

气流床气化炉激冷环冷态流场数值模拟

徐明, 张忠孝, 樊俊杰, 娄彤

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对气流床气化炉激冷室的工作特点, 建立了一套激冷室激冷环的冷态流动数学模型, 利用 Fluent 软件, 对激冷环气相冷态流场进行数值模拟。通过模拟与实验对比, 分析激冷环上不同位置喷嘴的流场分布; 通过改变激冷环的进气方式, 分析不同进气结构对激冷环上喷嘴速度的影响。结果表明: 相比二进气道结构, 四进气道结构使得激冷环喷嘴的速度分布相对均匀, 能够达到激冷环对合成气强化换热的效果。

关键词: 气化炉; 激冷环; 喷嘴; 速度分布; 数值模拟

中图分类号: TQ541; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2012)01-0075-04

Numerical simulation of cold flow field in quench ring of entrained-bed gasifier

XU Ming, ZHANG Zhong-xiao, FAN JUN-jie, LOU Tong

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the working principle of quench chamber of entrained flow gasifier, a quench chamber quench ring of cold flow mathematical model is established. Numerically simulated the cold flow field in quench ring with Fluent software. According to the comparison between simulation results and experimental ones, analyzed the flow field distribution in different locations of quench ring. Analyzed the influence of different intake structures on quench ring nozzle speed by changing ventilation methods. The results show that, compared with second inlet structure, the four inlet structure can effectively distribute the quench ring nozzle velocity, which can strengthen the heat transfer efficiency of synthetic gas.

Key words: gasifier; quench ring; nozzle; velocity distribution; numerical simulation

气流床气化技术是目前世界上最先进的煤气化方法之一, 它属于加压气流床气化工艺^[1]。主要特点可以概括为: 工艺流程及气化炉结构简单, 煤种适应性强, 生产能力大, 气化压力高, 合成气质量好, 操作稳定方便^[2]。

先进的气流床煤气化工艺按产物冷却方式不同可分为激冷流程、废锅流程和废锅-激冷流程 3 种^[3]。第 1 种流程主要用于合成氨、甲醇合成等相关产业, 后 2 种流程可用于 IGCC 发电和煤基多联

产, 当第 3 种工艺采用底部冷却水激冷时也适用于甲醇合成等行业^[4]。国内外对激冷流程的应用和研究较为广泛。如王亦飞等^[5]设计了一种新型旋流降膜激冷环, 研究了冷却水沿下降管的降膜速度与厚度, 并与普通激冷环进行了对比。彭宇慧等^[6]研究了气流床煤气化的部分水激冷流程, 通过计算发现: 采用部分水激冷方式的出废热锅炉的气体流量远小于用合成气激冷方案的 Shell 和 Prenfb 流程, 这将有助于减小后续的设备尺寸。陶志远等^[7]对

收稿日期: 2011-10-11 责任编辑: 宫在芹

基金项目: 上海市科委科技计划“两段供氧干排渣加压气流床气化技术开发”

作者简介: 徐明(1986—), 男, 辽宁沈阳人, 上海理工大学能源与动力工程学院研究生, 主要从事煤气化方面的研究。

水煤浆气化炉激冷环进行了结构的改进与分析,通过改变布水孔结构方向和数量,提高了激冷环的运行周期。李铁等^[8]对下降管内壁激冷水降膜特性进行了研究,分析不同降膜入口速度对降膜速度和降膜厚度的影响。陈意心等^[9]设计了一种新型冷却器,实现了对下降管降膜的均匀分布。

笔者利用 Fluent 软件,采用可实现 $k-\epsilon$ 模型对日处理 500 t 水煤浆的气化炉激冷环进行气相冷态实验与数值模拟。分析了不同进气结构下,激冷环上喷嘴速度的分布情况。

1 实验方法及数值模拟

1.1 实验模型的建立

激冷环在气化炉运行时的作用主要有 2 点:①降低出炉膛粗煤气和急冷渣的温度;②对底部有下降管的气化炉,可以分布激冷水,使其按圆周方式均匀布排流下,以保护下降管不被烧坏。进行数值模拟的物理模型为日处理 500 t 水煤浆气化炉激冷环环内三维空间速度的分布情况。

在一般的激冷流程中,激冷环均布置有喷嘴,其结构一般有 2 种:一种为激冷环上冷却水沿下降管内壁自上而下呈直线流动,粗合成气与冷却水接触的机会主要是通过下降管内壁的水膜接触;第 2 种是为了增大粗合成气与冷却水的接触面积,在激冷环上开设喷嘴,将水由喷嘴垂直(或斜向下)喷向合成气。

研究的对象是采用向炉内直喷布置方式的激冷环结构,即激冷环上开设喷嘴强合成气的冷却作用,主要讨论不同进气方式对喷嘴速度分布的影响。实验装置与实际结构的几何相似比为 1:2。环上布置 48 个喷嘴,每个喷嘴的直径为 3 mm,分别采用 4 进气管道和 2 进气管道 2 种结构进行实验与数值模拟对比。其中圆环上的参数:内圆直径为 395 mm,环宽 40 mm,进气管道的入口直径为 20 mm,实验设计工况的单个进气管道流量为 $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$,实验主要测试激冷环上垂直射向炉内的喷嘴速度分布情况,激冷环整体结构如图 1 所示。

实验过程主要进行了 2 组工况的实验,即 4 个进气管道同时开启为工况一;1 号、3 号进气管道开启,2 号、4 号进气管道关闭为工况二。

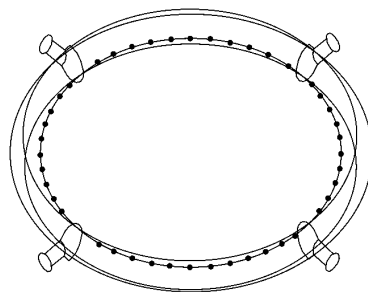


图 1 激冷环整体结构示意图

由于激冷环整体中心对称,在对激冷环中心的撞击流区速度进行测量时,主要选取 1 号、3 号进气管道径向方向进行测试,在径向方向上等距选取 7 个测点,具体测点布置如图 2 所示。

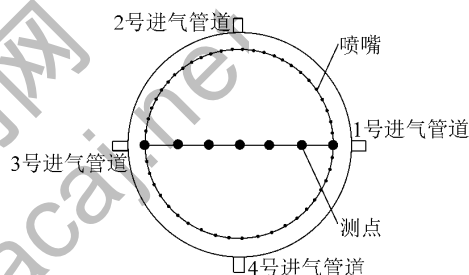


图 2 激冷环实验测点平面分布

1.2 数值计算的物理模型

实验模型确定后,利用四面体和六面体网格对数值计算的物理模型进行混合网格划分,如图 3 所示。由于激冷环圆形通道在建模时对计算收敛的影响较大,按照相同当量直径的原则,将圆形通道设置为矩形通道;考虑到激冷环上喷嘴的尺寸较小,且喷嘴流速较高,在构建网格时,对喷嘴附近网格进行了局部加密。



图 3 数值模拟计算的物理模型

1.3 连续相三维流动的数学描述

在冷态流场数值模拟中,流动主要由质量、动量守恒方程来描述。

质量守恒方程的一般形式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

动量守恒方程为 N-S 方程,其一般形式为:

$$\rho \frac{du_i}{dt} = \rho f_i - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \mu_{eff} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{1}{3} \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

模拟计算中采用可实现模型,其湍动能即耗散率输运方程为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} - C_3 G_b$$

式中, G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为由于浮力影响引起的湍动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; 湍流粘性系数 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$; 湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为: $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$; α_k 和 α_ε 分别是湍动能和有效湍流普朗特数的倒数^[10]。

$C_1 =$

$$\max \left(0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right) \eta = \frac{SK}{\varepsilon}, C_\mu = \frac{1}{4.04 + \sqrt{6} U^* \cos \phi / \varepsilon}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{D}_{ij} \tilde{D}_{ij}}, \tilde{D}_{ij} = \tilde{D}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k, \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}$$

$$\left[\sqrt{6} \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{(S_{ij} S_{ij})^{3/2}} \right] \omega_k \text{ 为角速度。}$$

1.4 边界条件设置

其离散格式采用一阶迎风格式,迭代算法采用 SIMPLE 压力-速度耦合方法,迭代误差小于 10^{-3} , 并达到进出口物料平衡为收敛依据。

其中边界条件设置为:

(1) 入口边界条件: 气相流体采用常温状态下的空气,其密度为 1.293 kg/m^3 ,动力粘度为 $1.506 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。入口气流按照湍流已经充分发展,直接给进出口截面的法向速度大小。其中进口气流的湍动度按照经验公式 $I = 0.16 \text{Re}^{-0.125}$ 计算得到。

(2) 出口边界条件设置: 假设出口处湍流流动已达充分发展状态,所有变量在出口截面法向方向上的梯度为零。

(3) 壁面边界条件: 壁面采用无滑移边界条件,即 $u = v = w = 0$ 。

2 模拟结果分析

2.1 模型检验

为了检验计算模型的可靠性,分别对 2 个工况下的实验测试结果与模拟计算的数值进行对比。其中图 4、图 5 分别为激冷环 2 号、4 号进气管道轴向截面速度分布。

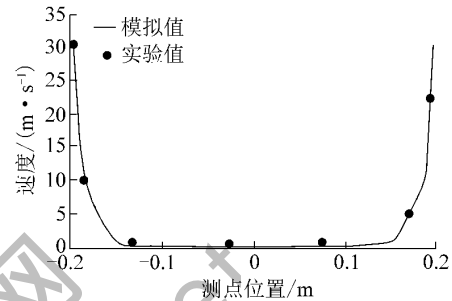


图 4 工况一径向速度模拟与实验对比

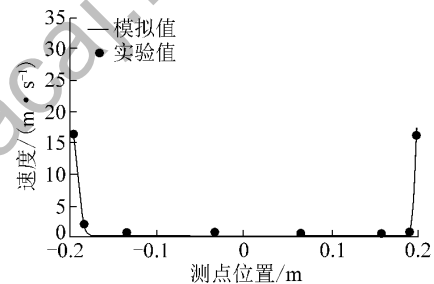


图 5 工况二径向速度模拟与实验对比

从 2 个图中可以看出在工况一和工况二中,激冷环喷嘴射出的冷态气相速度模拟值和实验值吻合较好,其测点误差均在 5% 以内,速度变化趋势基本一致。通过 2 组图的对比可以看出,激冷环喷嘴出口的速度在工况一的条件明显比工况二要大。由于计算模型的理想假设以及实验误差等因素,造成了两者数据之间的差异。由此表明,所采用的计算模型和数值模拟方法能够较好地预测激冷环内部流场,具有较高的可靠性。

2.2 气相流场分析

图 6 显示的是在工况一条件下,激冷环中心截面喷嘴速度分布云图。图 7 为工况一所对应的中心截面速度流线分布。由图 7 可知,在工况一的条件,激冷环喷嘴沿圆周方向的速度分布基本均匀,中心区域的速度梯度变化基本一致。其中激冷环喷嘴速度最大处主要集中在进气管道附近,速度最大为 31.1 m/s ,速度最小处在中心区域,其速度值为

0.11 m/s。这是由于环上喷嘴射流在中心区域进行撞击,导致速度递减。

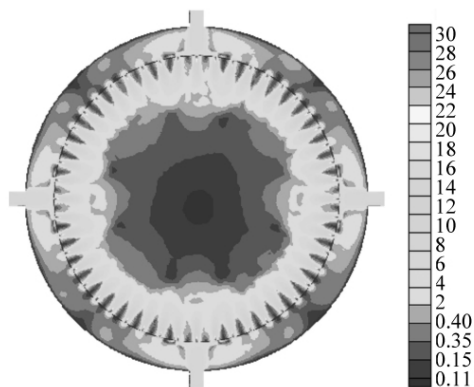


图6 工况一激冷环中心截面喷嘴速度分布云图

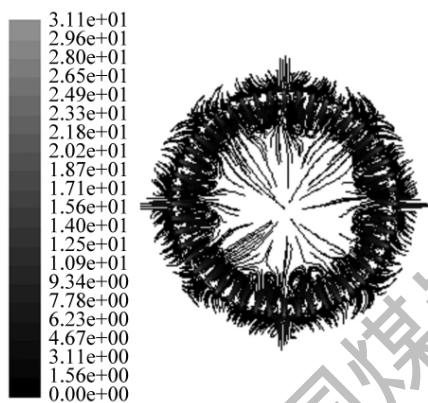


图7 工况一激冷环中心截面速度流线分布

图8表示在工况二条件下,激冷环中心截面喷嘴速度分布云图。图9为其对应的工况二条件下激冷环中心截面喷嘴速度流线分布。从图8可以看出,在工况二的条件下激冷环喷嘴沿圆周方向的速度分布不是十分均匀。激冷环喷嘴速度最大处仍然集中在进气管道附近,其最大速度为17.4 m/s,速度最小处为一狭长空间,其值为0.02 m/s。

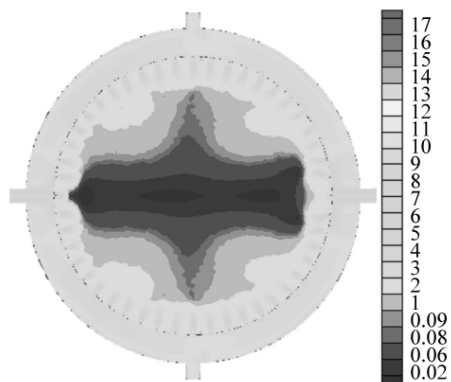


图8 工况二激冷环喷嘴截面速度分布云图

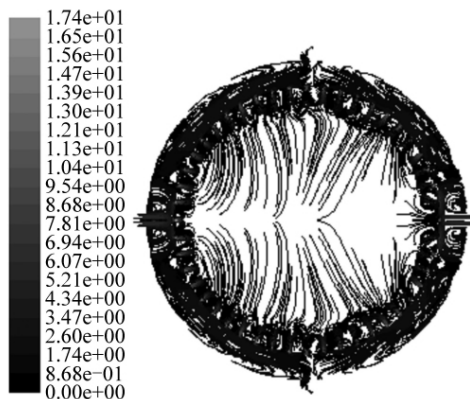


图9 工况二激冷环喷嘴截面速度流线分布

分析发现,在工况一的条件下,即4组进气管道同时开启时,冷却气流能基本保证激冷环喷嘴速度在圆周方向均匀分布且均匀喷入中心区域,达到对合成气的强化冷却;而在工况二的条件下,即一组对喷布置的进气管道开启时,随着气流在环内的流动,气流速度逐渐降低,相比工况一气流分布不均,气流射入方向基本为一组对置方向,因此对合成气强化换热效果会稍差一些。

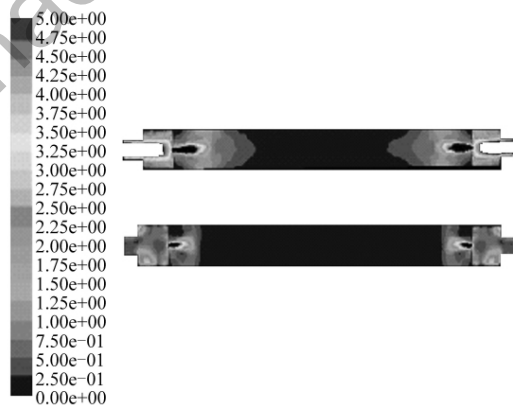


图10 工况一(上)工况二(下)1号、3号进气管道喷嘴截面速度分布

图10是2组工况在1号、3号进气管道上的轴向截面速度分布,可以看到工况一比工况二的射流撞击效果要好很多,能够对合成气气流形成一定的冲击作用,达到换热的目的。

总体来看,气流进入激冷环后,由于喷嘴的尺寸较小,且伴随着气流的惯性运动,大部分气流不能直接喷出,沿着环内流动;随着气流在环内的流动,喷嘴的速度依次降低,当两股气流在环内相遇时,附近的喷嘴速度将会有一定的提高。其中工况一为四进气结构,两股气流在环内汇合时,气流速度

(下转第94页)

参考文献:

[1] 王显政, 杨富, 朱凤山, 等. 煤矿安全新技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.

[2] 宋元文. 煤矿灾害防治技术 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2007.

[3] 黄俊, 牛艳萍, 芦山. 影响煤矿安全的因素与防治对策 [J]. 洁净煤技术, 2007, 13(3): 94-96.

[4] 卢鉴章, 刘见中. 煤矿灾害防治技术现状与发展 [J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(5): 1-5.

[5] 江成玉, 李春辉, 苏恒瑜. 瓦斯绿色开采技术的实现及其资源化 [J]. 洁净煤技术, 2010, 16(4): 1-3.

[6] 陈铭, 王继仁. 煤矿瓦斯灾害防治技术的研究 [J]. 煤炭技术, 2009, 28(3): 1-3.

[7] 庞成, 王宏图. 谈煤矿井下煤尘防治 [J]. 重庆职业技术学院学报, 2008, 17(2): 149-150.

[8] 马汉鹏, 王德明. 矿井粉尘防治技术探讨 [J]. 洁净煤技术, 2005, 11(4): 68-70.

[9] 苏加德. 矿井火灾防治技术的发展现状及趋势 [J]. 鸡西大学学报, 2005, 5(1): 52-60.

[10] 董书宁, 靳德武, 冯宏. 煤矿防治水实用技术及装备 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(3): 8-10.

[11] 李建伟. 回采工作面顶板事故原因分析及控制措施 [J]. 煤, 2007, 16(5): 46-50.

[12] 祁永峰. 巷道顶板事故防治技术探析 [J]. 煤, 2009, 18(8): 66-69.

[13] 康红普. 复杂地质条件巷道支护现状与发展趋势 [A]. 中国煤炭工业可持续发展的新型工业化之路——高效、安全、洁净、结构优化, 中国科协 2004 年学术年会第 16 分会场论文集 [C]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.

[14] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.

[15] 国家煤矿安全监察局. 2010 年度全国煤矿事故分析报告汇编 [R]. 北京: 国家煤矿安全监察局, 2010.

[16] 邵军. 我国煤矿安全技术的现状及发展方向 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 35(5): 1-3.

[17] 黄俊, 许洪峰. 矿井未开采区瓦斯涌出量的预测 [J]. 洁净煤技术, 2005, 11(1): 59-60.

(上接第 78 页)

递增,基本达到了气流的均匀分布。而由工况二的图像可知,激冷环上喷嘴速度分布相对不均匀,气流的射入方向主要为一组对喷方向。通过对比可知,工况一能够达到强化换热的目的。

3 结 论

通过对气化炉激冷环内部流场的冷态数值模拟,可以得到以下基本结论:

(1) 数值模拟结果和实验测试值吻合度较好,具有较高的可靠性。

(2) 针对 2 种工况的模拟可知,由于气流的惯性作用,激冷环喷出的速度最大处主要集中在进气管道附近,气流进入激冷环后速度依次递减,当两股气流在环内交汇时,速度会有一定的增大。

(3) 通过 2 种工况的对比可知,激冷环采用四进气管道结构时,激冷环上的喷嘴速度基本能够均匀分布,达到对合成气强化换热的目的。

参考文献:

[1] 陈国艳, 张忠孝, 代百乾, 等. 气流床固态排渣实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 73-79.

[2] 周国锋, 张忠孝, 李振中, 等. ICCC 系统燃气轮机变工

况对气化岛性能的影响 [J]. 洁净煤技术, 2010, 16(6): 40-44.

[3] 倪建军, 梁钦锋, 郭庆华, 等. 气化炉与辐射锅炉接口的传热流动数值模拟 [J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(1): 57-63.

[4] Ligang Zheng, Edward Furinsky. Comparison of Shell, Texaco, BGL and KRW gasifiers as part of IGCC plant computer simulations [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(11-12): 1767-1779.

[5] 王亦飞, 吴宏涛, 贺必云, 等. 新型旋流降膜式洗涤冷却环的开发与研究 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2005, 31(6): 752-755.

[6] 彭宇慧, 代正华, 龚欣, 等. 气流床煤气的部分水激冷流程研究 [J]. 化学工程, 2010, 38(2): 83-86.

[7] 陶志远, 张克锋. 水煤浆气化炉激冷环运行分析及结构改进 [J]. 大氮肥, 2008, 31(5): 322-324.

[8] 李铁, 李伟力, 袁竹林. 下降管内壁激冷水降膜流动特性 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(6): 962-966.

[9] 陈意心, 王亦飞, 梁铁, 等. 新型洗涤冷却室内气液两相的分布特性 [J]. 化工学报, 2008, 59(2): 322-327.

[10] M. El Haj Assad, Markku J. Lampinen. Mathematical modeling of falling liquid film evaporation process [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(7): 985-991.