

文章编号:1000-582X(2010)04-054-06

气固两相圆柱绕流背风区颗粒的运动特性

刘洪涛, 张 力, 陈艳容

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要:为了考察颗粒在圆柱绕流背风区中的运动特性,采用欧拉双流体模型结合雷诺应力模型对气固两相微细颗粒圆柱绕流进行了数值模拟。比较了不同粒径固体颗粒在圆柱背风区中的速度和浓度分布,模拟结果表明:气流在绕圆柱流动后形成漩涡,漩涡湍流强度影响到微细颗粒在圆柱背风区的浓度分布与速度变化;气流对颗粒的漩涡卷吸作用及其自身惯性作用决定微细颗粒绕圆柱流动的形式,同时影响到颗粒在壁面附近的浓度分布;微细颗粒在圆柱背风区浓度随粒径的增加先增大后减小。

关键词:雷诺应力模型;颗粒;湍流强度;颗粒浓度

中图分类号:TK121

文献标志码:A

Investigations of the particle motion characteristics in the gas-solid two-phase wake of leeward side circular cylinder

LIU Hong-tao, ZHANG Li, CHEN Yan-rong

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: This paper investigates the characteristics of the particle motion in circular cylinder wake flow of leeward side by simulating the micro-particle flow around circular cylinder using Euler two-fluid model combined with Reynolds stress model. It compares the particle velocity and concentration of different particle size in the leeward area. The results show that the vortex is formed after the gas flowed passing the cylinder, and the concentration and velocity of particles are affected by the turbulent intensity in the leeward side. Gas entrainment vortex and particles own inertia decide the flow form of fine particle around the cylinder. Both effects impact the particle concentration distribution of different size particles in the leeward area. With the increase of particle size, the particle concentration increases at the beginning and then decreases in the leeward area.

Key words: reynolds stress model; particle; turbulent intensity; particle concentration

气固两相流动作为一种常见的现象,广泛存在于能源动力、冶金、化工、航空航天等多个领域,对气固两相流的流动规律进行研究具有重要的实用价值。近年来,国内外对气固两相流问题进行了大量

研究,主要针对粒子的湍流扩散规律和粒子的存在对气相湍流特征的影响,研究内容为自然界风沙运动^[1]、循环流化床及其除尘风机与旋风分离器中颗粒的燃烧与运动^[2-4]、流道内颗粒的沉积情况^[5-7]等。

收稿日期:2009-12-21

基金项目:重庆市科技攻关重大项目(CSTC,2008AC2051)

作者简介:刘洪涛(1978-),男,重庆大学博士研究生,主要研究方向为气固两相流数值研究。

张力(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65103114;(E-mail)lizhang@cqu.edu.cn。

气固两相圆柱绕流是工业上普遍存在的现象,如锅炉尾部烟道中各种管式换热器的烟气流动,由于气固两相的存在与影响,导致了受热面的积灰与磨损。气体圆柱绕流流动的特征以及颗粒在圆柱尾流中扩散运动问题引起了许多专家的关注,从理论与数值计算的角度来分析圆柱绕流流型结构、湍流影响的关键因素^[8-9]、颗粒与涡结构的相互作用规律以及颗粒的脉动速度和湍动能等情况^[10-15]。在实际工业生产应用过程中,颗粒在受热面上的积灰导致换热效率降低,含颗粒的气流对壁面的冲刷磨损,容易造成换热器放生爆管现象。因此就需要对气固两相圆柱绕流颗粒的运动规律进行研究,了解颗粒在壁面上积灰与壁面磨损规律,对换热器定期进行吹灰或更换。

采用欧拉双流体模型结合雷诺应力模型对气固两相圆柱绕流问题进行数值研究,以获得气固两相圆柱绕流中颗粒在圆柱背风区的速度分布以及颗粒浓度分布,在此基础上对气固两相圆柱绕流颗粒的运动物理特性进行分析。

1 物理模型

计算模型结构如图1所示,圆柱体直径 $D = 30 \text{ mm}$,计算域尺寸为 $x = 10D, y = 4D, z = 5D$ 。圆柱体的中心处为坐标的原点,圆柱体的中心位置距进口的距离为 $2D$,如图1所示。

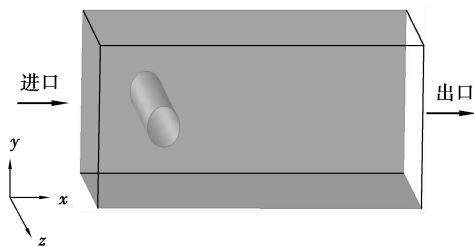


图1 物理模型示意图

2 数学模型

对于流-固两相流,可以采用单流体模型,将流体相和固粒相视作单一混合物的连续介质;也可采用双流体模型,将两相视作不同的两种连续介质,即欧拉模型;还可采用欧拉-拉格朗日模型,将流体视作连续介质,固体颗粒视作离散介质^[6]。文中采用欧拉双流体模型进行计算,将空气作为第一相,固体颗粒作为第二相。

在研究微细颗粒气固两相流时,做如下假设:1)流体的物性参数为常数;2)颗粒为球形,不考虑颗粒

相之间的相互作用力。

气固两相的连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{V}_q) = 0, \quad (1)$$

式中: q 表示相; g 为气相; p 为固体颗粒相; ρ 表示密度; α 表示容积份额。

$$\alpha_g + \alpha_p = 1. \quad (2)$$

动量守恒方程:

气相方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \mathbf{V}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{V}_g \mathbf{V}_g) \\ = -\alpha_g \nabla P_g + \alpha_g \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \mathbf{g} - \beta(\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p), \end{aligned} \quad (3)$$

固体颗粒相方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p \mathbf{V}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{V}_p \mathbf{V}_p) \\ = -\alpha_p \nabla P_p + \alpha_g \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g + \alpha_p \rho_p \mathbf{g} + \beta(\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p), \end{aligned} \quad (4)$$

式中的重力只在 x 轴即轴线方向上等于 g ,其它方向为0。式中的 β 用来表示气固两相间动量交换的物理量,文中采用 Wen and Yu 模型,表达式为

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |u_s - u_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65}, \quad (5)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} [1 + 0.15(\alpha_g Re_s)^{0.687}], \quad (6)$$

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s |u_s - u_g|}{\mu_g}. \quad (7)$$

由于绕圆柱流动,流动方向表面曲率发生变化,而各种双方程湍流模型均采用各向同性的湍流粘度来计算湍流应力,难以考虑由于表面曲率变化的影响,因而文中对湍流流场进行数值研究时,选用基于各向异性的湍流雷诺应力输运方程模型(RSM)。雷诺应力的输运方程具体表达见文献[16-17]。

3 数值方法及边界条件

采用CFD软件Fluent进行数值求解。由于在圆柱附近速度、压力及颗粒浓度梯度变化较大,故在网格的生成过程中,对计算域的网格采用非结构化六面体网格,在圆柱体周围区域采用网格加密,网格总数约12万,网格划分如图2所示。

在计算中,采用有限容积法对控制方程进行离散,压力与速度的耦合方式采用SIMPLE算法,对流项采用二阶迎风格式进行离散。

入口设为速度进口,设定 $v_g = v_p$,给定颗粒相的气体份额,文中取0.01。出口设为自由出流边界。 z 方向的2个面设为对称面, y 方向的2个面设为无

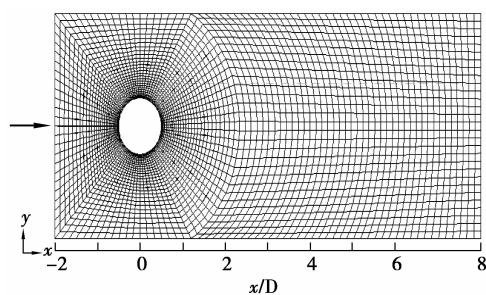


图2 计算模型网格图

滑移壁面。

在颗粒和气体以相同的速度 $v=10\text{ m/s}$ 进入流道情况下,流体的密度为 $\rho_g=1.225\text{ kg/m}^3$,运动粘性为 $\mu=1.7894\times 10^{-5}\text{ kg/ms}$ 。颗粒的密度 $\rho_p=2500\text{ kg/m}^3$,颗粒假设为球形,粒径 d_p 分别取 $1\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 内的15个粒径,颗粒体积份额为0.01,以及其它相关物性参数。文中计算的颗粒粒径很小、浓度很稀,颗粒所受的流体曳力是最主要的,其次是重力,其它力(如浮力、Basset力、Magnus力、Saffman升力等)在量级上与之相比非常小,一般可以忽略不计。

4 结果与讨论

4.1 气体流场与颗粒速度分析

图3表示不同粒径时,中心截面的气体速度矢量图。从图中可以发现,在颗粒粒径为 $10、20\text{ }\mu\text{m}$ 的

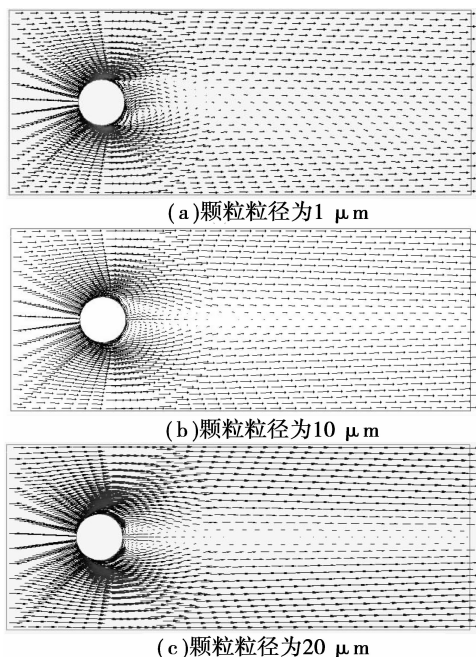


图3 气体速度矢量图

情况时,气流在圆柱体背风区的速度形成的湍流漩涡呈对称分布,而粒径为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时,气流形成的湍流漩涡在圆柱体背风区的分布不是对称的,呈摆动的形式。说明在相同的颗粒体积份额情况下,对于小颗粒来说,颗粒数目多,自身质量轻,颗粒的离心力和惯性力都比较小,受气流的加速作用明显,颗粒对气体流动影响作用小,颗粒容易被气流所携带,而跟随气流一起运动,由于形成湍流漩涡的强度不同,对颗粒的卷吸作用不同,造成气流在圆柱背风区的速度分布呈不对称分布。而对于大颗粒,颗粒数目少,自身质量重,能够较强地保持自身的运动特性不易被气流形成的涡卷吸,对气流绕圆柱后速度分布影响不大。

4.2 颗粒速度分析

在距圆柱中心后取 $X/D=2/3$ 、 $X/D=1$ 、 $X/D=2$ 、 $X/D=3$ 的4个截面对颗粒的流动特性进行分析。

图4分别表示距离圆柱中心位置不同截面的微细颗粒轴向速度分布,从图中可知不同粒径的微细颗粒轴向速度分布趋势基本相同,颗粒在截面上的速度分布呈马鞍型。在图4(a)和图4(b)中,由于颗粒距圆柱体壁面很近,并且都落在气流圆柱绕流后形成的湍流漩涡中,颗粒在靠近圆柱体壁面附近的轴向速度变化趋势随着粒径的增大而先减小后增大,表明粒径较小时受到绕流卷吸作用较大,使颗粒不易与壁面发生碰撞。但是随着微细颗粒的粒径增大,颗粒自身惯性开始发挥较大作用,而受颗粒气流漩涡卷吸影响呈减弱的趋势,使微细颗粒与壁面发生碰撞几率增加。

图4(c)和图4(d)为不同种粒径下 X/D 截面的轴向速度分布图,从图中可以观察到:由于距圆柱体后壁面距离增加,并且开始脱离所形成的气流漩涡。在 $X/D=2$ 时,颗粒轴向速度的变化呈马鞍型趋势,且小粒径颗粒的轴向速度变化比大粒径颗粒明显,说明颗粒粒径较小时,颗粒数较多,颗粒与气相之间的动量交换都比大颗粒充分。而颗粒粒径增大时,颗粒数减少,颗粒与气相之间的动量交换不是很充分,其受到自身惯性的影响较大。图4(d)表示的 $X/D=3$ 截面基本脱离气流的漩涡区,微细颗粒粒径为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时,颗粒由于离心力和自身惯性都小,跟随气流运动,受到气相的作用尤为明显,并将部分动量传给气相,导致其速度变化明显。而微细颗粒粒径增大时,受自身惯性作用影响明显,基本保持自身的运动轨迹,受气相的作用相对较小,因此它们的速度滑落不大。

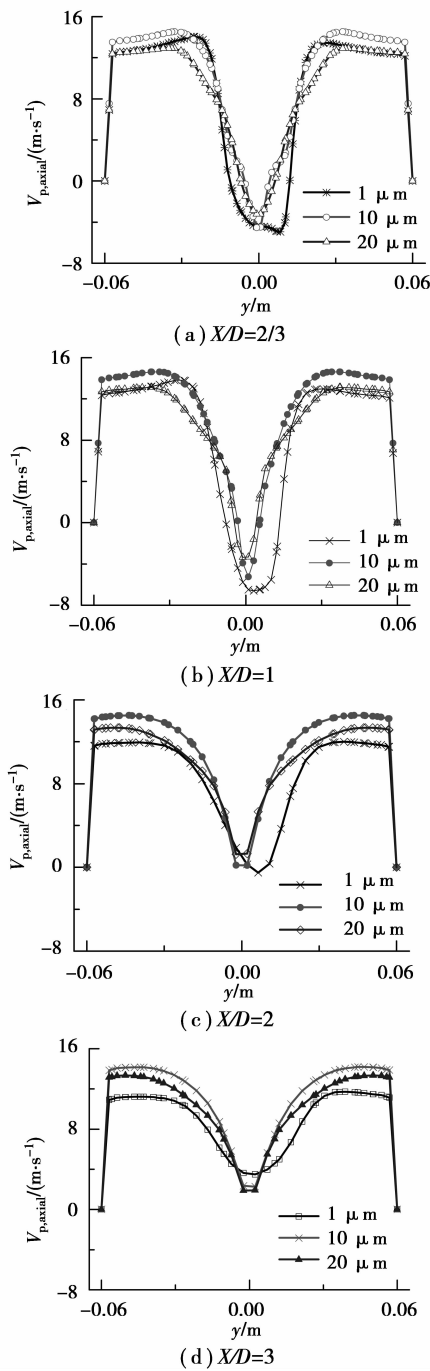


图 4 不同截面颗粒轴向速度

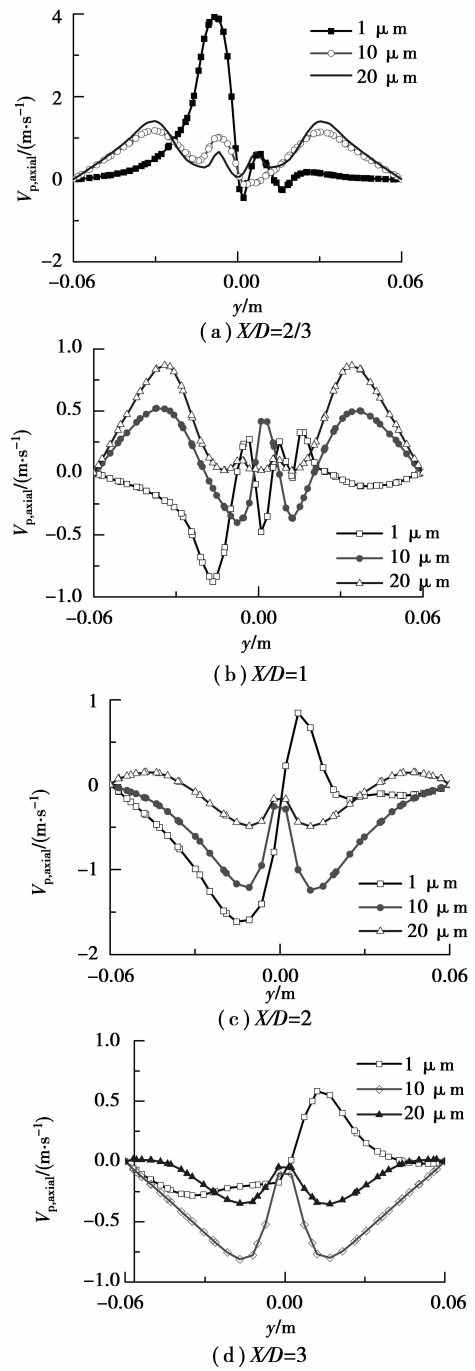


图 5 不同截面颗粒径向速度

图 5 分别表示距离圆柱中心位置不同截面的颗粒径向速度分布,可以看出小粒径颗粒径向速度的变化比较明显,说明小粒径颗粒更容易受到气流圆柱绕流后形成的漩涡卷吸影响。在图 5(a)中 $1 \mu\text{m}$ 粒径的微细颗粒产生的径向速度变化较大,由于 $x/D=2/3$ 很接近壁面,该处的湍流漩涡强度剧烈, $1 \mu\text{m}$ 粒径的微细颗粒由于粒径较小,受到卷吸作用影响明显。从图 5 还可以看出粒径为 $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 的颗粒,在距离圆柱中心位置不同截面颗粒的径向

速度分布规律基本上相同,径向速度变化较小,表明颗粒粒径增大时,颗粒受自身的惯性作用大,而受到绕流形成的漩涡卷吸作用减弱。

4.3 颗粒浓度分析

图 6 给出了距离圆柱体背风区后 0.25 mm 处, y 向上的颗粒浓度分布。从图中可知颗粒浓度随着距离 y 向圆柱体中心剖面接近,颗粒浓度先增加后减小,在背风区中心处颗粒浓度达到最大。结合图 3 分析可知,气流流经圆柱后,在其背风区形成涡

旋,对颗粒具有卷吸的作用,在中心处为速度漩涡分界面,从而造成颗粒在近壁面处浓度表现为图6中的变化趋势。从图中还可知,1 μm 粒径的颗粒浓度变化不大,而随着粒径的增大,在中心处的颗粒的浓度表现为先增大后减小,表明1 μm 的颗粒在壁面上的浓度受气流卷吸作用和自身惯性作用的影响,当气流卷吸作用和自身惯性作用都比较大时,微细颗粒不易在壁面上发生沉积,只有当二者的作用相差比较微弱的时候,微细颗粒开始在壁面上发生沉积。

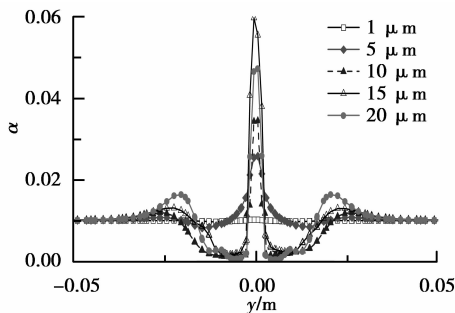


图6 y向上颗粒浓度分布

5 结 论

通过对不同粒径的微细颗粒圆柱绕流模拟发现:

1)不同粒径的微细颗粒气流流经圆柱后,在背风区形成的湍流漩涡强弱不一,影响到微细颗粒在圆柱背风区的浓度分布与速度变化。

2)微细颗粒在几个微米的时候,受到气流对其的携带和卷吸作用明显,容易跟随气流一起运动。随着粒径增大,颗粒由于自身惯性作用易穿过气流形成的湍流漩涡,气流形成的湍流漩涡卷吸作用对影响不大。

3)颗粒的自身惯性作用和气流湍流漩涡卷吸作用决定颗粒在壁面附近的浓度分布,微细颗粒在圆柱背风区浓度随粒径的增加先增大后减小。

参考文献:

- [1] 周芳,祁海鹰,由长福,等.有限空间风沙流动数值模拟及边界条件问题[J].清华大学学报:自然科学版,2004,44(8):1079-1082.
ZHOU FANG, QI HAI-YING, YOU CHANG-FU, et al. Numerical simulation of wind-sand current and boundary conditions in a limited space[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(8): 1079-1082.
- [2] 许用权,李永星,杨冬,等.循环流化床锅炉冷渣器内气固两相流场的数值模拟[J].西安交通大学学报,2005,39(5):472-475.
XU YONG-QUAN, LI YONG-XING, YANG DONG, et al. Simulation of gas-solid flow in slug coolers of circulating fluidized beds[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(5): 472-475.
- [3] 熊川龙,张力,冉景煜,等.循环流化床内生活垃圾颗粒冷态分层特性分析[J].重庆大学学报:自然科学版,2005,28(9):39-43
XIONG CHUAN-LONG, ZHANG LI, RAN JING-YU, et al. Numerical simulation on the cold flow distributing character of MSW particles in circulating fluidized bed[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(9): 39-43
- [4] 蒲舸,张力,辛明道,等.医疗垃圾与煤在循环流化床中的混烧试验[J].重庆大学学报:自然科学版,2003,26(8):106-108.
PU GE, ZHANG LI, XING MING-DAO, et al. Co-combustion experimental study of medical solid waste and coal in a CFBC[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(8): 106-108.
- [5] HE CHUNHONG, AHMADI GOODARZ. Particle deposition in a developed turbulent duct flow electrophoresis[J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(6): 739-758.
- [6] ZHANG Z, CHEN Q. Prediction of particle deposition onto indoor surfaces by CFD with a modified Lagrangian method[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(2):319-328.
- [7] WANG Q, SQUIRES K D. Large eddy simulation of particle deposition in a vertical turbulent channel flow[J]. Int. J. Multiphase flow, 1996, 22(4):667-683.
- [8] BRAZA M, PERRIN R, HOARAU Y. Turbulence properties in the cylinder wake at high Reynolds numbers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006,22(6):757-771.
- [9] INOUE O, IWAKAMI W, HATAKEYAMA N. Aeolian tones radiated from flow past two square cylinders in a side by side arrangement[J]. Physics of fluids, 2008,18(4):1-15.
- [10] 刘敏,刘飞,胡亚涛,等.三维串列双圆柱绕流气动流场及声场模拟[J].工程热物理学报,2008,29(3):402-406.
LIU MIN, LIU FEI, HU YA-TAO, et al. Aerodynamics and aeroacoustics numerical simulation of flow past two circular cylinders in tandem arrangements [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008,29

- (3):402-406.
- [11] KAIR V, TEZDUY T. 3D Computing of unsteady flows around circular cylinder[J]. *Parallel Computing*, 1997, 23(9):1235-1248.
- [12] 李文春,金哈辉,任安禄,等.气固两相三维圆柱绕流的直接数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(5): 808-810.
LI WEN-CHUN, JIN HAN-HUI, REN AN-LU, et al. Direct numerical simulation of gas-solid two-phase 3d wake of a circular cylinder[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(5):808-810.
- [13] 樊建人,胡桂林,姚军,等.气固两相圆柱绕流的直接数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(3):433-436.
FAN JIAN-REN, HU GUI-LIN, YAO JUN, et al. Direct numerical simulation of particle dispersion in the temporal wake of a circular cylinder[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(3):433-436.
- [14] 罗坤,陈松,蔡丹云,等.气固两相圆柱绕流近场特性的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(24): 116-120
LUO KUN, CHEN SONG, CAI DAN-YUN, et al. Experimental study of flow characteristics in the near field of gas-solid two-phase circular cylinder wakes[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(24): 116-120
- [15] 李万平,陈波,郭双喜.近壁圆柱绕流积沙线的形成机理研究[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2007, 35(8):112-115.
LI WAN-PING, CHEN BO, GUO SHUANG-XI. Experimental study on the sand accumulation phenomenon in flow around a circular cylinder near to a plane wall[J]. *Journal of huazhong university of science and technology: nature science*, 2007, 35(8):112-115.
- [16] 刘海生,贺会群,艾志久,等. 诺应力模型对旋流器内流场的数值模拟[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(9): 243-245, 271.
LIU HAI-SHENG, HE HUI-QUN, AI ZHI-JIU, et al. Numerical simulation of inner flow field in hydrocyclone with RSM Model [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(9): 243-245, 271.
- [17] 张兆顺,崔桂香,许春晓.湍流大涡数值模拟的理论和应用[M].北京:清华大学出版社, 2008.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 48 页)

- [16] 周敏.电厂烟气喷雾干燥法脱硫的理论研究[J]. *煤矿环境保护*, 1994, 8(3):28-30.  
ZHOU MIN. Theory analysis of desulfurization of flue gas with spray semi-dry method for thermal power plant [J]. *Environment protection of coal mine*, 1994, 8(3): 28-30.
- [17] 杜孟伊.喷雾干燥脱硫塔内气液两相流动与浆滴传热传质特性动态特性[D].重庆:重庆大学动力工程学院, 2008.
- [18] 蒲舸.垃圾与煤循环流化床混烧污染物生成与净化特性研究[D].重庆:重庆大学动力工程学院, 2006.
- [19] LIU Z S. Advanced experimental analysis of the reaction of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  with HCl and  $\text{SO}_2$  during the spray dry scrubbing process[J]. *Fuel*, 2005, 84(1):5-11.
- [20] SCALA F, D ASCENZO M, LANCIA A. Modeling flue gas desulphurization by spray-dry absorption[J]. *Separation and Purification Technology*, 2004, 34(1): 143-153.
- [21] STEIN J, KIND M, SCHLUNDER E-U. The influence of HCL on  $\text{SO}_2$  absorption in the spray dry scrubbing process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, 86(1/2):17-23.
- [22] LI X H, KUMAR K, MUJUMDAR A. A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computation fluid dynamic simulation[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2006, 45(6):461-470.
- [23] 李国莲.干法烟气脱硫过程的数值模拟[J]. *能源环境保护*, 2008, 22(6):13-38.  
LI GUO-LIAN. Study on numerical simulation of flue gas desulfurization process [J]. *Energy environment protection*, 2008, 22(6):13-38.
- [24] 王乃华,滕斌,高翔,等.半干法烟气脱硫整体化模型[J]. *动力工程*, 2008, 28(5):774-778.  
WANG NAI-HUA, TENG BIN, GAO XIANG, et al. Integrated modeling of semi-dry flue gas desulfurization [J]. *Journal of Power Engineering*, 2008, 28(5): 774-778.
- [25] 韩方亮,黎国华,许宁.喷雾干燥烟气脱硫塔流场数值模拟[J]. *中国水运*, 2006, 6(10):64-66.  
HAN FANG-LIANG, LI GUO-HUA, XU NING. The numerical simulation of the flow field inside absorber of fgd by spray drying[J]. *China Water Transport*, 2006, 6(10):64-66.

(编辑 陈移峰)