

# 鼓泡式烟气脱硫原理性试验台气体流动冷模试验

仲兆平, 金保升, 兰计香, 谭效德

(东南大学 洁净煤电与燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 描述了鼓泡式烟气脱硫原理性试验台气体流动冷模试验及结果。试验发现, 对管外喷射, 三种试验管型中底端封口的喷射管鼓泡层高度和压力降的变化都非常稳定; 对管内喷射, 随喷射速度和喷射管插入深度的变化, 喷射器压力降波动很大, 很不稳定。因而建议工程应用时采用管外喷射。采用 PIV 仪器对底端封口喷射管管外喷射的速度场进行测定, 试验发现, 在气液充分混合区域内, 气泡的运动轨迹非常复杂, 形成大量的涡团, 气液剧烈扰动; 在速度超过 16 m/s 涡团主要存在管壁附近, 中间气体形成腾涌, 对气液接触非常不利。

**关 键 词:** 鼓泡; 烟气脱硫; 气体流动; 冷模试验; PIV(粒子成像速度仪)

中图分类号: X511; TQ053 文献标识码: A

## 1 引 言

烟气脱硫技术 (FGD) 技术是目前控制燃煤电厂 SO<sub>2</sub> 气体排放最有效和应用最广泛的技术<sup>[1~3]</sup>。由于经典的石灰石/石膏法烟气脱硫投资和运行费用高, 近年来, 许多单位进行了大胆的探索, 以降低脱硫工艺的投资和运行费用, 比较突出的有日本千代田公司 (Chiyota) 开发的 CT-121 工艺<sup>[4]</sup>。与经典湿法脱硫相比, 该工艺取消了液体喷淋装置和再循环泵, 简化了工艺, 降低了成本和能耗, 作者在此基础上开发出鼓泡式烟气脱硫装置。本文主要介绍了该工艺原理性试验台上气体流动冷态模拟试验的试验结果。

## 2 冷模试验装置和试验方法

试验装置由送风系统、混风设备、反应器主体设备、测量系统组成。设计遵循了可视化的原则, 反应器主体用有机玻璃做成。图 1 是试验装置的系统

图。反应器主体是直径为 0.108 m 的筒体, 共分为上、中、下三段, 图 2 是采用管外(左图)和管内(右图)两种烟气喷射方式时的示意图。下筒体长 1 m。其侧面连接一个细长加液管, 用皮管连接一个大漏斗连续加液, 和底端的放液管相配合达到浆液循环的目的。在下筒体中上部连有一个小细管, 采用管外鼓泡时, 可以用来测定反应后气体的压力(如图 2 中左图), 采用管内鼓泡时可以用来测定进气压力(如图 2 中右图)。中筒体只在管外喷射时用, 其内部有 3 根通气管, 从反应液里出来的气体只能从通气管中进入上筒体。中筒体的侧壁连接带有法兰的一段短管, 为气体的入口管, 如图 3 所示。

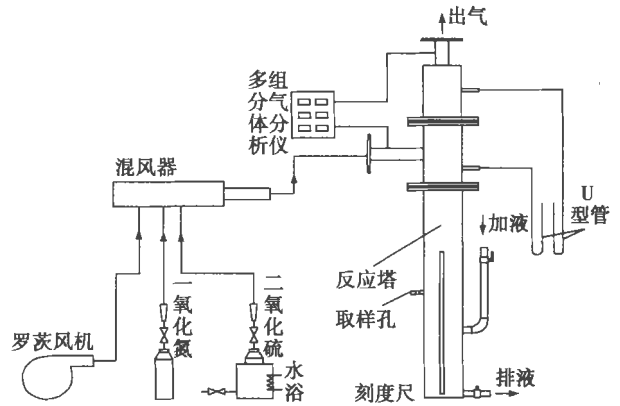


图 1 原理性试验装置系统图

喷射管是整个反应器的关键部件。它由有机玻璃管制成。喷射管的顶端车有螺纹, 可以旋入中筒体中下盖板的螺孔。喷射管的末端沿周长均匀开有狭长的缝隙, 底端有三种形式(封口、敞口、锥体开口), 每种形式都有 3 根, 供管外喷射试验用。另外还有一组(3 根)管径较大的喷射管, 做管内鼓泡时

收稿日期: 2002-11-26; 修订日期: 2003-05-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G19990221053); 教育部高等学校青年教师基金资助项目(J0030); 东南大学洁净煤电与燃烧技术教育部重点实验室访问学者基金资助项目(B001312)

作者简介: 仲兆平(1965-)男, 江苏东台人, 东南大学教授。

使用。

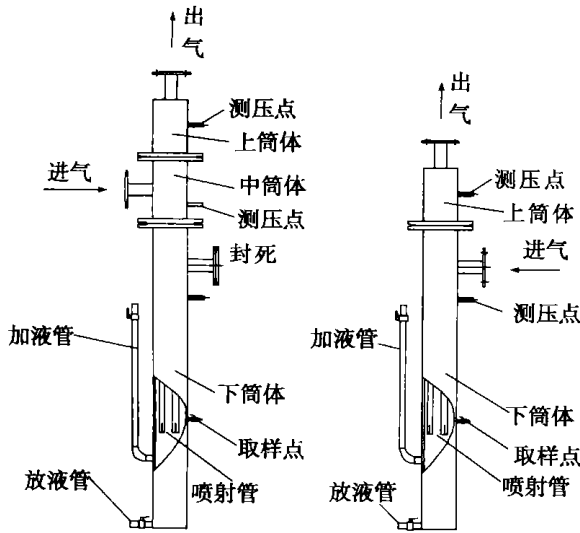


图 2 反应器主体结构示意图

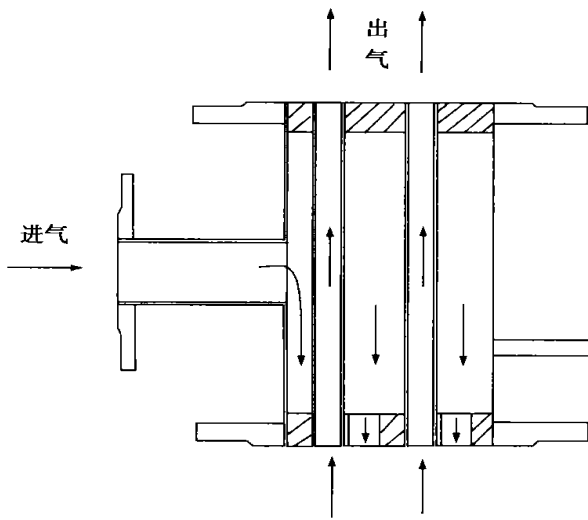


图 3 中筒体气体流程图

流量由转子流量计计量, 反应器压力降用 U 型差压计进行测定。利用丹麦 Dantec 公司生产的 Flow Map 型 PIV 仪 (Particle Imaging Velocimetry, 粒子成像速度仪) 对反应器内的气相流场进行测量。

为便于流场测量, 试验中液相采用水为介质。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 管外喷射试验

##### 3.1.1 喷射管不同插入深度的比较

图 4 是三种喷射管在喷射速度为 10 m/s 时, 鼓

泡层高度随喷射管插入深度的变化规律的比较。从图中可以看出: 随着喷射管插入深度的增加, 鼓泡层的高度基本上是线性增加的, 对于三种管型, 在开始测量的 0.1 m 深度时, 底端封口喷射管的鼓泡层高度稍微有点低, 在插入深度 0.25 m 时, 底段锥体的喷射管比其他两种稍微有点低, 但是三种管型的差距小于 0.02 m。图 5 是三种喷射管在喷射速度为 10 m/s 时, 喷射器压力降随喷射管插入深度的变化规律的比较。由图 5 可以看出底端不封口的喷射管在插入深度 0.1 m 时比其它两种管型压力降要大, 约在 500 Pa 左右, 试验中还发现底端不封口时, 液面非常不稳定。由图中还可以看出底端锥体的喷射管在各个插入深度都比底端封口的压力降要高。总体看来, 底端封口的喷射管压力降较小, 并且也比较稳定。

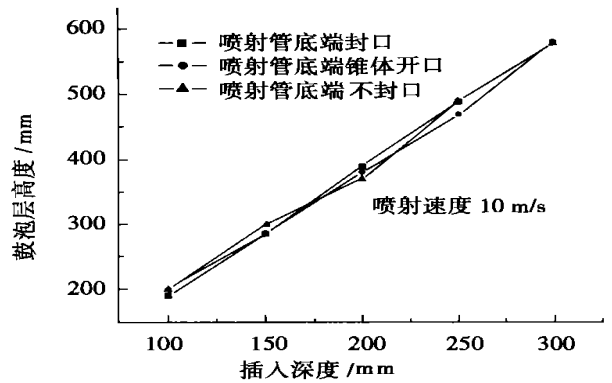


图 4 插入深度对鼓泡层高度的影响

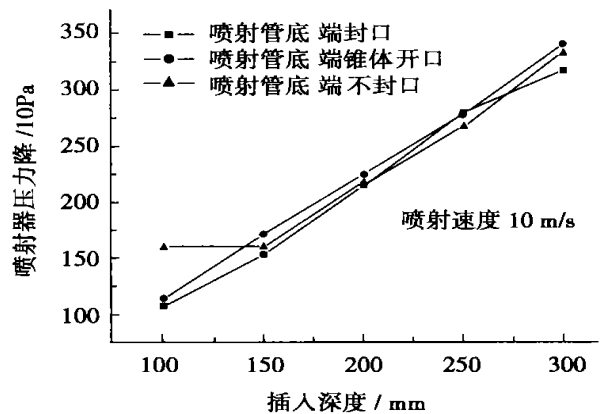


图 5 插入深度对喷射器压力降的影响

##### 3.1.2 不同喷射速度的比较

图 6 是三种喷射管在插入深度为 0.15 m 时, 喷

射器压力降随喷射速度的变化规律的比较。由图可以看出,速度较低时,底部不封口的喷射管压力降最小,底端锥体的喷射管压力降最大,差距在 200 Pa 左右;但是随着喷射速度的增加,当速度大于 10 m/s 时,底端封口的喷射管压力降开始最低;当速度大于 14 m/s 时,底端不封口的喷射管压力降变为最大。当喷射速度在 20 m/s 时,差距在 400 Pa 左右。结合试验得到的鼓泡层高度随喷射速度的变化规律,发现底端封口的喷射管效果最好。

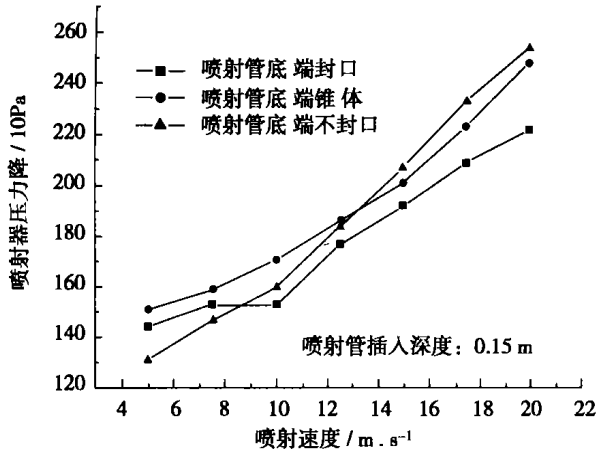


图 6 喷射速度对喷射器压力降的影响

### 3.2 管内喷射试验

采用管内喷射时,喷射管的管径比管外喷射时大,试验采用底部不封口的有机玻璃管,控制进口的喷射速度在 1~5 m/s 之间,喷射管在液面静止时的浸没深度在 0.02~0.1 m 之间变化。

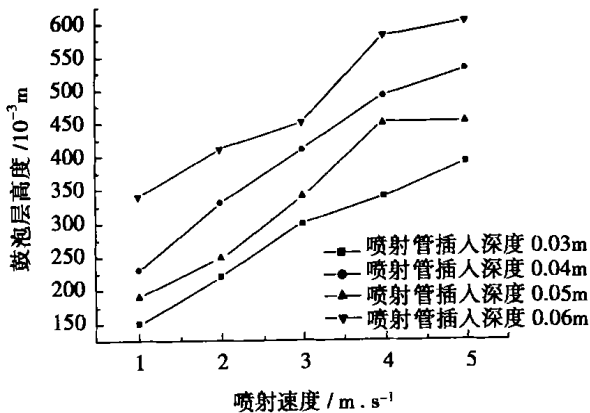


图 7 管内喷射时管内喷射速度对鼓泡层高度的影响

插入深度。由于在喷射管插入深度变化到一定的程度 ( $> 0.07$  m) 时,速度稍高,反应器顶端的废气出口就会有大量的液体夹带出去。因此,控制喷射管插入深度的变化范围为 0.03~0.06 m 之间。由图 7 中可以看出,随着喷射速度的增大,鼓泡层的高度增加。但是相比管外喷射,管内喷射的鼓泡层很不稳定,被气流带上去的液体在下落的过程中,可以一直冲到液面以下,使得管内的鼓泡层出现上下波动。这种波动直接影响到喷射器的压力降变化,如图 8 可以看出压力降随喷射速度的变化波动非常大,与管外喷射相比压力降损失较大;喷射速度超过 2 m/s 时,压力降开始降低。这是由于随着喷射速度的增加,气泡大量聚集,出现了气体的腾涌,对气液的接触非常不利。

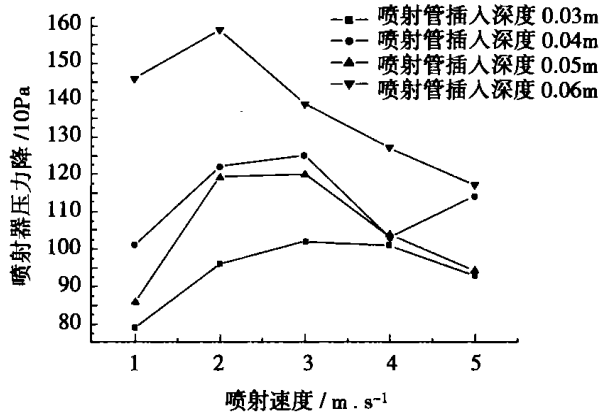


图 8 管内喷射时管内喷射速度对喷射器压力降的影响

管内喷射与管外相比较可以发现,管内喷射在工况变动时,压力降和鼓泡层的高度变化波动非常大,试验中还发现,随着管内喷射速度增加,管内的液体会形成腾涌,对烟气的吸收不利。建议在工程应用时采用管外喷射。

### 3.3 反应器中速度场的测定

利用 PIV 仪对底端封口的管外喷射情况进行了测定。由于反应器在鼓泡过程中有剧烈的气液反应,加入示踪粒子硫代硫酸钠后,会形成大量的泡沫,对测量造成困难。因此,本试验利用清水作为液相,压缩空气为气相,对气液剧烈扰动过程中形成的气泡进行跟踪,测定管外喷射时反应器内速度场。

图 9 表示出了试验中测定的位置 A 段和 B 段。下面介绍反应器中速度场测定的结果和数据处理结

图 7 和图 8 是鼓泡层高度和压力降随喷射速度变化时的变化规律,不同的曲线代表不同的喷射管

果。由于篇幅, 这里只介绍典型工况下的流场测定结果及数据处理结果。

对 A 段, 喷射速度为  $10\text{ m/s}$ , 喷射管插入深度为  $0.2\text{ m}$  的工况下, 将 PIV CCD 相机拍摄到的图像进行互相关处理后得到原始速度向量图。原始向量图中有一些明显不符合流动规律的向量, 这些向量是由于图像拍摄过程中干扰光造成的环境噪音, 影响了图像处理结果, 需要进行过滤处理。利用

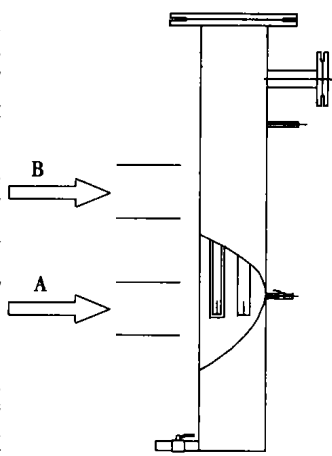


图 9 拍摄位置示意图

随仪器附带的专门软件处理后的向量图(见图 10)。

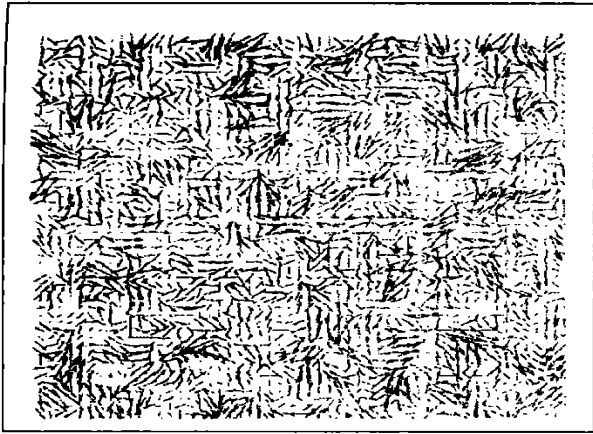


图 10 经平均过滤后的速度向量图

由图 9 可以看出 A 段区域, 气液剧烈混合充满了整个反应器, 受到喷射管相互间及筒体管壁的影响, 气流喷出后即形成紊流状态, 同时也带动液相紊流流动, 气泡群在液相中受到很大的浮力, 所以气液宏观上向上运动。气泡群达到液面后破裂汇总排放, 被带上去的液体开始下落, 在下落的过程中受到后面气泡群的冲击又向上运动, 从而形成如图 11 所示的复杂运动。

利用 PIV 随带的软件对上面的向量图处理后, 可以得出气泡运动的流线图和涡量图, 如图 11 和图 12 所示。由图中可以看出, 气液混合过程在整个反应器中产生大量的涡团, 形成局部扰动, 由于湍流、涡流作用, 使液体与气体的接触相界面不断更新, 这

对于气液接触非常有利。

下面介绍对图 9 所示 B 段的测定结果。

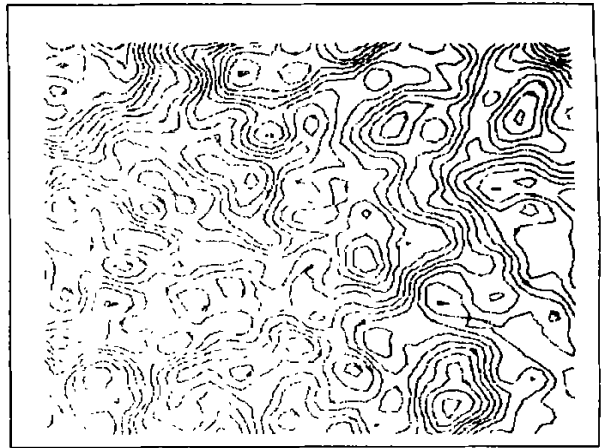


图 11 流线图

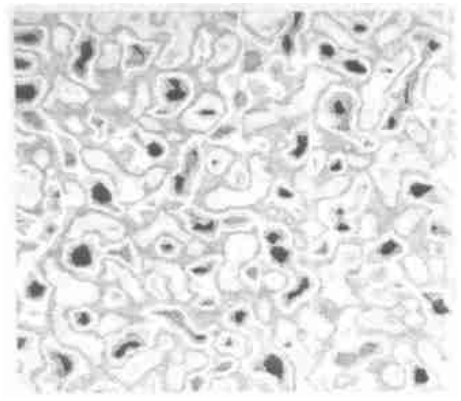


图 12 涡量图

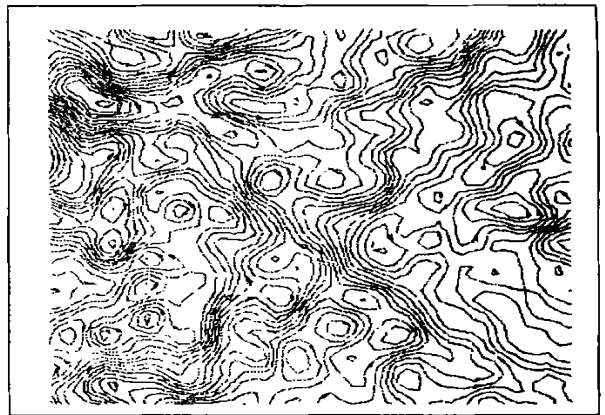


图 13 喷射速度  $10\text{ m/s}$  时流线图

图 13 所示为喷射管插入深度  $0.2\text{ m}$ , 速度为  $10\text{ m/s}$  时的流线图。由图中可以看出, 在喷射速度为

10 m/s 时, 气泡向上运动的过程中, 有大量的漩涡, 从而形成局部扰动, 使气泡在液相中的滞留时间增长, 对气液反应非常有利。

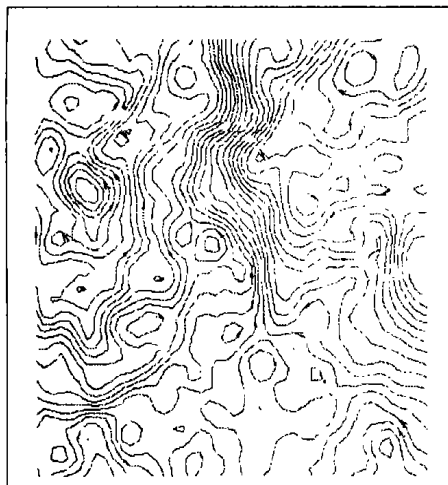


图 14 喷射速度 20 m/s 时流线图

图 14 为喷射管插入深度 0.2 m, 速度为 20 m/s 时的流线图。由图可以看出, 此时气液的紊乱度减小, 形成的涡流减少, 并且主要集中在壁面附近和顶端, 对气液的接触非常不利; 试验时可以通过可视化的反应塔用肉眼观察到, 大量的气泡聚集向上运动, 有时会形成一个气相空腔, 试验还发现此时的喷射器的压力降低, 这种情况主要出现在喷射速度大于 16 m/s 后。

(上接第 555 页)

## 4 结 论

提出的能级相近最大化相供策略能够解决多产品  
 火用流计价中的辅助方程的引入问题, 把供入能流按能级拆分, 依据能级相近最大化相供的原则与取出能流对应是切实可行的, 同时将供入与取出的能流进行对应时既考虑了火用量的差别, 又同时考虑了不同火用流所对应能流的能级间的差异, 解决了多产品火用存在时的附加方程引入问题, 能够降低计价过程的人为性, 为实现能量系统的火用经济学分析和优化提供依据, 将能级相近最大化相供方法用于热电联产系统—CGAM 系统的火用流计价, 得到了合理的火用流火用价, 真实反映了系统中联产火用流的价值, 说明所提出的计价方法能够有效用于能量系统火用经济分析优化。该方法具有普遍的理论

## 4 结 语

对不同喷射管管型在变化喷射管插入深度和喷射速度的冷态试验条件下, 进行了压力降和鼓泡层高度的比较。试验发现, 对管外喷射, 三种试验管型中底端封口的喷射管的鼓泡层高度和压力降的变化都非常稳定; 对管内喷射, 随喷射速度和喷射管插入深度的变化, 喷射器压力降波动很大, 很不稳定。因而建议工程应用时采用管外喷射。采用 PIV 仪器对底端封口喷射管管外喷射情况进行速度场的测定, 试验发现在气液充分混合区域内, 气泡的运动轨迹非常复杂, 形成大量的涡团, 气液剧烈扰动; 在速度超过 16 m/s, 涡团主要存在管壁附近, 中间气体形成腾涌, 对气液接触非常不利。

### 参考文献:

- [1] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [2] 王励前. 中国火电厂的环境保护[A]. 第五届海峡两岸环境保护学术研讨会论文集续集[C]. 南京: 东南大学, 1998: 1-21.
- [3] 史密斯 A, 苏德 H. 低成本烟道气脱硫技术[J]. 中国煤炭, 1999, 25(5): 45-49.
- [4] SOMESHWAR ARUN, BHAGAT SNEHAL, HOPKE PHILIP K. CT-121 FGD system monitoring project of the university of Illinois Abbott plant: A preliminary evaluation. Proceedings A&WMA Annual Meeting[J]. ASCE Anaheim CA USA, 1989, 2(6): 216-221.

(渠 源 编 辑)

### 意义和应用价值。

### 参考文献:

- [1] EI SAYED Y M, TRIBUS M. Strategic use of thermoeconomics for system improvement[J]. Efficiency and Costing ACS Symposium Series, 1983, 235: 215-238.
- [2] EI SAYED Y M, GAGGIOLI R A. A critical review of second law costing methods — I: background and algebraic procedures[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1989, 111: 1-7.
- [3] TSATSARONIS G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems[J]. Prog Energy Combust Sci, 1993, 19: 227-257.
- [4] HUA B, CHEN Q L. A new exergoeconomic approach for analysis and optimization of energy systems[J]. Energy-The International Journal, 1997, 22: 1071-1079.
- [5] TSATSARONIS G, PISA J. Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems: application to the CGAM problem[J]. Energy-The International Journal, 1994, 19(3): 287-321.
- [6] 杨东华. 火用分析和能级分析[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

(辉 编 辑)

calibration standard difference of the model is 1.41. **Key words:** near infrared spectrum, coal rank, on-line monitoring, volatile content

微燃烧器内甲烷催化燃烧的数值模拟 = **Numerical Simulation of Catalytic Combustion of CH<sub>4</sub> in a Micro-burner** [刊, 汉] / ZHONG Bei-jing, HONG Ze-kai (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 584 ~ 588

By making use of software CHD FLUENT and chemical reaction dynamics software DETCHEM a numerical simulation was conducted of the catalytic combustion of a mixture of CH<sub>4</sub> and air in a micro-burner featuring counter-flow heat exchange. During the calculations only the reaction of CH<sub>4</sub> on a catalytic surface has been taken into account. The stoichiometric ratio of fuel-air mixture is 0.4. Isothermal boundary condition and ambient convection heat-exchange boundary condition have been adopted for the burner outer wall surface. The impact of these two kinds of boundary condition on the burning of combustible fuel-air mixture was compared. Calculation results show that catalytic combustion has made it possible to realize the low-temperature and high-efficiency conversion of CH<sub>4</sub>, which cannot be carried out by a conventional method.

**Key words:** micro-burner, catalytic combustion, numerical simulation

油页岩流化床燃烧 N<sub>2</sub>O 生成特性 = **Experimental Investigation on N<sub>2</sub>O Emission Characteristics during the Operation of an Oil Shale-fired Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / DING Nai-jin, JIANG Xiu-min, WU Shao-hua (School of Energy Sources under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 589 ~ 591

On a small-sized (diameter 20mm and height 450mm) thermal-state fluidized bed combustion test rig an experimental investigation was carried out to ascertain the impact of different operating parameters on N<sub>2</sub>O emission characteristics during the operation of a oil shale-fired fluidized bed boiler. The investigation results indicate that an increase in combustion temperature and circulation ratio, a decrease in excess air factor and the desulfurization of in-boiler limestone, etc can be conducive to decreasing N<sub>2</sub>O generation quantity. The above finding has provided essential basic data for the design and operation of oil shale-fired circulating fluidized bed boilers. **Key words:** oil shale, N<sub>2</sub>O, fluidized bed combustion

鼓泡式烟气脱硫原理性试验台气体流动冷模试验 = **Cold Model Tests of Gas-liquid Flows in a Wet Bubbling Flue-gas Desulfurization Test Rig** [刊, 汉] / ZHONG Zhao-ping, JIN Bao-sheng, LAN Ji-xiang, et al (Education Ministry Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 592 ~ 596

Cold model tests and test results are described of gas-liquid flows in a wet bubbling flue-gas desulfurization test rig. Through the tests it is found that with regard to tube-outside jets the variation of injection pipe bubbling layer height and pressure drop at a bottom seal in three kinds of test tubes is very stable. As for tube-inside jets the injector pressure drop fluctuates dramatically with the change of injection speed and insertion depth of the jet pipe, thus being regarded as very unstable. In view of the above it is recommended to employ tube-outside jets for engineering applications. Measurements were taken of the jet velocity field of jet pipe tube-outside injection at a bottom seal with the use of a PIV (particle imaging velocimetry) instrument. It was discovered that in a gas-liquid fully mixed zone the motion trajectory of the gas bubbles are very complicated with a large quantity of vortex groups being formed accompanied by an intensive perturbation of gas-liquid. When the speed is in excess of 16 m/s, the vortex groups mainly appear in the neighborhood of tube walls and the intermediate gas-liquid assumes the form of surge waves, which is very unfavorable for gas-liquid contact. **Key words:** bubbling, flue gas desulfurization, gas-liquid flow, cold model test, particle imaging velocimetry

船用汽轮机冷态启动过程中热膨胀的研究 = **A Study of Thermal Expansion in the Cold-state Startup Process of a Marine Steam Turbine** [刊, 汉] / LIU Shu-yi, LI Jian-zhao (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China,