

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2019.06.023

旋转室内铰刀三维参数对干法制备氮化硅颗粒性能的影响

江竹亭, 宁翔, 赵增怡, 吴南星, 廖达海

(景德镇陶瓷大学 机械电子工程学院, 江西 景德镇 333403)

摘要: 为提高干法制备氮化硅颗粒的相关性能, 分析铰刀三维参数对流场的影响, 并通过扫描电子显微镜对颗粒球形度进行分析。构建欧拉气固两相流模型, 针对不同铰刀三维参数设计三种物理模型, 通过 RNG k- ϵ 模型对流场中的湍流情况进行求解, 对比旋转室内颗粒体积分数分布的差异, 并将数值结果与实验进行比照。云图分析表明旋转室内铰刀厚度分别为 7 mm、8 mm、9 mm 时, 氮化硅粉体平均轴向体积分数分别为 0.36、0.30、0.33; 氮化硅粉体平均径向体积分数分别为 0.33、0.31、0.34; 实验分析可知铰刀厚度为 8 mm 时, 颗粒 ρ 值最高, 并且流动指数最大, 检验了数值模拟正确性。以上方法和结果对提高干法制备氮化硅颗粒性能有一定理论意义, 并对铰刀三维参数设计提供一定依据。

关键词: 干法制备氮化硅颗粒; 铰刀三维参数; 气固两相流; 颗粒性能

中图分类号: TQ174.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2019)06-0847-06

Effects of the Three Dimensional Parameters of the Reamer in Rotary Cylinder on Properties of SiN Particles Prepared by Dry Granulation

JIANG Zhuting, NING Xiang, ZHAO Zengyi, WU Nanxing, LIAO Dahai

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China)

Abstract: In order to improve the properties of SiN particles prepared by dry granulation, the influence of the reamer's three dimensional parameters on flow field is analyzed, and the particle sphericity is analyzed by SEM. The Euler gas-solid two-phase flow model is constructed. Three physical models for the granulation room are designed according to different bottom parameters. The turbulence in the flow field is solved by the modified RNG k- ϵ model. The difference of particle volume fraction distribution in the granulation chamber is analyzed. The numerical results are compared with the experimental. The numerical results show that when the reamer's thickness is 7 mm, 8 mm and 9 mm, the axial particles volume fraction is 0.36, 0.30 and 0.33 respectively, the radial particles volume fraction is 0.33, 0.31 and 0.34 respectively. The experimental analysis shows that when the reamer's thickness is 8mm, the sphericity of the particles is the highest and the fluidity is the optimal, which verifies the correctness of the numerical simulation. The above methods and results have certain theoretical significance for improving the properties of SiN particles prepared by dry granulation, and provide some design basis of the reamer's three dimensional parameters.

Key words: silicon nitride particles prepared by dry method; three dimensional parameters of the reamer; gas-solid two phase flow; particle properties

0 引言

利用干法技术制备氮化硅颗粒相比于传统湿法技术有以下优势^[1], 例如提高生产率, 过程环保等。但是氮化硅干法制粒存在一些缺陷^[2-3], 例如: 成形颗粒粒径单一、颗粒组分不均及颗粒球形度低等。上述问题主要原因为氮化硅运动轨道呈均

匀环状分布^[4-5], 导致粉体碰击机率降低, 使粉体无法粘结。而通过优化铰刀三维参数以改变粉体运动趋势^[6], 改善旋转室流场, 可提高颗粒粒径比, 减少流场中的堆积现象。

粉体运动可通过流场状态进行分析。由于旋转流场状态复杂, 利用现有仪器对其监测非常困难, 但电子科技的发展为流场分析提供了新的途

收稿日期: 2019-07-13。

修订日期: 2019-09-10。

基金项目: 国家自然科学基金(51365018)。

通信联系人: 江竹亭(1963-), 男, 高级工程师。

Received date: 2019-07-13.

Revised date: 2019-09-10.

Correspondent author: JIANG Zhuting(1963-), male, Senior Engineer.

E-mail: 13320149686@163.com

径, 即通过电子计算机对流场状态进行数值模拟^[7]。赖科等^[8]指出旋转流场内的颗粒状态有两类, 粘结于侧壁不运动和均匀周向运动。沙毅等^[9]分析旋流泵固液两相流的流场, 分析泵外特性与内部流场关联。董敏等^[10]对组合搅拌桨当前的问题, 采用 CFD 方法对流场进行数值模拟。韩坤等^[11]对粉体混合过程进行数值分析, 发现随着粉体运动时间增长, 其最大体积分数逐渐趋向理论值。逢启寿等^[12]通过数值计算对有挡板的搅拌槽进行分析, 为流场优化提供理论基础。从以上资料可知, 氮化硅干法旋转室内的气固两相流同样适用电子计算机进行数值分析。

基于计算流体力学方法分析氮化硅干法制粒室中的流场, 建立制粒室物理模型, 自定义边界参数, 通过欧拉两相流对粉体-空气流场进行求解。利用粉体体积分数分布云图分析铰刀三维参数对氮化硅粉体运动形态的影响。成形颗粒性能通过颗粒检测仪(BT-1001)及扫描电子显微镜(Phenom LE)进行分析并间接验证数值分析正确性。所用方法对探究铰刀三维参数对旋转流场的影响提供了依据, 对优化氮化硅干法制粒室也提供了一定理论指导。

1 旋转室及铰刀结构简图

氮化硅干法制粒装置如图 1 所示, 由旋转室、电机和传动系统等构成。其中铰刀盘包含铰刀和制粒立柱, 铰刀盘平面示意图如图 2 所示。在高速电机作用下, 铰刀高速旋转, 进而带动粉体混合, 同时铰刀对聚集粉体有二次破碎作用。

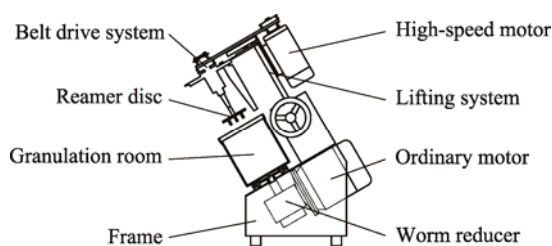


图 1 干法制粒机装置示意图
Fig.1 Diagram of dry granulation machine

2 数学模型

氮化硅粉体制粒前的粒径平均为 0.013 mm, 可作为拟流体相。在欧拉两相流模型中, 以空气相和粉体相为计算对象, 空气相和粉体相分别为主、副相, 空气与粉体互相渗透, 且拥有独立的连续方程、动量方程^[11]。数学方程如下:

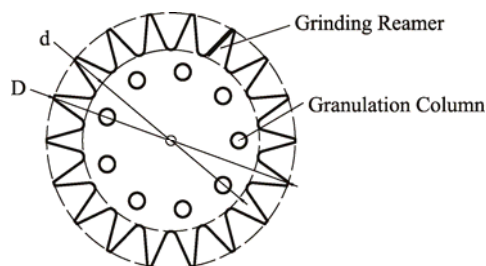


图 2 铰刀示意图
Fig.2 Sketch of reamer

(1) 连续性方程

空气连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = \sum_{g=1}^n \dot{m}_{gs} \quad (1)$$

式中, α_g 、 ρ_g 、 $\nu(\rightarrow)_g$ 、 $\square_{gs}$ 为空气体积分布、密度、速度、质量传递。

粉体连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = \sum_{s=1}^n \dot{m}_{sg} \quad (2)$$

式中, α_s 、 ρ_s 、 $\nu(\rightarrow)_s$ 、 $\dot{m}_{sg}$ 为氮化硅粉体体积分布、密度、速度、质量传递, 其中 $\dot{m}_{gs} = -\dot{m}_{sg}$ 。

(2) 动量守恒方程

空气动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = \\ -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \sum_{g=1}^n (\bar{R}_{gs} + \dot{m}_{gs} \vec{v}_{gs}) \\ + \alpha_g \rho_g (\bar{F}_g + \bar{F}_{lif,g}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中空气应变张量:

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) + \alpha_g \left(\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (4)$$

式中, $F(\rightarrow)_g$ 、 $F(\rightarrow)_{lif,g}$ 、 μ_g 、 λ_g 为空气体积力、升力、分子粘度、体积粘度。

粉体动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \\ -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \sum_{s=1}^n (\bar{R}_{sg} + \dot{m}_{sg} \vec{v}_{sg}) \\ + \alpha_s \rho_s (\bar{F}_s + \bar{F}_{lif,s}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中粉体应变张量:

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (6)$$

式中, $F(\rightarrow)_g$ 、 $F(\rightarrow)_{lif,s}$ 、 μ_s 、 λ_s 为粉体体积力、升力、分子粘度、体积粘度。 $R(\rightarrow)_{gs}$ 、 $R(\rightarrow)_{sg}$ 为相互作用力, 且 $R(\rightarrow)_{gs} = -R(\rightarrow)_{sg}$, p 为两相共享

压力, $\bar{I}$ 为单位张量。

3 物理模型

3.1 边界条件

物理模型如图 3 所示, 旋转室分为动区域和静区域, 动区域作为动力源, 范围是铰刀和制粒立柱邻近区域, 其余区域为静区域。动区域采用移动网格, 静区域设置为多重参考坐标系。动、静区域设置交界面连接, 使流场数据可自由交换。旋转室壁、旋转主轴、铰刀和制粒立柱都设置为 wall, 忽略其它因素对混合过程的影响。具体设置如图 3 所示。

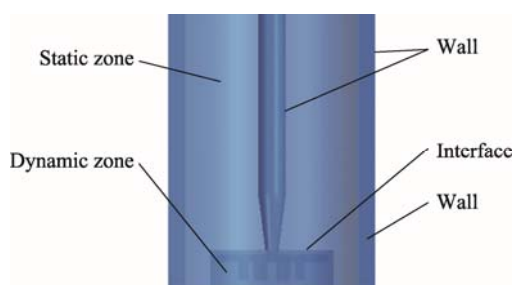


图 3 边界条件
Fig.3 Boundary conditions

3.2 网格划分

由于铰刀结构参数较多, 为提高动区域网格质量, 对其进行完全四面体非结构性网格划分, 所得网格单元数为 74563。静区域结构较为简单, 采用六面体为主, 四面体为辅的网格划分, 所得网格单元数为 102485。以铰刀厚度 8 mm 为例, 网格划分示意如图 4 所示。

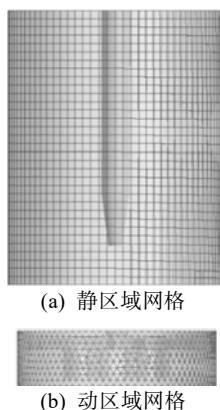


图 4 网格划分
Fig.4 Mesh generation

3.3 求解方法

采用压力隐式算法分析非稳态流场, 通过修正后的欧拉-欧拉双流体模型模拟旋转室内流场分

布, 湍流模型选用 RNG k-ε 模型, 时间解采用 Unsteady 模型, 应用二阶迎风格式减少计算误差, 压力-速度耦合采用相耦合算法, 为提高精度, 变量残差值小于 1×10^{-4} 。铰刀和旋转主轴转速均为 1200 r/min, 旋转室的转速为反向 40 r/min。

4 数值仿真分析

4.1 轴向云图分析

当旋转室内铰刀厚度为 7 mm 时, 粉体轴向体积分数的分布如图 5(a)所示, 粉体轴向平均体积分数的约为 0.36, 由局部云图可见在旋转室角落存在粉体的高体积分数的区域, 表示该区域粉体有堆积现象, 此现象由重力导致, 与实际情况相符合, 堆积区域约占粉体填充区域的 5%, 粉体体积分数的在 0.40-0.45 的范围约占 23%, 粉体体积分数的在 0.35-0.40 的范围约占 26%, 粉体体积分数的 0.35 以下的区域漂浮于粉体填充区域上方, 约占粉体填充区域 46%。当旋转室内铰刀厚度为 8 mm 时, 粉体轴向体积分数的分布如图 4(b)所示, 粉体轴向平均体积分数的约为 0.30, 由局部云图可见粉体高体积分数的区域明显小于铰刀厚度为 7 mm 时, 堆积范围基本可忽略, 粉体体积分数的在 0.40-0.45 的范围约占 9%, 粉体体积分数的在 0.35-0.40 的范围约占 34%, 粉体体积分数的 0.35 以下的区域在粉体混合区域上方, 约占粉体填充区域 57%。当旋转室内铰刀厚度为 9 mm 时, 粉体轴向体积分数的分布如图 4(c)所示, 粉体轴向平均体积分数的约为 0.33, 由局部云图可见粉体高体积分数的范围略高于铰刀厚度为 8 mm 情况, 堆积区域约占粉体填充区域的 2%, 粉体体积分数的在 0.40-0.45 的范围约占 16%, 粉体体积分数的在 0.35-0.40 的范围约占 22%, 粉体体积分数的 0.35 以下的区域漂浮于粉体填充区域上方, 约占粉体填充区域 60%。

通过 Fluent13.0 导出云图数据如表 1 所示。

4.2 径向云图分析

当旋转室内铰刀厚度为 7 mm 时, 粉体径向体积分数的分布如图 6(a)所示, 粉体径向平均体积分数的约为 0.33, 由局部云图可见在云图左上区域存在粉体堆积现象, 堆积区域约占该平面面积的 5%, 粉体体积分数的在 0.40-0.45 的范围集中于云图正上方, 约占平面面积 17%, 粉体体积分数的 0.40 以下区域约占平面面积 78%。当旋转室内铰刀厚度为 8 mm 时, 粉体径向体积分数的分布如图 6(b)所示, 粉体径向平均体积分数的约为 0.31, 粉体高体积分数的

表 1 轴向颗粒体积分布表
Tab.1 Axial particle volume distribution

Thickness/vol. %	7 mm	8 mm	9 mm
<0.40	72%	91%	82%
0.40-0.45	23%	9%	16%
>0.45	5%	0%	2%

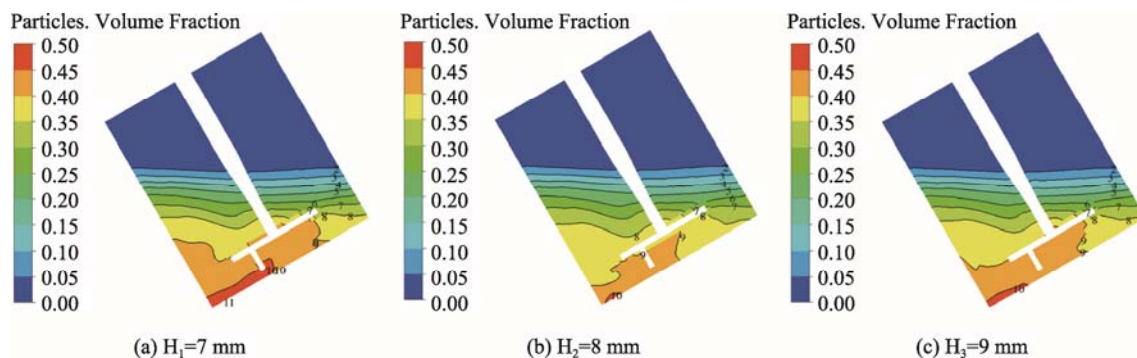


图 5 粉体体积分数轴向云图
Fig.5 Axial chart of particle volume fraction

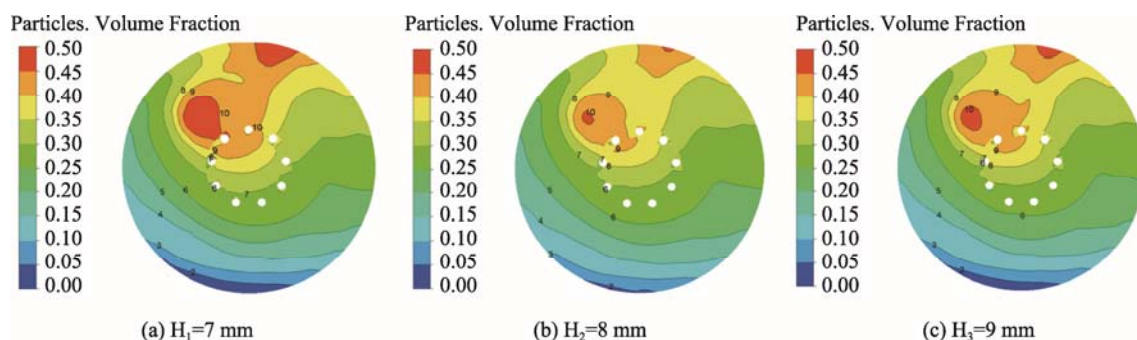


图 6 颗粒体积分布径向云图
Fig.6 Radial chart of particle volume fraction

区域基本未出现, 粉体体积分数在 0.40-0.45 的范围约占平面 8%, 粉体体积分数 0.40 以下区域约占平面面积 90%。当旋转室内较刀厚度为 9 mm 时, 粉体径向体积分数分布如图 6(c)所示, 粉体径向平均体积分数约为 0.34, 粉体高体积分数区域约占平面面积 3%, 粉体体积分数在 0.40-0.45 的范围约占平面 11%, 粉体体积分数 0.40 以下区域约占平面面积 86%。

通过 Fluent13.0 导出云图数据如表 2 所示。

表 2 径向颗粒体积分布表
Tab.2 Radial particle volume distribution

Thickness/vol. %	7 mm	8 mm	9 mm
<0.40	78%	90%	86%
0.40-0.45	17%	8%	11%
>0.45	5%	2%	3%

5 实验结果对比分析

5.1 实验流程

氮化硅粉体在混合过程中逐渐聚集为球状颗粒, 当颗粒混合均匀时, 球形度将接近 1, 当颗粒混合不佳时, 成形颗粒的球形度低于 1。颗粒特性例如平板角、压缩度等由智能颗粒测试仪得出, 由上述数值计算颗粒流动性。实验流程如图 7 所示:

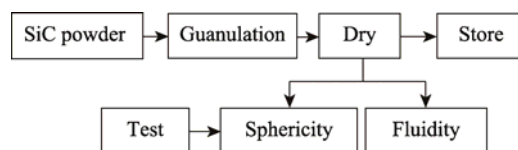


图 7 实验流程图
Fig.7 Chart of experimental process

5.2 实验结果

通过扫描电子显微镜图像对球形度进行计算分析，SEM 放大倍数设置为 200 倍，计算公式如下：

$$\rho = \frac{dn}{ds} \tag{7}$$

其中， dn 为平均直径(同体积球体直径)， ds 为圆周直径(外接球直径)，当 $\rho=1$ 时，颗粒为标准球体。

当铰刀厚度为 7 mm 时，如图 8(a)所示， $\rho=0.76$ ；当铰刀厚度为 8 mm 时，如图 8(b)所示， $\rho=0.88$ ；当铰刀厚度为 9 mm 时，颗粒如图 8(c)所示， $\rho=0.83$ 。可见铰刀厚度为 8 mm 时，颗粒球形度最高。

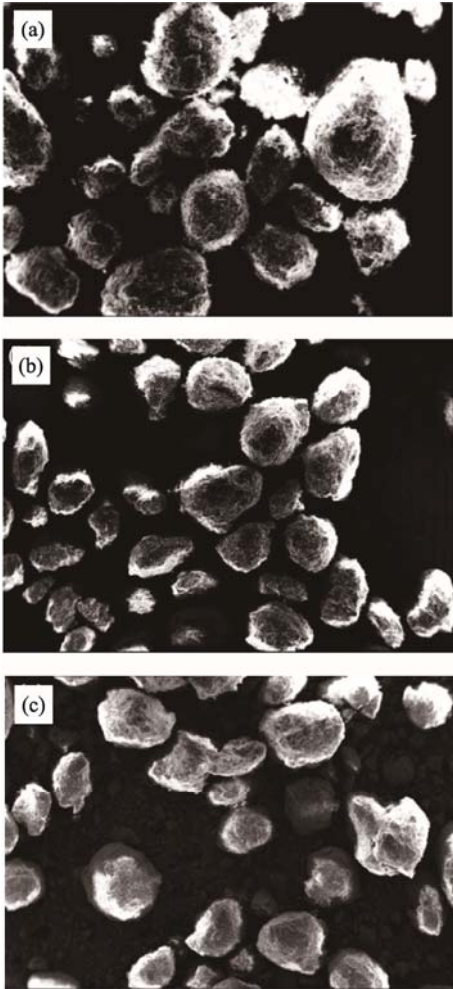


图 8 颗粒图像
Fig.8 Photographs of particles

通过 HYL-1001 型多功能粉体物理特性测试仪(丹东皓宇)分别测试铰刀厚度为 7 mm、8 mm、9 mm 制得的氮化硅颗粒的崩溃角、压缩率、平板角和均度，所检测的数据结果如表 3 所示，代入流动性计算公式得到其流动性指数。当制粒室内

铰刀厚度为 8 mm 时，氮化硅颗粒流动性指数为 91.34，间接验证了数值分析正确性。

表 3 颗粒性能参数表
Tab.3 Particle performance parameters

Thickness		7 mm	8 mm	9 mm
Collapse angle	Measured	35.72	40.43	38.34
	Index	21	18	20
Compression ratio	Measured	17.21	23.72	20.53
	Index	18	15	16
Flat angle	Measured	45.07	40.29	43.42
	Index	18	18	18
Mean degree	Measured	13	17	15
	Index	18	17	18
Liquidity index	Measured	82.57	92.15	85.73
	Index			

6 结 论

(1) 针对空气-粉体两相流流场进行欧拉建模，基于铰刀三维参数分析旋转流场中氮化硅粉体体积分数分布。由云图分析可知，当铰刀厚度为 8 mm 时，氮化硅粉体轴向平均体积分数为 0.30，径向平均体积分数为 0.31，均达到最优值。所用方法和结果能够对氮化硅粉体在流场中的分布状态提供参考依据。

(2) 当铰刀厚度为 8 mm 时氮化硅颗粒 ρ 值为 0.88、流动指数为 92.15，此时氮化硅颗粒的球形度以及流动指数均达到最大值。以上结果对氮化硅干法制粒室铰刀三维参数设计具有一定理论价值。

参考文献：

[1] 杨辉, 郭兴忠, 樊先平, 等. 我国建筑陶瓷的发展现状 & 节能减排[J]. 中国陶瓷工业, 2009, 16(2): 20-23.
YANG H, GUO X Z, FAN X P, et al. China Ceramics Industry, 2009, 16(2): 20-23.

[2] VIEIRA C M F, SÁNCHEZ R, MONTEIRO S N. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil [J]. Construction & Building Materials, 2008, 22(5): 781-787.

[3] 苑克兴, 建卫瓷行业节能减排的现状 & 技术措施[J]. 中国陶瓷工业, 2009, 16(1): 33-38.
YUAN K. China Ceramic Industry, 2009, 16(1): 33-38.

[4] 张秋云, 郭杏妹, 黄文庆, 等. 陶瓷行业节能减排技术与设备综述[J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 352-355.
ZHANG Q Y, GUO X M, HUANG W Q, et al. Research

- and Application of Materials, 2008, 2(4): 352-355.
- [5] 王斌, 郑伍魁, 李辉, 等. 我国陶瓷墙地砖制粉工艺的进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(5): 1312-1319.
WANG B, ZHENG W K, LI H, et al. Silicate Bulletin, 2015, 34(5): 1312-1319.
- [6] MGBEMERE H, JANSSEN R, PORTNER R, et al. Investigations on Bulk Ceramic Samples Using a Dry Powder High-Throughput [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2010, 82(9): 1431-1431.
- [7] SHAH M T, EVANS G M, UTIKAR R P, et al. Effect of closure models on Eulerian-Eulerian gas-solid flow predictions in riser [J]. Powder Technology, 2015, 269: 247-258.
- [8] 赖科, 马欣. 垂直旋转流场中单颗粒运动状态判别及受力分析[J]. 计算力学学报, 2019, 36(1): 59-64.
LAI K, MA X. Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(1): 59-64.
- [9] 沙毅, 朱颖, 武鹏, 李其朋, 等. 旋流泵菜籽-水两相流浓度特性实验与流场数值模拟[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 173-180.
SHA Y, ZHU Y, WU P, et al. Journal of Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 173-180.
- [10] 董敏, 夏晨亮, 李想. 组合桨搅拌槽内部流场及混合时间数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1): 43-48.
DONG M, XIA C I, LI X. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(1): 43-48.
- [11] 韩坤, 何建铎, 彭东辉, 等. 回转圆筒内粉体均化过程数值计算[J]. 化工装备技术, 2015, 36(2): 16-20.
HAN K, HE J B, PENG D H, et al. Chemical equipment technology, 2015, 36 (2): 16-20.
- [12] 逢启寿, 王亮, 王海辉. 稀土萃取搅拌槽不同挡板的三维流场数值模拟[J]. 中国有色冶金, 2017, 46(5): 37-40.
GE Q S, WANG L, WANG H H. China Nonferrous Metallurgy, 2017, 46(5): 37-40.