

基于 EDEM 的烧结矿卸料螺旋溜槽参数优化研究

李相臣¹, 王利刚², 余雪峰¹, 马建军², 郭玉静², 李海鹏²

(1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100000;

2. 天津天铁冶金集团有限公司, 天津 300000)

摘要: 烧结矿的转运方式直接影响其返矿率, 成为限制烧结矿产量提升的重要因素。针对采用传统斜溜槽进行烧结矿转运导致烧结矿返矿率偏高的问题, 本文将传统斜溜槽改为螺旋溜槽, 并在螺旋溜槽中增设挡板以降低烧结矿与溜槽底板的磨损, 采用 EDEM 模拟软件模拟不同螺旋溜槽角度、不同挡板高度及不同挡板数量条件下烧结矿下滑速度与分布状态。通过研究获得较优螺旋溜槽工艺参数: 螺旋角度为 45°, 螺距为 14 m, 挡板数量为 50 个, 挡板间距为 0.4 m, 挡板高度为 150 mm。优化后的螺旋溜槽挡板间可储存一定量烧结矿, 增加烧结矿下滑摩擦力, 烧结矿下滑速度由 7.11 m/s 降低到 3.63 m/s, 降低了烧结矿下滑冲击力, 从而使烧结矿返矿率降低, 螺旋溜槽寿命延长。

关键词: EDEM 模拟; 烧结矿; 返矿率; 螺旋溜槽

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0021-09

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.021

Research on optimization of sinter discharge spiral chute parameters based on EDEM

LI Xiangchen¹, WANG Ligang², SHE Xuefeng¹, MA Jianjun², GUO Yujing², LI Haipeng²

(1. National Key Laboratory of Green and Low-Carbon Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100000, China; 2. Tianjin Tiantie Metallurgical Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: The transfer mode of sinter directly affects its ore return rate, which has become an important factor limiting the increase of sinter production. To address the elevated return fines rate caused by conventional inclined chutes in sinter ore transportation, the traditional inclined chute was replaced with a spiral chute, and baffles were installed to reduce wear between the sinter ore and the chute baseplate. The EDEM simulation software is used to simulate the sinter sliding speed and distribution state under different spiral chute angles, different baffle heights and different baffle numbers. Through the research, the optimal spiral chute process parameters are obtained: the spiral chute spiral angle is 45°, the pitch is 14 m, the number of baffles is 50, the spacing of baffles is 0.4 m, and the height of the baffle is 150 mm. After optimization, a certain amount of sinter can be stored between the baffles of the spiral chute, which increases the sinter sliding friction, and the sinter sliding speed is reduced from 7.11 m/s to 3.63 m/s, which reduces the sinter sliding impact force, thereby reducing the sinter return rate and prolonging the life of the spiral chute.

Key words: EDEM simulation; sinter; ore return rate; spiral chute

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1960205)

作者简介: 李相臣(2001年—), 男, 硕士研究生, 从事烧结节能降耗相关研究。

通信作者: 余雪峰(1978年—), 男, 博士, 教授, 从事高炉低碳炼铁和冶金固废综合利用相关工艺技术研究。

随着全国钢铁行业产能趋于饱和,市场竞争加剧,降本增效、节能降耗已成为当前钢铁企业可持续发展的必然选择。钢铁工业是国民经济的重要基础产业,也是推动全国绿色低碳发展的关键领域之一,其碳排放占全国碳排放总量的15%~17%^[1]。在钢铁生产过程中,烧结工序能耗占吨钢综合能耗约8%~10%,仅次于高炉炼铁,是钢铁生产的第二耗能大户^[2-3]。因此,降低烧结工序中的固体燃料消耗对于钢铁企业的节能降耗具有重要意义。返矿率是表征烧结矿质量优劣的重要指标,降低返矿率的关键因素涉及烧结矿原料、烧结料层厚度、烧结点温度、烧结配矿结构和燃料品种及粒度等。闫军^[4]提出烧结矿混匀料的成分稳定性对烧结矿质量和返矿率有重要影响。于原浩等^[5]通过对烧结机尾台车不同部位进行取样并进行化学成分和微观结构对比,证明了烧结料层厚度和烧结原料对烧结返矿率具有重要影响。王静波等^[6]提出通过控制烧结配矿结构,并加强对熔剂的破碎,增强混合料制粒来降低烧结返矿率。王强等^[7]提出使用优质熔剂,增强混合料制粒,提高烧结透气性,从而降低烧结矿返矿率。刘其敏等^[8]提出改变混合加水方式和改变布料设施等措施降低烧结矿返矿率。相比之下,关于烧结转运设备参数研究较为有限,其中成品烧结矿在转运过程的碰撞强度受转运溜槽形式及参数的影响显著,因此,设计新型转运溜槽并优化其参数成为降低烧结矿返矿率的一个重要途径。

目前,大多数钢铁企业采用斜溜槽连接烧结工序和高炉工序,当斜溜槽落差较大时,烧结矿到达斜溜槽底端速度较大,对斜溜槽底端挡板产生较大冲击力,剧烈碰撞使成品烧结矿粒度减小,从而增加了烧结返矿率^[9-10],且在烧结矿运输过程中皮带之间转运时落料角度接近90°,使成品矿基本垂直砸向皮带,进一步增加了成品烧结矿的破碎率。

为减少这种不利影响,本文提出采用螺旋溜槽转运烧结矿的改进方案。将传统斜溜槽改进为螺旋溜槽后,由于增加了烧结矿下滑路程和下行过程的摩擦力,降低了烧结矿到达溜槽底端速度,减少了烧结矿的碰撞强度,从而降低了烧结矿返

矿率。同时烧结矿与螺旋溜槽底板摩擦增大会降低螺旋溜槽使用寿命,因此需在螺旋溜槽中增设挡板以存储一部分烧结矿,减少其对溜槽底板的直接磨损。因此,本文设计了不同螺旋溜槽半径、螺旋角度、挡板高度和挡板个数等参数,采用SolidWorks软件建模,并通过EDEM离散元仿真对颗粒流在螺旋溜槽的运动状态进行了模拟,获得了不同参数条件下烧结矿在螺旋溜槽内以及底端的运动速度和烧结矿的分布情况,为设计制造高寿命低返矿率螺旋溜槽提供了参数依据。

1 EDEM 模型建立与参数设置

1.1 模型建立

天铁360 m²烧结机成品矿供到高炉,途径6个转运站,成品矿最高落差14 m,采用原始斜溜槽,斜溜槽设备参数如表1所示,进料口800 mm×800 mm,溜槽横截面尺寸800 mm×800 mm,斜溜槽总长度为7 600 mm,斜溜槽与水平方向夹角接近30°,模型如图1(a)所示。

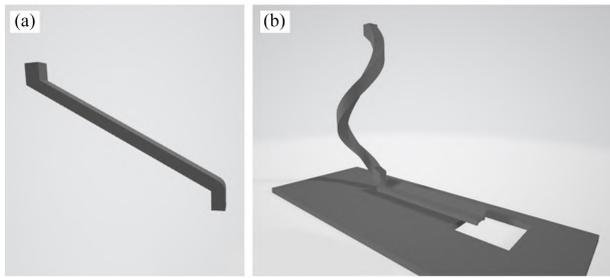
表 1 斜溜槽设备参数

Table 1 Equipment parameters of inclined ore tank

高度 落差/m	进料口 尺寸/mm	溜槽横截面 尺寸/mm	总长度/ mm	与水平方向 夹角/(°)
14	800×800	800×800	7 600	30

采用表1中斜溜槽设备高度落差、进料口尺寸和溜槽截面尺寸参数,使用SolidWorks建立螺旋溜槽如图1(b)所示,并通过设定不同的螺旋角度、溜槽内挡板数量和尺寸(图2),建立多个螺旋溜槽模型进行EDEM模拟。

烧结厂每小时进入螺旋溜槽的烧结矿为720 t,平均粒度为23 mm,进入溜槽入口速度为2 m/s。考虑符合现场出料口形状,方便加工,并使烧结矿下料顺畅,溜槽设计为正方形断面。烧结矿转运落差高度大,烧结矿返矿率偏高,因此降低烧结矿下滑速度和提高螺旋溜槽寿命是溜槽设计考虑的主要因素。优化螺旋溜槽首先在螺旋段溜槽内合理设置一定数量的挡板,挡板起到对烧结矿缓冲的作用,并在两个挡板之间存料,使挡板间存储的烧结矿基本铺满溜槽表面,减小下滑的烧结矿对螺旋溜槽表面的磨损,延长螺旋溜槽的寿



(a) 原始斜溜槽; (b) 改进的螺旋溜槽

图1 原始斜溜槽和改进后的螺旋溜槽模型

Fig. 1 Model of original inclined ore chute and improved spiral chute

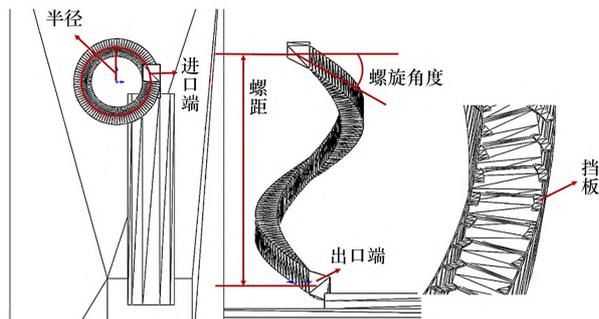


图2 螺旋溜槽参数

Fig. 2 Parameters of spiral chute

命;其次采用“S”形布置,螺旋式下降增加了烧结矿下滑路程,并通过挡板间存储的烧结矿增加了下滑烧结矿的摩擦力,从而减小烧结矿的下落速度,降低了烧结矿下滑冲击力。

1.2 参数设置

在 EDEM 软件中完成模型参数的设置,具体如下。

(1) 材料设置。根据实际材料特性,设置烧结矿物理属性:烧结矿密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3,剪切模量为 $2.2 \times 10^6\text{ Pa}$;并设置螺旋溜槽材料物理属性:密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3,剪切模量为 $7 \times 10^{10}\text{ Pa}$,材料的物理属性参数如表 2 所示^[11-12]。

表2 物理的物理属性

Table 2 Physical properties of materials

物料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/Pa
烧结矿	2 500	0.3	2.2×10^6
螺旋溜槽内物料	7 800	0.3	7×10^{10}

(2) 接触参数设置。颗粒间的接触参数包括碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数。设

置烧结矿与烧结矿的接触参数:碰撞恢复系数为 0.65,静摩擦因数为 0.45,滚动摩擦因数为 0.05;设置烧结矿与溜槽的接触参数:碰撞恢复系数为 0.20,静摩擦因数为 0.50,滚动摩擦因数为 0.01,如表 3 介质接触参数所示^[11]。

表3 介质接触参数

Table 3 Parameters of Media contact

介质	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
烧结矿与烧结矿	0.65	0.65	0.05
烧结矿与溜槽	0.20	0.50	0.01

(3) 颗粒设置。根据烧结厂实际烧结矿平均粒径为 23 mm,创建颗粒半径为 11.5 mm,由于实际烧结矿数量多,尺寸不唯一,如果按照烧结矿的真实尺寸比例建立颗粒模型,则需要计算的颗粒数量十分庞大,仿真耗时太长,因此,本研究将颗粒分为大中小 3 种,设置颗粒粒径分别为 22、23、24 mm,分别占总烧结矿的 25%、50%、25%。EDEM 中烧结矿颗粒分布如表 4 所示。

表4 烧结矿颗粒分布

Table 4 Distribution of sintered ore particles

创建颗粒半径/mm	实际颗粒与创建颗粒半径之比	实际颗粒在总颗粒中的占比(质量分数)/%	实际尺寸/mm	平均粒径/mm
11.5	0.96	25	22	
	1.00	50	23	23
	1.04	25	24	

采用离散元分析计算时,接触模型的选择对计算精度起着至关重要的作用。因此,在所建立的模型中,颗粒与颗粒、几何体之间的接触模型均选择 Hertz-Mindlin 模型,并对模拟结果进行统计,为模型增加 Grid Bin Group 网格分组,在 X、Y、Z 各个方向上设置网格数量,调整网格尺寸和位置,对螺旋溜槽挡板间烧结矿、螺旋溜槽出口烧结矿速度等区域进行具体分析。在 EDEM 软件中完成模型参数的设置^[13-14],具体如表 2、3、4 所示。

螺旋溜槽高度、螺旋溜槽进口尺寸如表 1 所示。为了使螺旋溜槽模型转运烧结矿模拟达到稳定状态,模拟时长设置为 30 s ^[15-16],烧结矿转运量为 6 000 kg,流量为 200 kg/s,烧结矿进入螺旋

溜槽速度为 2 m/s。表 5 为螺旋溜槽单因素模拟实验参数设置, 设置螺旋溜槽的螺旋角度分别为 40°、45°、50°, 螺旋溜槽内挡板个数分别为 30、40、50 个, 挡板高度分别为 100、150、200 mm, 共有 8 组单因素模拟实验, 每次只改变需要确定的因素, 对比改变此因素前后对烧结矿下滑速度、挡板间烧结矿填充率以及溜槽表面烧结矿覆盖率的影响, 从而确定螺旋溜槽最佳设计参数。由表 5 可知, 通过模拟 1、模拟 2 和模拟 3 确定螺旋溜槽最佳螺旋角度, 由模拟 2、模拟 4 和模拟 5 确定螺旋溜槽最佳挡板高度, 由模拟 6、模拟 7 和模拟 8 确定螺旋溜槽最佳挡板个数。

表 5 螺旋溜槽单因素模拟实验参数设置

Table 5 Parameter settings for single factor simulation experiment of spiral chute

模拟编号	螺旋角度/(°)	挡板个数/个	挡板高度/mm
1	50	50	100
2	45	50	100
3	40	50	100
4	45	50	150
5	45	50	200
6	45	30	150
7	45	40	150
8	45	50	150

2 EDEM 模拟结果分析

2.1 原始溜槽

烧结厂原始斜溜槽转运烧结矿模拟速度云图及烧结矿动能曲线图分别如图 3、4 所示。由图 3 可知, 烧结矿由斜溜槽进料口进入, 首先在溜槽进料口与溜槽斜面交接处发生碰撞, 之后在斜溜槽表面开始加速下滑, 速度逐渐提高, 到达斜溜槽的末端烧结矿的速度达到 5.70 ~ 7.11 m/s, 在斜溜槽末端烧结矿与出口挡板碰撞后改变方向, 脱离斜溜槽, 直接垂直落在烧结矿传送皮带上。结合图 4 可知, 烧结矿下滑过程明显有两处碰撞点, 分别为溜槽进料口与溜槽斜面交接处和溜槽末端, 第一个碰撞点高度为 13.3 m, 烧结矿改变自身运动方向沿溜槽斜面运输, 烧结矿动能由 204.537 J 减小到 190.559 J; 第二个碰撞点高度为 2.1 m, 此处烧结矿与斜溜槽挡板发生碰撞烧结矿

减速并改变运动方向, 烧结矿第二次碰撞前后速度由 7.11 m/s 降低到 3.42 m/s, 动能由 556.056 J 急剧减小为 215.195 J, 烧结矿承受巨大冲击力, 导致大量烧结矿粉碎, 使得返矿率较高。

对模拟结果进行分析, 分别统计第一次碰撞点和第二次碰撞点的烧结矿速度变化, 由于斜溜槽斜面对烧结矿产生加速作用, 到达第二碰撞点的最大速度为 7.11 m/s, 烧结矿与挡板碰撞使速度瞬间降低为 3.42 m/s, 最终烧结矿稳定输出速度为 4.22 m/s, 所以烧结矿在第二次碰撞点的冲击力巨大, 使烧结矿的粒径减小, 在此处会产生大量的不合格烧结矿, 提高了烧结矿返矿率^[17-18]。

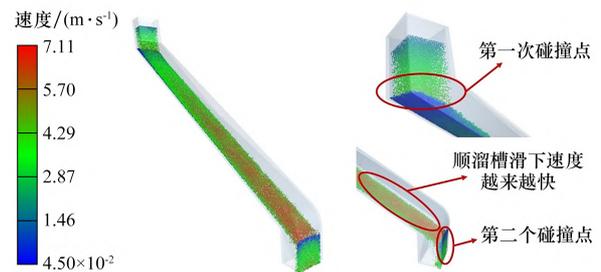


图 3 原始溜槽模拟结果

Fig. 3 Simulation results of the original chute

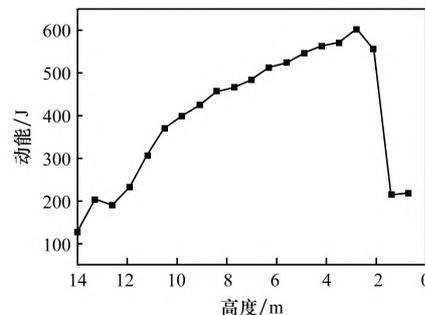


图 4 原始斜溜槽烧结矿动能

Fig. 4 Original inclined chute sintered ore kinetic energy

2.2 不同螺旋角度

根据现场烧结矿转运实际情况, 设定螺旋溜槽螺旋角度分别为 50°、45°、40°。由表 5 可知, 模拟 1 设定螺旋溜槽螺旋角度为 50°, 模拟 2 设定螺旋溜槽螺旋角度为 45°, 模拟 3 设定螺旋溜槽螺旋角度为 40°, 并保持其余因素不变。为了保持烧结矿的运输量和运输速度, 设置螺旋溜槽均为单螺旋, 即螺旋溜槽螺距均为 14 m。

螺旋溜槽改变螺旋角度模拟结果分别如图 5 所示。由图 5 可知, 随着螺旋溜槽螺旋角度的变

小,烧结矿最大下滑速度随之减小,烧结矿最小下滑速度先增加后减小。在螺旋溜槽的螺旋角度为 45° 时,烧结矿最小下滑速度为 2.17×10^{-5} m/s,说明当螺旋溜槽的螺旋角度为 45° 时,既可以保证烧结矿的供料能力,也可以确保烧结矿在螺旋溜槽内不发生堵塞,保证烧结矿的转运速度^[19-20]。

对模拟结果进行分析,统计螺旋溜槽从进料口到出料口的烧结矿总动能变化,统计结果如图6所示。由图6可知,不同螺旋角度的螺旋溜槽烧结矿下滑的总动能变化趋势不同,烧结矿到达出料口的总动能大小不同,则到达出料口速度不同,模拟1烧结矿平均出口速度为3.63 m/s,模拟2烧结矿平均出口速度为3.2 m/s,模拟3烧结矿平均出口速度为3.06 m/s,并可得螺旋溜槽螺旋角度为 40° 和螺旋角度为 45° 时的动能变化相似,而螺旋溜槽螺旋角度为 50° 时,烧结矿转运过程中总动能较大,总动能变化曲线较曲折,烧结矿初始运动处于不稳定状态,且中期烧结矿总体动能较大,到达出料口段动能又与螺旋角度为 40° 和 45° 的烧结矿动能相同,可得期间由于摩擦消耗的能量较大,降低了烧结矿的强度,并减小了烧结矿粒径,由上述分析可得螺旋溜槽螺旋角度最佳条件为 45° 。

2.3 不同挡板高度

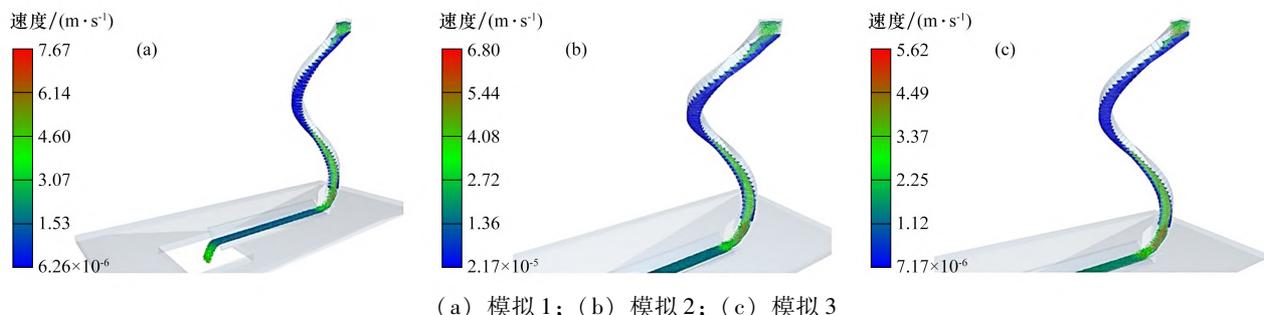
确定了螺旋溜槽的最佳螺旋角度为 45° ,设定挡板数量为50个,进行确定最佳挡板高度的单因素模拟实验。由表5可知,模拟2设定螺旋溜槽挡板高度为100 mm,模拟4设定螺旋溜槽挡板高度为150 mm,模拟5设定螺旋溜槽挡板高度为200 mm,并保持其余因素不变,螺旋溜槽改变挡板高度的模拟结果及螺旋溜槽改变挡板高度进料

口情况分别如图7、8所示。

模拟2、模拟4和模拟5为只改变挡板高度的单因素模拟实验,由图7可得溜槽表面铺料情况:模拟4与模拟5溜槽表面铺料情况较为理想,基本已铺满,而模拟2存在部分未铺满区域。当螺旋溜槽挡板高度为100 mm时,挡板间螺旋溜槽内侧表面存在较大空区,烧结矿并未铺满溜槽表面,溜槽表面被覆盖面积占总溜槽表面面积的85%;当螺旋溜槽挡板高度为150 mm时,挡板间螺旋溜槽内侧表面空区消失,烧结矿已基本铺满整个溜槽表面;当螺旋溜槽挡板高度为200 mm时,挡板间螺旋溜槽内侧表面空区也已经消失,与螺旋溜槽挡板高度为150 mm情况相同,溜槽表面被覆盖面积占总溜槽表面面积的98%。

根据图8模拟测量可知挡板间存料能力:模拟2最小,挡板间烧结矿填充约为80%;其次为模拟4,挡板间烧结矿填充约为94%;挡板间存料能力最强的是模拟5,挡板间烧结矿填充约为96%。可见,挡板高度决定挡板之间的存料能力,挡板高度越大,挡板间存料能力越强,在挡板高度由100 mm变为200 mm的过程中,螺旋溜槽进口处堆积的烧结矿越来越多。虽然模拟5存料能力最强,但由图8可知烧结矿堆积表面整体呈弧形,当挡板高度为200 mm时,烧结矿堆积最高点逐渐到达螺旋溜槽顶部,随着时间的积累,挡板高度为200 mm的螺旋溜槽进料口处很容易产生堵塞,在溜槽内存储的烧结矿超过整个溜槽容积约50%,造成溜槽转运烧结矿能力弱,导致烧结矿供应不足。

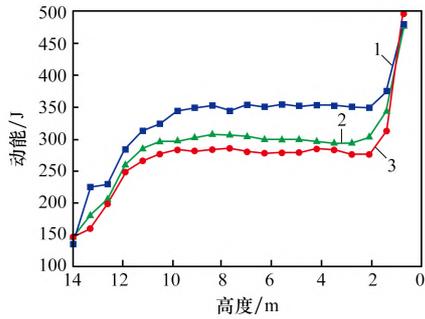
统计分析螺旋溜槽第一个弧形处烧结矿速度变化,可得烧结矿颗粒速度模拟2在螺旋溜槽第



(a) 模拟1; (b) 模拟2; (c) 模拟3

图5 螺旋溜槽改变螺旋角度模拟结果

Fig. 5 Simulation results of changing the spiral angle of the spiral chute



1—模拟 1；2—模拟 2；3—模拟 3。

图 6 螺旋溜槽不同螺旋角度动能比较

Fig. 6 Comparison of kinetic energy of spiral chutes with different spiral angles

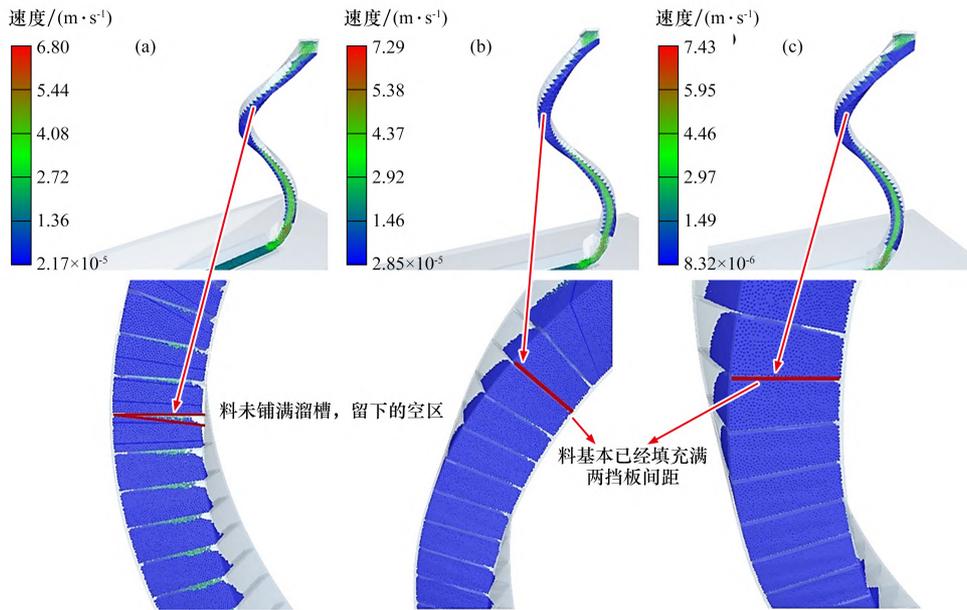
一个弧形处速度为 1.52 m/s，模拟 4 在螺旋溜槽第一个弧形处速度为 1.76 m/s，模拟 5 在螺旋溜槽第一个弧形处速度为 1.48 m/s。由此可得，螺

旋溜槽第一个弧形处的速度排序，模拟 2 < 模拟 4 < 模拟 5。因此，螺旋溜槽挡板高度最佳条件为 150 mm，此高度既保证了烧结矿运输顺畅和烧结矿的供应量，又可以铺满整个溜槽表面，延长溜槽使用寿命。

2.4 不同挡板间距

在确定螺旋溜槽最佳螺旋角度为 45°和最佳挡板高度为 150 mm 后，进行确定最佳挡板个数的单因素模拟实验，并通过计算得出对应的挡板间距。由表 5 可知，模拟 6 设定螺旋溜槽挡板个数为 30 个，模拟 7 设定螺旋溜槽挡板个数为 40 个，模拟 8 设定螺旋溜槽挡板个数为 50 个，并保持其余因素不变，模拟结果如图 9 所示。

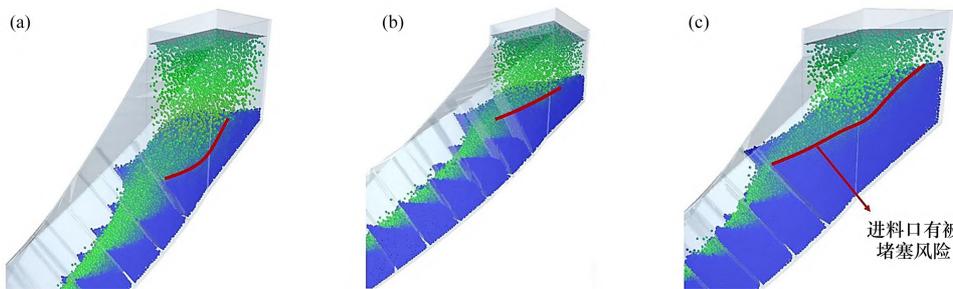
烧结矿由螺旋溜槽进口端进入，由于重力开



(a) 模拟 2；(b) 模拟 4；(c) 模拟 5

图 7 螺旋溜槽改变挡板高度模拟结果

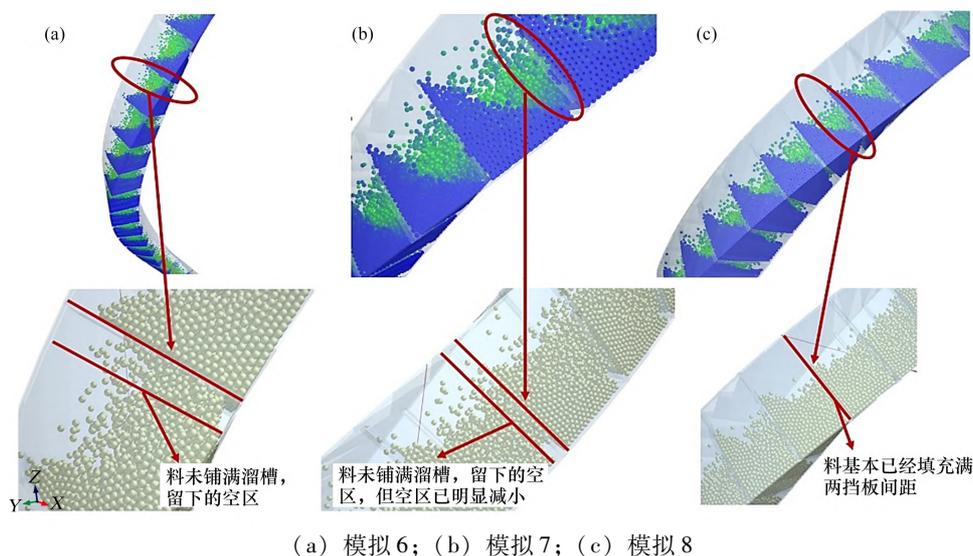
Fig. 7 Simulation results of changing the height of the baffle with a spiral chute



(a) 模拟 2；(b) 模拟 4；(c) 模拟 5

图 8 螺旋溜槽改变挡板高度进料口情况

Fig. 8 Spiral chute changes the height of the baffle and the feeding port situation



(a) 模拟6; (b) 模拟7; (c) 模拟8

图9 螺旋溜槽改变挡板个数模拟结果

Fig. 9 Simulation results of changing the number of baffles in a spiral chute

始下滑加速,遇到第一个挡板时,开始堆积,当堆积的烧结矿料层与挡板同高时,大部分烧结矿开始继续向下滑动,在每两个挡板之间进行堆积,逐渐填充挡板之间的空隙,并基本均匀的铺满挡板之间螺旋溜槽表面,螺旋溜槽的左右侧板起到烧结矿运输导向作用,左右侧板的挡板在烧结矿下滑时,也可存储一定量的烧结矿,不同挡板个数的螺旋溜槽挡板之间的距离不同,所以存储烧结矿能力不同,挡板之间的烧结矿起到了为烧结矿转运提供滚动摩擦通道,并保护螺旋溜槽的作用。由图9可知,底部挡板存料程度:模拟6 < 模拟7 < 模拟8;螺旋溜槽左右侧板的挡板存料程度:模拟6 < 模拟7 < 模拟8。当螺旋溜槽挡板个数为30个时,挡板间存在较大空区,烧结矿未铺满溜槽底部,挡板间烧结矿覆盖面积约占挡板间溜槽表面积的85%;当螺旋溜槽挡板个数为40个时,挡板间空区减少,挡板间烧结矿覆盖面积约占挡板间溜槽表面积的95%;当螺旋溜槽挡板个数为50个时,挡板间存料已经基本覆盖了溜槽底部和部分侧壁表面,挡板间烧结矿覆盖面积约占挡板间溜槽表面积的98%,可以有效的减少烧结矿对溜槽的磨损,同时减小了烧结矿与螺旋溜槽表面的接触面积,可延长螺旋溜槽的寿命。

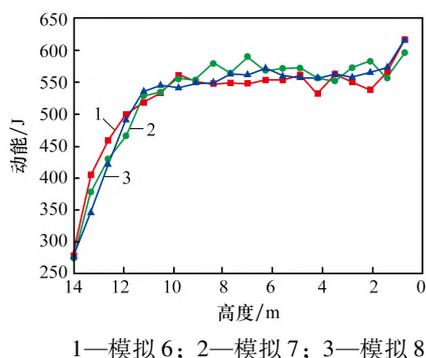
统计分析螺旋溜槽第一个弧形处烧结矿速度变化,可得模拟6在螺旋溜槽第一个弧形处速度为2.5 m/s,模拟7在螺旋溜槽第一个弧形处速度

为2.42 m/s,模拟8在螺旋溜槽第一个弧形处速度为2.41 m/s。由此可得,螺旋溜槽内挡板个数为30个时,烧结矿下滑速度较大,螺旋溜槽挡板个数增加到40个,烧结矿下滑速度减小,之后再增加挡板个数烧结矿下滑速度基本不变。

随着挡板数量的增多,由于溜槽表面存满了烧结矿,烧结矿下滑由原烧结矿与溜槽的磨损变为烧结矿与烧结矿的磨损,随着时间的增加,在螺旋溜槽内部逐渐形成一个烧结矿通道,增加了对溜槽的保护,但会使烧结矿的最大下滑速度提高,模拟6中烧结矿最大下滑速度为2.9 m/s,模拟7中烧结矿最大下滑速度为4.7 m/s,模拟8中烧结矿最大下滑速度为6.8 m/s,相对的提高了烧结矿转运速度,可以为提高铁产量提供有利条件。

统计从螺旋溜槽进料口到出料口烧结矿总动能变化曲线,结果如图10所示。当螺旋溜槽挡板个数为50时,其烧结矿总动能变化曲线较为平滑,超过螺旋溜槽高度为12 m时,其总动能基本区域稳定,而挡板个数为30个和40个时,烧结矿总动能曲线仍然在大幅度的震荡,不利于烧结矿的稳定运输和降低烧结矿返矿率。

综上所述,螺旋溜槽最佳挡板个数为50个。通过螺旋溜槽半径计算螺旋溜槽总里程,再根据挡板个数进行平均,可得模拟6的挡板间距为0.68 m,模拟7的挡板间距为0.5 m,模拟8的挡板间距为0.4 m,所以螺旋溜槽最佳挡板间距为0.4 m。



1—模拟 6；2—模拟 7；3—模拟 8

图 10 螺旋溜槽不同挡板个数总动能对比

Fig. 10 Comparison of total kinetic energy of spiral chutes with different numbers of baffles

3 结论

原始斜溜槽在转运烧结矿时，由于烧结矿与溜槽终点挡板发生频繁且强烈的碰撞，导致烧结矿返矿率升高，同时显著缩短了斜溜槽寿命。本文通过 EDEM 软件模拟分析，确定了螺旋溜槽的最佳工艺参数：螺旋溜槽螺旋角度为 45° 、螺距为 14 m、溜槽内挡板数量为 50 个、挡板间距为 0.4 m、挡板高度为 150 mm。生产采用改进后的螺旋溜槽，通过螺旋溜槽内设置的挡板存储烧结矿，使烧结矿基本铺满溜槽表面，减少了烧结矿对溜槽的磨损，增加了溜槽寿命，同时也增加了烧结矿下滑时受到的摩擦力，降低了烧结矿下降速度，减小了烧结矿与溜槽的碰撞冲击力，降低了烧结矿的返矿率。

参考文献：

- [1] 王艺帆,张淑会,么洪勇,等.降低烧结返矿率的技术现状及展望[J].烧结球团,2023,48(5):16-23.
WANG Yifan, ZHANG Shuhui, YAO Hongyong, et al. Current status and prospect of technology to reduce return fines ratio[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(5): 16-23.
- [2] 贾占民,贺宝军.烧结降低返矿率的技术措施[J].冶金与材料,2019,11(5):108-109.
JIA Zhanmin, HE Baojun. Technical measures to reduce ore return rate by sintering[J]. Metallurgy and Materials, 2019, 11(5): 108-109.
- [3] 杨小建,孙志成,王东.青钢降低高炉槽下烧结返矿率生产实践[J].山东冶金,2014,36(3):48-50.
YANG Xiaojian, SUN Zhicheng, WANG Dong. Production

practice of reducing the return fine ratio of sintered ore under trough of BF in Qingdao steel[J]. Shandong Metallurgy, 2014, 36(3): 48-50.

- [4] 闫军.直供料模式下烧结矿质量变化对高炉的影响[J].江西冶金,2019,39(4):27-30.
YAN Jun. A study on the influence of blast furnace under changing quality of sinter in direct feeding mode[J]. Jiangxi Metallurgy, 2019, 39(4): 27-30.
- [5] 于原浩,陈衍彪,刘燊辉,等.烧结返矿分布及形成机理研究[J].江西冶金,2021,41(5):1-7.
YU Yuanhao, CHEN Yanbiao, LIU Shenhui, et al. Study on distribution and formation mechanism of sintering return mines[J]. Jiangxi Metallurgy, 2021, 41(5): 1-7.
- [6] 王静波,吴凤霞,李发展.降低烧结返矿率的途径与实践[J].烧结球团,2003,28(4):53-55.
WANG Jingbo, WU Fengxia, LI Fazhan. Some measures for reducing sinter returns[J]. Sintering and Pelletizing, 2003, 28(4): 53-55.
- [7] 王强,刘培栋.提高球团矿产量的生产实践[J].烧结球团,2001,26(3):50-52.
WANG Qiang, LIU Peidong. Practice of increasing shaft furnace pellet output[J]. Sintering and Pelletizing, 2001, 26(3): 50-52.
- [8] 刘其敏,崔彦立.降低 400 m^2 烧结机返矿率的实践[J].烧结球团,2006,31(1):55-58.
LIU Qimin, CUI Yanli. Operating practice to decrease the sinter returns[J]. Sintering and Pelletizing, 2006, 31(1): 55-58.
- [9] 霍志飞,陈世君,李自雄,等.大直径煤仓螺旋溜槽参数的优化及应用[J].煤炭加工与综合利用,2023(7):18-21.
HUO Zhifei, CHEN Shijun, LI Zixiong, et al. Parameter optimization and application of spiral chute of large diameter coal bunker[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2023(7): 18-21.
- [10] 李敏.高炉烧结矿料流建模和配比优化[D].杭州:浙江大学,2011.
LI Min. Modeling and optimization of ratio of the stiner flow in blast furnace raw material charging system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [11] 赵士奇,裴元东,范正赞,等.基于离散元的烧结九辊布料过程仿真[J].钢铁,2019,54(1):14-18.
ZHAO Shiqi, PEI Yuandong, FAN Zhengyun, et al. Simulation of sintering nine-roller charging based on

- discrete element method[J]. *Iron & Steel*,2019,54(1):14-18.
- [12] 申雷丹,王国文. 块煤防破碎螺旋溜槽技术在新田煤矿的应用[J]. *煤炭加工与综合利用*,2024(4):49-50.
- SHEN Leidan, WANG Guowen. Application of block coal anti-breaking spiral conveyor technology in Xintian Coal Mine[J]. *Coal Processing and Comprehensive Utilization*, 2024(4):49-50.
- [13] 韩梅. 模拟算法在高炉布料溜槽旋转角度推算中的应用[J]. *山东冶金*,2016,38(3):59-60.
- HAN Mei. Application of simulation algorithm in the rotation angle calculation of BF distributing chute[J]. *Shandong Metallurgy*,2016,38(3):59-60.
- [14] 曹孟兵,曾剑武,吁伟俊,等. 螺旋溜槽分选技术发展现状和展望[J]. *矿产保护与利用*,2024,44(3):127-134.
- CAO Mengbing, ZENG Jianwu, YU Weijun, et al. Development status and prospect of spiral concentrator separation technology[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*,2024,44(3):127-134.
- [15] 周学军,门洪滔,王振,等. 储煤筒仓内钢制螺旋溜槽脱落事故分析[J]. *山东建筑大学学报*,2024,39(2):115-121.
- ZHOU Xuejun, MEN Hongtao, WANG Zhen, et al. Analysis of steel spiral chute detachment accidents in coal storage silos[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*,2024,39(2):115-121.
- [16] 孟令国,高淑玲,周孝洪,等. 入口流量对螺旋溜槽首圈流场演变及矿物颗粒分布的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2023,44(6):856-862.
- MENG Lingguo, GAO Shuling, ZHOU Xiaohong, et al. Influence of the inlet flow rate on flow field evolution and mineral particle distribution in the first turn of spiral separators[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2023,44(6):856-862.
- [17] 王绍岩. 螺旋溜槽的设计计算与应用[J]. *机械管理开发*,2021,36(8):8-9.
- WANG Shaoyan. Design calculation and application of a spiral chute[J]. *Mechanical Management and Development*, 2021,36(8):8-9.
- [18] 李鹏波,赵维英,马闫涛,等. 螺旋溜槽在王坡选煤厂块煤转载环节的应用及改造[J]. *煤炭加工与综合利用*,2020(5):34-36.
- LI Pengbo, ZHAO Weiyang, MA Yantao, et al. Coal Processing & Comprehensive Utilization,2020(5):34-36.
- [19] 富佳兴,李济洋. 螺旋溜槽关键参数的研究与应用[J]. *煤矿机械*,2020,41(2):161-164.
- FU Jiaying, LI Jiyang. Research and application of key parameters of spiral chute[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020,41(2):161-164.
- [20] 董敏,王延遐,相培,等. 储煤仓用螺旋溜槽结构的设计改进[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*,2020,34(1):18-21.
- DONG Min, WANG Yanxia, XIANG Pei, et al. Design and improvement of spiral chute structure for coal storage[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*,2020,34(1):18-21.

(上接第20页)

- [32] TU Y K, ZHANG Y B, SU Z J, et al. Mineralization mechanism of limonitic laterite sinter under different fuel dosage: Effect of FeO [J]. *Powder Technology*, 2022, 398:117064.
- [33] JIANG X, ZHAO J D, WANG L, et al. Effects of liquidus temperature and liquid amount on the fluidity of bonding phase and strength of sinter[J]. *ISIJ International*,2021, 61(1):86-92.
- [34] CHAI Y F, YU W T, ZHANG J L, et al. Influencing mechanism of Al_2O_3 on sintered liquid phase of iron ore fines based on thermal and kinetic analysis[J]. *Ironmaking & Steelmaking*,2019,46(5):424-430.
- [35] CHEN C L, LU L M, JIAO K X. Thermodynamic modelling of iron ore sintering reactions[J]. *Minerals*, 2019,9(6):361.