

DOI: 10.11779/CJGE201506007

循环单轴应力和循环温度作用下玄武岩力学性质初探

夏才初^{1,2}, 周舒威¹, 胡永生³, 张平阳¹, 周 瑜¹

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000;
3. 中国大唐集团新能源股份有限公司, 北京 100053)

摘 要: 对玄武岩在循环单轴应力-温度作用下的力学性质进行初步的试验研究。开展应力上限为 80% 和 65% 单轴抗压强度、温度上限为 60℃ 和 90℃ 的循环单轴应力-温度试验以及循环后的单轴压缩试验。试验结果表明: 循环应力和循环温度作用具有“叠加”效应; 循环应力上限为 80% 单轴抗压强度时, 玄武岩随循环次数增加逐渐损伤, 在循环中破坏; 应力上限 65% 抗压强度且温度上限 60℃ 时, 玄武岩随循环次数增加逐渐硬化, 在循环中不会发生破坏; 损伤岩样峰值应变经历初始阶段、等速阶段和加速阶段, 残余应变具有较大波动性; 损伤岩样峰值割线模量先迅速降低, 后缓慢降低, 在临近破坏时急剧减小, 应力上限大时峰值割线模量的降低程度大; 应力上限相同, 温度上限大的损伤岩样破坏循环数小; 硬化岩样峰值应变和残余应变随循环次数增加而减小, 峰值割线模量、割线弹性模量和卸载模量随循环次数增加而增大, 温度上限大时岩样模量增加幅度小; 硬化岩样受循环作用后, 抗压强度较初始强度提高; 岩石破坏时峰值应力与峰值割线模量定义的损伤因子线性相关程度高。

关键词: 循环应力; 循环温度; 玄武岩; 力学性质; 损伤

中图分类号: TU458; TD313

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)06-1016-09

作者简介: 夏才初(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学、地下结构以及能源地下工程等方向的研究和教学工作。E-mail: tjxiacbb@126.com。

Preliminary study on mechanical property of basalt subjected to cyclic uniaxial stress and cyclic temperature

XIA Cai-chu^{1,2}, ZHOU Shu-wei¹, HU Yong-sheng³, ZHANG Ping-yang¹, ZHOU Yu¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 3. China Datang Corporation Renewable Power Co., Limited, Beijing 100053, China)

Abstract: The mechanical property of basalt subjected to cyclic uniaxial stress and cyclic temperature is preliminarily studied through laboratory tests. Cyclic uniaxial stress-temperature tests are conducted during which stress upper limit is 80% or 65% of the uniaxial compressive strength and peak temperature is 60℃ or 90℃. Uniaxial compression tests after cycling are also performed. The results exhibit superposition of the effects of cyclic temperature and cyclic stress. The basalt specimens are gradually damaged with the increase in cycle number and fail in the cycles when the maximum stress is 80% of the uniaxial compressive strength. However, the specimens are gradually hardened and do not fail in the cycles when the maximum stress is 65% of the uniaxial compressive strength and the highest temperature is 60℃. The peak strain of a damaged specimen undergoes initial acceleration, steady and acceleration stages, while the residual strains fluctuate. The peak secant modulus of the damaged specimen decreases rapidly in the initial cycles, and then it decreases at a relatively low rate during most of the cycles, and drops sharply when the failure occurs. A higher stress upper limit results in more variations in the peak secant modulus. Failure cycle number is smaller at a larger temperature upper limit. The peak and residual strains of a hardened specimen decrease with the increase in the cycle number. However, the peak secant, secant-elastic and unloading moduli have opposite trends. Higher temperature results in smaller modulus variations. The uniaxial compressive strengths of the hardened specimens increase after stress-temperature cycling. The peak stress has a high linear degree of correlation with the damage factor defined by the peak secant modulus when the specimens fail.

Key words: cyclic stress; cyclic temperature; basalt;

mechanical property; damage

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278378); 国家高技术研究发展计划(863计划)课题(SS2012AA052501)

收稿日期: 2014-09-11

0 引言

在水利水电工程中,岩体在极端复杂条件下的力学性能是影响岩体工程长期稳定性的重要因素之一。而温度作为一种岩体性质的重要影响因素,已经在水工隧洞的设计、计算方面得到重视^[1]。然而在水利工程众多的西部地区,特有的地质条件使工程环境更加恶劣,高寒、周期性昼夜温差大且周期性夏冬温差更大^[2]。在这种环境下,工程中的岩体需考虑温度、特别是周期温度变化产生影响。同时周期性温度变化,在有约束情况下会使岩体产生周期性温度应力,从而对隧洞围岩与洞口边坡的安全性带来不利影响,因此在考虑周期温度影响时也需考虑其带来的周期性应力变化。此外,压气储能是一种具有广阔应用前景的储能和发电技术,其采用压缩空气作为储能和发电载体,在用电低谷时,利用电网中多余电能驱动空气压缩机,把空气压缩并储存于地下洞室;而在用电高峰时,再将高压空气放出,使之与少量气体燃料混合并在气轮机中燃烧而迅速膨胀做功,进而带动发电机发电。在地下压气储能工程领域,压气储能洞室内空气频繁、快速地充入和放出,使洞室产生显著的温度变化,且由于变化的空气压力影响,洞室围岩受循环应力和循环温度作用^[3-4]。因此从水利工程和压气储能工程安全的角度,需要对岩石在循环应力-温度作用下的力学性质展开研究。

迄今为止,国内外研究者们已经针对循环应力或者循环温度对岩石力学性质的影响开展了研究。在循环应力方面,葛修润等^[5-6]完了单轴压缩状态下大理岩、砂岩和花岗岩疲劳破坏变形的试验研究,划分了不可逆变形发展的3个阶段并提出了疲劳破坏的门限值;莫海鸿^[7]进行大理岩和红砂岩循环荷载试验且根据内时理论提出了岩石的疲劳本构模型;Xiao等^[8]研究了循环荷载下岩石损伤变量的演化规律;郭印同等^[9]开展了盐岩在单轴循环荷载下的疲劳试验,发现盐岩的疲劳破坏阈值为单轴抗压强度的75%~80%;杨永杰等^[10]侧重对煤岩的研究,得到循环荷载下煤岩的强度和变形特征;张凯等^[11]进行大理岩的循环加卸载试验并探讨了弹性模量的变化规律;王者超等^[12]通过花岗岩三轴循环荷载试验系统研究了花岗岩疲劳力学特性,并提出了疲劳力学模型。以上这些研究都只是针对常温,而任松等^[13]开展了不同温度下盐岩的循环荷载试验,探索了温度对盐岩疲劳力学性质的影响。总之,目前在循环应力作用下的岩石力学性质研究中还鲜有考虑温度效应。

另外,目前也只有较少的研究针对循环温度作用

对岩石力学性质的影响^[2,14-15]。朱珍德等^[2]开展了高温周期变化与高围压作用下的大理岩力学特性试验研究,发现随循环次数和温度增加,弹模、峰值强度和残余强度下降。方荣^[14]对不同加温温度和加温周期后的大理岩进行单轴压缩,获得了温度循环对应变、弹模以及抗压强度的影响。Mahmutoglu^[15]对砂岩和大理岩进行多次的温度循环,获得了在循环后岩石力学性质衰减规律。由于岩石在循环应力-温度作用下的力学性质较只有循环应力或者循环温度更具复杂性,因此还有待于进一步对岩石进行系统而基本的试验研究。但是至今还未见研究温度周期(循环)变化与循环应力同时作用下岩石力学变形特性这方面的资料,而恰恰这一研究成果对西部水电开发工程及压气储能工程具有重大的实际意义。

本文开展了循环单轴应力-温度试验及循环后的单轴压缩试验,分析玄武岩在不同的循环应力-温度作用下的应力应变过程,研究循环应力-温度作用对玄武岩峰值应变、残余应变、岩石模量以及抗压强度的影响,最后探讨了岩样破坏时峰值应力与以峰值割线模量定义的损伤因子之间的关系。本文研究成果可为深入了解循环应力-温度作用下岩石力学性质和相关工程实践提供参考。

1 循环单轴应力和循环温度岩石试验

1.1 试样制备

试验岩样采自内蒙古乌兰察布市韩勿拉风场,该处是地下压气储能洞库的一个可能场地。为尽量减小岩样离散性的不利影响,岩样取自一完整岩块且位置相近。所采岩样为灰色玄武岩,按照《工程岩体试验方法标准》^[16]进行制备。岩样按水钻法钻取并打磨成直径50 mm,高度100 mm的圆柱试件,试件端面平整度控制在 ± 0.05 mm以内。同时在试验前,对试验岩样进行含水率和干密度测试,测得含水率范围为0.077%~0.1225%,干密度范围为3309~3326 kg/m³。含水率和密度变化范围小,间接说明岩样的离散性较小。

1.2 试验过程

试验分为3个部分:①常规单轴压缩试验;②单轴加卸载及温度循环试验;③应力-温度循环作用后的单轴压缩试验。

首先,为获得岩石的平均单轴抗压强度和最小抗压强度,开展常规单轴压缩试验。单轴压缩试验共采用5个岩样,试验采用WDW-600电子万能试验机进行加载,得到岩样平均单轴抗压强度为67.7 MPa,最小单轴抗压强度为56.7 MPa。试验中最大、最小抗压

强度以及接近平均强度的 3 个岩样的应力 - 应变曲线如图 1 所示。由于本文只关注岩石峰前的力学行为, 图 1 中只给出峰前应力 - 应变曲线。

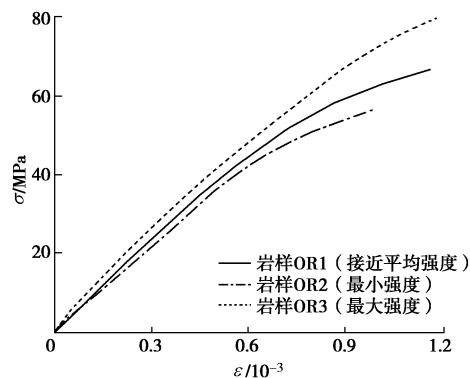


图 1 单轴压缩应力 - 应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of regular uniaxial compression tests

对于循环应力-温度作用的岩石试验, 由于目前的试验技术难以保证岩样升温-降温与加卸载快速同步, 无法使试验中岩石升降温、加卸载实际气压储能过程或者其他工程一一对应, 因此难以实现真正意义上的应力-温度耦合循环试验。故本文采用了一种简化方法, 将一次应力加卸载过程和一次升降温过程作为一次完整的应力-温度循环。按照常规单轴压缩试验结果, 以现有的应力阈值设置试验过程中最大加载应力为岩石平均抗压强度的 80% 和 65%^[5-6, 13], 且不超过最小岩石强度, 这样, 应力加卸载过程 (如图 2 所示) 为: 对岩样单轴加载到 55 MPa (或 45 MPa), 然后卸载至压力为 0。同时, 在加卸载过程中采用电阻应变片法获取岩样的应变。而加温、降温过程则为: 在 101A 电热鼓风加温炉 (温度波动度 $\leq 1^{\circ}\text{C}$, 温升 $50^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$) 中将岩样加热到指定温度 (60°C 或 90°C), 保持该温度 1 h 使岩样均匀受热, 然后拿出在空气中自然冷却 2 h, 使岩样温度完全降低到室温 (15°C)。不断地重复单轴应力加卸载和加温、降温过程, 使岩样受到循环应力-温度作用。试验过程中, 岩样应变采用高温应变片 (应变片在温度 300°C 以下正常工作) 测量, 并且通过合理的桥路搭接来减小温度对应变片的影响。

为保证较小离散性, 应力-温度循环试验总共只采用 10 个岩样, 每个岩样对应的编号以及在试验中对应的最大应力和最高温度如表 1 所示。

表 1 试验过程中各岩样对应的最大应力和温度

Table 1 Maximum temperatures and stresses of rock specimens

岩样	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大应力/ MPa
T1S1-1, T1S1-2	90	45
T1S2-1, T1S2-2	90	55
T2S1-1, T2S1-2, T2S1-3	60	45
T2S2-1, T2S2-2, T2S2-3	60	55

另外在目前的研究中, 循环温度-应力作用下的岩石破坏机理尚不清楚, 因此较难估计岩石在循环温度-应力作用下的循环寿命。同时从试验过程可以看出, 一次应力-温度循环的试验时间较长, 因此需要在一定的循环次数后终止应力-温度循环试验。随后, 在研究中开展了应力-温度循环试验后的单轴压缩试验, 从而确定在循环后岩样的抗压强度。

2 应力-温度循环中岩石应变

2.1 应力应变曲线

按照前述试验过程进行试验, 当岩石在循环过程中受到的最大应力为 55 MPa 时, 循环过程中的应力造成的损伤、劣化效应明显, 岩样在应力-温度循环过程中破坏, 此时岩样经历的循环数一般较小, 而破坏时的应力一般接近设定的应力上限 (55 MPa)。T1S2-1 (55 MPa , 90°C) 是这类岩样中的典型岩样, 其破坏就发生在应力-温度循环过程内, 该岩样从初始循环到破坏的应力应变曲线在图 3 中给出。需要说明的是, 由于应变采用非连续测量 (循环中有升降温作用), 得到的应变未能如文献[5, 6]般具有连续的变化趋势, 但每一加卸载循环内的应力 - 应变仍可获得, 因此本文只给出了这些循环内的应力 - 应变情况。

从图 3 中可以看出, 随着循环次数的增加, 岩样应力 - 应变曲线往右偏移, 出现了明显的损伤, 峰值应变增大, 弹性模量减小, 且每个循环均出现了不可逆的塑性应变。而在试验过程中, 当损伤加剧到一定程度时, 试件突然脆性破坏。另外, 如果将岩样总的

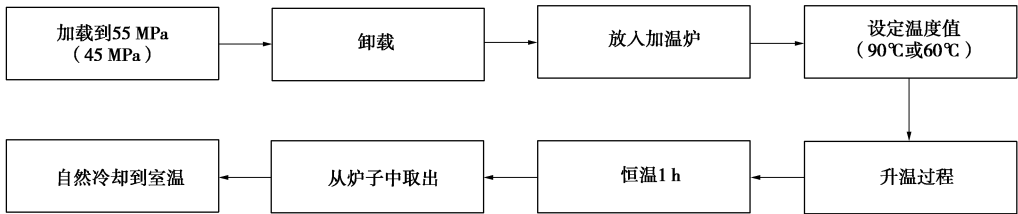


图 2 一次应力-温度试验过程

Fig. 2 One cycle of stress-temperature tests

不可逆应变看作是每个循环内不可逆应变的叠加, 这时总不可逆应变增大, 与文献[5~13]是一致的。

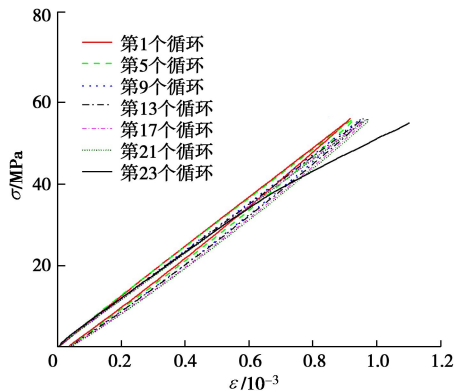


图3 岩样 T1S2-1 应力 - 应变曲线 (55 MPa, 90°C)

Fig. 3 Stress-strain curves of Sample T1S2-1, which failed in cycles (55 MPa, 90°C)

在循环应力 - 应变过程中, 当所受最大应力为 45 MPa 且所受最高温度为 60°C 时, 岩样在循环过程中不会发生破坏。以岩样 T2S1-1 (45 MPa, 60°C) 为例, 图4给出了该岩样从初始循环到第21个循环的应力 - 应变曲线。从图中可以看出, 随着循环次数的增加, 应力 - 应变曲线往左偏移, 峰值应变减小, 弹性模量增大, 这样可以认为岩样出现了“硬化”的特征, 即“负损伤”。此处, “负损伤”可借助其在预应力混凝土中的应用进行理解^[17], 循环温度和循环应力作用使存在的微裂缝和微孔隙闭合, 从而使岩样实际受压面积增大, 也可以说应力和温度的施加使岩石的弹性模量增大, 此时的损伤变量是一负值, 因而岩石处于“负损伤”状态, 也即是“硬化”状态。

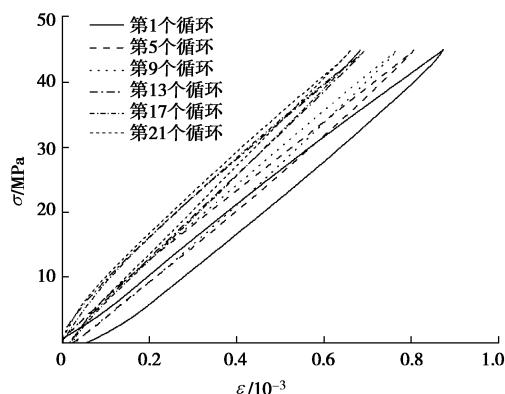


图4 岩样 T2S1-1 应力 - 应变曲线 (45 MPa, 60°C)

Fig. 4 Stress-strain curves of Sample T2S1-1, which failed in cycles (45 MPa, 60°C)

而当岩样受应力上限 45 MPa 和温度上限 90°C 的循环应力-温度作用时, 岩样应力 - 应变未如图3和图4一般在相同应力-温度条件下具有明显的变化趋势, 岩样 T1S1-1 随着循环次数的增加而不断损伤, 但岩样

T1S1-2 随循环次数的增加而产生“负损伤”。岩样 T1S1-1 岩样的应力 - 应变曲线随循环次数的增加不断往峰值应变增加的方向偏移, 而后在第8个循环发生破坏。而岩样 T1S1-2 不断硬化, 应力 - 应变曲线随循环次数的增加逐渐变陡, 峰值应变减小。

根据葛修润等^[5-6]的研究, 岩石受周期荷载作用存在“门槛值”, 当周期荷载上限应力值高于某值时, 岩石才会有疲劳损伤。而当荷载上限值低于“门槛值”时, 无论荷载作用多少个循环岩石都不会破坏。这时小应力的循环荷载作用有使岩样变硬的趋势^[12]。当岩石受循环温度作用时, 朱珍德等^[2]认为循环温度作用是一种周期疲劳作用, 会造成岩石峰值强度随周期次数的增加而减小, 岩石的力学性质逐渐劣化, 并且温度疲劳使初始温度造成的损伤加剧, 所加温度越高, 强度降低, 损伤越明显。这里, 将岩石在应力循环和温度循环下的研究结果同本文的初步试验结果对比, 试验结果初步验证了循环温度与循环应力对岩石的损伤具有“叠加”效应, 而循环温度作用加剧了岩石在循环应力作用下的损伤。玄武岩岩样在应力上限 55 MPa 的循环应力作用下, 由于应力上限接近单轴抗压强度, 高于疲劳“门槛值”, 故岩样随循环次数的增加而逐渐损伤劣化。而循环温度 (60°C 和 90°C) 的作用加剧了岩样损伤。但当岩石处于最大应力 45 MPa 的循环应力作用下, 由于荷载上限只为抗压强度的 65%, 低于疲劳“门槛值”, 循环应力作用下岩样具有“变硬”的趋势, 而循环温度作用减弱了此种趋势。当循环的最高温度为 60°C 时, 温度效应不明显, 岩样硬化, 即出现了如图4所示的应力 - 应变曲线变化趋势。但当循环的最高温度为 90°C 时, 温度效应已较为明显。这可参见文献[14]中的大理岩试验, 20°C~100°C 的循环温度已使大大理岩发生较为明显的损伤, 弹性模量减少较明显。循环应力效应与循环温度效应的相对强弱关系决定了岩石性质随循环次数的发展趋势, 这也是岩样在应力上限 45 MPa 和温度上限 90°C 的循环应力-温度作用下呈现出不同损伤趋势的原因。

2.2 循环应力-温度作用下峰值应变

将循环应力-温度作用下的岩样按照损伤趋势进行归类, 一类为损伤岩样, 包括在循环过程中受最大应力为 55 MPa 的全部岩样, 或受最大应力 45 MPa, 最高温度 90°C 的部分岩样 (岩样 T1S1-1)。损伤岩样对应的应力 - 应变曲线与图3类似, 曲线往右偏移。另一类为硬化岩样, 包括在循环过程中受最大应力 45 MPa, 最高温度 60°C 的全部岩样, 或最大应力 45 MPa, 最高温度 90°C 的部分岩样 (岩样 T1S1-2)。硬化岩样对应的应力 - 应变曲线与图4类似, 曲线往左偏移。

图5给出了典型损伤岩样在应力-温度循环过程

中峰值应变随循环次数的变化。从图中可以看出, 损伤岩样在循环过程中峰值应变随循环次数的增加而增加, 峰值应变的变化规律与葛修润^[6]得到的循环荷载作用下岩石的轴向变形三阶段发展曲线相似。循环应力-温度作用下, 损伤岩样也经历了 3 个阶段: 初始阶段、等速阶段和加速阶段。在初始阶段岩样峰值应变增加较为迅速, 然后在等速阶段峰值应变缓慢增加, 直到在加速阶段峰值应变再次迅速增加。在 3 个阶段中, 初始阶段的循环数占全部循环数的比例较小。另外, 从图中也可看出, 应力上限大时, 破坏时的峰值应变也大。

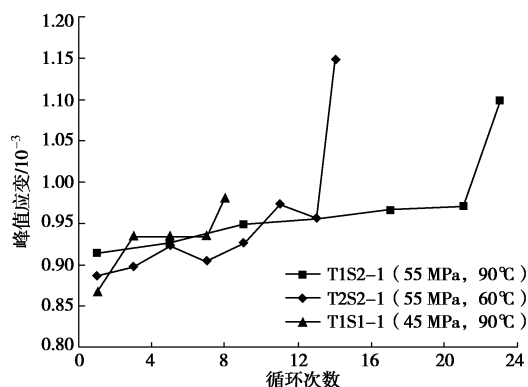


图 5 损伤岩样峰值应变随循环次数的变化

Fig. 5 Peak strains of damaged rock specimens with increase in cycle number

图 6 给出了典型硬化岩样在应力-温度循环过程中峰值应变的变化情况。从图中看出, 硬化岩样在循环过程中峰值应变随循环次数的增加而减小。在初始的几个循环内, 峰值应变变化较大, 但随着循环次数的增加, 峰值应变趋于平缓。同时, 在相同循环应力下, 最高温度为 90°C 的循环温度造成的岩样损伤效应大于最高温度为 60°C 的岩样, 较大循环温度造成较大的峰值应变。

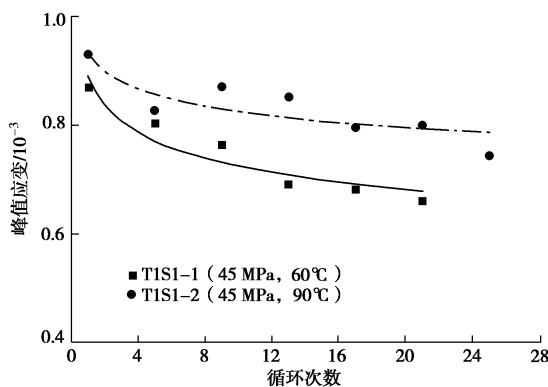


图 6 硬化岩样峰值应变随循环次数的变化

Fig. 6 Peak strains of hardened rock specimens with increase in cycle number

2.3 循环应力-温度作用下残余应变

在循环应力-温度作用下, 岩样变形的弹性部分在卸载的过程中得到恢复, 然而残余变形 (又称不可逆变形、塑性变形) 会保留下来。残余应变的大小、增长趋势可反映岩石的疲劳性能, 且与损伤直接相关。图 7 给出了典型损伤岩样在循环应力-温度作用过程中的残余应变变化情况, 然而该图显示损伤岩样的残余应变在循环过程中呈现出很大的波动性。

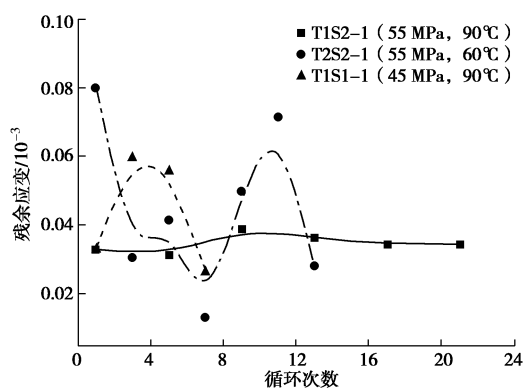


图 7 损伤岩样残余应变随循环次数的变化

Fig. 7 Residual strains of damaged rock specimens with increase in cycle number

图 8 给出了典型硬化岩样在循环应力-温度作用过程中的残余应变变化情况。从图 8 中可以看出, 虽然岩样残余应变也略微波动, 但随着循环次数的增加, 岩样的残余应变逐渐减小。在初始几个循环内, 残余应变减小的速率较快, 而后随着循环次数的不断增加, 残余应变减小的速率逐渐减小, 残余应变趋于平缓。

图 7, 8 呈现了不同的变化规律, 其原因在于残余应变是岩样微裂隙扩展的具体体现, 与循环应力和循环温度影响的程度有关。损伤岩样的损伤受循环应力和循环温度双重控制, 两种控制下岩样损伤演化方式尚不明确, 因此造成如图 7 所示的波动。但对于硬化岩样, 其硬化的规律主要受循环应力控制, 因此残余应变具有变小的趋势^[12]。

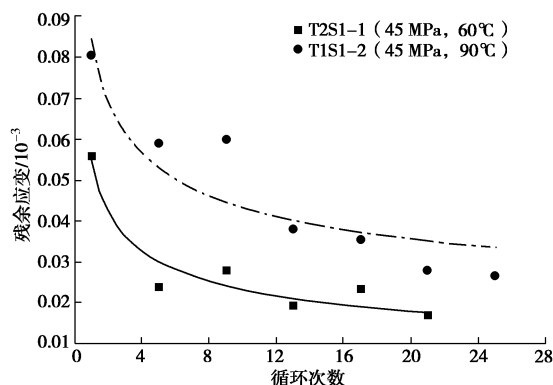


图 8 硬化岩样残余应变随循环次数的变化

Fig. 8 Residual strains of hardened rock specimens with increase in cycle number

3 循环应力-温度对岩石模量的影响

3.1 模量定义

岩石模量是岩石重要的力学性质, 在循环应力-温度作用下, 岩样的模量发生变化。定义岩石的峰值割线模量为一个应力循环内峰值应力与峰值应变的比值, 而根据《工程岩体试验方法标准》^[16]定义岩石割线弹性模量为峰值应力的一半与其对应应变的比值。另外, 卸载模量为峰值应力与弹性应变(峰值应变与残余应变之差)的比值。这样, 本文将在以下小节中分析循环应力-温度作用下岩样峰值割线模量、割线弹性模量和卸载模量的变化情况。

3.2 损伤岩样

图9所示为循环应力-温度过程中典型损伤岩样模量的变化情况。对于图9(a)给出的峰值割线模量, 在循环过程中, 损伤岩样峰值割线模量先迅速降低, 然后在中间的循环内缓慢降低, 最终在临近破坏时又突然急剧减小。同时岩样受应力上限55 MPa的循环作用时峰值割线模量的降低程度要大于应力上限为45 MPa时割线模量的降低程度。

图9(b)所示为循环应力-温度过程中典型损伤岩样割线弹性模量的变化情况。在循环过程中, 损伤岩样割线弹性模量只是先迅速降低, 然后随循环次数的增加而缓慢降低。图9(c)给出了循环应力-温度作用下, 典型损伤岩样的卸载模量的变化情况。与峰值割线模量和割线弹性模量不同的是, 损伤岩样卸载模量降低的程度低, 卸载模量略微波动并以相对稳定的速率随循环次数的增加而降低, 直至试样破坏。

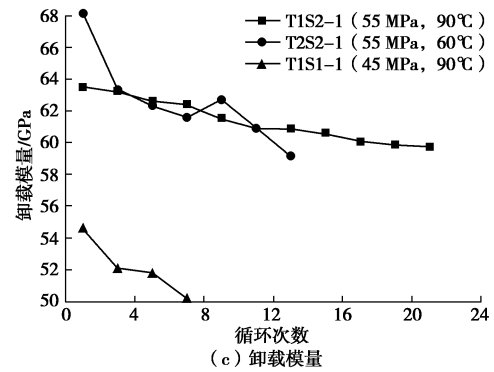
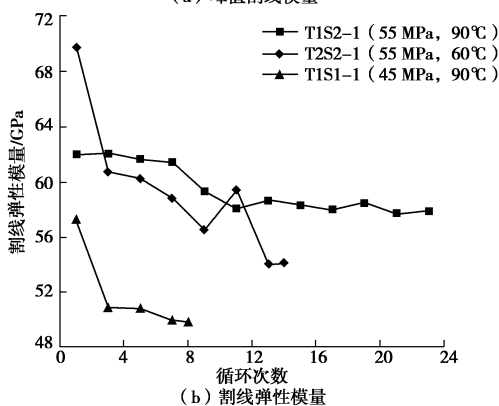
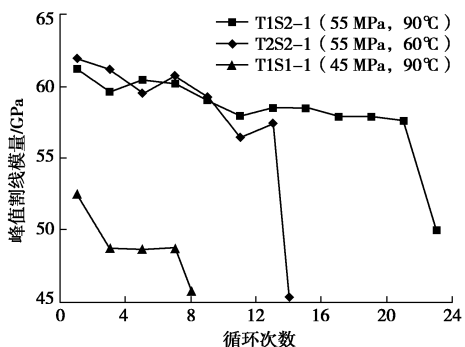
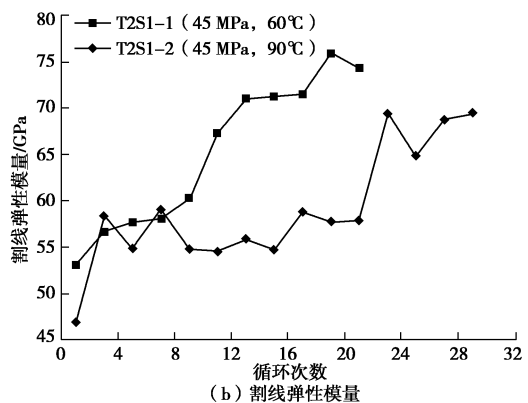
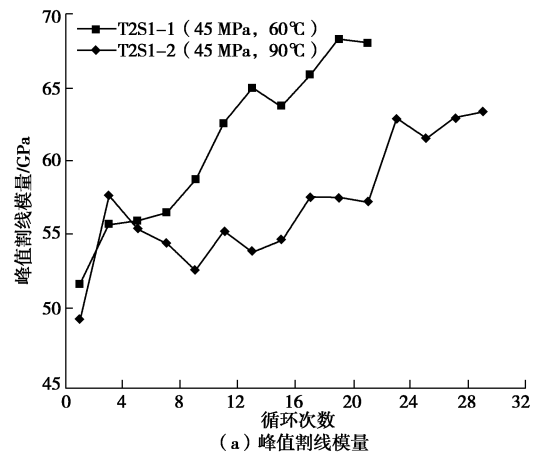


图9 损伤岩样模量随循环次数的变化

Fig. 9 Moduli of damaged rock specimens with increase in cycle number

3.3 硬化岩样

图10所示为循环应力-温度过程中典型硬化岩样的模量变化情况。从图10中可以看出, 硬化岩样的峰值割线模量、割线弹性模量以及卸载模量的变化规律是一致的, 在循环过程中, 随循环次数增加硬化岩样模量不断地增大。当岩样受最高温度90°C的循环作用时, 由于温度的损伤效应, 岩样模量出现较大波动, 但最终模量增加的程度要小于受最高温度60°C循环作用下模量的增加程度。此外, 最高温度为60°C时, 模量基本一直上升, 但在最高温度为90°C时, 模量的增长呈倒“S”型, 在前面几个循环内先上升再下降, 在下降到一定程度后再随循环次数增加而上升, 但在循环时间内岩样模量总体上呈上升趋势。



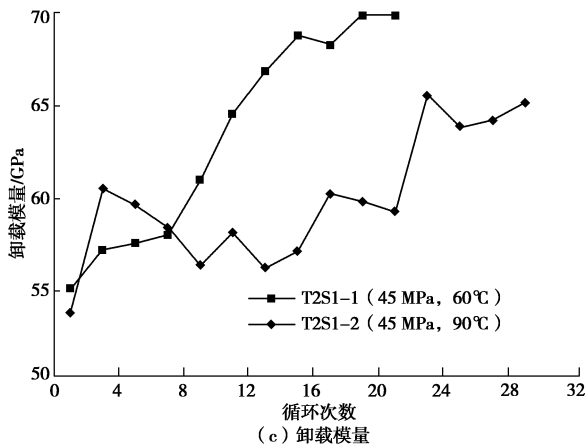


图 10 硬化岩样模量随循环次数的变化

Fig. 10 Moduli of hardened rock specimens with increase in cycle number

此外，通过对比图 9，10，发现由于岩石模量定义的不同，岩样 3 个模量变化趋势不大相同。割线弹性模量和卸载模量接近对弹性模量的概念，两者的变化趋势较为接近，但峰值模量的计算采用峰值应力和峰值应变，而峰值附近岩样损伤最为明显，不同循环内岩样在峰值处的行为与接近弹性段的行为不一致，由此造成了割线模量同割线弹性模量、卸载模量的变化趋势不太相同。

4 循环应力-温度对岩石强度的影响

4.1 损伤岩样破坏时循环数

当岩样在循环内破坏时（对应损伤岩样），岩样发生破坏时的峰值应力接近设定的最大应力，这时难以对循环应力-温度作用中岩样的抗压强度进行估计，循环内破坏的岩样强度衰减可通过循环次数间接反映。

损伤岩样破坏时对应的破坏应力及循环数如表 2 所示，从表 2 中可以看出，当最大应力为 55 MPa，最高温度为 90℃时，损伤岩样破坏时的循环数较稳定，平均值为 23。而在最大应力 55 MPa、最高温度 60℃的情况下，岩样破坏时的循环数则波动较大，平均破坏循环数为 25。最大应力 55 MPa，不同温度循环作用下的破坏循环数接近，这也说明了在应力上限超过疲劳阈值的应力-温度循环过程中，当温度较小（如不大于 100℃）且相差不大时，岩石性质随循环次数的发展趋势主要受应力控制，且作用温度大时破坏循环数小于作用温度小时。而对于岩样 T1S1-1，可能是其内部带有明显初始缺陷，造成岩样内部微裂纹在应力-温度作用下迅速扩展，进而岩样在温度-应力循环中迅速损伤、破坏。

4.2 循环后岩石单轴压缩强度

对于硬化岩样，由于其在循环过程内岩石模量逐

渐增加，在循环内相同循环应力作用下岩样难以破坏，因此在经过一定的循环次数后直接进行单轴压缩试验，从而获得在循环后的单轴压缩强度。图 11 给出了相关硬化岩样的试验结果及初始单轴压缩强度的对比情况。结果表明尽管受到的应力、温度、循环数以及岩样初始割线弹性模量不同，但这些岩样在受循环作用后的抗压强度都较初始强度有了明显的提高。在较小应力的反复挤压作用下，硬化岩样的岩石颗粒被不断压密，使岩石矿物、颗粒之间的黏结力加强，岩石内部的微裂隙在反复作用下闭合，这是硬化岩样强度提高的主要原因。

表 2 损伤岩样破坏时循环数

Table 2 Cycle numbers for failure of damaged rock specimens				
岩样编号	最高温度 / (℃)	最大应力 / MPa	破坏时应力 / MPa	破坏时循环数
T1S1-1	90	45	44.9	8
T1S2-1	90	55	54.6	23
T1S2-2	90	55	53.8	23
T2S2-1	60	55	52.4	14
T2S2-2	60	55	51.9	35
T2S2-3	60	55	49.6	26

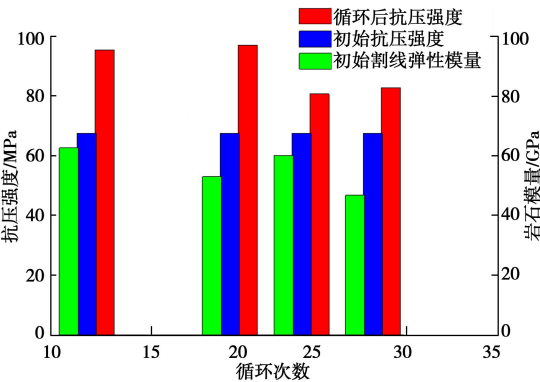


图 11 硬化岩样循环后抗压强度对比

Fig. 11 Comparison of compressive strengths of hardened rock specimens after cycling

4.3 破坏时峰值应力与损伤因子的关系

目前的研究中经常用损伤因子来定量考量循环应力或者循环温度的作用^[18]，这里，根据岩石的峰值割线模量来定义损伤因子^[18]：

$$D_n = 1 - E_n / E_0 \quad , \quad (1)$$

式中， D_n 为损伤因子， E_n 为岩石受多次循环应力-温度作用后的峰值割线模量， E_0 是初始岩石峰值割线模量。

将岩样破坏时根据峰值割线模量计算得到的损伤因子和破坏时的峰值应力绘于图 12 中。如前文所述，损伤岩样在循环内破坏，因此大部分岩样破坏时峰值强度在 55 MPa 附近，峰值应力与损伤因子的关系不明显。但对所有岩样的峰值应力和损伤因子进行线性

拟合, 相关系数为 0.95, 表明破坏时峰值应力和损伤因子线性相关程度高, 应力-温度循环过程中岩石强度与损伤因子具有一定的线性相关度。

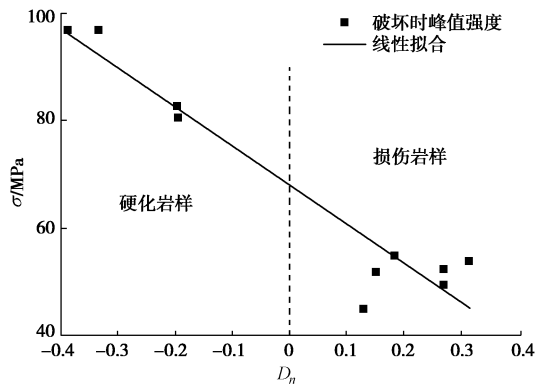


图 12 破坏时峰值应力与损伤因子的关系

Fig. 12 Relationship between failure peak stress and damage factor

5 结论和展望

开展了应力上限分别为 80%和 65%单轴抗压强度、温度上限为 60℃和 90℃的循环应力-温度试验和循环后的单轴压缩试验, 初步研究玄武岩在循环应力-温度作用下的力学性质, 得到以下 5 点结论。

(1) 循环应力和循环温度作用具有“叠加”效应。玄武岩循环应力上限为 80%单轴抗压强度时, 玄武岩随应力-温度循环次数增加逐渐损伤, 在循环过程中破坏。应力上限为 65%抗压强度且温度上限为 60℃时, 玄武岩随循环次数增加逐渐“硬化”, 在循环过程中不会发生破坏。

(2) 损伤岩样峰值应变发展经历 3 个阶段: 初始阶段、等速阶段和加速阶段, 残余应变在循环中波动较大。硬化岩样峰值应变随循环次数增加而减小, 残余应变随着循环次数增加而减小。

(3) 损伤岩样峰值割线模量先迅速降低, 后缓慢降低, 最终在临近破坏时急剧减小。应力上限 80%单轴抗压强度时峰值割线模量的降低程度大于应力上限为 65%单轴抗压强度时。

(4) 硬化岩样峰值割线模量、割线弹性模量和卸载模量随循环次数增加而增大。最高温度为 90℃的岩样模量增加程度小于最高温度 60℃时。

(5) 应力上限相同, 温度上限大的损伤岩样破坏循环数小。硬化岩样受循环作用后, 抗压强度较初始强度提高。岩石破坏时峰值应力与峰值割线模量定义的损伤因子线性相关程度高。

本研究是针对循环应力和循环温度作用下岩石力学性质的初步试验研究, 并且采用了已有的应力门槛

值, 因此开展大量更为符合实际的岩石力学试验、确定岩石损伤和硬化的温度-应力门槛值及提出相应的损伤演化模型是未来需要进一步开展的工作。

参考文献:

- [1] 蔡晓鸿, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (CAI Xiao-hong, CAI Yong-ping. Structural stress calculation of hydraulic pressure tunnel[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 朱珍德, 方 荣, 朱明礼, 等. 高温周期变化与高围压作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2279 - 2284. (ZHU Zhen-de, FANG Rong, ZHU Ming-li, et al. Study of mechanical performance of marble under high pressure and cyclic temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2279 - 2284. (in Chinese))
- [3] ALLEN R D, DOHERTY T J, FOSSUM A F. Geotechnical issues and guidelines for storage of compressed air in excavated hard rock caverns[R]. Springfield: Pacific Northwest Laboratory, 1982.
- [4] 周舒威, 夏才初, 张平阳, 等. 地下压气储能圆形内衬洞室内压和温度引起应力计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2025 - 2035. (ZHOU Shu-wei, XIA Cai-chu, ZHANG Ping-yang, et al. An analytical approach for stress induced by internal pressure and temperature of underground compressed air energy storage in a circular lined rock cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2025 - 2035. (in Chinese))
- [5] 葛修润, 蒋 宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1581 - 1585. (GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1581 - 1585. (in Chinese))
- [6] 葛修润. 周期荷载作用下岩石疲劳破坏及变形发展规律研究[C]// 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 23 - 31. (GE Xiu-run. Study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[C]// Proceeding of the 8th National Academic Conference of Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2004: 23 - 31. (in Chinese))
- [7] 莫海鸿. 岩石的循环试验及本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(3): 215 - 224. (MO Hai-hong. Investigation of cyclic loading tests and constitutive relation

- of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(3): 215 - 224. (in Chinese))
- [8] XIAO J Q, DING D X, JIANG F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2010, 47(3): 461 - 468.
- [9] 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 Ying-tong, ZHAO Ke-lie, SUN Guan-hua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristic of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1353 - 1359. (in Chinese))
- [10] 杨永杰, 宋 杨, 楚 俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 201 - 205. (YANG Yong-jie, SONG Yang, CHU Jun. Experimental study on characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 201 - 205. (in Chinese))
- [11] 张 凯, 周 辉, 冯夏庭, 等. 大理岩弹塑性耦合特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2425 - 2434. (ZHANG Kai, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Experimental research on elastoplastic coupling character of marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2425 - 2434. (in Chinese))
- [12] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1888 - 1900. (WANG Zhe-chao, ZHAO Jian-gang, LI Shu-cai, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1888 - 1900. (in Chinese))
- [13] 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 rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1839 - 1845. (in Chinese))
- [14] 方 荣. 温度周期变化作用下大理岩宏观细观力学变形试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (FANG Rong. The study on the marble macroscopic and mesoscopic mechanical deformation characteristics under the periodical change of temperature[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [15] MAHMUTOGLU Y. Mechanical behavior of cyclically heated fine grained rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(3): 169 - 179.
- [16] GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 2013. (GB/T 50266 — 2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. 2013. (in Chinese))
- [17] 熊辉霞, 司马玉州, 张耀庭. 基于损伤理论的预应力混凝土梁弹性模量分析[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 2): 217 - 220. (XIONG Hui-xia, SIMA Yu-zhou, ZHANG Yao-ting. Elastic modulus of prestressed concrete beam based on damage mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S2): 217 - 220. (in Chinese))
- [18] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990. (XIE He-ping. Damage mechanics of rock and concrete[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990. (in Chinese))