

高压物理学报

高温-冲击双循环下花岗岩的动力学特性与损伤

郭昊 左旭超 钟康杰 吴俊 刘磊

Dynamic Mechanical Properties and Damage Evolution in Granite under Coupled High-Temperature-Impact Cyclic Loading

GUO Hao, ZUO Xuchao, ZHONG Kangjie, WU Jun, LIU Lei

引用本文:

郭昊, 左旭超, 钟康杰, 等. 高温-冲击双循环下花岗岩的动力学特性与损伤[J]. 高压物理学报, 2025, 39(12):124101. DOI: 10.11858/gywlb.20251091

GUO Hao, ZUO Xuchao, ZHONG Kangjie, et al. Dynamic Mechanical Properties and Damage Evolution in Granite under Coupled High-Temperature-Impact Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(12):124101. DOI: 10.11858/gywlb.20251091

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20251091>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同不耦合系数下花岗岩爆破损伤特性的离散元模拟

Discrete Element Simulation of Blasting Damage Characteristics of Granite under Different Decoupling Coefficients
高压物理学报. 2022, 36(1): 015301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210804>

一维静载与循环冲击共同作用下砂岩动态力学特性试验研究

Experimental Study of Dynamic Mechanical Characteristics of Sandstone under One-Dimensional Coupled Static-Cyclic Impact Loads
高压物理学报. 2022, 36(3): 034101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210879>

循环爆炸作用下地下洞室的动态响应及损伤累积

Dynamic Responses and Cumulative Damage of the Underground Cavern under Cyclic Explosion
高压物理学报. 2021, 35(2): 025203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200612>

不同卸围压速率下花岗岩的力学性质及声发射特征

Mechanical Properties and Acoustic Emission Characteristics of Granite under Different Unloading Rates of Confining Pressures
高压物理学报. 2021, 35(1): 014102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200608>

高温高压下花岗岩部分熔融时的电导率

Experimental Conductivity of Partial Melt Granite at High Temperature and Pressure
高压物理学报. 2020, 34(5): 051201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200502>

超高压作用下爆破近区花岗岩的破碎规律

Crushing Law of Rocks in the Area Near Blasting Source under Ultra-High Pressure
高压物理学报. 2025, 39(11): 110109 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20251113>

DOI: 10.11858/gywlxb.20251091

高温-冲击双循环下花岗岩的动力学特性与损伤

郭 昊¹, 左旭超¹, 钟康杰¹, 吴 俊², 刘 磊¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093)

摘要:为研究高温-冲击双循环累积损伤对花岗岩动态力学特性的影响,以高径比为 0.8 的花岗岩试样为研究对象,测得 100、300 和 500 °C 高温下分别循环 2、4 和 6 次前后的纵波波速,利用分离式霍普金森压杆试验装置进行冲击气压为 0.25、0.30 和 0.35 MPa 的等幅循环冲击试验,研究温度、高温循环次数、冲击气压和冲击次数对花岗岩试样动力学特征的影响,同时基于 Lemaitre 连续损伤本构模型和应变等价原理定义循环高温和循环冲击累积损伤因子,分析高温-冲击双循环临界累积损伤因子。结果表明:随着初始高温累积损伤和冲击气压的增加,花岗岩试样第一次冲击的裂纹形态由单一裂纹向复杂裂纹演化,贯通度增加,峰值应力依次减小,峰值应变依次增大;花岗岩试样循环冲击中,第一次冲击和最后一次冲击的峰值应力与峰值应变变化显著;对循环高温处理后花岗岩试样的循环动态冲击累积损伤的影响由大到小依次为冲击气压、温度、高温循环次数,得出临界高温-冲击累积损伤因子在 0.625~0.676 之间,可为深部资源地下开采安全评估提供理论支撑。

关键词:花岗岩;循环高温;循环冲击;动力学特性;累积损伤因子

中图分类号: O347; O521.9

文献标志码: A

随着我国工业水平的快速提高,对资源的需求与日俱增,深部资源开采利用已成为必然趋势^[1],而深部开采过程中的高地温等因素使资源开采难度加大,作业环境恶化,生产成本急剧增加^[2-3]。尤其是循环高温对围岩造成的累积损伤,会对岩石的力学性能产生影响,从而加大开采难度,增加井下作业的危险性。与此同时,深部岩土工程常常受到岩爆、冲击地压、地震、爆炸等动力扰动影响^[4-5],在瞬间产生巨大的能量和压力,使得巷道围岩在大范围的应变速率下承受动态加载,造成围岩及其结构剧烈破坏^[6-7]。动力扰动导致近区岩体破碎的同时,不可避免地对中远区的岩体产生损伤^[8],特别是循环动力扰动造成的累积损伤,会导致岩石内部的裂隙持续增加,岩石力学性能持续劣化。因此,有必要开展循环高温和循环冲击造成的累积损伤对岩石力学性能的影响研究,以期对岩石失稳进行有效预警,合理规避井下作业的危险。

Chen 等^[9]通过对不同温度和循环次数的花岗岩进行单轴压缩发现:当温度低于 300 °C 时,随着温度和循环次数的降低,峰值轴向应力和杨氏模量呈线性降低;当温度高于 400 °C 时,其峰值轴向应力和杨氏模量呈非线性降低,逐渐由脆性破坏转变为延性破坏模式。Rong 等^[10]对 300 °C 的花岗岩采用自然冷却和液氮冷却 2 种冷却方式,探究了不同循环高温冷却方式对其损伤特征及机理的影响,结果显示,液氮冷却对花岗岩力学性能的劣化效果更好,特别是前 12 次循环的效果较为明显。Braunagel 等^[11]研制了能够在数百微秒内实现多次压缩应力循环的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar,

* 收稿日期: 2025-05-14; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 云南省“兴滇英才支持计划”(KKXX202521089); 云南省重大科技专项(202202AG050014)

作者简介: 郭 昊(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事高温岩石力学研究. E-mail: 2556900676@qq.com

通信作者: 刘 磊(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程爆破、岩土工程、火灾安全研究.

E-mail: kgliulei@kust.edu.cn

SHPB)装置,并对花岗岩进行压缩,结果显示,使用多次压缩应力循环的 SHPB 装置得出的花岗岩动态强度为传统 SHPB 试验中岩石动态强度的一半。詹金武等^[12]对不同冷却方式冷却后的花岗岩试样进行循环冲击,研究发现,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,当热循环超过 3 次时,花岗岩的抗循环冲击能力开始下降。余莉等^[13]对循环高温冷却的花岗岩进行研究,结果表明:加热温度相同时,抗压强度随循环次数的增加呈先下降后上升再下降趋势;循环次数相同时,抗压强度随加热温度的升高而下降。王志亮等^[14]使用改进的 SHPB 进行了不同入射波应力幅值对花岗岩试样的等幅循环冲击试验,发现随着冲击次数的增加,岩样的峰值应力逐渐降低,最大应变、平均应变率和损伤值均呈增大趋势。齐文超等^[15]对高温水冷循环后的玄武岩试样进行了静态单轴压缩试验,发现在高温水冷循环与荷载的共同作用下,玄武岩试样的总损伤变量演化曲线表现出非线性特征,且随着循环次数的增加,曲线逐渐变缓,表明玄武岩由脆性变为塑性。刘康琦等^[16]对含单节理的辉长岩进行了单轴循环冲击试验,发现节理倾角显著影响试件的抗冲击能力,累积损伤系数随着冲击次数的增加而增大,随节理倾角的增大而减小。王伟等^[17]对砂岩试样进行循环冲击试验,结果表明,循环冲击过程中,试样内部小而孤立的裂缝逐步形成大且相互贯通的裂缝;循环冲击 3、6、9 次时,试样分别形成了单一裂缝、裂缝连通、裂缝网络。综上所述,国内外学者对于循环高温累积损伤和循环冲击累积损伤作用后花岗岩的力学性能研究比较详尽,并且能够形成相关理论体系,但是对于深部资源开采工程中的复杂环境研究较少,特别是高地温与频繁动力扰动造成的循环高温累积损伤和循环冲击累积损伤的对比,以及两者耦合作用下花岗岩的动力学性能尚有不足。

鉴于此,本研究将选取高径比为 0.8 的花岗岩试样为研究对象,通过电阻炉对试样进行 100、300 和 500 °C 高温分别循环 2、4 和 6 次处理,并增加 1 组常温(25 °C)试件进行对比试验,对高温前后试样的纵波波速进行测量,随后使用 SHPB 系统对高温处理后的花岗岩进行冲击气压分别为 0.25、0.30 和 0.35 MPa 的等幅循环冲击试验,研究温度、高温循环次数、冲击气压和冲击次数对花岗岩试样表现形态、动态应力-应变曲线、峰值应力和峰值应变的影响。同时,基于应力波基础理论、动态变形模量的变化规律以及 Lemaitre 提出的连续损伤本构模型^[18]和应变等价原理,定义花岗岩试样循环高温累积损伤因子、循环冲击累积损伤因子和两者耦合作用的累积损伤因子,分析温度、高温循环次数、冲击气压对试样累积损伤的影响,并得到其临界损伤因子。

1 试样制备和试验方案

1.1 试样加工

试验岩样为取自云南某矿山的黑云母花岗岩,外观为麻状,通体有黑白色斑点。选取表面完整、质地均匀的花岗岩,使用自动取芯机和数控全自动切割磨平一体机进行加工,根据 ISRM 标准^[19-21]制备尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的圆柱体试样,确保花岗岩试样的不平行度和不垂直度均保持在 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 以内。对花岗岩试样的质量和纵波波速进行测量,选取范围内的试样进行后续处理,所选取的部分花岗岩试样如图 1 所示。



图 1 部分花岗岩试样

Fig. 1 Some granite samples

1.2 循环高温处理

采用箱式电阻炉对花岗岩试样进行高温处理, 循环高温自然冷却过程如图 2 所示。将花岗岩试样置于炉内分别加热至 100、300 和 500 °C, 升温速率为 5 °C/min; 花岗岩试样升温至预设温度后, 保持电阻炉恒温 1 h 使试样均匀受热; 最后, 将试样取出自然冷却至室温。以此为一次高温自然冷却循环。依照此流程, 分别将花岗岩试样进行 2、4 和 6 次高温自然冷却处理, 并测量循环高温处理后试样的纵波波速。最后, 将处理完毕的花岗岩试样放入电热鼓风干燥箱中存放。对高温处理的花岗岩采用“G-温度-高温循环次数”编号, 例如: G-100-2 中, G 表示花岗岩, 100 表示试样升温至 100 °C, 2 表示进行了 2 次高温自然冷却循环。

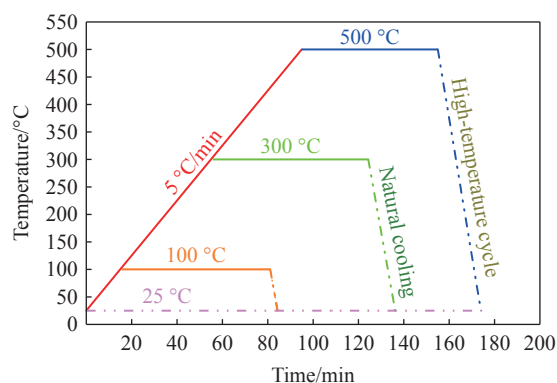


图 2 试样处理流程

Fig. 2 Specimen processing procedure

1.3 循环高温后花岗岩的表观特征

循环高温会使花岗岩试样表观特征发生变化。图 3 给出了花岗岩试样循环高温处理前、后的表观形貌。由图 3 可知, 花岗岩试样在常温条件下为灰白色、表面光滑; 经过 1 次 100 或 300 °C 处理后, 试样逐步向白色转变; 经过 1 次 500 °C 处理后, 试样变为黄白色。可以看出: 随着温度的升高, 试样表面粗糙度逐步增加; 而当温度相同时, 随着循环次数的增加, 试样颜色逐步加深, 特别是 500 °C 循环处理后, 试样转变为黄褐色, 表面更加粗糙。

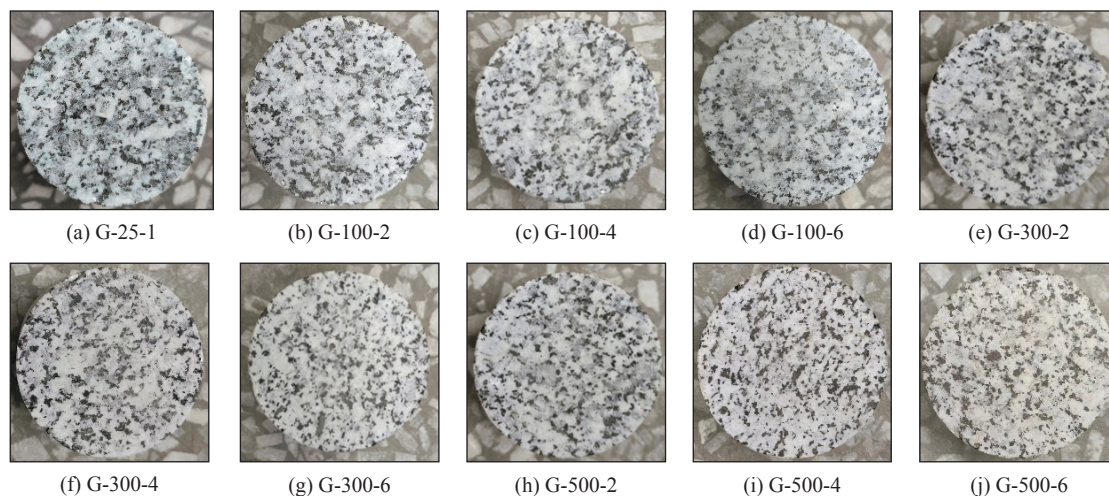


图 3 循环高温后花岗岩的表观形貌变化

Fig. 3 Apparent morphological changes of granite after high-temperature circulation

1.4 循环冲击试验方案

动态单轴循环冲击试验装置为直径 50 mm 的 SHPB。如图 4 所示, 该装置的子弹、入射杆、透射杆和缓冲杆均为高强度 40Cr 合金钢, 密度为 7810 kg/m³, 杆件长度均为 2 m, 弹性模量为 210 GPa, 纵波波速为 5400 m/s。图 5 中, σ_{in} 、 σ_{Re} 、 σ_{Tr} 分别为入射应力、反射应力和透射应力。由图 5 可知, 叠加应力曲线与透射应力曲线基本吻合, 满足 SHPB 试验一维假定和应力均匀假定^[22]。通过预试验确定常温花岗岩试样单次冲击的临界冲击气压为 0.43 MPa, 本试验选取 0.25、0.30 和 0.35 MPa 冲击气压开展等幅循环冲击试验。对循环冲击试验的花岗岩试样采用“G-温度-高温循环次数-冲击气压”编号。为避免试样的个体差异对结果产生影响, 进行 3 次平行试验, 从中选取合适的数据进行分析, 包括常温对照组, 共计 90 个试样。保证每次冲击试验前入射杆和子弹均在相同位置, 并且在试验过程中将花岗岩试样两端面涂抹凡士林, 以此减小初始速度、端部效应和摩擦效应对试验结果的影响。

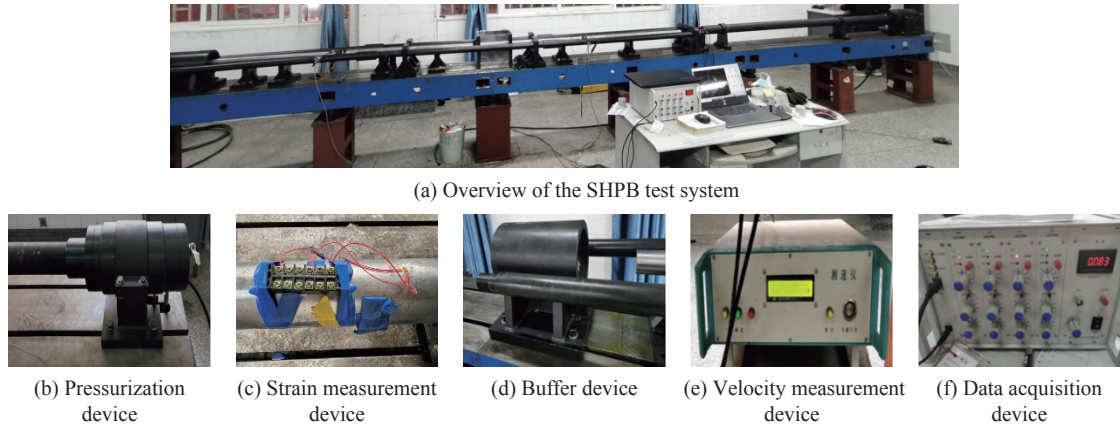


图 4 SHPB 试验系统

Fig. 4 SHPB test system

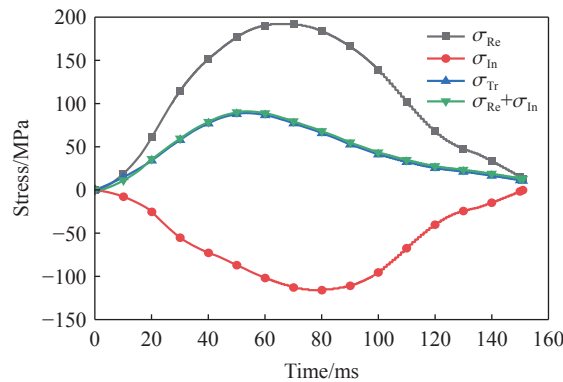


图 5 应力平衡验证

Fig. 5 Stress balance verification

2 试验结果与分析

2.1 第一次冲击结果分析

2.1.1 第一次冲击后的表现损伤特征

图 6 给出了循环高温处理后的花岗岩经过 0.25、0.30 和 0.35 MPa 冲击气压一次冲击后的部分破坏特征,可以看出,在相同高温累积损伤条件下,随着冲击气压的增加,花岗岩试样的破坏程度显著增大。冲击气压为 0.25 MPa 时,试样 G-100-2-0.25 未产生裂纹,所有试样均未发生破碎,同时,花岗岩试样的破坏形态为单一曲线裂纹破坏,随着初始高温累积损伤的增加,试样的裂纹长度和贯通度依次增加;冲击气压为 0.30 MPa 时,试样 G-25-1-0.30 未产生裂纹,而试样 G-500-6-0.30 发生破坏,随着初始累积损伤的增加,花岗岩试样的破坏形态由单一曲线裂纹破坏向放射状裂纹破坏演化,随着裂纹数量和贯通度的依次增加,试样破坏程度加剧;冲击气压为 0.35 MPa 时,所有试样均有裂纹产生,试样 G-500-2-0.35 和 G-500-4-0.35 发生破坏,试样的破坏形态均为网状裂纹破坏,随着初始累积损伤的增加,花岗岩试样的裂纹数量和贯通度均增加,最终使试样破碎。分析破坏过程的原因:冲击气压为 0.25 MPa 时,花岗岩试样吸收的能量较低,仅能产生一条曲线裂纹,未能使试样破坏;冲击气压为 0.30 MPa 时,花岗岩试样吸收的能量主要作用于试样上一个点,因此,试样主要产生放射状裂纹,试样破坏的大块率较高;冲击气压为 0.35 MPa 时,花岗岩试样吸收的能量较高,作用在试样内部比较均匀,故会产生网状裂纹,试样破坏后粉碎度较好。因此,可以得出,冲击气压和初始高温损伤均会影响花岗岩试样的破坏形态,并且冲击气压对试样的影响大于初始高温损伤。

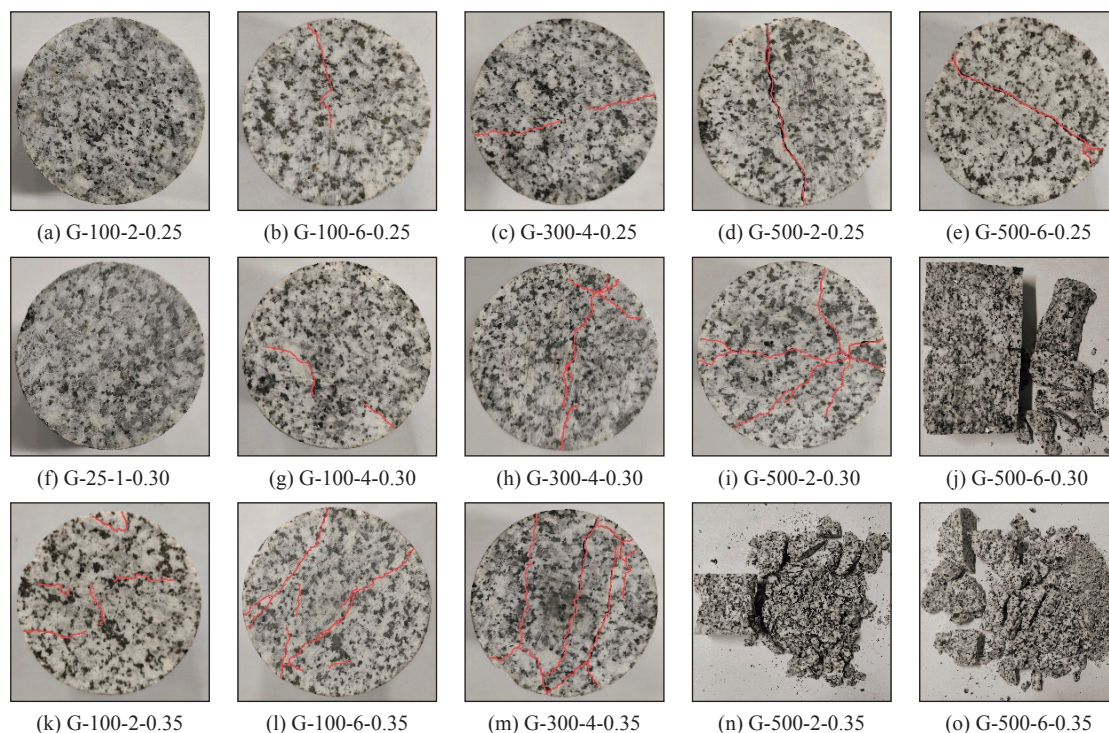


图 6 第一次冲击后部分花岗岩试样的表现形貌

Fig. 6 Apparent morphologies of some granite samples after the first impact

2.1.2 第一次冲击的应力-应变曲线

0.25、0.30 和 0.35 MPa 冲击气压下,不同高温损伤花岗岩试样第一次冲击时的应力-应变曲线如图 7 所示。不同初始高温损伤、不同冲击气压条件下,花岗岩试样应力-应变曲线的变化特征均比较相似。从图 7 可以看出:在弹性变形阶段,花岗岩试样可近似为理想弹性体,应力与应变成正比,即应力-应变曲线的前段近似为一条直线;在裂纹扩展阶段,花岗岩试样内部裂纹增加并扩展,内部损伤不断累积,应力-应变曲线的斜率随应力的增加逐渐减小;在应变硬化阶段,花岗岩试样延性较好的部分在应力作用下进行了内部结构调整,抗变形能力进一步增强,应力-应变曲线呈“上凸”形状,直至达到峰值应力点;在破坏后阶段,花岗岩试样仍有部分残余强度,内部储存的弹性应变能得到释放,呈“II”型应力-应变曲线特征,并伴随明显的“回弹”现象。

通过对比图 7(a)、图 7(b) 和图 7(c) 可知,试样 G-25-1-0.25、G-100-2-0.25 以及 G-25-1-0.30 的峰值应力显著高于其他组,主要归因于第一次冲击过程中花岗岩试样内部能量未达到裂纹萌生的临界条件,试件主要以弹性变形为主。研究发现,随着初始高温损伤的增加,花岗岩试样的应力-应变曲线整体向右下方移动,主要归因于初始高温损伤使试样内部裂纹产生并扩展,从而使试样的承载力减弱,并且冲击过程中裂纹扩展会消耗能量,从而使峰值应力减小,峰值应变增大。同时发现,相同温度、不同循环次数处理的花岗岩试样的应力-应变曲线较为集中,主要是因为,相较于循环次数,高温对花岗岩试样的内部损伤较大,与高温损伤因子变化结果相吻合。

2.1.3 第一次冲击下花岗岩试样的峰值应力和峰值应变

在 0.25、0.30 和 0.35 MPa 冲击气压下,不同高温损伤花岗岩试样的峰值应力和峰值应变分别如图 8 和图 9 所示。温度和冲击气压相同时,峰值应力和峰值应变的变化均较小。随着高温循环次数由 2 增加至 4 和 6,100 °C、0.25 MPa 冲击气压下,花岗岩试样的峰值应力仅降低了 3.3% 和 2.1%,峰值应变仅增大了 0.4% 和 11.0%,因此,高温循环次数对花岗岩试样第一次冲击的峰值应力和峰值应变变化的影响较小。

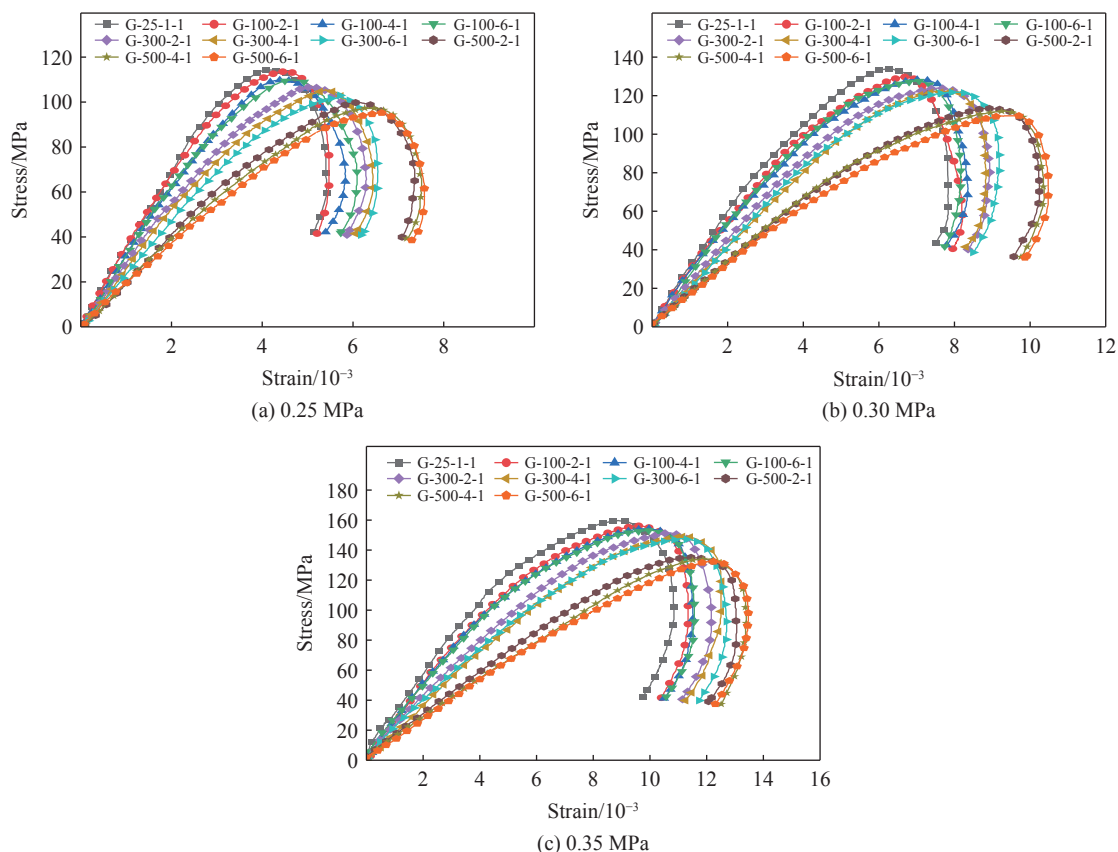


图 7 第一次冲击下花岗岩试样的动态应力-应变曲线

Fig. 7 First impact dynamic stress-strain curves of granite specimens

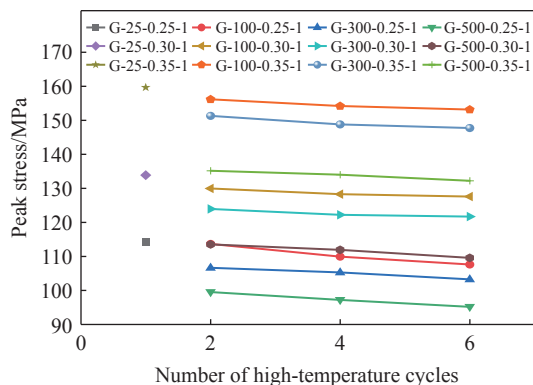


图 8 第一次冲击下花岗岩试样的峰值应力变化

Fig. 8 Change of peak stress of granite samples after the first impact

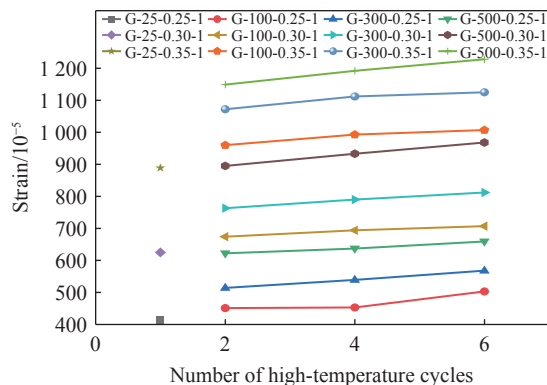


图 9 花岗岩试样第一次冲击峰值应变变化

Fig. 9 Change of peak strain of granite samples after the first impact

当冲击气压和高温循环次数相同时, 花岗岩试样第一次冲击峰值应力随温度的升高逐渐减小, 峰值应变随温度的升高逐渐增大, 且温度越高, 变化幅度越大。同时还发现, 由于花岗岩试样强度较高, 导致内部损伤较小, 因此, 除试样 G-100-2-0.25 外, 其余试样的峰值应力在冲击气压和高温循环次数相同时随温度变化比较均匀, 均为温度越高, 峰值应力越小, 特别是试样 G-500-6-0.35 的峰值应力相较于 300 °C 时降低了 10.5%, 具体原因前文已作分析。

当温度和高温循环次数相同时, 花岗岩试样第一次冲击的峰值应力和峰值应变随着冲击气压的增加变化比较明显。可以发现, 相较于温度的影响, 冲击气压对花岗岩试样第一次冲击的峰值应力和峰值应变的影响更大, 并且冲击气压越大, 第一次冲击的峰值应力和峰值应变越大, 特别是试样 G-100-2

的峰值应力随冲击气压的增加分别增大了 14.4% 和 20.2%, 峰值应变分别增加了 33.1% 和 29.8%。这主要归因于冲击气压通过机械能直接输入、应力波传播较慢导致局部应力集中, 从而显著提高了花岗岩试样第一次冲击的峰值应力, 而温度对花岗岩试样的劣化作用仅存在于其内部的矿物膨胀和裂隙萌生, 影响相对较小。

2.2 循环冲击结果分析

2.2.1 循环冲击的应力-应变曲线

考虑到相较于温度和冲击气压, 高温循环次数对试验结果的影响较小, 本研究仅对 4 次高温循环结果进行分析。经过 4 次高温循环后的花岗岩试样循环冲击动态应力-应变曲线如图 10 所示。可以看出, 花岗岩试样循环冲击应力-应变曲线与第一次冲击应力-应变曲线的特征基本相似。通过对比花岗岩试样的循环冲击应力-应变曲线发现, 试样最后一次冲击的“回弹”现象减弱, 其主要原因是随着累积损伤的增加, 花岗岩试样内部的弹性部分逐渐转变为塑性部分, 同时, 试样内部裂隙在冲击过程中有扩展或闭合现象, 这一过程会进一步消耗内部的弹性储能, 二者共同作用减弱了花岗岩试样的“回弹”能力。同时还发现, 随着初始温度和冲击气压的升高, 花岗岩试样的破碎冲击次数依次减小。分析认为,

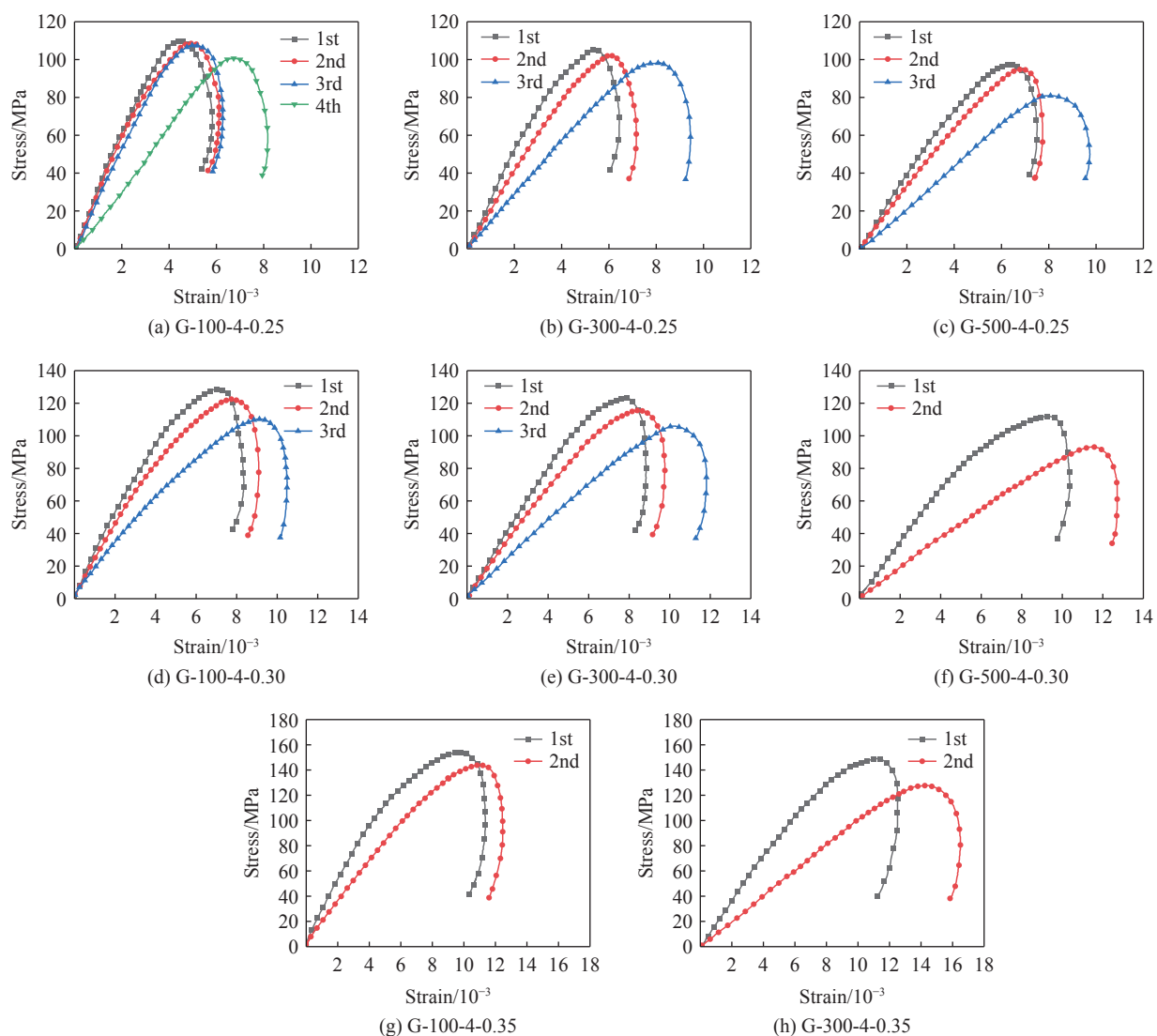


图 10 花岗岩试样循环冲击部分的动态应力-应变曲线

Fig. 10 Partial dynamic stress-strain curves of granite specimens under cyclic impact

通过热损伤弱化岩石内部结构,通过增大冲击气压来增大能量输入,二者共同作用于花岗岩试样,从而加速对试样的破坏,减少冲击次数。

2.2.2 循环冲击下的峰值应力和峰值应变

经过 4 次高温循环后,循环冲击下花岗岩试样的峰值应力和峰值应变分别如图 11 和图 12 所示。由峰值应力和峰值应变的变化趋势可知:第一次冲击和最后一次冲击的峰值应力变化显著,特别是试样 G-500-4-0.30 的峰值应力减小了 14.1%,峰值应变增大了 19.4%;而位于二者之间的冲击峰值应力和峰值应变变化缓慢,分析认为,是由于中间冲击阶段花岗岩试样进入损伤稳定演化阶段,作用于裂纹扩展的能量比较均匀,未能达到破坏阈值,故中间冲击的峰值应力平缓波动。同时还发现,随着温度和冲击气压的升高,花岗岩试样循环冲击的峰值应力逐渐减小,峰值应变逐渐增大。但是,随着循环冲击次数的增加,相较于温度和冲击气压升高而言,部分试样的变化更加明显,原因是冲击损伤与高温损伤共同影响,使试样的力学性能进一步劣化,冲击过程中试样的峰值应力和峰值应变变化明显。

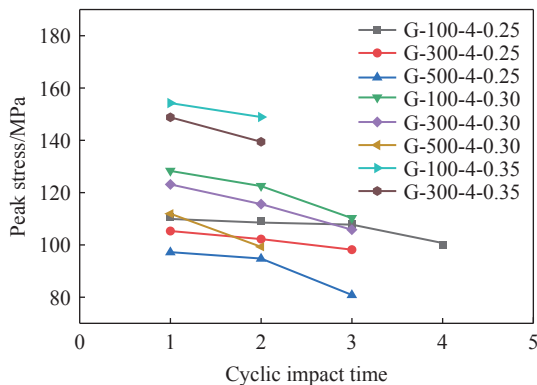


图 11 循环冲击下花岗岩试样的峰值应力变化
Fig. 11 Change of peak stress of granite samples during cyclic impact process

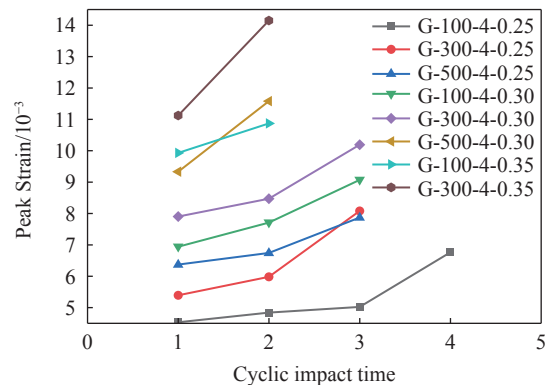


图 12 循环冲击下花岗岩试样的峰值应变变化
Fig. 12 Change of peak strain of granite samples during cyclic impact process

2.2.3 循环冲击下试样的破坏形态

图 13 给出了 4 次高温循环作用下花岗岩试样被循环冲击后的破坏形貌。可以看出,随着温度和冲击气压的升高,试样的破坏程度依次增大,其原因是高温累积损伤会降低试样的破坏能量阈值,同

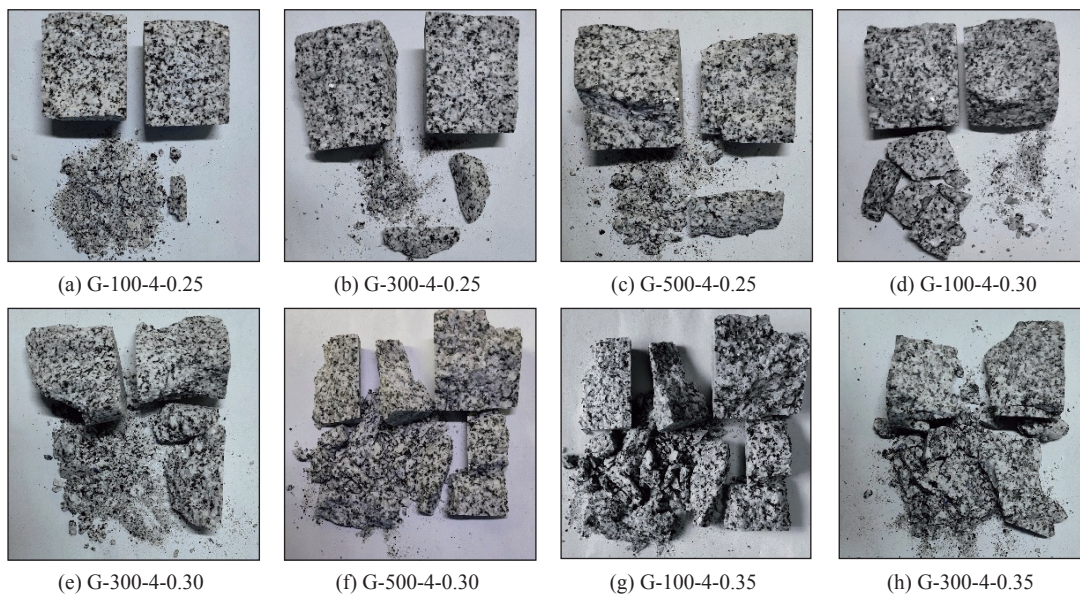


图 13 4 次高温循环冲击后花岗岩试样的破坏形貌

Fig. 13 Failure morphologies of granite specimens after four high-temperature cycles and impact cycles

时, 冲击气压增加会增大能量输入。

将图 13 与图 10 结合分析可知: 破坏前, 冲击试验使试样内部裂隙演化及发育, 试样冲击的峰值应力减小, 峰值应变增大, 累积损伤增加; 当累积损伤达到破坏阈值时, 试样发生破坏, 此时冲击试验的峰值应力显著减小, 峰值应变显著增大。

3 累积损伤分析

3.1 循环高温累积损伤

高温循环会对花岗岩试样内部造成累积损伤, 纵波波速变化能够反映高温循环后试样内部的裂隙扩展及数量变化情况, 并且能够对试样内部的损伤程度进行评价。使用 SGT-CW-01 型无线非金属超声波检测仪对高温处理前、后花岗岩试样的纵波波速进行测量, 过程如图 14 所示, 测得常温状态下试样纵波波速为 8 290.8 m/s。基于 Lemaitre 提出的连续损伤本构模型和应力波基础理论^[23], 可得出花岗岩试样的高温损伤因子 D_T 与纵波波速的关系

$$D_T = 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中: v_0 和 v 分别为花岗岩试样高温处理前、后的波速。

花岗岩高温循环后的累积损伤因子变化如图 15 所示。由图 15 可知, 花岗岩试样的高温累积损伤因子随温度和高温循环次数的增加而增大。温度变化对试样累积损伤因子的影响较大, 而高温循环次数对累积损伤因子的影响效果并不明显, 特别是试样 G-500-6, 对比 300 °C 高温时累积损伤因子增大了 59.1%。分析认为, 产生这种现象的原因是花岗岩试样内部的不同矿物对温度的感度不同, 当温度较低时, 内部矿物膨胀不明显, 对试样的损伤有限。同时, 发现前 2 次高温循环花岗岩试样的高温累积损伤因子显著大于后续高温循环, 特别是试样 G-500-2 的高温累积损伤因子为 0.419。这主要归因于花岗岩试样内部的不同矿物在经历初次高温时快速膨胀, 导致试样内部产生新裂隙并使原有裂隙扩大, 致使纵波波速急剧降低, 而后续的高温对矿物的影响较小, 纵波波速损失率较少。

3.2 循环冲击累积损伤

花岗岩试样的累积损伤因子可以量化循环冲击下试样的损伤程度, 基于动态变形模量的变化^[24], 可定义花岗岩试样的冲击损伤因子 D_I

$$D_I = 1 - \frac{E_i}{(1 - D_T)E_0} \quad (2)$$

式中: E_i 为循环高温处理后花岗岩试样第 i 次循环冲击时的动态变形模量, E_0 为未作处理花岗岩试样在临界冲击气压条件下的动态变形模量。

基于动态变形模量的定义并参考相关标准^[25-26], 可取应力-应变曲线中 50% 峰值应力与曲线原点连线的斜率作为动态变形模量。花岗岩循环冲击后的累积损伤因子变化如图 16 所示, 从图 16 可以看

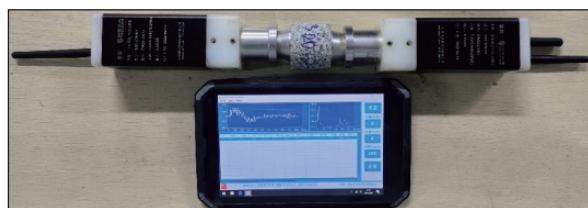


图 14 花岗岩试样纵波波速测量

Fig. 14 Measurement of longitudinal wave velocity of granite samples

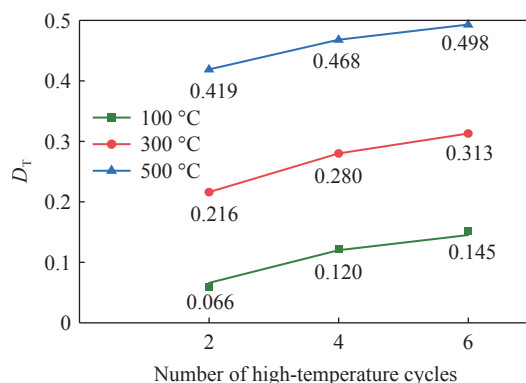


图 15 高温循环下花岗岩高温累积损伤因子变化

Fig. 15 Variation of granite high-temperature damage factor under high-temperature cycles

出,随着冲击次数的增加,冲击累积损伤因子不断增大,同时在最后一次冲击作用下增大明显,特别是试样 G-500-4-0.30,最后一次冲击下,冲击累积损伤因子增大了 44.2%,主要归因于冲击过程中试样的压密作用。同时还发现,初始损伤会影响第一次冲击累积损伤因子,特别是经过 500 °C 处理后 0.35 MPa 气压冲击下的试样,累积损伤因子为 0.561。

通过对循环高温花岗岩累积损伤因子(图 15)与循环冲击花岗岩累积损伤因子(图 16)进行对比可知,冲击气压对花岗岩试样累积损伤的影响显著大于高温的影响。分析认为,花岗岩为脆性材料,其损伤对动态冲击更为敏感,热量的缓慢输入

以及高能量密度的动态冲击气压快速输入均会对试样造成损伤。同时,高温对花岗岩试样累积损伤的影响显著大于高温循环次数的影响,具体原因在 2.2.2 节已作分析。因此,可以得出,对循环高温处理后花岗岩试样的循环动态冲击累积损伤的影响由大到小依次为冲击气压、温度、高温循环次数。

3.3 高温-冲击双循环耦合累积损伤

花岗岩试样经过循环高温和循环冲击作用后,其内部损伤不断累积,力学性能不断劣化,最终试样破坏。基于 Lemaitre 应变等价原理^[27],可得出循环高温与循环冲击耦合作用下的损伤因子 D 为

$$D = 1 - \frac{(1 - D_T)(1 - D_I)}{1 - D_T D_I} \quad (3)$$

经过 4 次高温循环后,花岗岩试样的高温-冲击累积损伤因子如图 17 所示。花岗岩试样冲击前受循环高温累积损伤影响,第一次和最后一次冲击的高温-冲击累积损伤因子变化较为显著。同时还发现:花岗岩试样的循环高温累积损伤因子均小于 0.498,且所有试样均未发生破坏;第一次冲击的高温-冲击累积损伤因子均不超过 0.625,最后一次冲击的高温-冲击累积损伤因子均大于 0.676。因此,基于循环高温和循环冲击损伤得到的花岗岩试样破坏的临界累积损伤因子在 0.625~0.676 之间。

4 结 论

(1) 随着初始高温累积损伤和冲击气压的增加,花岗岩试样第一次冲击的裂纹形态和贯通度依次增加,裂纹由单一裂纹向复杂裂纹演化,直至发生破坏;随着初始高温损伤的增强,花岗岩试样第一次冲击时的峰值应力依次减小,峰值应变依次增大。相较于温度影响,冲击气压对花岗岩试样第一次冲击时的峰值应力和峰值应变的影响更大,特别是试样 G-100-2,随着冲击气压的增大,其峰值应力分别增大了 14.4% 和 20.2%,峰值应变分别增大了 33.1% 和 29.8%。

(2) 随着初始温度和冲击气压的增大,花岗岩试样的破碎冲击次数依次降低,试样最后一次冲击的“回弹”现象减弱。在循环冲击中的第一次冲击和最后一次冲击时,花岗岩试样的峰值应力和峰值应变

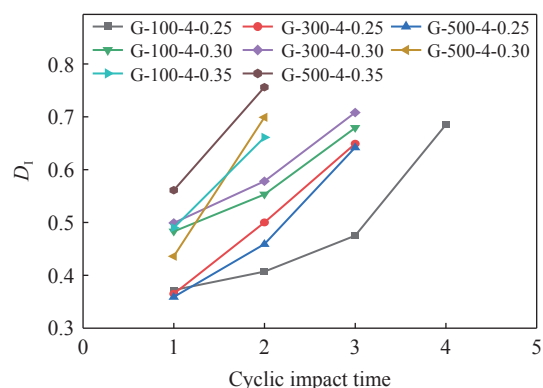


图 16 循环冲击下花岗岩的冲击累积损伤因子变化
Fig. 16 Variation of impact cumulative damage factor of granite under cyclic impact

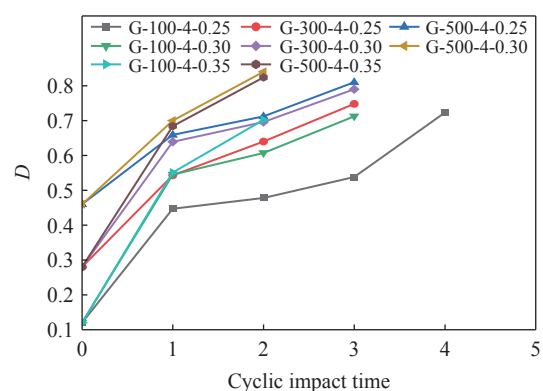


图 17 循环冲击下花岗岩高温-冲击累积损伤因子的变化
Fig. 17 Variation of high-temperature and impact cumulative damage factor of granite under cyclic impact

变化显著,特别是试样 G-500-4-0.30,其峰值应力减少了 14.1%,峰值应变增加了 19.4%。而位于二者之间的冲击峰值应力变化缓慢,试样循环冲击的破坏过程与峰值应力及峰值应变的变化有关。

(3) 随着温度的升高和高温循环次数的增加,花岗岩试样的高温累积损伤因子不断增大,且首次高温试样的高温累积损伤因子显著大于后续高温循环加载;随着冲击次数的增加,花岗岩试样的冲击累积损伤因子不断增大,且在最后一次冲击作用下增大最明显;循环高温处理后,花岗岩试样的循环动态冲击累积损伤的影响由大到小依次为冲击气压、温度、高温循环次数;通过对循环高温累积损伤和循环冲击累积损伤共同作用分析得出,临界累积损伤因子范围在 0.625~0.676 之间。

参考文献:

- [1] 朱万成,唐春安,左宇军. 深部岩体动态损伤与破裂过程 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-3.
ZHU W C, TANG C A, ZUO Y J. Dynamic damage and fracture process of deep rock mass [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-3.
- [2] 张鸿忠. 热冷循环后花岗岩物理参数演化规律与动态压缩性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023: 1-2.
ZHANG H Z. Study on the evolution of physical parameters and dynamic compression properties of granite after heating and cooling cycles [D]. Changsha: Central South University, 2023: 1-2.
- [3] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE H P. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [4] XIA K W, YAO W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system—a review [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(1): 27-59.
- [5] XIE H P, ZHANG K, ZHOU C T, et al. Dynamic response of rock mass subjected to blasting disturbance during tunnel shaft excavation: a field study [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(2): 52.
- [6] XIE H P, ZHU J B, ZHOU T, et al. Novel three-dimensional rock dynamic tests using the true triaxial electromagnetic Hopkinson bar system [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(4): 2079-2086.
- [7] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(4): 535-542.
XIE H P, ZHOU H W, XUE D J, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(4): 535-542.
- [8] 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: 1-3.
TIAN N C. Research on dynamic properties and evolution law of cumulative damage of granite under cyclic loading [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 1-3.
- [9] CHEN B, ZHANG S C, SHEN B T, et al. Mechanical properties and failure characteristics of granite treated with a combined water-air cooling cycle [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 34: 101964.
- [10] RONG G, SHA S, LI B W, et al. Experimental investigation on physical and mechanical properties of granite subjected to cyclic heating and liquid nitrogen cooling [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(5): 2383-2403.
- [11] BRAUNAGEL M J, GRIFFITH W A. A split Hopkinson pressure bar method for controlled rapid stress cycling using an oscillating double striker bar [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 3845-3851.
- [12] 詹金武,周亚来,王雨,等. 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 [J]. *岩土力学*, 2024, 45(8): 2362-2372, 2386.
ZHAN J W, ZHOU Y L, WANG Y, et al. Experimental study on physical damage and mechanical degradation of granite subjected to high-temperature cooling impact cycling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(8): 2362-2372, 2386.
- [13] 余莉,彭海旺,李国伟,等. 花岗岩高温-水冷循环作用下的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(4): 1025-1035.
YU L, PENG H W, LI G W, et al. Experimental study on granite under high temperature-water cooling cycle [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4): 1025-1035.
- [14] 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 Z L, YANG H, TIAN N C. Mechanical property and damage evolution mechanism of granite under uniaxial cyclic

- impact [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 59–66.
- [15] 齐文超, 蔡勇智, 何童, 等. 高温水冷循环后玄武岩静态压缩力学特性及宏微观损伤演化规律 [J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(2): 145–154.
- QI W C, CAI Y Z, HE T, et al. Mechanical characteristics and macromicro damage evolution of basalt under static compression after high temperature water cooling cycles [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2025, 42(2): 145–154.
- [16] 刘康琦, 刘红岩, 周月智, 等. 循环冲击荷载作用下单节理岩体的动态力学行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(6): 061423.
- LIU K Q, LIU H Y, ZHOU Y Z, et al. Dynamic mechanical behaviors of single-jointed rock mass under cyclic impact loadings [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(6): 061423.
- [17] 王伟, 刘泽, 牛庆合, 等. 循环冲击作用下砂岩裂缝扩展及渗透率响应特征 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(6): 061421.
- WANG W, LIU Z, NIU Q H, et al. Characteristics of fracture propagation and permeability response of sandstone under cyclic impact effect [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(6): 061421.
- [18] 杨逾, 魏珂, 刘文洲. 基于 Lemaitre 原理改进砂岩蠕变损伤模型研究 [J]. *力学季刊*, 2018, 39(1): 164–170.
- YANG Y, WEI K, LIU W Z. Study on the creep damage model of sandstone based on the principle of lemaître improvement [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2018, 39(1): 164–170.
- [19] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode- I fracture toughness of rock materials [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49: 105–112.
- [20] HUDSON J A, HARRISON J P. Rock dynamics and time-dependent aspects [M]//HUDSON J A, HARRISON J P. *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Amsterdam: Elsevier, 1997: 207–221.
- [21] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(3): 281–289.
- [22] 杨科, 刘文杰, 马衍坤, 等. 煤岩组合物冲击动力学特征试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2569–2581.
- YANG K, LIU W J, MA Y K, et al. Experimental research on dynamic characteristics of coal-rock combined specimen [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2569–2581.
- [23] 王倩倩. 基于不同循环静载的损伤砂岩静动态力学性能研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021: 55–56.
- WANG Q Q. Study on static and dynamic mechanical properties of damaged sandstone under different cyclic static loads [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021: 55–56.
- [24] 张蓉蓉, 沈永辉, 马冬冬, 等. 循环冲击作用下冻融红砂岩动力学特性与损伤机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(8): 081443.
- ZHANG R R, SHEN Y H, MA D D, et al. Dynamic characteristics and damage mechanism of freeze-thaw treated red sandstone under cyclic impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(8): 081443.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤和岩石物理力学性质测定方法 第 8 部分: 煤和岩石变形参数测定方法: GB/T 23561.8—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock—part 8: methods for determining the deformation parameters of coal and rock: GB/T 23561.8—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [26] ASTM. Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures: ASTM D7012-14e1 [S]. Pennsylvania: ASTM International, 2014.
- [27] MA D D, XIANG H S, MA Q Y, et al. Dynamic damage constitutive model of frozen silty soil with prefabricated crack under uniaxial load [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2021, 147(6): 04021033.

Dynamic Mechanical Properties and Damage Evolution in Granite under Coupled High-Temperature-Impact Cyclic Loading

GUO Hao¹, ZUO Xuchao¹, ZHONG Kangjie¹, WU Jun², LIU Lei¹

(1. *Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;*

2. *Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China*)

Abstract: To study the influence of high-temperature-impact dual-cycle cumulative damage on the dynamic mechanical characteristics of granite, specimens with a height-to-diameter ratio of 0.8 were subjected to high-temperature cycling treatments at 100, 300, and 500 °C for 2, 4, and 6 cycles, respectively. The P-wave velocities before and after treatments were measured. Constant-amplitude cyclic impact tests under gas pressures of 0.25, 0.30, and 0.35 MPa were conducted using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) system. The effects of temperature, high-temperature cycles, impact gas pressure, and impact cycles on the dynamic behavior of granite were systematically investigated. Based on Lemaitre's continuum damage constitutive model and the strain equivalence principle, cumulative damage factors for high-temperature and impact cycles were defined, and the critical dual-cycle cumulative damage factor was analyzed. Results indicate that with increasing initial high-temperature cumulative damage and impact gas pressure, the crack morphology of granite during the first impact evolved from single cracks to complex crack networks with increased connectivity, while peak stress decreased and peak strain increased. Significant variations in peak stress and strain were observed between the first and final impacts during cyclic loading. The influence of factors on the cumulative impact damage under high-temperature cycling followed the order: impact gas pressure > temperature > number of high-temperature cycles. The critical high-temperature-impact cumulative damage factor was determined to range between 0.625 and 0.676. These findings provide theoretical support for safety assessment in deep underground resource extraction.

Keywords: granite; cyclic high temperature; cyclic impact; dynamic characteristics; cumulative damage factor