

双旋流气体燃烧器冷态流动特性的实验研究

贾 琼, 刘 鸣, 车得福, 曹子栋

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 利用 IFA300 型二维恒温热线风速仪系统对双旋流气体燃烧器模型的冷态流场进行了实验研究, 测量了流场内不同位置瞬时速度分布及湍流强度特性。研究表明, 该燃烧器能够组织合理的空气动力场, 对负荷变化有较好的适应性。对比不同扩口结构下的流场, 发现安装一定结构的缩放扩口可以更好地促进燃料稳定、高效、清洁燃烧。异向旋转射流不利于燃料与空气的均匀混合, 还会使回流区长度大大缩短, 在设计燃烧器时应避免这种结构。

关 键 词: 旋流燃烧器; 气体燃烧; 热线风速仪; 冷态; 缩放扩口

中图分类号: TK16 文献标识码: A

1 引 言

旋流燃烧器具有稳定、高效、清洁燃烧的特点, 而且结构简单, 具有良好的负荷适应能力, 因此从 20 世纪 70 年代起受到了越来越多的制造商及发电企业的重视和青睐^[1]。

国内外很多学者利用多种测量仪器和实验方法对各种类型旋流燃烧器的空气动力场进行了大量的研究: Dixon 等人利用五孔探针研究了一次风不同旋流强度下旋转射流的流动特性^[2]。Vu 等人利用球型五孔探针和一维恒温热线风速仪测量了同轴共向和反向旋转组合射流的时均流场及湍流特性参数^[3], 发现了这两种流动结构湍流能量的分布规律。李争起利用相位多普勒激光测速仪(PDA)在径向浓淡旋流煤粉燃烧器上研究了齿形中心扩口对气固两相流场的影响^[4], 得出了此结构下颗粒浓度的分布规律。周屈兰利用双通道热线风速仪对两种径向浓淡燃烧器的空气动力场特性和燃烧过程进行了详细的实验研究^[5], 并建立了分别与之对应的数学模型。

气体旋流燃烧器分为中心进气和周向进气两种, 其燃料一般为单一煤气。随着旋流燃烧技术的进步, 气体旋流燃烧器正沿着适合多种可燃性气体

混合燃烧的方向发展。为了研究新型气体旋流燃烧器的气流流动特性, 建立了双旋流气体旋流燃烧器的实验台。本文采用二维热线风速仪对其冷态流场进行了测量, 得出了在燃烧器出口安装不同扩口时空气动力场的分布规律, 并考察了安装缩放扩口时燃烧器对负荷的适应能力, 以期进一步了解安装缩放扩口时燃烧器的稳燃特性, 为多组分气体燃烧器的设计提供详细的实验资料。

2 实验系统及方法

2.1 实验设备及测量仪器

实验所采用的双旋流气体燃烧器模型与实物的比例为 1:2.5, 喷口外径为 $d=364$ mm, 轴向旋流叶片倾斜角为 60° , 其结构如图 1 所示。该燃烧器以焦炉煤气和高炉煤气的混合气体作为主燃料, 结合多管式天然气燃烧器的原理, 将天然气作为二级燃料独立燃烧。其中焦炉、高炉混合煤气通过轴向旋流叶片产生旋转, 空气通过蜗壳产生旋转。采用美国 TSI 公司生产的 IFA 300 型恒温热线风速仪对燃烧器出口流场内的气流速度及湍流特征参量进行测量, 通过飘带示踪法确定空间气流的方向, 利用 1240 型二维探针同时测量旋转射流的轴向和切向速度分量, 并由其配套软件计算出湍流强度。

2.2 实验方法及参数

冷态实验中各入口处的气体均以空气代替, 额定负荷下各实验参数如表 1 所示, 经计算各参数满足相似模化的原则^[6], 因此所得结论适用于实际流场。在燃烧器出口处安装缩放扩口, 通过调节各个入口的风量研究不同负荷(80%、100%、120%)下燃烧器出口的流场特征, 并在额定负荷条件下, 研究不同扩口结构(缩放扩口、无扩口、渐缩扩口)及轴向旋流叶片倾斜方向对流场的影响。

收稿日期: 2006-01-16; 修订日期: 2006-06-07

作者简介: 贾 琼(1982-)男, 河北定州人, 西安交通大学硕士研究生。

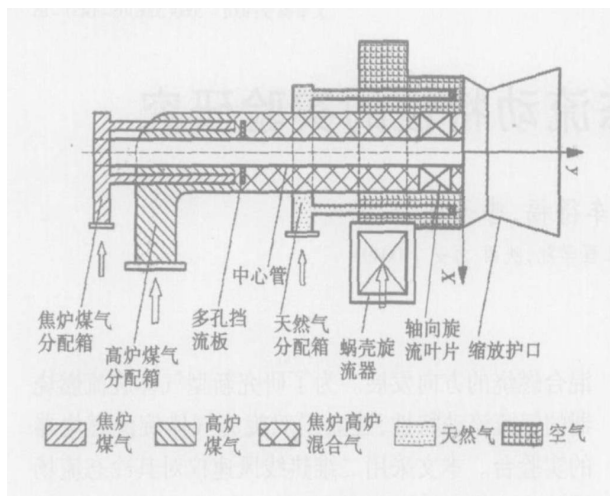


图 1 双旋流燃烧器结构示意图

表 1 额定负荷下主要实验参数

气体	速度/ $m \cdot s^{-1}$	当量直 径/m	流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	雷诺数 ($\times 10^5$)	动量 $/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
焦炉煤气	14.00	0.020	158	0.110	12.57
高炉煤气	20.00	0.138	1980	1.84	24.14
天然气	8.67	0.028	90.5	0.167	10.46
空气	16.88	0.089	3592	1.00	20.37

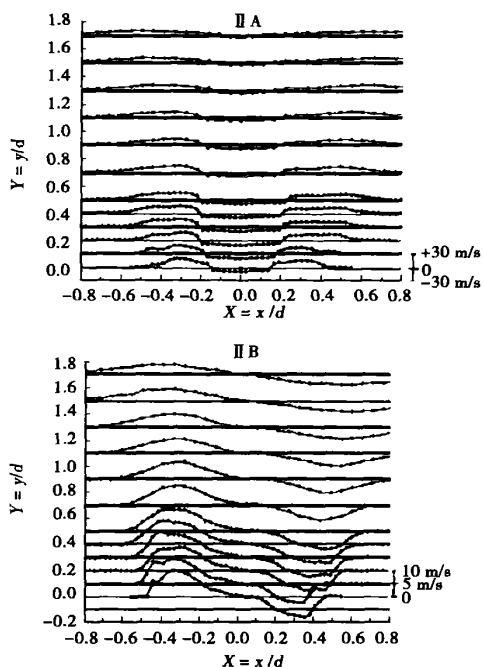
3 实验结果及分析

3.1 负荷的影响

额定负荷下燃烧器出口速度分布如图 2 所示。随着负荷的增加, 轴向和切向速度的大小均会相应增加, 但其分布规律却基本相同。在一定的负荷变化范围内, 燃烧器出口流场的回流区形状几乎不发生变化, 始终保持合理的细长形状, 使得足够的高温烟气回流, 为内层燃料气流的着火提供稳定的热源。轴向速度衰减较慢, 形成较长的火焰长度, 有利于燃烧后期的扰动和混合, 使燃料燃尽。切向速度有一定的张角, 使空气环绕在火焰周围, 形成氧化性气氛, 能够有效地防止水冷壁的高温腐蚀。在上述负荷范围内均能合理地组织炉内空气动力场, 这表明双旋流气体燃烧器对负荷有着较好的适应性。

不同负荷下流场湍流强度的分布如图 3 所示。随着负荷的增加, 湍流强度也相应增加, 各股气流之间的混合能力也相应增强。在回流区顶部 ($Y \approx 1.7$), 湍流强度有不同程度的突降, 且负荷越低, 突降程度越高, 这说明负荷降低, 在回流区边界上流场分布趋于稳定, 不利于各股气流之间的混合。在离喷口较远处, 当负荷高于额定负荷时, 其湍流强度有

明显升高, 因此适当增加负荷有利于燃料后期的燃尽。



I、II、III 表示 80%、100%、120% 的负荷, A、B 表示轴向和切向, 下同; 图中水平线表示各截面上的速度零值, 各测点的速度大小与方向对应右侧速度标尺, 下同。

I、II、III 表示 80%、100%、120% 的负荷, A、B 表示轴向和切向, 下同; 图中水平线表示各截面上的速度零值, 各测点的速度大小与方向对应右侧速度标尺, 下同。

图 2 额定负荷的流场

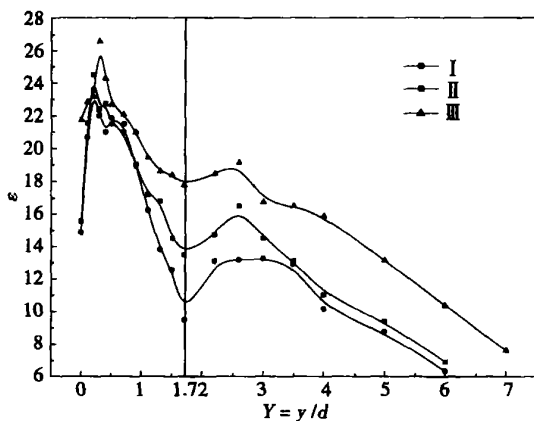


图 3 负荷对湍流强度的影响

3.2 扩口结构的影响

额定负荷时, 将燃烧器出口处的缩放扩口去掉及安装渐缩扩口时所得流场分别如图 4 和图 5 所示。对比图 2、图 4 和图 5, 去掉缩放扩口后射流轴

向速度增大, 但衰减很快, 安装渐缩扩口时, 射流轴向速度比无扩口时要小, 衰减也更快, 但燃烧器出口的切向速度普遍较大, 最大切向速度值几乎是前两

种结构的两倍, 而且衰减也较慢。只是具有较高切向速度的区域较为狭窄, 基本上局限在 $X \approx 0.3$ 范围内的环形带上。

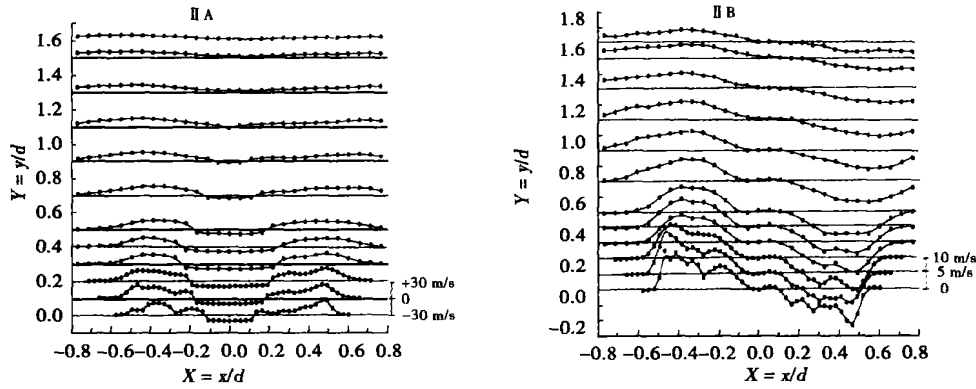


图 4 无扩口时的流场

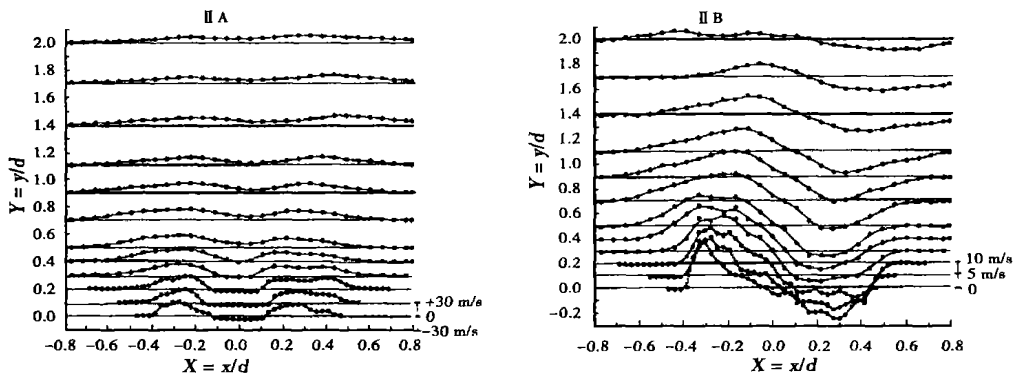


图 5 安装渐缩扩口时的流场

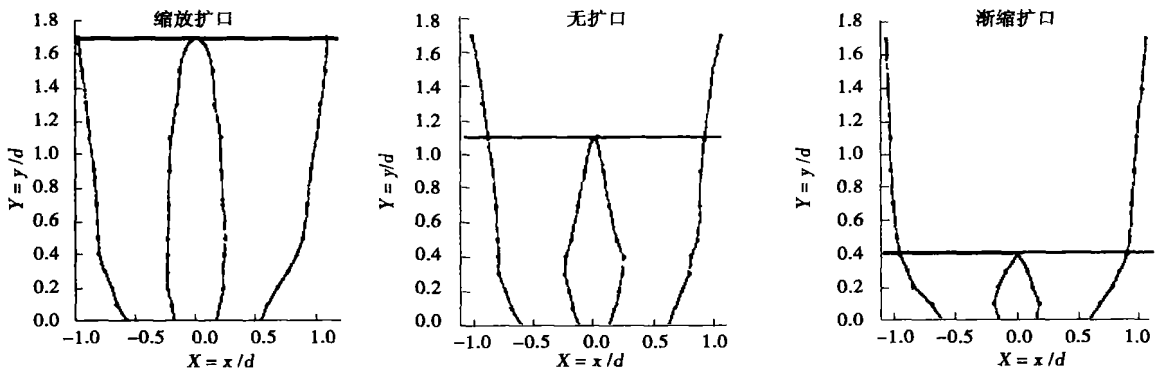


图 6 扩口结构对回流区及射流边界的影响

额定负荷下, 不同扩口结构的回流区及射流边界如图 6 所示。采用缩放扩口的回流区范围最大,

其长度达到 $Y \approx 1.7$, 并且形状细而长, 并具有适中的射流扩展角度, 可以使燃料更为集中, 既有利于气

流的着火燃烧,又有利于防止火焰“飞边”贴墙。去掉扩口后,回流区长度只有 $Y \approx 1.1$ 左右,而安装渐缩扩口时,回流区长度降为 $Y \approx 0.4$ 。通过计算各截面上的回流率可以发现相同负荷下,安装缩放扩口的截面回流率最大,而且衰减速率最慢,有利于卷吸更多的高温介质,组织稳定的火焰燃烧。

额定负荷下,不同扩口结构对湍流强度的影响如图 7 所示。去掉扩口后,湍流强度在出口处就达到最大值,且湍流强度高于安装缩放扩口的情况,但在其回流区内,衰减极为剧烈。安装渐缩扩口后,在燃烧器出口附近其湍流强度整体较低,而在距出口较远处($Y > 2.5$),其整体水平甚至高于安装缩放扩口的情况。主要是由于在出口附近,其切向速度较大,虽然也有衰减,但远离出口后,切向速度仍具有相对轴向速度较高的数值,使得湍流强度较大,有利于气流之间的混合和燃料的燃尽。值得注意的是安装渐缩扩口后,燃烧器出口流场湍流强度的最大值并非出现在回流区内,而是在气体远离回流区后($Y \approx 0.9$)才突然增大到最大值。这主要是因为回流区很小,且回流速度值也很低的缘故。

要在燃烧器出口附近混合程度较差,远离燃烧器出口后才进行充分地混合,因此湍流程度衰减较慢,在非回流区内还高于同向旋转的情况。

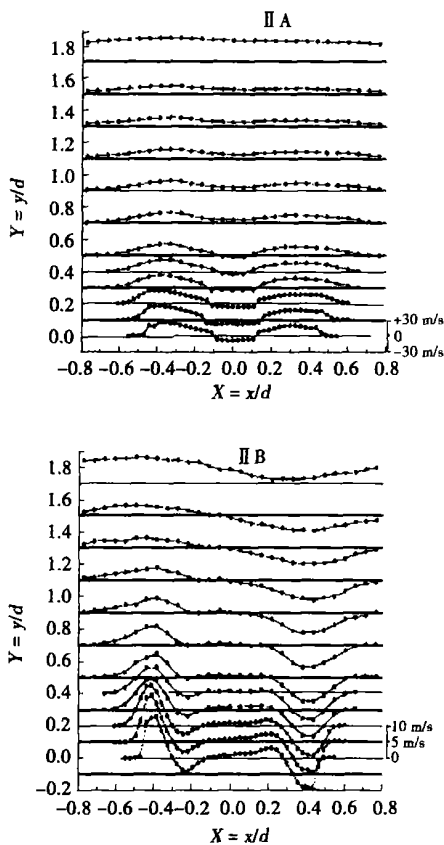


图 8 异向旋转的流场

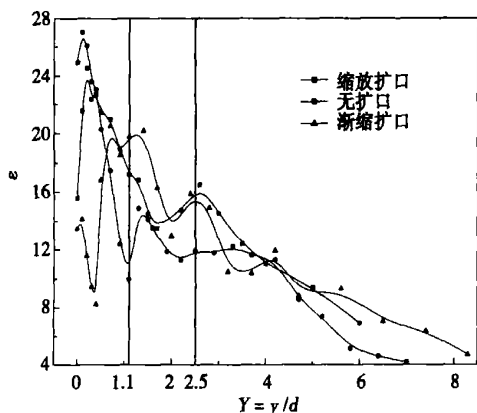


图 7 扩口结构对湍流强度的影响

3.3 异向旋转射流的影响

在额定负荷下,将轴向旋流叶片反向安装后,得到燃烧器出口速度分布如图 8 所示。对比图 2 和图 8 可以发现,异向旋转使回流区长度大大缩短($Y \approx 0.5$),并且沿径向切向速度的方向变化了两次,说明异向旋转的气流混合程度较差,抑制了两股气流之间的扩散和混合。

两种旋转组合方式下湍流强度的分布如图 9 所示。同向旋转的湍流强度在回流区内普遍高于异向旋转的情况,而在非回流区内,湍流强度大小情况恰好相反。究其原因主要是异向旋转时,两股气流主

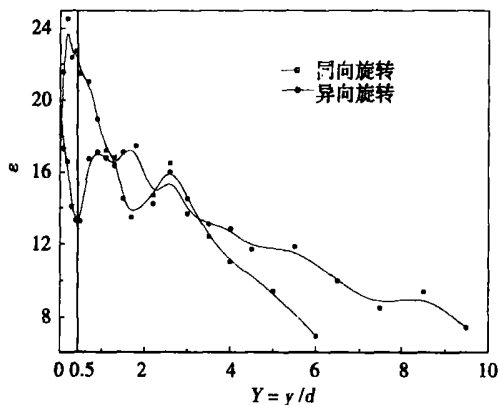


图 9 旋转组合方式对湍流强度的影响

4 结 论

(1) 在一定范围内,负荷的变化对双旋流气体燃烧器出口流场的影响不大,该燃烧器对负荷变化

的适应性较好;

(2) 安装一定结构的渐缩扩口会缩短回流区的长度, 使燃烧与空气的混合推后, 而安装一定结构的缩放扩口可以增加火焰和回流区的长度, 并使燃料与空气在回流区内均匀地混合, 有利于火焰的稳定和燃料的燃尽;

(3) 异向旋转射流将大大缩短回流区的长度, 推迟燃料与空气的混合时间, 降低两者的混合程度。

参考文献:

[1] 庄慧颖. 旋流燃烧器与直流燃烧器的特点比较及发展前景[J].

中国电力, 1998, 31(2): 35-37.

[2] DIXON T F. Aerodynamic studies on swirled coaxial jets from nozzles with divergent quads[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1983, 105(6): 197-203.

[3] BACH T V U. Flow measurement in a model swirl combustor[J]. *AIAA Journal*, 1982, 20(5): 642-651.

[4] 李争起. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器气固两相流动特性及应用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997.

[5] 周屈兰. 径向浓淡式双调风旋流燃烧器的试验研究与数值模拟[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.

[6] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

(何静芳 编辑)

2007 年《热能动力工程》设置栏目启事

一、自 2007 年第 1 期起, 将《热能动力工程》栏目细化, 按专业分栏目。新开设的栏目内容以陆用或船用燃气轮机, 汽轮机、锅炉、传动、及相关的燃烧传热为主, 并刊载与上述专业相关的控制、仿真、能源、新产品和技术应用文稿。

二、新栏目的设置有助于读者和作者了解本刊主报道方向和具体专业范围, 使作者更有针对性投稿, 读者查阅更为快捷方便。

三、栏目细化后, 读者可以很快查到所需专业文章在产学研相结合方向的创新技术和应用成果; 可以充分了解高校科研院所、企业在热能动力工程方面的最新基础研究与其成果在工程实践中的应用。

四、2007 年的《热能动力工程》目次页和版权页进行全新设计, 在纸张色度、颜色、字体上统筹布局, 使读者有良好视觉感, 凸现本刊风格。

五、欢迎科研院所、企业和院校作者为本刊投稿。来稿请用电子邮件发送至 mdlgch703@163.com 热刊编辑部或信函寄到编辑部, 也可登录我刊网站 www.mdlgc.com 了解有关信息。电话: 0451-55654932 55637728 联系人: 孙显辉。

《热能动力工程》编辑部

are the hydrodynamic-loop analytic method for the said boilers, the calculation method and operational procedures of hydrodynamic working points for the boiler as a whole. **Key words:** hot water boiler, natural circulation, hydrodynamic calculation, hydrodynamic-loop analytic method

双旋流气体燃烧器冷态流动特性的实验研究 = **An Experimental Study of Cold-state Flow Characteristics of Dual-swirl Gas Burners** [刊, 汉] / JIA Qiong, LIU Ming, CHE De-fu, et al (Energy Source and Power Engineering College under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 477 ~ 481

An experimental study was conducted of the cold-state flow field of a dual swirl gas burner model through the use of an IFA 300 type two-dimensional constant-temperature hot-wire anemometer system. The transient velocity distribution and turbulent flow intensity at different locations of the flow field were measured. The research results show that the said burner can organize a rational aerodynamic field and have a comparatively good adaptability to load changes. When the flow fields in different diffuser outlet structures are compared, it can be found that installing a convergent-divergent diffuser outlet of certain structure can better contribute to a stable, effective and clean combustion of fuel. A rotating jet flow assuming different directions can be detrimental to a uniform mixing of fuel and air and greatly reduce the length of the return flow zone. Such a structure should be avoided during the design of burners. **Key words:** swirl burner, gas combustion, hot-wire anemometer, cold state, convergent-divergent diffuser outlet

微细化煤粉再燃还原 NO 的反应动力学机制 = **Dynamics Mechanism Governing a NO Reduction Reaction During the Reburning of Superfine Pulverized Coal** [刊, 汉] / LIU Zhong, YAN Wei-ping (Energy Source and Power Engineering College under the North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), SONG Qiang, YAO Qiang (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Power Engineering under Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 482 ~ 486

With blended coals (bitumite and lignite) in three kinds of fineness, Datong-origin bitumite in one kind of fineness and Xingtai origin lean coal in the form of superfine pulverized coal all serving as reburning fuel, and having prepared a simulation flue-gas by using N₂, O₂, CO₂ and NO, an experimental study was conducted of NO reduction by reburning in a 1 300 °C and 1 100 °C EFR (entrained flow reactor) along with an analysis of its chemical reaction dynamics mechanism. The experimental results show that the chemical reaction rate of superfine pulverized coal reburning involving NO reduction is jointly controlled by diffusion-reaction dynamics. Hence, raising the temperature in the reburning zone, using pulverized coal with a high reaction activity as reburning fuel or increasing the fineness of reburned pulverized coal, all these measures can significantly enhance the chemical reaction rate of NO reduction through reburning, thereby properly shortening the residence time of pulverized coal in the reburning zone. However, if the residence time of the pulverized coal in the reburning zone is shorter than 0.6 s, the efficiency of NO reduction will drop drastically. Meanwhile, the pulverized coal burn-out rate will also be reduced. It has been found that with superfine pulverized coal serving as a reburning fuel, the suitable residence time in the reburning zone should be about 0.8 s. **Key words:** superfine pulverized coal, reburning, NO, reaction dynamic mechanism, experiment

循环流化床脱硫塔内流场及气固分离特性数值模拟 = **Numerical Simulation of the Flow Field in a Circulating Fluidized Bed Desulfurizer and Its Gas-solid Separation Characteristics** [刊, 汉] / GAO Jian-min, QIN Yu-kun, GAO Ji-hui, et al (Energy Source Science and Engineering College under Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 487 ~ 490

A numerical simulation was conducted of the gas-phase turbulent flow and particle-phase pulsating flow within the gas-sol-