

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2010.04.016

水煤浆喷嘴温度场和应力场分析及涂层材料应用*

张春子, 王卫泽, 涂善东

(华东理工大学 承压系统安全科学教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 为提高新型水煤浆喷嘴的抗冲蚀性能, 采用有限元分析法, 对新型水煤浆喷嘴稳定工作时的温度和应力场进行了分析计算; 并对超音速喷涂制备的涂层与等离子喷涂涂层、激光熔覆制备涂层与喷嘴材料哈氏合金的冲蚀性能进行试验研究。结果表明喷嘴稳定工作时, 出口端部的温度较高、温度梯度较大, 水煤浆通道温度在 300~500 °C。热应力最大值发生在冷却水套管的外壁圆角处, 同时喷嘴出口端部应力较大。在不同的冲蚀速度下, 3 种涂层的抗冲蚀能力均优于哈氏合金, 且超音速喷涂制备涂层的抗冲蚀能力最优。

关键词: 喷嘴; 涂层; 温度; 水煤浆

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)04-0070-04

Temperature Analysis of a New Nozzle in Coal-water Slurry Gasifier and Application of Anti-erosion Coatings

ZHANG Chun-zi, WANG Wei-ze, TU Shan-tung

(Key Lab of Safety Science of Pressurized System, Ministry of Education, School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract: Temperature field of new coal water slurry (CWS) nozzle was analyzed through using finite element method, in order to improve the erosion resisting performance of the nozzle. Moreover, the comparison of erosion behavior of high-velocity oxyfuel (HVOF) sprayed coating, plasma sprayed coating, and laser melting coating with Hastelloy alloys was investigated. The results show that the temperature and temperature gradient at the exit surfaces of the CWS nozzle were higher than that of other parts of the nozzle. And the temperature at the CWS channel is about 300~500 °C. The erosion resistance of three kinds of coatings is more than Hastelloy alloys. In addition, the erosion performance of the HVOF sprayed coating is the best.

Key words: nozzle; coating; temperature; coal water slurry

0 引言

煤气化在煤化工生产中占有重要地位, 是实现煤炭洁净利用的关键。由华东理工大学、兖矿鲁南化肥厂、中国天辰化学工程公司联合开发的新型多喷嘴对置式水煤浆气化炉在水煤浆气化领域达到了世界领先水平^[1]。喷嘴是水煤浆气化炉的关键部件之一, 其耐磨和耐热性能决定喷嘴的使用寿命, 并直接影响水煤浆应用的经济性和安全性。但由于

水煤浆喷嘴工作环境的温度较高(炉膛最高温度可达1400 °C), 喷嘴不同部位所接触的介质温度不同, 使得喷嘴内部存在较大的温度梯度和热应力, 导致喷嘴的使用寿命很短, 大约为2~3个月^[2]。所以频繁停炉更换或修复喷嘴, 影响生产连续进行或高负荷运行, 造成巨大的经济损失。

另外为使水煤浆有效雾化, 气体流速需达到一定数值。而由于水煤浆中富含煤粉固体颗粒, 造成喷嘴转角部位磨损严重。目前常采用抗磨性能良好的材料, 如 GH188 和 UMCo-50 等材料^[3], 但喷嘴连续工作的时间仍不理想。碳化物金属陶瓷的耐磨性能优异^[4]。涂层的抗磨损性能受制备工艺及工作

收稿日期: 2010-04-27; 修回日期: 2010-06-30

基金项目: *国家自然科学基金(50805048); 上海市自然科学基金(08ZR1405700); 教育部新教师基金(200802511008)。

作者简介: 张春子(1984—), 女(汉), 哈尔滨市人, 硕士生。

温度影响较大。采用超音速火焰喷涂制备涂层时,燃气流量和氧气流量对涂层的磨损失重影响较大。适当的燃气流量和氧气流量有利于沉积抗磨粒磨损性能较好的涂层,而过高的氧气流量下涂层的磨损失重较高^[5]。在 25 °C 和 400 °C 时 WC 系涂层呈现典型脆性断裂,冲蚀角为 90 ° 时冲蚀速度大于冲蚀角为 45 °。但温度升高到 750 °C 时冲蚀速度规律相反,破坏模式转为韧性冲蚀为主^[6]。超音速喷涂制备 NiCr 系涂层在 20~300 °C 时冲蚀速度随温度升高而降低。而随冲蚀温度进一步增加到 750 °C,冲蚀速度保持不变^[7]。

为提高新型水煤浆喷嘴的抗冲蚀性能,延长其使用寿命,文中拟在分析水煤浆喷嘴稳定工作时的温度场与应力场分布的基础上,比较分析几种不同涂层的抗冲蚀磨损性能,以确定提高其抗冲蚀性能提高的解决方案。

1 有限元分析的物理模型与边界条件

1.1 物理模型

模拟计算对象为新型水煤浆气化喷嘴。此喷嘴为三通道喷嘴,外环通道和中心通道为氧化剂通道,内环通道为水煤浆通道,喷嘴出口端外侧置冷却水套。此新型水煤浆喷嘴为典型的轴对称结构,故承受热载荷以及温度和热应力的分布也都是轴对称的,因此建立 1/4 模型。喷嘴给浆量为 5 t/h,温度为 30 °C;中心氧占总氧化剂的 10%,温度为 30 °C;冷却水温度为 25 °C,流量分别取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.6 kg/s;炉气温度取 1400 °C。采用六面体网格对喷嘴进行网格划分,在温度和温度梯度较大的端面区域进行网格端面细化,见图 1。温度场模拟采用三维稳态计算,并采用直接法进行热应力耦合计算。

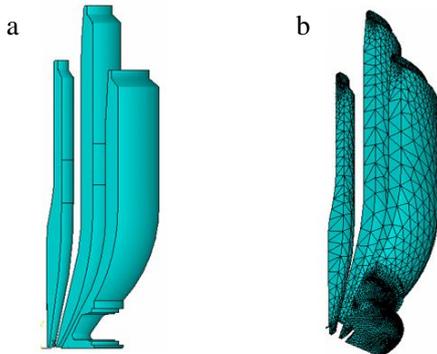


图 1 1/4 喷嘴三维模型(a)及网格划分(b)

Fig.1 Three-dimension model (a) and meshing (b) of nozzle

1.2 边界条件

喷嘴边界均采用第三类边界条件,为此需确定它与介质间的换热系数^[8]。根据喷嘴的实际工况,换热面主要有冷却水环面、水煤浆环面、中心氧及主氧环面、出口端面、入口端面以及外壁面。假设喷嘴的物性参数不随时间变化,而且材料各向同性。通过传热学换热关联式^[9]计算得出各个换热面的换热系数,见表1所示。

表 1 喷嘴表面各区域的换热系数

Table 1 Heat transfer coefficient at all surfaces of nozzle

区域	流量 $Q/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	换热系数 $/(W/\text{m}^2\text{K})$
	0.5	9363.38
	1.0	17360.15
冷却水环面	1.5	24829.84
	2.0	31975.85
	2.6	40106.02
水煤浆环面	215.35	
中心氧环面	3.45	
主氧环面	4.14	
喷嘴端面	462.61	
冷却水管接头	5020.13	
喷嘴入口	59.07	
喷嘴外壁	231.51	

2 喷嘴温度场的有限元分析

将高温烟气黑度取为 0.9,喷嘴材料的导热系数为 25.1 W/m·°C,对各个换热面施加热载荷,经过有限元模拟计算,得出不同冷却条件下喷嘴头部的温度场分布,如图 2。

由于喷嘴出口在炉内,受到高温烟气影响,喷嘴温度由入口向出口处逐渐增加。当冷却水流量从 0.5 kg/s 增加到 2.6 kg/s 时,喷嘴端部的最大温度分别有所下降,从 767 K 下降到 605 K,但下降幅度较小。即喷嘴端部外环通道氧化剂出口处的最高工作温度在 500 °C 左右,水煤浆通道上部温度在 300 °C 以下,靠近出口处的温度逐渐增加到近 500 °C。

3 喷嘴应力场的有限元分析

利用有限元方法,对喷嘴施加约束,并将计算得到的温度场作为热应力计算的初始条件进行耦合计算,得到不同冷却水流量下喷嘴头部区域的热应力分布,如图 3 所示。可见,不同冷却条件下热应力分布情况基本一致,随着冷却水流量的增大,

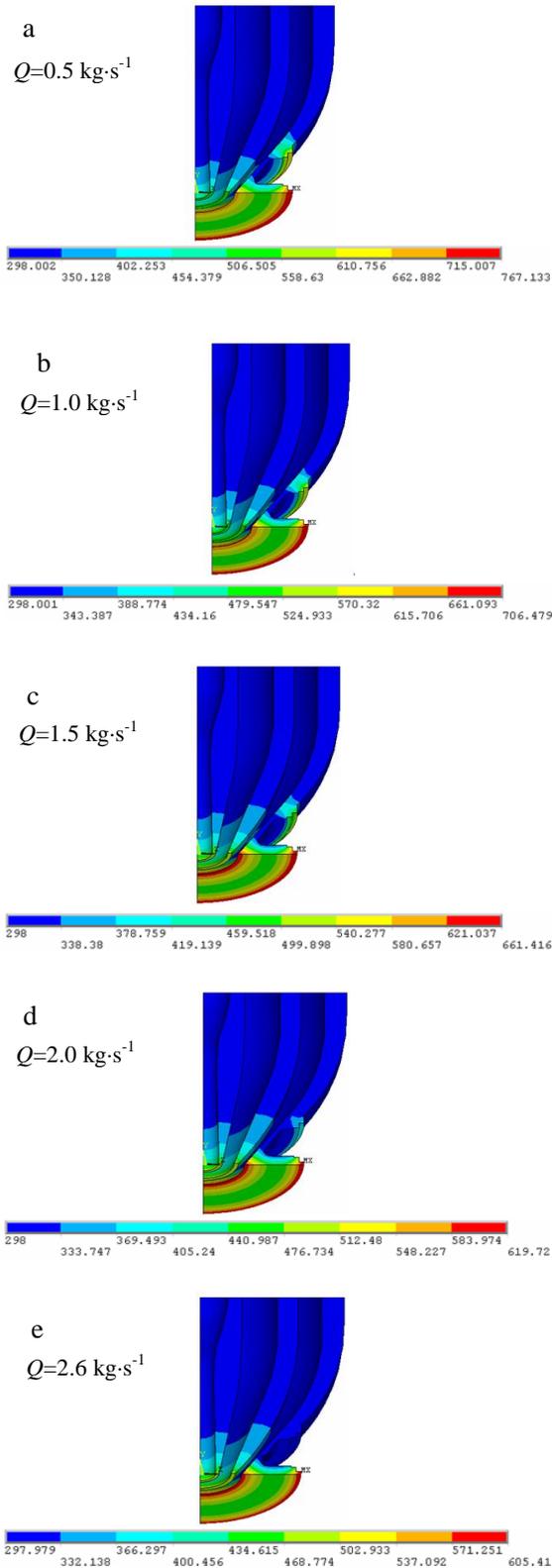


图2 不同冷却水流量 Q 时喷嘴头部的温度分布 (温度单位: K)

Fig.2 Distribution of temperature at head of nozzle with different cooling water flow (Temperature units: K)

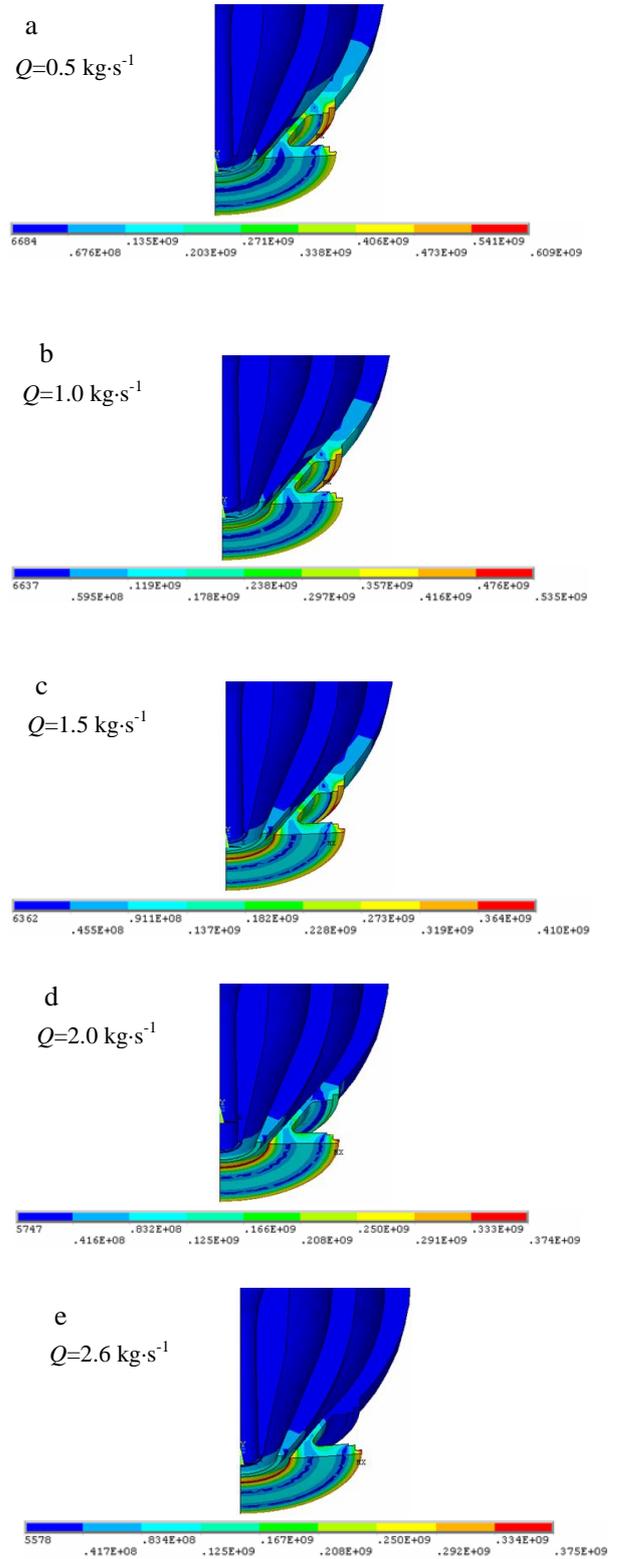


图3 不同冷却水流量 Q 时喷嘴头部的热应力分布 (应力单位: Pa)

Fig.3 Distribution of thermal stress at head of nozzle with different cooling water flow (Stress units: Pa)

最大的应力值有所下降(609~375 MPa)。热应力最大值发生在冷却水套管的外壁圆角处,达到609 MPa。喷嘴出口端部应力较大,这主要由于喷嘴头部圆角处既是高温区,又是高温度梯度区域,容易产生热膨胀;同时从材料的力学角度考虑,该区域也是应力集中的区域,所以在该处热应力较大。减小热应力的有效途径是尽可能降低喷嘴头部的温度和温度梯度,增加冷却水流量是降低端面温度、提高抗热震性能的方法之一。

4 涂层的抗冲蚀性能

研究分析得到水煤浆通道的喷嘴上部温度在300℃以下,而靠近出口处的温度近500℃。采用自行制备的粉末,并通过超音速火焰喷涂、等离子喷涂和激光熔覆方法制备WC基、NiCr基和Ni基涂层^[10]。制备工艺参数如表2~表4所示。通过自制的冲蚀磨损试验机对涂层的抗冲蚀性能进行考察。试样尺寸为直径14 mm,高14 mm,外圆面有宽度6 mm的平台。冲蚀过程外圆处的平台面为冲蚀面,外圆的其他部位为非暴露面。试样在含质量百分比15%石英砂(75目)的蒸馏水溶液中高速旋转,浆料对试样产生相对冲蚀磨损,从而导致材料的损伤与破坏。由于喷嘴上易发生冲蚀磨损的转角部位的温度为20~25℃,故冲蚀实验在室温(25℃)下进行。每次冲蚀时间为120 min,冲蚀角度选择为30°和60°。

表2 HVOF 喷涂工艺参数

Table 2 HVOF spraying parameters

设备型号	氧气流量 / (m ³ /h)	煤油流量 / (mL/min)	喷涂距离 / mm
JP5000	1.96	378.6	380

表3 大气等离子喷涂工艺参数

Table 3 Plasma spraying parameters

设备型号	电流 / A	电压 / V	主气 Ar 流量 / (m ³ /h)	辅气 He 流量 / (m ³ /h)	喷涂距离 / mm
F4-MB	700	67	1.42	2.41	100

表4 激光熔覆 WC-Ni 的工艺参数

Table 4 Laser cladding parameters

设备型号	功率 / kW	移动速率 / (mm/s)	送粉电压 / V	正离焦 / mm
CP4000	3	4	11	10

鉴于水煤浆在喷嘴内的实际流动速度为2 m/s^[2],故试验中冲蚀速度选定为1.5、2.0、2.5、3.5 m/s。在不同的冲蚀速度下,用精度0.1 mg的电子天平测量涂层的质量变化,以失重法表征涂层的冲蚀磨损率。失重率越大则表示抗冲蚀性能越差。图4为冲蚀角度60°时不同涂层与哈氏合金基体的冲蚀试验结果。随冲蚀速度增加,涂层与哈氏合金的冲蚀失重均增加。另外,尽管冲蚀速度不同,但超音速火焰喷涂制备涂层的冲蚀失重率较小,且不同涂层的冲蚀失重率均远小于喷嘴材料哈氏合金。故从冲蚀角度而言超音速制备涂层的抗冲蚀性能最优。

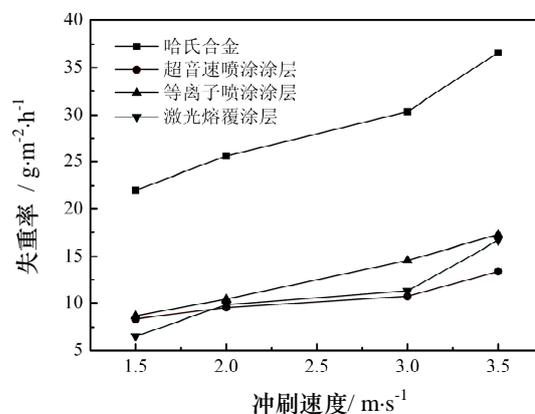


图4 冲蚀角为60°时不同材料的冲蚀磨损率与冲蚀速度的关系

Fig.4 The effect of erosion velocity on weight loss rate of materials with 60° erosion angle

5 结论

(1) 在高温烟气的辐射和对流作用下,喷嘴端部温度和温度梯度均较高,最高工作温度达到520℃。水煤浆通道上部温度在300℃以下,而靠近出口处的温度逐级增加为近500℃。

(2) 热应力最大值发生在冷却水套管的外壁圆角处,同时喷嘴出口端部应力较大。

(3) 随着冷却水流量从0.5 kg/s增加到2.6 kg/s时,喷嘴端部的最大温度和热应力最大值有所下降。可见,增加冷却水流量可以有效地降低喷嘴头部的温度和热应力。

(4) 比较超音速火焰喷涂制备涂层、等离子制备涂层与激光熔覆制备涂层以及喷嘴材料哈氏合金的抗冲蚀磨损能力,结果表明在不同的冲蚀速度下,超音速火焰喷涂制备涂层的抗冲蚀能力最优。

(下转第77页)