

# 考虑刚度劣化影响的含圆形孔洞砂岩破坏模式及能量释放特征

赵光明<sup>1,2</sup>, 吴旭坤<sup>1,2</sup>, 刘崇岩<sup>1,3</sup>, 许文松<sup>1,3</sup>, 张启航<sup>1,2</sup>, 韩广辉<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 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:** 巷道受开挖扰动影响, 岩体会产生不可避免的损伤, 从而导致其刚度和强度逐步衰减, 为研究刚度劣化后加载模式对巷道破坏特征的影响规律, 利用二维可变刚度动力破坏模拟试验系统, 对预制含圆形孔洞的损伤试样进行双轴压缩加载系统刚度试验, 分析侧向约束作用下加载系统刚度对损伤试样破坏模式及能量释放规律的影响机制. 结果表明: 初始损伤程度显著影响试样的承载能力和弹性模量, 劣化幅度分别为 0.54%~7.01% 和 5.76%~50.74%, 而侧向约束可以有效抑制裂纹扩展和减少孔洞引起的应力集中, 提高岩样的结构完整性和整体强度; 预制损伤对含圆形孔洞巷道的破坏特征影响显著, 损伤程度增加导致破坏时间缩短, 而加载系统刚度和侧向约束力的增加则显著延长破坏时间; 基于能量释放与耗散原理, 得出了刚度劣化与能量释放之间的耦合关系, 发现刚度劣化系数增加导致释放能量减少, 两者之间存在非线性数学关系, 而侧向约束力与能量释放呈正相关性. 研究结果为理解刚度劣化对围岩破坏机制的影响及稳定时效性控制提供了理论基础, 并提出通过调节系统刚度和侧向约束力, 可以在不同破坏时间阶段提高围岩的承载能力和整体刚度, 在一定程度上抵抗损伤带来的不利影响.

**关键词:** 含圆形孔洞; 损伤程度; 加载系统刚度; 侧向约束力; 能量释放; 破坏时间

**中图分类号:** TU 45; TD 32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0272-15

## Failure modes and energy release characteristics of sandstone containing circular holes considering the influence of stiffness degradation

ZHAO Guangming<sup>1,2</sup>, WU Xukun<sup>1,2</sup>, LIU Chongyan<sup>1,3</sup>, XU Wensong<sup>1,3</sup>,  
ZHANG Qihang<sup>1,2</sup>, HAN Guanghui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining, Ministry of Education of China, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. National Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. National and Local Joint Engineering Research Center for Coal Safety and Precision Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**收稿日期:** 2024-11-12 **修回日期:** 2025-01-09 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumat.20240532

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFC2907602); 国家自然科学基金项目(52342404); 安徽省高校优秀科研创新团队项目(2022AH010053)

**通信作者:** 吴旭坤(1995—), 男, 河南省驻马店市人, 博士研究生, 从事矿山压力与岩层控制方面的研究.

**E-mail:** 1627154904@qq.com **Tel:** 15339518075

**引用格式:** 赵光明, 吴旭坤, 刘崇岩, 等. 考虑刚度劣化影响的含圆形孔洞砂岩破坏模式及能量释放特征[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 272-286.

ZHAO Guangming, WU Xukun, LIU Chongyan, et al. Failure modes and energy release characteristics of sandstone containing circular holes considering the influence of stiffness degradation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 272-286.

**Abstract:** Due to the influence of excavation disturbances, the rock mass in roadways inevitably experiences damage, leading to a gradual degradation of its stiffness and strength. To investigate the influence of loading modes on the failure characteristics of roadways after stiffness degradation, a two-dimensional variable stiffness dynamic failure simulation test system was utilized. Biaxial compression loading tests were conducted on pre-damaged specimens containing circular holes to analyze the impact of loading system stiffness on the failure modes and energy release mechanisms of the damaged specimens under lateral constraints. This study focuses on the failure modes and energy release characteristics of sandstone containing circular holes, considering the effects of stiffness degradation. The results show that the initial degree of damage significantly affects the bearing capacity and elastic modulus of the specimens, with degradation ranges of 0.54% to 7.01% and 5.76% to 50.74%, respectively. Lateral constraints effectively inhibit crack propagation and reduce stress concentration caused by the holes, thereby enhancing the structural integrity and overall strength of the rock specimens. Pre-existing damage has a pronounced impact on the failure characteristics of roadways with circular holes. As the degree of damage increases, the time to failure decreases. Conversely, higher loading system stiffness and greater lateral constraint forces significantly extend the time to failure. Based on the principles of energy release and dissipation, the coupling relationship between stiffness degradation and accumulated elastic strain energy was established. It was found that an increase in the stiffness degradation coefficient leads to a reduction in elastic strain energy, with a nonlinear mathematical relationship existing between the two. Furthermore, lateral constraint force is positively correlated with the accumulation of elastic strain energy. The research results provide a theoretical basis for understanding the influence of stiffness degradation on the failure mechanism of surrounding rock and the control of stability time-effectiveness. It is proposed that by adjusting the system stiffness and lateral restraint force, the bearing capacity and overall stiffness of the surrounding rock can be enhanced at different failure time stages, which can resist the adverse effects brought by damage to a certain extent.

**Key words:** containing circular holes; degree of damage; stiffness of loading system; lateral constraint force; energy release; failure time

巷道开挖破坏了原有的应力平衡状态,随着时间推移,围岩的应力调整引起内部损伤演化和积聚,从而影响巷道围岩内的破坏区范围、变形能分布、应力分布及刚度劣化程度,而刚度劣化程度则会进一步缩短围岩控制的时效<sup>[1-3]</sup>. 这些因素共同作用导致巷道围岩发生剥落现象,并显著增加岩爆的频率,严重威胁着矿井的安全高效开采。

巷道在煤矿中扮演着至关重要的角色,不仅作为通道,还关乎安全生产. 鉴于深部巷道所处的复杂应力状态和地质构造,众多学者针对含孔隧(巷)道围岩应力分析进行了广泛研究. 文献[4-6]研究了圆形、矩形、直墙拱形隧洞板裂破坏过程,得到了深部圆形、矩形、直墙拱形隧洞板裂破坏的发生过程和机制;文献[7]开展了不同拱高孔的花岗岩试件真三轴试验,模拟不同初始地应力作用下的剥落过程,得到了不同拱高深埋硬岩巷道围

岩应力分布特征及剥落机理;文献[8]采用不同脆性带圆孔和预制裂隙的立方体试件进行结构面模拟,对比分析了不同脆性岩石在加载过程中有无带结构面试件的损伤过程、声发射特征及损伤模式;文献[9]对含圆孔花岗岩试件进行不同侧向载荷下的岩爆模拟试验,发现侧向载荷的增大对孔洞的承载能力起到先增强后弱化的效果;文献[10]研究椭圆长短轴比  $m$  及倾角  $\alpha$  对大理岩力学特性的影响,发现含椭圆形孔洞试样的最终破坏模式随倾角的增大可分为拉-剪混合破坏和剪切破坏 2 种;文献[11]利用红砂岩试件模拟了“D”形隧道侧壁的剥落过程及破坏特征,发现与圆形隧道相比,“D”形隧道有效地降低了围岩的破坏程度;文献[12]开展了真三维条件下椭圆形巷道冲击破坏试验,结果表明峰值应力及轴向变形量会随椭圆率的增大呈现先增大后减小的趋势,巷道

破坏主要集中在边帮两侧;文献[13-14]揭示了倒“U”形孔洞在单轴应力作用下的裂纹演化机制,并通过应力分布研究了圆柱形岩石模型中马蹄形孔洞在双轴压缩作用下的力学响应行为。

巷道开挖过程中会不可避免地产生岩体裂隙,围岩存在刚度损失,直接影响围岩结构的变形特性.学者们从刚度劣化角度开展了理论研究,如文献[15]采用损伤理论和三直线应变软化模型,建立了弱胶结软岩巷道围岩弹塑性流动损伤模型;文献[16]基于 D-P 屈服准则得到了考虑劣化效应的深埋圆形洞室锚固围岩弹塑性解;文献[17]基于特征曲线法,建立考虑围岩刚度劣化的本构模型,发现考虑刚度弱化后,3种开挖方式拱顶位移数值均增大;文献[18]采用应变损伤模型理论分析了圆形洞室围岩的力学特征,得到了发生矿震的洞室临界塑性区深度和临界作用力;文献[19]得到了复合式衬砌支护结构各个支护阶段的围岩黏弹塑性解析式,发现适当考虑中间主应力及围岩强度、刚度参数的劣化效应后,得到的变形量与深埋软岩隧道围岩的实际变形量吻合效果更好。

综上所述,探究刚度劣化对巷道围岩损伤与失稳破坏模式的影响是非常重要的.基于此,利用二维可变刚度动力破坏模拟试验系统,采用预制含圆形孔洞的损伤试样,开展双轴压缩下加载系统刚度试验,分析了含圆形孔洞砂岩破坏过程的应力应变响应、围岩破坏模式,通过 DIC 技术观测变形破裂过程,结合能量释放及声发射能量规律,揭示了考虑刚度劣化后加载模式对巷道破坏形态演化的影响特征.研究结果对于强动压巷道围岩的稳定性控制具有重要意义。

## 1 围岩刚度劣化模型

在巷道掘进过程中,围岩刚度劣化与围岩弹塑性区的发展密切相关,二者相互影响并决定了巷道的稳定性.在掘进时,围岩的应力状态发生显著变化,围岩弹性区和塑性区的范围随之调整,这种变化直接影响围岩的刚度,而围岩的刚度劣化

$$k_1(r) = \begin{cases} 0, & r = R_e, \\ k_0 \left( 1 - \left\{ 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{R_1 - r}{R_e} \right)^b \right] \right\} \right), & R_e < r < R_1, \\ k_0, & 0 \leq r < R_e. \end{cases} \quad (4)$$

由此可知,弹性区(Ⅲ区)范围: $\lambda(r) \approx 0$ ,  $k_1 \approx k$ ;塑性区(Ⅱ区)范围: $\lambda(r)$ 随塑性变形增加而变得显著,刚度开始降低;破碎区(Ⅰ区)范围:

主要发生在塑性区及其附近区域,在塑性区内,围岩经历了不可逆的变形,内部结构受损,裂隙扩展,使得围岩的承载能力和刚度显著下降.这种劣化效应不仅会降低围岩对巷道的支撑作用,还可能会导致围岩进一步失稳,形成坍塌、岩爆等灾害。

在巷道掘进过程中,随着距巷道周边距离  $R$  的增加,围岩塑性区范围逐渐扩大,围岩刚度呈现明显的劣化趋势,即  $k_m < k_1 < k$  ( $k$  为围岩弹性区变形阶段的刚度,  $k_1$  为围岩塑性阶段的刚度,  $k_m$  为围岩破碎阶段的刚度).巷道开挖时的假定条件为:围岩为各向同性均质围岩;巷道开挖断面为圆形,开挖半径为  $R_0$ ;原岩应力场为  $P_0$ ;破碎区半径为  $R_m$ ;在未支护状态下围岩主要分为破碎区(Ⅰ区)、塑性区(Ⅱ区)及弹性区(Ⅲ区),如图 1 所示。

假定围岩体刚度劣化均为各向同性,定义刚度劣化系数<sup>[20]</sup>,如式(1)所示:

$$k_1(r) = k_0 [1 - \lambda(r)], \quad (1)$$

式中: $k_1(r)$ 为塑性区  $r$  处的劣化刚度; $r$  为塑性区扩展范围; $k_0$  为初始刚度; $\lambda(r)$  为刚度劣化系数,随  $r$  和巷道开挖应力状态变化。

在塑性区内,围岩的刚度随着应力和应变的变化逐渐劣化,塑性区的范围直接影响围岩的刚度劣化程度<sup>[21-22]</sup>,塑性区的范围越大,其刚度劣化更显著.为定量描述围岩在不同半径  $r$  处的塑性区发展程度,采用刚度劣化系数  $\lambda(r)$  来描述围岩塑性区发展程度,受塑性区扩展范围  $r$  的影响<sup>[23]</sup>,其计算式为

$$\lambda(r) = 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{R_1 - r}{R_e} \right)^b \right], \quad (2)$$

式中: $a, b$  均为岩石材料常数,无量纲; $R_1$  为塑性区半径; $R_e$  为弹性区半径。

将式(2)代入式(1),可得劣化刚度为

$$k_1(r) = k_0 \left( 1 - \left\{ 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{R_1 - r}{R_e} \right)^b \right] \right\} \right). \quad (3)$$

综上所述,围岩刚度劣化与塑性区范围关系可以表示为

$$\lambda(r) = \begin{cases} 0, & r = R_e, \\ 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{R_1 - r}{R_e} \right)^b \right], & R_e < r < R_1, \\ 1, & 0 \leq r < R_e. \end{cases}$$

$\lambda(r) \rightarrow 1$ , 刚度降至极低水平,接近 0。

在地下工程巷道开挖过程中,围岩刚度劣化是关键因素,直接影响围岩结构的稳定性和安全

性. 故利用自主研发的二维可变刚度动力破坏模拟试验系统, 模拟开挖后的损伤巷道在加载刚度围岩系统作用下的破坏模式及能量演化规律. 对于理解和预测刚度劣化效应对围岩体稳定影响具有重要意义.

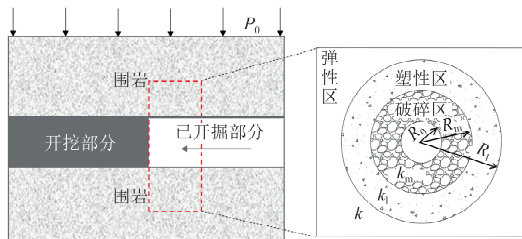


图1 巷道开挖后围岩分区示意  
Fig. 1 Zoning diagram of surrounding rock after tunnel excavation

## 2 试验方法

### 2.1 试样制备

模拟试验选用质地较均匀、完整性好的白砂岩加工成含圆形孔洞(直径为40 mm)的立方体(尺寸为100 mm×100 mm×100 mm)试样,如图2所示. 该砂岩单轴抗压强度为48.5 MPa,弹性模量为9.23 GPa,模型表面平整度控制在±0.05 mm,垂直度偏差小于0.25°.

为表示刚度劣化程度以对应不同塑性区范围的力学环境,目前较多学者通过循环加卸载试验来制备不同损伤程度试样. 在循环加卸载过程中,试验损伤演化过程必然伴随着试验输入能、弹性能以及耗散能之间的相互转化<sup>[24]</sup>. 根据热力学定律<sup>[25]</sup>可得输入能密度、弹性能密度及耗散能密度计算公式为

$$\begin{cases} u_i = \int_0^{\epsilon_i} \sigma d\epsilon, \\ u_{i,e} = \int_{\epsilon_{i,e}}^{\epsilon_i} \sigma d\epsilon, \\ u_{i,d} = u_i - u_{i,e}, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_i$ 为第*i*次循环中岩石存储的输入能密度; $u_{i,e}$ 为弹性应变能密度; $u_{i,d}$ 为耗散能密度; $\sigma$ 为峰值应力; $\epsilon_i$ 为峰值应变; $\epsilon_{i,e}$ 为塑性阶段应变.

由上述分析可知,岩体刚度劣化是由能量耗散引起的,损伤累积可以看作是能量耗散的不可逆过程,根据下式定义岩体损伤变量 $D$ <sup>[26]</sup>为

$$D = \sum_{i=1}^{n_i} u_{i,d} / \sum_{i=1}^n u_{i,d}, \quad (6)$$

式中  $n$  为循环加卸载次数.

图3展示了不同循环加卸载次数下含圆形巷道岩体试样损伤程度演化规律. 开展循环加卸载

试验制备损伤试样,采取载荷控制方式,加卸载速率均为0.5 kN/s,载荷以0~50~10~70~10~90~10~110~10~130~10~150 kN...的方式逐级递增. 根据式(5)~(6)计算试件的损伤变量,再根据损伤变量评估试件的损伤程度. 随着循环次数的增加,试样损伤程度呈非线性增长趋势.

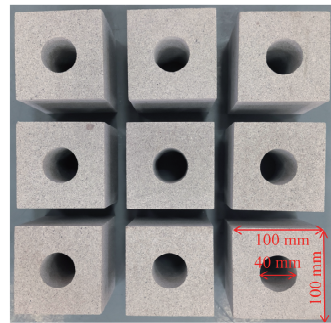


图2 含圆形孔洞砂岩试样  
Fig. 2 Sandstone sample with circular hole

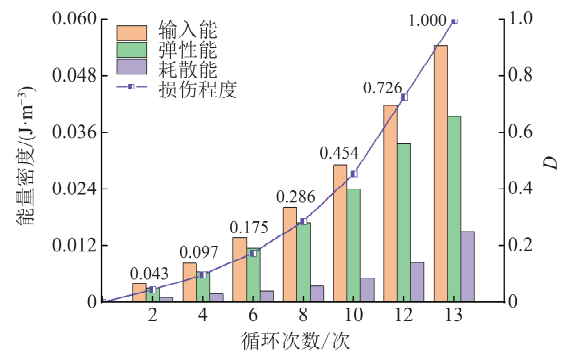


图3 不同循环加卸载次数下试件的损伤程度  
Fig. 3 Damage degree of the specimen under different cyclic loading and unloading times

### 2.2 试验方案

巷道开挖过程中,围岩表面岩体从三向受力状态转变为近似单向或双向受力状态,导致应力重新调整并在局部出现集中现象. 围岩系统刚度逐步减小,松动圈因此扩大,围岩刚度的降低使得巷道周围岩体的承载能力下降,从而增加了巷道变形和破坏的风险. 特别地,当围岩系统刚度低于岩体刚度时,巷道发生不稳定破坏的概率将逐渐增加<sup>[27-29]</sup>.

为了模拟开挖后的损伤巷道在加载刚度围岩系统作用下的破坏模式及能量演化规律,利用二维可变刚度动力破坏模拟试验系统,以预制损伤含圆形孔洞试样开展双轴压缩下加载系统刚度试验,分析侧向约束作用下加载系统刚度对损伤试样破坏模式及能量释放规律的作用机制. 具体试验方案如表1所示.

为避免混淆,采取了 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 方向进行区

分,如图 4 所示.其中  $\sigma_1$  为轴向方向加载应力; $\sigma_2$  为轴向方向加载系统刚度调节应力; $\sigma_3$  为侧向方向加

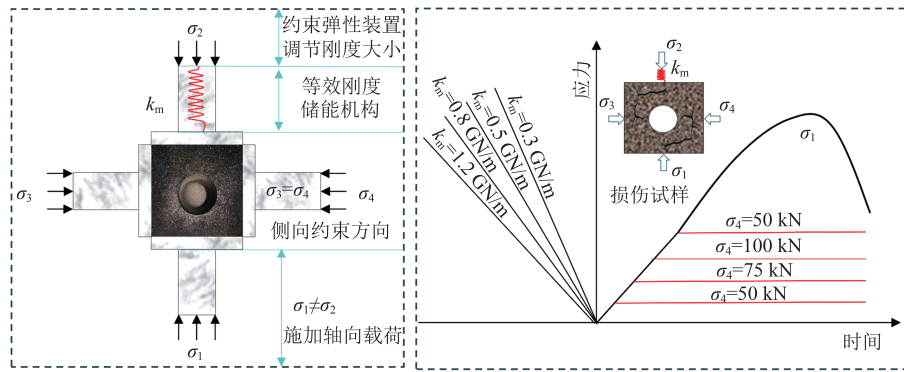


图 4 加载示意  
Fig. 4 Loading diagram

表 1 试验方案  
Table 1 Experimental protocol

试件形状	预制损伤程度 $D$	加载速率/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	侧向应力/ kN	加载刚度/ ( $\text{GN} \cdot \text{m}^{-1}$ )
含圆形孔洞试件	0			0.3
	0.097	0.1	50	0.3
	0.286			0.5
	0.726			0.8
				1.2
	0.286	0.1	50	0.3
			75	
			100	
			150	

1)不同损伤程度加载试验

选用同一质地的试件开展双轴压缩下不同损伤程度等刚度加载试验,预制不同损伤程度分别取 0 次循环( $D=0$ )、4 次循环( $D=0.097$ )、8 次循环( $D=0.286$ )、12 次循环( $D=0.726$ ),加载刚度设置为 0.3 GN/m,侧向约束力设置为 50 kN.具体方案:将  $\sigma_1, \sigma_4$  方向同时分别以加载速率 500 N/s 加载至 50 kN,再沿  $\sigma_1$  方向以变形加载速率

0.1 mm/min 加载,同时沿  $\sigma_2$  方向发送系统刚度 0.3 GN/m,直至将试件加载至破坏.

2)不同加载系统刚度试验

预制损伤程度设定为 0.286,将  $\sigma_1, \sigma_4$  方向同时分别以加载速率 500 N/s 加载至 50 kN,再沿  $\sigma_4$  方向以变形加载速率 0.1 mm/min 加载,同时沿  $\sigma_2$  方向发送系统刚度 0.3,0.5,0.8,1.2 GN/m,直至将试件加载至破坏.

3)不同侧向约束力加载试验

预制损伤程度设定为 0.286,将  $\sigma_1, \sigma_4$  方向同时分别以加载速率 500 N/s 加载至 50,75,100,150 kN.将  $\sigma_1, \sigma_4$  这 2 个方向加载至目标荷载后,再沿  $\sigma_1$  方向以变形加载速率 0.1 mm/min 加载,同时沿  $\sigma_2$  方向发送刚度 0.3 GN/m 至试件破坏.

2.3 试验设备

本次试验使用安徽理工大学自主研发的二维可变刚度动力破坏模拟试验系统,如图 5 所示,该系统主要包括弹性装置、变形传感器、控制系统及 4 个独立加载油缸等.

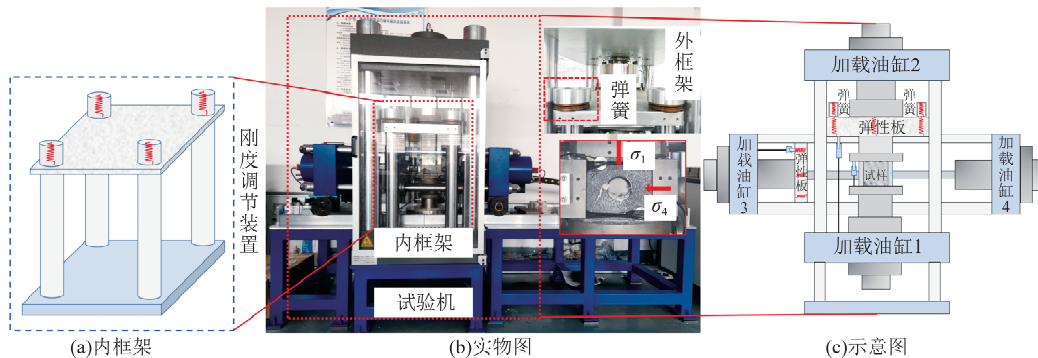


图 5 二维可变刚度动力破坏模拟试验系统

Fig. 5 Two-dimensional variable stiffness dynamic failure simulation test system

采用液压伺服机提供垂直与水平方向加载, 以弹性装置变形量等效为试验机内框架能量储能方式. 垂直方向  $\sigma_1, \sigma_2$  为 1 000 kN, 水平方向  $\sigma_3, \sigma_4$  为 600 kN, 负荷精度为  $\pm 1\%$ ; 试验机内所含的 6 个差动变压器作为位移传感器, 误差为  $\pm 0.001$  mm. 采用声发射信号监测系统实时记录声发射 (AE) 事件、能量、振幅等参数. 运用 DIC 软件进行数字图像数据采集.

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 应力-应变演化特征

图 6a, 6b, 6c 分别为含预制圆形孔洞砂岩在不同预制损伤程度、不同加载系统刚度以及不同侧向约束力下的应力-应变特征曲线. 因预制损伤程度不同, 试样承载应力大小存在差异, 不同损伤程度试样的应力-应变存在一定区别, 随着预制损伤程度增大, 试样承载应力呈逐渐降低趋势. 在未预制损伤时 ( $D=0$ ), 试件峰值应力最大, 相同试验过程初始损伤程度分别为 0.097, 0.286 及 0.726 的

试件与之相比, 其峰值应力分别减弱了 0.53%, 2.87%, 7.02%. 这是因为损伤程度增加削弱了岩样的能量吸收和传递能力, 使得其承载能力减弱, 对于损伤较大的岩石, 其应力-应变曲线中的线性阶段 (弹性变形阶段) 缩短, 整体曲线更早达到塑性变形和破坏阶段. 对于初始损伤程度为 0.286 的试件, 不同加载系统刚度 (0.3, 0.5, 0.8, 1.2 GN/m) 作用时, 含预制圆形孔试件峰值应力值无明显差别, 符合加载系统刚度原理<sup>[28]</sup>, 进一步验证了含圆形孔洞试件的均质性较为统一的特征; 而不同侧向约束力 (50, 75, 100, 150 kN) 作用时, 随着侧向约束力的增大, 峰值应力呈逐渐提升的趋势. 在侧向约束力为 50 kN 时, 试件峰值应力最小, 相同试验过程侧向约束力分别为 75, 100, 150 kN 的试件与之相比, 其峰值应力分别降低了 8.56%, 11.67%, 21.46%. 这是由于侧向约束的增加, 峰值强度相应提高, 弹性变形区域变宽, 裂纹扩展受到限制, 并且峰后存在残余应变.

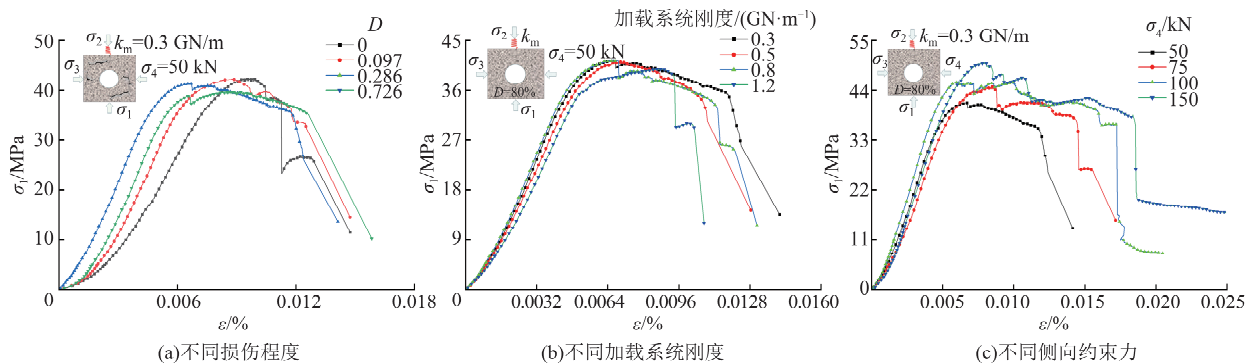


图 6 不同加载模式下的应力-应变曲线  
Fig. 6 Stress-strain curves under different loading modes

#### 3.2 宏观力学参数特征

刚度劣化条件下双轴加载含圆形孔洞试样的峰值强度、峰值应变和弹性模量随损伤程度  $D$ 、系统刚度  $k_m$  以及侧向约束力的变化特征如图 7 所示. 图中  $\sigma_m, \epsilon_m$  和  $E_m$  分别为未预制损伤岩样的峰值强度、峰值应变和弹性模量的平均值.

结合图 6 可知: 1) 对于预制初始损伤含圆形孔洞试件, 不同初始损伤程度加载试样的承载能力和弹性模量都有不同程度的劣化. 未预制损伤试样的平均峰值强度和弹性模量分别为 42.47 MPa 和 9.18 GPa, 而不同损伤程度 (0.097~0.726) 试样在加载下的平均峰值强度和弹性模量分别为 42.24~39.69 MPa 和 8.68~6.09 GPa, 劣化幅度分别为 0.54%~7.01% 和 5.76%~50.74%. 2) 对

于预制初始损伤含圆形孔洞试件, 不同加载系统刚度下试样的承载能力与弹性模量变化程度不明显, 这是由于加载系统刚度大小主要影响试样峰后破坏特征, 对峰值强度及弹性模量大小无明显影响. 3) 对于预制初始损伤含圆形孔洞试件, 不同侧向约束力加载下试样的承载能力与弹性模量都有不同程度的增加. 这是因为在双轴加载条件下, 增加侧向约束可以有效抑制裂纹扩展和减少孔洞引起的应力集中, 提高岩样的结构完整性和整体强度. 其中, 侧向约束力从 50 kN 增加至 150 kN 时, 峰值强度从 41.29 MPa 上升到 50.15 MPa, 增幅为 21.46%, 弹性模量从 7.31 GPa 上升到 8.53 GPa, 增幅为 16.69%. 这表明, 侧向约束力作用下可使试样内部预制损伤在加载早期阶段发生闭合, 提高岩样内部微裂隙的闭合能力, 增强岩样抵

抗变形的能力,使其表现出更高的刚度特征.

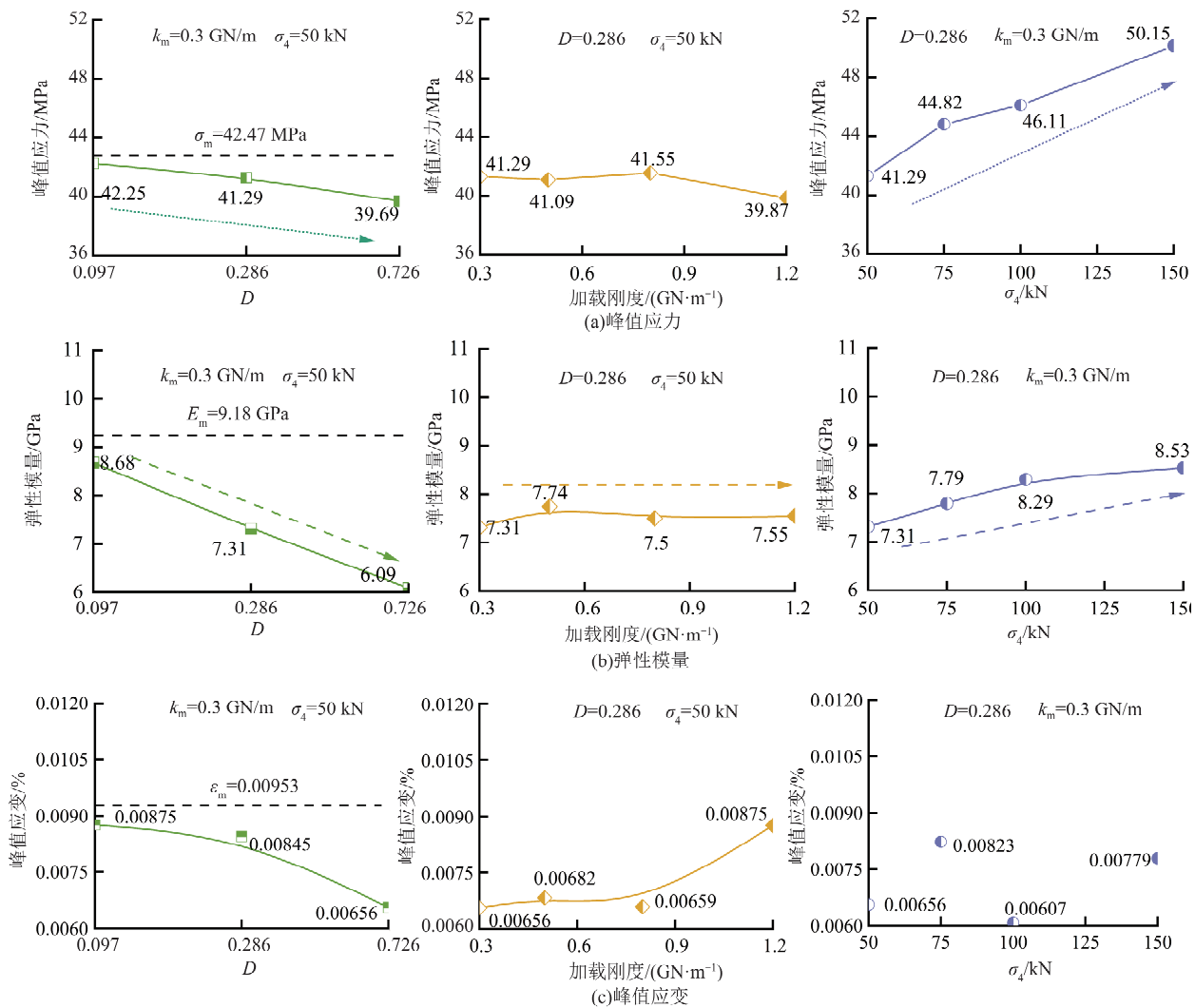


图 7 不同加载模式下试样力学参数变化特征

Fig. 7 Variation characteristics of mechanical parameters of samples under different loading modes

### 3.3 含孔洞围岩破坏过程分析

本文将试验过程中采集到的散斑图像导入到 Matlab 软件中进行分析处理,得到了各组试件表面的垂直位移云图,如图 8 所示,图中  $t_i$  ( $i=1,2,3$ ) 为裂纹及位移变化的时间.通过处理散斑图像,可以定量描述不同区域的变形程度,能够较好地反映试件材料的局部变形特征<sup>[30-32]</sup>.鉴于文章图像较多,为避免篇幅过长,本文选择损伤程度  $D=0.726$ 、加载系统刚度  $k_m=0.3$  GN/m、侧向约束力  $\sigma_4=150$  kN 时的散斑图像进行对比分析和讨论.圆形巷道孔周围本身就是应力集中区域,并随应力的持续增加向试样上下两端扩展,由于侧向应力的约束作用,不同方向上的位移变化不均匀性在散斑图上清晰显现,沿着主应力方向的位移增大较为显著.

图 8a 为预制初始损伤程度为 0.726 下圆形巷道孔试样加载的变形破裂过程.在初始阶段,孔洞

周围出现轻微不均匀的位移分布,整体位移较小;在裂纹扩展阶段,随着应力增加,其扩展过程主要受剪应力作用,孔洞附近和裂纹起始点的位移开始明显增大,显示出应力集中效应的增强,并且显示出明显的位移带梯度;在后期失稳阶段,随着裂纹连通和结构失稳,散斑云图显示位移突然增大,尤其在裂纹贯通区域,表现出剧烈的位移变化.

图 8b 为圆形巷道试样在预制初始损伤程度为 0.286 下加载系统刚度 ( $k_m=0.3$  GN/m) 时的变形破裂过程.在初期阶段,孔洞上下两端出现应力集中区域;在裂纹扩展阶段,随着时间的推移,巷道周围位移量变得较为明显,裂纹不断形成与扩展,在散斑位移云图中,位移较大的区域与周围区域色彩对比急剧增强,表明此区域的应变接近破坏临界值;在后期失稳阶段,云图上位移变化的色彩反差达到最大,裂纹全部贯通,岩样结构发生

失稳,发生明显错动现象,说明在其扩展过程中主要受剪应力作用。

图8c为圆形巷道试样在预制初始损伤程度为0.286下施加侧向约束力( $\sigma_4 = 150$  kN)时的变形破裂过程。初始阶段与上述试样一样,高应变区都是在巷道上下部位出现,反映为局部位移的高增长区;在裂纹扩展阶段,散斑云图清晰地显示出裂纹扩展路径,表现出显著拉伸与压缩形变;在后期失稳阶段,裂纹贯穿于试样上下两端,使结构失去

承载能力,云图显示出试样的整体失效模式,变形集中区域扩展,导致突然的全面位移变化。

试验结果表明,围岩的破坏特征显著受刚度劣化和侧向约束条件影响。刚度劣化程度高(损伤程度高)时,围岩在剪应力作用下易失稳;而施加侧向约束则能延缓裂纹扩展,增强结构稳定性。这表明在实际工程中,通过控制刚度劣化程度及采取有效的支护措施,可以显著延缓围岩的失稳过程,增强结构稳定性。

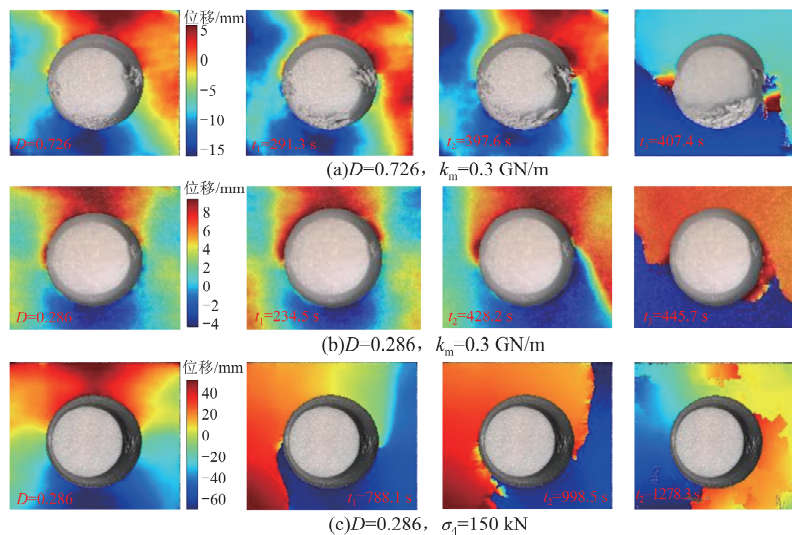


图8 不同加载条件下试样破裂过程中的垂直位移云图

Fig. 8 Vertical displacement cloud image in the fracture process under different loading conditions

### 3.4 含孔洞围岩破坏模式分析

通过分析不同加载条件下含孔洞砂岩的破坏过程,发现所有试样的破坏主要集中在两侧,对刚度劣化后不同加载条件下含孔洞试样最终破坏特征进行处理,刚度劣化下含孔洞砂岩试样的最终破坏特征及垂直应变场云图如图9所示,图中 $T$ 为孔洞破坏时间。由该图可见,垂直应变场主要集中在孔洞两侧,且孔壁发生剥落破坏,并形成了“v”型缺口。

初始损伤程度与不同系统刚度加载对含孔洞试样破坏特征具有显著影响。如图9a所示,当预制损伤程度较低时( $D = 0.097$ ),试样在破坏过程中表现出较长的塑性变形阶段,能量释放较为缓慢,破坏程度相对较小,裂纹扩展速度较慢,表现为塑性破坏;在预制损伤程度达到0.726时,试样本身几乎不具备存储较多弹性能的能力,大部分能量已在裂纹扩展过程中耗散,结合图6应力-应变曲线可知,在破坏阶段,存储的微量弹性能会瞬间释放,导致短期内的剧烈能量波动,从而引发显著的失稳和坍塌,主要表现为能量释放的瞬时性,呈现出典型的脆性破坏特征。如图9b所示,加载系统

刚度较低时( $k_m = 0.3$  GN/m),试样在短时间内发生快速的裂纹扩展,导致围岩出现脆性破坏,试样破坏时的能量释放具有突发性和瞬时性;加载系统刚度较高时( $k_m = 1.2$  GN/m),试样在破坏过程中表现出渐进性的塑性破坏特征,破坏时间相对较长,能量释放过程较为平稳。

为对比应力状态对洞壁围岩破坏特征的影响,选取侧向约束力分别为50,75,100,150 kN时的洞壁围岩破坏特征,对比洞壁破坏的严重程度,如图10所示。在较小的侧向约束力下( $\sigma_4 = 50$  kN及 $\sigma_4 = 75$  kN时),孔洞两侧围岩在短时间内产生剥落现象,由垂直应变云图可知,孔洞两侧的应变集中区域较为明显,说明局部应力过高,导致洞壁围岩快速破坏,在加载系统刚度的作用下发生脆性破坏。对比侧向约束力为 $\sigma_4 = 100$  kN及 $\sigma_4 = 150$  kN时,孔洞两侧的应力分布逐渐趋于均匀,洞壁围岩整体承载能力提高,结合图7c应力-应变曲线可知,应力释放过程较为平稳,并存在一定的残余强度,围岩最终发生大面积剥落并呈现环状裂隙,说明围岩经历较长时间的大变形才会出现失稳。因此,在孔洞侧向应力较低时,洞壁在加载系

统刚度的作用下易发生脆性破坏,随着侧向应力的增加,洞壁围岩的垂直应力增加,延缓了破坏的发生,表现为渐进的塑性破坏,从而起到了弱化系统刚度的作用。

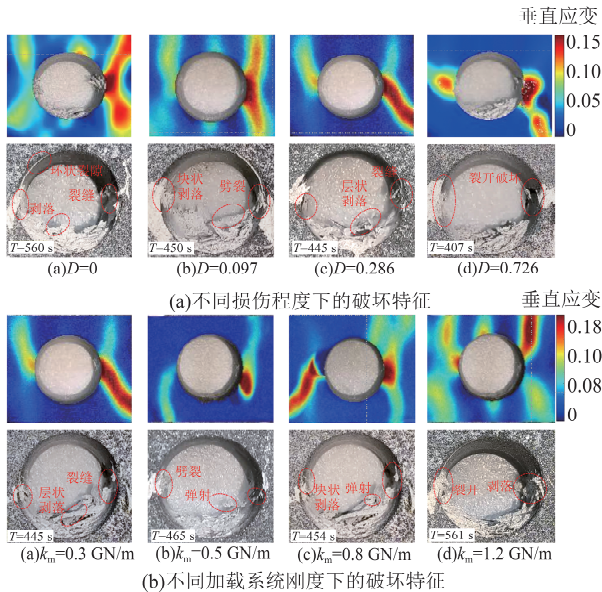


图9 刚度劣化下含孔洞试样破坏模式及其垂直应变场  
Fig. 9 Failure mode and vertical strain field with porosity under stiffness degradation

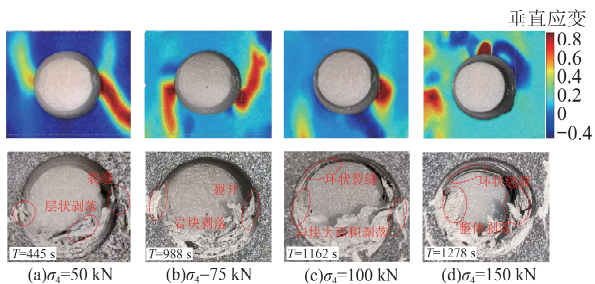


图10 应力调整下含孔洞试样破坏模式及其垂直应变场  
Fig. 10 Failure mode and vertical strain field with holes under stress adjustment

从刚度劣化状态和侧向应力调整角度来看,刚度劣化易导致围岩破坏模式从局部扩展转变为整体失稳,加速破坏进程,而侧向约束力的增加,使得孔洞两侧的应力分布逐渐趋于均匀,平衡了局部应力集中现象,从而提高了围岩的整体承载能力.在实际工程中,通过优化围岩系统的刚度和采取适当的围岩支护措施,可以有效控制围岩的破坏过程,延缓围岩破坏的发生,提高围岩的稳定性和工程的安全性。

## 4 围岩刚度劣化下能量演化规律

### 4.1 刚度劣化下能量释放特征

在巷道掘进过程中,巷道围岩体在长期荷载或应力集中作用下,会经历从弹性变形到塑性变

形再到最终破坏的过程.在这个过程中,围岩体的刚度逐渐劣化,伴随着能量的储存、耗散和释放<sup>[33-34]</sup>.

$$\begin{cases} W_t = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3, \\ W_E = \frac{1}{2}(\sigma_1 \epsilon_1^e + \sigma_2 \epsilon_2^e + \sigma_3 \epsilon_3^e), \\ W_d = W_t - W_E, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $W_t$ 为输入能密度; $W_E$ 为储存的弹性应变能密度; $W_d$ 为耗散能密度; $\epsilon_1$ 为最大主应变; $\epsilon_2$ 为中间主应变; $\epsilon_3$ 为最小主应变; $\epsilon_1^e, \epsilon_2^e, \epsilon_3^e$ 为3个主应力方向上的弹性总应变。

根据加载系统刚度原理可知,在加载系统刚度作用下,试验机弹性结构体在峰前只负责积聚能量,峰后释放能量作用于岩体上,故试验机框架弹性应变能密度<sup>[30]</sup>为

$$W_{ef} = \frac{1}{2} \sigma_f \epsilon_f = \frac{\sigma_f^2}{2E_t}, \quad (8)$$

式中: $W_{ef}$ 为试验机框架弹性应变能密度; $\sigma_f$ 为试验机框架所产生的应力; $\epsilon_f$ 为试验机框架所产生的应变; $E_t$ 为弹性装置的弹性模量。

根据前文方向的定义( $\sigma_4$ 为侧向方向应力),侧向约束方向产生的应力为 $\sigma_4$ ,应变为 $\epsilon_4$ ,故侧向约束条件下岩体自身内部产生的弹性应变能密度 $W_{el}$ 为

$$W_{el} = \frac{1}{2}(\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_4 \epsilon_4). \quad (9)$$

由于试验机框架产生了应变能并作用于岩体试件上,故岩体自身应变能与系统产生的应变能相互叠加共同作用于试件上,因此将式(8)、式(9)进行联合可得弹性应变能密度 $W_E$ 为

$$W_E = W_{ef} + W_{el} = \frac{1}{2}(\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_4 \epsilon_4 + \sigma_f \epsilon_f). \quad (10)$$

在岩体自身刚度劣化过程中,随着时间( $t$ )推移,岩体储存的弹性应变能密度随刚度劣化而减少,将式(9)联合式(10)进行时间 $t$ 变换得到 $W_{el}(t)$ 为

$$W_{el}(t) = \frac{k_1(t) \cdot E_1(t) \cdot \epsilon_1^2}{2} + \frac{\sigma_4 \epsilon_4}{2}. \quad (11)$$

将式(1)代入式(11)可得

$$W_{el}(t) = \frac{k[1-\lambda(t)] \cdot E[1-\lambda(t)] \cdot \epsilon_1^2}{2} + \frac{\sigma_4 \epsilon_4}{2}. \quad (12)$$

故刚度劣化与能量耗散之间的耦合关系可以通过以下表达式来概括:

$$\begin{cases} W_d(t) \propto \lambda(t), \\ W_e(t) \propto [1 - \lambda(t)]^2. \end{cases} \quad (13)$$

随着刚度劣化系数的增加,围岩的刚度降低,导致储存的弹性势能减少,而耗散的能量增多.表明刚度劣化程度越高,能量耗散的比例就越大,进而导致围岩体的稳定性越差.简而言之,刚度劣化对围岩的能量平衡和稳定性具有显著的负面影响.

根据上述理论,得到不同损伤程度  $D$ 、加载系统刚度  $k_m$ 、侧向约束力  $\sigma_4$  与试件积聚弹性应变能的关系如图 11 所示.不同损伤程度  $D$ 、加载系统刚度  $k_m$  与试件积聚弹性应变能的关系符合指数函数衰减规律;而侧向约束力  $\sigma_4$  与试件积聚的弹性应变能呈线性递增的关系,拟合优度  $R^2$  都在 0.95 以上.随着损伤程度的增加,含圆形孔洞试件

的弹性能储能能力减弱,损伤较大的试件发生破坏时释放的能量会相对较少,这是由于试件最初储存的弹性能在初始损伤过程中被耗散掉;加载系统刚度越大,刚度系统的变形能力越小,所储存的能量较小,在破坏发生时,由于高刚度系统的变形能力有限,无法通过变形吸收和耗散能量,导致更少的能量被释放;侧向约束作用限制了试件的横向变形,强化了其整体稳定性,随着侧向约束力的增加,试件在破坏前可以储存更多的弹性能,当破坏发生时,高约束状态下储存的能量会更为集中地释放,导致更多的能量释放.因此,在对巷道围岩进行控制时,通过增加支护材料的延性以提高围岩的刚度或适当增加侧向约束力来提高围岩的承载能力,可用来防治巷道发生灾害性破坏.

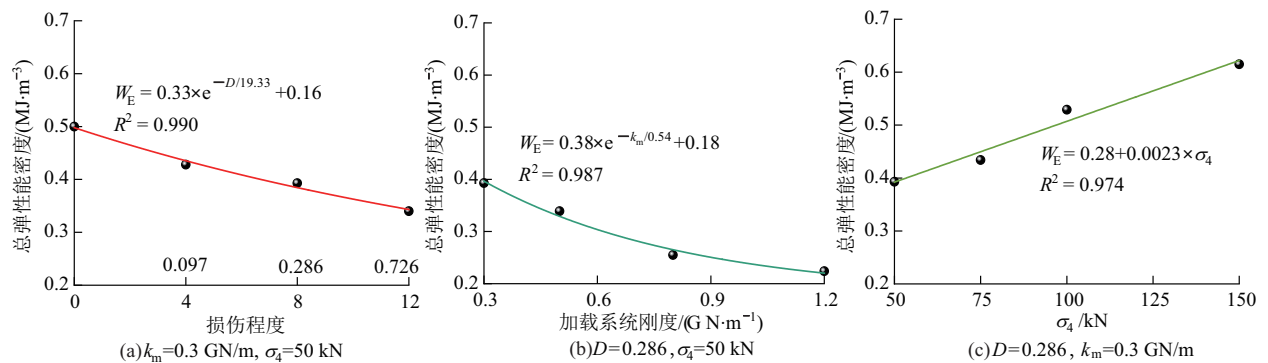


图 11 不同加载条件下能量释放变化关系

Fig. 11 Variation of energy release under different loading conditions

#### 4.2 声发射能量变化特征

声发射累计能量是指在试件破坏过程中,由于裂纹扩展和材料断裂所产生的声发射事件所释放的总能量,反映了试样内部损伤或宏观破坏时释放的能量<sup>[35]</sup>.由于不同加载条件下试样的声发射计数、累计能量演化规律图大致相似,为避免篇幅过长,选择一组典型试件( $D=0.726$ ,  $k_m=1.2$  GN/m,  $\sigma_4=150$  kN)进行分析,如图 12 所示.

在裂纹形成和扩展过程中,声发射累计能量的增加,直接对应于裂纹活动的能量释放;当含孔洞砂岩接近破坏时,宏观裂纹形成,导致声发射累计能量突增,反映了宏观破坏过程中能量的快速释放;声发射累计能量呈非线性增长,揭示了含孔洞砂岩破坏过程中能量释放的突发性和不连续性.

声发射累计能量是整个巷道围岩破坏过程能量积聚、释放的直观表现.结合图 13 不同加载条件下累计能量变化规律可知,不同加载条件下累计能量的增加随着时间进程均呈现非线性增长,表明能量失稳的突发性,在每一个阶段的交界处都伴随着高能量的声发射事件,累计能量曲线在阶

段交界处突增,表明在阶段交界处出现微裂纹快速扩展,在试件进入破坏阶段时,破裂会不断地累进性进行,整个过程可视为非稳态能量释放过程.从图 13a 中可以看出,试样在损伤一定程度时( $D$  分别为 0, 0.097, 0.286, 0.726 时)加载系统刚度过程中,声发射能量分别为  $24.27 \times 10^5$ ,  $18.17 \times 10^5$ ,  $15.01 \times 10^5$ ,  $10.79 \times 10^5$  aJ, 累计能量呈非线性递减趋势,进一步说明在损伤程度较高时加载系统刚度,导致围岩产生强度弱化作用.图 13b 展示了试样在不同加载系统刚度下的声发射累计能量特征,随着加载系统刚度的增加(0.3, 0.5, 0.8, 1.2 GN/m),累计能量分别为  $23.91 \times 10^5$ ,  $16.41 \times 10^5$ ,  $15.01 \times 10^5$ ,  $10.54 \times 10^5$  aJ, 呈非线性降低的趋势,由此可知加载系统刚度较低时,能量释放较高,洞壁破坏较为严重,反之亦然,这表明加载系统刚度的大小直接影响局部能量的释放程度.图 13c 为不同侧向约束作用下的声发射能量特征,随着侧向约束力的增大(50, 75, 100, 150 kN),累计能量分别为  $15.01 \times 10^5$ ,  $28.55 \times 10^5$ ,  $31.08 \times 10^5$ ,  $60.66 \times 10^5$  aJ, 呈非线性增加的趋势,这表明随着侧向约束力的增加,岩石破坏

时释放的能量也会增加,这是因为侧向约束提高了岩石的整体承载能力,使得在破坏前能够储存更多的能量.对累计能量与不同损伤程度、加载系统刚度

及侧向约束力进行数学拟合,发现符合指数函数,拟合优度  $R^2$  均达到 0.950 以上,印证了上述不同加载条件下试件可释放能量特征.

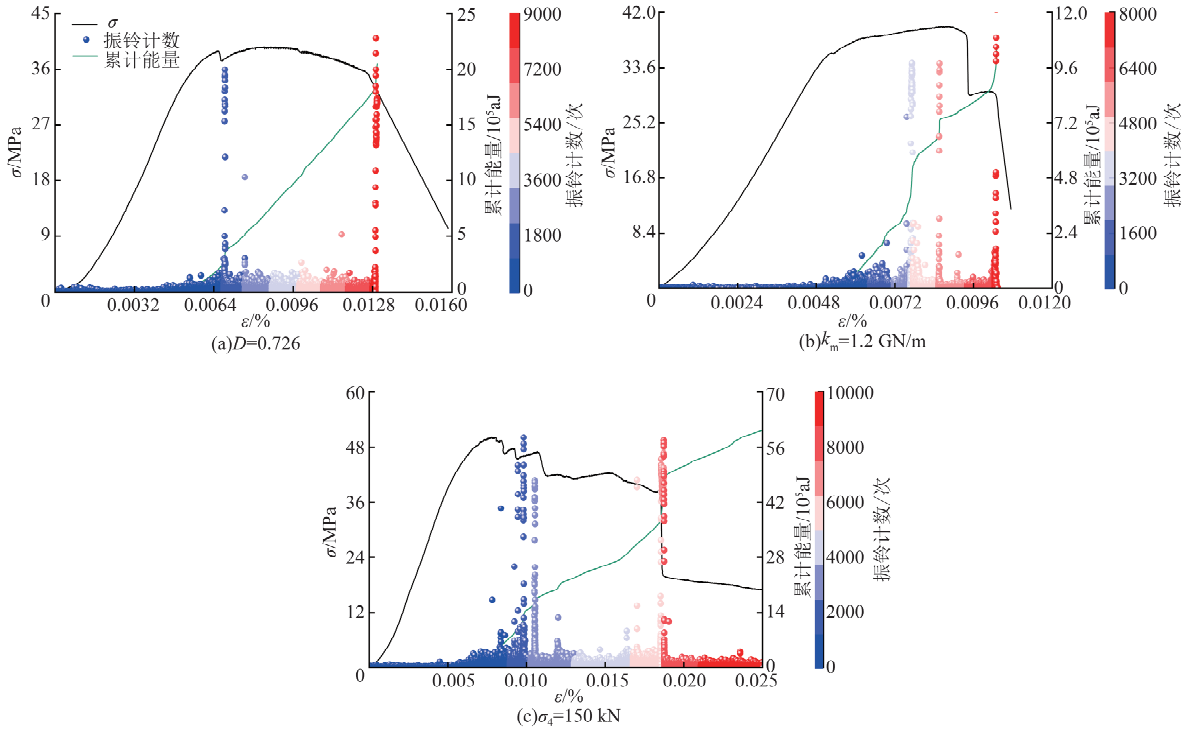
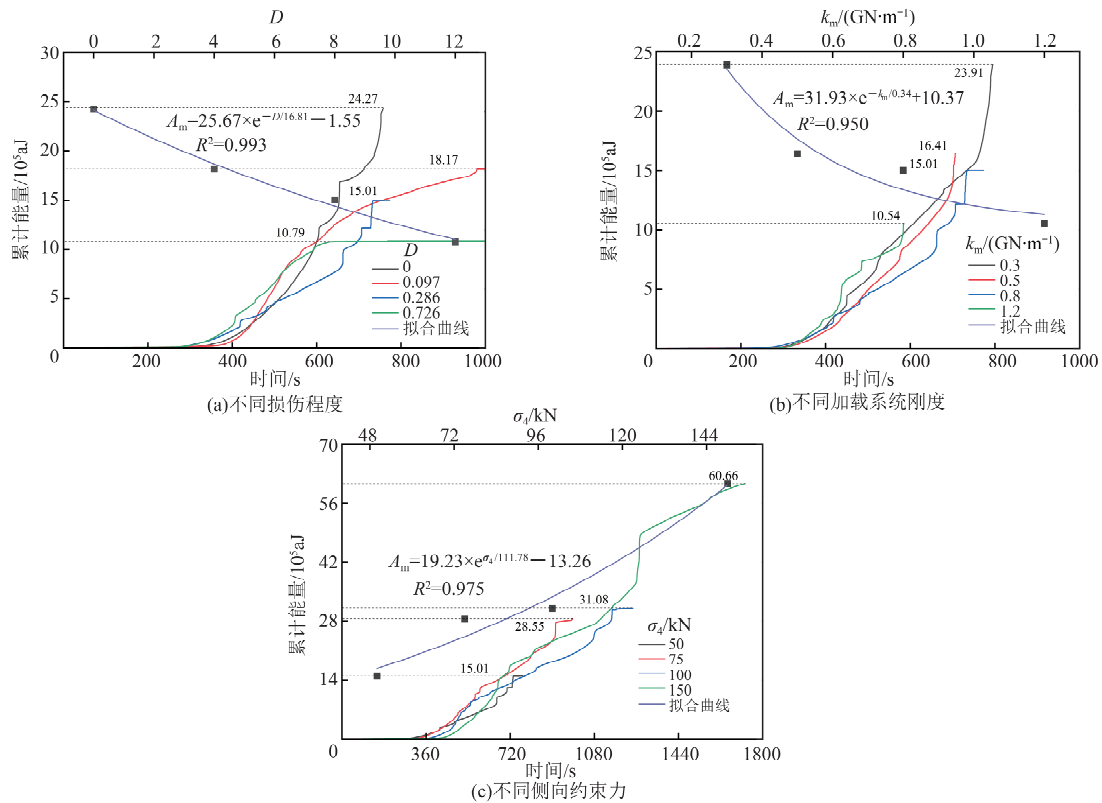


图 12 含圆形孔洞砂岩试件声发射特征

Fig. 12 Acoustic emission characteristics of sandstone specimens with circular cavities



注:  $A_m$  为累计能量.

图 13 含圆形孔洞砂岩试件声发射累积能量特征

Fig. 13 Characteristics of accumulated AE energy of sandstone specimen with circular cavity

### 5 讨 论

本文通过开展不同劣化程度下加载系统刚度及侧向约束力试验,研究了含圆形孔洞砂岩模拟巷道破坏模式及能量释放特征,发现在侧向约束作用及加载系统刚度条件下含圆形孔洞砂岩破坏时长是预制损伤程度和加载系统刚度作用下破坏

时长的数倍.这是由于侧向约束作用下岩石储能极限较高,趋于缓和的塑性破坏,进一步延长了破坏时长.这和文献[28]关于加载系统刚度作用下施加侧向约束力,可提高岩体的储能极限相一致.根据含圆形孔洞试件破坏累计时间,做出不同加载条件下试样破坏失稳情况随时间变化曲线,如图 14 所示.

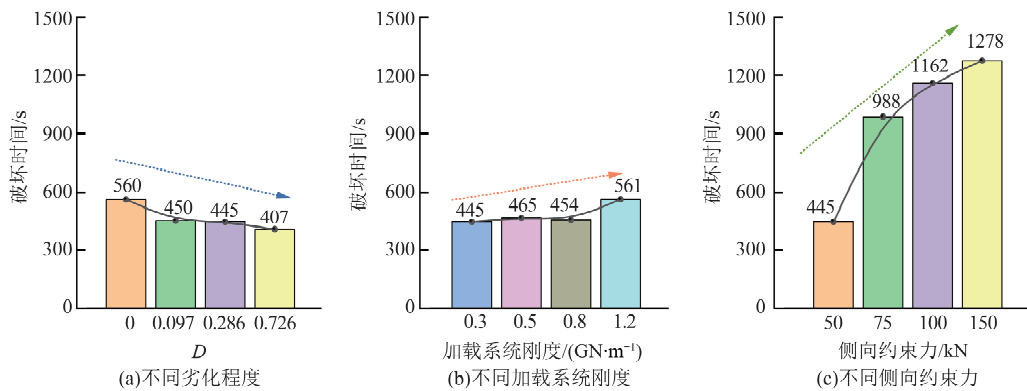


图 14 不同加载条件下试件破坏失稳时间

Fig. 14 Failure and instability time of specimens under different loading conditions

由图 14 可知,在加载过程中,含圆形孔洞砂岩试件的破坏时长受到损伤程度、加载系统刚度和侧向约束力的影响.随着损伤程度增加,破坏时长减少;而随着加载系统刚度和侧向约束力的增加,破坏时长则显著延长.这表明,通过调节系统刚度和侧向约束力,可以提高围岩的承载能力,并在一定程度上抵抗损伤带来的不利影响.

开挖完成初期,围岩会进入一个短暂的稳定阶段,围岩内部应力开始重新调整,岩体结构相对稳定,如图 15a 所示;随着时间的推移,外部荷载和内部应力的不平衡开始逐渐在围岩中积累,微裂纹形成并开始扩展,伴随着微小的变形和局部失稳迹象,出现岩屑掉落或小规模裂隙的延展,如图 15b 所示;随着损伤累积达到一定程度,微裂纹的扩展速度显著增加,变形速率显著提高,出现明显的岩块剥落和支护系统的承载困难,如图 15c 所示;破坏集中体现在严重的岩体崩落、大规模变形及支护体系的全面失效,如图 15d 所示.

圆形巷道破坏区域随时间的演化过程示意如图 15 所示,以时间点  $t_1, t_2, t_3, t_4$  分别表示围岩破坏过程的 4 个阶段,分别为初期稳定阶段 ( $T = t_1$ )、渐进损伤阶段 ( $T = t_2$ )、加速破坏阶段 ( $T = t_3$ ) 及最后失稳阶段 ( $T = t_4$ ). 由图 15 可见,在巷道

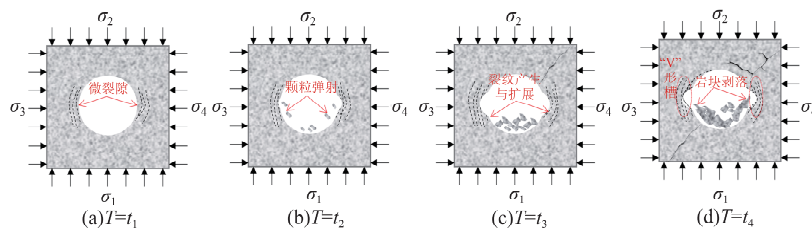


图 15 圆形巷道破坏区域随时间的演化过程示意

Fig. 15 Schematic diagram of the evolution process of the damaged area in circular tunnels over time

在工程实际中,围岩在开挖过程中由于应力的重新分布,往往会出现应力集中区域.这些区域极易引发塑性变形或局部破坏,从而逐步加剧围岩刚度的劣化,最终可能导致大变形或失稳问题,显著缩短围岩的稳定性时效.因此,及时对巷道围岩进行支护和控制是至关重要的.通过及时实施

支护措施,适当增加约束力和提高围岩体的强度,可以有效地弱化岩体在刚度环境劣化时的破坏程度,并降低围岩失稳或岩爆的风险.

### 6 结 论

1)不同初始损伤程度的试样在加载过程中,

其承载能力和弹性模量受到显著影响,劣化幅度分别为 0.54%~7.01%和 5.76%~50.74%;不同侧向约束力加载下试样的承载能力与弹性模量都有不同程度的增幅,增加侧向约束力可以有效抑制裂纹扩展和减少孔洞引起的应力集中,提高岩样的结构完整性和整体强度。

2)通过 DIC 技术对试样表面最大主应变场的演化进行观察,预制初始损伤对含圆形孔巷道破坏特征影响显著。随着损伤程度增加,破坏时间缩短;而随着加载系统刚度和侧向约束力的增加,破坏时间则显著延长。

3)基于能量积聚与耗散原理,发现损伤程度  $D$ 、加载系统刚度  $k_m$  与岩体积聚的弹性应变能的关系呈指数衰减趋势;而侧向约束力  $\sigma_4$  与岩体积聚的弹性应变能呈线性递增的关系,拟合优度  $R^2$  均在 0.950 以上。

4)巷道开挖过程中,应力调整引起围岩刚度劣化,而刚度劣化影响着围岩稳定时效性,通过调节围岩系统刚度和侧向约束力,可以提高围岩的整体刚度和承载能力,并在一定程度上抵抗损伤带来的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] 左建平,孙运江,文金浩,等.深部巷道全空间协同控制技术及应用[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(8):853-862.  
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WEN Jinhao, et al. Full-space collaborative control technology and its application for deeply buried roadways[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8): 853-862.
- [2] 王卫军,范磊,赵志强,等.基于塑性区控制的巷道围岩支护理论与技术研究进展[J].煤炭学报,2024,49(1):320-336.  
WANG Weijun, FAN Lei, ZHAO Zhiqiang, et al. Research progress of roadway surrounding rock support theory and technology based on plastic zone control [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 320-336.
- [3] 江权,冯夏庭,陈国庆.考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):144-152.  
JIANG Quan, FENG Xiating, CHEN Guoqing. A constitutive model of hard rock considering the deterioration of surrounding rock under high ground stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 144-152.
- [4] 宫凤强,罗勇,刘冬桥.深部直墙拱形隧洞围岩板裂破坏的模拟试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(6):1091-1100.  
GONG Fengqiang, LUO Yong, LIU Dongqiao. Simulation test of slab crack failure in deep arched tunnel with straight wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1091-1100.
- [5] 宫凤强,伍武星,李天斌,等.深部硬岩矩形隧洞围岩板裂破坏的试验模拟研究[J].岩土力学,2019,40(6):2085-2098.  
GONG Fengqiang, WU Wuxing, LI Tianbin, et al. Experimental simulation of slab crack failure in deep hard rock rectangular tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2085-2098.
- [6] 宫凤强,罗勇,司雪峰,等.深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1634-1648.  
GONG Fengqiang, LUO Yong, SI Xuefeng, et al. Simulation test of slab buckling rockburst in deep circular tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1634-1648.
- [7] PENG K, YI G S, LUO S, et al. Stress analysis and spalling failure simulation on surrounding rock of deep arch tunnel [J]. Applied Sciences, 2023, 13(11):6474.
- [8] ZHANG Z R, WU S C, CHENG H Y, et al. Rockburst simulation tests on structural plane of deep high-stress circular tunnels: A true triaxial test study on several different hard rocks [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 132: 104473.
- [9] 刘崇岩,赵光明,许文松,等.高应力巷道岩爆过程及时空演化规律试验研究[J].煤炭学报,2020,45(3):998-1008.  
LIU Chongyan, ZHAO Guangming, XU Wensong, et al. Experimental study on rock burst process and spatiotemporal evolution law of high stress roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 998-1008.
- [10] 朱泉企,李地元,李夕兵.含预制椭圆形孔洞大理岩变形破坏力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增1):2724-2733.  
ZHU Quanqi, LI Di Yuan, LI Xibing. Experimental study on deformation and failure mechanical properties of marble with prefabricated elliptical cavity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup 1): 2724-2733.
- [11] LUO Y, GONG F Q, LIU D Q, et al. Experimental simulation analysis of the process and failure characteristics of spalling in D-shaped tunnels under true-triaxial loading conditions [J]. Tunnelling and Un-

- derground Space Technology, 2019,90,42-61.
- [12] 许庆峰,彭守建,许江,等. 不同椭圆率巷道冲击破坏特征试验研究[J/OL]. 煤炭学报,1-14(2024-06-28) [2025-01-19]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0115>.
- XU Qingfeng, PENG Shoujian, XU Jiang, et al. Experimental study on impact failure characteristics of roadway with different ellipticity [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-14 (2024-06-28) [2025-01-19]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0115>.
- [13] WU H, KULATILAKE P H S W, ZHAO G Y, et al. A comprehensive study of fracture evolution of brittle rock containing an inverted U-shaped cavity under uniaxial compression [J]. Computers and Geotechnics, 2019,116,103219.
- [14] WU H, ZHAO G Y, MA S W. Failure behavior of horseshoe-shaped tunnel in hard rock under high stress: Phenomenon and mechanisms [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(2):639-656.
- [15] 王渭明,赵增辉,王磊. 考虑刚度和强度劣化时弱胶结软岩巷道围岩的弹塑性损伤分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5):679-685.
- WANG Weiming, ZHAO Zenghui, WANG Lei. Elastoplastic damage analysis of roadway surrounding rock in weakly cemented soft rock considering stiffness and strength deterioration [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5):679-685.
- [16] 张帅,王俊杰,张海龙,等. 考虑刚度与强度劣化的洞室围岩弹塑性分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1):101-109.
- ZHANG Shuai, WANG Junjie, ZHANG Hailong, et al. Elastoplastic analysis of surrounding rock with stiffness and strength degradation in consideration [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1):101-109.
- [17] 池平平. 基于特征曲线法考虑围岩刚度弱化隧道开挖变形分析[J]. 公路工程, 2018, 43(1):191-195.
- CHI Pingping. Deformation analysis of tunnel excavation considering surrounding rock stiffness weakening based on characteristic curve method [J]. Journal of Highway Engineering, 2018, 43(1):191-195.
- [18] 赵扬锋,潘一山,于海军. 基于损伤模型的圆形洞室矿震分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2):347-350.
- ZHAO Yangfeng, PAN Yishan, YU Haijun. Seismic analysis of circular cavity based on damage model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Sup 2):347-350.
- [19] 王俊杰,张帅,张海龙. 考虑劣化效应与支护时机的深埋软岩隧道变形分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(1):273-287.
- WANG Junjie, ZHANG Shuai, ZHANG Hailong. Deformation analysis of deep-buried soft rock tunnel considering deterioration effect and support timing [J]. Chinese Journal of Basic and Engineering Sciences, 2019, 32(1):273-287.
- [20] 班力壬,戚承志,单仁亮,等. 节理峰前剪切刚度软化模型及其影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10):2765-2772.
- BAN Liren, QI Chengzhi, SHAN Renliang, et al. Analysis of softening model of pre-peak shear stiffness of joint and its influencing factors [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10):2765-2772.
- [21] 杨哲豪,俞缙,涂兵雄,等. 考虑刚度劣化影响的岩石峰后应变软化模型[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(5):664-668.
- YANG Zhehao, YU Jin, TU Bingxiong, et al. Post-peak strain softening model of rock considering the effect of stiffness deterioration [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2018, 39(5):664-668.
- [22] 陈昊祥,王明洋,燕发源,等. 深部巷道围岩塑性区演化的理论模型与实测对比研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10):1855-1863.
- CHEN Haoxiang, WANG Mingyang, YAN Fayuan, et al. Theoretical model for evolution of plastic zone of rock mass around deep tunnels and its comparison with in-situ observation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10):1855-1863.
- [23] 韩征,李龙清. 基于四阶段应力-应变模型的深部巷道围岩弹塑性分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5):84-91.
- HAN Zheng, LI Longqing. Elastoplastic analysis of deep roadway surrounding rock based on four-stage stress-strain model [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5):84-91.
- [24] 贾蓬,毛松泽,孙占阳,等. 冻融损伤砂岩的能量演化及分段本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3):908-919.
- JIA Peng, MAO Songze, SUN Zhanyang, et al. Energy evolution and sectional constitutive model of freeze-thaw damaged sandstone [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2023, 54(3):908-919.
- [25] 王子辉,周宏伟,安露,等. 循环加卸载下花岗岩破裂过程及能量演化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(5):874-881.

- WANG Zihui, ZHOU Hongwei, AN Lu, et al. Study on fracture process and energy evolution of granite under cyclic loading and unloading [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49 (5): 874-881.
- [26] 张凯, 张东晓, 赵勇强, 等. 损伤岩石声发射演化特征及响应机制试验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(3): 96-106.  
ZHANG Kai, ZHANG Dongxiao, ZHAO Yongqiang, et al. Experimental study on acoustic emission evolution characteristics and response mechanism of damaged rocks [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2024, 52(3): 96-106.
- [27] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 变刚度加载试验系统的研制及其在煤岩破坏力学行为测试中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1846-1857.  
ZHAO Tongbin, YIN Yanchun, TAN Yunliang, et al. Development of variable stiffness loading test system and its application in failure mechanical behavior test of coal and rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1846-1857.
- [28] 吴旭坤, 赵光明, 孟祥瑞, 等. 单双向约束下加载系统刚度对砂岩峰后破坏行为的影响规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(11): 2796-2810.  
WU Xukun, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui, et al. Study on the influence of loading system stiffness on post-peak failure behavior of sandstone under single and double constraint [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(11): 2796-2810.
- [29] YIN Y, ZHENG W, TANG X, et al. Test study on failure and energy supply characteristics of rock under different loading stiffness [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 142: 106796.
- [30] 王笑然, 周鑫, 刘晓斐, 等. 石英岩峰后加卸载非线性断裂扩展及动态长度定量测定[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(4): 680-695.  
WANG Xiaoran, ZHOU Xin, LIU Xiaofei, et al. Nonlinear fracture propagation and quantitative determination of dynamic length of post-peak loading and unloading in quartzite [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(4): 680-695.
- [31] 彭瑞东, 翁炜, 左建平, 等. 数字散斑相关法在SEM观测岩石变形时的应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(4): 650-656.  
PENG Ruidong, WENG Wei, ZUO Jianping, et al. Application of digital speckle correlation method in rock deformation observation by SEM [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(4): 650-656.
- [32] 赵洪宝, 吉东亮, 程辉, 等. 非对称载荷作用下含孔试样渐进破坏机制与损伤表征[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(3): 478-491.  
ZHAO Hongbao, JI Dongliang, CHENG Hui, et al. Progressive failure mechanism and damage characterization of porous specimens under asymmetric loads [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(3): 478-491.
- [33] 刘之喜, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 真三轴压缩下砂岩的能量和损伤分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(2): 327-341.  
LIU Zhixi, MENG Xiangrui, ZHAO Guangming, et al. Energy and damage analysis of sandstone under true triaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(2): 327-341.
- [34] 纪洪广, 张春瑞, 张月征, 等. 岩石材料破裂过程中声发射信号的应力状态及能量演化研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(2): 211-223.  
JI Hongguang, ZHANG Chunrui, ZHANG Yuezhen, et al. Research on the stress state and energy evolution of acoustic emission signals during rock material fracture [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(2): 211-223.
- [35] WANG C Y, ZHANG D M, XIONG Z Y, et al. Acoustic emission noise reduction: A case of a uniaxial compression test of gypsum-like rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 178: 105781.

(责任编辑 沈春妮 全腾)