

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704048



立轴冲击式破碎机除尘的 数值模拟与仿真分析

宋 意¹, 杨建红¹, 房怀英¹, 陈俊龙²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建南方路面机械有限公司 技术部, 福建 泉州 362000)

摘要: 采用计算流体力学(CFD)理论中的离散相模型(DPM)对立轴冲击式破碎机内部复杂的气固两相流进行数值仿真,模拟立轴冲击式破碎机除尘装置除尘过程,探究除尘装置的除尘效果及最佳风机风量.以不同粒径的固体颗粒为入射源,分别从流场的速度、压强等方面讨论分析破碎机内部气固耦合作用,分析在除尘口风机不同风量下破碎机的除尘装置对不同粒径的颗粒的分离效果.结果表明:风机风量在最大值的 40%~60%之间时,既能保证除尘装置的除尘效果,又能尽量避免粒径较大的颗粒被吸除.

关键词: 立轴冲击式破碎机; 计算流体力学; 离散相模型; 气固两相流; 除尘

中图分类号: TH 232 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0014-06

Numerical Simulation and Simulation Analysis on Dust Removal of Vertical Impact Crusher

SONG Yi¹, YANG Jianhong¹, FANG Huaiying¹, CHEN Junlong²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Department of Technology, Fujian South Highway Machinery Limited Company, Quanzhou 362000, China)

Abstract: A numerical simulation of gas-solid two phase flow in a vertical shaft impact crusher was conducted using a discrete phase model(DPM) of computational fluid dynamics(CFD) theory to simulate the dusting process and find an optimum capacity of the exhaust fan for best dusting. Particles with different diameters were set as injections to analyze the gas-solid coupling effect in the crusher from the aspect of speed and pressure, etc. respectively and analyze the dusting efficiency for different diameter particles while different blast capacity of exhaust fan act on dust outlet. The experimental results indicate that 40%-60% of maximum blast capacity of exhaust fan can ensure effective dusting and avoid suction of bigger particles.

Keywords: vertical shaft impact crusher; computational fluid dynamics; discrete phase model; gas-solid two phase flow; dusting

立轴冲击式破碎机起源于 20 世纪 70 年代新西兰,80 年代逐步在中国推广^[1],其广泛适用于各种岩石、水泥熟料等多种硬脆物料的破碎^[2].破碎过程产生颗粒粒径在 150 μm 以下的粉尘,影响骨料级配,污染环境.通过在破碎机外部添加除尘结构,可实现矿石在破碎的过程中除尘.近年来,数值仿真成为研究流体流场和颗粒运动的有力手段^[3].采用数值求解的方法求解控制方程的计算流体力学,

收稿日期: 2017-04-16

通信作者: 房怀英(1978-),女,副教授,博士,主要从事高端机制砂产品的研究与开发的研究. E-mail:happen@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家国际合作项目(2015DFA710402);福建省产学研合作重大项目(2014H6017,2016H6013);福建省产业技术联合创新项目(2015 年度)

(CFD)已经成为模拟流体流动的主要技术手段^[4],可用于模拟结构复杂的几何体的内部流场^[5]. CFD 与其他计算方法耦合时可用于模拟气固两相流耦合作用,如张学强等^[6]利用 CFD 与离散单元法离散单元法 (DEM)耦合模型模拟流体流动和颗粒相运动,模拟密相气力运输过程,并对其进行优化. Berrouk 等^[7]采用基于欧拉-拉格朗日方法的密相离散相模型耦合 (DPM)模型模拟流化床气泡形成、长大、运动、颗粒的分布规律,得到相比欧拉-欧拉方法更加全面的颗粒分布规律和气泡分布情况,与同等条件下的实验结果一致. Kloss 等^[8]采用 CFD-DEM 模型模拟连续相和离散相的相互作用关系,并进行相应实验验证 CFD-DEM 模型的准确性和可靠性. CFD-DPM 耦合模型是处理气固两相流的另外一种模型^[9],相对于 CFD-DEM 模型而言,颗粒被视作为质点作稀疏相处理,不考虑颗粒与颗粒之间碰撞占用的计算机资源少,计算速度快^[10]. Takeuchi 等^[11]采用 CFD-DPM 模型对冲击式粉碎机内部气固耦合作用进行数值仿真,并进行同等条件实验,仿真与实际结果相对吻合. 立轴冲击式破碎机在破碎除尘的过程中,当除尘口内风量较大时,除尘装置在吸除粉尘的同时也会带走一部分成品砂;当除尘管口风量较小时,除尘效果不佳. 本文采用 CFD-DPM 模型模拟破碎机内部气固耦合作用,模拟和探讨立轴冲击式破碎机在不同风机风量得情况下对不同粒径的颗粒的分离效果,探究风机最佳除尘风量.

1 立轴冲击式破碎机及除尘装置

立轴冲击式破碎机内部结构示意图,如图 1 所示. 破碎机由入料口、除尘腔、破碎腔、挡板、出料口等静止结构和转子组成. 除尘腔为内部安装有挡板与挡环的圆环柱体结构,外径为 296 mm,内径为 185 mm,高度为 570 mm;除尘口与除尘腔相连且偏置于除尘腔的一侧;转子半径为 250 mm,最大线速度为 $55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;除尘口由风机产生一个速度向外的流场,风机最大风量为 $100\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$.

由图 1 可知:研究带有除尘功能的破碎机除尘效果,物料由入料口进入立轴冲击式破碎机,在转子的加速作用下以较高的速度抛出转子,并与物料衬层发生碰撞并破碎,在除尘口风机产生的负压作用下,粒径较小的粉尘颗粒经由除尘腔到达除尘口,粒径较大的骨料则直接由破碎腔落入产品出口,从而实现破碎机破碎过程中除尘.

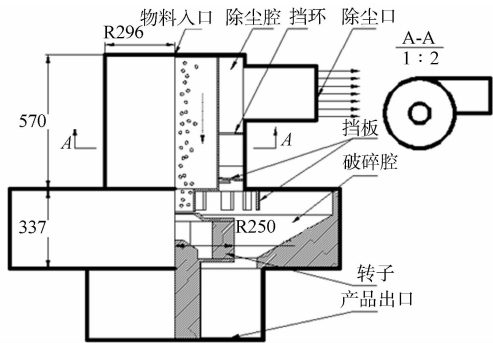


图 1 立轴冲击式破碎机示意图(单位:mm)
Fig. 1 Schematic diagram of vertical shaft impact crusher (unit: mm)

2 气固两相流数值模型

2.1 湍流模型

目前广泛应用的湍流模型中有 Jones 与 Spalding 提出的标准 $k-\epsilon$ 模型,和经过修正的各种低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型^[12-13]. 然而,相比于标准 $k-\epsilon$ 模型,修正后的 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动^[14].

修正后 $k-\epsilon$ 模型的湍流涡粘系数表达式为

$$\mu_1 = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}. \tag{1}$$

湍流动能方程(k 方程)为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon + Y_m + S_k. \tag{2}$$

耗散方程(ϵ 方程)为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} + G_b + \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} S_\epsilon. \tag{3}$$

式(2),(3)中: G_b 为由于浮力而引起的湍动能 k 的产生项; G_k 为由于速度梯度引起的应力源项; Y_m 为可压湍流中脉动的扩张项; $C_{1\epsilon}, C_2$ 为经验常数; ρ_k 和 ρ_ϵ 为湍动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数, $\rho_k = 1.0$,

$\rho_\epsilon=1.3$; S_k, S_ϵ 为用户定义源项; ρ 为气体密度; $C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right]$; $C_{3\epsilon} = \tanh\left|\frac{u_{hg}}{u_{vg}}\right|$, u_{hg}, u_{vg} 分别为流体水平方向和垂直方向速度.

相比于标准的 $k-\epsilon$ 模型,修正后的 $k-\epsilon$ 模型能更准确地模拟旋流. 因此,文中湍流模型选择修正后的 $k-\epsilon$ 双方程模型.

2.2 固体颗粒在气相流场内的受力

DPM 模型要以颗粒受力作为研究的切入点,离散相颗粒在气相流场运动过程中,所受重力与浮力是最基本的两个力. 此外,还有多个力作用于颗粒. 颗粒运动轨迹是由求解拉格朗日坐标下的运动方程得到^[15],即

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_d + F_p + F_{vir} + F_g + F_{others}.$$
 (4)

式(4)中:连续相对离散相的曳力 F_d 为

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d Re_p}{24} \rho_p (u - u_p).$$
 (5)

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}.$$
 (6)

式(5),(6)中: u 为气相流体速度; u_p 为颗粒速度; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒直径; Re_p 为颗粒雷诺数; C_d 为曳力系数或阻力系数; ρ 为气体密度.

压力梯度力 F_p 是气相流场中压力梯度对颗粒引起的作用力,其表达式为

$$F_p = \int_A -p dA = \int_V -\Delta p dV = -\frac{m_p}{\rho_p} \Delta p.$$
 (7)

由颗粒表观质量效应产生的虚假质量力 F_{vir} 为

$$F_{vir} = \frac{m_p}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d(u - u_p)}{dt}.$$
 (8)

颗粒在流体中所受的重力 F_g 为

$$F_g = m_p \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g.$$
 (9)

此外, F_{others} 还包括固体颗粒在流体中受到的 Basset 力、Saffman 力和 Magnus 升力等不同作用力. Basset 力只存在于有粘性的流体中,与流动的不稳定性有关. Saffman 力为颗粒主流动方向上下侧的速度大小不同,颗粒将受到一个升力的作用. 固体颗粒在运动时还伴随着高速旋转,固体颗粒旋转时也会产生一个与流体速度相垂直的 Magnus 升力.

文中固体颗粒相的密度远大于气相的密度,通用 DPM 模型将颗粒看作表面光滑的球体,于是认为颗粒不受气相流场的外力矩^[16],因此,忽略固体颗粒相所受到的虚拟质量力、压力梯度力、Magnus 升力,仅考虑气体与固体颗粒之间的拖曳力、固体颗粒与立轴冲击式破碎机壁面的碰撞等.

2.3 仿真条件

不考虑颗粒在破碎机中的破碎,研究破碎机除尘装置对不同粒径颗粒的分离效果,仿真参数如表 1 所示. 表 1 中:固体颗粒与壁面之间的法向碰撞恢复系数位 0.5,切向碰撞的恢复系数为 0.83^[17].

2.4 网格划分

立轴冲击式破碎机内部结构复杂,如图 2(a)所示. 对模型细节进行简化处理,得到 CFD 仿真的简化物理模型,如图 2(b)所示. 运用 ICEM 软件对破碎机转动部分和静止部分的流场域分开进行网格划分,并使用 interface 将两部分链接起来,由于模型总体尺寸较大,网格单元总数为 2 227 050,如图 2(c)所示. 仿真中采用滑移网格实现内部转子转动.

表 1 不同粒径颗粒的分离效果仿真条件
Tab.1 Separation effect of particles with different particle size simulation conditions

仿真条件	仿真参数
流体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.225
出口流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	26.9
颗粒进口流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.0
法向碰撞恢复系数	0.50
切向碰撞恢复系数	0.83
流体进口压力/kPa	101.325
颗粒密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 640
转子转速(滑移网格)/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	2 100

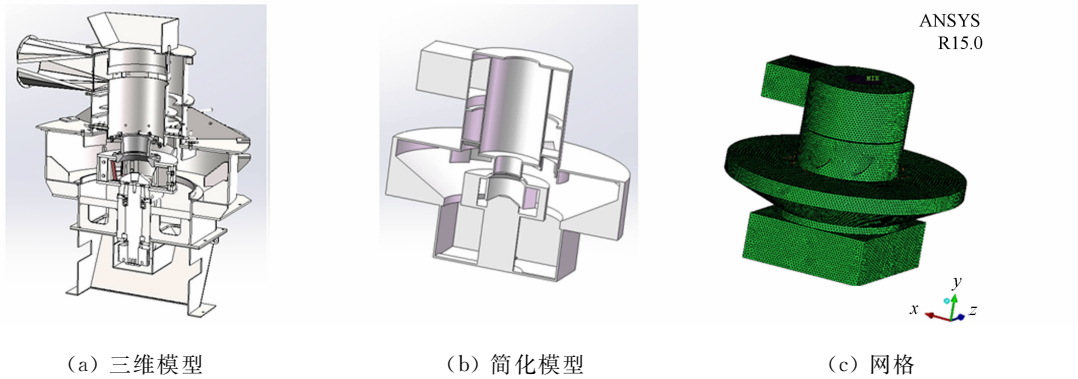


图 2 立轴冲击式破碎机建模及网格划分

Fig. 2 Modeling and meshing of vertical shaft impact crusher

3 仿真结果及分析

3.1 流线图与部分截面云图

风机风量为最大值时,以入料口为起始面,破碎机在某一时刻的流线图,如图 3 所示.

由图 3 可知:除尘口偏置导致除尘腔内靠近除尘口一侧流线密集、流速大且流向经除尘腔内指向除尘出口. 远离除尘口一侧流线稀疏、速度较小且流线曲率较大. 流线的切线方向为流体的速度方向,除尘腔内靠近除尘口侧流体流速大,方向垂直向,且与固体颗粒运动方向一致,颗粒受到流体曳力作用,直接经由除尘腔到达除尘口;除尘腔远离除尘口侧流体流速小,方向变化大,且与固体颗粒的运动方向不一致,导致部分颗粒无法到达除尘口.

分析风机风量为最大值时立轴冲击式破碎机除尘腔内部流场的均匀性,截取几个关键平面内速度与压力云图. 某时刻除尘口正对子午面 $X=0$ 面的速度与压力云图,如图 4 所示. 除尘腔末端截面($Y=337$ 面)的速度与压力云图,如图 5 所示.

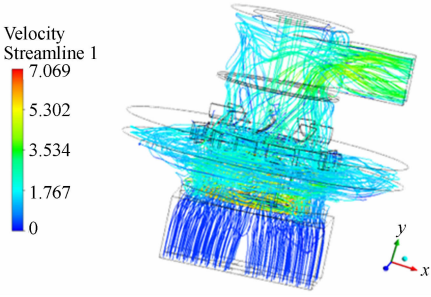


图 3 立轴冲击式破碎机内部流线图

Fig. 3 Streamline in vertical shaft impact crusher

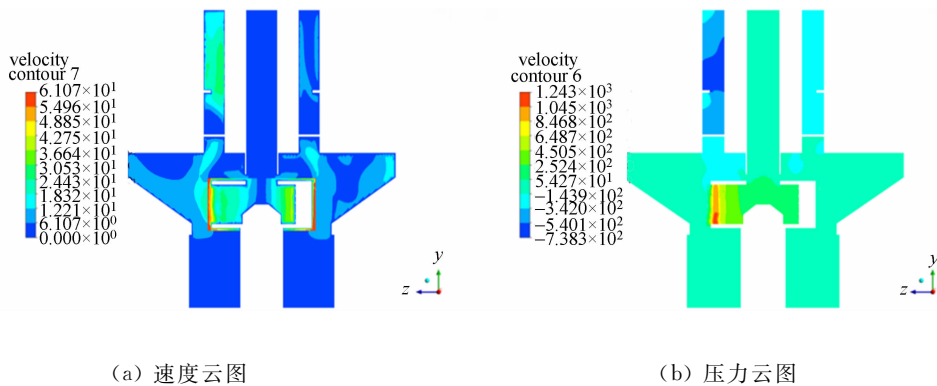


图 4 $X=0$ 面云图

Fig. 4 Contours of $X=0$ plane

由图 4 可知:靠近除尘口处速度较大,速度均匀性好,且由下至上压差大,远离除尘口一侧流体速度小,压差小.

由图 5 可知:流体速度主要分布在 $10\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,由于边界层效应靠近壁面处流体流速小,环内流速大,速度均匀性差,压强则由环内向环外依次减小. 粒径为 0.15 mm 及以下的粉尘颗粒的悬浮速度为 $2.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,输送气速为 $5\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [18]. 除尘结构针对粉尘颗粒具有较好的吸除效果,风量为最大值时也会将粒径较大的颗粒吸出. 较小风机风量除尘腔内风速较大一侧大颗粒吸出减少,同时,风速较小一侧将无法达到最小推荐输送气速,粉尘颗粒吸除效果下降.

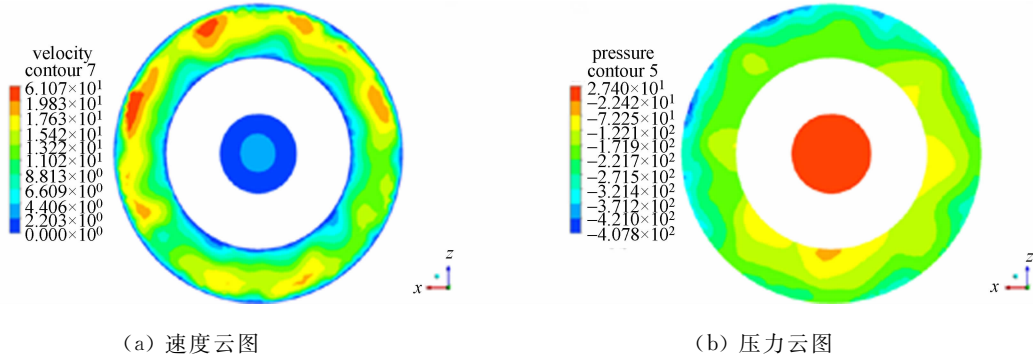


图 5 Y=337 面云图

Fig. 5 Contours of Y=337 plane

3.2 单粒径颗粒仿真结果

以物料入口为面入射源,除尘口风机风量为最大值时,分别以直径为 0.07~9.60 mm 的颗粒为入射颗粒.立轴式冲击破碎机内部体积较大,颗粒所占体积分数小,颗粒相做稀相处理,流体对颗粒的气动力占主导作用.统计颗粒从不同出口逃逸的数量,结果如表 2 所示.表 2 中: r 为粒径.

表 2 单粒径颗粒仿真结果

Tab. 2 Result of single diameter particle simulation

逃逸出口	r/mm							
	0.075	0.150	0.300	0.600	1.180	2.360	4.750	9.600
除尘口	1 619	1 481	1 287	645	186	10	0	2
产品出口	32	146	360	1 006	1472	1 649	1 658	1 658
总个数	1 651	1 627	1 647	1 651	1 658	1 659	1 658	1 660
吸除占比/%	98.06	91.03	78.14	39.07	11.22	0.60	0.00	0.12

由表 2 可知:破碎机除尘装置针对 0.15 mm(包含 0.15 mm)以下的粉尘颗粒吸除占比均达到 90% 以上;但粒径为 0.3,0.6 mm 的颗粒吸除占比也占有较大比重;颗粒粒径为 1.18~9.60 mm 的大颗粒也有少量被吸除;除尘口风机风量为最大值时,立轴冲击式破碎机针对粉尘颗粒具有较好的吸除效果,同时,也会带走大部分粒径较大的颗粒.

为探究除尘装置在不同风机风量下的分离除尘效果,保持其他条件不变,更改除尘口风机风量分别为最大值的 80%,60%,40%,不同粒径的颗粒吸除占比,如图 6 所示.图 6 中: d 为颗粒直径.

由图 6 可知:风机风量为 100%,80% 时,除尘装置针对不同粒径的吸除占比差别不大,风机风量继续下降时,某粒径范围内颗粒的吸除占比迅速降低;风机风量下降到最大值的 60% 时,除尘装置针对粒径为 0.3,0.6 mm 的颗粒吸除占比分别下降了 11% 和 19%,降低了粒径较大颗粒的吸除占比;风机风量下降到最大值的 40% 时,除尘装置针对粒径为 0.15,0.30,0.60 mm 的吸除占比分别下降了 20%,40% 和 15%,有效地减少了粒径较大的颗粒的吸除占比,但同时也降低了粒径为 0.15 mm 粉尘颗粒的吸除占比.由仿真结果可知:风机风量减少时,除尘装置针对不同粒径的吸除效果呈规律性下降,为保证粒径为 0.15 mm 及以下颗粒的吸除效果,又尽量减少 0.15 mm 以上颗粒的吸除占比,当前除尘装置风机风量应在最大值的 40%~60% 之间取值.

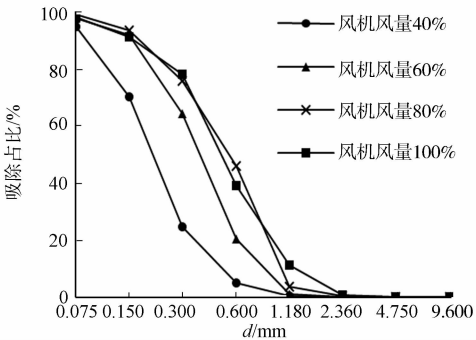


图 6 不同粒径吸除占比

Fig. 6 Gettering percentage of different particle sizes

4 结论

构建 CFD-DPM 气固两相流耦合模型,分析立轴冲击式破碎机内部流场及除尘口不同风量下不同粒径颗粒的吸除效果,得到以下 4 个结论.

1) 立轴冲击式破碎机除尘腔内部靠近除尘口侧流体流向变化小,远离除尘口侧流体流向变化大,因此,除尘腔两侧流体对颗粒曳力、湍流作用相差较大不能将均匀分布在破碎腔内的粉尘颗粒与粒径较大的颗粒完全分离开来。

2) 除尘口偏置导致除尘腔内流场均匀性差,靠近除尘口一侧速度、压差大,远离除尘口一侧速度、压差小,导致其针对不同粒径颗粒的颗粒分离效果较差。

3) 当前除尘装置存在最优风机风量在最大值的 40%~60%之间取值使得在吸除 0.15 mm 及 0.15 mm 以下颗粒时尽量减少对粒径较大颗粒的吸除作用。

4) 颗粒与立轴冲击式破碎机内部面碰撞具有随机性,风机风量为 100%,80%,60%时,均有个别粒径较大的颗粒与壁面随机碰撞,在流体曳力作用下,经过除尘腔从除尘口处被吸走。

参考文献:

- [1] 路文典.立轴冲击式破碎机制砂规律与效果改进研究[J].云南水力发电,2007,23(6):90-93. DOI:10.3969/j.issn.1006-3951.2007.06.023.
- [2] 高澜庆,王文霞,马飞.破碎机的发展现状与趋势[J].冶金设备,2001(4):13-16. DOI:10.3969/j.issn.1001-1269.2001.04.005.
- [3] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D. DEM prediction of particle flows in grinding processes[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2008, 58(3): 319-353. DOI:org/10.1002/fld.1728.
- [4] BAKKER A, HAIDARI A H, OSHINOWO L M. Realize greater benefits from CFD[J]. Chemical Engineering Progress, 2001, 97(3): 45-53.
- [5] BHASKER C. Numerical simulation of turbulent flow in complex geometries used in power plants[J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33(2): 71-83. DOI:org/10.1016/S0965-9978(01)00053-9.
- [6] 张学强.基于 EDEM-FLUENT 耦合的气力输送装置设计与研究[D].成都:西华大学,2015.
- [7] BERROUK A S, WU C L. Large eddy simulation of dense two-phase flows: Comment on DEM-LES study of 3-D bubbling fluidized bed with immersed tubes[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(5): 1902-1903.
- [8] KLOSS C, GONIVA C, HAGER A, *et al.* Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM [J]. Progress in Computational Fluid Dynamics An International Journal, 2012, 12(2/3): 140-152. DOI:org/10.1504/PCFD.2012.047457.
- [9] TENG Shuli, WANG Peng, ZHANG Qi, *et al.* Analysis of fluid energy mill by gas-solid two-phase flow simulation [J]. Powder Technology, 2011, 208(3): 684-693. DOI:org/10.1016/j.powtec.2010.12.033.
- [10] CHATZILAMPROU I G, YOUNDS M W, TIERNEY M J, *et al.* Numerical investigation of a developmental pneumatically fed impact pulveriser[J]. Applied Mathematical Modelling, 2006, 30(11): 1180-1195. DOI:org/10.1016/j.apm.2006.02.002.
- [11] TAKEUCHI H, NAKAMURA H, IWASAKI T, *et al.* Numerical modeling of fluid and particle behaviors in impact pulverizer[J]. Powder Technology, 2012, 217(2): 148-156. DOI:org/10.1016/j.powtec.2011.10.021.
- [12] 雷林,王智祥,孙鹏,等.计算流体力学 $k-\epsilon$ 二方程湍流模型应用研究[J].船舶工程,2010,32(3):5-8. DOI:10.13788/j.cnki.cbge.2010.03.005.
- [13] HWANG C B, LIN C A. Improved low-reynolds-number $k-\epsilon$ model based on direct numerical simulation data[J]. Aiaa Journal, 2012, 36(1): 38-43. DOI:org/10.2514/2.349
- [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. DOI:10.3969/j.issn.1007-7251.2009.02.013.
- [15] 张涛,李红文.管道复杂流场气固两相流 DPM 仿真优化[J].天津大学学报,2015(1):39-48. DOI:10.11784/tdxbz201306057.
- [16] 何成.基于 FLUENT 的气力输送浓相气固两相流数值模拟[D].广州:广东工业大学,2014.
- [17] SOMMERFELD M, HUBER N. Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6): 1457-1489. DOI:org/10.1016/S0301-9322(99)00047-6.
- [18] 吕子剑,刘今.不同粒径固体颗粒的悬浮速度计算及测试[J].化学工程,1997(5):42-46.