

气压-应力耦合作用下盐岩应力松弛特性研究

刘 雯^{1,2}, 范金洋^{1,2}, 刘文浩^{1,2}, 陈 结^{1,2}, 刘 伟^{1,2}, 吴 斐^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘 要: 为保障国家能源安全, 近年来国家加大了对压缩空气储能技术的研发投入, 这类工程较以往常规工程情况更为复杂, 岩石的应力松弛特性也会受更多因素影响。针对压缩空气储能工程特点, 从新研究角度出发, 进行了气压-应力耦合作用下盐岩应力松弛试验, 探究不同气压、轴向启动应力条件下盐岩的应力松弛特性。结果表明: (1) 盐岩的应力松弛宏观规律不受气压影响, 气压-应力耦合作用下盐岩的应力松弛仍可划分为快速、减速、稳定松弛 3 个阶段。其中, 快速松弛阶段的松弛量占整体松弛量 50% 左右, 而稳定松弛阶段在整个松弛过程中占比最大; (2) 盐岩应力松弛受轴向启动应力和气压影响, 轴向启动应力和气压越高, 应力松弛初速度越大, 稳定松弛阶段的松弛速率越大, 应力松弛度越大; (3) 循环气压下盐岩的应力松弛为循环性松弛, 松弛曲线受控于其循环上下限对应的恒定气压时盐岩的应力松弛曲线; (4) 松弛后盐岩的环境扫描电镜 (environmental scanning electron microscopy, ESEM) 图像表明, 微裂纹产生和发展是造成盐岩内部损伤的主要机制。松弛后盐岩的细观结构损伤主要有晶粒碎屑、晶内裂纹、沿晶裂纹和穿晶裂纹; (5) 改进的非线性二单元广义 Maxwell 松弛模型可以较好地描述不同的启动应力、气压条件下盐岩的应力松弛行为, 为盐穴压缩空气储能库的稳定性评估提供一定参考。

关 键 词: 盐岩; 气压-应力耦合; 应力松弛; 非线性应力松弛模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 08-2434-15

Stress relaxation characteristics of salt rock under the action of air barometric stress coupling

LIU Wen^{1,2}, FAN Jin-yang^{1,2}, LIU Wen-hao^{1,2}, CHEN Jie^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, WU Fei^{1,2}

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044 China;

2. School of Resources and Safety, Chongqing University, Chongqing 400044 China)

Abstract: To enhance national energy security, recent years have witnessed an increase in state investment directed towards the research and development of compressed air energy storage (CAES) technology. These initiatives are inherently more complex than traditional projects, as the stress relaxation characteristics of geological formations, particularly rocks, are influenced by a multitude of factors. According to the characteristics of CAES engineering, stress relaxation experiments of salt rock under barometric stress coupling were carried out from a new perspective to explore the stress relaxation characteristics of salt rock under different air pressures and axial starting stress conditions. The results show that: (1) The macroscopic behavior of stress relaxation in salt rock is independent of air pressure, and the process can be categorized into three distinct stages: rapid relaxation, decelerated relaxation, and stable relaxation. Notably, the rapid relaxation phase accounts for approximately 50% of the total relaxation, while the stable relaxation phase represents the predominant portion of the entire relaxation process. (2) The stress relaxation behavior of salt rock is significantly influenced by both axial starting stress and air pressure. Specifically, increased axial starting stress and air pressure correlate with heightened initial stress relaxation rates, greater relaxation rates, and an enhanced degree of stress relaxation during the stable relaxation phase. (3) Under cyclic pressure conditions, the stress relaxation of salt rock exhibits a cyclic relaxation pattern, with the relaxation curve being governed by the stress relaxation curve of salt rock at constant pressure, corresponding to its cyclic upper and lower limits. (4) Environmental scanning electron microscopy (ESEM) images of the relaxed salt rock reveal that the formation and propagation of micro-cracks constitute the primary mechanism of internal damage within the salt rock. Post-relaxation, the meso-structural damage observed in the salt rock includes grain debris, intragranular cracks, intergranular cracks, and trans-granular

收稿日期: 2024-09-23

录用日期: 2024-12-17

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (课题) (No. 2024YFB4007103)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology (Project) (2024YFB4007103).

第一作者简介: 刘雯, 女, 2002 年生, 硕士研究生, 主要从事盐穴储氢稳定性方面的研究。E-mail: cqlw3708@163.com

通讯作者: 范金洋, 男, 1989 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土力学、采矿工程、安全工程方面的研究。E-mail: Jinyang.f@cqu.edu.cn

cracks. (5) The improved nonlinear two-element generalized Maxwell relaxation model can better describe the stress relaxation behavior of salt rock under different starting stresses and pressure conditions, and provide a certain reference for the stability assessment of salt cavern compressed air energy storage.

Keywords: salt rock; barometric stress coupling; stress relaxation; nonlinear stress relaxation model

1 引言

在“双碳”目标和能源安全战略布局的推动下,我国新能源结构转型加快步伐。近年来,风能和光伏发电技术的推广对我国大规模储能技术提出了新的挑战^[1-3]。各类地质构造,诸如盐穴、废弃矿洞、枯竭油气藏等,不失为大规模储能的可行场所^[4-9]。而岩石的力学性质与地质储库的长期稳定和安全关联重大,特别是岩石的流变特性会导致岩石强度明显退化,造成安全隐患^[10]。因此,众多学者针对岩石的流变特性开展了大量试验研究,岩石的松弛特性作为岩石流变特性的重要研究方向之一,已有了一定的研究成果^[11-20]。

不同岩石的应力松弛特性受到岩性影响会有所差异,例如刘志勇等^[21]的研究指出石英云母片岩的应力松弛特性会受到片理发育方向的影响。同时,岩石节理的粗糙度和应力历史也会影响岩石的应力松弛特性,节理粗糙度越大,应力松弛越明显^[22-24]。而提高围压则可以有效降低岩石的松弛度和时间^[25]。盐岩由于具有极好的流变特性,在极小的偏应力作用下也会发生蠕变,针对这一特性,杨春和等^[26]研究了预蠕变对于盐岩应力松弛特性的影响,发现随着预蠕变的增加,盐岩应力松弛明显下降。此外,由于不同阶段的岩石的性质也会有所不同,于怀昌等^[27]采用分级加载的方式研究了粉砂质泥岩峰前峰后的应力松弛特性,并总结了峰前峰后岩石的应力松弛机制。

除了在无干扰条件下进行岩石本身的应力松弛特性研究,为更贴近工程实际需求,深入探索复杂条件下岩石的应力松弛特性,学者们也进行了耦合外部因素的应力松弛试验研究,如探究动态扰动对于岩石应力松弛特性的影响,研究结果表明,受扰动后岩石的承载能力急剧恶化,应力松弛也随之加剧,然而围压可以有效降低扰动的影响,围压越大,扰动效应越小^[28-29]。赵振华等^[30]探究了卸压孔在硬岩应力松弛过程中的作用。另外也有较多学者研究了水力耦合条件下岩石的应力松弛特性,众多的试验结果表明,水对于不同岩石应力松弛特性的影响效应大致相似。对于砂岩来说,相同有效围压条件下,水力耦合时砂岩的应力松弛时间效应更为明显,松弛潜力更高,而当围压不变时,增大水压会有效

抑制砂岩的应力松弛^[31-33]。此外,对于脆性砂岩而言,其水力耦合作用下的应力松弛特性与有效应力水平和裂纹的发育状态密切相关^[34]。对于煤柱^[35]、粉砂质泥岩^[36]、石灰岩^[37]而言,水力耦合条件下的流变效应都有所增强,孔隙水压的增大将缩短岩石流变破坏的时间。

过去对于岩石应力松弛特性的研究已有较多,也为以往的传统工程提供了较多的指导。然而,如今我国正处于新能源蓬勃发展的时期,对于规模化储能技术的需求极为迫切,国家更是在盐穴压缩空气储能和盐穴储氢等项目上投入了大量资源。因此,为尽快突破相关技术,为相关工程项目提供有价值的参考,研究气压作用下盐岩的应力松弛特性并构建力学模型用以准确预测盐岩的应力松弛变形,保障盐穴压缩空气储能库的建设安全和运营安全十分有必要。关于岩石应力松弛模型的研究成果有许多,学者们多是基于广义 Maxwell、广义 Kelvin、Hooke-Kelvin 和西原等流变模型进行改进修正^[38-41]。基于此,本文开展了气压作用下盐岩应力松弛特性试验研究,并基于试验结果改进了广义 Maxwell 模型,构建了能反映气压-应力耦合作用的盐岩应力松弛特性本构模型。

2 试验条件与试验方案

2.1 试验设备及试验材料

试验采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室采购的多场三轴试验机。该试验机适用于尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 与 $\Phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 两种不同规格的圆柱形试件,可进行三向荷载条件下不同气体压力、不同温度、不同应力条件的突出、吸附解吸、渗流以及常规力学等试验。试验机最大通气压力为 6.0 MPa ,最大轴向载荷为 500 kN ,最大围压为 60 MPa 。

此外,为实现气压-应力耦合,试验采用气体压力控制系统实现通入气体的压力控制,该系统可实现恒压与循环气压两种气压控制形式。为保证试验安全,试验中采用高纯度氮气作为充入气体。整个试验系统构成示意图如图 1 所示。

试验选取来自巴基斯坦喜马拉雅山脉深层的天然盐岩加工制备试件,该盐岩为高纯度盐,NaCl 含量超过 96% ,表观呈白色和淡橙色的半透明状。依据国际岩石力学试验的规范,将试件加工为直径

50 mm，高度 100 mm 的标准圆柱形试件，并在圆柱试件中心开直径为 6 mm 的通孔。同时，为保证

试验效果，采用手工打磨的方法将端面上下平整度误差控制在 ± 0.02 mm。

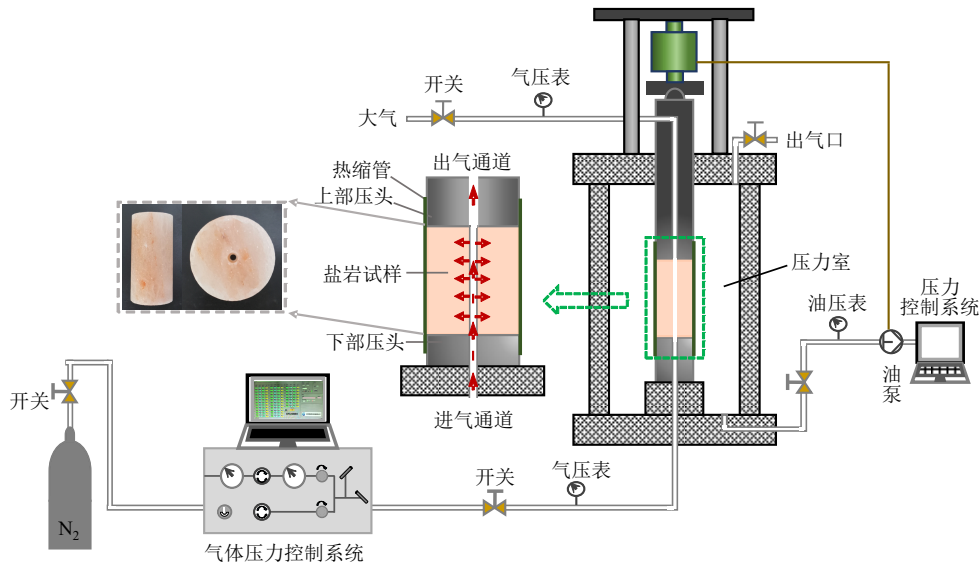


图 1 试验系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of the test system

2.2 试验方案及试样受力分析

2.2.1 试验方案

试验分为力学强度测试和松弛试验两部分，均在室温下进行。松弛试验基于强度测试的结果开展。

(1) 强度试验测定围压为 6 MPa，不同恒定气压条件下（0、1、3、5 MPa）盐岩的三轴抗压强度。强度试验设置轴向加载速度为 0.2 kN/s。

(2) 松弛试验设置恒定气压与循环气压两种气压加载方式。①恒定气压下松弛试验的条件为：围压为 6 MPa，恒定气压分别为 0、1、3、5 MPa，轴向加载速率设置为 0.2 kN/s。在加载完围压和气压后，将轴向力加载至恒定气压对应条件下强度的 0.4（0.6，0.8）后，试验机转换为位移控制，保持气压和轴向应变不变，开始应力松弛。②循环气压下的松弛试验条件为：围压为 6 MPa，循环气压分别为 1~3 MPa 与 1~5 MPa，轴向加载速率设置为 0.2 kN/s，气压加卸载速率为 2 MPa/min。在加载完围压并加载 1 MPa 气压后，将轴向力加载至循环气压上限对应条件下强度的 0.4（0.6，0.8）后，试验机转换为位移控制，保持轴向应变不变，开始应力松弛，同时开始进行气压的循环加卸载。松弛试验加载路径如图 2 所示，试验工况设置如表 1 所示。

2.2.2 试样受力分析

由于本文使用的打孔试件的外径 R_o 和内径 R_i 之比远大于 1.2，因此，将试样看作厚壁圆筒进行受

力分析^[42-45]。试验中试件将同时受轴压 p_z 、均匀内压 p_i 和外压 p_o 作用，如图 3(a)所示，此时，需考虑径向应力 σ_r ，即试件处于三向应力状态（见图 3(b)）。

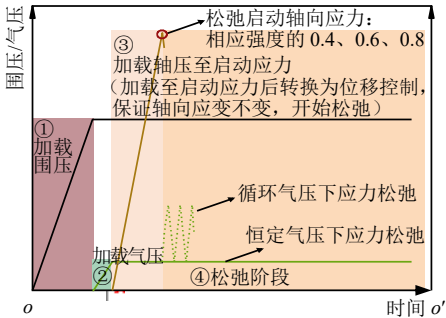


图 2 松弛试验加载路径
Fig.2 Loading path of relaxation test

表 1 松弛试验工况设置
Table 1 Setting of relaxation test conditions

松弛试验类型	试样编号	围压 / MPa	松弛启动轴向应力水平	气压 / MPa	启动应力基准
恒定气压下松弛	6-0-0.4(0.6/0.8)	6	0.4, 0.6, 0.8	0	6-0
	6-1-0.4(0.6/0.8)	6	0.4, 0.6, 0.8	1	6-1
	6-3-0.4(0.6/0.8)	6	0.4, 0.6, 0.8	3	6-3
循环气压下松弛	6-5-0.4(0.6/0.8)	6	0.4, 0.6, 0.8	5	6-5
	6-1-3-0.4(0.6/0.8)	6	0.4, 0.6, 0.8	1~3	6-3
	6-1-5-0.4(0.6/0.8)	6	0.4, 0.6, 0.8	1~5	6-5

注：启动应力基准为应力条件，如 6-3 表示 6 MPa 围压、3 MPa 气压。

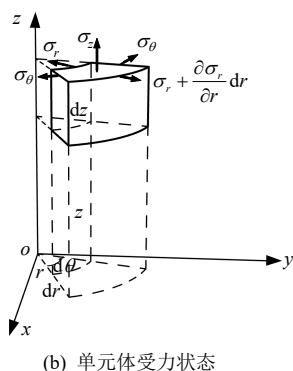
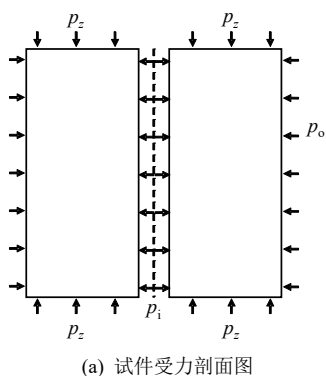


图 3 试件受力状态

Fig.3 Stress state of the specimen

根据弹性力学, 圆筒的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 仅为半径 r 的函数, 其关系表达式为 Lamé 公式:

$$\sigma_r = \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{R_o^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{R_o^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (2)$$

此外, 根据本文试验条件可知, 试验过程中试件的轴向将受到约束, 即轴向应变 $\varepsilon_z = 0$, 同时, 垂直于轴线方向的横截面变形后仍保持为平面, 轴向应力 σ_z 均匀分布, 筒体只产生径向位移 u_r 。因此, 根据荷载形式轴向应力的表达式应为

$$\sigma_z = \frac{p_z}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (3)$$

根据试件的受力情况, 本文松弛过程中仅监测轴向力的松弛情况。

3 试验结果与分析

3.1 强度测试结果

强度结果如表 2 所示。分析表 2 可知, 增加恒定气压作用后, 相同围压下岩石的抗压强度下降,

施加的恒定气压越高, 岩石的抗压强度越低, 可知气压对盐岩强度的影响是负相关的, 且气压由 3 MPa 升至 5 MPa 时比 1 MPa 升至 3 MPa 时岩石强度降低更为明显。

表 2 盐岩基础力学试验结果

Table 2 Experimental results of salt rock foundation mechanics

启动应力基准	围压 / MPa	气压 / MPa	抗压强度 / MPa
6-0	6	0	94.64
6-1	6	1	85.39
6-3	6	3	72.70
6-5	6	5	50.85

3.2 恒定气压下应力松弛试验结果分析

本文将加载至初始启动应力的时刻记为 $t = 0$, 记录松弛开始后盐岩试样轴向力的变化情况。经过降噪平滑处理后获得了无气压和 1 MPa 恒定气压下盐岩试样应力松弛曲线, 如图 4 所示。图 5 则为相同启动轴向应力水平, 不同恒定气压条件下盐岩试样松弛曲线对比图。

从应力松弛曲线图可以看出不同松弛试验条件下盐岩试样的应力变化轨迹、曲线形态和走势相似, 说明应力松弛的启动应力水平和气压的改变不会改变盐岩应力松弛的宏观规律: 在加载到启动应力开始松弛后, 不同气压条件下的岩石试样应力在初始较短时间内发生快速衰减, 随后随着时间的增长, 应力衰减速度持续变慢并渐渐趋于稳定, 最终应力以较小的速度下降。根据盐岩的应力松弛规律可将盐岩应力松弛划分为快速松弛、减速(衰减)松弛及稳定松弛 3 个阶段。对于盐穴储气库而言, 在修建储气库时, 围岩将会经历快速松弛和减速松弛阶段, 对于这两个阶段的控制将决定储库的修建效果。而盐穴储库的运营阶段则处于稳定松弛阶段, 因此为保证盐穴储库的安全, 应加强气压-应力耦合作用对盐岩应力稳定松弛阶段的影响研究。

3.2.1 应力松弛量

定义应力松弛量 $\Delta\sigma$ 为

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_t \quad (4)$$

式中: σ_0 为初始应力, 即应力松弛试验的启动应力; σ_t 为剩余应力, 即松弛时间为 t 时残余的应力。

应力松弛量用以表征盐岩的应力衰减特征, 应力松弛量越大表明岩石应力衰减的越多, 衰减幅度越大。

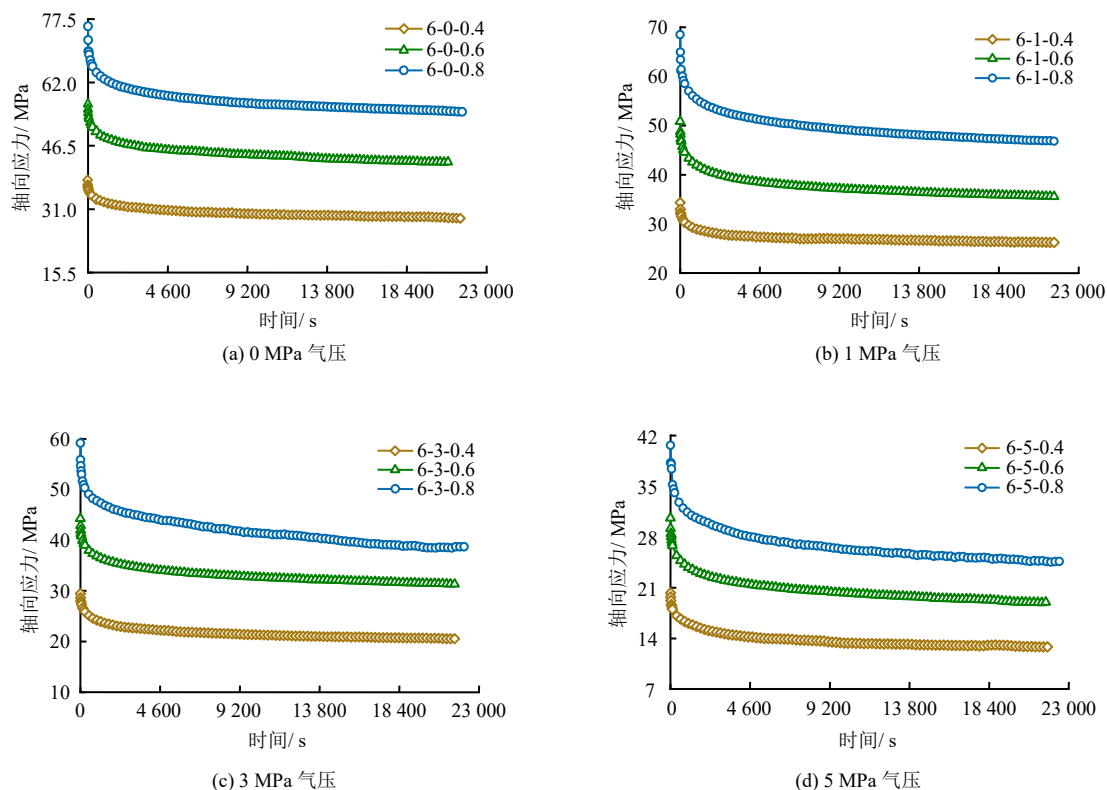


图4 不同气压下盐岩试件应力松弛曲线

Fig.4 Stress relaxation curves of salt rock specimens under different air pressures

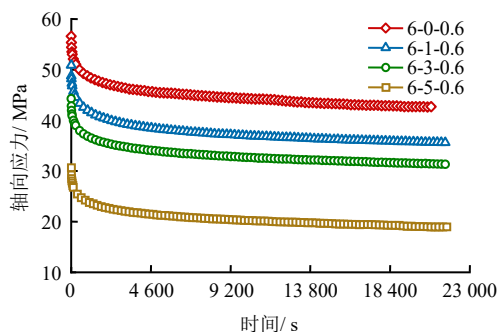
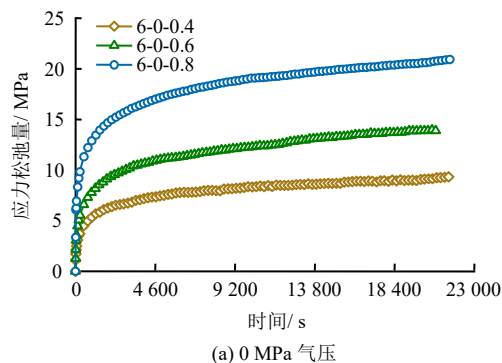


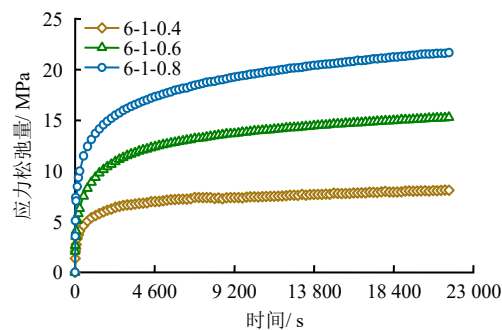
图5 启动轴向应力水平为0.6时恒定气压下盐岩应力松弛曲线

Fig.5 Stress relaxation curves of salt rock under constant air pressure when initial axial stress level is 0.6

图6为不同恒定气压下盐岩应力松弛量与时间的关系曲线。从图中可以看出,各条件下应力变化趋势相同,启动应力水平越大,岩石在快速松弛阶段产生的应力松弛量越大,但减速松弛阶段的应力松弛量始终占总应力松弛量的50%左右。而启动应力水平越高,相同时间内稳定松弛阶段的松弛量越大。此外,从图中可以看出,启动应力越大,应力的快速松弛阶段和减速松弛阶段持续时间越长,即启动应力越大,岩样进入减速松弛阶段的时间越晚,达到应力稳定松弛阶段所花费的时间越长。



(a) 0 MPa 气压



(b) 1 MPa 气压

图6 应力松弛量与时间关系

Fig.6 Relation between stress relaxation amount and time

图7为总应力松弛量与启动应力关系图,从图中可以看出,应力松弛稳定后的应力松弛量与启动

应力水平呈线性正相关关系, 同一围压和气压条件下, 启动轴向应力越高, 松弛稳定后的岩石试样应力松弛量越大。此外, 如图 7 所示曲线随着气压的增大向左偏移, 通入 3 MPa 气压, 启动轴向应力为 29.45 MPa 条件下试件的应力松弛量比 5 MPa 气压, 启动轴向应力为 30.63 MPa 条件下试件的应力松弛量小。由此可知在启动轴向应力相同的条件下, 通入气体的气压越高, 最终的应力松弛量也越大。这主要可能是由于在加载轴向应力的过程中, 盐岩会产生一定损伤和微裂纹, 此时气体将进入裂纹, 同时在“楔效应”^[46]的影响下加速裂纹的发展, 增强对岩石的损伤破坏, 气体压力越大, 造成的损伤越大。因此, 在相同的启动应力下, 气压越高对岩石内部造成的破坏将越强, 应力松弛时岩石产生的微裂隙更多, 裂隙扩展程度更大, 耗散的能量多, 导致应力松弛量更大。

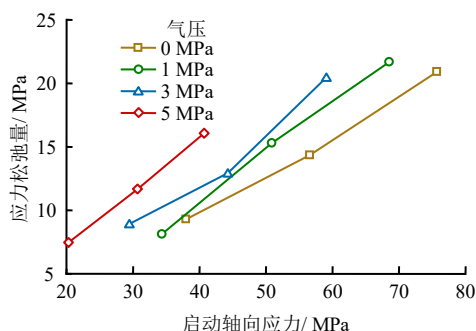


图 7 启动应力与应力松弛量关系

Fig.7 Relationship between initial stress and stress relaxation

3.2.2 应力松弛度

定义应力松弛度 λ 为

$$\lambda = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \quad (5)$$

应力松弛度用以表明岩石应力损失的程度, 应力损失度越大表明岩石应力损失越严重, 受到的破坏越大。

表 3 为各试验条件下岩石试样松弛稳定后的应力松弛度, 从表中可以看出盐岩的应力松弛度为 0.2~0.4。分析可知, 在围压和气压相同的条件下, 启动轴向应力越高, 松弛稳定后的应力松弛度越大, 即应力损失越严重。此外, 未通气压, 启动轴向应力为 37.98 MPa 时岩样的应力松弛度为 0.244 76, 而通入 5 MPa 气压, 启动轴向应力为 40.67 MPa 时岩样的应力松弛度增大为 0.394 71, 增大了 61%,

这表明气压的存在会促进盐岩的应力松弛效应, 加剧岩石受到的破坏。当恒定气压为 3 MPa、启动轴向应力为 29.45 MPa 时岩样的应力松弛度为 0.302 68, 恒定气压为 5 MPa、启动轴向应力为 30.63 MPa 时岩样的应力松弛度为 0.380 29, 增大了 25.6%, 这说明在启动轴向应力相近时, 气压越高, 应力松弛度越大。同时, 观察表中数据发现在启动轴向应力减小, 气压增大的条件下, 岩样的应力松弛度有所提升, 特别是气压为 5 MPa 时, 所有启动应力条件下的应力松弛度均大于其他气压条件时的应力松弛度值, 这说明增大气压对于盐岩应力松弛的促进效应强于增大启动轴向应力对盐岩应力松弛效应的促进效果。

表 3 松弛稳定后各试件应力松弛度

Table 3 Stress relaxation degree of each specimen after relaxation stability

恒定气压 / MPa	启动应力 水平	启动应力 / MPa	应力松弛量 / MPa	应力松弛度
0	0.4	37.98	9.30	0.244 76
	0.6	56.58	14.36	0.253 84
	0.8	75.72	20.91	0.276 23
1	0.4	34.32	8.10	0.236 14
	0.6	50.85	15.28	0.300 41
	0.8	68.49	21.67	0.316 38
3	0.4	29.45	8.91	0.302 68
	0.6	44.24	12.92	0.292 02
	0.8	59.08	20.47	0.346 40
5	0.4	20.26	7.45	0.367 76
	0.6	30.63	11.65	0.380 29
	0.8	40.67	16.05	0.394 71

3.2.3 应力松弛速度

定义应力松弛速度 v 为

$$v = \frac{\Delta\sigma}{\Delta t} \quad (6)$$

应力松弛速度 v 表征应力松弛过程中应力跌落的剧烈程度, v 越大表明应力跌落越剧烈。通过该式计算出应力松弛速度, 并作应力松弛速度曲线图, 如图 8 所示。

可以从图 8 中看出, 不同应力水平和不同气压条件下的应力松弛速度随时间变化的曲线形态大致相同, 均呈现随时间增加松弛速度非线性减小并趋向于稳定的现象。岩石试件的松弛速度在松弛开始后的 60 s 内迅速降低, 以围压 6 MPa, 气压 3 MPa 时的试件为例, 与进入松弛状态后的初始松弛速度相比, 松弛进行 60 s 后不同应力水平下松弛速度降低了 78.6%~89.3%。观察局部放大图可以发现, 在

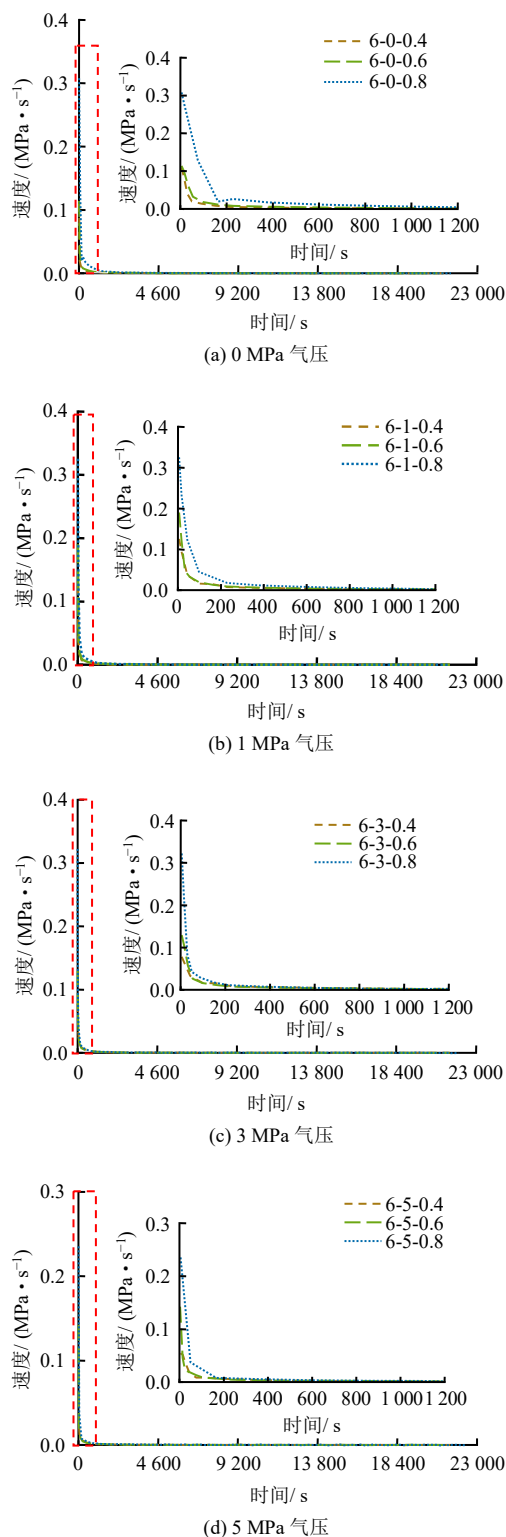


图8 应力松弛速度

Fig.8 Velocity variation of stress relaxation

围压和气压相同的条件下,增大启动轴向应力会增大应力松弛初速度,稳定松弛阶段的松弛速率更大。同时,快速松弛和减速松弛阶段持续时间变长,快速松弛阶段的应力松弛量变大,进入减速松弛阶段和稳定松弛阶段的时间变晚。此外,对比相近轴向启动应力,不同气压条件下应力松弛曲线(如曲线

6-3-0.4与6-5-0.6)可以发现,当启动应力相近时,气压增大后,岩样稳定松弛阶段的松弛速度也更大,这也说明了气压对于盐岩松弛的促进作用。

为探究气压对应力松弛初速度的影响,做出应力松弛初速度与初始轴向应力关系点图,并简单进行线性拟合,如图9所示。由图可见,拟合曲线的斜率逐渐增大,表明气压越大,增加相同应力水平的应力松弛启动应力,应力松弛初速度增加的幅度更大。究其原因,气压越高在加载过程中对岩石微裂纹的产生和发展促进效果越强,导致岩石内部产生越多的微裂隙,由此造成岩石强度下降,在松弛开始后,微裂隙快速扩展,能量快速耗散,应力急剧下降。可以得出气压越大,岩石输入的能量越多,能量初始释放速度越大,应力松弛初速度越大,松弛过程中对岩石的破坏越剧烈。

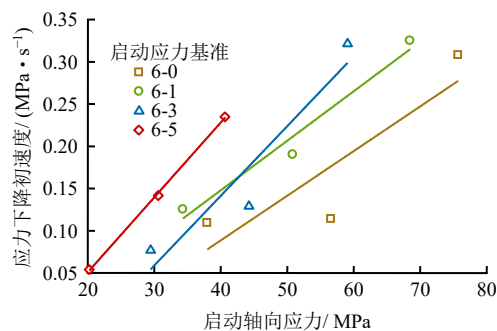


图9 应力松弛初速度与启动轴向应力关系

Fig.9 Relationship between initial velocity of stress relaxation and initiating axial stresses

3.3 循环气压下应力松弛试验结果分析

根据循环气压应力松弛试验数据绘制循环气压下盐岩试件应力松弛曲线,如图10、11所示。

从图10(a)和图11(a)中可知,循环气压并未改变岩石应力松弛整体趋势,在循环气压的影响下岩石在应力松弛过程中的应力变化依然可被分为快速松弛、减速松弛和稳定松弛3个阶段:在初始较短时间内迅速降低,随后进入减速下降阶段,最终轴向应力趋于稳定。然而,如局部放大图所示,循环气压下盐岩试样的应力松弛曲线与恒定气压下的应力松弛曲线有一定区别,即循环气压下盐岩的应力松弛过程中应力随气压的循环增减而规律波动性发展(循环性松弛)。此外,仔细观察可以发现在松弛最初时,气压增加只会减少应力的松弛量,但应力仍在降低,而随着松弛的逐渐发展,气压的增加会使应力值增加,且增长的量逐渐变大并随着松弛的稳定趋于稳定。与气压增加时应力的变化趋势相反,气

压降低时, 对应的应力松弛量从松弛初始阶段的较大值逐渐减小并随松弛的稳定趋于稳定。

由于盐岩试件通孔结构的存在, 气压在试件内部循环时不仅会作用于岩石试件, 还会对轴向压头产生一定作用力。在松弛初始阶段, 盐岩在加载过程中积累的能量会快速释放, 产生大量微裂纹和孔隙, 气压增加会作用于轴向压头产生一定的力, 但无法完全抵消掉盐岩损伤释放能量而降低的应力量, 因此在快速松弛阶段气压虽增加, 应力仍会降低。当积累的能量逐渐释放, 松弛减缓, 气压对轴向压头的作用力逐渐明显, 因此推测, 松弛稳定后应力呈循环下降的部分原因可能是气压循环作用于轴向压头。

为进一步分析循环气压对盐岩应力松弛的影响, 将同一应力水平循环气压下应力松弛试验结果与恒定气压下应力松弛试验结果进行对比, 如图 12 所示。在同一应力水平下, 循环气压应力松弛试验

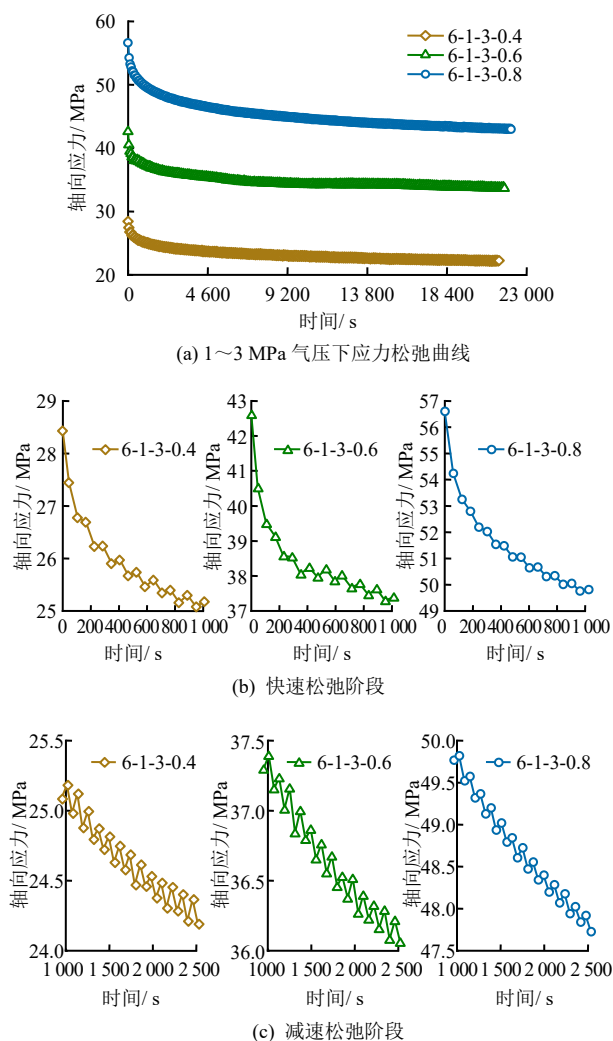
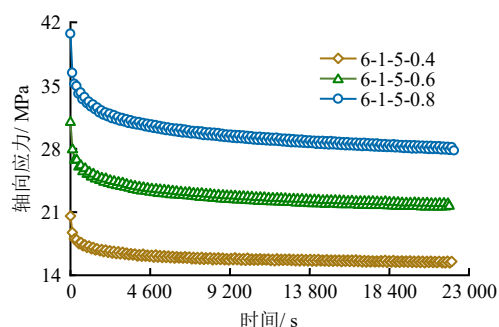
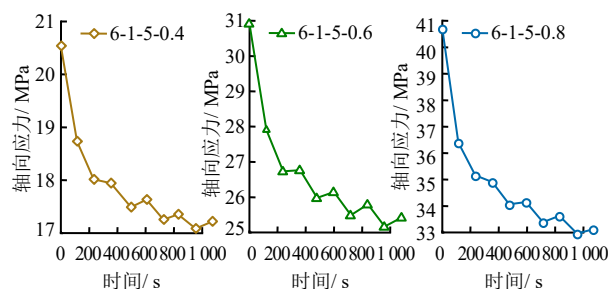


图 10 1~3 MPa 循环气压下应力松弛曲线

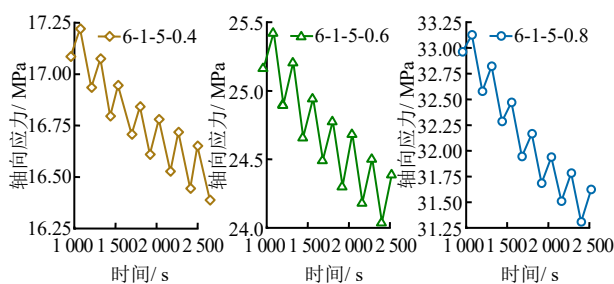
Fig.10 Stress relaxation curves under 1-3 MPa cyclic air pressure



(a) 1~5 MPa 气压下应力松弛曲线



(b) 快速松弛阶段



(c) 减速松弛阶段

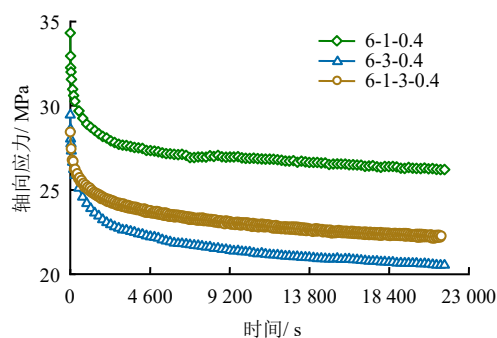
图 11 1~5 MPa 循环气压下应力松弛曲线

Fig.11 Stress relaxation curves under 1-5 MPa cyclic air pressure

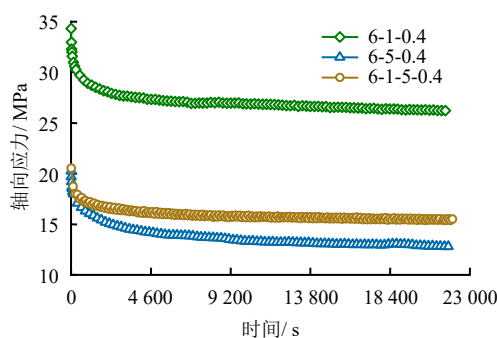
启动应力虽与气压上限相对应的恒定气压应力松弛试验相近, 但其应力松弛曲线却处于恒定气压应力松弛曲线的上方, 循环气压下应力松弛稳定后的轴向应力高于恒定气压应力松弛试验结果。此外, 循环气压下的应力松弛曲线形态和走势与气压下限相对应的恒定气压下应力松弛曲线形态更接近, 由此可见, 循环气压下的应力松弛曲线受气压上限和气压下限相对应的恒定气压下的应力松弛曲线约束。

3.3.1 应力松弛量

根据前文对应力松弛量的定义, 计算循环气压下岩石达到松弛稳定状态后的应力松弛量, 应力松弛量与启动轴向应力关系如图 13(a)、13(b)、13(c) 所示。从图中可知循环气压下应力松弛量的变化趋势仍遵循启动应力水平越高, 应力松弛量越大的规律, 且循环气压下应力松弛量与启动应力的函数关



(a) 1~3 MPa 气压



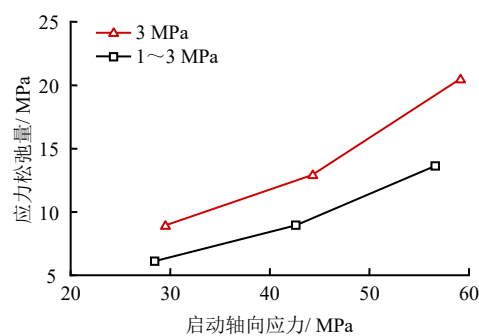
(b) 1~5 MPa 气压

图 12 应力松弛特征对比
Fig.12 Comparison of stress relaxation characteristics

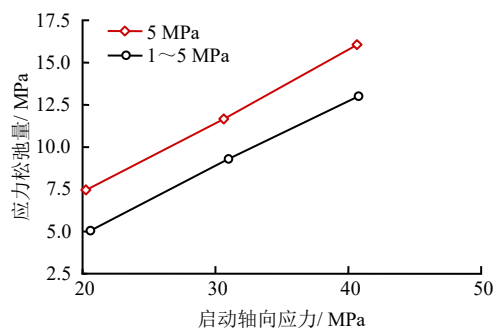
系和循环气压上限对应的恒定气压下应力松弛量与启动应力的函数关系相似。然而在相同的启动应力条件下,循环气压下的应力松弛量低于上限气压对应的恒定气压下的应力松弛量,推测这是由于在循环气压下的应力松弛试验有较大部分时间气压低于上限压力,由此可以推论气压对岩石应力松弛效应的增强效果与气压作用于岩石的时间有关,且气压越大对岩石应力松弛的增强效果越明显,即应力松弛量越大。由图 13(c)可知,当启动应力相近时,1~5 MPa 循环气压条件下的应力松弛量高于 1~3 MPa 循环气压下的应力松弛量,这表明在一定条件下,提高循环气压上限,增大循环气压幅值,将增强盐岩的应力松弛效应,提高应力松弛量。

3.3.2 应力松弛度

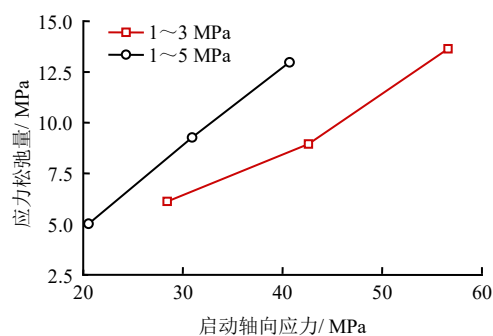
根据循环气压应力松弛度曲线可知(见图 13(d)),循环气压下盐岩的应力松弛度为 0.2~0.33。从整体趋势看,循环气压条件下盐岩的应力松弛度随着启动应力水平的提高而增大;当启动轴向应力相近时,循环气压的上限增大,应力松弛度也会增大,表明了高压对于盐岩应力松弛效应具有促进作用,同时循环气压的上限和幅值越大,促进效果越明显。



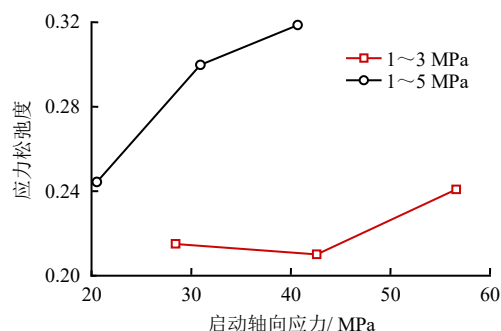
(a) 1~3 MPa



(b) 1~5 MPa



(c) 应力松弛量与启动应力关系



(d) 应力松弛度与启动应力关系

图 13 循环气压下应力松弛结果
Fig.13 Stress relaxation results under cyclic pressure

3.3.3 应力松弛速度

根据应力松弛速率的定义计算出循环气压下的应力松弛速度,结果如图 14 所示。由图可知,循环气压条件下应力松弛速度变化规律与恒定气压条件

下的应力松弛速度变化规律相似: ①两种荷载条件下岩样应力均呈现出在较短时间内先快速降低, 随后随着时间的增加, 松弛速度逐渐变缓最终趋向于 0 的现象; ②初始松弛速度和稳定阶段的松弛速度均随应力水平的增大而增大。同时, 对比两张局部放大图可以发现, 增大气压上限后, 试样减速松弛阶段时间变短, 更快进入稳定松弛阶段, 这表明增大气压不仅会促使盐岩的松弛量和松弛度增加, 也会促使盐岩松弛更快进入稳定阶段。

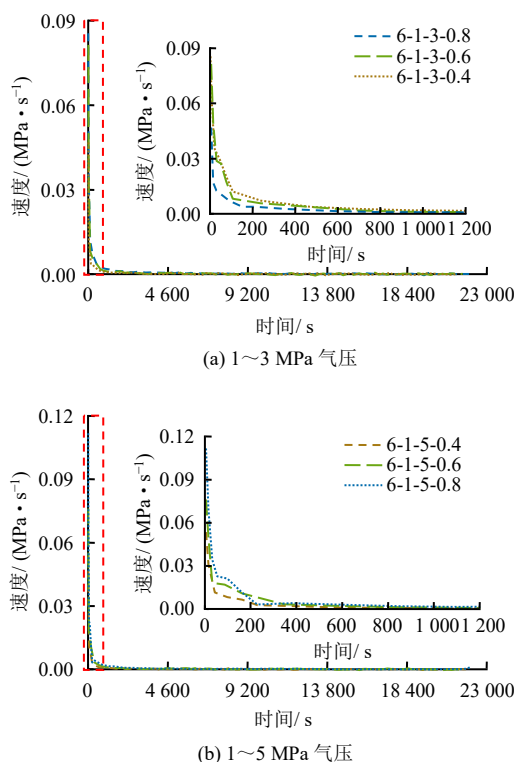


图 14 循环气压下应力松弛速度

Fig.14 Stress relaxation velocity under cyclic pressure

4 松弛后盐岩细观结构分析

如图 15 所示, 试验前盐岩试件的颜色为淡橙色, 透光性较好, 且形状匀称。而试验结束后的盐岩试件颜色变白, 透光性降低, 试件中部可以观察到一定的膨胀变形, 但时间整体并无明显损伤和裂纹。为探究气压-应力耦合作用下盐岩的应力松弛损伤情况和机制, 将进行松弛试验后的试件切片后利用环境扫描技术在接近自然的状态下观察盐岩的细观结构。

图 16 为切片盐岩样本的环境扫描电镜 (environmental scanning electron microscopy, ESEM) 图像, 图像按照放大倍数从小到大排列, 其中图 16(a)、16(b) 为较小放大倍数时的试件细观结构图, 从图中可以明显看到松弛损伤后的试件产生了裂纹以及晶

粒碎屑。从图 16(c) 和 16(d) 中可以观察到独立孔隙、晶内裂纹、沿晶裂纹以及穿晶裂纹的存在。而在进一步放大镜头倍数后在另一片区域上发现了多个大小不等的孔隙的存在, 如图 16(e)、16(f) 所示。由此可以推测气压-应力耦合作用下, 盐岩内部的损伤将会先初步生成较多独立的孔隙, 随着损伤的发展, 孔隙逐渐融合贯通形成微裂纹和晶内裂纹, 随着裂纹的逐渐扩展贯通进而形成较大的裂纹并发生断裂, 产生塑性损伤。在盐岩裂纹的形成和发展过程中, 气压的存在可能还会导致发生“楔效应” [46], 进而促进微裂纹的损伤发展, 因此气压-应力耦合作用下盐岩的应力松弛效应较无气压存在时更强, 松弛程度更大。

5 气压-应力耦合作用下松弛本构模型研究

目前学界对于流变本构模型的研究主要基于黏弹塑性理论, 即根据岩石的试验表现特征将黏性、弹性和塑性基本元件通过串联或并联方式组合成模型。在众多常用的模型中, 广义 Maxwell 本构模型由多个 Maxwell 模型并联而成, 结构简单却可较好地描述岩石的流变性能, 受到部分学者青睐。然而无论多少个模型并联, 其构成的模型本构关系始终为线性的, 无法反映岩石的非线性流变特性, 因此, 本文基于二单元广义 Maxwell 本构模型 (见图 17), 结合试验获得的气压-应力耦合作用下盐岩的应力松弛特性研究盐岩非线性应力松弛模型 [37]。

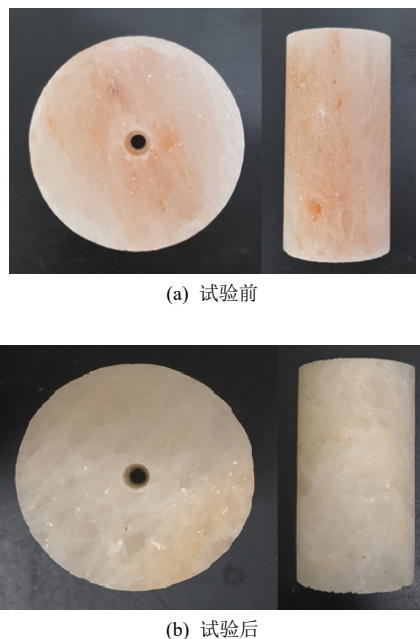


图 15 试验前后试件对比图

Fig.15 Comparison of specimens before and after the test

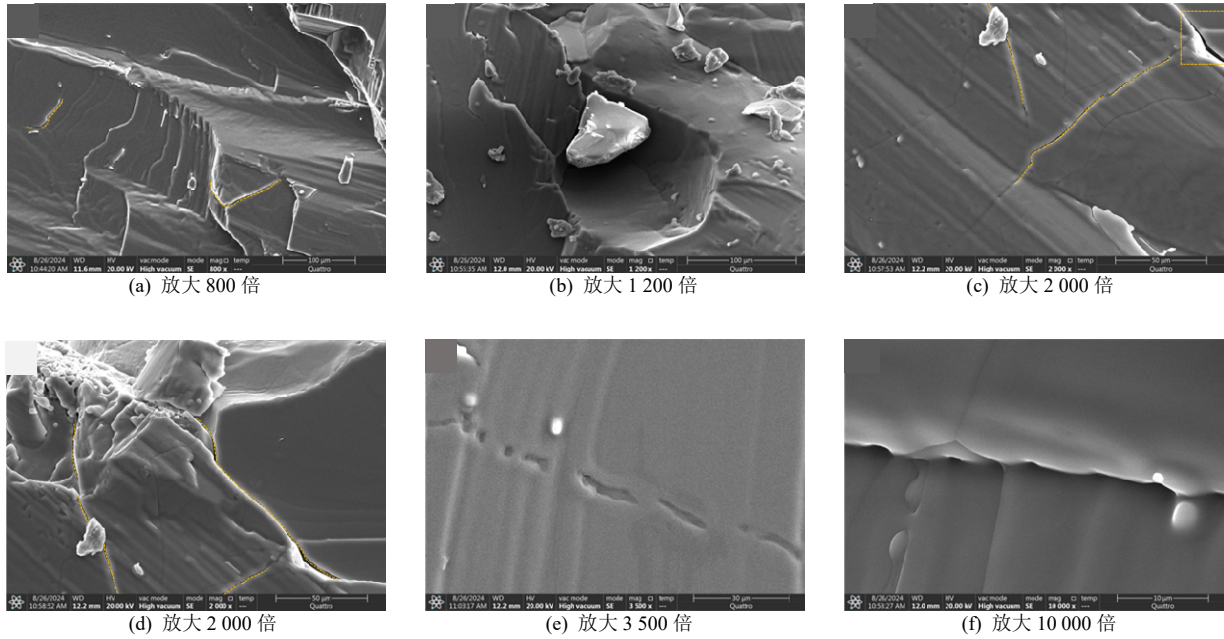


图 16 松弛后盐岩试件 ESEM 图像

Fig.16 ESEM images of salt rock specimen after relaxation

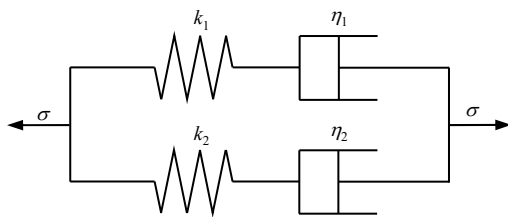


图 17 二单元广义 Maxwell 本构模型

Fig.17 Two-element generalized Maxwell constitutive model

5.1 二单元广义 Maxwell 模型

二单元广义 Maxwell 模型由两个独立 Maxwell 模型并联而成，其本构方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{\sigma}_1}{k_1} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} &= \dot{\varepsilon}_1 \\ \frac{\dot{\sigma}_2}{k_2} + \frac{\sigma_2}{\eta_2} &= \dot{\varepsilon}_2 \\ \dot{\varepsilon}_1 &= \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma &= \sigma_1 + \sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： σ 为总应力； σ_1 和 σ_2 分别为各并联部分受力； $\dot{\varepsilon}_1$ 和 $\dot{\varepsilon}_2$ 分别为各并联部分应变的一阶导数； k_1 和 k_2 为弹性系数； η_1 和 η_2 为黏滞系数。

由于松弛过程中，岩样的轴向应变保持不变，则 $\dot{\varepsilon}_1$ 和 $\dot{\varepsilon}_2$ 恒为 0，基于此，对本构方程进行求解可得一维二单元广义 Maxwell 本构模型的松弛方程为

$$\sigma = \varepsilon_0 \left(k_1 e^{-\frac{k_1 t}{\eta_1}} + k_2 e^{-\frac{k_2 t}{\eta_2}} \right) \quad (8)$$

推广式 (8) 可得三维应力状态下的松弛方程为

$$\mathbf{S}_{ij} = 2(\mathbf{e}_{ij})_0 \left(G_1 e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} + G_2 e^{-\frac{G_2 t}{\eta_2}} \right) \quad (9)$$

式中： $\mathbf{S}_{ij}$ 、 $\mathbf{e}_{ij}$ 分别为三维应力状态下岩体内部的偏应力张量与偏应变张量； $(\mathbf{e}_{ij})_0$ 为 $\mathbf{e}_{ij}$ 的初始值； G_1 、 G_2 为弹性模量。

5.2 非线性应力松弛模型构建

二单元广义 Maxwell 应力松弛模型参数中，弹性系数表示岩石的瞬时弹性力学特征，而黏滞系数则表示岩石的黏性力学特性随时间的变化特征。因此，依据模型参数的物理意义，在改进模型中考虑黏滞系数的时间相关性。此外，试验结果表明盐岩松弛将受气压和应力影响，因此，改进模型也应考虑气压因素和应力因素对盐岩应力松弛的影响。利用式 (9) 对试验数据进行拟合，经过分析拟合结果也发现模型中的黏性元件的黏滞系数并非保持不变，而是应力、气压与时间的函数。

其中，黏滞系数与时间满足以下关系：

$$\eta(t) = \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t} + m} \quad (10)$$

黏滞系数与应力的关系函数为

$$\eta(\sigma) = \sigma_0 (a + b e^{\frac{\sigma}{c}}) \quad (11)$$

式中： σ_0 为初始轴向应力； a 、 b 、 c 为参数。

黏滞系数与气压的关系函数为

$$\eta(\sigma) = (\sigma_3 - p) (a + b e^{\frac{p}{c}}) \quad (12)$$

式中： σ_3 为围压； p 为气压。

将黏滞系数与应力、气压和时间的关系表达式（式（10）～（12））结合，即可推出改进后的非线性松弛模型方程：

$$\left. \begin{aligned} S_{ij} &= 2(e_{ij})_0 \left(G_1 e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1(\sigma, p, t)}} + G_2 e^{-\frac{G_2 t}{\eta_2(\sigma, p, t)}} \right) \\ \eta_1(\sigma, p, t) &= \sigma_0(\sigma_3 - p) \left(a_1 + b_1 e^{\frac{\sigma_0 + p}{c_1}} \right) \left(\frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t} + m_1} \right) \\ \eta_2(\sigma, p, t) &= \sigma_0(\sigma_3 - p) \left(a_2 + b_2 e^{\frac{\sigma_0 + p}{c_2}} \right) \left(\frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t} + m_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 m_1 、 m_2 为模型参数。

5.3 模型验证

为验证非线性松弛模型的效果，在 Origin 中创建新函数，构建本文提出的松弛方程，然后采用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法对试验数据进行非线性拟合，识别参数并验证模型，最终得出改进二单元广义松弛方程前后的结果及拟合相关系数 R^2 。图 18 分别为改进前后松弛模型对于无气压和有气压情况下盐岩应力松弛的拟合效果，表 4 为拟合结果的 R^2 值。

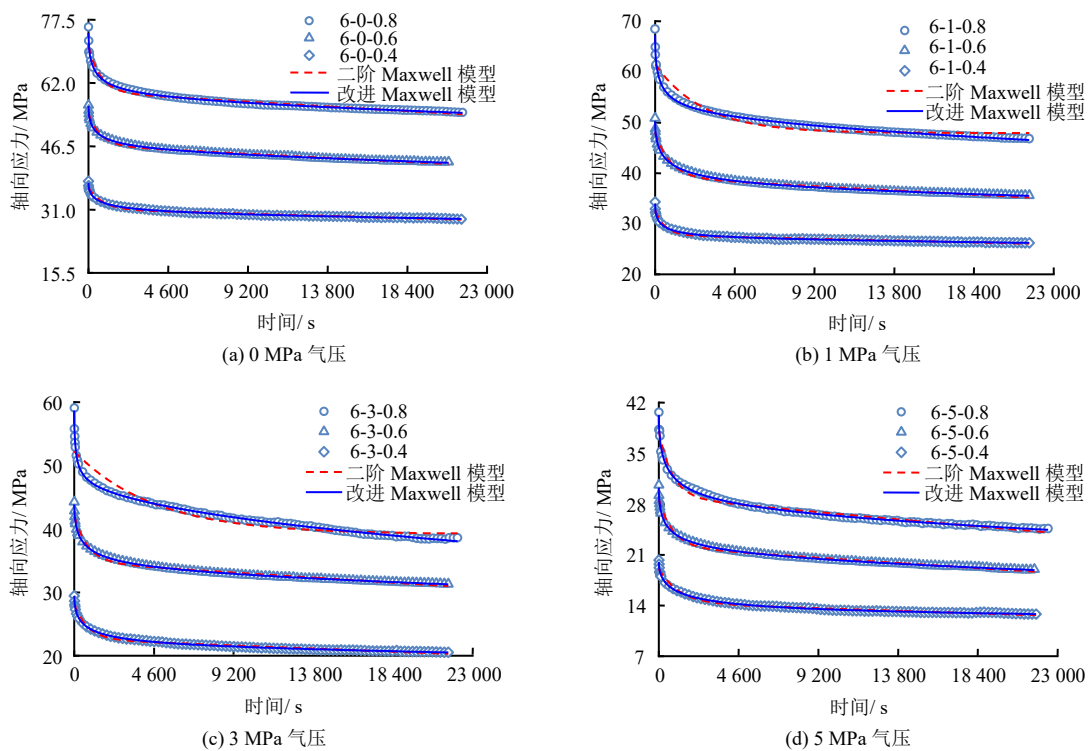


图 18 松弛模型拟合结果
Fig.18 Fitting results of the relaxed model

表 4 模型拟合效果
Table 4 Model fitting effect

气压 / MPa	启动轴向应力 / MPa	R^2	
		二单元 Maxwell 松弛模型	改进二单元 Maxwell 松弛模型
0	37.98	0.978 01	0.998 06
	56.58	0.983 57	0.999 05
	75.72	0.967 58	0.995 16
	34.32	0.972 64	0.997 15
1	50.85	0.980 19	0.999 13
	68.49	0.921 82	0.995 96
	29.45	0.983 10	0.999 55
	44.24	0.979 91	0.999 08
3	59.08	0.921 81	0.998 6
	20.26	0.981 25	0.997 79
	30.63	0.982 94	0.999 16
	40.67	0.977 74	0.997 42

从拟合结果图以及 R^2 值可以看出二单元广义 Maxwell 松弛模型对于盐岩松弛的快速松弛和减速松弛阶段拟合效果较差，特别是在高压、高启动应力条件下时，模型的拟合结果偏差极大，这是由于该模型属于线性模型，无法关联到气压和启动应力等影响因素对岩石松弛特性的影响，也就无法准确描述盐岩的非线性松弛特性。而在将模型中的定常黏滞系数代替为非定常系数，即改进模型后，模型拟合效果明显提升，基本能很好地吻合试验曲线，相关系数 R^2 均在 0.99 以上，甚至大多数都在 0.997 以上。说明改进后的松弛模型能在考虑到应力和气压等综合因素影响的同时很好地反映盐岩的非线性

松弛特性。

6 结 论

(1) 气压的作用并不会改变盐岩松弛的宏观规律, 其松弛仍可分为快速松弛、减速松弛、稳定松弛 3 个阶段。

(2) 盐岩的松弛特性与初始启动应力密切相关。应力松弛过程中, 在围压和气压相同的条件下, 启动轴向应力越高, 其初始应力松弛速率、总的应力松弛量、应力松弛度越大。同时, 启动轴向应力增大, 岩石快速松弛和减速松弛阶段持续时间增长, 松弛进入稳定状态所耗费的时间增加。

(3) 气压作用下盐岩的抗压强度明显下降且与气压的增长呈非线性关系, 且气压的存在对于盐岩的松弛特性具有促进效应。相同的围压和启动压力下, 气压的存在使得盐岩的总应力松弛量和应力松弛度都更加大, 此外, 增大气压比增大初始启动应力对于盐岩应力松弛效应的促进效果更大。

(4) 相较于恒定气压下盐岩的应力松弛规律, 循环气压下盐岩的应力松弛趋势无太大变化, 仍分为 3 个阶段。试验表明, 循环气压上限越高, 幅值越大, 试件初始应力松弛速率和应力松弛量越大, 其松弛曲线随气压的循环也呈现循环下降的现象。此外, 循环气压下盐岩的应力松弛曲线受控于其循环气压上下限对应的恒定气压条件下的应力松弛曲线。

(5) 微裂纹损伤是气压-应力耦合作用下盐岩应力松弛损伤的主导。气压会在“楔效应”的影响下对盐岩应力松弛的损伤产生促进作用, 损伤后的盐岩细观结构包括晶内裂纹、沿晶裂纹、穿晶裂纹以及晶粒碎屑。

(6) 通过研究二单元广义 Maxwell 松弛模型中黏滞系数与应力、气压和时间的关系, 将该松弛模型改进为非线性模型后, 能很好地描述盐岩在气压-应力耦合作用下的应力松弛特性, 拟合效果良好。

参 考 文 献

- [1] AMROUCHE S O, REKIOUA D, REKIOUA T, et al. Overview of energy storage in renewable energy systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(45): 20914-20927.
- [2] SHIVASHANKAR S, MEKHILEF S, MOKHLIS H, et al. Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources-a review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 1170-1184.
- [3] LI J D, CHEN S J, WU Y Q, et al. How to make better use of intermittent and variable energy? a review of wind and photovoltaic power consumption in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110626.
- [4] GUR T M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(10): 2696-2767.
- [5] HAMEER S, VAN NIEKERK J L. A review of large-scale electrical energy storage[J]. *International Journal of Energy Research*, 2015, 39(9): 1179-1195.
- [6] HEINEMANN N, ALCALDE J, MIOCIC J M, et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media-the scientific challenges[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(2): 853-864.
- [7] ANDERSSON J, GRONKVIST S. Large-scale storage of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(23): 11901-11919.
- [8] MUTHUKUMAR P, KUMAR A, AFZAL M. Review on large-scale hydrogen storage systems for better sustainability[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(85): 33223-33259.
- [9] XIE Y C, WU X N, HOU Z M, et al. Gleaning insights from german energy transition and large-scale underground energy storage for China's carbon neutrality[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(5): 529-553.
- [10] TIAN H M, XU Z C, CHEN W Z, et al. Strength degradation of argillaceous sandstone induced by relaxation behaviour[J]. *Materials Letters*, 2024, 356: 135592.
- [11] 许江, 马天宇, 大久保诚介, 等. 不同围压下岩石广义应力松弛特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增刊 2): 57-66.
XU Jiang, MA Tian-yu, OKUBO Seisuke, et al. Experimental study on generalized stress relaxation characteristics of rocks under different confining pressures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Suppl.2): 57-66.
- [12] FAN J Y, JIANG D Y, LIU W, et al. Discontinuous fatigue of salt rock with low-stress intervals[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 115(3): 77-86.
- [13] CHEN C C, XIE H P, XU J, et al. 3D digital-image correlation insight into generalized relaxation behavior of sandstone under stress and pore pressure coupling[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*

- Engineering**, 2024, 16(7): 2516-2536.
- [14] CHEN X, HE C, XU G W, et al. The creep behaviors of red sandstone in northern Yunnan and its fractional order damage modelling considering relaxation time effect[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2024, 83(8): 313.
- [15] 刘啸, 张晓君, 魏金祝, 等. 循环加卸载下直墙拱形巷(隧)道应力松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增加 1): 476-484.
- LIU Xiao, ZHANG Xiao-jun, WEI Jin-zhu, et al. Experimental study on the stress relaxation characteristics in straight-wall-top-arch roadway (tunnel) under cyclic loading and unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(Suppl.1): 476-484.
- [16] MU K, ZHANG M H, YU J. Study on stress relaxation and acoustic emission of fractured rocks with different fissure inclinations[J]. **Case Studies in Construction Materials**, 2024, 20: e02935.
- [17] FAN J Y, LIU W, JIANG D Y, et al. Time interval effect in triaxial discontinuous cyclic compression tests and simulations for the residual stress in rock salt[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(9): 4061-4076.
- [18] WANG M W, XU X Y, LIU Q Y, et al. A nonlinear fractional-order damage model of stress relaxation of net-like red soil[J]. **Scientific Reports**, 2021, 11(1): 22917.
- [19] LI Z Z, SUO J J, FAN J Y, et al. Damage evolution of rock salt under multilevel amplitude creep-fatigue loading with acoustic emission monitoring[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2023, 164(4): 105346.
- [20] ZHANG Q Z, LUO Z J, SHEN D Y, et al. Shear stress relaxation behavior of rock joints considering 3D morphological characteristics[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2023, 82(11): 429.
- [21] 刘志勇, 肖明砾, 谢红强, 等. 基于损伤演化的片岩应力松弛特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 101-107.
- LIU Zhi-yong, XIAO Ming-li, XIE Hong-qiang, et al. Stress relaxation characteristics of schist based on damage evolution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 101-107.
- [22] LIU A, TIAN G H, ZHANG Q Z, et al. Shear relaxation characteristics of rock joints under stepwise loadings[J]. **Comptes Rendus Mecanique**, 2018, 346(12): 1179-1191.
- [23] WANG Z, GU L L, SHEN M R, et al. Shear stress relaxation behavior of rock discontinuities with different joint roughness coefficient and stress histories[J]. **Journal of Structural Geology**, 2019, 126: 272-285.
- [24] ZHANG Q Z, WU C Z, FEI X C, et al. Time-dependent behavior of rock joints considering asperity degradation[J]. **Journal of Structural Geology**, 2019, 121: 1-9.
- [25] YU H C, ZHANG X S, LIU H D, et al. Stress relaxation behavior of silty mudstone considering the effect of confining pressure[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2016, 75(12): 1001.
- [26] 杨春和, 殷建华. 盐岩应力松弛效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 262-265.
- YANG Chun-he, YIN Jian-hua. The investigation of stress relaxation of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 262-265.
- [27] 于怀昌, 董金玉, 刘汉东, 等. 粉砂质泥岩峰前、峰后应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2663-2672.
- YU Huai-chang, DONG Jin-yu, LIU Han-dong, et al. Experimental study on pre-peak and post-peak stress relaxation characteristics of silty mudstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.1): 2663-2672.
- [28] 李帅, 朱万成, 牛雷雷, 等. 动态扰动对应力松弛岩石变形行为影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2795-2804.
- LI Shuai, ZHU Wan-cheng, NIU Lei-lei, et al. Experimental study on influence of dynamic disturbance on deformation behavior of rock under stress relaxation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 2795-2804.
- [29] YU J, ZHU Y L, YAO W, et al. Stress relaxation behaviour of marble under cyclic weak disturbance and confining pressures[J]. **Measurement**, 2021, 182: 109777.
- [30] 赵振华, 张晓君, 李晓程. 含卸压孔硬岩应力松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2192-2199.
- ZHAO Zhen-hua, ZHANG Xiao-jun, LI Xiao-cheng, et al. Experimental study of stress relaxation characteristics of hard rocks with pressure relief hole[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(6): 2192-2199.
- [31] 冯聪, 余健, 徐云霞, 等. 饱和灰砂岩水-力耦合松弛特性试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(8): 154-159.
- FENG Cong, YU Jian, XU Yun-xia, et al. Experimental study on hydro-mechanical coupling relaxation characteristics of saturated sandstone[J]. **Industrial Construction**, 2021, 51(8): 154-159.
- [32] 李昂, 俞缙, 刘士雨, 等. 水-力耦合作用下砂岩松弛特性试验与本构模型[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 469-476.
- LI Ang, YU Jin, LIU Shi-yu, et al. Experiment and

- constitutive model of relaxation behavior of sandstone under water-force coupling action[J]. **Journal of Huaqiao University (Natural Science)**, 2023, 44(4): 469-476.
- [33] 杨红伟, 许江, 彭守建, 等. 孔隙水压力分级加载砂岩蠕变特性研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(增刊 2): 365-370.
- YANG Hong-wei, XU Jiang, PENG Shou-jian, et al. Study of sandstone creep characteristics under stepwise loading pore water pressures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.2): 365-370.
- [34] 陈灿灿, 彭守建, 许江, 等. 水压-应力耦合作用下砂岩应力松弛特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2022, 41(6): 1193-1207.
- CHEN Can-can, PENG Shou-jian, XU Jiang, et al. Experimental study of stress relaxation characteristics of sandstone under stress and pore-water pressure coupling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(6): 1193-1207.
- [35] 郑志明, 杨逾, 潘铖. 水作用下煤柱体应力松弛特性的试验研究[J]. **非金属矿**, 2018, 41(4): 37-39.
- ZHENG Zhi-ming, YANG Yu, PAN Cheng, et al. Experimental study on stress relaxation characteristics of coal pillar under water action[J]. **Non-Metallic Mines**, 2018, 41(4): 37-39.
- [36] 于怀昌, 赵阳, 刘汉东, 等. 三轴应力作用下水对岩石应力松弛特性影响作用试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(2): 313-322.
- YU Huai-chang, ZHAO Yang, LIU Han-dong, et al. Experimental study of influence of water on stress relaxation of rock under triaxial stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(2): 313-322.
- [37] 阎岩. 渗流作用下岩石蠕变试验与变参数蠕变方程的研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- YAN Yan. Research on rock creep tests under seepage flow and variable parameters creep equation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [38] 于怀昌, 李亚丽, 刘汉东. 粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛本构模型研究[J]. **煤炭学报**, 2011, 36(8): 1258-1263.
- YU Huai-chang, LI Ya-li, LIU Han-dong, et al. Study of stress relaxation model of silty mudstone under triaxial compression[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(8): 1258-1263.
- [39] 于怀昌, 邹明俊, 刘汉东, 等. 岩石非定常黏弹性应力松弛本构模型研究[J]. **四川大学学报(工程科学版)**, 2015, 47(增刊 2): 54-60.
- YU Huai-chang, ZOU Ming-jun, LIU Han-dong, et al. Study of non-stationary viscoelastic stress relaxation model of rock[J]. **Advanced Engineering Science**, 2015, 47(Suppl.2): 54-60.
- [40] TANG L X, FAN J Y, LI Z Z, et al. A new constitutive model for salt rock under cyclic loadings based on state variables[J]. **Geoenergy Science and Engineering**, 2024, 233(2): 212433.
- [41] 曹平, 郑欣平, 李娜, 等. 深部斜长角闪岩流变试验及模型研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(增刊 1): 3015-3021.
- CAO Ping, ZHENG Xin-ping, LI Na, et al. Experiment and model study of rheological characteristics for deep amphibolite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.1): 3015-3021.
- [42] 周喻, 吴庆良, 杜晓伟, 等. 岩石厚壁圆筒试验破坏的细观力学机制[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(9): 1854-1863.
- ZHOU Yu, WU Qing-liang, DU Xiao-wei, et al. Meso mechanical mechanisms of thick-walled hollow rock cylinder during failure process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(9): 1854-1863.
- [43] 张后全, 刘红岗, 贺永年, 等. 岩石厚壁圆筒三向压缩下的卸荷试验与岩石强度破坏[J]. **北京科技大学学报**, 2011, 33(7): 800-805.
- ZHANG Hou-quan, LIU Hong-gang, HE Yong-nian, et al. Unloading experiment and rock strength failure of rock thick-walled cylinders under triaxial compression[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2011, 33(7): 800-805.
- [44] 薛永明, 戴兵, 陈科旭, 等. 厚壁圆筒花岗岩在动静耦合循环冲击作用下的动态力学特性试验研究[J]. **矿业研究与开发**, 2021, 41(5): 74-79.
- XUE Yong-ming, DAI Bing, CHEN Ke-xu, et al. Experimental study of dynamic mechanical characteristics of thick-walled cylindrical granite under dynamic and static coupled cyclic impact[J]. **Mining Research and Development**, 2021, 41(5): 74-79.
- [45] 连帅龙. 厚壁圆筒花岗岩力学特性研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.
- LIAN Shuai-long. Study on mechanical properties of thick-walled cylinder granite[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019.
- [46] 彭辉华. 盐岩变形显微机制与损伤自愈合研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- PENG Hui-hua. Study on the deformation microstructures and the microscopic damage-healing mechanism of salt rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.