

基于落重试验的锰矿石破碎特性试验研究

穆仕豪,赵丽梅*,李松,丁贤贤,吴灿辉

贵州大学机械工程学院,贵州 贵阳 550025



摘要:为探明锰矿石在冲击作用下的破碎特性、粒度分布规律与Mn元素的富集特性,以锰矿石作为研究对象,采用落重试验装置对锰矿石开展了一系列的冲击破碎试验,通过筛分分析了不同比冲击能及颗粒尺寸下破碎产物的粒度分布特征,系统探究了比冲击能量与颗粒尺寸对锰矿石破碎效果的影响,并采用XRF对各粒级破碎产物中的锰元素进行了分析。结果表明:锰矿石的破碎程度与比冲击能量和颗粒尺寸有关,颗粒的破碎程度随比冲击能量的增大而增大;在此基础上,利用实验数据进行了详细的回归分析,建立了 t_n-t_{10} 粒度分布预测模型,并构建了破碎产物粒度分布的 t_n 曲线族,试验验证表明该模型能够有效预测破碎产物的粒度分布,该模型不仅揭示了单颗粒锰矿石在冲击作用下的破碎规律,而且为破碎产物粒度分布的预测提供了依据;XRF检测结果表明Mn元素主要富集在细颗粒(-0.630+0.075 mm)中,其中在-0.315+0.160 mm粒级富集最多,在粗颗粒中富集的量随颗粒的增大而逐渐减少,这为提高锰矿石的资源利用率提供了理论指导。

关键词:冲击破碎试验;锰矿石;破碎特性;粒度分布;富集特性

中图分类号:TD451 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1189-08 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.192
引用格式:穆仕豪,赵丽梅,李松,等.基于落重试验的锰矿石破碎特性试验研究[J].黄金科学技术,2025,33(6):1189-1196.
MU Shihao, ZHAO Limei, LI Song, et al. Experimental Study on the Crushing Characteristics of Manganese Ore Based on the Weight Drop Experiment[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1189-1196.

矿产资源的开采与利用是推动国家经济和社会发展的基石。随着社会的不断发展和人们生活水平的逐步提升,全球对矿产资源的需求量呈现出持续上升的趋势(Lieberwirth et al, 2021)。然而,由于矿产资源的非可再生性,长期的开采使得高品质、易处理矿产资源的供应日益紧张,在此种情况下,破碎环节在提高矿石中有用成分的解离度和回收率方面发挥着至关重要的作用(Yang et al, 2023)。改进矿石破碎工艺、增强破碎效能并降低成本,对于提升矿业加工领域的资源利用率及优化整体生产经济性具有重要现实意义(Ma et al, 2022; 2023)。

在矿产资源开采与加工过程中,矿石破碎是实

现粒度减小和矿物解离的核心环节。破碎过程中所需的能量受到矿石物性、破碎方式、设备尺寸及性能等多种因素的共同影响(Faramarzi et al, 2018; Sun, 2024)。为了揭示矿石在冲击载荷下的力学响应与破碎规律,研究中广泛使用落锤试验、霍普金森压杆试验和双摆锤试验等技术手段(高锋等, 2022; 叶海旺等, 2023; 左蔚然等, 2024; 甘德清等, 2024)。在单颗粒破碎特性方面,研究人员关注的核心问题包括破碎强度、影响因素及产物粒度分布(金爱兵等, 2023; 李松等, 2024)。Napier-Munn et al (1996)通过大规模落锤冲击试验,统计破碎产物粒径特征,在此基础上建立了基于粒度模数 t_{10} 与冲击

收稿日期:2025-06-16;修订日期:2025-08-22

基金项目:国家自然科学基金项目“面向产品粒度分布控制的冲击式破碎机的破碎机理及其性能研究”(编号:52065007)资助

作者简介:穆仕豪(2000—),男,贵州遵义人,硕士研究生,从事机械制造及其自动化研究工作。E-mail:3244023955@qq.com

*通信作者:赵丽梅(1975—),女,辽宁锦州人,副教授,从事机械制造及其自动化研究工作。E-mail:lmzhao@gzu.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

能量密度 E_{cs} 之间定量关系的数学模型。后续研究表明,该模型能够有效刻画比冲击能量与 t_{10} 值的关联(Whyte, 2005)。进一步的实验工作系统分析了颗粒粒径对破碎效率的作用机理,揭示了冲击能量与产物粒度分布之间的定量关系(Zhou et al, 2019; 周强等, 2020; 甘德清等, 2025)。粒度分布的准确预测被认为是优化破碎过程的重要途径。相关研究发现, t_{10} 与粒度分布曲线 t_n 上任意点存在唯一对应关系,如果能够预测破碎指数 t_{10} ,就能从 t_n 族曲线确定破碎产物的整个粒度分布(Narayanan et al, 1988)。基于这一认识, Yin et al(2023)在铁矿石冲击破碎试验中建立了破碎概率数学模型,并分析了 t_n 与 t_{10} 的函数关系。周文涛等(2019)在落重试验和理论分析的基础上,提出融合广义回归模型与粒子群优化算法的粒度预测方法,使破碎产物分布预测的精度和适用性进一步提升。

已有研究主要关注石灰石、花岗岩、铁矿石和

煤矿石的破碎特性,但针对锰矿石的破碎特性、粒度分布预测和主要元素富集特性方面的研究较少。因此,本文选取贵州某产地的锰矿石作为试验对象,采用落重试验方法开展了冲击破碎试验,构建了基于比冲击能量的物料颗粒冲击破碎模型和粒度分布预测模型,深入分析了各粒级破碎产物中的 Mn 元素含量,以揭示粒度变化对 Mn 元素富集规律的影响,从而为优化锰矿石的破碎加工工艺和提高锰矿石的资源利用率提供理论指导。

1 材料与试验

1.1 材料

试验材料选自贵州的锰矿石,为消除锰矿石颗粒表面粉尘对粒度分析结果的干扰,对锰矿石进行水洗与干燥处理。将锰矿石划分为4个粒级,分别为: $-19+16$ mm、 $-25+19$ mm、 $-31+25$ mm 和 $-40+31$ mm,如图1所示。

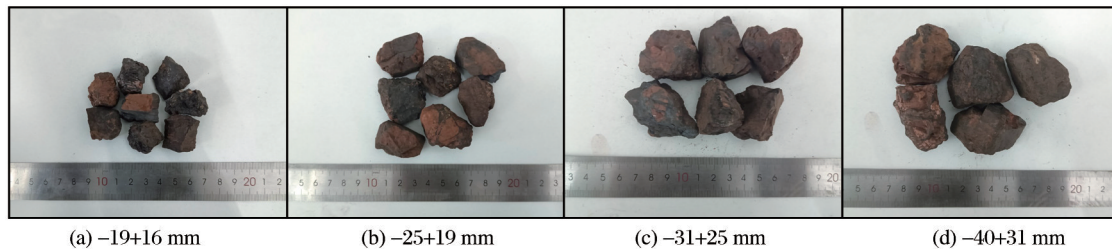


图1 不同粒级锰矿石试验材料

Fig. 1 Experimental materials of manganese ore with different particle sizes

1.2 锰矿石的成分分析

对所取锰矿石进行化学成分分析试验(XRF),得到锰矿石中主要元素的含量,结果见表1。该锰矿石中 Mn 元素主要以 MnO 的形式存在,同时含有石英(SiO_2)、磁铁矿(Fe_3O_4)、高岭石(Al_2O_3)和钾长石(K_2O)等伴生矿物。锰矿嵌布于细粒石英和磁铁矿基质中,颗粒间多为不规则镶嵌式接触,部分矿物之间存在显微裂隙,石英常以脉状或细脉状充填于锰矿之间,形成硬—脆矿物骨架(王臣臣, 2024)。高硬度石英晶体可能抑制整体解离,从而影响锰矿石的破碎特性。

1.3 试验内容

在本研究中,采用落重实验仪对单颗粒锰矿石开展冲击破碎试验,试验装置如图2所示。试验中

表1 锰矿石中主要元素分析结果

Table 1 Analysis results of main elements in manganese ore

成分	含量/%
MnO	25.3670
SiO_2	44.7610
Fe_2O_3	18.1220
Al_2O_3	8.5072

通过调节落锤质量和下落高度获得不同冲击能,对单颗粒锰矿石进行垂直冲击破碎。每个粒级的样品均匀分为4组,每组30颗颗粒,以确保结果可靠。对于每种粒径范围,分别在4种不同比冲击能量(E_{cs})条件下进行试验,试验数据见表2。 E_{cs} 由式(1)计算。

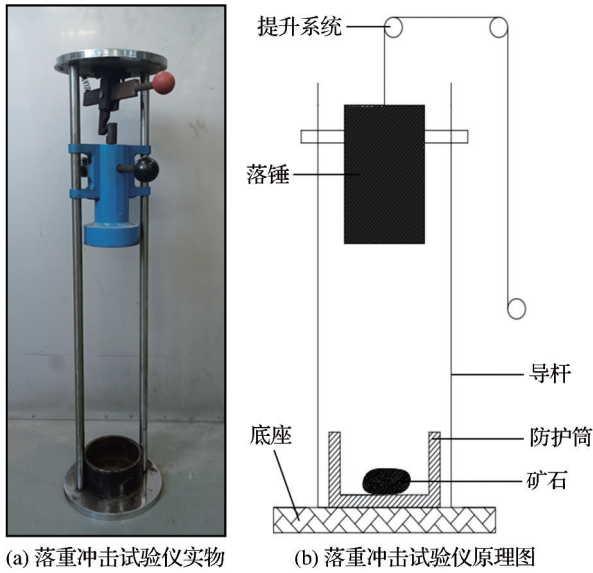


图2 落重试验仪器

Fig. 2 Drop-weight machine equipment

$$E_{cs} = \frac{0.0272M_d(h_i - h_f)}{m} \quad (1)$$

式中： E_{cs} 为比冲击能量(kWh/t)； M_d 为落锤的质量(kg)； h_i 和 h_f 分别为落锤的初始高度和最终高度(cm)； m 为颗粒质量(g)。

表2 冲击破碎试验参数

Table 2 Parameters of impact crushing experiment

粒径/mm	比冲击能量/(kWh·t ⁻¹)			
-19+16	0.1	0.2	0.4	0.8
-25+19	0.1	0.2	0.4	0.8
-31+25	0.05	0.1	0.2	0.4
-40+31	0.05	0.1	0.2	0.4

在对破碎产物的粒度分布进行分析时,通常将小于进料粒度十分之一的粒度定义为特征粒度,记为 t_{10} 。 t_{10} 所对应的筛下累积产率能够有效反映矿物的破碎程度,其数值越大意味着颗粒的破碎程度越高,产物更细。记录各条件下的 t_{10} 和 E_{cs} ,可绘制 $t_{10}-E_{cs}$ 散点图,并利用式(2)回归分析得到特征参数 A 和 b 。

$$t_{10} = A(1 - e^{-b \times E_{cs}}) \quad (2)$$

$t_{10}-E_{cs}$ 关系由Leung(1988)提出,该关系在工程实践中具有重要的应用价值,由于各种破碎设备的 $t_{10}-E_{cs}$ 关系是恒定的(柳晓峰等,2022),且 A 和 b 的值仅受到矿物性质的影响,因此,这一关系可以用

来指导矿石破碎设备的选择和优化。式(2)为颗粒能量关系模型,其中 A 与 b 的乘积是衡量矿石冲击破碎难易程度的关键参数,表3列出了该参数与矿石性质的对应关系。

表3 试验参数与矿石性质的关系

Table 3 Relationship between experimental parameters and ore properties

参数($A \times b$)数值范围	矿石硬度
<30	很硬
30~38	硬
38~43	中硬
43~56	中
56~67	中软
67~127	软
>127	很软

2 结果与讨论

2.1 锰矿石的冲击破碎特性

本研究系统分析了锰矿石在多种 E_{cs} 条件下的冲击破碎行为,并对破碎产物进行了细致的筛分和定量分析,构建了不同粒径锰矿石的筛下累积产率曲线。

试验选取了4种不同粒径范围的锰矿石(-19+16 mm、-25+19 mm、-31+25 mm和-40+31 mm),以深入探究其冲击破碎特性,结果如图3所示。由图3可知,不同 E_{cs} 下各粒径样品的粒度分布曲线形态整体相似,其位置主要受 E_{cs} 值和进料粒径的影响。在进料粒径固定的情况下,曲线随 E_{cs} 的增大整体向左上方偏移,表明较高的 E_{cs} 值可显著增加各粒级的筛下产率,从而实现更充分的破碎。

利用3次样条插值方法对各粒级锰矿石颗粒在不同比冲击能量条件下的 t_{10} 值进行计算,以此来描述和表征锰矿石破碎产物中特定粒度分布的特征。考虑到矿石颗粒实际上是由一个粒度范围内的多种颗粒组成的集合体,采用上下筛孔尺寸的几何平均数来定义破碎产物的粒度大小,例如-40+31 mm粒级记为35.5 mm,并进一步计算得到其1/10粒径,即3.55 mm。随后,将 t_{10} 与 E_{cs} 结合进行回归分析,根据式(2)构建函数关系,并拟合得到关键参数 A 与 b 的拟合曲线如图4所示,拟合结果如表4所示。

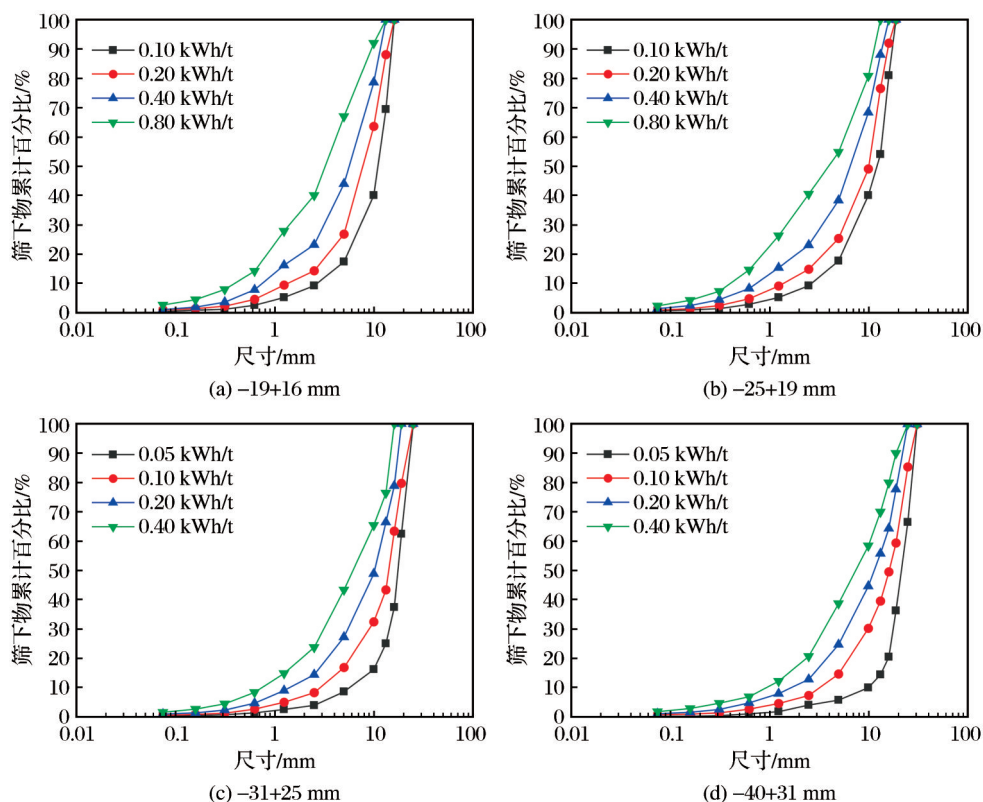


图3 锰矿石冲击破碎产物的粒度分布

Fig. 3 Particle size distribution of impact crushing product of manganese ore

对图4进行分析可知, t_{10} 随 E_{cs} 的增大而上升, 说明比冲击能越高, 锰矿石破碎越彻底。此外, 综合表3与表5数据, 可以将锰矿石的抗冲击破碎性能划分为“软”等级。将得到的 A 和 b 参数值代入式(2)中, 从而推导出描述锰矿石冲击破碎过程中 t_{10} 值与 E_{cs} 之间的函数关系式, 如式(3)所示。这一函数关系式为预测和计算不同比冲击能量条件下锰矿石的破碎产物粒度分布提供了理论基础, 对于指导实际破碎工艺的优化具有重要意义。

$$t_{10} = 45.5653(1 - e^{-1.9405 \times E_{cs}}) \quad (3)$$

2.2 破碎产物的粒度分布

使用3次样条插值的方法获取了 t_2 、 t_5 、 t_7 、 t_{25} 、 t_{50} 和 t_{75} 这6个关键粒度分布参数, 并拟合出 t_n 与比冲击能量 E_{cs} 的关系曲线, 如图5所示。结果表明, t_n 随 E_{cs} 的增大而上升, 但当 E_{cs} 达到一定值后增长趋缓, 说明比冲击能量越大, 其有效破碎能耗吸收阈值越快达到; 在相同的比冲击能量条件下, t_n 值随下标 n 的增大而逐渐减小, 说明在一定的比冲击能量作用下, 破碎产物的粒度越小, 其累积效应相应减弱。

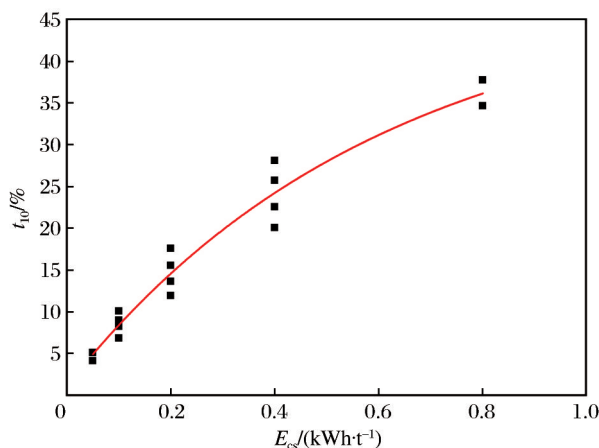


图4 锰矿石在冲击载荷作用下 t_{10} 与 E_{cs} 关系的拟合曲线
 Fig. 4 Fitting curve of the relationship between t_{10} and E_{cs} of manganese ore under impact loading

已有研究表明, 破碎产物的粒度分布特征点与 t_{10} 存在显著相关性 (Tavares et al, 2020)。在此基础上, 通过探究 t_n 与 t_{10} 之间的相互关系, 构建一系列 t_n-t_{10} 的相关模型, 进而能够预测不同冲击能量条件下的粒度分布情况。在本研究中, 构建了 t_2-t_{10} 、 t_5-

表 4 锰矿石颗粒冲击破碎 $t_{10}-E_{cs}$ 拟合结果

Table 4 Fitting results of $t_{10}-E_{cs}$ of manganese ore under impact crushing

参数	数值
A	45.56530
b	1.94050
$A \times b$	88.41950
R^2	0.95780

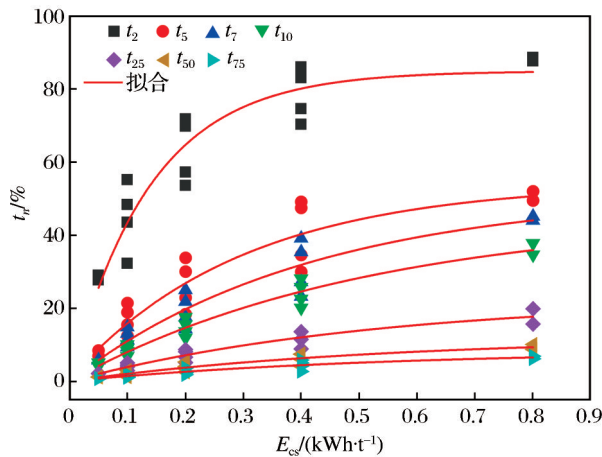


图 5 破碎产物 t_n 与 E_{cs} 关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between t_n and E_{cs} of crushing product

t_{10} 、 t_7-t_{10} 、 $t_{25}-t_{10}$ 、 $t_{50}-t_{10}$ 和 $t_{75}-t_{10}$ 之间的关联曲线,形成了一个 t_n 族曲线,如图 6 所示。这些曲线模型揭示了 t_n 与 t_{10} 之间的动态关系:当 $n < 10$ 时, t_n 随着 t_{10} 值的增大呈现出指数级的增长趋势,且这一趋势随着 n 值的减小更加显著;当 $n \geq 10$ 时, t_n 与 t_{10} 之间倾向于一种近似线性的关系。

为了建立能够量化 t_n 与 t_{10} 的关系模型,采用非线性回归分析的方法对图 6 所示的试验数据进行拟合,构建了锰矿石颗粒 t_n-t_{10} 破碎产物粒度分布预测模型,其表达式满足如式(4)所示的分段函数(Yin et al, 2023):

$$\begin{cases} t_n = \frac{100[1 - \exp(-0.01r_n t_{10})]}{1 - \exp(-r_n)}, n < 10 \\ t_n = r_n t_{10}, n \geq 10 \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_n 表示破碎参数; t_n 表示物料颗粒破碎为其初始尺寸 $1/n$ 的筛下累积产率。

基于式(4)构建了 t_n 曲线族,并从中求出反映颗粒破碎特性的关键参数 r_n , 具体见表 5。结果显

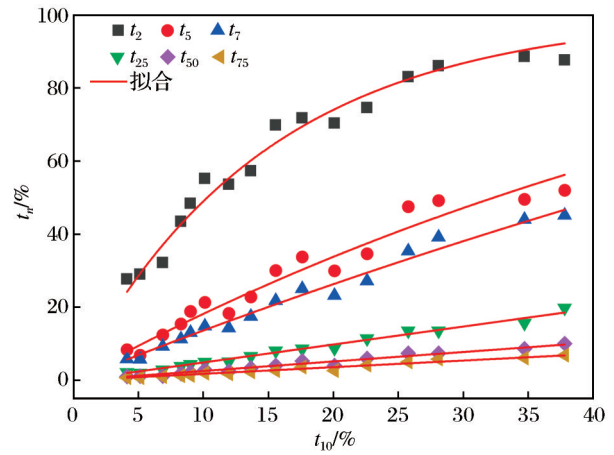


图 6 t_n 曲线族

Fig. 6 t_n curves family

表 5 t_n-t_{10} 拟合参数

Table 5 Fitting parameters of t_n-t_{10}

n	t_n	r_n	R^2
2	t_2	6.7322	0.9743
5	t_5	1.5507	0.9537
7	t_7	0.7452	0.9824
25	t_{25}	0.4917	0.9835
50	t_{50}	0.2593	0.9705
75	t_{75}	0.1813	0.9642

示, r_n 随 n 的增大而递减, 在本试验范围内取值介于 0.1~7.0。

为验证模型的准确性与可靠性, 基于式(5)建立的粒度分布预测模型, 选取 -25+19 mm 和 -31+25 mm 这 2 个粒度范围的锰矿石样品进行冲击破碎试验, 并对产物进行筛分分析。试验结果与预测值对比如图 7 所示, 该图展示了在 0.4 kWh/t 和 0.2 kWh/t 2 种不同的比冲击能量作用下, 2 种粒径范围的锰矿石样品破碎产物的粒度分布数据。2 种粒径样品的破碎产物粒度分布趋势一致, 试验值与预测值的最大偏差分别为 3.63% 和 4.82%。该偏差可能主要来源于设备测量精度限制及标准筛分过程中存在的精度误差。综合来看, 在合理误差范围内, 本研究构建的预测模型能够较为准确地预测锰矿石在不同冲击能条件下的粒度分布, 具有较高的实用性与可靠性。

2.3 Mn 元素的富集特性

Mn 是该矿石中的关键金属物质, 为探究锰矿

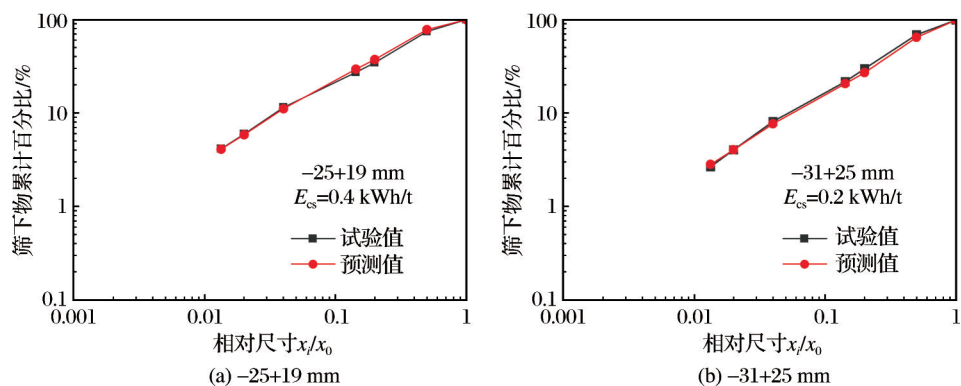


图7 锰矿石颗粒破碎产物粒度分布预测

Fig. 7 Prediction of particle size distribution of manganese ore particle crushing product

石中主要元素的粒度依赖性分布特征,采用落锤试验仪在0.1 kWh/t、0.2 kWh/t和0.4 kWh/t 3种比冲击能量条件下对锰矿石进行破碎处理。破碎后产物经筛分划分为6种粒级: -0.16+0.075 mm、-0.315+0.16 mm、-0.63+0.315 mm、-1.25+0.63 mm、-2.5+1.25 mm和-5.0+2.5 mm。然后,利用XRF技术对各粒级破碎产物中的MnO进行系统分析,以揭示粒度变化对元素富集规律的影响。

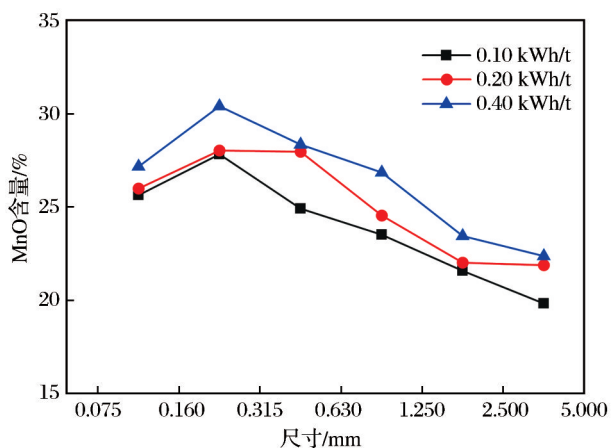


图8 MnO在各粒级中的含量

Fig. 8 Content of MnO in each particle size grade

图8展现了3种比冲击能量下不同粒级中MnO的含量。由图8可以看出,MnO主要富集在细颗粒(-0.63+0.075 mm)中,其中在-0.315+0.16 mm粒级中富集最多,在粗颗粒中的富集量随颗粒的增大而逐渐减少。同时,随着比冲击能量的增加,MnO的含量也增加,表明高能冲击促进了锰矿物的选择性解离,该现象可通过矿物硬度差异[菱锰矿(MnO)

莫氏硬度为3.5(王臣臣,2024)和石英(SiO₂)莫氏硬度为7.0(吴超明等,2025)]解释,高能量输入增强脆性矿物破碎效率,在破碎过程中,低硬度的矿物(MnO)优先破碎,集中在细颗粒中,而硬度高的石英(SiO₂)在粗颗粒中分布较多。

3 结论

为探明锰矿石在冲击作用下的破碎特性及粒度分布规律,采用落重试验装置对单颗粒锰矿石进行了冲击破碎试验,通过分析颗粒粒度和比冲击能量对锰矿石颗粒冲击破碎特性的影响,揭示了锰矿石颗粒的破碎特性,并基于破碎产物的筛分分析,建立了锰矿石颗粒破碎产物粒度分布的预测模型。得出以下结论:

(1)通过落重试验得到锰矿石的冲击破碎特征参数以及表征破碎过程的颗粒能量关系方程。锰矿石的冲击破碎特性参数为 $A=45.5653, b=1.9405, A \times b=88.4195$,据此将锰矿石的抗冲击破碎性能划分为“软”等级;锰矿石的颗粒能量关系方程为 $t_{10}=45.5653 \times [1 - \exp(-1.9405 \times E_{cs})]$,根据该方程可以估算任意 E_{cs} 条件下锰矿石颗粒的冲击破碎程度。

(2)通过对破碎产物的 t_n-t_{10} 进行回归分析,构建了粒度分布预测模型,并选取2种不同粒级的锰矿石颗粒进行了冲击破碎试验以验证模型,结果显示试验值和预测值存在较小的误差。在合理的误差范围内,该破碎产物粒度分布预测模型可以有效预测锰矿石颗粒破碎产物的粒度分布。

(3)采用XRF对锰矿石破碎产物各粒级中的

MnO 进行分析,得到了 MnO 主要富集在细颗粒 ($-0.630+0.075$ mm) 中,其中在 $-0.315+0.160$ mm 粒级中富集最多,在粗颗粒中富集随颗粒的增大而逐渐减少。这一发现对锰矿选冶工程具有重要指导意义,更为实现资源高效利用、工艺绿色化及经济效益最大化提供了科学依据和技术路径。

参考文献 (References):

- Faramarzi F, Jokovic V, Morrison R, et al, 2018. Quantifying variability of ore breakage by impact—implications for SAG mill performance[J]. *Minerals Engineering*, 127:81-89.
- Leung K, 1988. An energy based, ore specific model for autogenous and semi-autogenous grinding mills [D]. Brisbane: University of Queensland Library.
- Lieberwirth H, Kühnel L, Lieberwirth H, et al, 2021. Particle size effects on selectivity in confined bed comminution[J]. *Minerals*, 11(4): 342.
- Ma S J, Li H J, Shuai Z C, et al, 2022. Research on grinding characteristics and comparison of particle-size-composition prediction of rich and poor ores [J]. *Minerals*, 12(11): 1354.
- Ma S J, Li H J, Yang X J, et al, 2023. Study on impact crushing characteristics of minerals based on drop weight tests [J]. *Minerals*, 13(5): 632.
- Napier-Munn T J, Morrell S, Morrison R D, et al, 1996. Mineral comminution circuits: their operation and optimisation[J]. *Journal of Experimental Nanoscience*, 10(3): 1-8.
- Narayanan S S, Whiten W J, 1988. Determination of comminution characteristics from single particle breakage tests and its application to ball mill scale-up [J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Sec. C)*, 97: 115-124.
- Sun C B, 2024. Ore crushing [M]//The ECPH encyclopedia of mining and metallurgy. Singapore: Springer Nature Singapore.
- Tavares L M, de Carvalho R M, Bonfils B, et al, 2020. Back-calculation of particle fracture energies using data from rotary breakage testing devices [J]. *Minerals Engineering*, 149: 106263.
- Whyte R, 2005. Measuring incremental damage in rock breakage by impact [D]. Brisbane: University of Queensland.
- Yang J L, Zhu P Y, Li H J, et al, 2023. Impact crushing characteristics and relationship between multicomponent complex ore and its component minerals [J]. *Minerals*, 13(5): 676.
- Yin Z X, Wang N, Li T Q, et al, 2023. Experimental investigation of the impact breakage characteristics between grinding media and iron ore particle in ball mills [J]. *Advanced Powder Technology*, 34(4): 103982.
- Zhou W T, Han Y X, Sun Y S, et al, 2019. Multi-scale impact crushing characteristics of polymetallic sulphide ores [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(9): 1929-1938.
- 甘德清, 于泽峰, 刘志义, 等, 2025. 落锤作用下磁铁矿石冲击破碎特征的能比效应 [J]. *金属矿山*, 54(2): 48-55.
- Gan Deqing, Yu Zehao, Liu Zhiyi, et al, 2025. Energy ratio effect of impact crushing characteristics of magnetite ores under the action of drop hammer [J]. *Metal Mine*, 54(2): 48-55.
- 甘德清, 袁涛, 薛振林, 等, 2024. 微观尺度下磁铁矿石动态破碎特性与能耗 [J]. *科学技术与工程*, 24(32): 13756-13765.
- Gan Deqing, Yuan Tao, Xue Zhenlin, et al, 2024. Dynamic crushing characteristics and energy consumption of magnetite at microscale [J]. *Science Technology and Engineering*, 24(32): 13756-13765.
- 高峰, 甘德清, 郭君, 等, 2022. 岩石冲击破碎能量特征研究进展 [J]. *工程爆破*, 28(4): 14-24.
- Gao Feng, Gan Deqing, Guo Jun, et al, 2022. Research progress on fragmentation energy characteristics of rock under impact [J]. *Engineering Blasting*, 28(4): 14-24.
- 金爱兵, 李木芽, 孙浩, 等, 2023. 不同形状矿石单颗粒压缩破碎特性 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 54(9): 3585-3596.
- Jin Aibing, Li Muya, Sun Hao, et al, 2023. Compression crushing characteristics of single ore particle with different shapes [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 54(9): 3585-3596.
- 李松, 赵丽梅, 吴灿辉, 2024. 单颗粒物料冲击破碎特性及能耗试验研究 [J]. *黄金科学技术*, 32(6): 1068-1076.
- Li Song, Zhao Limei, Wu Canhui, 2024. Experimental study on impact crushing characteristics and energy consumption of single particle material [J]. *Gold Science and Technology*, 32(6): 1068-1076.
- 柳晓峰, 康建雄, 2022. 安山玢岩花岗斑岩混合矿石的磨矿产品粒度特性研究 [J]. *有色金属科学与工程*, 13(2): 107-112.
- Liu Xiaofeng, Kang Jianxiong, 2022. Ground product size characteristics of mixing ore of andesite porphyry and granite porphyry [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 13(2): 107-112.
- 王臣臣, 2024. 贵州某低品位碳酸锰矿磨矿分级技术研究 [D]. 贵阳: 贵州大学.
- Wang Chenchen, 2024. Grinding classifi-

- cation technology of a low grade manganese carbonate ore from Guizhou, China[D]. Guiyang: Guizhou University.
- 吴超明, 吴倩, 宋国定, 等, 2025. 试论郑州地区仰韶中晚期石铲再加工技术[J]. 农业考古, (3): 30-40. Wu Chaoming, Wu Qian, Song Guoding, et al, 2025. Analysis on re-processing technology of stone shovels in the middle and late stage of Yangshao culture in Zhengzhou Region [J]. Agricultural Archaeology, (3): 30-40.
- 叶海旺, 钱正昆, 雷涛, 等, 2023. 冲击载荷下石墨矿石动力学特性的层理效应及宏观破坏机理[J]. 爆炸与冲击, 43(12): 27-39. Ye Haiwang, Qian Zhengkun, Lei Tao, et al, 2023. Bedding effect and macro-micro mechanism of graphite ore dynamic mechanical properties under impact loads[J]. Explosion and Shock Waves, 43(12): 27-39.
- 周强, 潘永泰, 郭庆, 等, 2020. 不同冲击比能下煤岩颗粒破碎的分形演化[J]. 煤炭工程, 52(4): 143-148. Zhou Qiang, Pan Yongtai, Guo Qing, et al, 2020. Fractal evolution of particle fragmentation of ore and rock under different impact energy[J]. Coal Engineering, 52(4): 143-148.
- 周文涛, 韩跃新, 李艳军, 等, 2019. 冲击破碎粒度分布模型建立与预测[J]. 中国有色金属学报, 29(6): 1316-1323. Zhou Wentao, Han Yuexin, Li Yanjun, et al, 2019. Establishment and prediction of particle size distribution model for impact crushing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 29(6): 1316-1323.
- 左蔚然, 戴元松, 许京伟, 等, 2024. 碎磨功耗理论的发展与展望[J]. 金属矿山, 53(5): 16-27. Zuo Weiran, Dai Yuan-song, Xu Jingwei, et al, 2024. Development and prospects of comminution energy consumption theory [J]. Metal Mine, 53(5): 16-27.

Experimental Study on the Crushing Characteristics of Manganese Ore Based on the Weight Drop Experiment

MU Shihao, ZHAO Limei, LI Song, DING Xianxian, WU Canhui

School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China

Abstract: To examine the crushing characteristics, particle size distribution, and manganese enrichment of manganese ore under impact conditions, a series of impact crushing experiments were conducted using a falling weight apparatus. The particle size distribution of the crushed products, subjected to varying specific impact energies and initial particle sizes, was systematically analyzed through sieving. This analysis aimed to elucidate the effects of specific impact energies and particle sizes on the crushing behavior of manganese ores. Additionally, the manganese content in the crushed products of each particle size was quantified using X-ray fluorescence (XRF) analysis. The findings indicate a correlation between the crushing degree of manganese ore and both specific impact energy and particle size, with the degree of crushing increasing alongside specific impact energy. Subsequently, a detailed regression analysis was performed on the experimental data, and a t_n-t_{10} particle size distribution prediction model was developed, accompanied by the construction of a series of t_n curves representing the size distribution of crushed products. Experimental validation demonstrated that the model effectively predicts the particle size distribution of the products. This model not only elucidates the crushing behavior of single-particle manganese ore under impact conditions but also serves as a foundation for predicting the particle size distribution of crushed materials. X-ray fluorescence (XRF) analysis indicates that manganese is predominantly concentrated in the fine particles ($-0.630+0.075$ mm), with the highest concentration observed in the grain size range of $-0.315+0.160$ mm. Conversely, manganese enrichment in the coarse particles ($-5.00+0.63$ mm) decreases progressively as particle size increases. This research offers theoretical insights for enhancing the resource utilization of manganese ores.

Key words: impact crushing experiment; manganese ore; crushing characteristics; particle size distribution; enrichment characteristic