

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.022

新型脉冲除垢系统喷嘴设计

邓 昂¹, 虞 斌¹, 郝 彪²

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816;

2. 南京中建化工设备制造有限公司, 江苏 南京 210023)

摘 要:为了使应用于炭黑急冷锅炉中的新型脉冲除垢系统能达到更好的除垢效果,对其关键部件—喷嘴进行了研究。基于“择优比较”的原则,圆柱型、锥形、锥直型和缩扩型4种类型的喷嘴在外部尺寸相同的条件下,内部采用各自最优结构,以保证比较的平等性和结果的正确性。通过 Fluent 软件模拟喷嘴喷射后流体的速度分布、壁面压力分布和壁面剪切力情况,得到在同等工况下,选用锥直型喷嘴,能达到更好的除垢效果。所得到的分析结果对脉冲除垢系统喷嘴的选型提供了重要的理论依据。

关 键 词:急冷锅炉;除垢;喷嘴;Fluent 软件

中图分类号:TQ051.5 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)05-0091-06

Design on the Nozzle of New Pulse Descaling System

DENG Ang¹, YU Bin¹, HAO Biao²

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

2. Nanjing China Construction Chemical Equipment Manufacturing Co., Ltd., Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to make the new pulse descaling system applied to carbon black quench boiler achieve better descaling result, nozzle, as the key component in the system, was studied. Based on the principle of "optimum-optimum comparison", while the external dimensions of the four types of nozzles, including the linear type, conical, cone straight and convergent-divergent, were same, the internal dimensions applied their respective optimal values to ensure the equality of comparison and correctness of the results. With the aid of Fluent software, the jet velocity, wall pressure distribution and wall shear stress of the jet flow were simulated and analyzed. The results indicate that, at the same initial conditions, the cone straight nozzle is preferable. It can be concluded that the results provide an important theoretical basis for the selection of nozzle in the new pulse descaling system.

Key words: quench boiler; descaling; nozzle; Fluent

经过一百多年的发展,已有多种类型的吹灰器应用于锅炉换热器表面的灰渣清除中。目前占有率最高的还是蒸气吹灰器^[1],蒸气吹灰器对清除受热面的积灰和结渣都有较好的作用,对结渣性强、熔点低的灰尘也有很好的除垢效果,但传统的吹灰器吹灰周期长,吹灰过程繁琐。而在炭黑生产过程中,从裂解炉出来的裂解气中含有未完全充分燃烧的炭黑颗粒,炭黑粒子有很强的粘附性,在流经急冷锅炉的换热管的时候,极易粘附在管壁上,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

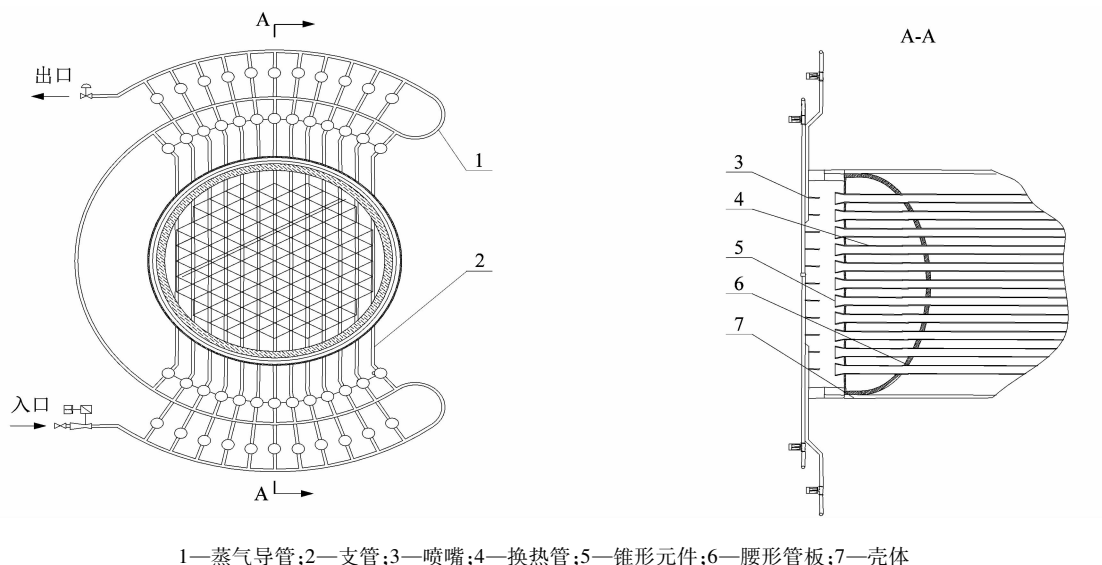
正常生产。基于这种特殊情况,南京工业大学虞斌等研究出一套新型的脉冲除垢系统^[2]。现本文在之前的研究基础上,对这套系统的关键部件进行较为深入的研究,使之能达到更优的吹灰效果。

1 新型脉冲除垢系统简介

图1所示为新型脉冲除垢系统,安装在锅炉内换热管的出口端。蒸气导管1为一环形弯管,内环和外环分置在两个平面上,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,每一排换热管对应着上下2根支管。支管上分布着喷嘴3,每一喷嘴对应一根换热管4,喷嘴

收稿日期:2014-03-23;修回日期:2014-04-15

作者简介:邓昂(1989),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为新型高效传热传质设备。E-mail:dengang1989@163.com



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

图1 新型脉冲除垢系统

Figure 1 New pulse descaling system

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,由喷嘴喷射出来的气体运动方向和换热管内炭黑烟气运动方向相反,水蒸气在换热管长度范围内流动速度快,压力大,能有效去除附着在管壁上的炭黑。锥形元件5能有效产生文丘里效应,增大引入气体量。

2 喷嘴结构设计

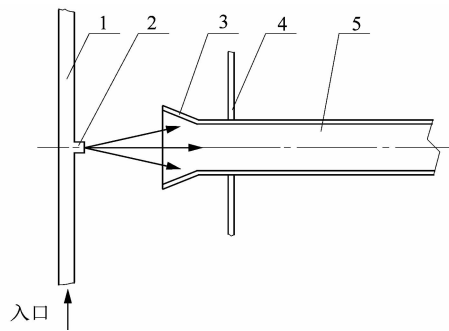
喷嘴是此除垢系统中的关键部件,喷嘴的结构及性能的好坏直接影响到水蒸气的射流效果^{[3]20},进而影响到对换热管的除垢效果。韩宇等^{[3]23}通过比较分析圆柱型,锥形,锥直型和抛物线型喷嘴指出锥形喷嘴的射流速度分布均匀,射流的贯穿距离较大,射流流场的扩散性较其他喷嘴好,且液体出喷嘴后湍流强度大。钟定清等^[4]通过对圆柱型,锥直型和抛物线型喷嘴进行仿真和实验分析,得出在同等工况下抛物线型喷嘴,即缩放型喷嘴的吹扫力最大,内部流动特性好。张尚先等^[5]通过仿真与实验,比较了圆柱型,圆锥型,锥直型和流线型4种类型的喷嘴,得出锥直型和流线型2种类型的喷嘴加速过程几乎相同,射流核心段都较长。以上所提到的喷嘴选型存在一个共同的缺点,即模型在结构上缺乏平等性。此处所指平等性是指模拟分析时应在外部结构尺寸相同的情况下,每一种类型的喷嘴内部结构较优的情况下来进行比较。尤其是没有对最后一种类型的喷嘴进行较优的结构设计。

那么,在本套除垢系统中,选用何种尺寸和类型的喷嘴能得到较优的除垢效果呢?下面将基于“优优比较”的原则来设计选择适宜用在脉冲除垢系统中的

喷嘴。

已知条件为流入换热管的炭黑烟气速度为 60 m/s,温度为 1 500 ℃,压力为 0.3 MPa,换热管内径为 60 mm,长度为 7 000 mm。

图2所示为喷嘴与换热管的位置关系图,则流入喷嘴内的水蒸气要将附着在管壁上的污垢除掉,必须满足条件 $Q_1 \geq Q_2$, Q_1 表示流经喷嘴的蒸气质量流量, Q_2 为炭黑烟气的质量流量。



1—不燃性流体导管;2—喷嘴;3—锥形入口端;4—管板;5—换热管

图2 喷嘴与换热管位置关系

Figure 2 Positional relationship diagram between nozzle and heat tube

炭黑烟气的一般组分(炭黑除外)为: CO_2 (4.09%), CO (9.09%), CH_4 (0.2%), H_2 (6.82%), N_2 (44.2%), H_2O (35.06%), C_2H_2 (0.52%), O_2 (0.002%)。由这些组份算出的平均气体分子量为 23.3 kg/mol。混合气体的状态方程为 $pV = (n_1 + n_2 + \dots)RT$, 式中, p 为压强, V 为体积, R 是气体常量, T 为气体的绝对温度, $n_1, n_2, \dots$ 是指各组成部分的摩

尔数,由此推导出温度为 $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力为 0.3 MPa 的炭黑烟气的密度为 0.474 kg/m^3 。则单位时间内流入单根换热管的炭黑烟气的质量流量 Q_1 为 $0.02\text{ m}^3/\text{s}$ 。

考虑到从喷嘴喷射出来的水蒸气会卷吸部分气体进入换热管,此处取 $Q_2 = 0.02\text{ m}^3/\text{s}$ 。水蒸气选用压力为 0.8 MPa , 温度为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的饱和水蒸气。

因缩扩型喷嘴结构较为复杂,涉及参数较多,现以缩扩型喷嘴为例,来计算关键参数。

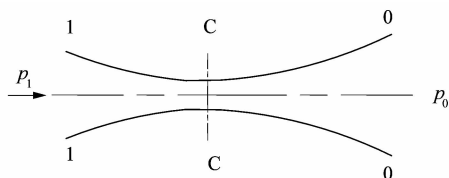


图3 缩扩型喷嘴示意图

Figure 3 Schematic diagram of convergent-divergent

取 1-1 为进口截面, 0-0 为出口截面, C-C 为喉部截面。

根据参考文献[6-7], 则在本例中, 喷嘴进口和出口的压力比为

$$E = P_1/P_0,$$

喉部直径为

$$d_r = 0.746 \frac{\sqrt{G_1}}{(P_1 \rho_1)^{1/4}},$$

其中: G_1 为工作蒸气流量/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$, P_1 为进口水蒸气的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$;

而喷嘴出口直径^[8]为

$$d_0 = C_r d_{cr},$$

C_r 为喷嘴出口直径计算系数, 根据 E 查表^[9] 得出 $C_r = 1.5518$, 将所得结果圆整至整数, 得

$$d_{cr} = 5\text{ mm}, d_0 = 8\text{ mm}.$$

N. Lemos 等^[10] 指出缩扩型喷嘴, 对喷射流场影响最大的是喷嘴的扩张段, 喷嘴收缩段的长度可取喉部直径的 5 倍左右。王晓云等指出喉部长度宜取 $5 \sim 6\text{ mm}$, 太大无益, 入口锥角不宜大 45° , 而扩张段的锥角最佳为 15° 左右。对于锥型和锥直型喷嘴而言, 刘萍等^[11] 指出最佳收缩角为 13° , 锥直型喷嘴出口圆柱段的最佳长径比范围为 $2.5 \sim 3$ 。对于喷嘴入口直径, 文献没有相关的具体规定。考虑到脉冲除垢系统支管上开孔直径不宜过大, 入口直径取为 16 mm 。

4 种类型喷嘴的进出口尺寸相同, 长度相同, 区别在于内部结构不同。喷嘴的具体结构图和尺寸图见图 4 和表 1。

表1 4 种类型喷嘴的结构参数

Table 1 Structural parameters of the four types of nozzles

喷嘴类型	喷嘴参数				
	喷嘴出口直径 d /	喷嘴入口直径 D /	收缩角 $\alpha/(^{\circ})$	喷嘴总长度 L /	喷嘴喉部直径 $d_{cr}/$
	mm	mm		mm	mm
喷嘴 a(圆柱型)	8	16		65	
喷嘴 b(锥型)	8	16	13	65	
喷嘴 c(锥直型)	8	16	13	65	
喷嘴 d(缩扩型)	8	16	15	65	5

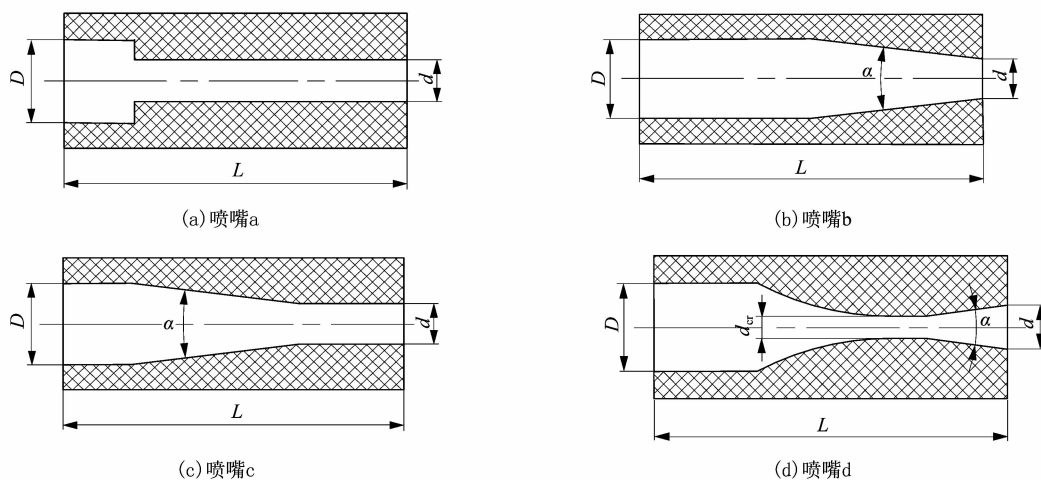


图4 4 种类型喷嘴的结构图

Figure 4 Schematic structure of the four types of nozzles

3 CFD 模型的建立

将喷嘴喷吹水蒸气的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。

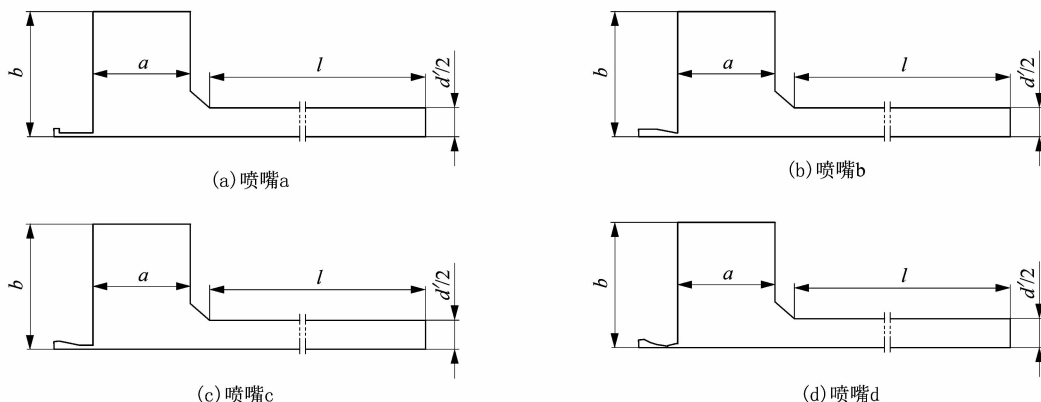


图5 4 种类型喷嘴的计算物理模型

Figure 5 Physical models of the four types of nozzles

喷嘴出口端距换热管锥形入口端的距离 a 选为 180 mm, 封闭区域的最外边界距轴线的距离 b 取为 130 mm, 换热管直径 d' 为 60 mm。

3.2 数学模型和数值处理方法

由于水蒸气在喷嘴入口处的雷诺数为 10 832, 已达到湍流状态, 选用非稳态的连续方程和 Navier-Stokes 时均方程作为控制方程。水蒸气在喷射流动过程中会出现流体的旋转, 故采用 Realizable κ - ε 方程。在与壁面相邻的黏性层中, 雷诺数很低, 这时须考虑分子黏性的影响, κ - ε 方程则需要做相应的修改, 因此在换热管壁面采用标准壁面方程组, 方程的形式及其相应含义见文献[12]。两相流模型选用 VOF 模型, 水蒸气为第一相, 空气为第二相, 初始状态时, 换热管内充满空气介质。在求解过程中采用压力—速度耦合方式并选择 PISO 格式, 采用二阶迎风离散格式对各控制方程进行数值求解。初始化后的迭代, 时间步长设为 0.000 01 s, 迭代周期为 10 000 次, 每个迭代周期内的最大迭代次数为 20 次。

3.3 网格划分

对换热管壁面设置边界层网格。由于不同湍流模型对近壁区的网格数量要求不同, 可以用 Y^+ 值(表示离壁面最近的网格节点到壁面的距离)来检验与壁面最近节点的位置, 确保近壁区有足够的节点数。在此模型中, 边界层数选为 10, 第一层网格与壁面的距离

3.1 计算物理模型

图 5 为 4 种喷嘴射流的计算物理模型。实际中换热管长度较长, 但为了便于模拟分析, 将换热管长度 l 取为 2 m。因模型须是封闭区域, 因此喷嘴与换热管锥形入口端取矩形计算区域。

选为 0.1 mm, 使得 Y^+ 处于 30 ~ 60 的范围。

在划分网格时, 换热管和锥形入口端采用自适应网格划分方法, 对喷嘴部分的网格进行进一步加密, 而喷嘴出口端和锥形入口端之间的区域采用不均匀网格划分的方法。

3.4 边界条件

1) 入口边界条件。由于水蒸气在流动过程中流量的变化情况较为复杂, 因此对流体的入口选为压力入口。喷嘴的入口为进口边界, 绝对压力为 0.8 MPa, 入口处水蒸气的体积分数为 1。

2) 出口边界条件。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。

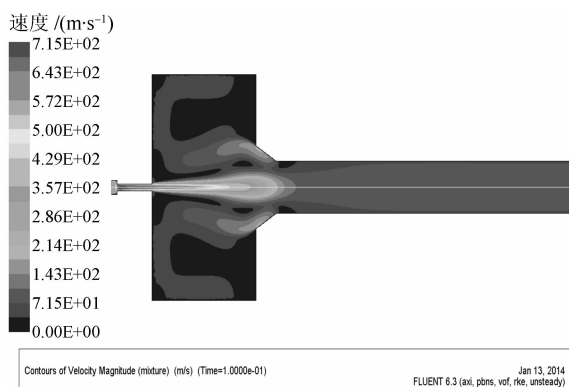
3) 壁面边界条件。除出入口和流场采用轴对称边界外, 其他边界条件均设为壁面, 采用无滑移边界条件。

4 模拟结果与分析

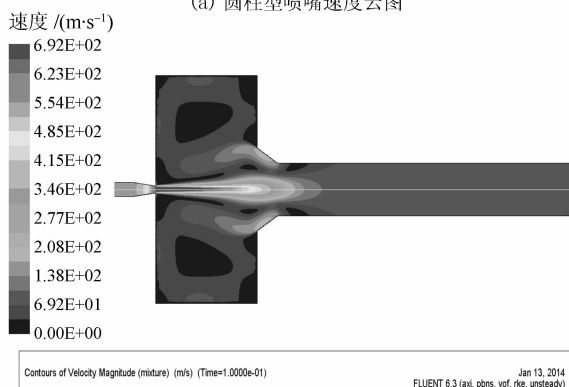
4.1 对射流流场速度的影响

在相同的初始条件下, 由于喷嘴内部结构不同, 所以水蒸气射出后流束的形状是不同的。比较图 6 中 (a), (b), (c), (d) 可知, 锥形和锥直型喷嘴的贯穿距离最大, 圆柱型和缩扩型喷嘴相对较小。流体离开喷嘴后的扩散角也不相同, 缩扩型喷嘴的扩散角最小。扩散角过大, 会使部分水蒸气喷射到管板上, 造成浪费; 而扩散角小, 若要使得水蒸气在进入管子时能够充

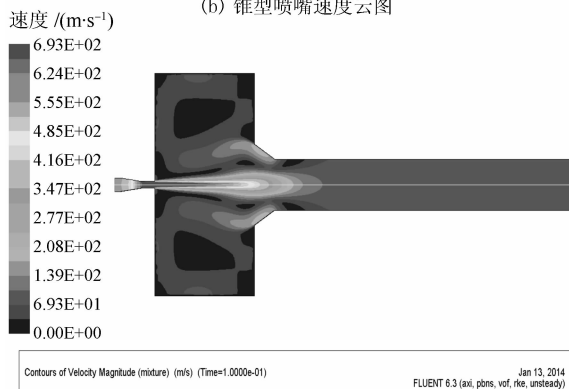
分地扩散,有效清除管壁上的灰垢,则需要增大喷嘴出口端与换热管锥形入口端的距离,这会造成水蒸气的动量消耗,还会增加设备的体积。



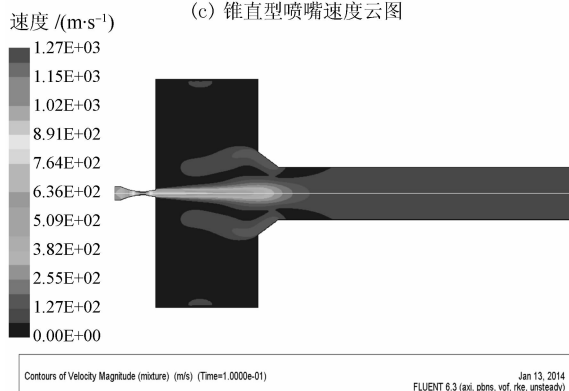
(a) 圆柱型喷嘴速度云图



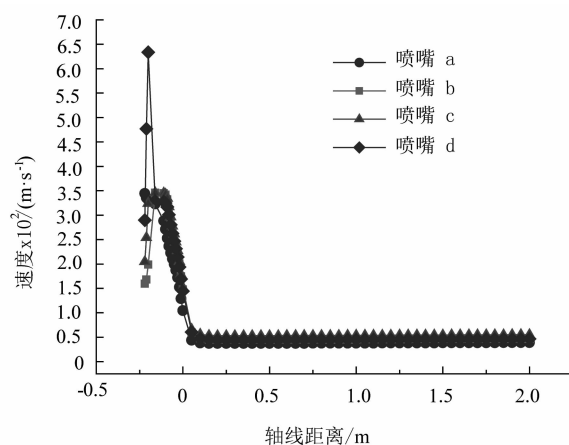
(b) 锥型喷嘴速度云图



(c) 锥直型喷嘴速度云图



(d) 缩扩型喷嘴速度云图



(e) 4 种类型喷嘴射流轴线速度曲线

图 6 4 种类型喷嘴射流速度图

Figure 6 Velocity diagram of the four types of nozzles

由图 6(e) 可以看出,流体的速度峰值出现在喷嘴内部结构突变处,缩扩型喷嘴的峰值最大,这与其先收缩后扩张的内部结构有关。在流体要进入换热管锥形入口端时,速度开始迅速衰减,这是由于喷射出的水蒸气进入管子时,携带周围大量的空气一起进入管子,而锥形入口的结构又有助于增大引入到管子的气体体积,从而提高除垢效率。水蒸气与空气混合时,两者之间有动量的传递,因此流体速度出现迅速衰减的情况。在相同的入口速度下,进入到管子后,圆柱型喷嘴的速度相对较小,锥直型喷嘴的速度稍大。

4.2 对换热管壁面压力的影响

从图 7 中可以看出,在气流刚进入到管内时,换热管壁上的压力为负压,之后迅速增加到管壁的压力峰值。从理论上分析,压力峰值越大,越有助于管壁上灰垢的清除。4 种类型的喷嘴喷射出气流在管壁上产生的压力峰值几乎都发生在同一位置,在气体进入到管内时管壁上存在负压,这是由于喷射的高速气体卷吸造成的。通过比较发现,喷嘴 C 在管壁上形成的压力峰值较大些。

4.3 对换热管壁面剪切力的影响

管子内壁上粘结的灰垢有一定的粘附力,而一定的壁面剪切力有助于将灰垢清除掉。从图 8 中可以看出,在流体刚进入到换热管处壁面剪切应力较小,之后迅速达到峰值。这是因为喷射出来的水蒸气在初进入到管内时还未完全扩散到管壁,如何确定喷嘴端和锥形入口端的距离,使得蒸气在进入管内时恰好充分扩散到管壁是值得研究的。随着流动的进行,水蒸气与被卷吸进入的空气混合,造成管内气体体积的膨胀,迅速充分扩散到管壁,因此壁面剪切力出现峰值。从理

论上讲,壁面剪切应力越大,越有助于管壁上灰垢的清除。相比4种喷嘴,喷嘴a壁面剪切应力最小,而喷嘴c的壁面剪切应力最大。

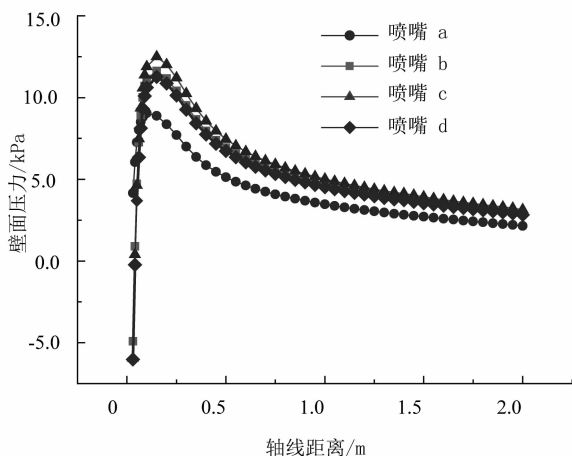


图7 4种类型喷嘴换热管壁面压力关系图
Figure 7 Heat exchanger wall pressure curve of the four types of nozzles

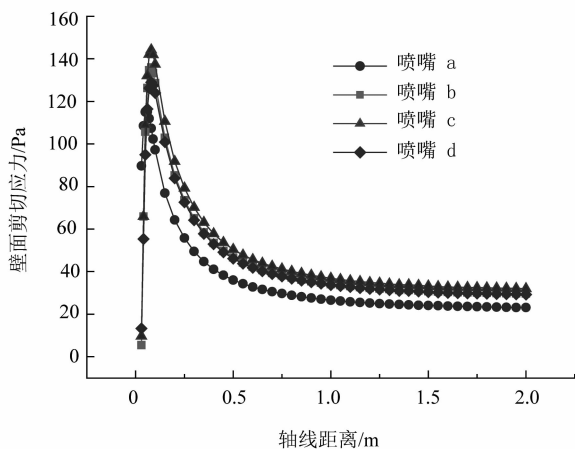


图8 4种类型喷嘴换热管壁面剪切应力关系图
Figure 8 Heat exchanger wall shear stress curve of the four types of nozzles

5 结语

在保证圆柱型、锥形、锥直型和缩扩型4种类型喷嘴结构平等的条件下,应用Fluent软件的Realizable $k-\epsilon$ 模型对脉冲除垢系统喷嘴的喷射流场进行了二维建模和数值模拟,分别分析了同等条件下,4种内部结构

不同的喷嘴喷射出的水蒸气在进入换热管后其速度分布、壁面压力变化和壁面剪切力变化,通过对比得到:

1) 从锥直型喷嘴喷出后的水蒸气进入换热管后壁面压力峰值最大,管内流速大于其他3种喷嘴,而且壁面剪切应力最大。因此,可断定,在同等条件下,选用锥直型喷嘴能达到更好的除垢效果。

2) 影响除垢效果的除喷嘴结构外,还有其他因素,如喷嘴入口与锥形入口端之间的距离,流入喷嘴的水蒸气的压力,每次喷吹时间等,这是下一步值得深入研究的问题。

3) 通过分析4种内部结构不同的喷嘴射流流场,为脉冲除垢系统选择合适的喷嘴类型提供了重要的理论依据,同时本文中所用研究方法和思路值得推广应用到其它领域中。

参考文献:

- [1] 卢步林. 吹灰器在大型火电厂吹灰、除垢、除焦方面的应用研究[J]. 华电技术, 2013, 35(8): 15-18.
- [2] 虞斌, 涂善东, 莫逊. 高温高含尘炉气急冷器: 中国, ZL20101094938[P]. 2010-06-08.
- [3] 韩宇, 李建昌. 基于Fluent模拟分析的真空下液体射流喷嘴的选型[J]. 真空, 2012, 49(6): 19-23.
- [4] 钟定清, 王龙. 轧制吹扫喷嘴结构仿真与优化[J]. 机床与液压, 2010, 38(1): 107-109.
- [5] 张尚先, 王建生. 水射流喷嘴内表面形状对切割性能的影响研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(11): 51-53.
- [6] 王晓云, 张荣克. 超音速蒸气喷嘴的计算原理[J]. 石油化工设备技术, 2009, 30(4): 36-39.
- [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] 牛晓娟, 李庆生, 石留帮. 蒸气喷射热泵的设计[J]. 轻工机械, 2012, 30(6): 13-15.
- [9] 国家石油和化学工业局. SH/T3118-2000 石油化工蒸气喷射式抽空器设计规范[S]. 北京: 中国石化出版社, 2001.
- [10] LEMOS N, LOPERS N, DIAS J M, et al. Design and characterization of supersonic nozzles for wide focus laser-plasma interactions[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(10): 1-5.
- [11] 刘萍, 张东速. 喷嘴几何参数对射流流场性能影响的研究[J]. 机械设计, 2007, 24(11): 50-52.
- [12] 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.