

中心扩口对径向浓淡旋流煤粉燃烧器出口气固流动特性的影响

(哈尔滨工业大学 热能工程教研室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

王 磊 吴少华 郝金波 李争起 孙 锐 秦裕琨

摘 要: 在不同中心扩口角度的情况下, 通过对径向浓淡旋流煤粉燃烧器的冷态 PDA 试验, 研究了燃烧器出口速度、粒径及浓度分布得出了中心扩口角度对燃烧器出口区域气固流动特性的影响规律, 并分析了中心扩口对燃烧器性能的影响, 为工程应用和优化设计提供了参考性依据。

关 键 词: 旋流煤粉燃烧器; 煤粉燃烧; 气固两相流; PDA

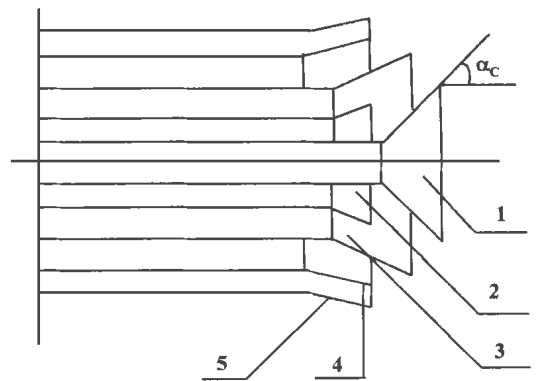
中图分类号: TK223.23 文献标识码: A

1 前言

旋流煤粉燃烧器作为煤粉燃烧的主要燃烧方式已在国内外各种容量锅炉机组上得到广泛的应用。哈尔滨工业大学综合旋流燃烧器稳定火稳, 高浓度煤粉燃烧原理和分级配风原理, 开发设计的径向浓淡旋流煤粉燃烧器^[1], 适用于中储仓式制粉系统和直吹式制粉系统, 不仅方便于我国现有旋流燃烧器的改造, 而且满足煤粉燃烧技术中适应大容量机组发展的需要。由于该燃烧器同时具有高效, 稳燃, 防结渣, 防高温腐蚀和低 NO_x 排放的优良性能, 因此得到了广泛的应用^[2~3]。

径向浓淡旋流煤粉燃烧器的回流区是在旋转气流、中心扩口的复合作用下形成的, 在燃烧器气出口处存在两个回流区即中心回流区和外回流区^[4]。外回流保证射流有合适的扩展角, 提供良好的补气条件, 对着火和燃烧有一定的作用。中心回流区直接卷吸下游的已开始燃烧的高温烟气至一次风粉混合气流的根部, 为燃料的着火提供着火热和已经反应的活性基团, 而且煤粉颗粒在中心回流区附近停留时间要比在外回流区处长得多, 因此煤粉着火初期发生的预热过程、热解过程、挥发份及固定碳的燃烧、污染物 NO_x 的生成过程主要在中心回流区边

界附近进行, 上述过程与中心回流区的流动结构、温度水平和气氛组成有重要关系。



1—中心扩口; 2—浓一次风扩口; 3—淡一次风扩口;
4—旋流二次风扩口; 5—直流二次风扩口

图 1 燃烧器喷口示意图

图 1 为径向浓淡旋流煤粉燃烧器结构示意图。从图中可以看出径向浓淡旋流煤粉燃烧器的中心扩口位于浓一次风喷口的内侧, 因此中心扩口对一次风出口气流的流动方向、颗粒流动情况及燃烧器出口处中心回流区附近的气流湍流脉动都有重要影响。

2 试验系统及测试方法

试验系统包括试验段、供风、送粉、粉尘收集、PDA 测试系统。实验段为高 2 m, 内径为 700 mm 的圆柱形筒体。

测试系统采用 DANTEC 公司生产的二维激光粒子动态分析仪(DualPDA), 它是一种非接触的测试方

收稿日期: 1999-04-06; 修订日期: 1999-05-25

基金项目: 国家九五重点科技攻关资助项目(96-A19-01)

作者简介: 王磊(1969-)男, 贵州人, 哈尔滨工业大学博士。

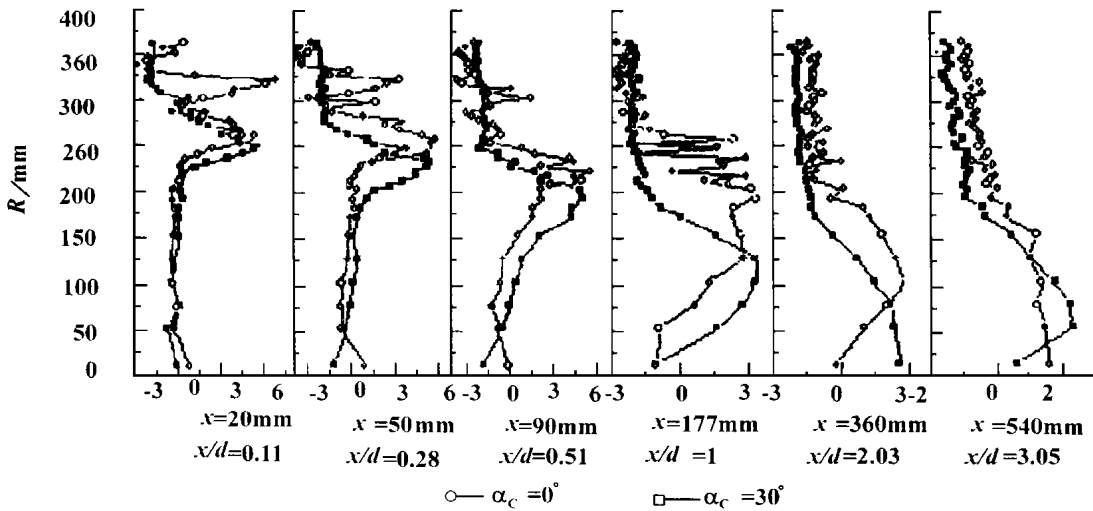


图 2 气相轴向平均速度(m/s)

式,既不影响流场也不影响粒子运动,是当今测量颗粒动态特性的最先进的工具之一。它可以在不干扰流场的基础上,同时采集气固两相速度和颗粒粒径信号,进而可以分析出一定时间、空间内的颗粒浓度分布、两相滑移速度、各种脉动指数和湍动能分布等。整个测试系统由 5 W 氙离子激光器,发射器,信号处理器,光学镜头,计算机,远控坐标架等组成。接收方式采用前向 30° 折射模式。

试验所用示踪粒子为玻璃微珠,平均粒径为 45 μm,球形度在 85% 以上,可以较好的满足实时性和可靠性的要求。

燃烧器模型与原型之间按几何相似准则以 1:6 制成。在试验中保持燃烧器进入自模化区,燃烧器模型与原型的动量比相等。试验中燃烧器其它结构不变,只改变中心风扩口角度 α_c = 0°、30°、45° 的条件下进行试验。每个工况沿试验段高度方向取六个测量截面(X = 20 mm, 50 mm, 90 mm, 177 mm, 360 mm, 540 mm),在轴线附近测点加密。每个截面沿直径方向取 40 ~ 45 个测点,每个测点采样为 1000 个数据点。

3 试验结果分析

在分析结果时,气相采用粒径为 0 ~ 8 μm 的颗粒作为示踪粒子。颗粒相采用粒径为 10 ~ 100 μm 的颗粒作为示踪粒子。颗粒粒径按颗粒个数平均的平均直径 d₁₀,颗粒浓度为颗粒相对数密度 C/C_{max}(单位体积内的颗粒数,C 为每一测点的颗粒数密度,C_{max} 为该截面颗粒数密度最大值)。

图 2 为气相的轴向平均速度分布图,从图中可

以看出,轴向速度分布为中心轴线附近的负速度区,外侧为速度峰值的马鞍型速度分布及近壁低速度区。0° 扩口在 x/d = 0.11 ~ 1 截面之间轴向速度出现了两个峰值,靠近中心的为一次风,靠近外侧的为旋流二次风,随着一次风向二次风的扩散,靠近中心的速度峰值逐渐减小,靠近边壁的速度峰值开始逐渐升高。在以后截面二次风随射流的发展向边壁扩散,速度的峰值逐渐降低。由于没有中心扩口的阻挡和分流,0° 扩口一次风保持直流通的特性,在中心区域,气流以较大的轴向速度向下游移动,且速度的最大值衰减较慢,这样使得中心回流区内的负压结构受到一定程度的破坏,导致回流区尺寸的缩小,不利于煤粉气流的着火和燃烧。随着 α_c 的增大,气流被导向外侧,使中心扩口后方的负压增大,形成较大的负速度区。在 x/d = 1 截面以后,30° 扩口仍具有较大的负速度值,这表明在较大的 α 情况下,回流区能卷吸更多的高温

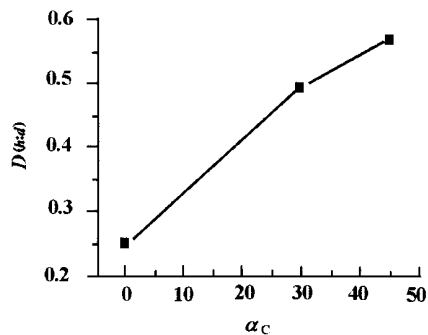


图 3 中心扩口角度对回流区直径的影响

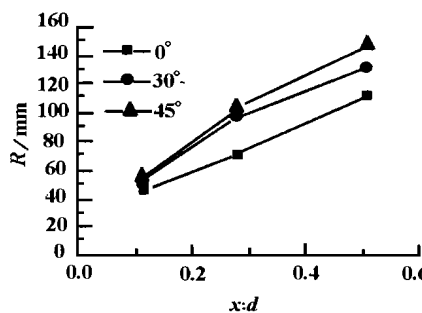


图 4 射流扩展半径受中心扩口角度的影响

在分析结果时,气相采用粒径为 0 ~ 8 μm 的颗粒作为示踪粒子。颗粒相采用粒径为 10 ~ 100 μm 的颗粒作为示踪粒子。颗粒粒径按颗粒个数平均的平均直径 d₁₀,颗粒浓度为颗粒相对数密度 C/C_{max}(单位体积内的颗粒数,C 为每一测点的颗粒数密度,C_{max} 为该截面颗粒数密度最大值)。

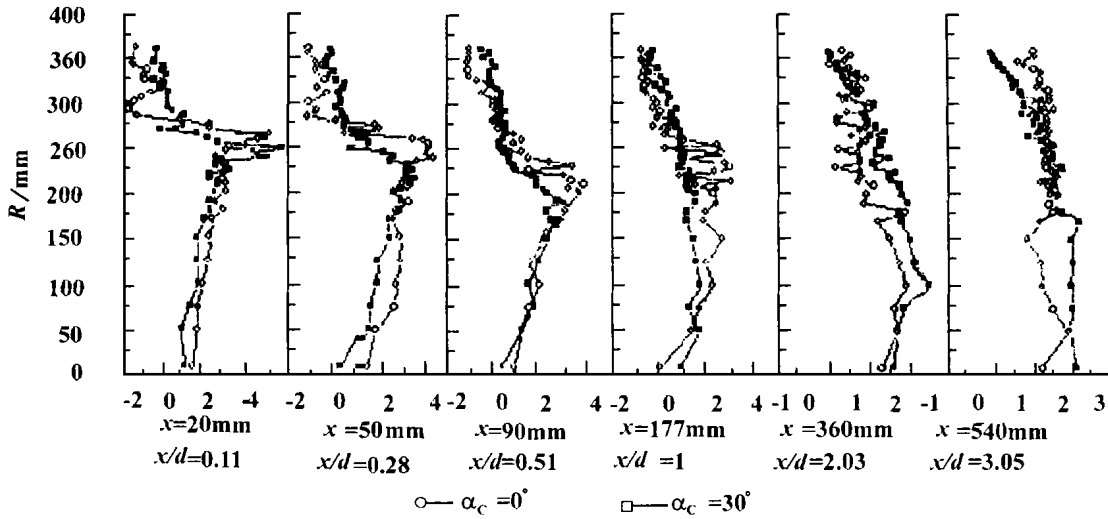


图5 气相切向平均速度(m/s)

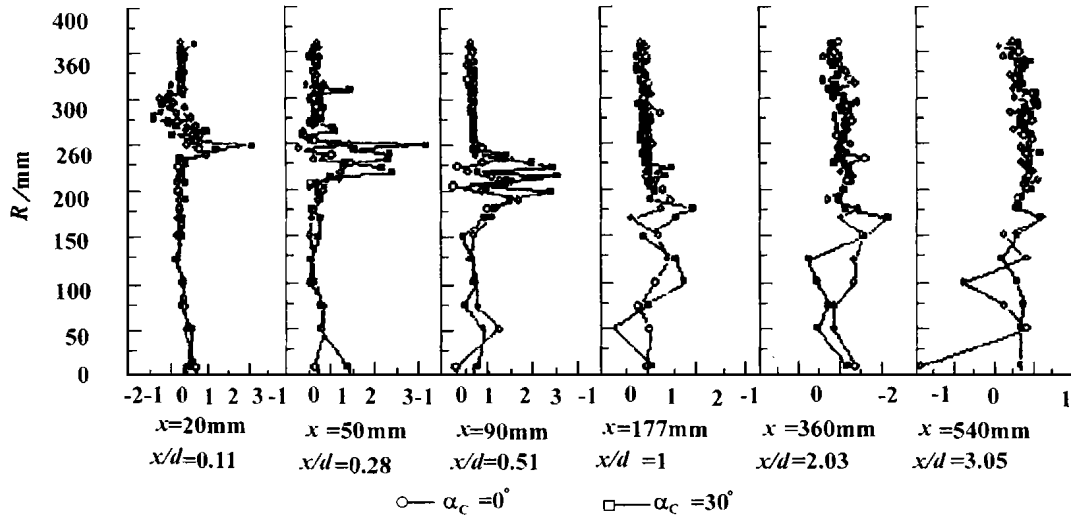


图6 气相雷诺切应力(m²/s²)

的发展似固核区逐渐减弱,切向速度的衰减要比轴向速度快得多。 30° 扩口的切向速度明显低于 0° 扩口的切向速度,这是由于中心扩口角度的增大,使得一次风射流得到扩展,更多的一次风混入二次风中,造成二次风能量损失加大,削弱了二次风出口的旋流强度,降低了切向速度。图6为气相雷诺切应力分布图,从图中可以看出,中心扩

烟气的存在改善了湍流结构,使回流区附近的湍流脉动增大。相对于 0° 扩口, 30° 扩口在出口附近的湍流脉动水平大幅度提高,大大加强了气流在回流区边界附近的质量和热量的湍流输运强度。湍流脉动能量的增强,使煤粉的燃烧反应速度加快、火焰传播速度加大,缩短火焰长度,对提高煤粉颗粒的燃烧效率非常有利。

图3为中心回流区直径随 α_c 的变化规律。中心回流区的直径随扩口扩角的增大而增大很快, α_c 从 0° 增大到 30° 时,其中心回流区直径增大一倍,其回流量也相应增大。图4为射流扩展角随 α_c 的变化趋势,此处射流扩展角是将轴向速度沿径向衰减为该断面最大速度的 $1/2$ 倍位置处作为射流边界而得到的扩展角,称为半速扩展角 $\alpha_{1/2}$ 。由此可见,中心扩口的存在起了钝体的作用,一次风被导向外侧,气流得到了扩展,使得中心区域负压加大,回流区尺寸增大。

图5为气相切向平均速度分布图。由图可见切向速度分布具有典型的 Rankin 涡结构,中部的区域是似固核区,外围很大的区域是自由涡区,随着射流

的存在改善了湍流结构,使回流区附近的湍流脉动增大。相对于 0° 扩口, 30° 扩口在出口附近的湍流脉动水平大幅度提高,大大加强了气流在回流区边界附近的质量和热量的湍流输运强度。湍流脉动能量的增强,使煤粉的燃烧反应速度加快、火焰传播速度加大,缩短火焰长度,对提高煤粉颗粒的燃烧效率非常有利。

从图7的颗粒粒径分布图中可以看出,随着 α_c 的增大,一次风在扩口的导流作用下改变方向,粒径较大的颗粒由于惯性而随气流运动,粒径较小的颗粒则在压力场的作用下进入回流区中,使得回流区内的颗粒平均粒径较小,而主流方向由于大颗粒的存在平均粒径较大。在燃烧过程中由于回流区中温度较高,这些小颗粒容易首先着火,对浓煤粉气流的

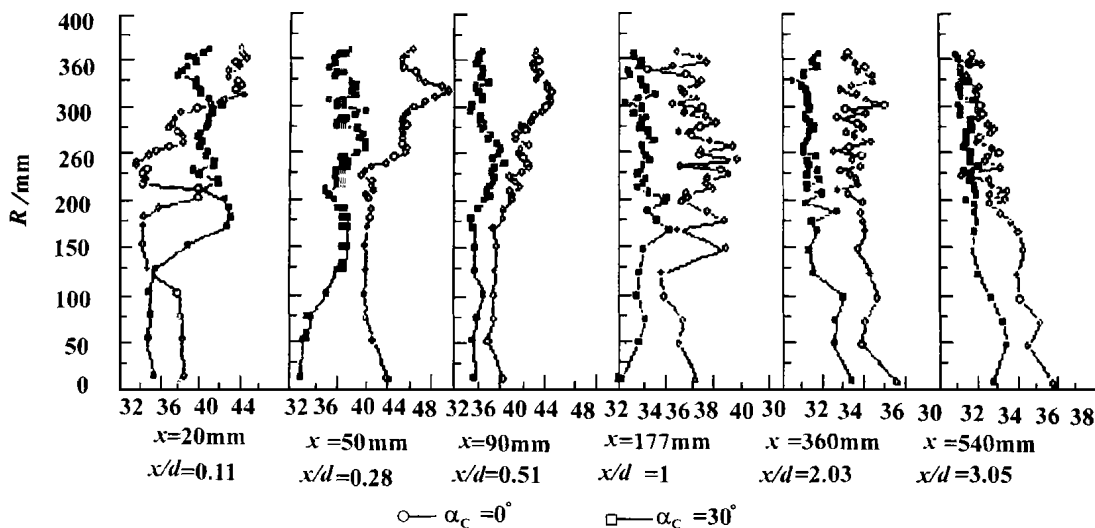


图 7 颗粒平均粒径 (μm)

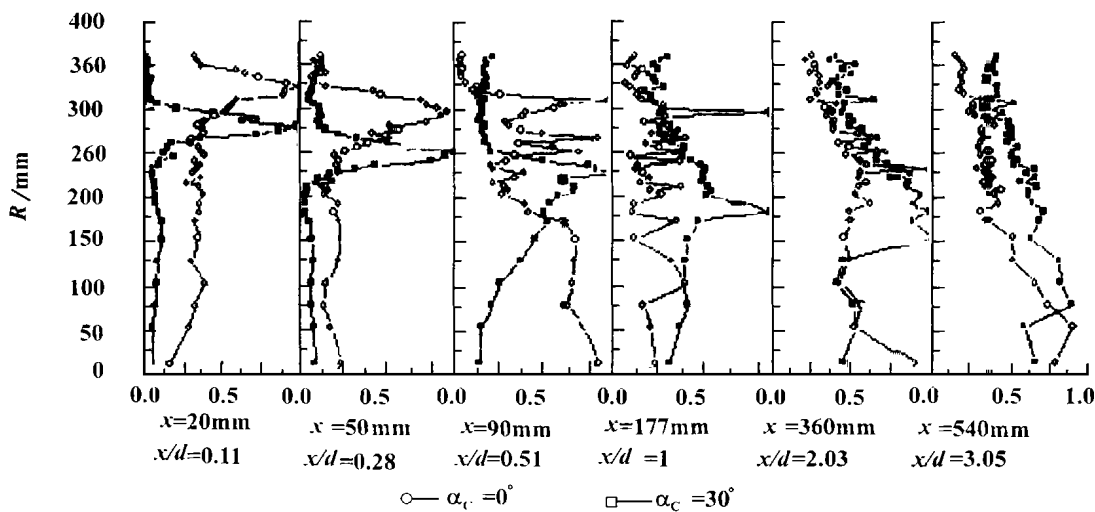


图 8 颗粒浓度分布

着火非常有利。从图 8 的颗粒浓度分布图中可以看出, 随 α_c 的增大, 回流区边界附近的颗粒浓度值增大, 并保持较高的峰值, 这一方面是由于扩口的作用使中心回流区的负压增大, 回流区的负压作用有利于浓一次风的滞留; 另一方面由于回流区边界附近的气固两相轴向速度值很小, 颗粒的惯性作用有利于颗粒的聚集。从图中可见 30° 扩口的浓度峰值较 0° 扩口的浓度峰值在径向上向外移, 但浓度的峰值在回流区边界附近。高煤粉浓度可以缩短着火时间和着火距离^[5-9], 使煤粉气流及时着火, 提高了火焰稳定性, 同时还可以大幅度降低 NO_x 的排放。由前面的分析可知, 回流区边界附近是湍流脉动强烈的区域, 燃烧时中心回流区内温度很高, 这样能将高湍流脉动区域与高浓度煤粉区域、高温烟气的区域相匹

配, 有利于强化煤粉火焰的燃烧强度, 加快燃烧反应速度。在浓煤粉气流着火之后, 再逐渐的与旋流二次风、直流二次风混合, 其火焰的气氛逐渐地由还原性气氛过渡到氧化性气氛, 有利于煤粉的燃尽, 提高了煤粉的燃烧效率。

4 结论

(1) 中心风扩口角度的增大, 使得回流区尺寸增大, 回流量增

大, 能卷吸更多的高温烟气, 有利于强化劣质煤粉的燃烧。

(2) 中心风扩口角度的增大, 提高了回流区边界附近气流的湍流脉动水平, 增强了气流的质量、热量的湍流运输能力, 高湍流脉动区域与高煤粉浓度的区域、高温烟气区域相匹配, 有利于加强煤粉火焰的燃烧强度, 加快燃烧反应速度, 提高火焰传播速度, 使煤粉燃烧效率得到提高。

(3) 中心扩口角度过分的增大, 会使一次风阻力加大; 一、二次风初期混合过于强烈, 削弱二次风的旋流强度, 使中心回流区尺寸变小, 气流湍流脉动水平下降, 不利于煤粉气流的着火和燃烧。过大的中心扩口, 还会形成开式回流, 引起火焰刷墙, 造成炉墙结渣。 (下转 263 页)

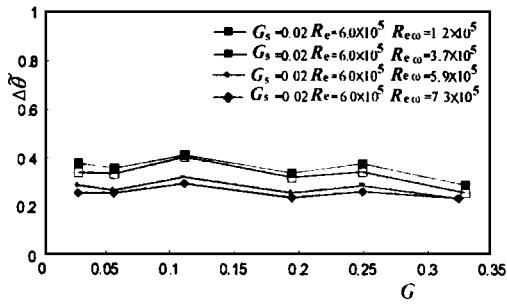


图 10 盘罩间隙对转盘无量纲过余体平均温度的影响

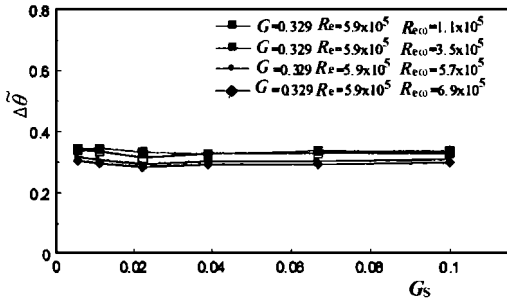


图 11 出气间隙对转盘无量纲径向温差的影响

温差的
影响要
小于对
无量纲
过余体
平均温
度的影
响,其原
因是进
气雷诺
数的增
加主要
反映在
冷气流
量的增
加,盘面
的换热
总体加
强,各处
强化的
相对程
度基本一
样,转盘
内的温
度总体
下降,径
向温差
变化不
大.因此
增加冷
气流量
对减小
转盘的
径向温
差没有
特别明
显的作
用。

盘罩间隙和出气间隙对转盘无量纲过余体平均温度和无量纲径向温差的影响比较小。如图 10 和图 11 所示。

根据实验数据对转盘的冷却效率 η 和无量纲径向平均温差进行了回归。实验研究范围内冷气的温度变化很小,因此可取 Pr 等物性参数为常数,无量纲几何参数除盘罩间隙比 $G(= S_1/R)$ 和出气间隙 $G_s(= S_2/R)$ 外没有改变,因此,它们都不参与回归。回归公式分别为:

$$\eta = 1 - \vartheta_{av}$$

$$= 5.6 \times 10^{-4} Re^{0.47} Re_{\omega}^{0.07} G^{-0.01} G_s^{0.009} \quad (4)$$

$$\Delta\theta = 33.6 Re^{-0.27} Re_{\omega}^{-0.082} G^{-0.018} G_s^{-0.0097} \quad (5)$$

上述公式适用范围: $10^5 < Re_{\omega} < 6.5 \times 10^5$, $1.4 \times 10^5 < Re < 8.2 \times 10^5$, $0.022 < G < 0.459$, $0.011 < G_s < 0.1039$ 。

与 139 组实验数据比较,式(4)有 6 个实验数据落在 $\pm 15\%$ 的拟合精度(分散度)外,式(5)有 1 个实验数据落在 $\pm 15\%$ 的拟合精度外。可以看出,除进气雷诺数外,其它因素对冷却效率和无量纲径向温差的影响均比较小,

4 主要结论

本文对中心进气旋转盘的两个冷却指标进行了实验研究,得到以下主要结论:旋转雷诺数对转盘无量纲过余体平均温度和无量纲径向温差影响较小;进气雷诺数对转盘的过余体平均温度影响较大,而对无量纲径向温差的影响不大。

参考文献

- [1] Haynes C M, Owen J M. Heat transfer from a shrouded disk system with a radial outflow of coolant. J. of Engineering for Power, 1975.
- [2] Owen J M. Fluid flow and heat transfer in rotation disk system. Heat and Mass Transfer in Rotating Machinery, Eds: D. E. Metzger and N. H. Afgan, Hemisphere, Washington, 1984.
- [3] Owen J M. Air-cooled gas-turbine disk; a review of recent research. Int. J. Heat and Fluid Flow, 1988, 19(4).
- [4] 徐国强,曹玉璋,邱绪光. 具有中心进气外缘加热旋转盘的平均换热特性研究. 航空动力学报, 1994, 9(1).
- [5] Wilson M, Piñrow R, Owen J M. Flow and heat transfer in a preswirl rotor-stator system. J. of Turbomachinery, 1997, 119; 364~373.
- [6] 徐国强. 转静系旋转盘腔流动与换热特性研究. [博士学位论文]. 北京: 航空航天大学, 1999.

(渠源 编辑)

(上接 246 页)

参考文献

- [1] 秦裕琨. 一种径向浓淡旋流燃烧器. 中国专利: ZL 93244359, 1993. 1.
- [2] 李争起. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器的工业性试验研究. 动力工程, 1998, 18(4): 63~67.
- [3] 李争起. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器调节特性的试验研究. 中国

电力, 1997, 30(1): 38~41.

- [4] 孙锐. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器流动特性研究及数值模拟. [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998. 9.
- [5] 郭晓宁. 煤粉空气混合物着火温度与浓度关系的理论分析及计算. 动力工程, 1982, (2): 27~31.
- [6] 侯栋岐. 煤粉气流着火特性的测试报告. 哈尔滨发电设备成套设计研究所, 1992.

(渠源 编辑)

Meanwhile, an investigation was conducted of the effect of blade curving on the location of horseshoe vortex and passage vortex formation. A positive curving of the blades has been found to be conducive to a decrease in the transverse pressure gradient at the end wall and a weakening of the end wall secondary flows. Moreover, the blade positive curving will lead to a shift of the initial separation point of the horseshoe vortex to the middle of the flow passage, bringing about a generation of the passage vortex ahead of the anticipated time. The differential scheme selected in this paper is a Godunov one of the third-order precision with TVD properties. The turbulent flow model is a B-L algebraic one after a correction. **Key words:** positive-curved blade, flow field parameter, numerical simulation

中心扩口对径向浓淡旋流煤粉燃烧器出口气固流动特性的影响 = **The Effect of a Central Flared Angle on the Gas-solid Flow Characteristics at the Outlet of a Radial Bias and Pulverized-coal Swirl Burner** [刊, 汉] / Wang Le, Wu Shaohua, Hao Jinbo, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 243 ~ 246, 263

Under the condition of different central flared angles and through the cold-state particle dynamic analyzer (PDA) testing of a radial bias and swirl burner a study was conducted of the burner outlet velocity, pulverized coal particle diameter and concentration distribution. As a result, obtained was the mechanism of the effect of the central flared angle on the gas-solid flow characteristics at the burner outlet. Also analyzed was the influence on the burner performance of the central flared angle. All the above work can provide some reference data and serve as a basis for the engineering application and optimized design of the above-mentioned burners. **Key words:** pulverized-coal swirl burner, pulverized-coal combustion, gas-solid dual-phase flow, particle dynamic analyzer (PDA)

复合型热管长度比的优化计算 = **Optimization Calculation of Length Ratios for a Composite Heat Pipe** [刊, 汉] / Adel M, Hu Yacai, Yuan Hai, *et al* (Energy Source Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 247 ~ 248, 255

A heat exchanger composed of gravity heat pipes with two kinds of cooling fluids has some specific features and merits in engineering applications. This paper presents a brief description of the method for determining the length ratios between the heating and cooling sections. In addition, several calculation examples are also given. **Key words:** composite heat pipe, heat pipe, length ratio

燃煤循环流化床模型与试验研究 = **Experimental Study and Simulation of a Coal-fired Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / Shen Laihong (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, Jiangsu, China, Post code 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 249 ~ 251, 259

Based on the basic research results concerning the gas-solid dual-phase flow of a circulating fluidized-bed and an in-bed gas-solid bias flow model the author has set up a circulating fluidized-bed combustion model suited for different construction parameters. The model has taken into account the return mixing and the circulation process of gas and solid particles in the bed. Also considered are such a variety of factors as coal burning, the generation and dissolution of nitrogen oxides and particle wear action, etc. The results of the experimental study and model simulation on a circulating fluidized-bed combustion test rig are in good agreement with the experimental data. This fully demonstrates that the circulating fluidized-bed combustion system set up on the basis of the gas-solid dense-lean flow model can accurately simulate the combustion process of a circulating fluidized bed. **Key words:** coal, circulating fluidized bed combustion, mathematical model, experimental study

流化床风帽温度分布及其耐热性的试验研究 = **Experimental Study of the Temperature Distribution of a Nozzle Button in a Fluidized Bed and Heat Resistance of the Nozzle Button** [刊, 汉] / Wu Xin, Zhao Changsui, Duan Yufeng, *et al* (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, Jiangsu,