

循环流化床旋直复合流化下的两相流动试验研究

郝晓文¹, 马春元², 王春冰³, 张立强²

(1. 哈尔滨工业大学 汽车工程学院, 山东 威海 264209; 2 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061;
3. 中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518124)

摘 要: 通过提高塔内混合和物料浓度是提高循环流化床烟气脱硫效率的途径。提出了旋直复合流化方式, 并用 PDA 测量系统对塔内气固两相流场进行测试, 得到了文丘里喉管安装轴向旋转叶片前后脱硫塔体内气固流动规律。结果表明, 非均匀布风的旋直复合流化方式提高塔内切向速度, 塔内的脉动强, 混合好, 增加了塔内颗粒浓度和内循环, 而且表现速度越高的复合流化的综合效果更好。试验结果为烟气脱硫新工艺的结构设计及优化提供了依据。

关键词: 循环流化床; 复合流化; 脉动速度; 内循环

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

引 言

循环流化床烟气脱硫过程发生在脱硫塔内, 因此塔内气固两相流动混合特性是实现有效脱硫的重要因素之一^[1~2]。而流化床入口结构形式对床层影响可以延伸到整个脱硫塔^[3~4], 所以入口结构的设计是改善流化和混合状态并最终影响脱硫效率的重要途径。另外塔内高物料浓度主要靠塔体、出口结构和外部循环等方式实现, 现有文丘里入口流化结构对循环影响较小。因此改进传统文丘里直流流化方式对脱硫装置尤其是大型脱硫装置是十分必要的。

在文丘里直流流化基础上提出了直流与旋流复合的流化方式: 文丘里喉管安装内筒, 内筒和文丘里之间安装轴向旋转叶片, 形成管内外侧旋流与内筒直流复合的流化方式, 内外筒的风量自动分配, 属于衰减旋流流动^[5]。这种流化方式比文献[6]的切向旋流方式加工简单, 布置容易。文献[7]研究了在相同叶片宽度下改变叶片出口仰角和安装位置时的气相流场规律, 所以本文研究同一组旋转叶片在改变流化速度后脱硫塔体内气固流动规律, 并与直流流化进行比较, 为工业脱硫装置提供优化设计。

1 试验系统

试验系统如图 1 所示, 文丘里喉管直径 130

mm, 内筒面积占总面积的 37.9%, 6 片轴向旋转叶片装在文丘里喉管内, 叶片出口与水平方向的平均夹角 42.5°, 旋流数 1.24。塔体直径 $D=219$ mm。

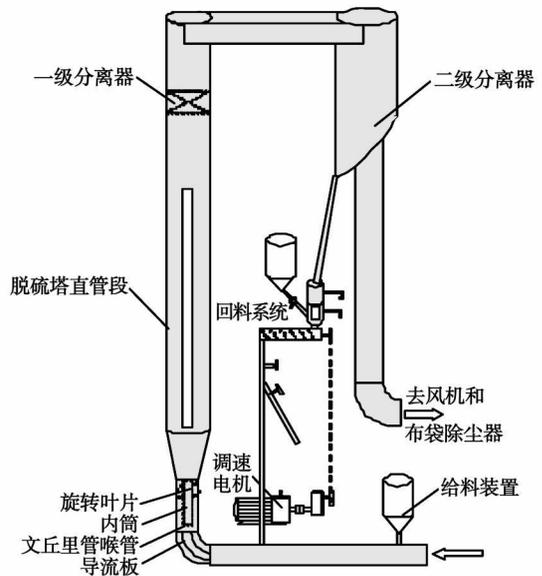


图 1 复合流化试验台系统图

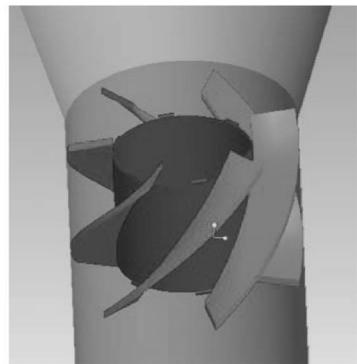


图 2 旋转叶片结构图

循环流化床脱硫塔体的二维流场采用激光粒子动态分析仪(PDA)测量, 因为脱硫塔的截面为圆形,

所以采用后向接收方式。以玻璃微珠为示踪粒子, 密度 $2\ 300\ \text{kg}/\text{m}^3$, 折射率 $1.5 \sim 1.55$, 球形度在 90% 以上。数据分析时将粒径小于 $5\ \mu\text{m}$ 的颗粒作为气相, 大于 $5\ \mu\text{m}$ 的颗粒作为固相。测量截面距塔主体入口 $0.0, 0.5, 1.0, 1.4, 1.9, 2.4D$ 。

2 试验结果及分析

试验中发现, 气相流动时, 塔主体表观速度在 $1 \sim 3\ \text{m}/\text{s}$ 时, 内筒风量占总风量的 $55\% \sim 56\%$ 。加入颗粒后表观速度在 1.94 和 $2.71\ \text{m}/\text{s}$ 时, 对应内筒

风率分别为 59% 和 68% , 入口浓度为 76.34 和 $55.71\ \text{g}/\text{m}^3$, 因此是一种不均匀布风的流化方式。

2.1 轴向平均速度和脉动速度分布

图 3 ~ 图 7 中 (a)、(b) 的表观速度 $1.94\ \text{m}/\text{s}$; (c)、(d) 的表观速度 $2.71\ \text{m}/\text{s}$ 。轴、切向相对速度为测量速度与表观速度的比值。

传统文丘里直流流化时, 如图 3 所示, 受渐扩段影响, 轴向速度在塔体上游中心区域朝壁面呈下降趋势, 在约 $r/R \geq 0.7$ 时, 表现出剧烈的轴向速度梯度, 这与文献[8]得到的结论类似。表观速度增加, 塔体上游轴向速度分布平缓。

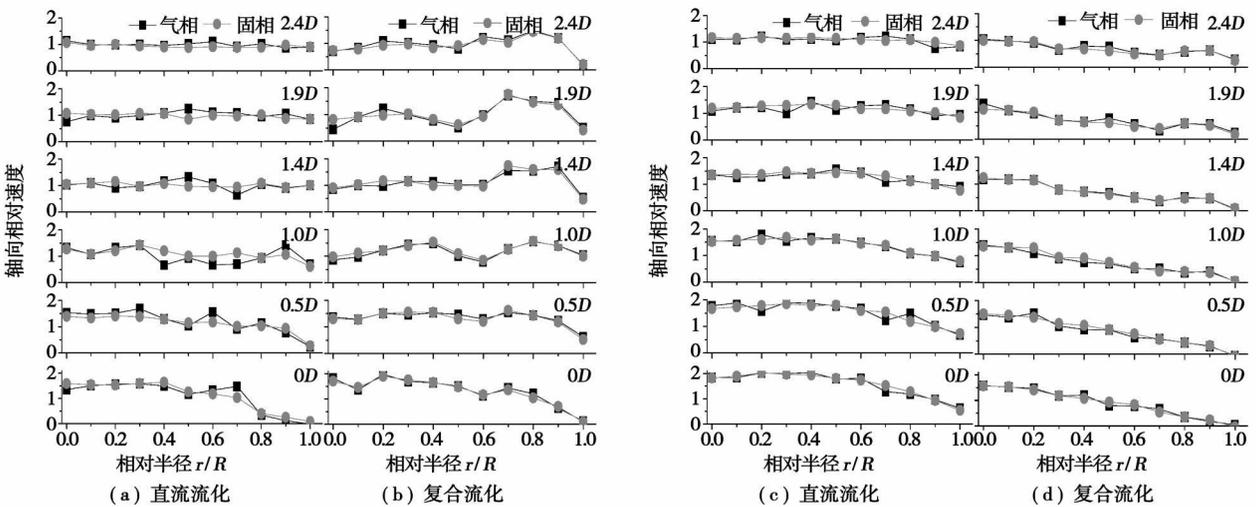


图 3 轴向速度分布图

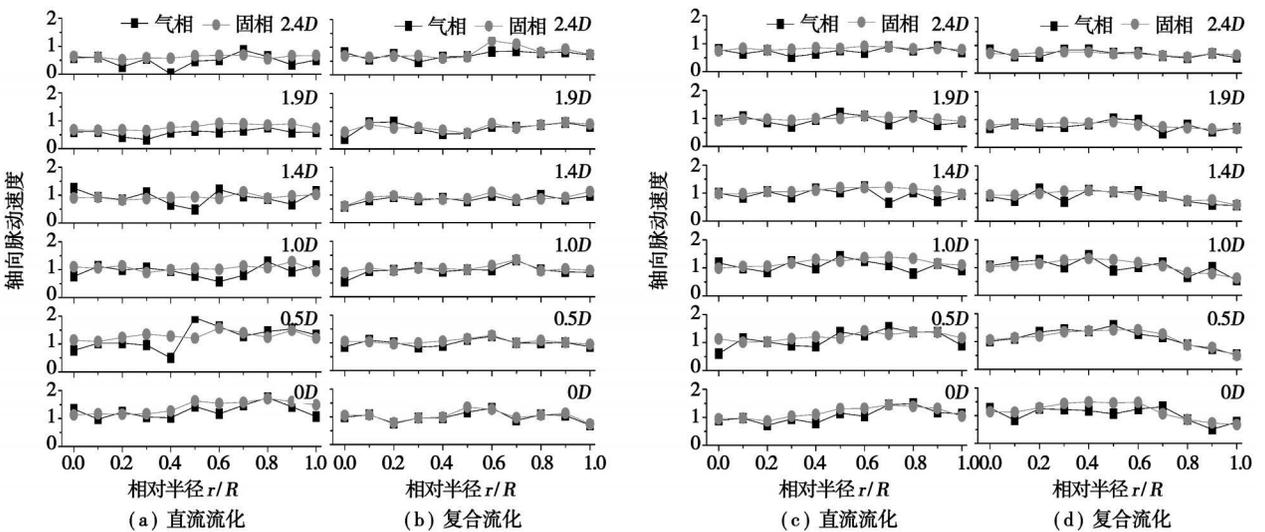


图 4 轴向脉动速度分布图

旋直复合流化后, 塔体上游的轴向速度沿径向接近线性下降, 由于文丘里喉管内筒风率增大, 在壁面有更低的速度。表观速度增加, 内筒中心风率增加了

9% , 所以塔体上游轴向速度梯度增大。随高度增加, 轴向速度沿径向分布变的平坦, 中心平均速度下降。由于气-固相互作用和影响, 固相获得足够加速度,

所以气固相有均一的分布,气固相速度小。

颗粒的脉动速度(RMS 平均值)在很大程度上反映了床内颗粒和气体的混合情况,在颗粒脉动速度较大的区域,颗粒和气体掺混强烈,较好的气固掺混有利于气固之间的传热和传质,这对于提高脱硫效率是有利的^[9]。

从图4可以看出,两种流化方式下的轴向脉动速度较大,但是沿径向的变化不大。随着高度增加,脉动速度逐渐减小。提高表观速度,可以提高轴向平均脉动速度,所以混合更好。

2.2 切向平均速度和脉动速度分布

直流流化时,如图5所示,所有测量截面的切向速度都很小。

口角,外部气流旋转强一些,因此接近壁面的切向速度最强。在文丘里渐扩段内直旋流风提前混合,塔体上游切向速度比对应位置均有所提高,切向输送被强化,有利于热质交换。切向速度在 $0 \leq r/R \leq 0.4$ 的中心区域较小且变化不大,在 $r/R > 0.4$ 的接近壁面区域迅速增加,接近壁面开始下降。随气流流动,塔体中上部仍有高于直流流化的切向速度,这与文献[10]得到的结果相同。在试验的表观速度内,表观速度增加,旋流风量更少,但是最大切向速度稍微增加,而且切向速度衰减变慢,所以表观速度增加,旋流效果提高。

直流流化时,在较低的切向速度下,塔体上游表现出较大的气固相速度。复合流化后切向速度增加,固相获得更高加速度,气固相速度减小。

复合流化后,由于叶片内部出口角小于外部出

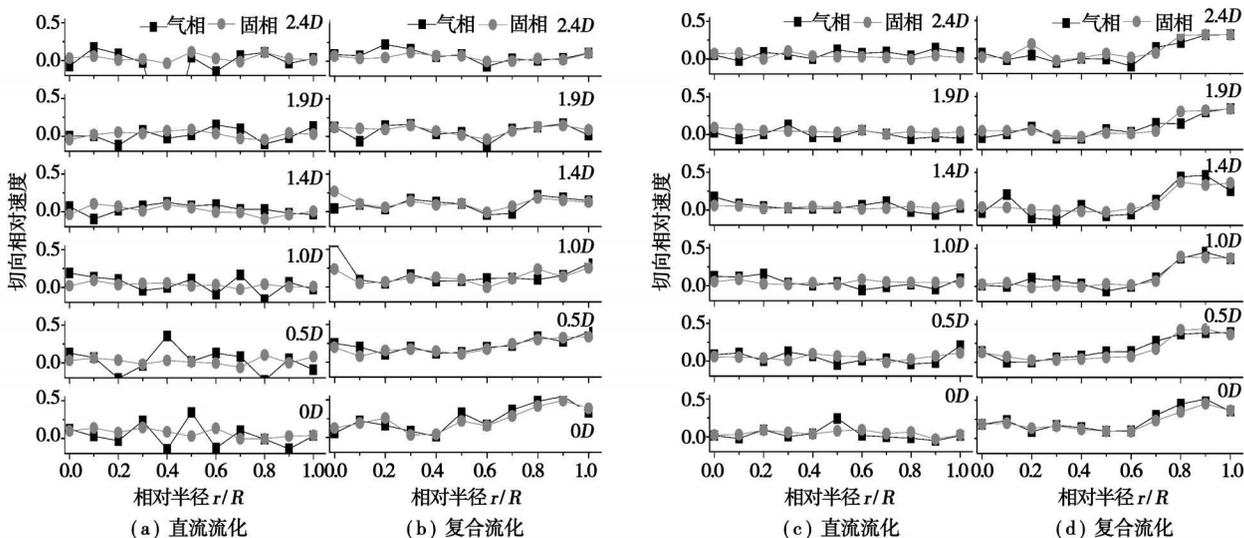


图5 切向速度分布图

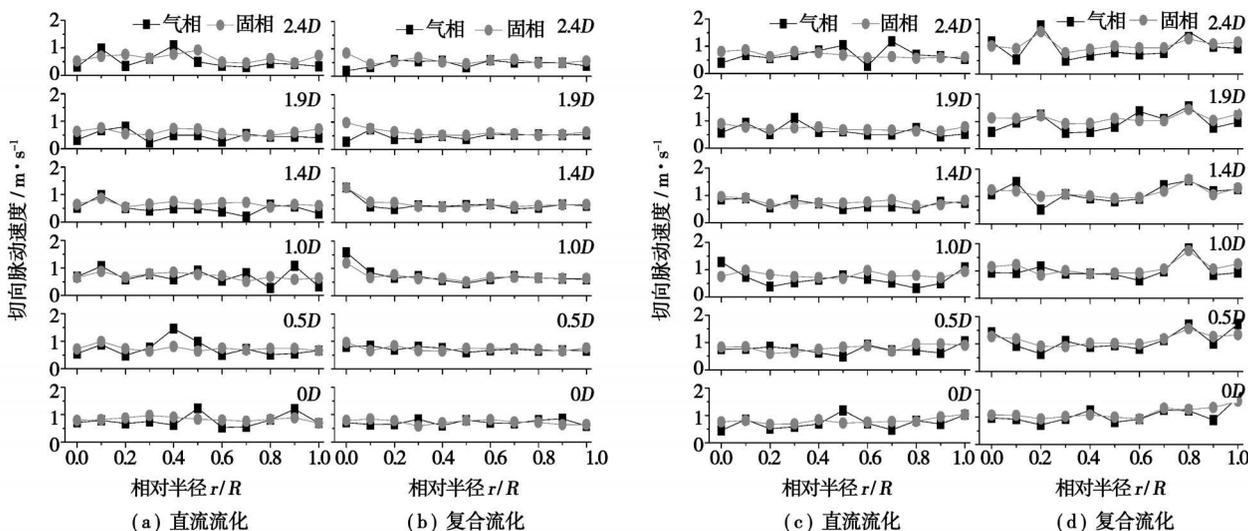


图6 切向脉动速度分布图

从图 6 可以看出, 提高表观速度, 采用旋直复合流化都会提高切向脉动速度。复合流化的切向脉动在接近壁面处达到较大值, 表观速度 2.71 m/s 时更明显。主要原因是离壁面稍远的颗粒由于离心力的作用向壁面方向移动, 而紧靠壁面的颗粒向离开壁面的方向移动。因此, 在靠近壁面的流体层中, 离心力的作用增强了切向脉动, 湍流混合加强。

2.3 颗粒粒径和相对体积流量分布

直流流化时, 如图 7 所示, 沿半径方向的粒径变化不大。复合流化后由于旋转运动的离心作用, 在所有测量截面从中心到壁面的粒径逐渐增加, 在壁面有最大值。表观速度提高, 切向速度增加, 粒径梯度增大。

颗粒相对体积流量是颗粒体积流量 (PDA 系统测量值) 与入口平均颗粒体积流量 $1.0 \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ (直流流化、表观速度 1.94 m/s) 的比值, 颗粒体积流量是 PDA 系统得到的结果, 其意义是单位时间通过

单位截面积的颗粒体积。直流流化时, 中心风速高, 气流流量大, 携带的颗粒多, 所以颗粒体积流量最高, 壁面体积流量高是颗粒在壁面的高浓度带来的, 所以沿半径增加方向流量先减小而后在壁面稍微增加。表观速度提高, 虽然入口平均浓度降低, 但是表观速度增加仍使每个测量截面的颗粒平均体积流量有所提高。

复合流化后, 旋转运动使颗粒停留时间增加, 所以沿半径增加方向, 体积流量逐渐增大, 在壁面附近迅速升高, 比中心增加了几十倍。表观速度上升, 颗粒体积流量减小, 但除了中心外其余点的流量相比直流流化仍显著提高。沿径向的轴向速度变化规律与体积流量相反说明了塔内颗粒平均浓度显著提高, 因此通过旋直复合流化方式可以增强颗粒内循环。

塔入口气固滑移速度低和颗粒体积流量沿半径增加的规律都说明旋转叶片内有大量颗粒流动, 叶片没有显著的阻碍作用。

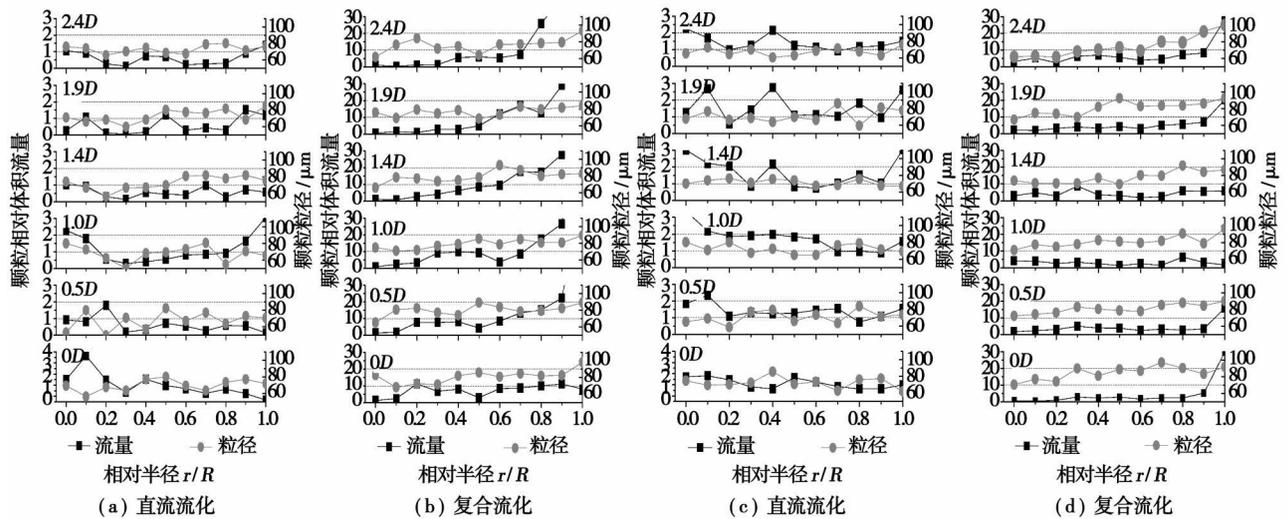


图 7 相对体积浓度和粒径分布图

通过旋流提高物料停留时间、浓度和内循环, 旋直复合流化方式可以增加钙利用率, 提高脱硫效率, 降低系统对外循环的依赖。所以在脱硫工程中选择阻力、体积小的外分离器, 从而降低造价, 降低占脱硫系统阻力 $2/3$ 的外循环阻力^[1], 在某些用地紧张的脱硫改造工程中甚至可以取消外分离器。

3 结论

(1) 旋直复合流化提高了塔内直流流化时很小的切向速度, 塔体上游近壁区的切向速度最大。表观速度提高, 切向速度增加, 旋流衰减减缓。

(2) 两种流化方式的轴向脉动较强。提高表观速度, 采用复合流化可以提高塔内切向脉动速度, 增强混合。脉动随距离增加降低。

(3) 复合流化时的旋转流动导致粒径和颗粒体积流量沿径向逐渐增加, 提高了颗粒在塔内的停留时间从而提高塔内内循环, 增加颗粒浓度。

(4) 综合来说, 较高表观速度的复合流化效果更好。

参考文献:

[1] 魏星, 李伟力, 凡凤仙, 等. 脱硫塔气固两相流场优化的数值

- 模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 12-18.
- [2] 何大阔, 王福利, 李振中. 循环流化床烟气脱硫效率的研究[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 582-586.
- [3] WEINSTEIN H, FEINDT H I, CHEN L, et al. Riser gas feed nozzle configuration effects on the acceleration and distribution of solids // Fluidization VIII Proceedings of the Eighth Engineering Foundation Conference on Fluidization[C]. France, Tour, 1995. 121-127.
- [4] 胡金榜, 李艳平, 李进龙等. 循环流化床脱硫器文丘里式入口对流动特性的影响[J]. 天津大学学报, 2005, 38(3): 225-238.
- [5] MARTEMIANOV S, OKULOV V L. On heat transfer enhancement in swirl pipe flows[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2379-2393.
- [6] 郝晓文, 马春元, 黄盛珠, 等. 循环流化床脱硫塔直/旋流复合流化下的两相流场试验研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 497-500, 505.
- [7] 郝晓文, 马春元, 张立强, 等. 内旋/直流复合流化下循环流化床的脱硫[J]. 动力工程, 2007, 27(4): 596-600.
- [8] 董 勇, 马春元, 秦裕琨. 烟气脱硫循环流化床内气固流动的PDA 试验研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(5): 450-453.
- [9] 何 鑫, 李定凯, 邓治国, 等. 向上射流悬浮床内气固两相流场实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(2): 109-116.
- [10] YILMAZ M, COMAKLI Ö, YAPICI S. Enhancement of heat transfer by turbulent decaying swirl flow[J]. Energy Conversion and Management, 1999, 40: 1365-1376.
- [11] 赵旭东. 双循环流化床烟气悬浮脱硫技术工业化试验及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.

(编辑 韩 锋)

新机组、新设计

Siemens 的 H 级燃气轮机

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2008 年 6 月号报道, 新的 SGT5-8000H 燃气轮机正在全负荷实际运行条件下连接到电网的装置中进行试验。

Siemens Energy 已对在位于德国巴伐利亚的 Irshing 市 E. On 电站的原型设计装置内新的 340 MW SGT5-8000H 燃气轮机开始进行热态试验。SGT5-8000H 是 Siemens 推出的一款最新型的大功率高效率燃气轮机。

IPP(独立的电力生产者)越来越注重运行的灵活性、高效率和高可靠性, 以便在市场中获得竞争的优势。

这些因素已促使 Siemens Energy 把新燃气轮机研制成一种完全空气冷却的、比蒸汽冷却更灵活的并基于能保证最高可靠性的机器。优化冷却空气分布、减少内部漏泄并略微增加燃烧温度已允许 SGT5-8000H 达到 39% 简单循环效率, 并允许以 530 MW SCC5-8000H1S 单轴动力岛配置的联合循环效率超过 60%。在把 SGT5-8000H 提供给市场前, 公司已决定在电网连接的电厂内实际的运行条件下全负荷试验样机。

SGT5-8000H 是一种重型燃气轮机, 其特点是一种轮盘式转子结构, 具有 15 个压气机级和 4 个涡轮级, 利用单个的拉杆保持在一起。轴流压气机的空气流量为 800 kg/s、压比为 19.2:1; 涡轮排气流量为 820 kg/s, 排气温度为 625 °C。排气以 50~55 m/s 的速度通过轴向扩压器通到烟囱。

压气机静子由一列可变的进口导叶和前三列可转导叶组成, 这就允许空气流量随涡轮负荷变化, 从而在下降到 55% 负荷的部分负荷下也能保持高的效率。

环状燃烧室装有 16 个板片式燃烧器, 这些燃烧器在 F 级燃气轮机上已能够达到单位数的 NO_x 和 CO 排放。

内部漏泄直接影响到燃气轮机的总效率, 可用先进的密封系统, 把这种漏泄减到最小。

(吉桂明 供稿)

off-design condition under the mode of “determining power generation on the basis of heating (cooling) demand”, thus revealing the off-design operating performance of the system under various regulating methods. It has been found that a recuperation adjustment can accommodate a relatively wide range of cooling and heating load regulation. Therefore, the micro gas turbine-based cogeneration system is particularly suitable for the occasion when the cooling and heating load undergoes a great change while the electric power load in the system is relatively stable. To keep a comparatively high performance of the system when operating at off-design conditions, in case of an increase of the cooling and heating load, the electric power regulation should be adopted as a first priority, followed by the recuperation regulation as a second choice and supplementary firing regulation as a last resort. When the cooling and heating load decreases, a reverse regulation order should be chosen. The research results can well provide useful reference and guidance for the design and operation of micro gas turbine-based CCHP cogeneration systems. **Key words:** micro gas turbine, cooling, heating and power cogeneration system, off-design performance

循环流化床旋直复合流化下的两相流动试验研究 = **Experimental Study of Two-phase Flows in a Circulating Fluidized Bed under a Rotating and Straight Compound Fluidization** [刊, 汉] / HAO Xiao-wen, (College of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, China, Post Code: 264209), MA Chun-yuan, ZHANG Li-qiang (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), WANG Chun-bing (ZHONG-guang Nuclear Engineering Design Co. Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 620 ~ 624

To increase in-tower blending and material concentration represents an approach for raising the flue gas desulfuration efficiency of a circulating fluidized bed. The authors have proposed a rotating and straight compound fluidization mode and measured gas-solid two-phase in-tower flow field by using a PDA (Phase Doppler Anemometer) measurement system. Obtained was a law governing the gas-solid two-phase flows in a desulfuration tower before and after axial rotating blades were installed in a Venturi throat. It has been found that the non-uniform air distribution as characterized by the rotating and straight compound fluidization mode can help increase the tangential speed in the tower, leading to an in-tower strong pulsation, good mixing and resulting in a higher in-tower particulate concentration and an increased inner circulation. In addition, a higher superficial speed can bring about a better comprehensive effectiveness of the compound fluidization. The experimental results can provide an underlying basis for the structural design and optimization of new technologies for flue gas desulfuration. **Key words:** circulating fluidized bed, compound fluidization, impulsive speed, inner cycle

串联型化工动力多联产系统主导因素与变工况特性 = **Leading Factors and Off-design Operating Characteristics of a Tandem Type Chemical-industry Power Polygeneration System** [刊, 汉] / FENG Jing, NI Wei-dou, LI Zheng (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 625 ~ 629

A polygeneration system having electric power as one of its main products, will, as a result, unavoidably face load variation problems during its operation. From the viewpoint of load variations to design a polygeneration system capable of meeting the requirement of an electric grid, the authors have through a detailed simulation analysis, come to emphasize two leading factors influencing the load variation capacity of a tandem type polygeneration system, namely, designed power-chemical production ratio and synthetic unit capacity surplus degree. In the form of a four-quadrant chart, shown was a relationship between the system design parameters and system product output on the one hand and the load variation capacity on the other. In addition, the characteristics of the system in question during a load variation were further analyzed, especially concerning the case when the fuel gas H_2/CO of the gas turbine increases with a decrease of the electric power load. **Key words:** polygeneration system, load variation, methanol synthesis, four-quadrant chart, leading factor

气液两相流垂直冲刷错列管束漩涡脱落特性的实验研究 = **Experimental Study of Vortex Shedding Characteristics of a Gas-liquid Two-phase Flow Vertically Sweeping Across a Staggered Tube Bundle** [刊, 汉] / ZHOU Yun-