矿石含水率对高压辊磨机粉碎效果影响的仿真模拟研究*

刘三阳[1],张成龙[2],赵礼兵[1],来有邦[2],吴照永[3],张迪[1],栗明媚[1]

(1.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;
2.河北钢铁集团矿山设计有限公司, 河北 唐山市 063701;
3.昆明佩思矿业工程设计有限公司, 云南 昆明 650032)

摘要:优化高压辊磨机的粉碎效果对于提高矿石加工效率、降低能耗和提高产品质量具有重要意义。为探究矿石含水率对高压辊粉碎效果的影响,以冀东地区磁铁矿石为研究对象,采用颗粒表面能表征物料的含水率,结合SolidWorks建模和EDEM仿真,对不同入料含水率条件下高压辊与颗粒间的相互作用开展模拟研究。仿真结果表明,当颗粒表面能从0增加到25 J/m^{2}时,颗粒在高压辊中的粉碎效果呈先增强后减弱的趋势,颗料表面能达到20 J/m^{2}时粉碎效果最优。不同入料含水率条件下的高压辊开路试验结果表明,入料含水率由0.11%增大到6%时,高压辊粉碎效果不断优化后变差,与仿真结果规律一致;入料含水率在1.5%~4.5%范围时,高压辊磨机粉碎后的产品粒度更细,粉碎效果较好。

关键词:高压辊磨;磁铁矿;含水率;颗粒表面能;粉碎效果

中图分类号:TD921 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)11-0277-08

Simulation Study on the Influence of Ore Moisture Content on the Crushing Effect of High-Pressure Roller Grinding

LIU Sanyang[1], *ZHANG Chenglong*[2], *ZHAO Libing*[1], *LAI Youbang*[2], *WU Zhaoyong*[3], *ZHANG Di*[1], *LI Mingmei*[1]

(1.School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
2.Hebei Iron and Steel Group Mining Design Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063701, China;
3.Kunming Peisi Engineering Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650032, China)

Abstract: The optimization of the crushing effect of high-pressure roller grinding is of crucial importance in relation to the enhancement of ore processing efficiency, the reduction of energy consumption, and the elevation of product quality. In order to investigate the influence of ore moisture content on the crushing effect of high-pressure rollers, with the magnetite ore from eastern Hebei selected as the research specimen, the interaction between high-pressure rollers and particles under different feed moisture content conditions was simulated by the combination with SolidWorks modeling and EDEM simulation. The simulation results indicate that, as the particle surface energy increases from 0 to 25 J/m^2, the crushing effect in the high-pressure roller initially strengthens and then weakens, when the particle surface energy reaches 20 J/m^2, the crushing effect is the best. Open-circuit test results under different feed moisture conditions show that as the feed moisture content rises from 0.11% to 6%, the crushing performance of the high-pressure roller first improves and then deteriorates, aligning with the simulation trends. When the feed moisture content is within the 1.5% to 4.5% range, the product particle size after crushing is finer, and the crushing effect is more favorable.

Key words: High-pressure roller grinding, Magnetite ore, Moisture content, Particle surface energy , Crushing effect

0 引言

对高压辊磨机进行离散元仿真可以模拟矿石破碎过程[1],探寻颗粒破碎行为并深入理解磨机内部颗粒流动、碰撞及受力情况,从而揭示颗粒破碎的微观机理,为优化设备设计、调整操作参数、提高粉碎效率和降低能耗提供指导。影响高压辊磨机粉碎效果的因素有很多,比如高压辊压力、转速、入料含水

* **收稿日期**:2024-11-16
基金项目:河钢集团有限公司重点科技项目(HG2022137)
作者简介:刘三阳(1999—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为矿产综合利用。E-mail:Lsy63y@163.com
通信作者:赵礼兵(1978—),男,河北廊坊人,教授,硕士生导师,主要从事矿产综合利用、选矿自动化方面的研究工作。E-mail:zhaolibing2002@126.com

率等[2]。当前在高压辊入料含水率方面的理论研究仍不够完善。

仿真中颗粒的表面能可以作为表征物料含水率的参数,当物料含水率≤10%时,表面能随含水率的增大快速增大;当物料含水率>10%时,表面能随含水率增大而增大的趋势有所平缓[3]。基于此,通过仿真模拟不同含水率条件下颗粒的运动、碰撞和破碎过程,可以深入分析物料含水率变化对颗粒破碎特性的影响机制,为优化高压辊工作条件、提高破碎效率提供重要的理论指导。

因此,本文以冀东地区磁铁矿石为研究对象,通过 SolidWorks 软件建立高压辊和不同颗粒形状的三维仿真模型[4],在三维模型的基础上,通过改变 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型的 JKR 表面能参数,可模拟矿物的含水率,结合 EDEM 中的 Tavares 破碎模型[5]进行一系列工况条件的仿真研究。最后,使用 EDEM Post-Processor 软件进一步分析不同工况下的高压辊粉碎特性,研究不同矿石含水率对高压辊粉碎效果的影响。研究结果对后续磨矿效果提升、能耗降低、设备保护和工艺优化等方面具有重要意义,同时也为相关工业领域的矿石粉碎和颗粒材料加工等提供参考。

1 仿真模型的建立

1.1 试验参数的选定

为提高高压辊仿真的准确性和可信度,在进行仿真之前需要通过试验确定关键参数,如高压辊的辊间距、工作压力和转速等[6-7]。因此,结合后续工艺要求,对试验原料进行高压辊开路试验时,高压辊辊间距固定为 6 mm,压力和转速分别选取实验室高压辊常用推荐参数,工作压力选择 8~12 MPa,转速选择 15~25 r/min。根据探索试验结果,选定工作压力为 10 MPa,转速为 20 r/min。

1.2 高压辊三维仿真模型

通过 SolidWorks 建立高压辊的三维仿真模型[8-10]如图 1 所示。在仿真模型中,高压辊参数按照实际试验高压辊进行设置,高压辊的直径为 25 cm,宽度为 10 cm,柱钉直径为 8 mm,露出辊面的高度为 3 mm。动辊施加压力为实际投影压力,工作压力 10 MPa 的投影压力为 4 MPa。

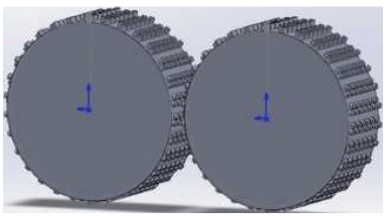
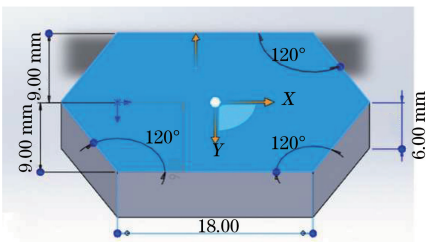


图 1 高压辊三维模型

Fig.1 3D model of high-pressure roller

1.3 颗粒模型

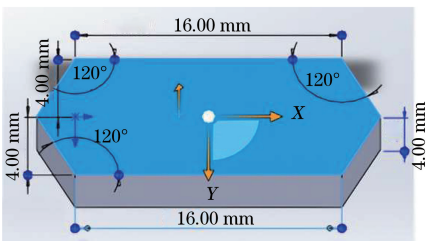
对实际工况下的贫磁铁矿而言,贫磁铁矿颗粒形态并非球形。为更加符合实际工况条件,颗粒模型采用 SolidWorks 三维软件进行建模,将建立好的三维颗粒模型导入 EDEM 中进行填充。以球形颗粒的坐标和半径为基础进行设置,最终得到表面颗粒模型的形态[11]。试验中高压辊的入料粒度在 20 mm 以内,根据试验原料粒级分布对仿真中的颗粒大小进行了规划,共分为 6 种不同大小的颗粒。3 种大尺寸颗粒模型见图 2。



(a) 18 mm 颗粒模型



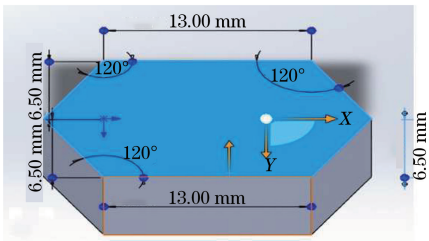
(b) 18 mm 颗粒模型填充



(c) 16 mm 颗粒模型



(d) 16 mm 颗粒模型填充



（e）13 mm 颗粒模型　　（f）13 mm 颗粒模型填充

图 2　3 种大颗粒模型尺寸、外形及内部颗粒填充图

Fig.2　Size, shape and internal particle filling diagrams of three types of large particle models

由图 2 可知，以最长边来定义，则大颗粒尺寸分别为 18 mm、16 mm 和 13 mm。对于小尺寸颗粒，使用直径为 1 mm、3 mm 和 6 mm 的简化球形颗粒模型，这是由于小尺寸颗粒在实际工程中往往具有较为规则的形状，球形颗粒能够有效地近似描述这一特征，简化了建模过程，提高了仿真效率，同时保证了仿真模型的准确性[12-13]。通过在 SolidWorks 中进行几何建模，分别得到这 3 种小颗粒的三维模型，并将其导入到 EDEM 软件中。通过导入不同尺寸和形态的颗粒模型，并进行颗粒工厂的设置，最终得到的仿真效果更为真实和可靠[14]。

2　EDEM 离散元数值标定

含水率较大的矿石颗粒与含水率较小的矿石颗粒存在明显差异，主要集中表现在颗粒的流动性和摩擦方面[15]。通过表面能表征颗粒间的黏结力大小，进而反映出颗粒物料间的流动特性。物料表面能的大小与颗粒间的黏结力呈正相关，与颗粒物料的流动性呈负相关[16]。

在仿真模型中使用的材料特性参数见表 1。部分参数参照里约热内卢联邦大学 Luís Marcelo Tavares 教授关于中试规模高压辊磨机 DEM 仿真的标定结果[17-19]。颗粒的密度为 3.639 g/cm^3。泊松比、剪切模量、碰撞恢复系数相对统一，几何体的材料选择钢材，泊松比为 0.3，杨氏模量为 7×10^{10} Pa，密度为 7.8 g/cm^3，无需为颗粒工厂平面定义材料属性。

表 1　材料特性参数

Table 1　Material characteristic parameters

材料	泊松比	密度/(kg/m^3)	杨氏模量/Pa
铁矿石	0.25	3 639	2×10^9
钢	0.30	7 800	7×10^{10}

颗粒之间的摩擦特性是通过滚动摩擦因数和静摩擦因数来进行表征，模型中材料间的接触参数设置见表 2。

表 2　材料接触参数

Table 2　Material contact parameters

材料	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
矿石与矿石	0.20	0.55	0.51
介质与钢	0.15	0.49	0.47

为贴近实际情况，对颗粒模型进行参数设置，重力加速度的方向为 Z 轴负方向，加速度为 9.81 m/s^2。含水颗粒之间的接触模型为标准的 Hertz-Mindlin with JKR，颗粒与几何体之间的接触模型选用 Hertz-Mindlin(no slip)。

EDEM 软件仿真过程中，颗粒由方形颗粒工厂生成，所设置的颗粒中 70% 为大尺寸颗粒，设置的仿真时间主要包括仿真起始时间、总仿真时间和瑞丽时间步。网格尺寸的大小依据仿真中所设置的最小颗粒半径来进行设置，一般为最小颗粒半径的 3 倍。结合实际工况，本次高压辊粉碎颗粒仿真所设置的瑞丽时间步长为 20%，总仿真时长为 10 s，网格半径为 $3R$，网格划分为21 557个。

3　EDEM 仿真结果分析

使用 EDEM Post-Processor 软件进行后处理操作，导出速度云图、能量云图和颗粒占比统计等结果，并根据仿真结果分析不同含水率条件下矿石颗粒经高压辊粉碎的过程、特性和效果。

3.1　颗粒速度分析

不同颗粒表面能条件下颗粒的平均速度曲线和颗粒速度云图分别如图 3 和图 4 所示。

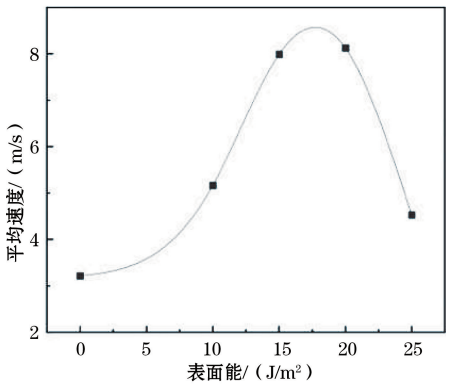


图 3 不同颗粒表面能下的颗粒平均速度曲线

Fig.3 The average velocity curve of particles under different particle surface energies

由图 3 可知,随着颗粒表面能由 0 增大到 15 J/m²,颗粒的平均速度增大。这是因为当表面能增大时,颗粒表面更容易吸附其他颗粒或者吸引其他颗粒靠近,颗粒之间的吸引力增加,导致颗粒更紧密地结合或聚集。此条件下,大颗粒受高压辊压力的作用,更容易破碎,破碎后产生的小颗粒之间的碰撞频率增加,促进了颗粒平均速度增大。当颗粒表面能由 20 J/m² 持续增大后,颗粒的平均速度下降。其原因为:增大的表面能增强了颗粒之间的吸引力,但同时也增加了颗粒之间的抵抗力,颗粒之间更加紧密地结合或聚集,增加了摩擦阻力,阻碍了颗粒的运动和能量转移,大颗粒难以完全破碎,使得颗粒的整体速度下降。

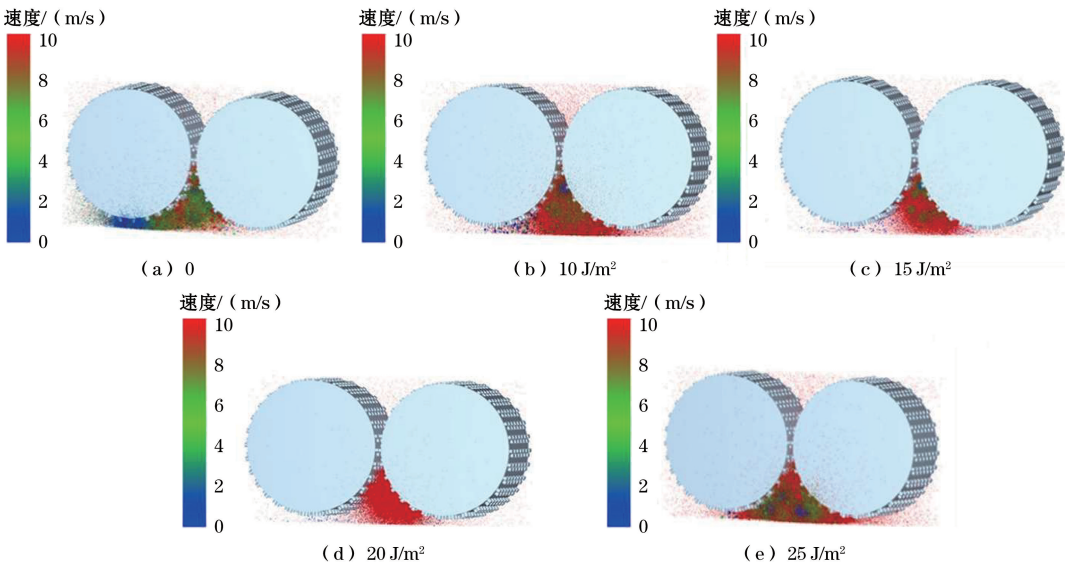


图 4 不同表面能下的颗粒速度云图

Fig.4 Particle velocity cloud diagrams under different surface energies

由图 4 可知,速度较小的多为大颗粒,小颗粒多为红色(颜色标识见电子版),速度较快。相同时间下不同表面能颗粒被破碎后,粒径的分布大小并不统一,尤其是在表面能为 15～20 J/m² 的工况下,颗粒的分布更均匀,且小颗粒相对较多。与图 3 中颗粒平均速度随不同表面能的变化规律一致,随表面能的增加,颗粒的速度先增加再趋于平稳,最后再下降。其中,表面能为 15～20 J/m² 时,颗粒间的黏结力达到了临界状态。对于初始时刻的大颗粒,表面能小或者为 0 的工况下,大颗粒在与高压辊的接触过程中,其速度较小,其动能也小,颗粒内部的破碎临界条件难以满足;而小颗粒在表面能的影响下,其破碎的临界条件更容易满足,且其速度较大,在相同表面能下,大颗粒破碎需要更多的时间。而表面能在 15～20 J/m² 区间时,表面能对大粒径颗粒的影响更强,大粒径颗粒的破碎速度更快,在相同时间下,大颗粒更容易破碎,破碎成小颗粒后整体速度增加。

综上所述,在不同表面能的影响下,颗粒破碎会存在一定的累积效应,表面能适量增大,在一定程度上提高颗粒的速度,尤其是颗粒与高压辊反复的接触过程中,速度会逐渐提高,进而发生破碎。由不同表面能的速度变化曲线可知,表面能对速度的影响存在一个边界,超过这个范围时,其颗粒的速度呈下降趋势。

3.2 颗粒能量分析

不同颗粒表面能条件下颗粒的平均能量如图 5 所示,不同颗粒表面能条件下的颗粒能量云图如图 6 所示。

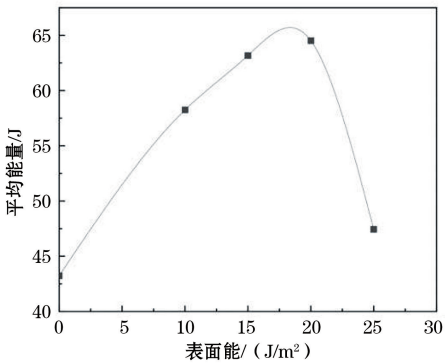


图 5 不同表面能下的颗粒平均能量

Fig.5 Average energy of particles under different surface energies

由图 5 可知,当颗粒的表面能从 0 增大到 25 J/m² 时,颗粒的平均能量出现先增大后减小的趋势,这与颗粒平均速度变化规律一致。表面能对颗粒能量的影响也存在一个阈值,如果超过了阈值范围,颗粒的动能会呈现迅速下降的趋势。

结合图 6 可知,当颗粒的表面能从 0 增加到 20 J/m² 时,颗粒的能量增大,而当表面能继续增加后,能量大幅度减小。因此,颗粒表面能为 20 J/m² 时,颗粒的能量最大,高压辊施加在颗粒上的压力作用最明显,能量转移更完全。这与颗粒速度变化规律一致,表明大部分能量来自大颗粒受力破碎时产生的动能。

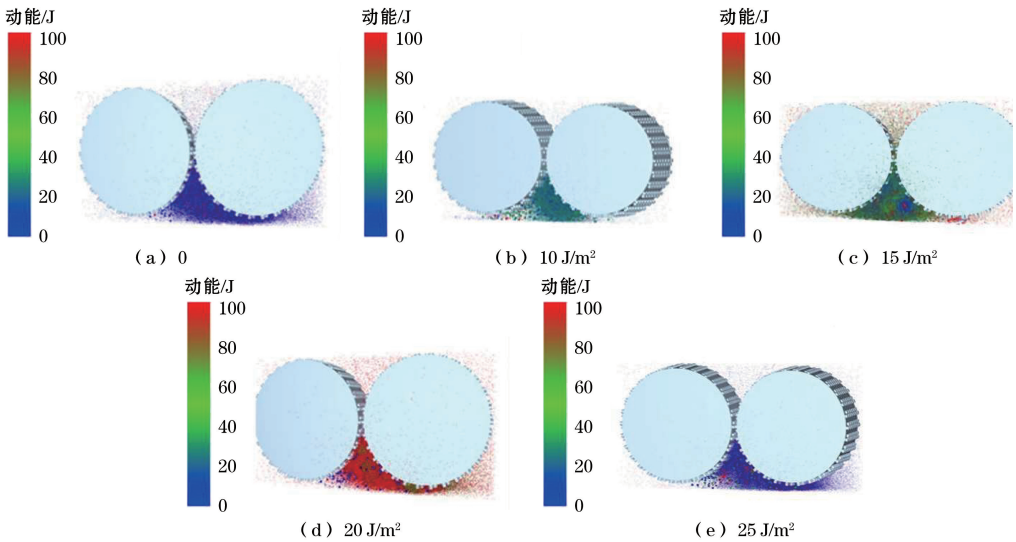


图 6 不同表面能下的能量云图

Fig.6 Energy cloud diagrams under different surface energies

3.3 颗粒占比分析

分别对 5 组仿真结束后的产品粒径分布进行数据提取,得到高压辊粉碎后的直径为 −0.24 mm、−1.93 mm 及 −5.39 mm 的 3 种粒级占比曲线,结果见图 7。由图 7 可知,随着颗粒表面能的增加,矿物颗粒占比增加,颗粒尺寸为 −0.21 mm、−1.93 mm、−5.39 mm 的颗粒数量占比均呈先缓慢增加后下降的趋势,高压辊破碎后 −5.39 mm 粒级范围在 80%左右。随着表面能从 0 增加到 20 J/m²,−0.24 mm 颗粒的占比逐渐增加,但增加的幅度是先上升后下降。表面能从 0 增加到 15 J/m² 时,−0.24 mm 颗粒占比由 37.26%增加到45.73%,增加了 8.47 个百分点,表面能从 15 J/m² 增加到20 J/m² 时,−0.24 mm 颗粒占比由 45.73%增加到56.44%,增加了 10.71 个百分点。−5.39 mm 和−1.93 mm 粒级颗粒在表面能从 0 增加到 15 J/m² 阶段均为平缓增加,表面能从 15 J/m² 增加到 20 J/m² 阶段无明显变化。当表面能从 20 J/m² 增加到 25 J/m² 时,3 种小颗粒累积含量占比均呈大幅下降。

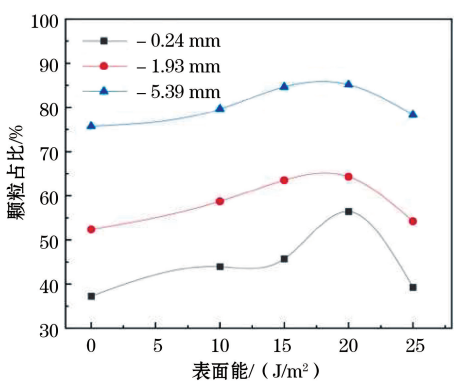


图 7 不同表面能下的各粒级颗粒的占比

Fig.7 The proportion of different particle sizes under different surface energies

EDEM 仿真结果表明,随着表面能从 0 增加到 20 J/m²,高压辊粉碎效果不断变化。这主要是因为增大的表面能会加强颗粒之间的吸附力和黏结力,使颗粒更容易形成团块或团聚体,增加了颗粒受到外部应力时的破碎概率。当颗粒表面能从 20 J/m² 持续增大后,在颗粒之间的黏结力过强、颗粒的表面过硬以及颗粒之间的连接方式过于紧密等因素的共同作用下,形成团块或团聚体,使得颗粒更难被分离和破碎,整体结构更加坚固,从而出现颗粒难破碎的情况。因此,表面能在 20 J/m² 左右存在一个阈值,一旦超越此表面能阈值,颗粒破碎效果将会下降。

4 试验验证及分析

试验矿样为冀东地区的磁铁矿石,实验室来料粒度约 50 mm 以下,取样后过 20 mm 筛网筛分,筛上矿样使用颚式破碎机破碎至 20 mm 以下,然后和筛下混匀,再利用割环法对试样进行缩分,制备高压辊粉碎试验原料,试验原料筛析结果见表 3。

由筛析数据可知,高压辊试验原料中 −1 mm 和 −6 mm 粒级颗粒的累积含量分别为 10.86% 和 24.71%,高压辊入料中含有 75.29% 的大颗粒需破碎,已含有的合格粒级占比较少。

表 3 试验原料粒度组成筛析结果

Table 3 Sieve analysis results of particle size composition of test raw materials

粒级/mm	试验原料	
	产率/%	累积含量/%
+15	21.69	100.00
−15～+10	34.47	78.31
−10～+8	7.62	43.84
−8～+6	11.50	36.21
−6～+3	6.83	24.71
−3～+2	2.39	17.88
−2～+1	4.64	15.49
−1～+0.5	2.75	10.86
−0.5～+0.2	1.90	8.10
−0.2～+0.15	0.53	6.21
−0.15～+0.074	2.01	5.67
−0.074	3.66	3.66
合计	100.00	—

通过在 0.11% 含水率物料中添加水分实现对入料含水率的调整,对试验原料进行高压辊压力为 10 MPa,转速为 20 r/min,入料含水率分别为 0.11%、1.5%、3%、4.5% 和 6% 的高压辊开路试验,粒度筛分结果见表 4,各粒级颗粒累积含量见图 8。

表 4 不同入料含水率下的辊压产品的粒度分布

Table 4 Particle size distribution of rolled products under different feed moisture contents

粒级/mm	0.11%含水率		1.5%含水率		3%含水率		4.5%含水率		6%含水率	
	产率/%	负累积/%	产率/%	负累积/%	产率/%	负累积/%	产率/%	负累积/%	产率/%	负累积/%
+6	15.30	100.00	15.39	100.00	11.43	100.00	12.33	100.00	16.38	100.00
−6～+5	7.32	84.70	4.97	84.61	4.82	88.57	5.09	87.67	4.09	83.62
−5～+3	20.65	77.38	19.48	79.64	19.43	83.75	18.44	82.58	22.22	79.53
−3～+2	5.99	56.73	5.59	60.16	6.06	64.32	5.62	64.14	6.46	57.31
−2～+1	14.92	50.74	15.62	54.57	17.94	58.26	15.45	58.52	15.73	50.85
−1～+0.5	6.88	35.82	7.99	38.95	8.98	40.32	8.31	43.07	7.21	35.12
−0.5～+0.22	5.35	28.94	6.07	30.96	6.45	31.34	6.73	34.76	5.17	27.91
−0.22～+0.15	9.80	23.59	7.71	24.89	8.43	24.89	11.78	28.03	8.21	22.74
−0.15～+0.074	1.68	13.79	3.30	17.18	2.86	16.46	2.15	16.25	2.10	14.53
−0.074	12.10	12.10	13.88	13.88	13.60	13.60	14.10	14.10	12.43	12.43
合计	100.00	—	100.00	—	100.00	—	100.00	—	100.00	—

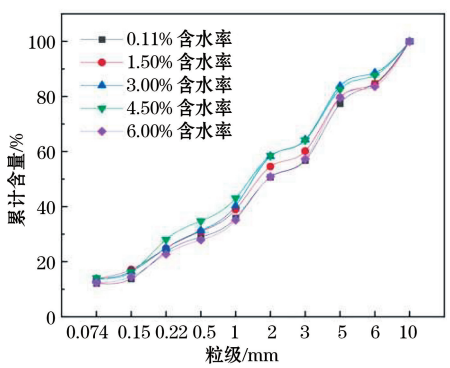


图 8 不同入料含水率下的辊压产品粒度累积曲线

Fig.8 Particle size accumulation curves of rolled products under different feed moisture contents

由表 4 可知,随着高压辊入料含水率增加,辊压后的产品粒度分布发生明显变化。入料含水率从 0.11% 增大到 6% 时,+6 mm 粒级范围辊压产品的产率从 15.30% 降低到 11.43% 后又迅速增大到 16.38%,其中入料含水率为 3% 时产率最低。由 −0.074 mm 细粒级颗粒产率数据得知,入料含水率的增加同样对高压辊粉碎物料过程中细粒级颗粒的产生有影响。入料含水率为 4.5% 时,高压辊 −0.074 mm 细粒级的颗粒产率最高。

由图 8 可知,随着入料含水率的增加,−6 mm 粒级颗粒累积含量呈先增加后减小的趋势。4.5%

含水率条件下辊压产品的各粒级颗粒累积含量明显高于0.11%、1.5%和6%含水率条件下的累积含量,且在-6~+2 mm粒级累积条件下略高于3%含水率条件,表明3%和4.5%含水率条件下高压辊粉碎效果较好,4.5%含水率条件下高压辊粉碎产生的细粒级产品较多。

采用罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler,R-R)粒度特性方程式对不同入料含水率条件下的辊压产品进行粒度特性分析,R-R粒度方程如式(1)所示,回归拟合结果见表5。

$$C=100\exp(-bx^m)\times 100\% \tag{1}$$

式中:C为粒度大于x的正累计产率,%;x为颗粒直径或筛孔宽,mm;b为与产物颗粒相关的参数,b越大,产物粒度越细;m为均匀性系数,表示粒度分布范围的宽窄程度,m越大,粒度分布越集中,标准偏差越小。

表5 不同含水率下的辊压产品R-R方程回归结果

Table 5 Regression results of R-R equation for rolled products under different moisture contents

含水率/%	m	b	决定性系数R^2
0.11	0.583 6	0.526 8	0.969 7
1.50	0.556 6	0.579 8	0.979 3
3.00	0.600 2	0.616 5	0.979 5
4.50	0.578 2	0.635 5	0.977 0
6.00	0.582 3	0.528 0	0.971 6

从表5可以看出,矿石含水率为3%时,辊压产品均匀性系数m较大,粒度分布更为集中,标准差较小。参数b随矿石含水率的增加先增大后减小,高压辊粉碎产品有先变细后增粗的趋势,其中矿石含水率4.5%时b值最大,此条件下高压辊粉碎产品粒度最细。含水率为3%时,b值与最高值的差距最小,高压辊粉碎产品粒度分布更集中于偏细粒级。

破碎比(F_X/P_X)为给料中X%通过的粒度与产品中X%通过粒度的比值,由R-R公式推导得出F_X和P_X计算公式:

$$X=\left[\frac{1}{b}\ln\left(\frac{100}{R}\right)\right]^{\frac{1}{m}} \tag{2}$$

经计算得到的辊压产品破碎比结果见表6。由表6可知,矿石含水率由0.11%增加到1.5%时,破碎比F_{20}/P_{20}由17.18增大至22.24,增幅约30%,细颗粒产品明显增多。矿石含水率在1.5%~4.5%时,各破碎比指标趋于稳定(F_{20}/P_{20}约23,F_{50}/P_{50}约6.5,F_{80}/P_{80}约3.2)。矿石含水率由4.5%增加至6%时,破碎比F_{20}/P_{20}由23.63降至18,降幅为23.83%,细颗粒产品明显减少;破碎比F_{50}/P_{50}和F_{80}/P_{80}分别下降了15.99%和12.35%,表明高压辊粉碎产品整体粒度变粗,粉碎效果变差。

表6 不同含水率下的辊压产品破碎比

Table 6 Crushing ratio of rolled products under different moisture contents

含水率/%	F_{20}/P_{20}	F_{50}/P_{50}	F_{80}/P_{80}
0.11	17.18	5.41	2.83
1.50	22.24	6.21	3.00
3.00	23.19	6.86	3.21
4.50	23.63	6.44	3.24
6.00	18.00	5.41	2.84

综上所述,入料含水率在1.5%~4.5%范围时,高压辊粉碎过程较为稳定,细粒级产品占比较高,整体粉碎效果优于入料含水率为0.11%(低水分)和6%(高水分)条件。结合实际的粒度分布可确定,该类矿物在高压辊粉碎过程中的较优入料含水率范围为1.5%~4.5%。

5 结论

本文以冀东地区磁铁矿石为研究对象,通过设置颗粒表面能表征物料的含水率,结合SolidWorks建模和EDEM仿真,开展了不同入料含水率条件下高压辊与颗粒间的相互作用的模拟研究,并进行了不同入料含水率条件下的高压辊开路试验,得出如下主要结论。

(1) 仿真结果表明,当颗粒表面能从0增加到25 J/m^{2}时,颗粒的平均速度、平均能量和破碎出小颗粒的占比都呈现比增加后降低的趋势,颗粒在高压辊中的粉碎效果先增强后减弱,在表面能为20 J/m^{2}时达到最优。这表明颗粒的表面能存在某个阈值,一旦超越该阈值,高压辊粉碎效果将会下降。矿石含水率同样存在一个较优值范围。

(2) 不同入料含水率条件下高压辊开路试验结果与仿真结果基本一致。入料含水率为3%和4.5%时,高压辊磨机的粉碎效果均优于其他含水率条件下的粉碎效果。入料含水率超过4.5%后,各项参数大幅减小,辊压产品中细粒级产品减少,高压辊粉碎效果变差。该试验所用高压辊磨机粉碎冀东地区磁铁矿石的较优入料含水率为1.5%~4.5%。

参考文献(References):

[1] PENG D. Oblique impact breakage unification of nonspherical particles using discrete element method[J]. Particuology,2024,90:61-71.

[2] 陈兴.高压辊磨对大冶含铜铁矿粉碎及分选过程影响[D].武汉:武汉科技大学,2023.
CHEN Xing. The influence of high-pressure roller grinding on the crushing and sorting process of Daye copper bearing iron ore[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2023.

[3] 廖贵文,姜永正,胡亚凡,等.基于表面能的湿煤颗粒含水率表征方法[J].中国粉体技术,2021,27(1):71-79.
LIAO Guiwen, JIANG Yongzheng, HU Yafan, et al. Methods for characterizing moisture content of wet coal particles based on surface energy[J]. China Powder Science and Technology,2021,27(1):71-79.

[4] MITIN E V, SULDIN S P, OVCHINNIKOV A Y, et al. Stirrup design using SolidWorks simulation tools[J]. Russian Engineering Research,2023,43(8):934-938.

[5] 杨琴,刘道修.基于离散元的对辊式破碎机破碎仿真分析[J].机电工程技术,2023,52(12):150-153.
YANG Qin, LIU Daoxiu. Simulation analysis of roller crusher crushing based on discrete element method[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology,2023,52(12):150-153.

[6] 郭建波.基于离散单元法的高压辊磨机性能分析及辊面优化研究[D].长春:吉林大学,2024.
GUO Jianbo. Performance analysis and surface optimization of high-pressure grinding rolls based on discrete element method[D]. Changchun: Jilin University,2024.

[7] 袁致涛,申帅平,谢琪春,等.高压辊磨机操作因素对粉碎产品粒度特性的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(8):1188-1191+1201.
YUAN Zhitao, SHEN Shuaiping, XIE Qichun, et al. Effect of operating factors of high pressure grinding roll on size of crushed product[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2013,34(8):1188-1191+1201.

[8] 李晓旭.基于层料粉碎理论的筒辊磨结构设计理论及设计方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
LI Xiaoxu. Research on the design theory and method of cylinder roller grinding structure based on layered material crushing theory[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,2016.

[9] 孙永生.高压辊磨机柱钉辊面维保技术探索与实践[J].现代矿业,2021,37(7):210-221.
SUN Yongsheng. Exploration and practice of maintenance technology for column nail roller surface of high-pressure roller mill.[J]. Modern Mining,2021,37(7):210-221.

[10] 万小东,孙其勋,刘健犇,等.基于界面相互作用的黏附接触数学模型研究进展[J].表面技术,2024,53(1):33-47+77.
WAN Xiaodong, SUN Qixun, LIU Jianben, et al. Research progress on mathematical models of adhesive contact based on interface interaction[J]. Surface Technology,2024,53(1):33-47+77.

[11] 王曼曼.磨煤机内部冲蚀磨损分析与堆焊防护技术研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2023.
WANG Manman. Research on erosion wear analysis and hardfacing protection technology of coal mil[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University,2023.

[12] 吕圣男,刘雪东,宣颖.颗粒尺度、形状对机械搅拌扭矩、功率影响的数值模拟[J].中国粉体技术,2022,28(5):92-101.
LYU Shengnan, LIU Xuedong, XUAN Ying. Numerical simulation of the effects of particle size and shape characteristics on mechanical stirring torque and power[J]. China Powder Science and Technology,2022,28(5):92-101.

[13] 崔微,魏杰,王超,等.考虑颗粒级配和形态的颗粒柱坍塌特性离散元模拟[J].岩土工程学报,2021,43(12):2230-2239.
CUI Wei, WEI Jie, WANG Chao, et al. Discrete element simulation of collapse characteristics of particle columns considering gradation and shape[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(12):2230-2239.

[14] 李永盛,张楠,崔曙光,等.基于EDEM的带式输送机磨损优化仿真设计[J].价值工程,2024,43(16):63-65.
LI Yongsheng, ZHANG Nan, CUI Shuguang, et al. Simulation analysis of factors influencing belt wear of belt conveyor[J]. Value Engineering,2024,43(16):63-65.

[15] 唐必亮,程波,陈松战,等.基于EDEM的半自磨机衬板方案对比研究[J].矿山机械,2024,52(2):33-37.
TANG Biliang, CHENG Bo, CHEN Songzhan, et al. EDEM-based comparative study on liner schemes of SAG mill[J]. Mining & Processing Equipment,2024,52(2):33-37.

[16] 汪建新,杨婷,杜志强.基于EDEM的新型辊式振动破碎机破碎性能仿真研究[J].有色金属(选矿部分),2023(6):30-38.
WANG Jianxin, YANG Ting, DU Zhiqiang. Simulation study on the crushing performance of a new roller vibration crusher based on EDEM[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2023(6):30-38.

[17] RODRIGUEZ V A, BARRIOS G K P, BUENO G, et al. Investigation of lateral confinement, roller aspect ratio and wear condition on HPGR performance using DEM-MBD-PRM simulations[J]. Minerals,2021,11(8):801.

[18] RODRIGUEZ V A, BARRIOS G K P, BUENO G, et al. Coupled DEM-MBD-PRM simulations of high-pressure grinding rolls. part 1: calibration and validation in pilot-scale[J]. Minerals Engineering,2022,177:107389.

[19] RODRIGUEZ V A, BARRIOS G K P, TAVARES L M. Coupled DEM-MBD-PRM simulations of high-pressure grinding rolls. part 2: investigation of roll skewing[J]. Minerals Engineering,2022,178:107428.