

王成,李洋,刘江斌,等.不同浸泡时间下煤岩组合体破坏特征点能量演化机制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):265-272.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240249

WANG Cheng, LI Yang, LIU Jiangbin, et al. Mechanisms of energy evolution at damage characterization points of coal-rock assemblages under different immersion time[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(3):265-272.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240249

不同浸泡时间下煤岩组合体破坏特征点能量演化机制

王成¹, 李洋¹, 刘江斌¹, 张仲杰¹, 于永江^{2*}, 刘佳铭²

(1. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司羊场湾煤矿, 宁夏银川 750410;
2. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为探究煤岩组合体在不同浸泡时间下变形破坏过程中特征点处的能量演化机制, 针对某矿煤岩体开展了不同浸泡时间下单轴压缩试验, 研究表明: 随着煤岩组合体浸泡时间的增加, 弹性模量、抗压强度、脆性指数与浸泡时间呈负相关, 峰值应变与浸泡时间呈正相关。基于能量计算原理可知, 随着浸泡时间的延长, 煤岩组合体在线弹性起始点处的弹性应变能占比逐渐增大, 在微裂纹形成和孔隙闭合过程中的耗散能占比较低; 在峰值应力处, 储存弹性应变能与吸收总应变能的能力越弱, 耗散能占比反而越高, 表明其能量耗散越显著; 在峰后完全破坏处, 吸收的总应变能呈下降趋势, 表明其吸收外界能量的能力在逐渐降低。进一步探究了煤岩组合体冲击倾向性演化规律, 当组合体浸泡时间增至21 d时, 能量冲击指数 I_{ACF} 与改进的脆性指数 I_{BIM} 逐渐降低, 但当浸泡时间增至28 d时, 即试样达到饱和状态, I_{ACF} 与 I_{BIM} 反而呈上升趋势。研究成果为煤岩矿柱水害预测评价与岩石力学评估提供参考。

关键词: 煤岩组合体; 浸泡时间; 能量演化; 力学特性; 半轴压缩实验; 能量耗散

中图分类号: TD821

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)03-0265-08

Mechanisms of energy evolution at damage characterization points of coal-rock assemblages under different immersion time

WANG Cheng¹, LI Yang¹, LIU Jiangbin¹, ZHANG Zhongjie¹, YU Yongjiang^{2*}, LIU Jiaming²
(1. Yangchangwan Coal Mine, National Energy Group Ningxia Coal Industry Company, Yinchuan 750410, China; 2. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to explore the energy evolution mechanism of the characteristic points in the deformation and failure process of the coal-rock combination under different soaking time, the uniaxial compression test of a coal-rock mass under different soaking time was carried out. The results show that with the increase of the soaking time of the coal-rock combination, the elastic modulus, compressive strength and brittleness index are negatively correlated with the soaking time, and the peak strain is positively correlated with the soaking time. Based on the principle of energy calculation, it can be seen that with the extension of soaking time, the proportion of elastic strain energy increases gradually at the starting point of linear elasticity of coal-rock combination, and the proportion of dissipated energy in the process of microcrack formation and pore closure is relatively low. At the peak stress, the weaker the ability to store elastic strain energy and absorb total strain energy, the higher the proportion of dissipated energy, indicating that the energy dissipation is more significant. At the post-peak complete failure, the total strain energy absorbed shows a downward trend, indicating that its ability to absorb external energy is gradually decreasing. The evolution law of the impact tendency of the coal-rock combination was further explored. When the soaking time of the combination increased to 21 days, the energy impact index I_{ACF} and the improved brittleness index I_{BIM} gradually decreased. However, when the soaking time increased to 28 days, that is, the sample reached saturation, I_{ACF} and I_{BIM} showed an upward trend. The research results can provide

收稿日期: 2024-08-09 修回日期: 2024-10-09 接受日期: 2024-10-16 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52374092)

作者简介: 王成 (1975-), 男, 汉族, 宁夏中宁人, 硕士, 工程师, 主要从事矿井安全方面的研究。E-mail: 13390781581@sohu.com

通信作者: 于永江 (1971-), 男, 汉族, 内蒙古集宁人, 博士, 副教授, 主要从事岩层控制方面的研究。E-mail: yuyongjiang001@163.com

reference for the prediction and evaluation of water disaster and rock mechanics evaluation of coal and rock pillars.

Keywords: coal-rock assemblage; immersion time; energy evolution; mechanical properties; uniaxial compression test; energy dissipation

0 引言

随着地下煤矿开采深度不断增加,地下水与煤岩体发生的物理、化学反应日益复杂,导致煤岩体结构受损、力学性质劣化^[1-4]。水是诱发地质灾害最活跃的因素之一,工程岩体发生变形、失稳、破坏等过程往往伴随着水的参与。水-岩相互作用导致的岩体力学特性劣化,直接影响能量释放和吸收的速率,当能量突然释放时,往往引发冲击地压等动力灾害^[5-8]。因此,研究水-岩作用下煤岩组合体的力学特性及能量演化机制,不仅能为科学指导煤矿井下安全开采提供理论支撑,还可为预防冲击地压等动力灾害提供科学依据。

多年来,针对水-岩作用下煤岩组合体变形破坏过程中力学特性及能量演化,学者们开展了一系列研究。陈光波等^[9]对不同循环次数的砂岩-煤组合体单轴压缩试验,探究了循环水-岩作用下煤岩组合体力学特性及劣化机制。张博成等^[10]对不同高度比例煤岩组合体开展了干燥与饱水条件下单轴压缩试验,探究了组合体界面处应力分布关系。李谭等^[11]对3种煤岩组合体开展了轴向压缩试验,探究了水-岩作用下组合体的力学特性、损伤特征及劣化机制。柳晶等^[12]对3种不同煤岩强度比的煤岩组合体开展了饱水前与饱水后的单轴压缩试验,探究了水-岩作用下组合体的力学特性演化规律及声发射损伤特征。冯佰研等^[13]对不同饱水-失水循环次数的蚀变岩进行了三轴压缩试验,探究了水-岩作用下蚀变岩石力学特性及劣化机制。张天军等^[14]对不同含水率下钻孔周围的煤岩展开分级加载蠕变声发射试验,探究了水-岩作用下钻孔周围煤岩组合体的力学特性及劣化机制。姚强岭

等^[15]对不同含水率作用下煤岩组合体进行了单轴压缩及剪切试验,并且在试验过程中对煤岩展开声发射试验,探究了水岩作用下含煤岩系在力学特性、变形破坏机理以及声发射特征方面的差异。

上述研究成果从多维度研究了水-岩作用下煤岩组合体力学劣化及能量演化机制,但针对富水煤岩组合体的能量演化机制的研究多依赖声发射试验,且较少基于能量计算原理研究不同浸泡时间下煤岩组合体破坏特征点的能量演化机制。鉴于此,本文通过开展不同浸泡时间下煤岩组合体单轴压缩试验,分析其力学劣化趋势,基于能量计算原理,探究不同浸水时间下煤岩组合体能量及冲击倾向性演化规律。

1 煤岩组合体力学性质

1.1 试验样品制备及试验方法

选取国家能源集团某矿4-2煤层及其顶板砂岩,制备砂岩-煤(G-C)组合体,煤、岩体积比为1:1,打磨后使其表面平整度为 $[-0.05\text{ mm}, 0.05\text{ mm}]$,按照左建平等^[16]提出的方法黏结组合体界面处,且严格遵循《煤和岩石物理力学性质测定方法第1部分:采样一般规定》(GB/T 23561.1—2024)基本要求,确保每组煤岩试样均取自相同的同一层位与同一方向,煤岩试件见图1,岩-煤组合体见图2。试验开始前,对所有试件进行干燥处理。每组制备10个试件,共5组,共计50个试件,分别浸泡7 d、14 d、21 d、28 d。采用如图3所示的MTS815全数字液压伺服试验系统对试件进行轴向加载,加载采用位移控制方式,速率为0.01 mm/s,数据采集间隔为1 s。

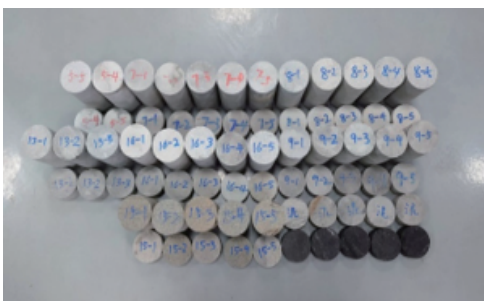


图1 部分煤岩样试件

Fig.1 part of coal and rock samples



图2 砂岩-煤组合体实物

Fig.2 physical of sandstone-coal assemblage



图3 MTS815全数字伺服压缩试验系统

Fig.3 MTS815 full digital servo compression test system

浸泡时间相同的煤岩, 峰前应力-应变曲线具有较好的相似性^[17-18], 因此随机选取一条曲线作为研究对象。不同浸泡时间下煤岩组合体含水率(质量分数)见图4。图4拟合式中, x 表示浸泡时间, y 表示煤岩组合体含水率。

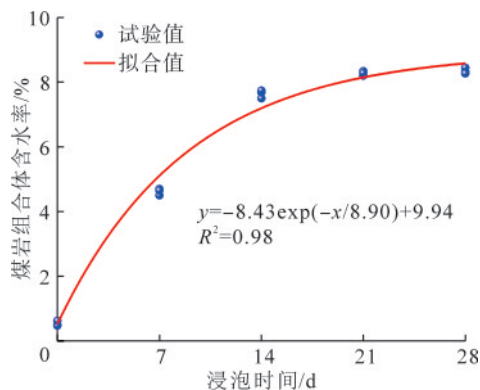


图4 不同浸泡时间下煤岩组合体含水率

Fig. 4 variation of water content of coal-rock assemblage under different soaking time

由图4可知, 浸泡时间超过21 d时, 煤岩组合体试件吸收水分渐接近饱和, 因此认为浸泡时间达到28 d时, 试件为饱水状态。不同浸泡时间试件的应力-应变曲线见图5。由图5可见, 浸泡时间较短时, 试样内部空隙水分填充度较低, 压密阶段持续时间较短, 峰前线弹性阶段占比较高。随着浸泡时间的增加, 试样压密阶段占比显著增加, 抗压强度逐渐降低, 在峰值后出现显著的跌落平台。这是由于煤岩组合体中空隙中含有较多的水分填补, 水分的润滑作用使得煤岩组合体内部的微观裂隙和空隙相对更加容易拓展与连接。

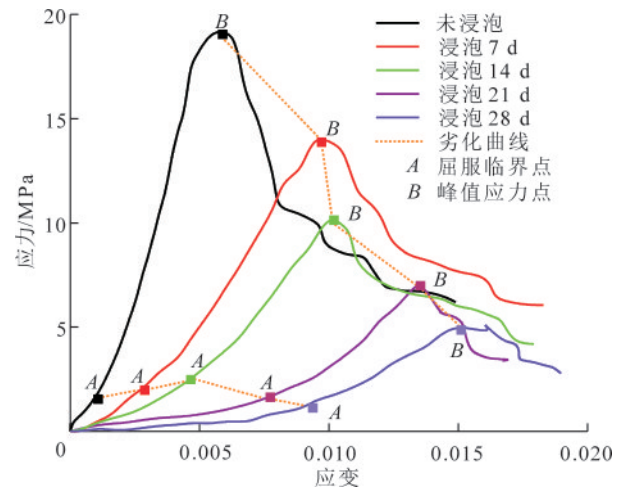


图5 不同浸泡时间下煤岩组合体应力-应变曲线

Fig. 5 stress-strain curve of coal-rock assemblage under different immersion times

根据不同浸泡时间煤岩组合体的破坏全应力-应变曲线, 可得试样的弹性模量 E 、抗压强度 σ_{max} 、峰值应变 ϵ_p 与浸泡时间的关系, 见图6~图8, 其中, 拟合表达式中 x 表示浸泡时间。

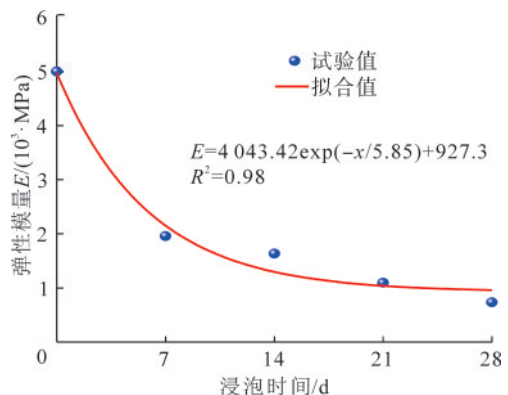


图6 煤岩组合体弹性模量拟合曲线

Fig.6 fitted curve of elastic modulus of coal-rock assemblage

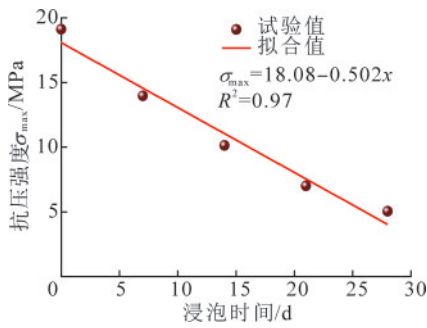


图7 煤岩组合物抗压强度拟合曲线

Fig.7 compressive strength fitting of coal-rock assemblage

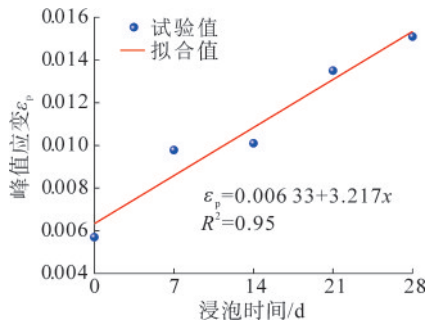


图8 煤岩组合物峰值应变拟合曲线

Fig. 8 peak strain fitting of coal-rock assemblage

由图6~图8可知,煤岩组合体的弹性模量、抗压强度与浸泡时间负相关,峰值应变与浸泡时间正相关。未浸泡试样的弹性模量为4 998.85 MPa,浸泡7 d、14 d、21 d、28 d试样的弹性模量分别下降60.83%、16.59%、32.94%、32.83%;未浸泡试样的抗压强度为19.12 MPa,浸泡7 d、14 d、21 d、28 d的试样抗压强度分别下降26.93%、27.48%、30.83%、28.20%;未浸泡试样的峰值应变为0.0057,浸泡7 d、14 d、21 d、28 d试样的峰值应变分别上升71.57%、3.27%、33.66%、11.85%。分析可知,随着浸泡时间的增加,试件弹性模量、抗压强度下降,这是因为水-岩作用加快煤岩组合体的软化、加速煤岩系统的失稳,浸泡时间对煤岩组合体的力学参数具有显著劣化效应。

脆性指数B是岩石的综合属性,在自身非均质性与外力作用下产生内部非均匀应力与局部应力集中,导致局部破坏,产生裂隙与裂痕的能力,可表示为

$$B = \alpha \sigma_c / \epsilon_p, \quad (1)$$

式中: σ_c 为抗压强度, MPa; α 为修正系数,取0.1。

由式(1)可得,浸泡0 d、7 d、14 d、21 d、28 d试样的脆性指数分别为33.54、14.28、10.24、

5.26、3.33,如图9所示。分析可知,浸泡时间为7 d时,试样的脆性指数下降57.42%;浸泡时间由7 d上升至14 d,脆性指数下降28.29%;浸泡时间由14 d上升至21 d,脆性指数下降48.63%;浸泡时间由21 d上升至28 d,脆性指数下降36.69%。随着浸泡天数的增加,试样脆性逐渐降低,这表明试样内部孔隙被水分子填充,导致内部结构与部分胶结材料发生软化,促使刚度降低。因此,在长时间富水环境下的施工工程应注意岩石的位移控制^[17]。

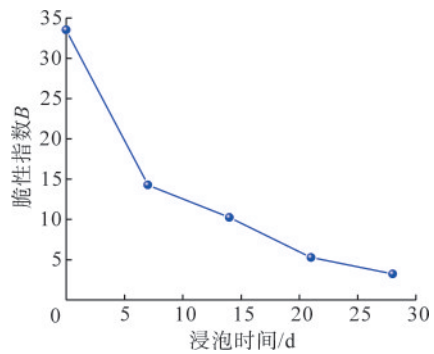


图9 不同浸泡天数煤岩组合物脆性指数

Fig. 9 brittleness index of coal-rock assemblages with different days of immersion

2 煤岩组合物变形破坏过程的能量演化规律

2.1 能量计算原理

从能量角度分析,煤岩组合物在外载荷作用下的变形破坏是能量输入、积聚及耗散的动态演化过程,在裂纹萌生、扩展甚至裂隙宏观扩展过程中均伴随着能量耗散^[19-20],能量全过程演化见图10。研究不同浸泡时间下煤岩组合物在变形破坏过程中的能量演化规律,对揭示浸泡时间对试样损伤破坏的影响机制有重要意义。

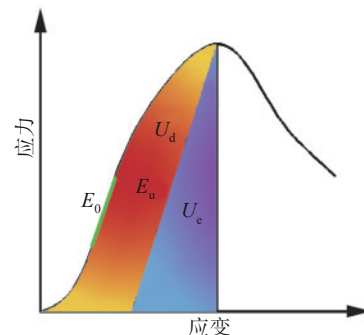


图10 能量全过程演化图

Fig.10 whole process of energy evolution

根据热力学定律^[21-23],外力做功产生的总能量为

$$U_0 = U_d + U_e, \quad (2)$$

式中: U_e 为弹性势能, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$; U_d 为耗散能, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

假设试验过程中系统与外界没有热交换, U_0 即为岩样实际吸收的能量,在单轴压缩条件下有

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0, \quad (3)$$

$$U_0 = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1, \quad (4)$$

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1^2}{2E_u} \approx \frac{\sigma_1^2}{2E_0}, \quad (5)$$

$$U_d = U_0 - U_e = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 - \frac{\sigma_1^2}{2E_0}, \quad (6)$$

式(4)~式(6)中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为煤岩的最大主应力、中间主应力和最小主应力, MPa; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为沿着主应力上的主应变; E_0 为煤岩的实际弹性模量, MPa; E_u 为卸载模量, MPa。

2.2 不同浸泡时间下煤岩能量演化规律

岩石破坏是在外界做功驱动下的状态失稳现象,此过程外力使岩石持续吸收能量,并以释放与耗散的形式动态演化。能量释放指峰前段储存的弹性应变能,自峰值点起在短时间内转化为破裂面扩展贯通的表面能等能量形式,同时为岩石破坏提供原动力^[24]。基于上述能量计算原理,得到不同浸泡时间下煤岩组合体在变形破坏过程中的能量演化规律,见图11。

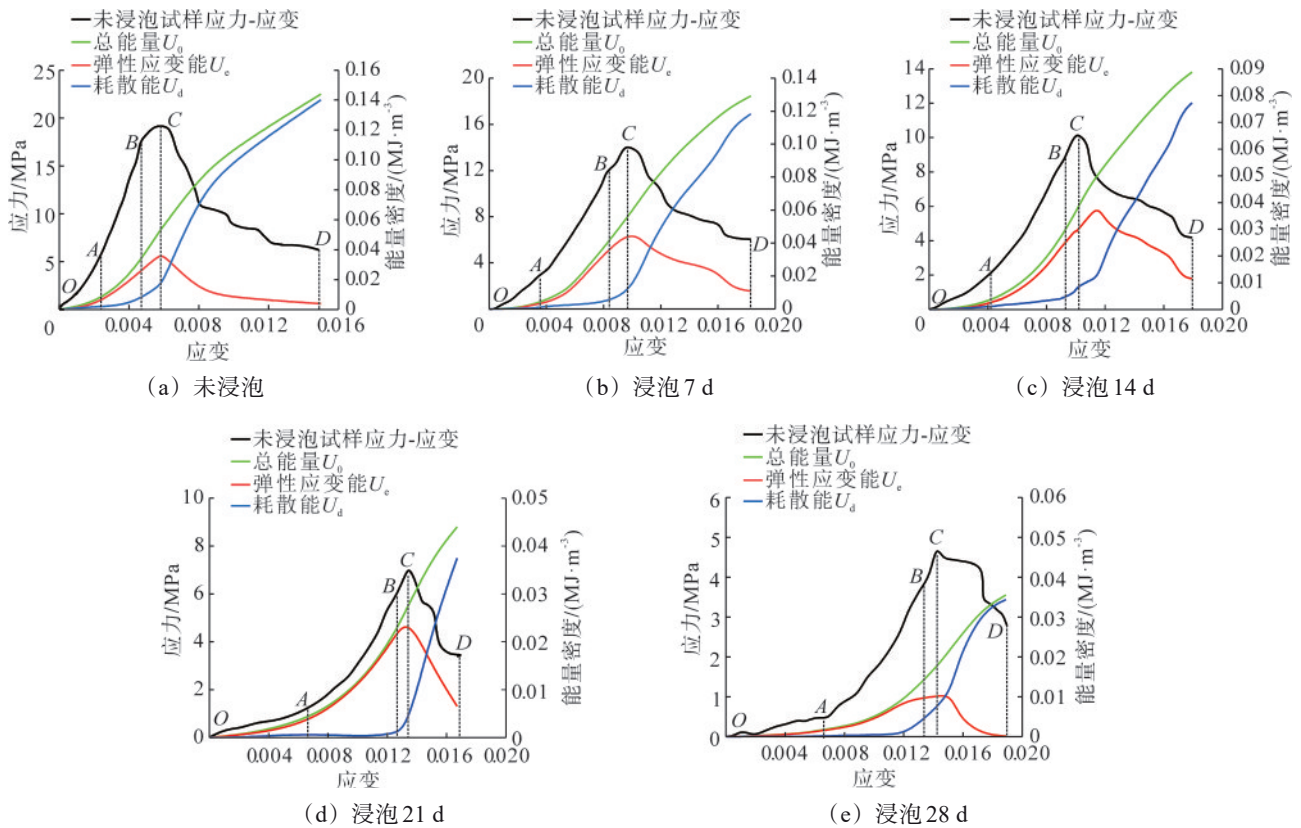


图11 不同浸泡时间下煤岩组合体变形破坏过程中的能量演化

Fig.11 energy evolution during deformation and destruction of coal-rock assemblage under different immersion times

图11中,根据煤岩应力-应变关系,将煤岩组合体加载变形破坏过程分为4个阶段。

压密阶段(OA段),弹性应变能与耗散能几乎不变化,总应变能增速较缓。此阶段试样存在微裂隙闭合与拓展,能量发展特征复杂,但3种能量都较小。在图11各子图的A点处,不同浸泡时间煤岩组合体的 U_e 占 U_0 的比例分别为65.03%、67.75%、69.74%、81.55%、84.57%,说明在此阶段试样耗散于微裂纹、孔隙闭合占比较小。

线性变形阶段(AB段),试样耗散能增幅持续较低,弹性能增幅加剧,说明此阶段试样从外界吸收的能量主要以弹性应变能储存在内部。经计算,浸泡时间为0d、7d、14d、21d、28d的试样,其弹性应变能增速分别为 $8.439 \times 10^{-3} \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 、 $6.804 \times 10^{-3} \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 、 $4.905 \times 10^{-3} \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 、 $2.465 \times 10^{-3} \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 、 $1.449 \times 10^{-3} \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。这说明随着浸泡时间的增加,试样储存弹性应变能的能力在逐渐减弱。

塑性变形阶段(BC段),试样应力-应变呈非线性发展,且表面开始产生一定数量裂纹,内部损伤开始加剧。弹性应变能增幅显著降低,耗散能增幅开始显著增加,弹性应变能在应力峰值C点处达到最大值。

峰后破坏阶段(CD段),试样在此阶段应力快速跌落,储存在内部的弹性应变能快速转化为耗散能,耗散能密度大幅度增加,说明多数能量耗散于破裂面发展中,总能量增速放缓。随着浸泡时间的增加,试样从外界吸收的总能量分别为0.143 9 MJ/m³、0.129 2 MJ/m³、0.088 8 MJ/m³、0.044 0 MJ/m³、0.035 5 MJ/m³,由此表明试样吸收的总应变能随浸泡时间的增加逐渐降低。

煤岩组合体在峰值处的能量特征值如表1所示。图12为不同浸泡时间下煤岩组合体总能量密度、弹性应变能密度、耗散能密度的变化规律。由图12可知,浸泡时间对试样在加载破坏全过程的能量演化具有显著影响。当应变相同时,浸泡时间越长的试样吸收能力越弱。未浸泡试样吸收的总应变能为0.143 9 MJ/m³,而浸泡28 d的试样

总应变能骤降至0.021 1 MJ/m³。由图12(b)可知,应力峰值处试样的弹性应变能分别为0.035 2 MJ/m³、0.044 0 MJ/m³、0.029 9 MJ/m³、0.022 9 MJ/m³、0.010 2 MJ/m³。由此可知,当浸泡时间未超过14 d时,峰值处的弹性应变能变化幅度不显著。由图12(c)可知,在应力峰值前,随着浸泡时间的增加,试样能量耗散愈发显著,说明在浸泡时间较长的情况下,试样破坏前内部损伤已历经较长时间的发展。因此,在实际开挖施工过程中,在围岩较干燥的情况下,其能量易发生急剧释放,进而极易发生岩块弹射、崩塌甚至岩爆等地质灾害,可通过喷射高压水降低围岩发生岩爆的概率。

表1 峰值处能量特征值

Tab.1 characteristic values of energy at the peak			
浸泡时间/d	U_0 /(MJ·m ⁻³)	U_e /(MJ·m ⁻³)	U_d /(MJ·m ⁻³)
0	0.053 7	0.035 2	0.018 5
7	0.056 5	0.044 0	0.012 5
14	0.038 4	0.029 9	0.008 5
21	0.027 5	0.022 9	0.004 6
28	0.017 8	0.010 2	0.007 6

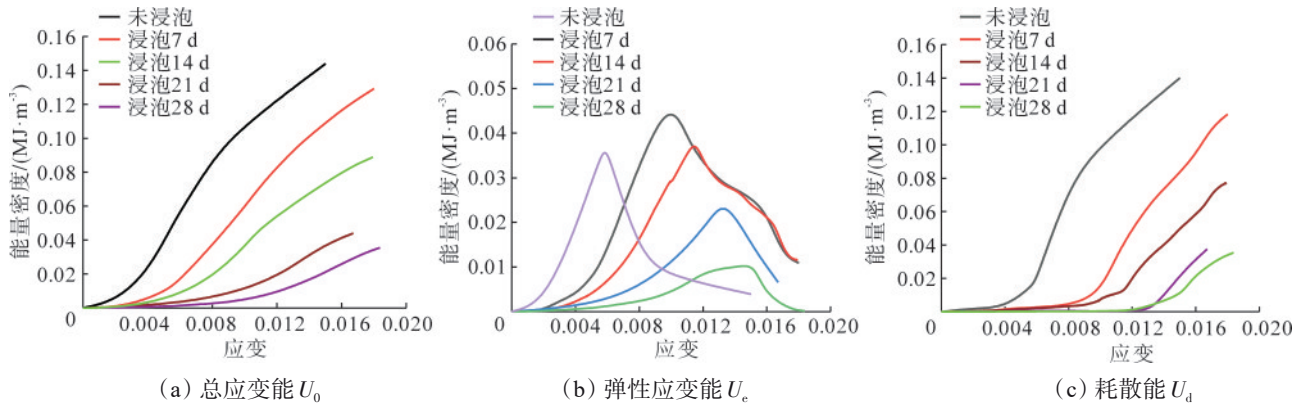


图12 不同浸泡时间下各能量演化规律

Fig.12 evolutionary pattern of each energy under different immersion times

3 煤岩组合体冲击倾向性

根据文献[25]和国家标准 GB/T 25217.2—2010,煤的冲击倾向性指标有4种,分别为能量冲击指数、单轴抗压强度、弹性能指数与动态破坏时间。煤岩组合体的力学特性劣化主要取决于煤体,因此这4种指标的计算方法同样适用于煤岩组合体。引用能量冲击指数 I_{ACF} 与改进的脆性指数 I_{BIM} ,量化不同浸泡时间下煤岩组合体试样的冲击倾向性,即

$$I_{ACF} = A_1/A_2, \quad (7)$$

式中: A_1 为峰值强度前全应力-应变曲线与横坐标围成的面积; A_2 为峰值强度后全应力-应变曲线与

横坐标围成的面积。

$$I_{BIM} = B_2/B_1, \quad (8)$$

式中: B_1 为基于割线模量E50计算的峰值时弹性应变能; B_2 为峰前加载曲线下的总面积。

由式(8)、式(9)可得不同浸泡时间下煤岩组合体能量冲击指数,见图13。

由图13可知,当组合体浸泡时间达到21 d时, I_{ACF} 与 I_{BIM} 逐渐降低;当浸泡时间达到28 d时,试样达到饱水状态, I_{ACF} 与 I_{BIM} 出现大幅度增加,表明试样冲击倾向性显著增大,这与文献[20]的结论一致。

当试样达到饱水状态时,稳定形成的水膜与孔隙水压力产生协同作用。此过程中,由于裂隙

水不可压缩性,孔隙水与稳定水膜构成的连续介质提供了附加刚度效应。该效应通过应力重分布机制,在承载阶段抵消了部分外部载荷导致的裂隙尖端应力集中,抑制了孔隙二次扩展。综合来看,浸泡时间达到21 d时,试样软化效果明显,即一定量的水对试样的损伤演化起缓解作用,当浸泡时间达到28 d时,水膜和孔隙水的耦合效应逐渐显现,加剧试样的破坏剧烈程度^[26]。

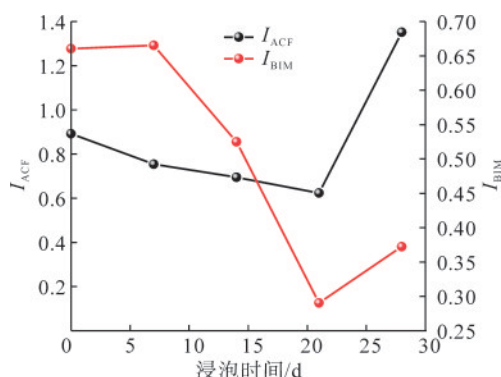


图13 不同浸泡时间下煤岩组合体的 I_{ACF} 与 I_{BIM}

Fig. 13 I_{ACF} and I_{BIM} of coal-rock combination under different soaking time

4 结论

(1) 煤岩组合体的峰值应力、弹性模量与脆性指数随浸泡时间的增加逐渐降低,峰值应变随浸泡时间的增加反而升高,劣化趋势均呈先缓后快的变化。

(2) 浸泡时间的增加使煤岩组合体在压密阶段弹性应变能占比逐渐增加,表明其能量耗散越显著,但量值较低;在弹塑性分界处,试样耗散能占比显著升高,表明内部开始出现不可逆塑性变形,弹性应变能增速逐渐放缓,在破坏点达到峰值。在峰后阶段,试样浸泡时间越长,其吸收总应变能的能力逐渐降低。

(3) 浸泡时间的增加促使煤岩组合体的冲击倾向性显著降低,当浸泡时间增至28 d时,试样达到饱和状态, I_{ACF} 与 I_{BIM} 出现大幅度增加,表明试样冲击倾向性显著增强,破坏剧烈程度加剧。

参考文献(References):

- [1] 张雷,徐智敏,袁慧卿,等.深部开采高盐矿井水减排治理技术体系构建与实现[J].煤炭科学技术,2023,51(12):208-219.
ZHANG Lei, XU Zhimin, YUAN Huiqing, et al. Construction and implementation of emission reduction and treatment technology system in deep mining of high salt mine water[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 208-219.
- [2] 曾一凡,朱慧聪,武强,等.我国不同类别煤层顶板水害致灾机理

与防控路径[J].煤炭学报,2024,49(3):1539-1555.

ZENG Yifan, ZHU Huicong, WU Qiang, et al. Disaster-causing mechanism and prevention and control path of different types of coal seam roof water disasters in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1539-1555.

- [3] 尹尚先,徐斌,尹慧超,等.矿井水防治学科基本架构及内涵[J].煤炭科学技术,2023,51(7):24-35.

YIN Shangxian, XU Bin, YIN Huichao, et al. Basic structure and connotation of mine water prevention and control discipline[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 24-35.

- [4] YU Y J, YANG Y T, LIU J J, et al. Experimental and constitutive model study on the mechanical properties of a structural plane of a rock mass under dynamic disturbance[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 21238.

- [5] 李见波,许延春,尹尚先.煤层底板加固中浆液充填套管的空间受力特征及其应用[J].煤炭学报,2021,46(7):2245-2253.

LI Jianbo, XU Yanchun, YIN Shangxian. Stress characteristics of casing pipes filled with slurry and its application in grouting reinforcement for coal seam floor strata[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2245-2253.

- [6] 曾一凡,刘晓秀,武强,等.双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J].煤炭学报,2023,48(2):538-550.

ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, et al. Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538-550.

- [7] 曾一凡,于超,武强,等.煤矿防治水“三区”划分方法及其水害防治意义[J].煤炭学报,2024,49(8):3605-3618.

ZENG Yifan, YU Chao, WU Qiang, et al. “Three zones” method for coal mine water hazard control and its significance[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3605-3618.

- [8] YU Y J, LIU J J, YANG Y T, et al. Failure energy evolution of coal-rock combination with different inclinations[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 19455.

- [9] 陈光波,李元,李谭,等.循环水岩作用下煤岩组合体力学响应及劣化机制[J].工程地质学报,2024,32(1):108-119.

CHEN Guangbo, LI Yuan, LI Tan, et al. Mechanical response and deterioration mechanism of coal-rock combined body under the action of circulating water-rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 108-119.

- [10] 张博成,吴斌斌,杨逾.水岩作用下不同煤体厚度组合体力学特性及损伤规律研究[J].河南科学,2024,42(1):55-61.

ZHANG Bocheng, WU Binbin, YANG Yu. Mechanical damage law of coal-rock combined bodies with different coal thicknesses under water-rock interaction[J]. Henan Science, 2024, 42(1): 55-61.

- [11] 陈光波,张俊文,李谭,等.水岩作用下煤岩组合体力学特性损伤劣化机制[J].煤炭学报,2021,46(增刊2):701-712.

CHEN Guangbo, ZHANG Junwen, LI Tan, et al. Timeliness of damage and deterioration of mechanical properties of coal-rock combined body under water-rock interaction[J]. Journal of China

- Coal Society, 2021, 46(Suppl.2): 701-712.
- [12] 柳晶, 李根威. 水岩作用下不同强度煤岩组合物力学特性损伤规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(3): 129-135.
LIU Jing, LI Genwei. Study on damage law of mechanical properties of coal-rock mass with different strength under water-rock interaction[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(3): 129-135.
- [13] 冯佰研, 秦哲, 牛传星, 等. 水岩作用下露天矿蚀变岩石力学试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 39-43, 105.
FENG Baiyan, QIN Zhe, NIU Chuanxing, et al. Study on mechanics test of altered rock under water-rock interaction in surface mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 39-43, 105.
- [14] 张天军, 武晋宇, 庞明坤, 等. 抽采钻孔孔周煤体渗流阻力分布特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 645-654.
ZHANG Tianjun, WU Jinyu, PANG Mingkun, et al. Distribution of coal seepage resistance around extraction boreholes: an experimental study[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 645-654.
- [15] 姚强岭, 王伟男, 李学华, 等. 水-岩作用下含煤岩系力学特性和声发射特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 558-569.
YAO Qiangling, WANG Weinan, LI Xuehua, et al. Study of mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 558-569.
- [16] 左建平, 陈岩, 宋洪强. 深部煤岩组合物破坏行为与非线性模型研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2510-2521.
ZUO Jianping, CHEN Yan, SONG Hongqiang. Study progress of failure behaviors and nonlinear model of deep coal-rock combined body[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2510-2521.
- [17] 王凯, 蒋一峰, 徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070-1079.
WANG Kai, JIANG Yifeng, XU Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1070-1079.
- [18] 于永江, 刘佳铭, 杨云涛, 等. 基于能量原理不同含水率下煤岩体变形破坏能量损伤演化机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 67-80.
YU Yongjiang, LIU Jiaming, YANG Yuntao, et al. Mechanical properties and damage constitutive model of coal with different water content based on energy principle[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 67-80.
- [19] 党亚倩, 吴亚敏, 王团结, 等. 不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征[J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 62-71.
DANG Yaqian, WU Yamin, WANG Tuanjie, et al. Energy and damage evolution characteristics of rock materials under different water contents[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(3): 62-71.
- [20] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570.
XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565-3570.
- [21] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [22] YU Y J, LIU J J, WANG P B, et al. Research on mechanical properties and macroscopic fracture evolution of rock with different joint plane features[J]. Shock and Vibration, 2022, 2022(1): 6460090.
- [23] YU Y J, YANG Y T, LIU J J, et al. Mechanical characteristics and energy evolution in a rock mass with a weak structural plane[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 18674.
- [24] 柳万里, 晏鄂川, 戴航, 等. 巴东组泥岩水作用的特征强度及其能量演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 311-326.
LIU Wanli, YAN Echuan, DAI Hang, et al. Study on characteristic strength and energy evolution law of Badong formation mudstone under water effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 311-326.
- [25] 左建平, 宋洪强. 煤岩组合体的能量演化规律及差能失稳模型[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3037-3051.
ZUO Jianping, SONG Hongqiang. Energy evolution law and differential energy instability model of coal-rock combined body[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3037-3051.
- [26] 来兴平, 张帅, 代晶晶, 等. 水力耦合作用下煤岩多尺度损伤演化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊2): 3217-3228.
LAI Xingping, ZHANG Shuai, DAI Jingjing, et al. Multi-scale damage evolution characteristics of coal and rock under hydraulic coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Suppl.2): 3217-3228.