

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.12.006

引用格式:邹全乐,江城子,马腾飞.循环荷载下不同岩性散体压实与再破碎特征[J].重庆大学学报,2025,48(12): 60-72.



循环荷载下不同岩性散体压实与再破碎特征

邹全乐^{a,b},江城子^{a,b},马腾飞^{a,b}

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室; b. 资源与安全学院,重庆 400044)

摘要:为了探究多重采动下破碎岩体的压实与再破碎特征,本文开展了不同岩性散体的循环加载力学试验,系统研究了散体力学参数的变化规律,并阐明了其能量演化特性与分形特征。研究结果表明:在相同荷载条件下,强度最低的泥岩散体表现出最大的应变量,其压实过程所需的累积能量最低。同时,泥岩的分形维数最大,表明其破碎程度最高。在加载初期,散体孔隙度迅速减小,压缩模量上升,散体被快速压实;当应力超过一定水平后,压缩模量持续下降,能量密度显著增加,散体颗粒发生大量破裂。研究结果可为揭示多重采动下垮落带岩体压实破碎机制提供重要理论支撑。

关键词:多重采动;压实与再破碎;能量演化;粒径分布

中图分类号:X936

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)12-060-13

Compaction and re-crushing characteristics of granules with varying lithologies under multiple mining-induced disturbances

ZOU Quanle^{a,b}, JIANG Chengzi^{a,b}, MA Tengfei^{a,b}

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; b. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To investigate the compaction and re-crushing characteristics of fractured rock under multiple mining. This study conducted cyclic loading and unloading mechanical tests on aggregates of different lithologies. The variation patterns of mechanical parameters of granules were systematically investigated. The granules energy evolution characteristics and fractal dimension were clarified. The research findings indicate that low-strength mudstone granules exhibit the greatest strain under identical loading conditions, requiring relatively low cumulative energy during compaction. Meanwhile, mudstone shows the highest fractal dimension, indicating the greatest degree of crushing. During the initial loading stage, the granules porosity rapidly decreases, the compressive modulus rises, and the granules is rapidly compacted. When stress exceeds a certain threshold, the compressive modulus continues to decrease, energy density increases significantly, and the granules undergo extensive fracture. The research findings provide significant support for elucidating the compaction and re-crushing mechanisms of granules in caving zones under multiple mining.

Keywords: multiple mining; compaction and re-crushing; energy evolution; particle size distribution

收稿日期:2024-05-27

基金项目:煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室开放基金(SKLMRDPC23KF14)。

Supported by Open Fund of State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining (SKLMRDPC23KF14).

作者简介:邹全乐(1987—),男,博士,教授,主要从事煤矿瓦斯灾害防控的研究,(E-mail)quanlezou2011@126.com。

中国煤层群广泛赋存, 多重采动普遍存在^[1-5]。多重采动是指煤岩层在经历一次或多次开采扰动后, 再次受到开采活动的影响, 导致煤岩层发生更加严重破坏的现象, 这对煤矿安全生产造成严重影响。煤层开采后, 上覆岩层逐渐形成了垮落带、裂隙带、弯曲下沉带^[6], 其中, 垮落带内堆积着由不同岩性破碎形成的散体, 其分布具有随机性、无序性等特点^[7], 受多重采动扰动影响, 易发生挤压、变形, 进而导致岩层坍塌、垮落^[8-10]。而垮落带散体的压实与再破碎过程直接影响其承载能力和稳定性, 进而影响上覆岩层的移动与沉陷^[11]。研究并掌握不同岩性散体的压实与再破碎特征对于探究采空区上覆岩层移动机制具有重要的理论价值和实践指导意义。

目前, 国内外学者采用理论推算、物理实验等方法对垮落带岩石的应力分布特征研究表明, 受采动扰动影响, 垮落带岩石经历了复杂的压实与变形过程, 赋存的散体颗粒对上覆岩层的移动与沉陷程度具有重要影响^[12-14]。因此, 相关学者借助自主搭建的侧限装置对散体的压实破碎特性开展了广泛的试验研究^[15-19]。通过分析不同因素下散体的应力-应变特征, 发现试样粒度和加载参数是影响散体压实变形特征的重要因素, 外界能量的输入、储存与释放是岩石变形破坏的本质原因^[20], 因此, 在力学参数基础上, 分析试样压实过程的能量耗散规律对于揭示散体变形特征具有重要帮助。此外, 依据散体压缩过程中能量密度数据, 可以认为散体压缩过程中存在阶段性规律, 并借助压缩模量数据, 发现此过程中散体承载能力发生变化, 且孔隙度呈现减小的特征^[21-22]。相关学者提出运用分形理论表征岩石的破碎情况, 主要通过分析散体破碎后粒径分布特性, 表征散体压缩后颗粒破碎情况^[23-24]。

现有研究主要侧重于同一岩性散体试样的压实破碎特性, 实际工况下垮落带内多由不同类型破碎岩体组成, 不同岩性散体试样的压实与再破碎特性有待深化研究。基于此, 本文在现有侧限装置基础上, 自主改进了散体压实腔体装置, 开展了散体循环加卸载力学试验, 探究了不同岩性散体试样力学参数变化特征, 揭示了散体能量演化规律, 分析了散体加载过程中声发射振铃计数变化规律, 阐明了散体粒径分布与孔隙演化特征。研究成果可为揭示多重采动条件下垮落带压实与破碎机制提供重要理论支撑。

1 试样制备与试验方案

1.1 试样制备

试验所用原材料取自陕西省韩城市桑北煤矿, 主要选取了较为常见且具有代表性的3种岩性的岩石, 分别为砂岩、泥岩和石灰岩。其中, 散体指颗粒材料本身, 试样指装入腔体、被压缩的整体。首先, 将岩块通过破碎机破碎至所需粒径范围, 再筛分获得6~8 mm的不同岩性散体开展试验。

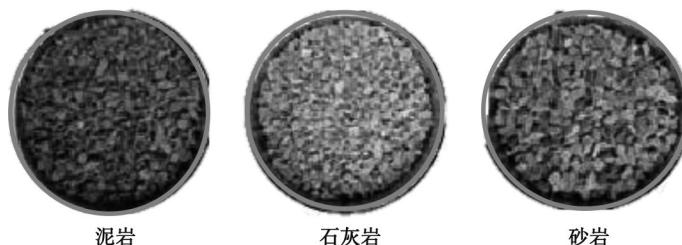


图 1 不同岩性散体

Fig. 1 Granular samples with different lithologies

由于岩块的强度直接影响其破碎后散体的承载与压缩特性, 因此, 需对砂岩、泥岩和石灰岩试样进行强度测试, 为后续散体试验提供基础参数。制备直径50 mm、高100 mm的标准岩石试样, 以400 N/s的速率加载至试件破坏, 实时记录并观察试验过程中的应力-应变曲线, 不同岩性试样单轴压缩实验如图2所示。通过测试得到石灰岩、砂岩和泥岩的抗压强度分别为44.7、39.6、24.1 MPa, 在3种岩性试样中, 石灰岩强度最高, 泥岩强度最低。

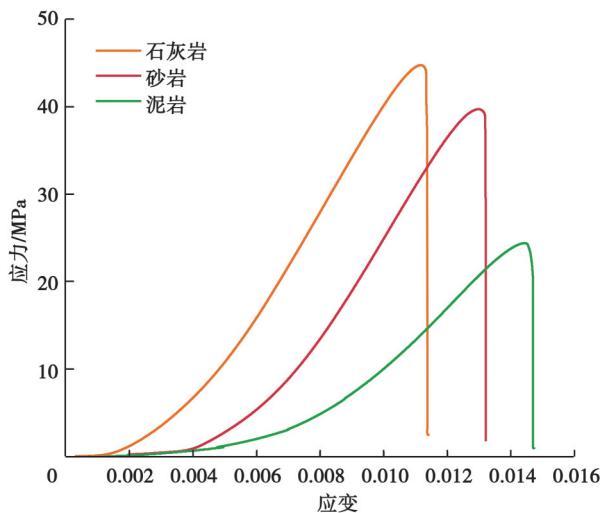


图2 不同岩性试样单轴压缩实验

Fig. 2 Compression experiment of samples with different lithologies

1.2 试验系统及方案

试验采用自主改进的散体压实装置,配合筛分处理系统进行粒径分析。散体压实装置主要包括微机控制电子万能试验机与密闭压缩腔体。电子万能试验机采用伺服电机驱动,伺服电机通过传动机构驱动横梁上下移动,该电子万能试验机只能开展完整岩样的加卸载试验,不具备压缩破碎散体的密闭空间。因此,根据试验要求,自主设计了散体密闭压缩腔体结构,该腔体在原设备底座基础上增加了凸台结构、侧限装置和压头结构。声发射监测子系统选用美国PAC公司12CHS PCI-2 system对散体压实过程中的声发射信号进行监测,阈值设置为40 dB。筛分处理系统主要由不同粒径筛孔的筛网构成,筛分过程中采取缓慢轻摇的方式,有效减少人工方式筛分造成的物料参数误差,提升试验效率,试验系统布置如图3所示。

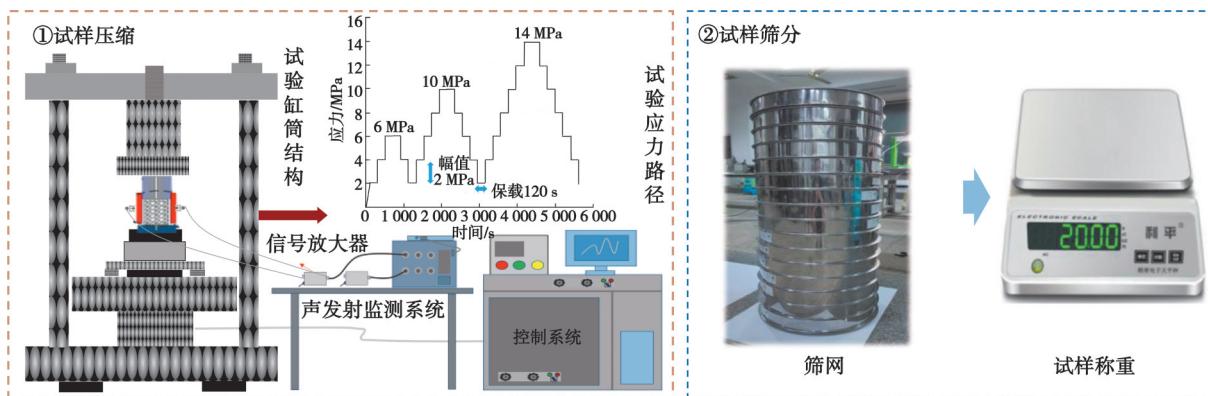


图3 试验系统

Fig. 3 Test system

基于施工现场情况及煤层群多重采动下的应力演化特性,本次试验的应力路径采用应力梯级循环加载并设置保载时间的加载方式,该应力路径的设计可充分模拟重复采动下不同煤层开采时段覆岩受力状态。首先,将制备完成的每组散体均匀混合至腔体内部并安装压头,同时,测量腔体上表面至压头下表面的距离,并扣除压头厚度,作为散体初始高度 h_0 。随后,开展加卸载力学实验,以400 N/s的速率加载至目标应力值,将该应力保载120 s,随后将应力进行卸载至2 MPa。对同一组散体试样进行多级循环加载(如加载至第1级应力,保载,卸载至残余应力,再加载至第2级,依此类推),并在每级循环后记录数据,最后再用天平称量各粒径区间散体的质量,从而统计散体粒径分布。

2 不同岩性散体力学参数变化规律

为了探究不同岩性散体的力学特性, 绘制了应力-应变曲线(图 4)。可以发现, 随着施加应力的增加, 散体应变不断增大, 石灰岩、砂岩、泥岩最终应变分别为 0.271、0.305、0.369。其中, 强度较低的泥岩散体试样更易变形, 最终应变值最大。强度最高的石灰岩, 其抵抗变形能力最强, 最终应变值最小, 因此, 散体应力-应变与试样强度有一定关联, 岩性强度较低的散体随应力的升高而变形更为明显, 应力-应变曲线上升较快。

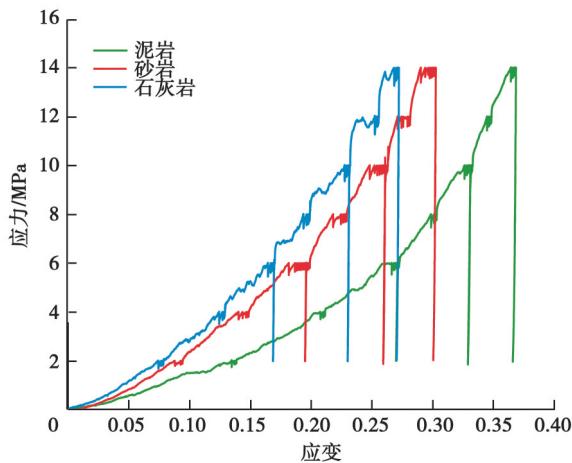
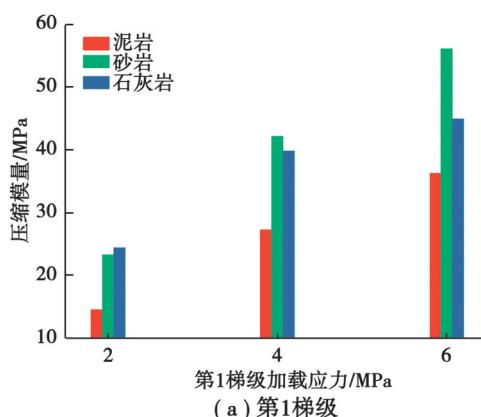


图 4 不同岩性散体应力-应变特征

Fig. 4 Stress-strain characteristics of granules with different lithologies

垮落带不同岩性散体的压实特性及承载力学性质对上覆岩层移动有重要影响。压缩模量是衡量材料抵抗压缩变形能力的重要指标, 反映了材料在受到压缩应力时的抵抗变形能力。本文通过计算压缩模量来表征破碎散体承压过程中的压缩变形特征, 计算了散体试样的压缩模量变化并绘制了各梯级应力加载过程中压缩模量的变化曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 不同岩性的散体压缩模量变化趋势具有一致性, 均随第 1 梯级应力的增大而上升。第 2 梯级应力加载过程中, 散体压缩模量整体呈下降趋势, 散体承载能力在该阶段大幅下降。其中, 泥岩散体压缩模量变化愈加明显, 对应泥岩试样承载能力下降越快。第 3 梯级应力加载至 8 MPa 过程中, 压缩模量出现回弹上升现象。随着应力的持续加载, 不同岩性散体压缩模量大幅降低, 说明应力梯级重复加载造成不同岩性试样抵抗变形能力大幅下降。这可能表明其内部结构在加载后期发生了进一步的破坏或调整。岩块强度越低, 其散体在压实与再破碎过程中越容易发生颗粒破碎, 导致整体结构稳定性越差, 承载能力越弱。



(a) 第 1 梯级

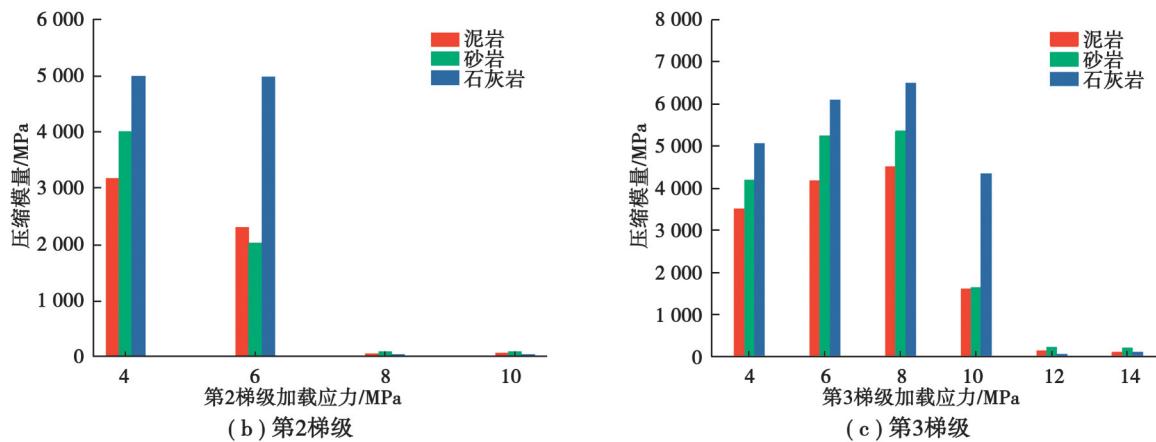


图5 不同岩性散体压缩模量变化
Fig. 5 Variation of compressive modulus of granular with different lithologies

3 不同岩性散体能量密度演化特征

岩石破坏的根本原因是在外界能量的驱动下,其内部裂隙不断萌生、发育、扩展及贯通,最终发生破坏^[25]。因此,分析散体压实变形过程中能量演化规律对于揭示其变形破碎特性尤为重要。其中,能量密度作为衡量散体能量变化的重要指标,可有效反映单位体积散体压实变形过程中所输入的能量。

根据能量守恒定律,试样能量密度 v_e 可表示为:

$$v_e = W - W_m = \left(1 - 0.1075 \frac{h_0}{r}\right) W \quad (1)$$

式中: W 、 W_m 、 μ 、 λ 、 r 和 h_0 分别表示单位体积内对试样做功量、摩擦力单位体积能量、摩擦系数、侧压系数、缸筒内径和试样初始高度。

为了探究不同岩性散体压实再破碎过程中能量演化时变规律,结合式(1)绘制了能量密度-时间曲线,如图6所示。可以发现,不同岩性散体压实破碎过程中的能量耗散情况存在一定差异。其中,相同加载条件下,泥岩能量密度最低,相比之下,石灰岩和砂岩的能量密度更高。通过观察不同岩性散体能量变化图可以发现,同一压缩时段周期内,泥岩散体试样对应能量密度较低,说明泥岩散体消耗较低能量参与压实破碎过程,而其他试样由于较高的强度压实变形较为困难,因此,对应输入能量更高。此外,通过分析能量密度阶段变化量可以看出不同岩性散体试样加载前期能量密度变化量较高,压实前期内部结构出现一定调整。

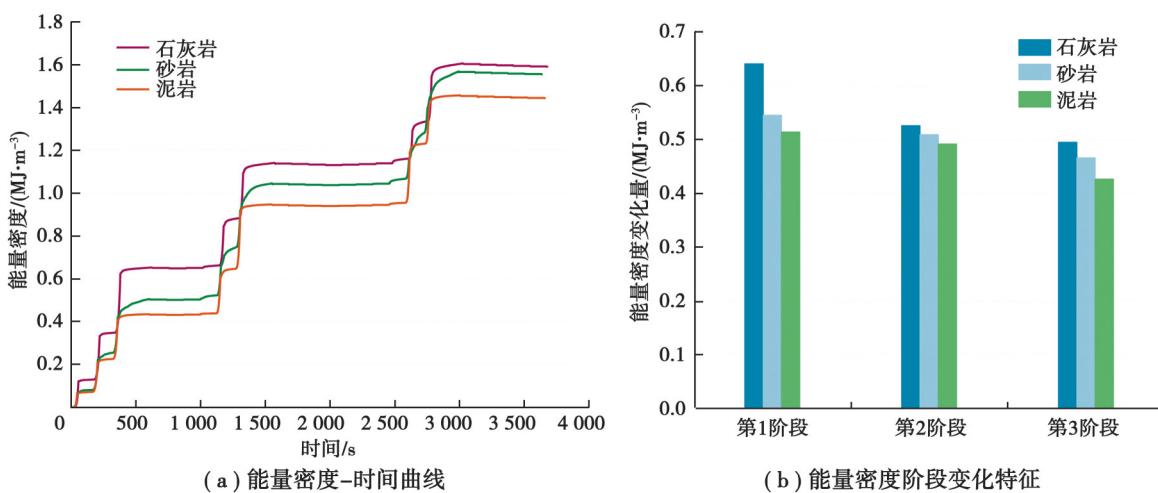


图6 散体能量密度阶段变化
Fig. 6 Energy density variation of granular with different stages

根据相关数据绘制了不同岩性散体累积能量密度变化图(图 7)。可以看出: 相同应变下, 石灰岩所输入的能量密度较高, 石灰岩散体相比泥岩和砂岩散体达到同一变形需要消耗更多的能量, 说明岩性变化会对整体试样颗粒破碎产生影响。

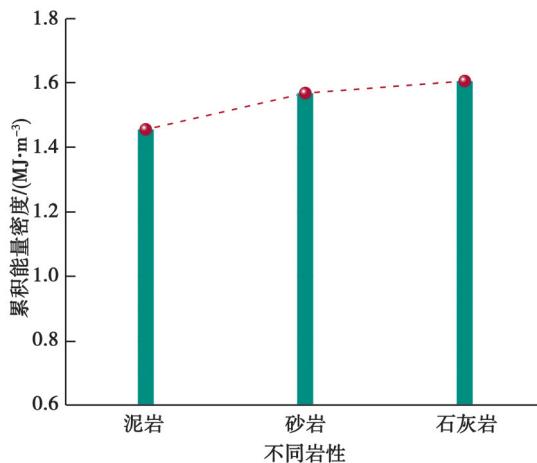


图 7 不同岩性散体累积能量密度变化特征

Fig. 7 Cumulative energy density curves of granular with different lithologies

4 不同岩性散体振铃计数演化特征

散体试样压缩过程中, 颗粒的破裂和摩擦均会产生声发射信号, 采用声发射设备收集了各组试样散体压缩过程中的信号数据, 依据声发射振铃计数的变化特征分析散体颗粒破碎程度及出现的频次, 绘制了循环荷载下声发射振铃计数随时间变化曲线, 表征散体变形破裂情况, 如图 8 所示。

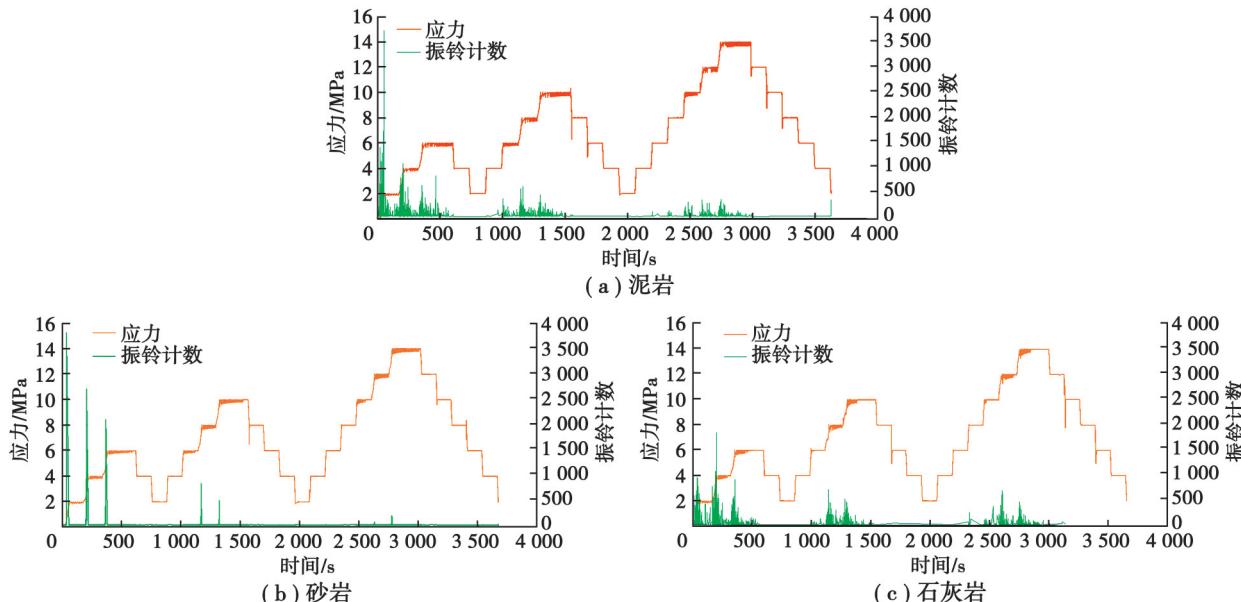


图 8 散体时间-声发射振铃计数变化特性

Fig. 8 Variation characteristics of acoustic emission ringing signals of dispersions with different times

可以发现, 各组试样声发射振铃计数随加载时间的递增呈现逐渐上升趋势, 散体振铃计数在各应力加载阶段表现出不同的特征。实验初期, 各组试样振铃计数曲线迅速上升。泥岩在第 1 梯级应力加载过程振铃信号最为活跃, 说明此阶段泥岩散体压实破碎频次最高。相比之下, 在第 2、第 3 梯级应力加载过程中, 声发

射计数曲线较为平稳,表明碎块间的错动和破碎颗粒间的孔隙逐渐减少,颗粒间的紧密堆积和摩擦力增大,使得颗粒移动变得更加困难。

为了定量表征循环荷载下散体试样各加载阶段累计振铃计数变化,绘制了不同岩性影响下散体各阶段振铃计数占比及累计振铃计数变化图(图9)。可以发现,不同岩性的散体试样在第1阶段振铃计数均占比最高,说明第1应力加载阶段压实破碎频次较高。同时,泥岩累计振铃计数较高,说明较低强度散体试样更易出现内部颗粒压实破碎。

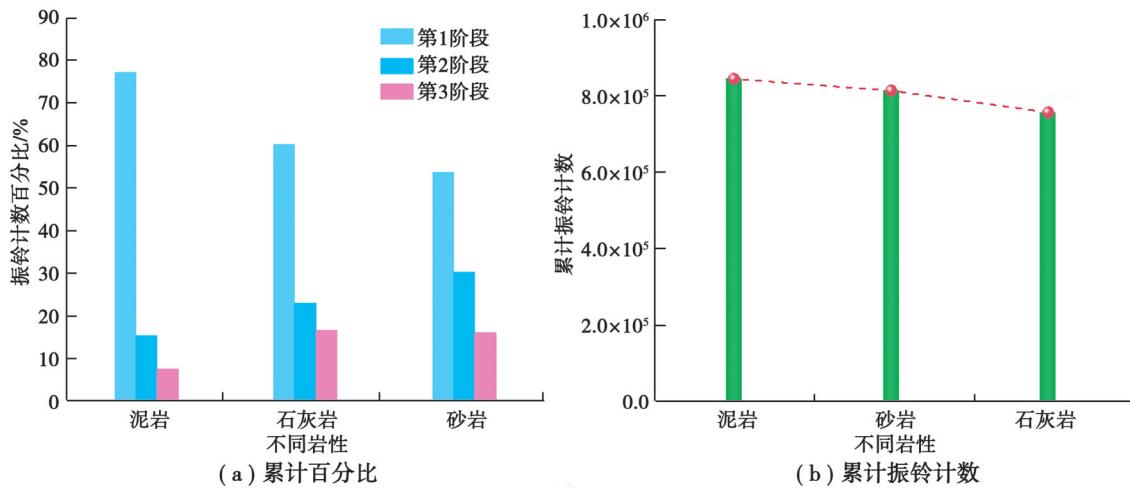


图9 不同岩性的散体累计振铃信号变化特性

Fig. 9 Variation characteristics of cumulative ringing signals of granules with different lithologies

5 散体粒径分布与孔隙演化特征

循环荷载作用下散体碎块粒径分布可反映散体变形后颗粒破碎情况。为了深入分析不同岩性散体在各粒径区间的质量分布特征,将侧限压缩试验后的散体试样进行筛分处理,并结合散体在各粒径区间的质量数据绘制了质量分布柱状图,如图10所示。可以发现,散体的岩性对各粒组质量占比影响较为显著。其中,强度较高的石灰岩散体筛分后在初始粒径区间6~8 mm的质量占比较高。

不同岩性散体筛分后的累积质量占比如图11所示。由图11可知,压实再破碎后3组试样累积质量分布总体较为紧密,筛分后不同岩性散体试样中,泥岩对应的小粒径散体试样质量占比最大,说明泥岩散体试样在循环加卸载过程的再破碎效果更显著。

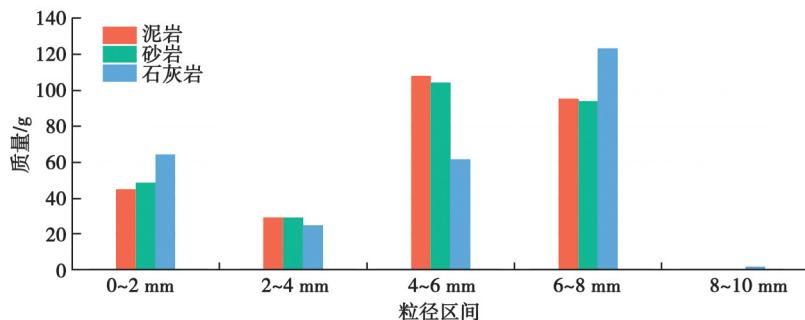


图10 不同岩性散体筛分后质量分布特征

Fig. 10 Characteristics of mass distribution after sieving of granules of different lithologies

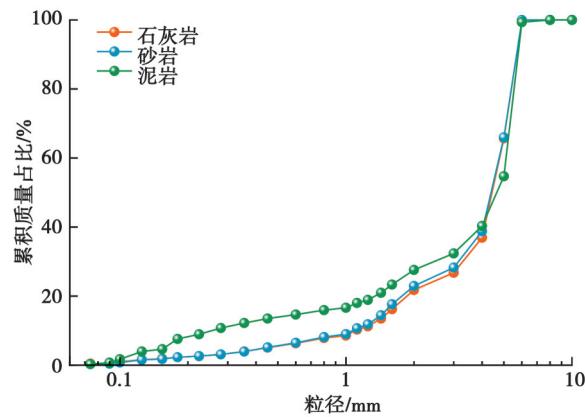


图 11 不同岩性散体累积质量占比

Fig. 11 Percentage of cumulative mass of granules of different lithologies

为了探究散体压实破碎后的破裂特性, 选择分形维数表征循环荷载下试样破碎程度。根据分形理论定义式, 表示为

$$\lg(M_d/M_i) = (3 - D) \lg(d/d_m) \quad (2)$$

式中: M_d 为颗粒的粒径小于 d 的质量, M_i 为试样整体总质量, d 为散体颗粒的特征尺度, d_m 为破碎砂岩的最大颗粒; D 为分形维数。

依据散体筛分后各粒径区间质量分布的统计, 绘制了不同岩性散体粒径比与质量比对数曲线(图 12)。可以发现 $\lg(M_d/M_i)$ 与 $\lg(d/d_m)$ 基本服从线性关系, 说明不同岩性散体压实过程中, 粒度分布满足分形条件, 具

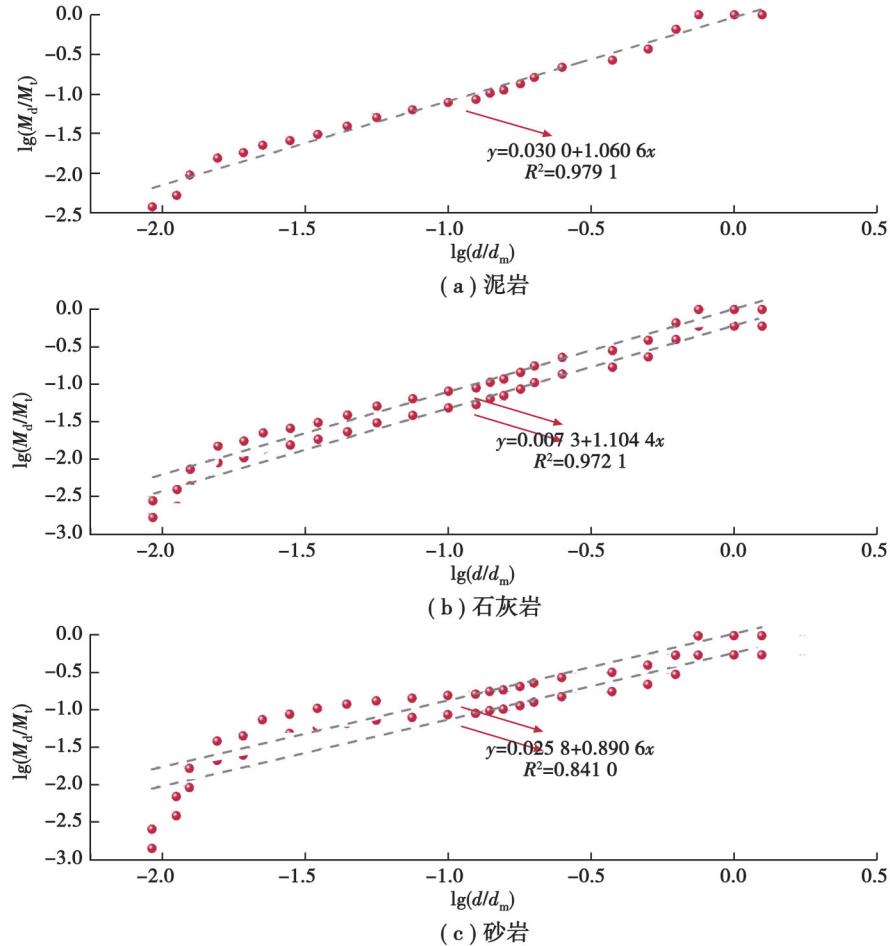


图 12 不同岩性散体粒径比与质量比对数

Fig. 12 Logarithm of particle size ratio and mass ratio of granules with different lithologies

备分形特征。

通过式(2)可得该直线的斜率为($3-D$),随后对试验数据进行一次拟合得到一次方程斜率,以此计算分形维数 D 的值。

不同岩性散体在压实破碎后的分形维数变化如图13所示。由图13可知,不同岩性散体中泥岩的分形维数较高,说明相同荷载下泥岩散体的破碎程度较大。

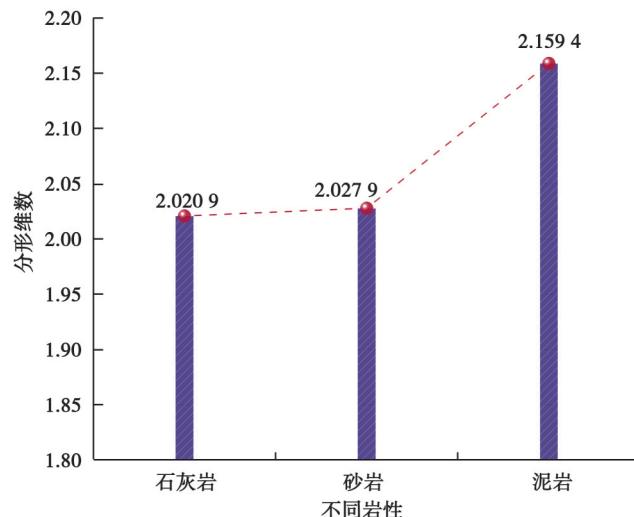


图 13 不同岩性散体分形维数变化

Fig. 13 Variation of fractal dimension of granules for different lithologies

为了深入揭示散体压实破碎过程中内部孔隙演化特征,引入孔隙度这一物理参数^[25],进而定量表征试样受载过程内部孔隙变化规律。可表示为

$$\varphi = (M_0 - M) / M_0, \quad (3)$$

$$M = Q \cdot h. \quad (4)$$

式中: φ, M, M_0, Q 和 h 分别表示试样孔隙度、试样压缩后总体积、试样压缩前总体积、试样的横截面积和试样在压实过程中的高度。

结合式(3)和(4)将实验数据代入并绘制了孔隙度变化图,如图14所示。可以发现,循环荷载过程中泥岩的孔隙度较高。第1梯级应力加载过程中,泥岩孔隙度衰减较快。随着应力的加载,第2、第3梯级间孔隙度变化量开始逐渐减小,不同岩性孔隙度阶段变化量相近。

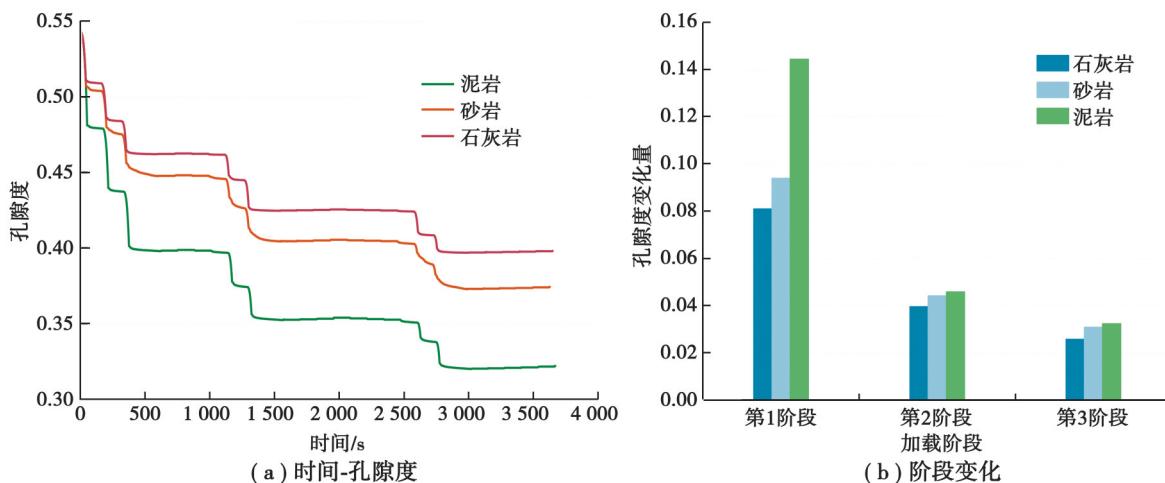


图 14 不同岩性散体孔隙度变化

Fig. 14 Porosity variation of granular with different lithologies

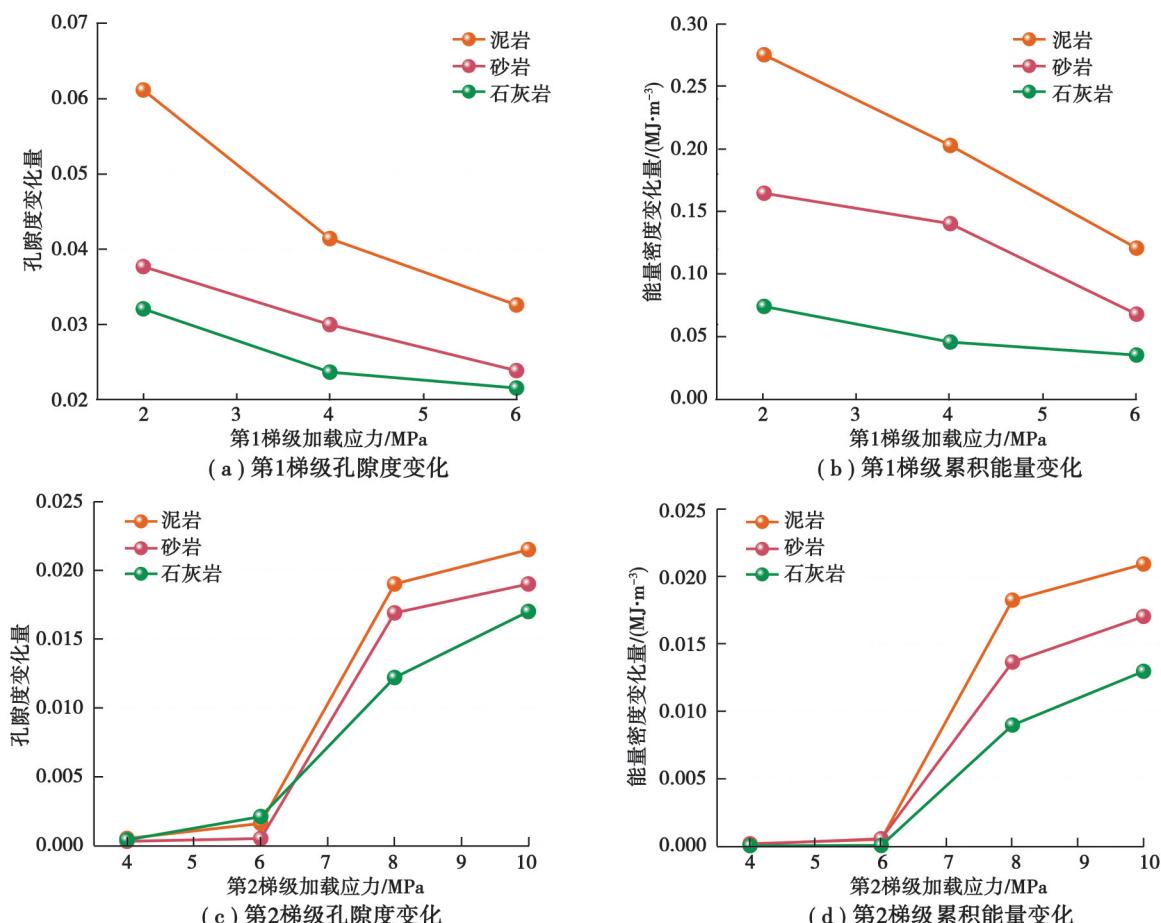
6 不同岩性散体压实与再破碎特征

为了深入探究不同岩性影响下散体压实与再破碎规律, 分别将散体各梯级应力加载阶段孔隙度及能量密度数据进行提取并绘制图形进行对比分析(图 15)。

整体而言, 试样第 1 梯级应力加载时孔隙度与能量密度变化较大。其中, 应力加载至 2 MPa 时, 大量孔隙发生闭合, 对应能量密度变化最大, 说明压实初期散体处于松散状态, 散体内部具有较大的压实与破碎潜能。同时, 泥岩散体试样比其他试样孔隙度高, 其能量密度变化量较大, 说明泥岩散体试样结构更不稳定, 极易受到外部载荷影响而发生变形破坏。随着应力的加载, 能量密度与孔隙变化量逐渐降低, 说明相邻颗粒间原有的较大空间被迅速挤压, 结合图 5(a)压缩模量的逐渐上升趋势, 充分体现了外部扰动下散体在该阶段被迅速压实。

观察图 15(c)(d)可以发现, 第 2 梯级应力加载至 6 MPa 时, 散体能量密度变化量与孔隙度衰减量变化较小, 对应此阶段的压缩模量呈现下降趋势, 说明相邻颗粒由原来的松散结构不断挤压从而出现少量颗粒破碎的情况, 此阶段仍处于散体整体承载能力范围内, 仍以压实状态为主。当应力由 6 MPa 上升至 10 MPa 时, 散体能量密度变化量与孔隙度衰减量开始大幅持续增加, 即散体压实过程可能存在阈值, 超过该阈值后压缩模量开始持续大幅下降。这说明循环荷载下散体的承载能力具有一定限度, 此范围开始由压实状态向破碎状态过渡, 当应力加载超过该范围时, 进入以散体颗粒破碎为主导的阶段, 散体内部大量颗粒发生破裂。

第 3 梯级应力由 4 MPa 加载至 14 MPa 过程中, 不同岩性散体试样能量密度变化量与孔隙度衰减量逐渐升高, 压缩模量呈现上升趋势, 如图 5(c)所示, 说明该阶段散体受到扰动载荷的影响, 相邻挤压破碎的小颗粒间进一步填充孔隙, 密实度逐渐提升, 对应造成耗能逐步增大, 但该阶段仍以散体颗粒变形破裂为主。当外部载荷进一步上升至超过上述阈值后, 压缩模量呈下降趋势, 如图 15(e)所示, 且散体需要消耗的能量呈现上



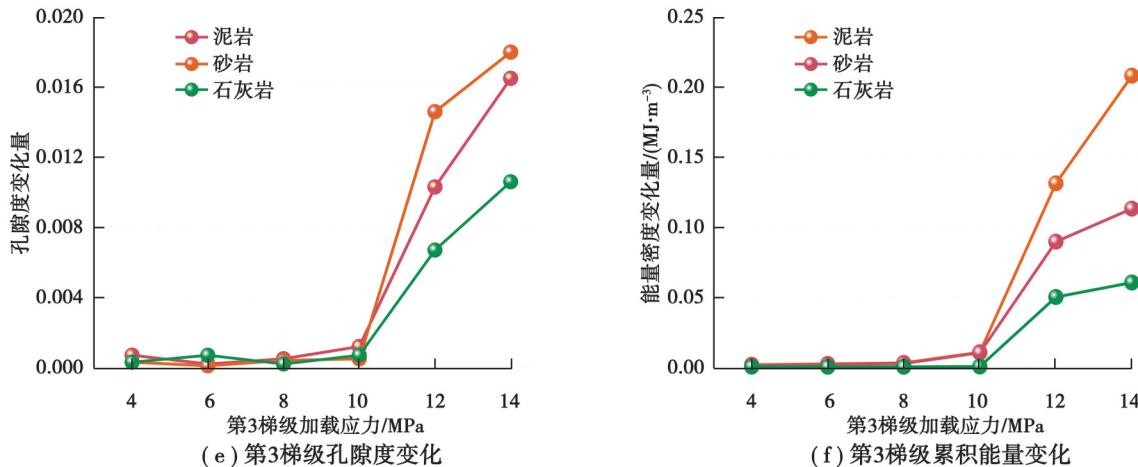


图 15 各阶段能量及孔隙度变化

Fig. 15 Variation of energy and porosity in different stages

升趋势,如图15(f)所示,说明散体颗粒移动逐渐变得困难。该阶段散体相邻颗粒在外部荷载作用连续挤压,颗粒破碎后不断移动并重新排列造成颗粒结构及分布位置逐渐调整,促使产生的更小的颗粒填充到孔隙中去,说明该阶段以散体颗粒移动重组为主。

7 结束语

以不同岩性散体为试验对象,开展了循环加卸载力学试验,阐明了循环荷载下散体的压实与再破碎力学参数变化规律,揭示了散体各阶段能量演化特性,并借助声发射监测系统分析了各组散体试样的振铃计数变化规律,获取了散体粒径分布与孔隙演化特征。主要结论如下。

(1)不同岩性试样中强度最低的泥岩应变量最高。不同岩性散体的压缩模量变化均呈现迅速压实、回弹上升、持续破碎的“三阶段”变化特征。其中,泥岩散体在加载过程中更易发生压缩变形,泥岩试样承载能力下降的越快。

(2)不同岩性散体实验过程中的累积能量密度总体呈上升的变化趋势。其中,散体试样每一次达到新的应力水平后能量密度发生突增现象,同一压缩时段内,泥岩散体试样能量密度较低,说明强度较低的散体试样输入较低的能量达到即可达到一定变形。

(3)不同岩性散体的孔隙度随时间的增加而逐渐减小,其中第1梯级应力加载过程中泥岩散体孔隙度衰减最快,压实程度较高,对应声发射累计振铃计数最大,散体内部颗粒压实与再破碎越剧烈,导致了强度较低的散体试样筛分后分形维数逐渐增大。

参考文献

- [1] Yossifova M G. Petrography, mineralogy and geochemistry of Balkan coals and their waste products[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 122: 1-20.
- [2] Adibee N, Osanloo M, Rahmankou M. Adverse effects of coal mine waste dumps on the environment and their management [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(4): 1581-1592.
- [3] Hughes J, Craw D, Peake B, et al. Environmental characterisation of coal mine waste rock in the field: an example from New Zealand[J]. Environmental Geology, 2007, 52(8): 1501-1509.
- [4] 邹全乐,周小莉,王睿智,等.不同分级循环加卸载模式下六边形蜂窝能量演化规律[J].重庆大学学报,2023,46(8): 45-55.
Zou Q L, Zhou X L, Wang R Z, et al. Energy evolution of hexagonal honeycomb under different graded cyclic loading and unloading modes[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(8): 45-55. (in Chinese)

- [5] 邹全乐, 王鑫, 李左媛, 等. 木质素磺酸钙对固井水泥石变形破坏特性的影响及其改性机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1606-1621.
Zou Q L, Wang X, Li Z Y, et al. Effect of calcium lignosulfonate on the deformation and failure characteristics of cementing stone and its modification mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1606-1621. (in Chinese)
- [6] Guo G L, Zhu X J, Zha J F, et al. Subsidence prediction method based on equivalent mining height theory for solid backfilling mining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3302-3308.
- [7] Liu E L. Deformation mechanisms of crushable blocky materials upon lateral unloading for a biaxial stress state[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(3): 439-444.
- [8] Feng G R, Li Z, Hu S Y, et al. Distribution of gob empty space for methane drainage during the longwall mining: a case study [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 60: 112-124.
- [9] Liu W, Li Y P, Yang C H, et al. Permeability characteristics of mudstone cap rock and interlayers in bedded salt formations and tightness assessment for underground gas storage Caverns[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 212-223.
- [10] Xia T Q, Wang X X, Zhou F B, et al. Evolution of coal self-heating processes in longwall gob areas[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 86: 861-868.
- [11] Bauer E. Hypoplastic modelling of moisture-sensitive weathered rockfill materials[J]. Acta Geotechnica, 2009, 4(4): 261-272.
- [12] 张村, 赵毅鑫, 屠世浩, 等. 颗粒粒径对采空区破碎煤体压实破碎特征影响机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 660-670.
Zhang C, Zhao Y X, Tu S H, et al. Influence mechanism of particle size on the compaction and breakage characteristics of broken coal mass in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 660-670. (in Chinese)
- [13] 郁邦永, 潘书才, 魏建军, 等. 承压饱和破碎岩石颗粒破碎及渗透率演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 632-638.
Yu B Y, Pan S C, Wei J J, et al. Particle crushing and permeability evolution of saturated broken rock under compaction[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 632-638. (in Chinese)
- [14] 张勃阳, 林志斌, 吴疆宇, 等. 侧限条件下陷落柱破碎岩体的渗流特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 1045-1053.
Zhang B Y, Lin Z B, Wu J Y, et al. Seepage characteristics of broken rock inside collapse column under application of lateral limited uniaxial compression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 1045-1053. (in Chinese)
- [15] 江宁, 尹大伟, 杨永杰, 等. 破碎矸石干湿循环长期承载变形及分形特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 176-182.
Jiang N, Yin D W, Yang Y J, et al. Experimental study on long-term load-bearing deformation and fractal characteristics of crushed gangue under dry-wet cycles[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 176-182. (in Chinese)
- [16] 张村, 赵毅鑫, 屠世浩, 等. 采空区破碎煤岩样压实再次破碎特征的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 696-704.
Zhang C, Zhao Y X, Tu S H, et al. Numerical simulation of compaction and re-breakage characteristics of coal and rock samples in goaf[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 696-704. (in Chinese)
- [17] 王平, 朱永建, 余伟健, 等. 软弱破碎围岩分次压实力学特性试验分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2703-2712.
Wang P, Zhu Y J, Yu W J, et al. Experimental analysis on fractional compaction mechanical characteristics of soft and broken rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2703-2712. (in Chinese)
- [18] 张天军, 庞明坤, 彭文清, 等. 三轴应力下胶结破碎煤岩体渗流稳定性[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 834-840, 847.
Zhang T J, Pang M K, Peng W Q, et al. Seepage stability of cemented and fractured coal rock mass under tri-axial stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4): 834-840, 847. (in Chinese)
- [19] 张天军, 尚宏波, 李树刚, 等. 三轴应力下不同粒径破碎砂岩渗透特性试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2361-2370.
Zhang T J, Shang H B, Li S G, et al. Permeability tests of fractured sandstone with different sizes of fragments under three-dimensional stress states[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2361-2370. (in Chinese)
- [20] 郁邦永, 陈占清, 戴玉伟, 等. 饱和破碎砂岩压实过程中粒度分布及能量耗散[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 197-204.
Yu B Y, Chen Z Q, Dai Y W, et al. Particle size distribution and energy dissipation of saturated crushed sandstone under compaction[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 197-204. (in Chinese)
- [21] 张天军, 尚宏波, 李树刚, 等. 分级加载下破碎砂岩渗透特性试验及其稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1129-1136.
Zhang T J, Shang H B, Li S G, et al. Permeability characteristics of broken sandstone and its stability analysis under step loading[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1129-1136. (in Chinese)

- [22] 马丹, 段宏宇, 张吉雄, 等. 断层破碎带岩体突水灾害的蠕变-冲蚀耦合力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1751-1763.
Ma D, Duan H Y, Zhang J X, et al. Experimental investigation of creep-erosion coupling mechanical properties of water inrush hazards in fault fracture rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1751-1763. (in Chinese)
- [23] 谢和平. 分形几何及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 14-24.
Xie H P. Fractal geometry and its application to rock and soil materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(1): 14-24. (in Chinese)
- [24] 郑克洪, 杜长龙, 邱冰静. 煤矸破碎粒度分布规律的分形特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 1089-1094.
Zheng K H, Du C L, Qiu B J. Experimental study on the fractal characteristics of crushing coal and gangue[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1089-1094. (in Chinese)
- [25] 马占国, 兰天, 潘银光, 等. 饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1447-1454.
Ma Z G, Lan T, Pan Y G, et al. Experimental study of variation law of saturated broken mudstone porosity during creep process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1447-1454. (in Chinese)

(编辑 吕建斌)