



史长亮,王凡,马娇,等.不同粒级煤泥在TBS分选过程中运动特性分析[J].煤炭学报,2020,45(S1):458-462.
doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1348
SHI Changliang, WANG Fan, MA Jiao, et al. Dynamics characteristics analysis of coarse coal slime separation with different particle sizes in TBS[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (S1): 458-462. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1348

移动阅读

不同粒级煤泥在TBS分选过程中运动特性分析

史长亮,王凡,马娇,赵继芬,程敢,湛伦建

(河南理工大学 化学化工学院,河南 焦作 454003)

摘要:煤泥因粒度组成较宽常常造成干扰床分选机(Teetered Bed Separator, TBS)的分选过程出现底流中夹杂细粒煤的现象,造成部分精煤损失于尾矿中,同时细颗粒又使得煤泥压滤效率降低,所以解析不同粒度颗粒的运动特性情况对于优化TBS的机体结构、提高TBS分选效率具有积极的意义;数值模拟作为一种高效率、低成本的研究方法,基于计算流体力学数值模拟软件 Fluent 对均一密度、不同粒级煤泥在TBS分选过程中运动特性分析,分别得出了粗粒级(1.60~1.25 mm)、中等粒级(1.0~0.6 mm)以及细粒级(0.45~0.25 mm)颗粒群在TBS分选过程中的速度场、湍动能情况以及颗粒群运动的迹线,计算不同粒级颗粒群的溢流理论产率,并且开展了与模拟仿真实验相同参数的TBS分选论证实验。结果表明:随着颗粒粒度的减小,颗粒群运动轨迹受TBS内部流场影响逐渐增大、运动轨迹越来越紊乱;粗粒级颗粒群在TBS机体上部至底部引起的速度场、湍动能的规律变化使该颗粒群有序全部进入底流;中等粒级颗粒群在TBS机体中下部开始出现紊乱运动趋势,该颗粒群经反复运动后,大部分颗粒仍进入底流,仅有少量颗粒进入溢流;细粒级颗粒群同样出现紊乱运动趋势,且紊乱区域增加至机体上部,大部分颗粒进入溢流,有部分出现至机体上部的颗粒出现回流,回流的煤粒进入底流,细粒煤被底流夹带而损失的现象出现;TBS分选实验得出的不同粒级颗粒溢流产率与对应的理论溢流产率误差较小,证实模拟选取的颗粒曳力模型的合理性,即:较粗颗粒选取non-spherical模型,较细颗粒选取spherical模型。研究结果侧面反映出选前对煤泥进行粒度的精确分级以减少细粒物的影响,可提高TBS分选效率。

关键词:运动特性;粗煤泥;TBS;粒度效应

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)S1-0458-05

Dynamics characteristics analysis of coarse coal slime separation with different particle sizes in TBS

SHI Changliang, WANG Fan, MA Jiao, ZHAO Jifen, CHENG Gan, CHEN Lunjian

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Due to the wide size fraction of coarse slime particles, the phenomenon of entrainment of fine coal in the underflow occurs in the separation process when the Teetered Bed Separator (TBS) is involved. The phenomenon will result in that the clean coal products will be contaminated in the tailings and the lower efficiency of treatment of fine coal particles with chamber press. It is of significance to analyze the motion characteristics of particles with different particle sizes for optimizing the structure of TBS and improving the efficiency of separation. The kinematic characteris-

收稿日期:2019-10-05 修回日期:2019-11-15 责任编辑:常明然

基金项目:河南省科技攻关资助项目(172102310680);河南省教育厅重点研究资助项目(12A440007)

作者简介:史长亮(1984—),男,河南焦作人,副教授。E-mail:scl303@126.com

通讯作者:王凡(1992—),男,湖北黄冈人,博士研究生。E-mail:664032116@qq.com

tics of coarse coal particles with identical density but different sizes during the TBS separation process was analyzed by CFD software FLUENT. For the coarse, middle and fine size fractions, the velocity field, the solution of turbulence kinetic energy and trace lines of particles had been obtained, and the theoretical yields of overflow were calculated, and the verification experiment that had the same parameters with the numerical simulation was conducted. The results show that the extent of trace lines of particles affected by the internal flow field was gradually intensive, and these traces became more chaos with the decrease of particle size. The coarse particle group reported into the underflow in an orderly manner because of the regularity of the velocity field and the turbulent kinetic energy caused by the particle group from the upper part to the bottom of the TBS. The middle particle group shown chaos from in the middle and lower part of the TBS, most of particles of the group reported to the underflow with a minority reporting to the overflow after some repeated movements. The chaos phenomenon occurred in the fine particle group as well, the chaos domain reached to the top part of TBS. The majority of fine particles reported to the overflow, some of them would report to the underflow in the motion of flowing back, the entrainment phenomenon of fine particle happened leading to the losses of some clean coal products. Rationality of choosing the drag law for particles was justified by the consistency between theoretical yield and experimental yield of overflow, i. e. the drag law of non-spherical is suitable for coarse particles and the drag law of spherical is suitable for fine particles. The study shows the weakening effect of particle size by an early accurate size classification, so that the efficiency of TBS could be improved.

Key words: kinematic characteristics; slime coal; TBS; particle size effect

TBS 被公认是处理粗煤泥的有效分选设备,对不同粒级物料分选效果截然不同^[1-3],分选性能的优劣一直是以分选后收集的底流和溢流物料的性质为基础,进而求解得出的分选效率作为实验评价指标;为提高其分选效率,大多学者主要从 TBS 结构优化着手进行实验研究。沙杰等^[4]研究了 TBS 的 3 种高度(1 200, 1 500, 1 800 mm)对粗煤泥分选效果的影响;步向宁等讨论精煤的灰分和产率受 TBS 上升水流的影响情况^[5];MANN 研究使用半工业规模的“Z”型特殊的分选腔体对分选效率的提升作用^[6];GALVIN 等^[7-8]的研究认为在 TBS 内部加入倾斜板,能够减小粒度效应对分选较宽粒级范围物料的影响作用,突出以密度为主的分选。但目前因洗煤厂来煤细粒级物料的增多,往往进入 TBS 的煤泥粒度组成较宽,与设计的 TBS 处理粒度不符,造成 TBS 在工业实践中存在底流夹细现象,试验手段只是以结果为导向,费时费力、成本较高。

CFD(Computational Fluid Dynamics) 是研究流体力学的有效计算模拟工具,被用于流场特性的研究^[9-16],华雷纳、KALAGA、LIU 沿用经典的力学模型对不同洗选过程颗粒运动特性进行分析,从微观层面反应颗粒群的真实运动轨迹,有效指导了生产实践。TBS 分选过程的动力学行为作为理论评价指标可以更加形象地展现颗粒运动信息,更加高效地为分选效率的提高做前期基础指导。目前,对分选煤泥颗粒的动力学行为分析,大多遵循干扰沉降理论进行近似分析,但粗煤泥颗粒群的运动轨迹十分复杂,目前尚无

合适的数学方法进行有效的描述。在 TBS 分选文献中,研究者大都采用欧拉-拉格朗日法(Eulerian-Lagrangian formulation, DPM-CFD)将研究对象简化为球形颗粒,对颗粒速度、颗粒位移以及受液相作用的曳力情况等动力学信息进行报道,颗粒的运动轨迹可从微观层面反映出 TBS 分选效率^[17-19]。

笔者基于实验室自制 TBS 模型,选取密度为 1 500 kg/m³ 的煤泥物料,对现场定型的 3 种不同粒级(粗粒级、中粒级、细粒级)物料进行动力学模拟,模拟采用 DPM-CFD 计算方法,对不同粒级颗粒赋予不同球形度、选取合适的 spherical 曳力模型或 non-spherical 曳力模型,以物料颗粒群的分离效率为评价指标。

1 物理模型及条件设置

根据现场常见 TBS 结构,实验室自制 TBS 物理模型,其实物及结构尺寸(单位:mm)如图 1(a)所示;采用 ICEM CFD 软件进行网格化,上部规整处采用六面体结构化网格、下部非规整处采用四面体非结构化网格,生成 176 838 个单元、113 624 个节点,保证计算精度,网格划分结果如图 1(b)所示。

综合相关文献,计算 TBS 内流场信息,选取 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型,保证计算速度和收敛性^[20];选取 DPM 模型计算颗粒运动轨迹,保证低浓度相条件下颗粒位置、速度、动量等物理量随时间的变化信息的准确度^[21]。球形度选取方面,对不同粒级颗粒的球形曳力公式根据粒度大小分别进行选取^[22];对粗粒级颗

粒和中等粒级颗粒使用 spherical drag law; 对细粒级颗粒使用 non-spherical drag law, 且 shape factor 设置为 0.65。其他边界条件以及颗粒属性见表 1。

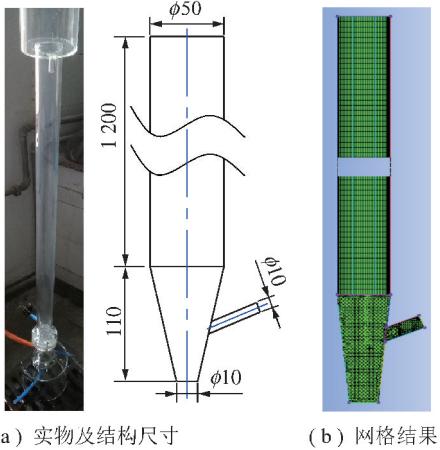


图 1 实物结构及网格划分

Fig. 1 Geometry size and meshing

表 1 边界条件及颗粒属性

Table 1 Boundary conditions and particle information

边界条件		颗粒条件		
进口速度/ (m · s ⁻¹)	出口压力/ kPa	其他	粒级/mm	密度/ (kg · m ⁻³)
0.336	101.325	Wall	1.60~1.25 1.0~0.6 0.45~0.25	1 500

2 模拟结果和讨论

为实现通过颗粒溢流数的方法进而计算溢流产率, 针对设定的每个粒级颗粒群, 分别选取 30 个粒径均匀分布的颗粒, 流场计算达到 0.001 的收敛精度之后, 计算得到粗粒级、中粒级、细粒级 3 种粒级颗粒群的速度云图、湍动能云图、运动轨迹, 并通过理论溢流产率计算分选效率^[17]。

2.1 粗粒级颗粒群运动特性

粗粒级颗粒群(1.60~1.25 mm)的模拟计算结果如图 2 所示。从图 2 可以看出: 粗粒级颗粒群在 TBS 机体底部速度比较大且分布并不均匀, 随着高度的增加, TBS 机体上部速度场的分布趋于均匀, 对于颗粒的分选作用有利; 湍动能云图的变化趋势受其速度场影响较为明显, 在 TBS 机体底部形成了较大的湍动强度, 不利于颗粒的分选; 颗粒运动轨迹云图反映出, 颗粒从释放位置进入流场之后, 因 TBS 机体上部速度场以及湍动能强度比较小, 颗粒群做近似于直线向下运动, 在进入 TBS 底部以后, 颗粒群受到内流场的干扰作用, 运动轨迹出现了紊乱现象, 在经历若

干个周期之后有规律地进入底流。经统计, 设定的 30 个粗颗粒全部进入底流, 理论溢流产率为 0。

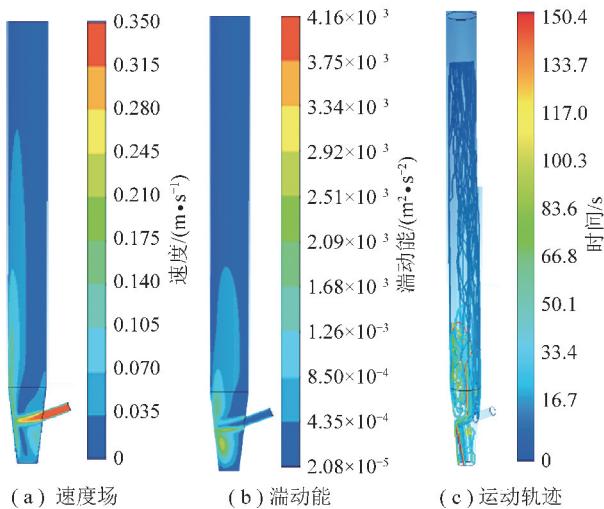


图 2 粗粒级煤泥颗粒运动特性模拟结果

Fig. 2 Coarse particles simulation calculation results

2.2 中粒级颗粒群运动特性

中粒级颗粒群(1.0~0.6 mm)的模拟计算结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 中粒级颗粒群在 TBS 机体内部的速度场云图及湍动能云图与图 2 中呈现的速度场大小、分布以及湍动能强弱、分布非常接近, 但中粒级颗粒群的运动轨迹做紊乱运动的区域明显扩大, 且紊乱程度也有所加强。原因在于中粒级颗粒群较粗粒级颗粒群而言, 体积小、干扰沉降速度更小, 颗粒群的运动更容易受流场影响; 中粒级颗粒群中的大部分颗粒在进入底流之前会经历若干个上下起伏震荡的周期过程, 这一现象会延长对粒群分选的时间, 不利于分选过程的进行, 中粒级颗粒群对于 TBS 而言属于较难分选对象。经统计: 30 个中粒级颗粒群中 28 个颗粒进入底流, 2 个颗粒进入溢流, 理论溢流产率为 6.67%。

2.3 细粒级颗粒群运动特性

细粒级颗粒群(0.45~0.25 mm)的模拟计算结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, 在相同的流场条件下, 细粒级颗粒群受到流场湍流作用比粗粒级颗粒群以及中粒级颗粒群的影响更为明显, 已由在 TBS 内部流场中部近似直线运动、底部紊乱运动的形式转换为在整个 TBS 内部流场区域全部颗粒为杂乱运动形式。细粒级颗粒群的整个运动过程可以清晰地表述为: 随着分选过程的进行, 颗粒群中部颗粒向机体中上部运动, 运动轨迹较紊乱, 在溢流口附近区域出现部分颗粒被夹带进入底流, 最终有 21 个颗粒进入溢流; 颗粒群还有一部分颗粒向机体底部运动并进入底流, 其运动轨迹所占据紊乱运动区域大于粗粒级和中粒级中进入底流颗粒紊乱运动的区域, 表明粒级更小的颗粒需要更长时间才能达到较好的分选效果。

经统计:细粒级颗粒群理论溢流产率为 70%。

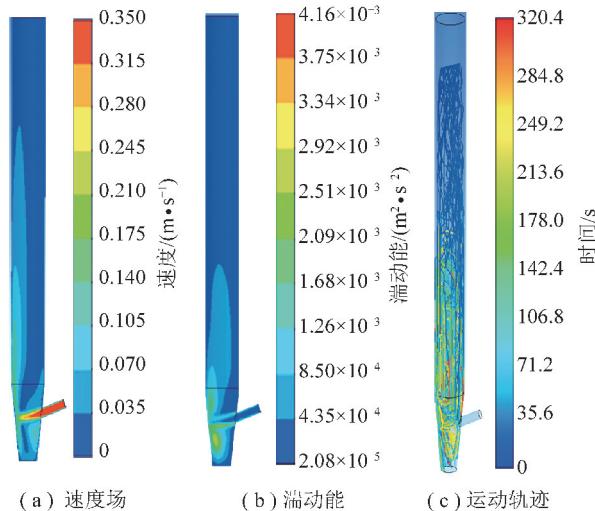


图 3 中粒级煤泥颗粒运动特性模拟结果

Fig. 3 Middle Particles Simulation Calculation Results

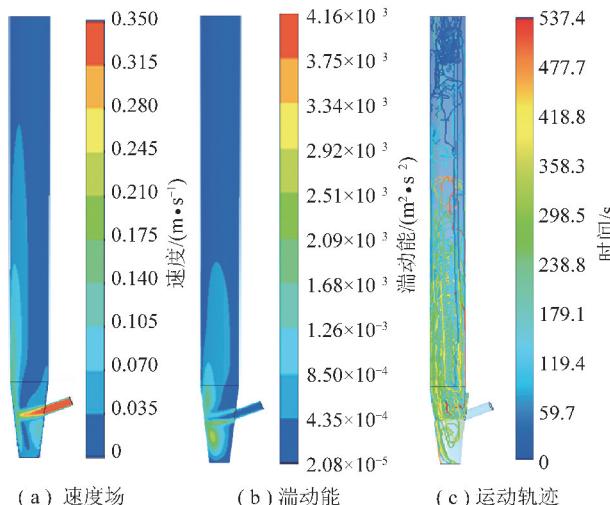


图 4 细粒级煤泥颗粒运动特性模拟结果

Fig. 4 Fine particles simulation calculation results

同时,细粒级颗粒群模拟时选用 non-spherical drag law 做计算,与选用 spherical drag law 的粗粒级颗粒群和中粒级颗粒群呈现的颗粒群运动轨迹图趋势一致,即:随着颗粒粒度的减小,流场底部颗粒紊乱运动的区域范围逐渐增大。因此,在对较细颗粒进行数值模拟时,应该考虑细颗粒的粒度效应与较粗颗粒的粒度效应的差异,选取合适的曳力模型。

综合以上分析,进一步微观层面认识了 TBS 分选煤泥中不同粒级颗粒群的运动特性,根据其粒度效应,认为现有 TBS 在分选粗煤泥时存在粒度分选盲区,应进一步划分粒度界限,提供窄粒级入料方式更为合理;同时,基于模拟中限定的同一密度颗粒群,对于细粒级颗粒,理想分选效果应使大部分甚至全部细颗粒进入溢流,避免进入底流;因此,应通过优化顶水形式设计、分选区结构设计等方面,使其尽量减少被

夹带进入底流的概率。

2.4 不同粒级颗粒群分选实验

为验证不同粒级颗粒群数值模拟计算溢流产率的准确度,根据模拟条件,选取表 2 中的煤泥物料进行试验,试验样机采用图 1 所示 TBS 结构。

表 2 实验物料

Table 2 Experimental coal particle material distribution

粒级/mm	密度/(kg·m⁻³)	灰分/%
1.60~1.25	1 500	24
1.00~0.60	1 500	29
0.45~0.25	1 500	22

具体分选过程为:从上部加入的物料因顶水的作用,会受到向上的浮力和流体对固体颗粒的曳力,在竖直方向上与之受到的重力及质量力相平衡,决定了不同性质的物料颗粒的运动状态。密度较大的粗颗粒受到的重力大于受到的流体的作用力,向下运动进入底流;密度较小的细颗粒受到的重力小于受到的流体的作用,向上运动进入溢流。经过实验室规模 TBS 分选实验之后,各个粒级的溢流产率计算见表 3。

表 3 各粒级溢流产率试验结果与理论计算结果对比

Table 3 Comparison of experimental and simulation results of coal overflow flow

粒级/mm	入料质量/g	溢流质量/g	试验产率/%	模拟产率/%	绝对误差/%
1.60~1.25	300	1.28	0.43	0	0.43
1.00~0.60	300	19.84	6.61	6.67	0.06
0.45~0.25	300	208.26	69.42	70.00	0.58

由表 3 可以看出,模拟计算的理论溢流产率和实验得出的溢流产率存在误差,原因在于:实际分选过程中为大量颗粒群的运动分离过程,而文中为准确计算、评价粒度对分选效率的影响,对所研究的不同粒级在进行数值模拟过程只选取在该粒级范围内分布的 30 个颗粒,具有代表性,但是不能完全代替实际情况中颗粒间的流体曳力等因素造成的影响;但绝对误差值很小,在合理范围内,证实了数值模拟的可信度以及不同粒级颗粒群对应选取曳力模型的正确性。

3 结 论

(1) 3 种粒级颗粒群在 TBS 分选过程中将因机体底部的湍流作用而受到极大干扰,运动轨迹呈现无规则的紊乱运动,在经历过若干个起伏震荡周期之后进入底流,随着粒度的减小,颗粒紊乱运动的范围依次增大,分选周期增长。

(2)粗粒级颗粒群、中粒级颗粒群在TBS机体中部做近似直线向下运动趋势,而细粒级颗粒群将有多数颗粒进入溢流,且运动形式杂乱无章,存在被夹带进入底流的概率。

(3)对于粗粒级颗粒群、中粒级颗粒群,选取non-spherical曳力模型;对于细粒级颗粒(0.45~0.25 mm),选取spherical曳力模型,能更准确地反映颗粒的运动轨迹。

(4)数值模拟结果从侧面反映出,对于TBS分选粗煤泥应选取窄粒级入料方式减少细粒级的粒度效应产生的干扰。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Lei, LIU Wenli, ZHANG Yanjun. Calculation of teeter bed height of teetered bed separator based on jet theory[J]. Powder Technology, 2016,295: 225–233.
- [2] XING Yaowen, GUI Xiaohui, WANG Yongtian, et al. Optimization of a teetered-bed separator using pulsed water[J]. International Journal of Coal Preparation & Utilization, 2015,36(6): 283–292.
- [3] TRIPATHY S K, BHOJA S K, KUMAR C R, et al. A short review on hydraulic classification and its development in mineral industry[J]. Powder Technology, 2015,270: 205–220.
- [4] SHA Jie, XIE Guangyuan, WANG Hong, et al. Effect of the column height on the performance of liquid-solid fluidized bed for the separation of coarse slime[J]. International Journal of Mining Science & Technology, 2012,22(4): 585–588.
- [5] BU Xiangning, NI Chao, XIE Guangyuan, et al. Preliminary study on foreign slime for the gravity separation of coarse coal particles in a teeter bed separator[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017,160: 76–80.
- [6] MANN H, ROLOFF C, HAGEMEIER T, et al. Model-based experimental data evaluation of separation efficiency of multi-stage coarse particle classification in a zigzag apparatus[J]. Powder Technology, 2017,313: 145–160.
- [7] GALVIN K P, ZHOU J, PRICE A, et al. Single-stage recovery and concentration of mineral sands using a REFLUX classifier[J]. Minerals Engineering, 2016,93: 32–40.
- [8] GALVIN K P, ZHOU J, WALTON K. Application of closely spaced inclined channels in gravity separation of fine particles[J]. Minerals Engineering, 2010,23(4): 326–338.
- [9] RAHAMAN M S, CHOUDHURY M R, RAMAMURTHY A S, et al. CFD modeling of liquid-solid fluidized beds of polydisperse struvite crystals[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 99: 48–61.
- [10] YE Xin, CHU Dongyuan, LOU Yaoyin, et al. Numerical simulation of flow hydrodynamics of struvite pellets in a liquid-solid fluidized bed[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017,57(7): 391–401.
- [11] HE Yurong, YAN Shengnan, WANG Tianyu, et al. Hydrodynamic characteristics of gas-irregular particle two-phase flow in a bubbling fluidized bed: An experimental and numerical study[J]. Powder Technology, 2016,287: 264–276.
- [12] HUA Leina, ZHAO Hu, LI Jun, et al. Eulerian-Eulerian simulation of irregular particles in dense gas-solid fluidized beds[J]. Powder Technology, 2015,284: 299–311.
- [13] KALAGA D V, REDDY R K, et al. Liquid phase axial mixing in solid–liquid circulating multistage fluidized bed: CFD modeling and RTD measurements[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 191(19): 475–490.
- [14] LIU T Y, SCHWARZ M P. CFD-based modelling of bubble-particle collision efficiency with mobile bubble surface in a turbulent environment[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009,90(1): 45–55.
- [15] ZHU Haiping, ZHOU Zongyuan, YANG Runyu, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(23): 5728–5770.
- [16] CORNELISSEN J T, TAGHIPOUR F, ESCUDIÉ R, et al. CFD modelling of a liquid-solid fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2007,62(22): 6334–6348.
- [17] LIU Runjia, XIAO Rui, YE Mao, et al. Analysis of particle rotation in fluidized bed by use of discrete particle model[J]. Advanced Powder Technology, 2018,29(7): 1655–1663.
- [18] AMIRI Z, MOVAHEDIRAD S. Bubble-induced particle mixing in a 2-D gas-solid fluidized bed with different bed aspect ratios: A CFD-DPM study[J]. Powder Technology, 2017,320: 637–645.
- [19] SUN Wenjing, ZHONG Wenqi, ZHANG Yong. LES-DPM simulation of turbulent gas-particle flow on opposed round jets[J]. Powder Technology, 2015,270: 302–311.
- [20] 孙铭阳, 韦鲁滨, 朱学帅, 等. 液固分选流化床三相流场模拟中各粘性流动模型的适用性[J]. 过程工程学报, 2016, 16(1): 10–17.
- SUN Mingyang, WEI Lubin, ZHU Xueshuai, et al. Research on performances of different viscous models in simulation of three-phase flow fields in a liquid-solid fluidized bed separator[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016,16(1): 10–17.
- [21] 韦鲁滨, 李大虎, 陈贊歌, 等. 颗粒在脉动气流场中受力和分选的数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2017,46(1): 162–168.
- WEI Lubin, LI Dahua, CHEN Zange, et al. Numerical simulation of force and separation on particles in pulsing airflow[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017,46(1): 162–168.
- [22] 张小辉, 刘柏谦, 王立刚. 燃煤流化床大颗粒形貌特征和空间分布特性[J]. 过程工程学报, 2009,9(s2): 195–199.
- ZHANG Xiaohui, LIU Boqian, WANG Ligang. An investigation on behavior of coarse particles in a fluidized bed combustor[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009,9(s2): 195–199.