

数值研究扩散式旋风分离器流场与颗粒分离特性

谭晓军, 陈丽华, 李宏剑, 樊建人

(浙江大学 机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 针对气固分离装置中的扩散式旋风分离器, 分别采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型、离散随机机轨道模型(DPM)对其内部的流场和颗粒分离行为进行了数值模拟; 计算了一定流速下不同粒径颗粒的轨迹; 讨论了多种入口浓度和流速对分离效率的影响, 以及反射屏对分离效率和颗粒停留时间的作用。计算表明, 分离器内整体成双层流动结构, 并且有较好的对称性, 径向速度总体上比轴向和切向速度小, 在反射屏内流速非常低; 排气管入口存在短路流动; 该类分离器对 $4\mu\text{m}$ 以下的小颗粒分离效果不高; 流速对分离效率的影响比较大; 反射屏能使小颗粒在分离器内停留更长的时间从而加大被分离下来的机会。

关 键 词: 扩散式旋风分离器; 两相流动; 颗粒分离; 数值模拟

中图分类号: X701.0357.1 文献标识码: A

1 前 言

长期以来气固分离工程中大量使用旋风分离器。传统旋风分离器下部的锥体段都是上大下小布置, 因为锥体部分使主气流易于转变成上升流, 同时便于粉尘从下部排出, 对分离效率有一定提高^[1]。各种传统旋风分离器的实验和数值方法研究, 已经获得了相当多的结果。扩散式旋风分离器, 其分离段与一般旋分器不同, 为上小下大的倒锥状布置, 而且内部有顶端开孔的反射屏。陈由旺等人采用 3D-PDA 实验研究了扩散段截面为方形的旋风分离器的流场情况^[2]; 冷碧霞等人也采用 PDA 手段对扩散式气固分离器进行了实验研究^[3]。本文研究的扩散式旋风分离器筒身为倒锥形, 圆形截面。在该类分离器中, 由于在反射屏上部几乎没有粉尘堆积, 主气流折转向上时很少将粉尘带出; 结构上可以避免扩散段含尘气体向筒中心短路排放; 同时阻气式反射屏能防止气流将反射屏下已分离的粉尘重新卷起,

有助于提高分离效率, 从而改善设备性能, 减少粉尘对下器壁的磨损^[1,4]。对于目前大多数厂家的生产与开发都是基于试验研究, 相应的数值研究比较少。本文拟从数值方法角度揭示其内部流场机制及分离行为, 尤其是反射屏对颗粒运动的影响等, 为设计提供一些参考。

2 物理模型与网格划分

扩散式旋风分离器结构如图 1 所示, 锥体部分倒置即上小下大, 然后在倒锥体内部设置反射屏(60°漏斗状, 尖端开孔), 反射屏与壁面之间有一定的间隙。含尘气流从方形进气管沿上部短圆筒切向进入, 分离后洁净气体从顶部排出, 粉尘颗粒则通过反射屏与壁面之间的间隙滑入积尘段, 在反射屏下部收集后下向排出。

数值模拟中采用的物理模型如图 1 所示。网格划分采用混合网格, 其中以四面体为主, 结合六面体和锥体网格, 并对扩散段和出口段进行了加密。总计约 30 万个单元。

3 数学模型与计算方法

显然这是三维旋转流的气固分离问题。由于工

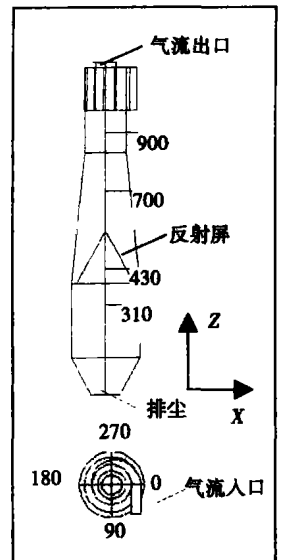


图 1 物理模型

程应用中颗粒浓度一般在 $1.7 \sim 200 \text{ g/m}^3$, 文中计算的流速在 $8 \sim 15 \text{ m/s}$ 之间。对于煤粉颗粒, 可以计算出固气体积比在 10^{-4} 量级, 属稀相流动。对于稀相气固两相悬浮流动可以采用单向耦合计算, 即在得到收敛的连续相场后, 再进行颗粒相的流动轨迹计算。

因为流速较低, 所以气相视为不可压流进行计算。计算在直角坐标系下进行, 采用守恒方程:

质量方程:

$$\partial(\rho U_i) / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial(-\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

由于标准 $k-\epsilon$ 模型不适用于强旋流和弯曲壁面的流动, 而用 RSM 模型计算的量又太大, 综合考虑选用 Yakhot 和 Orzag 提出的重正化群即 RNG $k-\epsilon$ 模型。RNG $k-\epsilon$ 模型是对标准 $k-\epsilon$ 模型的改进, 它通过修正湍动粘度考虑平均流动中的旋转和旋流效应^[3]。修正后的 k 方程和 ϵ 方程参见文献[6]。近壁面区域结合壁面函数法模拟。计算中采用基于交错网格的 SIMPLEC 算法, 计算取二阶精度。壁面采用无滑移边界条件。

颗粒相的受力比较复杂, 结合文献[1, 7]中关于颗粒受力的量级分析, 在本文中颗粒所受的主要作用力为气流曳引阻力、重力和离心力^[1, 8]:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + F_G + F_C \quad (3)$$

$$\text{重力: } F_G = \frac{\rho_p \pi d^3 g}{6} \quad (4)$$

$$\text{离心力: } F_C = \frac{\rho_p \pi d^3 u_t^2}{6r} \quad (5)$$

$$\text{曳引阻力: } F_D = \frac{1}{\tau_p} \frac{C_D Re_p}{24} m_g (u_g - u_p) \quad (6)$$

$$\text{其中: 颗粒弛豫时间 } \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (7)$$

$$\text{颗粒雷诺数: } Re_p = \frac{\rho_p d_p |u_g - u_p|}{\mu} \quad (8)$$

其中: m_p 、 d_p 、 ρ_p 、 u_p —颗粒质量、颗粒直径、颗粒密度和颗粒速度; u_t 、 u_g —颗粒切向分速度与气流速度; C_D 、 μ —阻力系数和流体粘性系数。

阻力系数按照 Morsi 和 Alexander 给出的公式依不同的颗粒雷诺数范围取值^[9]:

$$C_D = \frac{k_1}{Re_p} + \frac{k_2}{Re_p^2} + k_3 \quad (9)$$

表 1 式(9)中的系数取值

k_1	k_2	k_3	Re_p
24.0	0	0	≤ 0.1
22.73	0.09	3.69	0.1~1
29.17	-3.89	1.22	1~10
46.5	-116.67	0.617	10~100
98.33	-2.778	0.364	100~1000

在此基础上对非球形煤粉颗粒作阻力修正, 对 $100 \mu\text{m}$ 以下的颗粒为简化起见均乘以 1.7 修正^[10]。

颗粒轨迹跟踪用拉格朗日坐标下的随机轨道模型。关于随机轨道模型, 可参考文献[6, 10]。该模型采用随机方法来考虑瞬时湍流速度对颗粒轨道的影响。在随机轨道模型中假定脉动速度满足高斯概率密度分布, 对 $k-\epsilon$ 湍流模型而言, 脉动速度为:

$$u'(t) = \zeta \sqrt{2k/3} \quad (10)$$

其中: ζ 为一个满足正态分布的随机数。

将气流瞬时速度 $U + u'(t)$, 代入颗粒轨道方程计算式, 在离散的时间步上沿每个坐标积分即可得到颗粒轨迹。

本计算中取颗粒服从 Rosin-Rammer 分布, 最小为 $1 \mu\text{m}$, 最大 $60 \mu\text{m}$, 平均 $30 \mu\text{m}$, 颗粒分布指数 n 取 1.8, 分为 7 组。

表 2 颗粒粒径分布

	直径范围/ μm						
	1~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~60	≥ 60
质量分数	0.04	0.09	0.25	0.25	0.185	0.155	0.03

4 模拟结果

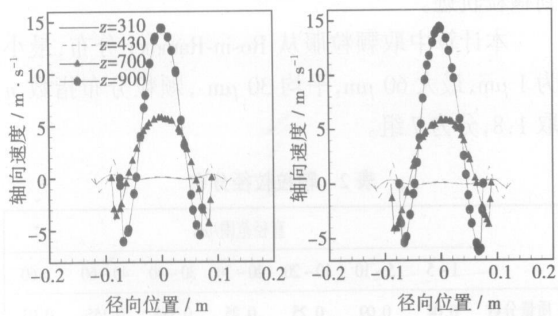
4.1 连续相

流体和颗粒的速度分布情况对分离器的分离性能至关重要, 合理地流动有助于提高分离效率和减轻磨损降低阻力。图 2(a)~(c)分别给出了入口流速为 12 m/s 时分离器 4 个横截面上的轴向、径向、切向速度比较图。图 2(d)、(e)分别给出了垂直剖面上在反射屏和上部排气管入口附近的速度矢量分布图。

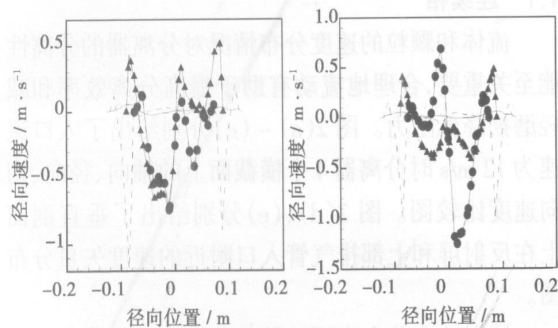
轴向速度分布表明扩散式分离器内部外层气流下行、内层上行的双层流动结构, 在反射屏下边各截面轴向速度比较小, 很显然这有助于防止颗粒被再次卷起。径向速度总体上比轴向和切向速度小很多, 下部圆筒段和反射屏内径向速度几乎为零, 在反

射屏外也显示有回流存在。在上部圆筒段和扩散段中心附近由于受上升出流影响径向速度都指向中心,而离开很小一段距离后,扩散段的速度改为指向器壁;上部圆筒中则因侧壁和出流、入流的共同作用流动比较复杂。总体上极小的径向速度可以防止颗粒被推向中心从而减少夹带提高分离效率,这在文献[3]的实验结果中得到证实。切向速度总体较大,反射屏外侧和扩散段、上部圆筒段切向速度曲线头部非常丰满,但反射屏内及其以下的部分仍然很小,越往上速度峰值越大(与有效截面减小有关),在器壁附近迅速减低。大的切向速度可以使颗粒产生很大的离心力,从而被甩向器壁发生分离。

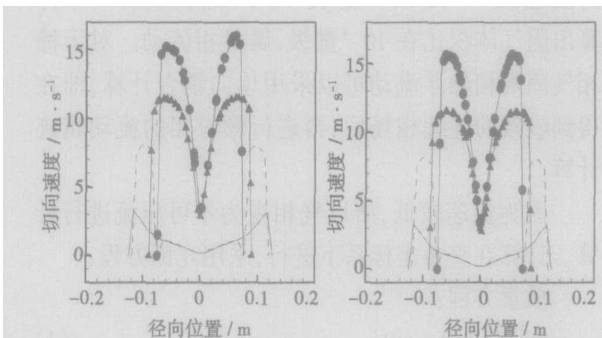
从图 2(a)可以看出,轴向速度在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和 $90^\circ \sim 270^\circ$ 两个方位上具有较好的对称性,分布比较一致,只是在扩散段($Z=700$)稍有差异。图 2(b)中显示径向速度在反射屏以下部分具有很好的对称性,但在上部圆筒段($Z=900$)已明显受到入流的影响呈非对称性,尤其在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 方位。图 2(c)说明切向速度分布有非常好的对称性。



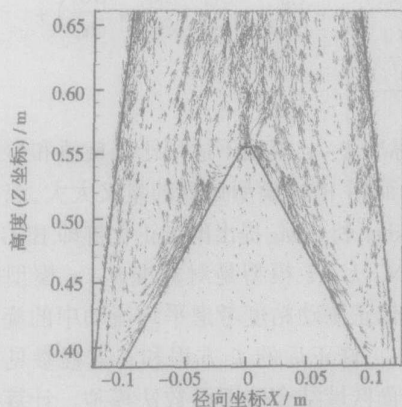
(a) 轴向速度分布(左图 $0^\circ \sim 180^\circ$ 方位;右图 $90^\circ \sim 270^\circ$ 方位.方位见图1所示)



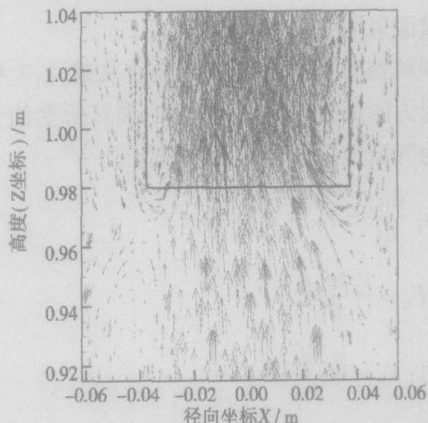
(b) 径向速度分布(左图 $0^\circ \sim 180^\circ$ 方位;右图 $90^\circ \sim 270^\circ$ 方位.方位见图1所示)



(c) 切向速度分布(左图 $0^\circ \sim 180^\circ$ 方位;右图 $90^\circ \sim 270^\circ$ 方位.方位见图1所示)



(d) 反射屏附近速度矢量($0^\circ \sim 180^\circ$ 方向)



(e) 排气管入口附近速度矢量($0^\circ \sim 180^\circ$ 方向)

图 2 流场速度分布

图 2(d)进一步表明扩散段流场呈明显的双层流动结构。图 2(e)显示在气流出口管入口处有短路流存在,这和一般旋风分离器是一样的,不利于颗粒分离。

4.2 颗粒相轨迹

考查不同大小颗粒在分离器内部的运动情况分析分离效率与分离机理有很大意义。图 3 表示 5 种颗粒在气流入口速度为 12 m/s 时的轨迹。

很显然,对 $1 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 的颗粒,由于气流曳引

作用相对颗粒自身惯性较大很容易被夹带出去, 难于分离。5 μm 的颗粒在反射屏外旋转数圈后才进入反射屏下部, 而 8 μm 和 10 μm 的颗粒则比较容易被分离下来。10 μm 的颗粒一旦进入反射屏后几乎直接到集尘锥部, 旋转的圈数非常少。而且颗粒越大越易被甩向器壁, 小颗粒几乎只在中心附近运动。可以看到重力对大颗粒的沉降效果非常显著。从顶盖处的颗粒轨迹可以看出, 大颗粒因为惯性大总要在顶部转圈, 能量耗散到一定程度后才快速滑入下段分离。

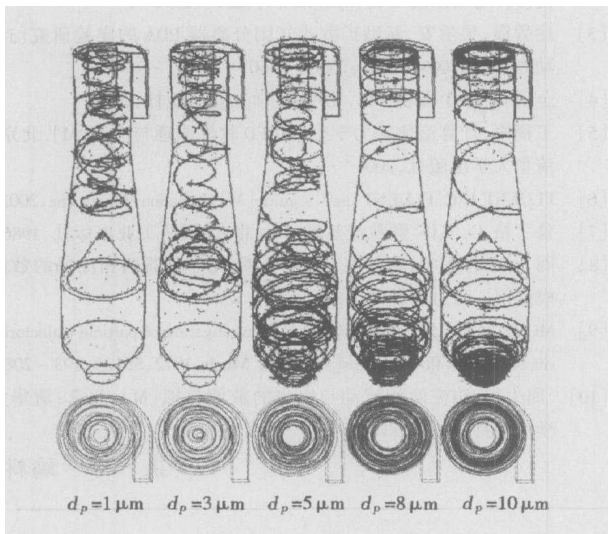


图 3 颗粒轨迹 ($U = 12 \text{ m/s}$)

4.3 分离效率

分离效率的高低是衡量分离器性能的最为重要的指标之一。一方面它可以大致界定适用范围, 同时对实际使用中工艺参数的取舍有一定的指导意义。图 4(a)~(c)中为跟踪 50 000 步的结果。

图 4(a)表明, 对 4 μm 以下的颗粒分离效率不是太理想, 这可从图 4 中的颗粒轨迹得到说明。图 4(b)表明, 含尘浓度为 1.7~200 g/m^3 时, 入口浓度对分离效率的影响不大, 文献 [3] 中的实验结果也表明在该浓度范围内, 颗粒的分离效率变化也只在 1 到 2 个百分点。图 4(c)说明气流速度对分离效率的影响比较大。大的入口速度能产生大的离心力, 故流速由 8 m/s 增到 10 m/s 时分离效率增长较快。当流速继续增加时因为夹带加剧分离效率增长变缓。

4.4 反射屏的影响

为进一步揭示反射屏的作用, 图 5(a)、(b)分别给出了反射屏对分级分离效率和颗粒停留时间的影响。图 5(a)中为跟踪 50 000 步的结果。

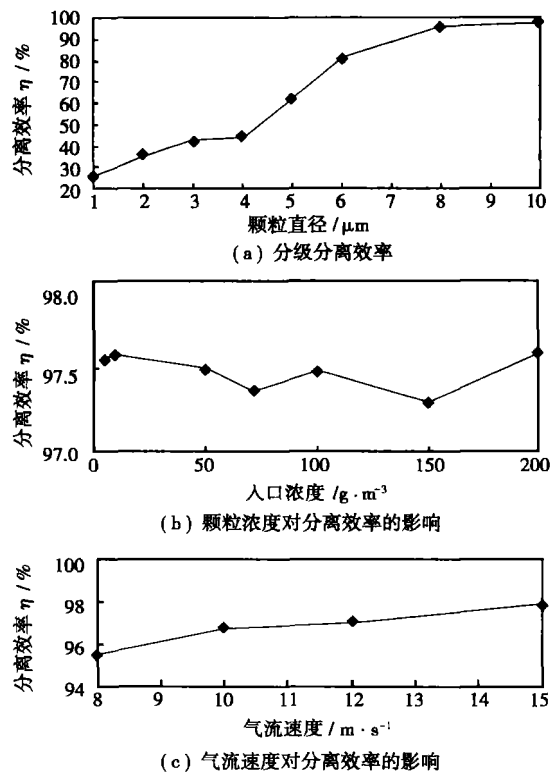


图 4 分离效率

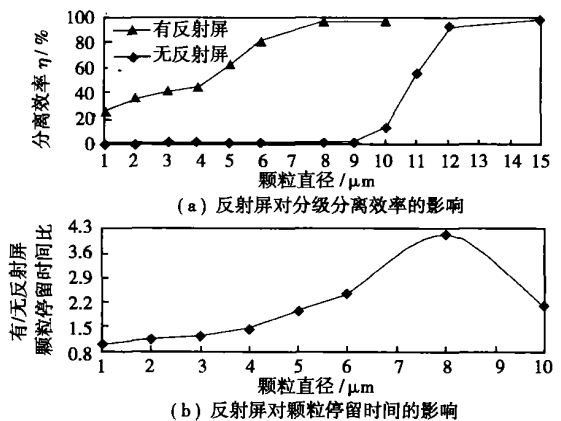


图 5 反射屏的影响

对 10 μm 以下的颗粒, 有无反射屏对分离效率的影响很大, 但对 10 μm 以上的大颗粒, 反射屏的作用明显减弱。图 5(b)反映了反射屏对颗粒逃出分离器前在分离器内停留时间的影响, 对 3 μm 以下的小颗粒影响不大; 对 3~9 μm 的颗粒, 有反射屏时颗粒要在分离器内停留更长的时间才能逃出, 加大了颗粒被分离下来的机会, 说明反射屏的存在对这类颗粒的分离影响较大, 这也可以从图 5(a)中的分级分离效率曲线得到证实; 超过 8 μm 时, 反射屏的作

用开始减弱。

5 结 论

通过对扩散式旋风分离器内两相流动特性的数值模拟,得到了连续相速度分布、颗粒相分离效率等一系列结果。模拟结果表明:

(1) 分离器内总体上呈内升外降的双层流动结构。在反射屏内轴向、径向、切向速度都比较小,有利于颗粒的分离和防止颗粒的卷起。径向速度总体上比轴向和切向速度小很多。

(2) 从截面上的轴向、径向和切向速度的分布图看,总体上都呈现较好的对称性,只是径向速度在某些部位稍有差异。矢量图显示排气管入口处有短路流。

(3) 对 4 μm 以下的颗粒,分离效率不太理想。颗粒浓度对分离效率的影响不大,而气流速度的影响相对要复杂。

(4) 反射屏的存在对 10 μm 以下的颗粒分级分离效率影响明显,对 10 μm 以上的颗粒其作用相对较弱;同时反射屏能使 3~9 μm 的颗粒在分离器内长时间停留从而增大被分离下来的机会,大约超过 8 μm 时反射屏的影响开始减弱。

以上只是一些初步的认识和结论,关于反射屏

的作用,还有很多方面值得深究,比如对压损和分离器磨损的影响,锥顶开孔大小与锥体角度以及环隙对流场结构和分离效率的作用,能否通过改变反射屏结构来达到降阻减磨的效果等等,这些都有待后续工作的深入探讨。

参考文献:

- [1] 岑可法,倪明江,严建华,等.气固分离理论及技术[M].杭州:浙江大学出版社,1999.
- [2] 陈由旺,吴学安,陈明,等.方形扩散式旋风分离器的实验研究[J].电站系统工程,2003,19(4):251-253.
- [3] 冷碧霞,吴学安.新型扩散式气固分离器 PDA 的实验研究[J].动力工程,2003,23(3):2458-2460.
- [4] 金国森.除尘设备[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [5] 王福军.计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [6] FLUENT INC. FLUENT user's guide[M]. Lebanon: Fluent Inc, 2003.
- [7] 鲁丁格 G. 气体-颗粒流基础[M].北京:国防工业出版社,1986.
- [8] 周强,程乐鸣,张仲决,等.方形卧式分离器两相流场的数值模拟[J].动力工程,2004(4):567-571.
- [9] MORSI S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Fluid Mech, 1972, 55(2): 193-208.
- [10] 周力行.湍流两相流动与燃烧的数值模拟[M].北京:清华大学出版社,1991.

(渠源 编辑)

(上接第 266 页)

形状,甚至在 2 m 左右时仍略带花瓣结构。

花瓣稳燃器的风粉气流与热烟气的混合周界一直保持着花瓣状曲线型,随着气流的扩散,混合周界也向外逐渐扩展。高温回流烟气与低温风粉气流在炉内形成曲线形的热边界,使得二者接触周界长,有利于煤粉气流的加热与混合,对低挥发分煤煤粉气流的快速升温、迅速着火、稳定燃烧起到促进作用。

该花瓣稳燃器在某厂 210 MW 贫煤锅炉中经过长时间试验,对低挥发分煤的适应性强,点火迅速,稳燃效果良好;能在 55%~100% 负荷范围内稳定燃烧挥发分为 $V_{daf}=12\% \sim 18\%$ 的贫煤。花瓣稳燃器在电厂运行近两年时间,未发现任何明显磨损现象。工业试验结果表明,该计算结果可靠,轴心温度分布测量结果与计算吻合良好。

6 结 论

(1) 应用 RNG $k-\epsilon$ 模型,对花瓣稳燃器建立了复杂几何模型的三维(360°)流场计算模型,网格划分采用三维贴体坐标结构化网格模型,实现了复杂

曲面模型的三维数值计算。

(2) 对花瓣稳燃器流场的数值计算结果从流场特点及混合边界两个方面进行了详细的理论分析。分析结果表明花瓣稳燃器所形成的特殊流场具有良好的稳燃效果,有利于低挥发分煤的着火与燃尽,计算结果对工程设计及应用有十分重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 周强泰,赵伶玲.旋流燃烧器的花瓣稳燃器[P].中国专利:CN 200410041107.7,2004-06-29.
- [2] 赵伶玲.花瓣燃烧器的稳燃性能与应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- [3] EASTWICK C N, PICKERING S J, AROUSSI A. Comparisons of two commercial computational fluid dynamics codes in modeling pulverized coal combustion for a 2.5 MW burner[J]. Applied Mathematical Modeling, 1999, 23: 437-446.
- [4] 谭辉平,赵坚行.煤粉锅炉旋流燃烧器的气动热力学性能数值分析[J].南京航空航天大学学报,2001,33:82-85.
- [5] FLUENT INC. FLUENT user's guide volume 3[M]. Lebanon: Fluent Inc, 2001.

(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