

烧结圆筒混料参数优化对制粒性能的影响

杨双平¹, 赵康¹, 王苗¹, 刘起航¹, 池延斌¹, 董洁¹, 于成刚²

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西星环聚能科技有限公司, 陕西 西安 710055)

摘要: 圆筒混料机是通过圆筒旋转将物料进行混匀的一种混料设备, 其参数不同对制粒效果影响不同。为优化圆筒混料机参数, 改善制粒工艺, 本文以 EDEM 软件为平台, 建立仿真分析模型, 对烧结混料过程中圆筒混料机的转速、制粒时间以及填充率进行仿真分析; 然后进行烧结试验, 对混合料进行人工加水混匀, 使混合料中的水分、粒度和料中各组分均匀分布, 并在圆筒混料机中补充润湿和预热混合料, 通过制粒试验确定了圆筒混料机运行过程中的最佳参数。研究表明: 增加填充率、提高混料机转速都对颗粒混合度有一定的影响。当填充率小于 11% 时, 小球逐渐增多, 小球平均粒径增大; 在填充率为 11% 时, 混合效果最佳, 继续增大填充率, 混合效果逐渐降低; 当转速小于 24 r/min 时, 小球逐渐增多, 小球平均粒径增大, 在转速为 24 r/min 时效果最佳, 继续增大转速, 混料性能逐渐下降; 随着制粒时间延长, 颗粒混合度先增大而后趋于稳定, 制粒时间小于 5 min 时颗粒混合逐渐均匀, 在制粒时间达到 5 min 时混合效果最佳, 随着制粒时间的继续增加, 制粒小球占比变化不大。通过 EDEM 软件进行仿真分析所得规律与实际试验结果基本吻合。

关键词: 烧结; 离散元素法; EDEM 软件; 混合料; 制粒

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0019-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.074

Effect of sinter balling drum mixture parameter optimization on granulation performance

YANG Shuangping¹, ZHAO Kang¹, WANG Miao¹, LIU Qihang¹,

CHI Yanbin¹, DONG Jie¹, YU Chenggang²

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. STARTORUS FUSION, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: Balling drum mixer is a kind of mixing equipment that mixes materials through drum rotation, and its parameters have different effects on the granulation effect. In order to optimize the parameters of the drum mixer and improve the granulation process, EDEM software is used as the platform to establish a simulation analysis model, simulate and analyze the rotation speed, granulation time and filling rate of the drum mixer in the process of sintering mixing, and then carry out sintering tests, manually add water to the mixture to mix evenly, so that the moisture, particle size and components in the mixture are evenly distributed, and the wetting and preheating mixture is supplemented in the drum mixer, and the optimal parameters during the operation of the drum mixer are determined through the granulation test. The results show that increasing the filling rate and increasing the speed of the mixer have a certain impact on the particle mixing. When the filling rate is less than 11%, the globules are gradually increased, and the average particle size of the globules is increased. When the filling rate is 11%, the mixing effect is the best, and the filling rate continues to increase,

收稿日期: 2024-09-15; 修回日期: 2025-05-07

基金项目: 陕西省科技厅—基础处—企业联合基金资助项目(2019JLM-34)

作者简介: 杨双平(1967—), 男, 博士, 教授, 从事冶金新技术及工艺优化方面的研究。

通信作者: 赵康(1998—), 男, 硕士研究生, 从事铁矿烧结方面的研究。

and the mixing effect is gradually decreased. When the rotation speed is less than 24 r/min, the globules are gradually increased, and the average particle size of the globules is increased, and the effect is best when the rotation speed is 24 r/min. With the extension of granulation time, the particle mixing degree first increases and then tends to be stable, and the particle mixing gradually becomes uniform when the granulation time is less than 5 min, and the mixing effect is best when the granulation time reaches 5 min. The simulation and analysis obtained by EDEM software are basically consistent with the actual test results.

Key words: sintering; discrete element method; EDEM software; mixture; granulation

烧结作为高炉炼铁中的关键步骤, 强化制粒、提高烧结料层的透气性是提高烧结机生产率的有效途径^[1]。混合料制粒工艺的好坏能够影响烧结矿的质量和性能^[2-3]。因此, 改善制粒效果、强化烧结过程已成为当下重点研究的内容之一。

目前, 国内外许多学者通过离散元软件对混合料制粒的过程进行仿真模拟研究。孙其诚等^[4]通过离散元模型模拟了圆筒混料机的混合过程并与试验结果进行了对比, 研究结果表明: 离散颗粒模型能够真实反映颗粒在圆筒混料机中的混合现象。朱旺等^[5]和赵士奇等^[6]针对混料机粘料现象严重、制粒效果差等问题, 采用 EDEM 软件对烧结混合料的制粒过程进行模拟, 研究了扬料板高度和间隔等对制粒的影响。研究结果表明: 适宜的扬料板高度和间隔可以使物料持续翻动, 有利于物料的混匀; 并在仿真基础上对混合料制粒系统进行了升级改造, 成功解决了混料机粘料现象。SODA 等^[7]采用数值模拟的方法研究了圆筒混料机的倾角和长度对颗粒行为的影响。研究结果表明: 圆筒混料机内的颗粒数目随着混料机倾角的增大而减少, 随着混料机长度的增大而增大, 但长度越长, 混合料达到稳态的时间也越长。YOU 等^[8]采用了基于离散元法的数值模拟研究颗粒在圆筒混合机中的混合效果。研究结果表明: 颗粒运动强度系数随转速的增加而增大, 旋转叶片的数量对颗粒影响不大。YARAGHI 等^[9]通过离散元模型研究了高速制粒设备叶轮转速、填充率等对颗粒混合度的影响, 研究结果表明: 当转速从 10 r/min 增大到 40 r/min, 填充率从 40% 提高到 60% 时, 混合料的混合程度均得到了一定程度的提高。唐凯^[10]在高速制粒设备的基础上建立了颗粒混合及聚结的数学模型, 通过仿真研究了颗粒的混合和制粒行为, 研究结果表明: 高速制粒设备

中, 颗粒的运动主要分为翻滚和抛落两个部分, 相比于传统圆筒混料机, 颗粒的运动更加剧烈。

为了更好地提升制粒效果, 以前人的相关研究为基础, 本文采用基于 EDEM 软件模拟烧结混料过程中圆筒混料机的转速、制粒时间以及填充率对制粒性能的影响, 并在仿真的基础上进行了混合料制粒试验, 通过制粒试验与仿真结果进行验证, 确定了圆筒混料机实际运行过程中的最佳转速、制粒时间、填充率。研究对提高我国烧结行业的生产水平, 节约生产成本, 提高生产效率有着重要意义。

1 离散元素法颗粒模型的建立与分析

1.1 颗粒模型原理

离散元素法颗粒模型是将颗粒与颗粒以及颗粒与边界之间的相互接触作用转化为振动运动模型^[11]。图 1 为离散元素法颗粒接触模型。

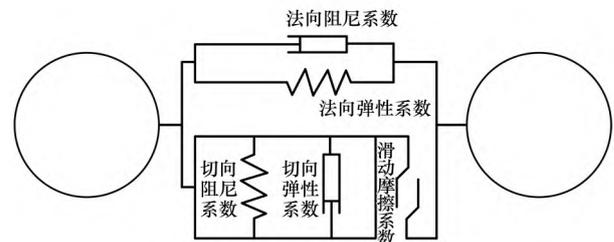


图 1 颗粒接触模型

Fig. 1 Particle contact model

颗粒法向方向上的受力:

$$F_n = m \frac{dx_n^2}{dt^2} + M_Q \frac{dx_n}{dt} + Y_n x_n \quad (1)$$

颗粒在切向上的运动包括滑动和滚动两个过程, 受力如下:

$$F_s = m \frac{dx_s^2}{dt^2} + M_t \frac{dx_s}{dt} + Y_s x_s \quad (2)$$

$$M = I \frac{d\theta^2}{dt^2} + (M_t \frac{dx_s}{dt} + Y_s x_s) R \quad (3)$$

式中: F_n 为颗粒法向上受力, N; F_s 为颗粒切向上受力, N; M 为颗粒受合力矩, N·m; M_Q 和 Y_N 分别为法向阻尼系数和法向弹性系数; Y_s 和 M_t 分别为切向阻尼系数和切向弹性系数; m 为颗粒的等效质量, kg; x_n 为颗粒在法向上的相对位移, m; x_s 为颗粒在切向上的相对位移, m; I 为颗粒的等效转动惯量, kg·m²; θ 为颗粒本身的旋转角度, rad; R 为旋转半径, m; t 为颗粒的运动时间, s。

根据牛顿第二定律可得到颗粒的运动方程如下:

$$\sum F = m \frac{dx^2}{dt^2} \quad (4)$$

$$\sum M = I \frac{d\theta^2}{dt^2} \quad (5)$$

式中: $\sum F$ 为颗粒所受合力, N; $\sum M$ 为颗粒所受合力矩, N·m。

1.2 颗粒模型的构建

1.2.1 制粒滚筒模型

在试验中, 如果按照实际尺寸仿真计算, 仿真过程会耗时过长, 因此用建模软件 SolidWorks 对圆筒混料机的尺寸进行了简化处理, 以便于缩短仿真时间, 提高仿真效率。本文仿真过程中基于实际混料机尺寸对所使用的圆筒混料机尺寸进行几何结构换算, 做相似缩小处理, 模拟尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

1.2.2 铁矿粉颗粒建模

铁矿粉理化性质的不同导致了其制粒能力的不同, 在实际生产生活中, 颗粒的理化性质和尺寸大小不完全相同, 而这些要素都对制粒效果有不同程度的影响, 因此选择合适的参数颗粒模型关系到整个试验的效率和精确性。EDEM 的 Creator 功能可以准确刻画颗粒的形状, 但是颗粒的形状不规则会加大计算难度, 降低计算效率和准确性, 因此本文在对铁矿粉颗粒进行建模时, 将所有铁矿粉颗粒简化为球状颗粒, 放大颗粒级进行仿真分析, 不仅能够缩短仿真时间, 还能够简化仿真流程步骤。

研究发现, 混合料中质量占比最大的是铁矿

粉, 但是其粒径级别过小, 从而加大了仿真难度。此外, 铁矿粉粒径范围跨度较大, 颗粒的平均粒径变化较大, 加上颗粒数量巨大, 这无疑增加了仿真的时间, 所以如何在有限的条件和时间下提高仿真模拟的精确性是需要研究的方向。针对以上问题, 本文在进行仿真时适度放大了铁矿粉颗粒尺寸, 各铁矿粉平均粒径放大前后尺寸如表 1 所示。

表 1 铁矿粉平均粒径放大前后尺寸

Table 1 Average particle size of iron ore powder before and after magnification

平均 粒径/mm	①号 矿粉	②号 矿粉	③号 矿粉	④号 矿粉	⑤号 矿粉
放大前尺寸	0.126	0.154	0.116	0.123	0.269
放大后尺寸	1.260	1.540	1.160	1.230	2.690

对粒径放大后的铁矿粉颗粒在 EDEM 软件进行建模, 颗粒模型如图 2 所示。模拟过程中各铁矿粉所占的比例如表 2 所示。

1.3 颗粒模型构建离散元仿真模型和颗粒参数设置

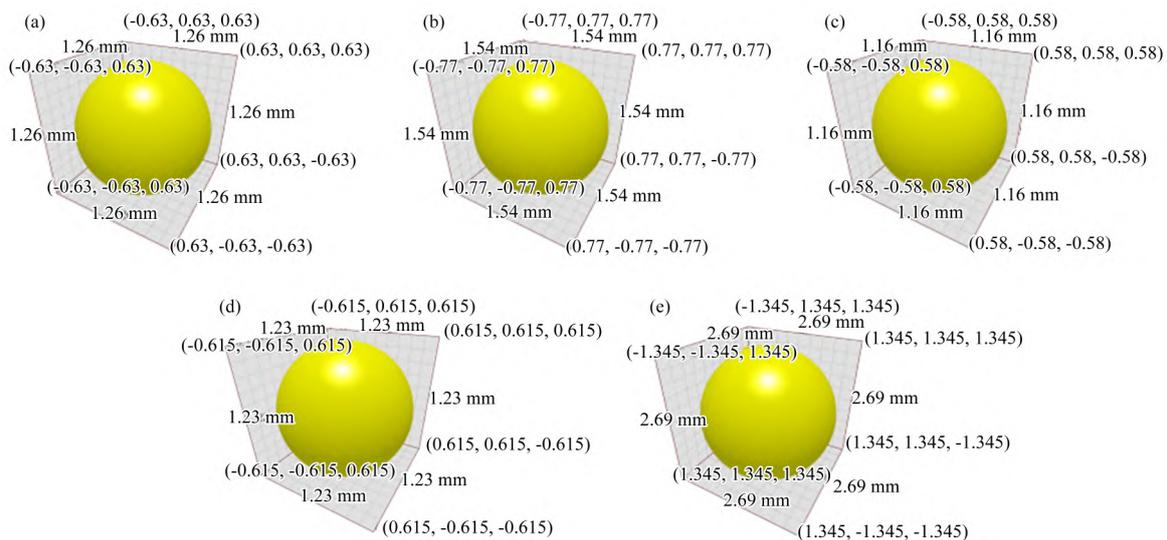
用软件 EDEM 进行仿真模拟试验时, 需要设置很多不同种类的参数, 其中不只是铁矿粉自身所具有的特性参数, 还有一些是不同矿粉颗粒相互影响以及颗粒和制粒机的接触参数。

自身特性参数主要包括泊松比、密度以及剪切模量。泊松比是反映材料横向变形的弹性常数; 剪切模量是衡量材料抵抗剪切应力的能力; 密度是对特定体积内的质量的度量。这些重要的参数可以预测铁矿粉颗粒在受力时的行为和性能。由于这三种参数基本不会发生变化, 所以一般在文献资料中都可以获取到。

接触参数主要包括恢复系数、静态摩擦系数以及滚动摩擦系数。这三种参数的不确定性比较大, 对外部条件的敏感性较强, 这类接触参数受材料物理化学性质、形态、湿度等参数影响大, 没有可参考的固定值, 需要试验方法进行标定, 可以用参数定法仿真得到参数数值。

颗粒以及圆筒混料机的各参数结果如表 3、4 所示。

EDEM 中的接触模型描述了元素在互相接触时的行为, 其中 Hertz-Mindlin 是 EDEM 中默认使



(a) ①号矿粉; (b) ②号矿粉; (c) ③号矿粉; (d) ④号矿粉; (e) ⑤号矿粉

图 2 颗粒模型

Fig. 2 Particle model

表 2 模拟过程中不同铁矿粉占比(质量分数)

①号 铁矿粉	②号 铁矿粉	③号 铁矿粉	④号 铁矿粉	⑤号 铁矿粉
19	58	3	7	13

表 3 自身特性参数

Table 3 Eigen parameter

测试对象	泊松比	剪切模量/Pa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
铁矿粉	0.25	5.0×10^7	4 900
圆筒混料机	0.30	7.7×10^{10}	7 800

表 4 接触参数

Table 4 Contact parameter

项目	恢复系数	静态摩擦系数	滚动摩擦系数
颗粒之间	0.15	0.44	0.05
颗粒和圆筒混料机之间	0.50	0.70	0.15

用的接触模型,主要用于常规颗粒的接触应用,不利于对混合料进行制粒。Hertz-Mindlin with JKR模型是在 Hertz-Mindlin 模型的基础上进行了改进,是一种内聚力的接触模型,它适用于粉体颗粒和一些含湿物料,颗粒之间发生黏结团聚的情况,并且允许对颗粒进行建模,所以此模型更适合用于对铁矿粉颗粒进行仿真模拟。因此,本文在仿真过程中选择 Hertz-Mindlin with JKR 模型进

行模拟。

1.4 评价方法

1.4.1 混合度评价方法

混合度评价方法常用的有标准差法、Lacey 指数法、变异系数法以及接触数法等^[12-14]。

接触数法由 VAN 等^[15]提出; GUPTA 等^[16]在其基础上,采用两种不同颗粒接触数与整体接触数的比值表征颗粒的混合情况,计算公式见式(7)。M 值越大,混合情况越好, M 值越小,则混合情况越差。

$$M = \frac{N_{AB}}{N_T} \quad (6)$$

$$N_T = N_{AA} + N_{AB} + N_{BB} \quad (7)$$

式中: N_{AB} 为 A 与 B 两颗粒的接触数目, N_{AA} 为 A 与 A 两颗粒的接触数目, N_{BB} 为 B 与 B 两颗粒的接触数目, N_T 为总的接触数目。

相比于其他混合度的评价方法,接触数法能够很好地表征不同区域的混合情况,且同时能够适用于径向混合以及轴向混合。但是接触数法在使用过程中需要统计颗粒的数目,且其值受统计颗粒数目的直接影响,因此在实际生产过程中基本上难以应用,多用于仿真模拟中。

本文在仿真过程中关于颗粒混合程度评价方法选用接触数法。混合度数值越大,颗粒的混合效果越好,数值越小,混合效果越差。

1.4.2 制粒效果评价方法

制粒效果评价指标中常用的有长大指数、混合料的平均粒度、透气性指数和制粒效率等。

制粒效率可表征制粒前后的变化。其中,制粒效率(η ,%)的计算方法见式(8)。

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (8)$$

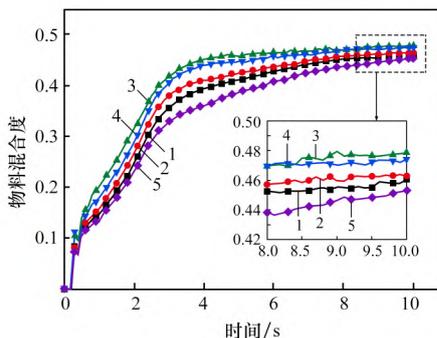
式中: E_1 为制粒前混合料中 < 3.00 mm颗粒的质量分数,%; E_2 为制粒后混合料中 < 3.00 mm颗粒的质量分数,%。 η 越大制粒效果越好。

制粒效率的不同对颗粒粒度分布、颗粒强度和颗粒形状有一定的影响,本文通过计算制粒效率以判断颗粒间力的作用力相对大小,评价制粒效果。

2 不同参数对物料混合度仿真分析

2.1 填充率影响分析

填充率对物料混合效率有着重要的影响,是衡量混合机混合效果的重要指标,它通常用百分数表示。在 EDEM 仿真过程中,在保持转速为 25 r/min 的条件下,探究填充率分别为 8%、10%、12%、14%、16% 下的最佳混合效果,仿真结果分析如图 3 所示。



填充率/%: 1—8; 2—10; 3—12; 4—14; 5—16。

图 3 填充率对混合度的影响

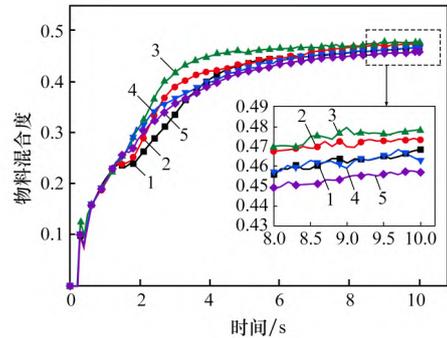
Fig. 3 Effect of filling rate on mixing degree

由图 3 可知,混合度先随着试验时间的增加而增加,之后趋于不变;当填充率分别为 16%、8%、10%、14%、12% 时,混合度依次递增,所以填充率过高过低都不适合,当填充率为 12% 时,混合度相对最高,填充效果最佳。

2.2 转速影响分析

转速不同会导致铁矿粉颗粒在混料机中的搅

拌效果不同,合适的混料机转速是保证混合质量的关键之一。为了研究不同转速对混合度影响,在填充率为 12% 的基础上,设定圆筒混料机转速分别为 15、20、25、30、35 r/min,其它参数不变,得到不同转速混合度随时间的变化结果如图 4 所示。



转速/($r \cdot \min^{-1}$): 1—15; 2—20; 3—25; 4—30; 5—35。

图 4 转速对混合度的影响

Fig. 4 Effect of rotational speed on mixing degree

由图 4 可知,混合度随着时间增加先增加而后保持稳定,当转速为 15 r/min 时,混合度随时间上升最慢,当转速提升至 25 r/min 时,混合度逐渐上升达到最大,这主要是因为当转速提升时,离心力和剪切力更强,能够使颗粒更好的在混合机中运动,接触效果更佳。在此基础上持续增加转速,混合度反而下降。因此,在实际生产过程中根据要求的不同要选择最合适的转速。

2.3 制粒时间影响分析

制粒时间是影响制粒工艺的主要参数之一,制粒时间的不同会导致颗粒尺寸大小的不同。在固定转速为 25 r/min、填充率为 10% 条件下,研究制粒时间对混合效果的影响,仿真模拟结果如图 5 所示。

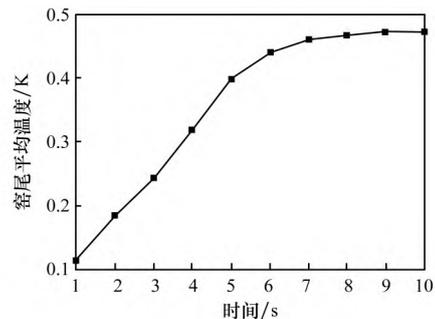


图 5 制粒时间对混合度的影响

Fig. 5 Effect of granulation time on mixing degree

由图 5 可知,在试验前期,随着时间的增加,混料均匀度逐渐增大,颗粒混合度逐渐增加,并且速率很快。继续增加时间,颗粒混合度变化曲线逐渐趋于平稳,这是因为随着时间线的拉长,物料混合充分,所以在这一阶段,颗粒混合度基本保持不变。

不同时间下颗粒的混合状态不尽相同。图 6 为仿真过程中五个阶段中颗粒的混合状态,5 种颜色代表 5 种不同的颗粒。仿真过程中:0~1 s 圆筒混料机保持静止状态;1 s 时为颗粒混合过程中的初始状态;5~7 s 颗粒开始慢慢混合,7 s 时不同颗粒之间的接触逐渐充分,继续增加时间到第 9 s,颗粒之间的接触状态变化不大。因此,颗粒混合度随着时间的增长逐渐趋于稳定,仿真模拟第 7 s 时颗粒之间能够充分混合。

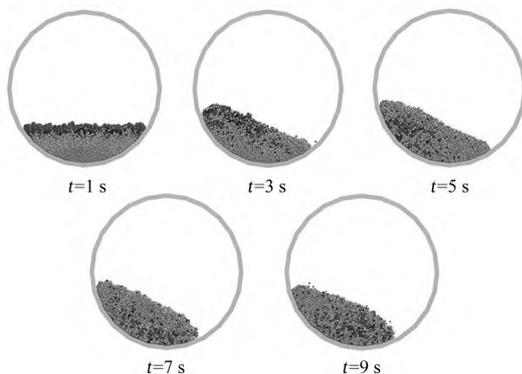


图 6 不同时间下颗粒的混合状态

Fig. 6 Mixing state of particles at different time

3 混料制粒试验结果分析

在前文利用 EDEM 软件对混合料制粒过程进行仿真模拟的基础上,本研究进一步开展了相应的试验工作。通过试验,一方面验证仿真所获得的填充率、转速和制粒时间对混合度影响规律的可靠性;另一方面也旨在通过实际制粒过程确定更优参数,为工艺优化提供试验依据。

3.1 试验方法

混料制粒试验所用的原料为 5 种铁矿粉,各自的平均粒径如表 1 所示。试验开始时按表 2 给定的比例称取相应质量的铁矿粉(5 种铁矿粉质量总计 30 kg)、焦粉以及熔剂;喷水消化后,通过人工将其混匀;混匀之后,将混匀料装入圆筒混料机进行强化制粒。试验过程中分别控制填充

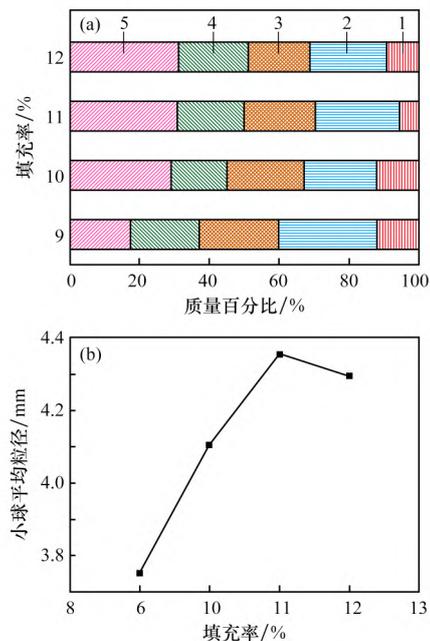
率、转速以及制粒时间,制粒完成后取样进行筛分,称取筛分之后不同粒度的重量。

3.2 不同参数对制粒效果的影响分析

在实际的混料试验中,各个参数的不同对混料效果具有一定的影响,比较关键的参数有填充率、转速、制粒时间等。基于上文在 EDEM 软件中不同参数对铁矿粉颗粒混合度的影响的仿真模拟结果,实际探究不同参数对造粒效果的影响。

3.2.1 填充率影响分析

参数条件设置:转速为 24 r/min,制粒时间为 5 min,当填充率分别为 9%、10%、11%、12% 时,颗粒性能效果如图 7 所示。依据实际填充的物料质量与设备容积之比得到物料填充率。



(a) 粒径分布; (b) 平均粒径

1—<1 mm; 2— [1, 3) mm; 3— [3, 5) mm;

4— [5, 6.3] mm; 5—>6.3 mm。

图 7 填充率对制粒小球粒径影响

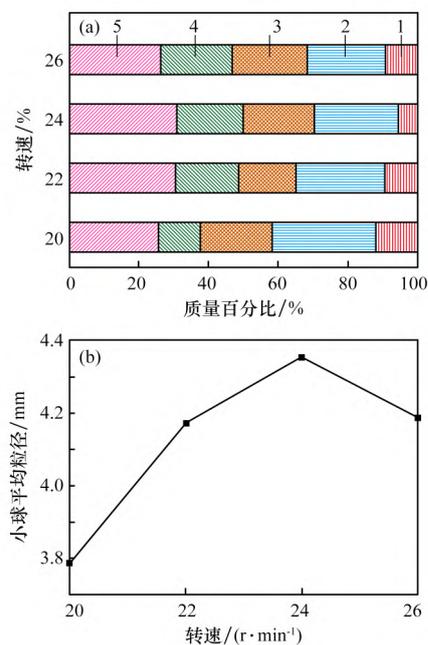
Fig. 7 Effect of filling rate on particle size of pellets

由图 7(a) 可知,3 mm 以上粒级的颗粒质量占比随着填充率的增加而增加,在填充率达到 11% 时达到最大随后开始下降。由图 7(b) 可知,增大填充率,当填充率处于 9%~11% 范围内时,制粒小球的平均粒径随着填充率的增加而增大。如果继续增大填充率的比例,制粒小球的平均粒径反而下降。由此可知,当填充率为 11% 时,混合料整体制粒性能最佳。与模拟结果不同,这可

能是由于填充时造成的,这个过程造成的误差范围为0.76%~3.08%^[17],本文结果在合理范围内。

3.2.2 转速影响分析

在填充率为11%、制粒时间为5 min的条件下,探究圆筒混料机转速对制粒效果的影响,结果如图8所示。



(a) 粒径分布; (b) 平均粒径

1— <1 mm; 2— [1, 3) mm; 3— [3, 5) mm;
4— [5, 6.3) mm; 5— >6.3 mm。

图8 转速对制粒小球粒径影响

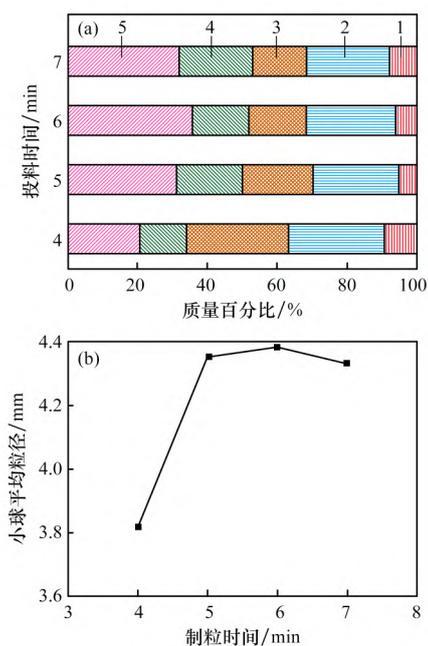
Fig. 8 Effect of rotational speed on particle size of pellets

由图8(a)中可知,随着转速的增加,制粒小球粒径3 mm以上的颗粒质量分数变化趋势为先升高而后降低。由图8(b)中可知,在转速由20 r/min增加到24 r/min的过程中,颗粒平均粒径逐渐变大,制粒效果明显。当转速继续增大到26 r/min时,颗粒粒径慢慢下降。在转速为24 r/min时,平均粒径最大,此时混合料制粒效果最明显。模拟转速为25 r/min时,与试验结果不同,这可能是由于试验设备和环境造成的,1 r/min的误差是可以接受的^[18]。

3.2.3 制粒时间影响分析

在填充率为11%、转速为24 r/min时,制粒时间对制粒效果的影响,结果如图9所示。

由图9(a)可知,3 mm粒径以上的颗粒占比随着制粒时间的增加先增加而后趋于稳定。由



(a) 粒径分布; (b) 平均粒径

1— <1 mm; 2— [1, 3) mm; 3— [3, 5) mm;
4— [5, 6.3) mm; 5— >6.3 mm。

图9 制粒时间对制粒小球粒径影响

Fig. 9 Effect of granulation time on particle size of pellets

图9(b)可知,制粒时间由4 min增加到5 min,制粒小球的平均粒径匀速扩大,继续增加制粒时间,颗粒粒径变化不大,因此当制粒时间为5 min时,制粒效果最优。通过延长物料在混合机内的加工时间,混合和制粒效果显著提高,但是如果错过了最适合的制粒时间,就会降低生产效率并且浪费资源。适当的制粒时间能够提高料层透气性,使得颗粒能够充分接触,在滚动过程中更容易形成小球。因此,在实际生产过程中,需要控制合理的混料时间,使颗粒之间混合效果更明显,生产效率更高。

4 结论

(1) EDEM离散元仿真分析表明:填充率的增加、转速的增大、混合度呈现先升高而后降低;随着制粒时间的增加,颗粒混合度先升高而后趋于稳定。当填充率在9%~12%的范围内,混合效果较好;当混料机转速处于5~25 r/min的范围内时,混料流动性好,混合度逐渐提高;试验前期,随着时间增加,颗粒充分接触,混合越来越均匀,

在第二阶段, 颗粒混合过程基本完成, 混合度无明显变化。

(2) 实际混料试验表明最佳混料参数: 填充率为 11%, 转速为 24 r/min, 制粒时间为 5 min。仿真分析和混料试验的参数误差在合理的范围内, 实际试验和模拟结果基本吻合。

参考文献:

- [1] 杨永斌, 唐培垚, 王林, 等. 预造球强化难制粒精矿烧结工艺 [J]. 烧结球团, 2024, 49 (3): 25 - 32.
YANG Yongbin, TANG Peiyao, WANG Lin, et al. Process of pre-pelletizing strengthened sintering of refractory concentrates [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49 (3): 25 - 32.
- [2] 史先菊, 李光强, 刘畅, 等. 烧结用铁矿粉制粒性能影响因素的试验研究 [J]. 烧结球团, 2023, 48 (4): 30 - 37.
SHI Xianju, LI Guangqiang, LIU Chang, et al. Experimental research on factors influencing granulation performance of iron ore powder for sintering [J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48 (4): 30 - 37.
- [3] 石玥, 潘建, 朱德庆, 等. 圆筒混合机制粒性能优化研究 [J]. 烧结球团, 2019, 44 (4): 1 - 6.
SHI Yue, PAN Jian, ZHU Deqing, et al. Research on improvement of granulating effect of drum mixer [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44 (4): 1 - 6.
- [4] 孙其诚, 王光谦, 杨宁. 水平圆筒型混合机中颗粒混合的离散模拟 [J]. 中国粉体技术, 2002 (1): 6 - 9.
SUN Qicheng, WANG Guangqian, YANG Ning. Simulation of flow and mixing of particles in a fast rotating cylinder [J]. China Powder Science and Technology, 2002 (1): 6 - 9.
- [5] 朱旺, 欧书海, 潘文, 等. 强化烧结混合制粒生产实践 [J]. 河北冶金, 2023 (4): 32 - 36.
ZHU Wang, OU Shuhai, PAN Wen, et al. Enhance sintering mixed granulation production production practices [J]. Hebei Metallurgy, 2023 (4): 32 - 36.
- [6] 赵士奇, 王春来, 欧书海, 等. 基于离散元的烧结圆筒混合机仿真模拟 [J]. 烧结球团, 2019, 44 (5): 18 - 22.
ZHAO Shiqi, WANG Chunlai, OU Shuhai, et al. Simulation of sintering drum mixer based on discrete element method [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44 (5): 18 - 22.
- [7] SODA R, SATO A, KANO J, et al. Analysis of granules behavior in continuous drum mixer by DEM [J]. ISIJ International, 2009, 49 (5): 645 - 649.
- [8] YOU Y, GUO J B, LÜ X W, et al. Numerical simulation of particle mixing behavior in high speed shear mixer and cylinder mixer [J]. ISIJ International, 2021, 61 (7): 2059 - 2065.
- [9] YARAGHI A, EBRAHIMI M, EIN-MOZAFFARI F, et al. Mixing assessment of non-cohesive particles in a paddle mixer through experiments and discrete element method (DEM) [J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29 (11): 2693 - 2706.
- [10] 唐凯. 高速搅拌过程中烧结原料颗粒混合和聚结行为数值模拟研究 [D]. 重庆大学, 2018.
TANG Kai. Simulation of particles mixing and coalescence behavior of sintering raw materials in high-speed granulator [D]. Chongqing University, 2018.
- [11] 胡励, 胡国明, 万卉, 等. 球磨机工作参数的离散元法分析与改进 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2010, 43 (6): 762 - 765.
HU Li, HU Guoming, WAN Hui, et al. Analysis and optimization of operating parameters of ball mills using discrete element method simulation [J]. Journal of Wuhan University (Engineering), 2010, 43 (6): 762 - 765.
- [12] 孔德华. 卧式强力混合机混匀过程及犁头磨损优化研究 [D]. 湖南大学, 2022.
KONG Dehua. Research on the mixing process of the horizontal intensive mixer and the optimization of the wear of the plowshare [D]. Hunan University, 2022.
- [13] 施进发, 高志龙, 杨杰, 等. 基于 EDEM 的双卧轴搅拌机混合度研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37 (Z1): 126 - 129.
SHI Jinfa, GAO Zhilong, YANG Jie, et al. Research on mixing degree of mixer with double horizontal shafts based on EDEM [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2020, 37 (Z1): 126 - 129.
- [14] 李少华, 朱明亮, 张立栋, 等. 回转装置内三组元颗粒径向混合评价方法分析 [J]. 化工进展, 2013, 32 (6): 1224 - 1229.

(下转第 76 页)

- on the simulated inter-particle percolation of pellets into coke during burden descent in the blast furnace, ISIJ International, 2012, 52: 788 - 796.
- [9] MIO H, KOMATSUKI S, AKASHI M, et al. Validation of particle size segregation of sintered ore during flowing through laboratory-scale chute by discrete element method [J]. ISIJ International, 2008, 48 (12) : 1696 - 1703.
- [10] KOU M Y, WU S L, ZHOU H, et al. Numerical investigation of coke collapse and size segregation in the bell-less top blast furnace [J]. ISIJ International, 2018, 58(11) : 2018 - 2024.
- [11] E Dianyu. Numerical investigation of mixed layer effect on permeability in a dynamic blast furnace [J]. Engineering Reports, 2020, 2(5) : e12166.
- [12] MIO H, KADOWAKI M, MATSUZAKI S, et al. Development of particle flow simulator in charging process of blast furnace by discrete element method [J]. Minerals Engineering, 2012, 33: 27 - 33.
- [13] 滕召杰, 程树森, 赵国磊. 高炉中心加焦对气流分布及煤气利用的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(12) : 9 - 14.
- TENG Zhaojie, CHENG Shusen, ZHAO Guolei. Influence of central coke charging on the gas distribution and utilization for a blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(12) : 9 - 14.
- [14] YU Y W, SAXÉN H. Particle flow and behavior at bell-less charging of the blast furnace [J]. Steel Research International, 2013, 84(10) : 1018 - 1033.
- [15] XU B H, YU A B. Numerical simulation of the gas-solid flow in a fluidized bed by combining discrete particle method with computational fluid dynamics [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(16) : 2785 - 2809.
- [16] WU Shengli, XU Haifa, WANG Guojun, et al. Basic study of modern blast furnace using natural lump ores rationally [J]. Chinese Journal of Engineering, 2007, 29(3) : 320 - 324.
- [17] 宁泽尧, 张晓辉, 王楠. 提高球团矿配比对高炉布料的影响及其优化研究 [J]. 烧结球团, 2025, 50(1) : 95 - 102.
- NING Zeyao, ZHANG Xiaohui, WANG Nan. Effect of increasing pellet ratio on blast furnace burden distribution and its optimization research [J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(1) : 95 - 102.
-
- (上接第 26 页)
- LI Shaohua, ZHU Mingliang, ZHANG Lidong, et al. Analysis of three-component radial mixing evaluation methods in rotary retorting [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32 (6) : 1224 - 1229.
- [15] VAN PUYVELDE D R, YOUNG B R, WILSON M A, et al. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis [J]. Powder Technology, 1999, 106(3) : 183 - 191.
- [16] GUPTA A, KATTERFELD A, SOETEMAN B, et al. Discrete element study mixing in an industrial sized mixer [C] // 6th World Congress on Particle Technology, WCPT 2010. Nürnberg Messe GmbH, 2010: 1 - 4.
- [17] 王超, 曹泽琦, 李文, 等. 基于离散元的氧化铝造粒粉堆积仿真研究 [J]. 中国陶瓷工业, 2021, 28(6) : 1 - 6.
- WANG Chao, CAO Zewen, LI Wen, et al. Simulation study on accumulation of alumina granulation powders based on discrete element method [J]. China Ceramic Industry, 2021, 28(6) : 1 - 6.
- [18] 戚江涛, 邓越云, 张纪元, 等. 基于 EDEM 的厩肥与颗粒肥混合排肥装置设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4) : 1 - 9.
- QI Jiangtao, DENG Yueyun, ZHANG Jiyuan, et al. Design and experiment of mixed fertilizer discharging device for manure and granular fertilizer based on EDEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4) : 1 - 9.