

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1429

高温-冷却-冲击循环下花岗岩物理损伤 及力学劣化试验研究

詹金武¹, 周亚来¹, 王 雨², 黄 明³, 江 松¹

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252059; 3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘 要: 高温岩石经不同冷却方式冷却后的力学特性直接影响着深地岩土工程施工的安全性。以中风化花岗斑岩为研究对象, 对 400 °C 下循环自然冷却和遇水冷却试样展开单轴压缩试验和循环动态冲击试验, 对比分析花岗岩力学性质的变化规律, 并基于 Logistic 分布规律, 引入受荷损伤变量和热循环损伤变量建立花岗岩统计损伤本构模型, 确定了相应参数表达式, 验证了本构模型的适用性与合理性, 结果表明: 在单轴压缩试验中, 随着热循环次数的提高, 花岗岩内部微裂隙开始扩展、贯通形成宏观裂纹, 岩样质量和纵波波速开始衰减, 静态应力-应变曲线中的弹性变形阶段逐渐缩短, 出现明显的不稳定破坏阶段; 冷却方式可以显著影响岩石强度的劣化速度, 但对花岗岩的最终静态抗压强度无明显影响。在 0.30 MPa 冲击气压下, 随着冲击次数的增加, 自然冷却花岗岩的动态抗压强度先增大后减小, 首次冲击可有助于提高自然冷却花岗岩的抗压强度, 当热循环超过 3 次时, 花岗岩的抗循环冲击能力开始下降。基于 Logistic 分布建立的动态损伤本构模型与试验曲线具有较好的一致性, 且模型参数获取简单, 物理意义明确, 具有一定适用性。研究成果可为变温环境下岩体施工、修复及围岩稳定性分析提供参考。

关 键 词: 高温岩石; 自然冷却; 遇水冷却; 多次冲击; 损伤程度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 08-2362-12

Experimental study on physical damage and mechanical degradation of granite subjected to high-temperature cooling impact cycling

ZHAN Jin-wu¹, ZHOU Ya-lai¹, WANG Yu², HUANG Ming³, JIANG Song¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: The mechanical properties of high-temperature rocks, after being cooled by various methods, significantly influence the safety of deep earth geotechnical engineering. The study primarily investigated medium-weathered granite porphyry. Uniaxial compression and cyclic dynamic impact tests were performed on specimens cooled naturally and via water immersion at 400 °C. The aim was to compare and analyze the change in the mechanical properties of granite. Utilizing the Logistic distribution law, loading damage variables and thermal cycling damage variables were incorporated to develop a statistical damage constitutive model for granite. The corresponding parameters were determined, and the applicability and reasonableness of the model were verified. The results reveal that during uniaxial compression testing, the internal microcracks in granite expand and coalesce into macroscopic cracks as the number of thermal cycles increases. Furthermore, the mass of the rock samples and longitudinal wave velocity decrease, while the elastic deformation phase in the static stress-strain curve shortens, indicating a distinct unstable damage stage. The rate of deterioration of rock strength can be significantly affected by the cooling method, but the final static compressive strength of granite is not significantly affected. Under an air pressure impact of 0.30 MPa, the dynamic compressive strength of naturally cooled granite initially increases and then decreases with increasing impact cycles. The initial impact enhances the compressive strength of naturally cooled granite. However, when thermal cycling exceeds three cycles, granite's resistance to cyclic impacts diminishes. The dynamic

收稿日期: 2023-09-21

录用日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No. 52008111); 福建省自然科学基金 (No. 2022J05185)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China for Young Scholars (52008111) and the Natural Science Foundation of Fujian Province (2022J05185).

第一作者简介: 詹金武, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。E-mail: zhanjinwu1989@foxmail.com

通讯作者: 周亚来, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: 1252352683@qq.com

damage model, formulated using the Logistic distribution, exhibits good alignment with the experimental curve. The model parameters are readily obtainable, possessing a clear physical interpretation and practical applicability. This research offers valuable references for the construction, repair, and stability analysis of rock masses in variable temperature environments.

Keywords: high-temperature rock; natural cooling; water cooling; cyclic impacts; damage degree

1 引言

随着经济建设的飞速发展,高地应力、高温度、高渗压等成为制约地下工程向深部发展的关键因素,赋存岩体与各类环境因素交织在一起,涉及到的工程灾变机制、力学问题复杂多变^[1-3]。近年来,高温岩体工程施工案例不断增多^[4],工程难点日益凸显,已经成为国内外学者研究的重点方向^[5]。岩石温度受环境及人为工程影响往往会表现出一种动态变化,如:在深埋隧道中^[6]受地热环境及通风影响导致隧道围岩温度发生改变;隧道、边坡、大坝等岩体工程遭受火灾后的抢修、加固;深部能源开采过程中,高温井壁与钻井冷却液接触造成循环热冲击等均会导致岩石温度呈现周期性变化。当岩体经高温循环,由于温度梯度及热应力的存在,致使岩石内部细观结构发生改变,进一步提高岩石力学性质的劣化程度。因此,探究循环高温后岩石物理力学性质的变化,对于控制岩体工程围岩稳定性和安全性具有重要意义。

罗生银等^[7]通过对比自然冷却与实时高温花岗岩力学性能发现,在 400 °C 之前自然冷却试样的峰值强度和弹性模量要明显高于实时高温试样,与 400 °C 之后恰好相反。朱振南^[8]、郜保平^[9]等认为相较自然冷却方式,遇水冷却为快速冷却方式,岩体内部由于冷却速度不一致会产生巨大的热冲击,致使矿物颗粒快速收缩,在岩石内部形成表面张力,使岩体内部初始裂隙发生扩展和产生新生裂隙,加剧岩体性能劣化。张帆等^[10]对循环高温水冷后的花岗岩进行三点弯曲试验,随着水-热循环冷却次数的增加,花岗岩的峰值荷载、断裂韧度不断减小,断面粗糙度呈上升趋势。Rong 等^[11]对 600 °C 的高温花岗岩进行循环试验,得出岩石力学特性的劣化效应主要是以前 5 次热循环损伤演化为主(第 1 次循环起主导作用),之后力学性质变化趋于平稳。Jin^[12]、曾严谨^[13]等对高温大理岩展开不同冷却方式对比试验,相比于自然冷却,遇水冷却的高温花岗岩随着温度的提高,峰值强度、弹性模量、纵波波速下降趋势更加明显。张蓉蓉等^[14]通过(split Hopkinson press bar, SHPB)装置对循环热冲击后的红砂岩试样展开冲击试验,表明岩样的纵波波速、干密度、动态峰值应力、弹性模量、平均破碎块度与热冲击

次数呈负相关性。王春等^[15]发现圆孔花岗岩的冲击变形规律与圆孔内径、加热温度、浸水温度和热循环次数无关。

虽然上述综合考虑了冷却方式、循环次数、高温对岩石的影响,但在实际工程中岩体的变形、失稳或塌陷往往不是由一次应力波导致的岩石发生破坏,而是一种非线性损伤累计的过程。Dai 等^[16]基于循环冲击荷载对花岗岩的岩石力学特性试验得出,试样的动态抗压强度随循环冲击次数的增加呈现先增加后降低的趋势,且试样的损伤值主要由最后一次冲击决定,随着循环冲击次数的增加,花岗岩损伤演化过程可分为缓慢增长、平稳增长、高速增长 3 个阶段。王志亮等^[17]对黑云母花岗岩进行等幅单轴循环冲击试验,得出试样最大应变、平均应变率和损伤值随冲击次数提高而增大的趋势,并经推导取得了试样的动态裂纹起裂应力。Luo^[18]、Zhou^[19]等使用 SHPB 试验装置对花岗岩进行循环冲击试验,发现 P 波波速随着冲击次数的增加不断减小,提出了以 P 波波速来衡量岩石循环冲击疲劳的力学特性。田诺成^[20]在对不同热处理下花岗岩进行循环冲击时发现每个温度下存在一个损伤应力阈值,在应力阈值内花岗岩劣化特征与冲击次数无关,且 600 °C 试样应力阈值明显小于 20~500 °C 处理后试样。

综上所述,国内外学者针对高温、循环高温及冷却方式对岩石力学性能的影响已经取得大量研究成果。但关于冷却方式、热循环次数对花岗岩静、动态力学的对比研究还尚有不足。此外,大部分学者仅对热处理后岩石进行单次动态冲击试验研究,缺乏对热循环后岩石在多次动态冲击作用下力学特性的探究。

基于此,以自然冷却和遇水冷却两种方式对花岗岩进行 400 °C 循环高温冷却处理,进行静态单轴压缩试验和多次动态冲击试验,并基于 Logistic 分布建立花岗岩动态冲击损伤本构模型,探讨两种冷却方式和循环次数对高温花岗岩动、静力学特性的影响规律及损伤原因,为循环高温冷却后花岗岩工程的施工、加固、稳定性分析提供参考。

2 试样制备及试验方案

2.1 样品制备

试验样品选自福州市文林山隧道右洞 YK3+280

左右掌子面处中风化花岗斑岩, 外观整体呈白色、肉红杂色。利用岩石钻芯机及全自动切割磨平一体机制备出 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 、 $\phi 50\text{ mm}\times 36\text{ mm}$ 两种高度试样, 以供岩石单轴试验和动态冲击试验用, 并确保试样端面平整度和垂直精度均在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内, 如图 1 所示。



图 1 花岗岩试样
Fig.1 Granite specimens

2.2 试验方案

将制备好的试样放置于工业电阻炉内, 控制炉体内温度以 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的加热速率升温至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并保持 2 h 恒温以使试样充分受热, 待到试样充分受热后立即将试样取出, 放置在装有纯净水的水桶里冷却至室温, 如图 2 所示, 冷却结束后将试样从水中取出用棉布将试样表面水分擦拭干净, 再放进工业电阻炉内进行加热, 以此为 1 次高温-水冷却循环 (water cooling, W-C; W-C-a-b, 表示遇水冷却循环 a 次, 动态冲击 b 次, 以下类同)。将试样放置在炉体内自行冷却至室温, 以此为一次自然冷却循环 (natural cooling, N-C)。循环次数为 1、3、6、9 次, 并设置一组常温下试样作为对照组。每种试验条件下共 3~5 个试样, 共计 100 个试样。

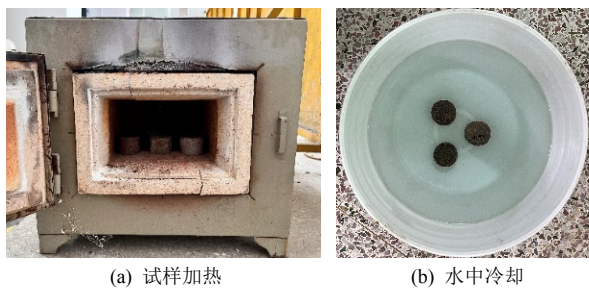


图 2 循环高温-冷却
Fig.2 Cycle of high-temperature cooling

单轴压缩试验: 利用 MTC 试验机对花岗岩进行单轴压缩试验, 试验设备最大试验力为 $1\,000\text{ kN}$, 准确度等级为 1 级, 试验力分辨力为 $1/500\,000$, 试验力示值相对误差为 $\pm 1\%$, 如图 3(a)所示, 以 $0.05\text{ mm}/\text{min}$ 的位移控制方式进行加载, 直至试样

完全破碎方可停止试验。

动态冲击试验: 利用直径 80 mm 的 SHPB 进行冲击试验, 该装置杆件系统及冲击头均为高强度合金钢, 其密度 $\rho = 7\,830\text{ kg}/\text{m}^3$, 弹性模量 $E = 198\text{ GPa}$, 纵波波速 $C = 5\,122\text{ m}/\text{s}$, 如图 3(b)所示。为使试样在冲击过程中满足应力均匀性假设, 试验使用 $\phi 25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的紫铜对入射波进行整形, 使其近似满足半正弦波加载需求。试验冲击气压设置在 0.30 MPa , 冲击速度约为 $16\text{ m}/\text{s}$, 为保证冲击入射波的一致性, 应确保每次冲击试验前子弹、入射杆的位置相同。在试验中, 试样与杆件之间的摩擦会导致波形出现弥散效应, 从而影响试验结果的准确性, 可在试验前将试样两端均匀涂抹润滑剂来减小端面摩擦。由图 4 可知, 试验中入射波与反射波之和与透射波几乎相等, 表明试验过程满足一维假定和应力均匀假定, 符合 SHPB 试验基本要求。

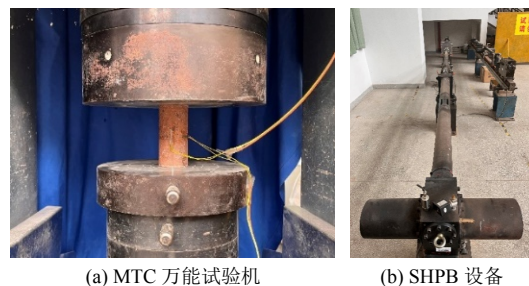


图 3 MTC 试验机
Fig.3 MTC testing machine

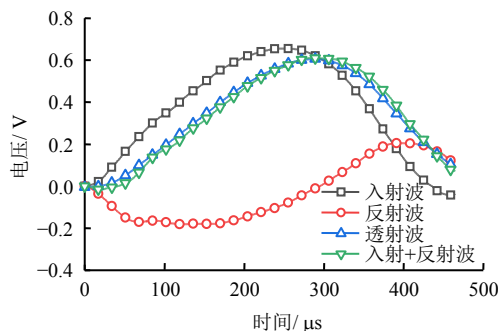


图 4 应力平衡验证
Fig.4 Stress balance verification

3 岩石静态单轴试验

3.1 微观损伤特征

图 5 为花岗岩试样经两种冷却方式循环处理后的表现特征变化。由图可知, 经过循环高温处理后的花岗岩试样与常温状态相比, 表面颜色由肉红杂色转变为灰白色, 表面粗糙感增加; W-C 花岗岩表面白色点状物逐渐增加, 并伴有白色粉末状颗粒脱

落,说明在经过多次高温遇水冷却后,部分矿物成分发生了相变,高温遇水冷却加剧了该过程的转变速度;6次热循环及以上热处理试样表面开始出现龟裂状裂隙,W-C花岗岩尤为明显,一方面是因为花岗岩经过高温作用后会发生体积膨胀,当进行淬火时,试样内部颗粒和表面颗粒无法同时收缩,产生巨大应力差,加剧试样的裂隙发育。另一方面,W-C花岗岩在进行多次循环时,裂隙水受热汽化产生热胀作用,进一步加剧岩石损伤。

通过细观电镜扫描试验,Chen^[21]、Yang^[22]等发现自然冷却花岗岩在200℃以内几乎无微裂纹生成,在300~573℃下自然冷却花岗岩开始生成裂隙网格。朱振南^[8]、张帆^[10]等则发现遇水冷却花岗岩在150℃下即可形成微裂纹网格,随着高温遇水冷却循环次数的增加,花岗岩内部微裂纹数目明显增多,分布范围更加广泛,微裂纹逐渐聚集贯通,裂隙长度、张开度进一步增加,最终形成宏观破坏。这与图5试样循环冷却后宏观破坏特征分析一致。

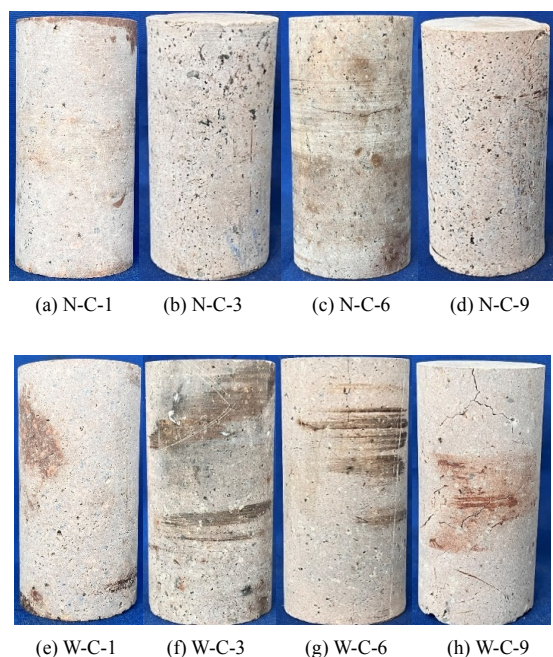


图5 花岗岩热循环后表面变化
Fig.5 Granite thermal recirculation surface change

3.2 质量及纵波波速变化规律

图6为花岗岩试样经两种冷却方式循环处理后的质量和纵波波速变化曲线。由此可以得出,随着热循环次数的增加,花岗岩试样的质量损失量总体呈上升趋势。经过1次热循环后,质量损失量显著增加,之后N-C花岗岩质量下降近似呈线性减少;经过3次热循环后,W-C花岗岩质量无明显变化,

6次热循环后质量损失量突增,于9次热循环后趋于平缓。导致花岗岩试样质量变化的主要因素是岩石内部自由水和结合水受热汽化逸出,以及表面碎屑脱落,而W-C花岗岩由于高温遇水冷却作用,导致岩石发生较大的永久变形,使得新旧裂纹迅速扩展、贯通,矿物脱落现象明显提高。

纵波波速通常用来衡量岩石内部裂隙发育及损伤程度,N-C花岗岩和W-C花岗岩的纵波波速均随着热循环次数的增加而减少。花岗岩在0次循环时的纵波波速为5160 m/s,在9次循环时,N-C花岗岩和W-C花岗岩的纵波波速为4119、3038 m/s,分别下降了20.17%、41.12%。对比两种冷却方式,W-C花岗岩的纵波波速下降速率明显高于N-C花岗岩,两者下降速率相差50.95%。这主要是因为W-C花岗岩经历高温遇水冷却作用后,矿物颗粒之间不均匀膨胀现象愈加明显,进而引起岩石内部微裂纹剧烈萌生、发育,导致纵波波速急剧下降。

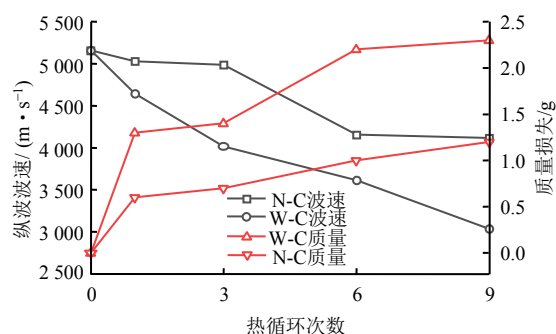


图6 花岗岩热循环后物理特性变化曲线
Fig.6 Physical characteristics change curves after granite thermal cycling

3.3 应力-应变曲线分析

观察单轴压缩试验过程可知,在3次热循环之内,受荷花岗岩试样在达到极限承载力的70%之前无明显变形,之后花岗岩在短时间内发生碎块崩落现象,随后崩落现象消失继续趋于稳定承载,在达到极限荷载时,花岗岩试样伴随巨大炸裂声瞬间崩坏,碎块飞溅。在6次热循环之后,受荷花岗岩竖向裂纹开始扩展,随着荷载的提高,试样内部裂隙发育声逐渐明显,少量碎块开始脱落。对比前3次循环,6次循环之后花岗岩破坏声音较为微弱,并伴有明显的裂隙发育扩展声,碎块粉末现象较为严重。

图7为花岗岩试样经两种冷却方式循环处理后的应力-应变曲线。试验结果显示,N-C花岗岩和W-C花岗岩的应力-应变曲线大致分为5个阶段,

即微裂隙压密闭合阶段、弹性变形阶段、微裂纹扩展阶段、裂纹贯通不稳定发展破坏阶段和破坏后阶段。对比两者微裂隙压密闭合阶段可以发现,热循环次数越多,微裂隙压密阶段越长(N-C-9 除外),且 W-C 花岗岩的压密阶段要高于 N-C 花岗岩,说明热循环次数越多,岩石内部的微裂隙发育就越多,同时冷却方式也会加剧微裂隙的产生。经过 3 次热循环,花岗岩试样的裂纹贯通不稳定发展阶段表现明显,出现不稳定发展平台。在破坏后阶段,应力-应变曲线迅速跌落,表现出强烈的脆性破坏特征,无残余强度(W-C-9 除外)。

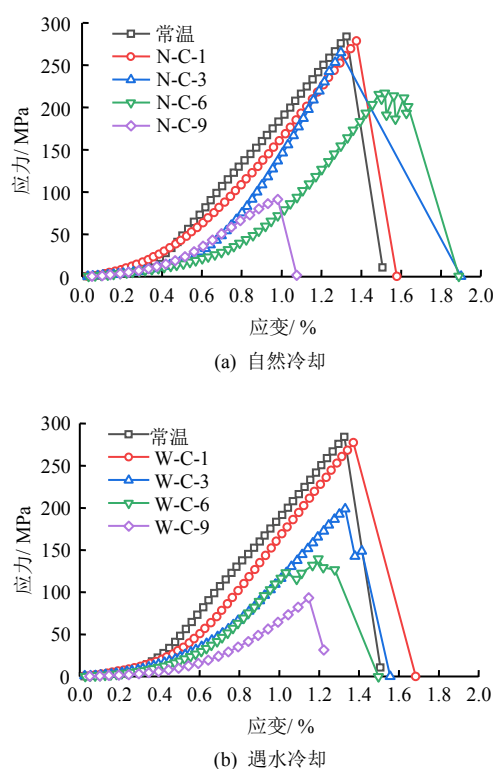


图 7 不同热循环次数下花岗岩应力-应变曲线
Fig.7 Stress-strain curves of granite under different thermal cycling frequencies

3.4 花岗岩强度特征分析

表 1 为由图 7 计算得到两种冷却方式处理后花岗岩的强度参数,图 8 为花岗岩试样经两种冷却方式循环处理后的峰值应力和弹性模量随热循环次数的变化曲线。由图可知,经过 1 次循环后,N-C 花岗岩和 W-C 花岗岩的峰值强度和弹性模量无明显减少,较常温状态下花岗岩峰值强度减少了约 2%,之后 N-C 花岗岩和 W-C 花岗岩分别呈上凸式和下凹式减少趋势,最终峰值强度下降到 91 MPa 左右,应力衰减幅度达 64.95%,说明在 400 °C 下,通过采用不同的冷却方式,可以有效减缓岩石强度的劣

化速率,但不会影响岩样最终的力学劣化特性。

表 1 单轴压缩试验数据
Table 1 Uniaxial compression test data

冷却方式	循环次数 /次	峰值应变 / %	峰值应力 / MPa	弹性模量 / GPa
常温	—	1.33	283.92	16.98
	1	1.37	277.20	15.10
遇水冷却	3	1.33	198.61	10.51
	6	1.20	139.38	8.43
	9	1.15	93.39	5.27
	1	1.38	278.49	15.19
自然冷却	3	1.30	264.91	13.60
	6	1.52	217.15	9.55
	9	0.98	91.19	6.83

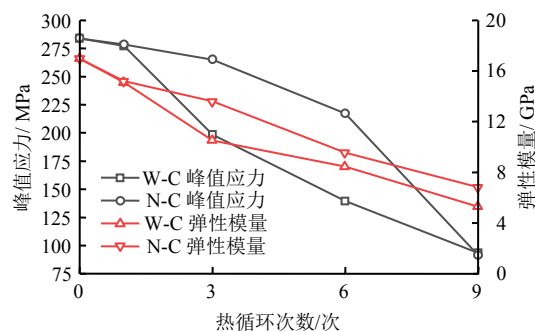


图 8 热循环后花岗岩力学特性变化趋势图
Fig.8 Trend chart of changes in mechanical properties of granite after thermal cycling

4 岩石动态冲击试验

4.1 一次冲击下应力-应变曲线

图 9 为 N-C 花岗岩试样在 0.3 MPa 气压下冲击 1 次后的动态应力-应变曲线。由图可得,试样的应力-应变加载阶段曲线近似为直线段,试样一直处于弹性变形阶段,峰值应力之后,动态应力-应变曲线呈现出明显的应变回弹现象。这是由于初始花岗岩具有很高的完整度和较大的波阻抗^[23],当应力波传递到试样时,较大的试样波阻抗使透射波幅值变大,且透射波达到峰值点的时间越短,对应各时刻的应力值越大。根据一维应力均匀性假设,透射波越大则反射波相应就越小,达到峰值点的时间也相应越快,但随着入射应力波的持续作用,反射波幅值开始减少,最后致使反射波形方向与入射波方向一致,应变开始减少,出现应变回弹现象。与常温状态相比,N-C 花岗岩的峰值强度衰减幅度在 10.65%以内,峰值应变均在 0.007 8 左右,说明在 400 °C 下,N-C 花岗岩的动态力学特性几乎不受热循环次数影响,由热循环次数带来的岩石内部损伤基本可以忽略。

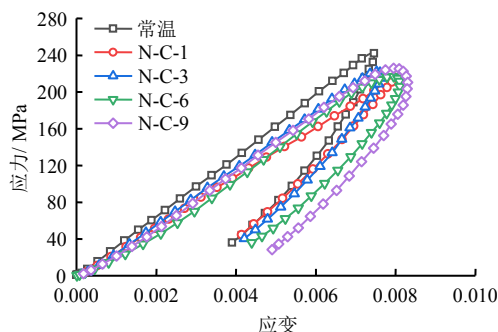


图 9 自然冷却花岗岩动态应力-应变曲线
Fig.9 Dynamic stress-strain curves
of naturally cooled granite

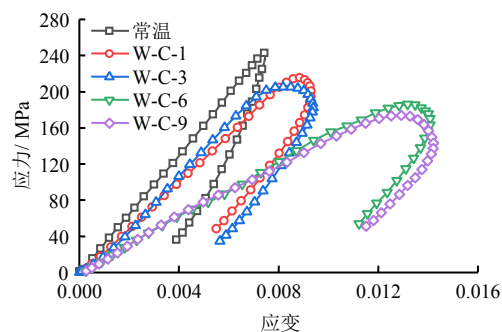


图 10 遇水冷却花岗岩动态应力-应变曲线
Fig.10 Dynamic stress-strain curves
of water-cooled granite

图 10 为 W-C 花岗岩试样在 0.3 MPa 气压下冲击 1 次后的动态应力-应变曲线。由图可知, W-C 花岗岩的动态应力-应变曲线与 N-C 花岗岩类似, 但峰值强度出现明显下降。与常温状态相比, 1、3 次热循环后, 峰值强度下降了 15.48%, 峰值应变提高了 0.001 4; 6、9 次热循环后, 峰值强度下降了 28.37%, 峰值应变提高了 0.005 9。可以发现随着热循环次数的增加, W-C 花岗岩的变形能力呈现逐渐减弱的趋势。

4.2 一次冲击下岩石破坏特征

图 11 为不同 N-C 和 W-C 花岗岩经 SHPB 冲击 1 次后宏观特征表现。由图可知, 在相同方式处理下, 随着热循环次数的增加, 裂纹扩展现象显著增加, 试样的破坏程度明显提高。经过 1 次热循环后, N-C 花岗岩试样仍表现出较高的完整性, 并伴随少量微裂纹的产生。1、3 次热循环后, W-C 花岗岩表面开始出现少量碎块脱落, 宏观贯通裂纹数量增加, 并以网状结构分布在试样端面上; 6、9 次热循环后,

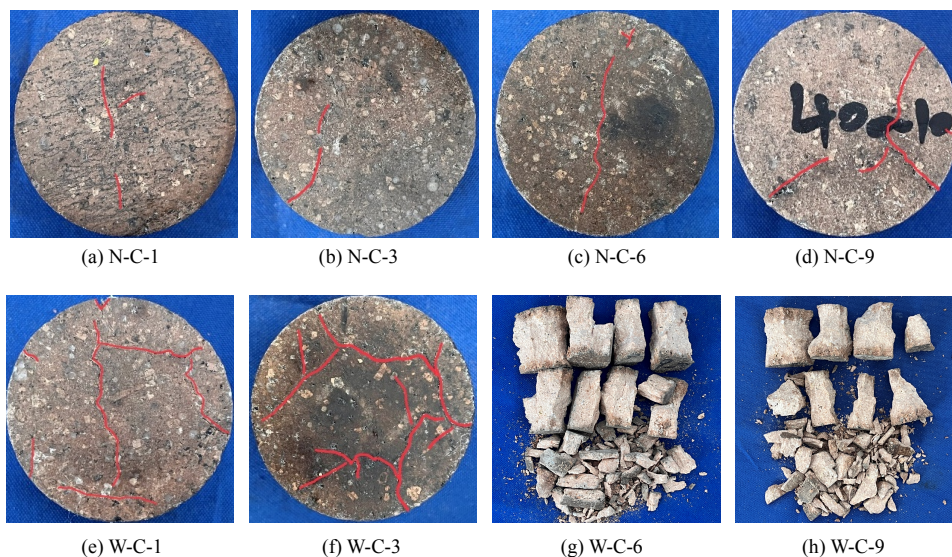


图 11 花岗岩 1 次冲击后形态图
Fig.11 Granite morphology after one impact

试样破裂面沿加载方向破坏成 8 大块, 呈现明显的柱状劈裂破坏模式。由此可见, 冷却方式和热循环次数两种因素作用决定了花岗岩的宏观破碎形态。

4.3 多次冲击下岩石的强度特征

图 12 为花岗岩在相同循环冲击荷载作用下的动态应力-应变曲线。由图可知, 在 2 次冲击作用下, N-C-1 和 N-C-3 花岗岩的应力-应变曲线呈现轻微上

扬趋势, 峰值应力和弹性模量略微上升, 分析原因是由于在经历第 1 次冲击后, 岩石内部微裂隙得以闭合, 使内部结构变得致密, 压密效果改善了岩样的力学性能, 降低了荷载损伤和热循环所带来的劣化作用; 在最后 1 次冲击作用下, 动态应力-应变曲线的前半段仍保持近似直线段, 后半段出现明显右倾形态, 岩样发生破碎, 峰值应变增加。

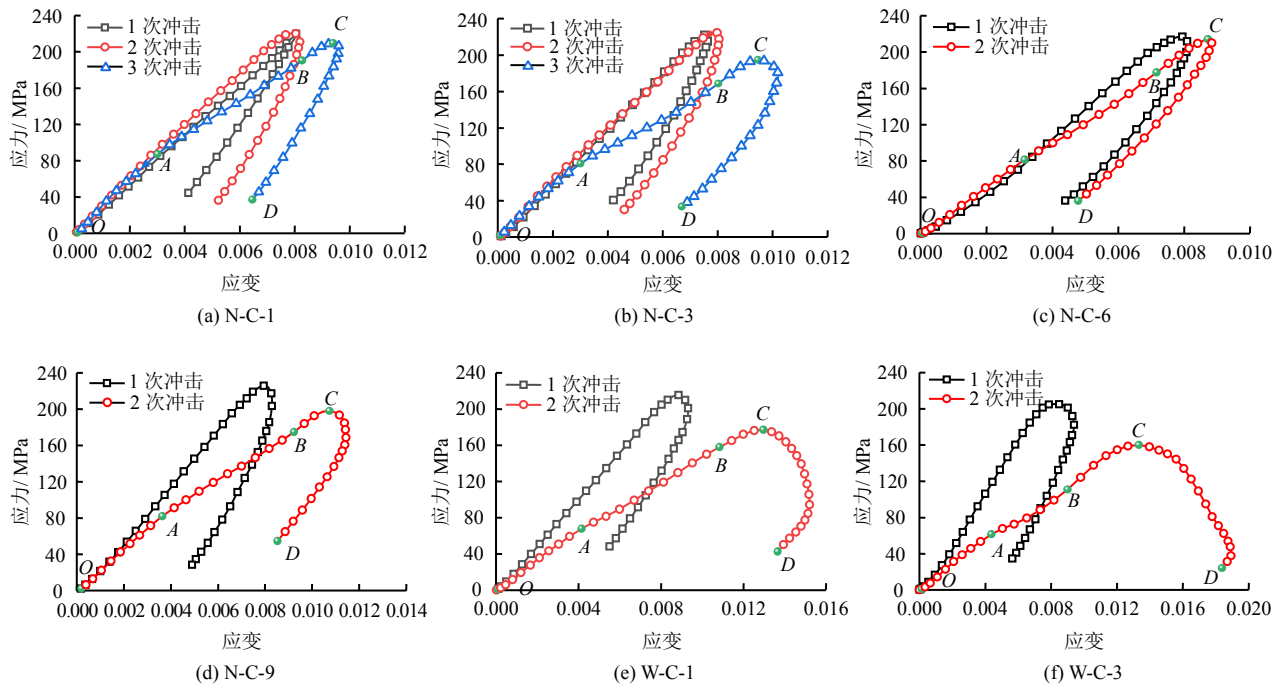


图 12 花岗岩多次冲击动态应力-应变曲线

Fig.12 Dynamic stress-strain curves of granite with multiple impact

由多次冲击后的应力-应变曲线形式可知,随着冲击次数的增加,花岗岩的应变回弹现象逐渐减弱。这是由于随着冲击次数的增加,岩石内部微裂隙开始扩展、贯通,损伤加剧,导致岩样波阻抗减少,致使应力波在传递到岩样时,由于裂隙界面的多次反射作用,使其叠加后的反射波幅值增大,透射波幅值减小,并且由于多次反射波与入射波的方向相反,导致反射波的峰值出现时间较晚。同时由于透射波的应力波方向与入射波方向一致,导致透射波峰出现的时间越来越早。由应力均匀性假设可知,试样的应变开始增大,应力减小,回弹现象逐渐减弱。

根据应力-应变曲线变化趋势,可将花岗岩破碎时的动态应力-应变曲线分为 4 个阶段: OA 段为孔隙压密阶段,花岗岩在加载初期内部裂隙继续压密,岩样保持弹性变形,应力-应变曲线近似为直线段, A 点对应应力为裂纹极限闭合应力; AB 段为裂纹稳定扩展阶段,随着应力的提高,部分孔洞、裂隙扩展、贯通并二次应力平衡,进入平稳发展阶段,应力-应变曲线近似呈直线段,切线斜率(即切线模量)较 OA 段减小; BC 段为应变硬化阶段,在此阶段,加载应力超过大部分孔洞的极限荷载,导致孔洞坍塌,在坍塌孔洞附近,应力迅速集中,从而引发短暂的应变硬化现象,应力-应变曲线形式短暂呈上凸形式,切线斜率先增加后减少; CD 段为破坏后阶段,应力-应变曲线形式总体随应变减小而减小,表

现为 II 型回弹曲线, II 型曲线揭示了岩石在受力过程中的应变回弹现象,这种现象的产生是由于岩样所积累的弹性能得到释放所致,此时岩样并没有完全碎裂,仍然具有一定的承载能力。

由图 12 计算 A 点的裂纹极限闭合应力可得, N-C 花岗岩和 W-C 花岗岩的裂纹极限闭合应力分别处于 71.42~81.49 MPa、54.18~78.10 MPa 之内,对应的应变范围在 0.002 4~0.003 2 和 0.003 6~0.004 9,说明冷却方式对花岗岩裂隙的压密进程有较大影响,对裂纹极限闭合应力的影响较小,主要是由于遇水冷却会加剧岩样裂纹发育,从而使压密进程提高。

5 岩石损伤本构模型

5.1 受荷损伤本构模型的建立

在损伤力学中,根据 Lemaitre 应变等价原理和有效应力原理,损伤体在名义应力 σ_i 下产生的应变 ε_i 与无损伤体在有效应力 σ_i^* 下产生的应变 ε_i^* 相同^[24]:

$$\varepsilon_i^* = \varepsilon_i \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

岩石经高温-冷却处理时,花岗岩内部矿物颗粒由于受热膨胀和冷却收缩的不均匀性发生错动,引起花岗岩微观结构的改变,在冲击荷载作用下,微裂隙快速扩展、贯通。考虑高温-冷却循环受荷下有效应力和主应力的关系,则有

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1-D} \quad (2)$$

由试验得出, 花岗岩的峰值应力和弹性模量受冷却方式、热循环次数和循环冲击次数共同影响, 假设岩石微元体在破坏前呈线弹性变形, 由广义 Hooke 定律可得

$$\sigma_i^* = E\varepsilon_i^* + \mu(\sigma_j^* + \sigma_k^*) \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中: E 为岩石弹性模量; μ 为泊松比。

在单轴冲击试验中, 由式 (2)、(3) 整理简化可得

$$\sigma = (1-D)E\varepsilon \quad (4)$$

5.2 受荷损伤本构模型的建立

岩石作为多种矿物质组成的固态集合体, 内部含有大量的微裂纹和孔洞, 呈现出一种随机、杂乱的分布状态。在外部荷载作用下, 岩石内部微裂纹扩展, 微元强度体发生破坏。随着荷载的持续作用, 微元体破坏数量增加, 直至岩石发生宏观破坏丧失承载力。假定岩石微元强度体服从 Logistic 分布规律, 则荷载下损伤变量 D 为^[25]

$$D = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^m} \quad (5)$$

式中: F 为微元体的强度; m 、 F_0 为 Logistic 分布参量, 控制微元体的形状、尺寸。

微元体强度 F 的形式由岩石破坏准则确定, Drucker-Prager 破坏准则以其参数形式简单, 求解方便等优势, 可广泛应用于岩石领域, 故可采用 Drucker-Prager 破坏准则描述微元体应力水平, 则:

$$F = f(\sigma) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} \quad (6)$$

式中: α 为与岩石内摩擦角有关的参数; I_1 、 J_2 分别为应力张量第一不变量和应力偏量的第二不变量, 具体分别为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 &= \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在单轴动态冲击条件下 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 故可简化为

$$F = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \alpha\right)E\varepsilon \quad (8)$$

联立式 (4)、(5) 即可得冲击荷载下花岗岩的损伤本构模型:

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^m} \quad (9)$$

5.3 受荷本构模型参数的确定

由动态应力-应变曲线可得, 存在一点 $(\varepsilon_f, \sigma_f)$ (σ_f 为峰值应力, ε_f 为对应的应变) 使得 $d\sigma/d\varepsilon = 0$, 则对式 (9) 中的 ε 求一阶导数可得

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{E \left[1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \right] - E\varepsilon m \frac{F^{m-1}}{F_0^m} \left[\left(\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)E \right]}{\left[1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \right]^2} \quad (10)$$

由上述已知条件化简可得

$$\frac{d\sigma_f}{d\varepsilon_f} = \frac{E \left[1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \right] - Em \frac{F^m}{F_0^m}}{\left[1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \right]^2} = 0 \quad (11)$$

故有

$$\left[1 + \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m_0} \right] - m \frac{F^{m_0}}{F_0^{m_0}} = 0 \quad (12)$$

式中: m_0 为常温下花岗岩的分布参数。

由式 (9) 可得

$$\left(\frac{F}{F_0}\right)^{m_0} = \frac{E\varepsilon_f}{\sigma_f} - 1 \quad (13)$$

联立式 (12)、(13) 即可得

$$m_0 = \frac{E\varepsilon_f/\sigma_f}{[E\varepsilon_f/\sigma_f] - 1} \quad (14)$$

对式 (13) 取对数可得

$$m_0 \ln\left(\frac{F}{F_0}\right) = \ln\left(\frac{E\varepsilon_f}{\sigma_f} - 1\right) \quad (15)$$

由式 (8) 可求得应力-应变曲线峰值点处的微元强度 F_f 为

$$F_f = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \alpha\right)E\varepsilon_f \quad (16)$$

化简即可得 F_0 取值:

$$F_0 = \exp\left[\ln F_f - \frac{1}{m_0} \ln\left(\frac{E\varepsilon_f}{\sigma_f} - 1\right)\right] \quad (17)$$

5.4 受荷本构模型修正

由静态单轴压缩试验得出, 随着热循环次数的提高, 花岗岩峰值应力和弹性模量减小, 且 W-C 花

岗岩的衰减速度要高于 N-C 花岗岩, 故可认为花岗岩力学性质劣化仅与冷却方式和热循环次数有关。考虑冷却方式和热循环次数对花岗岩力学特性的影响, 可借鉴宏观唯象学理论定义热循环损伤因子:

$$\left. \begin{aligned} D_s &= 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \\ D_E &= 1 - \frac{E_n}{E_0} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: σ_0 、 E_0 为 25 °C 花岗岩动态峰值强度和弹性模量; σ_n 、 E_n 为热循环 n 次后的动态峰值强度和弹性模量。

由试验可得, 花岗岩的弹性模量随热循环次数的改变而改变, 而高温循环也会对分布参数 m_0 、 F_0 产生影响, 根据有关研究^[26-27], 以此假设 m_0 、 F_0 受热循环影响规律类似, 则对不同热循环次数下试样的参数影响如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} m_n &= m_0(1 - D_s) \\ F_n &= F_0(1 - D_s) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: m_n 、 F_n 为热循环 n 次后岩石 Logistic 分布参量。

将式 (18)、(19) 代入式 (9) 即可得到修正后热循环和冲击荷载耦合下花岗岩的损伤本构模型:

$$\sigma = \frac{E_0(1 - D_E)\varepsilon}{1 + \left[\frac{F}{F_0(1 - D_s)} \right]^{m_0(1 - D_s)}} \quad (20)$$

5.5 模型参数取值及验证

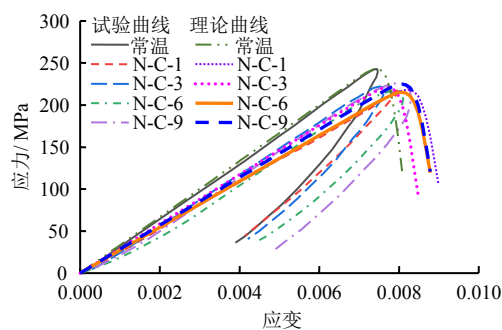
根据上述试验数据, 计算部分参数验证所建模型的适用性, 受试验条件限制, α 参数取值参考文献^[28]取值 0.204, σ_n 、 E_n 由试验获取, 故只需计算常温下花岗岩的分布参数 m_0 、 F_0 即可, 具体常温岩石参数取值和岩石力学参数如表 2 所示。

表 2 花岗岩本构模型参数取值

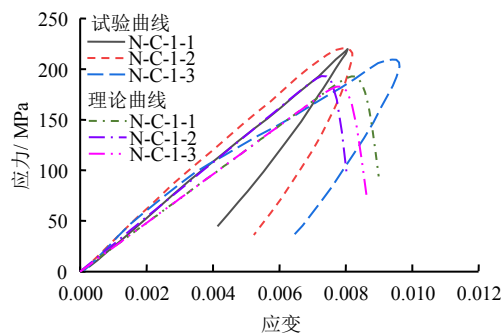
Table 2 Value of constitutive model parameters

编号	σ / MPa	E / GPa	F_0	m_0
常温	242.809	33.305	209.367	49.689
N-C-1-1	219.896	27.149	209.367	49.689
N-C-3-1	222.075	29.265	209.367	49.689
N-C-6-1	216.954	27.261	209.367	49.689
N-C-9-1	225.944	28.428	209.367	49.689
N-C-1-2	220.510	30.467	209.367	49.689
N-C-1-3	209.603	27.177	209.367	49.689
W-C-1-1	215.438	24.971	209.367	49.689
W-C-3-1	205.210	26.929	209.367	49.689
W-C-6-1	186.444	14.901	209.367	49.689
W-C-9-1	173.922	15.060	209.367	49.689
W-C-1-2	177.216	14.875	209.367	49.689

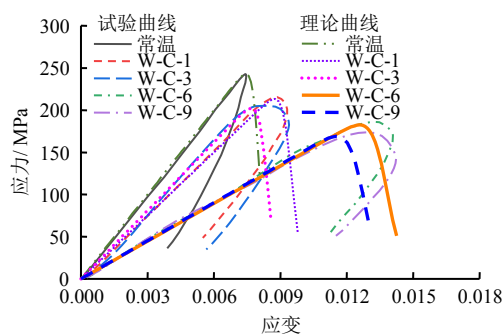
将表 2 数据代入到式 (20) 即得到图 13 不同热循环次数和循环冲击下的理论本构模型曲线。由图可以看出: 建立的耦合损伤本构模型与试验曲线在峰值应变之前具有较好的一致性, 但对于应变回弹现象描述不足, 从式 (5) 可以看出, 这是由于岩



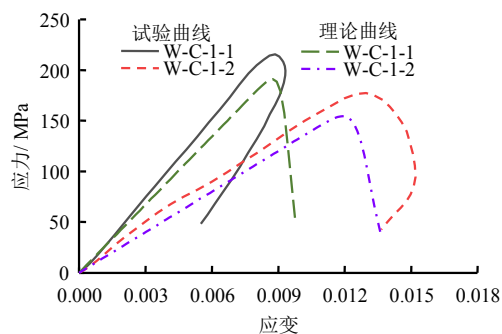
(a) N-C 花岗岩 1 次动态冲击



(b) N-C-1 花岗岩 3 次动态冲击



(c) W-C 花岗岩 1 次动态冲击



(d) W-C-1 花岗岩 2 次动态冲击

图 13 本构模型验证

Fig.13 Verification of constitutive models

石损伤在加载过程中具有不可逆性, 不会随应变发生回弹时, 损伤减小。

结合式(20)、图13可知, 建立的本构模型参数计算简单, 参数意义明确, 只需计算一组常温花岗岩分布参数, 便可由试验数据或其他已知条件估算出大致应力-应变曲线形式, 具有较好的适用性。

6 结 论

基于干热岩能源开采及深埋隧道面临的高温、高湿、高应力环境, 对400℃高温循环自然冷却和遇水冷却花岗岩展开单轴压缩试验和循环动态冲击试验, 探究花岗岩的力学劣化特性及损伤本构模型, 主要结论有以下几点:

(1) 遇水冷却花岗岩的强度衰减速率要明显高于自然冷却, 随着热循环次数的增加, 静态单轴压缩试验下花岗岩的弹性变形阶段逐渐缩短, 出现不稳定破坏阶段。

(2) 首次冲击对自然冷却花岗岩的动态强度无明显影响, 遇水冷却花岗岩峰值强度开始衰减, 衰减幅度在28%以内, 冷却方式及热循环次数对400℃花岗岩的动态力学性能影响较小。

(3) 在循环冲击中, 当热循环次数超过3次时, 花岗岩的多次承载能力开始下降。在最后破坏阶段, 花岗岩的裂纹极限闭合应力约为71 MPa, 遇水冷却花岗岩对应的裂纹极限闭合应变均要高于自然冷却花岗岩, 遇水冷却会加剧岩石内部微裂隙发育, 使其具有较长的压密阶段。

(4) 基于Logistic分布函数建立的动态损伤本构模型与试验曲线相比具有较好的一致性, 该模型能够较好地反应花岗岩在高温-冷却-冲击循环耦合作用下的强度特性, 且所需参数简单, 均为力学基本参数, 具有一定的适用性。

参 考 文 献

- [1] 徐正宣, 张利国, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安至林芝段工程地质环境及主要工程地质问题[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 29-42.
XU Zheng-xuan, ZHANG Li-guo, JIANG Liang-wen, et al. Engineering geological environment and main engineering geological problems of Ya'an-Linzi section of the Sichuan-Tibet Railway[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2021, 53(3): 29-42.
- [2] 苏发强, 于光磊, 高喜才, 等. 煤炭地下气化的热环境下煤样内部构造变化及模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4191-4200.
- [3] SU Fa-qiang, YU Guang-lei, GAO Xi-cai, et al. Study on internal structure change and model test of coal samples in thermal environment based on underground coal gasification[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(12): 4191-4200.
- [4] 谢和平, 昂然, 李碧雄, 等. 基于热伏材料中低温地热发电原理与技术构想[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(2): 1-12.
XIE He-ping, ANG Ran, LI Bi-xiong, et al. Principle and technological conception of middle-low temperature geothermal power generation based on large-scale single crystals of thermovoltaic materials[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2018, 50(2): 1-12.
- [5] 杨冬, 蒋树屏, 黄锋, 等. HHP花岗岩高温隧道温度场实测与仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 233-244.
YANG Dong, JIANG Shu-ping, HUANG Feng, et al. Measurement and simulation of temperature field in HHP granite high-temperature tunnel[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2023, 20(1): 233-244.
- [6] 吴星辉, 李鹏, 郭奇峰, 等. 热损伤岩石物理力学特性演化机制研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(5): 827-839.
WU Xing-hui, LI Peng, GUO Qi-feng, et al. Research progress on the evolution of physical and mechanical properties of thermally damaged rock[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2022, 44(5): 827-839.
- [7] DO D P, VU M N, TRAN N T, et al. Closed-form solution and reliability analysis of deep tunnel supported by a concrete liner and a covered compressible layer within the viscoelastic burger rock[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54(5): 2311-2334.
- [8] 罗生银, 窦斌, 田红, 等. 自然冷却后与实时高温下花岗岩物理力学性质对比试验研究[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 178-184.
LUO Sheng-yin, DOU Bin, TIAN Hong, et al. Comparative experimental study on physical and mechanical properties of granite after natural cooling and under realtime high temperature[J]. **Earth Science Frontiers**, 2020, 27(1): 178-184.
- [9] 朱振南, 田红, 董楠楠, 等. 高温花岗岩遇水冷却后物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 169-176.
ZHU Zhen-nan, TIAN Hong, DONG Nan-nan, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of heat-treated granite by water cooling[J]. **Rock and Soil**

- Mechanics**, 2018, 39(Suppl.2): 169-176.
- [9] 邵保平, 赵阳升. 600 °C 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 892-898.
XI Bao-ping, ZHAO Yang-sheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600 °C[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 892-898.
- [10] 张帆, 吕敦波. 循环高温淬火后花岗岩三点弯曲试验研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(7): 96-103.
ZHANG Fan, LÜ Dun-bo. Experimental study on three point bending of granite after high temperature quenching and thermal cycling[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2023, 40(7): 96-103.
- [11] RONG G, PENG J, CAI M, et al. Experimental investigation of thermal cycling effect on physical and mechanical properties of bedrocks in geothermal fields[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2018, 141: 174-185.
- [12] JIN P H, HU Y Q, SHAO J X, et al. Influence of different thermal cycling treatments on the physical, mechanical and transport properties of granite[J]. **Geothermics**, 2019, 78: 118-128.
- [13] 曾严谨, 荣冠, 彭俊, 等. 高温循环作用后大理岩裂纹扩展试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 220-226.
ZENG Yan-jin, RONG Guan, PENG Jun, et al. Experimental study of crack propagation of marble after high temperature cycling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl.1): 220-226.
- [14] 张蓉蓉, 经来旺, 马冬冬. 冻融和热冲击循环作用后红砂岩 SHPB 试验和本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(9): 267-275.
ZHANG Rong-rong, JING Lai-wang, MA Dong-dong. SHPB tests and constitutive model of red-sandstone after freeze-thaw and thermal shock cycles[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2022, 41(9): 267-275.
- [15] 王春, 胡慢谷, 王成. 热-水-力作用下圆孔花岗岩的动态损伤特征及结构模型[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 741-756.
WANG Chun, HU Man-gu, WANG Cheng. Dynamic damage characteristics and structural model of concentric perforated granite subjected to thermal-hydro-mechanical coupling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(3): 741-756.
- [16] DAI B, SHAN Q, CHEN Y, et al. Mechanical and energy dissipation characteristics of granite under cyclic impact loading[J]. **Journal of Central South University**, 2022, 29(1): 116-128.
- [17] 王志亮, 杨辉, 田诺成. 单轴循环冲击下花岗岩力学特性与损伤演化机理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 59-66.
WANG Zhi-liang, YANG Hui, TIAN Nuo-cheng. Mechanical property and damage evolution mechanism of granite under uniaxial cyclic impact[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2020, 52(2): 59-66.
- [18] LUO X D, JIANG N, WANG M Y, et al. Response of leptynite subjected to repeated impact loading[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(10): 4137-4141.
- [19] ZHOU T, DONG S L, ZHAO G F, et al. An experimental study of fatigue behavior of granite under low-cycle repetitive compressive impacts[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(10): 3157-3166.
- [20] 田诺成. 循环荷载作用下花岗岩动力学性能与累积损伤演化规律研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
TIAN Nuo-cheng. Research on dynamic properties and evolution law of cumulative damage of granite under cyclic loading[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [21] CHEN S, YANG C, WANG G. Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2017, 110: 1533-1542.
- [22] YANG S, RANJITH P G, JING H, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. **Geothermics**, 2017, 65: 180-197.
- [23] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 波阻抗对岩石动力学特性影响的模拟试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(3): 178-185.
YANG Ren-shu, LI Wei-yu, FANG Shi-zheng, et al. Tests for effects of wave impedance on rock's dynamic performance[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2020, 39(3): 178-185.
- [24] LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer Verlag, 1992: 26-39.
- [25] 周强. 准静态压缩作用下脆性物料颗粒破碎特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
ZHOU Qiang. Study on breakage characteristics of brittle granular materials under quasi-static compression[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2021.