不同破碎方式下落锤冲击试验的能量效率对比研究

曹行健[1],潘永泰[1],张永强[1],李少卓[1],尹方熙[1],余　超[1],赵环帅[2]
(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京　100083;
2. 唐山学院 河北省智能装备数字化设计及过程仿真重点实验室,河北 唐山　063000)

摘要: 破碎体形式与加载速率对物料的破碎过程具有明显影响,选择合适的破碎方式有利于物料的高效节能破碎与粒度控制. 本文通过改变破碎体刺入角度与下落高度进行落锤冲击试验,从物料破碎形态、粒度特征与破碎能量效率3个方面探究了不同破碎条件对准脆性物料破碎过程的影响. 研究结果表明:随着刺入角度的增加,试样的破坏由拉伸破坏逐渐演变为压缩破坏. 破碎产物的破碎分形维数在刺入角度<120°范围内上升并达到最大值,后在120°~180°范围内有所下降,其随质量比能的增加而增大,增幅在0.167 4~0.227 7 kW·h/t范围内减小. 物料在不同刺入角度条件下破碎的能量效率均值为1.68%~2.86%,其随刺入角度的增加匀速上升并在120°~180°刺入角度范围内维持稳定. 本研究以期充实破碎理论,为破碎产物预测、破碎体设计提供参考.

关键词: 矿业工程;破碎;落重试验;能量效率
中图分类号: TD 91　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0526-11

Comparative study on energy efficiency in drop weight impact tests under different crushing conditions

CAO Xingjian[1], PAN Yongtai[1], ZHANG Yongqiang[1], LI Shaozhuo[1], YIN Fangxi[1], YU Chao[1], ZHAO Huanshuai[2]
(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Equipment Digital Design and Process Simulation of Hebei Province, Tangshan University, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: The form of the crushing body and the loading rate significantly influence the material crushing process, making the selection of an appropriate crushing method essential for energy-efficient comminution and particle size control. In this study, drop weight impact tests were conducted by varying the penetration angle and drop height to investigate the effects of different crushing conditions on the fracture morphology, particle size characteristics, and energy efficiency during the fragmentation of quasi-brittle materials. The results show that as the penetration angle increases, the failure mode of the specimens transitions from tensile failure to compressive failure. The fracture fractal dimension of the crushed products increases and reaches a maximum within the penetration angle range below 120°, then decreases within the 120°—180° range.

收稿日期: 2025-09-22　　**修回日期:** 2025-10-31　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250387
基金项目: 国家自然科学基金项目(52074308)
第一作者: 曹行健(2000—),男,山西省阳泉市人,博士研究生.
通信作者: 潘永泰(1972—),男,河北省雄县人,教授,博士生导师.E-mail:panyongtai@cumtb.edu.cn
引用格式: 曹行健,潘永泰,张永强,等.不同破碎方式下落锤冲击试验的能量效率对比研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):526-536.
CAO Xingjian, PAN Yongtai, ZHANG Yongqiang, et al. Comparative study on energy efficiency in drop weight impact tests under different crushing conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 526-536.

The fractal dimension increases with rising mass-specific energy, though the rate of increase diminishes within the range of 0.167 4—0.227 7 kW·h/t. The average energy efficiency of material fragmentation under different penetration angles ranges from 1.68% to 2.86%, increasing uniformly with the penetration angle and stabilizing within the 120°—180° range. This study aims to enrich comminution theory and provide a reference for predicting crushed products and designing crushing bodies.

Key words: mining engineering; crushing; drop weight impact test; energy efficiency

破碎是实现脆性物料高效分离的基本操作单元. 要实现被破物料不同组分的高效分离,必须对其进行破碎处理,从而实现单体解离、粒度减小的目的. 破碎过程能量消耗巨大,世界上用于碎矿、磨矿的电能占总电能消耗的1.8%左右[1],且破碎过程中能量利用效率很低,在棒磨和球磨中能量利用效率约为1%[2],在矿石破碎中约为3%～5%[3]. 目前破碎理论研究多采用经验化模型和离散化处理方法,鲜有对破碎过程物料能量效率的定量化表征及相应破碎形式与粒度关系的规律研究[4-6]. 由于大多数破碎与磨矿作业的施载应变速率属于准静态[7],故对准静态加载条件下物料在不同破碎方式下的破碎特性进行分析,并对该过程能量效率进行定量研究,可充实破碎理论,进而对破碎流程的高效节能运行做出指导,同时为破碎产物预测、破碎体设计提供参考.

对准脆性物料的破碎作业,根据载荷接触主要形式的不同可分为点接触、线接触和面接触破碎[8],其本质区别是对被破碎物料施加的拉伸、压缩载荷的占比不同. 被破碎物料内部的拉、压应力存在复杂的分布关系,其分布形式受加载方式、加载速率、物料内部缺陷等因素影响. 学者们对不同性质材料在单一拉、压应力作用下的破碎断裂形式、力学特征以及破坏准则等方面进行了大量研究[9-11]. 文献[12]通过对岩石单轴拉伸、单轴压缩试验结果及其载荷速度效应和蠕变试验结果进行分析,提出了岩石受拉和受压力学特征具有相似性的理论观点;文献[13]结合试验和数值模拟方法,通过改变岩石试样受载面积,对岩石材料的拉、压破坏进行研究,发现随着试样受载面积的增加,其拉应力集中范围与裂纹扩展范围均呈纵向变小、横向变大的规律;文献[14]认为被破碎颗粒会受应力场的作用,尽管使用压缩或冲击加载方式破碎颗粒,颗粒内部的拉伸应力仍是颗粒断裂破坏的主要原因;文献[15]对钙质砂进行了单轴、三轴、相同应力加载等5种不同加载方式下的破碎试验,探究了其在不同应力路径下的应力-应变特征.

在实际破碎过程中,拉、压应力并不是单独作用的,材料的破碎往往是二者共同作用的结果[16]. 本文借助落锤冲击试验,通过改变锤头形式与下落高度模拟实际破碎过程,从物料破碎形式、粒度特征与破碎过程能量效率3个方面探究不同破碎条件下被破碎物料所受拉、压应力作用规律,以期为破碎产物粒度与粒形预测及破碎设备优化与设计提供参考.

1　试验方案

1.1　试样的制作与性能

为使试样具有简单的物料组成、力学性质均一且具有一定的强度,将水泥、石英砂(粒径<1 mm)、去离子水质量比为2∶1.4∶1[17-18]的均质混合物制成标准圆柱试样,并将其在室温下养护28 d以上,最后使用磨砂纸打磨试样上端面以保证试样的平整度. 最终得到的试样平均高度为(96.91±0.74) mm,直径为(49.71±0.03) mm,密度为(1.90±0.03) g/cm^3.

从制备好的试样中随机抽取6个,使用济南力领试验机有限公司生产的HAW-600D型微机控制电液伺服万能试验机进行单轴压缩试验,以证明试样力学性质的均一性. 设置加载速率为0.6 mm/min,当载荷达到峰值并下降至最大载荷的70%时停止试验. 单轴压缩试验的试样与所得试样的力学性能如图1与表1所示.

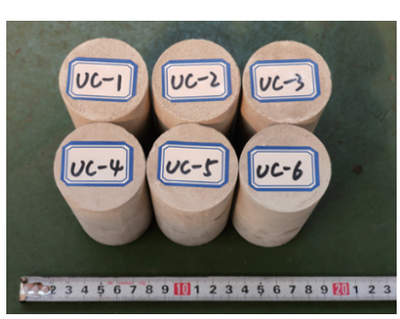


图1　单轴压缩试验中的试样

Fig. 1　Specimens in uniaxial compression tests

表 1 试样的力学性能

Table 1 Mechanical properties of specimens

抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
18.34±0.61	1.84±0.30	0.19±0.08

使用德国 KRUSS 公司生产的 DSA100 型接触角测量仪并结合 OWRK 方法[19-21]，进行试样液滴接触角的测量和表面自由能的计算. 测试液体常用组合为去离子水(总表面张力 γ=72.8 mN/m，极性分量高)与二碘甲烷(γ=50.8 mN/m，极性分量接近 0，色散分量高). OWRK 模型的基本公式如式(1)所示，其中，γ_L 为液体的总表面张力；γ_L^d 与 γ_L^p 分别为液体的色散分量和极性分量；γ_S^d 与 γ_S^p 分别为待测固体的色散分量和极性分量；θ 为接触角. 联立 2 种液体的测量结果，得到固体的表面自由能分量，最终得到固体的总表面能如式(2)所示. 根据以上试验方法，测得试验所需试样的接触角与表面自由能分量如表 2 所示，最终得到其表面自由能为 71.26 mN/m.

$$\gamma_L(1+\cos\theta)=2\left(\sqrt{\gamma_S^d\gamma_L^d}+\sqrt{\gamma_S^p\gamma_L^p}\right). \quad (1)$$

$$\gamma_S=\gamma_S^d+\gamma_S^p. \quad (2)$$

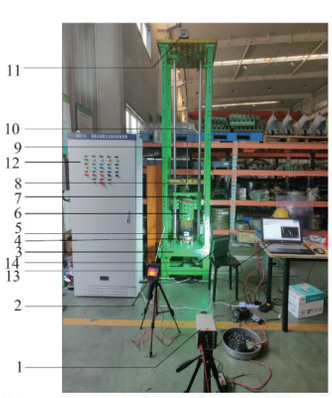
表 2 试样接触角与表面自由能测试结果

Table 2 Test results of contact angle and surface free energy of specimens

平均接触角/(°)		色散分量/	极性分量/	表面自由能/
去离子水	二碘甲烷	(mN·m^{-1})	(mN·m^{-1})	W(mN·m^{-1})
23.43±1.68	41.84±1.96	38.67±1.01	32.58±0.91	71.26±1.92

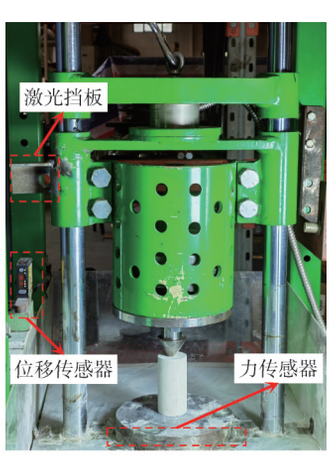
1.2 落锤冲击试验方案

本试验使用课题组自主研发设计的 PAN-E2E-VIT 型高速动态测定试验系统，如图 2 所示. 该试验系统在传统落锤试验机的基础上，增加了高速摄像机(最大分辨率为 1 280×1 024，拍摄频率为 800 Hz)、激光位移传感器(量程为±60 mm)、动态压力传感器(量程为 600 kN)等设备，可对冲击破碎过程中物料的破裂形态、锤头下落位移以及冲击作用力等特征数据进行实时监测与记录.



1:高速摄像机; 2:红外摄像机; 3:试验机机架; 4:砧板; 5:试样; 6:落锤; 7:电磁铁; 8:限位块; 9:滑轨; 10:提升链条; 11:提升电机; 12:控制柜; 13:采集仪和电脑; 14:补光灯

(a) 高速动态测定试验系统

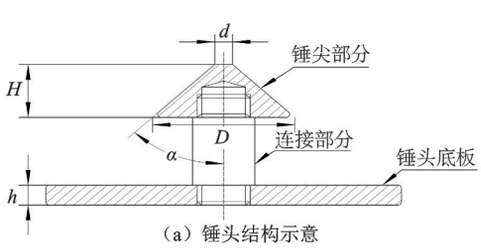


(b) 试验系统破碎区域放大图

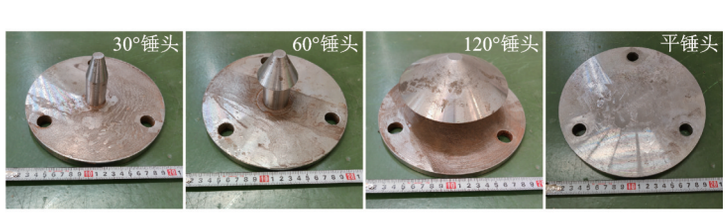
图 2 高速动态测定试验系统及破碎区域放大图

Fig. 2 High speed dynamic measurement test system and enlarged image of the crushing area in this system

为探究不同破碎方式下物料的破碎特征与能量效率，在不同下落高度与锤头锥角条件下对物料进行落锤冲击试验. 试验中落锤常用下落高度为 0.5～1.5 m[22]，结合本研究中落锤的基本质量，下落高度选取 0.3，0.5，0.7，0.9 m 这 4 个高度. 为使在同一下落高度下试验机对物料的输入能相同，对其锤头结构进行了设计，从而使不同形式的锤头具有相同的质量. 锤头结构及不同锥角锤头实物照片如图 3 所示.



(a) 锤头结构示意



(b) 锤头实物照片

图 3 锤头结构示意及不同锥角锤头实物照片

Fig. 3 Schematic of hammer head structure and physical picture of hammer heads with different taper angle

如图 3 所示，锤头的锤尖、连接、锤头底板这 3 个部分使用螺纹连接，通过调整锤头直径 D 与锤头半锥角 α 实现锤头形式的改变，通过改变底板高度 h 弥补因锤头形式引起的质量改变，同时保持连接部分的高度、锤头高度 H 与锤尖直径 d（d=15 mm）不变，以防止破碎行程过短时物料与底板直接接触现象发生. 为模拟不同类型的破碎过程，增大试验结果的差异性，锤头锥角选取 30°，60°，120°，180°这 4 个角度，对应试验组别为 A，B，C，D. 落锤基础质量为 35 kg，不同锥角的锤头质量均为（3.89±0.10）kg，试验机破碎执行部分总质量为（38.89±0.10）kg. 同一试验条件下进行 3 次平行试验，试验方案如表 3 所示，表中 X 表示不同锤头锥角的代号（X=A，B，C，D）.

表 3　试验设计

Table 3　Experimental design

试验组别	锤头锥角	锤头下落高度/m	试验编号
X-1	30°(A 组) 60°(B 组) 120°(C 组) 180°(D 组)	0.30	X-1-1 X-1-2 X-1-3
X-2		0.50	X-2-1 X-2-2 X-2-3
X-3		0.70	X-3-1 X-3-2 X-3-3
X-4		0.90	X-4-1 X-4-2 X-4-3

2　结果与讨论

2.1　破碎形式

通过讨论试样破坏过程的高速图像和具有代表性的力与位移曲线，定性描述不同破碎条件下物料的破碎特征.

在不同形式锤头与下落高度（H'）条件下的破碎试验中，试样的破坏现象差异显著，如图 4 所示. 由图 4a 可知，在锥角为 30°的锤头对试样的破碎过程中，当锤头下落高度为 0.3 m 时，由锤头劈裂试样产生的拉伸裂纹并未完全贯穿整个试样；随着落锤下落高度的增加，拉伸裂纹完全贯穿，同时在主裂纹附近产生裂纹分支，且裂纹分支产生的位置随落锤下落高度的增加而向下移动. 如图 4b 所示，当锤头的锥角增加至 60°时，主裂纹的末端位置较 30°锥角锤头有所升高，直到下落高度为 0.9 m 时拉伸裂纹才完全贯穿整个试样. 结合图 4c 与图 6b 可知，120°锥角锤头对试样的破碎过程则呈现出较为明显的压缩破坏特征，即在锤头与试样接触瞬间，大粒物料迅速剥落，且随着锤头下降，细粒物料开始产生并向四周飞溅；随着锤头高度的增加，试样底部未破碎的物料随之减少，表明试样进行了更彻底地压缩破碎. 由此可知，随着锤头锥角的增加，试样的破坏由拉伸破坏逐渐演变为压缩破坏.

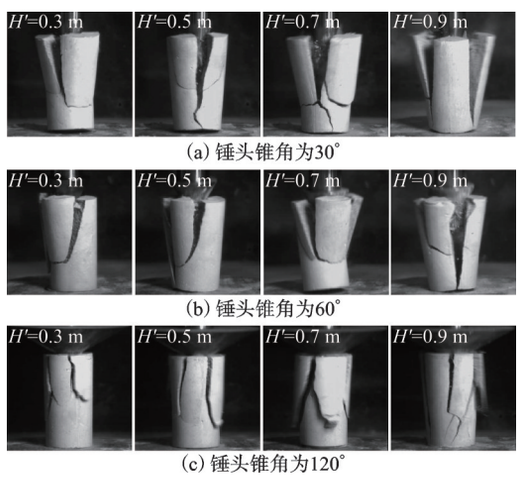


图 4　不同锥角锤头在不同下落高度时试样破坏的高速图像

Fig. 4　High speed image of sample fragmentation process of hammer heads with different taper angle under different falling heights

通过试样破碎过程中采集到的位移与接触力信号，可以计算出锤头与试样接触时的瞬时速度并计算锤头对试样的输入能，同时判别试样的破碎形式. 图 5 展示了试验过程中 2 种具有代表性的力-位移曲线.

图 5a 为平面锤头在下落高度为 0.5 m 时破碎试样的力-位移曲线. 在锤头进入位移传感器量程至与试样接触前，位移线性下降，故可将锤头的运动简化为匀速运动. A 点为锤头与试样接触的时刻，计算 A 点前 5 ms 内的平均速度得到锤头与试样接触时的瞬时速度 v，结合锤头质量 m，则可计算得到锤头破碎试样前的动能 E_k，同时可得试样破碎过程的输入能 E_{input}，如式（3）所示. 由此得到不同下落高度下的落锤速度、落锤对试样的输入能以及输入试样的质量比能（E_m），如表 4 所示.

$$E_{input}=E_k=\frac{1}{2}mv^2. \tag{3}$$

冲击力在锤头接触试样后迅速达到峰值，但由于力传感器的量程较大，所采集到的绝对值并不准确，但仍然可以用来确定锤头与试样的接触时间和判别试样的破碎形式. 结合图 5a 和图 6a 可

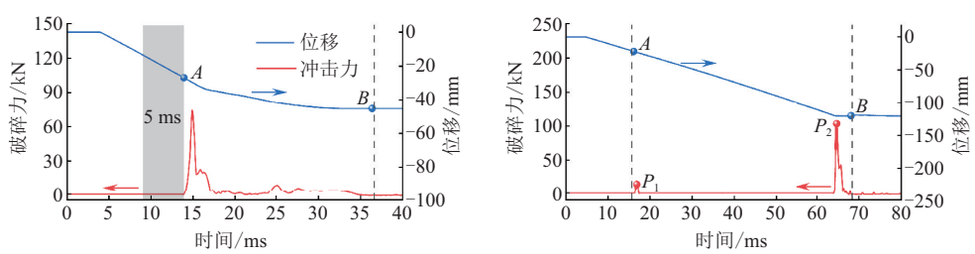
知，在平面锤头与试样端面接触的瞬间，试样顶部同时出现多条裂纹，其在载荷的驱动下迅速扩展，并使大块物料从试样上剥落；随着锤头继续下降，试样的破碎产物变为小粒度颗粒，并向四周快速飞溅，此过程中仍能采集到连续的冲击力信号，表明锤头仍在接触试样并持续向其输入能量；最后，锤头的动能完全输入到试样中，并在试样的残余颗粒上停止，力与位移信号也趋于稳定（B时刻）. 因此，图5a中A，B两时刻的间隔反映了锤头接触试样至锤头停止下落过程试样的破碎时间. 大锥角（120°）锤头对试样的破碎过程亦呈现此特征现象，如图6b所示.

对于小锥角锤头（30°，60°）的破碎过程，其力-位移曲线呈现另一种形式，如图5b所示. 图中，位移曲线在整个试样破碎过程呈线性下降趋势，与其对应的冲击力在A，B两时刻附近分别出现峰值. 这是由于在此破碎条件下，试样的破坏形式主要以劈裂为主，裂纹扩展动力与速度更高，锤头在与试样端面首次接触产生第一个冲击力峰值P_1后试样被迅速劈开，进而使锤头不受任何阻碍地砸向砧板产生第二个冲击力峰值P_2.

表4 不同下落高度对应的锤头速度、输入能与质量比能

Table 4 Hammer speed, input energy, and mass energy ratio corresponding to different falling heights

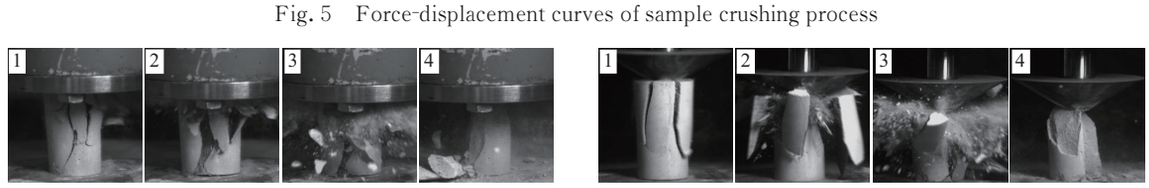
下落高度/m	落锤速度/(m·s^{-1})	E_{input}/J	E_m/(kW·h·t^{-1})
0.3	1.96±0.03	74.54±2.06	0.058 0±0.001 6
0.5	2.73±0.01	145.03±1.55	0.114 4±0.002 9
0.7	3.36±0.01	219.28±1.00	0.167 4±0.000 9
0.9	3.87±0.02	291.39±2.67	0.227 7±0.002 1



（a）平面锤头，H'=0.5 m （b）30°锥角锤头，H'=0.5 m

图5 试样破碎过程的力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curves of sample crushing process

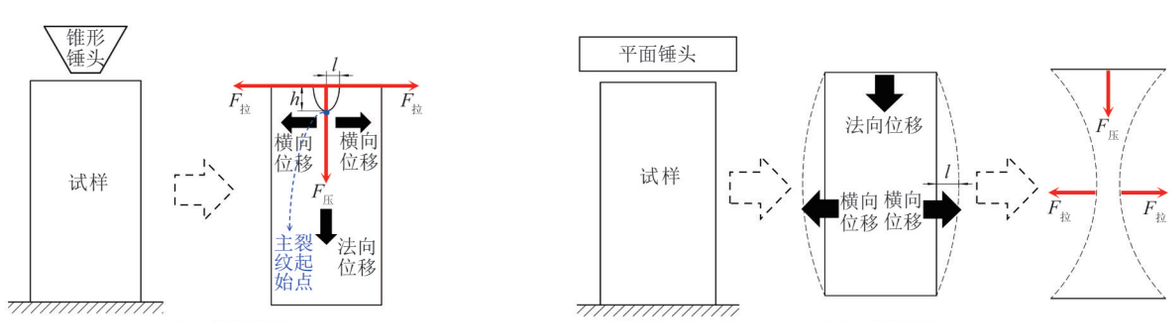


(a) 平面锤头 (b) 120°锥角锤头

图6 锤头下落高度为0.5 m时的试样破坏高速图像

Fig. 6 High speed image of the sample fragmentation process during hammer head falling from a height of 0.5 m

不同锥角锤头破碎物料过程示意如图7所示，图中l为试样破碎前最大横向位移；h为最大法向位移；$F_{拉}$和$F_{压}$分别为拉伸和压缩应力. 结合图示可更清晰地判别试样的破坏形式，对于小锥角锤头对试样的劈裂破坏过程，在拉伸和压缩应力的共同作用下，试样顶端产生凹坑，随着破碎的继续进行，破碎力在凹坑底部达到峰值，主裂纹在此产生并向下扩展贯穿试样完成破碎，如图7a所示.



（a）劈裂破坏 （b）压缩破坏

图7 不同破坏形式的破碎过程示意

Fig. 7 Schematic of different comminution modes

图 7b 展示了试样的压缩破坏过程，试样顶端主要承受均布应力，试样在其作用下发生法向位移，同时内部因弹性变形产生横向位移；随着破碎的进行，试样内部出现剪切裂纹，并在端面处产生圆锥状破碎产物（破碎锥）；破碎锥的法向移动会在其两侧产生拉伸应力，导致试样进一步横向移动；其破碎过程伴随着破碎锥的下移及其周围产物的飞溅．随着锤头锥角与下落高度的改变，试样的破坏形式随之改变，并最终导致不同的破碎结果．

2.2　粒度特征

对不同破碎条件下试样的破碎产物进行粒度分析，探究锤头形式与质量比能对破碎产物粒度分布与粒度特征参数的影响．

采用孔径为 0.3，0.5，1.0，3.0，6.0，13.0，20.0，30.0 mm 的标准筛对不同破碎条件下的破碎产物进行筛分，并对筛分数据进行拟合分析．岩石的破碎程度可使用破碎分形维数进行表征，破碎分形维数越大，表明试样的破碎程度越高，小粒度物料占比越大[23-24]．落锤冲击作用下，破碎产物总质量 M_T、各粒径筛下物料累积质量 $M(x)$、破碎产物粒径 x、破碎产物最大粒径 x_m 以及破碎分形维数 D 满足如式(4)所示的关系式．对式(4)等号两边取对数，得到以 $\lg(x/x_m)$ 为横坐标、以 $\lg[M(x)/M_T]$ 为纵坐标的破碎产物粒度拟合曲线．得到拟合曲线斜率 k 后，通过式(5)计算破碎分形维数 D．

$$M(x)/M_T=(x/x_m)^{3-D}. \tag{4}$$

$$D=3-k. \tag{5}$$

不同破碎条件下使用破碎分形维数方法拟合破碎产物粒度得到的粒度曲线如图 8 所示，对应的拟合结果如表 5 所示．由图 8 和表 5 可知，锤头锥角与落锤下落高度对破碎产物的粒度拟合曲线影响显著．30°锥角锤头破碎产物的粒度拟合曲线随输入试样质量比能的增加而下移，曲线截距由 0.058 0 kW·h/t 时的 1.648 下降至 0.227 7 kW·h/t 时的 1.227，表明低质量比能下的破碎产物粒度分布更均匀；其对应的破碎分形维数从 0.058 0 kW·h/t 时的 2.237 下降至 0.227 7 kW·h/t 时的 2.069，表明低质量比能下的试样破碎程度更高．60°，120°锥角锤头和平面锤头的破碎产物粒度曲线截距与破碎分形维数均随质量比能的增加而增大，对应的曲线截距从 0.058 0 kW·h/t 时的 1.311，1.374，1.013 分别增加至 0.227 7 kW·h/t 时的 1.651，1.800，1.861，破碎分形维数从 0.058 0 kW·h/t 时的 2.091，2.154，1.951 分别增加至 0.227 7 kW·h/t 时的 2.244，2.200，2.261，表明此条件下输入试样的质量比能与破碎产物的粒度分布均匀度和破碎分形维数呈正相关．

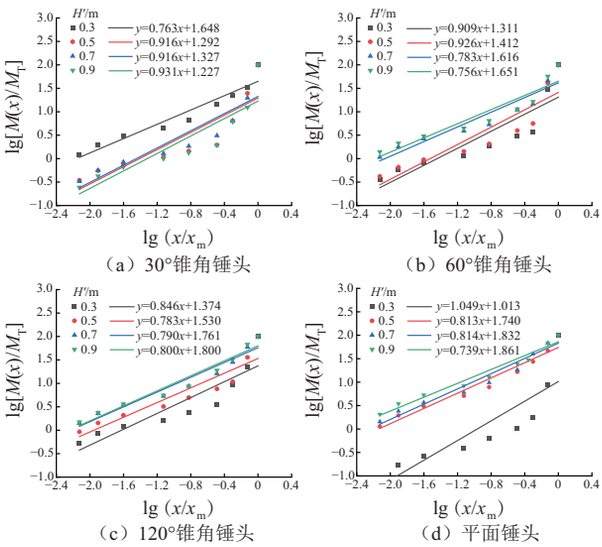


图 8　不同破碎条件下破碎产物的 $\lg(x/x_m)$-$\lg[M(x)/M_T]$ 曲线

Fig. 8　$\lg(x/x_m)$-$\lg[M(x)/M_T]$ curves of crushed products under different crushing conditions

表 5　不同破碎条件下破碎产物的拟合结果

Table 5　Fitting results of crushed products under different conditions

试验组别	R^2	k	D
A-1	0.929	0.763	2.237
A-2	0.781	0.916	2.084
A-3	0.831	0.916	2.084
A-4	0.803	0.931	2.069
B-1	0.788	0.909	2.091
B-2	0.819	0.926	2.074
B-3	0.895	0.783	2.217
B-4	0.890	0.756	2.244
C-1	0.822	0.846	2.154
C-2	0.870	0.783	2.217
C-3	0.948	0.790	2.210
C-4	0.953	0.800	2.200
D-1	0.764	1.049	1.951
D-2	0.958	0.813	2.187
D-3	0.962	0.814	2.186
D-4	0.972	0.739	2.261

对不同破碎条件下的破碎分形维数均值进行分析，探究单一影响因素对产物破碎分形维数的影响，结果如图 9 所示.

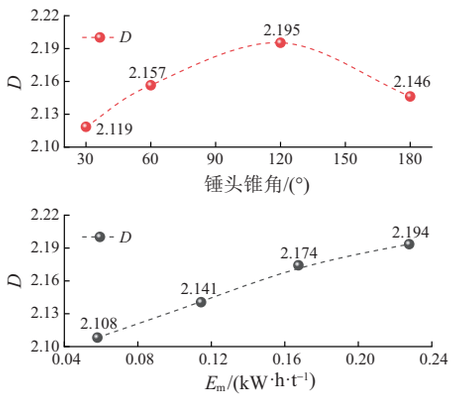


图 9 不同破碎条件下的破碎分形维数

Fig. 9 Fractal dimension of fragmentation under different conditions

由图 9 可知，30°，60°，120°锥角锤头和平面锤头破碎产物的破碎分形维数均值分别为 2.119，2.157，2.195，2.146，其在小于 120°锥角范围内上升并达到最大值，后在 120°～180°锥角范围内有所下降；结合 2.1 节的讨论可知，随着锤头锥角的增加，试样的破坏形式由拉伸破坏逐渐转变为压缩破坏，细粒破碎产物随之增加，但破坏裂纹的扩展动力降低，试样难以在低质量比能下完全破坏；在破坏形式和裂纹扩展动力的耦合作用下，120°锥角锤头破碎得到的产物破碎分形维数最高. 破碎比能为 0.058 0，0.114 4，0.167 4 和 0.227 7 kW·h/t 时产物的破碎分形维数均值分别为 2.108，2.141，2.174，2.194，破碎分形维数随质量比能的增加而增大，其增幅在 0.167 4～0.227 7 kW·h/t 范围内减小.

图 10 展示了不同锥角锤头在质量比能为 0.227 7 kW·h/t 时的破碎产物形貌，结合图 8 与图 10 可知，破碎产物中粒级为＋6 mm 的颗粒数量占比较多，且不同粒级对应的颗粒数量有明显不同. 故为进一步量化不同条件下破碎产物的粒度差异，对不同锤头锥角与质量比能下破碎产物的平均粒径进行分析. 由式(6)计算破碎产物的平均粒径 d_m.

$$d_m=\frac{\sum r_i d_i}{\sum r_i}, \tag{6}$$

式中：d_i 为不同粒级物料的平均粒径；r_i 为对应粒级物料的质量分数.



(a) 30°锤头 (b) 60°锤头

(c) 120°锤头 (d) 平面锤头

图 10 不同锥角锤头在质量比能为 0.227 7 kW·h/t 时的破碎产物

Fig. 10 Crushing products of hammer heads with different taper angle at a mass energy ratio of 0.227 7 kW·h/t

不同破碎条件下破碎产物的平均粒径如图 11 所示. 30°锥角锤头破碎产物的平均粒径在 0.058 0～0.114 4 kW·h/t 质量比能范围内增加，而当质量比能大于 0.114 4 kW·h/t 时，由于质量比能增大使锤头对试样劈裂效果增加，并未产生更多的细粒产物，其平均粒径稳定在 18.30～18.93 mm 范围内. 60°，120°锥角锤头和平面锤头的破碎产物平均粒径均随质量比能的增加而减小，且锤头锥角越大降幅越高，进一步表明试样的破坏形式随着锤头锥角的增加由拉伸破坏逐渐转变为压缩破坏. 30°，60°，120°锥角锤头和平面锤头的产物平均粒径分别为 18.04，16.87，15.96 和 15.27 mm，其随锤头角度的增加而降低且降幅逐渐减小.

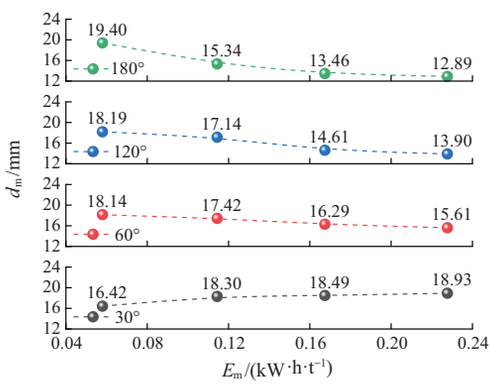


图 11　不同破碎条件下破碎产物的平均粒径

Fig. 11　Average particle size of crushed products under different crushing conditions

不同破碎条件下破碎产物的颗粒数量与外形差异较大，故单从粒度特征角度分析并不能完全反映破碎效果的差异，需进一步探究破碎条件对破碎产物新增表面能与能量效率的影响.

2.3　能量效率

在破碎过程中，外部载荷传递给待破碎物料的输入能会转化为弹性能、新增表面能、耗散热能、破碎后飞溅颗粒动能[25]. 其中，新增表面能 $E_{\Delta S}$ 是最有效的能量，其计算公式为

$$E_{\Delta S}=\gamma_s\cdot\Delta A=\gamma_s\cdot(S_p-A_0), \tag{7}$$

式中：ΔA 为破碎产物的新生表面积，由破碎后所有产物颗粒的表面积 S_p 与破碎前固体表面积 A_0 作差得到；γ_S 为固体的表面自由能.

通过分形理论和椭球模型[25-26]测量并计算破碎产物中粒级分别为 +30，20～<30，13～<20，6～<13 mm 的颗粒表面积. 采用文献[25，27]设计的破碎颗粒粒形特征测量系统采集各个粒级破碎颗粒的图像，后将其导入 Matlab 软件中的 Fraclab 工具箱计算颗粒周边分形维数 D_P，则表面分形维数 $D_S=D_P+1$. 之后，在光滑椭球模型的基础上考虑粗糙度，即采用粗糙椭球模型计算破碎产物颗粒的表面积：椭圆以轴线为旋转轴旋转得到光滑椭球，如式(8)所示；引入模型修正系数 α 得到椭球表面积 S_0 如式(9)所示；r 为椭球体积等效半径，由式(10)计算得到；当以椭圆的短轴为轴线旋转得到椭球时，$a>c$，等效椭球修正系数 α 的计算方式如式(11)所示；当以椭圆的长轴为轴线旋转得到椭球时，$a<c$，等效椭球修正系数 α 的计算方式如式(12)所示. 对光滑椭球模型的表面积 S_0 进行修正得到粗糙椭球表面积 S_F[28]，如式(13)所示，其中，δ_{min} 为测算过程中所使用到的最小码尺长度(已有研究得到的 δ_{min} 范围[25]为 2～4 μm，本文取 2 μm)；x 为颗粒的等效球体直径. 由于破碎产物中粒级为 −6 mm 的颗粒数量较多，特征尺寸提取难度较大，其表面积使用式(14)计算得到，其中，ρ 为颗粒密度；p_i 为各粒级质量.

$$\frac{x^2+y^2}{a^2}+\frac{z^2}{c^2}=1. \tag{8}$$

$$S_0=4\alpha\pi r^2. \tag{9}$$

$$r=\sqrt[3]{a^2c}. \tag{10}$$

$$\alpha=\frac{2\pi a^2+\dfrac{2\pi ac^2}{\sqrt{a^2-c^2}}\cdot\ln\left(\dfrac{a+\sqrt{a^2-c^2}}{c}\right)}{\dfrac{4\pi a^2c}{3}}\cdot\frac{r}{3}. \tag{11}$$

$$\alpha=\frac{2\pi a^2+2\pi ac^2\sqrt{\dfrac{1}{c^2-a^2}}\cdot\arcsin\dfrac{\sqrt{c^2-a^2}}{c}}{\dfrac{4\pi a^2c}{3}}\cdot\frac{r}{3}. \tag{12}$$

$$S_F=S_0(\delta_{min}/x)^{2-D_S}. \tag{13}$$

$$S=\frac{6}{\rho}\sum_{i=1}^{i=n}\frac{p_i}{d_i}. \tag{14}$$

在统计中发现，粒级为 +30，20～<30，13～<20，6～<13 mm 的颗粒表面分形维数范围分别为 1.75～1.87，1.71～1.83，1.55～1.78，1.51～1.74，平均表面分形维数分别为 1.82，1.78，1.71，1.63，可见随着粒径减小，颗粒的表面分形维数减小，同一粒级内的偏差增大，表明在较小的粒级范围内，颗粒的表面复杂性差异更大.

不同破碎条件下产物的新生表面能如图 12 所示. 由该图可见，30°，60°等小锥角锤头的破碎产物

新增表面能随质量比能的增加呈先增加后降低的趋势，且峰值向高质量比能的方向移动；结合图4a，4b可知，当质量比能较小时，锤头与试样表面产生的主裂纹扩展动力较小，不足以贯穿整个试样；随着质量比能的增加，试样破碎过程中，在锤头对试样内部的局部压缩与摩擦作用下，主裂纹扩展路径的周围出现裂纹分支，使试样折断进而增加了破碎产物的新增表面能；随着质量比能的继续增加，主裂纹快速贯穿并使劈裂产生的大块物料向四周飞溅，减少了锤头对试样内部的局部压缩和摩擦作用，带有裂纹分支的主裂纹逐渐转变为贯穿裂纹，使破碎产物的新增表面能降低．120°锥角锤头与平面锤头的破碎产物新增表面能则随质量比能的增加而增加，其增幅在0.058 0～0.167 4 kW·h/t范围内较大，而在高质量比能范围内增幅较小．30°，60°，120°锥角锤头与平面锤头破碎产物新增表面能均值分别为2.32，3.35，4.66与5.16 J，其随锤头锥角的增加呈减速上升的趋势；0.058 0，0.114 4，0.167 4和0.227 7 kW·h/t这4个质量比能下破碎产物新增表面能均值分别为2.31，3.94，4.60和4.65 J，其随质量比能的增加亦呈减速上升的趋势，并在0.167 4～0.227 7 kW·h/t范围内趋于稳定．

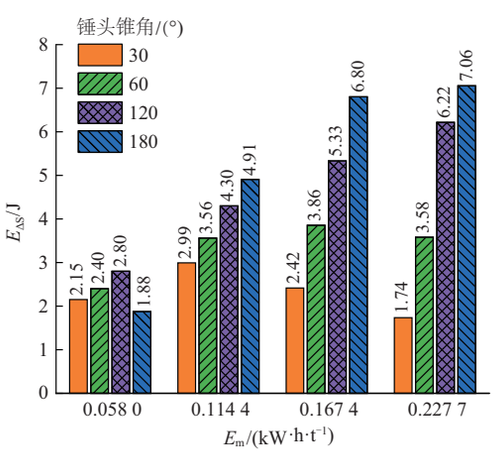


图12 不同破碎条件下破碎产物的新生表面能

Fig. 12 New surface energy of crushed products under different crushing conditions

不同破碎条件下锤头对试样的输入能转化为破碎产物新增表面能的能量效率，如图13所示．在改变质量比能的过程中，由于输入能的绝对值与增量均大于新增表面能，故不同锥角锤头破碎试样过程中的能量效率随质量比能的增加整体呈下降的趋势，其降幅随锤头锥角的增加而减小．在平面锤头对试样的破坏过程中，试样在小质量比能下无法发生整体性破坏，故其能量效率呈先上升后下降的趋势．30°，60°，120°锥角锤头与平面锤头破碎试样过程中的能量效率均值分别为1.68%，2.15%，2.86%与2.84%，其随锤头锥角的增加匀速上升并在120°～180°范围内维持稳定．文献[25]使用以上相同的方法得到花岗岩在单轴压缩作用下的能量效率为8%左右，此数据与本研究结果的差别是由输入能计算方法、加载方式和物料性质的不同而造成的，因此，此部分内容仍可进一步研究．

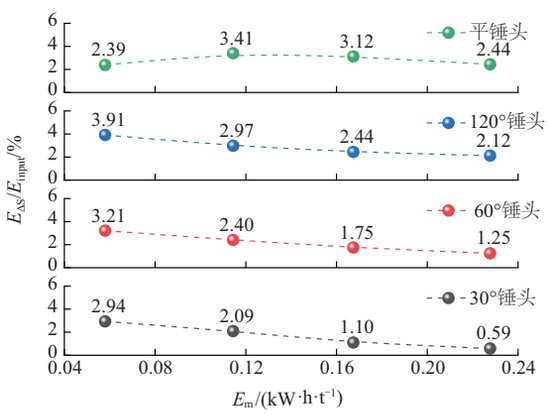


图13 不同破碎条件下的能量效率

Fig. 13 Energy efficiency under different crushing conditions

3 结 论

1）在破碎形式方面，根据试样破坏过程的高速图像与相应的力-位移曲线，定性描述不同破碎方式下物料的破碎特征．随着锤头锥角的增加，试样的破坏由拉伸破坏逐渐演变为压缩破坏．输入试样的质量比能影响了小锥角锤头破碎试样中主裂纹及其裂纹分支的形态与位置；在大锥角锤头对试样的压缩破坏过程中，质量比能对其亦有明显的影响．

2）在粒度特征方面，通过$\lg(x/x_m)$-$\lg[M(x)/M_T]$曲线、破碎分形维数、平均粒径对对破碎产物进行粒度分析，探究破碎方式对产物粒度特征参数的影响．破碎产物的破碎分形维数在锤头锥角小于120°范围内上升并达到最大值，后在120°～180°范围内有所下降；破碎分形维数随质量比能的增加而增大，其增幅在0.167 4～0.227 7 kW·h/t范围内减小．产物平均粒径随锤头角度的增加而降低且降幅逐渐减小．

3）在能量效率方面，为考虑破碎方式对破碎产物颗粒数量与粒形的影响，采用分形理论与粗糙椭球模型对破碎产物的新增表面能和破碎能量

效率进行分析．破碎产物新增表面能随锤头角度的增加呈减速上升的趋势，其随质量比能的增加亦呈减速上升的趋势，并在 0.167 4～0.227 7 kW·h/t范围内趋于稳定．不同形式锤头破碎过程的能量效率均值为1.68%～2.86%，其随锤头锥角的增加匀速上升并在120°～180°范围内维持稳定．

综上可知，在本研究针对的准脆性模型材料在准静态加载条件下的破碎过程中，破碎体刺入角度与输入被破物料的质量比能对物料的破碎效果具有明显的影响，且当破碎体刺入角度在30°～120°，输入比能在0.058 0～0.167 4 kW·h/t范围内的影响变化效果最为显著．与此同时，物料性质及其与破碎体的接触面积亦会影响破碎效果，此内容仍需进一步的探索研究，且更具体的破碎体刺入角度与输入比能对破碎过程的影响规律仍需结合离散元模拟探明．针对被破物料的不同性质，选用合适的破碎体形状与加载速率，对调控破碎产物的粒度与粒形以及提高破碎过程的能量效率具有重要意义．

参考文献：

[1] NAPIER-MUNN T. Is progress in energy-efficient comminution doomed? [J]. Minerals Engineering, 2015, 73:1-6.

[2] RADZISZEWSKI P. Energy recovery potential in comminution processes [J]. Minerals Engineering, 2013, 46/47:83-88.

[3] MARTINS S. Size-energy relationship in comminution, incorporating scaling laws and heat [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 153: 29-43.

[4] LIU X, LI S. A crushing index for granular soils based on comminution energy consumption theory [J]. Powder Technology, 2024, 434: 119380.

[5] BAAWUAH E, ADDAI-MENSAH J, SKINNER W. Pushing the frontiers of ultrafine crushing and the impact on comminution energy and mineral liberation [J]. Minerals Engineering, 2025, 231: 109430.

[6] PETRAKIS E, XIROUDAKIS G, SAMOUHOS M, et al. Modeling development for the prediction of the particle size distribution and energy consumption of the crushing Products: A first approach [J]. Minerals Engineering, 2025, 233: 109669.

[7] 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(北京)，2021.
ZHOU Qiang. Study on breakage characteristics of brittle granular materials under quasi-static compression [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021.

[8] 刘文礼，王新文，潘永泰．选煤机械[M]．北京：冶金工业出版社，2017.
LIU Wenli, WANG Xinwen, PAN Yongtai. Coal preparation machinery [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.

[9] 郭敬杰，李　伟，韩祥凯，等．基于纳米压痕的构造煤与原生煤结构面力学特性[J]．中国矿业大学学报，2024, 53(3): 509-523.
GUO Jingjie, LI Wei, HAN Xiangkai, et al. Mechanical properties instructural planes of tectonic coal and primary coal through nano-indentation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 509-523.

[10] 袁　超，黄煊祺，王卫军，等．预制孔几何参数对盘形刀盘侵岩力学特性影响试验研究[J]．中国矿业大学学报，2025, 54(2): 316-329.
YUAN Chao, HUANG Xuanqi, WANG Weijun, et al. Experimental study on the influence of geometric parameters of prefabricated holes on the mechanical properties of rock-intruding disc cutters [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 316-329.

[11] 张玉江，李书乐，杨永聪，等．动静耦合加载下受载钻孔试件力学特性及破坏特征研究[J]．中国矿业大学学报，2025，54(3)：577-594.
ZHANG Yujiang, LI Shule, YANG Yongcong, et al. Research on mechanical properties and failure characteristics of loaded borehole specimens under static-dynamic coupled loading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 577-594.

[12] 金丰年．岩石拉压特征的相似性[J]．岩土工程学报，1998, 20(2): 31-33.
JIN Fengnian. Comparison of tensile and compressive behaviours of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 31-33.

[13] 王来贵，赵　娜，初　影，等．不同面积载荷作用下的岩石试件破裂数值模拟[J]．沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2007(6): 918-921.
WANG Laigui, ZHAO Na, CHU Ying, et al. Numerical simulation of rock fracture under action of different area loading [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2007(6): 918-921.

[14] HU G M, OTAKI H, LIN M, et al. An index of the tensile strength of brittle particles [J]. Minerals Engineering, 2001, 14(10): 1199-1211.

[15] 钟　丽，陈鑫莲，刘晓璇，等．不同应力路径下钙质砂的力学及变形特性试验研究[J]．岩土力学，2023，

44(10): 2929-2941.
ZHONG Li, CHEN Xinlian, LIU Xiaoxuan, et al. Experimental study on the mechanical and deformation characteristics of calcareous sand under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2929-2941.

[16] 母福生,张智铁,秦龙头.破碎过程能量消耗规律的研究[J].焦作工学院学报,1996(4):54-58.
MU Fusheng, ZHANG Zhitie, QIN Longtou. Research for the energy consumption law of the crushing process [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1996(4): 54-58.

[17] 潘一山,章梦涛,王来贵,等.地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究[J].岩土工程学报,1997(4): 49-56.
PAN Yishan, ZHANG Mengtao, WANG Laigui, et al. Study on rockburst by equivalent material simulation tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997(4): 49-56.

[18] 王爱文,高乾书,潘一山,等.预制钻孔煤样冲击倾向性及能量耗散规律[J].煤炭学报,2021, 46(3): 959-972.
WANG Aiwen, GAO Qianshu, PAN Yishan, et al. Bursting liability and energy dissipation laws of prefabricated borehole coal samples [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 959-972.

[19] OWENS D K, WENDT R. Estimation of the surface free energy of polymers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1969, 13(8): 1741-1747.

[20] WU S H. Calculation of interfacial tension in polymer systems [J]. Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia, 1971,34(1): 19-30.

[21] VAN OSS C J, CHAUDHURY M K, GOOD R J. Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems [J]. Chemical Reviews, 1988, 88(6): 927-941.

[22] GUPTA A, YAN D S. Chapter 3: Size reduction and energy requirement [M]//GUPTA A, YAN D S. Mineral processing design and operation. Amsterdam: Elsevier Science, 2006: 63-98.

[23] 王 磊,袁秋鹏,谢广祥,等.冲击载荷下煤样能量耗散与破碎分形的长径比效应[J].煤炭学报, 2022, 47(4):1534-46.
WANG Lei, YUAN Qiupeng, XIE Guangxiang, et al. Length-diameter ratio effect of energy dissipation and fractals of coal samples under impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1534-1546.

[24] 甘德清,于泽皞,刘志义,等.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, 2025(2): 48-55.
GAN Deqing, YU Zehao, LIU Zhiyi, et al. Energy ratio effect of impact crushing characteristics of magnetite ores under the action of drop ammer [J]. Metal Mine, 2025(2): 48-55.

[25] 郭 庆.脆性矿物破碎过程能量演化规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2021.
GUO Qing. Energy evolution law of brittle minerals in comminution process [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021.

[26] 柯国军,张 琳,谢艳军.基于Image-Pro Plus软件骨料比表面积测量[J].混凝土, 2017(9):157-160.
KE Guojun, ZHANG Lin, XIE Yanjun. Measurement of specific surface area of aggregate based on image-pro plus [J]. Concrete, 2017(9): 157-160.

[27] GUO Q, ZHOU Q, PAN Y T, et al. The accurate algorithm of new surface area of single particle comminution, incorporating particle shape and roughness [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2021, 57(1): 259-272.

[28] 尹岳降,朱子晗,卢文波,等.基于分形理论的人工骨料比表面积计算方法:以白鹤滩水电站为例[J].人民长江, 2020, 51(4): 196-201.
YIN Yuejiang, ZHU Zihan, LU Wenbo, et al. Calculation method on specific surface area of artificial aggregate based on fractal theory: A case study of Baihetan Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 196-201.

(责任编辑 沈春妮 仝 腾)