

烧结机余热锅炉多通道烟气流场数值研究

金盈利, 王建志, 陈刚, 郝立波

(中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 以某余热锅炉入口烟道流场为研究对象, 建立了多通道入口烟道的三维数值计算模型, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 方程离散采用二阶迎风差分格式, 计算获得了余热锅炉多通道入口烟道内部流场的分布情况, 提出了加装导流板对流场进行优化的措施。计算结果表明: 在相同的进口尺寸条件下, 采用多通道小扩张角烟道流场优于单烟道结构的烟道流场, 在入口烟道内布置导流板可显著提高入口烟道内烟气流场的均匀性, 随着烟速的增加, 导流板对速度均匀性的改善作用有所减弱。

关键词: 入口烟道; 流场; 多通道; 导流板; 数值计算

中图分类号: TK229.9

文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.02.018

引言

余热锅炉是烧结余热回收系统的关键设备。采用余热锅炉烟气循环回收系统, 能够最大限度地回收余热, 降低烟尘外排量, 减少污染。该设备的设计制造技术虽渐近成熟, 但仍存在某些不足。由于环冷机烟气引出管道与余热锅炉受热面的衔接尺寸差距大, 需用过渡烟道相连。锅炉内部烟气流场的均匀性对换热性能有较大影响, 局部流速过高不但会造成蒸发器管束受热不均, 还会导致管排震动和磨损等问题, 这对余热锅炉的性能及寿命都产生巨大的影响^[1]。受烧结机排气系统及结构的限制, 锅炉入口烟道常需要多通道汇流及分流, 使锅炉入口流场更加复杂, 多通道入口烟气流场的优化设计与余热锅炉性能密切相关。本研究针对某烧结机余热锅炉双通道入口烟道流场进行优化研究和数值模拟, 并结合工程实例进行了验证, 对烧结机余热锅炉系统研究和设计具有一定的参考意义。

1 余热锅炉烟道模型

烧结机余热锅炉利用环冷机抽出的高温空气加热余热锅炉的受热面使之产生一定参数的蒸汽, 输出给汽轮机带动发电机发电。入口烟道是连接环冷

机出口与余热锅炉受热面的通道, 以邯钢 435 入口烟道为例, 如图 1 所示, 烟道为双通道结构, 前后左右四面均有一定的倾斜角, 两两对称, 出口为分叉形式。为对比单通道与双通道的流场特点, 分别建立了单通道和双通道三维计算模型, 如图 2 所示。

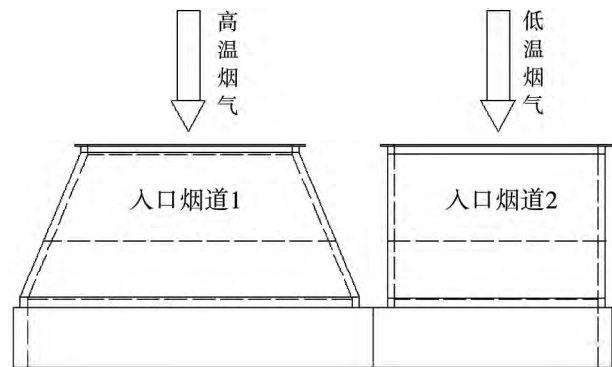


图 1 双通道入口烟道结构图

Fig. 1 Chart showing the structure of a dual-channel inlet flue gas duct

针对原烟道模型结构特点, 对 3 种入口烟道分别加装不同布置形式导流板, 单通道烟道在入口处加装 3 片导流板, 分别布置于四分之一节点处, 左右两片对称, 与入口截面成 60° 角, 高度取 1 m, 中心 1 片垂直向下, 高度取 1.2 m, 宽度均取 1.2 m; 双通道烟道 1 在入口处布置 4 块导流板, 两两对称, 间距分别为 1.4 m、1.8 m, 倾角分别为 70° 、 60° , 宽分别为 2 m、1 m, 高度取 0.8 m; 双通道烟道 2 在入口处对称加装 2 片导流板, 倾角同样取 60° , 高度取 1 m, 宽度取 1.4 m, 如图 3 所示。

2 烟道流场数值模拟

2.1 控制方程

由多通道余热锅炉入口烟道内空气流动的质量连续性, 得出质量守恒方程:

收稿日期: 2014-03-03; 修订日期: 2014-04-24

作者简介: 金盈利(1988-), 男, 吉林伊通人, 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所助理工程师。

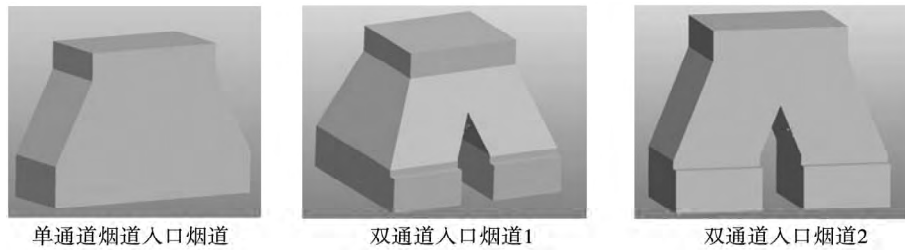


图 2 不同通道入口烟道三维模型

Fig.2 Different channel inlet flue gas duct three-dimensional model



图 3 不同通道入口烟道优化后三维模型

Fig.3 3-d model for the inlet flue gas duct in different channels after optimization

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程反映的是牛顿第二定律,其运动方程亦为纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \rho f - \nabla p + \nabla \cdot t \quad (2)$$

式中: ρf —体积分力; ∇p —压力梯度; $\nabla \cdot t$ —粘性力。

入口烟道流场雷诺数较大,流动为湍流。Reynolds 平均法是目前使用最广泛的湍流数值模拟方法^[2]。考虑到标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型对复杂几何区域内有回流的流动计算有较高的精度^[3]。本研究采用该模型计算,流体当作不可压缩流体,此时标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \times$$

$$\frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_{3\varepsilon} G_b \right] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.2 网格及边界条件

为了适应几何结构特点,原始结构模型采用结构化网格划分,优化后模型采用非结构化网格划分^[4]。使用商业软件 ICEM CFD 进行三维网格划

分,非结构网格整个计算区域全部选择 Tetra/Mixed 类型,利用 Robust(Octree) 网格生成方法生成四面体网格^[5],如图 4 所示,网格数量及质量如表 1 所示。烟气假设为理想气体。烟气物性参数如表 2 所示,由于已知烟气流量和进口尺寸,速度求解方便,故采用速度进口条件,进口处烟气的速度取 15 m/s。出口边界条件由于流道属于渐扩式结构,出口处存在明显的回流区域,采用压力出口条件,依据工程实际取 -500 Pa。同时,进行了烟气速度分别 10 m/s、20 m/s 出口压力 -500 Pa 条件下的数值计算分析。

表 1 各模型网格数量及质量汇总

Tab.1 Summing-up of the number and mass of grids of various models

模型名称	原网格数量	原网格质量	优化后网格数量	优化后质量
单通道烟道	30 万	%100 >0.82	190 万	%100 >0.43; %89 >0.6
双通道烟道1	52 万	%100 >0.81	722 万	%100 >0.42; %98 >0.6
双通道烟道2	30 万	%100 >0.83	560 万	%100 >0.41; %99 >0.6

表 2 各模型流场烟气物性

Tab.2 Physical properties of the flue gases in various models in the flow field

模型名称	烟气温度/K	烟气密度/kg·m ⁻³	烟气动力粘度/Pa·s
单通道烟道	673	0.524	3.306e-5
双通道烟道1	673	0.524	3.306e-5
双通道烟道2	573	0.615	2.972e-5

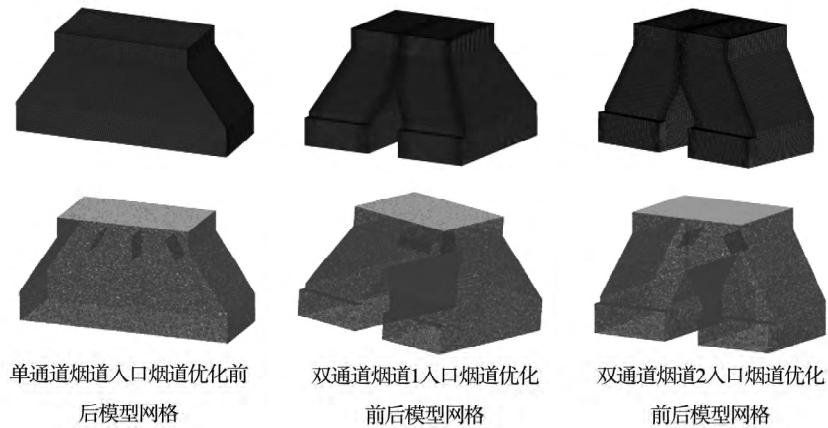


图 4 各模型优化前后网格划分

Fig. 4 Grid division of various models before and after optimization

3 结果分析

3.1 单烟道模型导流板加装前后流场

原过渡烟道中截面及出口截面速度等势图如图 5 及图 6 所示,由图可知,环冷机排烟进入过渡烟道后,随着烟道流通截面积的迅速扩大,主流流向外侧扩张。

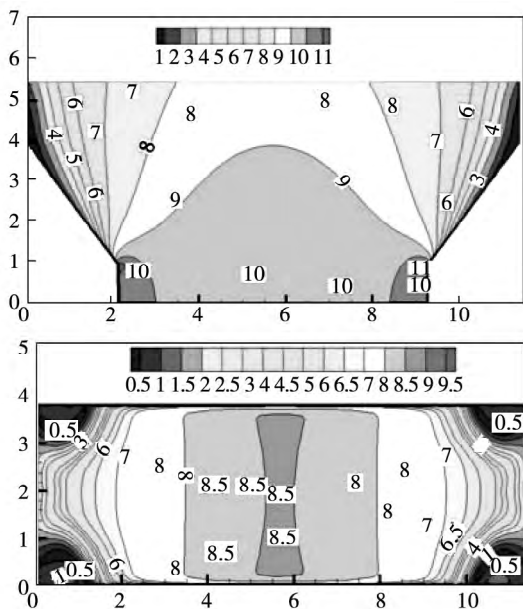


图 5 烟道优化前入口速度 10 m/s 单通道模型中截面及出口速度场等势图(m/s)

Fig. 5 Contour chart of the mid-cross section and outlet velocity field in the single-channel model before optimization of the flue gas duct when the inlet speed is 10 m/s(m/s)

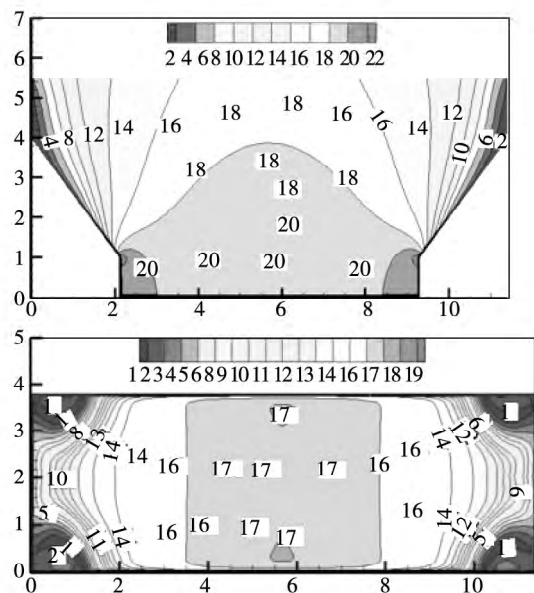


图 6 烟道优化前入口速度 20 m/s 单通道模型中截面及出口速度场等势图 (m/s)

Fig. 6 Contour chart of the mid-cross section and outlet velocity field in the single-channel model before optimization of the flue gas duct when the inlet speed is 20 m/s(m/s)

由于主流速度快,而烟道流动长度相对较短,气流并不能充分扩张到整个烟道就已到达烟道的出口。此外,从图中还可看出烟道中心位置气流速度快,四周速度慢,速度梯度很大,产生了很强的卷吸气流,并在四角附近形成明显旋涡,从而形成回流区。由于回流区的存在,烟道出口处的速度值由中心向四周逐渐减小。值得注意的是,此处回升的烟

速是由于烟气回流造成的,不利于换热。在烟道的出口处沿水平方向烟气速度分布极不均匀,烟道出口的中心部分的速度接近入口烟速 85%,而四角烟速均在入口烟速 10% 以下。通过加装导流板优化后的模拟计算结果(如图 7、图 8 所示)可以看出,在烟道内加装导流板使入口烟道内的主气流发生了改变,使原来的一股集中在烟道中心的主气流分成 3 股气流布满整个烟道的出口截面,这使出口截面平均速度提高,速度的均方差明显降低,这表示出口截面的速度有了本质的改善。

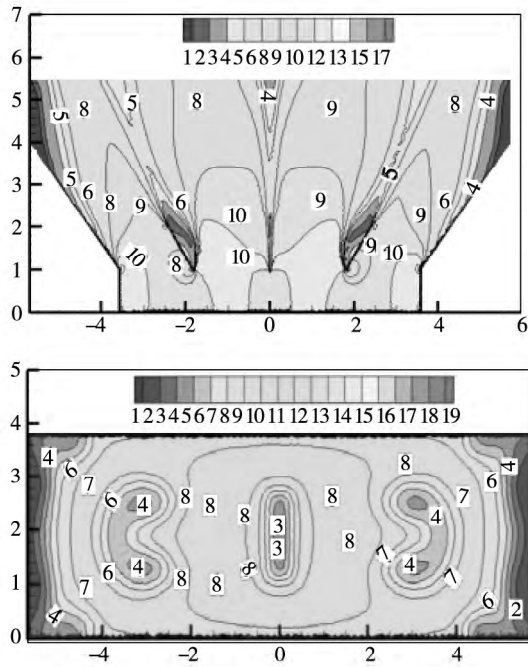


图 7 烟道优化后入口速度 10 m/s 单通道烟道模型中截面及出口速度场等势图 (m/s)

Fig. 7 Contour chart of the mid-cross section and outlet velocity field in the single-channel flue gas duct model after optimization of the flue gas duct when the inlet speed is 10 m/s(m/s)

3.2 双通道烟道模型导流板加装前后流场

由图 9 可知,与单通道相比,双通道烟道原入口烟道结构更有利于烟气分流,使烟气速度均匀性有所提高,但出口烟气速度仍不理想,烟气在各分烟道出口靠近内侧边界中心位置烟速较高,4 个外角位置烟速较低,回流明显,烟速梯度较大,且 Y 方向两顶角回流区大小不对称,这是因为接近出口位置截面 Y 向存在阶梯型增大(又 Y=7 增加为 Y=7.42,详见双通道烟道 1 流场几何模型),增强了截面增

大位置的出口回流。由图 10 可知,加装 4 片导流板优化后,通过导流板的强迫流动,烟气流场得到了显著改善,出口速度均匀性有较大提高,高速区由于导流板的布置,烟速明显降低,4 个外角位置烟速增大,回流区消失,在截面阶梯型增大位置仍存在小范围低速烟气区,可通过加装挡烟板方式消除。

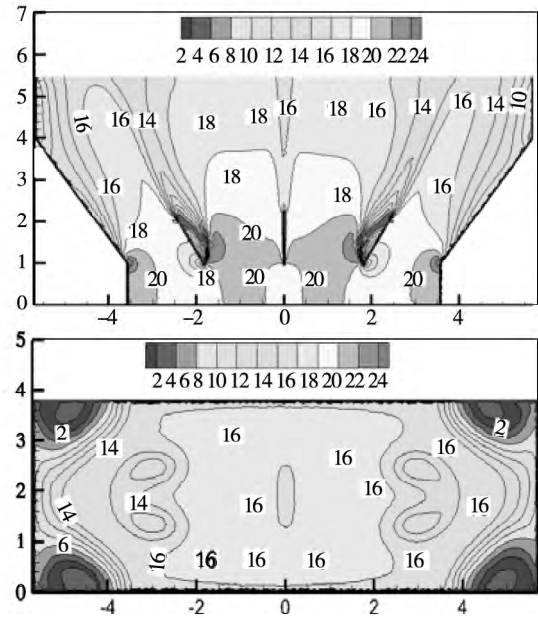


图 8 烟道优化后入口速度 20 m/s 单通道烟道模型中截面及出口速度场等势图 (m/s)

Fig. 8 Contour chart of the mid-cross section and outlet velocity field in the single-channel flue gas duct model after optimization of the flue gas duct when the inlet speed is 20 m/s(m/s)

为了有效地提高烟道出口处烟气速度的均匀性,采用加装导流板的方式对入口烟道进行优化,为了更好地对过渡烟道出口截面的烟气速度进行定量分析比较,采用面积加权的方式进行分析,为了对计算结果进行定量分析,引入面积加权平均速度(Area-Weighted Average Velocity)和速度均方差(Velocity Standard Deviation)对出口截面处的速度分布均匀性进行评价^[1]。

面积加权平均烟气速度的计算式为:

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int V dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n V_i |A_i| \quad (5)$$

式中: \bar{V} —平均烟速; A—面积。

出口截面平均烟速的均方差计算式为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V - \bar{V})^2}{n}} \quad (6)$$

式中: s —烟速的均方差。

入口速度分别为 10、15 和 20 m/s 时各模型总压降、出口面积加权平均烟气速度、出口截面平均烟速均方差详细参数如表 3 所示。

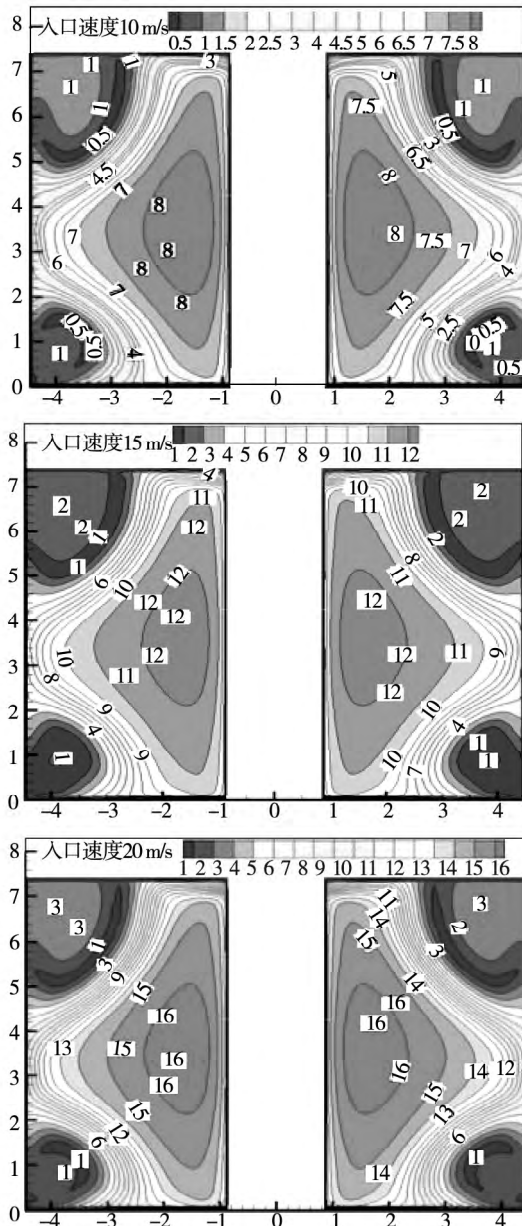


图 9 优化前双通道烟道模型出口速度场等势图 (m/s)

Fig. 9 Contour chart of the outlet velocity filed in the dual-channel flue gas duct model before optimization(m/s)

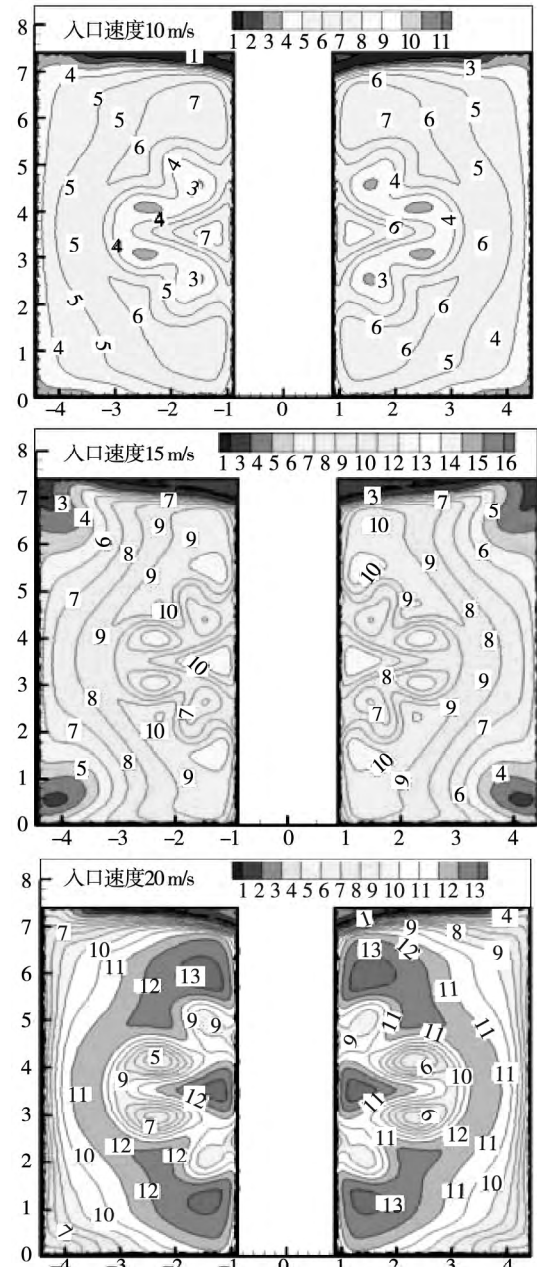


图 10 优化后双通道烟道模型出口速度场等势图 (m/s)

Fig. 10 Contour chart of the outlet velocity filed in the dual-channel flue gas duct model after optimization(m/s)

由表 3 可知,单通道、双通道烟道模型加装导流板后,在 3 种不同入口烟气速度下,模型总压损失均有所降低,由于烟气速率较低,各模型总压损失相对较小。由 3 个不同烟道出口加权平均速度可看出,加装导流板后单通道烟道及邯钢双通道烟道 2 烟道平均速度均有所提高,因原模型烟道回流区相对较

小, 加装导流板使其速度场更均匀, 平均烟速有所增加, 而双通道烟道 1 加装导流板后烟气平均速度有所降低, 这是因为该模型原烟道回流区较大, 优化前出口回流明显, 优化后回流区基本消失, 回流烟气转为正向低速烟气, 导致出口整体平均烟速有所降低。

从表中出口截面平均速度均方差可知加装导流板后, 出口烟气均匀性得到大度提高, 其中双通道烟道模型提高尤为显著, 而从 3 种入口烟速条件下对比可得出, 随着烟速的增加, 导流板对流场优化效果有所下降。

表 3 模型出口烟气参数表

Tab. 3 Table of the parameters of the flue gas at the outlet of the model

模型名称	总压降/Pa			出口平均速度/ $m \cdot s^{-1}$			出口速度均方差/ $m \cdot s^{-1}$		
	10	15	20	10	15	20	10	15	20
单通道烟道	4.2	9.3	16.4	6.45	9.68	12.91	2.88	4.31	5.73
优化后单通道烟道	3.82	8.7	15.5	6.54	9.89	13.27	1.83	3.03	4.46
双通道烟道 1	8.2	18.3	32.6	4.96	7.43	9.94	2.87	4.29	5.68
优化后双通道烟道 1	6.3	17.3	25.3	4.82	7.24	9.68	1.27	2.07	2.60
双通道烟道 2	4.6	10.5	19.4	7.25	10.89	14.53	2.24	3.36	4.46
优化后双通道烟道 2	4.3	10.1	18.3	7.35	11.03	14.63	1.76	2.96	4.24

这是由于烟道长度一定情况下, 烟速越大, 烟气经过入口烟道时间越短, 导流板对烟气的作用时间也越短, 导流作用也相应降低。

5 结 论

通过对烧结机多通道及单通道余热锅炉入口烟道的优化设计, 并对优化前后流场进行数值模拟分析, 得出结论:

(1) 在相同的进口尺寸条件下, 采用多通道小扩张角烟道流场质量要明显优于单烟道结构, 在入口烟道内布置导流板可显著提高入口烟道内烟气流场的均匀性。

(2) 单通道烟道中, 随着入口烟速的增加, 导流板对烟气的导流作用减弱, 对速度均匀性的改善效果有所下降; 双通道烟道中导流板多烟道烟气流场的改善能力依然很高。

参考文献:

[1] 王永堂, 陈明, 王艳滨, 等. 燃气轮机余热锅炉过渡烟道的优化设计[J]. 热能动力工程, 2010, (25): 66-68.

WANG Yong-tang, CHEN Ming, WANG Yan-bin, et al. Optimized design of the transition flue gas duct of the heat recovery steam generator of a gas turbine [J]. Thermal Power Engineering, 2010, (25): 66-68.

[2] 陶文铨. 数值传热学(第 2 版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.

TAO Wen-quan. Numerical heat transfer (Second Edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006.

[3] SHYY W, SUN C S. Multigrid computation for turbulent recirculating flows in complex geometries [J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 1993, 23: 79-98.

[4] 鲍玲玲, 刘中良. 海上平台水合物分离器内气液两相流数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(9): 1539-1542.

BAO Ling-ling, LIU Zhong-liang. Numerical simulation of the gas-liquid two-phase flow in hydrate separators for use on offshore platforms [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(9): 1539-1542.

[5] 纪冰冰. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解(第 1 版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

Ji Bing-bing. Detailed explanations of the cases in ANSYS ICEM CFD mesh division technology (First Edition) [M]. Beijing: China Water Conservation and Hydropower Press, 2012.

(丛 敏 编辑)

exceed $\pm 0.5\%$. The operation experience shows that to lower the amount of oxygen consumed in operation can reduce the NO_x produced, however, this can lead to an increase of the carbon content of flying ash. It is also true that to increase the amount of SOFA and to regulate the SOFA damper to its largest opening degree can also reduce the production of NO_x . In addition, the mode of putting the pulverizer into operation can also influence the NO_x emissions concentration. **Key Words:** low nitrogen modification, air staging, NO_x emissions, combustion adjustment

烧结机余热锅炉多通道烟气流场数值研究 = Numerical Study of the Flue Gas Flow Field Inside Multiple Ducts of the Heat Recovery Steam Generator of a Sintering Machine [刊, 汉] JIN Ying-li, WANG Jian-zhi, CHEN Gang, HAO Li-bo (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(2). -242-247

With the flow field in the flue gas duct at the inlet of a heat recovery steam generator serving as the object of study, established was a three-dimensional model for calculating multi-channel inlet flue gas ducts. The standard turbulent flow model was used, the pressure and speed were coupled by using the Simple algorithm and the equation was discretized by using the second-order upwind difference scheme to calculate and obtain the distribution of the flow field inside the multi-channel inlet flue gas duct of the heat recovery steam generator. A measure was proposed to optimize the flow field by additionally installing flow guide plates in the flue gas duct. The calculation results show that under the condition of the inlet having same dimensions, the flow field in a flue gas duct having a small divergence angle with multiple channels is superior to that in a flue gas duct with a single channel. To arrange and install flow guide plates inside the inlet flue gas duct can obviously enhance the uniformity of the flue gas flow field inside the inlet flue gas duct. With an increase of the speed of the flue gases, the degree of improving the speed uniformity by using the flow guide plates will somewhat decline. **Key Words:** inlet flue gas duct, flow field, multiple channel, numerical calculation, flow guide plate

湿法烟气脱硫装置中铁锰离子对 SO_2 催化氧化作用的试验研究 = Experimental Study of the Action of Iron and Manganese Ions in a Wet-method Flue Gas Desulfurization Device on the Catalytic Oxidation of SO_2 [刊, 汉] ZHAO Qing-qing, JIN Jing, GAO Xin-yong, LIU Wei, ZHANG Ying-wen, LIU Lei (College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(2). -248-252