

文章编号: 1671-6612 (2019) 01-001-5

竖直通道内烟气驱动空气自然对流换热数值模拟

任嘉友 王子云 高原 付召 齐润生 吴玉玲

(四川大学建筑与环境学院 成都 610065)

【摘要】 采用数值模拟和无量纲分析方法,对烟气驱动空气自然对流换热装置的流动、换热情况进行研究。结果表明:(1)随着空气通道瑞利数的增加,烟气通道换热边界层变薄,空气通道换热边界层变厚;(2)换热量随烟气通道入口温度增大而增大,同时,随着烟气通道入口流速增大,换热量的增加显著;(3)无量纲烟气通道入口流速为 0.93 时,随着烟气通道入口温度的增大,烟气通道内的回流区从无到有,且宽度逐渐增大,对传热过程的不利影响作用更强。因此,通过增大烟气通道入口流速,能明显减小烟气通道内回流区宽度,增强自然对流强换热效果。

【关键词】 烟气;自然对流换热;余热;数值模拟;无量纲分析

中图分类号 TK 文献标识码 A

Numerical Simulation of Air Natural Convection Heat Transfer Driven by Flue Gas in Vertical Channel

Ren Jiayou Wang Ziyun Gao Yuan Fu Zhao Qi Runsheng Wu Yuling

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065)

【Abstract】 Numerical simulation and dimensionless analysis are used for study flow and heat transfer of natural convection heat transfer which driven by flue gas in an equipment. The study results indicate that: (1) heat transfer boundary layer of flue gas channel decrease with *Rayleigh* number of air channel, heat transfer boundary layer of air channel left side increase with *Ra*; (2) heat transfer rate increase with average temperature of flue gas channel inlet, and increase with average flow rate of flue gas channel inlet remarkably; (3) when the dimensionless average flow rate of flue gas channel inlet is 0.93, as temperature of flue gas inlet is increased, backflow region of flue gas is appear, then width of back flow region become bigger gradually, which has increasing resistance effects on heat transfer. As results, increasing average flow rate of flue gas inlet can reduce width of back flow region, and reinforce natural convection heat transfer effects.

【Keywords】 flue gas; natural convection heat transfer; residual heat; dimensionless analysis

0 引言

随着我国节能减排步伐的加快,工业余热的利用显得尤为重要。目前,我国正处于工业化中后期,工业能耗约占社会能耗的 70%^[1],其中烟气余热占工业余热资源总量的 50%以上,广泛分布于各个工业行业,烟气余热利用潜力大^[2]。

将烟气作为自然对流换热过程的驱动热源,为排烟气的建筑或者临近区域建筑提供自然通风,将

会提高能源利用效率,降低烟气对环境的热污染。同时,能为建筑提供无风机能耗的新风及热量,营造良好的室内环境。一般情况下,烟气排放都是在竖直方向排放的,因此考虑在竖直矩形排烟通道外侧套一个竖直矩形空气通道,以烟气余热为热源,驱动空气自然对流。国内外有大量学者对侧壁加热竖直通道的空气自然对流及其传热过程进行试验或数值模拟研究。D Roeleveld^[3]利用可视化技术和

作者简介:任嘉友(1993.08-),男,硕士,E-mail:2016223050039@stu.scu.edu.cn

通讯作者:王子云(1972.11-),男,博士,副教授,E-mail:wzyfirst@163.com

收稿日期:2018-04-19

激光干涉测试法对在非对称等温加热垂直通道内的反浮力进行研究, 结果表明, 这种反浮力可能导致通道内的流动不稳定。Assunta Andreozzi 等^[4]采用实验方法研究了垂直通道中心线位置的非加热辅助平板对通道内辐射换热和自然对流换热影响效果。研究表明, 在高热流量和高瑞利数下, 辅助平板位于通道出口时, 最大通道壁温为最低值。Shwin-Chung Wong^[5]等采用有拓展计算域和无拓展计算域的数值模拟方法对二维垂直等温平板阵通道列进行研究, 结果表明: (1) 在内羽流区域具有较强的附加热羽流浮力; (2) 通道外部具有较高的入口分离阻力, 平板通道阵列整体的传热系数随着平板通道数量的增加而增加, 传统的对于多平板通道阵列具有相似传热性能的假设需要修正。

上述研究是针对恒定热源的垂直通道自然对流的换热及流动状态进行研究, 在实际工程中, 垂直通道壁面的热源可能为不稳定热源, 或者不均匀热源。本文研究对象为垂直通道在高温烟气通道加热下的空气通道换热性能, 其热源不均匀。采用数值模拟及无量纲分析方法来研究不同烟气对空气自然对流的驱动效果及换热情况。

1 数学及物理模型

1.1 物理模型及基本假设

换热通道俯视图见图1, 内侧为矩形烟气通道, 外侧为矩形空气通道, 空气通道内、外侧管壁均为不锈钢材。高温烟气向上流动, 将热量由管壁传入空气通道, 使空气产生向上的自然对流。为节省模拟计算时间, 取图1中1-1剖面, 且由于该剖面对称, 取一半进行计算, 利用 Gambit 2.4^[6]创建几何模型并划分网格。换热通道简化模型见图2, 换热通道简化模型几何尺寸见表1。

对模型做如下假定和说明:

- (1) 烟气与空气温差较大, 选用不可压缩理想气体模型进行自然对流计算^[7];
- (2) 流体在通道壁面上为无滑移边界条件;
- (3) 换热量及空气质量流量的计算以换热通道俯视图长度方向上单位长度 (1m) 对应的体积流量进行计算。

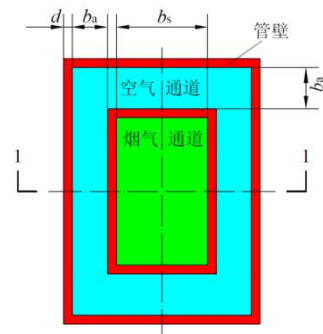


图1 换热通道俯视图

Fig.1 Top view of heat transfer channel

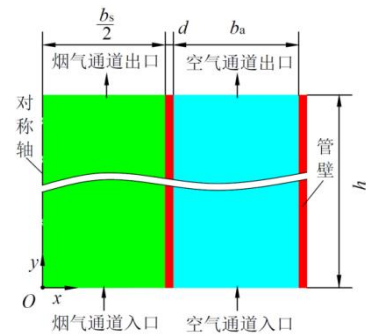


图2 换热通道简化模型

Fig.2 Simplify model of heat transfer channel

表1 换热通道简化模型几何尺寸

Table 1 Geometric dimensioning of heat transfer channel simplify model

b_s/mm	d/mm	h/mm	b_a/mm
200	2	2000	100

1.2 守恒方程

不可压缩连续流动控制方程如下:

$$\text{div}(\rho u \vec{\varphi}) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + S \quad (1)$$

表2 φ 、 Γ 、 S 对应参数

Table 2 Perspective parameter of φ 、 Γ 、 S

系数 方程	φ	Γ	S
连续	1	0	0
x 动量	u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}$
y 动量	v	μ	$-\frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + (\rho - \rho_0) g$
能量	T	$\frac{\mu}{Pr}$	0

$$\hat{p} = p - \rho_0 g y \quad (2)$$

无量纲数:

$$Pr = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\Phi b_a}{(T_w - T_0) h \lambda} \quad (4)$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_w - T_0) b_a^3}{\alpha \gamma} \quad (5)$$

引入无量纲量:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{T - T_0}{T_0} \\ v^* &= \frac{v d}{\alpha} \\ V^* &= \frac{\dot{m} \Delta \tau}{\rho h b} \\ \Phi^* &= \frac{\Phi}{c_p \dot{m} (T_{a0} - T_0)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, u 、 v 分别为直角坐标系中 x 、 y 方向的速度, m/s ; μ 动力粘性系数, $kg/(m \cdot s)$; p 为局部压强, \hat{p} 为修正压强, Pa ; ρ 为密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; T 为热力学温度, K ; Pr 为普朗特数; γ 为运动粘性系数, m^2/s ; α 为热扩散系数, m^2/s ; Nu 为空气通道努塞尔数; Φ 为换热量, W ; b 为通道宽度, h 为换热高度, d 为通道管壁厚度, mm ; λ 为热导率, $W/(m \cdot K)$; Ra 为空气通道瑞利数; β 为热膨胀系数, $1/K$; θ 为无量纲温度; V 为体积流量, m^3/s ; \dot{m} 为空气质量流量, kg/s ; 单位时间长度 $\Delta \tau = 1s$; c_p 为比定压热容, $J/(kg \cdot K)$ 。文中出现的量的下标: $_0$ 为环境空气参数; $_s$ 为烟气参数; $_a$ 为空气参数; $_w$ 为中间管壁平均参数; $_{si}$ 为烟气通道入口平均参数; $_{so}$ 为烟气通道出口平均参数; $_{ai}$ 为空气通道入口平均参数; $_{ao}$ 为空气通道出口平均参数。带“*”的量为无量纲量。

1.3 边界条件

左侧点画线设为 *symmetry* 类型, 中间管壁两侧为耦合壁面, 右管壁内侧设为耦合壁面, 外侧设为绝热壁面。烟气通道进、出口分别设为速度入口、压力出口; 空气通道进、出口分别设为压力入口、压力出口; $\theta_{si} = 19$, $\theta_{ai} = 0$; 烟气通道及空气通道内部的壁面发射率为 0.05, 外壁面考虑为绝热, 因此

不需要考虑壁面发射率。

1.4 网格划分及离散求解方法

采用结构化网格来划分模型, 对管壁及其附近网格进行加密, 网格数为 118000, 换热通道简化模型网格见图 3。采用 SIMPLEC 算法; 采用有限容积法对控制方程进行离散, 湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型, 并考虑增强壁面的处理方法^[8], 全浮力效果, 辐射模型选用 Do 模型; 动量、湍流动能、湍流扩散率、能量方程、Discrete Ordinates 均采用二阶迎风格式, 并选用合适的亚松弛因子。

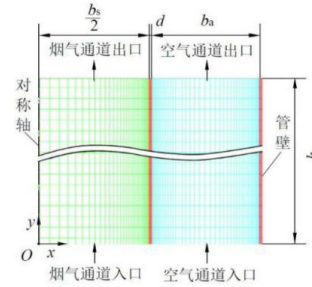


图 3 换热通道简化模型网格

Fig.3 Grid of heat transfer channel simplify model

2 不同 Ra 下的温度分布

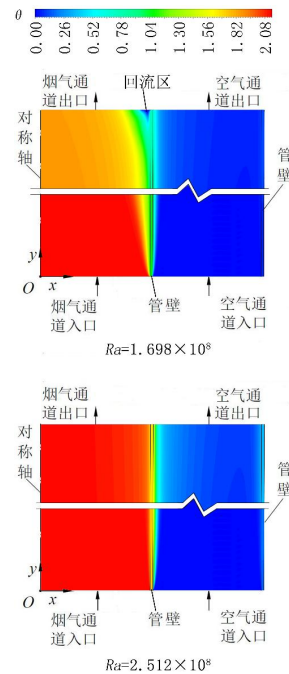


图 4 不同 Ra 下的温度分布图

Fig.4 Temperature distribution in different Ra

如图 4 所示, 在低 Ra 时, 烟气通道内的换热边界层较厚, 且烟气通道出口存在回流区, 两者均

对传热有不利影响。而较高 Ra 下, 烟气通道换热边界层较薄, 出口回流区消失, 对传热过程有正面影响, 同时, 烟气通道与空气通道之间的管壁温度有明显升高, 其与空气通道外侧管壁辐射换热增强。此外, 较高 Ra 下, 空气通道换热边界层也略微增大。

3 Nu 、空气无因次体积流量与 Ra 的关系

图 5 为 Nu 随 Ra 的变化图, 随着 Ra 增加 Nu 也增大, 这是由于烟气通道侧的换热边界层变薄, 导致换热增强, 同时由于换热间壁温度增加, 辐射换热强度也增加。而 Nu 随着 Ra 的增加率却略有降低, 由于 Ra 增加, 空气通道内的换热边界层厚度逐渐增大, 对整体换热过程有一定的削弱作用。图 6 为空气无因次体积流量 V_a^* 随 Ra 的变化情况, 随着 Ra 的增加, 空气无因次体积流量 V_a^* 逐渐增大, 变化情况接近线性变化。

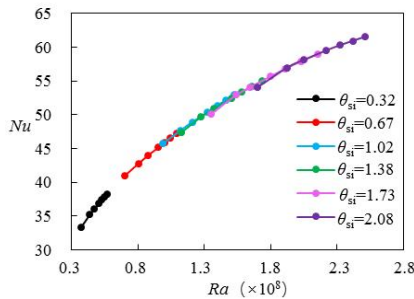


图 5 Nu 随 Ra 变化图

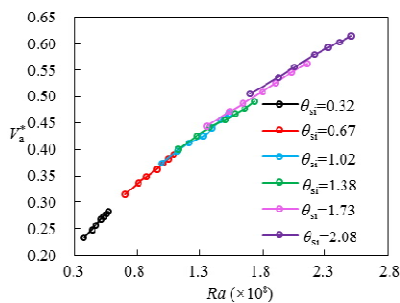


图 6 空气无因次体积流量随 Ra 变化图

Fig.6 The dimensionless volumetric flow rate of air changes with Ra

4 换热量与烟气温度变化关系

Φ^* 随 θ_{si} 的变化如图 7 所示, 随着 θ_{si} 的增加, 换热量逐渐增加。同时, 随着 θ_{si} 增大, v_{si}^* 对换热量

影响作用也变显著。如图 8 所示, $v_{si}^*=0.93$ 时, 在 θ_{si} 小于 0.32 时, 烟气通道内无回流区, 当 θ_{si} 大于 0.32 后, 随着 θ_{si} 的增大, 烟气通道内的回流区宽度逐渐增大, 对传热过程的不利影响作用更强。因此, 通过增大 v_{si}^* , 能明显减小烟气通道内回流区宽度, 换热量提升显著。

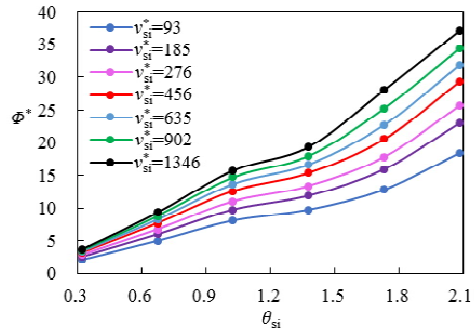


图 7 换热量随 θ_{si} 变化图

Fig.7 The heat transfer rate changes with θ_{si}

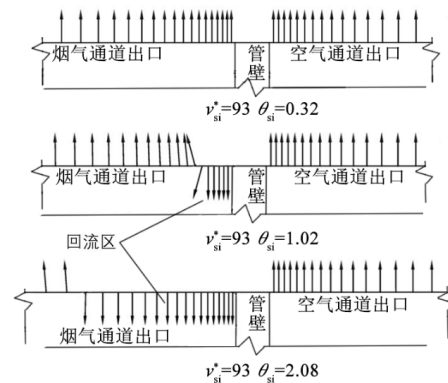


图 8 不同 θ_{si} 下烟气通道回流区宽度

Fig.8 Width of backflow region in flue gas channel in difference θ_{si}

5 结论

- (1) 随着 Ra 增加, 烟气通道换热边界层变薄, 空气通道换热边界层变厚;
- (2) 换热量 Φ^* 随 θ_{si} 增大而增大, 同时, 随着 v_{si}^* 增大, v_{si}^* 对换热量影响作用也变显著;
- (3) $v_{si}^*=0.93$ 时, 随着 θ_{si} 的增大, 烟气通道内的回流区从无到有, 且宽度逐渐增大, 对换热过程的不利影响作用更强。因此, 通过增大 v_{si}^* , 能明显减小烟气通道内回流区宽度, 增强换热过程。

参考文献:

- [1] 冯惠生,徐菲菲,刘叶凤,等.工业过程余热回收利用技术研究进展[J].化学工业与工程,2012,20(1):57-63.
- [2] 连红奎,李艳,束光阳子,等.我国工业余热回收利用技术综述[J].节能技术,2011,29(2):123-128.
- [3] D Roeleveld, D Naylor.Flow visualization of natural convection in vertical channels with opposing buoyancy forces[J].Experimental Thermal and Fluid Science, 2014,54(2):61-70.
- [4] Assunta Andreozzi, Oronzio Manca. Radiation effects on natural convection in a vertical channel with an auxiliary plate[J].International Journal of Thermal Sciences, 2015,97:41-55.
- [5] Shwin-Chung Wong, Shih-Han Chu. Revisit on natural convection from vertical isothermal plate arrays—effects of extra plume buoyancy[J].International Journal of Thermal Sciences, 2017,120:263-272.
- [6] 王福军.计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2005:160-172.
- [7] 宋姗姗,郭雪岩.Boussinesq 近似与封闭腔体内自然对流的数值模拟[J].力学季刊,2012,33(1):60-67.
- [8] 张兆顺,崔桂香,许晓春,等.湍流理论与模拟(第 2 版)[M].北京:清华大学出版社,2017:254-258.