

### 饱和浸水过程矸石胶结充填体强度及损伤特征

于祥 杨科 何祥 侯永强 文志强 张连富

#### 引用本文:

于祥, 杨科, 何祥, 等. 饱和浸水过程矸石胶结充填体强度及损伤特征[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(2): 147–159.

YU Xiang, YANG Ke, HE Xiang, et al. Strength and damage characteristics of cemented gangue backfill during saturated immersion[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(2): 147–159.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.05.0313>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 考虑渗透压力作用的岩石单轴压缩损伤模型构建及试验验证

Construction and experimental verification of a damage constitutive model of rocks under uniaxial compression considering seepage pressure

煤田地质与勘探. 2023, 51(5): 78–87 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.09.0721>

##### 基于动态损伤速率的岩石损伤本构模型

A dynamic damage rate-based constitutive model for rock damage

煤田地质与勘探. 2024, 52(10): 119–128 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.02.0131>

##### 基于Weibull分布的冻结砂岩损伤本构模型研究

Study of constitutive model of frozen sandstone damage based on Weibull distribution

煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 116–124 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.02.0070>

##### 中主应力系数影响下的冻结砂土损伤本构模型

Damaged constitutive model of frozen sand under the influence of intermediate principal stress

煤田地质与勘探. 2020, 48(5): 130–136 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.016>

##### 多源煤基固废胶结充填体力学及变形破坏特征试验研究

Experimental study on the mechanics and deformation failure characteristics of multi-source coal-based solid waste cemented backfill

煤田地质与勘探. 2024, 52(6): 102–114 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0188>

##### 内摩擦角对冻融岩石损伤本构模型的影响探讨

Influence of internal friction angle on damage constitutive model of freeze-thaw rock

煤田地质与勘探. 2019, 47(4): 138–143 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.021>



移动阅读

于祥, 杨科, 何祥, 等. 饱和浸水过程矽石胶结充填体强度及损伤特征[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(2): 147–159. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.05.0313

YU Xiang, YANG Ke, HE Xiang, et al. Strength and damage characteristics of cemented gangue backfill during saturated immersion[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(2): 147–159. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.05.0313

## 饱和浸水过程矽石胶结充填体强度及损伤特征

于 祥<sup>1</sup>, 杨 科<sup>1,2,3,\*</sup>, 何 祥<sup>1,2</sup>, 侯永强<sup>1,3</sup>, 文志强<sup>1</sup>, 张连富<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院 (安徽省能源实验室), 安徽 合肥 230031; 3. 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 【目的】受充填料浆水、工作面涌水和采空区内积水的影响, 矽石胶结充填体的含水率会随浸水时间的增加而发生改变, 进而改变了充填体的承载性能。研究矽石胶结充填体在饱和浸水过程的强度特性及损伤破坏特征, 对于保持充填体的稳定性和保障煤矿安全至关重要。【方法】通过对饱和浸水过程的矽石胶结充填体开展单轴压缩试验和微观电镜扫描测试, 分析充填体强度随浸水时间的变化规律, 并基于微元强度统计分布量, 建立峰前阶段的分段损伤本构模型, 通过微观电镜扫描, 揭示饱和浸水过程中矽石胶结充填体强度弱化机制。【结果和结论】结果表明: (1) 饱和浸水过程中, 胶结充填体单轴压缩下的应力-应变曲线呈现出明显的“四阶段”特征, 孔裂隙压密闭合阶段最大应变和应力及峰值应力点应变与浸水时间呈正相关, 而峰值应力和弹性模量与浸水时间呈负相关。(2) 随着浸水时间的增加, 矽石胶结充填体的破坏形态由剪切破坏为主过渡到以张拉-剪切共轭破坏为主, 最终转化为以纵向张拉破坏为主, 破坏位置主要集中在矽石胶结充填体的中部。(3) 建立了考虑孔裂隙压密闭合阶段最大应力和最大应变、弹性模量及峰值应力和峰值应力点应变的分段损伤本构模型, 基于试验数据对模型进行了验证, 理论模型曲线与试验曲线基本吻合。(4) 受水分张力作用、润滑作用及矿物溶解作用的影响, 将饱和浸水过程中矽石胶结充填体强度弱化机制分为 3 个阶段, 当充填体达到饱和状态后, 其强度持续降低, 但是降低速率减小。研究结果可为采空区富水环境下矽石胶结充填开采提供一定的数据支撑。

**关键词:** 饱和浸水; 矽石; 胶结充填体; 单轴压缩; 分段损伤; 本构模型; 强度弱化机理

**中图分类号:** TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)02-0147-13

## Strength and damage characteristics of cemented gangue backfill during saturated immersion

YU Xiang<sup>1</sup>, YANG Ke<sup>1,2,3,\*</sup>, HE Xiang<sup>1,2</sup>, HOU Yongqiang<sup>1,3</sup>, WEN Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Lianfu<sup>1,2</sup>

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China; 3. Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining, Huainan 232001, China)

**Abstract:** [Objective] Under the influence of backfill slurry, water intrudes in mining face, and water accumulation in goaves, the water content in cemented gangue backfill varies with the immersion time, thus altering the bearing performance of the backfill. Investigating the strength and damage characteristics of cemented gangue backfill during saturated immersion is crucial for maintaining the stability of the backfill and ensuring the safety of coal mines. [Methods] Using uniaxial compression tests and scanning electron microscopy (SEM) of cemented gangue backfill during saturated immersion, this study analyzed the law of changes in the backfill strength under varying immersion times. Based on the

收稿日期: 2024-05-12; 接收日期: 2024-12-05

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(52130402); 安徽省煤炭安全精准开采工程实验室开放课题基金项目(ESCMMP202402); 安徽省关闭/废弃矿井资源开发利用工程研究中心开放基金项目(EUCMR202208); 甘肃省青年科技基金项目(24JRRA1012); 甘肃省青年博士支持项目(2024QB-103)

**第一作者:** 于祥, 1996 年生, 男, 安徽阜阳人, 博士研究生。E-mail: 1872487613@qq.com

**\*通信作者:** 杨科, 1979 年生, 男, 四川舒永人, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: yksp2003@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

statistical distribution of microelement strength, this study established a piecewise damage constitutive model for the cemented gangue backfill in the pre-peak stage. Using SEM, this study revealed the mechanism underlying the strength weakening of the cemented gangue backfill during saturated immersion. [Results and Conclusions] The results indicate that during saturated immersion, the cemented gangue backfill under uniaxial compression exhibited significant four-stage stress-strain curves. In the compaction and closure stage of pores and fractures, the maximum strain/stress and the strain at the peak stress point were positively correlated with the immersion time, while the peak stress and modulus of elasticity were negatively correlated with the immersion time. With an increase in the immersion time, the primary failure morphologies of the cemented gangue backfill transitioned from shear failure to tension-shear conjugate failure, finally shifting to longitudinal tensile failure, with the failures concentrated in the central part of the cemented gangue backfill. This study established a piecewise damage constitutive model for the cemented gangue backfill in the compaction and closure stage of pores and fractures that considered the maximum stress and strain, modulus of elasticity, peak stress, and strain at the peak stress point. This model was verified using test data, indicating that the model-derived theoretical curves were roughly consistent with the test curves. Subjected to the surface tension and lubrication of water, as well as mineral dissolution, the cemented gangue backfill during saturated immersion manifested a three-stage strength weakening mechanism. As the cemented gangue backfill was saturated with water, its strength continued to decrease at a decreasing rate. The results of this study will provide certain data for coal mining based on cemented gangue backfill in environments with water-rich goaves.

**Keywords:** saturated immersion; gangue; cemented backfill; uniaxial compression; piecewise damage; constitutive model; strength weakening mechanism

党的二十大报告指出“深入推进能源革命,加强煤炭清洁高效利用”,进一步彰显了煤炭在我国能源结构中的主导地位<sup>[1-2]</sup>。煤炭开采在推动经济发展的同时,产生了大量如煤矸石、粉煤灰等煤基固废材料,严重污染矿区生态环境<sup>[3-4]</sup>。以煤基固废材料制备胶结充填体进行煤矿井下充填,是一种消纳固废和减小地表沉降切实可行的方法<sup>[5-6]</sup>。然而,充填体在采空区内会受到充填料浆水、工作面涌水和采空区内积水等的浸泡<sup>[7]</sup>,浸水过程将对胶结充填体强度造成不同程度的影响。因此,研究煤基固废胶结充填体在浸水过程中的强度特性及损伤破坏特征,对于保持充填体的稳定性和保障煤矿安全至关重要。

自然浸水对煤岩体力学特性的影响已有众多学者展开研究。通过开展循环浸水煤岩体的单轴压缩性试验,发现煤岩体的抗压强度及弹性模量均随着循环浸水次数的增加而减小<sup>[8-9]</sup>。基于对砂岩压缩过程中受浸水高度和浸水时间的影响研究,发现砂岩抵抗变形的能力随着浸水高度和浸水时间的增加显著降低<sup>[10]</sup>。Gao Liyang 等<sup>[11]</sup>开展了温度和浸水作用对煤岩体力学性能、声发射特征的影响研究,指出温度和浸水均会影响煤岩体的力学性能,浸水会使煤岩体的塑性增大,影响裂纹的膨胀。通过开展不同浸水时间下垂直层理和水平层理煤岩体的单轴压缩新试验,指出煤岩的吸水特性受层理性的显著影响,层理方向、数量与浸水时间共同影响煤岩体的力学性质<sup>[12-13]</sup>。Xu Yong 等<sup>[14]</sup>探究了水浸作用对煤体孔隙结构的影响,发现水浸通过影响煤体的孔隙结构进而影响其强度。尹大伟<sup>[15]</sup>、Ding Yisong<sup>[16]</sup>等研究

了初始损伤与压力水浸耦合下,煤样的单轴压缩力学行为,指出初始损伤量与压力水浸煤样的抗压强度、弹性模量呈负相关。韩鹏华等<sup>[17]</sup>将煤样的自然浸水分为非饱和浸泡阶段和长期浸泡阶段,指出在非饱和浸泡阶段与长期浸泡阶段煤样的抗压强度分别降低了 46.3%、34.5%,且呈指数函数降低。

在水分对胶结充填体力学特性及损伤特征影响方面,Liu Jiawei 等<sup>[18]</sup>基于对充填体的力学、渗透与微观结构的测试,发现浸水降低了充填体的黏聚力,水弱化了充填体的力学性能,这种弱化程度受浸水时间和含水量的影响。Zhou Nan 等<sup>[19]</sup>研究了矿井水浸泡和干湿循环对充填体力学性能的影响,表明浸泡和干湿循环弱化了充填体的强度,随浸泡时间的增加,充填体的强度呈指数函数降低的趋势,且干湿循环对充填体强度弱化的影响强于浸泡作用。水分对充填体力学特性的影响除了体现在浸水时间与循环浸水次数上,还会引起充填体含水率的变化进而影响充填体的力学特性。研究表明,充填体的抗压强度、峰值应变、弹性模量均会随着充填体含水率的增加逐渐减小,含水率的增加会促进充填体损伤的发展,含水率对充填体力学特性的弱化分为物理效应、化学效应和结构效应<sup>[20-22]</sup>。为了进一步探究含水率对充填体损伤发展及蠕变行为的影响,宋学朋等<sup>[23]</sup>建立了基于能量耗散的充填体损伤模型,指出干燥和饱水分别对充填体的抗压强度与弹性模量具有强化和弱化作用。李召峰等<sup>[24]</sup>基于 Weibull 统计分布,构建了不同含水饱和度下充填体的损伤本构模型,验证了模型的可靠性。刘鼎等<sup>[25]</sup>分析了蠕变速率、形变和

长期强度受含水率的影响机制,建立了描述不同含水率胶结充填体的分数阶蠕变本构模型。除此之外,还有些学者开展了酸性环境<sup>[26-27]</sup>、氯盐溶液环境<sup>[28-29]</sup>和碳酸盐溶液环境<sup>[30]</sup>浸润下充填体力学特性演化研究。

综合以上分析可知,前人对浸润或浸泡作用下煤岩体的力学特性演化方面开展了大量的研究,但是在胶结充填体受水分影响方面,主要集中于含水率、水环境等因素,针对充填体受自然浸水作用对其力学特性影响方面研究较少,尤其缺乏对充填体达到饱和浸水过程力学特性演化的研究。另一方面,现有的损伤本构模型,主要考虑了应力-应变曲线的弹性变形阶段和塑性屈服变形阶段<sup>[31]</sup>,而忽略了充填体压密阶段的影响。因此,笔者基于充填体的自然浸水试验,发现充填体自然浸水时其含水率会在极短时间内接近饱和含水率,因此,在模拟真实井下采空区水环境对充填体达到饱和过程力学特性影响时,使用含水率作为变量已不能满足要求。笔者选择达到饱和浸水过程中的4个时间点开展矽石胶结充填体的单轴压缩和微观电镜扫描试验,分析充填体强度随浸水时间的变化规律,并基于微元强度统计分布量,建立峰前阶段的分段损伤本构模型,通过微观电镜扫描,揭示饱和浸水过程中矽石胶结充填体强度弱化机制。研究结果可为保持采空区矽石胶结充填体承载特性的稳定性提供理论依据。

## 1 试验设计与方法

### 1.1 试样制备

本试验以煤矽石、粉煤灰、水泥和水为原材料,按照质量比5:2:2:1制备成质量分数为80%的矽石胶结充填材料<sup>[32-33]</sup>。其中煤矽石取自宁夏任家庄煤矿,按照粒径级配筛分为粗(>10~15 mm)、中(>5~10 mm)、细(0~5 mm)3种骨料类型,分别占比35%、35%和30%。粉煤灰为宁夏鸳鸯湖电厂的II级粉煤灰,水泥为4.5级普通硅酸盐水泥(P.O),水为普通自来水,其中粉煤灰和水泥的粒径分布如图1所示。煤矽石的微观形貌呈不规则的块状或片状,易于胶凝产物附着;粉煤灰的微观形貌呈规则的球状、颗粒状,易于在骨料颗粒间运移和流动,使得煤矽石和粉煤灰具有较好的充填属性<sup>[34]</sup>。

将煤矽石、粉煤灰、水泥和水按照比例充分混合搅拌后,浇筑进直径为50 mm、高度为100 mm的圆柱形模具中,24 h后进行脱模,随后在标准的恒温恒湿养护箱(温度:25℃;湿度:90%)中养护28 d。

### 1.2 浸水试验

为了研究浸水作用对胶结充填体强度及损伤破坏的影响,将养护28 d后的试样放入装满纯净水的烧杯中进行自然浸水,浸水过程如图2所示。首先取3个胶

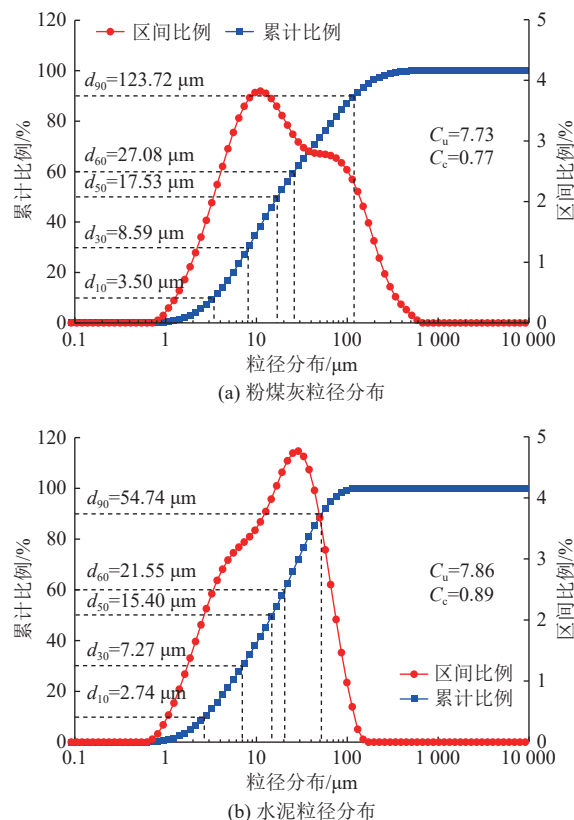


图1 粉煤灰与水泥的粒径分布

Fig.1 Particle size distributions of fly ash and cement

结充填体试件,100℃烘干24 h,待完全烘干后,称取各胶结充填体的质量,并计算3个充填体的平均质量,为消除烘干温度等对充填体力学性质的影响,以烘干后的平均质量作为后续含水率 $w$ 计算时充填体的干燥质量。随后将自然状态的胶结充填体试件分为A、B、C、D共4组,每组3个试样,先对D组试样进行浸水试验,以探究试样含水率随浸水时间的变化规律。

图3为D组胶结充填体在浸水1 h内含水率的变化规律,由图3可知,当浸水时间在0~10 min时,胶结充填体含水率骤增;当浸水时间在10~60 min时,胶结充填体含水率基本稳定,不再随浸水时间增加发生明显变化。发生此种现象的原因是:胶结充填体内部孔隙结构相对发育,孔隙通道的连通性较好<sup>[35]</sup>,导致胶结充填体对水等介质的吸附能力较强,在水的浸泡作用下,水分会快速进入充填体内部的孔隙,以至于胶结充填体的含水率在10 min内骤增并趋近于饱和含水率,称此阶段为非饱和骤增阶段。

图4为D组试样10 min~48 h内的含水率随浸水时间的变化规律,3组试样含水率随浸水时间的增加具有相同的变化趋势。在浸水时间由10 min~24 h内,3组充填体试样的含水率呈现缓慢增加的趋势,将此阶段称为非饱和缓增阶段。在浸水时间24~48 h内,3组试样的含水率增长速率随浸水时间的增加趋于0,即含

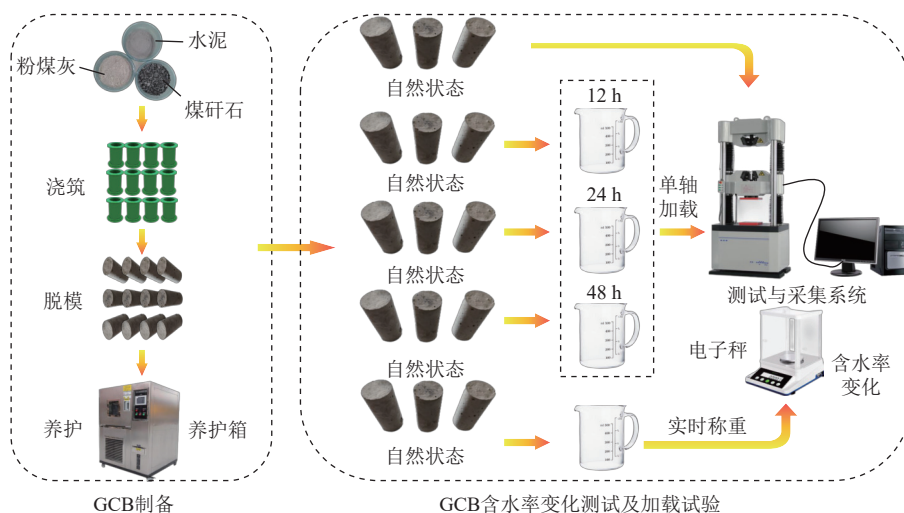


图 2 试验流程及相关设备

Fig.2 Flow chart and related devices for tests

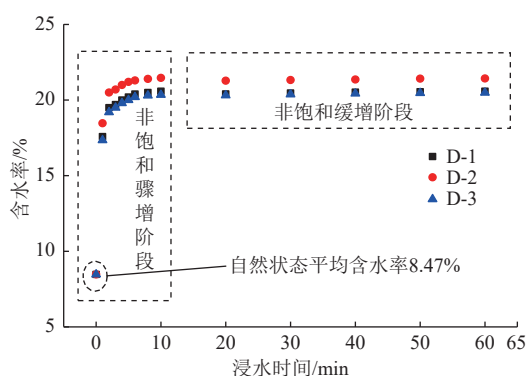


图 3 浸水 60 min 内胶结充填体含水率变化规律

Fig.3 Variations in water content in cemented gangue backfill within 60 min of immersion

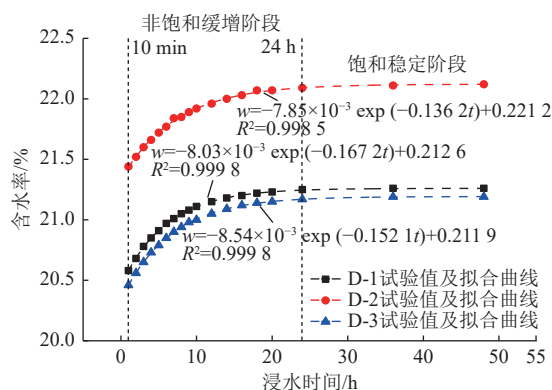


图 4 浸水 10 min~48 h 内胶结充填体含水率变化规律

Fig.4 Variations in water content in cemented gangue backfill within 10 min to 48 h of immersion

水率最终趋向于矸石胶结充填体的饱和含水率,将此阶段称为饱和和稳定阶段。

利用指数函数对 D 组试样含水率与浸水时间(10 min~48 h)的关系进行最佳拟合,由图 4 可知,3 组试样拟合结果的相关系数分别为 0.998 5、0.999 8 和 0.999 8,表明指数函数能够较好地表征矸石胶结充填体

含水率随浸水时间的变化规律。

在非饱和骤增阶段充填体试样的含水率变化较快,持续时间较短,故本文暂不分析该阶段内充填体内部结构及强度的变化规律。由图 4 可知,当充填体浸水 24 h 后其含水率基本不再发生变化,即达到了饱和浸水。前人已经开展了充填体或煤岩体长期浸水的研究,然而针对充填体浸水早期,尤其是在达到饱和浸水的过程中,充填体强度及内部结构变化的规律研究尚存在空缺。因此,根据 D 组试样浸水 48 h 内含水率的变化情况,选取非饱和和缓增阶段(B 组、C 组)和饱和稳定阶段(D 组)作为试验研究对象,将未浸水、浸水 12、24、48 h 的充填体试样分为 A、B、C、D 共 4 组(各组试样含水率的变化规律见表 1),通过含水率和加载试验结果研究饱和浸水过程中矸石胶结充填体强度及损伤特性的演化规律。

表 1 不同浸水时间下胶结充填体含水率变化情况

Table 1 Variations in water content in cemented gangue backfill under different immersion time

试样编号	浸水时间/h	浸水前质量/g	浸水后质量/g	含水率/%
A-1	未浸水	35.09	—	8.35
A-2		349.81	—	8.45
A-3		36.81	—	8.61
B-1	12	350.55	391.71	21.20
B-2		350.23	39.75	21.64
B-3		350.84	39.78	21.44
C-1	24	356.70	397.93	21.01
C-2		35.83	397.60	21.89
C-3		355.35	394.48	21.33
D-1	48	354.69	396.70	21.32
D-2		346.07	389.81	22.19
D-3		35.38	39.86	21.24

### 1.3 加载试验

胶结充填体试样进行浸水后, 开始加载试验, 试验条件及步骤均按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。采用 0.5 mm/min 的位移加载速率将浸水后的胶结充填体加载至破坏。加载系统采用 WAW-2000 型微机控制电液伺服万能试验机, 该试验机最大试验力 2 000 kN, 准确度等级为 0.5, 变形测量范围为 1%~100% FS(满度), 横梁速度调节范围为 0.1~100 mm/min。加载过程中记录并采集荷载、形变等参数。试验具体的加载测试过程如图 2 所示。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 应力-应变曲线分析

图 5 为饱和浸水过程中矽石胶结充填体的应力-应变曲线。由图 5 可知, 未浸水充填体存在压密阶段, 但不明显, 随着浸水时间的增加, 充填体的压密阶段逐渐明显。故将不同浸水时间充填体的应力-应变曲线分为 4 个阶段, 即孔裂隙压密闭合阶段(OA)、弹性变形阶段(AB)、塑性屈服变形阶段(BC) 和峰后破坏阶段(CD)。

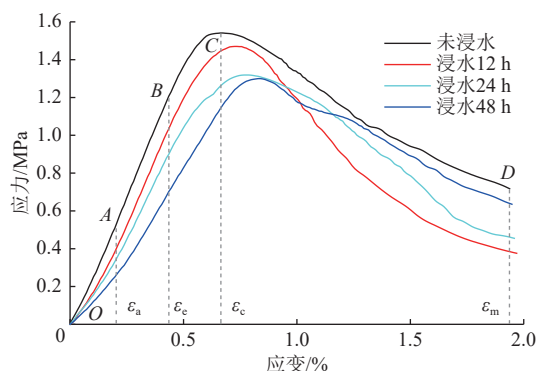
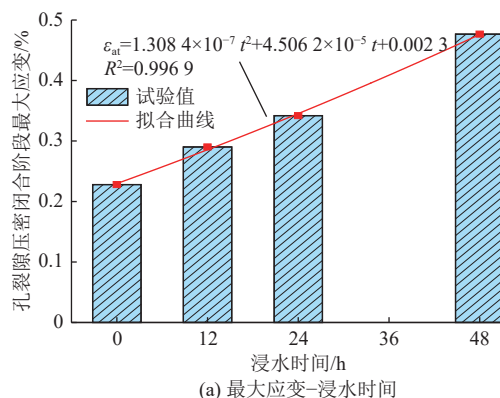


图 5 饱和浸水过程中胶结充填体应力-应变曲线

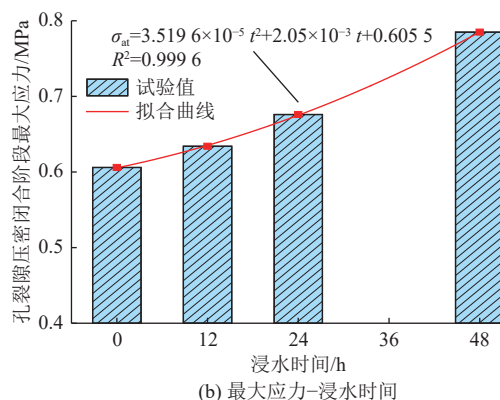
Fig.5 Stress-strain curves of cemented gangue backfill during saturated immersion

(1) 孔裂隙压密闭合阶段(OA): 此阶段不同浸水时间的矽石胶结充填体应力-应变曲线变化趋势均为上凹形态, 且随着浸水时间的增加, 上凹形态越明显。这主要是由于水分子首先通过与充填体表面贯通的孔隙裂隙进入充填体的内部, 随着浸水时间的增加, 在水的张力作用下, 这些孔隙裂隙扩展或持续贯通, 从而增加了充填体内部孔隙裂隙的体积, 导致充填体应力-应变曲线的上凹形态越发明显。如图 6 所示, 充填体在该阶段内的最大应变和最大应力也随着浸水时间的增加逐渐增长。利用一元二次方程对充填体在该阶段内的最大应变、最大应力与浸水时间的关系进行拟合, 拟合函数如图 6 所示。

(2) 弹性变形阶段(AB): 此阶段应力-应变曲线基本



(a) 最大应变-浸水时间



(b) 最大应力-浸水时间

图 6 孔裂隙压密闭合阶段最大应变/最大应力与浸水时间的关系

Fig.6 Maximum strain/stress vs. immersion time in the compaction and closure stage of pores and fractures

呈直线, 矽石胶结充填体内部裂纹开始萌生。随着浸水时间的增加, 充填体应力-应变曲线斜率逐渐减小, 表明浸水时间与充填体的弹性模量呈负相关。如图 7 所示, 从饱和浸水过程中充填体弹性模量的变化规律曲线可看出, 相较于未浸水的充填体试样, 浸水 12、24 和 48 h 的充填体弹性模量的相对降低率分别为 6.23%、19.97%、32.93%。采用一元二次函数对浸水时间与弹性模量的关系进行拟合, 拟合函数如图 7 所示。

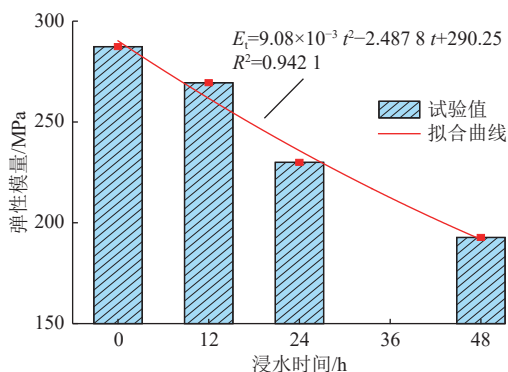


图 7 浸水时间与弹性模量关系

Fig.7 Water immersion time vs. modulus of elasticity

(3) 塑性屈服变形阶段(BC): 此阶段应力-应变曲线呈上凸形, 矽石胶结充填体内部的裂纹发育、扩展, 逐

渐达到峰值强度。如图 8a 所示,相较于未浸水充填体,浸水 12、24、48 h 的充填体强度逐渐减弱,峰值应力相对降低率分别为 4.61%、14.41% 和 15.64%,说明浸水早期会使得胶结充填体峰值强度发生明显劣化,但这种劣化现象在充填体含水率达到饱和状态后逐渐减弱。如图 8b 所示,相较于未浸水充填体,浸水 12、24、48 h 的充填体应变逐渐增大,峰值应力点应变相对增长率分别为 9.23%、16.92% 和 24.61%,说明浸水早期会使得胶结充填体逐渐由脆性破坏向延性破坏转变。为了更加清晰地了解饱和浸水过程中矽石胶结充填体峰值强度和峰值应力点应变的关系,分别利用一元二次函数对浸水时间与峰值强度和峰值应力点应变的关系进行拟合,拟合函数如图 8 所示。

(4) 峰后破坏阶段(CD): 矽石胶结充填体内部裂纹不断产生并快速扩展,直至发生贯通,表现为充填体试样的宏观破坏。由图 5 可以看出,矽石胶结充填体在达到峰值强度后并不会立即发生破坏,而是表现出明显的延性破坏特征。

## 2.2 破坏模式分析

饱和浸水过程中矽石胶结充填体的破坏形态如图 9 所示,浸水作用对矽石胶结充填体的破坏形态具有显著的影响。当未浸水时,矽石胶结充填体的破坏形态以平行于加载方向的非贯穿剪切破坏为主,破坏位置主要发生在试样的中部,表面伴有多条纵向裂隙和次要裂纹(图 9a);当浸水时间为 12 h 时,矽石胶结充填体的破坏形态以贯穿剪切破坏为主,存在少量的纵向张拉裂纹,在试样中间位置出现大块缺陷(图 9b);当浸水时间为 24 h 时,矽石胶结充填体的破坏形态以张拉-剪切共轭

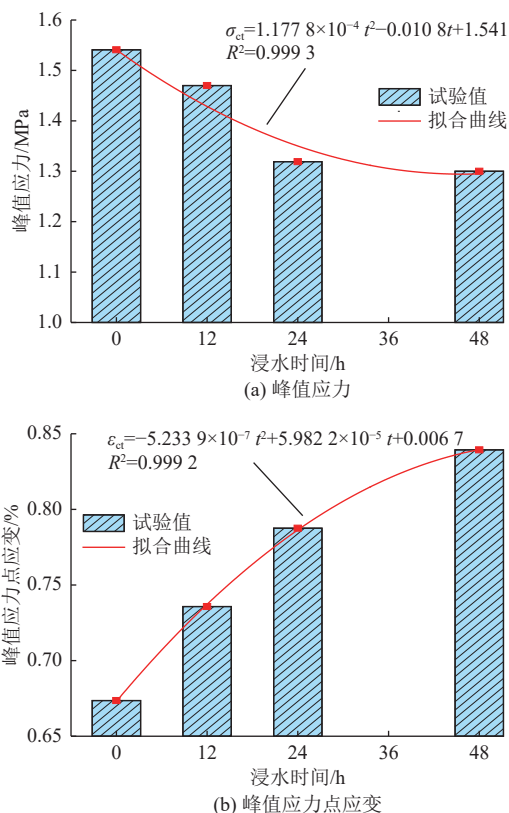


图 8 浸水时间与峰值应力/峰值应力点应变关系

Fig.8 Water immersion time vs. peak stress and strain at the peak stress point

破坏为主,破坏位置主要集中在试样中部,在试样的中下部表面伴有众多纵向张拉裂纹(图 9c);当浸水时间为 48 h 时,矽石胶结充填体的破坏形态以纵向张拉破坏为主,仅在试样底部存在少量剪切缺陷,破坏位置主要集中于试样中部(图 9d)。

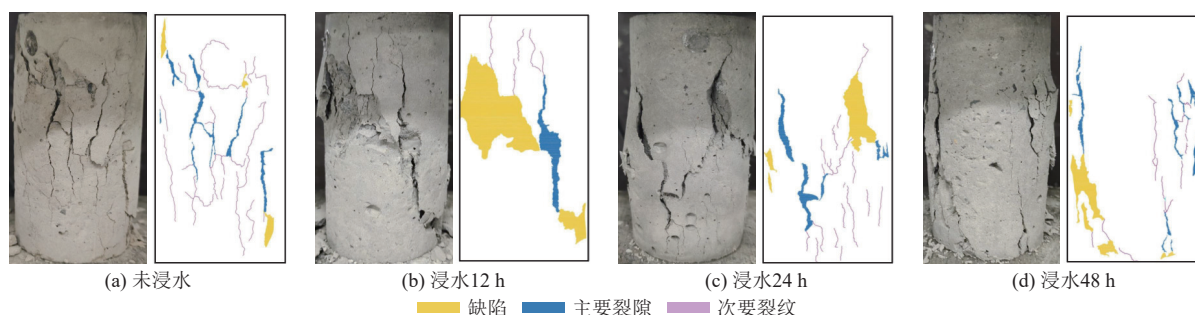


图 9 不同浸水时间下矽石胶结充填体裂纹扩展规律

Fig.9 Propagation patterns of cracks in cemented gangue backfill under different immersion times

通过对矽石胶结充填体的破坏形态进行分析可以得出:单轴加载条件下,矽石胶结充填体的破坏形态与浸水时间具有显著的相关性,即在单轴压缩下,矽石胶结充填体受浸水作用影响的破坏形态主要为剪切破坏、张拉-剪切共轭破坏和张拉破坏 3 种,随着浸水时间的增加,矽石胶结充填体的破坏形态由剪切破坏为主过渡到以张拉-剪切共轭破坏为主,最终转化为以纵向张拉

破坏为主,破坏位置主要集中在矽石胶结充填体的中部。

## 3 胶结充填体损伤分析

### 3.1 微元强度统计分布量

从胶结充填体的微元强度随机分布出发,假设胶结充填体微元强度服从幂函数分布<sup>[36]</sup>,则其概率密度函数为:

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left( \frac{F}{F_0} \right)^{m-1} \quad (1)$$

由于胶结充填体内部微元破坏是相对独立且随机分布的, 当应力水平加载到微元强度时, 此时已经发生破坏的微元数目为:

$$n = \int_0^F NP(x)dx = N \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \quad (2)$$

D-P 强度准则不仅计入了中间主应力的影响, 而且考虑了静水压力的作用。选择 D-P 强度准则作为胶结充填体微元强度统计分量, 其表达式为:

$$F = f(\sigma^*) = a_0 I_1^* + J_2^{*1/2} \quad (3)$$

$$I_1^* = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* \quad (4)$$

$$J_2^* = \frac{(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2}{6} \quad (5)$$

等效应变假说<sup>[37]</sup>认为, 有效应力可视为受损材料的变形, 即受损材料的应变关系可以用无损状态的形式表示, 只需要将名义应力矩阵  $\sigma$  用有效应力  $\sigma^*$  替换即可得到充填体的损伤本构方程为:

$$\sigma = \sigma^* (I - D) = H \varepsilon (I - D) \quad (6)$$

假设充填体的损伤是各向同性, 即可得到充填体的一维损伤本构关系:

$$\sigma_i = \sigma_i^* (1 - D_i) = E \varepsilon_i (1 - D_i) \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1 - D_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

联立式(3)—式(5)和式(8), 得到充填体微元强度的统计分布量  $F$  的表达式为:

$$F = \frac{(a_0 I_1 + J_2^{1/2}) E \varepsilon_i}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)} \quad (9)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (10)$$

$$J_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6} \quad (11)$$

由于本实验采用单轴压缩为外力条件, 则有  $\sigma_i = \sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3 = 0, \varepsilon_i = \varepsilon_1$ , 将式(9)化简可得单轴压缩条件下基于 D-P 强度准则的充填体微元统计分布量为:

$$F = \left( a_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) E \varepsilon_i \quad (12)$$

### 3.2 损伤本构模型建立

由图 5 可知, 在峰后破坏阶段, 随着浸水时间增加, 充填体的应力-应变曲线表现出明显的非规律性, 因此, 为使得到的损伤本构模型理论曲线与试验曲线拟合程度较好, 本文仅考虑峰前阶段充填体的损伤破坏过程,

建立适用于峰前阶段的分段损伤本构模型。

假设胶结充填体在孔裂隙压密闭合阶段内部孔隙和裂隙完全被压实, 未发生损伤扩展, 而在峰前损伤扩展阶段(弹性变形阶段和塑性屈服变形阶段)发生连续损伤, 根据鲁祖德<sup>[38]</sup>研究可知, 胶结充填体在孔裂隙压密闭合阶段的应力-应变曲线关系为:

$$\sigma_i = \sigma_a \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_a} \right)^2 \quad (13)$$

为提高模型可靠性, 对式(13)进行修正, 引入修正因子  $\lambda$  和  $\xi$ ,  $\lambda$  和  $\xi$  介于 0~1, 故可将式(13)修正为:

$$\sigma_i = \lambda \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a^2} \varepsilon_i^2 + \xi \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \varepsilon_i \quad (14)$$

考虑到当  $\varepsilon_i = \varepsilon_a$  时,  $\sigma_i = \sigma_a$ , 故式(14)成立的必要条件为  $\lambda + \xi = 1$ 。

在峰前损伤扩展阶段, 连续介质损伤力学将损伤变量  $D$  定义为某应力水平下已经发生破坏的微元数目  $n$  和微元总数目  $N$  的比值, 即:

$$D = \frac{n}{N} = \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \quad (15)$$

由于微元在发生破坏后, 仍然具有一定的承载能力, 因此, 在本构模型中需要引入修正系数  $\alpha$  (取值 0~1) 来反映微元单位仍然具有一定的承载能力, 即某一应力水平下真正失去承载能力的微元单位个数为  $\alpha n$ 。因此, 修正后的损伤变量表达式为:

$$D_i = \alpha \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \quad (16)$$

将损伤变量表达式(16)代入损伤本构方程式(7)可得, 矽石胶结充填体在峰前损伤扩展阶段的应力-应变服从基于幂函数分布的损伤统计本构模型, 表达式为:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i \left[ 1 - \alpha \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (17)$$

联立式(14)与式(17), 即得到矽石胶结充填体单轴压缩的分段式损伤本构模型:

$$\sigma_i = \begin{cases} \lambda \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a^2} \varepsilon_i^2 + \xi \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \varepsilon_i & (\varepsilon_i < \varepsilon_a) \\ \sigma_a + E (\varepsilon_i - \varepsilon_a) \left[ 1 - \alpha \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] & (\varepsilon_i \geq \varepsilon_a) \end{cases} \quad (18)$$

### 3.3 损伤本构模型验证

将充填体微元统计分布量式(12)代入充填体损伤分布统计模型式(17), 得到充填体损伤的本构模型为:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i \left\{ 1 - \alpha \left[ \frac{\left( a_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) E \varepsilon_i}{F_0} \right]^m \right\} \quad (19)$$

根据单轴压缩下应力-应变曲线的特征, 式(19)需

要满足的边界条件为:

$$\begin{cases} \varepsilon_i = \varepsilon_c, & \sigma_i = \sigma_c \\ \varepsilon_i = \varepsilon_c, & d\sigma_i = d\varepsilon = 0 \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19),整理可得:

$$F_0 = \left(a_0 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right) E \varepsilon_c [(m+1)\alpha]^{\frac{1}{m}} \quad (21)$$

$$m = \frac{\sigma_c}{E \varepsilon_c - \sigma_c} \quad (22)$$

联立式(21)和式(22)并代入式(19)可得:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i \left[ 1 - \frac{1}{m+1} \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_c} \right)^m \right] \quad (23)$$

因此,式(18)可以表示为:

$$\sigma_i = \begin{cases} \lambda \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a^2} \varepsilon_i^2 + \xi \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \varepsilon_i & (\varepsilon_i < \varepsilon_a) \\ \sigma_a + E(\varepsilon_i - \varepsilon_a) \left[ 1 - \frac{1}{m+1} \left( \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_a}{\varepsilon_c - \varepsilon_a} \right)^m \right] & (\varepsilon_i \geq \varepsilon_a) \end{cases} \quad (24)$$

将图 8 中的拟合公式代入式(28)可得:

$$m_t = \frac{\sigma_{ct}}{E_t \varepsilon_{ct} - \sigma_{ct}} \quad (25)$$

令  $m+1=n$ , 则有:  $n_t = \frac{E_t \varepsilon_{ct}}{E_t \varepsilon_{ct} - \sigma_{ct}}$ 。

故将式(25)代入式(24)整理后可得:

$$\sigma_i = \begin{cases} \lambda \frac{\sigma_{at}}{\varepsilon_{at}^2} \varepsilon_i^2 + \xi \frac{\sigma_{at}}{\varepsilon_{at}} \varepsilon_i & (\varepsilon_i < \varepsilon_{at}) \\ \sigma_{at} + E_t(\varepsilon_i - \varepsilon_{at}) - \frac{E_t(\varepsilon_i - \varepsilon_{at})^{n_t}}{n_t(\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{at})^{n_t}} & (\varepsilon_i \geq \varepsilon_{at}) \end{cases} \quad (26)$$

采用试验获得的单轴压缩应力-应变曲线验证本文推导的分段损伤本构模型。基于式(25)计算不同浸水时间下的  $m_t$  和  $n_t$ , 不同浸水时间下孔裂隙压密闭合阶段的最大应力  $\sigma_{at}$ 、最大应变  $\varepsilon_{at}$ 、弹性模量  $E_t$ 、峰值应力  $\sigma_{ct}$  和峰值应力点应变  $\varepsilon_{ct}$  可由图 6—图 8 的拟合结果获取,具体数值见表 2。将上述参数代入式(26),得到不同浸水时间下孔裂隙压密闭合阶段的损伤本构方程和峰前损伤扩展阶段的损伤本构方程,见表 3。

表 2 不同浸水时间下模型拟合值

Table 2 Model fitting-derived values under different immersion times

浸水时间/h	$\sigma_{at}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{at}/\%$	$E_t/\text{MPa}$	$\sigma_{ct}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{ct}/\%$	$m_t$	$n_t$	$\lambda$	$\xi$
未浸水	0.605 5	0.230 0	290.25	1.541 0	0.670 0	3.817 4	4.817 4	0.165 6	0.834 4
12	0.635 2	0.286 0	261.70	1.428 4	0.734 2	2.897 4	3.897 4	0.359 9	0.640 1
24	0.675 0	0.345 7	235.77	1.349 6	0.783 4	2.713 2	3.713 2	0.332 7	0.667 3
48	0.785 0	0.476 4	191.76	1.294 0	0.836 6	4.170 6	5.170 6	0.395 2	0.604 8

表 3 不同浸水时间下矽石胶结充填体损伤本构方程

Table 3 Damage constitutive equations for cemented gangue backfill under different immersion time

浸水时间/h	孔裂隙压密闭合阶段	峰前损伤扩展阶段
未浸水	$\sigma_i = 18\,954.78\varepsilon_i^2 + 219.66\varepsilon_i$	$\sigma_i = 290.25\varepsilon_i - 5.968\,2 \times 10^{10} \times (\varepsilon_i - 2.3 \times 10^{-3})^{4.817\,4} - 0.062\,1$
12	$\sigma_i = 27\,948.61\varepsilon_i^2 + 14.16\varepsilon_i$	$\sigma_i = 261.7\varepsilon_i - 4.282\,1 \times 10^8 \times (\varepsilon_i - 2.86 \times 10^{-3})^{3.897\,4} - 0.113\,3$
24	$\sigma_i = 18\,791.34\varepsilon_i^2 + 130.29\varepsilon_i$	$\sigma_i = 235.77\varepsilon_i - 1.594\,8 \times 10^8 \times (\varepsilon_i - 3.457 \times 10^{-3})^{3.713\,2} - 0.140\,1$
48	$\sigma_i = 13\,669.2\varepsilon_i^2 + 99.66\varepsilon_i$	$\sigma_i = 191.76\varepsilon_i - 5.753 \times 10^{11} \times (\varepsilon_i - 4.764 \times 10^{-3})^{5.170\,6} - 0.128\,5$

基于试验数据,对式(20)进行回归分析,获得了未浸水、浸水 12、24、48 h 的充填体对应的最优参数  $\lambda$  和最优参数  $\xi$ ,如图 10 所示,具体数据见表 2。

取点至峰值应力点,获得饱和浸水过程中不同浸水时间下的矽石胶结充填体理论模型曲线与试验曲线的对比,如图 11 所示。通过将试验值与模型计算值进行对比可知,在峰前阶段,本文建立的基于浸水时间的分段式损伤本构模型曲线与试验曲线基本吻合,能够较好地反映峰前应力-应变曲线的关系。同时,该模型综合考虑了孔裂隙压密闭合阶段最大应力和最大应变、弹性模量及峰值应力和峰值应力点应变的影响,能够有效地预测饱和浸水前矽石胶结充填体强度的变化规律,为保持采空区矽石胶结充填体承载的稳定性提供理论依据。

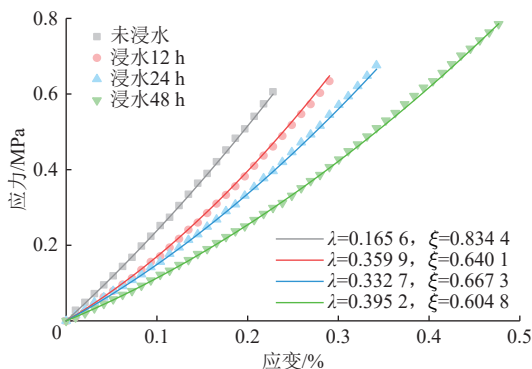


图 10 孔裂隙压密闭合阶段最优回归分析

Fig.10 Optimal regression analysis for cemented gangue backfill in the compaction and closure stage of pores and fractures

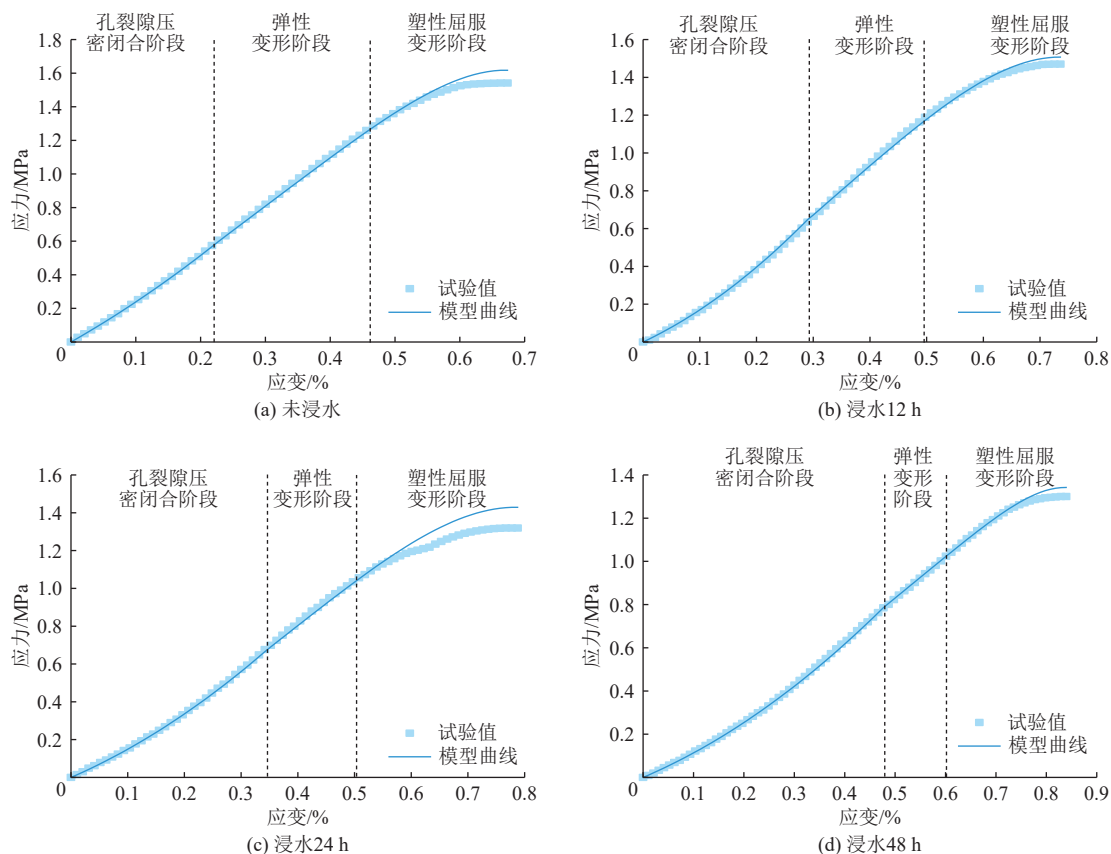


图 11 不同浸水时间下矽石胶结充填体模型曲线与试验曲线对比

Fig.11 Comparison of model-derived and test curves of cemented gangue backfill under different immersion times

#### 4 饱和浸水充填体强度弱化机理

为了探究饱和浸水过程中矽石胶结充填体强度弱化机制,对不同时间浸水后的矽石胶结充填体试样进行

取样,并进行微观形貌扫描电镜(SEM)观测,获得了不同浸水时间下矽石胶结充填体放大1万倍后的微观形貌,如图12所示。

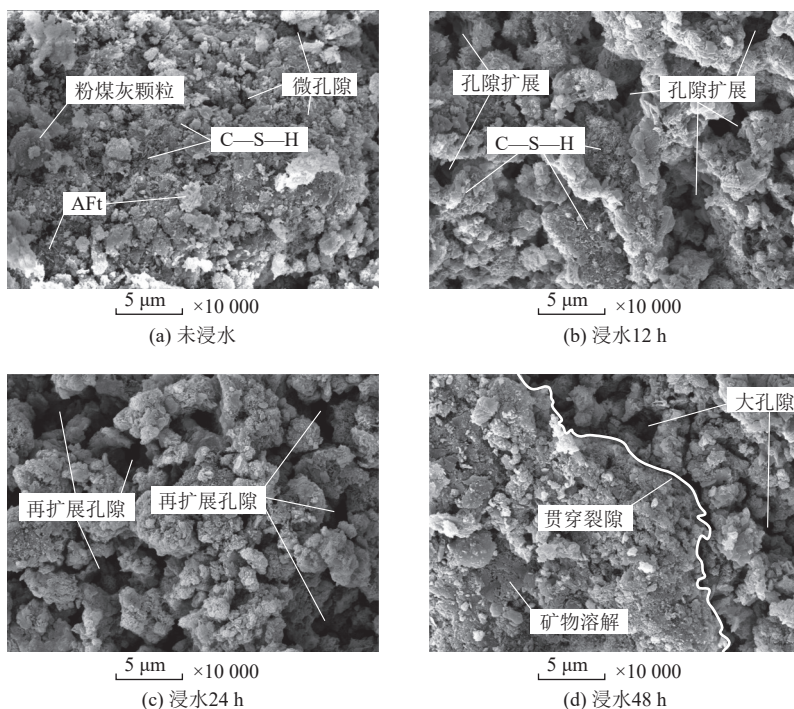


图 12 不同浸水时间下矽石胶结充填体微观形貌分析

Fig.12 Microscopic morphologies of cemented gangue backfill under different immersion times

当未浸水时,能够明显观察到充填体的微观形貌存在部分粉煤灰颗粒未充分反应,孔裂隙较少,且多为微孔结构,说明充填体相对致密,体现在应力-应变曲线上即为孔裂隙压密闭合阶段相对较短且曲线的上凹形态不够明显,可见明显的水化产物水化硅酸钙凝胶(C-S-H)和针状或棒状的钙矾石,水化产物的存在,进一步提高了充填体的强度(图 12a);当浸水时间为 12 h 时,微观形貌未见明显固废颗粒残留,基本完全发生水化反应,水分通过充填体表面微孔隙或与表面贯通的裂隙快速进入充填体内部,并且由于水分的张力作用,使得充填体的孔隙扩展,可见大量扩展孔隙,表现在应力-应变曲线上即为孔裂隙压密闭合阶段相较未浸水时稍有增加,且曲线的上凹形态也对应增加,同时由于水的润滑作用,降低了充填体颗粒间的摩擦力,最终使得充填体的强度降低(图 12b);当浸水时间为 24 h 时,水化产物溶解或被溶解后的矿物包裹,未见明显的水化硅酸钙凝胶和钙矾石,孔隙结构进一步扩展,表现在应力-应变曲线上即为孔裂隙压密闭合阶段相较浸水 12 h 再次增加,曲线的上凹形态明显,润滑作用进一步加强,充填体的强度进一步降低(图 12c);当浸水时间为 48 h 时,观察到微观结构存在明显“流沙状”矿物溶解物,存在较多的大孔隙,并有一条明显的贯穿裂隙,表现在应力-

应变曲线上即为孔裂隙压密闭合阶段相较浸水 24 h 明显增加,曲线的上凹形态更加明显,但在浸水 48 h 时,充填体基本已经达到饱和状态,润滑作用与浸水 24 h 时基本一致,因此充填体的抗压强度降低率相对减少(图 12d)。

综上,如图 13 所示,饱和浸水过程中胶结充填体强度弱化机制分为 3 个阶段:第一阶段,水分通过表面孔隙或与表面的贯通裂隙进入充填体内部,在张力作用下使得充填体孔隙扩展,促进水化产物的生成,并且由于水的润滑作用降低了充填体颗粒间的摩擦力,导致充填体强度降低;第二阶段,更多水分进入充填体内部,张力作用下孔隙进一步扩展,充填体含水率接近饱和状态,水化产物溶解或被溶解的矿物包裹,润滑作用更加明显,充填体强度进一步降低;第三阶段,充填体达到完全饱和状态,张力及溶解作用使得充填体内部出现较大的贯穿裂隙,但润滑作用保持不变,充填体的强度略有降低但不明显。说明充填体的强度在饱和浸水过程中会快速降低,当充填体的含水率达到饱和状态后,充填体强度的降低率减小,但是仍然持续降低,且浸水会破坏充填体内部结构。因此,应避免充填体在采空区内的长期浸水。

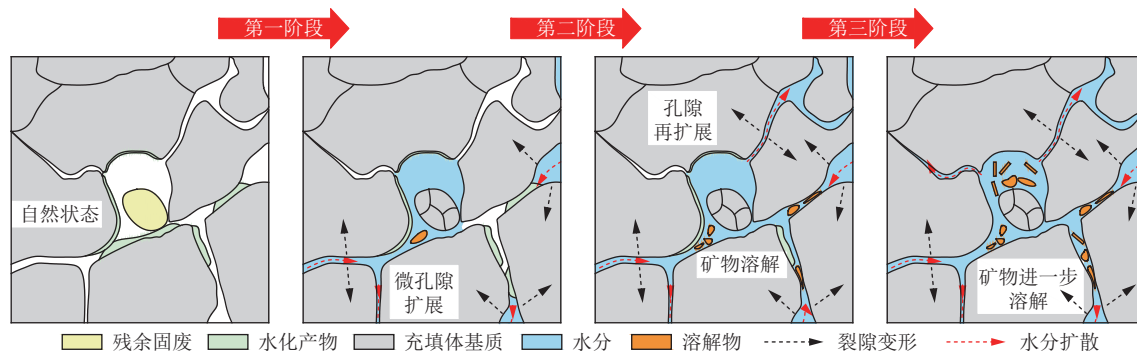


图 13 不同浸水时间下矽石胶结充填体强度弱化的微观机理

Fig.13 Mechanisms underlying strength weakening of cemented gangue backfill

## 5 结论

(1) 饱和浸水过程中,胶结充填体单轴压缩下的应力-应变曲线呈现出明显的“四阶段”特征,孔裂隙压密闭合阶段最大应变和应力、峰值应力点应变与浸水时间呈正相关,而峰值应力和弹性模量与浸水时间呈负相关,可用二次函数的形式表示各阶段应力和应变、弹性模量与浸水时间的关系。

(2) 矽石胶结充填体的破坏形态与浸水时间具有显著的相关性,矽石胶结充填体受浸水作用影响的破坏形态主要为剪切破坏、张拉-剪切共轭破坏和张拉破坏 3 种,随着浸水时间的增加,矽石胶结充填体的破坏形

态由剪切破坏为主过渡到以张拉-剪切共轭破坏为主,最终转化为以纵向张拉破坏为主,破坏位置主要集中在矽石胶结充填体的中部。

(3) 本文建立的基于浸水时间的分段式损伤本构模型曲线与试验曲线基本吻合,能够较好地反映饱和浸水过程中胶结充填体峰前阶段应力-应变曲线的关系。同时,该模型综合考虑了孔裂隙压密闭合阶段最大应力和最大应变、弹性模量及峰值应力和峰值应力点应变的影响,能够有效地预测饱和浸水过程中矽石胶结充填体强度的变化规律,为保持采空区矽石胶结充填体承载的稳定性提供理论依据。

(4) 饱和浸水过程中胶结充填体强度弱化机制可分为3个阶段: 第一阶段, 水分张力作用扩展了充填体表面孔隙或贯通裂隙, 同时水的润滑作用降低了充填体颗粒间的摩擦力, 导致充填体强度降低; 第二阶段, 张力作用与润滑作用进一步加强, 部分水化产物和矿物颗粒开始溶解, 充填体强度进一步降低; 第三阶段, 充填体达到完全饱和状态, 张力及溶解作用使得充填体内部出现较大的贯穿裂隙, 充填体的强度持续降低, 但降低率减小。

#### 符号注释:

$a_0$  为充填体内摩擦角和黏聚力有关的常数;  $C_u$  为不均匀系数;  $C_c$  为曲率系数;  $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_{60}$ 、 $d_{90}$  分别为样品中果汁粒度分布占比达到 10%、30%、50%、60% 和 90% 时所对应的粒径,  $\mu\text{m}$ ;  $\mathbf{D}$  为损伤变量矩阵;  $D_i$  为损伤变量;  $E$  和  $E_i$  分别为不同浸水时间下充填体弹性模量实际值和拟合值,  $\text{MPa}$ ;  $f(\sigma^*)$  为基于 D-P 强度准则的充填体微元强度统计分布量;  $F$  为微元强度随机分布变量;  $F_0$  为反映充填体对外部载荷响应特征的微元强度分布参数;  $\mathbf{H}$  为充填体的弹性模量矩阵;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $I_1$  为名义应力表示的应力张量第一不变量,  $\text{MPa}$ ;  $I_1^*$  为应力张量第一不变量,  $\text{MPa}$ ;  $J_2^*$  为应力偏量第二不变量,  $\text{MPa}$ ;  $J_2$  为名义应力表示的应力偏量第二不变量,  $\text{MPa}$ ;  $m$  为反映充填体对外部载荷响应特征的微元强度分布参数;  $m_i$  和  $n_i$  分别为不同浸水时间下  $m$  和  $n$  的拟合值;  $n$  为已经发生破坏的微元数目;  $N$  为微元总数;  $P(x)$  为应力水平达到  $x$  时充填体微元强度分布函数;  $P(F)$  为应力水平达到  $F$  时充填体微元强度分布函数;  $t$  为浸水时间;  $\alpha$  为修正系数;  $\sigma$  为名义应力矩阵;  $\sigma^*$  为有效应力矩阵;  $\sigma_a$  和  $\sigma_{at}$  分别为孔裂隙压密闭合阶段最大应力实际值和拟合值,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_c$  和  $\sigma_{ct}$  分别为不同浸水时间下充填体峰值应力实际值和拟合值,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_i^*$  和  $\sigma_i$  分别为三向应力作用下充填体的有效应力和名义应力 ( $i=1,2,3$ ), 其中  $\sigma_1^*$  和  $\sigma_1$  分别为充填体单轴压缩时的轴向有效应力和名义应力,  $\text{MPa}$ ;  $\varepsilon$  为应变矩阵;  $\varepsilon_a$  和  $\varepsilon_{at}$  分别为孔裂隙压密闭合阶段最大应变实际值和拟合值;  $\varepsilon_c$  和  $\varepsilon_{ct}$  分别为不同浸水时间下充填体峰值应力点应变实际值和拟合值;  $\varepsilon_e$ 、 $\varepsilon_m$  分别为弹性阶段对应的最大应变和峰后阶段对应的最大应变;  $\varepsilon_i$  为充填体单轴压缩下的应变 ( $i=1,2,3$ ), 其中  $\varepsilon_1$  为充填体单轴压缩时的轴向应变;  $\mu$  为充填体泊松比;  $\lambda$  和  $\xi$  为修正因子。

**致谢:** 感谢安徽省煤炭安全精准开采工程实验室开放课题基金(ESCMMP202402)、国家自然科学基金重点资助项目(52130402)、安徽省关闭/废弃矿井资源开发利用工程研究中心开放基金项目(EUCMR202208)对本研究的资助。

#### 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

#### 参考文献(References)

- [1] 武强, 涂坤, 曾一凡. “双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J]. 科学通报, 2023, 68(15): 1884–1898.  
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884–1898.
- [2] 杨科, 何淑欣, 何祥, 等. 煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 69–82.  
YANG Ke, HE Shuxin, HE Xiang, et al. Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’ in coal power base[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 69–82.
- [3] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167–4181.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [4] 杨科, 赵新元, 何祥, 等. 多源煤基固废绿色充填基础理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4201–4216.  
YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, et al. Basic theory and key technology of multi-source coal-based solid waste for green backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4201–4216.
- [5] 董猛, 李江山, 陈新, 等. 煤系固废基绿色充填材料制备及其性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 75–84.  
DONG Meng, LI Jiangshan, CHEN Xin, et al. Preparation of coal-series solid-waste-based green filling materials and their performance[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 75–84.
- [6] 杨科, 张继强, 何祥, 等. 多源煤基固废胶结充填体力学及变形破坏特征试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 102–114.  
YANG Ke, ZHANG Jiqiang, HE Xiang, et al. Experimental study on the mechanics and deformation failure characteristics of multi-source coal-based solid waste cemented backfill[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(6): 102–114.
- [7] 刘志义. 水-力耦合作用下尾砂胶结充填体力学特性与损伤机理[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.  
LIU Zhiyi. Mechanical properties and damage mechanism of tailings cemented filling under water-force coupling[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023.
- [8] 吴宝杨, 王伟男, 郭东明. 浸水次数影响下裂隙砂岩强度损伤及声发射特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 1054–1060.  
WU Baoyang, WANG Weinan, GUO Dongming. Strength damage and AE characteristics of fractured sandstone under the influence of water intrusion times[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 1054–1060.
- [9] 陈田, 姚强岭, 杜茂, 等. 浸水次数对煤样裂隙发育损伤的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3756–3762.

- CHEN Tian, YAO Qiangling, DU Mao, et al. Experimental study on the damage of water immersion times to the crack development of coal samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup.2): 3756–3762.
- [10] DONG Wenyu, XIA Zhiguo, HU Jun, et al. Mechanical and acoustic characteristics of sandstone failure at different immersion heights under tailings water erosion conditions[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 132: 104475.
- [11] GAO Liyang, ZHANG Wenrui, LU Wei, et al. Study on the effects of temperature and immersion on the acoustic emission and electromagnetic radiation signals of coal rock damage under load[J]. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106503.
- [12] 刘小玲, 张泽天, 张茹, 等. 浸水煤体单轴压缩能量破坏机理及层理效应研究[J/OL]. *工程科学与技术*, 2024: 1–15[2024-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240428.1252.006.html>.
- LIU Xiaoling, ZHANG Zetian, ZHANG Ru, et al. Energy failure mechanism and bedding effect of soaked coal under uniaxial compression[J/OL]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024: 1–15[2024-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240428.1252.006.html>.
- [13] 姜琳婧, 赵会杰, 赵怡晴, 等. 层理煤岩浸水前后力学性质研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 97–108.
- JIANG Linjing, ZHAO Huijie, ZHAO Yiqing, et al. Study on mechanical properties of coal before and after flooding considering bedding direction[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 97–108.
- [14] XU Yong, CHEN Xuexi, ZHAO Wei, et al. Effect of water intrusion on the characteristics of surface morphology and pore fracture spaces in argillaceous meagre coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 81: 103404.
- [15] 尹大伟, 丁屹松, 汪锋, 等. 考虑初始损伤的压力水浸煤岩力学特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4417–4432.
- YIN Dawei, DING Yisong, WANG Feng, et al. Experimental study on mechanical properties of coal soaked in pressurized water considering initial damage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4417–4432.
- [16] DING Yisong, YIN Dawei, HU Hao, et al. Influence characteristics and macro-meso mechanism of pressure immersion time on tensile properties for coal materials[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 2358–2370.
- [17] 韩鹏华, 赵毅鑫, 高森, 等. 长期水浸作用下煤样渐进破坏特征及损伤本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(4): 918–933.
- HAN Penghua, ZHAO Yixin, GAO Sen, et al. Progressive damage characteristics and damage constitutive model of coal samples under long-term immersion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(4): 918–933.
- [18] LIU Jiawei, SUI Wanhua, ZHANG Dingyang, et al. Durability of water-affected paste backfill material and its clean use in coal mining[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119576.
- [19] ZHOU Nan, DONG Chaowei, ZHANG Jixiong, et al. Influences of mine water on the properties of construction and demolition waste-based cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 313: 125492.
- [20] WANG Jie, ZHANG Chi, FU Jianxin, et al. Effect of water saturation on mechanical characteristics and damage behavior of cemented paste backfill[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 6624–6639.
- [21] 聂亚林, 王晓军, 黄广黎, 等. 不同含水率纯尾砂胶结充填体强度及损伤模型分析[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(6): 2008–2013.
- NIE Yalin, WANG Xiaojun, HUANG Guangli, et al. Strength and damage model analysis of pure tailings cemented filling body with different water content[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(6): 2008–2013.
- [22] 王永岩, 于卓群, 崔立桩. 不同含水率膏体充填材料的单轴压缩试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 219–224.
- WANG Yongyan, YU Zhuoqun, CUI Lizhuang. Experimental study on compressive behavior of cemented paste backfill material with different water contents[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 219–224.
- [23] 宋学朋, 郝宇鑫, 王石, 等. 不同加载速率下差异性含水率尾砂胶结充填体力学行为及损伤特性研究[J]. *材料导报*, 20, 36(24): 107–116.
- SONG Xuepeng, HAO Yuxin, WANG Shi, et al. Study on mechanical behavior and damage characteristics of cemented tailings backfill with different water content under different loading rates[J]. *Materials Reports*, 20, 36(24): 107–116.
- [24] 李召峰, 张晨, 张健, 等. 不同水饱和度充填体力学性能及损伤机制研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 1063–1069.
- LI Zhaofeng, ZHANG Chen, ZHANG Jian, et al. Mechanical properties and damage mechanism of backfill with different water saturation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 1063–1069.
- [25] 刘鼎, 许军策, 浦海. 不同含水率下研石胶结充填体蠕变特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 1055–1062.
- LIU Ding, XU Juncce, PU Hai. Experimental study on creep characteristics of gangue cemented fillers with different water content[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 1055–1062.
- [26] LING Hao, LI Xilin, XUE Haowen, et al. The effect of acid mine drainage on the properties of an all-solid waste paste backfill body based on oil shale residue[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 425: 136017.
- [27] ZHAO Yonghui, GUO Yuxia, FENG Guorui, et al. Long-term strength and deformation size effect of gangue cemented backfill in acid mine water[J]. *Structures*, 2023, 57: 105114.
- [28] ZHU Gengjie, ZHU Wancheng, FU You, et al. Effects of chloride salts on strength, hydration, and microstructure of cemented tailings backfill with one-part alkali-activated slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 374: 130965.
- [29] 杜兆文, 陈绍杰, 尹大伟, 等. 氯盐侵蚀环境下膏体充填体稳定性试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 532–538.
- DU Zhaowen, CHEN Shaojie, YIN Dawei, et al. Experimental study of stability of paste backfill under chloride erosion environment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 532–538.
- [30] 高萌, 刘娟红, 吴爱祥. 碳酸盐溶液中富水充填材料的腐蚀及劣

- 化机理[J]. 工程科学学报, 2015, 37(8): 976–983.
- GAO Meng, LIU Juanhong, WU Aixiang. Corrosion and deterioration mechanism of water-rich filling materials in carbonate solutions[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(8): 976–983.
- [31] HAN Penghua, ZHAO Yixin, ZHANG Cun, et al. Progressive damage characteristic and microscopic weakening mechanism of coal under long-term soaking[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(11): 7861–7881.
- [32] FENG Guorui, RAN Hongyu, GUO Jun, et al. Experimental investigation on the deformation and strength properties of cemented gangue backfill column under long-term axial compression[J]. *Structures*, 2022, 43: 1558–1572.
- [33] 冯国瑞, 赵永辉, 郭育霞, 等. 柱式充填体单轴压缩损伤演化及破坏特征研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(10): 4012–4023.
- FENG Guorui, ZHAO Yonghui, GUO Yuxia, et al. Study on damage evolution and failure characteristics of backfill column under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(10): 4012–4023.
- [34] ZHAO Xinyuan, YANG Ke, DINO G A, et al. Feasibility and challenges of multi-source coal-based solid waste (CSW) for underground backfilling: A case study[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 181: 8–25.
- [35] 郭育霞, 赵永辉, 冯国瑞, 等. 矽石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2434–2444.
- GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2434–2444.
- [36] HOU Yongqiang, YIN Shenghua, YANG Shixing, et al. Mechanical properties, damage evolution and energy dissipation of cemented tailings backfill under impact loading[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 66: 105912.
- [37] 李海潮, 张升. 基于修正 Lemaitre 应变等价性假设的岩石损伤模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1321–1326.
- LI Haichao, ZHANG Sheng. A constitutive damage model of rock based on the assumption of modified Lemaitre strain equivalence hypothesis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1321–1326.
- [38] 鲁祖德. 裂隙岩石水-岩作用力学特性试验研究与理论分析[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2010.
- LU Zude. Experimental study and theoretical analysis on mechanical characteristics of water-rock interaction in fractured rocks[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.

(责任编辑 吴敏杰)