

基于粗粒化 CFD-DEM 耦合的球磨机钢球级配优化

唐良彪¹, 涂福泉¹, 徐森¹, 陈向东², 高路萍³, 白云³

(1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室,湖北武汉,430081;2. 武钢资源集团鄂州球团有限公司,湖北鄂州 436000;3. 武钢资源集团大冶铁矿有限公司,湖北黄石 435006)

摘要:球磨机在选矿过程中扮演着关键角色,其性能直接影响后续分选效率和经济收益。本文针对球磨机性能优化方法所存在的高成本和低效率问题,提出了一种基于粗粒化 CFD-DEM 双向耦合方法研究钢球级配对研磨效率的影响。该方法使用粗粒化模型将原始系统中一定数量的粒子由粗粒系统中较大的粒子表示。通过模拟不同钢球级配方案,分析了不同矿石粒度的比能量消耗和球磨机总功耗。试验结果表明,推荐方案一[$m(\varnothing 80):m(\varnothing 60):m(\varnothing 30)=40:25:35$]的总功率消耗比现场方案[$m(\varnothing 100)=100$]低 7.5%,耗散功率低 5.2%,且在破碎[8,3] mm 和[3.0,0.5] mm 矿石颗粒时,累积比功率最高,破碎效果最佳。粗粒化 CFD-DEM 双向耦合方法的应用有效降低了大规模颗粒系统的计算开销,提高了球磨机研磨过程模拟的计算效率,为球磨机优化设计提供了更高效的实践指导。

关键词:球磨机; 钢球级配优化; 粗粒化 CFD-DEM 耦合; 数值模拟; 磨矿效率

中图分类号:TD453;TD921.4

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)02-0087-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.029

Optimization of steel ball gradation in ball mill based on coarse-grained CFD-DEM coupling

TANG Liangbiao¹, TU Fuquan¹, XU Miao¹, CHEN Xiangdong², GAO Luping³, BAI Yun³

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. WISCO Resources Group Ezhou Pelletizing Co., Ltd., Ezhou 436000, Hubei, China; 3. WISCO Resources Group Daye Iron Mine Co., Ltd., Huangshi 435006, Hubei, China)

Abstract: Ball mill plays a key role in the beneficiation process, and its performance directly affects the efficiency and economic benefits of subsequent separation. In order to address issue such as high cost and low efficiency in the performance optimization method of ball mill, a two-way coupling method based on coarse-grained CFD-DEM is proposed to study the influence of steel ball grade pairing grinding efficiency. This method uses a coarse-grained model to represent a certain number of particles in the original system by larger particles in the coarse-grained system. By simulating different ball gradation schemes, the specific energy consumption of different ore particle sizes and the total power consumption of the ball mill are analyzed. The results show that the total power consumption of recommended scheme 1 [$m(\varnothing 80):m(\varnothing 60):m(\varnothing 30)=40:25:35$] is 7.5% lower and the dissipation power is 5.2% lower than that of the field scheme [$m(\varnothing 100)=100$], and the cumulative specific power is the highest and the crushing effect is the best at crushing [8,3] mm and [3.0,0.5] mm ore particles. The application of the coarse-grained CFD-DEM two-way coupling method effectively reduces the computational overhead of large-scale particle system, improves the computational efficiency of ball

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52375061)

作者简介: 唐良彪(2000—),男,硕士研究生,从事球磨机磨矿破碎过程与效率分析方面的研究。

通信作者: 涂福泉(1970—),男,教授,从事冶金机械自动化方面的研究

mill grinding process simulation, and provides more efficient practical guidance for the optimal design of ball mill.

Key words: ball mill; optimization of steel ball grading; coarse-grained CFD-DEM coupling; numerical simulation; grinding efficiency

工业 4.0 时代背景下, 随着全球矿产资源需求的不断增长, 以及环境保护和可持续发展的日益重视, 提高矿物加工效率和降低能耗已成为行业的重要课题。在矿物加工和选矿行业中, 磨矿环节对矿物解离至关重要, 直接关联选矿厂的工艺效率和经济效益^[1]。球磨机作为磨矿环节的核心设备, 其研磨效率直接关系到矿物加工的质量和成本^[2]。然而, 球磨机在运行过程中往往面临较高的能源与研磨介质消耗问题, 不仅导致生产资源的浪费, 还可能对环境造成潜在负担^[3]。因此, 优化球磨机性能不仅有助于提高选矿效率、降低生产成本, 更能促进矿物加工行业的可持续发展。

优化球磨机的关键在于提升研磨效率和降低能耗, 而研磨介质的运动状态在其中起着至关重要的作用。其受填充率、转速、钢球级配和矿石入料粒度等工艺参数的影响^[4]。特别是钢球级配的优化, 对提升球磨机性能具有显著影响, 是提高磨矿效率和降低能耗的关键^[5]。

传统的球磨机优化方法主要依赖于实验和技术人员的经验, 这种方法不仅成本高昂且效率低下, 难以适应快速变化的生产需求。随着计算机技术的发展, 数值模拟技术为球磨机的性能优化提供了新的解决方案^[6-8]。数值模拟技术的出现, 特别是计算流体力学-离散元法(CFD-DEM)耦合方法的应用, 标志着球磨机优化方法的一个重要转变。这种方法使研究人员能够在虚拟环境中模拟湿式球磨机的磨矿过程, 从而在不增加成本的情况下, 快速分析各种操作参数对磨矿效果的影响, 有效提高了优化过程的效率和精确度。

如 MAYANK 等^[9]通过 CFD-DEM 耦合模拟球磨机内部矿石颗粒和矿浆的运动, 仿真结果与粒子图像测速技术试验数据高度一致, 该方法通过模拟颗粒与流体之间的相互作用, 提供颗粒尺度的详细信息, 有助于深入解析磨矿工艺中的复杂动态过程。BEINERT 等^[10]采用 CFD-DEM 耦合方法对行星式球磨机进行了数值研究, 分析了磨矿

介质的运动情况、接触事件及接触时颗粒动能, 详细跟踪了磨矿介质的运动和碰撞接触, 获得了磨矿过程中能量的传递和分布。然而, CFD-DEM 耦合方法在处理大规模颗粒系统时, 仍面临计算资源的限制, 这限制了其在工业中的应用。

针对上述问题, 本文采用粗粒化 CFD-DEM 耦合方法, 在保持模拟精度时简化模型的复杂度。该方法通过粗粒化模型将多个小颗粒合为较大的代表性颗粒, 有效减少了模拟所需的颗粒总数, 从而显著提升计算效率。基于此方法, 本文进一步研究了球磨机钢球级配的优化, 以提高其破碎能力并降低能耗。通过对大型湿式球磨机进行建模, 分析了不同钢球级配的比能谱和能量利用率, 以提高其破碎能力并降低能耗, 旨在寻找最优钢球级配, 为选矿厂提高磨矿效率及经济效益提供参考。

1 模拟方法

1.1 CFD-DEM 耦合方法

EL GEITANI 等^[11]通过试验验证了 CFD-DEM 耦合方法在模拟球磨机磨矿过程中的适用性, 通过模拟不同工况下研磨介质的运动情况, 发现模拟结果与试验数据高度一致, 证明了该方法在预测球磨机内部颗粒运动方面的准确性, 在这种双向耦合模拟中, 颗粒不仅是流体流动的组成部分, 而且通过双向作用影响流体的流动。CFD-DEM 双向耦合模拟流程如图 1 所示。

图 1 展示了 CFD 和 DEM 模块的计算过程, 以及两者之间的数据交换。由图 1 可知, 仿真开始时, CFD 和 DEM 模块分别初始化流体和颗粒。DEM 模块导入 CFD 的初始流体数据, 计算初始单元的平均值, 并调整时间步长以匹配 CFD 的整数倍, 结果反馈至 CFD 模块。

随后, DEM 模块求解颗粒运动方程, 考虑流体拖曳力、颗粒动力学特性及颗粒间相互作用, 完成设定时间步长的计算后, 将颗粒施加于流体的力及新位置数据传递至 CFD 模块。CFD 模块更

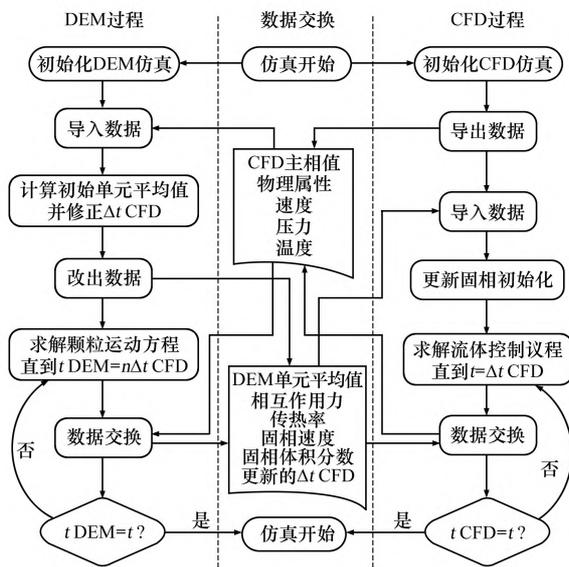


图 1 CFD-DEM 双向耦合流程

Fig. 1 Bidirectional coupling process of CFD-DEM

新固相初始状态, 求解流体控制方程, 直至系统收敛, 输出颗粒对流的相互作用力、传热情况及固相体积分数, 反馈给 DEM 模块。DEM 模块利用这些反馈信息重新计算颗粒运动状态。这个数据交换和迭代过程重复进行, 直到仿真达到预定时间步长, 仿真结束。

然而, 随着系统中固体颗粒数量的增加, CFD-DEM 方法所需的计算资源和时间急剧上升。因此, 为了高效模拟包含大量固体颗粒的多相流, 采用粗粒化方法对 CFD-DEM 方法进行优化。这种方法通过减少模拟中的颗粒总数, 降低了计算负荷, 同时保持了模拟的精度和可靠性。

1.2 粗粒化 CFD-DEM 耦合方法

粗粒化模型 (CGM) 的核心思想是通过将多个小颗粒聚合为一个较大的颗粒, 减少模拟中颗粒的总数。粗颗粒由原始颗粒特征 (材料、形状、大小等) 和缩放因子 f_{CGM} 定义, 每个粒子组有独特的比例因子。增加颗粒尺寸后, 粗粒模型允许使用更长的时间步长, 从而显著提高计算效率。

为了确保粗粒化系统准确代表原始系统, 需要调整包裹与流体相间的相互作用力以及包裹间的接触力, 以保证粗粒化颗粒在模拟中的动力学行为与原始颗粒一致。从而在保持关键物理特性的同时减少计算量, 有效表示原始颗粒群的运动。本文采用基于无量纲重叠的缩放方法^[12-13]来调整

颗粒间的相互作用以及粒子与边界的相互作用。粗颗粒直径 (D_{CGM}) 由原始颗粒的直径 (D_{prim}) 和一个缩放因子 (f_{CGM}) 决定, 具体见式 (1)。

$$D_{CGM} = f_{CGM} D_{prim} \quad (1)$$

式中: D_{CGM} 为粗颗粒直径, mm; f_{CGM} 为缩放因子; D_{prim} 为原颗粒直径, mm。

矿石颗粒可近似为球形, 每个粗颗粒由 f_{CGM}^3 个小颗粒构成。对于由非内聚粒子组成的系统, 这种标定方法产生以下无量纲数, 这些粒子需要在原始系统和粗粒度系统中保持相同。

$$\Pi_1 = \beta, \Pi_2 = k_n / (R_i \rho_p \nu_0^2), \Pi_3 = c_n / (R_i^2 \rho_p \nu_0) \quad (2)$$

式中: β 为颗粒碰撞半径之比; k_n 为粒子的法向刚度, N/m; c_n 为法向阻尼系数, kg/s; ρ_p 为颗粒密度, kg/m³; ν_0 为参考速度, m/s; R_i 为粒子特征长度, m。在本研究中, 原始系统和粗粒度系统均采用单分散颗粒。因此, 对于原始系统和粗粒系统, Π_1 都是 1。法向刚度在满足以下条件的情况下, Π_2 在原始系统和粗粒度系统中保持不变:

$$k_{n,prim} / k_{n,CGM} = D_{prim} / D_{CGM} \quad (3)$$

式中: $k_{n,prim}$ 为原颗粒法向刚度, N/m; $k_{n,CGM}$ 为粗颗粒法向刚度, N/m。

法向阻尼在满足以下条件的情况下, Π_3 在原始系统和粗粒系统中保持不变:

$$c_{n,prim} / c_{n,CGM} = D_{prim}^2 / D_{CGM}^2 \quad (4)$$

式中: $c_{n,prim}$ 为原颗粒法向阻尼系数, kg/s; $c_{n,CGM}$ 为粗颗粒法向阻尼系数, kg/s。

流体对一个粗颗粒施加的阻力, 需要通过对流体阻力方程进行修改以满足其约束条件。由于粗颗粒面积 A_{CGM} 等于 $f_{CGM}^2 A$, 因此只需在原阻力上乘以一个比例因子即可达到所需的颗粒总数 f_{CGM}^3 , 即使用 CGM 模型时的阻力 ($F_{D,CGM}$) 由下式给出:

$$F_{D,CGM} = \frac{1}{2} f_{CGM} c_n \rho_f A_{CGM} |u - v_p| (u - v_p) \quad (5)$$

式中: ρ_f 为流体密度, kg/m³; u 为是流体流动速度, m/s; v_p 是颗粒运动速度, m/s。

1.3 粗粒化验证

在评估球磨机破碎过程时, 直接进行全尺寸模拟涉及巨大的计算成本。为解决这一问题, 采

用一种基于统计的方法：通过分析颗粒间及颗粒与衬板的碰撞数据，间接评估破碎效率。该方法通过统计分析揭示颗粒破碎所需的能量分布，从而避免了直接模拟每个破碎事件的高计算成本^[14]。为实现这一目标，本文采用能谱图作为主要分析工具，以预测粉碎过程中实际用于颗粒破碎的能量比例。在能谱分析中，每个粒度级别的颗粒破碎都需要一个最小能量平均值，可以通过落重试验测定^[15]。

为了验证粗粒化模型的计算精度，本试验采用了不同缩放因子对矿石颗粒的研磨过程进行模拟，并分析了其比能谱图。鉴于 CFD-DEM 耦合方法的有效性取决于颗粒尺寸与 CFD 网格单元大小的关系，试验中最小网格单元尺寸设定为 80 μm，缩放因子的上限被设定为 5，仿真总时长设定为 15 s。不同缩放因子下的颗粒数量和总模拟时间以及同缩放因子对累积比功率分布的影响分别如表 1 与图 2 所示(图 2 中的 1~5 分别对应表中缩放因子 1~5)。

表 1 缩放因子验证结果

Table 1 Validation results of scaling factor

项目	1	2	3	5
颗粒总数	26 843 970	346 856	109 190	33 636
计算时间/min	8 654	1 887	467	258

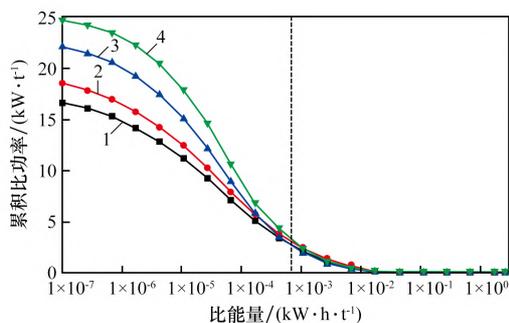


图 2 缩放因子验证比能谱图

Fig. 2 Validation specific energy spectrum of scaling factor

由表 1 可知，缩放因子的增加导致颗粒总数显著下降，同时计算时间也大幅度减少。具体而言，颗粒总数从缩放因子为 1 时的 26 843 970 个减少至缩放因子为 5 时的 33 636 个，而计算时间则从 8 654 min 减少至 258 min。

由图 2 可知，在累积比能量低于 0.005 kW·h/t

时，不同缩放因子导致的比能量分布差异显著；而当累积比能量超过这一阈值，这些差异显著减少。鉴于多数矿石的标称比破碎能阈值通常高于 0.005 kW·h/t^[16]，粗粒化模型在该能量范围内所提供的预测与实际情况更为吻合，这一特性不仅验证了模型的可靠性和有效性，也证实了其在模拟高能量输入的矿石破碎过程中具有较高的计算精度。

综合表 1 和图 2 的数据可知：增加缩放因子能有效减少模型中的颗粒数量，从而提升模拟的计算效率。此外，粗粒化模型在模拟精度上表现优异，特别是在模拟高能量输入条件下的矿石破碎过程。这一发现验证了粗粒化 CFD-DEM 耦合方法在评估和优化矿石研磨过程方面的应用潜力，特别是在计算资源受限的工业大规模模拟场景中具有重要意义。

2 钢球级配仿真试验

2.1 材料、磨机建模

湿式球磨机研磨材料为铁矿石，研磨介质为钢球，其泊松比和剪切模量从生产厂家获得(表 2)。恢复系数、静摩擦系数以及滚动摩擦系数的确定是基于行业内长期实践的经验数据(表 3)。此外，矿浆的密度和黏度数据来源于某铁矿的试验测试结果，分别为 1 992 kg/m³ 和 1.3 kg/(m·s)。空气的密度为 1.225 kg/m³，黏度为 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)(参考数据)^[17]。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料	泊松比	杨氏模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
钢球/衬板	0.30	7.00 × 10 ¹⁰	8 200
矿石	0.27	4.47 × 10 ¹⁰	3 300

表 3 接触参数

Table 3 Contact parameters

参数	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
钢球-钢球/钢球-衬板	0.5	0.500	0.05
钢球-矿石/衬板-矿石	0.2	0.500	0.05
矿石-矿石	0.1	0.545	0.05

本文以某铁矿选矿厂的 ∅2.7 m × 5.0 m 球磨

机为研究对象,仿真试验基于该球磨机的实际工作参数,具体参数见表4。考虑到算力的限制,决定选择球磨机中心段的五分之一,即1 000 mm长度作为仿真研究的对象,这允许在有限的计算资源下对球磨机的关键操作区域进行深入的模拟分析。为了简化仿真过程并提升计算效率,将研磨介质和矿物颗粒抽象为球形颗粒进行处理。球磨机的转速设置与实际生产条件相符,仿真过程的总时长设定为20 s。

表4 球磨机工作参数

Table 4 Operating parameters of ball mill

球磨机 直径/m	球磨机 长度/m	有效 容积/m ³	钢球填 充率/%	转速/ (r·min ⁻¹)
2.7	5	25.8	31	17.3

2.2 仿真设置

DEM模拟使用ROCKY-DEM软件,并选用颗粒滚动阻力模型、法向接触模型和切向接触模型^[18]。为降低计算成本,数值软化因子设定为0.1。

CFD模拟使用Fluent软件。网格划分采用四边形和六面体结构,网格正交质量指标的最小值为0.273 998,最大值为0.969 735 1,平均值为0.727 436 9。CFD仿真采用欧拉多相流模型^[19],系统分为三相:主相为矿浆,第二相为空气,第三相为矿粒和研磨介质。其中,矿浆-空气相互作用采用对称相互作用模型计算;颗粒-矿浆及颗粒-空气相互作用采用Schiller-Naumann模型计算^[20]。仿真过程中,湍流效应由标准湍流模型和可伸缩壁面函数处理。

CFD与DEM的双向耦合通过Koch-Hill阻力定律实现^[21],这一过程中要求CFD单元的尺寸大于研磨介质的尺寸,以确保耦合的准确性。因此,最小网格尺寸被设定为80 mm。为确保模拟的稳定性与精度,CFD的时间步长设置为0.000 2 s。

2.3 钢球级配

钢球级配,即磨矿介质中不同直径钢球的组合配比,对磨矿效率具有显著影响。在确定球磨机填充率后,进一步优化磨矿介质的粒度组合(即级配比)是提高磨矿效率的关键策略。磨矿介质粒径直接影响物料碰撞频次及破碎程度,进而影响

磨矿效果,较小粒径的钢球虽然能够增加物料的碰撞次数,但其较小的动能可能不足以实现有效的破碎,较大粒径的钢球具有更大的动能,有助于破碎大块物料,但可能会因为减少物料接触频率和研磨面积而影响磨矿效率。因此,平衡不同粒径钢球的比例,以发挥各自的优势,是实现高效磨矿的关键。

在磨矿介质的配置中,必须综合考虑物料特性、磨矿目标以及磨矿机的特定操作条件,以确定最佳的粒径分布。这通常涉及到对不同粒径钢球的混合比例进行试验和优化,以达到所需的磨矿效果和效率。通过这种细致的调整,可以确保磨矿时既能够充分利用钢球的动能,又能够保持足够的碰撞频率,从而实现最佳的磨矿性能。

本文采用段氏球径半理论公式^[22],结合现场矿石的力学特性及一段磨机给矿的粒度分布,确定了各粒度级的钢球尺寸范围(表5),并根据钢球尺寸范围设置了推荐方案。为了进一步探究不同钢球尺寸对比对矿石破碎效果的影响,还设计了两种极端方案:一种方案中钢球的平均直径较推荐方案增加,另一种方案中则减少(表6)。这些方案旨在验证不同对比对矿石破碎效率的具体效果。

表5 一段球磨给矿粒度和初装球比计算结果

Table 5 First-stage milling particle size and ball ratio calculations

粒度/mm	给矿 产率/%	扣除<0.15 mm 后待磨产率/%	各组适宜 钢球直径/mm
>12	8.83	9.54	80
[12,8)	29.83	32.22	70
[8,3)	35.81	38.68	60
[3.0,0.5)	14.86	16.05	40
[0.50,0.15)	3.24	3.51	30
[0.150,0.074]	7.43	—	—
合计	100.00	100.00	—

3 结果与讨论

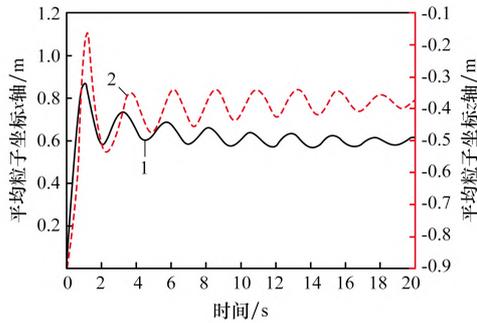
在球磨机运行中,当所有研磨介质和矿石颗粒在水平轴(x)和垂直轴(y)上的加权平均坐标波动范围限制在 ± 0.15 m内,即达到稳态值时,表明球磨机已进入稳态运行模式,模拟过程中的平

表 6 磨矿介质配比方案

Table 6 Grinding media proportioning scheme

项目	推荐方案一	推荐方案二	偏大方案	偏小方案	现场方案
介质质量比	$m(\varnothing 80):m(\varnothing 60):m(\varnothing 30) = 40:25:35$	$m(\varnothing 80):m(\varnothing 70):m(\varnothing 50):m(\varnothing 40) = 20:25:25:30$	$m(\varnothing 80):m(\varnothing 60):m(\varnothing 40) = 40:35:25$	$m(\varnothing 80):m(\varnothing 60):m(\varnothing 40):m(\varnothing 30) = 20:25:25:30$	$m(\varnothing 100) = 100$
钢球平均直径/mm	57.5	58.0	63.0	50.0	100.0

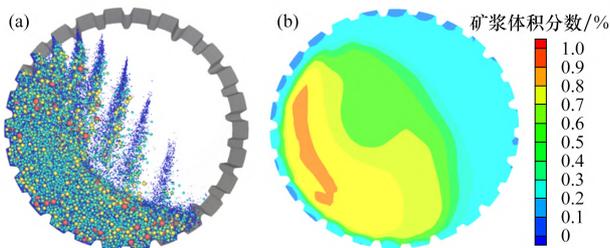
均粒子坐标如图 3 所示。由图 3 可知，球磨机启动阶段，粒子坐标经历了快速的波动，并迅速趋向其平衡位置。在 8~20 s 的模拟时间段内，球磨机维持了稳态运行，因此在此期间对材料的能量相互作用进行了分析。球磨机内物料达到稳定时颗粒和矿浆的分布情况如图 4 所示。



1—平均粒子坐标 x 轴；2—平均粒子坐标 z 轴。

图 3 模拟过程中的平均粒子坐标

Fig. 3 Average particle coordinates in the simulation process

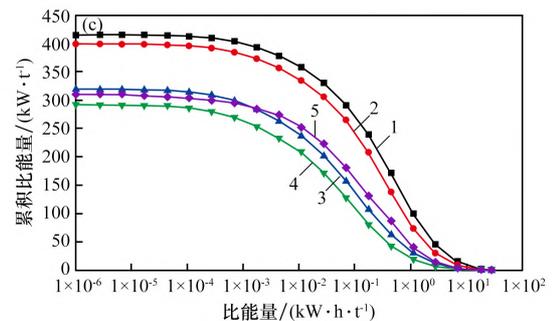
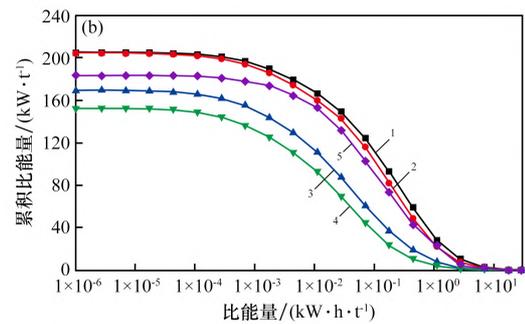
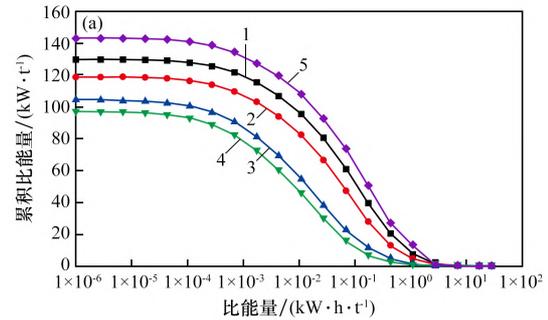


(a) 固体颗粒分布；(b) 矿浆体积分数

图 4 球磨机稳定运行时物料状态

Fig. 4 Material state diagram during the stable operation of the ball mill

不同粒径矿石颗粒在不同钢球级配方案下的累积比能谱特性如图 5 所示。由图 5 可知，在破碎 [12,8) mm 粒径的矿石颗粒，现场方案高于推荐方案 5%，明显超过其他方案。推荐方案一在破碎 [8,3) mm 和 [3.0,0.5) mm 粒径矿石时，累积比功率较现场方案分别提高了 10% 和 24%，破碎效



矿石粒径/mm: (a) [12,8); (b) [8,3); (c) [3.0,0.5)

1—推荐方案一；2—推荐方案二；3—偏大方案；4—偏小方案；5—现场方案。

图 5 不同矿石粒径比能谱

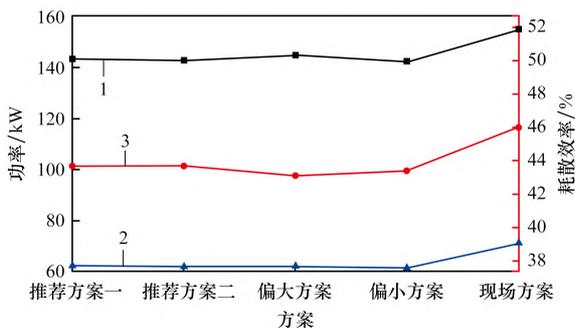
Fig. 5 Energy spectrum diagram for different ore particle sizes

果显著优于其他方案。

可见，大颗粒矿石在破碎时所需的标称破碎能量实际上更低，这主要归因于大颗粒的天然裂缝和微裂纹，以及更大的表面积，使其具有更高的破碎概率。大颗粒矿石能够更有效地吸收和传

递磨矿介质施加的冲击能量,而小颗粒则可能在能量传递过程中损失更多能量。此外,磨矿机内部的动力学特性对矿石破碎机制具有重要影响。大颗粒矿石更容易受到研磨介质的直接冲击,从而提高破碎效率,而小颗粒矿石则主要依赖介质与其他颗粒的间接作用进行粉碎。在这一过程中,较小粒径的钢球由于数量较多、分布更均匀,能够提供更高的接触频率,使小颗粒矿石得到充分研磨。仿真结果进一步证实了这一点,大钢球在破碎大颗粒矿石时更具优势,而小钢球则更适用于破碎小颗粒矿石。因此,合理优化钢球的尺寸分布,对于提升球磨机的整体破碎效率至关重要。

球磨机在稳定运行后,不同方案的总功率和耗散功率对比如图6所示。由图6可知,推荐方案一在总功率消耗上比现场方案低7.5%,而在耗散功率上则低5.2%,表明优化钢球级配能够有效降低球磨机的功率消耗。因此,在相同操作条件下,不同钢球级配对球磨机的能耗特性有显著影响。



1—总功率; 2—耗散功率; 3—耗散效率。

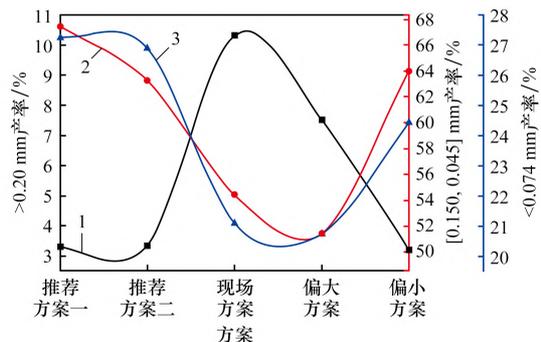
图6 总功率和耗散功率

Fig. 6 Total power and dissipated power

在同质量钢球填充条件下,大直径钢球比例增加会导致功率消耗的增加。这主要是由于大钢球的动能、转动惯量、冲击能量以及磨机内部动力学等因素的综合作用。较大钢球因其质量增加,具有更高的转动惯量。根据动能公式,较大的钢球在相同速度下需要更多能量来改变其运动状态。此外,大钢球在撞击物料时,因其质量和转动惯量的增加,能够产生更大的冲击力,这同样需要消耗更多的能量。较大钢球可更有效地粉碎物料,但也需要更多的能量来驱动。球磨机内部的动力学复杂,大钢球可能会改变内部的流动模式,影响其他钢球的运动,从而增加整体能耗。球磨机

设计对不同大小的钢球有不同的适应性,大钢球需要磨机提供更多的动力来维持其运动。因此,尽管钢球的总质量相同,但当大钢球在配比中占据较大比例时,球磨机的功率消耗可能会更高。

为了验证仿真结果的合理性,在 $\varnothing 240 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的小型实验室球磨机中进行了磨矿介质配对比试验,试验结果见图7。由图7可知:现场方案及偏大方案中, $>0.20 \text{ mm}$ 不合格粒级产率比推荐方案高, $<0.074 \text{ mm}$ 产率较低,因此,现场方案及偏大方案应当舍弃;偏小方案中,中间易选级别 $[0.150, 0.045] \text{ mm}$ 和 $<0.074 \text{ mm}$ 粒级产率都比现场方案高,但低于推荐方案;推荐方案一和推荐方案二中 $>0.20 \text{ mm}$ 粒级产率比现场方案低,分别降低7.03%和6.77%, $[0.150, 0.045] \text{ mm}$ 和 $<0.074 \text{ mm}$ 的产率比现场方案分别提高12.99%和8.81%。



1— $>0.20 \text{ mm}$; 2— $[0.150, 0.045] \text{ mm}$; 3— $<0.074 \text{ mm}$ 。

图7 各方案磨矿效果对比

Fig. 7 Comparative analysis of milling efficiency in different schemes

可见,磨矿效果对比数据不仅证实了仿真模型的准确性,还表明了仿真结果与实际试验结果高度一致。仿真模型在实际应用中的预测精度显著体现在以下粒度变化趋势:在推荐方案中 $>0.20 \text{ mm}$ 粗粒级产率降低, $[0.150, 0.045] \text{ mm}$ 中间粒级和 $<0.074 \text{ mm}$ 细粒级产率同步提升。这一结果进一步证实,基于粗粒化 CFD-DEM 双向耦合模型的数值方法能够有效预测球磨机钢球级配优化效果。

综合考虑破碎效果、能量利用效率和经济成本,最终确定推荐方案一 $[m(\varnothing 80): m(\varnothing 60): m(\varnothing 30) = 40: 25: 35]$ 作为一段球磨机钢球的最优方案。

4 结论

(1) 粗粒化 CFD-DEM 双向耦合方法在模拟不同钢球级配下的球磨机破碎过程表现出较高的准确性和可靠性。该模型的引入不仅大幅减少了计算时间,提高了模拟效率,同时在不同能量输入条件下依然能够保持良好的计算精度,确保了模拟结果的可信度。

(2) 通过仿真试验和磨矿试验,综合考虑破碎效果、能量利用效率和经济性,最终推荐方案一 $[m(\varnothing 80):m(\varnothing 60):m(\varnothing 30) = 40:25:35]$ 被选为某铁矿一段球磨机的优化钢球级配方案。该方案不仅在破碎效率上表现优异,同时在能耗和成本控制方面也具有显著优势。考虑到仿真与实际工况可能存在一定差异,该配比方案可作为优选基础,在实际应用中仅需根据具体工况进行适当微调,无需大规模重新配置或长时间试磨,从而可节省调试时间,降低运行成本,具备广泛的工业应用前景。

参考文献:

- [1] 黎芬芳,崔桂梅. 基于 PSO 优化 T-S 模糊神经网络的磨矿粒度预测[J]. 烧结球团,2022,47(4):64-70.
LI Fenfang, CUI Guimei. Grinding size prediction of optimization of T-S fuzzy neural network based on PSO [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(4):64-70.
- [2] 田原,刘琼. 基于短时能量和梅尔频率倒谱系数的球磨机工况识别[J]. 烧结球团,2020,45(3):39-43.
TIAN Yuan, LIU Qiong. Ball mill working condition recognition based on short-time energy and MFCC[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(3):39-43.
- [3] 左蔚然,戴元松,许京伟,等. 碎磨功耗理论的发展与展望[J]. 金属矿山,2024(5):16-27.
ZUO Weiran, DAI Yuansong, XU Jingwei, et al. Development and prospects of comminution energy consumption theory[J]. Metal Mine,2024(5):16-27.
- [4] 崔瑞,刘昕,张义闹,等. 球磨机钢球球径制度对磨碎速率的影响研究[J]. 矿冶工程,2019,39(1):39-43.
CUI Rui, LIU Xin, ZHANG Yinao, et al. Effect of diameter regime of ball charge on grinding rate in ball mill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(1):39-43.
- [5] 武煜凯,肖庆飞,高志勇. 多级配球降低半自磨中顽石积累及改善磨矿效果试验[J]. 稀有金属,2022,46(5):673-680.
WU Yukai, XIAO Qinglei, GAO Zhiyong. Hard rock accumulation decrease and grinding effect improvement in semi autogenous grinding by multi-stage ball distribution[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(5):673-680.
- [6] XU L, LUO K, ZHAO Y Z. Numerical prediction of wear in SAG Mills based on DEM simulations[J]. Powder Technology, 2018, 329:353-363.
- [7] 袁文彬,孙欣,金凯,等. 不同研磨介质填充率下球磨机内钢球碰撞研究[J]. 矿冶工程,2023,43(4):57-60.
YUAN Wenbin, SUN Xin, JIN Kai, et al. Investigation on collision of steel balls in ball Mills with varied filling rates of grinding media[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4):57-60.
- [8] 崔振强,田万一,汪群. 球磨机介质运动仿真与优化[J]. 烧结球团,2020,45(4):61-64.
CUI Zhenqiang, TIAN Wanyi, WANG Qun. Simulation and optimization of medium motion of ball mill[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(4):61-64.
- [9] MAYANK K, MALAHE M, GOVENDER I, et al. Coupled DEM-CFD model to predict the tumbling mill dynamics [J]. Procedia IUTAM, 2015, 15:139-149.
- [10] BEINERT S, FRAGNIÈRE G, SCHILDE C, et al. Analysis and modelling of bead contacts in wet-operating stirred media and planetary ball mills with CFD-DEM simulations [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 134:648-662.
- [11] EL GEITANI T, BLAIS B. Solid-liquid rotary kilns: An experimental and CFD-DEM study[J]. Powder Technology, 2023, 430:119008.
- [12] DI RENZO A, NAPOLITANO E, DI MAIO F. Coarse-grain DEM modelling in fluidized bed simulation: A review[J]. Processes, 2021, 9(2):279.
- [13] LIU X Y, SULAIMAN M, KOLEHMAINEN J, et al. Particle-based coarse-grained approach for simulating dry powder inhaler[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 606:120821.
- [14] GAO P, ZHOU W T, HAN Y X, et al. Enhancing the capacity of large-scale ball mill through process and equipment optimization: An industrial test verification [J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(5):2079-2091.

(下转第 142 页)

- [9] 王斌,李玉然,熊劲,等. 活性炭法烟气净化工艺解析过程试验研究[J]. 河北冶金,2019(S1):72-76.
WANG Bin, LI Yuran, XIONG Jin, et al. Experimental study on analytical process of flue gas purification process by activated carbon method[J]. Hebei Metallurgy, 2019(S1):72-76.
- [10] 乔骊竹,张威力,彭汉忠等. 解析参数对活性焦再生过程及再生效果的影响[J]. 钢铁,2022,57(6):159-166.
QIAO Lizhu, ZHANG Weili, PENG Hanzhong, et al. Influence of desorption parameters on regeneration process and regeneration effect of activated coke[J]. Iron and Steel, 2022, 57(6):159-166.
- [11] 马海涛. 高温氯盐环境中金属材料的腐蚀[D]. 大连:大连理工大学,2003:7-24.
MA Haitao. High temperature corrosion of metallic materials induced by chloride salts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003:7-24.
- [12] 姜磊,王永征,余滔,等. 生物质混煤燃烧过程中硫氯成分协同腐蚀作用机理探析[J]. 电站系统工程,2013,29(3):1-4.
JIANG Lei, WANG Yongzheng, YU Tao, et al. Study on synergy corrosion mechanism of sulfur-chlorine during biomass and coal co-firing[J]. Power System Engineering, 2013, 29(3):1-4.
- [13] 吴峰. 高温氯腐蚀的特点[J]. 电站系统工程,2003,19(1):13-15.
WU Feng. Characteristics of chlorine corrosion at high temperature[J]. Power System Engineering, 2003, 19(1):13-15.

(上接第 94 页)

- [15] 王泽红,楚文城,孔令斌,等. 落重试验测定矿石粉碎特性参数[J]. 金属矿山,2014(9):85-89.
WANG Zehong, CHU Wencheng, KONG Lingbin, et al. Comminution parameters detection of the ore by drop-weight tests[J]. Metal Mine, 2014(9):85-89.
- [16] ZHANG Z X, OUCHTERLONY F. Energy requirement for rock breakage in laboratory experiments and engineering operations: A review[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(2):629-667.
- [17] LVOV V, CHITALOV L. Semi-autogenous wet grinding modeling with CFD-DEM[J]. Minerals, 2021, 11(5):485.
- [18] CLEARY P W, HILTON J E, SINNOTT M D. Modelling of industrial particle and multiphase flows[J]. Powder Technology, 2017, 314:232-252.
- [19] AALI H, KAZEMI S, LARIJANI R S, et al. CFD-DEM modeling of breakage of non-spherical particles in fluidized beds[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 189:593-605.
- [20] ZBIB H, EBRAHIMI M, EIN-MOZAFFARI F, et al. Comprehensive analysis of fluid-particle and particle-particle interactions in a liquid-solid fluidized bed via CFD-DEM coupling and tomography[J]. Powder Technology, 2018, 340:116-130.
- [21] KUANG S B, ZHOU M M, YU A B. CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: A review[J]. Powder Technology, 2020, 365:186-207.
- [22] 宦秉炼,段希祥,况世华,等. 磨机钢球直径半理论公式的改进研究[J]. 昆明理工大学学报,2002,27(1):10-16.
HUAN Binglian, DUAN Xixiang, KUANG Shihua, et al. Research on the Revision of the Half-Theory Formula to Determine Mill Steel Ball Size[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2002, 27(1):10-16.

(上接第 111 页)

- XU Yong. Study on the reaction between mullite/corundum refractories and alkali-doped deposition materials[J]. Refractories & Lime, 2013, 38(5):39-45.
- [23] 曹亚然,徐博,王铮铮,等. Al_2O_3 对熔融态高炉渣结构与黏度影响的分子动力学模拟[J]. 烧结球团,2022,47(6):57-65.
CAO Yaran, XU Bo, WANG Zhengzheng, et al. Molecular dynamics simulation of effect of Al_2O_3 on structure and viscosity of molten blast furnace slag[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(6):57-65.