

冻融循环作用下贺兰山遗址区岩石损伤特征研究

杨有贞^{1,2}, 林青青¹, 冯海燕¹, 赵诣深¹, 马文国^{1,2}

(1. 宁夏大学 物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 固体力学研究所, 宁夏 银川 750021)

摘要: 针对宁夏环境致贺兰山遗址区岩石风化严重的问题, 首先对取自贺兰山遗址区的岩样进行冻融循环试验, 设置循环次数分别为 0、10、20、30、40 次, 测量岩样的质量、纵波波速及有效孔隙率, 并分析冻融循环次数对它们的影响; 然后开展单轴压缩和声发射试验, 绘制应力-应变曲线, 分析其变化规律; 最后基于弹性模量与累积振铃计数, 定义损伤变量, 建立温度-水-力三场耦合作用下的损伤本构模型。研究结果表明, 有效孔隙率和波速降低比率在 20 次循环周期后均有所下降, 此时岩样出现颗粒剥落现象, 二者的变化能够反映岩石表面损伤情况; 损伤变量经历了平稳阶段、缓慢增加阶段和陡然上升阶段, 对应于应力-应变的变化规律; 构建的损伤本构模型能够描述贺兰山岩石的损伤演化过程, 为进一步认识贺兰山遗址岩石的病害机理提供了理论依据。

关键词: 冻融循环; 单轴压缩; 声发射; 三场耦合; 损伤特征; 贺兰山遗址区

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0372-08

Study on damage characteristics of rock in Helan Mountain site under freeze-thaw cycle treatment

YANG You-zhen^{1,2}, LIN Qing-qing¹, FENG Hai-yan¹, ZHAO Yi-shen¹, MA Wen-guo^{1,2}

(1. School of Physics and Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. Institute of Solid Mechanics, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: In view of the serious weathering of rocks in the Helan Mountain site area caused by Ningxia environment, firstly, the freeze-thaw cycle tests were carried out on the rock samples taken from the Helan Mountain site, and the cycle times were set as 0, 10, 20, 30 and 40 times respectively. The mass, longitudinal wave velocity and effective porosity of the rock samples were measured, and the influence of the cycles on them was investigated. Then, uniaxial compression tests and acoustic emission tests were performed; the stress-strain curves were obtained, and their variation laws were analyzed. Finally, the damage variable was defined, based on the elastic modulus and cumulative ringing count, and the damage constitutive model under the coupling action of temperature-water-force was established. The study results show that the effective porosity and the reduction ratio of wave velocity decrease after 20 cycles. At this time, the particle spalling phenomenon occurs in rock samples, and the changes of two indexes can reflect the damage of rock surface. The damage variable has experienced a steady stage, a slowly increasing stage and a steep rising stage, which corresponds to the change law of stress-strain. The constructed damage constitutive model can describe the damage evolution process of rocks in the Helan Mountain, which provides a theoretical basis for further understanding the disease mechanism of rocks in the Helan Mountain site.

Key words: freeze thaw cycle; uniaxial compression; acoustic emission; three field coupling; damage characteristics; the Helan Mountain Site area

0 引言

贺兰山是宁夏和内蒙古的分界线, 山体狭长呈

西南东北走向, 长约 250 km, 宽 15~50 km, 属于干旱大陆季风气候。贺兰山遗址区位于贺兰山东麓, 该区温度最高可达 37 °C, 最低气温约为

收稿日期: 2022-04-28

基金项目: 宁夏自然科学基金(022204050013); 国家自然科学基金项目(11662015; 51768059)。

作者简介: 杨有贞(1979—), 女, 宁夏银川人, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境岩土工程。E-mail: hemai@163.com。

-22.5℃^[1],早晚温差大,加之地势地貌特殊,贺兰山体间充满大量的岩隙水^[2],水分渗入岩石内部,在低温条件下冻结膨胀使岩石结构破坏产生微孔隙、微裂隙,温度升高冰霜融化,水分继续渗入新的孔隙、裂隙,循环往复,形成冻融过程。在这种冻融循环作用下,遗址区岩石表层出现粉化剥落、裂隙发育等多种病害,如图1所示,造成遗址本体表面出现了严重的损伤^[3]。因此,研究冻融循环条件下贺兰山遗址区岩石损伤特性,对岩画的保护具有重要意义。



(a) 颗粒脱落



(b) 表层剥落

图1 贺兰山岩画表层损伤

Fig. 1 Surface damage of Helan Mountain rock painting

近年来,针对岩石冻融损伤特性进行了大量研究。在宏观方面,MOMENI等^[4]对不同类型的花岗类岩石进行冻融试验,结果表明单轴抗压强度是反映岩石冻融损伤的最佳力学参数。GHOBADI等^[5]通过进行冻融试验,研究了经历冻融循环后孔隙率对岩石损伤的影响规律。张慧梅等^[6]利用弹性模量表示损伤变量,建立了冻融作用下岩石的损伤演化方程和本构模型。贾海梁等^[7]分析了饱和砂岩所经历的冻融作用的特点,在疲劳损伤理论的基础上,使用开孔孔隙率表示损伤变量,建立了砂岩在冻融循环作用下的损伤演化方程。王天禹等^[8]对绿砂岩、花岗岩和红砂岩3种不同岩性岩石进行了冻融试验,结果表明岩石的孔隙率和弹性模量很大程度上影响了冻融后岩石抗压强度的降幅。李博文等^[9]通过试验研究了隐晶质玄武岩在不同冻融循环次数下的物理力学特性变化规律与变形破坏特点,得到了损伤变量随冻融次数的拟合关系式。在细观层

面上,刘慧等^[10]对不同冻融循环作用下的砂岩进行巴西劈裂实时声发射监测,基于声发射累积振铃计数值建立了损伤变量,推演了砂岩的损伤演化过程。张功等^[11]通过声发射技术研究了砂质泥岩在正冻过程以及不同温度下(常温及负温)单轴试验中的声发射特征变化,引入Weibull分布函数,建立损伤变量与声发射能量参数的变化关系。刘波等^[12]将声发射能量作为损伤变量,展示了不同温度泥岩在劈裂试验过程中内部损伤过程。可见目前对于冻融作用下岩石损伤变量的研究,在宏观上主要集中于孔隙率、弹性模量、冻融循环次数等因素,细观上主要集中于声发射累积振铃数、声发射累积能量数等,缺乏宏观量与细观量结合起来表征岩石损伤变量的研究。

为此,本文在前人研究的基础上,结合贺兰山遗址区的环境特征,设置了0、10、20、30、40循环次数的冻融试验,测量冻融试验前后岩样的质量、纵波波速和孔隙率,分析冻融循环对于它们的影响;开展单轴压缩试验和声发射试验,定义弹性模量和累积振铃计数耦合作用的损伤变量,分析损伤变量与应力-应变曲线变化的规律,构建温度-水-力三种因素耦合作用下的岩石损伤本构模型,丰富了贺兰山遗址载体损伤机理的认识。

1 试验设计

本次试验岩样取自贺兰山遗址区内,为保证试验结果的可靠性,所选取岩块均为无节理或裂隙的新鲜岩块。用显微镜采用正交偏光的鉴定方法对岩样进行岩矿鉴定分析,鉴定结果显示所取岩样为钙质胶结不等粒长石砂岩,块状构造,主要有石英、斜长石和钾长石、岩屑、方解石、黏土矿物、金属矿物等组成。胶结物以方解石为主,可见少量黏土矿物及铁质不均匀散布。方解石略均匀充填于上述碎屑物间隙中,使岩石呈基底式胶结,部分黏土矿物已变质为绿泥石集合体。

1.1 试样制备与筛选

试验岩样取自贺兰山遗址区内的完整岩块,按照《工程岩体试验办法标准》^[13],将选取的岩块加工成为直径50 mm,高100 mm的标准岩样,精度应符合下列要求:(1)试件两端面不平行度误差不得大于0.05 mm;(2)沿试件高度,直径的误差不得大于0.3 mm;(3)端面应垂直于试件轴线,偏差不得大于0.25°^[13]。同时对加工后的岩样利用材料超声波检测仪进行超声波筛选,选取的岩样波速

平均值为 $5\,189\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，波速误差小于 2%。将 15 个岩样分为 5 组，每组 3 个岩样。

1.2 试验设备及方案

本次试验主要包括物理参数测试、冻融循环试验、单轴压缩声发射试验。具体试验方案如下：(1) 前期工作：试验前利用游标卡尺测量岩样的直径与高度，并测量每个样品的质量。再将 15 个岩样全部利用抽真空饱和装置进行饱和试验，岩样放入压力为 0.8 MPa 的蒸馏水中抽真空 30 min 后，保持压力继续真空饱水 24 h，饱和完成后测得岩样的质量。

(2) 冻融设备及过程：岩样在 TMS 9012 型冻融机中进行冷冻。饱水后的岩样放入冻融机中，根据贺兰山水文变化^[14]并结合规范^[13]，将冻融循环设置为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2 h 温度下降到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 4 h，2 h 温度升到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 4 h，一个循环为 12 h。循环次数为 0、10、20、30、40 次。并对冻融循环结束后的试样分别进行波速、质量的测量。(3) 单轴压缩设备及过程：试验采用 TFD-1000 微机控制岩石多场耦合仪。试验开始前先使压头与岩样接触，当加载至目标值后，开始加载轴向载荷，加载方式为位移加载，速率为 0.002 mm/s ，采集岩石的全过程应力-应变曲线。(4) 声发射设备及过程：试验采用美国物理声学公司 (PAC) 的声发射系统和 AE win 声发射信号数据采集软件。声发射系统设置阈值为 40 db，采样时间间隔 0.1 s，确保数据采集密集提高试验精度。

2 试验结果及分析

2.1 岩样质量变化

岩样质量是物理基本参数之一。制样过程中不易保证每个岩样质量一致，为保证更精准反映冻融作用对岩样质量的影响，定义质量损失率为：

$$S = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： M_0 为岩样的初始质量，kg； M_n 为一定循环次数下岩样质量，kg， $n=0, 10, 20, 30, 40$ 。

图 2 给出了质量损失率与循环次数的关系。

由图 2 可知，岩样在 10 次循环后出现了质量损失，损失率为 0.018%，质量损失较小；30 次与 40 次循环结束后，质量的损失率分别为 0.038% 和 0.057%，每循环增加 10 次，质量损失率增长 0.019%。说明冻融岩样的质量损失率随着循环次数的增加而增长，主要原因为温度-水周期性作用使碎屑颗粒之间失去联结造成重力解体，造成岩石颗

粒脱落，作用时间越长颗粒剥离越厉害，如图 3 所示，冻融机底部出现大量粉末状剥落颗粒。

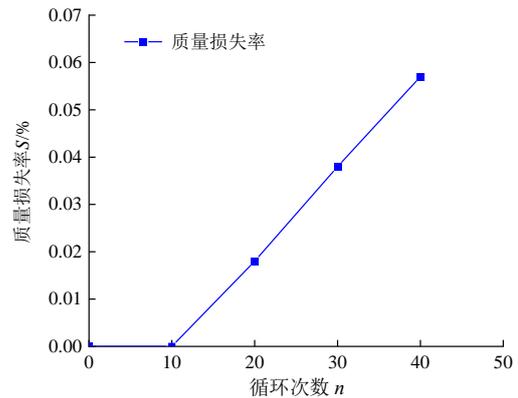


图 2 质量损失率与循环次数的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between mass loss rate and cycle times



(a) 容器内部

(b) 剥落颗粒

图 3 容器底部堆积的剥落颗粒

Fig. 3 Flaking particles accumulated at the bottom of the container

2.2 有效孔隙率变化

为进一步探究岩石内部连通性，引入有效孔隙率，其计算公式为：

$$n_s = \frac{\rho_{nd}}{\rho_w} \times \frac{M_{n3} - M_{n2}}{M_{n2}} \quad (2)$$

式中： ρ_w 为水的密度； ρ_{nd} 、 M_{n2} 、 M_{n3} 为岩样干密度、干质量以及饱水质量， $n=0, 10, 20, 30, 40$ 。

图 4 给出有效孔隙率与冻融循环次数的关系。

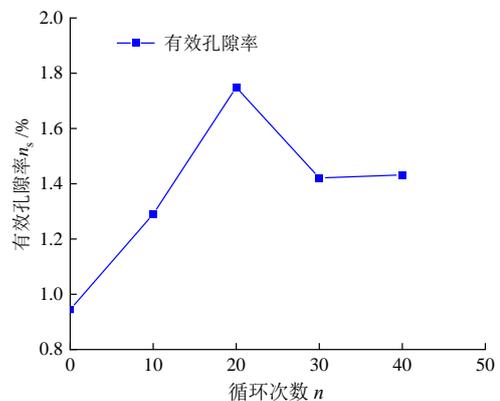


图 4 不同循环次数后岩样有效孔隙率的变化

Fig. 4 Changes of effective porosity of rock samples after different cycles

由图4可知,有效孔隙率在前10个和20个循环次数内呈上升趋势,上升率分别为0.345%与0.459%,后者增加更为明显,达到峰值。而30个循环周期过后有效孔隙率较20个循环周期下降了0.328%,之后有效孔隙率趋于稳定,这是因为温度与水的周期作用使岩样出现颗粒剥落,有效孔隙率的增大与质量损失带来的孔隙率的减小趋于一致。

2.3 波速变化

纵波波速综合反映岩石物理力学特性,定义波速变化率为:

$$R_p = \frac{v_0 - v_n}{v_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_p 为波速变化率; v_0 为岩样初始波速; v_n 为 n 次冻融循环后岩样波速, $n=0, 10, 20, 30, 40$ 。

图5给出了波速变化率与循环次数的关系。由图5可得,冻融循环次数增加时,岩样波速持续下降。冻融循环试验结束后,10,20,30,40次的波速分别降低了2.18%,7.07%,1.01%,3.38%。20次循环周期结束后波速降低比达到最大,之后降幅减小,主要原因为温度与水的耦合作用使岩样颗粒之间联结作用减弱,岩样出现剥落现象,有效孔隙率增加,纵波在岩样内部传播时间增加,导致波速大幅度降低。但随着循环周期的增加,岩样表面颗粒脱落造成了孔隙、裂隙的损失,质量的减少与有效孔隙率的增加达到平衡,故后者趋于稳定,波速变化率减小。

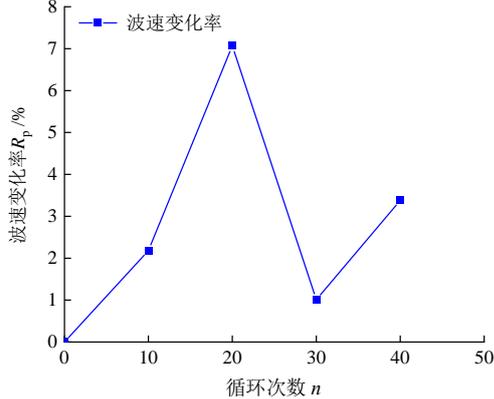


图5 不同循环次数后岩样波速降低比例

Fig. 5 Ratio of wave velocity decrease after different cycles

2.4 弹性模量变化

弹性模量的大小可以反映岩石的整体强度。本文使用切线法计算弹性模量,图6给出了弹性模量与循环次数的关系。从图6中可知,弹性模量随冻融循环次数的增加而逐渐减少。与冻融前相比,10、20、30、40次循环后分别减少了4.71%、12.22%、15.53%和18.54%。

岩石的抗压强度可以用峰值应力来表示。图7为峰值应力随循环次数的变化关系。从图中可知,峰值应力随循环次数的增加不断减小,与上一次目标循环相比,10、20、30和40次循环分别降低了3.99%、10.45%、10.64%和14.51%。

弹性模量和峰值应力随冻融循环的变化说明冻融作用会导致岩石整体强度大幅下降,这是由于冻融过程中,水与温度共同作用导致岩样内部孔隙及裂隙不断扩展,从而降低了遗址区岩石的原有强度。

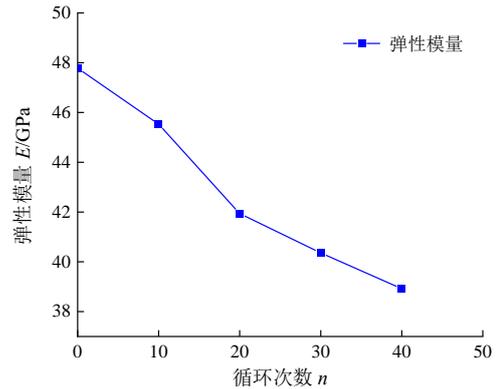


图6 不同循环次数后岩样弹性模量的变化

Fig. 6 Elastic modulus of rock samples after different cycles

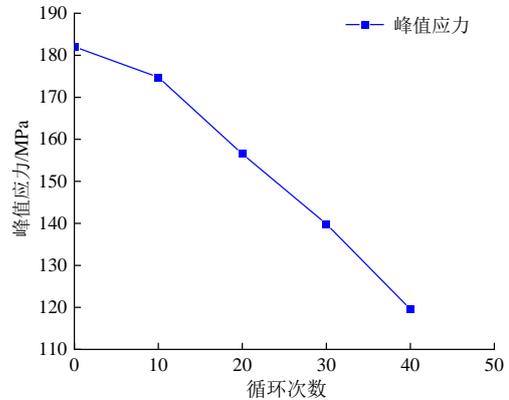


图7 不同循环次数后岩样峰值应力的变化

Fig. 7 Peak stress of rock samples after different cycles

3 冻融损伤岩石损伤本构模型

3.1 声发射累计振铃计数

材料在变形或断裂过程中,以弹性波的形式释放出应变能的现象,称为声发射。声发射累计振铃计数可以反映在单轴压缩过程中岩样内部微观结构的变化情况。图8给出了不同冻融周期下单轴压缩应力和声发射计数随时间变化的曲线。由图8可知,声发射计数变化主要分为4个阶段:(1)计数初始增长阶段:岩样本身存在的微孔隙、微裂隙受

到载荷作用开始闭合,此时声发射计数活跃性低。

(2) 计数稳定增长阶段:随着载荷不断增加,岩样内部开始出现裂纹,声发射计数表现为稳定活跃。该阶段对应岩样弹性变形阶段。(3) 计数快速增长阶段:岩样内部裂纹和孔隙不断发育,出现较大的裂纹和孔隙,此时声发射计数快速增加,该阶段对应岩样单轴压缩曲线中的塑性变形阶段。(4) 计数剧烈增长阶段:岩样持续受到载荷作用,达到峰值应力后失稳破坏,此时声发射计数剧烈增加,该阶段对应岩样单轴压缩破坏曲线中的破坏阶段。

3.2 损伤变量

选取弹性模量的变化作为冻融循环损伤变量 D_n 为:

$$E_n = E_0(1 - D_n) \quad (4)$$

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (5)$$

式中: E_0 为冻融循环前岩样的弹性模量; E_n 为冻融循环 n 次后岩样的弹性模量。

选取声发射累计振铃计数并考虑临界损伤变

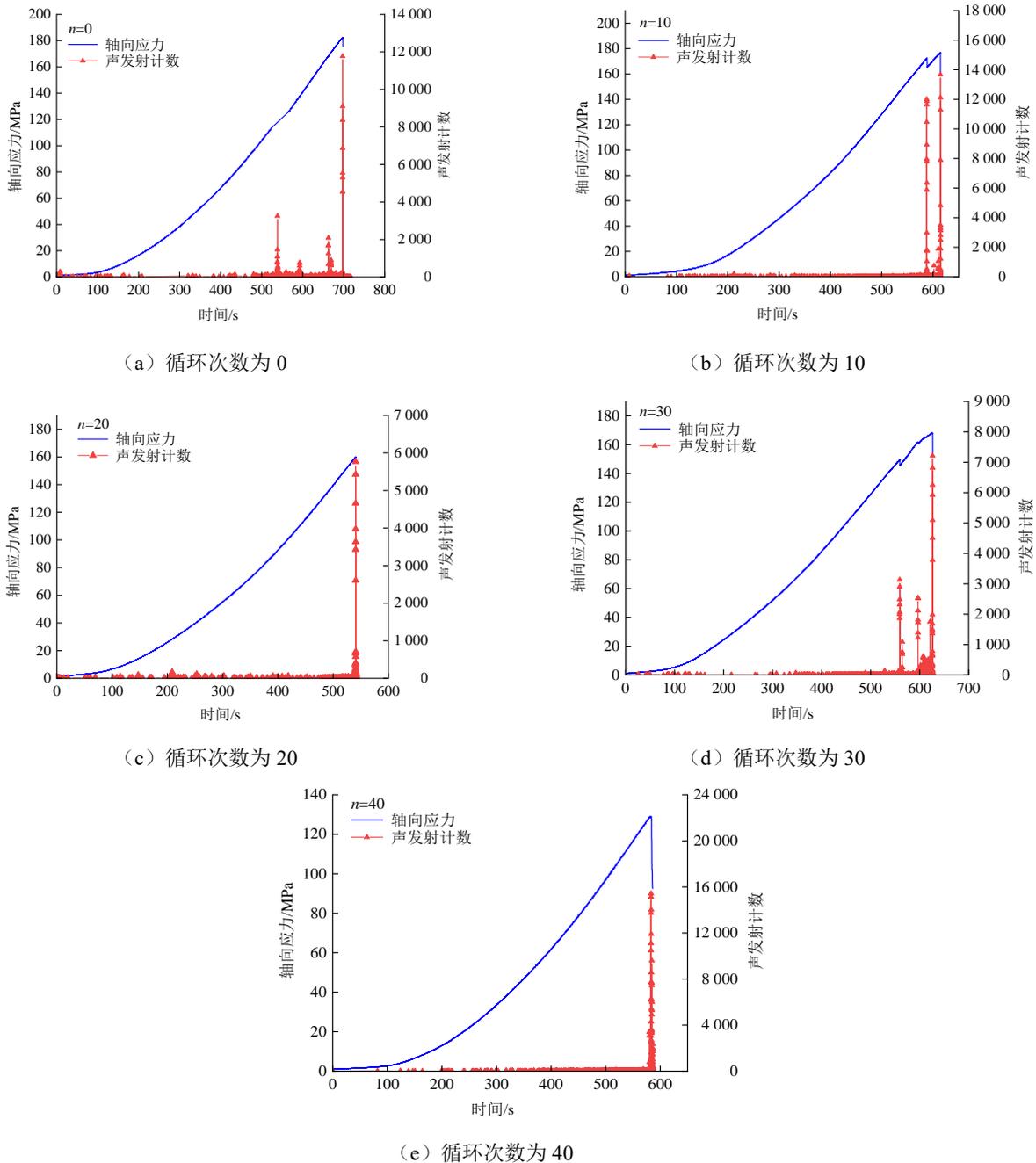


图 8 不同冻融次数下单轴压缩应力和声发射计数随时间变化的曲线

Fig. 8 Curves of uniaxial compressive stress and acoustic emission count with time in different freeze-thaw (F-T) cycles

量^[6], 定义损伤变量 D 为:

$$D = (1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_m}) \frac{C_d}{C} \quad (6)$$

式中: C 为岩石内部颗粒完全破裂时产生的声发射累计振铃计数; C_d 为岩石产生的累计振铃计数; σ_m 为峰值应力, σ_n 为最大振铃计数 C 所对应的应力。

以往学者在建立损伤变量时要么仅考虑宏观量^[15], 如考虑弹性模量、纵波波速以及伸长率等, 要么仅考虑细观量^[10-12], 如考虑 AE 振铃计数, AE 累计能量数以及 AE 能量概率密度等。缺乏将二者结合起来表征损伤变量的研究, 从而无法实现损伤变量的跨尺度定义。鉴于此, 本文联立公式 (5) 与

公式 (6) 定义总损伤变量 D_m :

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} [1 - \frac{C_d}{C} (1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_m})] \quad (7)$$

上式表明冻融岩石在受载时损伤呈非线性增长。利用弹性模量与累积振铃计数耦合定义的损伤变量, 既定义了温度-水周期作用下岩石内部受冻胀力孔隙增大和胶结物流失导致的损伤, 又可以定义岩石内部在加载条件下裂纹发育和扩展的时空演化损伤。两种损伤相互影响, 其耦合作用使总损伤变量 D_m 微弱减小。

根据公式 (7) 可以得出贺兰口岩画载体材料砂岩的损伤变量与应力变化的曲线如图 9 所示。

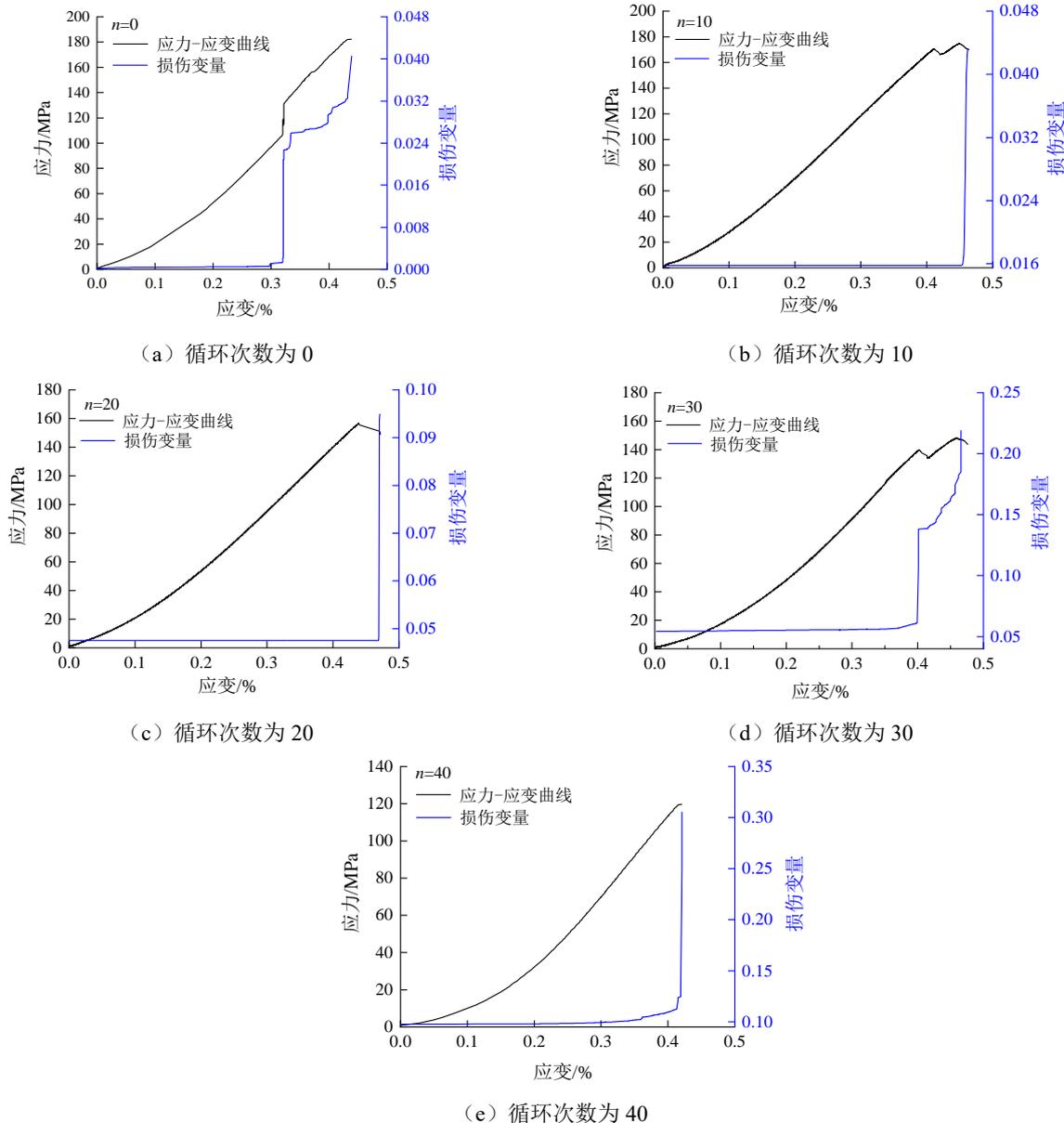


图 9 不同冻融循环次数下岩石损伤变量变化曲线

Fig. 9 Rock damage variables under different freeze-thaw (F-T) cycle times

由图 9 可得, 当损伤变量较小时, 冻融作用对岩样的损伤也较小, 应变为 0 时, 损伤变量最小值

为 0, 最大值为 0.1, 且其变化了 0.1。当损伤变量一定时, 随着循环次数的增加其对应应变值减小,

损伤变量为 0.1 时, 循环 40 次对应的应变为 0, 而循环 0 次的最大损伤冻融变量只能达到 0.041, 冻融作用对岩样的损伤越来越明显。相同的冻融循环次数下, 岩样的损伤随着应变的增大而增加, 且都经历了平稳阶段与缓慢变化阶段以及后续陡然增加的过程, 该过程与应力-应变曲线变化规律相对应。即在受载的初期, 岩样内部的微裂隙及裂纹等缺陷随着应变的增大而闭合, 此阶段损伤值平稳, 损伤曲线趋于平行 x 轴。伴随着应变的增大, 内部裂纹逐渐闭合之后, 岩样强度增大, 损伤变量曲线呈下凹。当应变达到一定程度时, 岩样内部裂纹开始稳定发育, 此时损伤开始加速发育, 损伤陡然增加。从损伤变量曲线的三个阶段可以看出, 基于冻融循环过后的弹性模量和声发射振铃计数耦合的

损伤变量可以良好的反映贺兰山岩样的损伤演化过程, 公式(7)可以作为岩画损伤变量的表征公式。

3.3 损伤本构模型建立及验证

基于损伤变量的岩石应力-应变的本构关系表示为:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D_m) \tag{8}$$

式中: E 为弹性模量; ε 为轴向应变。

将公式(7)代入公式(8), 得到贺兰山岩石在单轴压缩试验下的损伤本构模型:

$$\sigma = E_n \left[1 - \frac{C_d}{C} \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_m} \right) \right] \varepsilon \tag{9}$$

为验证该损伤本构模型的有效性, 将应力的理论计算值与试验值进行比较, 如图 10 所示。

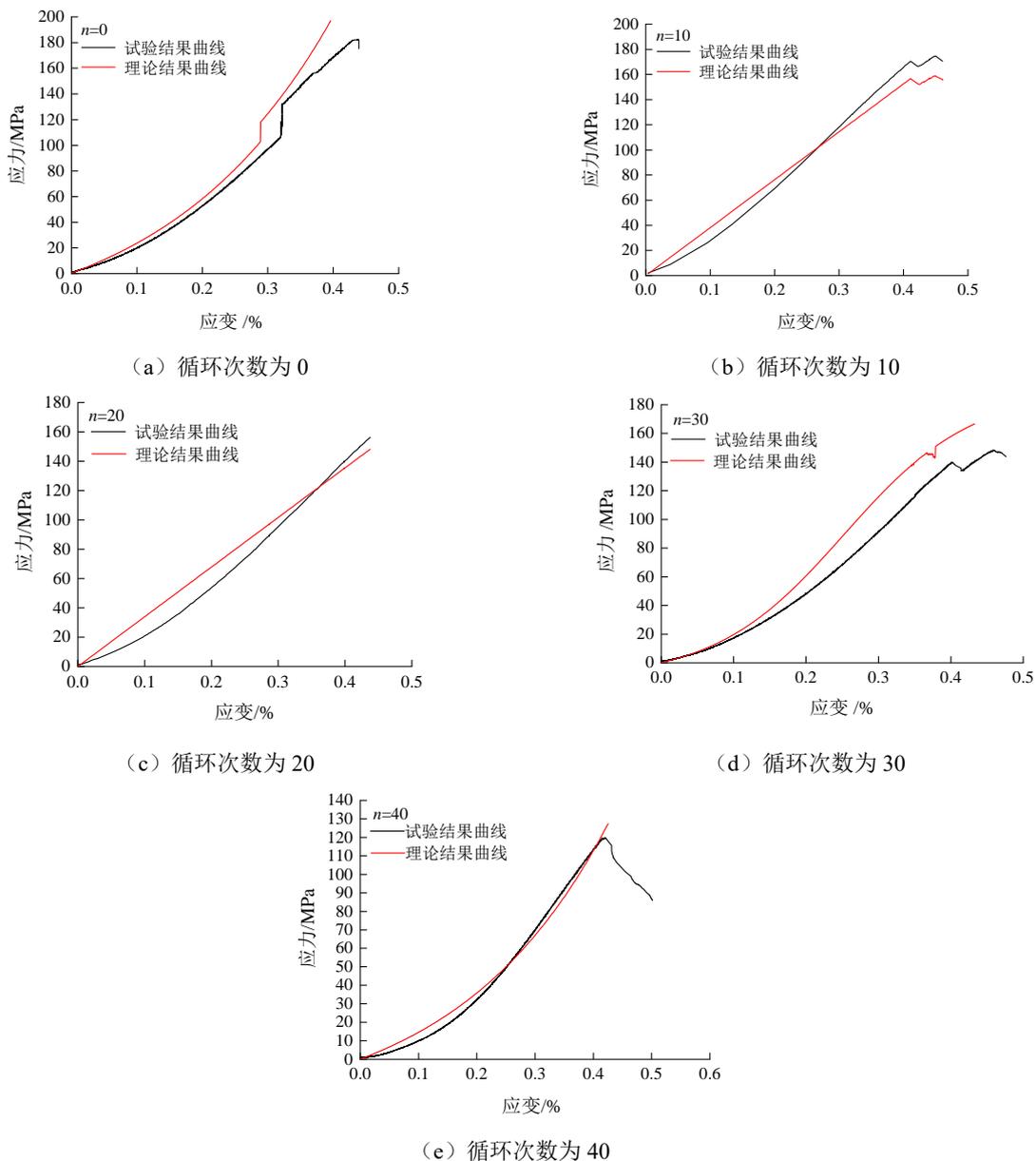


图 10 不同冻融循环次数下应力-应变的模型预测值与实测值比较

Fig. 10 Comparison of predicted and measured stress-strain under different freeze-thaw (F-T) cycles

由图 10 可知,理论结果与试验结果在趋势上吻合较好,能够反映贺兰山岩画载体岩石强度变化特征,进一步证明了该模型的有效性,该本构模型可用于评估贺兰山岩画载体材料的损伤特性。

4 结 论

本文对冻融作用下的完整岩样测量质量、纵波波速和有效孔隙率,之后进行单轴压缩和声发射试验,通过分析每组试验后所得的数据结果,得出以下结论:

(1) 有效孔隙率和波速的变化能够反映岩石表面损伤情况:当岩石出现颗粒剥落时,有效孔隙率及波速降低比例均有所下降。当有效孔隙率与质量损失率趋于一致,波速降低速率与冻融初期较为接近。

(2) 基于冻融循环过后的弹性模量和声发射振铃计数耦合的损伤变量可以较好地反映贺兰山砂岩的损伤演化过程,损伤变量的变化经历了平稳阶段、缓慢增加阶段和陡然上升阶段,与应力-应变曲线变化规律一致。

(3) 实现了损伤变量的跨尺度定义,建立的温度-水-力三场耦合作用下损伤本构模型,可以描述贺兰山岩石的损伤特性,为贺兰山岩画病害机理的认识提供模型参考。

参考文献

- [1] 杨有贞, 张晓霞, 马汉林, 等. 贺兰口岩画风化病害机理[J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27(增刊 1): 31-37.
YANG You-zhen, ZHANG Xiao-xia, MA Han-lin, et al. Study on the weathering mechanism of Helankou rock art[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2015, 27(S1): 31-37.
- [2] 杨有贞, 金梦华, 强文华, 等. 贺兰山岩画区岩石吸水特性试验研究[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2021, 42(1): 29-33.
YANG You-zhen, JIN Meng-hua, QIANG Wen-hua, et al. Experimental study on water absorption characteristics of rock in Helan mountain rock painting area[J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2021, 42(1): 29-33.
- [3] 吕燃. 贺兰口岩画载体风化特征与机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
LV Ran. Weathering characteristics and mechanism study on the carrier of rock paintings in Helankou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [4] MOMENI A, ABDILOR Y, KHANLARI G R, et al. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2016, 75(4): 1-8.
- [5] GHOBADI M H, BABAZADEH R. Experimental studies on the effect of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal sandstone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(3): 1001-1016.
- [6] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471-476.
ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471-476.
- [7] 贾海梁, 刘清秉, 项伟, 等. 冻融循环作用下饱和砂岩损伤扩展模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3049-3055.
JIA Hai-liang, LIU Qing-bing, XIANG Wei, et al. Damage evolution model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3049-3055.
- [8] 王天禹, 李斯涵, 夏晨皓, 等. 冻融循环作用下裂隙岩体力学特性研究[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(10): 6-9.
WANG Tian-yu, LI Si-han, XIA Chen-hao, et al. Study on dynamic property of fractured rocks under freeze-thaw cycles[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(10): 6-9.
- [9] 李博文, 荣冠, 蒙世仟, 等. 冻融循环条件下玄武岩耐久性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 116-121.
LI Bo-wen, RONG Guan, MENG Shi-qian, et al. The durability of basalt under freeze-thaw cycles[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(10): 116-121.
- [10] 刘慧, 蔺江昊, 杨更社, 等. 冻融循环作用下砂岩受拉损伤特性的声发射试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 830-839.
LIU Hui, LIN Jiang-hao, YANG Geng-she, et al. Acoustic emission test on tensile damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 830-839.