

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1356

循环荷载作用下盐岩微观结构变化及经验疲劳模型

张 强^{1,2}, 王军保^{1,2}, 宋战平^{1,2}, 冯世进³, 张玉伟^{1,2}, 曾 涛^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055;
3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 为研究盐岩在循环荷载作用下的疲劳特性和微观结构变化, 对盐岩试件展开了不同上限应力下的单轴疲劳试验; 同时, 利用 SEM 和 NMR 设备观测了盐岩试验前后的微观结构。结果表明: 循环荷载作用下, 盐岩内部裂纹发育以晶间裂纹的生成为主, 且裂纹数量随上限应力比(上限应力与单轴抗压强度的比值)增大而增加。循环荷载作用后(12 000 次循环), 盐岩内部大孔隙和总孔隙数量增加, 小孔隙数量减少, 且大孔隙和总孔隙增加的数量及小孔隙减少的数量均随上限应力比增大而增加。上限应力比为 0.40 且荷载循环次数 $N \leq 2\,000$ 次时, 盐岩内部小孔隙、大孔隙和总孔隙数量均随荷载循环次数增加而增加; 但小孔隙数量的增长速率大于大孔隙, 此时盐岩孔隙结构变化以小孔隙萌生为主。上限应力比为 0.40 且荷载循环次数 $N > 2\,000$ 次时, 盐岩内部大孔隙和总孔隙数量仍随荷载循环次数增加而增加, 而小孔隙数量不断减少, 此时盐岩孔隙结构变化以大孔隙生成为主。通过求解 S 形函数反函数的方法, 建立了一个形式简单、参数少, 且能够描述盐岩累计不可逆变形发展全过程的经验疲劳模型, 并利用盐岩疲劳试验结果验证了模型的合理性。

关 键 词: 盐岩; 循环荷载; 微观结构; SEM; NMR; 经验疲劳模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 04-0995-14

Microstructure variation and empirical fatigue model of salt rock under cyclic loading

ZHANG Qiang^{1,2}, WANG Jun-bao^{1,2}, SONG Zhan-ping^{1,2}, FENG Shi-jin³,
ZHANG Yu-wei^{1,2}, ZENG Tao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the fatigue properties and microstructure variation of salt rock under cyclic loading, uniaxial fatigue tests under different maximum cycling stresses were carried out on salt rock specimens. Meanwhile, scanning electron microscopy (SEM) and nuclear magnetic resonance (NMR) instruments were utilized to analyze the microstructure variation in salt rock before and after the test. The results indicated that the cracks growth mode in salt rock under cyclic loading is mainly the development of intergranular cracks, and the number of cracks increases with the maximum stress ratio (the ratio of the maximum cycling stress to the uniaxial compressive strength). After cyclic loading (12 000 cycles), the number of macropores and total pores in salt rock both increase, whereas the number of micropores decreases; and with the increase of maximum stress ratio, the increasing number of macropores and total pores and the decreasing number of micropores both increase. When the maximum stress ratio is 0.40 and the cycle number $N \leq 2\,000$, the numbers of micropores, macropores and total pores all increase with cycle number; but the increase rate of micropores is faster than that of macropores, showing that the pore structure variation in salt rock is dominated by the initiation of micropores. When the maximum stress ratio is 0.40 and the cycle number $N > 2\,000$, the number of macropores and total pores still increase with cycle number, whereas the number of micropores decreases, demonstrating that the formation of macropores accounts for the main change of pore structure. By solving the inverse function of S-shaped function, an empirical fatigue model with simpler form and fewer parameters was established, which can describe the whole process of irreversible deformation development of salt rock with a

收稿日期: 2021-08-16

修回日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52178393, No. 52178354); 陕西省住房和城乡建设科技规划项目 (No. 2019-K39); 中国博士后科学基金 (No. 2018M643809XB); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (No. 2019JQ-762); 陕西省创新团队创新能力支撑计划 (No. 2020TD-005)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52178393, 52178354), the Housing and Urban-Rural Construction Science and Technology Planning Project of Shaanxi Province (2019-K39), the China Postdoctoral Science Foundation (2018M643809XB), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2019JQ-762) and the Innovation Capability Support Plan of Shaanxi - Innovation Team (2020TD-005).

第一作者简介: 张强, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学与地下工程等方面的研究工作。E-mail: nndsjyzq@163.com

通讯作者: 王军保, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: xajdwangjunbao@163.com

unified function, and the rationality of the model was verified by the fatigue test results of salt rock.

Keywords: salt rock; cyclic loading; microstructure; SEM; NMR; empirical fatigue model

1 引言

盐岩具有结构致密、渗透性低、力学性质稳定及损伤自愈能力强等诸多优点,被视为建造盐穴地下储气库和压气蓄能电站的理想介质^[1-2]。盐穴地下储气库和压气蓄能电站的运营过程包括注气加压、高压运行、采气降压和低压运行 4 个阶段,如图 1 所示。注气加压阶段,储库内压逐渐增大,洞周围岩的不平衡力逐渐减小;高压运行阶段,储库内压保持在较高的水平且基本不变,洞周围岩不平衡力较小且较为恒定;采气降压阶段,储库内压逐渐减小,洞周围岩不平衡力逐渐增大;低压运行阶段,储库内压保持在较低的水平且基本不变,此时围岩不平衡力较大且较为恒定。由于周期性注采气的特点,盐穴地下储气库和压气蓄能电站长期运营过程中,围岩将承受循环荷载作用^[3]。因此,为保证盐穴地下储气库和压气蓄能电站的长期安全性和稳定性,对盐岩在循环荷载作用下的疲劳特性展开研究是非常重要的^[4-5]。

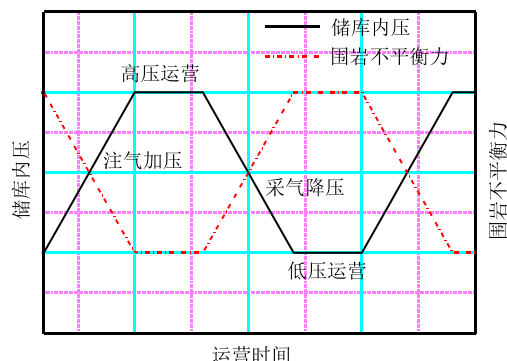


图 1 盐穴储库内压和围岩不平衡力变化规律示意图

Fig.1 Variation of internal pressure and unbalanced force of surrounding rock for salt cavern storage

由于盐岩在天然气等能源地下储存方面占有重要位置,相关学者从不同角度对其疲劳性质展开了研究。马林建等^[6]研究了应力幅值、加载频率、上限和下限应力对盐岩强度、变形和损伤特性的影响。郭印同等^[7]指出,随循环荷载平均应力或上限应力比的提高,盐岩疲劳进程明显缩短,疲劳破坏时产生的总变形大幅度减少。在总结不同温度下盐岩疲劳试验结果的基础上,任松等^[8]探讨了温度对盐岩内部损伤发展及疲劳寿命的影响。Pouya 等^[9]利用夹杂矩阵模型,将微观应力与宏观应力、微观

黏塑性应变和宏观黏塑性应变联系起来,分析了循环荷载对盐岩内部损伤发展的影响。Fan 等^[10]对盐岩展开了含有间歇时间的疲劳试验,并指出随间歇时间延长,盐岩内部损伤逐渐增加,疲劳寿命逐渐缩短。姜德义等^[11]从理论角度解释了盐岩在含有间歇时间的循环荷载作用下的损伤机制,认为 Bauschinger 效应和残余应力是引起盐岩疲劳寿命缩短的主要原因。尽管相关学者对盐岩疲劳性质进行了较多的研究,但多数研究集中在循环荷载对盐岩宏观力学参数(如强度和变形等)的影响,而对其微观结构影响方面的研究相对较少。实际上,盐岩在循环荷载作用下力学性质的劣化是其内部损伤不断累积的宏观体现。因此,从微观角度研究盐岩在循环荷载作用下的内部结构变化,对于正确理解盐岩的疲劳机制具有重要意义^[12-14]。

为定量描述岩石不可逆变形的发展规律,相关学者结合室内疲劳试验和理论推导等方法构建了大量疲劳本构模型。从总体来看,这些模型主要可以分为两类:

(1) 损伤疲劳模型。李树春等^[15]从岩石在循环荷载作用下力学性质劣化的角度出发,结合连续介质损伤力学理论建立了岩石低周疲劳损伤模型。Wang 等^[16]基于盐岩疲劳试验结果和 Manson-Coffin 方程,提出了考虑加载频率和应力幅值影响的盐岩低周损伤模型。Li 等^[17]在分析裂隙岩体残余应变和弹性模量随荷载循环次数变化规律的基础上,从能量耗散的角度出发构建了裂隙岩体的损伤模型。Liu 等^[18]从能量耗散的角度建立了岩石在循环荷载作用下的损伤演化方程,并利用递推方法建立了岩石疲劳损伤本构模型。虽然损伤疲劳本构模型能够有效地反映出岩石在循环荷载作用下的疲劳特性,但选择合理的损伤变量来表征损伤演化过程比较困难^[19]。

(2) 元件组合疲劳模型。由于岩石累计不可逆变形曲线与蠕变曲线之间的相似性,近年来相关学者开始借鉴元件组合蠕变模型的相关成果来构建岩石疲劳本构模型。郭建强等^[20]提出了 3 个疲劳基本单元,并在 Burgers 蠕变模型的基础上提出了反映岩石疲劳变形行为的本构模型。彭述权等^[21]在分析岩石疲劳特征曲线的基础上,提出了节理塑性和黏性疲劳单元,同时结合文献[20]的研究成果,构建了描述节理岩体黏弹塑性疲劳变形行为的本构模型。李永辉等^[22]在提出含有疲劳参数的非线性单元

的基础上, 用其替换 Nishihara 模型中的黏性单元, 构建了描述岩石疲劳变形 3 阶段的改进 Nishihara 模型。唐欣等^[23]利用带有开关功能的村山体代替 Nishihara 模型中的 Kelvin 模型, 同时利用含疲劳参数的非线性黏性单元代替黏塑性体中的线性单元, 构建了反映岩石在循环荷载作用下变形行为的本构模型。Liu 等^[24]在提出三维黏性、弹性和塑性疲劳单元及循环荷载作用下岩石疲劳屈服准则的基础上, 构建了岩石三维黏弹塑性疲劳模型。然而, 当利用元件组合模型来描述岩石疲劳变形时, 需要人为地将原本连续的疲劳变形过程划分为 3 个阶段 (初始、等速和加速阶段), 并用不同函数来描述每个阶段的疲劳变形行为。同时, 基于这种方法建立的岩石疲劳本构模型大多形式复杂、参数较多, 使用不便^[25]。

本文对盐岩开展了不同上限应力 (下限应力和加载频率恒定) 下的室内单轴疲劳试验; 同时, 利用扫描式电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 和核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR) 系统观测了盐岩试验前后的微观结构。基于试验结果, 分析了盐岩微观孔隙结构随上限应力和荷载循环次数的变化规律。在此基础上, 通过求解 S 形函数反函数的方法建立了盐岩的经验疲劳模型, 并利用盐岩疲劳试验结果验证了模型的合理性。

2 盐岩单轴疲劳试验

2.1 试件制备

试验所用岩样取自巴基斯坦某盐矿, 埋深约在 600 m。岩样外观呈浅红色或白色, 主要成分为 NaCl (含量 $\geq 98\%$), 其余成分为 K_2SO_4 、 Na_2SO_4 及泥质不溶物等。由于盐岩遇水易溶解, 故采用干式打磨的方法在干燥环境中将岩样加工成径高比为 1:2 的标准圆柱体试件 (直径 50 mm、高度 100 mm)。此外, 为防止盐岩试件在储存过程中因吸收空气中的水分发生潮解, 用保鲜膜将加工完成后的试件进行包裹, 如图 2 所示。



图 2 盐岩试件
Fig.2 Salt rock specimens

2.2 试验设备

本文目的是研究上限应力对盐岩疲劳特性和微观结构的影响规律。根据该目的, 对盐岩开展了不同上限应力下的室内单轴疲劳试验; 同时, 利用 SEM 和 NMR 设备观测了盐岩疲劳前后的微观结构。本次试验所用主要设备有:

(1) 电液伺服疲劳试验机: 该设备可施加的最大轴向荷载和可测量的最大轴向位移分别 250 kN 和 75 mm, 力和位移测量精度为 $\pm 0.5\%$, 位移分辨率为 0.001 mm; 加载波形包含三角波、方波和正弦波等。

(2) Quanta 200 扫描式电子显微镜: 该设备的最大分辨率为 3.5 nm, 最大有效放大倍数为 1 000 000。

(3) MacroMR 12-150H-I 型核磁共振系统: 该设备磁场强度为 0.3 ± 0.05 T, 磁场均匀度为 35×10^{-6} , 峰值输出大于 300 W, 线性失真度小于 0.5%, 有效样品检测范围为 $\phi 150 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm}$ 。

2.3 试验方案

开展疲劳试验前, 首先对盐岩基本物理力学性质进行了测试, 得到了所用盐岩试件的基本物理力学性质参数, 见表 1。

表 1 盐岩基本物理力学参数
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of salt rock

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2.21	35.18	15.33	0.29

注: 表中数据为平均值。

盐穴地下储气库和压气蓄能电站长期运营过程中, 作用在洞周围岩上的荷载变化波形为梯形波, 见图 1 中虚线。考虑到高压运行和低压运行阶段, 地层不平衡力基本不变, 故这两个阶段围岩仅产生蠕变变形, 而不产生疲劳变形。因此, 本文开展盐岩疲劳试验时, 应力加载波形采用三角波, 如图 3 所示。

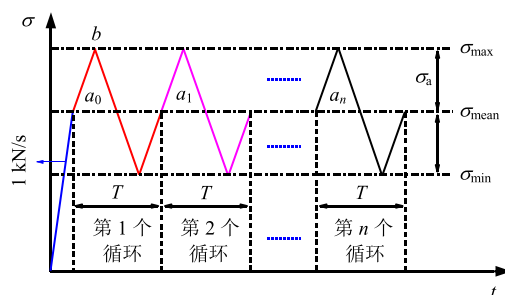


图 3 应力加载波形示意图
Fig.3 Sketch map of stress loading waveform

试验所用岩样的埋深约为 600 m。根据 Hock 和 Brown 的统计规律^[26], 该深度处对应的竖向地应力约为 16.20 MPa。盐穴地下储库最大和最小储存压力一般取上覆地层压力的 70%和 20%^[27]。对于本文所用盐岩的埋深而言, 若储库最大储存压力取上覆地层压力的 70%, 此时地层不平衡力为地层压力的 30%, 即 4.86 MPa。因此, 本文疲劳试验所选取的循环荷载下限应力为 5 MPa, 对应的下限应力比 R_L (下限应力与盐岩单轴抗压强度的比值) 为 0.14。此外, 本文目的是研究上限应力对盐岩疲劳特性和微观结构的影响规律。根据该目的, 对 6 个盐岩试件开展了 8、14、20、23、26、30 MPa 等 6 种不同上限应力下的单轴疲劳试验, 对应的上限应力比 R_H (上限应力与盐岩单轴抗压强度的比值) 分别为 0.23、0.40、0.57、0.65、0.74、0.85。

对于盐穴压气蓄能电站工程, 其运营过程中通常一天经历 1 次注采气循环。按此计算, 在其设计使用年限 (30 a) 内, 围岩所经历的荷载循环次数可达 11 000 次。为使试件经历足够多的荷载循环次数并尽量减少盐岩蠕变对疲劳试验结果的影响, 本文试验中荷载最大循环次数设定为 12 000 次, 荷载频率取为 1 Hz。此时, 一个疲劳试验在 3.4 h 内即可完成。赵克烈^[28]、郭印同^[7]等也均证实, 在本文试验工况下, 由于试验时间短, 盐岩蠕变变形较小, 蠕变对疲劳试验结果的影响可忽略不计。

2.4 试验步骤

试验过程包括如下步骤: ①称量试件初始质量 m_0 , 然后在饱和卤水中进行真空饱水, 每隔 4 h 称一次试件质量, 直至相邻两次质量差小于 0.01 g 时即认为达到饱和状态; ②利用 NMR 分析系统对饱和后试件的微观孔隙进行测试; ③将试件放置于 40 °C 的恒温烘箱中加热, 每隔 2 h 称一次试件质量, 直至相邻两次质量差小于 0.01 g 为止; ④将试件安装于疲劳试验机上; ⑤以 1 kN/s 的速率施加轴向应力至循环荷载平均值 (图 3 中的 a_0 点); ⑥以 a_0 点为起点反复施加循环荷载, 直至试件发生破坏或荷载循环次数达到 12 000 次后停止试验; ⑦对于未发生疲劳破坏的试件, 再次饱水处理后进行核磁共振测试, 试验过程同步步骤①和②; ⑧利用 SEM 设备对试验后试件的微观结构进行测试。同时, 另取 3 个没有经过循环荷载作用的试件, 利用 SEM 设备对其初始微观结构进行测试。

此外, 为研究盐岩微观孔隙结构随荷载循环次数的变化规律, 另取一个试件 (7#试件: R_H 和 R_L 分别为 0.40 和 0.14, 荷载频率取为 1 Hz), 利用 NMR

设备观测该试件在经历 0、500、2 000、5 000、8 000 和 12 000 次循环后的微观孔隙结构, 试验过程同步步骤①~⑦。

3 宏观疲劳试验结果分析

3.1 轴向应力-应变曲线

图 4 给出了 1#~6#试件的轴向应力-应变曲线。可以看出: (1) 上限应力比低于 0.74 时, 1#~4#试件经历了 12 000 个循环后仍未发生破坏, 轴向应力-应变曲线仅包含“疏一密”两个阶段; 试验结束时, 这 4 个试件产生最大的轴向应变分别为 0.51%、1.01%、1.96%和 2.74%。(2) 上限应力比为 0.74 和 0.85 时, 5#和 6#试件分别经历了 4 982 次和 1 613 次循环后发生破坏, 轴向应力-应变曲线包含“疏一密一疏”3 个阶段; 试验结束时, 这 2 个试件产生的最大轴向应变分别为 4.98%和 6.10%。

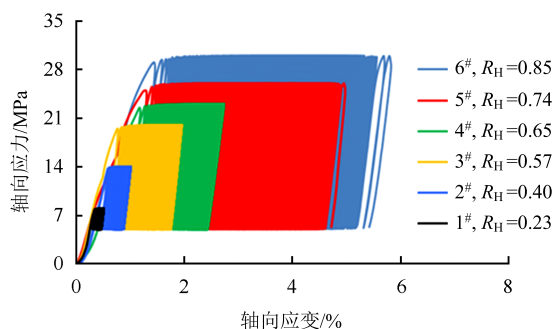


图 4 盐岩轴向应力-应变曲线
Fig.4 Axial stress-strain curves of salt rock

3.2 不可逆变形

循环荷载作用下, 岩石在加载阶段产生的总变形由弹性变形和塑性变形两部分组成, 其中弹性变形在卸载阶段得到全部恢复, 而塑性变形 (即不可逆变形) 会残留下来。图 5 给出了盐岩试件累计不可逆变形 ε 随荷载循环次数 N 的变化规律。可以看出:

(1) 上限应力比为 0.74 和 0.85 时, 5#和 6#试件在试验过程中发生了疲劳破坏, 累计不可逆变形的变化过程包括初始阶段 (累计不可逆变形速率逐渐减小)、等速阶段 (累计不可逆变形速率基本保持不变) 和加速阶段 (累计不可逆变形速率逐渐增大) 等 3 个阶段。

(2) 上限应力比低于 0.74 时, 1#~4#试件在试验过程中未发生疲劳破坏, 累计不可逆变形的变化过程仅包含初始和等速阶段。

(3) 荷载循环次数相同时, 盐岩累计不可逆变形随上限应力比增加而增大。

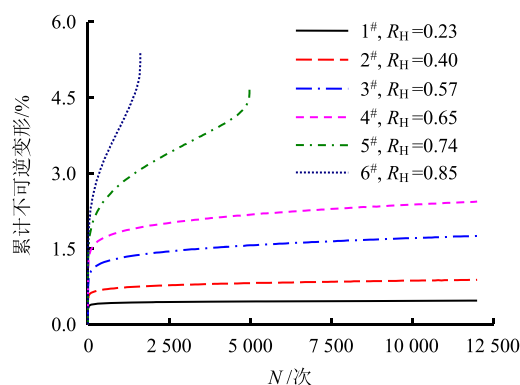


图5 盐岩累计不可逆变形随荷载循环次数的变化规律
Fig.5 Variation of cumulative irreversible deformation of salt rock with cycle number

4 SEM 试验结果分析

扫描电子显微镜 (SEM) 的基本工作原理是: 高压电子枪发出的电子束与被观测材料表面接触后会产生各种物理信息, 然后对这些信息收集、转换、调整和再成像, 最终以图像的形式来反映材料的微观结构形貌。通过分析盐岩试验后的 SEM 图像可以直观地了解其在循环荷载作用下的微观结构变化和裂纹扩展机制。

4.1 初始状态下的盐岩 SEM 图像

图 6 给出了初始状态下的盐岩 SEM 图像 (放大 2 000 倍)。可以看出, 初始状态下的盐岩微观结构非常致密, 晶粒间的接触十分紧密, 即使在放大 2 000 倍的情况下也观察不到明显的孔隙和裂隙, 这也是盐岩具有孔隙率小、渗透性低和密闭性好等优点的主要原因。此外, 由图 6(d) 可以发现, 盐岩晶

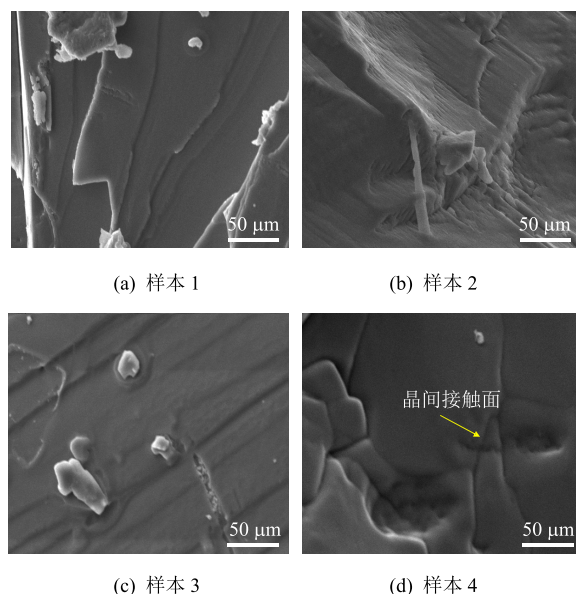


图6 初始状态下的盐岩 SEM 图像
Fig.6 SEM images of salt rock in initial state

粒的大小和尺寸存在较大差异, 且晶粒间的接触面 (晶间接触面) 极不规则, 这些不规则的晶间接触面在外部荷载的作用下很可能会发生开裂现象, 进而产生晶间裂纹。

4.2 循环荷载作用后的盐岩 SEM 图像

盐岩内部微裂纹在外部荷载作用下的扩展模式主要有 3 种, 分别为发育于盐岩晶粒接触面间的微裂纹 (即晶间裂纹)、穿越盐岩晶粒发育的微裂纹 (即穿晶裂纹) 以及盐岩晶粒内部发育的微裂纹 (即晶内裂纹)。图 7 给出了循环荷载作用后的盐岩 SEM 图像 (放大 500 倍)。

由图 7 可以看出, 相较于初始状态下的盐岩微观结构 (见图 6), 盐岩在循环荷载作用后的微观结构发生了明显变化。从总体上来看, 盐岩内部微观结构变化以晶间裂纹发育为主, 且随上限应力比增大, 裂纹的数量逐渐增加。此外, 上限应力比为 0.74 和 0.85 时, 盐岩内部出现少量的穿晶裂纹和晶内裂纹 (如图 7(e) 和 7(f) 所示)。对于纯盐岩而言, 其内部结构在微观上表现为以盐岩晶粒为单元的随机材料聚合体, 且晶粒间存在极易劈裂的解理面 (晶间接触面), 这些解理面在外部荷载作用下很可能会发生开裂现象, 这也是盐岩在循环荷载作用下内部裂纹发育以晶间裂纹为主的主要原因^[29]。

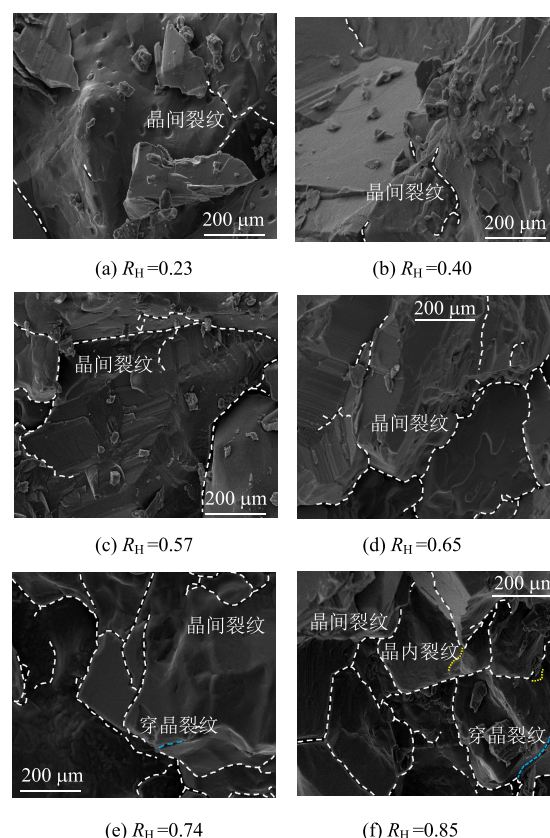


图7 循环荷载作用后的盐岩 SEM 图像
Fig.7 SEM images of salt rock after cyclic loading

5 NMR 试验结果分析

对于饱和岩石材料而言,通过 NMR 试验获得的横向弛豫时间 T_2 与孔隙半径 r 之间满足:

$$r = \rho_0 F_s T_2 \quad (1)$$

式中: ρ_0 为表面弛豫强度 ($\mu\text{m/s}$); F_s 为孔隙形状参数(孔隙为圆柱形时, $F_s=2$; 孔隙为球形时, $F_s=3$)。

由式(1)可以看出,横向弛豫时间 T_2 与孔隙半径之间呈正比例关系,即 T_2 越大,孔隙孔径越大; T_2 越小,孔隙孔径也就越小。根据 Tang^[30]和 Yang^[31]等的研究成果,本文将横向弛豫时间 $T_2 \leq 10$ ms 时对应的孔隙定义为小孔隙,将 $T_2 > 10$ ms 时对应的孔隙定义为大孔隙。

5.1 不同上限应力比下的 T_2 谱分布和面积变化

5.1.1 T_2 谱分布

由于横向弛豫时间 T_2 与孔隙半径 r 之间成正比例关系(式(1)),因此通过分析试验前后的 T_2 谱分布可以直观地了解盐岩内部孔隙孔径在循环荷载作用下的变化规律。由于 5#和 6#试件在试验过程中发生了疲劳破坏,故图 8 仅给出了 1#~4#试件试验前后的 T_2 谱分布情况。可以看出:

(1) 由于试件之间的离散性,这 4 个试件试验前的核磁共振参数,如波峰数量、峰值信号强度、起始和结束弛豫时间等均存在一定差异。

(2) 疲劳试验前,1#($R_H=0.23$)和 2#($R_H=0.40$)试件第 1 个谱峰对应的最小弛豫时间分别为 0.020 0、0.261 3 ms,试验后第 1 个谱峰对应的最小弛豫时间分别为 0.017 4、0.018 7 ms,即这两个试件试验后第 1 个谱峰均向左移动,表明循环荷载作用使得盐岩内部萌生出孔径更小的小孔隙。1#和 2#试件试验前最后一个谱峰对应的最大弛豫时间分别为 766.341 1、821.434 4 ms,试验后最后一个谱峰对应的最大弛豫时间分别为 1 011.638 0、1 162.322 5 ms,即这两个试件试验后最后一个谱峰均向右移动,说明盐岩内部已有孔隙在循环荷载作用下不断贯通形成孔径更大的大孔隙。

(3) 疲劳试验前,3#($R_H=0.57$)和 4#($R_H=0.65$)试件第 1 个谱峰对应的最小弛豫时间分别为 0.369 7、0.396 3 ms,试验后第 1 个谱峰对应的最小弛豫时间分别为 2.409 4、0.911 6 ms,即这两个试件试验后第 1 个谱峰均向右移动。此时,盐岩内部孔隙孔径的变化可以分为两个方面:一方面,循环荷载作用使得盐岩内部新萌生出孔径更小的小孔隙;另一方面,这些新萌生的小孔隙和已有孔径较小的小孔隙在较大上限应力的循环荷载作用下又逐渐贯通形成孔径

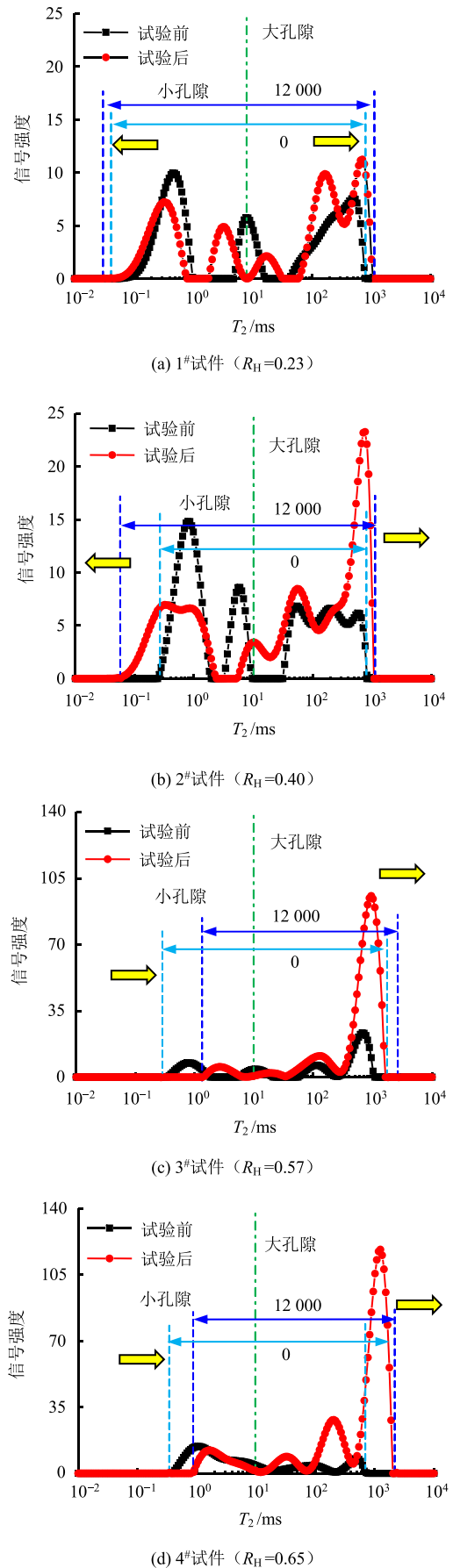


图 8 盐岩试验前后 T_2 谱分布
Fig.8 T_2 spectrum distribution of salt rock before and after the test

较大的小孔隙, 进而导致新萌生的小孔隙和已有孔径较小的小孔隙消失。3[#]和 4[#]试件试验前最后一个谱峰对应的最大弛豫时间分别为 1 011.638 0、666.992 0 ms, 试验后最后一个谱峰对应的最大弛豫时间分别为 2 494.508 1、1 889.652 3 ms, 即这两个试件试验后最后一个谱峰均向右移动, 说明盐岩内部孔隙在循环荷载作用下不断贯通形成孔径更大的大孔隙。同时, 由于上限应力较大, 3[#]和 4[#]试件内部孔隙的扩展程度明显提高, 进而导致这两个试件试验后孔隙的最大孔径远大于 1[#]和 2[#]试件。

5.1.2 T_2 谱面积变化

研究表明, T_2 谱面积与岩石内部孔隙数量成正比, 即 T_2 谱面积越大, 表明岩石内部孔隙数量越多。因此, 通过对比试验前后的 T_2 谱面积, 可以定量地分析循环荷载对盐岩内部孔隙数量的影响规律。表 2 给出了盐岩试件试验前后的 T_2 谱面积分布, 可以看出:

(1) 虽然 1[#]~4[#]试件试验前的 T_2 谱波峰数量和信号强度等参数存在一定差异, 但 T_2 谱总面积之间的差值相对较小, 处于 422.73~586.76 范围内, 说明这 4 个试件内部初始孔隙的总数量相差较小。此外, 除 3[#]试件初始孔隙以大孔隙为主 (对应面积占总面积的 72.02%) 外, 其他试件初始状态下的小孔隙数量均多于大孔隙数量, 小孔隙对应面积占总面积的比例均在 52% 以上。

(2) 经历 12 000 次循环后, 1[#]~4[#]试件内部小孔隙数量出现一定程度的减少, 且随上限应力比增大, 小孔隙减少的数量呈增加趋势。经分析, 这 4 个试件试验后小孔隙对应面积分别减少了 25.15、62.38、63.16 和 150.88。说明盐岩内部新萌生的小孔隙和部分已有小孔隙在循环荷载作用下逐渐贯通形成大孔隙, 且上限应力比越大, 贯通的小孔隙数量越多。但由于试件的离散性以及小孔隙数量变化的动态性和随机性, 2[#]和 3[#]试件试验后小孔隙减少的数量比较接近。

(3) 经历 12 000 次循环后, 1[#]~4[#]试件内部总孔隙数量和大孔隙数量均出现一定程度的增加, 且上限应力比越大, 总孔隙和大孔隙增加的数量越多。经分析, 这 4 个试件试验后 T_2 谱总面积分别增加了 79.78、194.78、1 061.21、1 606.01, 大孔隙对应的面积分别增加了 104.93、261.16、1 117.37、1 756.89。这主要是因为上限应力越大, 盐岩内部新萌生的孔隙数量越多, 且新萌生孔隙和部分已有孔隙贯通形成的大孔隙数量越多, 总孔隙数量也就越多。

表 2 不同上限应力比下盐岩 T_2 谱面积分布
Table 2 Area distribution of T_2 spectrum for salt rock under different maximum stress ratios

试件 编号	R_H	试验 阶段	总面积	小孔隙		大孔隙	
				面积	比例 /%	面积	比例 /%
1 [#]	0.23	试验前	422.73	221.36	52.36	201.37	47.64
		试验后	502.51	196.21	39.05	306.30	60.95
2 [#]	0.40	试验前	582.31	322.32	55.35	257.99	44.65
		试验后	777.09	259.94	33.45	519.15	66.55
3 [#]	0.57	试验前	489.16	136.85	27.98	359.31	72.02
		试验后	1 550.37	73.69	4.75	1 476.68	95.25
4 [#]	0.65	试验前	586.76	396.49	67.57	190.27	32.43
		试验后	2 192.77	245.61	11.20	1 947.16	88.80

图 9 给出了 1[#]~4[#]试件 T_2 谱总面积增量 ΔS 随上限应力比的变化规律。

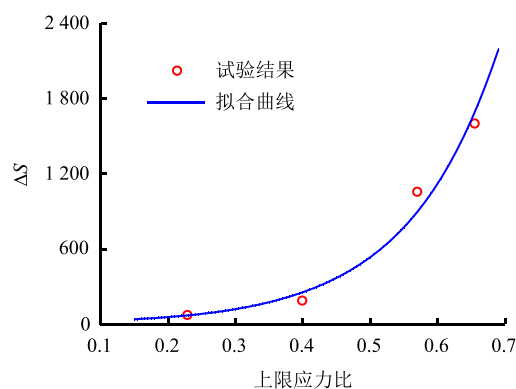


图 9 盐岩 T_2 谱总面积增量随上限应力比的变化规律
Fig.9 Variation of total area increment of T_2 spectrum with maximum stress ratio

由图 9 可以看出, 上限应力比不超过 0.40 时, 随上限应力比增大, T_2 谱总面积增量虽不断增大, 但增大的幅度相对较小; 上限应力比超过 0.40 时, T_2 谱总面积增量仍不断增加, 且增加的幅度越来越大。经拟合分析, 盐岩试件 T_2 谱总面积增量随上限应力比的变化规律满足指数关系 (见下式), 其相关系数为 0.991 4。

$$\Delta S = 13.159 \exp(7.412 R_H) \quad (2)$$

图 9 中同时给出了拟合曲线和试验结果的对比, 可以看出, 式 (2) 可以较好地描述两者的关系。

5.2 不同荷载循环次数下 T_2 谱分布和面积变化

5.2.1 T_2 谱分布

图 10 给出了荷载循环次数分别为 0、500、2 000、5 000、8 000 和 12 000 次时 7[#]试件 ($R_H=0.40$) 的 T_2 谱分布情况。可以看出:

(1) 荷载循环次数为 0、500 和 2 000 时, 7[#]试件第 1 个谱峰对应的最小弛豫时间分别为 0.740 2、0.280 1 和 0.017 4 ms, 即 $N \leq 2 000$ 次时, 随荷载循

环次数增加,第1个谱峰逐渐向左移动,说明随荷载循环次数增加,盐岩内部逐渐萌生出孔径更小的小孔隙。7[#]试件最后一个谱峰对应的最大弛豫时间分别为 382.749 5、1 431.458 9 和 2 494.508 1 ms,即 $N \leq 2\,000$ 次时,随荷载循环次数增加,最后一个谱峰逐渐向右移动,表明随荷载循环次数增加,盐岩内部已有孔隙逐渐贯通形成孔径更大的大孔隙。

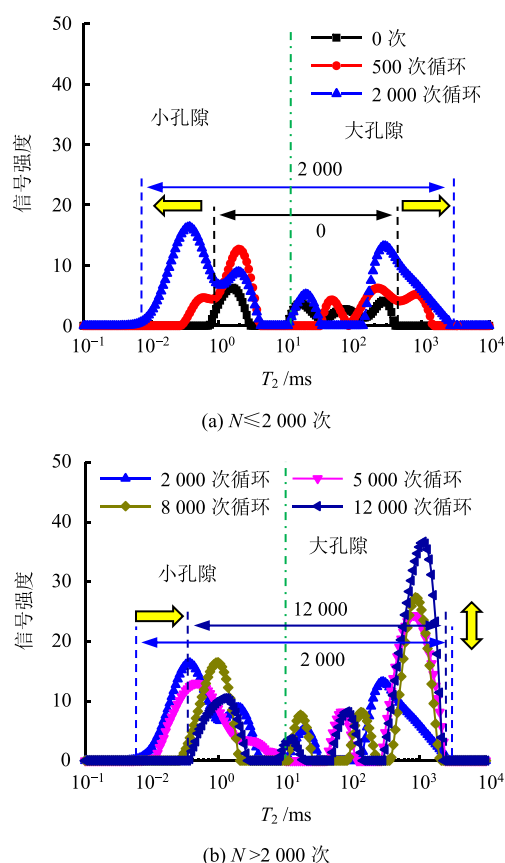


图 10 不同荷载循环次数下 7[#]试件 T_2 谱分布情况
Fig.10 T_2 spectrum distribution of #7 specimen under different cycle numbers

(2) 荷载循环次数为 2 000、5 000、8 000 和 12 000 时,7[#]试件第 1 个谱峰对应的最小弛豫时间分别为 0.017 4、0.024 7、0.261 3、0.369 7 ms,即 $N > 2\,000$ 次时,随荷载循环次数增加,第 1 个谱峰又逐渐向右移动,表明盐岩内部新萌生的孔径更小的小孔隙又逐渐贯通形成孔径较大的小孔隙。但即便经历 12 000 次循环后,7[#]试件第 1 个谱峰对应的最小弛豫时间 (0.369 7 ms) 仍小于试验前 (0.740 2 ms),表明经历 12 000 个循环后,该试件内部仍残留有一部分新萌生的孔径更小的小孔隙。7[#]试件最后一个谱峰对应的最大弛豫时间分别为 2 494.508 1、2 327.202 5、2 025.501 9 和 2 171.118 0 ms,即 $N > 2\,000$ 次时,最后一个谱峰对应的最大弛豫时间基本

不随荷载循环次数发生变化,这表明盐岩内部孔隙的最大孔径在经过 2 000 次循环后已达到该上限应力比 ($R_H = 0.40$) 下的最大值,此后基本不随荷载循环次数增加而发生变化。

5.2.2 T_2 谱面积变化

表 3 给出了 7[#]试件经过不同荷载循环次数后的 T_2 谱面积,图 11 给出了 7[#]试件 T_2 谱总面积、大孔隙和小孔隙对应面积随荷载循环次数的变化规律。由表 3 和图 11 可以看出:

(1) 7[#]试件内部初始孔隙分布以大孔隙为主,大孔隙和小孔隙对应面积占总 T_2 谱总面积的比例分别为 61.02%和 38.98%。

表 3 不同荷载循环次数下 7[#]试件 T_2 谱面积分布
Table 3 Area distribution of T_2 spectrum for specimen #7 under different cycle numbers

循环次数	总面积	小孔隙		大孔隙	
		面积	比例 /%	面积	比例 /%
0	203.00	79.13	38.98	123.87	61.02
500	447.12	238.87	53.42	208.25	46.58
2 000	827.08	474.80	57.41	352.28	42.59
5 000	879.77	364.36	41.41	515.42	58.59
8 000	923.82	319.44	39.76	604.38	75.24
12 000	993.55	228.52	23.00	765.03	77.00

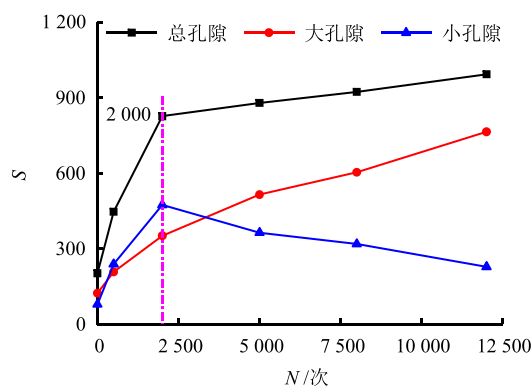


图 11 7[#]试件 T_2 谱总面积、大孔隙和小孔隙对应面积随荷载循环次数的变化规律

Fig.11 Variation of total T_2 spectrum area, and the corresponding areas of macropores and micropores for specimen #7 with cycle number

(2) 荷载循环次数 $N \leq 2\,000$ 次时,7[#]试件内部总孔隙、大孔隙和小孔隙数量均随荷载循环次数增加而增加,且小孔隙数量的增长速率大于大孔隙。经分析,荷载循环次数从 0 增加至 2 000 次时, T_2 谱总面积、大孔隙和小孔隙对应面积分别增加了 624.08、228.41 和 395.67。经过 2 000 次循环后,7[#]试件内部大孔隙和小孔隙对应面积占总面积的比例分别为 42.59%和 57.41%。相较于初始状态时大孔隙和小孔隙对应面积占总面积的比例 (61.02%和

38.98%), 荷载循环次数从 0 增加至 2 000 次时, 大孔隙对应面积占总面积的比例逐渐减少, 而小孔隙对应面积占总面积的比例逐渐增加。因此, $N \leq 2\,000$ 次时, 盐岩内部孔隙结构变化以小孔隙萌生为主。

(3) 荷载循环次数 $N > 2\,000$ 次时, 随荷载循环次数增加, 7[#]试件内部总孔隙和大孔隙数量仍不断增加, 而小孔隙数量逐渐减少。经分析, 荷载循环次数 N 从 2 000 次增加至 12 000 次时, T_2 谱总面积和大孔隙对应面积分别增加了 166.47 和 412.75, 而小孔隙的数量减少了 246.28。相较于 $N=2\,000$ 次时 7[#]试件内部大孔隙和小孔隙对应面积占总面积的比例, 当 N 从 2 000 次增加至 12 000 次时, 大孔隙对应面积所占比例逐渐增加至 77.00%, 而小孔隙对应面积所占比例逐渐减小至 23.00%。因此, $N > 2\,000$ 次时, 盐岩内部孔隙结构变化以小孔隙贯通形成大孔隙为主。

图 12 给出了 7[#]试件 T_2 谱总面积增量 ΔS 随荷载循环次数的变化规律。可以看出, 荷载循环次数 $N \leq 2\,000$ 次时, T_2 谱总面积增量以较快的速率不断增大; $N > 2\,000$ 次时, 随荷载循环次数增加, T_2 谱总面积增量仍不断增加, 但增加的速率逐渐减慢。

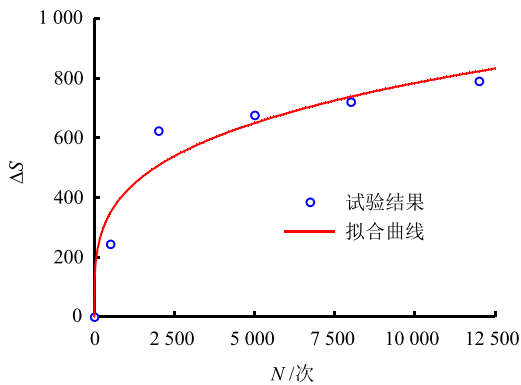


图 12 盐岩 T_2 谱总面积增量随荷载循环次数的变化规律
Fig.12 Variation of total area increment of T_2 spectrum for salt rock with cycle number

经过拟合分析, 7[#]试件 T_2 谱总面积增量随荷载循环次数的变化规律可用式 (3) 表示的函数进行描述, 相关系数 $R=0.972\,8$ 。图 12 中同时给出了拟合曲线和试验结果的对比, 可以看出式 (3) 可以较好地反映两者的关系。

$$\Delta S = 65.01N^{0.27} \quad (3)$$

6 盐岩经验疲劳模型

6.1 模型建立

从已构建的岩石疲劳本构模型来看, 损伤模型虽然可以较好地反映出岩石在循环荷载作用下的疲

劳变形行为, 但选择合适的损伤变量来表征岩石内部的损伤演化过程比较困难。基于元件组合模型理论构建的疲劳本构模型具有形式复杂以及参数较多等缺点; 同时, 应用这种方法描述岩石不可逆变形过程时需要人为地将岩石原本完整的疲劳变形过程划分为 3 个阶段, 并用不同函数来描述每个阶段的变形规律, 无法以一个统一的函数来表示。

由图 5 可知, 上限应力比为 0.74 和 0.85 时, 5[#]和 6[#]盐岩试件在试验过程中发生了破坏, 累计不可逆变形的变化过程可分为初始、等速和加速阶段, 曲线形态如图 13 中的曲线 1 所示。如果沿直线 $\varepsilon=N$ 作曲线 1 的对称曲线, 即可得到图 13 中的曲线 2。由于这两条曲线的方程互为反函数, 只要确定出曲线 2 的方程, 通过求解反函数的方法即可得到曲线 1 的方程, 即盐岩疲劳本构方程。

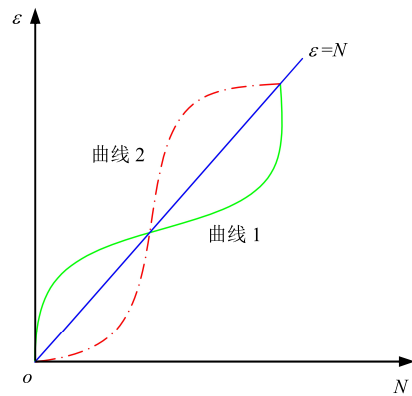


图 13 盐岩累计不可逆变形曲线的反函数示意图
Fig.13 Sketch map of the inverse function of cumulative irreversible deformation curve

曲线 2 属于 S 型生长曲线, 其方程可用 MMF 函数、Logistic 函数、Gompertz 函数和 Weibull 函数等函数来表示。其中, MMF 函数的应用较为广泛, 其表达式为^[32]

$$y = \frac{ax^b}{m + x^b} \quad (4)$$

式中: x 和 y 分别为自变量和因变量; a 、 b 和 m 分别为材料常数 ($b > 1$), 且参数 a 表示因变量的最大值。

经计算, 式 (4) 的反函数为

$$x = \left(\frac{ym}{a - y} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (5)$$

累计不可逆变形曲线中, 自变量 x 和因变量 y 分别为荷载循环次数 N 和累计不可逆变形 ε , 用 ε

和 N 分别替换式 (5) 中的 x 和 y , 则有

$$\varepsilon = \left(\frac{Nm}{a-N} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (6)$$

式 (4) 中, 参数 a 表示因变量 y 的最大值, 则式 (6) 中的参数 a 表示荷载循环次数 N 的最大值, 即岩石疲劳寿命 N_F ; 此外, 为方便表达, 令式 (6) 中 $1/b=n$, 则式 (6) 可变换为

$$\varepsilon = \left(\frac{m \frac{N}{N_F}}{1 - \frac{N}{N_F}} \right)^n \quad (7)$$

值得注意的是, 式 (4) 中 $b>1$, 则式 (7) 中 $n<1$ 。

潘华等^[33]研究指出, 材料疲劳寿命与循环荷载上限和下限应力之间的关系满足:

$$N_F = \frac{1}{p} \left[\sigma_{\max} \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right) \right]^{-q} = \frac{1}{p} (\sigma_{\max} \sigma_a)^{-q} \quad (8)$$

式中: p 和 q 为模型参数。

将式 (8) 代入式 (7), 可得

$$\varepsilon = \left[\frac{mpN(\sigma_{\max} \sigma_a)^q}{1 - pN(\sigma_{\max} \sigma_a)^q} \right]^n \quad (9)$$

式 (9) 即为本文通过求解 S 形函数反函数的方法得到的岩石疲劳模型最终表达式。

6.2 模型参数确定

由式 (9) 可以看出, 本文模型共有 4 个待定参数 (p 、 q 、 m 和 n) 需要确定。

其中, 参数 p 和 q 可根据两级荷载作用下的岩石疲劳寿命进行确定。假设上限应力为 σ_c 和 σ_d , 下限应力为 σ_{cl} 和 σ_{dl} 时, 对应的疲劳寿命为 N_{Fc} 和 N_{Fd} 。将 $(\sigma_c, \sigma_{cl}, N_{Fc})$ 和 $(\sigma_d, \sigma_{dl}, N_{Fd})$ 分别代入式 (8) 建立一个二元线性方程组, 然后可得参数 c 和 d 的取值。

参数 m 和 n 的取值可通过拟合疲劳试验结果得到。具体操作过程如下:

(1) 将参数 m 和 n 看作设计变量 P :

$$P = (m, n) \quad (10)$$

(2) 建立目标函数 Y :

$$Y = \sum_{j=1}^J \left[\lambda_j (P, t_j) - \lambda_j \right]^2 \quad (11)$$

式中: J 为试验组数; $\lambda_j (P, t_j)$ 和 λ_j 分别为 t_j 时刻的变形计算值和实测值。

(3) 设定目标函数的控制精度, 然后进行迭代求解。待目标函数满足精度要求后, 停止迭代, 输出结果。

6.3 模型验证

为了说明本文模型的合理性, 利用盐岩疲劳试验结果对其进行了验证。首先, 按照 6.2 节中介绍的方法确定了模型参数, 如表 4 所示。

表 4 模型参数确定结果

Table 4 Determination results of model parameters						
试件 编号	上限应力 /MPa	下限应力 /MPa	参数			
			p	q	m	n
1 [#]	8	5	4.449×10^{-13}	3.552	1.367×10^{-48}	0.045
2 [#]	14	5			4.554×10^{-31}	0.064
3 [#]	20	5			7.593×10^{-23}	0.079
4 [#]	23	5			8.870×10^{-20}	0.087
5 [#]	26	5			3.869×10^{-17}	0.091
6 [#]	30	5			4.157×10^{-14}	0.108

由表 4 可知, 参数 m 和 n 随上限应力不断发生变化, 并非常数。同时, 式 (8) 和式 (9) 中, 由于循环荷载应力振幅 $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$, 故参数 m 和 n 必然与函数 $f(\sigma) = \sigma_{\max} \sigma_a$ 密切相关。因此, 若能建立参数 m 、 n 与 $f(\sigma)$ 之间的定量关系, 则对于预测盐岩在任意上限/下限应力下累计不可逆变形的变化规律具有重要意义。

经分析, $-\lg m$ 、 n 与 $f(\sigma)$ 之间的关系可分别用式 (12) 和式 (13) 表示的函数描述, 相关系数 R 分别为 0.999 4 和 0.996 1。图 14 给出了拟合曲线和表 4 中参数反演结果的对比情况。可以看出, 式 (12) 和式 (13) 可以较好地反映 $-\lg m$ 、 n 随 $f(\sigma)$ 的变化规律。

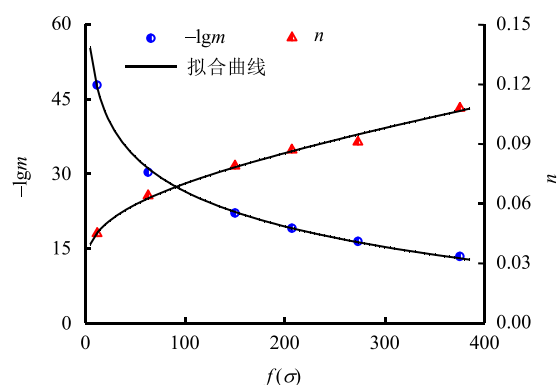


图 14 参数 m 和 n 随 $f(\sigma)$ 的变化规律

Fig.14 Variation of parameters m and n with $f(\sigma)$

$$-\lg m = -10.226 \ln[f(\sigma) + 1] + 76.644 \quad (12)$$

$$n = \frac{1}{4\,518.320 - 4\,487.068 f(\sigma)^{8.206 \times 10^{-4}}} \quad (13)$$

将 $p=4.449 \times 10^{-13}$ 、 $q=3.552$ 、式(12)和式(13)代入式(9), 即可得到盐岩在不同上限应力比下的累计不可逆变形预测曲线。图15给出了预测曲线和试验结果的对比情况。可以看出, 本文提出的疲劳

模型不仅可以描述盐岩在较低上限应力比下累计不可逆变形的初始和等速阶段(1#~4#试件); 还可以描述较高上限应力比下累计不可逆变形的加速阶段(5#和6#试件)。

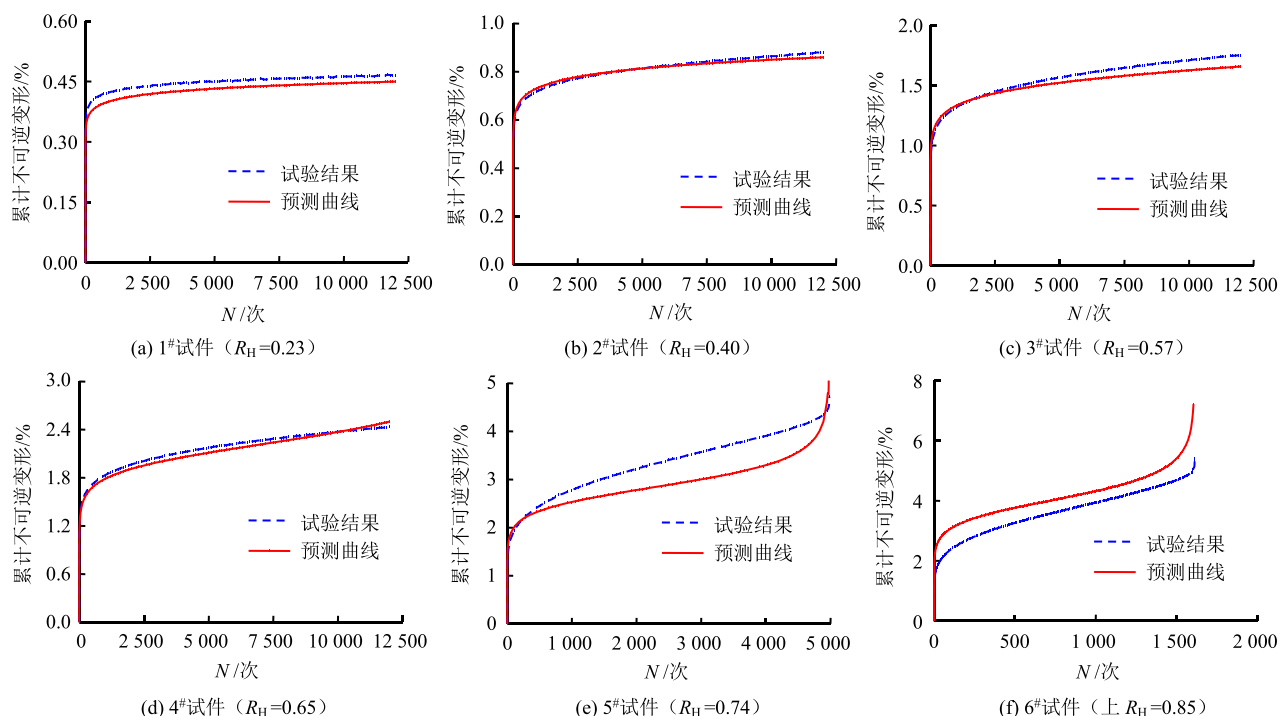


图15 预测曲线和试验结果对比
Fig.15 Comparison between predicted curves and test data

从吻合程度来看, 上限应力比为 0.74 和 0.85 时误差相对较大, 其余上限应力比下的试验结果和预测曲线吻合程度较高。但总体而言, 该模型可以较好地描述不同上限应力下盐岩累计不可逆变形随荷载循环次数的变化规律。同时, 从式(9)可以看出, 该模型参数较少(仅4个), 表达式简单, 方便应用。

7 讨 论

7.1 疲劳模型的适用性

众多研究表明, 循环荷载作用下, 岩石存在疲劳破坏门槛值^[34]。当上限应力低于门槛值时, 随荷载循环次数增加, 岩石累计不可逆变形会达到上限值, 之后不再随循环次数发生变化, 岩石不会发生疲劳破坏; 当上限应力高于门槛值时, 岩石累计不可逆变形会随荷载循环次数增加持续增大, 直至岩石发生疲劳破坏。对于本文模型而言, 由式(9)可知, 即便在上限应力较低的情况下, 累计不可逆变形也会随荷载循环次数增加而不断增大, 且岩石最终会发生疲劳破坏。因此, 本文模型实际上不能描述上限应力低于疲劳破坏门槛值情况下岩石不可逆

变形的发展规律。

马林建^[6]、郭印同^[7]等指出, 盐岩的疲劳破坏门槛值与其单轴抗压强度的比值约为 0.8。但对于本文试验所用的盐岩试件而言, 即便当上限应力比仅为 0.23 时, 经过 12 000 次循环后, 其累计不可逆变形仍然没有到达上限值, 仍在随荷载循环次数增加而缓慢增大, 见图 16。这与本文模型描述的情况相符合。

同时, 对于盐穴压气蓄能电站, 通常一天只经历 1 次注采气循环。按此计算, 在其设计使用年限(30年)内, 围岩所经历的荷载循环次数约为 11 000 次。而对于本文模型, 当上限和下限应力比分别为 0.23 和 0.14 时, 虽然盐岩试件会发生疲劳破坏, 但其疲劳寿命为 3.296×10^8 次(式(8)), 远大于压气蓄能电站在设计使用年限内围岩经历的荷载循环次数(11 000 次)。因此, 当上限应力较低时, 可认为盐岩疲劳寿命为无穷大, 即在压气蓄能电站服役期间不会发生疲劳破坏。

综合以上分析, 利用本文模型描述盐岩在上限应力低于疲劳破坏门槛值情况下的不可逆变形发展规律是可行的。

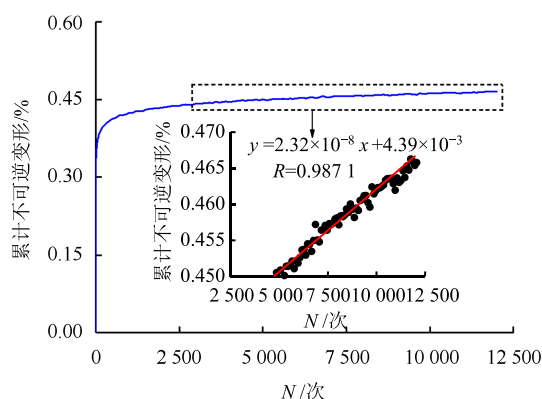


图 16 1#试件累计不可逆变形随荷载循环次数的变化规律
Fig.16 Variation of cumulative irreversible deformation of specimen #1 with cycle number

7.2 本文研究的不足

对于盐穴储气库,其运营过程中通常一年只经历 1~2 次注采气循环;而对于盐穴压气蓄能电站,其运营过程中通常一天经历 1 次注采气循环。也就是说,实际工程中储库内压由最小运行压力增加至最大运行压力或由最大运行压力减小至最小运行压力的持续时间较长,作用在围岩上的应力加卸载速率较慢、循环加卸载频率较低。由于频率低,荷载变化过程中围岩不仅会产生疲劳变形,还会产生蠕变变形。而且可以预见,由于蠕变和疲劳的耦合作用,会使得这一变形过程极其复杂。

本文为了研究盐岩在循环荷载下的疲劳特性,选取的循环荷载频率为 1 Hz,即轴向应力从下限应力增加至上限应力或由上限应力减小至下限应力的持续时间仅为 0.5 s,此时作用在盐岩上的应力变化速率很快,最大变化速率可达 50 MPa/s。由于荷载变化频率高,试验时间短,盐岩在试验过程中产生的蠕变变形很小,可忽略不计,故而频率为 1 Hz 的循环加卸载试验可看作是一个纯疲劳试验。由于荷载频率的差别,本文试验结果必然与实际工程存在一定的差别,具体差别有多大尚需通过试验对比后方可确定。因此,在后续研究中需要对盐岩在低频循环荷载(考虑疲劳和蠕变耦合作用)下的力学特性展开进一步深入研究。

8 结 论

(1) 循环荷载作用下,盐岩内部裂纹的扩展方式以晶间裂纹为主,且裂纹数量随上限应力比增大而增加。此外,上限应力比为 0.74 和 0.85 时,盐岩在试验过程中发生了疲劳破坏,内部开始出现少量的晶内和穿晶裂纹。

(2) 上限应力比为 0.23 和 0.40 时,经过 12 000

次循环后,盐岩内部孔隙的最小孔径减小,而最大孔径增大;上限应力为 0.57 和 0.65 时,盐岩内部孔隙的最小孔径和最大孔径均增大。疲劳试验后,盐岩内部大孔隙和总孔隙数量增加,小孔隙数量减少,且大孔隙和总孔隙增加的数量及小孔隙减少的数量均随上限应力比增大而增加。

(3) 上限应力比为 0.40 且荷载循环次数 N 从 0 次增加至 2 000 次时,盐岩内部孔隙的最小孔径逐渐减小,而最大孔径逐渐增大;同时,盐岩内部小孔隙、大孔隙和总孔隙数量均随荷载循环次数增加而增大;但小孔隙数量的增长速率大于大孔隙,此时盐岩孔隙结构变化以小孔隙萌生为主。

(4) 上限应力比为 0.40 且 N 从 2 000 次增加至 12 000 次时,盐岩内部孔隙的最小孔径逐渐增大,而最大孔径基本不变,表明最大孔径在经过 2 000 次循环后已达到该上限应力比下的最大值;同时,盐岩内部大孔隙和总孔隙数量仍随荷载循环次数增加而增大,但小孔隙数量不断减少,此时盐岩孔隙结构变化以大孔隙生成为主。

(5) 通过求解 S 形函数反函数的方法建立了一个参数少且形式简单的经验疲劳模型,并利用盐岩试验结果对其合理性进行了验证。结果表明,该模型可以较好地描述不同上限应力下盐岩累计不可逆变形随荷载循环次数发展全过程的变化规律。

尽管本文通过试验获得了盐岩疲劳变形过程中孔隙数量、孔隙半径等随荷载循环次数和上限应力的变化规律,得到了一些有益的结论,但需要说明的是,结论(1)~(4)是根据本文试验所用的盐岩试件得出的,考虑到岩石种类的多样性和岩石矿物成分、力学性质的复杂性,这些结论对于其他岩石或其他产地的盐岩的普适性尚需通过试验进一步验证。此外,本文提出的经验疲劳模型是从宏观唯象学角度出发建立的,该模型的理论曲线符合岩石疲劳变形的三阶段变化规律,故其亦可用于描述其他岩石或其他产地的盐岩的不可逆变形发展规律。

参 考 文 献

- [1] WANG J B, ZHANG Q, SONG Z P, et al. Creep properties and damage constitutive model of salt rock under uniaxial compression[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2020, 29(6): 902-922.
- [2] 梁卫国, 曹孟涛, 杨晓琴, 等. 溶浸-应力耦合作用下钙芒硝盐岩蠕变特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2462-2470.

- LIANG Wei-guo, CAO Meng-tao, YANG Xiao-qin, et al. Experimental study on creep of glauberite salt rock under coupled compression and dissolution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(12): 2462-2470.
- [3] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507-2513.
- JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2507-2513.
- [4] 许宏发, 王晨, 马林建, 等. 三轴低频循环荷载下盐岩体积应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 741-746.
- XU Hong-fa, WANG Chen, MA Lin-jian, et al. Volumetric strain of rock salt under triaxial low-frequency cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(4): 741-746.
- [5] WANG J B, ZHANG Q, SONG Z P, et al. Experimental study on creep properties of salt rock under long-period cyclic loading[J]. **International journal of Fatigue**, 2021, 143: 106009.
- [6] 马林建, 刘新宇, 许宏发, 等. 循环荷载作用下盐岩三轴变形和强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 849-856.
- MA Lin-jian, LIU Xin-yu, XU Hong-fa, et al. Deformation and strength properties of rock salt subjected to triaxial compression with cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 849-856.
- [7] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353-1359.
- GUO Yin-tong, ZHAO Ke-lie, SUN Guan-hua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1353-1359.
- [8] 任松, 白月明, 姜德义, 等. 温度对盐岩疲劳特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1839-1845.
- REN Song, BAI Yue-ming, JIANG De-yi, et al. Experimental study of temperature effect on fatigue property of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(9): 1839-1845.
- [9] POUYA A, ZHU C, ARSON C. Micro-macro approach of salt viscous fatigue under cyclic loading[J]. **Mechanics of Materials**, 2016, 93: 13-31.
- [10] FAN J Y, CHEN J, JIANG D Y, et al. Fatigue properties of rock salt subjected to interval pressure[J]. **International Journal of Fatigue**, 2016, 90: 109-115.
- [11] 姜德义, 范金洋, 陈结, 等. 间歇疲劳试验对盐岩疲劳特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1181-1186.
- JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie, et al. Influence of interval fatigue tests on fatigue characteristics of salt rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(7): 1181-1186.
- [12] PENG H H, FAN J Y, ZHANG X, et al. Computed tomography analysis on cyclic fatigue and damage properties of rock salt under gas pressure[J]. **International Journal of Fatigue**, 2020, 134: 105523.
- [13] 陈剑文, 杨春和. 基于细观变形理论的盐岩塑性本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 117-122.
- CHEN Jian-wen, YANG Chun-he. Mesoscopic deformation based plastic constitutive model of salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 117-122.
- [14] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 单轴荷载作用下盐岩声波与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2107-2116.
- LI Hao-ran, YANG Chun-he, LIU Yu-gang, et al. Experimental study of ultrasonic velocity and acoustics emission properties of salt rock under uniaxial compression load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(10): 2107-2116.
- [15] 李树春, 许江, 陶云奇, 等. 岩石低周疲劳损伤模型与损伤变量表达方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1611-1614, 1619.
- LI Shu-chun, XU Jiang, TAO Yun-qi, et al. Low cycle fatigue damage model and damage variable expression of rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1611-1614, 1619.
- [16] WANG Y S, MA L J, FAN P X, et al. A fatigue damage model for rock salt considering the effects of loading frequency and amplitude[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2016, 26(5): 955-958.
- [17] LI T T, PEI X J, WANG D P, et al. Nonlinear behavior and damage model for fractured rock under cyclic loading based on energy dissipation principle[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2019, 206: 330-341.
- [18] LIU X S, NING J G, TAN Y L, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. **International Journal of**

- Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2016, 85: 27-32.
- [19] XIAO J Q, DENG J Q, JIANG F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 47(3): 461-468.
- [20] 郭建强, 黄质宏. 循环荷载作用下岩石疲劳本构模型初探[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1698-1704.
GUO Jian-qiang, HUANG Zhi-hong. Constitutive model for fatigue of rock under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(9): 1698-1704.
- [21] 彭述权, 王培宇, 樊玲, 等. 节理岩体弹塑黏性疲劳本构模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 379-387.
PENG Shu-quan, WANG Pei-yu, FAN Ling, et al. Research on elasto-plastic viscous fatigue constitutive model of jointed rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 379-387.
- [22] 李永辉, 浦少云, 饶军应, 等. 基于循环荷载下西原岩石疲劳模型的改进研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(7): 129-135.
LI Yong-hui, PU Shao-yun, RAO Jun-ying, et al. Study on a modified Nishihara fatigue model for rock with cyclic loading[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2017, 48(7): 129-135.
- [23] 唐欣, 俞缙, 林立华, 等. 岩石疲劳应力等效化及非线性疲劳变形本构模型[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 102-111.
TANG Xin, YU Jin, LIN Li-hua, et al. Equivalent fatigue stress and non-linear constitutive model for fatigue of rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(3): 102-111.
- [24] LIU J H, PU S Y, RAO J Y. Visco-elastoplastic constitutive fatigue model for rocks[J]. **Advances in Civil Engineering**, 2020(1): 4292043.
- [25] 王军保, 刘新荣, 宋战平, 等. 基于反 S 函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2446-2459.
WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, SONG Zhan-ping, et al. A whole process creeping model of salt rock under uniaxial compression based on inverse S function[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(11): 2446-2459.
- [26] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [27] 张桂民, 王贞硕, 刘侯轩, 等. 水平盐穴中压气储能储库关键顶板稳定性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 800-812.
ZHANG Gui-min, WANG Zhen-shuo, LIU Yu-xuan, et al. Research on stability of the key roof above horizontal salt cavern for compressed air energy storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(3): 800-812.
- [28] 赵克烈. 注采气过程中地下盐岩储气库可用性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
ZHAO Ke-lie. Research on the usability of underground salt rock gas storage in the process of gas injection and production[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [29] WANG J B, ZHANG Q, SONG Z P, et al. Mechanical properties and damage constitutive model for uniaxial compression of salt rock at different loading rates[J]. **International Journal of Damage Mechanics**, 2021, 30(5): 739-763.
- [30] TANG Z Q, ZHAI C, ZOU Q L, et al. Changes to coal pores and fracture development by ultrasonic wave excitation using nuclear magnetic resonance[J]. **Fuel**, 2016, 186: 571-578.
- [31] YANG X Y, WENG L, HU Z X. Damage evolution of rocks under triaxial compressions: an NMR investigation[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2018, 22(8): 2856-2863.
- [32] 王军保, 刘新荣, 李鹏, 等. MMF 模型在采空区地表沉降预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2012, 7(3): 411-415.
WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, LI Peng, et al. Study on prediction of surface subsidence in mined-out region with the MMF model[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 7(3): 411-415.
- [33] 潘华, 邱洪兴. 基于损伤力学的混凝土疲劳损伤模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 605-608.
PAN Hua, QIU Hong-xing. Fatigue model of concrete based on continuum damage mechanics[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2006, 36(4): 605-608.
- [34] 葛修润. 周期荷载下岩石大型三轴试件的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11-19.
GE Xiu-run. Study on deformation and strength behavior of the large-sized triaxial rock samples under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1987, 8(2): 11-19.