



引用格式:张文叶,吴庆伟,吴刚,等. 氨基酸种类与添加量对山楂酒中主要高级醇生成量的影响[J]. 轻工学报,2017,32(3):1-7.

中图分类号:TS261 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.001

文章编号:2096-1553(2017)03-0001-07

氨基酸种类与添加量对山楂酒中主要高级醇生成量的影响

Effects of amino acid variety and addition amount on the formation of main higher alcohols in hawthorn wine

张文叶,吴庆伟,吴刚,赵凡

ZHANG Wen-ye, WU Qing-wei, WU Gang, ZHAO Fan

郑州轻工业学院 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001

College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

关键词:

氨基酸;山楂酒;高级醇;风味物质

Key words:

amino acid; hawthorn wine; higher alcohol; flavor compound

摘要:以辉县山楂为原料,通过向山楂发酵液中分别添加5种不同的氨基酸,研究氨基酸种类与添加量对山楂酒中主要风味物质高级醇生成量的影响.实验结果表明,除谷氨酸外,其他4种氨基酸均影响山楂酒中高级醇的生成.其中,甘氨酸作为合成异戊醇的前体物质,能使山楂酒中异戊醇含量升高;而缬氨酸、苯丙氨酸和亮氨酸在山楂酒中进一步分解代谢,生成更多的异丁醇、苯乙醇和异戊醇.

收稿日期:2017-03-23

基金项目:河南省科技攻关项目(142102110061);郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(2015029);食品生产与安全河南省协同创新中心研究生科技创新基金项目;郑州轻工业学院大学生创新实验项目

作者简介:张文叶(1965—),女,河南省辉县市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为食品生物技术.

Abstract: The study aimed to explore the effects of amino acid variety and addition amount on the formation of the main flavor compound higher alcohols in hawthorn wine by using Huixian hawthorn as raw material and adding five amino acids into fermentation broth of hawthorn. The results showed that the other four amino acids exerted obvious influences on the generation of higher alcohols in hawthorn wine except glutamate. In that, glycine, as the precursor for the synthesis of phenethyl, led to the increase of phenethyl content in hawthorn wine. Whereas, the addition of valine, phenylalanine and leucine promoted the increase of isobutanol, phenethyl and isopentanol alcohol in hawthorn wine, respectively.

0 引言

山楂又名山里果、山里红,为蔷薇科山楂属。山楂果实含有多种营养成分,是有名的药食同源水果。山楂酒是以山楂果为主要原料,经过发酵工艺酿造而成的,酒质温和爽口、果香浓郁,基本保持了山楂果实中的营养成分,是一种天然健康的生物饮品^[1-3]。

高级醇是包含3个以上碳的一元醇类物质的总称,能与酒中的其他物质一起构成酒体的主要风味物质^[4-6]。高级醇溶于酒精而不溶于水,低浓度时似油状,故又称为杂醇油,在酒精工业中被视为杂质^[7-8]。酒中含高级醇过量,能使人神经系统充血,引发头疼等反应,并且其毒性随着含量的加大而加剧,因此高级醇的含量直接影响酒的品质^[9-12]。不同发酵条件对高级醇生成量的影响不同,研究发现,与不锈钢桶相比,橡木桶存储的果酒高级醇生成量增加550 $\mu\text{g/L}$,分析其原因可能是木桶中含有 α -氨基酸^[13-15]。宫振英^[16]发现,向苹果酒中添加 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$,随着其添加量的增加,高级醇的生成量出现了先减小后增大的趋势。张斌等^[17]研究发现,荔枝汁发酵时,向其中添加60 mg/L 谷氨酸或精氨酸,能明显提高发酵速率,促进酵母生长,提高酒精得率,但该研究未涉及氨基酸组成对高级醇生成量影响。鉴于此,本实验通过分别向山楂发酵液中添加甘氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸和谷氨酸5种氨基酸,分析其对山楂酒中异丁醇、异戊醇和苯乙醇这3种主要高级醇生成量的影响,以期通过工艺优化调控

发酵酒中高级醇生成量的研究提供理论依据。

1 材料与方法

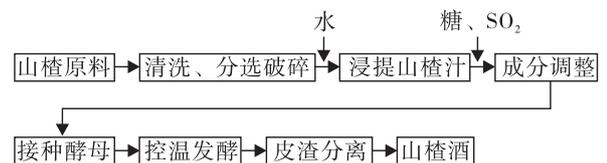
1.1 材料与仪器

材料:山楂,购自河南省辉县市上八里村;安琪酿酒耐高温活性干酵母,购自湖北省宜昌市安琪酵母股份有限公司;甘氨酸(AR)、缬氨酸(AR)、苯丙氨酸(AR)、亮氨酸(AR)、谷氨酸(AR)、异丁醇(AR)、异戊醇(AR)、苯乙醇(色谱纯)、无水乙醇(色谱纯)、二氯甲烷(色谱纯),购自天津市科密欧化学试剂有限公司。

仪器:SHP-250智能生化培养箱,上海鸿都科技有限公司产;7820气相色谱仪,美国Agilent公司产。

1.2 实验方法

1.2.1 山楂发酵工艺流程



工艺要点:按 $m(\text{原料}) : m(\text{水}) = 1 : 4$ 配比,加热煮沸15 min,室温冷却3 h,糖分调整为170 g/L ,按接种量0.6 g/L 进行接种,保持在22~23 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行发酵。

1.2.2 气相色谱测定山楂酒中3种高级醇的方法 标准溶液的配制:分别称取0.5000 g异丁醇、异戊醇、苯乙醇于100 mL容量瓶中,用无水乙醇定容,得到高级醇标准储备液。再用无水乙醇稀释标准储备液,配制成浓度分别为0.020 mg/mL , 0.060 mg/mL , 0.100 mg/mL ,

0.140 mg/mL, 0.200 mg/mL, 0.400 mg/mL 的高级醇标准溶液。

气相色谱条件:选用 HP-INNOWAX 毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)对异丁醇、异戊醇和苯乙醇标准品进行分离,色谱条件:进样口温度为 220 °C,检测器温度为 280 °C,分流比为 20 : 1,进样量为 1 μL,载气为 He(纯度 99.999%)。色谱柱升温程序:初始温度 45 °C,保持 2 min,以 3 °C/min 升至 80 °C,再以 10 °C/min 升至 220 °C,保持 5 min,然后升温至 240 °C,保持 5 min^[18]。

高级醇生成量计算:将不同浓度梯度的高级醇标准品上样分析,以峰面积/10⁷ 为横坐标,质量浓度为纵坐标作标准曲线。山楂酒样品经 0.45 μm 滤膜过滤后直接上样分析,计算出峰面积/10⁷,代入标准曲线方程即可得到样品中 3 种主要高级醇生成量。

1.2.3 氨基酸种类对山楂酒中 3 种高级醇生成量影响的分析方法 在 1.2.1 中成分调整阶段分别添加 0.15 g/L 亮氨酸、甘氨酸、缬氨酸、谷氨酸和苯丙氨酸于发酵液中,以不添加氨基酸为对照,发酵过程中每 4 d 测定 1 次高级醇生成量,选出对其有显著影响的氨基酸。

1.2.4 氨基酸添加量对山楂酒中 3 种高级醇生成量影响的分析方法 将对高级醇生成量有显著影响的氨基酸,按照 0 g/L, 0.1 g/L,

0.2 g/L, 0.3 g/L, 0.4 g/L, 0.5 g/L 的添加量加入山楂发酵液,就氨基酸添加量对山楂酒中主要高级醇生成量的影响进行定量分析。

1.3 统计方法

测定结果采用 Origin Pro 7.0 进行处理。

2 结果与分析

2.1 3 种高级醇标准品的气相色谱图线性分析结果

图 1 为 3 种高级醇标准品的气相色谱图。由图 1 可以看出,本实验应用的气相色谱方法对异丁醇、异戊醇、苯乙醇 3 种主要高级醇能够实现较好的分离。3 种高级醇标准品线性分析结果见表 1。由表 1 可知,异丁醇、异戊醇、苯乙醇之间的相关系数均在 0.994 以上,表明 3 种高级醇的质量浓度与相应的峰面积/10⁷ 呈良好的线性关系。因此,该方法能够应用于山楂酒样品中 3 种高级醇生成量的定量和定性检测。

2.2 氨基酸种类对山楂酒中 3 种高级醇生成量的影响

2.2.1 氨基酸种类对山楂酒中异丁醇生成量的影响 图 2 为氨基酸种类对山楂酒中异丁醇生成量的影响。由图 2 可知,在发酵前期(0 ~ 4 d)阶段,6 组发酵液中异丁醇含量均急剧上升,其原因是发酵前期酵母生长繁殖迅速,分解与合成代谢活动旺盛。随着发酵时间进一步延长(4 ~ 20 d),异丁醇生成速度逐渐减慢,由此可

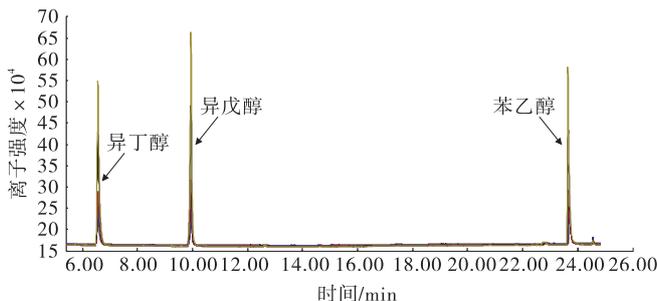


图 1 3 种高级醇标准品的气相色谱图

Fig. 1 Gas chromatograph map of three higher alcohols standards

知,异丁醇主要在发酵前期随着酵母的生长繁殖而生成^[19]. 添加甘氨酸和缬氨酸的实验组中,异丁醇含量与对照组相比,分别上升了32.28%和70.12%,而添加另外3种氨基酸的实验组中异丁醇生成量与对照组相比变化不大,主要是因为甘氨酸被酵母利用作为合成异丁醇的前体物质,而缬氨酸的添加则促进了其本身的分解代谢,经转氨脱羧生成异丁醇.

2.2.2 氨基酸种类对山楂酒中异戊醇生成量的影响 图3为氨基酸种类对山楂酒中异戊醇生成量的影响. 由图3可知,随发酵时间的延长,异戊醇含量不断上升,发酵结束时,添加甘氨酸和亮氨酸的实验组与对照组相比,异戊醇含量分别上升了37.17%和46.12%,而添加缬氨酸、苯丙氨酸和谷氨酸的实验组中异戊醇含量无明显变化. 由此可知,发酵液中添加甘氨酸和亮氨酸对异戊醇的生成有显著促进作用.

表1 3种高级醇标准线性分析结果

Table 1 Linear analysis results of three higher alcohols standards

成分	回归方程	相关系数 R^2	线性范围/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
异丁醇	$y = 0.009x + 0.020$	0.996	20 ~ 600
异戊醇	$y = 0.012x + 0.030$	0.994	20 ~ 600
苯乙醇	$y = 0.008x + 0.008$	0.999	20 ~ 600

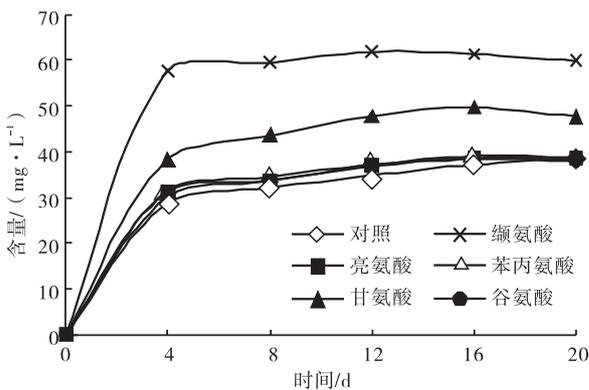


图2 氨基酸种类对山楂酒中异丁醇生成量的影响
Fig.2 Effects of different amino acids on the formation of isobutanol in hawthorn wine

2.2.3 氨基酸种类对山楂酒中苯乙醇生成量的影响 图4为氨基酸种类对山楂酒中苯乙醇生成量的影响. 由图4可知,在发酵前期(0~4 d)添加苯丙氨酸的实验组中苯乙醇生成量迅速上升,在之后的4~20 d发酵阶段,苯乙醇生成量的上升幅度趋于平缓. 而其他实验组和对照组中苯乙醇生成量在整个发酵阶段均上升缓慢,并且随发酵进行苯乙醇生成速率不断降低. 发酵结束时,添加苯丙氨酸的实验组中苯乙醇生成量是对照组的3.83倍,而添加亮氨酸、甘氨酸、缬氨酸和谷氨酸的实验组与对照相比,苯乙醇生成量无明显变化. 由此可知,发酵液中添加苯丙氨酸能明显提高山楂酒中苯乙醇生成量.

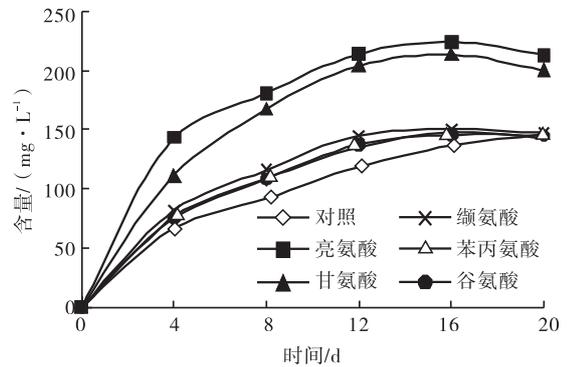


图3 氨基酸种类对山楂酒中异戊醇生成量的影响
Fig.3 Effects of different amino acids on the formation of isopentanol in hawthorn wine

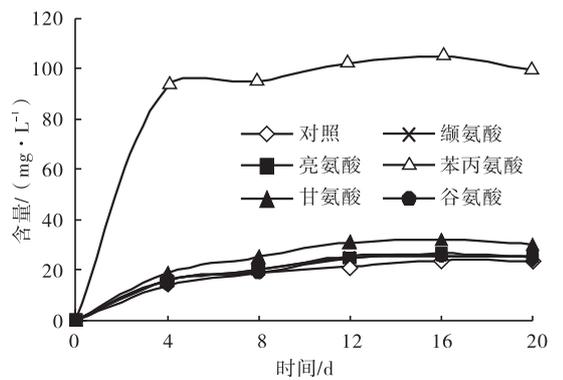


图4 氨基酸种类对山楂酒中苯乙醇生成量的影响
Fig.4 Effects of different amino acids on the formation of phenethyl alcohol in hawthorn wine

2.3 氨基酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

2.3.1 甘氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

图5为甘氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响.由图5可知,随着甘氨酸添加量的增加,异丁醇、异戊醇和苯乙醇含量均不断增加,但不同的甘氨酸添加量对异戊醇含量影响最为明显,而对异丁醇和苯乙醇含量的影响较小.其原因是甘氨酸作为合成异戊醇的前体物质,其添加促进了异戊醇含量升高.

2.3.2 缬氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

图6为缬氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响.由图6可知,随着

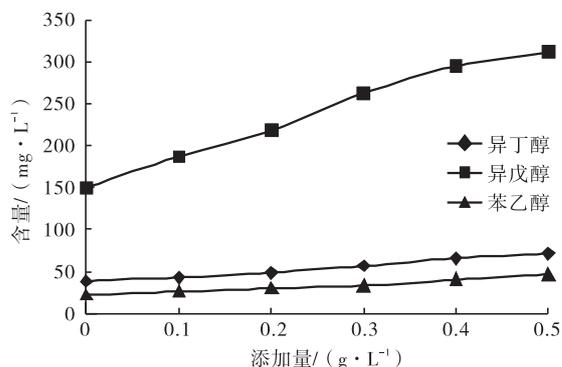


图5 甘氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

Fig. 5 Effects of addition amount of glycine on the content of three higher alcohols in hawthorn wine

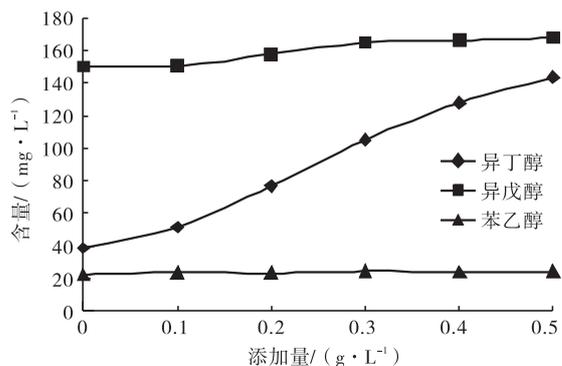


图6 缬氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

Fig. 6 Effects of addition amount of valine on the content of three higher alcohols in hawthorn wine

缬氨酸添加量的增大,3种高级醇呈现不同的变化趋势:异丁醇含量不断增大,在添加0.5 g/L缬氨酸时,异丁醇含量可达143.67 mg/L;异戊醇含量整体略有增加,在添加0.3 g/L缬氨酸后有所上升,之后没有明显变化;缬氨酸添加量对苯乙醇含量没有明显的影响.综上可知,添加缬氨酸对山楂酒中3种高级醇生成量的影响主要表现在异丁醇上,这与甄会英^[20]的分析结果一致.其原因是缬氨酸添加量的不断增大促进了自身的分解代谢,从而使异丁醇含量不断增大.

2.3.3 苯丙氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

图7为苯丙氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响.由图7可知,苯丙氨酸添加量对苯乙醇含量的影响最显著,当苯丙氨酸添加量分别为0.1 g/L,0.2 g/L,0.3 g/L,0.4 g/L,0.5 g/L时,苯乙醇的含量分别为对照组的3.58倍、5.53倍、7.24倍、9.18倍、10.86倍.这表明,苯丙氨酸的添加促进了自身的分解代谢,添加量越大越能分解生成更多的苯乙醇.苯丙氨酸添加量对异丁醇、异戊醇含量的影响不明显.

2.3.4 亮氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

图8为亮氨酸添加量对山楂酒

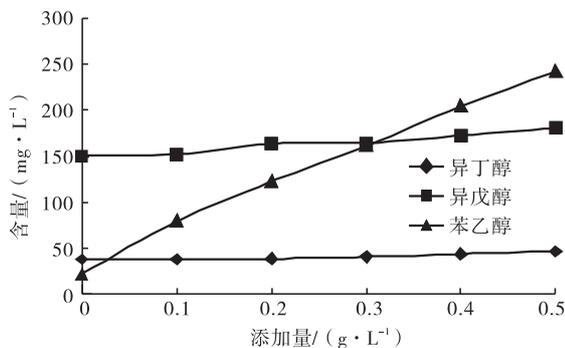


图7 苯丙氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

Fig. 7 Effects of addition amount of phenylalanine on the content of three higher alcohols in hawthorn wine

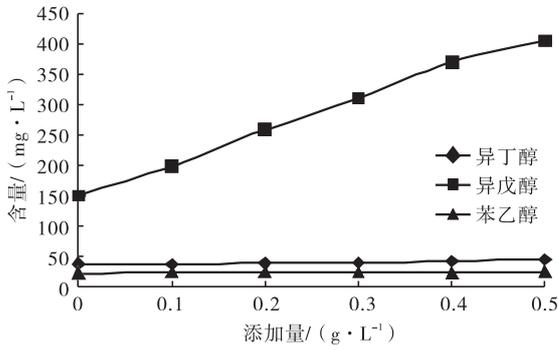


图8 亮氨酸添加量对山楂酒中3种高级醇生成量的影响

Fig.8 Effects of addition amount of leucine on the content of three higher alcohols in hawthorn wine

中3种高级醇生成量的影响.由图8可知,随着亮氨酸添加量的增大,异戊醇生成量迅速增加,在添加量为0.5 g/L时,异戊醇生成量是对照组的2.69倍.而异丁醇和苯乙醇生成量随亮氨酸添加量的增大变化不明显.因此,添加亮氨酸对异戊醇生成量变化影响最大,原因是随着亮氨酸浓度升高,会反馈抑制其在合成途径的酶活性,降低高级醇在合成途径的生成量,但使分解途径的异戊醇生成量显著增加.这与张丹等^[21]就亮氨酸对固态发酵枣酒中高级醇生成量的影响的研究结论一致.

3 结论

以辉县山楂为原料,通过向山楂发酵液中分别添加5种不同的氨基酸,研究了氨基酸种类和添加量对山楂酒中异丁醇、异戊醇、苯乙醇3种高级醇生成量的影响.实验结果表明,甘氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸和亮氨酸的添加对3种高级醇生成量有显著影响:甘氨酸作为合成异戊醇的前体物质,其添加促进了异戊醇含量升高;缬氨酸、苯丙氨酸和亮氨酸在山楂酒中进一步分解代谢,生成了更多的异丁醇、苯乙醇和异戊醇,从而使山楂酒中3种高级醇生成量增加.谷氨酸对这3种高级醇的含量无明显影响.本研

究为今后在果酒发酵过程中,通过选育氨基酸缺陷型酵母调控果酒中高级醇生成量,以期生产出更高品质的酒类提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 刘武. 山楂的营养化学成分及保健作用[J]. 食品研究与开发,2002,23(5):65.
- [2] 周广麟,尹丽杰,闫辞,等. 山楂白兰地的酿造及检测[J]. 中国酿造,2011,30(8):150.
- [3] 韩翠萍. 山楂的营养成分及其加工性能[J]. 农产品加工,2010(4):28.
- [4] 李先奇. 刺葡萄酒生产中高级醇的调控及其脱出技术的研究[D]. 武汉:湖北农业大学,2012.
- [5] 罗惠波,苟云凌,叶光斌,等. 影响白酒中高级醇生成的工艺条件研究[J]. 中国酿造,2011,30(8):87.
- [6] 曾曹珍,张永茂,康三江,等. 发酵酒中高级醇的研究进展[J]. 中国酿造,2015,34(5):11.
- [7] 秦伟帅. 影响葡萄酒酿造过程中高级醇形成的因素分析[D]. 济南:山东轻工业学院,2010.
- [8] VIDAL E E, DE BILLERBECK G M, SIMOES D A, et al. Influence of nitrogen supply on the production of higher alcohols/esters and expression of flavour-related genes in cachaca fermentation[J]. Food Chemistry,2013,138(1):701.
- [9] 武宝忠,申华. 浅析啤酒发酵过程中高级醇的产生及控制措施[J]. 酿酒,2003(5):66.
- [10] 童永鑫,李玲,杨文字,等. 气相色谱法测定石榴葡萄酒中的甲醇和杂醇油[J]. 2013,32(3):142.
- [11] 田小菊,张宝善,张百刚. 影响石榴酒中甲醇和杂醇油生成量的几个工艺因素[J]. 安徽农业科学,2009,37(33):16705.
- [12] 林玲,王丽,张兴亚,等. 气相色谱法测定黄酒中的高级醇[J]. 中国酿造,2011,30(5):170.
- [13] MARIATERESA L, SANDRA P, MATTEOALE-

- SANDRO D N, et al. Aroma quality improvement of Chardonnay white wine by fermentation and ageing in barrique on less [J]. *Food Research International*, 2010, 43(4):996.
- [14] TOEEEA D, FRAILE P, GARDE T, et al. Production of volatile compounds in the fermentation of Chardonnay musts inoculated with two strains of *Saccharomyces cerevisiae* with different nitrogen demands [J]. *Food Control*, 2003, 14(8):565.
- [15] GONZALEZ-MARCO A, JIMENEZ-MORENO N, ANCIN-AZPILICUETA C. Concentration of volatile compounds in Chardonnay wine fermented in stain less steel tanks and oak barrels [J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(1):213.
- [16] 官振英. 苹果酒酿造过程中高级醇的控制 [D]. 保定:河北农业大学, 2003.
- [17] 张斌, 曾新安, 陈勇, 等. 添加复合氨基酸对荔枝酒发酵进程的影响 [J]. *酿酒科技*, 2008(3):23.
- [18] LEE P R, ONG Y L, YU B, et al. Profile of volatile compounds during papaya juice fermentation by a mixed culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Williopsis saturnus* [J]. *Food Microbiology*, 2010, 27(7):853.
- [19] 孙金旭, 朱会霞, 杨晓红, 等. 酵母添加量对酱香型白酒中杂油醇的影响 [J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(12):67.
- [20] 甄会英. 葡萄酒中高级醇的测定方法与调控技术研究 [D]. 保定:河北农业大学, 2005.
- [21] 张丹, 锁然, 范立欣, 等. 可同化氮素对固态发酵枣酒高级醇的影响 [J]. *酿酒科技*, 2013(11):15.



引用格式:白艳红,韩雪,李可,等.市售酱卤鸡腿老汤中杂环胺含量的检测与分析[J].轻工学报,2017,32(3):8-13.

中图分类号:TS251.6⁺1 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.002

文章编号:2096-1553(2017)03-0008-06

市售酱卤鸡腿老汤中杂环胺含量的检测与分析

Detection and analysis of heterocyclic aromatic amines in halogen soups of market-derived stewed chicken legs

白艳红,韩雪,李可,栗俊广,谢美娟,赵电波,张华

BAI Yan-hong, HAN Xue, LI Ke, LI Jun-guang, XIE Mei-Juan, ZHAO Dian-bo, ZHANG Hua

郑州轻工业学院 食品与生物工程学院/食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001

College of Food and Bioengineering/He'nan Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

关键词:

酱卤鸡腿老汤;杂环胺;超高效液相色谱串联质谱

Key words:

halogen soups of stewed chicken leg; heterocyclic aromatic amines; UPLC-MS/MS

摘要:采用超高效液相色谱串联质谱法、分两个批次对随机抽取的农贸市场3家个人摊点酱卤鸡腿老汤中10种杂环胺含量进行检测与分析.结果表明,酱卤鸡腿老汤中杂环胺总含量最高可达35.626 ng/g,共检出8种杂环胺,其中Harman和Norharman在3家老汤中均被检出,其含量占杂环胺总含量的41%~77%.鉴于此,建议生产方严格控制卤煮工艺,减少老汤使用次数.

收稿日期:2017-02-17

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD040040304);河南省高校科技创新人才支持计划项目(15HASTIT033);郑州轻工业学院博士启动科研基金项目(2015BSJJ038);食品生产与安全河南省协同创新中心研究生科技创新基金项目(FCICY201615,FCICY201618)

作者简介:白艳红(1975—),女,辽宁省彰武县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为畜产品加工与质量控制.

Abstract: Aimed to evaluate the contents of 10 heterocyclic aromatic amines (HAs) in two batches of halogen soups of stewed chicken legs randomly selected from three individual market stalls by using ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). The results showed that the total contents of detected 8 HAs in halogen soups of stewed chicken legs from three individual market stalls reached 35.626 ng/g. In that, both Harman and Norharman accounted for 41% ~77% of the total HAs. Thus, it was imperative to recommend the producers to strictly control the stewing process and reduce the recycle numbers of halogen soups.

0 引言

酱卤鸡肉制品是我国特有的传统肉制品之一。千百年来,我国不同地区根据各地饮食习惯形成了独具地方特色的传统酱卤制品,深受广大消费者喜爱。酱卤肉制品是在水中加入食盐、酱油等调味料和香辛料,经煮制而成的熟肉制品^[1],其主要特点是老汤在卤煮过程中赋予产品以鲜艳的色泽、独特的风味和良好的口感。老汤是指经过多次(一般认为至少15次)反复煮制的卤水,生产时常被反复使用。但由于长时间高温卤煮加工,且生产者对酱卤关键技术的掌控程度不够,老汤中很可能会产生杂环胺,使得酱卤肉制品存在一定的安全隐患。

流行病学研究表明,直肠癌、胃肠道癌和前列腺癌等疾病与过量食用经高温或长时间熟制的肉制品中含有的杂环胺有一定的关系。因此,肉制品加工过程中杂环胺的生成逐渐成为肉品加工与质量控制的研究热点。目前,国外研究主要集中在油炸和烤制工艺对肉制品中杂环胺生成的影响^[2-5],国内则主要研究传统肉制品中杂环胺的含量,且多集中于禽肉和牛肉制品^[6-7]。相关研究表明,肉制品中检测出含量最多的是 Harman 和 Norharman 两种杂环胺,并且在低温和高温条件下均易生成^[8-9],而关于老汤中杂环胺的种类和含量研究尚缺乏相关报道。鉴于此,本文拟采用超高效液相色谱串联质谱方法(UPLC-MS/MS)对市售酱卤鸡腿老汤中的杂环胺含量进行抽样检测,分析酱卤老汤中杂环胺的组成特点,旨在了解市售酱卤鸡腿的

安全性,给消费者安全食用提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

样品采集: 酱卤鸡腿老汤,采集于河南省郑州市某农贸市场,随机选择3家摊点(编号A, B, C),分两批进行采集(第一批和第二批相差1个月)。每家摊点每一批次分别在4个不同时间点各采集50 mL老汤,混合均匀(200 mL)。随后在无菌操作台上平均分装成5份,分别储存在60 mL带盖磨口瓶内。3家摊点、两个批次样品共计30瓶,于-18℃下贮存待测。

试剂: 10种杂环胺标准品,分别为 Harman(1-甲基-9H-吡啶并[3,4-b]吡啶)、Norharman(9H-吡啶并[3,4-b]吡啶)、PhIP(2-氨基-1-甲基-6-苯基咪唑并[4,5-b]吡啶)、Trp-P-1(3-氨基-1,4-二甲基-5H-吡啶并[4,3-b]吡啶)、Trp-P-2(3-氨基-1-甲基-5H-吡啶并[4,3-b]吡啶)、IQ(2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-f]喹啉)、MeIQx(2-氨基-3,8-二甲基咪唑并[4,5-f]喹啉)、4,8-DiMeIQx(2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑并[4,5-f]喹啉)、AαC(2-amino-9H-pyrido[2,3-b]indole 2-氨基-9H-吡啶并[2,3-b]吡啶)、MeAαC(2-氨基-3-甲基-9H-吡啶并[2,3-b]吡啶),纯度均大于96%,购自加拿大 Toronto Research Chemicals 公司;硅藻土,购自天津市科密欧化学试剂有限公司;Oasis MCX 混合阳离子交换小柱(3 mL/60 mg),购自美国 Waters 公司;乙酸乙酯、甲

醇、乙腈、甲酸、冰醋酸,均为色谱纯,购自北京 DIKMA 公司;其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

Agilent 1290 超高效液相色谱仪(配备 Thermo LTQ XL 质谱检测器),美国 Agilent 公司产;12 管固相萃取装置,日本岛津公司产;N150-2 氮吹仪,上海博翔仪器设备公司产;YQD-09 氮气减压装置,青岛华青仪表有限公司产;SB-4200-DT 超声波清洗机,宁波新芝生物科技有限公司产;AB265-S 电子天平,瑞士梅特勒公司产;JA3003N 型电子天平,上海菁海仪器设备有限公司产;Milli-Q 超纯水器,美国 Millipore 公司产;HC-3618 高速冷冻离心机,安徽中科中佳仪器有限公司产。

1.3 实验方法

1.3.1 杂环胺的提取

参照文献[10]杂环胺提取方法,稍作修改。准确称取 3.0 g 卤汤,将其加入 30 mL 1 mol/L NaOH 溶液中,磁力搅拌 1 min,加入 15 g 硅藻土,混合均匀。然后用 30 mL 乙酸乙酯超声波提取 50 min,重复提取两次,置于 78.5 N 离心力下离心 10 min,合并上清液。上样前预先用 5 mL 甲醇活化混合阳离子交换小柱,待样品全部通过固相萃取小柱后,分别用 3 mL 乙酸乙酯、6 mL 0.1 mol/L HCl 淋洗,流速控制在 1.0~1.5 mL/min,抽干。最后用 6 mL 甲醇/氨水($V(\text{甲醇}):V(\text{氨水})=19:1$)洗脱。洗脱液经氮吹仪在 50 °C 条件下吹干后,用 500 μL 甲醇复溶,过 0.45 μm 滤膜,对滤液进行 UPLC-MS/MS 分析。

1.3.2 UPLC-MS/MS 检测条件

Agilent EclipsePlusC18 色谱柱(2.1 mm \times 150 mm, 1.8 μm),柱温 30 °C,流动相 A 为 25 mmol/L 甲酸水溶液,流动相 B 为乙腈。

梯度洗脱程序:0~18 min,B 由 10% 上升至 30%;18~20 min,B 由 30% 上升至 100%,保持 3 min;23~25 min,B 由 100% 下降至 10%,保持 1 min。进样量为 5 μL ,流速为 0.3 mL/min。

质谱条件:离子源为电喷雾离子源(ESI);扫描方式为正离子扫描;检测方式为多反应监测(SRM)扫描模式;离子喷雾电压为 3.5 kV,毛细管温度为 300 °C,毛细管电压为 12 V,鞘气体(N_2)流速为 30 arb,辅助气体(N_2)流速为 5 arb。

1.4 样品中杂环胺含量的计算

试样中杂环胺的测定值 $\omega/(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})$ 计算公式为

$$\omega = \frac{C_0 \times V \times A}{mA_0}$$

式中, C_0 表示标准溶液的质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$, V 表示试样定容体积/L, A 表示样品溶液峰面积, m 表示所取老汤样品的质量/g, A_0 表示标准溶液峰面积。

1.5 数据处理

用 SPSS 16.0 进行数据统计分析,采用单因素方差分析和 Dunnett 法多重比较进行统计学差异检验,统计结果表示为 $\text{mean} \pm \text{SD}$,显著性水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 10 种杂环胺的提取离子流色谱图

由于 10 种杂环胺化合物化学特性差异性较大,采用等度洗脱难以在短时间内实现分离,故采取梯度洗脱。根据杂环胺的结构特性,选择正离子模式,在电喷雾条件下对浓度为 200 ng/mL 的单标准品进行二级质谱分析,得到各自碎片离子。每种化合物选择两个信号最强的特征碎片离子作为子离子,根据子离子和母离子确定色谱峰,10 种杂环胺提取离子流色谱图如图 1 所示。

由图 1 可知,10 种杂环胺化合物峰型均很尖锐,根据保留时间和 m/z 能够确定杂环胺化合物的色谱图,以满足阳性样品中杂环胺的定性、定量分析。

2.2 老汤样品中 10 种杂环胺含量的分析

3 家市售酱卤鸡腿不同批次的老汤样品中的杂环胺测定结果见表 1。由表 1 可知,在 3 家

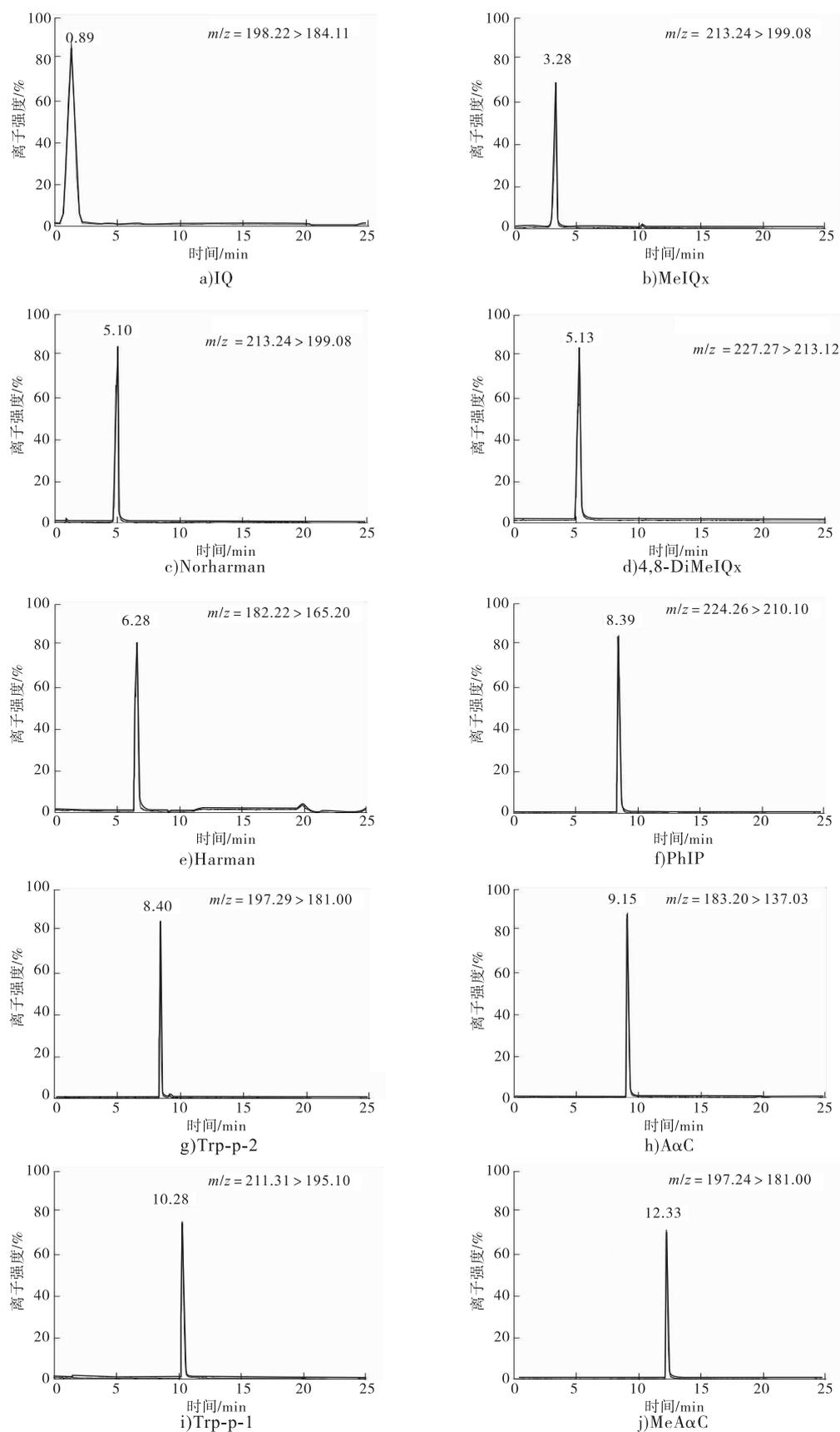


图1 10种杂环胺标准品的提取离子流色谱图

Fig. 1 Extraction ion chromatography of 10 HAs

卤汤中均检测到杂环胺,批次1和批次2中杂环胺含量分别为8.718~19.583 ng/g和19.657~35.626 ng/g. A家老汤共检测出7种杂环胺,批次2中杂环胺总含量是批次1的1.8倍.与批次1相比,批次2中Harman, IQ, Norharman, A α C, PhIP和Trp-p-2含量显著增加,特别是Norharman和Harman的含量均是批次1的1.6倍. B家老汤共检测到7种杂环胺,批次2中杂环胺总含量比批次1高16.677 ng/g. 批次2中Norharman, PhIP, MeIQx, Trp-p-2含量与批次1相比,呈现显著性增加($P < 0.05$). 而两批次的4,8-DiMeIQx差异不显著, IQ在批次1中未检出. C家老汤中共检测出4种杂环胺,批次2中杂环胺总含量比批次1中杂环胺总含量高10.939 ng/g. 其中,批次2中Harman, Norharman的含量分别是批次1的3.4倍和2.7倍.

综上可知, Harman和Norharman在3家店铺老汤中均被检出,在批次1中含量变化幅度分别为3.384~1.389 ng/g和3.823~7.361 ng/g,在批次2中变化幅度分别为4.720~5.815 ng/g和9.196~19.936 ng/g,两种杂环胺含量占杂环胺总含量的41%~77%.

这与A. Szterk研究结果基本一致^[11].

此外,由3家摊点老汤样品中杂环胺总含量结果可以看出,批次2检测出的杂环胺种类和总含量高于批次1.根据调查获知,批次2老汤比批次1老汤多循环使用约30次,这说明老汤使用循环次数增加,杂环胺含量也随之增加,其安全隐患也进一步加大.值得注意的是,本实验对3家摊点的酱卤鸡腿老汤中杂环胺含量进行测定,发现所有样品均含有杂环胺,而且杂环胺总含量批次间差异较大,这很可能是农贸市场上的酱卤熟制工艺不稳定,或不能定期清理老汤中的杂质所导致.

3 结论

本文采用超高效液相色谱串联质谱法对3家市售酱卤鸡腿老汤的杂环胺含量进行分批检测.结果表明,在3家卤汤中均检测到杂环胺,共检出8种杂环胺,总含量最高可达35.626 ng/L.批次2老汤循环使用次数比批次1多近30次,所以其中杂环胺含量显著高于批次1中含量.

此外,在老汤中均检测出Harman和Nor-

表1 3家酱卤鸡腿老汤中杂环胺的含量

Table 1 Contents of HAs in Halogen soups from 3 individual market stalls

ng/g

杂环胺	老汤 A		老汤 B		老汤 C	
	批次 1	批次 2	批次 1	批次 2	批次 1	批次 2
IQ	2.354 ± 0.090 ^a	9.910 ± 0.030 ^b	ND	0.586 ± 0.030	1.348 ± 0.050 ^a	1.943 ± 0.070 ^b
MeIQx	ND	ND	0.726 ± 0.040 ^{a*}	1.318 ± 0.020 ^b	ND	ND
4,8-DiMeIQx	0.797 ± 0.050 [*]	0.970 ± 0.010 [*]	2.758 ± 0.080	2.863 ± 0.320	2.158 ± 0.060	2.537 ± 0.080
Harman	3.384 ± 0.150 ^a	5.492 ± 0.026 ^b	4.769 ± 0.150 ^a	5.815 ± 0.180 ^b	1.389 ± 0.100 ^a	4.720 ± 0.170 ^b
Norharman	5.914 ± 0.050 ^a	9.196 ± 0.160 ^b	7.361 ± 0.130 ^a	19.936 ± 0.270 ^b	3.823 ± 0.240 ^a	10.457 ± 0.360 ^b
A α C	0.478 ± 0.028 ^{*a}	0.657 ± 0.040 ^{*b}	ND	ND	ND	ND
Trp-p-1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PhIP	5.361 ± 0.140 ^a	7.937 ± 0.320 ^b	1.180 ± 0.030 ^a	2.674 ± 0.070 ^b	ND	ND
Trp-p-2	1.295 ± 0.070	1.464 ± 0.030	0.315 ± 0.010 ^{a*}	0.594 ± 0.010 ^{b*}	ND	ND
MeA α C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
总含量	19.583	35.626	17.109	33.786	8.718	19.657

注: *表示高于检出限而低于定量限; ND表示未检出; a, b在同一行中(同家老汤)字母不相同,则表示 $P < 0.05$ 差异显著; A, B, C代表不同的采样来源.

harman 两种杂环胺,占杂环胺总含量 41% ~ 77%。虽然国家对此并未规定安全范围,但是处于 ng 级别的 Harman 和 Norharman 已具有致癌性,危害不容忽视。

由此可知,农贸市场个人摊点的酱卤鸡腿安全性相对比较低,随着卤煮时间和次数的增加,杂环胺的含量也在增加。因此建议在酱卤肉制品加工中应科学地规范并严格控制卤煮工艺,同时减少老汤使用次数。

参考文献:

- [1] 唐春红,李海,李侠,等.反复卤煮对老汤品质的影响研究[J].现代食品科技,2015(5):187.
- [2] OZ F,ZIKIROV E. The effects of sous-vide cooking method on the formation of heterocyclic aromatic amines in beef chops[J]. LWT-Food Science and Technology,2015,64(1):120.
- [3] SKOG K,STEINECK G,AUGUSTSSON K,et al. Effect of cooking temperature on the formation of heterocyclic amines in fried meat products and pan residues[J]. Carcinogenesis,1995,16(4):861.
- [4] AASLYNG M D,DUEDAHL-OLESEN L,JENSEN K,et al. Content of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in pork,beef and chicken barbecued at home by Danish consumers[J]. Meat Science,2013,93(1):85.
- [5] DONG A,LEE J,SHIN H S. Formation of amino-imidazo-azaarenes and carbolines in fried beef patties and chicken breasts under different cooking conditions in Korea[J]. Food Science and Biotechnology,2011,20(3):735.
- [6] 邵斌,彭增起,杨洪生,等.固相萃取-高效液相色谱法同时测定传统禽肉制品中的9种杂环胺类化合物[J].色谱,2011,29(8):755.
- [7] 万可慧,彭增起,邵斌,等.高效液相法测定牛肉干制品中10种杂环胺含量[J].色谱,2012,30(3):285.
- [8] 潘晗.酱肉中Norharman和Harman形成机理的研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [9] ARVIDSSON P,BOEKEL M,SKOG K,et al. Kinetics of formation of polar heterocyclic amines in a meat model system[J]. Journal of Food Science,1997,62(5):911.
- [10] 曾茂茂,李洋,何志勇,等.液相色谱-质谱联用法结合主成分分析考察食品中前体物质对HAAs生成的影响[J].分析化学,2015,42(1):71.
- [11] SZTERK A. Heterocyclic aromatic amines in grilled beef: The influence of free amino acids, nitrogenous bases, nucleosides, protein and glucose on HAAs content [J]. Journal of Food Composition and Analysis,2015,40:39.



引用格式:弓丽华,李万鹏,郭良起,等. Oasis MCX 固相萃取柱结合内标法高效检测羊肉中瘦肉精残留量的方法研究[J]. 轻工学报,2017,32(3):14-20.

中图分类号:TS251 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.003

文章编号:2096-1553(2017)03-0014-07

Oasis MCX 固相萃取柱结合内标法高效检测羊肉瘦肉精残留量的方法研究

Study on the efficient determination of clenbuterol in lamb by using Oasis MCX SPE column combined internal standard method

弓丽华¹,李万鹏¹,郭良起¹,曲良苗¹,师敬敬¹,单素敏¹,
马伟伟²,张永辉²

GONG Li-hua¹,LI Wan-peng¹,GUO Liang-qi¹,QU Liang-miao¹,SHI Jing-jing¹,
SHAN Su-min¹,MA Wei-wei²,ZHANG Yong-hui²

1. 河南广电计量检测有限公司 食品实验室,河南 郑州 450001;

2. 郑州轻工业学院 材料与化学工程学院,河南 郑州 450001

1. Food Laboratory, He'nan GRG Metrology & Test Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

关键词:

羊肉; 瘦肉精; Oasis MCX 固相萃取柱; 内标法

Key words:

lamb; clenbuterol; Oasis MCX SPE column; internal standard method

摘要:在以乙腈-0.1%甲酸溶液为流动相、5%氯化甲醇为洗脱剂、梯度洗脱、HPLC-MS/MS电喷雾正离子、多反应监测模式的检测条件下,利用高效液相色谱串联三重四级杆质谱仪,研究了 Oasis MCX 固相萃取柱结合内标法检测羊肉中克伦特罗(俗称瘦肉精)残留量的方法.结果表明,克伦特罗残留量在线性范围 0.050~5.000 ng/mL 内均具有良好的检出率,相关系数为 0.997 8,加标回收率为 98%~102%,相对标准偏差为 2.09%.该方法灵敏度高,检测结果准确度高,适用于羊肉中克伦特罗残留的定量检测,对其他肉质中克伦特罗的检测也具有一定的参考价值.

收稿日期:2017-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(21301158);国家大学生创新创业训练项目(201510462065)

作者简介:弓丽华(1987—),女,河南省开封市人,河南广电计量检测有限公司助理工程师,主要研究方向为食品分析检测.

通信作者:张永辉(1981—),男,河南省宝丰县人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为应用化学和功能纳米材料.

Abstract: The study aimed to establish the detection method of clenbuterol in lamb by using Oasis MCX SPE column combined internal standard method. The separation was performed by using acetonitrile - 0.1% formic acid solution as mobile phase and 5% ammoniated methanol as eluent. The detection was conducted by using HPLC-ESI-MS/MS in positive ion and multiple reaction monitoring (MRM) modes. The results showed that this method possessed satisfactory detecting rate for clenbuterol ranging from 0.050 ng/mL to 5.000 ng/mL. The coefficient was 0.997 8, the recovery rate was 98% ~ 102%, and the relative standard deviation was 2.09%. With high sensitivity and accuracy, this method could be used for detecting the clenbuterol in lamb, and it also had certain guiding significance for quantitative analysis of clenbuterol in other meat products.

0 引言

克伦特罗 (clenbuterol), 俗称瘦肉精, 分子式为 $C_{12}H_{18}Cl_2N_2O$, 是一种平喘药, 属于 β -受体激动剂的一种, 在家畜和人体内吸收良好. 与其他 β -受体激动剂相比, 克伦特罗的生物利用度较高, 能提高牲畜生长速度, 增加瘦肉率, 表现为毛色光亮, 皮肤红润, 收腹, 卖相好; 屠宰后, 肉色鲜红, 脂肪层极薄, 往往是皮贴着瘦肉, 瘦肉丰满. 肥牲畜饲喂瘦肉精后, 逐渐出现四肢震颤无力, 心肌肥大, 心力衰竭等症状. 而患有高血压、心脏病的人食用含瘦肉精的猪肉和内脏, 可能加重病情, 甚至导致死亡. 自 2002 年 9 月 10 起, 在中国境内禁止在饲料和动物饮用水中使用瘦肉精^[1-2].

国内外关于猪肉中瘦肉精残留量的检测方法很多, 主要有色谱法、质谱法, 酶联免疫法^[1-11]等, 其中色谱法主要指高效液相色谱法, 质谱法包括气相色谱-质谱联用法^[9-10]、液相色谱-质谱联用法^[11]等. 高效液相色谱法灵敏度较低, 达不到克伦特罗残留量的检出限; 气相色谱-质谱联用法的前处理过程比较复杂, 降低了检测结果的可信度; 酶联免疫法存在假阳性的现象. 而液相色谱-质谱联用法则具有较高的灵敏度, 是定量检测 β -受体激动剂残留量常用的方法, 并经常用来作阳性样品筛选后的确证. 杨娟等^[12]利用 MCX 固相萃取-高效液相色谱-串联质谱技术, 建立了羊肉中克伦特罗、莱克多巴胺、沙丁胺醇 3 种 β -受体

激动剂的测定方法.

在农业部组织开展的农产品质量安全例行监测工作中, 在羊肉中也监测到了克伦特罗等 β -受体激动剂兽药残留. 但目前这类报道较少. 羊肉具有与猪肉相似的基质效应, 样品前处理过程对检测结果的影响比较大, 因此选择一种合适的前处理过程对确保检测结果的准确性至关重要.

鉴于此, 本文拟采用高效液相色谱串联三重四级杆质谱仪, 选用 Oasis MCX 固相萃取柱进行净化处理, 结合内标法, 测定羊肉中瘦肉精残留量^[13], 以期对肉品安全检测提供参考.

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

材料: 羊肉购自某超市, 经绞碎处理后备用; 乙腈、甲醇、甲酸, 均为色谱级, 上海安谱实验科技股份有限公司产; 乙酸铵、氨水 (质量分数 25% ~ 28%)、三氯甲烷, 均为分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司产; 盐酸 (质量分数 36% ~ 38%, 优级纯), 北京化工厂产; 盐酸克伦特罗标准物质 (CAS 号为 21898-19-1, 纯度 99.1%, 0.1 g, 不确定度 ± 0.5), 盐酸克伦特罗-D9 内标 (CAS 号为 184006-60-8, 纯度 99.99%, 10 mg, 不确定度 0.1), 有机相针式滤器 (尼龙) (规格 13 mm, 0.22 μ m), 上海安谱实验科技股份有限公司产.

仪器: Oasis MCX 固相萃取柱 (3 cc, 60 mg), Prime HLB 固相萃取柱 (6 cc, 200 mg),

Waters TQD 高效液相色谱 - 串联三重四级杆质谱仪配电喷雾离子源 (ESI), 美国 Waters 公司产; ME204E/02 分析天平, 上海梅特勒 - 托利多仪器有限公司产; CT14RD II 台式高速冷冻离心机, 上海天美生化仪器设备工程有限公司产; CNW 24 位固相萃取装置, GM - 1.0A 隔膜真空泵, 天津津腾实验设备有限公司产; Multi Reax 振荡器, 德国 Heidolph 公司产; DC - 24 24 位氮吹仪, 上海安谱实验科技股份有限公司产; AS 系列超声波清洗机, 天津奥特赛恩斯仪器有限公司产; Milli - Q Advantage A10 纯水机, 盐城方圆环保科技有限公司产。

1.2 方法

1.2.1 标准溶液配制 标准储备液: 准确称取一定量的标准物质, 用甲醇溶解分别配制成浓度为 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的克伦特罗和克伦特罗 - D9 内标标准储备液 10 mL, 置于 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 下避光保存。

中间储备液: 用甲醇分别稀释克伦特罗标准储备液至 1.00 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 和 100 ng/mL , 稀释克伦特罗 - D9 内标标准储备液至 50.0 ng/mL 。

其他溶液: 质量分数 0.1% 甲酸溶液; 0.01 mol/L 盐酸溶液; 质量分数 5% 氨化甲醇溶液。

1.2.2 色谱、质谱条件 色谱条件: 色谱柱选用 ACQUITY UPLC[®] HSS T₃ (1.8 μm , 2.1 mm \times 100 mm), 柱温 35 $^\circ\text{C}$; 流速 0.3 mL/min; 进样量 10 μL ; 流动相 A 选自质量分数 0.1% 甲酸溶液、水和 2 mmol/L 乙酸铵溶液, 流动相 B 选自乙腈、甲醇。采用梯度洗脱的方法进行分离, 梯度洗脱条件见表 1。

质谱条件: 采用电喷雾离子源、正离子扫描、多反应监测方式, 质谱参数为毛细管电压 3.5 kV, 去溶剂气温度 500 $^\circ\text{C}$, 去溶剂气流量 600 L/h, 锥孔气流量 20 L/h。克伦特罗的定性、定量离子对见表 2 (定性时, 相对离子丰度分别为 $>50\%$, 20% ~ 50%, 10% ~ 20%, $\leq 10\%$ 时,

表 1 梯度洗脱条件

Table 1 Conditions of gradient elution

时间/min	A 体积分数/%	B 体积分数/%
0.00	95	5
2.00	95	5
6.00	40	60
7.00	5	95
7.01	95	5
8.00	95	5

表 2 克伦特罗定性、定量离子对

Table 2 Qualitative and quantitative ion pair of clenbuterol

定量离子对 (m/z)	定性离子对 (m/z)	碰撞能量/V	锥孔电压/V
277.0/202.9	277.0/202.9	14	30
	277.0/131.9	28	30

允许的相对偏差分别为 $\pm 20\%$, $\pm 25\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$)。

1.2.3 目标物提取 1) 称取 2.00 g 制备好的羊肉样品于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL pH = 5.2 的乙酸铵溶液, 充分振荡 10 min, 超声 15 min 后再振荡 2 min, 在 4 $^\circ\text{C}$ 条件下以 8000 r/min 的速度离心 5 min, 取上清液于另一 50 mL 离心管中, 加入 5.0 mL 三氯甲烷 (除脂肪), 振荡 2 min, 在 4 $^\circ\text{C}$ 条件下以 8000 r/min 的速度离心 5 min, 取全部上清液 (1[#]) 过固相萃取柱净化。

2) 称取 2.50 g 制备好的羊肉样品于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL 质量分数 80% 乙腈水溶液, 充分振荡 10 min, 超声 15 min 后再振荡 2 min, 在 4 $^\circ\text{C}$ 条件下以 10 000 r/min 的速度离心 5 min, 取全部上清液 (2[#]) 过固相萃取柱净化。

1.2.4 样品萃取净化 Oasis MCX 固相萃取柱净化: 使用之前依次用 3.0 mL 甲醇、3.0 mL 水、3.0 mL 盐酸溶液活化, 然后将 1[#] 上清液加入固相萃取柱中, 流速保持在 0.5 mL/min, 依次用 3.0 mL 水、3.0 mL 质量分数 50% 甲醇淋

洗小柱, 弃去淋洗液, 真空抽干 2 min, 用 6.0 mL 洗脱液进行洗脱, 收集洗脱液, 并将洗脱液置于 45 °C 下氮气吹干, 加入 1.0 mL $V(\text{流动相 B}) : V(\text{流动相 A}) = 5 : 95$ 的溶液充分溶解残渣, 过 0.22 μm 有机滤膜后, 用高效液相色谱串联质谱仪进行测定。

Prime HLB 固相萃取柱净化: 使用之前无需活化, 直接将 2[#] 上清液加入固相萃取柱中, 流速保持在 0.5 mL/min, 收集全部淋洗液, 取出 4.0 mL 淋洗液置于 45 °C 下氮气吹至近干, 用 $V(\text{流动相 B}) : V(\text{流动相 A}) = 5 : 95$ 的溶液定容至 1.0 mL, 过 0.22 μm 有机滤膜后, 用高效液相色谱串联质谱仪进行测定。

2 结果与分析

2.1 流动相的确定

分别选用不同溶液作为流动相, 对 0.10 ng/mL 的克伦特罗标准溶液进行分离, 得到图 1 所示色谱图。由图 1 可知, 乙腈 - 0.1% 甲酸溶液作为流动相能够得到分离较好、峰型

较好、保留时间在 3.8 min 左右的色谱图, 而乙腈 - 水、乙腈 - 2 mmol/L 乙酸铵溶液作为流动相时没有得到相应的克伦特罗色谱峰图; 甲醇 - 0.1% 甲酸溶液作为流动相时能够得到保留时间在 4.3 min 左右的色谱峰, 同时在 6.0 min 左右发现了较大的干扰峰; 甲醇 - 水作为流动相时在 4.1 min 左右出现色谱峰, 峰型展宽并出现了分叉现象; 甲醇 - 2 mmol/L 乙酸铵溶液作为流动相时未得到克伦特罗色谱峰图。通过对比发现, 使用乙腈 - 0.1% 甲酸溶液梯度洗脱时, 克伦特罗的离子化效率最高, 色谱峰形最好, 响应值最高。因此, 决定选用乙腈为流动相 B, 0.1% 甲酸溶液为流动相 A。

2.2 洗脱剂的确定

针对 Oasis MCX 固相萃取柱, 选取合适的洗脱剂对试验结果的影响也至关重要。不同溶剂对目标物的洗脱能力不同, 分别选取常用的固相萃取柱洗脱剂甲醇、乙腈、5% 氨化甲醇、5% 氨化乙腈对克伦特罗进行洗脱, 发现 5% 氨化甲醇和 5% 氨化乙腈的洗脱能力较纯甲醇和

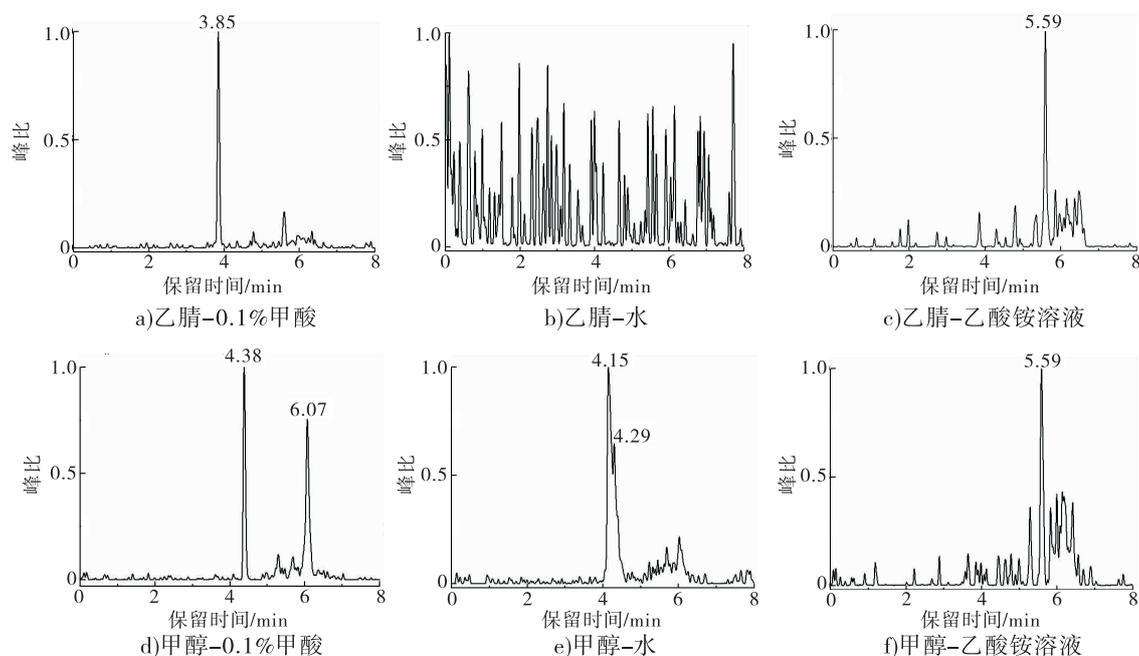


图 1 不同溶液作为流动相的 0.10 ng/mL 克伦特罗标准溶液色谱图

Fig. 1 Chromatograms of 0.10 ng/mL clenbuterol standard solution by using different solutions as mobile phases

纯乙腈的洗脱能力更好,而5%氨化甲醇和5%氨化乙腈的洗脱能力相近,考虑到甲醇比乙腈的毒性弱一些,价格也比较低廉,因此本试验选用5%氨化甲醇作为洗脱剂。

2.3 线性范围和检出限的确定

配制克伦特罗标品溶液浓度分别为0.015 ng/mL, 0.050 ng/mL, 0.100 ng/mL, 0.500 ng/mL, 1.000 ng/mL, 2.000 ng/mL, 5.000 ng/mL进行分析,得到线性回归方程为 $y = 6490.4x + 487.89$,相关系数 $R^2 = 0.9998$ 。

其中, x 为目标物的相对浓度, y 为对应的峰面积。在确定不含克伦特罗的阴性羊肉样品中添加回收,按照1.2.3试验方法1)对样品进行处理,分别以3倍和10倍的信噪比(S/N)计算得出克伦特罗检出限为0.015 ng/mL和0.050 ng/mL,保留时间均为3.68 min。图2为浓度0.050 ng/mL克伦特罗标准溶液色谱图,图3为阴性羊肉基质提取液的色谱图。从图2和图3可以看出,克伦特罗标准品在定量限0.050 ng/mL的出峰时间为3.68 min,同时在5~6 min之间存在一定的噪音信号,但两峰分离明显,对克伦特罗峰型并无明显的干扰。阴性羊肉基质提取液的色谱图只在5~6 min左右存在一定的噪音信号,无明显的克伦特罗色谱峰型。

2.4 Oasis MCX 和 Prime HLB 固相萃取柱的比较

使用1.2.3中两种试验方法,分别用Oasis

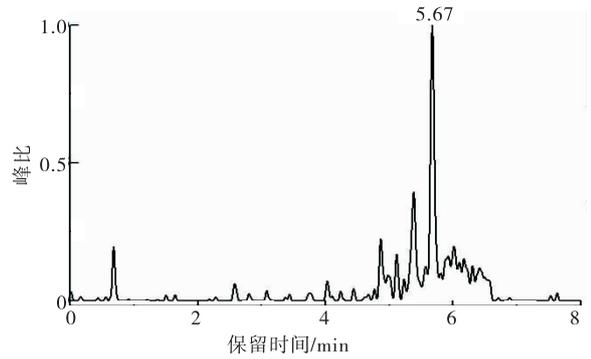


图3 阴性羊肉基质提取液的色谱图
Fig.3 Chromatogram of extract for negative lamb matrix

MCX 和 Prime HLB 固相萃取柱对加标样品进行前处理和分析测定。以阴性羊肉样品为空白基质,分别添加0.05 ng/mL, 0.25 ng/mL, 0.50 ng/mL 3个浓度水平的标准品,每个浓度水平进行3次测定,得到的回收率和相对标准偏差如表3和表4所示。

由表3和表4可知,标准品添加浓度越大,测定得到的结果相对标准偏差越小。在相同的添加浓度水平下,Oasis MCX 固相萃取柱处理后的样品回收率更高,为92.8%~108.0%,相对标准偏差更小,为1.52%~3.85%,因此,数据的准确性和重复性较好。其原因可能是,Oasis MCX 固相萃取柱处理样品的过程是吸附和解吸附的过程,目标性较强。而Prime HLB固相

表3 Oasis MCX 固相萃取柱处理后测定结果

Table 3 Determination results of Oasis MCX SPE column

添加量 /(ng · mL ⁻¹)	测定值 /(ng · mL ⁻¹)	回收率/%	相对标准 偏差/%
0.05	0.052	104.0	3.85
	0.050	100.0	
	0.054	108.0	
0.25	0.241	96.4	2.08
	0.232	92.8	
	0.240	96.0	
0.50	0.495	99.0	1.52
	0.510	102.0	
	0.500	100.0	

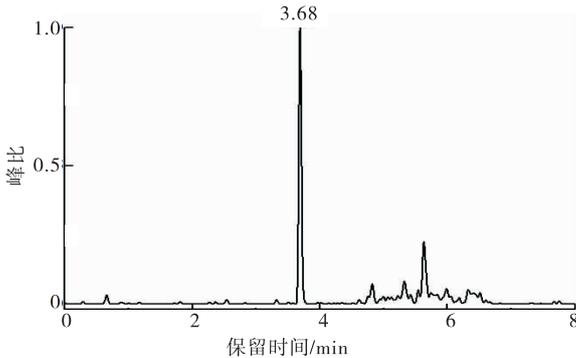


图2 0.050 ng/mL 克伦特罗标准溶液色谱图
Fig.2 Chromatogram of 0.050 ng/mL clenbuterol standard solution

表 4 Prime HLB 固相萃取柱处理后测定结果

Table 4 Determination results of Prime HLB SPE column

添加量 /(ng · mL ⁻¹)	测定值 /(ng · mL ⁻¹)	回收 率/%	相对标准 偏差/%
0.05	0.040	80.0	4.76
	0.044	88.0	
	0.042	84.0	
0.25	0.205	82.0	3.70
	0.215	86.0	
	0.200	80.0	
0.50	0.420	84.0	2.44
	0.400	80.0	
	0.410	82.0	

萃取柱的萃取模式是,样品溶液通过吸附剂时,主要干扰物被保留,目标物和部分杂质随溶剂流出,再加入适量溶剂将目标物完全洗出,该固相萃取柱在样品处理过程中仅起到了净化作用,可能会造成部分干扰物和目标物一同随溶剂流出,从而干扰目标物的测定,导致检测结果不够准确。

2.5 内标法和基质加标法的比较

选用 Oasis MCX 固相萃取柱,分别用内标法和基质加标法对同一个加标水平进行测定。

内标法:取克伦特罗中间储备液(1.00 μg/mL),克伦特罗-D9 内标中间储备液(50.0 ng/mL),以 V(乙腈):V(0.1% 甲酸溶液) = 5:95 的溶液为溶剂,分别配制 0.05 ng/mL, 0.10 ng/mL, 0.50 ng/mL, 1.00 ng/mL, 2.00 ng/mL 和 5.00 ng/mL 共 6 个浓度水平的标准溶液,每个浓度水平中内标

物的含量均为 2.50 ng/mL。以阴性羊肉样品为空白基质,添加 1.00 ng/mL 的标准溶液和 1.00 ng/mL 的内标物,分别做 3 个平行样品,采取 1.2.3 处理方法中的 1) 进行测定。

基质加标法:称取阴性羊肉样品 8 份,分别添加浓度水平为 0.05 ng/mL, 0.10 ng/mL, 0.50 ng/mL, 1.00 ng/mL, 2.00 ng/mL 和 5.00 ng/mL 的标准溶液,1 份阴性样品做空白,1 份阴性样品做加标回收,添加浓度水平为 1.00 ng/mL,分别做 3 个平行样品,采取 1.2.3 处理方法中的 1) 进行测定。

两种方法得到的检测结果如表 5 所示。由表 5 可知,在阴性样品中添加相同浓度水平的标准溶液,内标法定量得到的数据更加准确,回收率为 98% ~ 102%,相对标准偏差为 2.09%。而基质加标法定量得到的数据值均偏高,说明羊肉样品的基质效应比较明显,对准确定量造成了一定的正向影响。

2.6 Oasis MCX 固相萃取柱结合内标法检测验证

抽取市售羊肉 10 份,阴性羊肉加标样品 2 份,采用 Oasis MCX 固相萃取柱,内标法定量的方法进行前处理和检测分析,结果如表 6 所示(备注:N. D. 表示未检出)。由表 6 可知,市售的 10 份样品中均未检出克伦特罗残留量,加标样 1[#] 和 2[#] 的检测结果分别为 0.997 ng/kg 和 2.020 ng/kg,加标回收率均在 98% ~ 102% 范围内,说明此方法能够应用于市售羊肉中克伦

表 5 内标法和基质加标法测定检测结果

Table 5 Determination results of internal standard method and matrix-calibrated standard addition method

方法	线性方程	相关系数 R^2	加标量/(ng · mL ⁻¹)	回收率/%	相对标准偏差/%
内标法	$y = 11\,784.9x - 297.939$	0.997 8	1.020	102	2.09
			0.980	98	
			0.990	990	
基质加标法	$y = 330.449x + 81.329\,4$	0.999 9	1.100	110	4.56
			1.180	118	
			1.200	120	

表6 市售10份羊肉样品的克伦特罗检测结果

Table 6 Determination results of clenbuterol contents in market lamb samples

样品名称	保留时间/min	检测结果/(ng·kg ⁻¹)
1 [#]	3.80	N. D.
2 [#]	3.80	N. D.
3 [#]	3.80	N. D.
4 [#]	3.80	N. D.
5 [#]	3.80	N. D.
6 [#]	3.80	N. D.
7 [#]	3.80	N. D.
8 [#]	3.80	N. D.
9 [#]	3.80	N. D.
10 [#]	3.80	N. D.
加标回收1 [#] (1.0 ng/kg)	3.80	0.997
加标回收2 [#] (2.0 ng/kg)	3.80	2.020

特罗的检测。

3 结论

本文采用不同的样品前处理过程和高效液相色谱串联三重四级杆质谱仪,对羊肉中的克伦特罗残留量检测方法进行研究。结果表明,Oasis MCX 固相萃取柱的提取效率优于 Prime HLB 固相萃取柱,在以乙腈和-0.1%甲酸溶液为流动相、5%氨化甲醇为洗脱剂、梯度洗脱、HPLC-MS/MS 电喷雾正离子、多反应监测模式的检测条件下,克伦特罗在线性范围0.050~5.000 ng/mL 内均具有良好的检出率,相关系数为0.997 8,加标回收率为98%~102%,相对标准偏差为2.09%。可见,Oasis MCX 固相萃取柱检测限低、灵敏度高、回收率高、重现性好,与内标法相结合,能够实现羊肉中克伦特罗的准确检测,对于其他肉质中克伦特罗的检测也有参考价值。

参考文献:

[1] 汤轶伟,王硕,励建荣,等.β-兴奋剂盐酸克伦特罗残留检测方法最新研究进展[J].中国食品学报,2013,13(5):154.

[2] 王春民,张秋萍,吴春霞,等.动物性食品中4种β-兴奋剂的超高效液相色谱-串联质谱法测

定[J].中国卫生检验杂志,2016,26(21):3064.

[3] 黎娟,乔庆东,庄景新,等.改进的高效液相色谱-串联质谱方法同时测定动物性食品中4种β₂-受体激动剂残留[J].色谱,2016,34(2):170.

[4] 曲艺.猪肉中瘦肉精残留的危害及检测方法[J].现代畜牧科技,2016(7):178.

[5] 邸万山.高效液相色谱内标法测定动物饲料中盐酸克伦特罗[J].中国酿造,2016,35(6):170.

[6] 肖义坡,卢海艳,吕邵军,等.质谱快速分析猪肉中痕量沙丁胺醇及克伦特罗[J].分析化学,2016,44(11):1633.

[7] 陈曦,曹慧,徐斐,等.盐酸克伦特罗酶标抗原的制备及其ELISA检测[J].江苏农业学报,2013,29(2):458.

[8] ZHENG S L, SONG S Q, HUO L, et al. Newly combined method of molecularly imprinted solid-phase extraction with ELISA for rapid detection of clenbuterol in animal-tissue samples [J]. Analytical Letters, 2009, 42(3):600.

[9] 俞慧红. GC-MS 法测定动物组织中盐酸克伦特罗前处理方法的研究[J].安徽农业科学, 2016, 44(4):130.

[10] GARCIA I, SARABIA L, ORTIZ M C, et al. Three-way models and detection capability of a gas chromatography-mass spectrometry method for the determination of clenbuterol in several biological matrices: the 2002/657/EC European decision [J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 515(1):55.

[11] 孙清荣,李楠,郭礼强,等. HPLC-MS/MS 法测定猪肉中克伦特罗和莱克多巴胺[J].食品研究与开发,2016,37(20):154.

[12] 杨娟,吴星祥,冯敏玲,等.固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法同时测定羊肉中3种β-兴奋剂[J].现代农业科技,2012(5):347.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.进出口动物源食品中克伦特罗、莱克多巴胺、沙丁胺醇和特布他林残留量的测定液相色谱-质谱/质谱法:SN/T 1924-2011[S].北京:中国标准出版社,2011.



引用格式:孟宏. 中医药理论和中药组方技术在化妆品开发中的应用[J]. 轻工学报,2017,32(3):21-26.

中图分类号:TQ658;R268 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.004

文章编号:2096-1553(2017)03-0021-06

中医药理论和中药组方技术在化妆品开发中的应用

Application of traditional Chinese medicine theory and Chinese medicine prescription technology in cosmetics development

孟宏

MENG Hong

北京工商大学 中国轻工业化妆品重点实验室,北京 100048

Key Laboratory of Cosmetic of China National Light Industry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

关键词:

中医药理论;中药组方技术;中草药化妆品

Key words:

traditional Chinese medicine theory;
Chinese medicine prescription technology;
Chinese herbal medicine cosmetics

摘要:中医药理论中整体观念、阴阳学说、五行学说、气血理论、体质学说,以及中药配伍组方、炮制技术,应用于皮肤护理效果明显,在化妆品开发中也得到越来越多的应用。目前中草药化妆品许多品牌仅仅是配方中添加了中草药成分,或仅仅引入了中医理论中某些概念,内涵浅显,未能深入挖掘、汲取中医思想精髓。中草药化妆品的研发不能简单地添加几味中草药提取物,更不能机械地照搬照抄古人留下的药方,而是要正确理解并掌握中医药理论,在中草药化妆品的发掘、继承和推广中有所创新,如此才能打造品牌特色,形成核心竞争力。

收稿日期:2016-09-10

作者简介:孟宏(1969—),女,河北省深南县人,北京工商大学教授,博士,主要研究方向为中医药美容、皮肤养生保健、植物(中药)化妆品的研发与临床疗效观察。

Abstract: The overall concept, yin and yang theory, the five elements theory, qi and blood theory, physical theory, and traditional Chinese medicine compatibility group, processing technology in traditional Chinese medicine theory had obvious effect on its application for skin care, and had also been more and more applications in the development of cosmetics. At present, in many brands of Chinese herbal medicine cosmetics only the formula of Chinese herbal medicine ingredients are only added, or certain concepts of traditional Chinese medicine theory are introduced, which lack the deep understanding of the essence of Chinese medicine thought. The research and development of Chinese herbal medicine cosmetics can not be the simply addition of a few herbs extract, or mechanically copy of the ancient prescription. It needs the correct understanding and mastering the traditional Chinese medicine theory and some innovation in the excavation, inheritance and promotion of Chinese herbal medicine so as to create brand characteristics and form core competitiveness.

0 引言

中医学是以中医药理论与实践经验为主体,以预防、诊断、治疗、康复和保健为目的,研究人类生命活动中健康与疾病转化规律的综合科学,至今已有数千年的历史.中药是在中医理论指导下,用于预防、诊断、治疗疾病或调节人体机能的药物,多为植物药.中药学是研究中药的基本理论和临床应用的一门学科,其中中药炮制和中药配伍组方技术是中医药理论的特色.目前,中医药美容护肤日益受到关注.中医药在化妆品中的应用自古就有,如东汉《神农本草经》中记载365种中药,其中160余种药物可用于皮肤美容保健,如桃花“令人好颜色”,旋覆花“去面黥黑,色媚好”^[1];《千金翼方诠释》和《外台秘要方》等中医古籍中也记载了大量美容护肤的中药、方剂^[2-3].这些都说明中医药美容护肤具有一定的发展过程和应用背景.然而,当今众多可见可闻的中草药化妆品中,大部分仅仅是配方中添加了中草药成分,或是仅仅引入了中医理论中某些概念,对其思想精髓并未深入挖掘,不能透彻理解其内涵,因此未能将中医药理论和化妆品科学地结合并发展.本文拟就中医药理论相关学说和中药组方技术在化妆品中的应用进行综述,以促进中医药理论之应用的创造性转化和创新性发展,使之与现代化妆品科技发展相融合.

1 应用于皮肤护理的中医理论

中医学有五大理论,每一种理论都与化妆品的应用密切相关.

1.1 整体观念

中医学具有完整的理论体系,这一独特的理论体系内容广泛,而整体观念是其重要内容之一.整体,就是统一性和完整性,整体观念强调在观察、分析、研究和处理问题时,必须重视事物本身所存在的统一性、完整性和联系性.

中医学认为,人体是一个有机整体,构成人体的各个组织器官在结构上是相互沟通的,在功能上是相互协调、相互为用的,在病理上是相互影响的.“五脏一体观”,即指人体是一个以五脏(肝、心、脾、肺、肾)为中心,通过经络系统把六腑(胆、小肠、胃、大肠、膀胱、三焦)、官窍(口、鼻、舌、耳、眼)等有机地联系起来,并通过精、气、血、津液的作用而形成的完整统一的整体.如果脏腑功能失调,在人体外部则有相应表现,如脾气虚的人,可见面色萎黄、没光泽、食欲欠佳、倦怠、大便不成形,这个时候就应当健脾益气,加以调理.

此外,人体与外界环境也具有统一性,所谓“人以天地之气生,四时之法成”,强调的就是人与自然环境的密切关系.四季的气候变化、昼夜晨昏的变化都会对人体生理、病理产生一定影响:春季多风,皮肤多敏感;秋季多燥,皮肤则

易干燥缺水;夏季多暑热,易生痱子;冬天多寒冷,容易生冻疮.又如皮肤的瘙痒症状往往日轻夜重.另外,地理区域的不同也在一定程度上影响着人体的生理活动,如北方气候较为寒冷干燥,所以北方人多易受寒邪、燥邪的影响.

除了自然环境,社会环境对人体的影响也同样重要.随着都市生活节奏日益加快,伴随而来的是高强度的工作压力、生活压力,很多人因此出现作息时间不规律、睡眠不足、焦虑等情况,部分人还会因此而选择吸烟饮酒、暴饮暴食等不健康的生活方式来释放压力,而这些不良生活习惯都会影响人的皮肤状况,日久则会出现一系列的皮肤问题.

因此,应将整体观念融入化妆品研发中,从内而外整体思考不同地区、不同人群的皮肤特点、护肤需求和适用的皮肤问题解决途径.除了对外用护肤品的研发外,更多的还是要思考导致皮肤问题出现的根本原因,这些原因既包括内在生理因素,也包括外界环境的影响.只有深刻剖析原因才能从根本上解决问题.因此,将整体观念与皮肤护理和化妆品研发相结合,全面整体地看待皮肤问题,才能提出有效的解决方法.

1.2 阴阳学说

阴阳,代表一切事物内部的对立统一关系,这一概念源自古代中国人的自然观.古人观察到自然界中各种既对立又统一的自然现象,如天地、日月、昼夜、寒暑、男女、上下等,便以哲学的思想方式归纳出“阴阳”这一概念.阴阳平衡是一种阴阳相互协调和相对稳定的状态,只有阴阳平衡,在自然界才能表现为气候的正常变化、四时寒暑的正常更替;在人体才能标志生命活动的稳定、有序、协调.因此《黄帝内经》中说:“阴阳匀平,以充其形,九候若一,命曰平人.”^[4]相反,如果阴阳失衡,自然界的气候变化异常,人体则会出现生命活动的异常表现,这

些异常活动也很容易在皮肤上表现出来,如皮肤的代谢功能紊乱,导致皮肤出现一系列的问题.因此,皮肤护理应当遵循阴阳平衡的理论,达到“阴平阳秘”.

1.3 五行学说

五行的概念源自对构成世界的五种基本物质的认识.“五”是指由宇宙本原之气分化的构成宇宙万物的木、火、土、金、水五种基本物质;“行”是指这五种物质的运动变化.“五行相生”指木、火、土、金、水之间存在着有序的递相资生、助长和促进的关系,往复不休.“五行相克”指木、火、土、金、水之间存在着有序的递相克制、制约的关系,循环不止.无论是对自然万物还是人体生理功能,五行都通过这种相生相克的循环达到一种动态平衡,使万物有序发展.但是,一旦五行中的某一行失常,如过旺或不足,影响到其他行,必然会破坏整体的动态平衡,在皮肤上就会出现干燥、肤色不均、暗沉等问题.根据五行学说,针对因为某一行过旺或不足而导致的皮肤问题,可以通过抑制过旺的某一行、补充不足的某一行,即抑强扶弱的方法来解决;也可以抑强与扶弱兼用,损其有余,补其不足,使之达到正常状态,进而使五行恢复到正常的动态平衡,皮肤问题就会得以解决.

1.4 气血理论

气与血均是构成人体和维持人体生命活动的基本物质,在人体组织的生理功能活动中,二者相互促进、相互转化、相互依存.气是血生成和运行的动力,血是气的物质基础和载体^[1].气以推动、温煦为主,血以营养、滋润为主.与人体其他脏腑组织器官相同,皮肤也需要气血的温煦、滋润和濡养,气血充足、气血通畅,在皮肤上才能表现出润泽健康;相反,如果气血亏虚、气血运行不畅,则会导致气血不能上荣于面,失于濡养而见面色淡白或苍白而无光泽.因此,气血不仅是机体运行的物质基础,更是皮肤美容的

物质基础^[5]. 可以通过调节气血的方式改善皮肤微循环,进而改善由于气血亏虚、运行不畅导致的各类皮肤问题,如采用四物汤加减的活血养颜方,改善气血微循环,实现多重功效,从根本上解决肌肤问题,让肌肤由内而外焕发健康.

1.5 体质学说

体质,是人体在先天禀赋和后天调养基础上表现出来的功能(包括心理气质)和形态结构上相对稳定的固有特性. 中医理论的体质分类是为了更好地对不同体质人群进行用药和养生保健的临床指导. 所谓“有诸内必形诸外”,中医体质学说认为,人体的生理活动或体内发生病变,都会反映到体表. 形体的肥瘦、肌肉的松紧、皮肤的弹性、皮脂分泌的多少、头发的质地与疏密等,都与体质密切相关. 因此,可以针对不同体质的皮肤进行研究,根据其独特的皮肤特点和症状,提出对应的护理重点,通过内服外用用来调理体质,进而改善肌肤问题.

中医理论将人体体质类型划分为9种,1种平和体质,8种偏颇体质(即气虚质、阳虚质、阴虚质、湿热质、痰湿质、血瘀质、气郁质、特禀质). 平和质为相对健康的人群的体质,面色红润、明润含蓄,头发稠密有光泽,皮肤状态比较理想,皮肤调理以预防为主,应注意保湿和防晒;气虚质常见面色淡白无光泽、皮肤缺乏弹性,应注意补水保湿和抗衰;阳虚质易畏寒,气血不荣于面,应注意抗衰、补充营养;阴虚质易上火、阴液不足而皮肤干燥,应该注重补水保湿、控油抗炎;湿热质、痰湿质皮肤多出油、易生痤疮,应该注重皮肤的清洁、清爽、控油;血瘀质和气郁质皮肤多见暗沉、色斑,应注意美白、祛斑;特禀质容易敏感,会出现皮肤过敏、瘙痒等现象,护肤要慎重,可选择配方简单、舒缓的化妆品. 由此可见,不同体质的养颜方式不同,体质差异化养颜尤为重要^[6].

2 应用于化妆品开发的中药组方技术

中医用药的特点主要有两个,一是复方即配伍组方,二是中药炮制. 二者都是中医药理论的重要内容,同时也是中药应用于临床诊治疾病中不可或缺的关键过程.

2.1 配伍组方

中药复方主要是根据“君臣佐使”的组方理论和“七情配伍”的组方原则进行的. 关于君、臣、佐、使组方的理论,最早见于《黄帝内经》,《素问·至真要大论》说:“主病之为君,佐君之为臣,应臣之为使.”^[4]君药是针对主病或主证起主要治疗作用的药物. 臣药含意有两个,一是辅助君药加强治疗主病或主证作用的药物;二是针对重要的兼病或兼证起主要治疗作用的药物. 佐药即配合君药、臣药以加强治疗作用,或直接治疗次要兼证的药物. 使药为调和药,即具有调和方中诸药作用的药物.

“君臣佐使”组方思想自古传承并沿用至今,化妆品植物原料按照这一原则进行组方配伍具有实际意义^[7]. 在解决某一具体皮肤问题时,对皮肤的症状进行辨证分析和归纳总结,得出解决方案后,采用“君臣佐使”的组方原则对症下药,全面解决皮肤问题,也是中医整体观念的一种体现.

清代医家徐灵胎说:“药有个性之专长,方有合群之妙用.”^[8]中药的功用各有所长、也各有所短,只有通过合理的组织,发挥其综合作用,使各具特性的药物组成新的有机整体,才能发挥出最优的药效作用,而这个整合诸药的过程就称为配伍. 由此可知中药组方中配伍的重要性. 《神农本草经》^[9]将各药物的配伍关系归纳为“有单行者,有相须者,有相使者,有相畏者,有相恶者,有相反者,凡此七情,合而视之.”这也就是常说的“七情配伍”. 分而论述,

单行就是单用一味药来治疗某种病情单一的疾病;相须是用两种功效类似的药物配合应用,以增强原有药物的功效;相使是一种药物为主,另一种药物为辅,两药合用,以辅药提高主药的功效;相畏是一种药物的毒副作用能被另一种药物所抑制;相杀是一种药物能够消除另一种药物的毒副作用;相恶是一种药物能破坏另一种药物的功效;相反就是两种药物同用能产生剧烈的毒副作用。

中药七情配伍原则可以运用到化妆品研发中。上述七情中除单行外,相须、相使可以起到协同作用,能提高疗效,是最常用的配伍方法,如石斛和玉竹相须为用,保湿补水效果 $1 + 1 > 2$;相畏、相杀可以减轻或消除毒副作用,以保证用药安全,是使用毒副作用较强药物的配伍方法。在化妆品研发中,可以利用这一原理来解决化妆品配方中防腐剂、香精香料、表面活性剂等原料带来的一些不可避免的刺激和副作用,通过选取某些能够降低副作用的物质,将风险降到最低。相恶则是因为药物的拮抗作用,抵消或削弱其中一种药物的功效;相反则是药物的相互作用,能产生毒性反应或强烈的副作用,所以相恶、相反是配伍用药的禁忌。

2.2 炮制技术

中药炮制是遵循中医药基础理论,根据临床判断辨证施治用药的需要和药物自身性质,选择适当的工艺,将药材加工为能直接用于临床配方的一项传统制药技术。炮制技术在中药的生产使用过程中十分重要,其目的有纯净分拣药材、切制饮片、干燥药材、去除药品味道、降低毒副作用、增强药物功效、改变药物性能、引经入药等。

将中药用于化妆品开发,也是传统与现代科技结合的典范。通过中药炮制技术,富集中药的功能成分,强化其在化妆品中的功效,或者降低某些成分的副作用,弱化其危险性,使美容中

药成分得以安全、高效地被利用^[10]。“发酵”、“油灸”等技术已被广泛应用到化妆品研发中,表明中药的炮制技术在其中具有一定的指导意义。

3 中草药化妆品研发常见问题与对策

2016年12月6日,国务院新闻办发布了《中国的中医药》白皮书。这是我国首次发布关于中医药发展情况的白皮书,从中医药的特点、发展历程、传承与发展、国家政策和主要措施,以及中医药国际交流与合作等方面对我国中医药的发展过程和现状进行了概述。国家已把中医药发展上升为国家战略,对推进新时期中医药事业发展做出了系统性部署^[15]。作为国粹瑰宝,中医药理论和中药组方技术应用于化妆品行业必定有广阔的发展空间,并能以其独特的东方特色和深厚的文化内涵立于世界之林。

鉴于中草药含有各种天然活性成分,正以其安全、温和、持久、高效等优势,被广泛应用于美白、防晒、保湿、抗衰、毛发护理等产品中。另外,一部分中草药还被作为天然香料、抗菌防腐剂等应用于化妆品配方。目前大多数美白化妆品是以酪氨酸酶为作用靶点,利用黄酮类、多酚类、鞣花酸等中药有效成分抑制酪氨酸酶活性的作用,如添加当归、红花、人参、甘草、白藜等,以实现美白功效。将黄芩、芦荟、紫草、沙棘、甘草等添加到防晒产品中^[11],利用其中草药活性成分吸收紫外线、防止氧自由基形成等功能可达到防晒效果,并防止皮肤免疫系统和角质细胞的衰退,修复皮肤,延缓衰老。利用白及、竹茹等中草药提取物所含羟基可以与水以氢键形式结合,形成锁水膜的特性,将其添加于化妆品,可防止皮肤水分流失;合欢花等植物提取物中含有神经酰胺成分,将其添加于化妆品,有效成分能够渗入皮肤角质层与水结合,修复缺乏脂

质的皮肤屏障,提高保水能力;利用筋骨草促进水通道蛋白 AQP3 表达、增强水分子跨膜通透性,以及紫苏、紫草、千屈菜等中药提取物抑制透明质酸酶活性、减少透明质酸降解等特性,将其添加于化妆品,均可有效提高皮肤保湿效果^[12-14]。

而从现实情况看,尽管目前国内外诸多化妆品品牌致力于回归自然、绿色健康发展,但是多数品牌存在两种问题:一是仅在配方中添加了中草药成分,以单味中草药或是中药组方为卖点,忽略中医理论的整体性。二是仅引入了中医理论中的某些概念,内涵浅显,未能挖掘中医思想精髓。产生这些问题的原因有很多,首先大部分化妆品公司缺少真正中医学专业的工作人员,不能真正理解并掌握中医药理论的内涵,开发的产品虽然有中草药的影子,貌似与中医药有关,但实际上运用得很牵强。另外,化妆品行业迅猛发展,产品更新换代的速度也不断加快,国内诸多体现中草药护肤理念的品牌间竞争激烈,同时这些民族品牌还共同面临着日本、韩国等国外宣称汉方本草护肤品牌强有力的竞争。在这种双重夹击的现实面前,为了迎合消费者喜好,国内很多品牌都争相模仿韩日产品,不能体现本土品牌的特色,也无暇通过深入研究来实现中医药理论与化妆品开发的科学融合。

中草药化妆品研发不能简单地选取几味中草药提取物加入化妆品中,更不能机械地照搬照抄古人遗留下的药方,而是要正确理解并掌握中医药理论,在中草药化妆品的发掘、继承和推广中有所创新。如此才能打造品牌特色,形成核心竞争力。

一要有思想。思想引领科技,科技引领技术,技术引领产品。要基于中医药理论,突显自身特色。中国拥有 5000 多年的历史,在发展进程中兼容并蓄、开放创新,中医药理论作为我国珍贵的文化遗产理应得到继承与发展。我

国化妆品企业应当明确,只有赋予产品以中国传统文化内涵,才能与西方先进技术下的化妆品比肩。

二要融入科技。将中医药理论与中药组方技术应用于化妆品研发,必须学习借鉴现代科学技术,坚持古为今用。化妆品研发是多学科交叉的领域,应当通过联合医药生产、生物工程技术 and 精细化工等各相关领域的专家,以跨学科联合攻关模式开展化妆品的研究与开发。

三要重品质。品质是产品的生命力。要打造名品,就要品质至上,严把质量关。中草药的选取既要保证确切的功效,也要符合化妆品行业的相关法规要求;提取、配方、工艺流程等方面均需严格把控。

四要大创新。创新驱动,引领未来。创新驱动已经列为国策,在国家大背景的观照下的化妆品领域显然会出现新的格局,“渠道为王”的时代已经过去,“产品为王”的时代即将来临,而创新作为产品的驱动力显得尤为重要。只有努力实现中医药理论之应用的创造性转化和创新性发展,使之与现代化妆品科技发展相融合,才能开创具有中国特色的美妆事业,使中国品牌的化妆品走出国门,走向世界。

参考文献:

- [1] 崔玲主. 神农本草经[M]. 天津:天津古籍出版社,2009.
- [2] 钱超尘. 千金翼方诠释[M]. 北京:学苑出版社,1995.
- [3] 王焘. 外台秘要方[M]. 北京:华夏出版社,2009.
- [4] 张大生. 黄帝内经[M]. 天津:天津古籍出版社,2006.
- [5] 邹鹏飞,刘辉,董丽娟,等. 基于气血养颜的中医护肤品的设计思路[J]. 日用化学品科学,2012,35(5):20.



引用格式:朱文驿,邓小锋,孟宏.基于传统中医方药的晒后修复化妆品研究进展[J].轻工学报,2017,32(3):27-32.

中图分类号:TQ658;R268 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.005

文章编号:2096-1553(2017)03-0027-06

基于传统中医方药的晒后修复化妆品研究进展

Advances in research cosmetics with sunburnt repairment based on traditional Chinese medicine prescription

朱文驿,邓小锋,孟宏

ZHU Wen-yi, DENG Xiao-feng, MENG Hong

关键词:

晒后修复;日晒疮;中医方药;清热解毒

北京工商大学 中国化妆品协同创新中心,北京 100048

China Cosmetic Collaborative Innovation Center, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

Key words:

sunburnt repairment;
solar dermatitis;
Chinese medicine
prescription; detoxification

摘要:基于晒伤的病因病机分析,以及从古代医学典籍和中药临床应用中筛选出具有清热解毒、治烫伤、治晒斑/疮等作用的晒后修复中医方药的归纳总结,指出,具有晒后修复功能的中医方药对于日晒疮的治疗有一定的作用,可将其应用于晒后修复化妆品的开发;晒伤严重的晒后修复,辅以清凉镇痛方药,有助于增强患者的舒适感和心理上的愉悦感。

收稿日期:2016-09-10

作者简介:朱文驿(1994—),女,湖南省澧县人,北京工商大学硕士研究生,主要研究方向为防晒化妆品。

通信作者:孟宏(1969—),女,河北省滦南县人,北京工商大学教授,博士,主要研究方向为中医药美容、皮肤养生保健及植物(中药)化妆品的研发与临床疗效。

Abstract: Based on the etiology and pathogenesis of sunburn, a few of traditional Chinese medicine prescriptions with sunburnt repairment effect were filtrated. The prescriptions of detoxification, cure burns and cure sunburn treatment were summarized. It was pointed out that traditional Chinese medicine prescriptions with sunburnt repairment effect for the treatment of solar dermatitis had a certain role, which could be applied to the development of sunburnt repairment. For the treatment of severe sunburn, cool analgesic prescriptions must be supplemented to enhance comfort and psychological pleasure of the patients.

0 引言

与自然老化相比,太阳光给人类皮肤带来的急性损伤和慢性损伤更为严重.太阳光由 > 95% 的 UVA (400 ~ 315 nm)、< 5% 的 UVB (315 ~ 280 nm) 和被臭氧层与大气层完全吸收的 UVC (280 ~ 100 nm) 组成.当皮肤受到 UVA 和 UVB 照射超过所能承受的剂量时,会产生急性皮炎,轻者可见红斑,境界鲜明;重者可发生水肿或大疱,感觉瘙痒、灼热、疼痛.对于晒后修复,现代研究多集中于损伤细胞(角质形成细胞和成纤维细胞)的修复作用对体内内源性抗氧化酶和 MDA 的影响,以及对皮肤氧化应激和 DNA 损伤的影响^[1-3].现在市售晒后修复类产品主要从修复损伤细胞的角度出发,再添加一些细胞活化因子,普遍缺乏针对日光物理性急性晒伤和继发性光敏性皮炎的修复功能^[4].

中医理论认为,阳光温暖其性属火,火热之邪易致肿疡、火邪易生风动血,可引起皮肤红斑、肿胀瘙痒.中医对此类损伤无明确区分,至明朝时期正式命名为“日晒疮”.从损伤程度来看,日晒疮的病理表现相当于现代医学所说的急性晒伤.现代医学中,晒伤日照性皮炎即日光性皮炎,又称日晒伤或晒斑,是正常皮肤经暴晒后产生的一种急性炎症反应,表现为红斑、水肿、水疱、色素沉着、脱屑.有研究者曾对植物防晒剂的古籍进行了筛选研究,主要关注促进伤口愈合、美白等功效的中草药^[5],但未关注去除肌肤邪热、解毒止痒的具有晒后修复作用的方药.中医方药中清热解毒、治烫伤、治晒斑/疮的方药与现代晒后修复相似.本文拟在分析日晒

疮病因病机的基础上,对具有防晒功效的这些中医方药的修复机理和临床应用情况进行归纳总结,以期防晒和晒后修复方药的改进提供参考.

1 日晒疮的病因病机

华佗将晒伤描述为“身如火烧,紫斑烂然者”和“夏日斑”,认识到晒伤的发病时间为夏天^[6].隋代巢元方在《诸病源候论》中记载,“风毒肿者,其先赤痛炎热,肿上升瘰浆,如火灼也”.其中瘰浆即属于急性晒伤的范畴^[7].朱震亨总结晒斑的症状和发病原因,称:“斑属风热挟痰而作,自里而发于外,通圣散中消息,当以微汗散之,切不可下.内伤斑者,热之病发于外,微汗以散之,若下之非理.疹属热与痰,在肺清肺火降痰,或解散出汗,亦有可下也.发则多痒或不仁者,是兼风兼温之殊,色红者,兼火化也.”^[8]吴昆认为,日晒的斑疹病因病机为:“无热不斑,无湿不疹,此二言者,斑疹之大观也.其致疾之由,则有风、寒、暑、湿之殊;辨证之法,则有表、里、虚、实之异.此在人之自悟,非可以纸上尽也.”^[9]申斗垣发现日晒疮是由日晒过度所导致:“日晒疮,三伏炎天,勤劳之人,劳于工作,不惜生命,受酷日曝晒,先疼后破而成疮者,非血气所生也.”^[10]名医陈士铎于《外科秘录》中写道:“日晒疮,乃夏天酷烈之日曝而成者也,必先痛而后硬,非内热所损也.大约皆奔走劳役之人与耕田胼胝之农夫居多,安闲之客安得生此疮乎?故止须消暑之药,如青蒿一味饮之,外用末药服之即安.”^[11]

现代医学认为:在日光暴晒下,由于个人先

天性体质较弱,皮肤失去防御功能,导致太阳的热毒进入皮肤表面,这类热毒不能被排出体外,因此灼伤肌肤,导致日晒疮的发生.由此可以看出,传统中医理论和现代医学对日晒疮的病因分析有异曲同工之妙:1)禀赋不耐.每个人的皮肤抵御紫外线的的能力不同,根据国际分类标准 Fitzpatrick,将日光反应性皮肤类型分为 I—VI型,中国女性人群(以北京、广州、上海、成都城市女性为例)中皮肤类型以 III型(有时发生日晒红斑,有些晒黑)为主,其次是 II型(易生日晒红斑,轻微晒黑)和 IV型(很少发生日晒红斑,中度晒黑)^[12],皮肤类型的差异主要由遗传基因决定.2)腠理失却其致密防卫之功,以致阳热毒邪侵入体表.日晒给皮肤造成损伤,导致皮肤抵御紫外线的的能力变弱,发生以下改变:UV 诱发超氧化物的产生,降低体内抗氧化酶的活性,改变基因组成的结构和功能,激发各种信号通路,导致皮肤基质的降解,诱发细胞凋亡.不仅如此,紫外线还能造成表皮中朗格汉斯细胞数目减少,骨架和形态改变,呈递抗原性受到抑制,出现免疫抑制,最终导致皮肤屏障功能减退^[13-15].3)蕴郁肌肤不得外泄,焦肤伤肌而导致发病.低剂量的日光照射,皮肤具有自我修复的功能,若损伤过度,则会出现日晒红斑,并伴有如下病理现象产生:紫外线照射后出现红斑的早期,真皮乳头层毛细血管扩张,白细胞游出,液体渗出;进一步发展可出现毛细血管内皮损伤,血管周围出现淋巴细胞和多形核细胞浸润等炎症反映,同时表皮基底层出现液化变性,棘层细胞层部分表现为胞质均匀一致,嗜酸性染色,核皱缩,深染,即所谓“晒伤细胞”.这种变性细胞周围可有海绵样水肿、空泡形成,并伴有炎性细胞浸润^[16].这与中医对日晒伤的描述一致:毒热之邪侵袭肤表,则肌肤暴露部位出现焮红灼热、漫肿;毒热郁于肌肤,蕴热化湿,湿热俱盛,则生水疱、糜烂;若热毒入里,劫灼阴液,则发热、头痛、恶心、谵妄^[17].

综上所述,日晒疮的病因病机为:盛夏酷暑,日光暴晒,加之禀赋不耐,腠理失却其致密防卫之功,以致阳热毒邪侵入体表,蕴郁肌肤不得外泄,焦肤伤肌而导致发病^[18].

2 具有晒后修复功能的中医方药

2.1 清热解毒

医学古籍认为日晒疮都是“热”所致,故可利用清热解毒之药达到清热邪、解热毒的效果.已有临床研究表明,清热解毒方药的外部涂抹能够有效地消退红斑水肿^[18].细数古代和现代医籍,清热之方药不知其数.

《慈禧光绪医方选议》中的清热活血化毒膏,其组成为乳香、苍耳子、甘草、冰片,加入黄连膏,共捣烂合膏,外敷.主治皮肤疮疡,能够清热活血,祛风化湿,解毒^[19].若患者体内多夹湿夹瘀,可用此方.《会约》中的清热泻火汤.主治目暴痛,赤肿羞明.组成为生地、赤芍、白芷、川芎、荆芥、大黄(酒炒)、薄荷、羌活、防风、连翘、甘草、黄芩、山栀(炒黑)、独活,水煎服用^[20].生地、赤芍、黄芩、山栀(炒黑)、连翘、甘草为清热之品,赤芍、川芎、大黄(酒炒)为活血之品,白芷、荆芥、羌活、独活为祛风之品,薄荷具有疏风散热、透疹之功效.《中西医结合皮肤病学》中的疏肝活血汤,功效为疏肝清热、活血化瘀,主治日光性皮炎.其组成为柴胡、薄荷、黄芩、栀子、归尾、赤芍、红花、莪术、陈皮、甘草,具有良好药效^[21].柴胡和解表里,具有疏肝、升阳之功效,黄芩、栀子清降,归尾、赤芍、红花活血散瘀,莪术破血行气,陈皮、甘草和中扶正.即使同为清热方药,适用对象也不尽相同:热毒在血分者,可配伍清热凉血药;火热炽盛者,可配伍清热泻火药;夹有湿邪者,可配伍利湿、燥湿、化湿药;热毒血痢、里急后重者,可配伍活血行气药等.

2.2 治烫伤

古籍的烫伤、烧伤与现代的日晒伤均为毒

热之邪侵袭肌表而成。烫伤药对烫伤创面具有抗菌、消炎的功效,且能促进创面愈合^[22]。

《洪氏集验方》中记载有治烫伤之验方:将大黄捣碎,调以美醋,敷疮上。大黄有凉血解毒收敛作用,并对葡萄球菌和溶血链球菌有抑制作用^[22]。《外科集验方》中治疗烫伤的方药有清凉膏、黄柏散、蛤粉散。其中栀子仁、黄连(去须)、白芷、生地黄、葱白、黄蜡、清麻油、黄柏、大黄在以上3个方药中运用频繁。现代药理试验表明,清凉膏、黄柏散具有抗炎和镇痛作用,蛤粉散具有抗菌、消炎、消肿作用^[23-25]。《疡科心得集》中用白玉膏治湿毒疮、白泡疮、烫伤等,收湿生肌长肉,甚有效。白玉膏能够促进创面肉芽组织中表皮生长因子和血管内皮生长因子的分泌,从而促进伤口愈合^[26]。《用药心得十讲——焦树德》中将地榆末与黄连素同研为均匀细粉,用于治疗烫伤或烧伤,取得良好效果^[27]。《历代本草药性汇解》中将地榆归为理血类,指出地榆对治疗烧伤、烫伤和炎症的功效,即地榆有收敛、生肌、抑菌等作用,可有效减轻烧伤、烫伤早期组织水肿,降低毛细血管通透性,减少渗出,保护创面,兼有利水、防止休克的作用^[28]。

2.3 治晒斑/疮

《华佗神方》载有华佗治夏季中暑神方,其病证为中暑忽倒,口吐白沫,将欲发狂,身如火烧,紫斑烂然者,多不可救。方药为玄参、麦冬各3两,天冬、青蒿各1两,升麻、荆芥、黄连、黄芩各3钱,水煎服,一剂而斑色变淡,三剂而斑色褪尽矣。华佗治夏日斑神方,用水洗净汗垢,研密陀僧为末,以胡瓜蒂蘸擦数次,即愈^[6]。玄参、麦冬两味药是一个“药对”,可协同增强清热滋阴的功效,天冬养阴润肺,青蒿解暑热,升麻、荆芥、黄连、黄芩具有解毒之效。

《医方考》将晒后损伤表征为热斑、红斑。主要方药有防风通圣散、消风散、调中汤、大建中汤。主要含有防风、川芎、当归、麻黄、桔梗、甘

草、半夏等。防风、川芎、麻黄解表,当归和血,半夏、甘草所以调中,皆健脾。防风通圣散在现代临床上具有治疗皮疹、痤疮、银屑病等功效。消风散具有抗炎、抗变态反应、抗过敏、止痒、治疗接触性皮炎等功效。调中汤和解表里,大建中汤则具有温中补虚,降逆止痛之功效^[9]。

《丹溪治法心要》载:“一人发斑面赤,昏愤谵语,脉洪而虚,按之无力,用人参、生地各0.5两,附子1钱,大黄1.5钱,煎服之。不甚泻,夏月用之效。疹属热与痰在肺,当清肺火降痰,或以汗解。亦有可下者,通圣散加减。”^[8]人参补气,生地补阴,附子回阳救逆、补火助阳、散寒止痛,大黄则具有清热泻火、凉血解毒、逐瘀通经的功效。

《外科启玄》日晒疮,内宜服香菇饮加芩、连之类,外搽金黄散、制柏散、青黛等药治之^[10]。香连金黄散具有抗炎、镇痛的效果,制柏散可治湿毒疮,青黛则具有清热、解毒、凉血的功效。

《外科秘录》日晒疮,服止须消暑之药,如青蒿一味饮之,外用末药服之即安^[11]。青蒿主治暑邪发热、阴虚发热、夜热早凉、骨蒸劳热、疟疾寒热、湿热黄疸。

3 晒后修复方药的临床应用

京万红软膏为传统中成药,具有活血解毒,消肿止痛,去腐生肌的功效,常用于轻度水、火烫伤,疮疡肿痛,创面溃烂等治疗。李晓鹏等^[29]将京万红软膏与绿药膏(林可霉素利多卡因凝胶)作对比,观察二者对Ⅰ度日晒伤、Ⅱ度日晒伤的治疗效果并进行评价。结果表明,京万红软膏比绿药膏更能促进日晒伤愈合,其愈合天数更短。这是由于京万红软膏中多清热解表、活血收敛的中草药。

刘龙友等^[30]将复方苦黄喷雾剂喷于创面,治疗晒伤病例205例,晒伤至就诊时间为8~24 h。其治疗原则主要以清热、凉血、解毒透疹、

消肿止痛为主. 临床结果表明,其止痛时间、愈合时间、痊愈率明显优于对照组,并具有显著性差异.

韩晓丽等^[31]用龙珠软膏治疗日光性皮炎59例,每天涂药1—2次,涂药3—7d后全部患者痛痒症状明显减轻,皮肤潮红减退,水泡基本消失,且防护部位无新晒伤发生. 龙珠软膏有清热解毒、消肿止痛、祛腐生肌之功效,但用其治疗日光性皮炎效果,与对照组炉甘石洗剂对比,无显著性差异.

乔宏等^[32]采用自拟中药汤剂(清热除湿)联合湿润烧伤膏治疗日光性皮炎,取得了良好的治疗效果. 30例患者均在治疗5—14d后基本痊愈,痊愈率为96.67%. 其中患有急性光毒性皮炎的患者,曾使用抗过敏等激素类药膏治疗无明显效果,但使用湿润烧伤膏暴露治疗,每日4次,最终痊愈.

吴韵华等^[33]对内服青蒿配方颗粒治疗日光性皮炎进行了疗效观察,其有效治疗率为98.50%. 青蒿,味苦,辛,寒;归肝、胆经、三焦、肾经;清透虚热,凉血除蒸,截疟,可用于暑邪发热,阴虚发热,夜热早凉,骨蒸劳热,疟疾寒热,湿热黄疸. 笔者认为青蒿恰为清血分热的要药,可推广用青蒿配方颗粒治疗日光性皮炎.

4 中医方药晒后修复化妆品的开发

由上述临床应用情况可知,具有晒后修复功能的中医方药对于日晒疮的治疗有一定的作用,可将其应用于晒后修复化妆品的开发. 目前这方面的研究成果较少,且多为专利形式,如:董银卯等^[34]发现晒后修复中药组合物包括沙棘、银杏叶、荞麦叶、月见草、白花蛇舌草,这五味中药具有保湿和晒后修复的作用. 沙棘有跌打瘀肿之功效,银杏叶有活血化瘀、止痛之功效,荞麦叶有减缓痛肿之功效,月见草能祛风除湿,而白花蛇舌草则具有清热解毒、抗炎的功效. 将该中药组合物制备成常用的护肤品剂型,

涂抹于受试者紫外照射后的红斑区域,治疗晒后红斑的效果较好. 麻本莲^[35]制备了一种主要由中草药组成的晒后修复面膜,包含槐花、黄芩、陈皮提取液、当归、蜂蜜、柠檬汁、丹参、吴茱萸、珍珠粉、沙棘油等成分. 不同年龄段的60名晒后试用者使用该面膜2个月,相比未试用者肤色更均匀,皮肤更水润光泽,晒黑程度低于70%,表明该中草药晒后修复面膜具有明显改善晒后皮肤状态的功效. 王亚等^[36]发现中药组合物包括蒲公英、当归、积雪草、益母草、红花、金银花、艾叶、无患子、甘草、葛根等也具有晒后修复功效. 其中,蒲公英、积雪草、无患子、甘草为清热类中药,当归、益母草、红花为活血类中药,金银花、艾叶凉血止血,葛根解肌退热,发表透疹. 但该中药组合物具体的晒后修复效果未公布.

现代晒后修复类化妆品主要在西医范畴进行细胞层面的治疗,外加美白、抗衰等功效. 中国古代医学典籍针对晒后修复的方药较少,但临床医学表明,清热解毒、治烫伤、治日晒疮的药中皆有晒后修复的潜力. 此外,古代方药还包含了清凉、镇痛的中药,这正是现代晒后修复化妆品所缺乏的. 此外,晒伤严重的晒后修复,辅以止痛方药,有助于增强患者使用方药的舒适感和心理上的愉悦感.

参考文献:

- [1] 陈斌,康健,吕中明,等. 黄芪甲甙对中波紫外线损伤皮肤角质形成细胞的保护作用[J]. 中国中西医结合皮肤性病学期刊,2009,8(1):1.
- [2] 李小婷,庞玉新,王丹,等. 艾纳香油对紫外线诱导小鼠皮肤晒伤的保护作用[J]. 中成药,2017,39(1):26.
- [3] 李小婷,王丹,庞玉新,等. 艾纳香油对晒伤小鼠皮肤氧化应激及DNA损伤的影响[J]. 热带农业科学,2016,36(2):59.
- [4] 任伯伟. 扩展晒后修复产品的新市场[J]. 中

- 国化妆品,2005(9):66.
- [5] 胡念芳,李利.植物防晒剂的古籍及现代文献筛选研究[J].中医杂志,2012,53(22):1973.
- [6] 华佗.华佗神方[M].北京:中外出版社,1979.
- [7] 南京中医学院.诸病源候论校释(下册)[M].北京:人民卫生出版社,1982.
- [8] 朱震亨.丹溪治法心要[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1997.
- [9] 吴昆.医方考[M].北京:中国中医药出版社,2013.
- [10] 申斗垣.外科启玄[M].北京:人民卫生出版社,1955.
- [11] 陈士铎.外科秘录[M].北京:中国中医药出版社,1991.
- [12] 刘玮,赖维,王学民,等.中国城市女性人群皮肤类型调查及相关研究[J].临床皮肤科杂志,2005,34(7):420.
- [13] RITTIÉ L, FISHER G J. UV-light-induced signal cascades and skin aging [J]. Ageing Research Reviews, 2002, 1(4):705.
- [14] MELNIKOVA V O, ANANTHASWAMY H N. Cellular and molecular events leading to the development of skin cancer [J]. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 2005, 571(1):91.
- [15] 李燕华,毕志刚,蒋艺.紫外线及其辐射的尿刊酸对朗格汉斯细胞功能影响的研究[J].中华皮肤杂志,2001,34(1):47.
- [16] 刘玮.皮肤日晒红斑[J].临床皮肤科杂志,2005,34(7):483.
- [17] 叶小红,宋洪涛.中药治疗日晒伤的研究进展[J].解放军药学学报,2010(1):83.
- [18] 李点.美容良方大全[M].太原:山西科学技术出版社,2006.
- [19] 陈可冀.慈禧光绪医方选议[M].北京:中华书局出版社,1981.
- [20] 罗国纲.罗氏会约医镜[M].北京:人民卫生出版社,1965.
- [21] 王根会,冯兰珍,雷明君.中西医结合皮肤病学[M].石家庄:河北科学技术出版社,2012.
- [22] 王茂先.中国中医烫伤药的研究概述[J].科技资讯,2010(2):231.
- [23] 郑雪平,夏勤,王业皇,等.清凉膏抗炎镇痛作用的实验研究[J].中华中医药学刊,2009,27(6):1235.
- [24] 彭丹.复方黄柏散的镇痛抗炎作用[J].中国医院药学杂志,2012,32(14):1108.
- [25] 杨白玫.“蛤粉散”的药理作用[J].山西医科大学学报,1999,30:62.
- [26] 王思农,张博,柳文红,等.生肌白玉膏对大鼠深Ⅱ度烫伤创面 EGF 和 VEGF 表达的影响[J].中国麻风皮肤病杂志,2014,20(4):586.
- [27] 焦树德.用药心得十讲[M].3版.北京:人民卫生出版社,1980.
- [28] 马子密,傅延龄.历代本草药性汇解[M].北京:中国医药科技出版社,2002.
- [29] 李晓鹏,夏丽真,孙强.外用京万红软膏与绿药膏治疗日晒伤疗效观察[J].北京医学,2015,37(11):1092.
- [30] 刘龙友,赵凯,倪生冬,等.复方苦黄喷雾剂治疗日光性皮炎的临床研究[J].西北国防医学杂志,2013,34(3):258.
- [31] 韩晓丽,李成.龙珠软膏治疗日光性皮炎 59 例[J].医学信息:下旬刊,2011,24(3):142.
- [32] 乔宏,刘灵.自拟中药汤剂联合湿润烧伤膏治疗日光性皮炎的临床疗效观察[J].中国烧伤疮疡杂志,2015(5):380.
- [33] 吴韵华,潘永年.青蒿配方颗粒治疗日光性皮炎疗效观察[J].医药前沿,2013(23):230.
- [34] 董银卯,赵华,孟宏,等.具有美白保湿及晒后修复功效的外用中药组合物、制剂及其制备方法:CN103784551A[P].2014-05-14.
- [35] 麻本莲.一种晒后修复面膜:CN106074321A[P].2016-11-09.
- [36] 王亚,周雨晴,储浩侠,等.一种用于晒后修复的中药组合物:CN106138380A[P].2016-11-23.



引用格式:岳立芝,李丽,孟宏. 痤疮辨证分型的中医药研究与化妆品研发进展[J]. 轻工学报,2017,32(3):33-36.

中图分类号:TQ658;R268 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.006

文章编号:2096-1553(2017)03-0033-04

痤疮辨证分型的中医药研究与化妆品研发进展

Research on traditional Chinese medicine in dialectical classification of acne and cosmetics development

岳立芝,李丽,孟宏

YUE Li-zhi, LI Li, MENG Hong

关键词:

中医药理论;病因病机;辨证施治;痤疮

北京工商大学 中国轻工业化妆品重点实验室,北京 100048

Key Laboratory of Cosmetic of China National Light Industry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

Key words:

traditional Chinese medicine theory; etiology and pathogenesis; syndrome differentiation and treatment; acne

摘要:鉴于不同发病机理的痤疮其特征不同,痤疮的治疗也应结合个体体质差异分析病因,辨证施治,有的放矢地选择药物.在祛痘化妆品的开发中,应以中医理论为指导,针对肺经风热、湿热蕴结、痰瘀凝结、冲任不调等不同类型痤疮的特点设计痤疮功效产品;在组方时还应遵循配方君臣佐使的科学配伍思想,发挥中医药在治疗痤疮方面疗效明显、副作用少等优势.

收稿日期:2016-09-10

作者简介:岳立芝(1991—),女,山东省临沂市人,北京工商大学硕士研究生,主要研究方向为问题肌肤的治疗和皮肤保健.

通信作者:孟宏(1969—),女,河北省滦南县人,北京工商大学教授,博士,主要研究方向为植物(中药)化妆品、皮肤医学养生技术.

Abstract: Acne has different features according to different pathogenesis. Acne treatment and choice of medicine should base on etiology analysis and syndrome differentiation treatment according to different individual constitutions. The development of acne cosmetics should be guided by traditional medicine theory. The acne products should be designed according to the features of the different types: lung-heat type, accumulated dampness/heat type, phlegmstatic coagulation type, and disharmony of Chong and Conception Channels type. Composing prescriptions should follow the principle of "Principal, Assistant, Complement and Medating guide" and give full play of the advantages of the significant curative effect and less side effect of traditional Chinese medicine.

0 引言

痤疮,俗称青春痘、粉刺、暗疮,早期中医又称面疮、酒刺、肺风等,是一种常见的毛囊皮脂腺慢性炎症性皮肤病,多见于青年人群,好发于皮脂腺分泌旺盛的部位,其病程长,易反复.临床表现为粉刺、炎性丘疹、脓包、结节、囊肿、瘢痕等,因其具有损容性的特点,给青少年身心带来很大困扰和痛苦.以往祛痘的措施较为单一,多是根据痤疮的外观或者症状表现进行治疗,效果不佳^[1].中医学理论有其独特的辨证论治理论体系和丰富的临床经验,在痤疮的临床诊断和治疗上积累了丰富的经验.鉴于此,本文拟针对痤疮的中医病因病机与辨证分型,阐述肺经风热、湿热蕴结、痰瘀凝结和冲任不调4种痤疮证型的基本特征与用药特点,以期为中医学理论指导祛痘化妆品的开发提供参考.

1 痤疮的病因病机研究

《素问·生气通天论》云:“劳汗当风,寒薄为皴,郁乃痤”,在医学文献中首载了痤疮的病因病机,指出痤疮是由于热邪、寒邪、风邪、湿邪郁于肌表,从而闭阻经络,导致脂凝邪聚而形成的^[2].《医宗金鉴》云:“此证由肺经血热而成,每发于面鼻,起碎疙瘩,形如黍屑,色赤肿痛,破出自粉汁.”^[3]《外科正宗·肺风粉刺酒齄鼻》曰:“粉刺属肺,齄鼻属脾,总皆血热,郁滞不散,所谓有诸内,形诸外”,又云“又有好饮者,胃中糟粕之味,熏蒸肺脏而成”^[4].由此可见,

古代医家多认为痤疮形成的主要病因是肺胃血热、风热^[2].近年来,各方医家对痤疮病因病机的认识逐渐加深,不仅对传统的肺热、风热、血热痤疮病因病机进行了补充,还提出了从心、肝、脾、肾论治,以及湿热、血瘀、气滞、痰结、热毒、阴虚、冲任失调等致生痤疮的新观点^[3].赵炳南等^[6]认为,饮食不节,过食肥甘厚味是痤疮的主要病因,肺胃湿热、外感毒邪则是其病机.朱仁康则将痤疮分为肺风型和痰瘀型两种,认为肺风型痤疮的主要治疗手段是清理肺热、凉血解毒,痰瘀型痤疮的主要治疗手段则以活血化瘀、消痰软坚为主^[7].陈达灿^[8]认为,肺风粉刺形成的主要原因在于先天素体肾阴不足,相火天癸过旺,再加上后天饮食失调,从而导致肺胃火热上蒸头面,血热郁滞,从而将肾阴不足、肺胃血热、痰游互阻和冲任失调归为痤疮形成的主要病因.俞若熙等^[9]认为,痤疮之发生多因素体阳热偏盛,或过食辛辣肥甘厚味食品,是以湿热体质为本,毒瘀痰结为标,主张从湿热体质论治痤疮.李玢钰等^[10]将痤疮按体质分为平和型、阳虚型、阴虚型、气虚型、痰湿与湿热型、气郁型、血瘀型、特禀型痤疮.有学者对近20年的痤疮中医文献进行了回顾性调查研究,指出痤疮的主要证型为肺经风热、湿热蕴结、痰瘀凝结和冲任不调4种类型^[11].

2 痤疮证型的辨证施治

所谓“有诸内,形诸外”,不同的发病机理决定了不同的外在体征.痤疮的治疗应结合个

体体质差异分析病因,辨证论治,有的放矢地选择药物.治疗的总原则是清热解毒、活血化痰、疏通经络.

2.1 肺经风热

肺经风热是指人体受风热之邪乘袭而发病.肺主表,上通于喉,开窍于鼻,外合皮毛,职司卫外,为华盖,性属娇脏,不耐邪侵.若腠理不密,风热之邪从口鼻、皮毛乘袭,使肺经血热郁滞,则肺卫失宣,皮毛被郁,邪毒肺热蕴于肌肤而致病^[11-12].肺经风热型痤疮多见于青春发育期的少男少女,表现为皮肤油滑光亮,颜面、胸背散在皮疹,针头至芝麻大小,色红,顶端有黑头,可挤出黄白色粉渣,亦可见脓头,常伴有敏感型皮肤表现^[13-14],对该型痤疮的治疗应以清热泻肺、凉血解毒为主.常用中药为黄芩、桑白皮、地骨皮、枇杷叶、生甘草、连翘、金银花、黄连、白花蛇舌草、生地、丹皮、桑叶、菊花、薄荷等^[15-16],其中桑叶、菊花、薄荷疏风清热,桑白皮和地骨皮清肺、泄热、生津,连翘和生甘草解肌表清疮毒^[17].若面部红斑明显,可加牡丹皮、大青叶、赤芍、凌霄花、野菊花;若皮肤容易过敏,则加浮萍、金银花、荆芥、防风;若面部油腻,则加重黄芩和知母用量,同时加生槐花、侧柏叶^[14].王敏^[18]用I号中药面膜粉(生大黄、连翘、金银花、紫草、蒲公英、黄芩、黄柏各10g)治疗以丘疹脓疱为主的皮疹,效果很好.

2.2 湿热蕴结

湿热蕴结型痤疮多是由于年轻人素体阳热偏盛所致,若长期暴饮暴食或过食辛辣肥甘厚味食品,则脾失健运,中焦运化不周,酿生湿浊,积久湿郁化热,聚于毛孔,热滞肌肤血络,外壅肌肤而发痤疮^[12],表现为颜面、胸背部皮肤油腻,丘疹色红、常伴脓疱,自觉红肿疼痛,伴口干口臭,大便秘结,小便黄^[19].对该型痤疮的治疗当以服用清热解毒、清化湿热、消痰散结类药物为主,可用黄芩、野菊花、金银花、栀子、牡丹皮、

赤芍、防风、连翘、白花蛇舌草、马齿苋等^[9,16].其中,黄芩可清热解毒,能有效抑制或杀灭引起痤疮的主要菌种,如痤疮丙酸杆菌;金银花清热解毒,凉血消疹;野菊花可用于缓解痈疽、疔肿、化肿等较严重症状;防风、连翘可引药于肌肤,疏肌表之邪^[20].解玉等^[21]采用中药面膜(银花、连翘、当归、丹参、茯苓、白术等加减)联合痤疮护理治疗66例面部寻常型痤疮,总有效率达89%,与仅施用痤疮护理治疗的对照组相比有显著性差异($P < 0.05$).张静萍^[22]用中药湿敷(蒲公英25g,黄芩25g,黄柏25g,白花蛇舌草50g,地丁25g,黄连5g)联合倒模治疗90例痤疮患者,对照组口服维胺酯胶囊,外用水氯酞洗剂,连续观察一个月,治疗组总有效率达100%,与对照组相比有显著性差异($P < 0.05$).

2.3 痰瘀凝结

痰瘀凝结型痤疮多见于男性或者肥胖之人,患者多皮肤粗糙,以结节、脓肿、囊肿、瘢痕为主,反复发作,经久难愈,渐成黄豆或蚕豆大小肿物,肿硬疼痛或按之如囊,日久融合,凹凸不平,或部分消退而遗留瘢痕^[13].痰瘀凝结是由于患者体内脾气不健、运化失调、水湿内停、日久成痰,湿热或痰热郁久阻滞,气血运行不畅,再与痰邪相结,凝滞肌肤而发病^[11].在治疗此类痤疮时,仅仅清热解毒、凉血化痰并不能收到很好的治疗效果,应以清化痰湿、消痰散结为主,具体可用陈皮、夏枯草、丹参、半夏、茯苓、甘草、薏苡仁、川贝、黄柏、生地黄、山药、车前子、归尾、赤芍、桃仁、红花等^[7,16].其中,半夏、茯苓燥湿化痰;陈皮、甘草理气和中,防风、连翘引药于肌肤;莪术、当归、桃仁、红花等活血祛瘀药可以减少囊肿和结节,同时有助于减轻皮损和色素沉着;当归、丹参不仅可活血化痰、养血润肤,还具有抑制痤疮丙酸杆菌、解毒、改善面部局部微循环、减少渗出、调节组织修复和再生等功能.

王敏^[18]针对结节囊肿为主的皮疹,施用II号中药面膜粉(夏枯草、益母草、紫花地丁、桃仁、丹参、鱼腥草、赤芍各10g),效果令人满意.陈琴等^[23]在治疗痰瘀凝结型痤疮时,多用药用金银花、连翘、紫花地丁、丹参、炒瓜蒌、土茯苓、皂角刺、淡竹茹、白鲜皮,以清热解毒,利湿化痰祛瘀.

2.4 冲任不调

冲任不调型痤疮多见于女性患者,是由冲任不和致气血壅滞而发病,皮疹常发于口周或下颌,患者面部丘疹、粉刺、脓疱的发生与月经周期关系密切,大多经前加重、经后减轻,伴有月经前乳房胀痛,烦躁易怒,月经不调,小腹胀痛等^[12,19].临床上使用频次较高的药物主要有益母草、香附、当归、柴胡、白芍、红花、丹参、女贞子等^[24].香附被称为“妇科之主帅”“气病之主帅”,具有较好的疏肝理气、调经止痛的功效^[25].研究发现,香附中的挥发油含有丰富的类雌激素作用,除可以理气活血外,还可以调节雄激素,治疗由于雄激素绝对或相对偏高而引起的痤疮^[26];当归,《雷公炮制药性解》云:“入心、肝、肺三经”,李杲:“当归梢,主癥癖,破恶血,并产后恶血上冲,去诸疮疡肿结”,可补血活血^[27].

3 痤疮辨证分型的化妆品研发

基于上述痤疮的病因病机与分证施治原则,在开发祛痘化妆品时,要以中医理论为指导,辨证施治,针对不同痤疮特点,设计痤疮功效产品.比如,杨彦洁等^[28]用疏风清肺汤联合中药药膜(黄芩、蒲公英、连翘等组成)治疗肺经风热型痤疮.杨彦洁^[16]用II号面膜(黄芩、黄连、紫花地丁、连翘、白花蛇舌草等组成)联合中药汤剂治疗肺胃湿热型痤疮,用III号面膜(黄芩、丹参、生地榆、虎杖等组成)联合中药汤剂治疗痰瘀互阻型痤疮,与内服丹参酮胶囊和外用维胺醋维乳膏的对照组相比,疗效均十分显著($P < 0.05$);目前适用于冲任不调型痤疮护

理的化妆品研发有待加强.此外,在组方时还应遵循配方君臣佐使的科学配伍思想,发挥中医药在治疗痤疮方面疗效明显、副作用少等优势,进一步挖掘中医药祛痘产品的市场应用潜力.

参考文献:

- [1] 吴小红,王煜明.分阴阳辨治痤疮临床心得[J].中国中西医结合皮肤性病学杂志,2013,12(1):61.
- [2] 李秀玉,王晓静,腰向颖.痤疮中医理论溯源[J].中医临床研究,2013(7):1.
- [3] 田晓翔,田鹰.肺风粉刺的中医病因病机理论探析[J].内蒙古中医药,2013,32(15):74.
- [4] 郭激,李咏梅.痤疮的中医药治疗研究述评[J].中医学报,2012,27(6):759.
- [5] 黄云,李丽琼.痤疮的病因病机及中医治疗进展[J].云南中医中药杂志,2014,35(6):83.
- [6] 赵炳南,张志礼.简明中医皮肤病学[M].北京:中国展望出版社,1983.
- [7] 中医研究院.朱仁康临床经验集[M].北京:人民卫生出版社,1979.
- [8] 陈达灿.皮肤性病科专病中医临床诊治[M].北京:人民卫生出版社,2005.
- [9] 俞若熙,倪诚,王琦.王琦教授从湿热体质论治痤疮的理论探析[J].中华中医药杂志,2012,27(4):878.
- [10] 李玢钰,吴景东.辨体质类型与证型治疗痤疮[J].中国美容医学,2011,20(2):340.
- [11] 李明亮,杨柳,黄文婧,等.基于杨柳教授4种证型分类的痤疮病因病机探讨[J].时珍国医国药,2010,21(2):456.
- [12] 周佳,陈力.中医药辨证治疗痤疮经验[J].吉林中医药,2008,28(4):261.
- [13] 孟宏.痤疮形成机理及祛痘产品开发和临床实验[J].中国化妆品,2010(14):71.
- [14] 赵霞,李建伟.李斌教授诊疗痤疮学术思想探析[J].新中医,2010,42(4):95.



引用格式:张子衿,孟宏,李丽.传统中医药应用于老年止痒化妆品开发的初步探讨[J].轻工学报,2017,32(3):37-42.

中图分类号:TQ658;R268 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.007

文章编号:2096-1553(2017)03-0037-06

传统中医药应用于老年止痒化妆品开发的初步探讨

A preliminary study on traditional Chinese medicine in the development of senile antipruritic cosmetics

张子衿,孟宏,李丽

ZHANG Zi-jin, MENG Hong, LI Li

关键词:

中医药理论;老年性
瘙痒症;止痒化妆品;
辨证施治

北京工商大学 中国化妆品协同创新中心,北京 100048

China Cosmetics Collaborative Innovation Center, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

Key words:

traditional Chinese
medicine theory; senile
pruritus; antipruritic
cosmetics; syndrome
differentiation and
treatment

摘要:从老年性瘙痒症的发生机理入手,综述了现代医学和中医治疗老年性瘙痒症的状况,认为老年性瘙痒症的西医疗法治愈率不高,而出现不良反应的风险和复发率较高;而中医疗法效果显著,副作用小,复发率低。鉴于老年人通常较为抗拒就医,相比药物治疗,老年人对护肤品的接受程度更高,且护肤品的使用又较为方便快捷。因此,以中医药理论为指导,充分吸收现代科技成果,将辨证施治应用于老年止痒化妆品的开发,是进一步的研究方向。

收稿日期:2016-09-10

作者简介:张子衿(1992—),女,新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人,北京工商大学硕士研究生,主要研究方向为老年瘙痒的防治。

通信作者:李丽(1980—),女,辽宁省大连市人,北京工商大学副教授,博士,主要研究方向为化妆品植物原料研究与应用。

Abstract: Beginning with mechanisms of senile pruritus, the present situation of modern medicine and traditional Chinese medicine for the treatment of senile pruritus were analyzed. It was found that cure rate of western medicine treatment to senile pruritus was not high and the risk of adverse reactions and the recurrence rate were higher. However, the effect of traditional Chinese medicine was remarkable with small side effects and low recurrence rate. In view that the elderly are usually more resistant to medical treatment, compared to drug treatment, the elderly have higher acceptance of skin care products because of its convenience. Therefore, guiding by the traditional Chinese medicine theory, fully absorbing the achievements of modern science and technology, applying syndrome differentiation and treatment to the development of antipruritic cosmetics development will be the further research direction.

0 引言

老年性瘙痒症是一种无原发性皮肤损害、仅有瘙痒症状的皮肤病,多发于50岁以上的人群^[1]。老年性瘙痒症是老年人常见的皮肤病,杨洁等^[2]随机抽取912例唐山市60岁以上老年人,发现其中患老年性皮肤瘙痒症者达33.8%。目前,我国老年人口数量呈上升趋势,面临社会老龄化程度加深的形势^[3],老年医学越来越受到关注。老年性瘙痒症多发反复、病程缠绵,瘙痒发作时轻时重、时间长短不一,最初发于一处继而扩展至身体多处,瘙痒的皮肤表面通常干燥脱屑,容易引起患者抓挠继而引发皮损,严重者可能因感染引起疥疮溃疡、毛囊炎、淋巴管炎、淋巴结炎等^[4]。日常生活习惯与老年性瘙痒症的发病密切相关,饮食习惯、情绪变化、碱性洗涤剂的使用、穿衣习惯、日晒情况等,都是老年性瘙痒症的影响因素^[5]。皮肤瘙痒影响患者的睡眠质量,扰乱其睡眠时间,进而导致作息规律被打乱^[6],同时皮肤瘙痒也会对心理情感造成负面影响^[7],严重者甚至可能影响患者的身心健康。目前,对于该病现代医学的治疗手段大多从单一致病途径进行干预以达到缓解瘙痒的目的,治愈率不高且容易复发,而中国传统医学(中医)对老年性瘙痒症的治疗取得了一定的临床效果。本文拟从老年性瘙痒的发生机理入手,分析讨论现代医学和中医治疗老年性瘙痒症的状况,并对传统中医药应用于老年止痒化

妆品开发提出初步建议。

1 传统中医关于皮肤瘙痒的记载

中医称瘙痒为痒风或风瘙痒,最早记载瘙痒的古籍为《诸病源候论》,又称《诸病源候总论》《巢氏病源》,隋代巢元方等撰于大业六年(公元610年),是中国最早的论述以内科为主的各科病因和症候的专著,对其临床病症进行系统分类,阐述了瘙痒形成的原因:“风瘙痒者,是体虚受风,风入腠理,与血气相搏,而俱往来,在皮肤之间。邪气微,不能冲击为痛,故但瘙痒也。”^[8]唐朝孙思邈所著《千金方》^[9]也对瘙痒有相关记载,“痒证之一,血虚皮肤燥痒……或通身痒,或面痒,如虫行皮中……风邪客于肌中,则肌虚,真气发散,又被寒邪搏于皮肤,外发腠理,开毫毛,淫气妄行之,则为痒也”,指出风邪是瘙痒症的重要病因,以内服秦艽散治之。著名的元代宫廷医家许国祯于至元四年(公元1267年)刻板成书的《御药院方》^[10]记载,可用何首乌散热洗风痒疮患处。此外,《医林纂要探源》《证治准绳·疡医》《解围元藪》《圣济总录》《外台秘要》等^[11-15]古籍均有缓解瘙痒症状的古方记载,可见中医对皮肤瘙痒的研究历史悠久,中药应用于缓解治疗瘙痒有大量的临床经验。

2 中西医治疗老年性瘙痒症的状况

2.1 现代医学治疗老年性瘙痒症的状况

现代医学认为,老年人皮肤瘙痒的发生机

制尚不十分明确,引起老年人皮肤瘙痒的主要因素有皮肤屏障功能受损、免疫系统衰老和神经性改变,皮肤病、免疫系统疾病和神经性疾病会引起瘙痒^[16]。干燥症、皮肤 pH 值的变化、皮脂腺和汗腺活动减少等都能导致皮肤屏障功能受损,进而引起皮肤瘙痒。免疫系统衰老影响先天性和适应性免疫,并与自身免疫反应增加有关,从而诱发瘙痒^[17]。组胺、蛋白酶、P 物质、阿片样物质、NGF 和前列腺素、神经递质、肽酶、5-羟色胺、白介素-2、白介素-6、白介素-31、TNF- α 等瘙痒介质也可引发瘙痒。神经末梢出现与年龄相关的改变,疼痛性神经纤维传入功能缺陷,使中枢抑制瘙痒的功能出现障碍,导致通过疼痛抑制瘙痒感的效果减弱^[18]。西医治疗皮肤瘙痒的方法主要有口服抗组胺、抗焦虑药,外用润肤剂、糖皮质激素、免疫调节剂、薄荷醇、辣椒碱、局部麻醉剂、水杨酸等。但是,瘙痒可能由单一机制引发,也可能由多个机制相互影响、共同作用而产生,仅从单一机制入手治疗效果不佳,尤其是过度使用糖皮质激素会引发不良反应,导致皮肤萎缩,而免疫调节剂和辣椒碱的使用可能引起暂时的灼烧感,老年患者依从性差^[19]。

2.2 中医治疗老年性瘙痒症的状况

中医认为,老年性瘙痒症的病因主要是老年人五脏虚损,气血化生不足,精血亏损,皮肤失养而致干燥,血虚生风导致瘙痒,气滞血瘀使瘙痒加重。郑楠等^[20]指出,随着年龄增长,肝肾亏损,血虚不能濡养肌肤是为根本。血虚导致生风化燥的原因,一为气血虚弱运行不畅,二为邪气客于肌肤,日久脉道阻塞。田园等^[21]认为,老年性瘙痒症是风邪久留体内,化火生燥,以致津血枯涩,致肌肤失养。此外,风热、风寒或湿热之邪也是引发皮肤瘙痒的原因。血热生风致皮肤瘙痒,可用清热凉血法。外寒束于肌腠,则营卫不和致瘙痒,遇寒加重,多发于冬季,可从疏散

风寒、调和营卫入手治疗。风邪每多挟热,外侵肌腠搏击于皮肤,遇热加重,多发于夏季,可施以疏散风热法。湿邪郁于皮肤不得宣泄致痒,多发于潮湿之地,以健脾祛风除湿为主。朱仁康将老年性瘙痒症分为 7 型,即血热型、血虚型、血瘀型、风盛型、风湿型、阴痒型、风寒型,其医治分别施以凉血清热、消风止痒之法,养血润燥、消风止痒之法,活血化瘀、消风止痒之法,搜风清热、败毒止痒之法,祛风胜湿、和中止痒之法,补益肝肾、养血熄风之法,祛风散寒、调和营卫之法^[22]。薛梅等^[23]对老年性瘙痒症的研究较为成熟,将其细分成 9 个类型,即血虚风燥型、肝肾阴虚型、营卫不和型、阴阳两虚型、脾肾阳虚型、血瘀生风型、胃阴亏虚型、燥热伤肺型、气血两亏型,根据其类型因病施药。

2.2.1 血虚风燥型 血虚风燥型老年性瘙痒症是由老年人五脏虚损,血虚生风,风邪化火生燥导致的,多采用益气养血润燥,疏风止痒,补益肝肾之法。安丽凤等^[24]用当归饮子合二至丸治疗 30 例血虚风燥型老年性皮肤瘙痒症患者。其当归饮子合二至丸由当归、生地、何首乌、黄芪、白芍、荆芥、防风、川芎、白蒺藜、女贞子、旱莲草、甘草组成,养血滋阴,益气固表而不留邪,疏散风邪而不伤正,有效率为 78.60%,效果显著。当归调养营血以治其本,可提高机体免疫力,抑制 I、II、III、IV 型变态反应;生地、何首乌养血滋阴;黄芪益气固表;白芍养血柔肝,抑制花生四烯酸代谢;荆芥、防风透散开泄肌表皮毛,疏风祛邪;川芎行气活血,可降低 Th2 型细胞分泌白介素-6;白蒺藜祛风止痒;甘草调和诸药,甘草甜素可抑制致敏大鼠花生四烯酸的释放。穆怡^[25]将当归饮子联合祛风洗剂应用于血虚风燥型老年性皮肤瘙痒症的治疗,该祛风洗剂的主要成分是白芍、丹皮、紫草、青蒿、防风、芒硝、地肤子,其疗效显著,不良反应小且复发率较低。白芍清热凉血、养血敛阴;丹皮清热

凉血;紫草凉血活血;青蒿清透虚热;芒硝清热润燥;地肤子祛风止痒. 梁瑞^[26]用养血止痒片配合外用消炎止痒霜治疗血虚风燥型老年性皮肤瘙痒病患者45例,养血止痒片由熟地、当归、白芍、丹皮、牡砺、甘草、酮替芬制成,治疗效果显著,有效率达82.22%. 张欢欢^[27]使用润肤止痒汤联合马来酸氯苯那敏和肤舒止痒膏治疗血虚风燥型老年性皮肤瘙痒症,润肤止痒汤主要成分为熟地、当归、麦冬、桃仁、红花、知母、地肤子、荆、防风、白蒺藜、白僵蚕、白鲜皮、黄芩、夜交藤、甘草,治疗效果较好,不良反应发生率小且能明显提高患者生活质量. 李艳^[28]用口服中药养血解郁汤加外擦蛇黄软膏治疗血虚风燥型老年性瘙痒症,养血解郁汤的主要成分为当归、生地黄、川芎、白芍、刺蒺藜、防风、柴胡、香附、茯苓、合欢皮、首乌藤、炙甘草,总有效率为81.25%,治疗效果明显.

2.2.2 肝肾阴虚型 肝肾阴虚型老年性瘙痒症的病因主要是老年人五脏技能渐衰、肾精日亏致不能濡养肌肤,肝气亏虚,其调节气与津液功能衰退,腠理气血水湿瘀滞,腠理失养,阴虚内热,热扰内风,风扰筋脉皮肤,则发为瘙痒,治疗应以滋补肝肾、祛风通络为主. 王莹^[29]用中药首乌地黄汤加味治疗肝肾阴虚型老年性瘙痒症,成分为制首乌、生地、山萸肉、淮山药、泽泻、刺蒺藜、女贞子、旱莲草、乌梢蛇、僵蚕、牡丹皮、泽泻、刺蒺藜燥湿、利湿、疏风,旱莲草双向调节白介素-2,僵蚕、牡丹皮清热解毒,疏散风热,首乌地黄汤加味滋补肝肾之阴,佐以祛风、通络、止痒等功效,不良反应少,疗效较好.

2.2.3 营卫不和型 营卫不和型老年性瘙痒症是卫气逆乱的表现,应充养肌肤,主要协调营卫,加强卫气的温煦、防御作用. 黄庆云^[30]用桂枝汤加何首乌、防风,治疗营卫不和型老年性瘙痒症,效果明显. 桂枝,振奋人体阳气,利于驱邪外出,具有免疫调节作用;何首乌可调节免疫;

防风疏风祛邪.

2.2.4 阴阳两虚型 阴阳两虚型老年性皮肤瘙痒症遇热遇冷均易发作,是阴盛阳亏,多属阴阳两虚,虚风外扰所致. 由于老年人肾中元阴元阳不足,阴虚生风,阳虚则肌肤失于温润,导致皮肤干燥瘙痒,应主要通过调理阴阳,兼养血熄风止痒. 赵龙等^[31]运用二仙汤加熟地、防风治疗阴阳两虚型老年性瘙痒症,有效率达90.60%. 二仙汤的主要成分为仙茅、仙灵脾、巴戟天、知母、黄柏、当归,其中仙茅、仙灵脾、巴戟天通达肌肤,知母、黄柏清热养阴,调理阴阳,当归调冲任养血,熟地可加强养血润燥的效果.

2.2.5 脾肾阳虚型 脾肾阳虚型老年性瘙痒症多出现四肢欠温、食少便溏等症状,且与疲劳有密切的关系,这是脾肾阳虚的表现,治疗应以补脾强胃、温肾助阳、固本清源为主. 陈岩^[32]以乌梅汤(丸)基本方治疗脾肾阳虚型老年性瘙痒症,乌梅汤(丸)由乌梅、党参、当归、细辛、干姜、桂枝、制附子、黄柏、黄连、川椒组成,疗效显著,复发率较低. 乌梅为君,敛肺涩肠,通达肌表,细辛、干姜、桂枝、制附子、黄柏补阳、坚阴、和营、活血、清热、燥湿.

2.2.6 血瘀生风型 血瘀生风型老年性瘙痒症是由老年人气血不足,血虚生风,阴亏血涩脉络瘀阻,血瘀失养,气血不能濡养肌肤所致. 李艳彦等^[33]认为老年性皮肤瘙痒与脏腑气血失调,即与肺气虚、肝血虚、血虚生风和气血虚致血瘀络阻有关,用具有益肺气养肝血、化瘀通络、柔肝润燥、祛风而止痒作用的黄芪桂枝五物汤治疗该类老年性瘙痒症,疗效较好. 黄芪桂枝五物汤由黄芪、白芍、桂枝、生姜、大枣组成. 周卫东等^[34]在消风散原方上加用紫草、红花和牡丹皮而成紫红消风散,加强其活血化瘀之功效,对血瘀生风型老年性瘙痒症的治疗总有效率为90.00%,短期和长期疗效均高于抗组胺药,不

良反应率低。

2.2.7 胃阴亏虚型 胃阴亏虚型老年瘙痒症人群存在轻重不一的纳差、便溏等脾胃虚寒之证。王尊壮^[35]以脾胃论治胃阴亏虚,用益胃止痒汤治疗胃阴亏虚型老年性瘙痒症。益胃止痒汤的主要成分为乌梅、白术、沙参、石斛、绿萼梅、木瓜、蝉蜕、白鲜皮、防风、槐花、甘草。该方有养阴益胃、生发胃气、祛湿止痒等功效,随症加减,疗效显著,尚未出现复发的状况。

2.2.8 燥热伤肺型 燥热伤肺型老年性瘙痒症是由老年人血虚生风生燥所致。肺为娇脏,燥邪最易伤之,肺主由皮毛之功能失调而致肌肤失养者,主要通过清宣燥热,益气生津,润肺降逆进行治疗。赖建志^[36]以清燥救肺汤治疗该类老年性瘙痒症。清燥救肺汤由桑叶、煅石膏、人参、甘草、胡麻仁、真阿胶、麦门冬、杏仁和枇杷叶煎煮而成,疗效理想。

2.2.9 气血两亏型 气血两亏型老年瘙痒症人群多体虚五脏虚损,气血化生不足,精血亏损。吴江等^[37]用八珍汤治疗气血两亏型老年性瘙痒症。八珍汤的主要药物成分为人参、白术、白茯苓、当归、川芎、白芍药、熟地黄、甘草等。

3 中西医结合开发老年止痒化妆品的思考

由现代医学和中医治疗老年性瘙痒症的状况可知,西医疗法治疗老年性瘙痒症的疗效欠佳,存在出现不良反应的风险,复发率高,而中医疗法从根源上调理机体功能,治标治本,效果显著,副作用小,复发率低。但是中医疗法的效果不能迅速体现,需要长期坚持,且用药方法比较复杂,对于年老体弱、行动不便的老年患者,临床上可根据病情状况选择合适的方法,也可选择中西医结合的疗法。虽然瘙痒症影响老年人的身心健康,但是在没有明显其他病征的情况下,老年人通常较为抗拒就医,因此应提前预

防老年性瘙痒症的发生,在没有瘙痒症状或瘙痒症状较为轻微的时候就应该注意保持良好的生活习惯。老年人也需要注重护肤,平时注意保湿用品的使用。相比药物治疗,老年人对护肤品的接受程度更高,且护肤品的使用又较为方便快捷。因此,以中医药理论为指导,充分吸收现代科技成果,将辨证施治应用于老年止痒化妆品的开发,是进一步研究的方向。可考虑将一些常用止痒中药用于化妆品配方,比如,可将有活血、缓解皮肤瘙痒功效的凌霄花、细叶益母草,有抗炎、缓解皮肤瘙痒功效的素馨花、山茱萸,有抗组胺功效的徐长卿、葛根、厚朴、甘草、当归、藁本、柴胡、香薷,有清热燥湿疏风止痒、抗菌功效的鱼腥草、苦参等,辨证施治应用于止痒化妆品的开发中。

参考文献:

- [1] 徐佩红,袁定芬,丁徐安. 瘙痒症患者瘙痒与生活质量状况的调查研究[J]. 中国中西医结合皮肤性病学期刊,2012,11(3):154.
- [2] 杨洁,窦娜,马素慧,等. 唐山市老年皮肤瘙痒症影响因素[J]. 中国老年学杂志,2014,34(18):5205.
- [3] 蔺雪芹,王岱,王女英,等. 北京市老年人口空间分布格局特征及驱动力[J]. 地域研究与开发,2016,35(3):158.
- [4] 赵党生. 王文春教授诊治老年性皮肤瘙痒症经验[J]. 甘肃中医学院学报,2014(6):16.
- [5] 李丹,窦娜,马素慧,等. 老年皮肤瘙痒症的危险因素分析[J]. 中国全科医学,2013,16(26):3062.
- [6] 杨洁,贺晶,漆军,等. 男性老年瘙痒症患者瘙痒与生活质量关系的评价研究[J]. 中华老年多器官疾病杂志,2009,8(2):152.
- [7] DESAI N S, POINDEXTER G B, MONTHROPE Y M, et al. A pilot quality-of-life instrument for pruritus[J]. Journal of the American Academy of Dermatology, 2008, 59(2):234.

- [8] 巢元方. 诸病源候论[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2011.
- [9] 孙思邈, 张瑞贤. 千金方[M]. 北京:华夏出版社, 1993.
- [10] 许国桢. 御药院方[M]. 北京:中医古籍出版社, 1983.
- [11] 江凌圳. 《医林纂要探源》版本考证[J]. 浙江中医杂志, 2016(1): 67.
- [12] 王肯堂. 证治准绳(四)癩医[M]. 北京:人民卫生出版社, 2014.
- [13] 沈之问. 解围元藪[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1959.
- [14] 赵佶. 圣济总录:下[M]. 北京:人民卫生出版社, 1962.
- [15] 王焘. 外台秘要[M]. 北京:人民卫生出版社, 1955.
- [16] BERGER T G, STEINHOFF M. Pruritus in elderly patients-eruptions of senescence[J]. Seminars in Cutaneous Medicine & Surgery, 2011, 30(2): 113.
- [17] WHITE-CHU E F, REDDY M. Dry skin in the elderly: complexities of a common problem[J]. Clinics in Dermatology, 2011, 29(1): 37.
- [18] VALDES-RODRIGUEZ R, STULL C, YOSIPOVITCH G. Chronic pruritus in the elderly: pathophysiology, diagnosis and management[J]. Drugs & Aging, 2015, 32(3): 201.
- [19] 刘彤云, 何黎. 老年性瘙痒的病理生理及其治疗[J]. 皮肤病与性病, 2013, 35(6): 331.
- [20] 郑楠, 张宇波, 刘伟玲, 等. 李治牢教授治疗老年皮肤瘙痒症经验介绍[J]. 新中医, 2008, 40(7): 9.
- [21] 田园, 高普, 宋芊, 等. 高普教授治疗老年性皮肤瘙痒症临床经验总结[J]. 世界中西医结合杂志, 2015(12): 1657.
- [22] 李社改. 朱仁康治疗风瘙痒经验[J]. 辽宁中医杂志, 2005, 32(11): 1117.
- [23] 薛梅, 陈宏. 老年瘙痒症的中医治疗进展[J]. 西部中医药, 2015(2): 138.
- [24] 安丽凤, 黄敬文, 吴俊荣, 等. 当归饮子合二至丸治疗血虚风燥型老年皮肤瘙痒症的疗效观察[J]. 中国民族民间医药, 2012, 21(12): 94.
- [25] 穆怡. 当归饮子联合祛风洗剂治疗血虚风燥型老年性皮肤瘙痒症临床观察[D]. 武汉:湖北中医学院, 2009.
- [26] 梁瑞. 养血止痒片及消炎止痒霜治疗血虚风燥型老年性皮肤瘙痒病临床研究[D]. 广州:广州中医药大学, 2005.
- [27] 张欢欢. 润肤止痒汤治疗血虚风燥型老年性皮肤瘙痒症的临床观察[D]. 济南:山东中医药大学, 2013.
- [28] 李艳. 养血解郁汤治疗老年性皮肤瘙痒症(血虚风燥证)的临床疗效观察[D]. 成都:成都中医药大学, 2014.
- [29] 王莹. 首乌地黄汤加味治疗老年性瘙痒症(肝肾阴虚型)的临床疗效观察[D]. 成都:成都中医药大学, 2012.
- [30] 黄庆云. 解表法治疗皮肤病的营卫机理探讨和临床运用[D]. 广州:广州中医药大学, 2014.
- [31] 赵龙, 刘耀辉. 二仙汤加熟地、防风配方颗粒治疗老年皮肤瘙痒症 85 例[J]. 湖南中医杂志, 2013, 29(7): 58.
- [32] 陈岩. 乌梅丸治疗老年性皮肤瘙痒症 41 例临床观察[J]. 求医问药(学术版), 2011, 9(12): 408.
- [33] 李艳彦, 王永辉, 张永刚, 等. 黄芪桂枝五物汤从肺肝论治老年性皮肤瘙痒理论探析[J]. 山西中医学院学报, 2013, 14(2): 49.
- [34] 周卫东, 匡琳, 杨年华, 等. 紫红消风散治疗老年性皮肤瘙痒症的临床观察[J]. 湖南中医药大学学报, 2009, 29(1): 53.
- [35] 王尊壮. 益胃止痒汤治疗老年瘙痒症 32 例[J]. 新中医, 2004, 36(1): 64.
- [36] 赖建志. 清燥救肺汤的理论与临床应用文献研究[D]. 北京:北京中医药大学, 2010.
- [37] 吴江, 林谦平. 八珍汤加减治疗老年性皮肤瘙痒症 36 例[J]. 实用中医药杂志, 1999, 15(6): 9.



引用格式:姚二民,周利军,李晓,等.微波膨胀烟梗技术及其应用研究进展[J].轻工学报,2017,32(3):43-50.

中图分类号:TS43 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.008

文章编号:2096-1553(2017)03-0043-08

微波膨胀烟梗技术及其应用研究进展

Progress of technology and application for microwave expanded tobacco stem

姚二民¹,周利军¹,李晓¹,丁美宙²,景天¹,郑力文¹,江雪彬¹,
王海滨²

YAO Er-min¹,ZHOU Li-jun¹,LI Xiao¹,DING Mei-zhou²,JING Tian¹,
ZHENG Li-wen¹,JIANG Xue-bin¹,WANG Hai-bin²

1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001;

2. 河南中烟工业有限责任公司 技术中心,河南 郑州 450000

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Technology Center, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China

关键词:

微波膨胀;梗丝质量;
卷烟降焦减害

Key words:

microwave expanded;
quality of cut stem;
reducing tar and harm
of tobacco

摘要:烟梗作为烟叶的重要组成部分,具有填充性高、燃烧性好等特点,经微波膨胀处理后,其理化性质、感官品质等有较大改善.基于对微波膨胀烟梗设备、影响因素、加工工艺在卷烟中的应用效果等方面的最新研究成果的综述,指出今后的研究应主要从以下几方面进行:1)优化微波膨胀烟梗关键加工工序工艺参数,建立其与梗丝质量指标的关系模型;2)利用生化与加香技术,提高梗丝感官品质;3)开发微波膨胀烟梗生物质材料方向研究;4)结合卷烟辅助材料,研究微波膨胀烟梗梗丝对卷烟降焦减害的影响;5)研发与工业应用相匹配的烟梗微波膨胀设备.

收稿日期:2016-08-01

基金项目:烟草行业烟草加工形态研究重点实验室资助项目(ZW2014034)

作者简介:姚二民(1961—),男,河南省襄城县人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为烟草工艺.

通信作者:李晓(1967—),女,河南省南阳市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为烟草工艺.

Abstract: As an important part of tobacco leaf, tobacco stem has high filling value, well combustibility. Its physical and chemical property, sensory quality were improved after expanded by microwave. The paper made an overview of process of tobacco stem microwave expansion equipment influential factors, and application of processing technology in cigarette for microwave expanded stem, pointing out that the future research should be mainly from the following prospects: 1) optimizing the key processing parameters of microwave expanded stem and building models between parameters and quality index of cut stem; 2) using biochemical and flavoring technology to improve the sensory quality of cut stem; 3) developing the study of biomass material for microwave expanded stem; 4) combining with cigarette auxiliary materials, comprehensively analysing the effect of cut stem on reducing tar and harm of cigarette; 5) research and development and industrial applications to match the tobacco stem microwave expansion equipment.

0 引言

微波具有加热效率高、加热内容可选、加热过程易控等特点,目前被广泛应用于纸张、木材等的干燥,以及医学和食品工业中的杀菌等^[1-3].微波技术在烟草行业主要应用于烟草化学成分分析^[4-7]、烟草安全性处理^[8-9]、梗丝膨胀、烟草薄片加工、烟丝膨胀^[10-13]、防霉杀虫^[14-15]等方面.用微波处理烟梗的工艺最早由美国的 Z. B. Roger^[16]于1968年提出,并获得美国专利,但该工艺在微波处理过程中发生的焦糊难以控制.烟梗经微波膨胀处理后其理化性质、感官品质等有较大改变.本文对微波膨胀烟梗设备、影响因素、加工工艺、在卷烟中的应用等方面的研究进展进行综述,以期为提高烟梗利用率和梗丝加工质量提供理论依据.

1 微波膨胀烟梗的设备

目前,烟梗膨胀技术主要有两种,即汽爆技术和微波技术,前者对设备条件要求较高,而后者可以在极短时间内提高物料温度,在相同温度下加快反应速度,因而可以缩短加热时间,加快升温速度,有利于烟梗的膨胀.

2004年,冯春堂等^[17]设计了一种多波源多馈口微波膨胀烟梗装置,包括微波磁控管、驱动电源、加热箱体、进出料口上的抑制段等,该装置加热速度快,膨胀效果较好.2006年,汤马

斯·亨利·怀特^[18]利用高温蒸汽和文氏管的原理使烟梗膨胀,所制备的梗丝有较高的填充值.2011年,梁贵安等^[19]在研究84 kW微波烟梗膨胀生产试验装置控制系统时,采用微波对烟梗进行膨胀处理并进行了工业化试验.2012年,许琨敏等^[20]发明了一种滚筒式烟梗连续微波膨胀设备,但是该设备不能有效控制膨胀后烟梗中的水分,功率密度低且不均匀,膨胀效果差.

现有的微波膨胀设备波源比较单一、过程控制能力较差,影响烟梗的膨胀效果和后续加工质量,其改进方向应该是:在满足烟梗膨胀效果的同时,保证烟梗膨胀的均匀性.

2 微波膨胀烟梗的影响因素

烟梗经微波处理后,其理化性质发生较大变化,而膨胀率作为其膨胀特性的具体体现受许多因素的影响.

2.1 微波参数

高锐等^[21]研究微波膨胀对烟梗品质的改善作用,确定了烟梗微波膨胀的最佳条件:膨胀时间45 s,烟梗含水率20%,微波功率630 W.陈晶铃等^[22]通过对烟梗进行微波膨胀,确定了烟梗微波膨化的影响因素.结果表明,膨化效果最佳条件为烟梗含水率18%~21%,膨化时间约70~80 s,膨化烟梗无碳化现象.W. H. Zi等^[23]采用响应面法,优化微波膨胀烟梗制备生

物质材料. 结果表明:响应面法适合表征膨胀率与自变量之间的关系;优化参数为蒸汽压 0.35 MPa,微波功率 6 kW,搅拌频率 15 Hz,最大膨胀率 261.12%,所建模型相对误差为 3.45%. 李晓等^[24]研究了微波膨胀功率对烟梗质量的影响,对比分析了烟梗膨胀率、化学成分和微观结构的差异. 结果表明,当微波功率为 30~33 kW 时,膨胀烟梗综合质量较好.

2.2 烟梗原料

资文华等^[25]对云南典型烟区主栽品种烟的烟梗原料进行了微波膨胀特性测试,探讨了烟梗原料的膨胀特性差异. 结果表明,烟梗膨胀特性,在不同产地、品种、部位间表现出不同规律. 杨威等^[26]分析了微波膨胀处理对 3 个烤烟品种(K326,云烟 87,红大)烟梗化学成分、主要致香成分含量和显微结构的影响. 结果表明:微波处理使不同品种烟梗中的细胞壁物质、全纤维素、总糖、还原糖含量降低,主要致香成分含量增加,微观变化明显. 廖晓祥等^[27]研究了不同来源烟梗原料经相同微波膨胀工艺处理后的品质差异. 结果表明:不同产地烟梗经过微波膨胀所制得的梗丝常规化学成分、致香成分、主流烟气存在差异;不同年份烟梗经过微波膨胀所制得的梗丝,其感官品质差异不明显;不同产地、品种、部位烟梗所制得的样品其感官品质存在差异.

2.3 微波介质

烟梗具有致密的孔隙结构和完整的纤维气室,其强度和韧性均较高且含有极性水分子,具有强烈吸收微波的介电特性. 因此,可以通过高压和高热等技术对烟梗进行膨胀,进而获得膨胀率较高的烟梗.

周川等^[28-30]分别使用微波低损耗固体介质颗粒和气体作为热媒,制得膨胀烟梗产品. 马铁兵等^[31-32]设计了一种使用饱和蒸汽或过热蒸汽连续进行烟梗膨胀处理的设备,通过在线

膨胀设备于切丝前预先处理烟梗,避免了对筛分的短梗进行再切,减少了工序环节. 李军等^[33]将烟梗分别在氮气和空气中进行微波膨胀,对制得颗粒的质量进行了对比分析. 结果表明:两种处理方式对所制样品理化性质的影响不大,但对其挥发性致香成分的影响较大,氮气环境下所制得样品的绝大部分,挥发性致香成分含量和感官品质均高于空气环境.

2.4 制梗丝前处理条件

一般情况下,在烟梗膨胀之前需先对其进行回潮处理,使烟梗获得必要的水分以保持烟梗良好的均匀性和柔性,这直接关系着膨胀烟梗的质量. 卓卫民^[34]先对烟梗洗梗或浸梗,利用微波加热使烟梗外部的表面明水完全进入烟梗内部,然后将烟梗送入储梗设备储存. 赵云川等^[35]提出,通过原料准备、定量喂料、烟梗增温后再进行微波膨胀,能够满足专业化、大型化和连续化的微波膨胀烟梗加工需求. 满鸣等^[36]先将烟梗进行分级,再浸渍回潮,在真空条件下微波加热膨胀烟梗,并进一步在真空条件下采用两种以上连续的不同微波输出功率进行微波加热膨胀. 赵云川等^[37]首先将烟梗进行微波膨胀,然后采用风分设备剔除膨胀率较低、密度较高的烟梗,提高了梗丝填充值和密度均匀性,降低了卷烟烟气焦油释放量的批内波动,卷烟燃烧性较好.

2.5 陈化条件

对于微波膨胀烟梗,必须储存一段时间,使膨胀的组织结构达到稳定状态,再经人工补水回潮后,才能满足后续卷烟工艺需要. 然而,膨胀烟梗在储存过程中受外界环境的影响易导致膨胀效果变差,进而影响烟梗后续加工中的关键物理特性. 小川高志等^[38-39]在研究烟丝膨胀的过程中发现:膨胀烟丝在自然条件下陈化回潮 7 d 后填充值较高. 武怡等^[40]也提到膨胀烟梗冷却至 ≤ 25 °C 后,置于阴凉、通风的环境中

贮存1—3个月后,才能进行回潮后续加工.李军等^[41]研究了陈化时间对微波膨胀烟梗关键物理特性的影响.结果表明:随陈化时间的增加,膨胀烟梗体积呈现先降低,7 d后趋于稳定的趋势,陈化时间对其成品颗粒的填充值具有一定的影响,而对成品得率的变化影响较小.之后,李军等^[42]利用高压脉冲电场和将微波膨胀烟梗处理后分别陈化不同时间的方法,探讨了高压脉冲电场和陈化时间对微波膨胀烟梗萎缩的影响.结果表明:经高压脉冲电场处理的样品陈化8 d后,其含水率和萎缩率基本稳定.

从以上研究可以看出,微波处理后,膨胀烟梗的物理性质、显微结构、化学成分、感官品质均得到一定的改变和提升.但不同烟梗原料微波膨胀的系统性研究较为缺乏,而建立和完善不同原料的微波膨胀体系,将有助于提高烟梗的利用率.

3 微波膨胀烟梗加工工艺

微波膨胀烟梗的加工工艺主要是造粒和制丝.

3.1 造粒工艺

烟梗膨胀造粒技术是近年来在国外出现的烟草加工新技术,指的是以烟梗、细梗、梗签、梗块为原料,经膨胀、回潮、造粒、定型等一系列工艺处理后,最终形成不规则颗粒状烟梗材料的技术.对于微波膨胀烟梗,多将其加工制备成颗粒状或丝状,其加工方式和过程对其质量有一定影响.

资文华等^[43]研究了不同造粒方式对烟梗颗粒产品质量的影响.结果表明:不同造粒方式对生产过程的物料损耗率、生产能力、耗电量、合格颗粒得率和成品填充值的影响较大,但对产品的内在感官品质影响较小,且锤片式造粒方式较好.此外,正交试验结果表明,物料含水率16%左右、造粒次数2—3次比较合理^[44].杨

涛等^[45]采用3种不同工艺制备膨胀梗粒,结果表明:膨胀后烟梗结构中的片状、层状结构消失,长度变化不显著,宽度和厚度显著增加;总糖、还原糖含量明显减少,烟碱、总氮、氯和钾含量没有显著变化;部分挥发性成分(主要为呋喃类)的相对含量有显著变化.

3.2 制丝工艺

何炬等^[46]比较了采用微波膨胀烟梗方法制成的梗丝与常规方法制成的梗丝之间的差异.结果表明:微波膨胀烟梗方法可以改善吸味品质,增加烟香,与李涛等^[47-48]研究结论相似;此外,还可以提高填充值和成丝率,对协调叶组配方有明显效果.邹泉等^[49]通过均匀试验设计分析了二次切丝工艺参数对梗丝质量的影响.结果表明:整丝率、填充值与切片厚度、切丝宽度极显著正相关,碎丝率与切片厚度、切丝宽度为极显著负相关;切片厚度0.75~0.85 mm,切丝宽度0.30~0.35 mm时,微波膨胀梗丝的综合品质最优.董高峰等^[50]以某品牌卷烟的烟梗配方模块为对象,对微波膨胀烟梗制丝工艺的7种关键工艺进行均匀试验设计,建立了微波膨胀烟梗工艺参数的BP神经网络模型,对3个部位模块的工艺参数进行仿真、优化,最终挑选出不同部位烟梗的最佳工艺参数组合和不同部位烟梗的混配比例.邹泉等^[51-52]为提高微波膨胀烟梗所制梗丝的品质和纯净度,在切片与切丝之间设置风选工序,先将不合格样品分离出来,再进行切片,既降低了膨胀烟梗被切成梗片的消耗,又避免了剔除梗片设备的设置,且最终获得的膨胀梗丝纯净度较高.

由此可知,采用微波膨胀烟梗方法制成的梗丝与常规方法制成的梗丝相比,致香成分增加,吸味得到改善.但对于制丝关键加工工序的工艺参数和设备研究较少,且与主要工艺品质指标之间相关性分析的研究需要加强.

4 微波膨胀烟梗在卷烟中的应用

目前烟梗加工后应用于卷烟配方主要有3种方法,即传统的高温高湿形成丝状片状的材料^[53]、ESS梗屑膨胀技术^[54-55]、叶丝微波膨胀与干燥技术^[56]。3种方法制备的梗丝与颗粒均具有较高的填充性,但前两者的后续耐加工性和对烟梗固有杂气的去除效果不甚理想^[57-59]。近年来,卷烟企业为降低烟丝消耗和烟气焦油量,膨胀梗丝在卷烟配方中掺兑的占比越来越高。但由于膨胀梗丝存在颜色发白、燃吸时香气淡薄和杂气木质气较重、刺激性较大等缺陷,在一定程度上限制了其在卷烟中的用量^[60]。王慧等^[61]将微波膨胀烟梗制备成颗粒添加到卷烟中,顺利通过卷烟生产线。只是,随着颗粒在其中占比的增加,卷烟质量呈下降趋势:百支卷烟糖碱比和氮碱比逐渐升高,烟气化学成分含量降低。当其占比为6%~15%时,卷烟感官品质、吸食风格无明显变化;当其占比达20%时,感官品质和吸食风格均有一定变化。尧珍玉等^[62]将膨胀烟梗颗粒添加到卷烟滤嘴中,降低了卷烟焦油和卷烟主流烟气中的苯并[a]芘含量,提升了卷烟香气浓度,减少了刺激性。金哲等^[63]采用均匀设计研究不同梗丝、不同掺配比例对卷烟质量的影响,结果表明:适当增加颗粒状梗丝和丝状梗丝以替代片状梗丝,可在一定程度上提高卷烟综合品质。赵莉等^[64]采用蒸汽-微波协同膨胀技术制备复合膨胀烟梗,掺配不同量的梗丝进行感官评吸,结果表明:杂气较轻、干净程度和回味较好,当掺配比例为15%时感官评价最好。丁美宙等^[65]对微波膨胀条状梗丝的理化性质进行了检测分析。结果表明:随着微波膨胀条状梗丝掺配比例的增大,卷烟的单支质量降低,其他物理指标增加;卷烟烟气成分减小;烟支自由燃烧特性改善。相同掺配比例梗丝与对照样(掺配传统梗丝)相比,掺配

微波膨胀条状梗丝的烟支物理质量稍差,吸阻标准偏差较大;烟支抽吸口数较少,烟气成分含量均较低;烟支自由燃烧速率较快,热塌陷值较小,包灰性能较好;可显著改善卷烟口感特性。

由此可以看出,由掺配微波膨胀烟梗制得的梗丝,卷烟的安全性得到提高,但仅限于在中低档卷烟中的应用,如何在保证卷烟综合品质不变或者提高的前提下,增加梗丝在中高档卷烟中的掺配比例,将是今后的研究方向之一。

5 结论与展望

近年来,对于微波膨胀烟梗的研究多集中于制备工艺和膨胀特性方面,关于微波膨胀烟梗加工工艺和在卷烟中的应用方面的研究较少。因此,对于微波膨胀烟梗,今后的研究主要应从以下几个方面进行。

1)微波膨胀烟梗关键加工工序的系统性研究。分析各工序工艺参数对微波膨胀烟梗制得梗丝的外观、理化性质、微观结构等综合质量的影响,建立相关工艺参数与质量指标的关系模型,确定适宜的微波膨胀烟梗加工工艺参数。

2)微波膨胀烟梗制得梗丝的感官品质研究。通过生化处理和加香技术,提高梗丝的感官品质。

3)微波膨胀烟梗综合应用研究。可将其作为制备生物质的材料,经物理方法或生化方法提取有用物质,提高微波膨胀烟梗的利用价值。

4)同其他卷烟辅助材料结合,研究在卷烟应用中微波膨胀烟梗制得梗丝对卷烟理化性质、有害成分的影响,为卷烟减害降焦提供理论依据。

5)完善自身技术方法,研发生产与工业应用化相匹配的烟梗微波膨胀设备,满足生产需要。

总之,随着科技进步和研究的深入,微波膨胀烟梗技术将不断发展和完善。通过对微波膨

胀烟梗技术的深入研究,不仅可以提高烟梗利用率和梗丝加工品质,节约成本,缓解原料对高档卷烟品牌发展的制约,对卷烟减害降焦等也具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] LINT M, DURANCE T D, SCAMAN C H. Characterization of vacuum microwave, air and freeze-dried carrots [J]. *Food Research International*, 1998, 31(2):111.
- [2] DECAREAU R U. The microwave sterilization process [J]. *Microwave World*, 1994, 15(2):12.
- [3] PATERSON J L, CRAMSTON O M, LOH W H. Extending the storage life of chilling beef: microwave processing [J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1995, 30(2):97.
- [4] DAMM M, HOLZER M, RADSPIELER G, et al. Microwave-assisted high-throughput acid hydrolysis in silicon carbide microtiter platforms—A rapid and low volume sample preparation technique for total amino acid analysis in proteins and peptides [J]. *Journal of Chromatography A*, 2010(50):7826.
- [5] PENA T, PENSADO L, CASAIS C, et al. Optimization of a microwave-assisted extraction method for the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons from fish samples [J]. *Journal of Chromatography A*, 2006(2):163.
- [6] SERBAN M, REYNOLDS R J. Analysis of protein amino acids in tobacco using microwave digestion of plant material [J]. *Beitrag Zur Tabakforschung International*, 2005, 21(8):451.
- [7] VANSUYT G, SOUCHE G, STRACZEK A, et al. Flux of protons released by wild type and ferritin over-expressor tobacco plants: effect of phosphorus and iron nutrition [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, 41(1):27.
- [8] WILLIAMS J R. Method of treating tobacco to reduce nitrosamine content and products produced thereby: US6311695 [P]. 2001-11-06.
- [9] WILLIAMS J R. Method of treating tobacco to reduce nitrosamine content and products produced thereby: US6338348 [P]. 2002-01-15.
- [10] NEWMAN C L, BEST F W. Tobacco expansion process utilizing microwave energy: US3828797 [P]. 1974-08-13.
- [11] 成清校,任宏杰.微波膨胀烟丝的微观形貌与理化指标 [J]. *机电产品开发与创新*, 2015(1):111.
- [12] NEUMANN C L. Tobacco expansion process utilizing microwave energy: US3828797 [P]. 1974-08-13.
- [13] LASZLO T. Microwave expansion of tobacco: US3842846 [P]. 1974-10-22.
- [14] WALDEMAR W, REINHARD L. Method and apparatus for making tobacco shreds: US4799501 [P]. 1989-01-24.
- [15] LASCH M, HACKMACK, K, HOHM R, et al. Method of and apparatus for manipulating bales of condensed tobacco particles: US5139035 [P]. 1992-08-18.
- [16] ROGER Z De La B. Method of preventing the shrinkage of puffed tobacco and product obtained thereby: US3409027 [P]. 1968-11-05.
- [17] 冯春堂,王佑铭,施荣东,等.多波源多馈口微波膨胀烟梗装置:2607033Y [P]. 2004-03-24.
- [18] 汤马斯·亨利·怀特.一种制备烟梗膨胀的方法及所采用的设备:1748586 [P]. 2006-03-22.

- [19] 梁贵安,彭金辉,苏四清,等. 84 kW 微波烟梗膨胀生产试验装置控制系统研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2011(8):110.
- [20] 许琨敏,彭金辉,苏四清,等. 一种滚筒式烟梗连续微波膨胀设备:102326858A[P]. 2012-01-25.
- [21] 高锐,黄志强,王松峰,等. 烟梗微波膨胀条件优化及其对烟梗化学成分和物理结构的影响[J]. 河南农业科学,2013,42(11):50.
- [22] 陈晶铃,陈明功,汪晓艳,等. 烟梗微波膨化基本规律的研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2008,28(3):61.
- [23] ZI W H, PENG J H, ZHANG X L, et al. Optimization of waste tobacco stem expansion by microwave radiation for biomass material using response surface methodology[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2013, 44(4):678.
- [24] 李晓,景天,姚二民,等. 微波膨胀功率对烟梗质量的研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(3):141.
- [25] 资文华,龙海明,陈琳,等. 云南典型烟区烟梗原料的微波膨胀特性差异[J]. 烟草科技,2013(7):8.
- [26] 杨威,张强,董高强. 微波膨胀对烟梗品质及显微结构的影响[J]. 江西农业科学,2014,6(3):69.
- [27] 廖晓祥,赵云川,陈冉,等. 不同微波膨胀烟梗的化学感官特性研究[J]. 化学研究与应用,2015,27(3):292.
- [28] 周川,刘朝辉,刘毅,等. 烟梗的预处理工艺:1518906A[P]. 2004-08-11.
- [29] 周川,刘朝辉,刘毅,等. 一种采用气体热煤的微波膨胀烟梗的方法:102613687A[P]. 2012-08-01.
- [30] 李军,徐济仓,杨伟祖,等. 一种烟梗预处理的方法及设备:101214086[P]. 2008-07-09.
- [31] 马铁兵,杜爱祥. 烟梗在线膨胀设备及使用该设备的烟梗处理方法:1973699A[P]. 2007-06-06.
- [32] 马铁兵,王永金,陈良元,等. 以低压蒸汽为介质的烟梗膨胀方法和设备:101773290A[P]. 2010-07-14.
- [33] 李军,李吉昌,资文华,等. 工艺环境介质氛围对微波膨胀烟梗及制品品质的影响研究[J]. 中国烟草学报,2010,16(3):28.
- [34] 卓卫民. 一种烟梗的回潮方法及生产线:200610041231[P]. 2007-02-21.
- [35] 赵云川,牟定荣,王毅,等. 一种微波膨胀烟梗的处理方法:102726826A[P]. 2010-10-20.
- [36] 满鸣,何常青,杨继志,等. 一种烟梗膨胀的方法:101862023[P]. 2012-10-17.
- [37] 赵云川,邹泉,牟定荣,等. 一种去除微波膨胀烟梗中高密度烟梗的方法及设备:103230091A[P]. 2013-08-07.
- [38] 小川高志,佐久间雅,仲村正已,等. 膨胀烟草的方法:1061896A[P]:1992-06-17.
- [39] 邱纪青,傅淑英. 国内外烟草膨胀技术与设备研究进展[J]. 烟草科技,1999(6):13.
- [40] 武怡,曾晓鹰,者为,等. 一种新型卷烟滤嘴用过滤材料及其制备方法:101103845A[P]. 2008-01-16.
- [41] 李军,资文华,宋莲英,等. 陈化时间对微波膨胀烟梗加工过程物理特性的影响[J]. 烟草科技,2010(11):15.
- [42] 李军,陈婉,资文华,等. 高压脉冲电场处理对微波膨胀烟梗萎缩的影响[J]. 中国烟草学报,2011,17(1):45.
- [43] 资文华,刘坚,王保兴,等. 不同造粒方式对梗颗粒产品质量的影响[J]. 中国烟草学报,2011,17(3):23.
- [44] 资文华,刘坚,李军,等. 造粒方式及物料含水率对烟梗颗粒质量的影响[J]. 烟草科技,2011(5):11.
- [45] 杨涛,李敏,李姗姗,等. 微波膨胀过程中烟梗

- 及其制备的颗粒的物理化学变化[J]. 烟草科技, 2008(2):33.
- [46] 何炬, 刘维涓, 师建全, 等. 微波膨胀烟梗质量研究[J]. 烟草科技, 2006(2):9.
- [47] 李涛, 杨伟祖, 许琨敏, 等. 烟梗梗丝加工方法: 201110132050. 1[P]. 2011-09-14.
- [48] 李红武, 张强, 孙力, 等. 微波膨胀对烟梗致香物质的影响分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24):207.
- [49] 邹泉, 廖晓祥, 赵云川, 等. 微波膨胀烟梗二次切丝工艺参数研究[J]. 烟草科技, 2015(11):59.
- [50] 董高峰, 殷沛沛, 和智君, 等. 微波膨胀梗制丝关键工艺参数的优化[J]. 中国农学通报, 2014(30):302.
- [51] 邹泉, 赵云川, 牟定荣, 等. 提高微波膨胀烟梗所制梗丝质量和得率的方法及设备: 103315380A[P]. 2013-09-25.
- [52] 王毅, 邹泉, 赵云川, 等. 一种提高微波膨胀所制梗丝纯净度的方法及设备: 103238923A[P]. 2013-08-14.
- [53] 李晓, 纪晓楠, 姚二民, 等. 不同地区烟梗吸湿性能对加工分组的影响[J]. 烟草科技, 2014(6):5.
- [54] 薄云川, 岳田利, 毛多斌, 等. 粒状梗丝膨胀的应用技术研究[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(12):200.
- [55] 易文波, 朱效群, 吴文强, 等. 颗粒状梗丝在卷烟中的可用性[J]. 烟草科技, 2008(2):13.
- [56] 孔臻, 席年生, 刘朝贤, 等. 微波法叶丝干燥研究[J]. 烟草科技, 2003(11):14.
- [57] 邱纪青, 傅淑英, 郑新章, 等. 国内外烟草膨胀技术与设备研究进展[J]. 烟草科技, 1999(6):3.
- [58] 陈良元. 卷烟生产工艺技术[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2002.
- [59] 蒋德友, 孙志勇, 陈章玉, 等. 高温高湿法梗丝膨胀技术综述[J]. 烟草科学研究, 2005(2):38.
- [60] 陈良元, 王鹏, 杨清. 制梗丝加料位点试验[J]. 烟草科技, 2003(3):9.
- [61] 王慧, 曾晓鹰, 杨涛, 等. 微波膨胀烟梗制粒颗粒应用于卷烟的效果评价[J]. 烟草科技, 2008(10):5.
- [62] 尧珍玉, 马涛, 温东奇, 等. 微波膨胀烟梗颗粒在卷烟滤嘴中的应用[J]. 应用化工, 2010, 39(9):1432.
- [63] 金哲, 朴永革, 黄树, 等. 3种梗丝不同掺配比例对卷烟质量的影响[J]. 烟草科技, 2012(12):5.
- [64] 赵莉, 车靖, 王海滨. 复合膨胀烟梗及其制备的梗丝在卷烟中的应用[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30):10640.
- [65] 丁美宙, 熊安言, 王海滨, 等. 微波膨胀条状梗丝应用效果评价[J]. 烟草科技, 2015(2):79.



引用格式:贾梦珠,孙九喆,苏东赢,等. 烤烟品种的多重 PCR 技术标记鉴别[J]. 轻工学报, 2017,32(3):51-57.

中图分类号:TS424 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.009

文章编号:2096-1553(2017)03-0051-07

烤烟品种的多重 PCR 技术标记鉴别

Tag identification of flue-cured tobacco varieties by multiplex PCR technique

贾梦珠¹,孙九喆²,苏东赢²,杨金初²,王二彬²,许衡²,
王永超¹,王君婷¹,孟丹丹¹,马林¹

JIA Meng-zhu¹,SUN Jiu-zhe²,SU Dong-ying²,YANG Jin-chu²,WANG Er-bin²,
XU Heng²,WANG Yong-chao¹,WANG Jun-ting¹,MENG Dan-dan¹,MA Lin¹

关键词:
多重 PCR 技术;SCAR
标记;烤烟品种鉴别;
指纹图谱

Key words:
multiplex PCR technique;
SCAR tag; identifica-
tion of flue-cured
tobacco varieties;
fingerprints map

1. 郑州轻工业学院 烟草科学与工程学院,河南 郑州 450001;

2. 河南中烟工业有限责任公司 技术中心,河南 郑州 450000

1. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Technology Center, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China

摘要:以 12 份烤烟品种为模板,针对 6 对 SCAR 引物进行引物比例和退火温度的条件优化,采用多重 PCR 技术,建立了 12 份烤烟品种的多重 PCR 指纹图谱和鉴别路线.结果表明,同普通 PCR 相比,多重 PCR 具有高效、快速、节约时间、成本低的优点,6 对 SCAR 引物稳定性好、条带特异性强,能准确区分 12 份烤烟品种.

收稿日期:2016-10-13

基金项目:河南中烟有限责任公司科技项目(ZW2015012)

作者简介:贾梦珠(1991—),女,河南省平顶山市人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为烟草生物技术.

通信作者:马林(1964—),男,河南省信阳市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为烟草工业生物技术和卷烟工艺.

Abstract: With 12 varieties of flue-cured tobacco as a template, the conditions for primer concentration and annealing temperature for 6 pairs of SCAR primers were optimized. Multiplex PCR fingerprints and identification routes of 12 flue-cured tobacco varieties were established by multiplex PCR. The results showed that multiplex PCR had the advantages of high efficiency, high speed, time saving and low cost compared with ordinary PCR. Six pairs of SCAR primers had good stability and specific band specificity, which could distinguish 12 flue-cured tobacco varieties accurately.

0 引言

1988年, J. S. Chamberlain 等^[1]首次提出多重 PCR 技术, 多重 PCR 技术指加入两对或者两对以上的特异性引物, 使模板 DNA 在不同区域扩增多个目的片段或者多个模板 DNA 的反应体系, 具有高效、快速、节约时间、成本低等优点。目前, 多重 PCR 技术已广泛应用于植物病虫害检测和植物分子育种等领域^[2-7], 但应用于烟草方面的报道却很少。2008年, 高玉龙等^[8]采用多重 PCR 技术对烟草转基因进行了检测, 通过在多重 PCR 反应体系中添加增强剂, 验证了多重 PCR 技术在烟草中的稳定性与可使用性。2015年, 马林等^[9]对烤后烟叶多重 PCR 反应体系进行了优化, 结果表明烤后烟叶多重 PCR 扩增的最佳反应体系为: 20 μL 体系中含模板 DNA 45 ng, Mg^{2+} 浓度 2.50 mmol/L, dNTP 浓度 0.40 mmol/L, Taq 酶用量 4.00 U。

马林等^[10]运用烟草 RAPD 方法开发了烟草 SCAR 标记技术, 利用 6 对 SCAR 引物, 成功地建立了 12 个烤烟品种的分子 ID 和鉴别路线。本文拟将已建立的特异性引物相互组合, 利用多重 PCR 技术的优势, 快速鉴别 12 份烤烟品种, 建立烤后烟叶多重 PCR 指纹图谱和鉴别路线。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

主要试剂: 烤烟烟叶品种 1—12 分别为: 红花大金元, K326, NC102, NC297, 云烟 85, 云烟 87, 云烟 97, 中烟 100, 翠碧-1 号, KRK26, 龙江 911, 南江 3 号, 均由河南中烟工业有限责任公司提供; Taq 酶, dNTP, 10 \times buffer, MgCl_2 , DL2000 DNA ladder marker, 均购自宝生物工程(大连)有限公司。

引物来源: 6 对 SCAR 引物均由生工生物工程(上海)股份有限公司合成, 引物信息见表 1。

表 1 SCAR 引物
Table 1 SCAR primers

SCAR 引物	引物对	序列(5'→3')	碱基数/bp	退火温度/°C	扩增片段长度/bp
SCAR1	S1-1	GTCCACACGGGGCAATTAATG	21	62~64	545
	S1-2	GTCCACACGGCTATGAGATTA	21		
SCAR2	S2-1	CACGGCTGCGAAGAGCTAAG	20	69	733
	S2-2	CACGGCTGCGTGTATGAAC	20		
SCAR3	S3-1	CAATCGCCGTAAATACACAAAAGTA	24	57~59	887
	S3-2	AATCGCCGTCAGGAGAGAGA	20		
SCAR4	S4-1	CCACAGCAGTCTGATATTGGATG	23	57~59	313
	S4-2	CCACAGCAGTAACAGCAGGA	20		
SCAR5	S5-1	AGGCTGTGCTTACTGCTTCTAC	22	68	555
	S5-2	AGGCTGTGCTATTGTAGGATGAGAC	25		
SCAR6	S6-1	TTTGAGAATACGTCTTAACGACCA	24	63	1760
	S6-2	CCACAGCAGTCCCTTCCTAA	20		

1.2 方法

1.2.1 烤后烟叶基因组 DNA 提取 烤后烟叶基因组 DNA 的提取采用文献[11]的方法。

1.2.2 多重 PCR 引物组合的条件优化 引物组合建立在本实验室前期引物组合实验的基础上。引物 3 + 引物 4, 引物 3 + 引物 6, 引物 3 + 引物 5, 这 3 种引物组合前期预实验结果没有理想的扩增条带, 特异性不明显, 没有后续实验优化的必要。根据引物退火温度相差的大小进行分组, 结果见表 2。

表 2 引物组合分组

Table 2 Primer combinations

退火温度	引物组合	引物退火温度
相近	引物 1 + 引物 6	引物 1 为 64 ℃, 引物 6 为 63 ℃
	引物 2 + 引物 5	引物 2 为 69 ℃, 引物 5 为 68 ℃
相差较大	引物 1 + 引物 2	引物 1 为 64 ℃, 引物 2 为 69 ℃
	引物 4 + 引物 6	引物 4 为 58 ℃, 引物 6 为 63 ℃
	引物 4 + 引物 5	引物 4 为 58 ℃, 引物 5 为 68 ℃

对于退火温度相近的引物组合, 只进行引物比例优化; 对于退火温度相差较大的引物组合, 其引物比例和退火温度都要进行条件优化。

多重 PCR 反应程序: 94 ℃ 预变性 6 min; 94 ℃ 变性 50 s; 各自退火温度下退火 20 s; 72 ℃ 延伸, 反应 35 个循环; 72 ℃ 延伸 6 min, 4 ℃ 保温。

2 结果与分析

2.1 多重 PCR 引物组合的条件优化

2.1.1 退火温度相近的引物组合的优化

1) 引物 1 + 引物 6 的条件优化结果如图 1 所示。

由图 1 可知, 引物 1 的扩增条带在 545 bp 左右, 引物 6 的扩增条带在 1760 bp 左右, 与普通 PCR 扩增结果一致。泳道 1—6 的引物比例分别为 1 : 1.5, 1 : 1.8, 1 : 2, 0.8 : 1, 1 : 0, 0 : 1, M 为 DL2000 Marker。1—6 泳道中, 泳道 5 和泳道 6 作为单引物对照。1—2 泳道只出现引

物 1 的扩增条带, 随着反应体系中引物 6 所占比例的增加, 泳道 3—4 出现两条引物扩增条带, 其中泳道 3 的两条特异性扩增条带最清晰, 所以引物 1 与引物 6 的最佳优化比例为 1 : 2。

2) 引物 2 + 引物 5 的条件优化结果如图 2 所示。

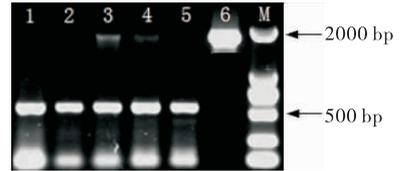


图 1 引物 1 + 引物 6 条件优化实验结果

Fig. 1 Conditional optimization experimental results of primer 1 + primer 6



图 2 引物 2 + 引物 5 条件优化实验结果

Fig. 2 Conditional optimization experimental results of primer 2 + primer 5

由图 2 可知, 引物 2 的扩增条带在 733 bp 左右, 引物 5 的扩增条带在 555 bp 左右, 与普通 PCR 扩增结果一致。泳道 1—6 的引物比例分别为 1 : 0, 0 : 1, 1 : 0.8, 1.5 : 1, 1.8 : 1, 2 : 1, M 为 DL2000 Marker。泳道 1 和泳道 2 作为单引物扩增对照。泳道 3 只出现引物 5 的扩增条带, 随着反应体系中引物 2 所占比例的增加, 泳道 4—6 出现两条引物扩增条带。其中泳道 5 的两条特异性条带最为清晰, 所以引物 2 与引物 5 的最佳优化比例为 1.8 : 1。

2.1.2 退火温度相差较大的引物组合的优化

1) 引物 1 + 引物 2 的条件优化结果

泳道 1—15 如表 3 所示, M 为 DL2000 Marker, 扩增结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 引物 1 的扩增条带在 545 bp 左右, 引物 2 的扩增条带在 733 bp 左右。泳道

1—5 中,1—3 泳道都只出现了引物 1 的扩增条带,应该增大反应体系中引物 2 所占的比例;泳道 4—5 没有扩增条带,表明退火温度太高,不利于引物 1 的条带扩增. 泳道 6—10 中,随着引物退火温度的提高,泳道 8 出现两条引物扩增片段,退火温度继续提高,泳道 9 只出现引物 2 的扩增条带,泳道 10 没有扩增条带,表明退火温度和引物比例的提高都有利于引物 2 的条带扩增. 泳道 11—15 中,泳道 11—13 都出现了两条引物的扩增条带,其中泳道 13 的两条扩增条带最清晰. 所以引物 1 与引物 2 的最佳优化比例为 1 : 1.5,退火温度 66 ℃.

2) 引物 4 + 引物 6 的条件优化结果

泳道 1—18 如表 4 所示, M 为 DL2000 Marker, 扩增结果如图 4 所示.

表 3 引物 1 + 引物 2 实验电泳顺序

Table 3 Conditional optimization electrophoresis sequence of primer 1 + primer 2

引物比例	引物组合退火温度/℃				
	62	64	66	68	70
1.5 : 1	泳道 1	泳道 2	泳道 3	泳道 4	泳道 5
1 : 1	泳道 6	泳道 7	泳道 8	泳道 9	泳道 10
1 : 1.5	泳道 11	泳道 12	泳道 13	泳道 14	泳道 15

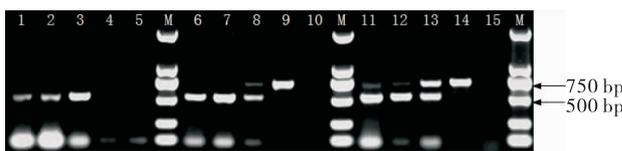


图 3 引物 1 + 引物 2 条件优化实验结果
Fig. 3 Conditional optimization experimental results of primer 1 + primer 2

表 4 引物 4 + 引物 6 实验电泳顺序

Table 4 Electrophoresis sequence of primer 4 + primer 6

引物比例	引物组合退火温度/℃					
	58	59	60	61	62	63
0.8 : 1	泳道 1	泳道 2	泳道 3	泳道 4	泳道 5	泳道 6
1 : 1	泳道 7	泳道 8	泳道 9	泳道 10	泳道 11	泳道 12
1 : 1.5	泳道 13	泳道 14	泳道 15	泳道 16	泳道 17	泳道 18

由图 4 可知,引物 4 的扩增条带在 313 bp 左右,引物 6 的扩增条带在 1760 bp 左右. 当引物 4 与引物 6 的比例分别为 0.8 : 1, 1 : 1, 1 : 1.5 时,引物 6 始终没有出现条带,由于两个引物之间的扩增片段大小相差太大,一般的引物比例不能满足引物 6 的扩增要求,应加大反应体系中引物 6 所占的比例. 随着退火温度的提高,泳道 1、泳道 3、泳道 4 和泳道 15 出现引物二聚体,而当退火温度分别为 59 ℃, 62 ℃ 和 63 ℃ 时,条带扩增清晰,无拖带现象. 结果表明:退火温度为 59 ℃, 62 ℃ 或者 63 ℃ 时,均能达到理想的扩增效果.

引物 4 + 引物 6 引物比例实验结果如图 5 所示.

由图 5 可知,选取退火温度为 62 ℃,引物 4 的扩增条带在 313 bp 左右,引物 6 的扩增条带在 1760 bp 左右. 泳道 1 为引物比例 0.2 : 3, 泳道 2 为引物比例 0.2 : 2, M 为 DL2000 Marker. 泳道 1 出现两条特异性扩增条带,且条带最为清晰,故引物 4 与引物 6 的最佳优化比例为 0.2 : 3.

3) 引物 4 + 引物 5 的条件优化结果

泳道 1—12 如表 5 所示, M 为 DL2000 Marker,

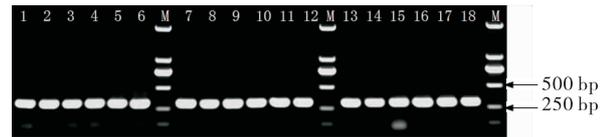


图 4 引物 4 + 引物 6 条件优化实验结果
Fig. 4 Conditional optimization experimental results of primer 4 + primer 6

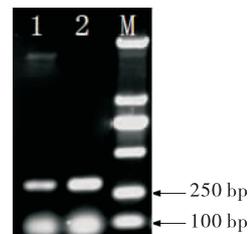


图 5 引物 4 + 引物 6 引物比例实验结果
Fig. 5 Experimental results of primer 4 + primer 6

扩增结果如图 6 所示。

由图 6 可知,引物 4 的扩增条带在 313 bp 左右,引物 5 的扩增条带在 555 bp 左右.泳道 1—4 中,只有 1—2 泳道出现两条引物扩增条带,随着退火温度的提高,只有引物 5 的扩增条带可见.表明引物 4 的最佳退火温度是 62 ~ 64 °C.泳道 5—8 中,只有泳道 5 出现两条引物扩增条带.泳道 9—12 中,只有泳道 9 出现两条引物扩增条带.泳道 1,2,5,9 中,两条条带亮度比较均衡的是泳道 5,故引物 4 与引物 5 的最佳优化比例为 1 : 1,退火温度 62 °C.

2.2 12 份烤烟品种的多重 PCR 指纹图谱

实验采用优化后的多重 PCR 反应体系和引物组合对 12 份烤烟品种进行 PCR 扩增筛选,每对引物组合至少重复扩增 3 次,以保证扩增的稳定性.在上述实验的基础上,选取扩增结果稳定同时能实现快速鉴别 12 份烤烟品种的引物组合,最终选取 3 对引物组合即可实现 12 份烤烟品种鉴别.多重 PCR 扩增图谱见图 7—图 9.图中,1—12 表示 12 份烤烟品种,M 为 DL2000 Marker.经过第一次多重 PCR,可能会出现 4 种情况:只有一条引物的扩增条带,只有

表 5 引物 4 + 引物 5 实验电泳顺序

Table 5 Electrophoresis sequence of primer 4 + primer 5

引物比例	引物组合退火温度/°C			
	62	64	66	68
1.5 : 1	泳道 1	泳道 2	泳道 3	泳道 4
1 : 1	泳道 5	泳道 6	泳道 7	泳道 8
1 : 1.5	泳道 9	泳道 10	泳道 11	泳道 12

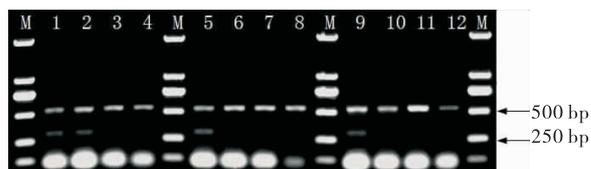


图 6 引物 4 + 引物 5 条件优化实验结果

Fig. 6 Conditional optimization experimental results of primer 4 + primer 5



图 7 引物组合 1(引物 1 + 引物 2)对 12 份烤烟品种的 PCR 扩增

Fig. 7 Primer combination 1 (primer 1 + primer 2) PCR amplification of 12 tobacco varieties



图 8 引物组合 2(引物 4 + 引物 6)对 12 份烤烟品种的 PCR 扩增

Fig. 8 Primer combination 2 (primer 4 + primer 6) PCR amplification of 12 tobacco varieties

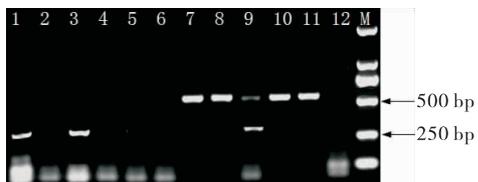


图 9 引物组合 3(引物 4 + 引物 5)对 12 份烤烟品种的 PCR 扩增

Fig. 9 Primer combination 3 (primer 4 + primer 5) PCR amplification of 12 tobacco varieties

另一条引物的扩增条带,同时有两条引物的扩增条带,没有扩增条带.进行第二次多重 PCR,可能出现 4 种同样情况,将每小组依次分开,再进行第三次多重 PCR,最终一一分开,实现 12 份烤烟品种的鉴别.如图 7 所示:泳道 1,2,3,6,7 扩增条带在 733 bp 左右;泳道 4,9,11,12 扩增条带在 545 bp 左右;泳道 5,8,10 在 545 bp 左右和 733 bp 左右均有扩增条带.如图 8 所示:泳道 1,2,8,9 扩增条带在 1760 bp 左右;泳道 4,7 扩增条带在 313 bp 左右;泳道 5,6,10,12 在 313 bp 左右和 1760 bp 左右均有扩增条

带;泳道3,11无扩增条带.如图9所示:泳道1,3扩增条带在313 bp左右;泳道7,8,10,11扩增条带在555 bp左右;泳道9在313 bp左右和555 bp左右均有扩增条带;泳道2,4,5,6,12无扩增条带.与普通PCR扩增结果一致.

2.3 烤烟品种鉴别分析

多重PCR扩增鉴别路线如图10所示,其中+表示有扩增条带;-表示无扩增条带;1—12为不同烤烟品种.

由图10可知,利用3对引物组合对12份烤烟品种进行多重PCR扩增,建立了12份烤烟品种的鉴别路线.经过第一步引物1和引物2的多重PCR扩增,出现3种情况,分别为只有引物1的扩增条带、只有引物2的扩增条带和同时有引物1和引物2的扩增条带.这3种情况再经过第二步引物4和引物6的多重PCR扩增,出现4种情况,分别为只有引物4的扩增条带、只有引物6的扩增条带、同时有引物4和引物6的扩增条带、没有扩增条带.第三步引物4和引物5的多重PCR扩增主要鉴别剩余的4个品种,出现3种情况,分别为只有引物4的扩增条带,只有引物5的扩增条带,没有扩增条带.结果表明,3对引物组合的扩增结果同普通PCR扩增结果保持一致,同时能快速实现对12份烤烟品种的鉴别,使鉴

别时间大大缩短.

3 结论

本文采用多重PCR技术对6对SCAR引物进行引物组合,对引物比例和退火温度进行条件优化,运用优化后的多重PCR技术和引物组合对12份烤烟品种进行多重PCR扩增,主要结论如下.

1)退火温度相近的引物组合中,引物1与引物6、引物2与引物5的最佳优化比例分别为1:2和1.8:1时,分别都有两条特异性条带,与单引物扩增条带完全吻合.

2)退火温度相差较大的引物组合中,引物1与引物2的最佳优化比例为1:1.5、退火温度为66℃;引物4与引物6的最佳优化比例为0.2:3,引物4与引物5的最佳优化比例为1:1,退火温度均为62℃,分别都有两条特异性条带.

3)利用多重PCR优化体系和3对引物组合对12份烤烟品种进行多重PCR扩增,得到12份烤烟品种多重PCR指纹图谱,建立了多重PCR扩增鉴别路线.

同普通PCR相比,本文采用的多重PCR具有高效、快速、节约时间、成本低的优点,6对SCAR引物稳定性好、条带特异性强,使鉴别时间大大缩短.后期可以设计转化更多的引物,扩

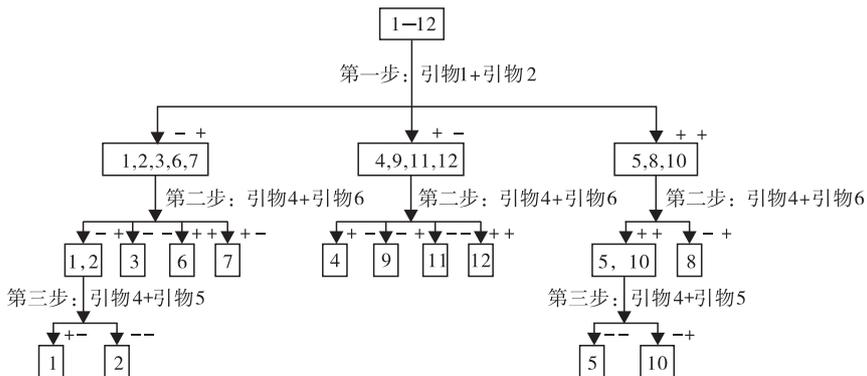


图10 多重PCR扩增鉴别路线

Fig. 10 Multiple PCR amplification identification route

大品种鉴别范围,以建立更多品种的多重 PCR 指纹图谱.

参考文献:

- [1] CHAMBERLAIN J S, GIBBS R A, RAINER J E, et al. Deletion screening of the Duchenne muscular dystrophy locus via multiplex DNA amplification [J]. *Nucleic Acids Research*, 1988, 16(23):11141.
- [2] 王晓泉,焦新安,刘晓文,等. 江苏部分地区食源性和人源沙门氏菌的多重耐药性研究[J]. *微生物学报*, 2007(2):221.
- [3] 许瑾,徐涛,朱永芳,等. 多重 PCR 技术在鉴定菜豆中的应用[J]. *检验检疫学刊*, 2010(1):8.
- [4] 陈明洁,方侗,柯涛,等. 多重 PCR——一种高效快速的分子生物学技术[J]. *武汉理工大学学报*, 2005, 27(10):33.
- [5] 赵红庆,苑锡铜,黄留玉,等. 多重 PCR 技术在病原检测中的应用[J]. *生物技术通讯*, 2007(5):863.
- [6] 陈明洁,刘勇,涂知明,等. 多重 PCR 法快速鉴定转基因小麦植株及后代[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(9):105.
- [7] 于力,朱龙英,万延慧,等. 多重 PCR 技术鉴定番茄 Ty-1 和 Mj 基因[J]. *分子植物育种*, 2008, 6(1):165.
- [8] 高玉龙,焦芳婵,徐照丽,等. 多重 PCR 在烟草转基因检测中的应用[J]. *生物技术通报*, 2008(2):140.
- [9] 马林,郭苗,苏东赢,等. 烤后烟叶多重 PCR 反应体系的优化[J]. *郑州轻工业学院学报(自然科学版)*, 2015, 30(2):30.
- [10] 马林,罗昭标,罗华元,等. 烟草品种的 SCAR 标记鉴别[J]. *中国烟草学报*, 2012, 18(5):79.
- [11] 马林,王广超,罗昭标,等. 烤后烟叶基因组 DNA 提取条件优化[J]. *郑州轻工业学院学报(自然科学版)*, 2013, 28(2):59.
- (上接第 36 页)
- [15] 许鸿佳,邱锋. 中医药治疗痤疮研究进展[J]. *光明中医*, 2012, 27(3):606.
- [16] 杨彦洁. 中药治疗寻常性痤疮的文献分析及中医药内外结合治疗痤疮的临床研究[D]. 北京:北京中医药大学, 2014.
- [17] 孙亮. 痤疮的中医辨证论治疗分析[J]. *世界最新医学信息文摘(电子版)*, 2016, 16(15):131.
- [18] 王敏. 中医特色疗法外治痤疮[J]. *中医外治杂志*, 2009, 18(1):63.
- [19] 杨岚,李元文,曲剑华. 痤疮辨证分型的文献研究[J]. *北京中医药*, 2015, 34(6):472.
- [20] 赵宏伟,吴志韵,袁琳,等. 祛痘化妆品用中药提取物的抗炎作用研究[J]. *香料香精化妆品*, 2013, 12(6):27.
- [21] 解玉,杜蕊,张雯雯. 中药面膜治疗寻常型痤疮 66 例临床观察[J]. *现代中西医结合杂志*, 2010, 19(15):1865.
- [22] 张静萍. 中药湿敷联合倒膜治疗痤疮疗效观察[J]. *慢性病学杂志*, 2010, 12(9):1024.
- [23] 陈琴,陈晓雯,贾其军. 陈晓雯治疗痤疮经验[J]. *实用中医药杂志*, 2014, 30(8):755.
- [24] 顾炜,张小卿,吴景东. 从中医病因病机与常用药探讨痤疮的中医治疗特色[J]. *辽宁中医杂志*, 2016, 43(4):739.
- [25] 刘晶,唐昌敏. 以《内经》“天癸”理论为指导治疗“冲任不调型”痤疮的研究[J]. *湖北中医杂志*, 2015, 37(10):45.
- [26] 刘冬梅,李宏军,高进. 有雌激素活性中草药在皮肤科中的应用[J]. *中国中西医结合皮肤性病学杂志*, 2005, 4(3):197.
- [27] 李士材. 雷公炮制药性解[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1958.
- [28] 杨彦洁,黄尧洲,郎娜. 疏风清肺汤联合中药膜治疗痤疮肺经风热 32 例临床研究[J]. *中医药导报*, 2014, 20(2):19.



引用格式:罗志雪,王昭焜,罗靖,等.烟草松散回潮机进风装置的改进[J].轻工学报,2017,32(3):58-62.

中图分类号:TS43 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.010

文章编号:2096-1553(2017)03-0058-05

烟草松散回潮机进风装置的改进

Improvement of inlet air equipment for tobacco loosing and conditioning machine

罗志雪,王昭焜,罗靖,于静

LUO Zhi-xue, WANG Zhao-kun, LUO Jing, YU Jing

厦门烟草工业有限责任公司 质量管理部,福建 厦门 361022

Department of Quality Control Xiamen Tobacco Industrial Co., Ltd., Xiamen 361022, China

关键词:

烟草松散回潮;热风
导向管;松散率

Key words:

tobacco loosing and
conditioning; hot-blast
air guiding device;
loose rate

摘要:为了解决松散回潮工序烟块松散程度不足、片烟和薄片板结等问题,提出一种松散回潮机进风装置优化设计方案:1)改进松散回潮机的进风系统,进风位置由物料进口振槽上方改为物料进口振槽下方,并在热风管道底部增设排水装置;2)设计并加装热风导向风管,把原有的水平方向出风改为一定角度的向右下方向出风.经验证,改进后的松散回潮机片烟松散率提高0.28%,薄片松散率提高7.12%;松散后片烟结块质量平均降低89.8%,蒸汽耗量降低14.95%.

收稿日期:2016-07-11

基金项目:福建中烟工业有限责任公司科技项目(FJZYJH2012016)

作者简介:罗志雪(1976—),男,福建省连城县人,厦门烟草工业有限责任公司工程师,主要研究方向为卷烟工艺.

通信作者:于静(1973—),女,辽宁省葫芦岛市人,厦门烟草工业有限责任公司工程师,主要研究方向为卷烟工艺及品质控制.

Abstract: In order to solve the problem of lack of loosening and conditioning and tobacco block, an optimized scheme of inlet air device of resurgence machine was suggested. 1) resurgence inlet air system was improved, location of inlet air was under tablet entrance vibration slot instead of above, and equipment of drainage was added at bottom of hot-air pipe; 2) hot air director was designed and added, direction of hot air was changed from horizontal to downward and offside. The validation test results indicated that loose rate of tablet enhanced 0.28%, loose rate of reconstituted tobacco enhanced 7.12%, weight of tobacco block reduced 89.8%, steam consumption reduced 14.95%.

0 引言

在卷烟生产过程中,松散回潮是卷烟工艺的第一个环节,该工序利用机械松散和热蒸汽渗透的共同作用,适当增加片烟温度和水分,使切片后的烟块受热吸水舒展,从而使压实的烟块充分松散,提高烟叶的耐加工性,以满足后续工序烟叶加料、切丝的要求。

松散回潮工序不仅影响烟叶加工的物理质量,也对烟叶的香气风格和感官品质有重要影响^[1-2]。但在实际生产中,回潮机出口处总有一小部分未松散开的烟块,使烟块的松散率达不到设计要求^[3-4],直接影响后续加料工序的料液吸收^[5-6]。本文拟针对上述问题,对松散回潮机进风系统进行改进,以提高能源有效利用率和松散率,减轻片烟和薄片的结块现象,提高回潮后烟叶物理质量的稳定性。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

主要材料:七匹狼卷烟某规格叶组,厦门烟草工业有限责任公司提供。

主要仪器:TB-S型松散回潮机,德国HAUNI公司产;TCS-B型台秤,上海新源公司产;72F2S-5E0AA1AAA6AH型蒸汽流量计,德国Endress+Hauser公司产。

1.2 方法

1.2.1 松散率测试方法 按照《卷烟工艺测试与分析大纲》制定的方法进行片烟和薄片松散率的测定。

1.2.2 烟块结块质量测试方法 一定投料量时,在星辊剔除处挑拣结块和尚未回软的烟块,并对其称重。

1.2.3 蒸汽消耗量测试方法 根据蒸汽流量计测量值,计算松散回潮工序单位时间内蒸汽消耗量。

2 松散回潮工艺与进风装置存在的问题

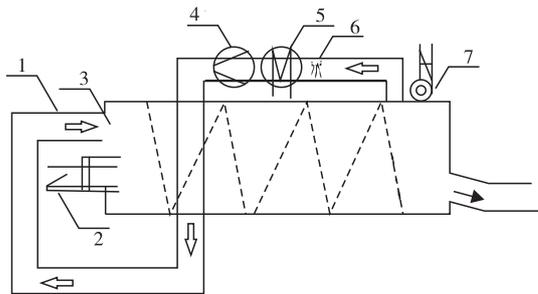
松散回潮是将切片后的烟块先输送到旋转滚筒中,由滚筒内耙钉带动,随滚筒旋转向前翻滚、抛洒,这一过程使烟块得到一定的机械松散;同时,在滚筒进口端喷入蒸汽和雾化水,烟块与滚筒里的蒸汽、雾化水充分接触,蒸汽释放出的热量和水分均匀渗入到烟块中,烟块因受热吸水而舒展,使压实的烟块充分松散。压制而成的烟块经回潮机回潮、松散、增温后,可提高烟叶的耐加工性,满足后续工序的工艺要求。

但在实际生产中,烟块的松散率通常达不到设计要求,松散回潮出口还有较多板结烟块(包括片烟和薄片),见表1。结块烟块会造成星辊堵料从而影响生产。烟块内部烟叶回潮不彻底,温度和水分均不达标,对后续工段工艺达标也会产生不利影响。

现有松散回潮机(结构见图1)在对烟块进行回潮过程中,通常进风管道1位于物料进料口2上方,且管道与进料口保持水平状态。热空气采用换热器5进行加热,同时在管道内设置蒸汽注入装置6,热空气与蒸汽混合后,风机4将风吹进滚筒内实现热风循环,湿热热风通过

表1 松散回潮机改进前烟块松散率和结块情况

批次	薄片结块质量/kg	薄片松散率/%	片烟结块质量/kg	片烟松散率/%
1	14.0	96.11	7.8	99.41
2	17.6	90.22	0.0	100.00
3	18.4	89.78	2.3	99.91
4	21.0	88.33	6.0	99.75
5	13.7	92.39	13.4	99.45
平均	16.9	91.37	5.9	99.70



1. 进风管道 2. 物料进口口 3. 热风出口 4. 风机
5. 热空气换热器 6. 蒸汽注入装置 7. 排潮装置

图1 现有松散回潮机结构简图

Fig.1 Structure sketch of existing resurgence machine

与烟块进行热质交换,使烟块在达到一定温度的同时完成松散.现有松散回潮机在接近出料处,设置有排潮装置7,通过排潮阀门开度的设计以保证回潮过程系统气压的相对稳定.

现有松散回潮机进风装置存在以下问题:

1) 热风采用物料进口口上方进风方式,不利于烟块的受热和吸湿.当湿热热风沿水平方向进入滚筒后,热风中所包含的部分蒸汽冷凝水无法排出,且气体过多集中于筒体上部,而烟块在随滚筒翻转过程中,形成了竖直方向烟幕,湿热热风无法与烟块正面接触,冷凝水随重力作用直接喷洒在了烟块上,滚筒粘叶现象较为突出. 2) 由于采用了热风上方进风方式,而排潮装置也位于滚筒上方,造成了实际加工生产过程中,过多的湿热气体易被排潮排出,直接影响了回潮出口烟块温度的稳定性. 3) 在热风上方进风对烟块进行回潮过程中,湿热热风与烟块接触

不充分,为了保证热风温度的相对稳定,必须增大蒸汽注入量,致使能源利用率明显下降.

3 松散回潮机进风装置的改进

针对目前TB-S型HAUNI松散回潮机存在的上述问题,实验从两方面对松散回潮机进行改进:1)改进进风管道系统,进风位置由物料进口振槽上方改为物料进口振槽下方,并在热风管道底部增设排水装置;2)改进进风管道出口,加装一个有 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 弯度的热风导向风管,并对风管截面形状、弯角和尺寸进行优化设计.

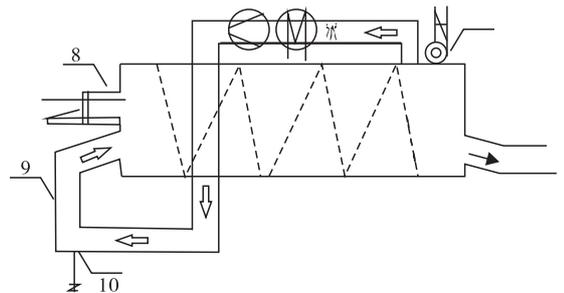
3.1 进风装置的改进方案

为了克服上述缺陷,在回潮机物料进口振槽8下方设置进风管9,进风管与水平方向成 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 夹角,且在进风管道弯管底部增设疏水装置10(见图2).

改进后的进风装置,将进风位置由原有的物料进口振槽8上方改变为物料进口振槽8下方;另外,通过把进风管道末端原有的水平进风方向改为有一定向上角度的进风方向,可以使该处冷凝水靠重力作用流入在热风管道底部增设的疏水装置排出,避免冷凝水随热风进入滚筒中.

3.2 热风导向风管优化设计

3.2.1 热风导向风管形状的优化设计 实验对松散回潮机加装了热风导向风管,并对热风导



8. 物料进口振槽 9. 进风管 10. 疏水装置

图2 改进后的回潮进风装置

Fig.2 Improved resurgence inlet air device

向风管截面形状、弯角和尺寸进行了优化设计。

1) 热风导向风管截面形状的优化设计

选择圆形和矩形两种风管截面形状进行对比。在相同横截面时,圆形风管的阻力小、材料省、强度也大,但是对于松散回潮筒来说,出风口为矩形,将矩形转为圆形时风力会产生一定的阻力磨损,导致热风热交换率降低。所以,对松散回潮机出口改进时,优先选择矩形风管,并对其尺寸进行了优化设计。

矩形风管比摩阻计算公式为

$$\frac{R_j}{R_y} = \frac{0.49(w+h)^{1.25}}{(w+h)^{0.625}}$$

式中, w, h 分别为矩形风管的宽和高。

在风管截面积相同的情况下,宽高比 w/h 的值增大, R_j/R_y 的值也增大。矩形风管的宽高比最高可达 8 : 1, 但自 1 : 1 变至 8 : 1 时, 表面积要增加 60%。

风管表面积的增加会产生下列问题: 风管表面的热损失增大; 风管的压力损失增大; 在风管内部引起偏流, 还会引起风量的波动。为减小上述问题的影响, 在设计矩形风管时应缩小宽高比。因此, 采用矩形截面设计松散回潮机出口的风管断面, 以适当缩小出风口的宽高比。

2) 热风导向风管弯角形状的优化设计

常用的管道弯角有内外圆型、内圆外角型和内外角型 3 种外形设计(见图 3), 相对于内外角型和内圆外角型, 内外圆型的弯管参数和压力损失最少, 所以实验选用了内外圆型的弯管设计。

由流体力学可知: 弯头小于 90°, 渐缩角度



图 3 3 种常用的管道弯角外形图

Fig. 3 External view of three pipe angle

小于 45°, 使用光滑的钢板材质, 弯管部的摩擦阻力非常小, 可保证热风风速和热交换率在转换过程中损耗较小。实验采用了 1.0 mm 的钢板, 其优点是易于工业化加工制作、安装方便、能承受较高温度, 按照图 4 和图 5 加工制作了松散回潮机出风口的热风导向风管, 其连接原风口端尺寸为 38 cm × 12 cm, 出风口端尺寸为 30 cm × 12 cm, 缩小出风口端的宽高比, 以减小风管表面的热损失、风管的压力损失和风管内部的偏流, 从而提高热风风量和压力的稳定性。

3.2.2 松散回潮机出风口改造

实验进行了热风导向板一体化设计, 进风管与水平方向成 20° ~ 25° 夹角, 将热风压向右侧斜下方, 使热风与烟叶接触面增加、热量利用效率提高, 并且不会干扰雾化水喷洒, 当达到设备所需的热风温度时, 散热器蒸汽阀门开度降低 20%。

4 改进后松散效果的实验验证

对比改进前后的 TB-S 型 HAUNI 松散回

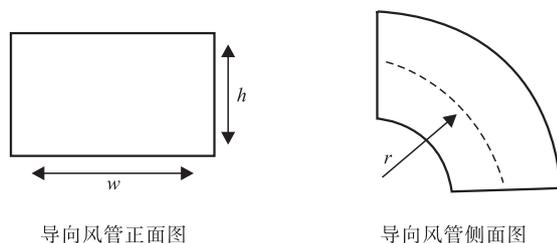


图 4 热风导向风管截面图

Fig. 4 External view of hot-blast air guiding device

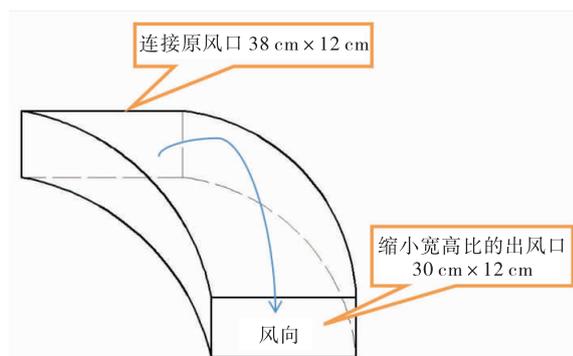


图 5 热风导向风管三维立体图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of hot-blast air guiding device

潮机的松散效果和蒸汽消耗量,松散回潮机改进后烟块松散率和结块情况见表2.设备改进前后蒸汽消耗量见表3.

表2 松散回潮机改进后烟块松散率和结块情况

Table 2 Loose rate and weight of tobacco block after equipment improvement

批次	薄片结块质量/kg	薄片松散率/%	片烟结块质量/kg	片烟松散率/%
1	4.0	98.89	0.0	100.00
2	6.2	96.56	0.0	100.00
3	2.2	98.78	1.9	99.92
4	4.0	97.78	2.3	99.91
5	0.0	100.00	0.0	100.00
6	1.0	99.44	0.0	100.00
7	7.2	98.00	0.0	100.00
平均	3.5	98.49	0.6	99.98

表3 设备改进前后蒸汽消耗量

Table 3 Comparison of steam consumption before and after equipment improvement

工艺	实验序号						均值
	1	2	3	4	5	6	
改进前	1.981	1.858	2.093	2.974	2.943	3.400	2.541
改进后	1.776	1.696	2.055	2.386	2.775	2.277	2.161

4.1 松散效果对比分析

从表1和表2可以看出:松散回潮机经改进后,片烟松散率提高0.28%,薄片松散率提高较明显,提升7.12%;片烟结块由5.9 kg降为0.6 kg,降幅达89.8%.

4.2 蒸汽消耗量对比分析

从表3可以看出:改进后松散回潮蒸汽消耗量均值由2.541 t/(10⁴ kg烟丝)下降至2.161 t/(10⁴ kg烟丝),改进后的松散回潮机蒸汽消耗量降低14.95%.安装了热风导向风管的松散回潮机能使热风与烟块接触面增加,热量利用效率提高,且不会干扰对雾化水喷洒,降低了散热器能耗.

5 结论

针对松散回潮工序存在烟块松散程度不

足、烟块结块多、星辊堵料等问题,以TB-S型HAUNI松散回潮机为例,对热风进风管道和热风出口分别进行了改进:1)松散回潮机的进风位置由物料进口振槽上方改为物料进口振槽下方,并在热风管道底部增设排水装置,杜绝了冷凝水随热风进入滚筒中;2)在热风出口处设计并加装了热风出口导向风管,导向风管选用矩形截面、内外圆型弯管,出风口尺寸为30 cm×12 cm,该设计把原有的水平方向出风改为一定角度的向右下方向出风.

改进后的松散回潮设备使回潮过程中湿热气流与烟块接触更充分,蒸汽耗量降低14.95%,显著提高了能源有效利用率.同时,改进后的片烟松散率提高0.28%,薄片松散率提高7.12%;松散后片烟结块质量平均降低89.8%,提高了回潮后烟叶物理质量的稳定性,为后续工序提供了工艺保障.

参考文献:

- [1] 邓国栋,姚光明,李晓,等.松散回潮工序加工强度对烤烟烟叶感官特性的影响[J].郑州轻工业学院学报,2011,26(6):32.
- [2] 吴爱国.WQ3316型滚筒式回潮机提高松散率的改造[J].科学之友,2012(6):25.
- [3] 朱文魁.基于入口介质温湿度控制的新型松散回潮控制模式性能评价[J].烟草科技,2010(4):9.
- [4] 曹正良.片烟松散回潮含水率控制方式的改进[C]//中国烟草学会工业专业委员会烟草工艺学术研讨会论文集.青岛:[出版社不详],2010:65-67.
- [5] 王雷.松散回潮出口水分稳定性的改进[J].科技致富向导,2011(5):116.
- [6] 宋克强,韩利强,袁书豪.松散回潮机出口水分稳定性研究[J].中国高新技术企业,2013(1):27.



引用格式:蒋亚平,曹聪聪,梅骁.网络入侵检测技术的研究进展与展望[J].轻工学报,2017,32(3):63-72.

中图分类号:TP393.08 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.011

文章编号:2096-1553(2017)03-0063-10

网络入侵检测技术的研究进展与展望

Research progress and prospect of network intrusion detection technology

蒋亚平,曹聪聪,梅骁

JIANG Ya-ping, CAO Cong-cong, MEI Xiao

郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院,河南 郑州 450001

College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

关键词:

入侵检测;人工智能;
入侵防御;免疫计
算机

Key words:

intrusion detection;
artificial intelligence;
intrusion prevention;
immune computer

摘要:目前网络面临越来越多的病毒、漏洞和黑客攻击,入侵检测技术作为网络安全防御的核心技术之一,能够有效地检测攻击行为.综述了网络入侵检测技术不同的发展阶段的相关研究与技术,以及基于神经网络、数据融合、计算机免疫学的入侵检测新技术及其产品,基于入侵检测产品性能评价指标进行了相关产品分析,指出学科融合、高效智能入侵检测、入侵检测免疫预防、无线网络入侵检测、高级躲避技术防御,是未来网络入侵检测技术的发展趋势和研究方向.

收稿日期:2015-12-03;修回日期:2016-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61272038);河南省科技厅科技攻关基金项目(0624220084);河南省基础与前沿技术研究计划项目(122300410255);河南省教育厅自然科学基金项目(2010A520044)

作者简介:蒋亚平(1970—),男,河南省永城市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为网络安全、智能计算.

Abstract: Networks are facing more and more virus, vulnerability and hacker attacks at present. As one of the core of the network security defense technology, intrusion detection technology can effectively detect attacks. The related research and technology of network intrusion detection technology at different stages of development, and the new technology and its products based on neural network, data fusion and computer immunology were summarized. Based on the performance evaluation index of intrusion detection products, it was pointed out that the discipline integration, efficient intelligent intrusion detection, intrusion detection immune prevention, wireless network intrusion detection, advanced defense technology defense were the development trend and the research direction of network intrusion detection in the future.

0 引言

随着黑客工具的日益泛滥,黑客门槛逐渐降低,网络非法攻击和入侵行为与日俱增,网络安全面临巨大的挑战.美国电信运营商 Verizon 年度调查报告显示,2014 年全球接近 8 万家公司被黑客入侵,包括全球 500 强企业在内的大约 2120 家公司承认关键数据被盗,涉及全球 60 多个国家和地区^[1].《2013 年中国网民信息安全状况研究报告》^[2]指出,74.1% 的网民遇到过信息安全问题,总人数达 4.38 亿,全国因信息安全事件而造成的个人经济损失多达 196.3 亿元.2015 年,据《经济参考报》^[3]报道,目前补天漏洞平台已知的漏洞已导致 11.27 亿用户隐私信息泄露.据测算,2014 年前 11 个月,360 网站安全检测平台共扫描各类网站 164.2 万个.其中,存在安全漏洞的网站有 61.7 万个,占扫描网站总数的 37.6%;存在高危安全漏洞的网站有 27.9 万个,占扫描网站总数的 17.0%.安全是相对的,网络入侵与安全防御之间的关系是“道高一尺,魔高一丈”,入侵者较防御者占据更大的主动权,操作系统、数据库管理系统和网络浏览器等软件的漏洞也给入侵者带来了机会和便利.惟其如此,入侵检测技术已成为当前网络安全领域研究的前沿和热点之一.本文拟基于入侵检测技术的产生背景、意义和研究进展,综述网络安全领域已开发的新技术,指出未来入侵检测技术发展的趋势和研究方向.

1 入侵检测技术发展历程

古代修建木屋时,会在木屋周围砌上一道坚固的石墙,防止火灾发生或蔓延,这种防护措施被称为“防火墙”.计算机网络的防火墙就来源于这个概念,它通过隔离外界网络未经授权的通信来抵御外界对网络的非法访问^[4].防火墙是计算机网络的第一道防线,配合访问控制、身份认证、密码技术等传统技术,能够防止网络外部的非法入侵.但是,随着计算机网络的快速发展,这些传统安全技术已远远不能满足目前的需求;同时,网络内部和系统本身存在的缺陷或漏洞也成为了要解决的重要难题之一.美国国土安全部一项研究显示,大部分黑客入侵事件都是由于计算机使用者的人为因素造成的^[5].据统计,有 70% 以上的攻击事件来自内部网络,系内部人员作案,而这恰恰是防火墙的盲区^[4].为了弥补防火墙的不足,入侵检测系统应运而生,开创了计算机网络安全防护的第二道防线.

入侵检测技术自 1980 年代早期提出以来,经过 30 多年的不断发展,从最初的基本概念和抽象模型,迅速发展出各种应用系统,成为计算机安全防护领域不可缺少的一种重要的安全防护技术.入侵检测技术可以帮助计算机系统应对网络攻击,提高系统管理人员的网络安全管理能力,在一定程度上保证信息安全基础结构的完整性.在不影响网络性能的情况下,入侵检测系统作为网络的第二道安全防线能够检测网络非法

行为(例如黑客攻击、内部人员作案或误操作、网络系统本身的缺陷或漏洞等因素所引起的非法行为)。入侵检测系统是通过收集计算机网络或系统中的信息并进行分析,从中判断网络或系统是否被攻击,进而做出及时响应,从而保护网络与系统。入侵检测技术的出现为网络安全防护作出了突出贡献,对其深入研究也成为网络安全领域的重要工作之一。

本文按照其发展时间、特点和功能,将入侵检测技术的发展归纳为入侵检测发展初期、入侵智能检测和入侵防御3个阶段。

1.1 入侵检测发展初期

入侵检测最早由 J. P. Anderson 在技术报告中提出将入侵定义为对信息非授权的访问、操作,以及导致系统不稳定、不可靠的行为^[6]。1987年, D. E. Denning^[7]提出了入侵检测的基本模型,首次将入侵检测引入计算机安全防御,推动了入侵检测的进一步研究。1988年, S. E. Smaha^[8]设计开发了 Haystack 入侵检测系统,帮助系统安全员检测和调查入侵。1989年, T. F. Lunt 等^[9]进一步改进了入侵检测模型,并提出了一种入侵检测专家系统 IDES (intrusion detection expert system) 模型,该模型采用两种不同的方法来检测异常,即统计和基于规则的异常检测,系统效率高于单一方法的使用。1990年, L. T. Heberlein 等^[10]提出了基于网络的入侵检测概念。1996年, S. S. Chen 等^[11]提出基于图形的入侵检测系统,解决了绝大多数入侵检测系统可伸缩性不足的问题。

1.2 入侵智能检测

由于入侵检测系统 IDS (intrusion detection system) 的工作环境是动态的,所以面对不断更新的工作环境,国内外专家和学者开始研究智能入侵检测技术^[12-22]。C. Sinclair 等^[12]采用遗传算法和决策树自动生成规则对网络连接进行分类,还将机器学习方法应用于网络入侵检测。

凌军等^[13]实现了基于规则的、层次化的智能入侵检测原型系统,该系统不仅能快速检测网络入侵,而且具有一定的学习适应能力。Z. W. Yu 等^[14]提出了自动调优入侵检测系统,该系统在遇到虚报时,能够根据系统操作员提供的反馈及时地自动调整检测模型。实验结果表明:如果只有 10% 的虚报调整了模型,系统性能提高约 30%;当调节延迟较短时,系统性能提高约 20%;但实际上只有 1.3% 的虚报用于调整模型。因此,系统操作员可以专注于信度不高的验证预测,因为只有这些预测确定为虚假时才可用于调整检测模型。A. K. Ghosh 等^[15]比较了 3 种不同的入侵检测方法,其中包括平等匹配、BPL 和 Elman 递归网络,发现 Elman 网络具有更好的检测率和低虚警率,取得了零虚警概率下 77% 的检测概率。蒋亚平等^[16]提出了基于疫苗算子的入侵检测模型,该模型解决了协同性差、检测率不高等问题。文献[17]中 KDD CUP99 实验表明, D-S 融合算法可以弥补系统中基本检测器各自的不足,检测结果更稳定。然而,融合的结果仍取决于基本检测器的性能,如果存在太多的低性能检测器,也很难得到满意的结果。因此,基本检测器的性能至关重要,如何提升检测器的性能是进一步研究的重点。K. S. Desale 等^[18]提出了使用流数据挖掘技术来提高 IDS 效率的机制,并使用 4 种分类器来提高 IDS 性能。实验结果表明, Naive Bayes 分类器更精确,但是需要更多的时间; Hoeffding tree 分类器精确度接近 Naive Bayes 分类器,所用时间也较少。所以,网络数据集应该选择最优分类器以提高 IDS 的性能,这就涉及自适应选择问题。

1.3 入侵防御

传统的 IDS 虽然能够发现攻击并报警,起到预警的作用,但是由于不具备防御能力,因而不能有效地抵御黑客攻击,于是诞生了入侵防御系统 IPS (intrusion prevention system)。近几年

来,IPS 发展迅速,有了大量的研究成果. 针对 SMTP 攻击和垃圾邮件, M. J. Chen 等^[23] 提出一个基于硬件的带有病毒检测引擎的 SMTP 入侵防御系统,该系统可以阻止 SMTP 攻击和病毒入侵,但防御攻击种类单一,且不能处理病毒. A. H. Al-Hamami 等^[24] 使用数据挖掘方法开发了一个基于网络的入侵预防系统(NIPS),该系统改进了基于误用和异常检测方法的 NIPS. Y. P. Jiang 等^[25] 结合计算机免疫学,提出了基于免疫的 IPS 框架,该框架包括免疫监测、免疫识别、免疫应答 3 部分,新的入侵由当前的网络监测封装,并作为疫苗通过移动代理发送给其他网络以防止相同的入侵,但无法防止变异的攻击. G. L. Chen 等^[26] 提出了智能规划识别引擎的无线 IPS 框架,同时改进了计划识别模型. 该引擎不仅可以检测和防御主要的无线攻击,而且可以减少误报,但不能检测未知的无线攻击. S. M. Alqahtani 等^[27] 提出了一种在云计算中基于服务的入侵防御系统(SIPSCC),从漏洞检测、平均时间和误报 3 个方面进行研究和评估, SIPSCC 服务对于 Snort 和 OSSEC 对抗来自 CCW 的 SQL 注入攻击是一个有效的机制. S. Li 等^[28] 提出和建立了一种基于混合交互蜜罐的主动防御入侵检测系统,该系统可以减少虚假信息,增强主动防御网络的稳定性和安全性,增加蜜罐诱骗能力,加强攻击预测能力. H. Li 等^[29] 通过结合 Snort 入侵检测系统和防火墙实现了一个小型智能 IPS,降低了漏检率,所需要的规则少,操作方便,但串联连接的方式可能导致潜在问题. 目前 IPS 的发展进度与智能 IDS 基本并驾齐驱,利用一些新的技术将其发展得更高效、更实用,是 IPS 未来发展的方向.

2 入侵检测新技术

自 1990 年代以来,研究人员利用人工智能或机器学习算法,从不同角度提出了不少新的

检测算法,这些新的检测技术被称为“先进入侵检测技术”^[30].

2.1 基于神经网络的入侵检测技术

神经网络具有学习和自适应能力、内在并行计算和存储能力、概括和抽象能力,对不完整输入信息具有一定程度的容错处理能力,因而人工神经网络非常适用于入侵检测.

RBF 神经网络是前馈型网络中一种特殊的三层神经网络^[31],其模型如图 1 所示.

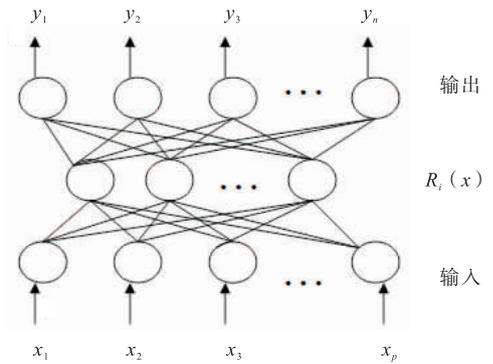


图 1 RBF 神经网络模型

Fig. 1 RBF neural network model

吴峻等^[32] 提出了基于 BP 神经网络和特征选择的入侵检测模型. Z. M. Yang 等^[33] 用实验证明了 RBF 神经网络性能比 BP 神经网络更好, RBF 神经网络具有更少的训练步骤,缩短了培训时间,在训练样本中既能精确识别已知的人侵行为,还能区分新的人侵行为和突变的人侵行为.

Elman 网络也分为输入层、隐含层、输出层 3 层,但有一个特殊的联系单元^[34].

针对目前多数 IDS 检测率低的问题,杨宏宇等^[35] 提出一种自适应进化神经网络算法 AENNA,但由于该算法在改进中引入了模拟退火算法,因而增加了算法的时间复杂度. 传统入侵检测对已知攻击类型具有较高的检测率,但是不能识别新的攻击类型,杨雅辉等^[36] 提出一种基于增量式 GHSOM 神经网络模型的人侵检

测方法来解决该问题,但是,由于网络中的数据易受噪声影响,有很大的不确定性,识别准确率不高.

2.2 基于数据融合的入侵检测技术

数据融合算法的目标是对初级警报进行数据融合,找出它们之间的关联性,从而生成高级警报,消除重复警报,以降低误报率.因此,需要计算警报属性的相似度.不同类型属性相似度的计算公式^[37]如下.

1) 数值型变量

采用加权的欧几里得距离

$$d(i, j) =$$

$$\sqrt{w_1 |x_{i1} - x_{j1}|^2 + w_2 |x_{i2} - x_{j2}|^2 + \cdots + w_p |x_{ip} - x_{jp}|^2}$$

其中,警报 $i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ip})$, 警报 $j = (x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{jp})$, w_k 表示不同属性的权重.

2) 布尔型变量

计算两警报间属性的相似度,可采用著名的简单匹配系数法

$$d(i, j) = \frac{r + s}{q + r + s + t}$$

其中, q 和 t 分别是警报 i 和 j 都为 1 或 0 的属性的数目, r 是警报 i 为 1 而警报 j 为 0 的属性的数目, s 是警报 i 为 0 而警报 j 为 1 的属性的数目.

3) 枚举型变量

枚举型变量跟布尔型变量不同,有多个取值,其计算公式为

$$d(i, j) = \frac{p - m}{p}$$

其中, m 为匹配的数目,即警报 i 和 j 取值相同的属性数目; p 是全部属性的数目.

4) 字符串型变量

$$d(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^p \delta_{ij} w_k d_{ij}}{\sum_{k=1}^p \delta_{ij} w_k}$$

其中, k 是 p 个属性中的某一个, w_k 表示属性 k 在警报相似度中的权值, δ_{ij} 取值 0 或 1, d_{ij} 是警

报 i 和 j 在 k 属性上的相似度.

以上公式都是各种融合方法计算的基本支撑,目前大多数基于融合的 IDS 通常依赖专家,缺乏融合技术的训练数据集.有效的自治方法可使融合数据更准确,更具有适应性.文献[38]提出了基于聚类技术的决策融合方法,该方法能够精确地融合来自不同检测模块的信息,数据融合模块在进行融合时考虑每个分析器的效率因素,可以预测未来的网络威胁.文献[39]采用极大极小法传感器融合的入侵检测,使用极小分布作为替代事件数据的未知真实分布,该方法提供了一个下界风险临界值.

2.3 基于计算机免疫学的入侵检测技术

目前结合计算机免疫学研究入侵检测的文献有很多,采用不同的方法、模型以提高入侵检测的效率,并实现了 IDS 的多样性及适应性.基于人工免疫的入侵检测模型是由记忆细胞检测模块、成熟细胞检测模块、未成熟细胞模块构成的.定义抗原 Ag 表示由长度为 L 的二进制串组成的 IP 地址、端口号或协议类型等网络常务特征, $Self$ 表示正常的网络行为, $Nonself$ 表示网络遭到非法攻击.模型中的耐受采用否定选择算法,匹配采用 r 连续位匹配规则,采用 Hamming 距离 (D) 计算亲和力,公式为^[40]

$$D = \sum_{i=1}^L \delta \quad \begin{cases} \delta = 1 & ab_i \neq ag_i \\ \delta = 0 & ab_i = ag_i \end{cases}$$

其中,抗体的坐标用 $\langle ab_1, ab_2, \cdots, ab_i \rangle$ 表示,抗原坐标用 $\langle ag_1, ag_2, \cdots, ag_i \rangle$ 表示.该模型具有良好的自适应性和多样性,与动态克隆选择算法相比,它受外部系统的影响更小.

无线传感器网络 (WSN) 是一种特殊的应用广泛的独立无线网络,但是它缺乏有效的安全机制,容易受到攻击,因此,文献[41]设计了一种基于免疫的 WSN 动态入侵检测模型.该模型随机选取一些记忆抗体作为疫苗,通过疫苗提取和接种技术提取优良基因,以提高检测率,

降低能源消耗.公式分别为

$$v_i^k = \begin{cases} 1 & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i^k > \theta_1 \\ 0 & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i^k < \theta_2 \\ * & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\overline{h_i^k} = \begin{cases} v_i^k & v_i^k = 0 \text{ or } 1 \\ h_i^k & v_i^k = * \end{cases}$$

其中,疫苗 $v \in D, D$ 是由 $0, 1, *$ 组成的长度为 $l(l \in N, l > 0)$ 的二进制字符串; v_i^k 表示第 i 疫苗的第 $k(k \leq l)$ 个基因编码; m_i^k 表示第 i 个记忆细胞第 k 个基因位编码; n 为优良个体数; $\overline{h_i^k}$ 为接种疫苗后的抗体, h_i^k 为待接种的成熟抗体.

张玲等^[42]提出一种基于动态疫苗接种的入侵检测方法(DIDV),以提高检测算法的收敛速度和检测率,同时该算法的时间复杂度也相对较小.检测器检测非自体时可能产生黑洞,影响检测性能.为解决该问题,刘海龙等^[43]提出一种基于协同进化的免疫实值检测器分布优化算法,该算法不仅能有效减少黑洞,而且用较少的检测器即可精确地匹配非自体,从而提高检测器性能.冯翔等^[44]针对传统人工免疫算法存在的一些缺陷,提出了基于复合免疫算法的入侵检测系统,不仅避免了匹配时产生漏洞,而且提高了检测器生成的动态性和多样性,但是相对传统算法该算法增加了检测器生成时间.

3 入侵检测产品性能评价指标与分析

3.1 入侵检测产品性能评价指标

入侵检测不会影响网络系统正常运行,而且可以在无人监控的状态下连续工作并保护网络系统.入侵检测产品即使遇到系统崩溃也应能正常工作,同时能够适应不同的网络系统,可以与其他网络安全防御产品(如防火墙)兼容、集成,达到相对全面的网络安全防护.基于上述

分析,入侵检测产品性能评价指标分为3个方面:

1)准确性.入侵检测是对网络中的入侵行为进行检测.因此,可以通过检测率、误报率、漏报率的大小来评价IDS的检测准确性.

2)效率需求.根据用户需求和设备重要性进行合理的IDS选择.例如,百兆IDS和千兆IDS差别很大,故在考虑资源充分利用的情况下,将效率需求作为不同环境下IDS的评价指标.

3)系统指标.由于IDS是软硬件结合,因此,要同时考虑软件因素和硬件因素两个方面.用户能够及时升级软件版本以保证IDS的有效性.

3.2 入侵检测产品性能分析

入侵检测的性能取决于引擎每s捕获数据包并进行处理的最大能力.在实际应用中,由于应用环境不同、需求不同,每种产品的性能优势也不同,因此,IDS产品的选用要根据具体情况,在不造成资源浪费的同时,保证网络安全.入侵检测产品性能分析对比见表1.

4 入侵检测技术的发展趋势

针对目前网络安全现状和研究进展,不管是理论上还是技术产品上入侵检测都有待更深层的研究和应用.因此,今后的研究方向主要有以下几个方面.

4.1 学科融合

入侵检测技术是一门基于人工智能、人工免疫、计算机科学等的交叉学科.目前入侵检测、计算机免疫学和法学相结合的技术——计算机取证引起了人们研究的热潮.文献[45]提出一种基于人工免疫的网络入侵动态取证方法,可以实时进行证据的提取,人工免疫与计算机学科的融合使各自的优势在一定范围内达到最优.因此,希望在未来的发展过程中将更多的学科进行融合,将生活中更多的相似特征进行

表1 入侵检测产品性能分析

Table 1 Intrusion detection product performance analysis

区域	公司	产品	优势
国内	中科网威	“天眼”入侵检测系统	采用混合检测模式和多层次的相关性分析技术,提高“天眼”报警的准确性
	启明星辰	“天阙”黑客入侵检测系统	多种技术结合防止漏报,多种措施降低误报,多种机制限制滥报,自定义入侵检测规则,全面兼容 CVE 和 CNCVE 标准
	绿盟	“冰之眼”网络入侵防御系统	出色的协议异常检测,针对未知的溢出攻击与拒绝服务攻击,达到接近 100% 的检测准确率和几乎为零的误报率
	瑞星	瑞星入侵检测系统 RIDS-100	检测结果准确,误报率低;检测引擎的运行效率高
	曙光	曙光 GodEye-HIDS 主机入侵检测系统	利用分布式入侵检测技术,有效地实现了管理周密、简单易用、检测严密、主动防护、过硬的自我保护功能、有效防范近千种黑客攻击、攻击取证等几大功能优势,具有极强的抗欺骗能力和降低漏报误报能力
国外	IIS	RealSecure	能够准确检测并及时阻断网络攻击;能够依据攻击和误用的风险等级,采取恰当的响应措施;能够集中定义、监控和管理等
	Cisco	Cisco Secure IDS	能够监视高达 100 Mb/s 的流量和检测各种攻击;提供高级的 IP 碎片重组功能和“扫除”反 IDS 检测的能力
	COAST	AAFID	由很多代理组成,每个代理独立运行,增加和删除代理不会对系统其他部分产生影响;可以适应复杂的网络拓扑环境,并能对各方面的信息进行综合分析和处理等
	NAI	CyberCop Monitor	一种混合型入侵检测系统;识别当前用户行为与历史活动的偏差;支持被破坏文件的实时替换,从而阻止黑客攻击;具备检测长时间跨度端口扫描过程的能力等

模拟仿真,找出平衡点,以提高入侵检测技术的效率.

4.2 高效智能入侵检测

虽然现在针对入侵检测算法、方法、模型有一定的研究,也具有自学习、自适应、多样性等特征,但实际应用方面还有一定的欠缺,加之网络环境越来越复杂、入侵手段越来越高明、各种数据泛滥等因素都增强了处理问题的难度.其次,入侵检测技术的检测率高低都是在特定的方法或条件下实现的,阈值的自我调节可将检测率针对不同攻击在不同环境下达到最优.如何提高海量数据的分析处理速度和不同攻击阈值的自我调节是今后研究的重点之一.

4.3 入侵检测免疫预防

当前入侵检测技术处于被动地保护网络状态,应化被动为主动,为计算机网络注射特定疫苗,以防网络遭受攻击.但考虑到成本,可以将其分为长时间或永久免疫和短时间免疫,根据网络重要程度进行合理选择.这也需要借鉴生

物疫苗技术原理制作针对不同攻击,甚至病毒的计算机疫苗,采用疫苗接种技术预防网络中的非法攻击和病毒.这都是相对普通计算机来说的,如果计算机本身具有免疫能力,则相当于人类自身的免疫系统能够抵御外界的一些病毒细菌.目前有学者已提出控制台和免疫计算机之间通过信息共享、相互协作实现实时入侵检测.今后研究的方向可以从计算机本体着手,使计算机本身具备免疫功能.

4.4 无线网络的入侵检测技术

随着无线网络的快速发展与普及,无线网络的安全也越来越受到人们的关注.虽然已有一些文献^[46-47]针对无线网络的安全进行了研究,但是相对于有线网络安全的研究,还不够成熟.面对大规模复杂的网络环境,如何提高检测效率、完善防护措施,同时满足大量剧增的无线用户,是无线网络入侵检测技术未来的研究目标.

4.5 高级躲避技术防御

天融信公司推出的“网络卫士入侵防御系

统 TopIDP”能够满足电信、金融等高性能、高稳定性行业的要求. 但一些研究人员发现, 一类恶意软件——高级躲避技术 (AET), 可以绕过 IPS 向计算机释放 Sasser 和 Conficker 等病毒且不会留下痕迹. 因此, 面对多技术组合的 AET, 甚至是未知的多技术融合的新技术, 未来 IPS 需要防御高级躲避技术.

参考文献:

- [1] 中国新闻网, 中国青年网. 中国互联网安全大会开幕 周鸿祎提出网络安全新法则 [EB/OL]. (2015 - 09 - 29) [2015 - 12 - 03]. http://finance.youth.cn/finance_IT/201509/t20150929_7166068.htm.
- [2] 中国互联网络信息中心. 2013年中国网民信息安全状况研究报告 [EB/OL]. (2013 - 12 - 19) [2015 - 12 - 03]. <http://doc.mbalib.com/view/36fa7f6e8531bc3cf3487d6c42768c70.html>.
- [3] 杨焯, 李唐宁. 信息安全“黑洞门”触目惊心 [N]. 经济参考报, 2015 - 03 - 04(001).
- [4] 赵泽茂, 吕秋云, 朱芳. 信息安全技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [5] 新浪科技. 美国研究显示人为因素带来信息安全问题 [EB/OL]. (2011 - 06 - 27) [2015 - 12 - 03]. <http://tech.sina.com.cn/i/2011-06-27/21095697326.shtml>.
- [6] ANDERSON J P. Computer security threat monitoring and surveillance [R]. [S. l. : s. n.], 1980.
- [7] DENNING D E. An intrusion detection model [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1987, 13(2): 222.
- [8] SMAHA S E. Haystack: an intrusion detection system [C] // Aerospace Computer Security Applications Conference. Piscataway: IEEE Conference Publications, 1988: 37.
- [9] LUNT T F, JAGANNATHAN R, LEE R, et al. Knowledge-based intrusion detection [C] // AI Systems in Government Conference. Piscataway: IEEE Conference Publications, 1989: 102.
- [10] HEBERLEIN L T, DIAS G V, LEVITT K N, et al. A network security monitor [J]. IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy, 1990: 296.
- [11] CHEN S S, CHEUNG S, CRAWFORD R H, et al. GrIDS-A Graph Based Intrusion Detection System for Large Networks [C] // Proceedings of the 19th National Information System Security Conference, [S. l. : s. n.], 1996: 56.
- [12] SINCLAIR C, PIERCE L, MATZNER S. An application of machine learning to network intrusion detection [C] // Computer Security Applications Conference. Piscataway: IEEE Conference Publications, 1999: 371.
- [13] 凌军, 曹阳, 尹建华, 等. 基于时态知识模型的网络入侵检测方法研究 [J]. 计算机学报, 2003, 26(11): 1591.
- [14] YU Z W, TSAI J J P, WEIGERT T. An automatically tuning intrusion detection system [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2007, 37(2): 373.
- [15] GHOSH A K, SCHWARTZBARD A, SCHATZ M. Learning program behaviour profiles for intrusion detection [C] // Conference on Workshop on Intrusion Detection and Network Monitoring [S. l. : s. n.], 1999: 51.
- [16] 蒋亚平, 赵军伟, 冯柳, 等. 基于疫苗算子的入侵检测模型 [J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(7): 2335.
- [17] ZHAO X F, JIANG H, JIAO L Y. A data fusion based intrusion detection model [C] // 2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2009: 1017.
- [18] DESALE K S, KUMATHEKAR C N, CHAVAN

- A P. Efficient intrusion detection system using stream data mining classification technique [C]// International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2015:469.
- [19] CHEN Y. Intelligent intrusion detection based on soft computing [C] // The 7th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICM TMA). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2015: 577.
- [20] HEDAR A R, OMER M A, Al-Sadek A F, et al. Hybrid evolutionary algorithms for data classification in intrusion detection systems [C] // ACIS 16th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPDP). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2015:1.
- [21] TAVALLAEE M. Nsl-kdd dataset [EB/OL]. (2012 - 05 - 20) [2015 - 12 - 03]. <http://www.iscx.ca/NSL-KDD>.
- [22] GONG W, FU W L, CAI L. A neural network based intrusion detection data fusion model [C] // Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization (CSO). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2010: 410.
- [23] CHEN M J, CHIEN K P, HUANG C Y, et al. An ASIC for SMTP intrusion prevention system [C] // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2009:1847.
- [24] AL-HAMAMI A H, AL-SAADON G M W. Development of a network-based intrusion prevention system using a data mining approach [C] // Science and Information conference (SAI). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2013:641.
- [25] JIANG Y P, CHANG J L. Intrusion prevention system base on immune vaccination [C] // Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2009: 350.
- [26] CHEN G L, YAO H, WANG Z B. An intelligent WLAN intrusion prevention system based on signature detection and plan recognition [C] // Second International Conference on Future Networks. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2010:168.
- [27] ALQAHTANI S M, BALUSHI M A, JOHN R. An intelligent intrusion prevention system for cloud computing (SIPSCC) [C] // 2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2014: 152.
- [28] LI Song, ZOU Q, HUANG W. A new type of intrusion prevention system [C] // 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2014:361.
- [29] LI H, LIU D H. Research on intelligent intrusion prevention system based on snort [C] // International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2010:251.
- [30] 唐正军, 李建华. 入侵检测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [31] 靳蕃. 神经计算智能基础 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000.
- [32] 吴峻, 李洋. 基于 BP 神经网络和特征选择的

- 入侵检测模型[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(30):114.
- [33] YANG Z M, WEI X M, BI L Y, et al. An intrusion detection system based on RBF neural network [C] // Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2005:873.
- [34] 时小虎, 梁艳春, 徐旭. 改进的 Elman 模型与递归反传神经网络[J]. 软件学报, 2003, 14(6):1110.
- [35] 杨宏宇, 赵明瑞, 谢丽霞. 基于自适应进化神经网络算法的入侵检测[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(8):1469.
- [36] 杨雅辉, 黄海珍, 沈晴霓, 等. 基于增量式 GHSOM 神经网络模型的入侵检测研究[J]. 计算机学报, 2014, 37(5):1216.
- [37] 田俊峰, 赵卫东, 杜瑞忠, 等. 新的入侵检测数据融合模型——IDSFP[J]. 通信学报, 2006, 27(6):115.
- [38] FESSI B A, ABDALLAH S B, DJEMAIEL Y, et al. A clustering data fusion method for intrusion detection system [C] // IEEE 11th International Conference on Computer and Information Technology (CIT). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2011:539.
- [39] PUGH M. A minimax approach to sensor fusion for intrusion detection [C] // IEEE on Sensors Applications Symposium (SAS). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2015:1.
- [40] 梁可心, 李涛, 刘勇, 等. 一种基于人工免疫理论的新型入侵检测模型[J]. 计算机工程与应用, 2005(2):129.
- [41] ZHAO J H, LIU N. A dynamic intrusion detection model based on immunity for wireless sensor network [C] // The Third International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2011:1.
- [42] 张玲, 白中英, 谢康. 动态疫苗接种的入侵检测侧方法[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(Z):77.
- [43] 刘海龙, 张凤斌, 席亮. 基于协同进化的免疫检测器分布优化算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(11):154.
- [44] 冯翔, 马美怡, 赵天玲, 等. 基于复合免疫算法的入侵检测系统[J]. 计算机科学, 2014, 41(12):43.
- [45] 丁菊玲, 刘晓洁, 李涛, 等. 基于人工免疫的网络入侵动态取证[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(5):108.
- [46] WANG H R, WANG H. Research and design of multi-agent based intrusion detection system on wireless network [C] // International Symposium on Computational Intelligence and Design. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2008:444.
- [47] KUMAR G V P, REDDY D K. An agent based intrusion detection system for wireless network with artificial immune system (AIS) and negative clone selection [C] // International Conference on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies (ICESC). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2014:429.



引用格式:郭延辉,尹西杰,张宏.一种用于图像分类的局部二值改进算法[J].轻工学报,2017,32(3):73-77.

中图分类号:TP391.41 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.012

文章编号:2096-1553(2017)03-0073-05

一种用于图像分类的局部二值改进算法

An improved local binary algorithm for image categorization

郭延辉,尹西杰,张宏

GUO Yan-hui, YIN Xi-jie, ZHANG Hong

关键词:

图像分类;局部二值描述符;汉明距离;特征提取;多尺度融合

山东女子学院 信息技术学院,山东 济南 250300

School of Information Technology, Shandong Women's University, Ji'nan 250300, China

Key words:

image categorization;
local binary descriptor;
Hamming distance;
feature extraction;
multiscale fusion

摘要:针对LBP特征提取过程中聚类耗时、占用内存较大的问题,提出了一种用于图像分类的局部二值改进算法.该算法用二进制描述符替代LBP中的十进制表示、用汉明距离替代欧氏距离进行特征聚类,同时将不同尺度的LBP特征进行融合,实现了多尺度图像局部二值描述.将提出的改进算法,尤其是多尺度融合特征,在PASCAL VOC 2007数据库与经典LBP方法进行对比分析,实验结果表明,本算法正确率更高,运行效率也有很大提高.

收稿日期:2016-11-01

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(J14LN54)

作者简介:郭延辉(1982—),男,山东省临清市人,山东女子学院讲师,博士,主要研究方向为机器学习和模式识别.

Abstract: In the extraction process of LBP features, most consumption of time and memory were paid for clustering. In order to address these problems, an improved local binary algorithm for image categorization was proposed. The algorithm replaced decimal system encoding LBP with binary descriptor. Meanwhile, Hamming distance was employed rather than Euclidean metric for features clustering. The multi-scale LBP features was flued for a new local binary descriptor. The result of the experiment on the PASCAL VOC 2007 dataset showed that the adopted local binary descriptor was better than the classical LBP, specifically for time consumption.

0 引言

随着数字产品的不断普及,大量图片爆炸式地增长.这些图片的有效分类,能帮助人们快速获取高质量的信息.尽管图像分类在最近几年获得很大进展,但仍是计算机视觉领域很有挑战性的一个难题.图像分类方法一般由3步构成,依次为特征提取、特征选择、利用分类算法实现特征分类.在第一步中,比较流行的方法有尺度不变特性变换(SIFT)、方向梯度直方图(HOG)、局部二值模式(LBP)、卷积神经网络(CNN)等^[1-9];在第二步,最常用的方法是特征袋 BoF(Bag of Features);在第三步,将选取的特征通过分类器,如支持向量机(SVM),Soft-max 等^[10-11]实现图像分类.

LBP 被广泛应用在计算机视觉领域,与 SIFT 和 HOG 相比,由于局部二值法用二值表示,速度更快、内存空间更少,因此,在图像匹配中具有较好的性能.然而,LBP 在分类过程中,需要将二值数据转换成十进制数生成直方图,这严重影响了 LBP 的计算效率.为了解决以上问题,本文拟改进二值描述符,并使用汉明距离^[12-13]编码 LBP 特征,以得到高效的分类效果.

1 预备知识

通常,局部二值描述通过像素的邻接像素获得 0 或 1 值;然后,将加权之和转换成十进制数;最后,采用 BoF 模型编码这些二值描述.该方法分两个步骤:一是视觉词汇构建,二是直方图绘制.其中,距离测量在这两个步骤中起重要

作用,不但要真实地反映两元素之间的远近,还要方便计算.本文采用汉明距离进行距离测量.

1.1 汉明距离

汉明距离最早被应用在通信领域,主要用于固定长度的二进制字符串的校对工作. F_n 的汉明距离 $d(x, y)$ 是两个长度为 n 的字符串 x, y 对应位不同数字的个数.如在 F_4 中, $d(1001, 1100) = 3, d(0101, 0111) = 1$.

局部二值描述是从图像中抽取的维度相同的 0, 1 值.考虑到计算效率,汉明距离更适合 BoF 模型.在计算机中,通过异或操作能够快速实现距离计算.

1.2 汉明距离编码 BoF

使用汉明距离编码 BoF 主要是为了解决直方图维度快速增长的问题.汉明距离也可以通过 K -mean 算法等实现聚类.假设 $x \in \{0, 1\}^d$, d 为二进制字符串的长度.将 n 个观察值 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 划分到 k 个集合 (S_1, S_2, \dots, S_k) 中,使分配到 k 个集合中的总误差最小,总误差公式为

$$\arg \min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} |x_j - \mu_i|_{HD}$$

通过求解上式,聚类结果得到所有的质心,即视觉单词 $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$.假设从图片中抽取的一组描述为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,每个描述符 x_i 被分配到相应的视觉单词 μ_i 中:

$$\arg \min_{i=1 \dots k} |x_j - \mu_i|_{HD}$$

直方图是一个由这些局部描述符组成的 k 维非负向量 F .

BoF 模型的性能主要取决于 K -mean 聚类.在聚类过程中,距离测量方法对聚类结果至关

重要^[7],也会对存储空间和计算效率产生重要影响. 汉明距离和欧式距离聚类结果如图 1 所示,其中,网格点代表局部二值描述符,· 代表获得的质心.

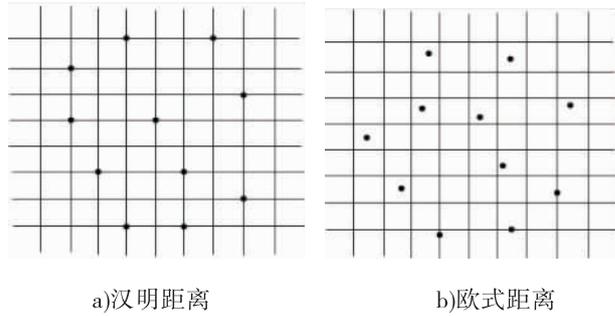


图 1 汉明距离和欧式距离聚类结果

Fig. 1 The clustering result of Hamming distance and Eudidean distance

由图 1 可见,汉明距离聚类结果都落在网格上,而欧式距离聚类结果大多落在网格内,因此汉明距离更适合局部二值描述.

2 图像分类框架

利用局部二值模式进行图像分类的主要步骤一般为二值特征抽取→利用聚类方法建模特征袋→根据特征袋计算图像的特征向量→用分类器实现图像分类. 具体过程如图 2 所示.

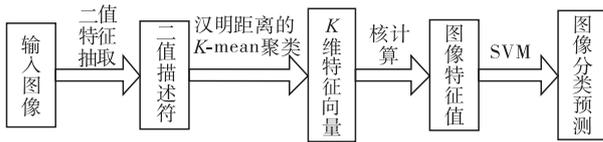


图 2 图像分类的过程与步骤

Fig. 2 The process and steps of image classification

2.1 局部二值特征提取

在进行像素特征值提取时,LBP 采用不同的半径,选取不同的邻居个数. 相应地,点 (x_c, y_c) 的 LBP 特征值定义如下:

$$\tau(g_c, g_p) = \begin{cases} 1 & g_c < g_p \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

其中, g_p 是邻接像素的灰度值, g_c 是中心像素

值. 按照不同的邻接像素的半径 r , 一般会选择不同的像素点个数 p . 本文提取 1 个像素的 p 维 LBP 特征值为

$$f_p(g_c) = \sum_{1 \leq i \leq p} 2^{\tau(g_c, g_p)}$$

最后,求出所有像素的 p 维 LBP 特征值.

2.2 使用汉明距离的 BoF 模型

特征提取后,一幅图像被表示成一个 LBP 特征值的集合. 本文不需要计算十进制数的特征值,而是直接使用二值描述符描述特征值(0 或 1). 然后,用汉明距离对特征值进行聚类,得到每幅图片的 BoF 特征向量 F .

2.3 图像分类

获取输入图像的 BoF 描述之后,本文通过 SVM 对图像进行分类. SVM 作为基于直方图的图像分类器已经得到广泛应用. 本文用 χ^2 作为测量两个特征向量 F 和 F' 的距离(n 为特征向量的个数):

$$dist_{\chi^2}(F, F') = \sum_{i=1}^n \frac{(F_i - F'_i)^2}{F_i + F'_i}$$

将基于 χ^2 的核函数应用到 SVM 中,训练 SVM 分类器. 核函数公式如下:

$$K_{\chi^2}(F, F') = e^{-\frac{1}{D} dist_{\chi^2}(F, F')}$$

其中, D 为距离归一化参数. 本文中, D 为所有训练数据的平均距离. 最后,将训练好的 SVM 模型应用到测试图像集,并预测分类结果.

3 实验结果与分析

3.1 实验设置

为了验证本文提出的方法,采用比较经典的 LBP 算法作为对比对象,在 PASCAL VOC 2007 数据集上进行实验,对比了原始 LBP 特征和基于汉明距离的 BoF 特征的平均正确率 (mAP),以及 BoF 模型使用不同距离测量方法的耗时. 实验采用的二进制描述符与选取邻接像素的个数 p 相同,视觉词汇的大小用 c 表示. 文献[1] 提出,词汇越多,图像的分类效果越

好。但是,词汇量太多会导致直方图太稀疏,比较也更困难。为了控制好词汇量的大小,本文做了一系列的实验,最后的设置如下: $\{r = 1, p = 8\}, c = 220; \{r = 2, p = 16\}, c = 1300; \{r = 3, p = 24\}, c = 1400; \{r = 2, p = 16\}, c = 1300; \{r = 3, p = 24\}, c = 1400$ 。采用 LibSVM^[14] 进行分类器训练。

3.2 实验结果比较

两种方法不同距离测度的 *mAP* 结果如表 1 所示。由表 1 可见,本文方法的 *mAP* 优于经典的 LBP 算法。由于 LBP 在计算特征值的时候需要加权, LBP 的邻接像素值不能超过 32。而本文提出的方法能够有效地避免这个问题。

表 1 两种方法不同距离测度的 *mAP* 结果

Table 1 The *mAP* comparison of different distance measure of two methods %

不同距离测度	<i>mAP</i>
LBP $\{r = 1, p = 8\}$	28.30
BoF $\{r = 1, p = 8\}$	28.40
LBP $\{r = 2, p = 16\}$	32.11
BoF $\{r = 2, p = 16\}$	33.09
LBP $\{r = 3, p = 24\}$	36.13
BoF $\{r = 3, p = 24\}$	35.09
LBP $\{r = 4, p = 32\}$	—
BoF $\{r = 4, p = 32\}$	32.52
LBP $\{r = 5, p = 40\}$	—
BoF $\{r = 5, p = 40\}$	33.24
LBP $\{r = 6, p = 48\}$	—
BoF $\{r = 6, p = 48\}$	32.78

本文将不同尺度的 LBP 特征值进行组合来评估 LBP 的多尺度融合。选取 $\{r = 1, 2, 3, p = 8 + 16 + 24\}$ 作为每个像素的特征提取方案。组合后的二进制特征维度为 48。同时,笔者将传统的 LBP 直方图特征 $\{r = 1, p = 8\}, \{r = 2, p = 16\}, \{r = 3, p = 24\}$ 进行融合。本文方法的 *mAP* 为 35.17%, 而融合后的 LBP 获得的 *mAP* 仅为 32.49%。

本文采用汉明距离实现特征聚类,并对汉明距离和欧式距离做了时间消耗对比实验。该

实验条件为 Intel(R) Core(TM) i7 CPU 940@2.93 GHz, 9 GB RAM。实验结果表明,同样条件下,欧氏距离的时间耗费约是汉明距离的 200 倍(汉明距离所需时间为 98.93 s, 欧氏距离需要 19 046.43 s)。特征提取设置为 $\{r = 1, p = 8\}$ 时,利用汉明距离获得的 *mAP* 为 28.20%, 略微低于欧氏距离的 *mAP* 为 29.13%。但是,汉明距离可以节省更多的时间,而且可以在特征提取时选用更大的半径和更多的邻接像素。

4 结语

本文提出了一种改进的用于图像分类的局部二值描述方法。该方法能够有效解决局部二值方法对高维度的限制,同时,由于汉明距离更适合计算机操作,大大提高了运行效率。本文还将提出的方法与经典 LBP 方法在 PASCAL VOC 2007 数据库上做了对比,计算时间有很大优势。今后,会将随机场理论加入特征提取过程中,实现邻接像素的选择。

参考文献:

[1] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91.

[2] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '05). Piscataway: IEEE, 2005, 1: 886.

[3] OJALA T, PIETIKAINEN M, MAENPAA T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 971.

[4] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolution-

- al neural networks [C] // NIPS2012. Nevada: ACM Press, 2012: 1097.
- [5] CALONDER M, LEPETIT V, STRECHA C, et al. BRIEF: binary Robust independent elementary features [C] // ECCV2010. Crete: Springer Press, 2010, 6314: 778.
- [6] KUMAR D A, ANNIE M L C. Clustering dichotomous data for health care [J]. International Journal of Information Sciences and Techniques, 2012, 2(2): 23.
- [7] PANDIT S, GUPTA S. A comparative study on distance measuring approaches for clustering [J]. International Journal of Research in Computer Science, 2011, 2(1): 29.
- [8] CAPUTO B, HAYMAN E, MALLIKARJUNA P. Class-specific material categorisation [C] // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV' 2005). Piscataway: IEEE, 2005: 1597.
- [9] ZHU C, BICHOT C E, CHEN L. Visual object recognition using daisy descriptor [C] // 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Piscataway: IEEE, 2011: 1.
- [10] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks [J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273.
- [11] GOLD S, RANGARAJAN A. Softmax to soft-sign: Neural network algorithms for combinatorial optimization [J]. Journal of Artificial Neural Networks, 1996, 2(4): 381.
- [12] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection [C] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2005: 886.
- [13] OJALA T, PIETIKÄINEN M, MÄENPÄÄ T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 971.
- [14] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: A library for support vector machines [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 27.
- (上接第 26 页)
- [6] 孟宏. 中医药理论与创意在化妆品中的应用 [J]. 北京日化, 2016(2): 2.
- [7] 董银卯, 孟宏, 何聪芬. 中医药理论与技术在化妆品中的应用 [J]. 日用化学品科学, 2009, 32(9): 14.
- [8] 徐灵胎. 徐灵胎医书全集 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2001.
- [9] 崔玲. 神农本草经 [M]. 天津: 天津古籍出版社, 2009.
- [10] 邓小锋, 孟宏, 李丽, 等. 炮制技术在化妆品植物原料开发中的应用 [J]. 日用化学工业, 2015, 45(4): 226.
- [11] 赵二劳, 郭青枝, 白建华. 几种中草药防晒成分的提取及其性能测定 [J]. 北方园艺, 2010(11): 197.
- [12] 李楚忠, 高红军, 丛琳. 天然植物保湿成分在护肤品中的应用概况 [J]. 日用化学品科学, 2014, 37(7): 24.
- [13] SÜNTAR I, AKKOL E K, KELES H, et al. Exploration of the wound healing potential of *Helichrysum graveolens* (Bieb.) Sweet: isolation of apigenin as an active component [J]. J Ethnopharmacol, 2013, 149(1): 103.
- [14] 谢艳君, 孔维军, 杨美华, 等. 化妆品中常用中草药原料研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(20): 3925.
- [15] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的中医药 [M]. 北京: 人民出版社, 2016.



引用格式:张卫正,刘晓燕,王国飞,等. 基于车载 LiDAR 的行道树胸径和株距测量[J]. 轻工学报,2017,32(3):78-84.

中图分类号:TN959.4;S758.4 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.013

文章编号:2096-1553(2017)03-0078-07

基于车载 LiDAR 的行道树胸径和株距测量

Measurement of DBH and row spacing of street trees based on mobile LiDAR

张卫正¹, 刘晓燕², 王国飞³, 张焕龙⁴, 张伟伟¹, 陈启强¹,
董寿银⁵

ZHANG Wei-zheng¹, LIU Xiao-yan², WANG Guo-fei³, ZHANG Huan-long⁴,
ZHANG Wei-wei¹, CHEN Qi-qiang¹, DONG Shou-yin⁵

1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 中国船舶重工集团公司 第七一三研究所, 河南 郑州 450000;
3. 星际空间(天津)科技发展有限公司 航测事业部, 天津 300384;
4. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;
5. 浙江省第二测绘院 航测与遥感三分院, 浙江 杭州 310012

1. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Seventh Thirteen Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450000, China;
3. Department of Aerial Division, Tianjin StarGIS Engineering Co., Ltd., Tianjin 300384, China;
4. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
5. Third Branch of Aerial Survey and Remote Sensing, The Second Surveying and Mapping Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China

关键词:
车载 LiDAR; 行道树; 胸径; 株距; 测量与计量

Key words:
mobile LiDAR;
street trees;
diameter at breast height (DBH);
row spacing;
measurement and metrology

摘要:采用车载 LiDAR 获取点云, 根据分层投影算法结合地物特征等先验知识实现各单株行道树点云的提取, 通过最小二乘法拟合圆, 运用 Matlab 编程测量行道树胸径和株距。实验结果表明, 该方法与人工测量两种测量方法测得的行道树胸径和相邻行道树的间距的均方根误差分别为 0.008 7 m 和 0.010 3 m, 相关系数分别为 0.968 2 和 0.999 6。该方法精度高、测量范围大, 可为检测行道树分布和生长状态提供优质数据。

收稿日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61403349,61503173);郑州轻工业学院博士科研基金项目(JSJ20170017);郑州轻工业学院2017年大学生科技活动项目

作者简介:张卫正(1982—),男,河南省滑县人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为生物信息采集处理与农业信息化。

Abstract: Points cloud of street trees were obtained by vehicle LiDAR. The existing hierarchical projection algorithm was combined with heuristic knowledge of object characteristics to achieve the points cloud extraction of each tree. Fitting circle by least squares, the diameter at breast height (DBH) and row spacing of street trees were measured by Matlab programming. The experimental results showed that the root mean square (RMS) error of DBH and row spacing of LiDAR-based measurement and manual measurement were 0.008 7 m and 0.010 3 m, the correlation coefficients were 0.968 2 and 0.999 6. The proposed method had high precision and wide measuring range and provided quality data for the detection of distribution and growth state of street trees.

0 引言

行道树等道路绿化植被具有释氧固碳、蒸腾吸热、消声滞尘和杀菌防污等作用^[1],除了用于观赏,还能减少地表水分蒸发,抑制盐碱的上移,防止土壤盐渍化,对环境、土壤和气候因子具有良好的调节作用^[2]. 城市道路绿化规定中,对行道树的苗木胸径要求是:快长树不得小于 5 cm,慢长树不宜小于 8 cm;最小种植株距应为 4 m^[3]. 行道树等道路植被信息的获取与监测技术越来越受到国内外政府部门和相关行业的重视,研究行道树胸径和株距等生长分布情况,有助于市政管理部门及时、准确地掌握信息,为植被生长监测和管理提供依据^[4-8].

地面光探测与测量 LiDAR (light detection and ranging) 在单株树木的信息提取和参数测量方面具有优势,但对于大范围的行道树信息的采集,则需要布设非常多的站点,其数据融合与处理复杂繁琐,难以在短期内完成,人工成本高^[9-11]. 此外,图像只能获取树木的二维色彩信息,超声波传感器采样率较低^[12-13]. 车载 LiDAR 具有主动性强、不受光照和阴影影响、地物间隙穿透能力良好等优点,对植被空间结构探测能力强,可用于快速获取大范围树木的三维结构信息,是应用于检测行道树等植被分布的新技术,对于测绘数据采集方式、效率、数据丰富度和后期数据处理等,在方法和手段上有质的飞跃^[14-17].

鉴于此,本文拟在车载 LiDAR 技术基础

上,采用现有的分层投影结合地物特征等先验知识提取行道树点云,利用最小二乘法拟合各单株行道树胸径范围内的点云,从而得到单株行道树的胸径和相邻行道树株距的准确数据,以期为城市行道树的生长研究和监测提供依据.

1 研究区域与实验系统

天津市地处东经 116°43' ~ 118°04', 北纬 38°34' ~ 40°15', 市区中心位于东经 117°10', 北纬 39°10'. 主要地貌为平原及洼地,北部有低山丘陵,海拔自北向南呈下降趋势. 数据采集于中心城区大学城的市政道路 (117°07' E, 39°05' N). 研究区域临近渤海湾,属暖温带半湿润季风性海洋气候:四季分明,春季多风,干旱少雨;夏季炎热,雨水集中;秋季气爽,冷暖适中;冬季寒冷,干燥少雪. 研究的行道树树种是国槐,广泛种植在北方的公园和道路两侧,该树种根系发达,抗风耐旱,尤其适宜城市土壤板结等不良环境条件,对 SO₂ 和烟尘等污染物的抗污性较强. 幼龄时生长较快,以后中速生长,寿命很长.

该研究采用加拿大 Optech 公司的 Lynx V100 车载激光雷达系统,该系统使用人眼安全激光,配备有两台具有 360° 视场的激光扫描仪、两台光学相机、POS 定位定向系统,其工作模式是在车辆行进中对周边 360° 视场进行环绕扫描测量,最大限度地减少扫描漏洞. 车载平台为三菱汽车 (Outlander EX 城市型 SUV), 该车利用电子控制多模式 4WD 驱动技术,以保证

强大的动力性能和良好的运行效果,系统和平台如图 1 所示.



图 1 Lynx V100 车载激光雷达系统
Fig.1 Lynx V100 mobile LiDAR system

为确保在风力较小的良好天气采集数据,减小由行人、车辆产生的遮挡和由风引起行道树晃动所产生的误差,外业数据采集需遵循如下原则:

- 1) GNSS 基准站采样频率不低于 1 Hz, 基站需完整覆盖移动测量设备作业时间段.
- 2) 正式作业开始、结束前,为了保证定位精度,移动测量车需要静态观测 5 ~ 10 min; 作业过程中应注意行车方式和行车速度,争取最大范围地覆盖目标地物.
- 3) 若作业期间 GPS 失锁时间过长,则需要在信号正常区域重新静态初始化 5 min,同时设备操作人员需标记该地段,供内业数据处理^[18].

经过数据采集路线规划,于 2016 年 5 月 23 日上午在市中心大学城选择行人、车辆较少的时段和路段开始数据采集,搭载平台的汽车车速保持在 50 km/h 以内,以保证汽车行驶稳定与安全.

2 研究方法

2.1 研究区域点云预处理

通过车载 LiDAR 采集点云数据,并进行预处理:

- 1) 结合地面 GNSS 基站采集的卫星数据,对移动平台采集的原始数据进行解算;
- 2) 为实现工程化管理,可对解算后的点云

数据进行分幅处理;

- 3) 对原始解算输出后的点云数据或分幅处理后的点云数据进行坐标转换.

为了提高点云精度,需要在道路路面上布设一定数量的控制点,结合外业测量控制点,对预处理后的点云进行精度改正,得到的路段点云如图 2 所示.从图 2 可以看出,目标区域包含行道树、建筑、道路、电力线等点云,行道树位于道路两侧,平行排列.

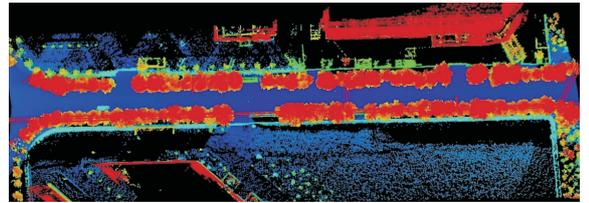


图 2 部分路段点云
Fig.2 Points cloud of city road section

2.2 地面和行道树点云提取

要测量行道树的胸径和株距,需要从车载 LiDAR 所采集的复杂地物点云中提取行道树点云.步骤为:

- 1) 根据车辆行驶轨迹和道路中心线,向两侧扩充适当的距离,删除该距离外的点云以减小计算量.
- 2) 分离地面点.依据给定尺寸设定正方形网格,从每个网格中提取高程最低的点作为地面种子点,添加到不规则三角网(TIN)上,建立初始地面模型.通常网格应大于点云数据中最大参照物(行道树).遍历 TIN,计算包含在三角网内各个三角形中的点与其平面的距离 d ,若 d 小于设定的阈值,则规定该点为地面点,加入到地面点集合.重复此步骤,直到满足条件的地面点都加入到三角网中,完成迭代^[19].

3) 行道树点云的提取.在已有研究^[20-22]的基础上,本文采用分层投影法结合地物特征等的先验知识进行行道树点云的提取分割.

单株行道树的点云如图 3a) 所示,行道树

底部有可能是低矮灌木或垃圾桶等,高度低于 1 m. 图 3b) 为树冠冠层点云,它精确地反映了树冠的形态. 图 3c) 为树干点云,从中可以进行胸径测量. 胸径又称干径,指乔木主干离地表面胸高 1.3 m 处的直径,断面畸形时,测取最大值和最小值的平均值.

根据提取的行道树点云,本文截取 1.0 ~ 2.8 m 的树干部分,如图 4 所示.

2.3 胸径和株距测量

为了测量胸径和株距,需要提取行道树的胸径处点云. 截取 1.2 ~ 1.4 m 间的行道树胸径区间点云,进行二维平面投影(图 5 中绿色点为点云,红色圆为拟合圆). 单株行道树胸径计算采用最小二乘法拟合圆形作为胸径的范围. 最小二乘法又称最小平方方法,是一种通过误差平方和最小化寻找数据最佳函数匹配的数学优化方法. 利用该方法可以简便地求得未知的数据,并使之与实际数据之间误差的平方和最小,可用于圆形等形状的曲线拟合^[23]. 拟合公式为

$$r^2 = (x - A)^2 + (y - B)^2$$

展开后得到 $r^2 = x^2 - 2Ax + A^2 + y^2 -$

$2By + B^2$, 令 $a = -2A, b = -2B, c = A^2 + B^2 - r^2$, 可得圆曲线方程的另一个形式,即

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0$$

只要求出参数 a, b, c 就可以求得行道树的半径 r 和圆心 (A, B) , 其中 $r = 0.5 \times (a^2 + b^2 - 4c)^{0.5}, A = -0.5a, B = -0.5b$.

单株行道树胸径点云中的点 (X_i, Y_i) 到圆心的距离

$$d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2$$

点到圆心距离的平方与圆半径平方的差为 $\delta_i = d_i^2 - r^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2 - r^2 =$

$$X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c$$

令 $Q(a, b, c)$ 为 δ_i 的平方和, 即

$$Q(a, b, c) = \sum \delta_i^2 =$$

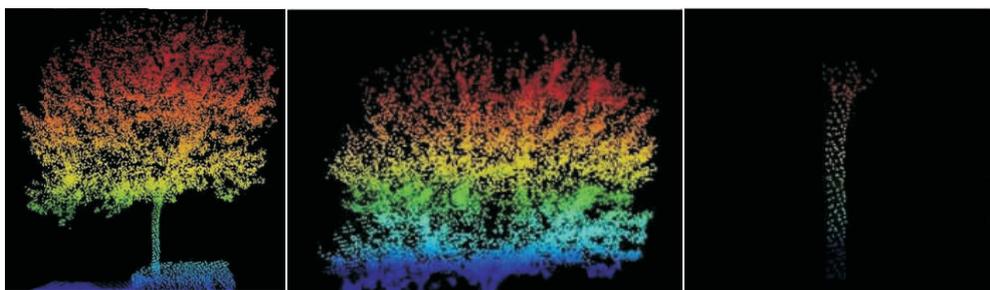
$$\sum (X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2$$

采用 Matlab 计算参数 a, b, c , 使得 $Q(a, b, c)$ 值最小.

3 实验结果与分析

3.1 行道树点云提取分析

根据图 5 采用最小二乘法拟合计算行道树



a) 整株点云

b) 冠层点云

c) 树干点云

图 3 单株行道树点云

Fig. 3 Points cloud of individual street tree



图 4 行道树树干点云

Fig. 4 Points cloud of street trees trunks

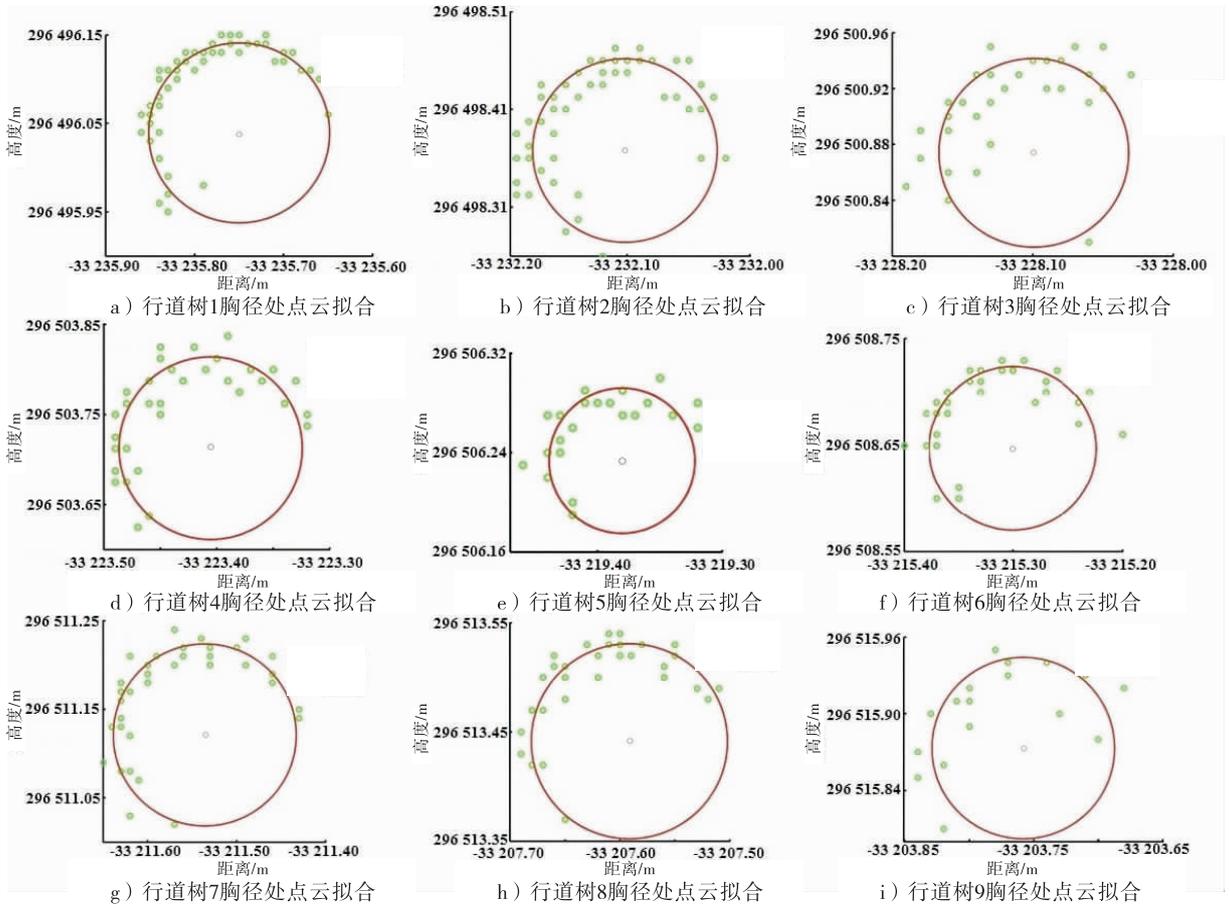


图5 行道树胸径区间点云

Fig. 5 Points cloud of DBH interval

的直径 R_1 和圆心. 根据行道树胸径处的圆心计算得到相邻行道树间距 S_1 , 如表 1 所示.

市政园林部门对行道树的要求是树体大小尽可能整齐划一, 避免因高低错落、粗细各异而

表 1 车载 LiDAR 和人工测量行道树胸径和株距

Table 1 Measurement results of DBH and row spacing of street trees by mobile LiDAR method and manual method

序号	R_1/m	R_2/m	S_1/m	S_2/m
1	0.188 0	0.196 1	—	—
2	0.149 7	0.158 2	4.321 6	4.310 7
3	0.135 1	0.129 5	4.723 4	4.734 8
4	0.162 0	0.152 3	5.473 8	5.482 2
5	0.115 4	0.107 6	4.759 5	4.746 7
6	0.152 9	0.144 7	4.742 2	4.748 9
7	0.205 7	0.200 3	4.504 8	4.512 1
8	0.178 0	0.165 4	4.576 4	4.590 2
9	0.142 1	0.131 9	4.539 4	4.548 6

影响美观, 同时带来管理上的不便. 从表 1 可以看出, 行道树的胸径大小不一, 胸径处的半径也在一定程度上反映了树木生长速度、体量大小和生长形态. 相邻行道树间距在 4.321 6 ~ 4.759 5 m 范围内变化, 这反映了种植时未能严格按照间距标准种植, 或之后有人为挪动等.

行道树点云的准确提取是进行胸径和株距测量的基础, 采用分层投影法结合地物特征等的先验知识进行行道树点云的提取分割, 在计算胸径时, 由于最小二乘法拟合圆是对胸径附近 1.2 ~ 1.4 m 间的所有点云在水平面投影拟合, 算法计算了点集中的每个点, 如果具有极值或是相对偏离胸径较远的非行道树胸径点云在拟合的胸径点集中, 就会产生较大的误差, 本文在采用最小二乘法拟合圆时, 排除了 x 轴和 y

轴的4个极值,以减小计算误差.

3.2 本文方法与人工测量方法比较

将本文基于车载 LiDAR 点云的激光测量方法与传统的人工测量方法进行比较. 现场用卷尺沿着树干在距离地面 1.3 m 的高度测量行道树的胸径(周长除以 π)为 R_2 ,在平行于行道树胸径中心的位置测量相邻行道树的株距为 S_2 ,结果见表 1.

由表 1 可知,车载 LiDAR 测量与人工测量的行道树胸径的平均绝对误差为 0.008 5 m,均方根误差为 0.008 7 m,相关系数 R 为 0.968 2;车载 LiDAR 测量与人工测量的相邻行道树间距的平均绝对误差为 0.010 1 m,均方根误差为 0.010 3 m,相关系数 R 为 0.999 6,可以满足要求.

4 结语

本文采用车载 LiDAR 获取点云,根据行道树的特点,在现有的分层投影结合地物特征等先验知识的基础上,运用 Matlab 编程实现对车载 LiDAR 数据中行道树点云的提取,并采用最小二乘法拟合圆,计算得到单株行道树的胸径和相邻行道树的株距,从而实现了大范围的行道树胸径和株距的快速测量. 车载 LiDAR 测量与人工测量的行道树胸径和相邻行道树间距的均方根误差分别为 0.008 7 m 和 0.010 3 m,相关系数 R 分别为 0.968 2 和 0.999 6,可以满足要求,为检测行道树分布和生长状态提供了优质数据源. 车载 LiDAR 具有精度高、测量范围大等优点,具有广阔的应用前景,将其引入到市政园林、林业等领域有助于政府等相关部门进行高效合理的科学管理和决策.

林木在不同季节的树冠形态和树叶茂密程度不同,这对采集的车载 LiDAR 数据有直接影响,在一定程度上对提取行道树点云方法的适应性提出了挑战. 本文实验数据的采集是在植

被生长旺盛的时间段,若在冬季或对树叶稀少的树种,更有利于树干点云的处理和胸径的计算,但可能会对从地物点云中分离行道树点云产生影响,需要通过大量的实践来验证提取效果. 此外,工程施工和其他人为破坏也可能对最终结果产生影响,需要在后续研究中进行探讨.

参考文献:

- [1] 史晓丽. 北京市行道树固碳释氧滞尘效益的初步研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- [2] 商洪池,洪金祥. 浅析盐碱地的治理及其园林绿化的方法[J]. 园林科技,2003(2):24.
- [3] 胡长龙. 城市道路绿化[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [4] 滨谊. 城市道路景观规划设计[M]. 南京:东南大学出版社,2002.
- [5] CHEN Q, GONG P, BALDOCCHI D, et al. Estimating basal area and stem volume for individual trees from LiDAR data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(12):1355.
- [6] SRINIVASAN S, POPESCU S C, ERIKSSON M, et al. Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter[J]. Remote Sensing, 2015, 7(2):1877.
- [7] 吴宾,余柏蕙,岳文辉,等. 一种基于车载激光扫描点云数据的单株行道树信息提取方法[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2013(2):38.
- [8] 毛杰,张西童,吴珍珍,等. 基于三维激光扫描技术的景观石重建技术[J]. 黑龙江工程学院学报,2016,30(2):12.
- [9] 徐伟恒,冯仲科,苏志芳,等. 一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J]. 光谱学与光谱分析,2014, 34(2):465.
- [10] BÉLAND M, WIDLOWSKI J L, FOURNIER R

- A, et al. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9):1252.
- [11] BALSARI P, DORUCHOWSKI G, MARUCCO P, et al. A system for adjusting the spray application to the target characteristics[J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2008(10):1128.
- [12] 张富贵,洪添胜,肖磊,等. 果树冠幅的检测机理研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4):25.
- [13] 俞龙,洪添胜,赵祚喜,等. 基于超声波的果树冠层三维重构与体积测量[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11):204.
- [14] 李永强,杨莎莎,李框宇,等. 车载激光扫描数据中杆状地物提取[J]. *测绘科学*, 2015, 40(8):42.
- [15] CHEEIN F A A, GUIVANT J, SANZ R, et al. Real-time approaches for characterization of fully and partially scanned canopies in groves[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015(118):361.
- [16] ROSELL P J R, SANZ C R, LLORENS C J, et al. A tractor-mounted scanning LiDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102(2):128.
- [17] LIN Y. LiDAR: An important tool for next-generation phenotyping technology of high potential for plant phenomics[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015(119):61.
- [18] 田春来,邓世军,王国飞,等. 一种基于点云的道路信息自动提取方法:201410047529.9 [P]. 2014-02-11.
- [19] 管海燕,邓非,张剑清,等. 面向对象的航空影像与 LiDAR 数据融合分类[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(7):830.
- [20] 陈昌鸣,向煜,龙川. 基于车载激光雷达的行道树提取研究[J]. *北京测绘*, 2015(1):18.
- [21] 杨莎莎,李永强,李框宇,等. 基于车载 LiDAR 数据的单株树提取[J]. *测绘工程*, 2014, 23(8):23.
- [22] 冯义从,岑敏仪,张同刚. 基于知识的车载 LiDAR 地物自动分类[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(5):122.
- [23] 贾小勇,徐传胜,白欣. 最小二乘法的创立及其思想方法[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(3):507.

本刊数字网络传播声明

本刊已许可万方数据资源系统、维普网、博看网、超星、中国科技论文在线、中教数据库、91阅读网等,以及中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文. 其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付. 作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明.



引用格式:韩斌慧. 纵轴式掘进机多工况下振动特性试验研究[J]. 轻工学报,2017,32(3): 85-95.

中图分类号:TB123 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.014

文章编号:2096-1553(2017)03-0085-11

纵轴式掘进机多工况下振动特性试验研究

Experiment study of vibration characteristics for the longitudinal axial roadheader under multi-working conditions

韩斌慧

HAN Bin-hui

西安航空职业技术学院 航空制造工程学院,陕西 西安 710089

School of Aeromautical Manufacturing Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China

关键词:

纵轴式掘进机;多工况;振动特性

Key words:

longitudinal axial roadheader; multi-working conditions; vibration characteristics

摘要:为掌握纵轴式掘进机关键部件的振动特性,对 EBJ-120TP 型掘进机进行了空载、钻进、向右横扫、向下竖扫、向左横扫多工况下振动特性试验。结果表明,截割工况与空载工况相比,呈现出随机振动特征并伴随有瞬间冲击;掘进机在截割工况下的振动表现出非稳态、非线性的特性,且主振频在 10~1000 Hz 范围,主频带分布较宽;钻进工况下振动最激烈,该工况下截割减速器的振动烈度最大,等级为 D,电控箱振动烈度等级达到 C;向下竖扫和钻进工况下舒适性最差,严重影响操作人员身体状况。通过采用黏弹性阻尼材料减振措施,振动值较原型机下降了 30%。

收稿日期:2016-06-20

基金项目:国家青年科学基金项目(51305288);西安航空职业技术学院 2016—2017 年度自选综合科研项目(16XHXY-001)

作者简介:韩斌慧(1971—),男,山西省晋城市人,西安航空职业技术学院高级工程师,博士,主要研究方向为机械设计及理论。

Abstract: To master the vibration characteristics of the longitudinal-type roadheader, the in-situ vibration test over the EBJ-120TP under classic working conditions, i. e., free loading, drilling, right-and-left cutting and downward cutting was carried out. The results were as follows: the cutting condition exhibited a random vibration characteristic compared with free loading, and was accompanied by an instantaneous impact; the roadheader vibration displayed non-stable and nonlinear feature, and had an extensive frequency scale ranging from 10 Hz to 1000 Hz; drilling was the most serious working condition, in which the cutting gear box had greatest vibration with level D (not permissible), while electronic control with level C (just tolerable); the operator would feel worst in downward cutting and drilling. Through the using of viscoelastic damping material vibration reduction measures, the vibration value of the prototype machine decreased by 30%.

0 引言

纵轴式掘进机是煤矿综合机械化采煤技术的标志性设备. 随着开采条件日益苛刻, 以及受开采工艺、环境保护、职业健康等方面的限制, 大功率、低振动、重型化、自带除尘功能的掘进设备已成为掘进机行业市场的竞争热点. 目前, 掘进机整机功率超过400 kW, 被截割煤层硬度系数 $f=3\sim 10$, 并大量配备除尘风机. 整机功率的提高在为截割头提供更大截割力的同时, 也使得机器的振动加剧. 为了解决这一矛盾, 国内外诸多业内学者围绕影响纵轴式掘进机振动和稳定性的相关因素做了大量研究, 主要集中在以下方面.

1) 针对整机和关键元部件开展的振动特性及稳定性研究: O. Acaroglu 等^[1]通过简化纵轴式掘进机结构、引入稳定性指数来评价其在各种工况下的稳定性. 李晓豁等^[2-6]通过建立数学模型, 在整机模态分析、垂直截割、水平截割动力学模型建立、纵向随机振动分析、纵向和横向联合随机振动分析等方面循序渐进, 进行了大量研究. 陶晓^[7]对纵轴式掘进机电控箱从锥形减振器到 EA 型减振器的发展过程进行了论述, 并将具有刚度和阻尼非线性特性的钢丝绳减振器应用于 AM-50 型纵轴式掘进机电控箱.

2) 岩石切割机理研究: 截割头与岩石相互作用是纵轴式掘进机振动主要的激励源, 故对

岩石参数及其切割性能的研究对于解决振动控制问题具有重要意义. R. Jerzy 等^[8]通过建立 2D 和 3D 的岩石离散元模型, 研究了岩石在截齿作用下的破碎过程, 证明离散元模型在反应岩石真实破碎过程中有较好的精度. A. Michael^[9]研究了岩石的磨蚀性与岩石应力状态的关系, 并进一步讨论了纵轴式掘进机截齿损耗与磨蚀性指数(CAI)的关系.

3) 除尘理论与实践研究: 对于机载式除尘设备, 含尘气体在气流冲击和风机转子旋转力作用下产生的振动也是纵轴式掘进机的振动源, 因此对粉尘产生机理、分布规律和除尘设备的研究意义深远. H. T. Wang 等^[10]进行了井下新型泡沫除尘装置除尘试验, 结果表明, 泡沫除尘较传统的水雾除尘在除尘效果和工作面可见度改善方面有明显提高. H. T. Wang 等^[11]提出一种新型矿用泡沫除尘设备, 并在不同工作压力下进行了该设备的除尘性能试验. 除尘实践领域的研究有: 煤机制造企业通过研究截割头、截齿分布, 主动控制粉尘的产生量^[12]; 截割部位设计通过改进内喷雾结构、增加外喷雾装置提高除尘效率^[13]; 三一重配置了负压除尘风机^[14], 山西天地煤机装备有限公司引进了德国 CFT 湿式、干式除尘技术等, 在保证良好除尘效果的同时, 控制了整机振动水平^[15].

纵轴式掘进机振动是多因素共同作用的结果. 强烈的振动不仅会加速截齿的损耗, 造成关键零部件过度疲劳, 液压、电控系统失效, 降低

掘进效率,影响掘进过程安全、可靠地进行,而且会产生大量噪音,严重危害操作人员身心健康.本研究以 EBJ-120TP 纵轴式掘进机为研究对象,在煤矿采掘机械装备国家工程实验室开展整机多工况振动试验,研究掘进机截割减速器、操纵台、履带架和电控箱关键部位在空载工况和截割工况(钻进、向右横扫、向下竖扫和向左横扫)下的振动特性,以期为纵轴式掘进机关键零部件减振降噪设计提供参考.

1 试验研究

1.1 模拟截割试验环境

试验在位于山西太原的煤矿采掘机械装备国家工程实验室完成,试验场主要由模拟巷道和假岩壁构成.模拟巷道配备通风除尘系统,模拟掘进机截割工作过程中的巷道和底板条件;假岩壁实现煤岩不同硬度级别模拟.掘进机截割时,安装在机体各处的传感器将试验场各部分在不同工况下的工作状态参数实时传递给数据采集分析系统,用以分析研究掘进机振动、截齿消耗、失稳等现象.

1.2 试验设计

1) 试验标准

开切、截割试验按照《MT/T 238.3—2006 悬臂式掘进机 第3部分:通用技术条件》标准进行.测试截割减速器、操纵台、履带架和电控箱的振动情况,分析掘进机截割过程中的振动强度分布,掌握空载、钻进、向下竖扫、向左横扫工况下各部位的振动情况,通过对被测数据的处理分析,判断掘进机截割能力与整机稳定性.试验流程如图1所示.

2) 样机选择

EBJ-120TP 纵轴式掘进机是目前煤机市场上的主流机型之一,主要应用于煤巷和半煤岩巷的掘进.其经济截割硬度 f6,局部可达 f8,最大截割功率120 kW,总装机功率190 kW,截

割头额定转速 55 r/min.该机型设计思想成熟、理论完整,是一款经过长期实践检验的经典机型,作为试验对象,可以较好地用试验数据验证设计理论,并进一步完善测试系统结构.

3) 试验硬度

依照被测设备设计参数,试验岩壁硬度设置为 f6,并随机分布硬度 f8 的硬岩点以实现硬度不均匀性仿真.试验轨迹线如图2所示,并将其标记在人工岩壁上.

4) 仪器设备

测试所用的主要仪器见表1.

1.3 传感器布置与安装

被测部位如图3所示.将三向加速度传感

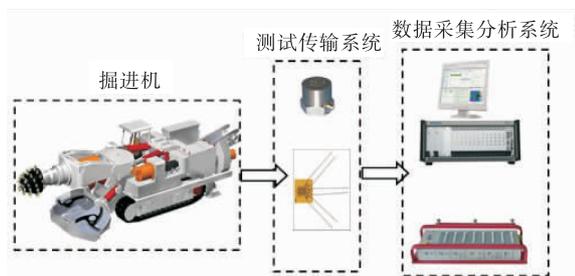


图1 试验流程图

Fig. 1 Test process chart

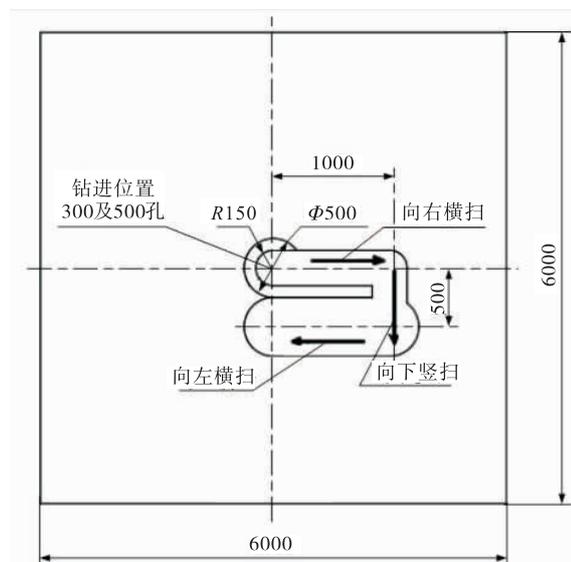


图2 截割岩壁及试验轨迹/mm

Fig. 2 Cutting rock and test track

器(INV9822A)安装在截割减速器、履带架、操纵台、电控箱上,布点以振动部位明显、安装牢固、不妨碍操作为标准.将机身广义坐标系和正方向设置为:掘进机前进为 x 方向,宽度为 y 方向,垂直于地面为 z 方向.

1.4 试验步骤

1.4.1 试验前准备工作 1)检测人工岩壁的硬度、岩石的其他相关参数,要求符合被测掘进机的截割硬度范围;

2)被测掘进机和除尘设备无故障,水、电(包括 1140 V,660 V 和 220 V 电压)供应满足试验技术要求,截齿全部更换新品;

3)调试、标定仪器量程,选择采样频率,确保试验设备具有较强的抗干扰能力,能够可靠、精确地采集数据.

1.4.2 试验工况和截割位置 1)空载状态:启动设备和除尘系统,额定转速运行 2 min.

2)钻进工况:从图 2 标记处开切钻进300 ~ 500 mm 孔,达到 500 mm 处时整机跳动剧烈,停止钻进.

3)向右横扫:从钻进结束位置起步,整机固定,仅截割臂向右切割 1000 mm.

4)向下竖扫:从向右横扫结束位置向下截割 500 mm.

5)向左横扫:竖扫结束的槽中,整机位置不动,截割臂向左截割 1000 mm.

6)记录上述过程 5 kHz 采样频率的振动加速度数据.

2 结果与讨论

2.1 振动时域分析

数据选择和处理说明:1)由于测试过程中存在各种噪声干扰,需对采样数据进行必要的预处理,截取各工况稳定运行时段的时域数据(空载为 60 ~ 70 s;钻进为 20 ~ 30 s;向下为 40 ~ 50 s;向左为 60 ~ 70 s)进行分析;2)由于向右横扫与向左横扫虽工况运行方向相反,但测得数据接近,故这两种工况按照向左横扫工况一并讨论.

对振动信号分析计算后,得出被测部件在 4 种工况下振动加速度的最大值(Max)和均方差(Std),数据见表 2.

综合历次试验数据、相关试验报道及本次试验结果,掘进机整机和部件在 z 方向的振动幅值较其余两个方向大得多,根据表 2 作出了上述部件 z 向(垂向)振动加速度时域图,如图 4 所示.

综合图 4 和表 2,对掘进机振动情况分析如下.

1)空载工况,整机振动波动较小,各部件振

表 1 测试使用的主要仪器

Table 1 The main instrument used in the test

设备或仪器名称	型号	参数范围和功能
加速度传感器	INV9822A	0.5 ~ 8 kHz, 100 mV/g, 量程 50 g, 质量 10 g, M5 安装螺纹
实时采集仪器	INV3020D	24 位 AD, 44 通道, 支持电压 DC, AC, ICP 输入方式, 通道可扩展
数据处理软件	DASP V10	采集、储存、分析功能

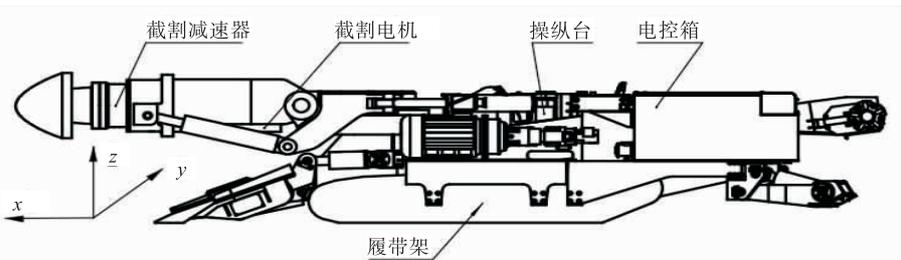


图 3 传感器布置

Fig. 3 Sensor location

表2 振动加速度时域数据
Table 2 Vibration data statistics

被测部件	方向和合成	空载工况		向左横扫		向下竖扫		钻进工况	
		Max	Std	Max	Std	Max	Std	Max	Std
截割减速器	x	7.361 5	1.454 3	97.416 7	6.874 1	69.069 6	3.487 2	96.844 3	5.672 7
	y	11.951 1	2.143 6	99.367 3	7.245 9	67.403 0	3.468 4	100.358 7	6.590 0
	z	7.120 4	1.325 2	74.347 1	6.886 7	54.370 5	3.429 8	97.727 6	6.423 9
	合成	12.656 6	1.304 5	59.670 4	6.793 1	55.630 0	5.494 7	150.688 8	7.947 3
履带架	x	3.362 9	0.793 0	60.945 3	1.354 6	20.597 2	0.965 9	52.468 6	1.366 6
	y	3.935 8	0.913 9	58.354 2	2.955 8	21.230 1	1.368 1	53.146 5	2.028 6
	z	3.271 1	0.904 8	47.268 8	1.728 7	14.430 7	1.164 2	28.081 8	1.609 9
	合成	4.129 1	0.610 8	20.631 5	2.121 5	26.525 4	1.639 0	51.987 1	2.309 4
操纵台	x	2.571 0	0.558 8	25.797 6	3.145 1	21.738 9	2.091 2	36.236 9	3.772 6
	y	2.468 7	0.553 5	26.344 4	2.451 3	23.059 4	1.643 8	34.077 3	3.003 0
	z	4.062 2	0.934 0	44.811 2	3.319 9	30.103 4	1.968 1	62.465 5	3.403 5
	合成	3.504 7	0.511 4	25.693 7	3.223 3	32.382 9	2.806 6	67.194 2	4.885 3
电控箱	x	1.771 0	0.475 5	11.788 0	1.226 6	8.829 8	0.701 7	80.209 9	1.889 4
	y	1.739 6	0.395 4	14.700 0	1.048 4	13.333 0	0.626 2	98.559 3	2.586 9
	z	3.686 3	0.747 4	30.626 3	3.001 5	19.755 3	1.172 0	91.195 8	3.105 9
	合成	3.206 9	0.401 3	20.232 0	2.341 5	15.886 9	1.294 9	104.221 4	5.678 8

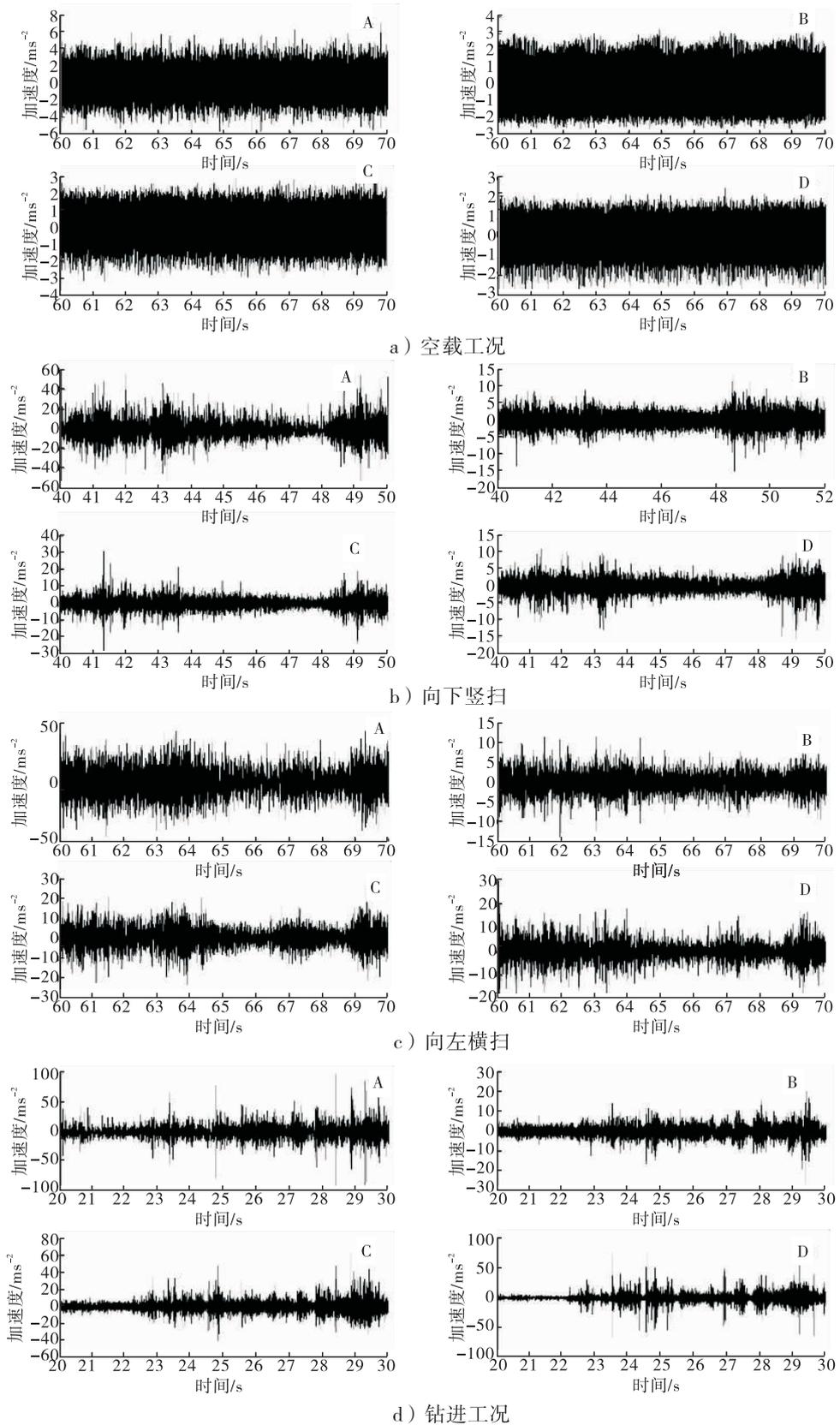
动稳定,为拟周期形态.其中,截割减速器的三向振动幅值均最大,电控箱在 x,y 向的振动幅值最小,履带架在 z 向的振动幅值最小;由均方差可知,操纵台、电控箱在 z 向振动波动大于其余两个方向,截割减速器、履带架在 y 向振动波动大于其余两个方向.

2) 截割工况,各部件具有非线性振动的典型特征,并伴随瞬间冲击,此工况为非平稳随机特性.其中,截割减速器各工况下的三向振动幅值仍为最大;向左横扫工况下,电控箱的各向振动幅值最小;向下竖扫工况下,电控箱在 x,y 向振动幅值最小,履带架在 z 向振动幅值最小;钻进工况下,操纵台在 x,y 向振动幅值最小,履带架在 z 向振动幅值最小.综合发现,所有部件在空载工况下振动幅值最小;截割工况下,向下竖扫时振动波动最小;截割减速器在向左横扫时的振动幅值比在其他工况下的振动幅值要大;操纵台、电控箱、履带架在钻进工况下的振动幅值明显高于其余工况下的振动幅值.

钻进工况下振动剧烈的原因:截割头各截齿尖运动轨迹都形成三维螺旋线^[16],如图5所

示, s 为螺旋线节距.钻进工况下,截割头与煤岩间相对运动也是空间螺旋线,截割轨迹除了沿截割头轴向延伸外,还沿径向扩展,造成截齿与岩石之间相互作用投影面积最大,作用力也由此达到最大,导致激烈振动;随着钻进深度增加,同时参与切割的截齿数增加,更加剧了振动.相对其他截割工况下的振动幅值而言,向下竖扫工况下振动较小,这主要是因为截割头与被切割煤岩接触处和行走履带支撑点构成二力点,提高了整机支撑刚度;同时截割臂和部分机身重量参与向下竖扫,降低了实际截割功率,使得振幅降低.

电控箱为控制系统核心,内部包含精密电子元件,对振动比较敏感,由于在EBJ-120TP纵轴式掘进机设计时采取了较好的隔振措施,因此振动幅值较小.履带架由于质量大,且本身材料阻尼和连接部的接触阻尼较大,在后支撑油缸和铲板着地的情况下,履带链具有一定的离地间隙,所以履带架振动亦相对较小.截割减速器,既承受截割冲击、截割电机造成的外部激励,又承受内部齿轮传动过程中的啮合激励、液



A. 截割减速器 B. 履带架 C. 操纵台 D. 电控箱

图4 不同工况z向振动时域图

Fig.4 The z direction vibration time domain figure in the different working conditions

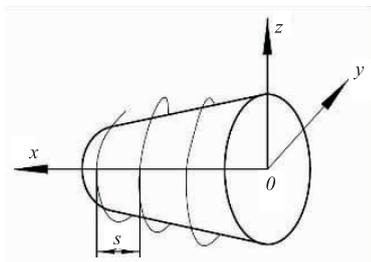


图5 截齿齿尖的三维螺旋线轨迹

Fig. 5 The three-dimensional spiral track of the cutter tooth

压系统供油压力不稳造成的脉动作用. 由于截割减速器与截割头之间通过悬臂段连接,三者刚度均较大,阻尼较小,被测4个部件中,截割减速器距离截割头最近,截割头工作过程中承受复杂截割力,由此造成的剧烈振动直接传递给减速器,造成外部激励;其次,由于截割减速器采用二级行星齿轮传动结构,相互啮合的齿轮对数多,齿轮时变啮合刚度、齿侧间隙、啮合冲击、设计制造误差,都会造成内部激励. 如此内外综合作用,会导致截割减速器剧烈地振动. 因此在大功率硬岩掘进机开发中,设计具有优良减振降噪性能的截割减速器,可提高减速器在服役期间的可靠性和安全性.

3) 合成加速度是对振动强度的综合反映. 表2测得各部件单向加速度之后进行速度合成,计算所得合成振动加速度值也直观反映了上述结果.

4) 各振动时域图中观察到的瞬时冲击主要源于随机分布的硬岩点,截割碰到硬岩点时截齿与煤岩产生了复杂的动力学耦合并引起交变冲击载荷,从而造成各部件的急剧振动.

2.2 振动频域分析

通过谱分析,得到各部件不同工况下前10阶频域,如图6所示.

由图6发现,各工况下的主频带分布在10~1000 Hz. 由于系统中转动零件多、非线性周期作用和试验场所噪声大等原因,系统存在

多个峰值频率簇,频率成分复杂. 由于不同工况外部载荷和内部激励不同,各部位主振频分布亦不尽相同.

空载工况各阶频率要大于截割工况. 比如对于操纵台,空载工况下首阶频率为447.7 Hz;截割工况下,由于截割头与岩壁接触增加了整机刚度,从而降低了各阶主频率,使得向下竖扫、向左横扫和钻进工况首阶频率分别下降到11.2 Hz,36.72 Hz,36.72 Hz.

由于截割减速器啮合转动时存在自身激励,截割减速器在各工况下存在重合主振频:一级啮合频率在第7,8阶主振频之间,为385 Hz;二级啮合频率接近第二阶主振频,为62.37 Hz;一级行星轮转动频率接近第一阶主振频,为12.93 Hz,为一阶振型激振源;其他主振频率啮合的形成,主要是由截割臂的振动、齿轮啮合和转动相互耦合所致.

2.3 振动烈度与舒适性评价

2.3.1 振动烈度分析 振动烈度用来评价隔振后系统振动满足规定要求的能力^[17-18],表达式为^[19]

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (1)$$

式中, v_{rms} 为振动速度的有效值/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), $v(t)$ 为振动速度函数, T 为振动周期/s.

对于离散型数据

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum v_i^2} \quad (2)$$

式中, v_i 为采样点处的振动速度, N 为采样点数.

根据ISO2372标准计算当量振动烈度

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{v_{x\text{rms}}^2 + v_{y\text{rms}}^2 + v_{z\text{rms}}^2} \quad (3)$$

式中, $v_{x\text{rms}}$, $v_{y\text{rms}}$, $v_{z\text{rms}}$ 分别为 x,y,z 方向速度有效值.

用分贝表示为

$$V_{\text{dB}} = 20 \lg \left(\frac{V_{\text{rms}}}{V_{\text{ref}}} \right) \quad (4)$$

式中, V_{dB} 表示当量振动烈度分贝; V_{ref} 为参考值, 取值为 10^{-5} mm/s .

根据式 ①—④ 及试验数据计算掘进机不同工况下振动烈度, 见表 3.

根据表 3, 空载工况下所有部件振动等级均为 A, 振动烈度最小; 钻进工况下振动烈度最大; 向下竖扫和向左横扫振动烈度相当, 与时域分析结果一致. 不同部件之间, 截割减速器振动烈度最大, 在向下竖扫和向左横扫工况下等级均为 C, 在钻进工况下振动加剧, 等级为 D, 已

经严重影响到减速器在服役期间的寿命和可靠性; 履带架和操纵台的振动烈度相当, 在截割工况下振动等级均为 B, 可以正常运行; 电控箱在钻进工况下振动烈度较大, 振动等级达到 C, 将会影响到内部电子设备安全、可靠运行.

2.3.2 舒适性 为了保护职工健康、改善作业环境、防止和消除振动危害, 近年来, 噪声与振动作业职业卫生日益得到重视. 研究工业活动(工矿、冶金、纺织等)中周期的、随机的和瞬态的机械振动对人们的舒适、活动和健康的影

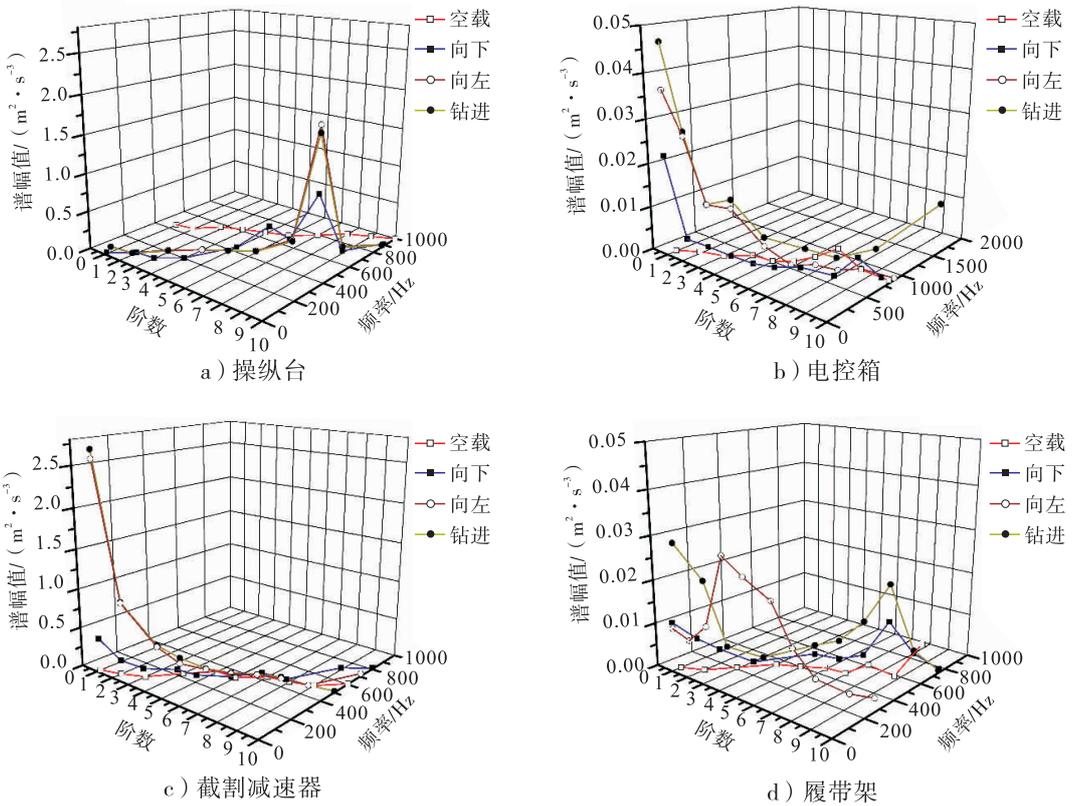


图 6 振动频域分析

Fig. 6 Frequency analysis

表 3 振动烈度和振动等级

Table 3 The vibration intensity and level

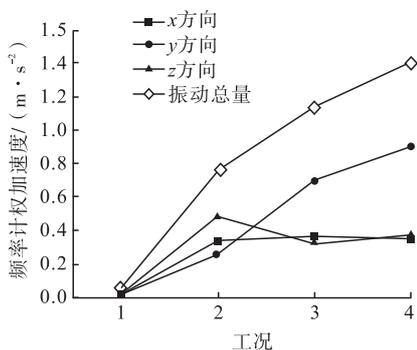
工况	截割减速器	履带架	操纵台	电控箱	dB
空载	100.096 2(A)	97.471 8(A)	97.377 5(A)	102.388 5(A)	
向下竖扫	119.610 1(C)	109.351 5(B)	110.167 2(B)	108.588 9(B)	
向左横扫	120.015 6(C)	109.016 9(B)	108.142 5(B)	106.840 7(B)	
钻进	121.038 1(D)	112.795 5(B)	110.409 3(B)	113.041 2(C)	

注: A 为良好; B 为容许; C 为可容忍; D 为不允许.

响,是改善产品设计,突破产品出口技术壁垒,实现产品升级的重要切入口之一。

由于操作员与操作台接触,以操作台为研究对象,且计算所得各向波峰因数小于9(根据ISO 2631 - 1 和 GB/T 13441《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第一部分:一般要求》标准中规定的“基于实践经验,均方根值方法仍继续作为波峰因素小于9 的测量基础”),故采用文献[20] 的频率计权均方根加速度计算方法,得出操作台振动加速度的频率计权均方根加速度(见图7),研究掘进机振动在各工况下对操作员舒适性的影响;再根据ISO 2631 - 1 的评价标准(见表4),对掘进机振动舒适性进行评价。

由图7和表4可知,三方向在不同工况下对人体舒适性的影响不同.空载工况下,人体在三方向均感觉不到不舒适,操作员状况良好;向左



1. 空载 2. 向左横扫 3. 向下竖扫 4. 钻进

图7 各工况下频率计权均方根加速度

Fig.7 Frequency weighted acceleration RMS in different working conditions

表4 舒适性评价标准

Table 4 The comfortable evaluation criteria

计权均方根加速度值 $a_w/(m \cdot s^{-2})$	人体感觉
$a_w < 0.315$	感觉不到不舒适
$0.315 < a_w < 0.63$	有点不舒适
$0.5 < a_w < 1$	不舒适
$0.8 < a_w < 1.6$	很不舒适
$1.25 < a_w < 2.5$	非常不舒适
$2 < a_w$	极不舒适

横扫工况下,人体在 x, z 方向感觉到有点不舒适,在 y 方向感觉不到不舒适;向下竖扫工况下,人体在 x, z 方向感觉到有点不舒适,在 y 方向感觉到不舒适;钻进工况下,人体在 x, z 方向感觉到有点不舒适,在 y 方向感觉到很不舒适。

为了综合评价掘进机对舒适性的影响,以振动总量为指标

$$a_w = \sqrt{\sum k_i a_{wi}} \quad (5)$$

式中, a_w 为振动总量; k_i 为方向因数,取 1.4; a_{wi} 为方向频率计权加速度; i 代表 x, y, z 3 个方向。

由振动总量知,空载工况下人体感觉不到不舒适;向左横扫工况下,人体感觉到不舒适甚至很不舒适;向下竖扫工况下,人体感觉到很不舒适,接近非常不舒适的状态;钻进工况下,人体感觉到非常不舒适。

综上所述,掘进机操作员舒适性感知随着工况的不同而不同,其影响由小到大为:空载工况下、向左横扫工况下、向下竖扫工况下和钻进工况下.其中,向下竖扫和钻进工况下的舒适性最差,达到了不舒适的程度,会降低操作员的正常工作效率,严重影响到操作员身心健康。

3 减振措施

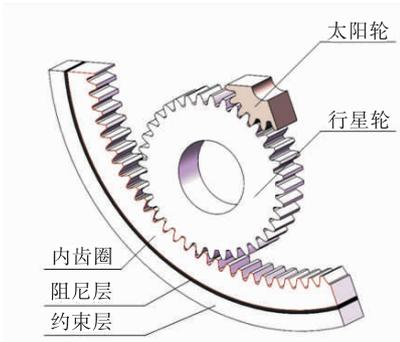
试验分析结果显示,截割减速器是整机振动最为剧烈的部件.因此,通过对截割减速器部件进行进一步的模态分析、动态特性试验分析,并且采取黏弹性阻尼材料减振方案进行减振处理,截割减速器减振结构原理如图8所示。

通过数值仿真对改进前后截割减速器的结构进行了静态、瞬态、谐响应下的应力、应变分析;增加阻尼结构以后的各项指标均较无阻尼结构有较大幅度的降低;同时使得结构的固有频率降低.有、无阻尼结构位移与激励频率之间的关系曲线见图9。

经整机工业性试验,使用阻尼结构减速产



a) 原始截割减速器结构



b) 经过黏弹性阻尼材料减振后的结构

图8 减振方案实施原理

Fig. 8 The principle of vibration reduction scheme

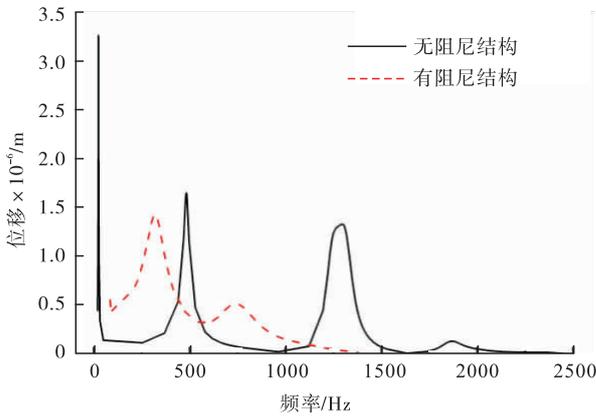


图9 位移与激励频率关系曲线

Fig. 9 The relation curve between displacement and excitation frequency

品,整体性能良好,振动值较原型机下降了30%,提高了装备的可靠性。

4 结论

在太原煤矿采掘机械国家工程实验室对EBJ-120TP纵轴式掘进机进行振动试验,研究

其截割减速器、履带架、操纵台和电控箱的时域振动、频域振动、振动烈度和舒适性,得到如下结论。

1)纵轴式掘进机振动呈现非线性特性和随机振动特性.按工况比较,钻进工况下振动最强烈;按被测部件比较,截割减速器的振动最强烈.纵轴式掘进机振动主频带分布较宽,前10阶位于10~1000 Hz内.存在多个峰值频率簇,频率成分复杂.设计时,需从系统设计出发,分析研究整机模态与局部模态耦合作用机理,避开不同工况下具有大振幅的主振频。

2)不同部件之间,截割减速器的振动烈度最大,在钻进工况下振动加剧,等级为D,已经严重影响到截割减速器在服役期间的寿命和可靠性;电控箱在钻进工况下振动烈度较大,振动等级达到C,将会影响到内部电子设备安全、可靠运行.为此要对截割减速器和电控箱实施有效的隔振减振措施。

3)不同工况下,纵轴式掘进机操作员舒适性感知由舒适到不舒适的顺序为:空载工况下、向左横扫工况下、向下竖扫工况下和钻进工况下.其中,向下竖扫和钻进工况下的舒适性最差,达到了不舒适的程度,会降低操作员的正常工作效率,严重影响到操作员身心健康.因此要对关键重要部件进行动态优化设计,降低工作现场的振动及噪声双重影响,改善作业环境,保护职工身体健康。

4)通过采用黏弹性阻尼材料减振措施,振动值较原型机下降了30%.黏弹性阻尼减振机理可以较好地解决重型装备振动问题。

参考文献:

[1] ACAROGLU O, ERGIN H. A new method to evaluate roadheader operational stability [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006(21):172.

[2] 李晓谥,何洋,李婷,等.纵轴式掘进机横向和

- 纵向随机振动响应的分析[J]. 煤炭学报, 2014,39(3):580.
- [3] 李晓豁,何洋,李婷,等. 纵轴式掘进机截割机构纵向随机振动的仿真研究[J]. 工程设计学报,2013,20(6):495.
- [4] 李晓豁. 横轴式掘进机垂直截割的动力学模型[J]. 中国工程机械学报,2006,4(1):1.
- [5] 李晓豁. 横轴式掘进机水平截割的动力学建模[J]. 黑龙江科技学院学报,2006,16(6):335.
- [6] 李晓豁,何洋,曹艳丽,等. 基于 ADAMS 的纵轴式掘进机模态分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2010,35(2):254.
- [7] 陶晓. AM-50 型掘进机电控箱的振动与隔振研究[D]. 无锡:江南大学,2009.
- [8] JERZY R, EUGENIO O, CARLOS L, et al. Discrete element simulation of rock cutting [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(6):996.
- [9] MICHAEL A. Stress dependency of the cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23: 351.
- [10] WANG H T, WANG D M, REN W X, et al. Application of foam to suppress rock dust in a large cross-section rock roadway driven with roadheader[J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24:257.
- [11] WANG H T, WANG D M, LU X X, et al. Experimental investigations on the performance of a new design of foaming agent adding device used for dust control in underground coal mines[J]. J Loss Prev Process Ind, 2012, 25(6):1075.
- [12] 左前明. 大采高综采工作面煤尘扩散规律及防治技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2014.
- [13] 马威,刘勇,陈芳. 难湿润煤层快速综掘工作面粉尘防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1):70.
- [14] 王海龙. 全岩机掘巷道局部负压除尘技术的试验与应用[J]. 山东煤炭科技, 2012(5):54.
- [15] 杨春海. 掘进机机载除尘系统的研制及应用[J]. 煤炭技术, 2015, 34(10):249.
- [16] 丛日永,李晓豁. 纵轴式掘进机钻进工况的运动学模型[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(6):245.
- [17] 程广利,朱石坚,黄映云,等. 齿轮箱振动测试与分析[J]. 海军工程大学学报, 2004, 16(6):83.
- [18] 张俊红,毕凤荣,倪广健. 动力总成悬置位置对车体振动能量输入的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7):25.
- [19] 樊新海,安钢,王凯,等. 机械状态振动烈度监测方法研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008(4):46.
- [20] 宗长富,陈双,冯刚,等. 基于频率加权滤波的汽车平顺性评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(6):517.



引用格式:刘磊,何世权. 调节阀阀芯型线的优化设计与流阻分析[J]. 轻工学报,2017,32(3):96-101.

中图分类号:TH134 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.015

文章编号:2096-1553(2017)03-0096-06

调节阀阀芯型线的优化设计与流阻分析

Optimal design and flow resistance analysis of regulating valve spool type line

刘磊,何世权

LIU Lei, HE Shi-quan

关键词:

调节阀; 阀芯型线; 数值模拟; 流阻

南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816

College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China

Key words:

regulating valve; spool type line; numerical simulation; flow resistance

摘要:针对传统的调节阀阀芯型线设计无法有效减小压降的问题,采用正交多项式作最小二乘拟合的方法对型线进行优化,得到新的曲线方程,将该方程提取到 AutoCAD 中设计阀芯型线.数值模拟结果表明,新设计的阀芯型线的流阻系数比原来下降 35%,且进出口压降减小,实现了节能的目的.

收稿日期:2016-07-09

作者简介:刘磊(1990—),男,河南省信阳市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为特种阀门开发.

通信作者:何世权(1966—),男,安徽省肥东县人,南京工业大学教授,博士,主要研究方向为化工过程机械、阀门与流体密封、流体机械.

Abstract: In order to solve the problem that type line conventional valve spool design can't effectively reduce pressure drop. Optimization of the profile of the orthogonal polynomials for fitting the least squares method was used to obtain a new curve equation, and then a new curve equation into AutoCAD design type lines was extracted. Numerical simulation results showed that the flow resistance coefficient of the newly designed molded lines decreased by 35% than the original, and import and export reduced pressure dropped, to achieve energy saving purposes.

0 引言

调节阀也称控制阀,其主要作用是:在过程控制中利用相关的执行机构来调节流体的流量^[1]。相比于截止阀,它具有流量更易控制、开度更易调节等优势,所以常用在工业控制系统中。

随着工业的日益现代化,对调节阀的设计提出了新的要求,例如节能。调节阀的节能措施主要有:采用低阻抗阀门;提高阀门的密封性能;使用电动执行机构来代替其他种类的执行机构^[2]等。此外,通过优化阀芯型线来减小压力损失、降低流阻系数,也可使调节阀达到节能的效果^[3]。

阻力大小是衡量一个阀门是否合格的标志,阀门的阻力系数对整个管道系统有着重要的影响^[4]。阀门的阻力影响整体的系统性能,无论增大进口的压力还是降低出口的压力,都会影响用户的使用效率。一般地,在相对较短的管道系统中,阀门的压降是影响能量消耗的重要因素。同时,阻力也是阀门产生噪声的原因之一,间接地反映了流场内部的振动强弱。从经济和噪声两方面考虑,阀门的阻力系数越小越好,这样有利于节能环保和降噪,便于实现对阀门的精细化设计和整个管道系统对节能、降噪要求的有效融合^[5]。

随着计算机技术和计算流体力学的发展,出现了许多 CFD 仿真模拟软件,本文用 ICEM CFD 软件对流道模型进行网格划分和边界定义,然后将网格文件导入 FLUENT 软件,进行调节阀内部流场模拟,再利用模拟所得数值进行最小二乘法运算,从而实现阀芯型线的优化设计。

1 调节阀流量特性与型线分类

1.1 调节阀流量特性分类

调节阀的流量特性是指流体流过调节阀时的相对流量与相对行程之间的函数关系,表示为

$$q = \frac{Q}{Q_{\max}} = f\left(\frac{L}{L_{\max}}\right) = f(l)$$

式中: Q 为行程在 L 时的流量, Q_{\max} 为阀的最大流量, L 为某开度时的行程, L_{\max} 为最大流量时的行程。

根据调节阀进口和出口两端的压降,可以将其流量特性分为固有流量特性和工作流量特性,其中固有流量特性也被称为理想流量特性,是在进口、出口两端压降恒定时测定的。

1.2 阀芯型线分类

不同的流量特性曲线对应不同的阀芯型线。理想流量特性曲线大致可以分为快开流量特性曲线、直线流量特性曲线、抛物线流量特性曲线和等百分比流量特性曲线 4 种情况^[6](见图 1),每条理想流量特性曲线都对应着不同的阀芯型线,相对应的阀芯型线也分为 4 种(见图 2)。其中,型线 1 对应快开流量特性曲线,型线 2 对应直线流量特性曲线,型线 3 对应抛物线流量特性曲线,型线 4 对应等百分比流量特性曲线。

2 调节阀阀芯型线设计

2.1 直线流量特性

因为直线流量特性的调节阀在调节过程中具有放大系数不变、调节灵敏度好、不会出现振荡现象的优点,故本文主要针对直线流量特性的调节阀进行阀芯型线设计。直线流量特性是

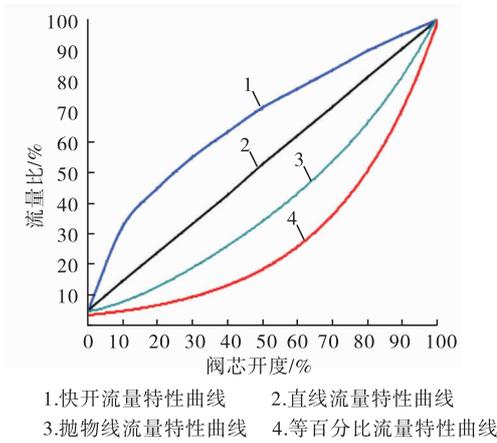


图1 理想流量特性曲线

Fig.1 Ideal flow characteristic curve

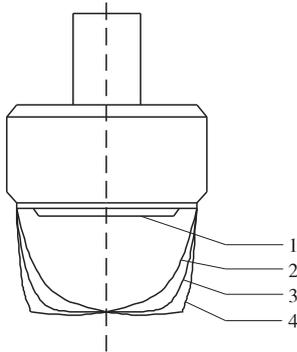


图2 阀芯型线

Fig.2 Spool type line

指在阀芯运动过程中某一位置相对流量的变化与该位置的相对行程是正比关系,即

$$dq = K_{v2} dl$$

两边同时积分得

$$q = K_{v2} l + C$$

边界条件 $L=0$ 时, $Q = Q_{\min}$; $L=L_{\max}$ 时, $Q = Q_{\max}$.

求解得直线流量特性的函数关系为

$$q = \frac{R-1}{R} l + \frac{1}{R}$$

2.2 抛物线型线设计及曲线方程

从图1和图2可以看出,直线流量特性的调节阀其阀芯型线对应的型线为抛物线. 根据工况需要,用 Auto CAD 绘制阀芯型线的样条曲线,并且基于中心线建立坐标轴,测出任意不同位置对应的半径. 阀芯型线类似于抛物线,将所

测得的数据按照二次抛物线的样式,采用正交多项式作最小二乘法拟合^[7],即可得到一条新的阀芯型线的样条曲线. 最小二乘拟合数据如图3所示.

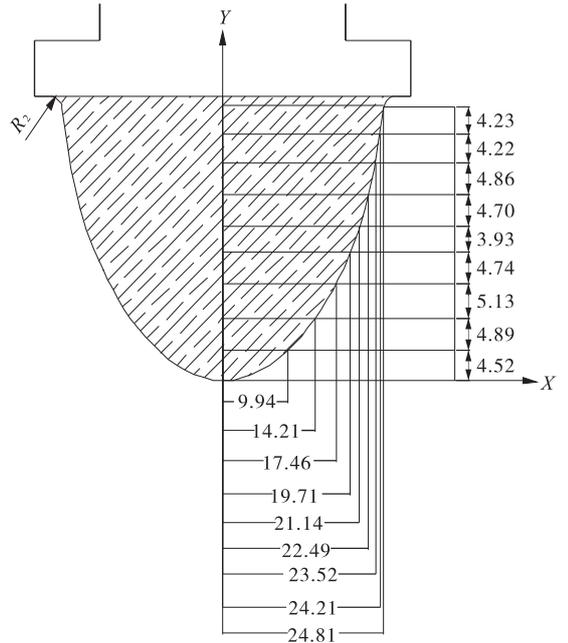


图3 最小二乘拟合数据/mm

Fig.3 Least square fitting data

根据正交多项式的算法^[8],给出其中一组正交基底,即

$$\begin{cases} P_0(x) = 1 \\ P_1(x) = (x - \alpha_1)P_0(x) \\ P_2(x) = (x - \alpha_2)P_1(x) - \beta_1 P_0(x) \end{cases}$$

这样可以求得新拟合曲线如下相关系数:

$$\alpha_0^* = \frac{\sum_1^{10} y_i P_0(x_i)}{\sum_1^{10} [P_0(x_i)]^2} = \frac{\sum_1^{10} y_i}{10} = 20.985$$

$$\alpha_1^* = \frac{\sum_1^{10} x_i [P_0(x_i)]^2}{\sum_1^{10} [P_0(x_i)]^2} = \frac{\sum_1^{10} x_i}{10} = 17.749$$

$$P_1(x) = x - 17.749$$

$$\alpha_1^* = \frac{\sum_1^{10} y_i P_1(x_i)}{\sum_1^{10} [P_1(x_i)]^2} = \frac{895.196}{551.344} = 1.624$$

$$\alpha_2 = \frac{\sum_1^{10} x_i [P_1(x_i)]^2}{\sum_1^{10} [P_1(x_i)]^2} = \frac{4640.662}{551.344} = 8.417$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_1^{10} [P_1(x_i)]^2}{\sum_1^{10} [P_0(x_i)]^2} = \frac{551.344}{10} = 55.134$$

$$P_2(x) = (x - 8.417)(x - 17.749) - 55.134 = x^2 - 26.166x + 94.259$$

$$\alpha_2^* = \frac{\sum_1^{10} y_i P_2(x_i)}{\sum_1^{10} [P_2(x_i)]^2} = \frac{2\ 696.464}{30\ 753.069\ 2} = 0.087\ 7$$

所以,新的拟合曲线为

$$y = \alpha_0^* P_0(x) + \alpha_1^* P_1(x) + \alpha_2^* P_2(x) = 0.087\ 7x^2 - 0.684x + 0.664$$

用正交多项式做最小二乘法拟合,得到的拟合曲线方程准确可靠,其拟合精度达到 0.01 mm,可以对原有的曲线进行修正。

2.3 阀芯型线的优化设计与加工

根据上述用正交多项式做最小二乘法得到的新的拟合曲线方程,计算出阀芯型线上各点坐标,将这些新的坐标数据提取到 AutoCAD 中,并对相关坐标加以修正,绘制出新的阀芯型线,如图 4 所示。

对于机械加工而言,这样的设计方法使阀芯加工有一定困难。但是可以利用 Master Cam X9 软件包含的 CAD 模块绘出新设计的阀芯

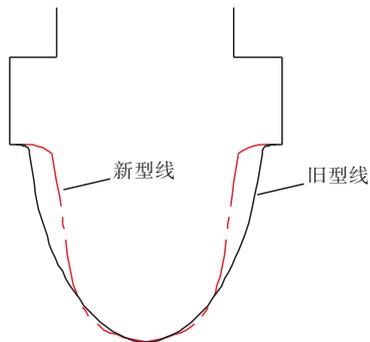


图 4 新旧阀芯型线对比

Fig. 4 Comparison of original and new spool type line

型线,绘制完成之后选择进入加工环境,接着设定相关参数进行模拟加工,可以很直观地看到整个过程^[9]。Master Cam 提供 400 种以上的后置处理文件,适用于各种类型的数控系统。根据机床的实际结构编制后置处理文件,所编译的 NCI 文件经后置处理后便可生成加工程序。

生成的加工程序可以视加工对象之具体情况进行修改和微调,然后导入 FANUC 系统数控机床,完成对阀芯型线的加工。

3 调节阀流阻分析

3.1 阀门阻力系数计算

阀门阻力系数通过试验来确定,同一个阀门在不同开度时的阻力系数也不一样。假设被测阀门的进口与出口之间的压降为 $\Delta P/\text{Pa}$,流体密度为 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$,流体速度为 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,阻力系数 K 为无量纲系数,则 $\Delta P = \rho v^2 K/2$,即

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \quad (1)$$

因此,要想准确测出阻力系数 K ,关键在于先得到准确的进出口压降值 ΔP 。

3.2 阀芯的数值模拟

利用 Ansys ICEM CFD 软件,对新阀芯的调节阀阀体进行网格划分,然后导入 Fluent 软件。选择标准 $k-\varepsilon$ 模型为湍流模型;选择标准壁面函数;流道内介质为 20 °C 的水;阀门入口为速度入口边界, $v = 1.2 \text{ m/s}$;阀门出口为压力出口边界,为 0.1 MPa;采用 SIMPLE 算法二阶迎风格式求解速度和压力的耦合方程。求解完成后,对运算结果进行后处理,可以得到相关的压力云图(见图 5)和速度云图(见图 6)。

由图 5 可知,从阀门的进口到阀芯部位为高压区域,压力很大;阀芯到出口为低压区域,压力较小。整个区域不存在局部压力较大的区域,压力分布较为均匀。

由图 6 可知,阀门流道内部的流场运动较

表1 不同入口介质流速下的压降

Table 1 Pressure drop of various medium velocity

入口处介质流速/(m·s ⁻¹)	出口处压强/Pa	压降/Pa
1.0	1 × 10 ⁵	2 380.22
1.2	1 × 10 ⁵	3 431.72
1.4	1 × 10 ⁵	4 598.20
1.6	1 × 10 ⁵	6 184.46
1.8	1 × 10 ⁵	7 728.13
2.0	1 × 10 ⁵	9 560.62
4.0	1 × 10 ⁵	38 152.42

在进口速度为 $v = 1.2 \text{ m/s}$, 出口压力为 0.1 MPa 时, 对新旧两种阀芯结构进行数值模拟, 得到进口、出口压降曲线如图 7 所示。

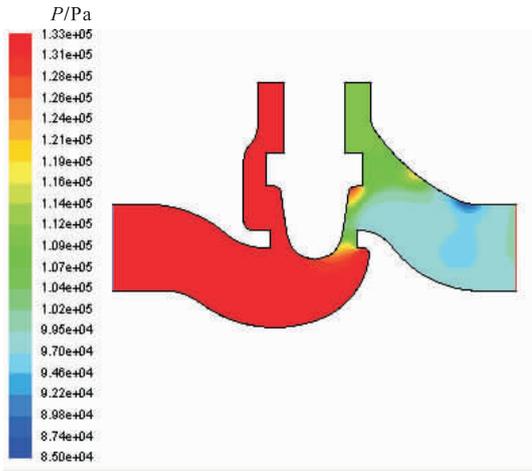


图5 阀芯开度60%压力云图

Fig. 5 Pressure distribution at 60% valve opening

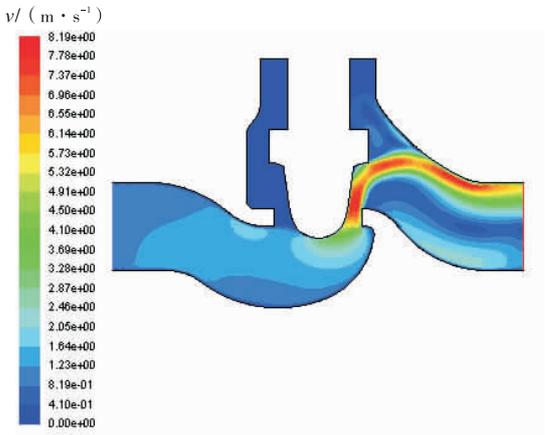


图6 阀芯开度60%速度云图

Fig. 6 Speed distribution at 60% valve opening

为复杂, 流速较高的区域位于阀芯出口一侧. 流速较高区域后移至阀芯右侧, 减弱了高速流体对阀芯的冲刷, 有利于延长阀芯的使用寿命. 从整体看来, 从阀门的进口段一直到阀门的出口段, 流速呈带状分布. 特别是在阀芯右侧, 既有高流速区, 也有低流速区, 呈对称分布.

新设计的阀芯在全开状态下, 改变其入口处介质的流动速度, 并且在不改变出口边界条件的状况下进行数值模拟, 得到进、出口之间的压降值, 见表 1.

根据表 1 数值模拟得到的压降值, 利用公式①, 可以计算出阻力系数 $K \approx 4.82$.

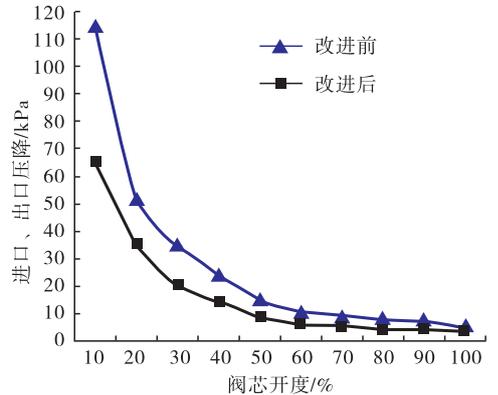


图7 改进前后进口、出口压降曲线图

Fig. 7 Import and export pressure drop curve original and imparased valve

从图 7 可以看出, 阀门的进口、出口压降随着开度的增大而逐渐减小, 最后趋于平缓. 对比改进前后的两条曲线发现, 在刚开始时, 相同开度的情况下, 压降的变化下降比较明显; 开度增加到 60% 以后, 压降的变化幅度逐渐减缓.

总体来看, 阀芯改进后压降的减小比较明显. 分析其原因, 改进后的阀芯, 能够更好地让流体沿着曲线平稳地向前流动. 这能够在阀门的开关过程中, 减小流体对阀芯的冲刷, 起到保护阀芯的作用, 从而延长阀门的使用寿命.

根据公式①可以计算出, 在全开的状态下, 改进前后阀门的流阻系数(见表 2). 经过计算,

表2 阀芯改进前后的压降和流阻系数

Table 2 Pressure drop and flow resistance coefficient of original and improved spool

阀芯	入口流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	压降/Pa	流阻系数
改进前	1.2	5 321.25	7.48
改进后	1.2	3 431.72	4.82

新阀芯曲线的流阻系数比改进前下降 35%,且进出口压降有效降低。

3.3 试验验证

按照 JB/T 5296—1991 标准^[10],以 20 °C 水为介质对改进后的调节阀进行流阻试验,结果见表 3。

表3 阀芯改进后调节阀试验结果

Table 3 Regulating valve test results of spool after improvement

序号	入口流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 /($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	压降 /Pa	流阻 系数
1	1.00	18.12	2 310.32	4.63
2	2.00	36.33	9 410.24	4.71
3	3.00	54.42	21 380.12	4.76

由以上试验结果可以看出,调节阀的阀芯改进后,数值模拟结果与试验结果非常接近,可以认为两结果相一致,这表明利用数值分析设计阀芯的方法是可行的。

4 结论

本文针对传统的调节阀阀芯型线设计无法有效减小压降的缺点,提出了用最小二乘法设计型线的方法,并使用 Ansys ICEM CFD 软件进行数值模拟,得到如下结论。

1) 调节阀不同的理想流量特性曲线对应着不同的阀芯型线。若要使工作流量特性接近理想流量特性,可以利用这种对应关系,对阀芯型线进行大致方向上的确定,这样有利于缩短整个设计周期。

2) 利用直线流量特性中流量与开度的关

系,可以推导出两者之间的数学关系式。

3) 针对绘制的阀芯型线,选择采用正交多项式做最小二乘拟合,对曲线进行修正。利用 FANUC 系统数控机床完成对新阀芯的加工。

4) 对新旧两种阀芯进行数值分析,设置多种进口条件。模拟结果表明,新阀芯的流阻系数比旧阀芯下降 35%。

5) 对新阀芯进行试验验证,利用试验数据得到的流阻系数与数值模拟得到的基本一致,证明了对阀芯型线用正交多项式做最小二乘拟合的可行性。

参考文献:

- [1] 龚飞鹰,刘传君,何衍庆. 控制阀实用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2015.
- [2] 明赐东. 调节阀应用 1000 问[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 张文栋. 论如何降低流阻系数加强阀门的节能作用[J]. 科技传播,2010(16):106.
- [4] 陆培文. 调节阀应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [5] 周志杰,沈正帆,种道彤. 船舶管路阀门阻力系数试验研究[J]. 中国科技论文,2015,10(10):1197.
- [6] 尚照辉. 阀芯结构对节流截止阀性能影响的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2012.
- [7] 崔硕,晏宇,胡旭. 调节阀阀瓣型线拟合[J]. 阀门,2010(5):38.
- [8] 林成森. 数值分析[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [9] 胡泽凯. 调节阀阀瓣型线的加工[J]. 阀门,2014(3):14.
- [10] 中华人民共和国机械电子工业部. 通用阀门流量系数和流阻系数的试验方法:JB/T 5296—1991[S]. 北京:机械工业出版社,1991.



引用格式:许金龙,王东方. 汽车盘式制动器的优化设计[J]. 轻工学报,2017,32(3):102 - 108.

中图分类号:U463.51⁺² 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.016

文章编号:2096-1553(2017)03-0102-07

汽车盘式制动器的优化设计

The optimization design of automobile disc brake

许金龙,王东方

XU Jin-long, WANG Dong-fang

关键词:

汽车盘式制动器;有限元法;响应面法;NSGA-II 算法

Key words:

automobile disc brake; finite element method; response surface method; NSGA-II algorithm

南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816

School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816, China

摘要:对汽车盘式制动器进行有限元建模,得到制动器紧急制动工况和重复制动工况下的温度和应力分布.在不改变制动器整体结构的前提下,以制动盘外径、厚度和摩擦块的内径、厚度为设计变量,以制动器最高温度最低化和应力最小化为优化目标,将响应面法和 NSGA-II 算法相结合对盘式制动器进行优化设计.优化后的制动器最高温度降低了 13%,最大应力降低了 15%,对优化后的制动器进行台架试验,结果表明,试验数据与仿真值拟合状况良好,证明了该优化设计的可行性.

收稿日期:2016-07-30

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20130941)

作者简介:许金龙(1989—),男,江苏省如皋市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为汽车 CAE 技术.

通信作者:王东方(1961—),男,江苏省南京市人,南京工业大学教授,主要研究方向为机械产品动力学仿真与现代设计方法.

Abstract: Through finite element modeling of the automobile disc brake, the temperature and stress distribution of the brake emergency braking condition and the continuous braking condition were obtained. Under the premise of not changing the whole structure of the brake, diameter and thickness of the brake disc and the inner diameter and thickness of the friction block were defined as the design variables, maximum temperature and stress were defined as optimization objectives, finite element method, response surface method and NSGA-II algorithm were used in the optimization of the brake. After optimization, the maximum temperature of the brake was reduced by 13%, the maximum stress was reduced by 15%; Bench test was made to optimized brake. Results showed the experimental value matched well with simulation value and proved the feasibility of the optimized design.

0 引言

随着我国国民经济的跨越式发展,汽车已成为货物运输、人员流动的重要工具. 制动器是汽车的核心部件,其可靠性关系到人的生命和财产的安全^[1]. 因此,在不提高制造成本、不增加制动距离的前提下,如何设计出可靠性高的制动器,是汽车企业和科研工作者关注的热点问题.

近年来,国内外诸多学者对盘式制动器进行了深入研究. P. H. Wang^[2]对盘式制动器在重复制动工况下的温度进行了热-结构耦合仿真. 孟祥宝^[3]用 CATIA 建立了盘式制动器的三维模型,并用 ANSYS 对制动过程进行了模拟仿真. 李明磊^[4]用 HyperMesh 建立了盘式制动器三维模型,并用 ABAQUS 对制动器进行了刚度校核. 陈亚林^[5]基于模态理论,运用 ANSYS 对盘式制动器进行了优化设计.

近似模型(代理模型)是近年来在数理统计的基础上发展起来的、能以少量样本点建立自变量与响应之间复杂函数关系的近似表达. 响应面法^[6](RSM)是构建近似模型的一种重要方法,它以多项式函数拟合设计空间,具有精度高、鲁棒性强、适用范围广等优点. NSGA-II 算法是 2009 年由 K. Deb 等^[7]提出的基于 NSGA 的改进版,该算法导入了非劣排序法,降低了计算的复杂程度;利用精英算法将父代种群进行交叉变异得到子种群,扩大了样本采样

区域,保留了父代优良个体,增强了 Pareto 解的前进能力. 但运用响应面法和 NSGA-II 算法联合优化盘式制动器的相关文献鲜见报道.

鉴于此,本文拟基于有限元模型和响应面法,运用 NSGA-II 算法对盘式制动器进行优化设计,并对改进后的制动器进行试验验证,以期为进一步提高盘式制动器的性能提供参考.

1 盘式制动器有限元模型的建立

1.1 模型建立与网格划分

制动器在制动过程中,摩擦产生的热量基本被制动盘和摩擦块吸收,然后散发到空气中,所以在分析时,只需考虑制动盘和摩擦块这两个关键部件. 为了节约求解时间,对关键部件实体进行去除装配孔、倒角、圆角等必要的简化^[8].

现以国产某车型的制动器为初始研究对象建立有限元模型,如图 1 所示. 选用 solid45 三维 16 节点的六面体耦合场分析单元,划分网格得到制动盘单元数 2130 个,摩擦块单元数 462 个,其节点数分别为 3124 个和 720 个. 建模过程中需要的几何尺寸和材料参数见表 1.

1.2 边界条件的计算

由热力学第一定律可知:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{Q\} = P$$

因为只有一个热源,所以上式又可写成

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{Q\} = 0 \quad (1)$$

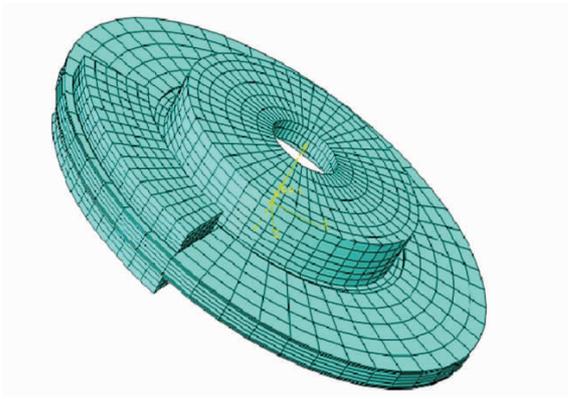


图1 制动器有限元模型

Fig.1 Finite element model of the brake

表1 制动盘和摩擦块的几何尺寸和材料参数

Table 1 Geometric dimensions and material parameters of the brake disc and friction block

参数	制动盘	摩擦块
材料	ZG ¹ Cr13	树脂复合材料
外径/mm	128	125
内径/mm	77	88
厚度/mm	12	13
包角/(°)	360	60
密度/(kg·m ⁻³)	7228	2150
比热/(J·(kg·K) ⁻¹)	419	1200
热膨胀系数	4.39 × 10 ⁻⁶	11.65 × 10 ⁻⁶
热传导系数	48.46	1.50
弹性模量/MPa	175	2.2
泊松比	0.3	0.3
摩擦因数	0.35	0.35

其中

$$L = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad v = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

由傅里叶定律和式②可将式①推导为

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

其中： ρ 为密度； c 为比热容； t 为时间； T 为温度； v_x, v_y, v_z 分别是沿着 x, y, z 方向的热流质

点速度； k_x, k_y, k_z 是 x, y, z 方向的热传导率。但求解式③，还必须确定下列条件。

1.2.1 制动盘最大角减速度的确定 在仿真时要确定制动时间，在汽车初始行驶速度已知的条件下，还需确定最大角减速度。

汽车的最大制动力矩为

$$M_{\mu_{\max}} = G_c / L (L_1 + \varphi h_g) \varphi r_e$$

制动盘的等效转动惯量为

$$I = \frac{G(L - L_1 - 0.45h_g)r_e^2}{2L}$$

最大角减速度为

$$\varepsilon = \frac{M_{\mu_{\max}}}{I} \approx 23 \text{ r/s}$$

式中， G_c 为汽车质量/kg， G 为汽车自重加货物质量/kg， L 为汽车轴距/m， L_1 为汽车质心到后轴中心距/m， φ 为附着系数， h_g 为汽车质心高度/m， r_e 为车轮有效半径/m。计算所需要的整车重要参数见表2。

表2 整车重要参数

Table 2 Important parameters of vehicle

参数	G_c /kg	L /m	L_1 /m	φ	h_g /m	r_e /m
数值	1100	20.5	1.13	0.7	0.45	0.295

1.2.2 制动盘与摩擦块之间热量分配系数的确定 汽车的减速过程是摩擦生热的过程，产生的热量一部分被制动盘和摩擦块吸收，一部分被空气对流带走。热量的传递有热传导、热对流、热辐射3种方式，这里只考虑热传导和热对流，忽略热辐射的影响。

制动盘与摩擦块之间的热量分配系数

$$\eta = \frac{q_p}{q_k + q_p} = \frac{r}{r + 1}$$

可得

$$r = \frac{q_p}{q_k} = \sqrt{\frac{\lambda_p c_p \rho_p}{\lambda_k c_k \rho_k}}$$

其中， λ_p, λ_k 为制动盘和摩擦块的导热率； c_p, c_k 为制动盘和摩擦块的比热容； ρ_p, ρ_k 为制动盘和

摩擦块的材料密度. 代入数据计算得 $\eta = 0.86$, 表明制动盘吸收了绝大部分热, 所以取制动盘作为重点研究对象.

1.2.3 对流传热系数的确定 制动盘在高速旋转的过程中, 与摩擦块接触的表面在一个摩擦周期结束时与空气存在着强制对流, 其传热系数也是随角速度的变化而变化的, 即

$$h = \begin{cases} 7.666\omega^{0.55} & \omega \leq 53.5 \\ 3.585\omega^{0.8} & \omega > 53.5 \end{cases}$$

可见, 随着角速度的减小, 制动盘对流传热的作用也有一定减小. 另外, 不参与摩擦的制动盘和摩擦块的圆柱面与摩擦块的另一端面也有对流传热, 但由于温度较低, 传热量较少.

1.3 载荷和约束的施加

对照盘式制动器真实工作状况, 以制动盘圆心处为原点, 释放制动盘 X 方向的转动自由度, 约束其他 5 个自由度; 释放摩擦块 X 方向的平动自由度, 约束其他 5 个自由度. 驾驶员踩下刹车制动踏板后, 在液压油作用下制动块实现平动, 所以在制动块上施加一个 60 MPa 的平面力^[9].

由于制动盘和摩擦块的运动是一种不连续的非线性行为, 两者之间有一个垂直方向的相互作用力, 所以需给两者定义一个接触: 初始距离为 0.01 mm, 摩擦块为接触面, 制动盘为目标面, 摩擦系数取 0.35^[10].

2 仿真结果与分析

根据《制动器台架试验方法》(QC/T 564—1999), 在 ANSYS 有限元软件中分别对紧急制动和重复制动这两个工况进行仿真分析.

2.1 紧急制动工况

紧急制动工况模拟汽车在高速公路上行驶(设初始速度 100 km/h)时, 驾驶员遇到危险、以最短距离实现停车制动的情况, 经过计算该过程用时 4 s.

经仿真得到紧急制动过程中制动盘的表面

温度随时间变化的关系如图 2 所示(取制动盘表面 7 个节点的温度作为研究对象).

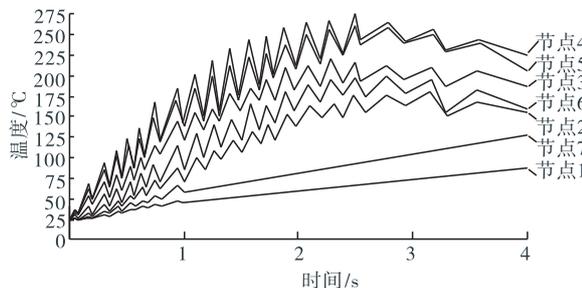


图 2 紧急制动过程中制动盘表面温度变化曲线

Fig. 2 Surface temperature change of brake disc during emergency braking process

由图 2 可以看出, 在整个制动过程中, 0 ~ 2.5 s 温度稳步上升, 这是因为摩擦产生的大量热量集中在摩擦表面并不断积累, 使得温度迅速上升; 在 2.5 s 时制动盘温度达到最高, 约为 270 °C (见图 3); 在 2.5 s 以后摩擦副温度下降, 这是因为随着制动盘角速度的降低, 摩擦生热的速度减小了, 而此时空气热对流起到主要作用, 所以温度会降低. 温度曲线呈现忽高忽低的锯齿形是因为研究的节点进入摩擦行程时升温, 退出摩擦行程时由于对流散热而降温, 出现波动.

从图 2 还可以看出, 节点 4 温度最高, 因为这是摩擦副接触的中心点, 该区域是热源产生地而且远离空气对流换热区, 热量不易散失, 温度短时间处于高温状态; 节点 6 和节点 7 温度无显著变化, 这是因为这两个节点远离热源.

与温度的分布类似, 摩擦副接触中心应力最大, 应力变化的整体趋势也是先增大后略有减小, 但最大应力到达时刻比温度稍晚, 最大应力为 128.7 MPa (见图 4). 另外, 制动块的应力场分布并不均匀, 由于机械接触的摩擦产生局部高温, 温度分布不均产生热应力, 应力场的波动会导致摩擦副外形的变化, 几何外形的变化同时也会产生应力, 影响应力场的分布, 所以这几方面相互影响、相互耦合^[11].

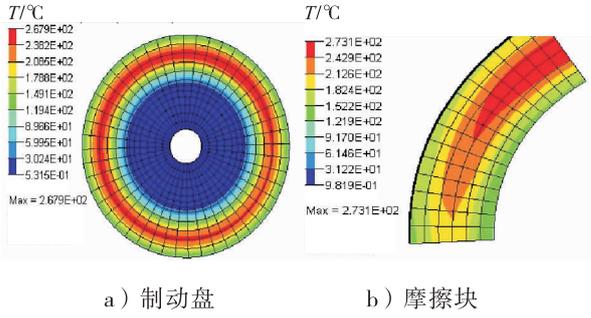
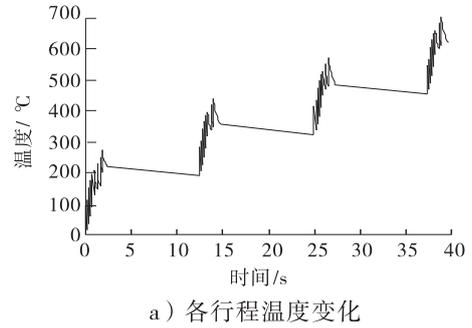


图3 紧急制动过程中的最高温度

Fig.3 Maximum temperature during emergency braking



a) 各行程温度变化

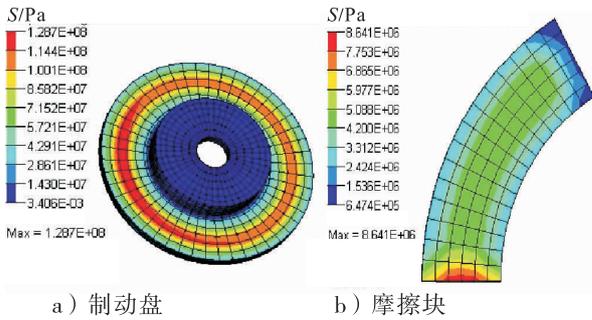
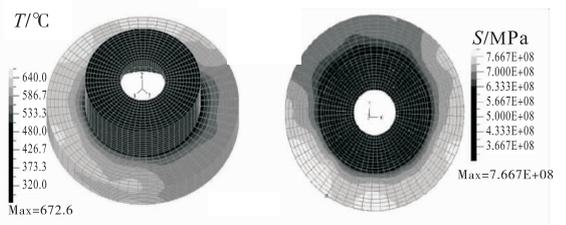


图4 紧急制动过程中的最大应力

Fig.4 Maximum stress during emergency braking



b) 温度云图

c) 应力云图

图5 重复制动结束时制动盘的温度和应力
Fig.5 The temperature and stress of the brake disc at the end of repeated braking

2.2 重复制动工况

重复制动工况模拟汽车在山路连续下坡的工作情况. 与紧急制动工况不同,该工况初始速度较低,但工作行程较长. 仿真得到重复制动结束时制动盘的温度和应力见图5.

由图5可以看出,该工况由4个工作行程和3个休息行程组成,每个工作行程用时2.5s,休息行程用时10s;在工作(即制动)后制动盘温度急剧上升,在休息后温度缓慢下降. 在第4个工作行程结束后,温度和应力达到峰值,分别为672.6 °C和766.7 MPa.

由此可见,重复制动工况与紧急制动工况相比更加恶劣. 温度672.6 °C和应力766.7 MPa虽然未超过标准规定的最高额定数值,但已不能满足工作安全系数为1.2的要求,因此要针对重复制动结束时的温度和压力对盘式制动器进行设计参数的优化.

3 设计参数优化

3.1 优化问题的数学描述

在不改变制动器整体结构的前提下,选取工作条件较为恶劣的重复制动工况为待优化工况. 受成本控制,对制动盘和摩擦块材料不作更改,本文选取对制动器性能影响最大的4个参数作为设计变量,即摩擦块内径、摩擦块厚度、制动盘外径、制动盘厚度,分别记为 x_1, x_2, x_3, x_4 ,以温度(T)和应力(S)最小化为优化目标,同时要保证4个变量在允许范围内变动并且油缸油压不超过规定范围. 综上所述,优化问题可用数学式表述为

$$\begin{cases} \text{Minimize: } T = (x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \text{Minimize: } S = (x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \text{subject-to: } 0.080 \leq x_1 \leq 0.095 \\ 0.010 \leq x_2 \leq 0.015 \\ 0.125 \leq x_3 \leq 0.135 \\ 0.009 \leq x_4 \leq 0.013 \\ P \leq [P] \end{cases}$$

3.2 响应面模型的建立和校核

在拟合响应面模型之前必须进行试验设计,本文采用最优拉丁超立方试验设计方法,得到 30 组试验样本数据,根据这些样本点构建二次响应面模型为

$$T = 3\ 177.9 + 16\ 374.2x_1 - 20\ 822.92x_2 - 48\ 098.18x_3 - 84\ 414.8x_4 - 62\ 955.39x_1^2 + 423\ 854x_2^2 + 179\ 761.7x_3^2 + 599\ 472x_4^2 + 19\ 498.75x_1x_2 - 54\ 994.69x_1x_3 + 132\ 285.47x_1x_4 - 83\ 013x_2x_3 - 193\ 600x_2x_4 + 449\ 362.15x_3x_4$$

$$S = 2\ 358.47 - 12\ 777.8x_1 + 26\ 962.65x_2 - 12\ 011x_3 - 146\ 880.1x_4 + 9\ 410.3x_1^2 + 10\ 9313.5x_2^2 - 5\ 816.8x_3^2 + 480\ 416.59x_4^2 - 4785x_1x_2 + 71\ 068.48x_1x_3 + 270\ 351x_1x_4 - 151\ 459.3x_2x_3 - 557\ 216.3x_2x_4 + 836\ 224.3x_3x_4$$

近似模型的精度是指真实响应值和预测值之间的误差,可用均方根误差 RMSE 来校核:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}$$

式中, n 为样本点数, y_i 为真实值, y'_i 为预测值. 经计算,两个响应面模型的 RMSE 值分别为

0.043 和 0.127,说明模型精度满足要求.

3.3 NSGA-II 算法的优化

基于响应面近似模型,采用 NSGA-II 算法进行优化. 盘式制动器内部优化流程图如图 6 所示.

设温度权重为 6,应力权重为 4,经过 49 次迭代计算,求得重复制动工况下优化的 Pareto 解一共有 19 个,评价总数 241 次,所以一个解所需的评价次数是 12.6.

表 3 为制动器优化前后的设计参数和性能对比,从中可以看出,制动器性能有了明显改善:最高温度下降了 13%,最大应力下降了 15%,且对于最高额定数值仍能满足安全系数为 1.2 的要求,达到了优化设计的目的.

4 试验验证

为验证仿真结果的正确性,依据《制动器台架试验方法》(QC/T 564—1999)对优化后的制动器在重复制动工况下进行台架试验,其试验台为 JF122 试验台. 输入初始速度、温度、初始制动力矩、材料性能等,输出间隔 5 s 的点的温度并与仿真值对比,其结果如图 7 所示. 由图 7

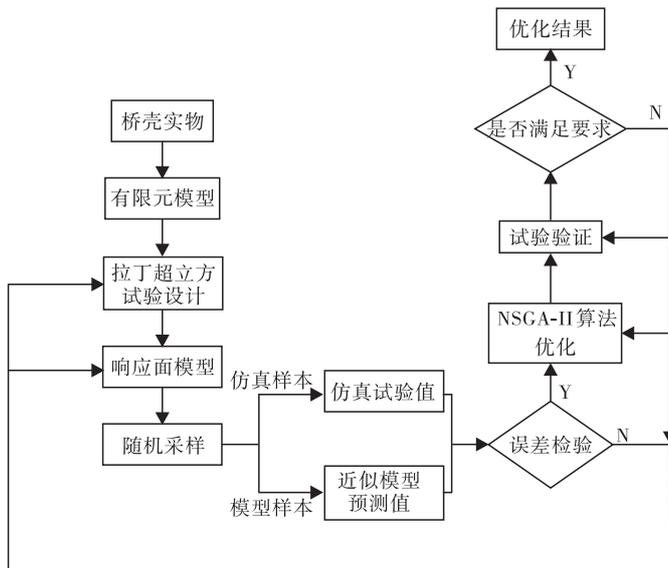


图 6 盘式制动器内部优化流程图

Fig. 6 Internal optimization flow chart of disc brake

表3 制动器优化前后对比

Table 3 Comparison before and after the optimization of brake

参数	优化前	优化后
制动盘外径/mm	128	126.22
制动盘厚度/mm	12	10.6
摩擦块内径/mm	88	86.3
摩擦块厚度/mm	13	14.4
最高温度/℃	672.6	587.0
最大应力/MPa	766.7	652.0

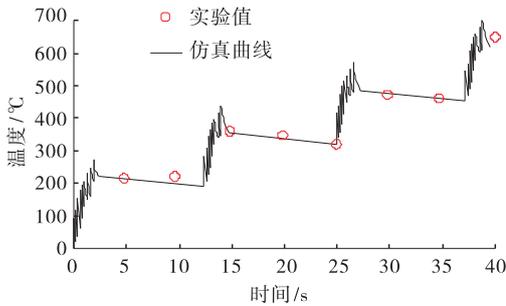


图7 仿真值和试验值对比

Fig. 7 Comparison of simulation and experimental results

可以看出,有限元仿真曲线与试验值拟合状况良好,验证了仿真的正确性.仿真曲线与试验值有微小出入,可能是因为制动盘制造工艺存在缺陷.

5 结论

本文应用有限元仿真方法对盘式制动器进行了仿真建模,分别对紧急制动工况和重复制动工况进行了有限元耦合仿真,实现对最高温度和压力的校核.然后根据设计经验在 ANSYS 中微调输入参数,得到多组样本数据;接着对这些样本数据运用响应面法构建盘式制动器的近似模型,在此基础上用 NSGA-II 算法进行了优化设计.优化后的制动器最高温度降低了 13%,最大应力降低了 15%,制动器工作性能指标明显好转,提高了使用寿命.

在有限元的基础上用近似模型进行优化设

计比直接用有限元方法优化,所用时间大大缩短,从而可以提高研发效率.响应面法和 NSGA-II 算法联合优化的方法经试验验证了其合理性,该方法为工程设计人员提供了新思路.

参考文献:

- [1] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [2] WANG P H. Thermal-mechanical coupled simulation of a solid brake disc in repeated braking cycles[J]. Engineering Tribology, 2015 (30): 71.
- [3] 孟祥宝. 基于 AYSYS 的制动器摩擦生热分析[D]. 吉林:延边大学,2014:1-5.
- [4] 李明磊. 基于 CAE 的汽车盘式制动器结构优化设计研究[D]. 长沙:湖南大学,2014:5-8.
- [5] 陈亚林. 基于 HYPERMESH 和 ANSYS 的盘式制动器的结构分析与优化[J]. 制造业自动化,2014(5):35.
- [6] 邢艺文. 汽车扭杆弹簧的有限元分析与优化设计[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2015,30(5/6):76.
- [7] DED K, MONTGMEYRY D C, ADERSON C M. Response surface methodology-process and product optimization using NSGA-II[M]. New York: Wiley Publishers, 2009.
- [8] 华林. 汽车压盘式制动器瞬时温度场研究[J]. 润滑与密封,2007(5):8.
- [9] 张朝晖. ANSYS12.0 热分析工程应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [10] 邓小凡. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [11] HUANG J C, KROUSGRILL C M, BAJAJ A K. Modeling of automotive drum brakes for squeal and parameter sensitivity analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, (289):245.