

CFB-FGD 布袋除尘器内气固流动特性的数值模拟研究

刘 玲¹, 卢 平¹, 黄 震²

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)
(2. 南京龙玖环境工程有限公司, 江苏 南京 210009)

[摘要] 采用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型和离散相模型对循环流化床烟气脱硫(CFB-FGD)布袋除尘器内气固两相流动进行了数值模拟,分析了进口烟道结构形式、气流均布板和锅炉负荷等对改进前后布袋除尘器的流场分布、阻力特性及颗粒相流动状况的影响规律. 模拟结果表明,渐扩型进口烟道和具有一定开孔率的气流均布板可很好地改善除尘器内流场分布的均匀性. 与布袋除尘器原型相比,改进型除尘器内的颗粒流动更加均匀,同时灰斗积灰对颗粒相均匀分散有一定的改善作用. 不考虑粉尘堆积情况下,改进型布袋除尘器总阻力损失与锅炉负荷满足二次函数关系.

[关键词] 循环流化床烟气脱硫,布袋除尘器,气流均布板,数值模拟

[中图分类号]TK09;X701.2 [文献标志码]A [文章编号]1672-1292(2014)01-0029-06

Numerical Simulation on Gas-solid Flow Characteristics of a CFB-FGD Bag-Filter

Liu Ling¹, Lu Ping¹, Huang Zhen²

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)
(2. Nanjing Longrow Environmental Engineering Co. Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract: Based on the $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model and discrete phase model(DPM), the numerical simulation of the gas-solid two-phase flow characteristics of original and modified bag-filters for circulating fluidized bed flue gas desulphurization(CFB-FGD) is carried out. The effects of flue gas duct structure, flue gas distributor and boiler load on flow filed distribution, resistance properties, particle flow trajectory of original and modified bag-filters are analyzed. Simulation results indicate that the uniformity of flow field distribution in the bag-filter can be improved by diverging inlet flue gas duct and flue gas distributor with a certain opening ratio. The particle flow in modified bag-filter is more uniform than that in original bag-filter, and fly ash deposition in the hopper can enhance the particle distribution in the modified bag-filter. The resistance loss of modified bag-filter and the boiler load meet the needs of quadratic function under no ash deposition in the surface of filter bag.

Key words: CFB-FGD, bag-filter, flue gas distributor, numerical simulation

循环流化床烟气脱硫(Circulating fluidized bed flue gas desulphurization, CFB-FGD)是一种半干法尾部烟气脱硫技术,它利用了循环流化床优良的传热传质性能,具有投资相对较低、脱硫效率相对较高、设备运行可靠、操作维护方便和占地面积小等优点,已受到越来越多研究者的重视和广泛的工程应用^[1]. 我国也将 CFB-FGD 烟气脱硫技术作为重点研究开发和推广的烟气脱硫技术之一. 除尘装置作为 CFB-FGD 系统的关键部件之一,其内部气固流动特性对于 CFB-FGD 系统的正常运行具有重要影响. 由于袋式除尘器具有除尘效率高、适应性强、运行稳定可靠以及能满足日趋严格的环保要求等优点,已被作为脱硫塔内高浓度含尘烟气的除尘与返料装置,广泛应用于 CFB-FGD 系统.

布袋除尘器内气固流动特性对于降低系统阻力、延长布袋使用寿命等均具有重要影响. 计算流体力学

收稿日期:2013-07-14.
基金项目:国家自然科学基金(51076067)、江苏省自然科学基金(BK2010081).
通讯联系人:卢 平,博士,教授,研究方向:能源清洁利用与污染物控制. E-mail: luping@njnu.edu.cn

(CFD)数值模拟技术是研究气固流动的重要手段之一,近年来得到了国内外各国学者的普遍关注. Ivanovl^[2]通过对 Fluent 软件提供的多相流模型比较研究,提出了利用 VOF、Mixture 和 Eulerian 3 种多相流模型模拟旋风除尘器流场所需的条件. Aroussi 等^[3]利用 CFD 模拟了单滤筒过滤时粉尘颗粒的运动特性,并通过实验结果验证了 CFD 模拟粉尘颗粒运动轨迹的有效性. 张樱等^[4]应用 Fluent 软件研究了袋式除尘器内气流均布板设置以及滤袋高度等对袋式除尘器内部流场的影响,提出了除尘器内部气流分布的措施. 陈少华等^[5]利用 CFD 方法对下进风式布袋除尘器内滤袋进行了简化,并模拟了其内部流场,给出了实现气流均匀分布的导流板与入口风速的设置方案. 潘伶等^[6]通过对袋式除尘器流量分配和气流分布的数值模拟结果表明,气流均布板结构优化可以实现除尘器箱体流量的合理分配. 本文根据 CFB-FGD 系统的工作特点,利用 Fluent 软件研究进口烟道结构形式、气流均布板和烟气负荷等因素对布袋除尘器气固流动特性的影响规律,旨在为 CFB-FGD 系统除尘器的优化设计提供指导.

1 数学模型的建立

1.1 气相控制方程和湍流模型

气相控制方程包括质量方程和动量方程,分别由式(1)和式(2)表示:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j)=-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)+f_i, \tag{2}$$

式中, u_i 、 u_j 为速度分量; x_i 、 x_j 为坐标分量; ρ 为密度; P 为压力; μ 为流体分子的动力黏度; f_i 包含了其他的模型相关源项,如多孔介质和自定义源项.

本文采用标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟气相流场,该模型包括湍动能 k 方程(3)和耗散率 ε 方程(4).

$$\rho \frac{dk}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho \varepsilon-Y_M, \tag{3}$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon} G_b\right)-C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{4}$$

式中,湍流黏度 $\mu_t=\rho C_\mu k^2 / \varepsilon$. 模型通用常数的取值分别为 $C_{1\varepsilon}=1.44$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.92$ 和 $C_{3\varepsilon}=0.99$;湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k=1.0$ 和 $\sigma_\varepsilon=1.3$.

1.2 DPM 模型

颗粒相采用拉格朗日离散颗粒模型. 根据袋式除尘器内气相及颗粒流动的实际情况,认为离散相模型中颗粒相非常稀薄,忽略颗粒-颗粒间的相互作用以及颗粒体积分数对连续相的影响. 为较好地追踪颗粒的运动轨迹,做出了如下简化假设:

- (1)颗粒密度为常数,在运动过程中无化学反应,且与气相之间没有任何质量交换;
- (2)袋式除尘器入口处的颗粒速度均匀,进口速度等于气相流速,且在进口截面上均匀分布;
- (3)各颗粒沿自身的轨道运动而互不干扰,颗粒群没有自身的湍流粘性与湍流扩散;
- (4)整个流场温度恒定,不考虑能量传递.

建立颗粒相模型时,采用拉氏公式考虑离散相颗粒的曳力、重力和升力^[7]. 颗粒满足的动量守恒方程为:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt}=\mathbf{F}_s+\mathbf{F}_b, \tag{5}$$

式中, m_p 为颗粒质量,kg; \mathbf{v}_p 为颗粒的速度矢量,m/s; t 为颗粒的运动时间,s; \mathbf{F}_s 为颗粒表面受的力,N; \mathbf{F}_b 为颗粒自身受的力,N.

2 物理模型和数值计算方法

2.1 布袋除尘器原型的结构和几何参数

CFD-FGD 布袋除尘器原型结构如图 1 所示,该除尘器由烟气进口、进口烟道、灰斗、箱体、滤袋组和烟

气出口等组成。箱体结构尺寸为 7 200×7 200×10 000 mm;灰斗为高 7 300 mm 的倒四棱锥,灰斗侧面与水平面的夹角为 65°。滤袋口呈椭圆形,其折合直径为 $\Phi 130$ mm,滤袋长为 8 130 mm。箱体内设置了 900 条滤袋组成的外径为 $\Phi 5\ 800$ mm 滤袋组,滤袋截面布置如图 2 所示。

2.2 改进型袋式除尘器的结构和几何参数

改进型袋式除尘器的结构如图 3 所示,即在除尘器烟气入口直侧板外增加一个渐扩型侧板,并在原有的直侧板位置处设置一块矩形气流均布板。气流均布板宽度与箱体相同,其上端与箱体上沿平齐,下端距离灰斗上沿 400 mm。沿垂直方向将气流均布板分成三个开孔率不同的区块,其中中间区块的宽度为 5 800 mm,开孔率为 10%;两侧区块的宽度相等,开孔率均为 35%。

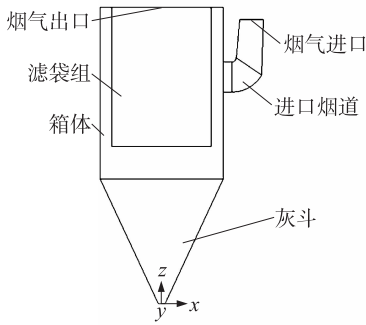


图1 布袋除尘器原型结构示意图

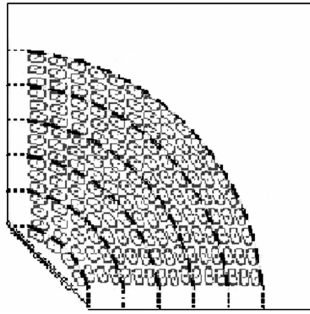


图2 滤袋截面布置示意图

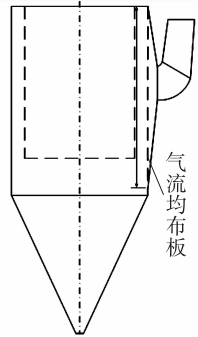


图3 改进型除尘器结构示意图

Fig.1 Schematic of the original bag filter

Fig.2 Cross-sectional arrangement of filter bag

Fig.3 Schematic of modified bag filter

2.3 滤袋与气流均布板的计算模型与处理方法

滤袋与气流均布板采用多孔介质跳跃模型,其本质是对单元区域的多孔介质模型的一维简化。流体穿过介质的压力损失 Δp 为 Darcy 公式和附加内部损失项的结合,可用式(6)表示^[8]:

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v + \frac{1}{2}C_2\rho v^2\right)\Delta m, \quad (6)$$

式中, μ 为流体动力黏性系数,Pa·s; α 为多孔介质的渗透率, m^2 ,是表征多孔介质透气性强度的参数; C_2 为压力跳跃系数, m^{-1} ; v 为垂直于介质表面的速度分量,m/s; Δm 为过滤介质的厚度,m。一般袋式除尘器设计过滤风速只有 1 m/min 左右,压力损失主要表现为黏性损失,可忽略内部阻力项^[9],则式(6)可简化为:

$$\Delta p = -\frac{\mu}{\alpha}v\Delta m. \quad (7)$$

根据文献[10,11],气流均布板的渗透率 $\alpha = 1.0\ m^2$,且粘性系数很小,于是,式(6)中粘性附加项近似为零,可简化为式(8):

$$\Delta p = -\frac{1}{2}C_2\rho v^2\Delta m. \quad (8)$$

根据阻力公式:

$$\Delta p = -\frac{1}{2}K_l\rho v^2, \quad (9)$$

式中, K_l 为不同开孔率的阻力系数。按照式(10)计算^[10,11]:

$$K_l = (0.707\sqrt{1-f} + 1 - f)^2/f^2, \quad (10)$$

式中, f 为气流均布板开孔率。由式(8)和式(9)可得 $C_2 = K_l/\Delta m$ 。

2.4 数值计算方法和边界条件

气相采用稳态 3D 分离隐式解算器,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,对流项选取二阶迎风离散格式,在近壁区采用壁面函数法。采用速度入口边界条件、压力出口边界条件和多孔跳跃边界条件,各壁面均设为无滑移壁面。

烟气进口风速为 11.16 m/s,其密度为 1.034 4 kg/m³,动力黏度为 1.939×10⁻⁵ Pa·s,气流均布板厚度为 6 mm,出口负压取-5 500 Pa。根据 47.6% 开孔率的花板将烟气出口面积折算为 $\Phi 4\ 002$ mm 圆形出口。除尘器中的滤袋组简化成直径 5.8 m 和高 8.13 m 的单滤袋,滤袋的渗透率为 3.61×10⁻¹¹ m²,厚度为 2 mm,

压力跳跃系数为 $4\,717^{[9,12]}$. 颗粒颗粒直径为 $10\,\mu\text{m}$, 颗粒密度为 $2\,000\,\text{kg/m}^3$, 在除尘器入口处以面源方式均匀释放, 其进口速度为 $11.16\,\text{m/s}$, 质量流量为 $0.28\,\text{kg/s}$. 固体壁面与出口边界条件分别取为弹性反射条件与逃逸面, 气流均布板及滤袋边界条件分别设为 interior 与 trap.

3 计算结果与分析

3.1 改进前后袋式除尘器内的气流分布特性

图 4~图 6 分别给出了改进前后袋式除尘器不同截面的速度分布. 由图 4~图 6 可知, 对袋式除尘器原型而言, 当烟气经进口烟道进入除尘器箱体时, 由于其入口烟气风速较大, 烟气在除尘器入口截面(图 5(a), $X=2\,900\,\text{mm}$)以及滤袋迎风面周围(图 6(c))形成明显的高速射流, 其中大部分烟气直接穿过滤袋, 并沿着滤袋的高度方向上升; 小部分烟气流向滤袋两侧和底部运动, 因此, 形成了气流对滤袋组前排与两侧的严重冲刷, 这将加速此区域滤袋磨损, 从而导致粉尘过滤效率和滤袋寿命的下降. 对于改进型袋式除尘器而言, 由于在进口烟道喉部增设了渐扩段以及开孔率不等的气流均布板, 除尘器入口即内部流场分布的不均匀性得到了较大的改善(如图 5(b)和图 6(d)). 由图可知, 在气流均布板的均流作用下, 入口截面($X=2\,900$)气速降低较为明显, 截面气流分配更加均匀, 气流对前排与两侧滤袋的冲刷作用大大减弱, 滤袋的迎风面得到了很好的保护, 同时整个布袋除尘器内的气流分布也更为均匀.

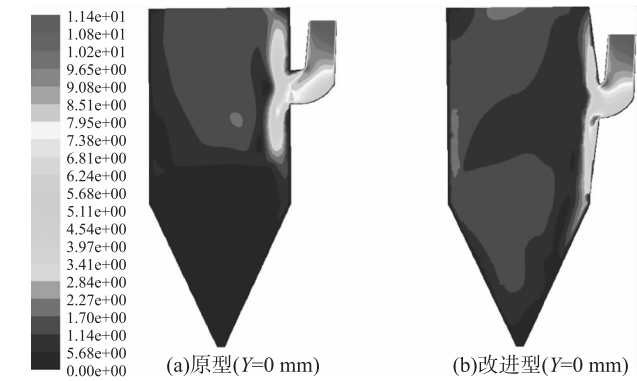


图 4 改进前后袋式除尘器 Y 截面的速度分布
Fig. 4 Velocity distribution of Y-section of the original and modified bag filters

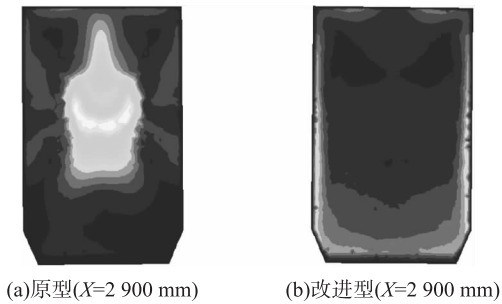


图 5 改进前后袋式除尘器 X 截面的速度分布
Fig. 5 Velocity distribution of X-section of the original and modified bag filters

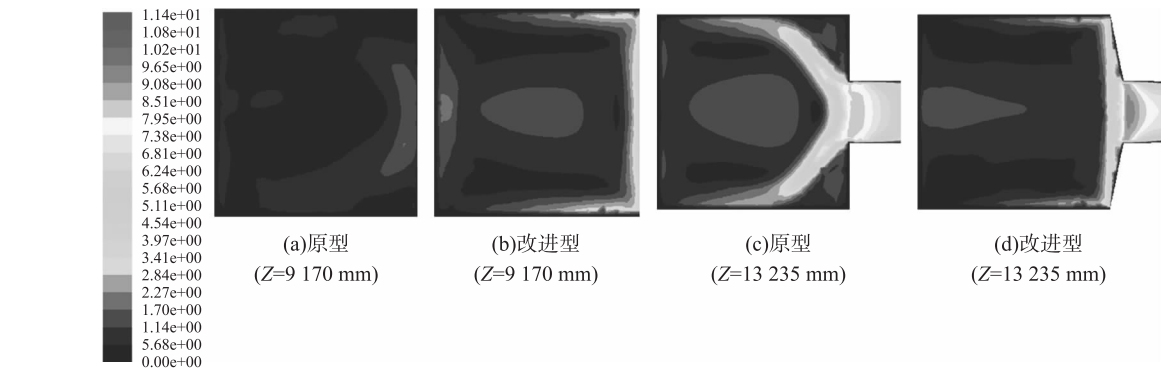


图 6 改进前后袋式除尘器 Z 截面的速度分布
Fig. 6 Velocity distribution of Z-section of the original and modified bag filters

3.2 改进前后袋式除尘器的阻力特性

图 7 给出了改进前后袋式除尘器阻力损失的变化情况, 其中锅炉负荷 L 为 100% . 由图 7 可知, 在不考虑布袋表面粉尘堆积条件下, 改进型布袋除尘器阻力较布袋除尘器原型增加了 52.6% . 在气流均布板作用下, 除尘器内的烟气分布更加均匀, 烟气流程延长, 从而使沿程阻力损失稍有增加. 此外, 当袋式除尘器工作时, 由于飞灰在滤袋表面的堆积作用, 由滤袋层产生的阻力降约为 $1\,000\,\text{Pa}$, 因此, 上述基础压降增加对布袋除尘器的影响还是很小的.

图 8 给出了锅炉负荷对改进型布袋除尘器的阻力特性的影响,其中锅炉负荷为 60% ~ 120% . 由图 8 可以看出,随着锅炉负荷的增加,布袋除尘器系统阻力不断增大. 不考虑粉尘堆积情况下,布袋除尘器的阻力与负荷可用式(11)表示:

$$\Delta P=73L^2, \tag{11}$$

式中, ΔP 为布袋除尘器的阻力损失, Pa; L 为锅炉负荷.

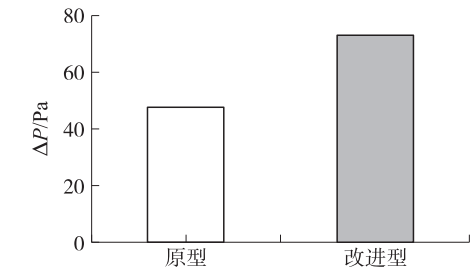


图 7 改进前后布袋除尘器的阻力损失
Fig. 7 Resistance loss of the original and modified bag filter

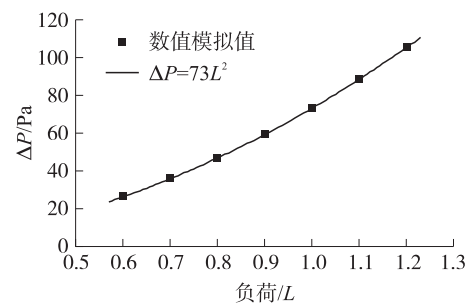


图 8 不同负荷下改进型布袋除尘器的阻力损失
Fig. 8 Resistance loss of the modified bag filter at different boiler load

3.3 改进前后布袋除尘器内颗粒流动特性

图 9 给出了改进前后布袋除尘器内离散颗粒相的流动轨迹,其中灰斗内有积灰是表示在灰斗高度方向 $Z=3\ 650\ \text{mm}$ 位置及其以下部分存有除尘飞灰,因此计算时不考虑该区域内两相流体流动. 由图 9 可知,对布袋除尘器原型而言,具有较高进口速度的颗粒对除尘器进口处的滤袋产生了较强的冲刷作用,使得大部分颗粒直接被烟气入口附近的滤袋捕集,仅有少部分颗粒流向滤袋两侧和底部,进而与滤袋接触并被捕集. 总体而言,颗粒在除尘器箱体内的充满度较差,大部分颗粒集中于箱体的中部. 对改进型布袋除尘器来说,颗粒相在布袋除尘器内流动轨迹的分布更加均匀,颗粒充满度更好,较多的颗粒流向四周壁面和箱体底部;与灰斗内无积灰时颗粒运动相比,灰斗积灰对颗粒相均匀分散有一定的改善作用. 总体而言,渐扩型进口以及气流均布板较好地改善了除尘器箱体内部烟气和颗粒的流动情况,从而可以有效延长布袋除尘器的使用寿命.

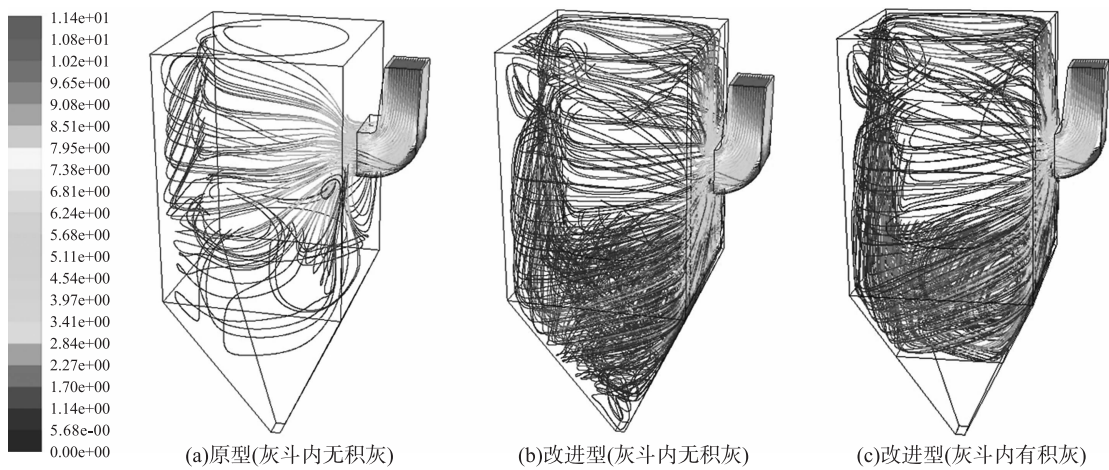


图 9 布袋除尘器内颗粒运动轨迹
Fig. 9 Particle trajectory of the original and modified bag filters

4 结语

- (1)对布袋除尘器原型,进入箱体的高速气流将会对入口侧外围滤袋产生严重的冲刷磨损;对改进型布袋除尘器,由于渐扩型进口和气流均布板的双重作用,极大地提高了布袋除尘器入口及其内流场分布的均匀性.
- (2)在不考虑滤袋表面粉尘堆积条件下,改进型布袋除尘器阻力损失较原型稍有增加,但与实际运行

阻力相比阻力损失的增加可以忽略;布袋除尘器阻力损失随着锅炉负荷的增加而增大,其阻力与负荷可用二次函数 $\Delta P=73L^2$ 表示。

(3)对布袋除尘器原型而言,颗粒相以较高的入口流速直接冲刷烟气入口侧的外围滤袋,颗粒充满度较差,且大部分颗粒集中于烟气入口附近的滤袋;对改进型布袋除尘器而言,颗粒相充满度得到了极大提高,颗粒流动更加均匀,同时,灰斗积灰对颗粒相均匀分散有一定的改善作用。

[参考文献](References)

- [1] 李艳平,胡金榜,赵凯.循环流化床脱硫器气固两相流动的数值模拟[J].高校化学工程学报,2008,22(3):454-459.
Li Yanping,Hu Jinbang,Zhao Kai. Numerical simulation of gas solid flow in circulating fluidized bed desulfurization reactor [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities,2008,22(3):454-459. (in Chinese)
- [2] Ivanov V A,Sarasola F J,Vasquez S A. Multiphase mixture model applied to cyclone separators and bubble columns[J]. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP,1999,397(1):317-324.
- [3] Aroussi A,Simmons K,Picketing S J. Particulate deposition on candle filters[J]. Fuel,2001,80(3):335-343.
- [4] 张樱,王贺岑,安连锁,等.不同袋室结构下除尘器内部流场数值模拟研究[J].能源与节能,2012(12):111-114.
Zhang Ying,Wang Hecen,An Liansuo,et al. Study on internal flow field numerical simulation of filter with different bag structures[J]. Energy and Energy Conservation,2012(12):111-114. (in Chinese)
- [5] 李少华,王坤玉,格日勒,等.袋式除尘器气流分布均匀性的数值模拟[J].电站系统工程,2009,25(2):17-18,31.
Li Shaohua,Wang Kunyu,Ge Rile,et al. Numerical simulation of air distribution uniformity in bag-type filter[J]. Power System Engineering,2009,25(2):17-18,31. (in Chinese)
- [6] 潘伶,杨燕珍.袋式除尘器内部流场的数值模拟[J].环境工程学报,2012,6(8):2 750-2 754.
Pan Ling,Yang Yanzen. Numerical simulation of flow field in bag filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012,6(8):2 750-2 754. (in Chinese)
- [7] 万芬,彭小勇,谢清芳,等.基于离散相模型的铀尾矿砂大气迁移数值模拟[J].安全与环境学报,2013,13(1):96-101.
Wan Fen,Peng Xiaoyong,Xie Qingfang,et al. Numerical simulation of atmosphere migration of uranium tailings grit based on DPM[J]. Journal of Safety and Environment,2013,13(1):96-101. (in Chinese)
- [8] 李萌萌.基于 CFD 对袋式除尘器流场的数值模拟分析[D].武汉:武汉科技大学资源与环境工程学院,2010.
Li Mengmeng. Numerical simulation analysis on flow filed in bag filter based on CFD[D]. Wuhan:School of Resources and Environmental Engineering,Wuhan University of Technology,2010. (in Chinese)
- [9] 王以飞,沈恒根.袋式除尘器在线清灰流场分布的研究[J].环境工程,2010,28(2):72-77.
Wang Yifei,Shen Henggen. Study on airflow distribution of on-line cleaning bag filter[J]. Environmental Engineering,2010, 28(2):72-77. (in Chinese)
- [10] 李雪梅.电除尘器内部气流分布特性的数值研究[D].吉林:东北电力大学能源与机械工程学院,2009.
Li Xuemei. Numerical simulation on the characteristic of the gas flow in the electrostatic precipitator[D]. Jilin:School of Energy and Mechanical Engineering,Northeast Dianli University,2009. (in Chinese)
- [11] 蔡竹.基于气流分布板不同开孔率的电除尘器内气粒运动模拟研究[D].武汉:武汉科技大学资源与环境工程学院,2009.
Cai Zhu. Simulation study of gas-particle movement based on different opening rate of air distribution plate in ESP[D]. Wuhan:School of Resources and Environmental Engineering,Wuhan University of Technology,2009. (in Chinese)
- [12] 黄飞.袋式除尘器气固两相流动数值模拟与优化研究[D].南京:东南大学能源与环境学院,2012.
Huang Fei. Numerical simulation study and optimization on the gas-solid two phase flow in the bag-filter[D]. Nanjing:School of Energy and Environment,Southeast University,2012. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]