

液柱冲击塔雾化特性的试验研究

王 君, 高 翔, 郭瑞堂, 骆仲决

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要:液柱冲击塔内液柱雾化效果直接影响系统的脱硫效率, 其中的影响因素主要有挡板类型、液体进口流量、气体流速以及喷嘴与挡板的间距。在一小型液柱冲击塔模拟试验台上, 利用粒子图像测速技术(PIV), 测量模拟试验塔内液柱雾化形成的气-液两相流场。试验结果表明, 上述结构因素和操作参数对雾化流场内液滴的尺寸及其运动速率有显著影响, 并且发现流场中的液滴粒径符合 Rosin-Rammler 分布规律。

关 键 词:PIV 技术; 液柱冲击塔; 粒径分布

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

1 引 言

在湿法烟气脱硫工艺中, 为了增强脱硫剂对烟气中 SO_2 的吸收, 提高装置的脱硫效率, 必须强化烟气与脱硫浆液的传质。目前采用的方法主要是雾化脱硫浆液为细小液滴, 增大气液接触面积, 从而提高脱硫效率。液柱冲击塔即是运用此原理, 利用挡板撞击破碎喷射入塔的脱硫浆液柱达到雾化目的, 实现高效脱硫。

在液柱冲击塔内, 烟气自下而上流动; 脱硫浆液由喷嘴自下而上喷射形成与烟气顺流的液柱, 液柱与喷嘴上端的挡板撞击后破碎散开, 形成细小液滴逆向洒入烟气流, 烟气与液滴充分接触, SO_2 被吸收。显然, 雾化液滴与流动烟气形成了一个非常复杂的气-液两相流场, 流场离散相(雾化液滴)的特性, 诸如雾化液滴的颗粒尺寸, 雾化液滴的运动状态等, 对 SO_2 的吸收效果都有着重要影响。

利用 PIV 技术, 通过实验方法较为深入地研究了液柱冲击塔内构件及操作参数等对吸收区雾化液滴的颗粒尺寸及其运动状态的影响。

2 实验系统

2.1 实验装置及工况

为了方便研究液柱冲击塔内复杂的气-液两相流场, 设计搭建了一个小型的液柱冲击塔雾化流场 PIV 测试试验台, 实验装置如图 1 所示。

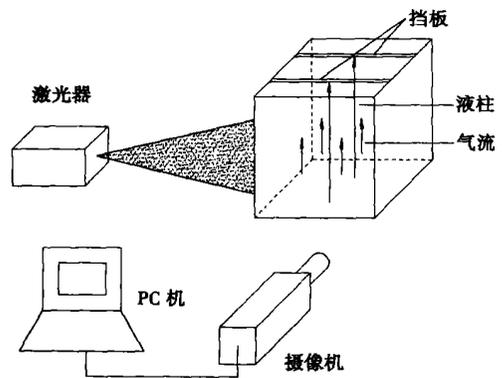


图 1 实验装置示意图

实验所用脱硫浆液为自来水, 流量由一玻璃转子流量计控制, 出口是一内径为 8 mm 的铜制喷嘴。液体自喷嘴向上射出形成一束液柱, 与安置在其正上方的挡板发生撞击。塔内模拟烟气为压缩机的出口空气, 从扁状铜制管口(1.5 mm×11.5 mm)喷入液柱雾化区域, 风速由一阀门控制。实验采用的挡板类型分别为角形、扁状、圆形, 如图 2 所示。

激光器是湖北光通光电公司生产的 GL-8 绿光灯泵浦固体激光器, 其主要技术参数为: 供电电源为三相 380/50 Hz, 6 500 W (其中主电源 4 000 W, 冷却电源 2 500 W); 输出功率最大 8 W; 激光模式为多模; Q 开关最大工作频率为 27 Hz。图像捕捉装置是 Motion Pro CMOS 高速摄影。

收稿日期: 2005-09-29; 修订日期: 2006-03-20

基金项目: 国家重点基础研究专项发展规划基金资助项目(G1999022201-05)

作者简介: 王 君(1980-)男, 安徽铜陵人, 浙江大学硕士研究生

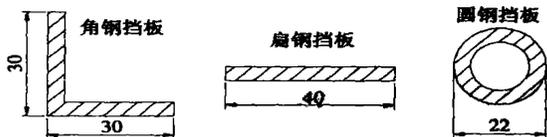


图 2 挡板类型

另外, 还需配置一台性能较高的 PC 机, 用于集中控制与管理 PIV 系统。该计算机中安装有图像采集和处理软件, 负责对粒子图像进行采集、计算与显示。

表 1 详列了试验工况。

表 1 试验工况

挡板类型	液柱流量 $q/L \cdot h^{-1}$	气体流速 $u/m \cdot s^{-1}$	喷嘴与挡板间距 h/mm
扁钢	300, 400, 500	1.5, 3.0, 4.5	87, 40
角钢	300, 400	1.5, 3.0, 4.5	87
圆钢	300, 400	1.5, 3.0, 4.5	87

2.2 雾化液滴图像

图 3 是数码相机拍摄的液柱遇到挡板撞击破碎成细小液滴的图片; 图 4 是 PIV 测量系统拍摄到的流场中分散的液滴图像。

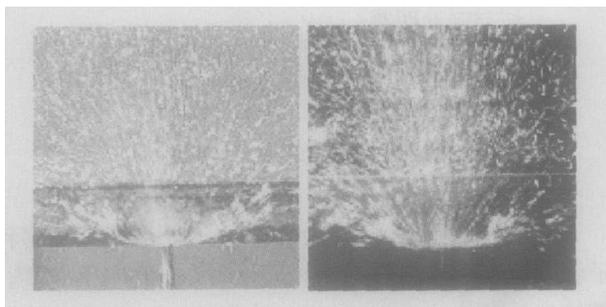


图 3 液柱撞击挡板后的雾化情况

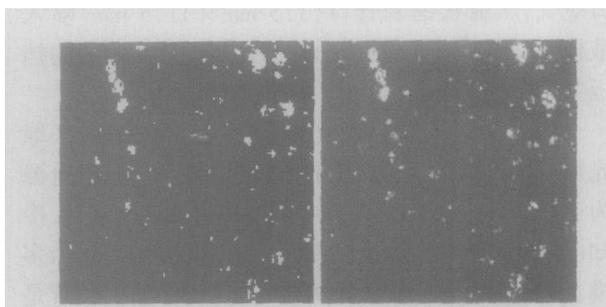


图 4 流场中雾化液滴图像

流场中分散较好, 且其分布具有一定的规律性。

2.3 实验图像处理

PIV 技术是一种图像分析技术, 通常所讲的 PIV 技术在用于测量时的情况是: 粒子浓度很高, 但粒子图像在被测区并不重叠^[1]。

一般情况下, PIV 技术是通过示踪粒子来确定二维流速的大小和方向^[2]。

如果流场中一示踪粒子在二维平面上的位移变化为 $x(t)$ 、 $y(t)$, 该粒子所在位置的流速可以表示为式(1):

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \bar{v}_x \\ v_y = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t+\Delta t) - y(t)}{\Delta t} = \bar{v}_y \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)中, 当 Δt 足够小时, \bar{v}_x 与 \bar{v}_y 的大小可以精确地反映 v_x 和 v_y ^[3]。如果液滴的曲率半径足够小, 其光学特性类似于固体颗粒, 我们则可以采用相同的方法来测量液滴和处理液滴图像^[4]。本实验流场中的液滴已十分细小, 因此, 无须使用示踪粒子可直接对液滴进行测量和图像处理。

雾化液滴的绝对尺寸采用全图像标尺标定的方法, 即判断各液滴图像边界断定其在图像中包含的像素数, 根据 CCD 相机的分辨率确定单位像素的实际尺寸, 可得液滴图像的实际面积 S , 从而可得不规则形状液滴折算成等效球形液滴后的等效直径 $d = \sqrt{4S/\pi}$ 。有了各液滴的等效直径便可将图像中的液滴按尺寸分类, 于是得到相应的试验工况下气-液两相流场中雾化液滴的粒径分布, 同时也可得到液滴的平均粒径等信息。

3 实验结果与分析

3.1 挡板类型对雾化液滴的影响

气体流速相同时, 选用圆钢挡板, 雾化液滴的平均粒径最小(见图 5); 当液体流量 $q=400 L/h$, $u=3.0 m/s$, $h=87 mm$ 时, 分别选用扁钢、圆钢、角钢挡板, 多数雾化液滴粒径分布在 $0.6 mm$ 、 $1.0 mm$ 、 $1.1 mm$ 左右(见图 6); 其它实验条件相同时, 选用圆钢挡板, 雾化液滴的运动速率(v)最大(见图 7)。液滴尺寸越小气液接触越充分, 且液滴运动速率越大, 扰动越剧烈, 越有利于气液反应。因此 3 种类型挡板中, 圆钢挡板的雾化效果稍好。图中 d 为液滴平均粒径, u 为塔内气体流速, h 为喷嘴与挡板的间距, f 为分布频率。

从该试验台中的液柱雾化效果来看, 离散相在

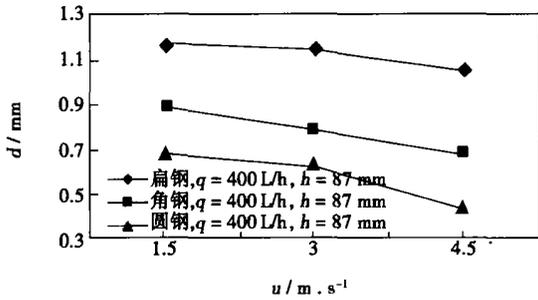


图5 挡板类型对雾化液滴平均粒径的影响

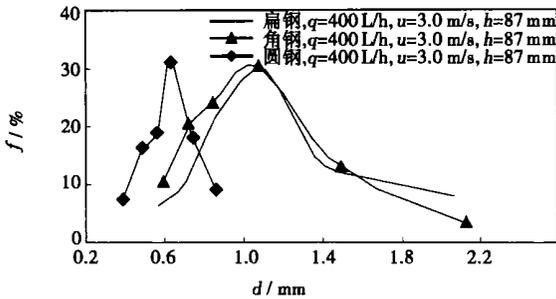


图6 挡板类型对雾化液滴粒径分布的影响

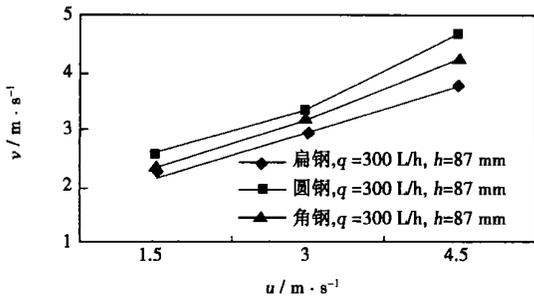


图7 挡板类型对雾化液滴运动速率的影响

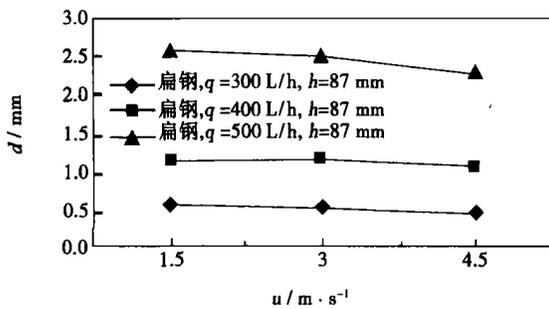


图8 液体流量对雾化液滴平均粒径的影响

气体流速相同时,雾化液滴的平均粒径随着液体流量的增大而减小(见图8);选用扁钢挡板, $u = 3.0 m/s, h = 87 mm$ 时, $q = 300 L/h, 400 L/h, 500 L/h$,多数雾化液滴的粒径分布在 $0.6 mm, 1.1 mm, 2.5 mm$ 左右(见图9);其它实验条件相同时,液体流量越大,雾化液滴的运动速率越大(见图10)。虽然提高液体流量不利于减小液滴的尺寸,但在气体流速不变的条件下有利于增大液气比,提高脱硫效率;并且,液滴运动速率的提高可以强化气液接触。因此,在实际工程中,可以适当增大脱硫浆液的进塔量,但应注意脱硫剂的利用率。

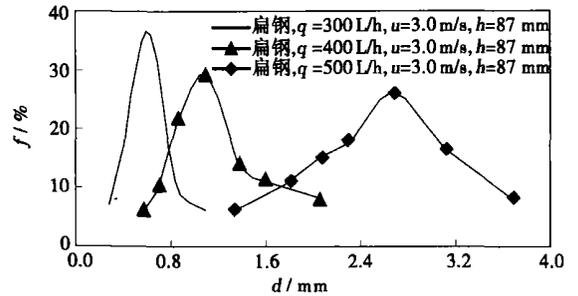


图9 液体流量对雾化液滴粒径分布的影响

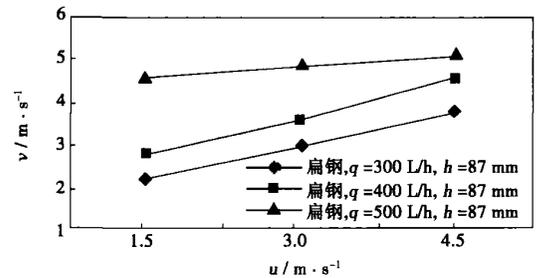


图10 液体流量对雾化液滴运动速率的影响

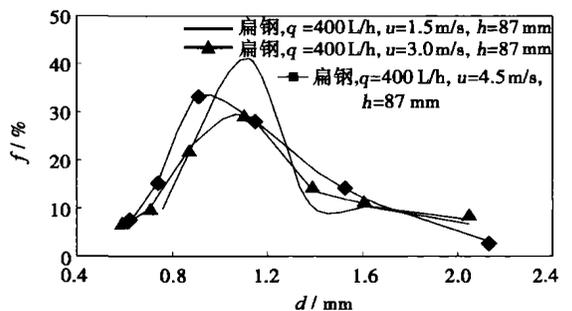


图11 气体流速对雾化液滴粒径分布的影响

3.2 液体流量对雾化液滴的影响

3.3 气体流速对雾化液滴的影响

图5、图7、图8、图10、图11均表明,由于在雾化过程中气流可以加剧液柱与挡板之间的碰撞,撕裂一些液滴,从而增大液滴运动速率,减小液滴尺寸。

其它实验条件相同时,气体流速越大液滴尺寸越小,液滴运动速率越大。因此,液体流量不变时适当增大气体流速可以增强液柱雾化效果,但减小了液气比且过大流速易将液滴夹带出脱硫塔。

3.4 喷嘴与挡板的间距对雾化液滴的影响

喷嘴离挡板越近,液柱撞击越剧烈,液滴尺寸随之减小,运动速率随之增大,雾化效果得到增强,见图12~图14。可知在试验条件下,喷嘴与挡板的间距越小越有利于提高液柱的雾化效果。

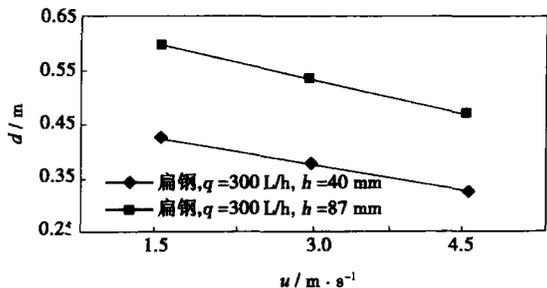


图12 喷嘴与挡板间距对液滴平均粒径的影响

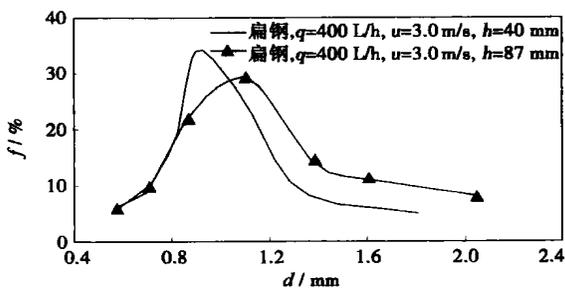


图13 喷嘴与挡板间距对液滴粒径分布的影响

3.5 雾化液滴粒径符合 Rosin-Rammler 分布

Rosin-Rammler 分布公式为:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n}$$

式中: d —粒径; Y_d —粒径大于 d 的液滴颗粒质量分数; n —均匀性指数; \bar{d} —特征粒径; 即 $Y_d = e^{-1} \approx 0.368$ 对应的液滴颗粒粒径^[5]。根据实验数据,得到公式中参数 n 、 \bar{d} 的值以及 Y_d-d 曲线图。

根据两种典型工况的实验数据,分别可拟合得到 Rosin-Rammler 分布的 Y_d-d 曲线,两条曲线与各

自的实验数据甚为吻合,见图15和图16。

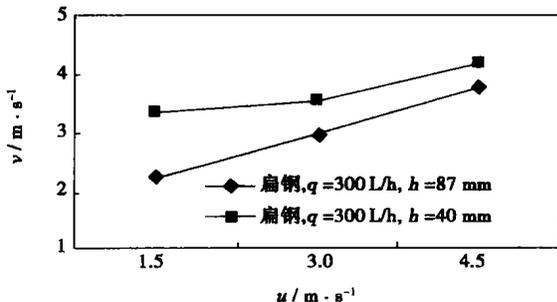


图14 喷嘴与挡板间距对液滴运动速率的影响

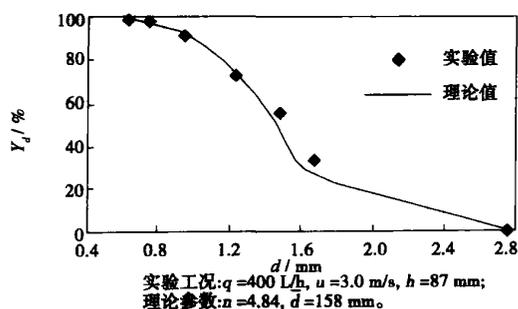


图15 Rosin-Rammler 理论曲线与实验数据的比较

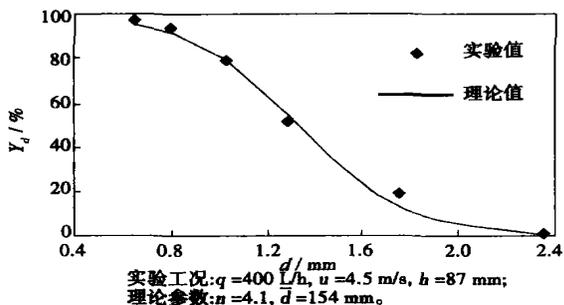


图16 Rosin-Rammler 理论曲线与实验数据的比较

对于其它工况,根据其实验数据,同理可得相应的液滴颗粒粒径 Rosin-Rammler 分布公式及其中参数 n 、 \bar{d} 的值,这对于流场的数值计算具有重要意义。

4 结 论

(1) 在气流作用下液柱经挡板撞击雾化为细小的液滴形成复杂的气-液两相流场,利用 PIV 技术可以很好地实现对该流场的实验研究;

4 误差分析

导致由图像边缘检测技术识别汽化核心数量的误差的因素主要有 3 个方面:

4.1 噪音干扰

高速摄像机拍摄到的图像中都含有一定的噪声,文中运用了中值滤波的方法减少了噪声的影响。

4.2 气泡合并

图像中如果出现两个气泡纵向合并的情况,这两个气泡对汽化核心数量的贡献是 1。如果是两个气泡横向合并的情况,这合并成一个气泡的对汽化核心数量的贡献应该是 2。目前对气泡合并(是纵向合并还是横向合并)的识别还依赖于肉眼。如何依靠图像处理识别出图像中气泡的合并情况是一个很有挑战性的研究。

4.3 图像边缘区域的影响

如图 4 所示,所拍摄到的气泡图像的边缘包含有一些不完整的气泡图像。这些边缘图像下面是否有汽化核心是一个较难判断的问题。如何定量地解决这一问题也是未来研究的一个重要方向。

5 结 论

(1) 从加热壁面底部拍摄气泡图像的摄像方法可以准确并且全面地捕捉到加热壁面上气泡的动态行为,并且消除流体扰动对摄像的干扰。

(2) 图像边缘检测技术可以使我们在高热流密

度下能够较好地辨别出图像里气泡群中所包含的气泡个数。

(3) 气泡合并是造成气泡图像中包含的气泡数量和这些气泡下面的汽化核心数量之间存在差异的主要因素。先由图像边缘检测技术识别出气泡图像中包含的气泡个数后,然后再将上述因素考虑在内,就可以得到汽化核心的实际数量。

参考文献:

[1] ROSS L JUDD, ANDREJ SIMJANOV. Bubble nucleation in response to a step change in heat flux [J] . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 2149—2159.

[2] CIESLINSKI J T, MOSDORF R. Gas bubble dynamics—experimental and fractal analysis [J] . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005 45: 1808—1818.

[3] QI YUSEN, KLAUSNER JAMES F, MEI RENWEI. Role of surface structure in heterogeneous nucleation [J] . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 3097—3107.

[4] THEOFANOUS T G, TU J P, DINH A T, *et al.* The boiling crisis phenomenon part I: nucleation and nucleate boiling transfer [J] . *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26: 775—792.

[5] YANG S R, XU Z M. On the fractal description of active nucleation site density for pool boiling [J] . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44: 2783—2786.

[6] LINA GARCÍA CABRERA. Median-type filters with model-based pre-selection masks [J] . *Image and Vision Computing*, 1996, 14: 741—752.

[7] KITTLER J. On the accuracy of the sobel edge detector [J] . *Image and Vision Computing*, 1983, 1: 37—42.

(渠 源 编 辑)

(上接第 278 页)

(2) 不同类型的挡板、液柱流量、气体流速以及喷嘴与挡板的间距,对雾化液滴的尺寸和液滴运动速率都有较为明显的影响;

(3) 选用圆钢挡板,增大气体流速,减小喷嘴与挡板的间距有利于增强液柱的雾化效果,即雾化液滴尺寸减小,液滴运动速率增大;

(4) 增大液柱流量,虽不可减小雾化液滴尺寸,但液气比及液滴运动速率增大,有利于提高脱硫效率;

(5) 液柱冲击塔内的雾化液滴粒径遵循 Rosin-Rammler 分布,根据实验数据,可以得到各种实验工况条件下相应的液滴颗粒粒径 Rosin-Rammler 分布参数 n 、 \bar{d} ,从而确定粒径分布特征。

参考文献:

[1] 范洁川. 近代流动显示技术 [M] . 北京: 国防工业出版社, 2002.

[2] 陈向阳, 邹介棠. 使用 PIV 技术测量喷嘴附壁射流的冷态流场 [J] . *流体机械*, 2003, 31(9): 5—14.

[3] 孙鹤泉, 康海置, 李广伟. 二维流场测量技术: PIV [J] . *研究与开发*, 2002(6): 43—45.

[4] LU YONG, WANG FENGLIN, WANG SHIMIN. Measurement of concentration of sorbent particles and water droplets in hydration desulfurization reactor with PIV [J] . *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2003, 19(1): 83—87.

[5] 戴丽燕. 关于 Rosin-Rammler 粒径分布函数的研究 [J] . *工业安全与防尘*, 2000(5): 6—8.

(渠 源 编 辑)

the standing-wave acoustic field has been derived. By combining experimental measurements with an advanced microscopic high-speed photography technique, the movement trajectory of a single micron-grade particle has been successfully photographed. Through an analysis of the pictures the required parameters were obtained. By way of seeking a solution the diameter and slippage factor of a single particle were obtained, avoiding a slippage assumption based on experience in the calculation process. The experimental and calculation results show that the present experimental platform can be used to measure micron and sub-micron grade single particle size as well as to observe and record dynamic characteristics. The acoustic entrainment method, being supported by a reliable theoretical basis, can serve as a new and feasible method for the measurement of micron-grade single particle size. **Key words:** micron, acoustic wave entrainment, microscopic photography, particle size measurement

数值研究扩散式旋风分离器流场与颗粒分离特性 = **Numerical Study of the Flow Field and Particle Separation Characteristics for a Diffusion Type Cyclone Separator** [刊, 汉] / TAN Xiao-jun, CHEN Li-hua, LI Hong-jian, et al (Mechanical and Energy Engineering College under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 270 ~ 274

With respect to a diffusion type cyclone separator in a gas/solid separation device, a RNG $k-\epsilon$ turbulent-flow model and discrete-phase random trajectory model were adopted respectively to perform a numerical simulation of its inner flow field and particle separation behavior. The trajectory of particles with different diameters at a constant flow speed was calculated and the impact of various inlet concentrations and flow speeds on the separation efficiency as well as the effect of a reflector screen on separation efficiency and particle residence time were discussed. The calculation results indicate that the separator as a whole assumes a double-layer flow structure and features a relatively good symmetry. In general, the radial speed is lower than the axial and tangential speed with an extremely low flow speed within the reflector screen. There exists a short-circuit flow at the inlet of exhaust pipes. This kind of separators provides a low separation efficiency for small particles with a diameter less than $4 \mu\text{m}$. The flow speed has a relatively high impact on separation efficiency. The reflector screen can make small particles stagnate in the separator for a longer time, thus enhancing their chances of being separated out. **Key words:** diffusion type cyclone separator, two-phase flow, particle separation, numerical simulation

液柱冲击塔雾化特性的试验研究 = **Experimental Study of the Atomization Characteristics of a Liquid-column Impingement Tower** [刊, 汉] / WANG Jun, GAO Xiang, GUO Rui-tang, et al (State Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 275 ~ 278, 282

The atomization effectiveness of a liquid column in a liquid-column impingement tower has a direct influence on the desulfurization efficiency of a whole system. The main influencing factors include: the type of damper plates, liquid inlet flow rate, gas velocity and the clearance between the nozzles and damper plates. On a simulation test rig of a small-sized liquid-column impingement tower, by using particle image velocimetry (PIV) measuring technology, measurements were taken of the gas-liquid two-phase flow field formed by the liquid column atomization inside a simulation test tower. The test results show that the above-mentioned structural factors and operational parameters have a significant effect on the size of liquid droplets in the atomization flow field and their kinematic speed. Moreover, it was found that the liquid droplet size in the flow field complies with Rosin-Rammler distribution law. **Key words:** PIV (Particle Image Velocimetry) technology, liquid-column impingement tower, particle size distribution

高热流密度下 R113 核态沸腾中汽化核心密度的识别 = **Identification of Densities at the Nucleation Sites in a**