

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.01.011

基于正交试验法的脉冲除垢系统的优化

虞斌¹, 邓昂¹, 涂善东²

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816;

2. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:为了使应用于炭黑急冷器中的新型脉冲除垢系统达到更好的除垢效果,通过正交试验和数值模拟的方法,以换热管壁面峰值压力作为评价指标,分析了喷吹压力、喷吹距离、喷嘴直径和喷吹时间对除垢性能的影响。得到了影响除垢效果因素的主次顺序依次是喷吹压力、喷吹时间、喷嘴直径和喷吹距离;在所选取的水平范围内,当喷吹压力为2.0 MPa,喷吹时间取0.2~0.3 s,喷嘴直径为7.5 mm,喷吹距离为40 mm时,脉冲除垢系统能取得较好的效果。所得到的分析结果为脉冲除垢系统的设计优化提供了理论依据,为炭黑急冷器的工程化安全应用奠定了基础。

关键词:急冷器;除垢;正交试验;数值模拟

中图分类号:TQ051.5

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)01-0042-06

Optimization Analysis of Pulse Descaling System Based on Orthogonal Experiment

YU Bin¹, DENG Ang¹, TU Shandong²

(1. College of Mechanical & Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. School of Mechanical & Power Engineering, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In order to make the new pulse descaling system applied to carbon black quencher achieve better descaling result, the orthogonal experiment and numerical simulation method were applied to analyse how much impact the injection pressure, injection distance, nozzle diameter and injection time make on the descaling result, with peak pressure on the surface of heat exchange tube as the appraisal target. The results show that the primary and secondary order of the factors that influence the descaling result is injection pressure, injection time, nozzle diameter and injection distance in turn. The results also indicate the preferable values in the selected level scope, such as the injection pressure = 2.0 MPa, injection time = 0.2 ~ 0.3 s, nozzle diameter = 7.5 mm and injection distance = 40 mm. The results provide an important theoretical basis for design optimization of pulse descaling system and lay the foundation in security engineering of quencher application.

Key words: quencher; descaling; orthogonal experiment; numerical simulation

从高温裂解炉排出的炭黑烟气中含有未完全充分燃烧的炭黑颗粒,而炭黑粒子有很强的黏附性,在流经急冷器内换热管的时候,极易黏附在管壁上,并且积灰程度在短期内迅速增长,逐渐趋于平衡,若不及时清除这些灰垢,不仅会降低换热效率,严重时还会造成管道堵塞,影响整条炭黑装置的正常运行。基于这种特殊情况,南京工业大学虞斌等^[1]研究出一套新型的脉冲除垢系统。现本文在之前的研究基础上^[2],对这套系

统进行进一步的优化,使之能达到更优的除垢效果。

1 新型脉冲除垢系统简介

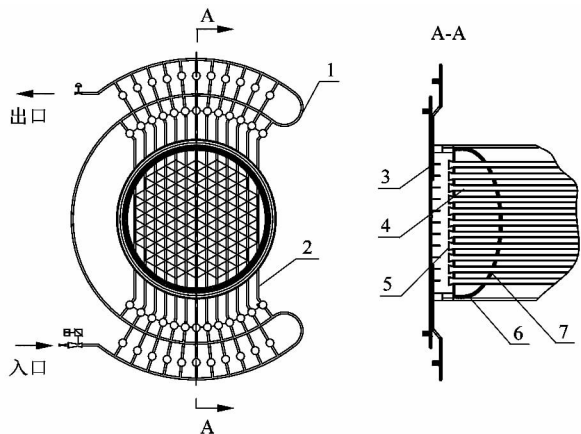
1.1 除垢系统结构简介

图1所示为本文所要研究的新型脉冲除垢系统结构图。脉冲除垢系统安装在换热管出口端。蒸气导管1为一环形弯管,内环和外环分置在不同平面上,这样既可减少所占空间,又可防止凝结水在蒸气导管内形成。内环管和外环管上连接很多支管2,每一排换热

收稿日期:2014-06-02;修回日期:2014-08-20

作者简介:虞斌(1965),男,江苏南京人,教授,主要研究方向为新型高效传热传质设备。E-mail:abyu@njtech.edu.cn

管对应着上下 2 根支管。支管上分布着喷嘴 3, 每个喷嘴对应 1 根换热管 4, 喷嘴的末端在同一水平面上。此除垢系统由专业软件控制, 启动时能间歇喷射水蒸气, 锥形元件 5 能有效产生文丘里效应。



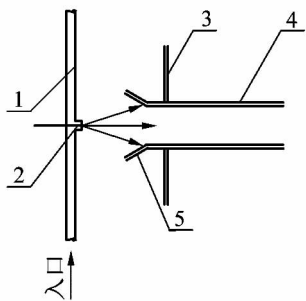
1—蒸气导管;2—支管;3—喷嘴;4—换热管;5—锥形元件;6—壳体;7—腰形管板

图 1 新型脉冲除垢系统结构图

Figure 1 Structural diagram of new pulse descaling system

1.2 除垢系统除垢机理

图 2 所示为喷嘴和换热管位置关系图。喷嘴 2 正对着换热管 4 的出口端。水蒸气经由喷嘴 2 高速喷出后, 能卷吸周围部分气体一起进入到换热管 4 内, 在换热管内形成与炭黑烟气流动方向相反的气流。这一气流在换热管 4 内一边高速流动, 一边吹掉换热管内壁上附着而还未固结的炭黑颗粒。如果使高温急冷器换热管出口附近的口径增大, 即在换热管的左端加一锥形入口元件, 就能在这一口径逐渐增大部分和恒定内径部分的结合处, 有效地产生文丘里效应, 从而增大引入的气体量。



1—水蒸气导管;2—喷嘴;3—管板;4—换热管;5—锥形入口元件

图 2 喷嘴与换热管位置关系

Figure 2 Positional relationship diagram between nozzle and heat tube

2 CFD 模型的建立

由于流动过程复杂, 对喷嘴喷吹水蒸气进行除垢过程进行如下简化:

- 1) 取单个喷嘴和换热管为研究对象, 水蒸气为可压缩的流体;
- 2) 在喷嘴入口处, 假定喷吹气流的速度沿喷嘴径向均匀分布;
- 3) 因为喷吹时间较短, 而且传热过程明显慢于速度场, 所以采用常温计算条件, 不涉及温度对流场的影响;
- 4) 喷吹气流在换热管内的流场属于三维流动问题, 喷吹气流沿管长度方向的轴线是对称的, 可简化为二维轴对称问题。

2.1 物理模型的建立

文献[2]指出, 锥直型喷嘴较适用于本套除垢系统, 因此图 3 所示的脉冲除垢系统计算物理模型中选用锥直型喷嘴。喷嘴与锥形入口元件之间取矩形封闭计算区域, 封闭区域的最外边界距轴线的距离 b 取为 130 mm。喷嘴与换热管末端的距离, 即喷吹距离记为 a , 换热管长度 l 为 7 000 mm, 换热管内径 d_1 为 60 mm。

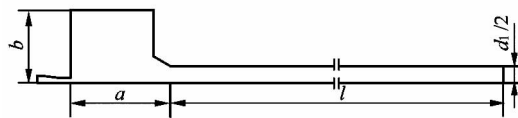


图 3 脉冲除垢系统计算物理模型

Figure 3 Computational physical model of pulse descaling system

2.2 数学模型和数值处理方法

本文采用非稳态的数值计算方法, 经计算水蒸气在喷嘴入口处流场完全处于湍流状态, 并且水蒸气在喷射流动过程中会出现流体的旋转, 因此采用 Realizable $\kappa-\varepsilon$ 方程。对换热管的壁面采用标准壁面函数处理, 两相流模型选取 VOF 模型, 将水蒸气设为第一相, 空气设为第二相, 初始状态时, 换热管内充满空气。压力-速度耦合采用 PISO 格式的求解方式, 差分格式采用二阶迎风差分进行数值求解, 以提高精度^[3]。

2.3 生成计算网格及边界条件

设定网格时, 要对换热管壁面划分边界层网格, 确保 Y^+ 值处于 30 ~ 60 的范围。喷嘴部分的网格均为 0.5 mm, 换热管部分轴向网格为 4 mm, 径向方向为 1 mm, 喷嘴与换热管之间采用不均匀网格划分方法, 整个模型采用自适应网格划分方法。

设定喷嘴的入口为压力进口边界,入口处的气体全为水蒸气。为防止流体出现回流的情况,将换热管最右端设为压力出口边界,压力值为大气压。除出入口和流场采用轴对称边界外,其他边界条件均设为壁面,采用无滑移边界条件。

3 试验因素及水平

采用正交试验法设计试验^[4]。本文中分析喷吹压力、喷吹时间、喷吹距离和喷嘴直径对除垢效果的影响。

蒸气吹灰器的压力一般取值范围为 0.8 ~ 1.98 MPa^[5],因此,在本章中选取脉冲除垢系统的喷吹压力范围为 0.8 ~ 2.0 MPa。

对于锥直型喷嘴,喷嘴直径^[6-7]

$$d = \sqrt{\frac{4Q_0}{3.14\mu\sqrt{2g\frac{\Delta p_0}{\rho}}}} \quad (1)$$

其中, Q_0 —流过喷嘴的流体的体积流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

μ —为喷嘴流量系数,其取值范围为 0.9 ~ 0.95;

g —重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

Δp_0 —工作压力/MPa;

ρ —工作液体的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

之前的研究工作^{[2]96}表明,流经喷嘴的水蒸气的质量流量约为 $0.08 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,经过计算,得到喷嘴直径的变化范围为 6.88 ~ 7.53 mm,因此,正交试验中喷嘴直径水平值范围为 6 ~ 8 mm。

射流理论^[8-9]是研究脉冲除垢性能的基础,在换热管末端无锥形元件的情况下,当射流半径等于换热管半径时,如图 4 所示。

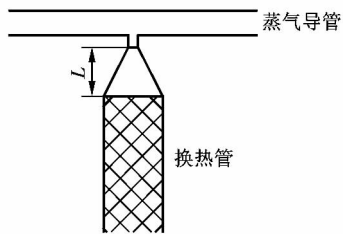


图 4 射流半径等于换热管半径

Figure 4 Jet radius equal to the heat exchange tube radius

则此时喷嘴出口端与换热管靠近喷嘴端的距离为

$$L = \frac{R_1 - R_2}{\tan \theta} \quad (2)$$

其中, R_1 —换热管半径/mm;

R_2 —喷嘴半径/mm;

θ —蒸气从喷嘴喷出后,射流的角度。

庞生敏等^[10]指出,对于锥直型喷嘴,喷吹角度为 13° 时,对应的喷吹射流角度为 45° 左右。考虑到射流角度具有很大的不稳定性,因此选取射流角度为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。因此,在做正交试验时,选取喷吹距离为 40 ~ 130 mm。

对于此脉冲除垢系统的喷吹时间,现尚无详细数据来考核,考虑到此结构的特点和炭黑烟气污垢增长速率的特点,脉冲除垢系统需及时除垢,因此选择短时间高频率的除垢策略,假设正交试验选取的喷吹时间为 0.1 ~ 0.5 s。

每个因素取 4 个水平表,因素水平表见表 1。

表 1 正交试验设计因素水平表

Table 1 Factor and level table of orthogonal experimental design

水平	因素			
	喷吹压力/MPa	喷吹距离/mm	喷嘴直径/mm	喷吹时间/s
1	0.8	40	6.0	0.1
2	1.2	70	7.0	0.2
3	1.6	100	7.5	0.3
4	2.0	130	8.0	0.5

4 正交试验结果分析

正交试验方案及数值模拟结果见表 2。峰值压力指从喷嘴喷出的气流在换热管壁面产生的最大静压值。将沿长度方向换热管壁面各点压力最大值连线,得到了不同模拟条件下换热管壁面的峰值压力曲线,如图 5 所示。

表 2 正交试验方案及数值模拟结果

Table 2 Test scheme and results of orthogonal design

试验号	因素				峰值压力 平均值/kPa
	喷嘴 直径/mm	喷吹 距离/mm	喷吹 压力/MPa	喷吹 时间/s	
1	6.0	40	0.8	0.1	1.3
2	6.0	500	1.2	0.2	3.8
3	6.0	100	1.6	0.3	5.0
4	6.0	130	2.0	0.5	5.9
5	7.0	40	1.2	0.3	6.8
6	7.0	500	0.8	0.5	3.4
7	7.0	100	2.0	0.1	3.5
8	7.0	130	1.6	0.2	6.7
9	7.5	40	1.6	0.5	9.7
10	7.5	500	2.0	0.3	9.3
11	7.5	100	0.8	0.2	4.0
12	7.5	130	1.2	0.1	3.2
13	8.0	40	2.0	0.2	10.1
14	8.0	500	1.6	0.1	2.5
15	8.0	100	1.2	0.5	6.8
16	8.0	130	0.8	0.3	4.7

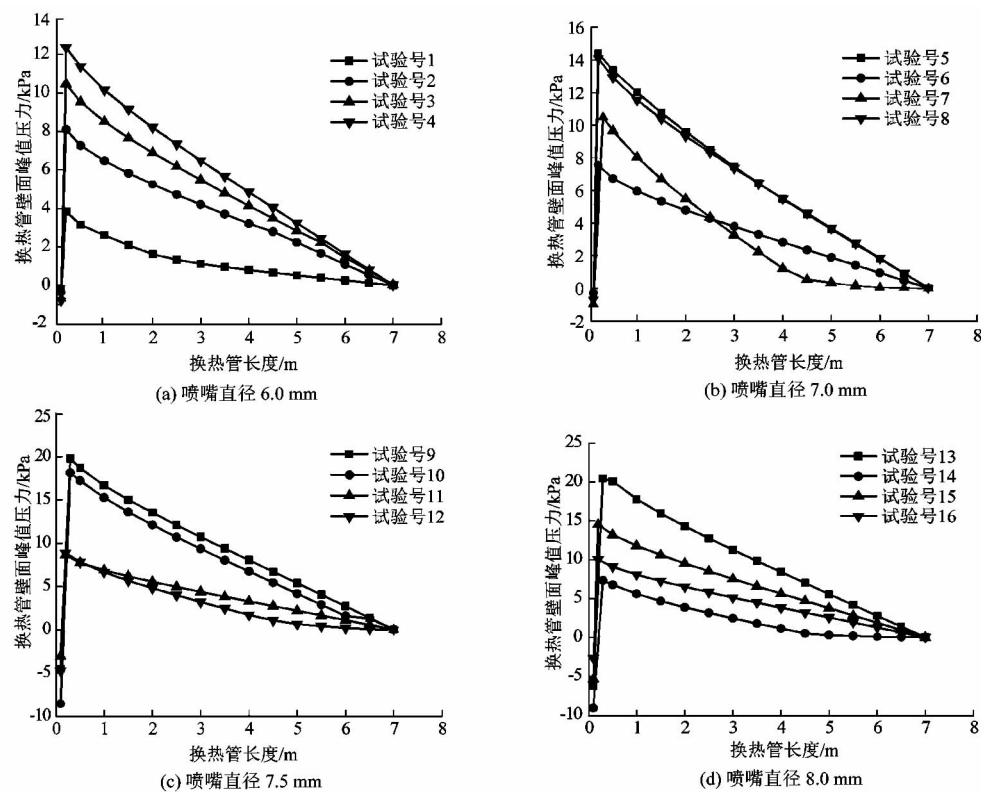


图5 换热管壁面峰值压力曲线

Figure 5 Curve of peak pressure on the surface of heat exchange tube

由表3, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别代表各因素在水平上对应的指标数值之和, $k_1 = K_1/4$ 、 $k_2 = K_2/4$ 、 $k_3 = K_3/4$ 、 $k_4 = K_4/4$ 表示各水平所对应的平均值,极差 R 为平均值中最大值减去最小值所得值。极差越大,则因素对试验指标的影响越大。从表2中看出,喷吹压力变化,对

壁面峰值压力的影响最大。而喷吹距离的变化,对其影响最小。按极差大小排序,得到影响换热管壁面峰值压力大小的因素主次顺序依次是喷吹压力、喷吹时间、喷嘴直径和喷吹距离。

表3 换热管壁面峰值压力极差分析表/Pa

Table 3 Range analysis of peak pressure on surface of heat exchange tube

K_1	K_2	K_3	K_4	k_1	k_2	k_3	k_4	极差 R
15 928	20 393	26 083	18 001	3 982	5 098	6 521	4 500	2 539
27 823	19 099	19 273	20 340	6 956	4 775	4 818	5 085	2 181
13 390	20 578	23 768	28 799	3 348	5 145	5 942	7 200	3 852
10 522	24 570	25 714	25 729	2 631	6 143	6 429	6 432	3 801

以喷嘴直径、喷吹距离、喷吹压力和喷吹时间作为横坐标,以壁面峰值压力平均值作为纵坐标,可作出换热管壁面峰值压力随各因素的变化趋势,如图6所示。

4.1 喷吹压力对换热管壁面峰值压力的影响

从图6可以看出,在正交试验的取值范围内,换热管壁面峰值压力随着喷吹压力的增加,呈直线上升的趋势。图7为喷嘴直径为7.0 mm,喷吹距离为70 mm和喷吹时间为0.3 s时,不同的喷吹压力下,壁面峰值压力变化的曲线。可看出,当喷吹压力分别取0.8 MPa、1.2 MPa、1.6 MPa和2.0 MPa时,峰值压力曲线

都有明显的变化,且峰值依次上升。

4.2 喷吹时间对换热管壁面峰值压力的影响

从图6中可以看出,喷吹时间取0.2 s、0.3 s和0.5 s时对换热管壁面峰值压力的影响不是特别明显。图8是模拟得到的是喷嘴直径为7.0 mm,喷吹距离为70 mm,喷吹压力为0.8 MPa的情况下,壁面峰值压力随时间变化的曲线。从图中可以看出,喷吹时间为0.2 ~ 0.5 s的壁面峰值压力曲线基本上是重合的。可见,当喷吹时间大于某一值时,再继续延长喷吹时间,只是会增加水蒸气的消耗量,并不能有效提高壁面峰值压力。

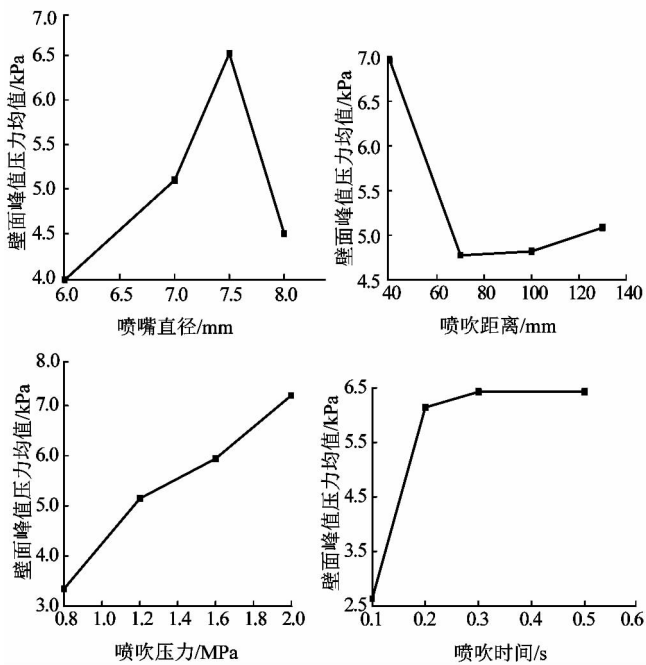


图6 换热管壁面峰值压力随各因素的变化趋势

Figure 6 Change trend of peak pressure along with various factors

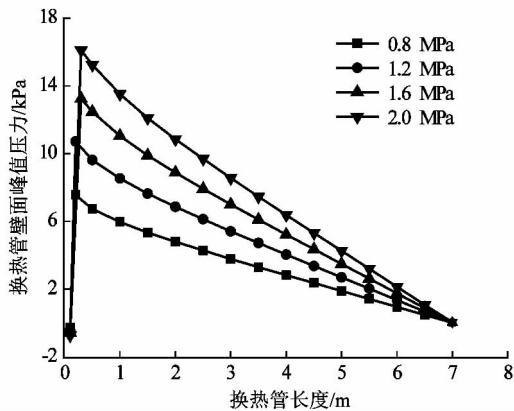


图7 喷吹压力对换热管壁面峰值压力的影响

Figure 7 Influence of injection pressure to peak pressure

4.3 喷嘴直径对换热管壁面峰值压力的影响

从图6中可以看出,换热管壁面峰值压力随喷嘴直径的增加先呈上升的趋势,当喷嘴直径取7.5 mm时,峰值压力取得极值点,后随着喷嘴直径的增加呈下降趋势。图9是在喷吹距离为70 mm,喷吹压力为2.0 MPa和喷吹时间为0.3 s时得到的不同喷嘴直径下换热管壁面峰值压力曲线。

4.4 喷吹距离对换热管壁面峰值压力的影响

从图6中可以看出,随着喷吹距离的增加,换热管壁面峰值压力先下降,后逐步趋于平缓,呈缓慢上升的

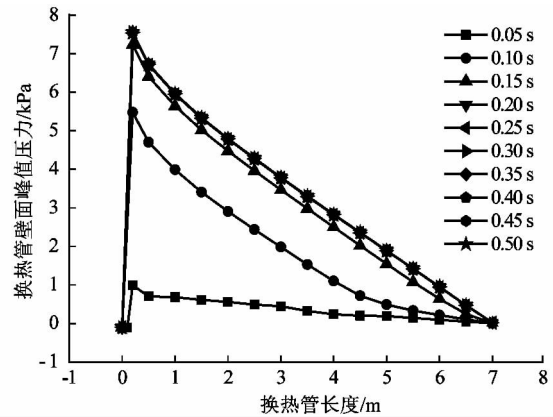


图8 喷吹时间对换热管壁面峰值压力的影响

Figure 8 Influence of injection time to peak pressure

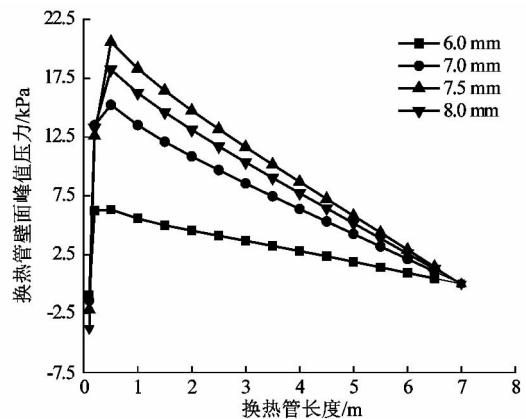


图9 喷嘴直径对换热管壁面峰值压力的影响

Figure 9 Influence of nozzle diameter to peak pressure

趋势。当喷吹距离取40 mm时,壁面峰值压力最大。图10是喷嘴直径为6 mm,喷吹压力为1.6 MPa和喷吹时间为0.3 s的情况下得到的不同喷吹距离下,换热管壁面峰值压力变化曲线。从图10中可以看出,喷吹距离为40 mm时,换热管壁面峰值压力稍大,再继续增大喷吹距离,峰值压力会下降,且喷吹距离为70 mm、100 mm、130 mm时,壁面峰值压力曲线基本是重合的。急冷器脉冲除垢系统存在着最佳喷吹距离,过大或过小的喷吹距离都不能使得系统取得良好的除垢效果。

5 结论

通过正交试验的方法对急冷器脉冲除垢系统参数的模拟结果进行讨论,可得如下结论:

1) 影响除垢系统除垢效果的因素的顺序,依次是喷吹压力、喷吹时间、喷嘴直径和喷吹距离。

2) 经过分析比较,得到在所选取的水平范围内,当喷吹压力为2.0 MPa,喷吹时间取0.2~0.3 s,喷嘴

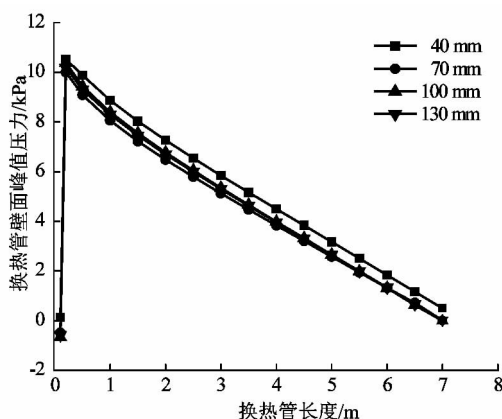


图10 喷吹距离对换热管壁面峰值压力的影响

Figure 10 Influence of injection distance to peak pressure

直径为7.5 mm,喷吹距离为40 mm时,脉冲除垢系统能取得较好的效果。

3) 通过观察换热管壁面峰值压力变化曲线可以发现,峰值压力随着换热管长度的增加呈下降趋势,这会造成除垢不均匀性,影响除垢效果。如何提高脉冲除垢系统的除垢均匀性,是下一步值得深入研究的问题。

4) 数值模拟和正交试验方法避免了实验的工作量大和实验过程繁琐的缺点,为应用在炭黑急冷器中

的脉冲除垢系统的设计优化提供了理论依据,为炭黑急冷器的工程化安全应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 虞斌,涂善东,莫逊. 高温高含尘炉气急冷器: 中国, ZI20101094938[P]. 2010-06-08.
- [2] 邓昂,虞斌,郝彪. 新型脉冲除垢系统喷嘴的设计与研究[J]. 轻工机械, 2014, 32(5): 91-96.
- [3] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 144-152.
- [4] YAO Keheng, LIU Shihao, XIA Yongjun, et al. Orthogonal experiment analysis and optimization design for operation power of ditcher[J]. Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 529-535.
- [5] 刘张鹏,臻宏伟,李相超. 吹灰蒸汽参数对炉管近壁面压力场与温度场的影响[J]. 华电技术, 2012, 34(3): 22-81.
- [6] 刘爱荣,樊民强. 喷嘴直径对旋流器充气和分选性能的影响研究[J]. 矿山机械, 2014, 42(2): 89-92.
- [7] 张振,章巧芳. 高压喷嘴的射流仿真研究[J]. 机电工程, 2013, 30(2): 185-187.
- [8] 李筱秋. 袋式除尘器喷吹距离的研究[J]. 洁净与空调技术, 2010(3): 31-38.
- [9] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用[M]. 武昌: 武汉大学出版社, 2004.
- [10] 庞生敏,陈沛民. 基于CFD的圆柱形喷嘴设计[J]. 机械制造与研究, 2001, 40(1): 41-42.
- [11] 刘美玲. 袋式除尘器脉冲清灰气流的数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

(上接第41页)

4 结论

本文提出一种理论分析与试验相结合的方法,定量研究细长轴车削时的弯曲变形及振幅的影响因素。分析结果为抑制振动提供重要理论依据。

1) 基于横向振动理论建立了细长轴车削过程的振动模型,并从力学及数值分析角度求解了切削力引起的工件振动响应。

2) 定量研究细长轴车削时的弯曲变形及振幅的影响因素,在Matlab软件中通过仿真研究了切削用量及尺寸的变化对工件振动响应幅值的影响,寻求减小振动的方法。

3) 设计了四因素三水平正交实验,实验表明转速、进给速度、背吃刀量和长径比对切削力的影响程度依次为长径比、背吃刀量、进给速度和转速,实验结论验证了仿真结果的正确性,揭示了细长轴车削过程的动态特性。

参考文献:

- [1] 孔繁森,王宇,于骏一. 颤振征兆早期识别的模糊信息融合法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 108-111.
- [2] QUINTANA G, CIURANA J. Chatter in machining processes: A

review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(5): 363-376.

- [3] KIM P, BAE S, SEOK J. Bifurcation analysis on a turning system with large and state-dependent time delay[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331: 5562-5580.
- [4] TURKES E, ORAK S, NESELI S, et al. A new process damping model for chatter vibration[J]. Measurement, 2011, 44(8): 1342-1348.
- [5] 韩贤国,王敏杰,欧阳华江. 车削过程中工件的振动力学建模与分析[J]. 机械强度, 2012, 34(5): 644-649.
- [6] KAYMAKCI M, KILIC Z M, ALTINTAS Y. Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012(54/35): 54-55.
- [7] ALTINTAS Y, EYNIAN M, ONOZUKA H. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 371-374.
- [8] WU X, LEUNG D Y C. Optimization of biodiesel production from camelina oil using orthogonal experiment[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 3615-3624.
- [9] FRANEKN L, JIANG Xiaoyi. Orthogonal design of experiments for parameter learning in image segmentation[J]. Signal Processing, 2013, 93(6): 1694-1704.