

# 加载速率对不规则钼矿石破坏特性的影响研究

郑超<sup>1</sup>, 周强<sup>1,2</sup>, 肖庆飞<sup>1</sup>, 刘向阳<sup>1</sup>, 汪轶凡<sup>1</sup>, 王庆凯<sup>2</sup>

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;  
2. 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室, 北京 102628

中图分类号: TD921.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)03-0095-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.03.010

**摘要** 加载速率是影响矿石破碎特性的关键因素之一。为探究加载速率对不规则钼矿石破坏特性的影响,开展了不规则钼矿石在不同加载速率下的单轴压缩实验,系统研究了加载速率对钼矿石的破坏形态、载荷峰值、位移变化、断裂能、破碎强度及 Weibull 分布模型的影响。实验结果表明:随着加载速率增大,不规则钼矿石破坏程度愈剧烈,其载荷峰值呈现增大趋势,且在高加载速率下增加幅度更为显著,峰值位移(峰值强度对应位移)逐步减小;断裂能在低加载速率(0.1 mm/min 和 0.5 mm/min)时变化不显著,高加载速率(10 mm/min)时断裂能增加幅度较为显著;随着加载速率增加,不规则钼矿石的破碎强度表现为先急剧增大、后缓慢增加的变化趋势,近似满足幂函数关系;两参数 Weibull 分布模型可以较好地描述不规则钼矿石破碎强度分布,其中 Weibull 分布模量  $m$  为常数,与加载速率无关,特征强度  $\sigma_0$  随着加载速率的增大呈现增大趋势。本论文研究结果进一步丰富和扩展了不规则矿石破碎的理论与方法。

**关键词** 加载速率; 不规则钼矿石; 破碎强度; 断裂能; Weibull 分布模型

## 引言

破碎与磨矿过程是选矿过程中能耗最高的作业<sup>[1]</sup>。而单颗粒破碎仍然是选矿领域碎磨的主要作用方式之一,研究单颗粒的破碎过程有助于改进碎磨设备、提高粉碎效率、降低能耗<sup>[2]</sup>。

影响单颗粒破碎效果的主要因素包括物料的性质、加载强度、破碎方式、加载速率、颗粒粒度、颗粒形状、温度与周围介质等。加载速率指载荷施加于试样或机件时的速率,用单位时间内应力增加的数值表示。实验研究发现,加载速率是影响物料破碎特性的重要因素<sup>[3]</sup>,不同的加载速率会导致矿石颗粒产生截然不同的变形、断裂和损伤行为,对矿石颗粒破碎行为产生影响。因此,对不同加载速率条件下岩石的破碎行为进行研究已成为一个重要的研究方向<sup>[4-6]</sup>。国内外学者运用理论分析、实验等方法对其开展了大量研究<sup>[7-9]</sup>。XIAO 等<sup>[10]</sup>将声发射技术引入到煤岩体单向加载速率的研究中,发现煤岩断裂、破碎过程中的声

发射活跃性信号增强,而在强度较大的阶段,其相应的应变率降低。吕志强<sup>[11]</sup>研究了煤岩体在不同加载速率下的抗拉强度变化规律,发现加载速率改变对煤岩体抗拉强度和破坏形态有显著影响。周辉等人<sup>[12]</sup>针对硬脆性大理岩进行了单轴抗拉强度特性的加载速率效应实验,得到了岩样的峰值抗拉强度随着加载速率的提高而呈对数增加的规律的结论。苏承东等<sup>[13]</sup>以大理岩为研究对象,进行了不同加载速率下的单轴压缩实验,发现泊松比与应变速率成指数关系。徐秉权<sup>[14]</sup>研究发现,当载荷条件、矿石粒度相同时,在快加载过程中,荷载的增加速度很快,而不规则矿石的变形则相对减少。王介强<sup>[15]</sup>实验研究发现,随着加载速率的提高,破碎产物的粒度分布指数减小,表明了破碎产物中细颗粒的含量增多。Parapari 等<sup>[16]</sup>研究了加载速率对颗粒比断裂能、破碎模式、解离和破碎的影响,结果表明加载速率越高,平均比裂缝能越低,能量消耗变化越大。

然而,目前关于加载速率效应的研究对象大多为

收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52304290); 云南省科技厅基础研究专项一面上项目(202201AT070766); 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室开放研究基金项目(BGRIMM-KZSKL-2022-01)

作者简介: 郑超(2000—),男,云南省大理人,昆明理工大学硕士研究生,主要从事碎磨理论及碎磨过程数值模拟研究, E-mail: 2396500544@qq.com。

通信作者: 周强(1991—),男,山东枣庄人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事碎磨理论及碎磨过程数值模拟研究, E-mail: zq1246051563@163.com。

砂岩、泥岩和煤岩等,且主要为标准试件,关于不规则钼矿石的应变率效应的研究还未见报道。基于此,本论文使用 YCAW-300F 型微机控制电子压力试验机分别对 10~12 mm 的不规则钼矿石颗粒开展 5 种不同加载速率实验,系统研究了加载速率对不规则钼矿石的破坏形态、载荷峰值、断裂位移、断裂能、破碎强度的影响规律,构建断裂能、断裂强度与 Weibull 分布模型中参数与加载速率的函数模型,进一步丰富和扩展了不规则矿石破碎的理论与方法。

## 1 实验材料与方案

### 1.1 实验条件

实验采用 YCAW-300F 型微机控制电子压力试验机,主要对不规则矿石颗粒的最大破碎力及变形情况进行测量。该系统可施加最大轴向压力 300 kN,实验力示值精度为 $\pm 1\%$ ,承压板最小移动速度为 0.02 mm/min,最大移动速度为 30 mm/min。YCAW-300F 型微机控制电子压力试验机装置如图 1(a)所示。

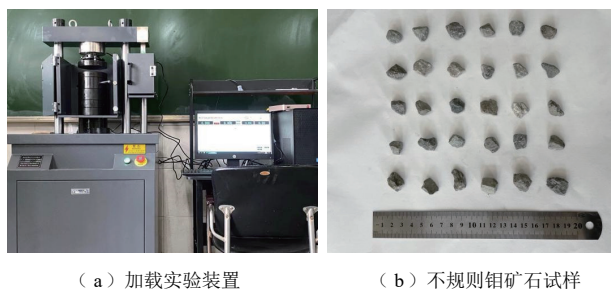


图 1 加载实验装置及不规则钼矿石试样

Fig. 1 Loading experimental device and irregular molybdenum ore sample

实验用不规则矿样取自洛阳某钼矿,如图 1(b)所示,实验选取几何平均粒径范围为 10~12 mm 的不规则钼矿石颗粒,其矿石力学性质测定结果表明:矿石最大容重 3.55 g/cm<sup>3</sup>,最小容重 2.67 g/cm<sup>3</sup>,平均容重为 3.08 g/cm<sup>3</sup>,容重较大;矿石普氏硬度系数最大为 12.70,属于硬矿块,最小为 4.70,属于软矿块,软硬分布不均匀,平均硬度 7.80,整体属于中等硬度矿石;静弹性模量最大为 9.71 $\times 10^4$  MPa,最小为 5.57 $\times 10^4$  MPa,平均 8.11 $\times 10^4$  MPa,脆性较大;矿石泊松比最大值为 0.29,最小 0.11,平均泊松比为 0.16,平均脆性较大。

### 1.2 实验方案

将不规则钼矿石颗粒以短轴为轴向方向放置于压力试验机的承压板上,使压力试验机承压板中心与试件重心重合,以高位移加载速率加载至距离不规则钼矿石较近的位置,后以低位移加载速率继续缓慢加载,使其上压板刚好接触矿石颗粒。调整控制面板上相关参数,如加载速率等。本实验中加载速率分别为

0.1、0.5、1、5、10 mm/min。通过压力试验机施加均匀的压力,开始压力加载,自动记录加载过程中的压力和变形数据。当颗粒被完全破碎后,或者系统检测到轴向力发生急速下降时,停止装置加载。该试验系统加载装置的承载能力较好,因此可忽略装置自身变形的影响。本实验每个加载速率下的实验次数为 30 次,共计 150 组实验。

物料的强度取决于其对外力或能量的抵抗能力,这取决于物料内部质点间化学键的结合状态。因此,强度的本质与化学键的类型和力学性质密切相关。本文将通过最大破碎力、断裂能和破碎强度来描述不规则矿石颗粒的强度特征。最大破碎力指的是物料在承受外力作用时,能够达到的最大抗力或最大承载能力,它反映了物料抗压或抗拉的极限。断裂能是指材料在发生断裂时吸收的能量,反映了材料抗断裂和抗破坏的能力。破碎强度是指材料在受到外部加载或应力作用下破坏的抗力或抗力,通常用来描述材料的抗压或抗拉能力。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不规则钼矿石颗粒破碎过程

整个实验过程中,实验数据均由精密传感器自动测量并传输到电脑上。对 150 组实验数据进行了整理,发现其载荷-位移曲线可大致分为两类。图 2 展示两类典型不规则钼矿石载荷-位移曲线,以加载速率 10 mm/min 为例。如图 2(a)中所示,第一类典型不规则钼矿石的载荷-位移曲线为锯齿形曲线。在发生宏观破坏前,颗粒压缩时产生的局部破碎会引起载荷-位移曲线发生波动,会出现箭头 1 所示的力峰,这是由于钼矿石颗粒的不规则性,在加载点附近产生了应力集中,压头与颗粒面接触处的棱边不断剥落,从而引起了局部破裂。继续加载会出现箭头 2 所示的载荷暴跌现象,此时,不规则钼矿石发生完全断裂,实验结束。出现此类曲线的多为棱角较少,整体形状较为规整的不规则钼矿石。第二类典型不规则钼矿石载荷-位移曲线如图 2(b)所示,此类曲线在加载过程中会出现箭头 1 所示的多个力峰以及在断裂点箭头 2 之前的连续峰值区域。这主要是因为不规则矿石的棱角较多,实验发现,极不规则钼矿石容易出现此类曲线。因此,在实验过程中,应该同时观察载荷-位移曲线以及矿石的宏观裂纹来确定实验是否结束。标志实验结束的条件应满足:(1)实验装置在不规则矿石颗粒表面的加载点之间出现贯穿性裂纹或不规则矿石断裂为两块或多块;(2)破碎载荷-位移曲线中出现如图 2 中展示的“载荷暴跌”现象(曲线急剧下降),以保证不规则颗粒发生的是灾难性破坏。

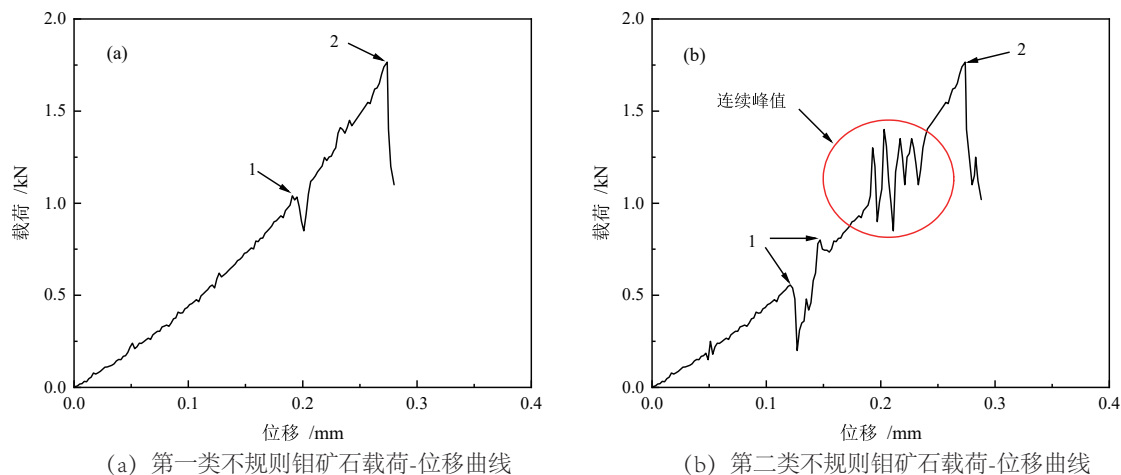


图2 典型不规则钼矿石载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve of typical irregular molybdenum ore

## 2.2 加载速度对不规则钼矿石破碎的影响

### 2.2.1 破坏形态及力学曲线分析

基于不规则钼矿石在不同加载速率下的压力机实验数据及试件产品,整理得到不同加载速率下载荷和位移曲线以及对应的不规则钼矿石破坏形态见图3,观察图中在0.01 mm/min低加载速率作用下的试件残余母体,发现试件整体性较好,仅有少量表面破裂并伴有周边碎屑脱落,矿石破碎多为轴向断裂为两块或几块大颗粒。加载速率为1 mm/min时,发现不规则钼矿石在破裂时伴有小颗粒产品生成。观察以10 mm/min加载速率高速加载作用下的试件残余母体,发现试件局部剪切破坏趋势减弱,其各向微裂纹同步发展至表面出现明显的锥形破裂面,细小颗粒增多,说明在较大的加载速率下,应力跌落时的弱化程度显著增大,其宏观破裂面越明显,越易形成锥形破裂面,试件破坏越剧烈,产生的细小颗粒越多,不规则钼矿石断裂面增多。破坏形态分析结果表明,随着加载速

率的增大,试件破坏愈来愈剧烈。

观察图3不规则钼矿石不同加载速率下试样载荷-位移变化曲线可知,在不同加载速率下,不规则钼矿石试样载荷-位移曲线变化趋势基本相同,呈现锯齿形曲线,表现为脆性破坏特性。根据数据可知,不同加载速率下不规则钼矿石最大载荷范围在1.448 9~1.766 2 kN之间,随着压力试验机加载速率增大,不规则钼矿石荷载峰值呈现增大趋势,且在高加载速率下增加幅度更为显著。这是因为加载速率大时,矿石颗粒对外界力的抵抗能力更强,破碎需要的力更大。随着压力试验机加载速率的增大,不规则钼矿石荷载峰值呈现逐步左移趋势,即峰值位移(峰值强度对应位移)逐步减小,由0.353 9 mm下降到了0.273 9 mm。

### 2.2.2 断裂能与加载速率的关系

断裂能是衡量加载强度的一个常用物理量<sup>[17]</sup>。通过接触力-位移曲线进行数值积分,可以直接使用式(1)计算不规则钼矿石破碎过程中的断裂能<sup>[18]</sup>:

$$E_c = \int_0^{S_B} F ds \quad (1)$$

式中: $E_c$ 对应不规则钼矿石的断裂能,J; $F$ 对应颗粒发生灾难性破坏时对应的接触力,N; $S_B$ 对应颗粒发生灾难性破坏时对应的位移,m; $s$ 对应颗粒发生的位移,m。

5个加载速率对应的平均断裂能分别为0.216 4 J、0.221 3 J、0.289 8 J、0.338 5 J、0.389 1 J。图4为根据实验数据绘制的加载速率( $v$ )和断裂能的关系。由图4可以得出,断裂能在低加载速率0.1 mm/min和0.5 mm/min时变化不显著,加载速率为0.5 mm/min、1 mm/min、5 mm/min、10 mm/min时相较0.1 mm/min时不规则钼矿石的断裂能增幅分别为2.26%、33.92%、56.42%、79.81%。研究结果发现断裂能随加载速率的增加近似呈幂函数增加。原因可能是在高加载速率下不规则钼矿石裂纹扩展速度快,微观裂纹增多,导致断裂能增大。

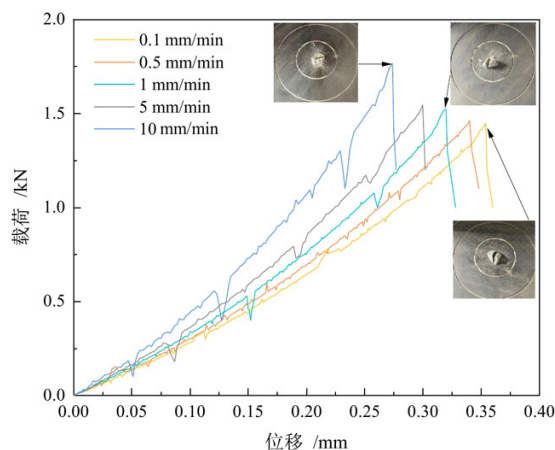


图3 不同加载速率下载荷和位移曲线及破坏形态

Fig. 3 Load and displacement curves and failure modes at different loading rates

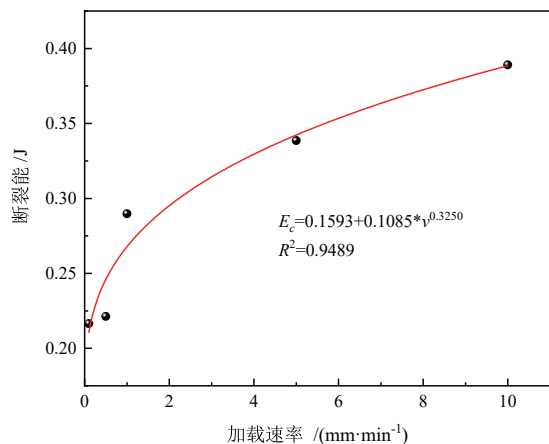


图4 不规则钼矿石加载速率与断裂能的关系

Fig. 4 Relationship between loading rate and fracture energy of irregular molybdenum ore

### 2.2.3 不规则钼矿石破碎强度与加载速率的关系

断裂应力被广泛用来表示颗粒的强度<sup>[19]</sup>,通过加载装置与试样之间的“局部压平”,使其处于沿压缩轴产生平均拉应力的应力状态,且轴向平均拉应力随接触半径与试样半径比的增大而减小。由于不规则的颗粒形状拥有更大的接触半径,可能导致沿轴受拉的有效体积更小,进而产生更大的破碎荷载。因此对于不规则颗粒的强度计算可通过 Hiramastu 和 Oka<sup>[20]</sup>提出的载荷系数为 1.4(即接触半径比为 0.2),单颗粒破碎强度  $\sigma$  可定义为颗粒破坏时产生的断裂应力,即:

$$\sigma = 0.9 \frac{F_c}{d^2} \quad (2)$$

式中,  $F_c$  为颗粒最大破碎力, N;  $d$  为初始颗粒直径, 可定义为两个加载接触点之间的距离, mm。

统计不同加载速率下的不规则钼矿石试样峰值荷载,并根据试样的最小尺寸等参数,通过式(1)计算其对应破碎强度,可得破碎强度  $\sigma$  与加载速率  $v$  的关系曲线,见图 5。由图 5 可知,随着加载速率增加,不规则钼矿石的破碎强度呈增大趋势。不规则钼矿石破碎强度随加载速率增加表现为先急剧增大、后缓慢

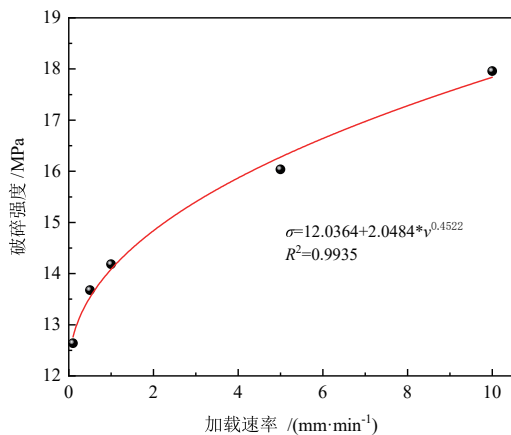


图5 加载速率与破碎强度的关系

Fig. 5 Relationship between loading rate and crushing strength

增加的变化趋势,可近似拟合为幂函数,相关系数为 0.99,拟合程度较高。

### 2.3 不规则钼矿石强度的 Weibull 分布

对 150 组不同加载速率下不规则钼矿石发生灾难性破坏时对应的最大载荷和位移数据进行了汇总,结果如图 6 所示。从图中可以看出,最大载荷与不规则钼矿石的最大变形表现出较大的离散性。对于这类离散性的实验数据,必须采用统计学方法来计算不规则钼矿石的破碎特征强度。

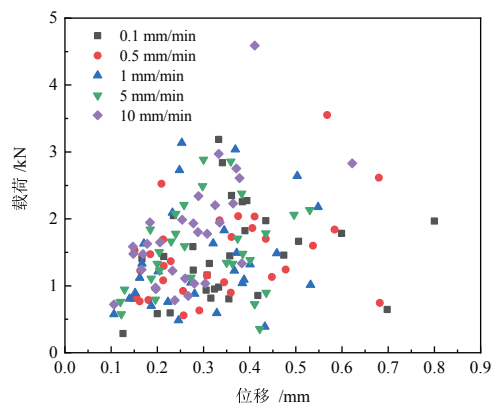


图6 不同加载速率的不规则钼矿石最大载荷与位移汇总

Fig. 6 Summary of maximum load and displacement of irregular molybdenum ore with different loading rates

前人的研究表明,使用两参数 Weibull 分布模型对大部分不规则矿石实验数据拟合得较好<sup>[19]</sup>,因此本实验采用两参数 Weibull 分布模型描述不规则钼矿石破碎特征强度。为了能方便计算 Weibull 分布中的特征应力和 Weibull 分布模量,采用式(3)计算<sup>[3]</sup>:

$$\ln \ln \frac{1}{P} = m \ln \frac{F_B}{d^2} - m \ln \sigma_0 \quad (3)$$

式中,  $P$  为累积存活概率;  $F_B$  为最大实验力, N;  $d$  为初始颗粒直径, 可定义为两个加载接触点之间的距离, mm;  $m$  为 Weibull 分布模量;  $\sigma_0$  为不规则钼矿石对应的特征强度, MPa。

由式(3)可以看出,只需确定不规则钼矿石的应力  $\sigma$  和与之对应的累积存活概率  $P$ ,就可以计算出 Weibull 分布模量。利用式(3)对应力和累积存活概率的数据点进行线性拟合,则直线的斜率为  $m$ ,截距为  $-m \ln \sigma_0$ ,通过截距我们可以计算出不规则钼矿石颗粒的特征强度  $\sigma_0$ 。

不同加载速率下不规则钼矿石的实验数据点与相应的根据式(3)拟合出的曲线如图 7 所示。从图中可以看出,Weibull 分布模型对不规则钼矿石破碎拟合效果较好。利用式(3)计算出的不规则钼矿石的 Weibull 分布模量及特征强度展示在表 1 中。从计算出来的数据结果发现,Weibull 分布模量  $m$  与不规则钼矿石的加载速率并未表现出明显的函数关系。这

也与之之前学者提出的 Weibull 分布模量  $m$  是个常数的假设相符<sup>[21]</sup>。因此, 在利用 Weibull 分布模量建立破碎数学模型时, 可以默认 Weibull 分布模量为常数, 与颗粒的加载速率无关, 在计算时可以取不同加载速率下 Weibull 分布模量的均值。而不规则钼矿石对应的特征强度  $\sigma_0$  则随着加载速率的升高呈现升高趋势, 且在高加载速率下升高的幅度更大。加载速率为 1 mm/min 时相较 0.1 mm/min 时不规则矿石的特征强度增幅为 11.75%, 加载速率为 10 mm/min 时相较 0.1 mm/min 时不规则矿石的特征强度增幅为 42.44%。

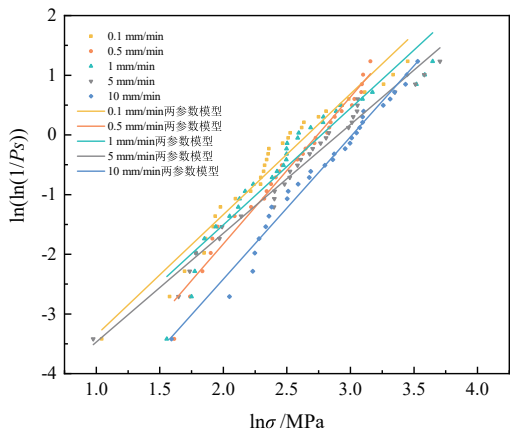


图 7 两参数 Weibull 分布模型对不同加载速率下不规则钼矿石实验数据拟合结果

Fig. 7 The two-parameter Weibull distribution model fits the experimental data of irregular molybdenum ore at different loading rates

表 1 通过两参数 Weibull 分布模型拟合得到的不规则钼矿石的各参数汇总

Table 1 Parameters of irregular molybdenum ore fitted by two-parameter Weibull distribution model are summarized

| 加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> ) | $m$   | $\sigma_0/\text{MPa}$ | $R^2$ |
|------------------------------|-------|-----------------------|-------|
| 0.1                          | 2.019 | 14.306                | 0.954 |
| 0.5                          | 2.462 | 15.511                | 0.972 |
| 1                            | 1.952 | 15.987                | 0.902 |
| 5                            | 1.824 | 18.242                | 0.978 |
| 10                           | 2.383 | 20.377                | 0.979 |

从表 1 中发现, 对于加载速率为 1 mm/min 的不规则钼矿石, 两参数 Weibull 分布模型的拟合精度为 0.902, 相对于其他加载速率的拟合精度较低, 其原因在于不规则钼矿石在破碎过程中至少存在张拉破坏与剪切破坏两种机制, 在实际破碎过程中可能是多种破坏机制的综合效果。

3 结论

- (1)随着加载速率的增大, 试件破坏程度增加, 不规则钼矿石载荷峰值呈现增大趋势, 峰值位移逐步减小。
- (2)断裂能和破碎强度随加载速率的增加表现为

先急剧增大、后缓慢增加的变化趋势, 可近似满足幂函数规律, 拟合得出的公式可用于预测加载速率对不规则钼矿石强度的影响。

(3)两参数 Weibull 分布模型可较好地描述不规则钼矿石破碎强度分布, 其中 Weibull 分布模量  $m$  与颗粒的加载速率无关, 特征强度  $\sigma_0$  则随着加载速率的增加而增加。

参考文献:

[1] 崔学茹. 功率控制在磨矿分级自动控制系统中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(1): 120–123.  
CUI X R. Application of power control in automatic control system of grinding and classification[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(1): 120–123.

[2] 李晶, 叶红齐, 罗衡, 等. 静载荷作用下颗粒破碎的分形统计规律研究[J]. 金属矿山, 2016(8): 103–107.  
LI J, YE H Q, LUO H, et al. Study on statistical fractal rule of particle breakage with static load[J]. Metal Mine, 2016(8): 103–107.

[3] 周强. 准静态压缩作用下脆性物料颗粒破碎特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.  
ZHOU Q. Study on breakage characteristics of brittle granular materials under quasi-static compression[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.

[4] 金爱兵, 朱东风, 孙浩, 等. 不同加载速率下的矿岩劈裂破坏特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(1): 269–279.  
JIN A B, ZHU D F, SUN H, et al. Experimental study of ore-rock splitting failure characteristics at different loading rates[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(1): 269–279.

[5] 李福林, 杨健, 刘卫群, 等. 单轴压缩条件下泥岩加载速率变化效应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 369–378.  
LI F L, YANG J, LIU W Q, et al. Research on the effect of loading rate variation of mudstone under uniaxial compression conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 369–378.

[6] 宋义敏, 邢同振, 邓琳琳, 等. 不同加载速率下岩石变形场演化试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2773–2779+2788.  
SONG Y M, XING T Z, DENG L L, et al. Experimental study of ore-rock splitting failure characteristics at different loading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2773–2779+2788.

[7] 尹白琳, 吝曼卿, 石明汉, 等. 不同加载速率对磷块岩破坏特性的影响研究[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(8): 26–31+38.  
YIN B L, LIN M Q, SHI M H, et al. Study on the effect of loading rates on the failure characteristics of phosphate rock[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(8): 26–31+38.

[8] 杨敬虎, 于翔. 加载速率影响抗拉强度的机理及其数值验证[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 51–59.  
YANG J H, YU X. Mechanical explanation of loading rate impact on tensile strength and its numerical simulation analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 51–59.

[9] SHABNAM EBRAHIMI, BASHIR BEHJAT, MOHSEN KOUHI. The effect of loading rate on mixed mode I/II fracture behavior of adhesively bonded joints: Experimental and numerical approach[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 131: 104420.

[10] XIAO W J, ZHANG D M, CAI Y, et al. Study on loading rate dependence of the coal failure process based on uniaxial compression test[J]. Pure and Applied Geophysics, 2020, 177(10): 4925–4941.

- [11] 吕志强. 加载速率对煤岩抗拉强度参数影响程度研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(10): 301–302.  
LV Z Q. Study of loading speed influence on tensile strength parameter of coal rock[J]. Coal Technology, 2014, 33(10): 301–302.
- [12] 周辉, 杨艳霜, 肖海斌, 等. 硬脆性大理岩单轴抗拉强度特征的加载速率效应研究—实验特征与机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1868–1875.  
ZHOU H, YANG Y S, XIAO H B, et al. Research on loading rate effect of tensile strength property of hard brittle marble—test characteristics and mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1868–1875.
- [13] 苏承东, 李怀珍, 张盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 943–950.  
SU C D, LI H Z, ZHANG S, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 943–950.
- [14] 徐秉权. 料层粉碎研究的进展[J]. 湖南有色金属, 1993(5): 278–283.  
XU B Q. Progress in research on material layer crushing[J]. Hunan Nonferrous Metals, 1993(5): 278–283.
- [15] 王介强, 宋守志. 关于料层粉碎的理论研究[J]. 中国矿业, 1998(5): 48–50.  
WANG J Q, SONG S Z. A theoretical study of particle bads comminution[J]. China Mining Magazine, 1998(5): 48–50.
- [16] PARAPARI P S, PARIAN M, ROSENKRANZ J. Quantitative analysis of ore texture breakage characteristics affected by loading mechanism: fragmentation and mineral liberation[J]. Minerals Engineering, 2022, 182: 107561.
- [17] 金子恒, 谢发祥, 蔡定鹏, 等. 不同加载速率下 SAP 混凝土断裂性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(10): 3546–3553.  
JIN Z H, XIE F X, CAI D P, et al. Fracture performance of SAP concrete under different loading rates[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(10): 3546–3553.
- [18] ANTONYUK S, TOMAS J, HEINRICH S. Breakage behaviour of spherical granulates by compress[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(14): 4031–4044.
- [19] 周强, 汪轶凡, 肖庆飞, 等. 不规则铜钼矿颗粒断裂强度分布实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 33–42.  
ZHOU Q, WANG Y F, XIAO Q F, et al. Experimental study of the strength distribution of irregular copper–molybdenum ore particles[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 33–42.
- [20] Y. HIRAMATSU, Y. OKA. Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1966, 3(2): 89–90.
- [21] 黄俊宇. 冲击载荷下脆性颗粒材料多尺度变形破碎特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.  
HUANG J Y. Dynamic multiscale deformation behavior and particle-breakage properties of granular materials subjected to impact loading[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.

## Research on the Influence of Loading Rate on the Failure Characteristics of Irregular Molybdenum Ores

ZHENG Chao<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>1,2</sup>, XIAO Qingfei<sup>1</sup>, LIU Xiangyang<sup>1</sup>, WANG Yifan<sup>1</sup>, WANG Qingkai<sup>2</sup>

1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Optimized Manufacturing in Mining and Metallurgical, Beijing 102628, China

**Abstract:** Loading rate is one of the key factors affecting the crushing characteristics of ore. In order to explore the influence of loading rate on the failure characteristics of irregular molybdenum ore, uniaxial compression experiments of irregular molybdenum ore at different loading rates were carried out. The effects of loading rate on the failure mode, peak load, displacement change, fracture energy, crushing strength and Weibull distribution model of molybdenum ore were systematically studied. The experimental results show that with the increase of loading rate, the damage degree of irregular molybdenum ore is more severe, the peak load shows an increasing trend, and the increase is more significant at high loading rate, and the peak displacement ( peak strength corresponding displacement ) gradually decreases. The fracture energy does not change significantly at low loading rates (0.1 mm/min and 0.5 mm/min), and the fracture energy increases significantly at high loading rates (10 mm/min). With the increase of loading rate, the crushing strength of irregular molybdenum ore increases sharply at first and then increases slowly, which approximately satisfies the power function relationship. The two-parameter Weibull distribution model can better describe the crushing strength distribution of irregular molybdenum ore. The modulus  $m$  of Weibull distribution is constant and has nothing to do with the loading rate. The characteristic strength  $\sigma_0$  increases with the increase of loading rate. The research results of this paper further enrich and expand the theory and method of irregular ore crushing.

**Keywords:** loading rate; irregular molybdenum ore; crushing strength; fracture energy; weibull distribution model

引用格式: 郑超, 周强, 肖庆飞, 刘向阳, 汪轶凡, 王庆凯. 加载速率对不规则钼矿石破坏特性的影响研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(3): 95-101.

ZHENG Chao, ZHOU Qiang, XIAO Qingfei, LIU Xiangyang, WANG Yifan, WANG Qingkai. Research on the influence of loading rate on the failure characteristics of irregular molybdenum ores[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(3): 95-101.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)



### 作者简介:

郑超(2000—), 男, 云南省大理人, 昆明理工大学硕士研究生, 主要从事碎磨理论及碎磨过程数值模拟研究。E-mail: [2396500544@qq.com](mailto:2396500544@qq.com)。



### 通信作者简介:

周强(1991—), 男, 山东枣庄人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事碎磨理论及碎磨过程数值模拟研究。在核心期刊发表论文 32 余篇, SCI 期刊 6 篇, EI 期刊 5 篇, 中文核心期刊 22 篇, 主持国家自然科学基金青年科学基金项目 1 项, 申请发明专利 18 项, 获授权发明专利 5 项。E-mail: [zq1246051563@163.com](mailto:zq1246051563@163.com)。