

潮湿细煤气流分级机内气固两相流的 CFD 模拟

焦 杨¹, 章新喜², 李海生²

(1. 中国矿业大学 理学院 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 化工学院 江苏 徐州 221116)

摘要: 以 CFD 计算软件 FLUENT 为平台, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和欧拉-拉格朗日方法的离散相模型对实验室研制的潮湿细煤气流分级机内的空气流场进行数值模拟, 得到分级机中流场的气流速度、流场静压、流场湍动能的分布情况, 以及不同粒径细粒煤在分级机中的运动轨迹。数值计算结果表明: 分级机内多孔层的设置可造成压强和流速阶跃, 增强多孔层上方区域的流速, 提升气体对细粒煤的携带作用; 导流板的设置使入料口到细料出口间出现了较强的流带, 有利于细粒煤分离; 导流板和倾斜多孔层的设置使分级机内压差最大且湍流较弱, 有利于颗粒分散, 实现小颗粒与大颗粒的分离, 提高分级效率同时也有利于中等粒径团聚体的破碎、分散, 但对大粒径团聚体的分裂破坏作用有限。

关键词: 气流分级机; 潮湿细煤; 气固两相流; 导流板; 多孔层

中图分类号: TD45

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)05-0001-05

CFD simulation of gas-solid two-phase flow in air classifier for moist fine coal

JIAO Yang¹, ZHANG Xinxi², LI Haisheng²

(1. College of Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model is developed for the air classifier of laboratory scale using the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and Euler-Lagrange's method of discrete phase. Obtain the distribution of airflow velocity, static pressure, turbulent kinetic energy in classifier. Simulate the motion trails of coal particles in different sizes. Simulation results show that setting slant-ranked separation blades can create pressure and flow step in classifier, enhance the flow field above the guide plates and promote coal carrying effect of fluid. The guide plates setting in classifier create a strong flow between the feeding inlet and light products outlet, which is beneficial to coal separation. Guide plates and slant-ranked separation blades in classifier can weaken the turbulence and increase the collisions with coal particles. As moist fine coal feed in classifier, small particles are dragged to the light products outlet by gas flow and big particles fall along the slant-ranked blades to the heavy products outlet by gravity. Collisions can enhance comminuting and separate the particles in aggregation for the middle size particles. For large size particles or aggregation, collisions are weak.

Key words: air classifier; moist fine coal; gas-solid two-phase flow; guide plate; porous layer

收稿日期: 2013-06-20 责任编辑: 白娅娜

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(50921002)

作者简介: 焦 杨(1977—), 女, 江苏扬州人, 教师, 在读博士, 研究方向为颗粒团聚、分散技术及干法分选。E-mail: jiaoyangcumt@126.com。

引用格式: 焦 杨, 章新喜, 李海生. 潮湿细煤气流分级机内气固两相流的 CFD 模拟[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(5): 1-5, 9.

0 引言

气流分级是一种古老的分级方法,采用干法气流分级技术对煤炭进行 6 mm 以下分级,具有低成本、高效率、工艺简单的优点。无论是动力煤还是炼焦煤,采用有效的干法分级方法使不入选或不同分选粒度的煤预先分离,可提高分选效率,降低运行成本,增加经济效益^[1-2]。

随着采煤机械化程度的提高,煤粉量不断增加,加上环保要求洒水除尘^[3],使井下原煤水分迅速提高,有些矿区原煤水分已达 12%~14%^[4]。这些湿黏原煤为分级作业带来困难。筛分作业中,潮湿细粒煤团聚后黏附在筛面上堵塞筛孔,导致筛分效率下降,筛分过程恶化。外在水分达到 7% 以上时,一般振动筛已很难完成 3 mm 筛分任务^[5-6]。气流分级技术没有筛网,不存在筛孔堵塞问题,可完成潮湿细粒煤的分级作业,但分级效率会随着外在水分的增加而下降^[7-9]。为解决这一问题,世界煤炭生产大国广泛研究设计出十几种不同类型的气流分级设备,以提高潮湿细粒煤的气流分级效率。

1 试验设备

实验室针对潮湿细粒煤分级设计的气流分级设备如图 1 所示。设备主要由罗茨风机、分级机和旋风除尘器组成。其工作流程为:物料由入料口进入,经过罗茨风机产生的高速气流及离心风机分配的分散风对入料进行分散。潮湿煤粒及其团聚体下落后与分级机内的倾斜多孔层产生碰撞,破碎后的粗粒煤沿倾斜多孔层滚落后收集,细粒煤由气流携带进入分级区,通过除尘器收集后由细粒级出口连续排出。调节分级区的气流速度和压强可控制分级粒度。



图 1 潮湿细粒煤气流分级设备

本文针对实验室研制的潮湿细粒煤气流分级机进行数值模拟,研究了内部设置的导流板和倾斜多孔层对流场的影响,采用单颗粒运动方程模拟了不同细粒煤在分级机中的运动轨迹,验证模拟结果与试验结果的吻合程度。

2 数学模型

2.1 网格划分和边界设置

气流分级机结构如图 2 所示。

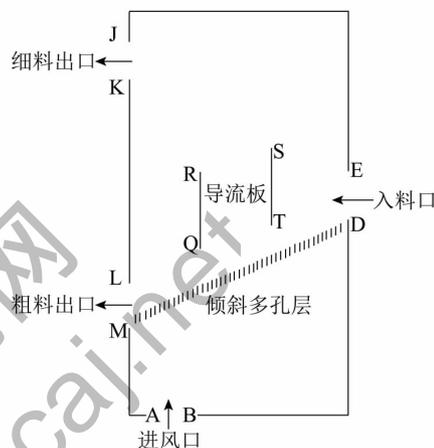


图 2 气流分级机结构示意图

使用前置处理器 Gambit 2.3.16 对 1610 mm × 690 mm × 200 mm 长方体结构的分级机进行建模和 2D 网格划分,采用四边形网格单元划分,并在边界处、导流板及多孔层处进行网格加密,如图 3 所示。

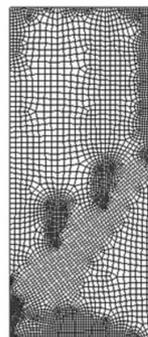


图 3 气流分级机 2D 网格

2.2 计算方法

模拟将流动分为连续相和分散相两相,其中连续相为气体,分散相为细粒煤。为方便气相流场的模拟,对连续相作以下合理假设:①单相流体不可压缩;②单相流体为定常流动,即 $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$, ϕ 为速度、压强、密度等相关物理量;③流场恒温,不考虑热量传递,不考虑由于流体与壁面的摩擦而引起热效

应;④入口气体的流速均匀,流动处于湍流状态;
⑤由于分级机中细粒煤的体积分数小于10%,忽略颗粒运动对流体相的影响。

对分散相的假设:①细粒煤为球形颗粒;②颗粒与壁面之间的碰撞为刚性碰撞。

计算时以 FLUENT 软件为平台,采用有限元体积法,利用连续性方程对网格中各控制体进行离散求解,用经典 SIMPLE 算法求解压力-速度耦合问题。利用湍流模型在欧拉坐标系下将气相流场计算到收敛,再在入口处加入颗粒相,采用单向耦合方法和离散相模型,在拉格朗日坐标下计算不同粒径颗粒在已求解流场中的运动轨迹。

2.3 基本方程

2.3.1 连续性方程

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = \rho F_{bx} + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = \rho F_{by} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = \rho F_{bz} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u_x, u_y, u_z 为 x, y, z 方向的流速分量, m/s ; F_{bx}, F_{by}, F_{bz} 为单位质量力在 x, y, z 方向的分量, N/kg ; p_{ij} ($i, j = x, y, z$) 为作用在微元六面体各面上的应力, N/m^2 [10-12]。

2.3.2 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型

计算采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型 [13-14], 湍动能 k 方程为

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \quad (3)$$

耗散率 ε 方程为

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (4)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad \eta = S \frac{K}{\varepsilon}$$

式中, k 为总湍动能, m^2/s^2 ; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能, m^2/s^2 ; G_b 为浮力引起的湍动能, m^2/s^2 ; Y_m 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响, m^2/s^2 ;

ρ 为流体密度, kg/m^3 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^2 ; $C_1, C_2, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为湍流模型中的经验常数; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为湍动能及其耗散率的湍流普朗特数; μ 是流体的湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 是时均速度, m/s ; S_ε, S 和 K 为用户定义的源项。

2.3.3 颗粒运动方程

将细粒煤视为离散相,在拉格朗日坐标系下采用颗粒轨道模型进行模拟,由颗粒力的平衡方程计算颗粒轨道 [15-16]

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p + F_x \quad (5)$$

式中, $F_D(u - u_p)$ 为颗粒所受曳力, N ; $g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p$ 为颗粒的表观重力, N ; F_x 为其他作用力, N 。其中

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D R_e}{24} \quad (6)$$

式中 μ 和 u_p 分别是流体和颗粒的速度, m/s ; μ 是空气的黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ 和 ρ_p 分别是流体和颗粒的密度, kg/m^3 ; D_p 为粒径, m ; R_e 为相对雷诺数; C_D 为无量纲阻力系数。

$$R_e = \frac{\rho D_p |u - u_p|}{\mu} \quad (7)$$

2.4 边界条件与初始条件

计算采用了与试验一致的设备参数和颗粒物性参数,出口处压强和流速的设置采用实测值。

1) 连续相

与外界相通的 LM 和 ED 设置为压力出口,表压为 0;与除尘器相连的 JK 亦为压力出口,表压为 -198 Pa; AB 为速度入口,气流速度为 6.2 m/s;数值模拟中为增强计算的稳定性和收敛性,且较精确地描述倾斜多孔板层中气流速度和压强的降落特征,将 MD 设置为多孔阶跃,其中面渗透率约为 10^{-7}m^2 ,压强阶跃系数为 975 Pa/m; RQ 和 SP 设置为内件,其余设置为壁面。采用湍流强度和水利直径定义入口湍流,湍流强度为 10%,水利直径为 0.3 m;壁面设置为无滑移壁面,近壁面采用标准壁面函数法处理。

2) 离散相

颗粒材料设为烟煤,粒径为 0.001 ~ 6.000 mm,满足 Rosin-Rammler 粒径分布函数。颗粒入口速度为 0,采用面射流,流量 0.2 kg/s。颗粒与壁面的碰撞系数设为 0.8,碰撞为完全反弹,出口条件为完全逃逸。

3 计算结果分析

3.1 流场分析

3.1.1 气流速度分布

在未加入颗粒的情况下,对4种不同内部结构分级机中的流场进行数值计算,得到分级机中气流速度分布、静压分布及湍动能的分布情况,具体如图4所示。由图4可知4种结构下的气流速度在3个边界口处(入料口、粗料出口和出风口)最大,在设备右下角和右上角远离边界口处最小。这是由于出风口处为负压,速度入口为正压,总体形成

从速度入口到出风口的流动;而入料口和粗料出口都与外界相连,压强高于出风口,分别形成从2个边界口到出风口的流动,且出风口处负压对流速影响很大,气流速度高达13 m/s,是进口速度的2倍。有多孔层的图4a)和4d)中,出风口流速超过无多孔层的图4b)和4c),达到13.8 m/s。这是由于多孔层造成压强和流速阶跃,增强了倾斜多孔层上方区域的流速,提升气体对细粒煤的携带作用,有利于细粒煤分离。比较图4a)和4d)可知,有导流板情况下,入料口到出风口间出现了较强的流带,可见迎风设置的导流板能增强流场。

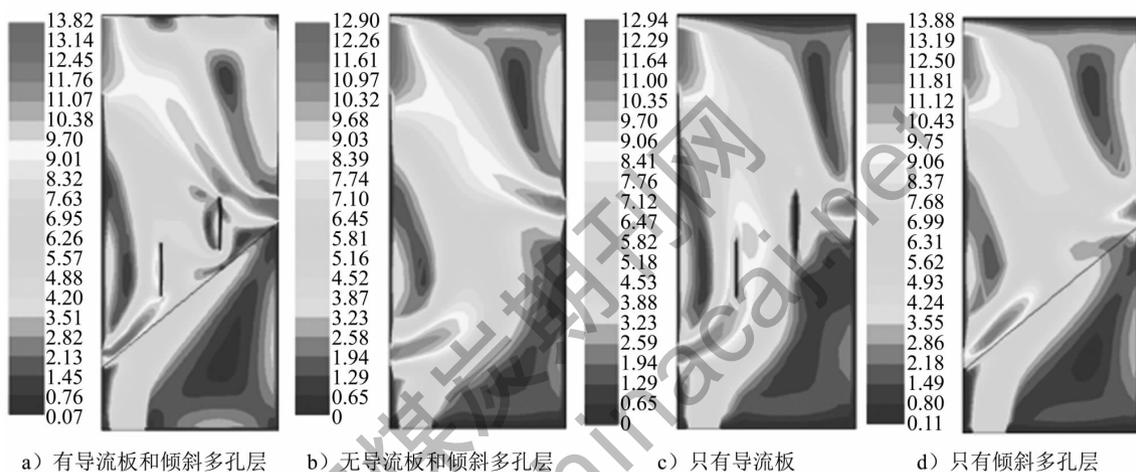


图4 气流速度分布

3.1.2 流场静压

流场静压分布如图5所示。由图5可知,倾斜多孔层造成压强的阶跃,多孔层上方和下方区域有较强的压强降落,导流板的设置对压强分布有较大影响。图4d)中多孔层上方区域压强分布较均一,而有

导流板的图4a)中多孔层上方压强分布不均,导流板两侧有较大压差,阶跃的压强能增强气流速度,有利于细粒煤分离。4种结构下流场中最大压差分别为180.90,139.27,165.23,161.28 Pa,有导流板和倾斜多孔层的结构压差最大,有利于颗粒的分散。

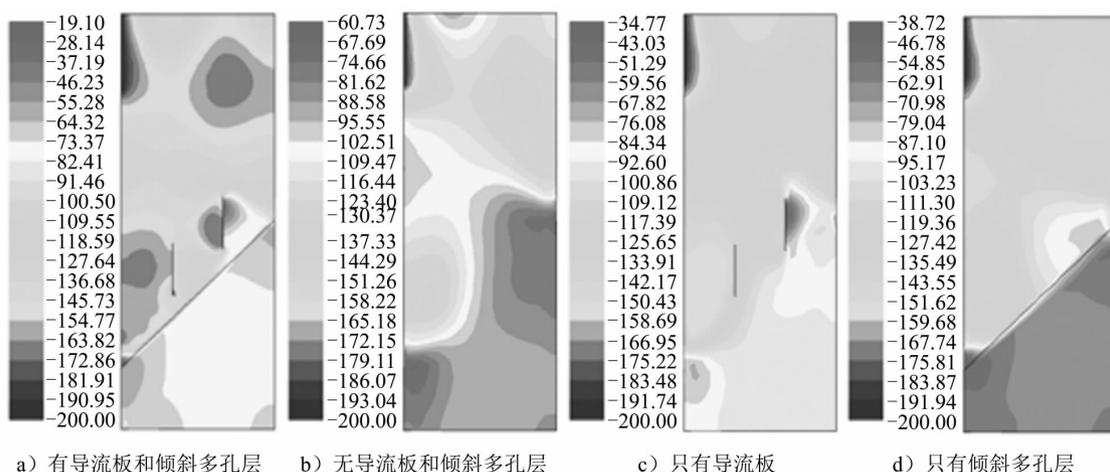


图5 流场静压分布

3.1.3 流场湍动能

流场湍动能分布如图 6 所示。

湍流分布直观地说明了内部结构对流场的分割效果。无导流板和多孔层的图 6b) 出现了较大区域和较大强度的湍流,不利于小颗粒的分离,导致小颗粒随湍流在设备内运动而无法排出。竖直导流板可将原来大范围的湍流分割,如图 6c) 所示,

但在导流板附近形成 2 个范围较小的湍流,强度较大。设置了倾斜多孔层后,只在粗料出口附近形成一个范围很小的湍流,如图 6d) 所示,主要由壁面效应造成,强度较弱且出现在多孔层下方,对分级没有影响。图 6a) 在导流板左侧出现 2 个弱小湍流,主要由导流板两侧压差造成,强度较弱,不利影响较小。

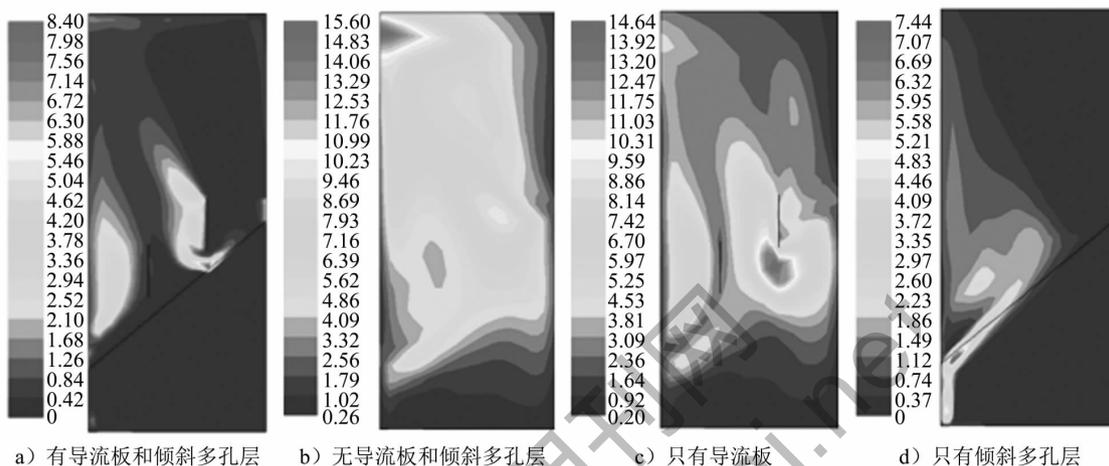


图 6 流场湍动能分布

3.2 颗粒运动轨迹分析

细粒煤运动轨迹如图 7 所示。

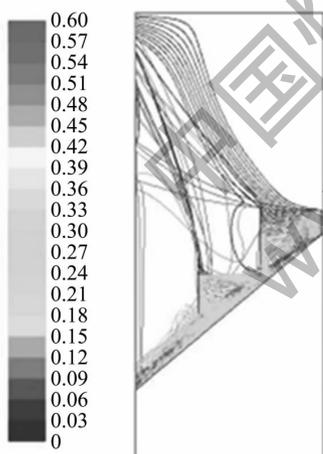


图 7 细粒煤运动轨迹

由图 7 可知,当入口气流速度为 6 m/s,出风口压强为 -200 Pa 时, -1 mm 小颗粒在曳力作用下被气流携带直接从出风口排出; +2 mm 大颗粒或团聚体主要在重力作用下沿倾斜多孔层滚落; 1 ~ 2 mm 中等颗粒或团聚体受到的曳力和重力相当,进入分级机后,在导流板和倾斜多孔层之间发生多次碰撞,碰撞中损失了动能和水平方向动量,其中较大颗粒从粗料出口低速排出,较小颗粒经过多次碰撞后在

导流板或粗料出口附近受曳力作用沿壁面上升,潮湿煤颗粒团聚体在多次碰撞中实现大小颗粒的分离,颗粒与导流板、倾斜层碰撞后产生的碰撞力可破坏潮湿细粒煤的团聚,提高分级效率。1 ~ 2 mm 团聚体与壁面发生的碰撞较多较强,因此导流板和多孔层的设置有利于中等粒径团聚体的破碎与分散;但 +2 mm 团聚体主要沿倾斜多孔层滚落,与壁面的碰撞较少较弱,碰撞对大粒径团聚体的分裂破坏作用有限。因此进一步提高潮湿细粒煤的气流分级效率,必须解决潮湿细粒煤的脱粉(小颗粒黏附在大颗粒上)问题,增强大粒径团聚体与壁面的碰撞,进一步优化分级设备内部结构。

4 结 论

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和欧拉-拉格朗日方法的离散相模型,对潮湿细粒煤气流分级机内的气固两相流进行数值模拟,得出以下结论:

1) 分级机内设置的倾斜多孔层可造成压强和流速的阶跃,提升气体对细粒煤的携带作用,有利于细粒煤的分离。

2) 导流板的设置能增强流场,提高压差,分割湍流,有利于颗粒的分散。

(下转第 9 页)

煤质逐渐变差,通过改造增加或增强某些环节的处理能力,能最大限度地发挥整个工艺系统的能力^[14]。平朔一号井选煤厂通过增加粗煤泥分选、回收系统,有效减小了细砂岩对系统的影响,提高了选煤厂的技术和经济水平,对新建动力煤选煤厂有一定的借鉴和指导意义。进一步了解细砂岩对煤泥水的影响,并在药剂的选择、添加和应用上探索出适合本厂煤泥水处理的药剂方案和药剂制度,是平朔一号井选煤厂下一步的研究方向^[15]。

参考文献:

- [1] 刘益民. 絮凝剂在洗煤厂的应用实践[J]. 山西焦煤科技, 2011(1): 41-43.
- [2] 王正书, 周学东. 粗煤泥分选工艺在安家岭选煤厂的应用[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(3): 7-9.
- [3] 张晨. 李雅庄矿洗煤厂粗煤泥回收系统的技改实践[J]. 选煤技术, 2010(3): 43-44.
- [4] 高丰. 粗煤泥分选方法探讨[J]. 选煤技术, 2006(3): 40-43.
- [5] 陈开玲, 钱坤. 浅析煤泥水的特点及治理方法[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(2): 15-17.
- [6] 谢登峰. 水力分级旋流器在我国选煤厂的应用范围及研究方向[J]. 煤炭加工与综合利用, 2009(6): 24-26.
- [7] 刘文礼, 张瑞文, 赵银荣, 等. 干扰床分选机对粗煤泥的分选试验研究[J]. 矿业工程研究, 2010, 25(1): 9-11.
- [8] 韩恒旺, 李炳才, 訾涛, 等. 粗煤泥分选设备及分选工艺研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(2): 12-14.
- [9] 赵树彦, 张春林, 徐学武, 等. “2+2”创新模式的煤泥水流程[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(2): 14-18.
- [10] 鲍玉新, 李永志, 李迎喜, 等. 高频筛在洗煤厂中的应用及技术改进[J]. 煤矿机械, 2008, 29(1): 128-129.
- [11] 许强. 塔山选煤厂煤泥系统灵活性的研究与应用[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(34): 184-187.
- [12] 姜永宁. 高产高效选煤厂管理模式探索[J]. 洁净煤技术, 2004, 10(2): 13-15.
- [13] 贺天才, 马洪礼, 宋洪刚, 等. 改造煤泥水系统提高选煤厂综合效益[J]. 中国煤炭, 2003, 29(9): 47-49.
- [14] 郭苗, 张海林. 煤泥水闭路循环技术改造的实践[J]. 选煤技术, 1999(5): 28-30.
- [15] 罗元富, 田沫. 二塘选煤厂煤泥水处理药剂制度的改进[J]. 选煤技术, 2007(4): 97-98.

(上接第5页)

3) 潮湿细粒煤进入分级机后,小颗粒在导流板附近受曳力作用上升从细料出口逸出,大颗粒沿倾斜多孔层滚落于粗料出口排出,实现分级。导流板和多孔层的设置有利于中等粒径团聚体的破碎与分散,但对大粒径团聚体的分裂破坏作用有限。

因此,CFD模拟采用的模型和算法具有较高精度,模拟结果与试验结果吻合,为分级机的结构优化和操作参数的选择提供有力指导。

参考文献:

- [1] 成玉琪, 杜铭华, 余洁, 等. 中国洁净煤技术发展述评[J]. 洁净煤技术, 1999, 5(1): 5-12.
- [2] 徐虎. 洁净煤技术的展望[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(1): 89-92.
- [3] 马汉鹏, 王德明. 矿井粉尘防治技术探讨[J]. 洁净煤技术, 2005, 11(4): 68-70.
- [4] 陈清如, 杨玉芬. 干法选煤的现状和发展[J]. 中国煤炭, 1997, 23(4): 19-22.
- [5] 陶秀祥, 赵跃民, 杨国华, 等. 潮湿细粒煤炭筛分过程堵孔机理的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 196-199.
- [6] 孙乾, 蒋善勇, 章新喜, 等. 潮湿煤炭水分对气流分级效果的影响[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(2): 26-29.
- [7] 邓锋, 章新喜, 王进松, 等. 一种新型煤炭干法分级设备的试验研究[J]. 煤炭技术, 2010, 29(11): 109-110, 113.
- [8] 蒋善勇, 孙乾, 章新喜. 操作参数对潮湿煤炭气流分级效果的影响[J]. 科技信息, 2007(24): 310-303.
- [9] 孟营, 章新喜, 杨啸, 等. 潮湿细粒煤炭复合式气流分级机性能的试验探究[J]. 矿山机械, 2013, 41(6): 80-83.
- [10] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [11] 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] 何亚群, 赵跃民, 段晨龙, 等. 主动脉气流分选机理及流场模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(5): 1199-1204.
- [13] 肖志祥, 李凤蔚, 鄂秦. 湍流模型在复杂流场数值模拟中的应用[J]. 计算物理, 2003, 20(4): 335-340.
- [14] 任志安, 郝点, 谢红杰. 几种湍流模型及其在FLUENT中的应用[J]. 化工装备技术, 2009, 30(2): 38-40, 44.
- [15] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [16] 于静梅, 陈永辉, 杨柳, 等. 可调浓淡燃烧器内风煤两相流的数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(1): 74-77.