基于DEM的强力混合机颗粒仿真与优化

薛 宁
(湖南中冶长天重工科技有限公司,湖南 长沙 410205)

摘要: 为研究卧式强力混合机的混合过程和机理,提高混合效率,本文采用DEM软件对强力混合机的混合均匀性和效率进行研究。首先建立卧式强力混合机的数值仿真模型,分别对混合原料粒度、填充率、含水量、转子组件4个参数进行研究,分析其对物料混合时间、混合均匀性和转子部件磨损的影响规律,最后通过正交试验验证数值仿真结果的有效性。研究结果表明:含水量对混合度有显著影响;在填充率为10%、转速为55 r/min、表面能为3 J/m^2、含铁原料和溶剂粒度为8.5 mm,燃料粒度为6.5 mm时,筒内混合度最好。

关键词: 强力混合机; DEM; 仿真优化
中图分类号: TF046.4; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2021)06-0062-07
doi: 10.13403/j.sjqt.2021.06.086

Simulation and optimization of intensive mixer particles based on DEM

XUE Ning
(*Hunan CIE Heavy Industry Technology Co.,Ltd.,Changsha* 410205,*Hunan*,*China*)

Abstract: In order to study the mixing process and mechanism of horizontal intensive mixer and improve the mixing efficiency,DEM software is used to study the mixing uniformity and efficiency of intensive mixer. Firstly,a numerical simulation model of the horizontal intensive mixer is established; and then the influence of 4 parameters,such as the particle size of the mixed raw material,the filling rate,the water content,and the rotor components on the material mixing time,the mixing uniformity and the wear of the rotor components,are studied and analyzed; finally,the validity of the numerical simulation results is verified by orthogonal tests. The results show that the water content has a significant effect on the mixing degree; the best mixing degree in the cylinder is achieved at 10% filling rate,55 r/min speed,3 J/m^2 surface energy,8.5 mm particle size of iron-containing raw material and solvent,and 6.5 mm particle size of fuel.

Key words: intensive mixer; DEM; simulation and optimization

在传统烧结工艺流程中,烧结矿的产、质量受混合料的混合过程影响较大[1-3]。而圆筒混合机是目前主要的混合设备,这类混合机的优点在于产量大,但是效率较低,混合效果有待提高[4-5]。相比于圆筒混合机,强力混合机有着更好的混合效果和更小的体积。在卧式强力混合机的连续运行中,物料从进料口进料,通过转子组件的搅拌作用在圆筒内混合,最后从出料口出料。如果烧结混合料未完全混合就从进料口排出,会严重影响后续工艺流程,从而降低烧结矿质量; 另外,物料在缸内混合时间过长,容易出现混合过度造成成分分离,增加能耗,并影响烧结矿质量。因此,探究强力混合机的混合过程和机理,可为合理设计混合机的结构,优化工艺技术提供参考,同时对提高混合质量及生产效率,减少污染排放和提高

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-10-11
作者简介: 薛 宁(1982—),男,高级工程师,从事铁矿烧结球团工艺相关设备的研发工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

能源利用效率也有着重要意义[6]。

DEM 仿真模拟经过数十年的发展，通过建立与实验对标的数值仿真模型，可以解决传统实验性方法的诸多限制[7-8]。颗粒形状、接触模型、模型尺寸等工艺参数会较大程度影响数值仿真结果，因此用于模拟干湿颗粒的接触模型、模型尺寸的放大设计、建立方便快捷的参数标定方法等仍有待深入研究。由于影响混合的因素众多，导致混合过程极其复杂，颗粒的混合机理仍需深入探讨。圆筒混合机的结构相对简单，研究也最为全面，研究方法可为其他混合设备的研究提供参考。而卧式强力混合机属于连续式混合机，其结构相对复杂，相关研究较少，特别是对于烧结原料湿颗粒的混合尚未见研究。

本文以用于烧结工艺的卧式强力混合机为研究对象，采用离散元仿真与试验相结合的方法，研究影响混合机混合效果的相关因素以及规律，并对相关操作参数进行优化，获得达到最佳混合度和最短混合时间的参数组合，以期可为类似项目提供指导。

1　DEM 仿真理论与建模方法

1.1　理论分析

离散元方法是 Peternal Cundall 在 1971 年提出[9]，其根据牛顿第二定律来计算每一个独立颗粒作用力和位移之间的关系。伴随着离散元方法的发展，其也越来越多地被运用在冶金装备的分析上。离散元方法集成了许多不同类型的接触模型，以适用不同的计算环境。本文采用 Hertz－Mindlin(no slip) 模接触型来计算每个颗粒之间的法向接触力，其中包括阻尼器耗散与弹性项，具体计算方法如下[10]。

$$F_n = -k_n\delta_n + c_n\dot{\delta}_n \tag{1}$$

式中：c_n 为法向阻尼系数；δ_n 为法向重叠量，N；k_n 为法向刚度系数。

其中，c_n 和 k_n 由下式计算：

$$k_n = \frac{4}{3}E^*\left(R^*\delta_n\right)^{1/2}$$

$$c_n = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2+\ln^2 e}}\sqrt{s_n m^*} \tag{2}$$

式中：E^* 为接触颗粒的等效弹性模量，MPa；R^* 为等效粒子半径，m；s_n 为法向刚度，N/m；e 为弹性恢复系数；m^* 为等效质量，kg。

其中，E^*、R^*、s_n 和 m^* 可由下式计算：

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-v_i^2}{E_i} + \frac{1-v_j^2}{E_j} \tag{3}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \tag{4}$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \tag{5}$$

$$S_n = 2E^*\sqrt{R^*\delta_n} \tag{6}$$

式中：i，j 分别为不同的颗粒；E_i 为颗粒 i 的弹性模量，MPa；v_i 为颗粒 i 的泊松比；R_i 为颗粒 i 半径，m；m_i 为颗粒质量，kg。

采用 Mindlin[11] 模型来计算切向力：

$$F_t = -k_t\delta_t + c_t\dot{\delta}_t \tag{7}$$

式中：δ_t 为切向重叠量，N；k_t 和 c_t 分别为切向的刚度系数和阻尼系数，其可由下式计算：

$$k_t = 8G^*\left(R^*\delta_t\right)^{1/2} \tag{8}$$

$$c_t = 2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{k_t m^*} \tag{9}$$

式中：G^* 为等效剪切模量，Pa；$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2+\ln^2 e}}$。

1.2　DEM 建模方法

离散元数值仿真主要用来分析介质的宏观运动规律，其颗粒参数是个关键因素。合理的颗粒参数能够更准确地反应出强力混合机介质的运动特性。在 DEM 建模中，仿真环境中的介质与真实环境存在一定的差异，因此，DEM 分析中一般都会结合颗粒的实际参数值，在软件中对仿真参数进行标定，最后获得较为合理的颗粒仿真参数。

本文采用数量、材质及形状尺寸都相同的两种染色石子作为混合物料，其平均粒度为 7.5 mm，具体参数如表 1 所示。

两种染色石子的填充率均为 10%，最终得到仿真结果如图 1 所示。用 Grid Bin Group 工具划分取样空间，导出各样本中的数据进行分析

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 颗粒混合仿真物性参数表

Table 1 Simulation physical parameters of particle mixing

颗粒种类	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	剪切模量/Pa
有机玻璃	0.25	1 300	1.0×10^{7}
石子	0.25	1 646	4.5×10^{10}

计算，评价其混合均匀性(本文采用混合度来评价均匀程度，无量纲)；然后搭建与数值仿真同尺寸的卧式强力混合机试验装置，如图2所示。在模型验证过程中，采用与仿真过程一致的采样方法对粒度为6～9 mm的红、蓝两种颜色的石子进行采样。

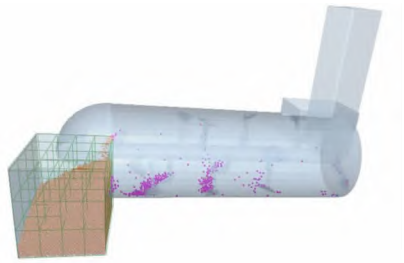
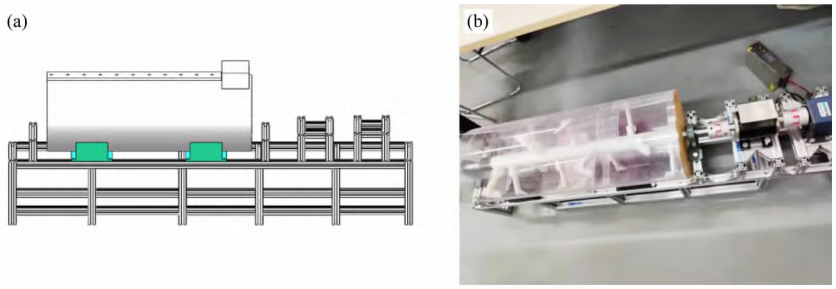


图1 Grid Bin Group取样空间划分

Fig. 1 Grid Bin Group sampling space division



(a) 三维模型；(b) 试验装置

图2 卧式强力混合机三维模型与试验装置

Fig. 2 Three-dimensional model and test device of horizontal intensive mixer

试验和仿真中的取样结果分别如图3所示，仿真中Grid Bin Group设置与实验取样器尺寸相同。最终测得试验中颗粒的变异系数为8.5，仿真中变异系数为8.1，误差为5%左右。由此可知该仿真模型是可靠的。

2 基于DEM的颗粒混合均匀性分析

仿真采用的原料配比及其对应接触参数分别如表2、3所示。

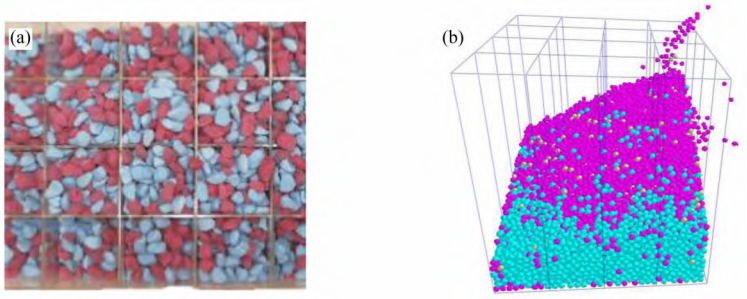


图3 实验及仿真取样分析

Fig. 3 Sampling analysis using experimental and simulation method

表2 烧结原料仿真物性参数

Table 2 Simulation physical parameters of sintering raw materials

项目	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})	质量分数/%
含铁原料	0.30	6.77×10^{7}	2 900～3 300	87.0
燃料	0.25	1.12×10^{8}	450	4.2
熔剂	0.29	1.26×10^{9}	2 500～2 700	8.8
钢	0.30	7.00×10^{10}	7 800	—

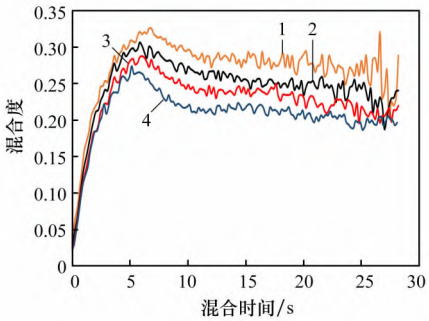
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　烧结原料仿真颗粒接触参数

Table 3　Simulated particle contact parameters of sintering raw materials

项目	颗粒 – 颗粒	颗粒 – 几何体
恢复系数	0. 10	0. 20
静摩擦系数	0. 70	0. 50
动摩擦系数	0. 01	0. 01

本文采用接触数法来评价烧结原料的混合效果。在转速为 65 r/min，颗粒粒度为 6. 5 mm，表面能为 1 J/m^2 时，考虑填充率分别为 10%、13%、16%、19% 对混合效果的影响。在不同填充率下，强力搅拌机筒内烧结原料的混合程度随时间变化曲线如图 4 所示。如图 4 可知，填充率从 10% 增加到 19% 时，含铁原料混合度整体降低，但总的降低程度很小，且变化趋势基本一致。这说明填充率的变化对混合度影响不大。分析原因认为：随着转子组件转速的增加，颗粒的运动速度也随之增加，产生了更好的混合特性。在 80 r/min 转速下，烧结原料的流出速度快，在混合后期筒内物料少，因此混合度波动较大。转子组件转速的增加能够提高混合速度，加快物料流出速度，有效提高生产效率，但是能量消耗会增加，故在工程实际中，需要协调好两者之间的关系。

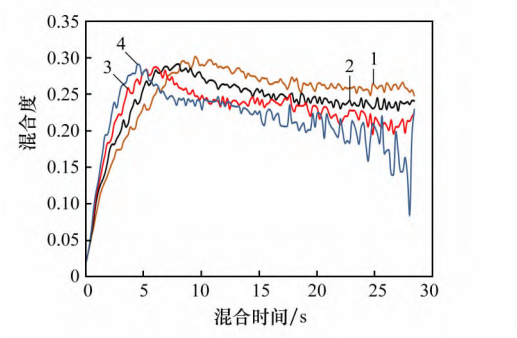


填充率/%：1—10；2—13；3—16；4—19。

图 4　填充率对筒内含铁原料混合度的影响

Fig. 4　The effect of filling rate on the mixing degree in cylinder

在填充率为 16%，颗粒粒度为 6. 5 mm，表面能为 1 J/m^2 时，考虑转速为 55、65、75、85 r/min 对混合均匀性的影响，结果如图 5 所示。由图 5 可知：随着转速的增大，筒体内含铁原料的混合度达到最高值的时间缩短，混合速率越快；当转速为 85 r/min 时，达到最高混合度的混合速率最快，且时间最短，为 5 s 左右。分析原因认为：随着填充率的增加，颗粒的运动空间减小，减弱了正反推犁头的剪切、对流混合，不利于充分混合；并且在相同犁头的线速度下，填充率越低则颗粒所获得的平均运动速度越高。间歇式混合机在不同填充率下仅存在混合速度的差异，最终混合度差别较小，而卧式强力混合机为连续式混合机，物料在混合过程中同时由出料口排出，所以导致最终混合度随着填充率的增加而降低。

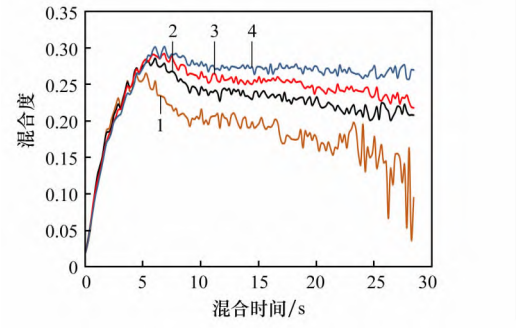


转速/(r·min^{-1})：1—55；2—65；3—75；4—85。

图 5　转速对筒内含铁原料混合度的影响

Fig. 5　The effect of speed on the mixing degree in cylinder

在填充率为 16%，转速为 65 r/min，颗粒粒度为 6. 5 mm，考虑不同含水量(干物料，1、2、3 J/m^2) 对混合均匀性的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，在混合过程中，黏性原料的混合程度高于非黏性干颗粒。随着黏度的增加，最高混合度有增加的趋势，但变化不明显。



1—干物料；表面能/(J·m^{-2})：2—1，3—2，4—3。

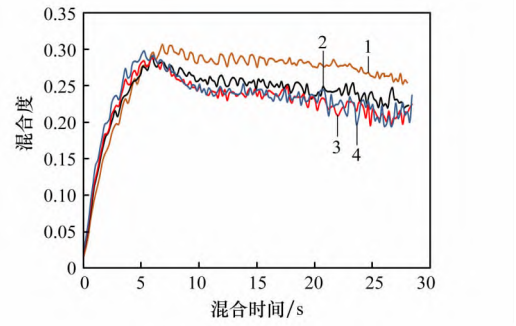
图 6　含水量对筒内含铁原料混合度的影响

Fig. 6　The effect of water content on the mixing degree in cylinder

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在不同的颗粒黏度下，混合速度几乎相同。产生这种现象的可能原因是：物料黏性的增加，降低了颗粒的轴向运动速度，使颗粒在筒内的停留时间增加，从而表现出更高的混合度；此外，物料流出速度会降低，干颗粒的流出速度最快，在混合后期混合度波动较大。

在填充率为16%，转速为65 r/min，表面能为1 J/m^2，考虑粒度差异对混合均匀性的影响，结果如图7所示。由图7可知，粒度为5.5 mm的颗粒在筒内停留时间最长，流出速度最慢，随着粒度的增大，筒内物料质量百分比达到10%的时间缩短，流出速度逐渐增大，但粒度为8.5 mm的颗粒在混合后期流出速度低于粒度为7.5 mm的颗粒，可以推测颗粒流出速度随着粒度的增加而增加至一定值。5.5 mm颗粒在筒内停留时间最长，因此可以推测，由于物料流出速度过快导致大颗粒在混合稳定状态的混合度下降。



粒度/mm：1—5.5；2—6.5；3—7.5；4—8.5。

图7 粒度对筒内含铁原料混合度的影响

Fig. 7 The effect of particle diameter on the mixing degree in cylinder

3 正交试验优化

3.1 试验设计

在进行正交试验时，一般选用标准正交表，因子的个数与表中的列数正交；且最好保持空列计算的随机误差，使层数与正交表中的层数一致。在满足要求情况下，尽量选择较小的正交表，以减少试验次数。烧结原料的混合过程有4个因素，每个因素有4个层次，因此本文选用的正交表为$L_{16}(4^5)$，最后一列空列用于计算随机误差，如表4所示。

表4 正交试验各因素水平

Table 4 The factor level of orthogonal test

水平序号	填充率(A)/%	转速(B)/(r·min^{-1})	粒度(C)/mm	含水量(D)/(J·m^{-2})
1	10	55	6.5+5.5	干物料
2	13	65	6.5+6.5	1
3	16	75	6.5+7.5	2
4	19	85	6.5+8.5	3

注：含水量用颗粒表面能来表征，J/m^2。

3.2 试实验结果分析

按上述正交表，进行16组基于强力混合机数值仿真模型的试验验证，结果如表5所示。采用接触数评价法，将稳定阶段圆筒内含铁原料的最高混合度和混合度达到0.25时的混合时间填入正交表，并进行结果分析。试验中每个圆筒中的铁原料的混合程度随时间的曲线如图8、9所示。

表5 烧结原料混合正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results of mixing effect of sintering raw materials

试验号	填充率(A)	转速(B)	含水量(C)	尺寸差(D)	空列	混合度	混合时间/s
1	1	1	1	1	1	0.32	5.46
2	1	2	2	2	2	0.40	2.26
3	1	3	3	3	3	0.47	1.46
4	1	4	4	4	4	0.51	1.06
5	2	1	2	3	4	0.38	4.26
6	2	2	1	4	3	0.34	5.66
7	2	3	4	1	2	0.38	1.06
8	2	4	3	2	1	0.41	1.46
9	3	1	3	4	2	0.42	3.26

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(续表 5)

试验号	填充率 (A)	转速 (B)	含水量 (C)	尺寸差 (D)	空列	混合度	混合时间/s
10	3	2	4	3	1	0.46	1.86
11	3	3	1	2	4	0.29	4.26
12	3	4	2	1	3	0.31	2.06
13	4	1	4	2	3	0.43	2.06
14	4	2	3	1	4	0.34	2.06
15	4	3	2	4	1	0.33	3.46
16	4	4	1	3	2	0.28	3.46

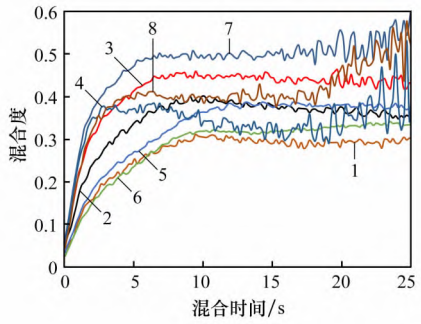


图 8　正交试验筒内含铁原料混合度变化曲线(1～8)

Fig. 8　Variation curve of mixing degree in orthogonal test(1～8)

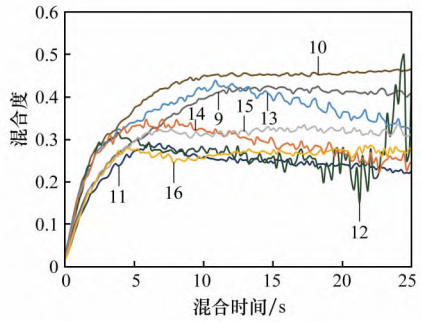


图 9　正交试验筒内含铁原料混合度变化曲线(9～16)

Fig. 9 Variation curve of mixing degree in orthogonal test(9～16)

由图 8、9 可看出：当填充率为 10%、转速为 55 r/min、表面能为 3 J/m^2、含铁原料和熔剂粒度为 8.5 mm，燃料粒度为 6.5 mm 时筒内混合度最好；当填充率为 10%、转速为 85 r/min、含水量为表面能取 3 J/m^2 时对应值、含铁原料和熔剂粒度为 7.5 mm，燃料粒度为 6.5 mm 时，颗粒在筒内的混合速度最快；物料含水量对筒内混合度的影响最大，其次为填充率，转子组件的旋转速度对筒内混合度的影响最小；物料含水量对筒内物料在筒内混合时间的影响最大，其次为转速，填充率对筒内混合速度的影响最小。

4　结　论

本文采用数值模拟方法对强力混合机的工作过程进行模拟，建立并求解强力混合机物理和数学模型；基于 DEM 仿真模型，对烧结原料的混合过程进行仿真，分析原料在烧结混合中的各影响因素。得出如下结论：

(1) 随着填充率和颗粒粒度的增加，烧结原料的混合程度均减小；随着转速的增加，颗粒混合程度变化并不明显；随着黏度的增加，颗粒的混合程度增大。

(2) 正交试验表明，含水量因素对混合度有显著影响，填充率和粒径对混合度有显著影响，转速对混合时间无显著影响。最佳混合度的工艺参数：填充率为 10%，转速为 55 r/min，颗粒表面能取 3 J/m^2 时，可得到含铁原料和熔剂粒度为 8.5 mm，燃料粒度为 6.5 mm。

参考文献：

[1] 陆坤权. 颗粒物质(上) [J]. 物理，2004，33(9)：629－635.
LU Kunquan. Granular Matter [J]. Physics，2004，33(9)：629－635.

[2] 孙其诚，王光谦. 颗粒物质力学导论 [M]. 北京：科学出版社，2009.
SUN Qicheng，WANG Guangqian. Introduction to granular matter mechanics [M]. Beijing：Science Press，2009.

[3] 张长森. 粉体技术及设备 [M]. 上海：华东理工大学出版社，2007.
ZHANG Changshen. Powder technology and equipment [M]. Shanghai：East China University of Technology Press，2007.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[4] 张超. 当代混合机的结构原理及发展趋势[J]. 矿山机械,2010,38(16):12-15.
ZHANG Chao. Structure principle and development trend of current drum mixers [J]. Mining Machinery,2010,38(16):12-15.

[5] 唐建波. 柳钢120万t/a球团生产卧式强力混合机设备作业率攻关[J]. 烧结球团,2012,37(6):57-59.
TANG Jianbo. TANG Jianbo. Brainstorming equipment availability of horizontal intensive mixer for liusteel 1.2 million t/a pellet production line [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(6):57-59.

[6] 夏建芳,邓佳欣. 立式强力混合机料仓旋转参数优化研究[J]. 设计与研究,2017(1):77-80.
XIA Jianfang,DENG Jiaxin. Study on optimization of silo rotation parameters of vertical intensive mixer [J]. Design and research,2017(1):77-80.

[7] ZUO Zhijian,GONG Shuguang,XIE Guilan. Analysis of blade erosion of intensive mixer based on DEM during wet particles mixing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(5):81-90.

[8] BEHJANI M A,MOTLAGH Y G,BAYLY A E,et al. Assessment of blending performance of pharmaceutical powder mixtures in a continuous mixer using Discrete Element Method (DEM) [J]. Powder Technology,2020,366:73-81.

[9] CUNDALL PA. A computer model for simulating progressive,large-scale movements in blocky rock systems [J]. Procintsympon Rock Fracture,1971,1(II-b):11-18.

[10] HERTZ H. Über die Berührung fester elastischer Körper [J]. Reine Angew Math,1882(92):156-171.

[11] MINDLIN R D,DERESIEWICZ H. Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces [J]. J. APPL. MECH. ASME,1953,20(3):327-344.

(上接第54页)

[7] 赵斌,张玉柱,王子兵,等. 烧结环冷机热工测试及余热源参数确定[J]. 钢铁,2010,45(8):90-93.
ZHAO Bin,ZHANG Yuzhu,WANG Zibing,et al. Thermal test of sintering ring cooler and determination of residual heat source parameters [J]. Iron and steel,2010,45(8):90-93.

[8] 沈永兵,刘建虎,高杨. 基于热力学模型的烧结环冷机漏风率测算方法研究[J]. 热能动力工程,2016,31(1):87-91.
SHEN Yongbing,LIU Jianhu,GAO Yang. Study on calculation method of air leakage rate of sintering annular cooler based on thermodynamic model [J]. Thermal power engineering,2016,31(1):87-91.

[9] 汪用澎,张信. 大型烧结设备[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
WANG Yongpeng,ZHANG Xin. Large sintering equipment [M]. Beijing:Machinery Industry Press,1997.

(上接第61页)

[7] 武轶,李小静,余正伟. 低硅烧结矿的冶金性能及其优化配用研究[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2018,28(1):19-22.
WU Yi,LI Xiaojing,YU Zhengwei. Study on metallurgical properties of low silicon sinter and its optimum combination [J]. Journal of Anhui Metallurgical Science and Technology Vocational College,2018,28(1):19-22.

[8] 郭贺,沈峰满,柳明旭,等. MgO以及装料方式不同对烧结矿熔滴性能的影响[J]. 材料与冶金学报,2017,16(1):13-16.
GUO He,SHEN Fengman,LIU Mingxu,et al. Effects of MgO and charging methods on the properties of sinter droplet [J]. Journal of Materials and metallurgy,2017,16(1):13-16.

[9] 许满兴. 烧结矿冶金性能对其质量和高炉主要操作指标的影响[J]. 烧结球团,2014,39(3):1-11.
XU Manxing. Effect of metallurgical properties of sinter on its quality and main operation index of blast furnace [J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(3):1-11.

[10] 丁智敏,姜鑫,魏国,等. 软熔带类型对高炉内未燃煤粉分布影响的数值模拟[J]. 东北大学学报,2018,39(9):1242-1245.
DING Zhimin,JIANG Xin,WEI Guo,et al. Numerical simulation of the influence of soft melt zone type on unburned pulverized coal distribution in blast furnace [J]. Journal of Northeastern University,2018,39(9):1242-1245.

[11] 王海涛,李光辉,范晓慧. 几种高炉炉料冶金性能的对比研究[J]. 钢铁,2006,41(1):23-27.
WANG Haitao,LI Guanghui,FAN Xiaohui. Comparative study on metallurgical properties of several BF burden [J]. Iron and Steel,2006,41(1):23-27.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net