

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0169

水冷却对高温花岗岩的细观损伤及动力学性能影响*

朱要亮^{1,2}, 俞 缙¹, 高海东³, 李 刚³, 周先齐¹, 郑小青²

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;

2. 福建江夏学院工程学院, 福建 福州 350108;

3. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

摘要: 为探讨高温花岗岩经水冷却后的细观结构损伤及动态力学性能, 对水冷却后高温花岗岩开展波速和核磁共振测试, 分离式霍普金森压杆冲击试验, 以及冲击破碎试样的扫描电镜观察, 分析比较不同状态下花岗岩波速、孔隙度和动力学参数的变化规律。研究发现: 随着温度升高, 经水冷却处理后高温花岗岩波速非线性下降, 大孔隙孔隙度分量增大, 且水冷却后试样的孔隙孔径尺寸和数量均大于自然冷却; 水冷却后高温花岗岩动力学参数呈现出随着温度升高, 峰值应力减小, 峰值应变增大, 弹性模量则先增大后减小的规律; 由于水冷却使高温花岗岩表面温度急剧降低, 产生额外的温度应力, 花岗岩内部损伤加剧, 表现出更低的波速与峰值应力; 而水的冷淬作用一定程度上提高了表层花岗岩的硬度, 降低了高温后花岗岩的塑性能力, 与自然冷却相比水冷却后花岗岩的峰值应变减小, 弹性模量增大, 表现出脆性破坏特征。在温度低于 400 °C 时, 冷却方式对冲击裂纹影响不大, 随着温度升高到 800 °C, 自然冷却后花岗岩冲击断面呈蜂窝状, 而水冷却后冲击断面则相对平整。

关键词: 高温花岗岩; 水冷却; 细观损伤; 动力学性能; 冷淬作用

中图分类号: O346.5; TU 452

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

在高放废物地质处置、地热岩石的开发与利用、隧道、洞库、涵洞等经受火灾后修复等工程中, 都涉及到高温岩石问题。该类工程除了承受常规静荷载外, 也可能面临地震、爆炸、武器冲击以及车辆荷载等多种动力荷载作用^[1]。这需要我们加深对高温前后岩石静力学与动力学性能的了解, 为此国内外学者进行了大量的研究。在静力学方面, 徐小丽等^[2]、Chen 等^[3]、Liu 等^[4]、Dwivedi 等^[5] 研究了不同温度热处理后, 花岗岩单轴压缩下物理力学性质。蔡燕燕等^[6] 研究了高温后花岗岩在卸荷路径下的力学性质。在动力学方面, 刘石等^[7]、李明等^[8]、陈腾飞等^[9]、尹士兵等^[10-11] 分别对高温后大理岩和砂岩进行了冲击动力实验, 获得了岩石高温后动力学性能参数。刘石等^[12]、支乐鹏等^[13] 对经温度处理后的花岗岩进行了波动特性与动力特性的研究。卢志堂等^[14] 探讨了应变率对不同温度下花岗岩动力学参数的影响。

虽然以上实验研究考虑了温度对岩石的影响, 但主要是对高温岩石自然冷却后再进行实验。然而在实际工程中往往会出现高温岩石遇水冷却的情形, 如对于遭受火灾的隧道、洞库等地下工程, 采取喷水灭火; 高温岩石施工过程中利用钻井液或泥浆对岩石冷却; 高地温地质条件下先借助水冷却再开挖修建隧道等等。水的急剧冷却将导致围岩温度迅速降低, 势必产生热破裂, 这显然不利于围岩的稳定性。该问题在近几年逐渐受到重视, 黄真萍等^[15-16] 对高温大理岩、石灰岩遇水冷却后的力学、声学以及波动性能进行了研究; 邵保平等^[17] 发现 600 °C 以内花岗岩遇水冷却后, 其单轴抗压强度、抗拉强度以及弹性模量均随着温度增大而减小; 朱振南等^[18] 研究了 500 °C 内高温花岗岩遇水冷却后的物理力学特性; 梁铭

* 收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(51874144, 51679093); 福建省自然科学基金(2018J01630)

第一作者: 朱要亮(1985—), 男, 博士研究生, ziaini@126.com;

通信作者: 俞 缙(1978—), 男, 博士, 教授, 博导, bugyu0717@163.com。

等^[19]通过实验得到花岗岩经自然冷却与遇水冷却后的温度和孔隙率变化曲线。以上研究主要是从静力学角度讨论水冷却对高温岩石的影响,然而经水冷却后的高温岩石在后期仍面临着地震、爆炸、施工振动等动力影响,所以从岩体工程的安全性、可靠性、耐久性等角度出发,必须了解高温岩石经水冷却后的动力学性能。但目前只有翟越等^[20]研究了高温混凝土遇水冷却后的动力学性能,对岩石材料的实验研究尚未见报道。鉴于此,本文中选取洞库、隧道工程中常见的花岗岩,对其加热至预定温度后,采取水冷却,随后进行波速测试、核磁共振扫描、分离式霍普金森压杆冲击实验和扫描电镜观测,深入研究水冷却对高温岩石的细观结构损伤及动态力学性能影响,并与自然冷却结果对比,得到一些有益成果,为高温后岩体工程的研究提供借鉴与参考。

1 岩样制备及实验方案

1.1 岩样制备

岩样取自湖南岳阳完整花岗岩大样,岩石状态较好,致密无裂纹。根据国际岩石实验试样尺寸的标准,按照2:1比例,切割加工成直径50 mm、高25 mm的圆柱体,并对其两端进行仔细打磨,保证其表面平整度在0.02 mm以内。加热前试样平均密度2.61 g/cm³,纵波波速在3 859~4 074 m/s之间,试样均匀性与一致性较好。

1.2 岩样处理与实验方案

为了研究高温花岗岩经水冷却后的动态力学性能,设定5组温度条件:25℃(常温)、200℃、400℃、600℃和800℃。作为对比,加热后岩石分别采取浸水冷却与自然冷却两种方式,每组温度每种冷却方式各3块试样(常温组3块),共计27块。

采用ZBL-U510非金属超声检测仪对高温前后试样进行波速测试,获得波速变化值。根据编号将每组6块试样同时放入型号为SX2-2.5-12N的箱式电阻炉内加热到预定温度并恒温2 h后,取出3块试样放入预先注满水的容积为20 L的铁皮水桶中进行浸水冷却。由于600℃与800℃时,岩石温度较高,为保证冷却效果,将高温岩石放入水桶中后,随即再往桶中注入水,将升温后的热水置换出来,以保证水冷却效果,余下3块留在电阻炉中自然冷却。对冷却后的岩石试样采用MesoMR23-060H-I型核磁共振成像分析仪进行核磁共振度测试,随后进行动力冲击实验,最后对冲击破碎后的试样进行扫描电镜观测,分析温度、冷却方式与动力冲击耦合作用下花岗岩损伤特征。由于本次实验不考虑应变率效应,为保证冲击速度一致,系统气压统一设为0.4 MPa,每次实验前用直尺将子弹送至同一位置,最终获得每组冲击速率平均值为6.25~6.57 m/s。为获得可靠的应力应变关系,根据前人研究,采用波形整形技术,在入射杆端部黏贴紫铜波形整形器,并在试样与杆件接触部位涂抹凡士林以减小摩擦。图1为实验获得的典型SHPB实验应力波形。

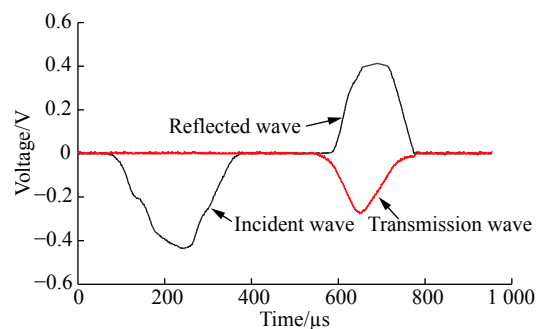


图1 高温花岗岩典型 SHPB 应力波形
Fig. 1 Typical SHPB stress waveforms for high-temperature granite specimens

从图1中可以看出入射波缓慢上升,应力波在传播过程中无明显震荡,表明较好满足应力波一维传播假设。

2 超声波及孔隙度结果分析

在测试前,先用游标卡尺测量出各个试样的高度,并在其表面涂抹凡士林作为耦合剂,随后在主机界面输入高度尺寸,即可直接读取波速结果,每个试样读取6个点。

2.1 超声波形图分析

根据超声波形图实验结果发现 25~400 °C 热损伤较小, 超声波形状基本相似, 仅幅值大小不同, 800 °C 时高温引起损伤已经很大, 冷却方式影响不明显, 故限于篇幅, 此处只列出部分超声波形图。

从图 2 中可以看出, 从室温到 600 °C 自然冷却, 随着温度升高, 超声波幅降低, 超声波形比较规则, 波峰间距均衡, 表明此时花岗岩内部虽然产生新的损伤, 但岩样仍能维持一定均匀性。600 °C 花岗岩经水冷却后超声波形不规则, 随着温度升高到 800 °C, 超声波形更加凌乱, 表明岩石内部萌生更多孔隙, 试样均匀性变差, 声波传播到裂隙部位将进行多次反射、折射等, 使超声波形变得凌乱。

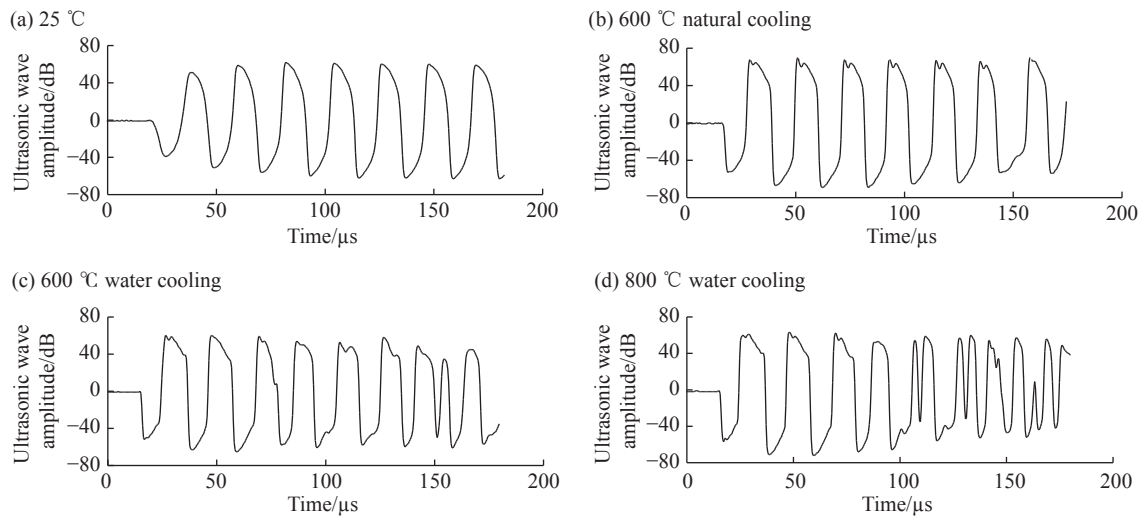


图 2 高温花岗岩不同温度后纵波波形图

Fig. 2 Longitudinal waveforms of granite sample exposed to different temperatures

2.2 波速变化分析

超声波在穿过不同介质时, 波速会发生变化, 若内部存在裂缝、空洞等缺陷则超声波速会降低。图 3 所示为岩石高温前后超声波速对比情况, 图中数值为三个试样均值。

从图 3 中可以看出, 随着温度升高, 水冷却处理后的高温花岗岩超声波速分别下降到初始超声波速平均值的 88%、81%、68% 和 29%, 整体表现为非线性下降趋势。从图中还可以发现高温花岗岩经水冷却后的超声波速均比自然冷却后低, 在 600 °C 时超声波速差达到最大值 (344 m/s), 而在 800 °C 时超声波速差最小, 仅为 36 m/s。分析原因是水冷却使花岗岩表面温度急剧下降, 试样内部将形成较大温度梯度, 从而产生二次温度应力引起更大热损伤, 加剧高温花岗岩的劣化。但在 800 °C 时, 由于花岗岩内部矿物在高温作用下已经充分膨胀, 产生较多微孔隙或原生孔隙进一步扩大、贯通, 使得力学性能大幅降低。水冷却虽能进一步引起岩石力学性能劣化, 但空间不大, 故二者差异不明显。

2.3 孔隙度

由于岩石结构的骨架不会产生核磁信号, 故需要先对岩样进行饱和处理, 让水浸入岩石内部, 利用水的原子核被极化产生的横向磁化矢量衰减时间(即 T_2 弛豫时间)与饱和岩样孔隙体积存在的对应关系,

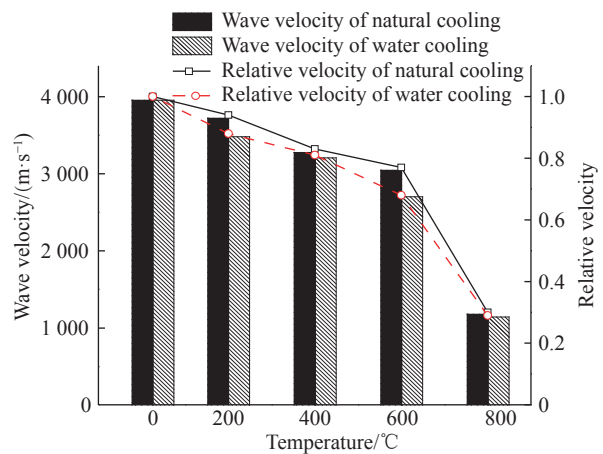


图 3 高温前后纵波波速均值对比

Fig. 3 Comparison of average longitudinal wave velocity before and after exposure to high temperature

通过对 T_2 谱总面积进行标准刻度转换,从而计算出岩石的孔隙度和孔径分布。所以,核磁共振检测得到的孔隙度实质上是岩样内部的孔隙与裂隙之和,孔隙度的变化也可反应岩样内裂隙的变化情况,二者具有一致性^[21-23],故接下来均从孔隙角度进行讨论。表 1 为对应的 T_2 谱面积,图 4 所示为 4 个温度等级下,高温花岗岩冷却后孔径分布图,从中可以看出:

表 1 核磁共振 T_2 谱面积
Table 1 T_2 spectrum area of NMR

冷却方式	T_2 谱面积				
	25 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
自然冷却	1 852	1 910	2 086	3 072	4 029
水冷却	1 852	1 981	2 254	3 544	4 887

(1)原始岩样的 T_2 谱曲线仅有一谱峰,对应孔径大小为 0.01 μm 左右,表明原始岩样中的孔隙以小孔径孔隙为主,大孔径孔隙为辅。高温花岗岩经水冷却处理后, T_2 谱面积随着温度增大而增大, T_2 谱曲线出现两个谱峰,第一个谱峰对应孔径仍然为 0.01 μm 左右,第二个谱峰对应孔径则随着温度增加而变大,在 800 °C 时最大孔径达到 16 μm 。表明温度引起热损伤,使得试样孔径扩张,孔径大小与孔隙数量增加。

(2)小孔径孔隙数量随着温度增大呈现先减少后增多的变化规律。在 200 °C 时冷却后的试样内小孔径孔隙数量大小关系为:自然冷却<水冷却<原始岩样,在其他温度条件下则为:原始岩样<自然冷却<水冷却。这是因为在 200 °C 时温度对岩石的主要影响是使其所含矿物体积发生膨胀,从而使试样内原生微孔隙闭合,导致小孔隙减少。而水冷却加速了高温岩石冷却,减少了矿物膨胀时间,所以此时小孔径孔隙数量大于自然冷却。当温度升高到 400 °C 后,矿物间不均匀热膨胀趋于显著,由此引起的温度应力将会超过岩石强度极限,因而萌生出比原始岩样更多的小孔径孔隙。

(3)水冷却后试样大孔径尺寸和数量随着加热温度的增大而增大,且均大于同等温度条件下自然冷却的结果,两者之间差异随着温度增大而增大,但 800 °C 时水冷却与自然冷却后试样的大孔径基本相同。这是因为随着温度升高,试样内微孔隙不断发展、贯通形成大孔隙。水的急剧冷却产生显著的温度梯度,因而在岩样内产生二次温度应力,诱发出更多孔隙。这种急剧冷却效果与温度直接相关,温度越高效果越明显。当温度达到 800 °C 时,由于加热到预定温度后保温 2 h,故孔隙得到充分发展,水的急剧冷却主要起到萌生孔隙的作用,所以在裂隙数量上明显多于自然冷却,而孔径大小基本不变。

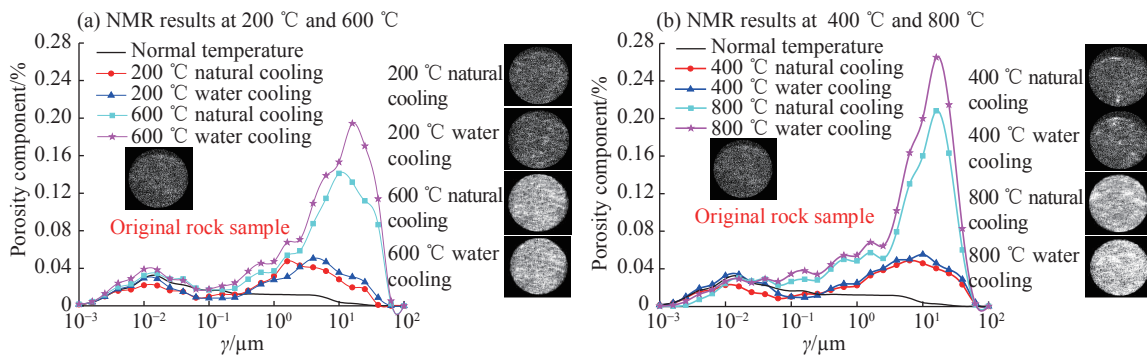


图 4 核磁共振孔径分布及断面扫描图

Fig. 4 Pore size distribution curves and scanning images of cross-sectional area

3 SHPB 实验结果及分析

3.1 应力应变特征

图 5 所示为高温花岗岩采用水冷却后的动态应力应变曲线,作为对比同步给出自然冷却后的实验结果。从中可以看出,采用水冷却处理后,随着温度的增大,花岗岩动态峰值应力减小,动态峰值应变增加。与自然冷却结果对比可发现,在各个温度条件下,水冷却后花岗岩的动态峰值应力均小于自然冷却,应力应变曲线峰后应力跌落迅速,表现出一定脆性破坏特征。

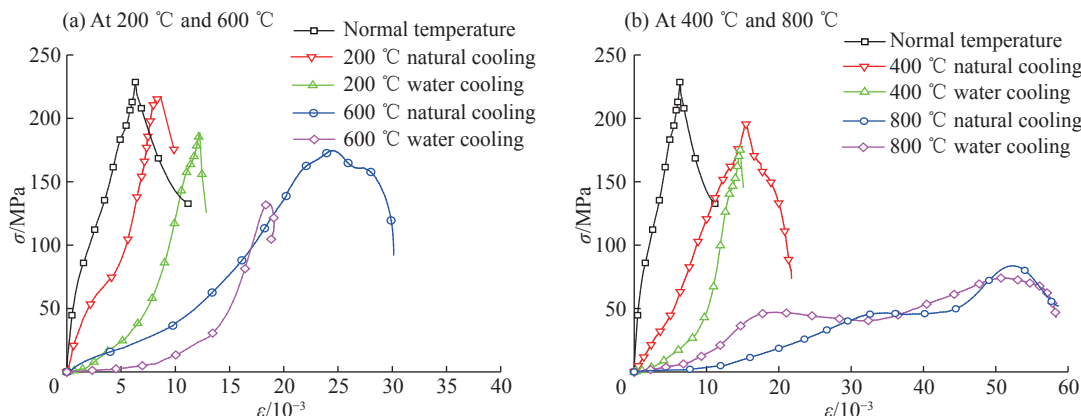


图 5 花岗岩动态应力应变曲线图

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of granite

从图 5 中还可以发现, 自然冷却后花岗岩应力应变曲线在低于 200 °C 时压密段不明显, 随着温度继续升高, 压密段越加明显。这主要是因为当温度不高时, 不同矿物质热膨胀系数引起矿物间不均匀热膨胀变形较小, 此时温度主要引起花岗岩内部空气以及部分矿物质膨胀, 使得一些初始微裂缝闭合, 提高试样的密实性。而随着温度继续升高, 矿物间不均匀膨胀越加显著, 由此产生的热应力超过花岗岩抗拉强度时则会诱发新裂缝, 导致内部孔隙增多, 且矿物内结晶水的逃逸也使得矿物的晶格结构发生破坏而造成内部缺陷增大并联通, 所以表现出明显的压密段。采用水冷却的应力应变曲线不管在何种温度条件下, 均表现较强的压密段。分析其原因是水冷却使高温岩石表面温度急剧下降, 产生显著温度梯度, 相比较自然冷却而言则会引起额外的热应力, 加剧岩石的损伤, 产生更多的孔隙(核磁扫描结果可证明这一点)。所以水冷却花岗岩最终表现出来为相对低的动态峰值应力和显著的压密段。

3.2 动态峰值应力与动态峰值应变

图 6 所示为高温花岗岩经水冷却后动态峰值应力 σ_{vw} 随温度变化, 以及与自然冷却结果 σ_{vN} 对比情况。通过对数据进行拟合, 发现两种方式冷却后花岗岩的动态峰值应力均随着温度增大而呈线性下降趋势, 且水冷却后动态峰值应力下降速度相对更为剧烈。

$$\begin{cases} \sigma_{vN} = -0.170 6T + 245.69 & R^2 = 0.799 \\ \sigma_{vw} = -0.186 8T + 235.06 & R^2 = 0.949 \end{cases} \quad (1)$$

从图 6 中还可以发现, 与自然冷却结果相比, 各个温度条件下高温花岗岩经水冷却后的动态峰值应力均低于自然冷却的结果, 从 200 °C 到 800 °C, 强度分别降低 29、20、42、10 MPa, 降低幅度达到了 13.4%、10.2%、24.1%、11.9%。由此可见, 水冷却处理对高温花岗岩的峰值应力具有明显的劣化作用, 会进一步降低花岗岩的强度。这也可以解释部分岩质工程在火灾过程中未倒塌破坏, 但经射水灭火降温后发生倒塌的现象。

图 7 所示为花岗岩动态峰值应变与温度关系。从中可以看到经水冷却后的高温花岗岩动态峰值应变随着温度升高而增大。与自然冷却结果对比可以发现在 200 °C 时水冷却结果大于自然冷却, 随后则小于自然冷却。这是因为水冷却对高温岩石有两方面影响: 一是扩大温度差, 产生温度应力, 加速孔隙萌生与发展; 二是具有冷淬作用提高试样硬度。前者导致花岗岩致密程度降低, 在冲击荷载作用下, 动

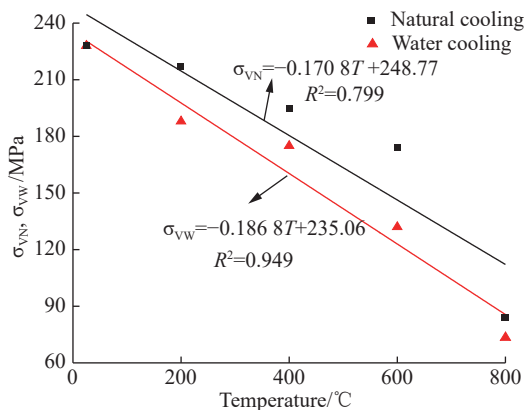


图 6 花岗岩动态峰值应力

Fig. 6 Dynamic peak stress of granite

态峰值应变显著增大,而后者则会降低花岗岩塑性变形能力,引起动态峰值应变减小,二者综合作用使得水冷却后花岗岩峰值应变表现出与自然冷却不同的规律。冷淬作用跟温度有密切关系,在 200 °C 时冷淬作用不显著,此时水冷却的影响主要体现在引发温度应力,加速孔隙萌生,起到劣化岩石的作用,所以动态峰值应变大于自然冷却。而从 400 °C 开始,水的冷淬作用愈加显著,在一定程度上提高了岩样的硬度,降低了塑性变形能力,故在冲击荷载作用下表现出较自然冷却小的动态峰值应变。

3.3 弹性模量

由于高温后岩石动态应力应变曲线均存在一定长度压密段,所以为保证结果具有对比性,本文中采用弹性模量 E_C ^[7],即选取应力应变曲线上上升段应力为 40% 和 60% 峰值应力的两点连线的斜率,结果如图 8 所示。

从图中发现水冷却后花岗岩弹性模量 E_{CW} 先增大后减小,整体上呈非线性下降趋势,拟合结果如下:

$$\begin{cases} E_{CN} = -2 \times 10^{-5} T^2 - 0.0224 T + 31.527 & R^2 = 0.887 \\ E_{CW} = -1 \times 10^{-4} T^2 + 0.0568 T + 26.025 & R^2 = 0.994 \end{cases} \quad (2)$$

同时还可以看到从 400 °C 开始,采用水冷却处理的花岗岩的弹性模量大于自然冷却后的结果 E_{CN} ,其原因与前文所述相同,是因为水的冷淬作用提高了花岗岩硬度。

4 冲击破坏形态及损伤机理

4.1 冲击破坏形态

图 9 所示为高温花岗岩经两种方式冷却、冲击后的破坏形态对比图(编号第 1 个数字表示冷却方式(1:自然冷却、2:水冷却),第 2 个数字表示温度等级、第 3 个数字表示块号)。从图中可以看出花岗岩冲击破坏程度随温度的增大而剧烈,由室温时的块状逐步变成 800 °C 时的粉末状。在 200~400 °C,试样破坏均表现出轴向劈裂现象,随着温度的升高,试样周边破坏加剧,水冷却方式对高温花岗岩破坏形态影响不明显。但在 600 °C 时,水冷却后花岗岩出现了轴向破裂面,四周破裂以块为主,而自然冷却轴向破裂面不明显,外围破坏出现较多粉末。800 °C 时自然冷却的花岗岩粉碎更为彻底,水冷却则存在相当数量的大颗粒状碎块,通过测量发现自然冷却最大颗粒尺寸(长×宽×深)为:2.1 cm×1.2 cm×0.8 cm;水冷却最大颗粒尺寸:2.5 cm×1.4 cm×1.2 cm。

4.2 水冷却热损伤机理

花岗岩内部含有石英($8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)、斜长石($3.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)、方解石($13.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)等多种矿物,热膨胀系数存在显著差异,当温度达到一定阈值时,矿物间将发生不均匀热膨胀。石英在 573 °C 会发生从 α 相到 β 相位移型相变,在此过程中石英体积将增大 5%^[24],进而导致试样内裂纹增多。矿物不均匀膨胀与石英相变综合作用引起微观层面上晶粒面滑移,产生微裂缝。同时岩石内部原有孔隙进一步发育、贯通导致动态力学性能下降。

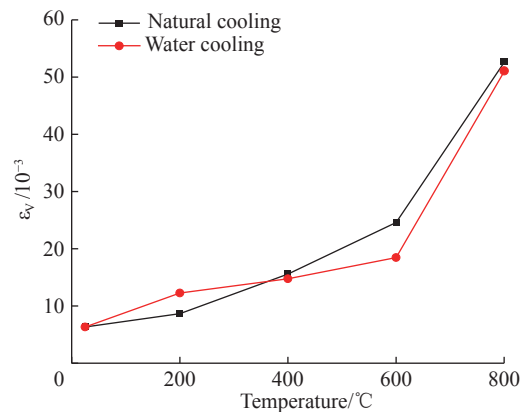


图 7 花岗岩动态峰值应变

Fig. 7 Dynamic peak strain of granite

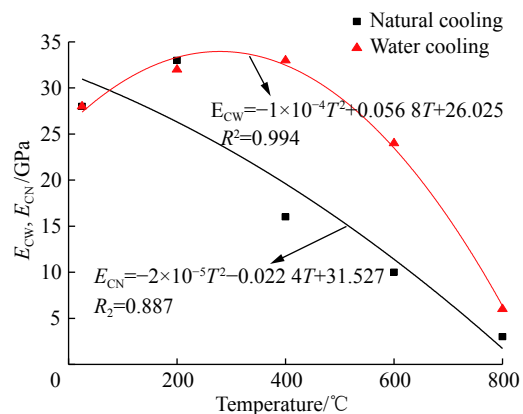


图 8 弹性模量随温度变化曲线

Fig. 8 Variation of dynamic elastic modulus EC with temperature

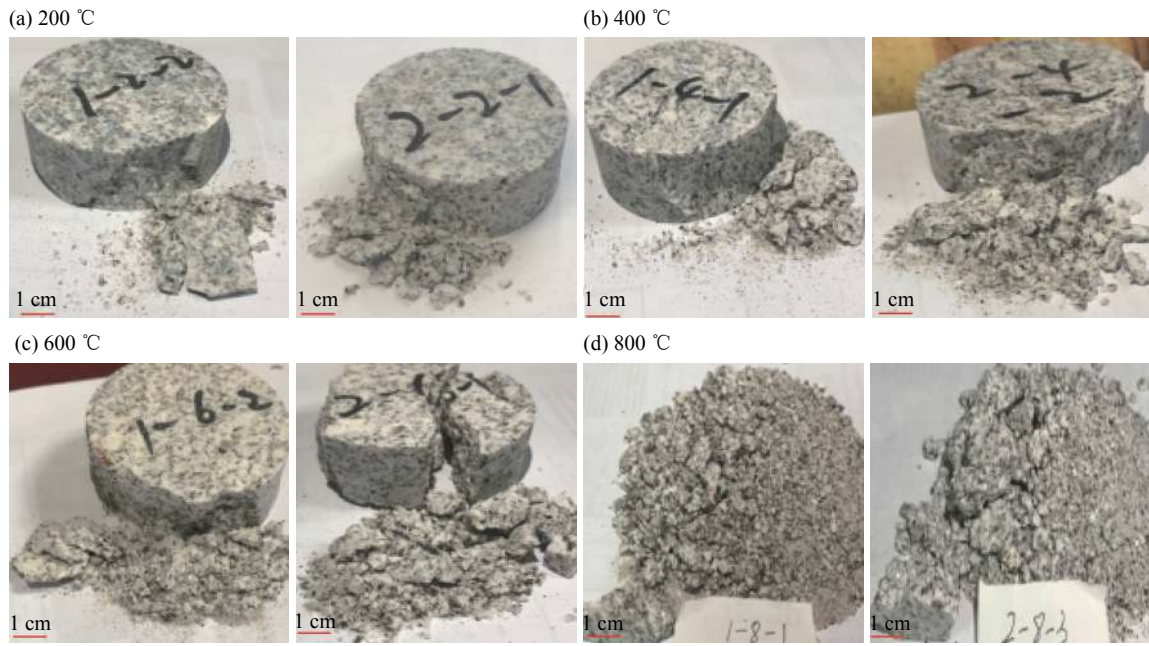


图 9 花岗岩冲击破坏形态

Fig. 9 Failure forms of granite under different temperatures and different cooling methods

此外,将高温岩石试样视作整体,采用不同冷却方式,则会得到不同温度场与温度梯度,由此引起的不协调变形将产生二次温度应力。为从理论上探讨水冷却对高温岩石损伤机理,将岩样内部温度应力的力学模型分为热膨胀应力与二次温度应力两部分。把岩石试样划分成若干个有限区域,并假设每个区域内仅有两种矿物,则各区域温度应力计算如下:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{1ij} + \sigma_{2ij} \quad (3)$$

其中矿物间不均匀变形所引起热膨胀应力^[17]:

$$\sigma_{1ij} = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T_{1ij} E_1 E_2 / (E_1 + E_2) \quad (4)$$

水冷却引起的二次温度应力:

$$\sigma_{2ij} = E_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{E_{ij} \alpha_{ij} \Delta T_{2ij}}{1 - 2\nu_{ij}} \quad (5)$$

式中: α_{ij} 、 α_1 、 α_2 为 ij 区域内岩石、矿物 1 和 2 的热膨胀系数; E_{ij} 、 E_1 、 E_2 为 ij 区域内岩石、矿物 1 和 2 的弹性模量; ν_{ij} 为 ij 区域内材料的泊松比; ΔT_{1ij} 为 ij 区域从室温加热到某温度的温差; ΔT_{2ij} 为 ij 区域与相邻区域的温度梯度。

由式(3)~(5)可知,矿物间不均匀膨胀变形所引起的温度应力将使试样内部萌生孔隙,而水冷却引起的二次温度应力则进一步导致已有孔隙尖端应力集中,有利于裂纹的扩展,导致岩石内部的破坏更加严重。同时水的入侵又削弱矿物颗粒间的联系,引起力学性能的进一步降低,所以水冷却后高温花岗岩无论在孔隙数量与孔隙孔径尺寸上均比自然冷却的大。核磁共振扫描结果即可验证这一结论。图 10 所示为高温花岗岩经两种方式冷却后核磁共振扫描孔隙率分布伪彩图,红色表示孔隙。由于低于 400 °C 的孔隙率值较小,从图上看差异不明显,故限于篇幅仅给出 600 °C 与 800 °C 结果。从中可以直观看出水冷却后花岗岩孔隙数量明显多于自然冷却,这表明水冷却会加速高温岩石力学性能的劣化。

由式(5)可知,二次温度应力大小主要受温度梯度的影响。因岩石导热性能较差,当高温岩石遇水冷却,水的温度并不能快速传递到试样内部,所以整个冷却过程为非稳态热传导。为直观对比冷却方式

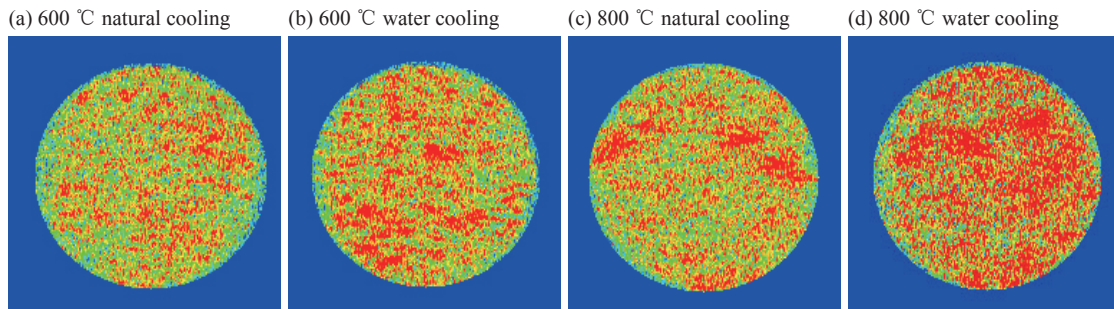


图 10 花岗岩样品成像伪彩图

Fig. 10 pseudo-color image of granite sample

的影响,采用 ABAQUS 软件,模拟高温花岗岩温度分布情况。由于高温物体冷却实质上是与外界换热过程,受热换系数的控制,水与岩石接触时热换系数从几千到上万不等^[25](本文取两个值作为对比),而自然环境则一般为几十。故花岗岩相关参数取为:导热系数 $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,试样温度 $600 \text{ }^\circ\text{C}$,比热 $635 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$,热换系数 α_{H} :水冷却 $1\,000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 和 $100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,自然冷却 $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。根据路径提取温度结果见图 11。

从图 11 中可以看出,高温岩石经水冷却后,试样表面温度急剧降低,尤其在表面与侧面交点 A 处,温度降低最快,故此处产生的温度梯度最大,从而将产生最大二次温度应力,且为拉应力^[25]。由于岩石的抗拉强度较低,所以水冷却高温花岗岩,当温度差引起的拉应力足够大时,花岗岩表面将产生裂缝。在实验过程中发现,从 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始,高温花岗岩经水冷却后,率先在边缘出现肉眼可见裂缝,随着温度升高裂缝逐步向中心发展,且边缘出现岩样脱落现象,如图 12 所示。

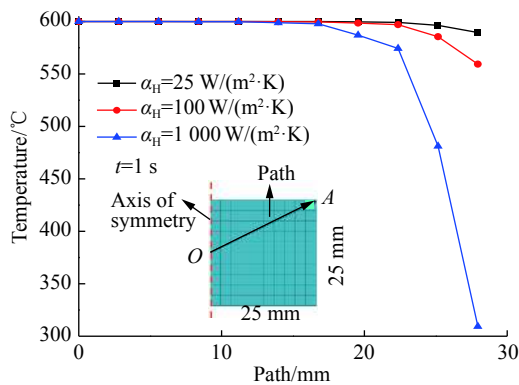


图 11 温度模拟结果

Fig. 11 Simulation results for temperature

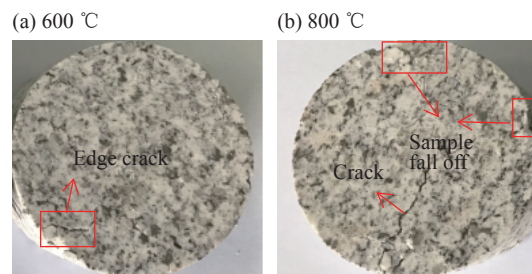


图 12 水冷却花岗岩表面裂缝

Fig. 12 Surface cracks in granite specimen after water cooling

4.3 冲击破坏微观裂缝形态

对冲击破碎后的回收试样进行扫描电镜分析,探讨温度、冷却方式以及冲击荷载耦合作用下对裂缝发展的影响,限于篇幅仅展示部分图片。

从图 13 中可以看出,花岗岩经 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 处理后,裂纹小且短。随着温度升高到 $400 \text{ }^\circ\text{C}$,裂纹沿着一个主方向延长,四周伴随从裂纹并向着主裂纹汇集。在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,通过对比可以发现自然冷却后的断面呈蜂窝状,凌乱无规则,周边伴随小碎块,水冷却后的断面则相对整齐,主要是因为温度应力作用使得岩石内部已经萌生大量裂纹,故在冲击荷载作用下,裂纹迅速扩展贯通形成裂缝。而水的冷却作用在一定程度上提高了表层花岗岩硬度,在冲击荷载作用下,具有一定脆性破碎特征,从而获得相对规则的破裂断面。

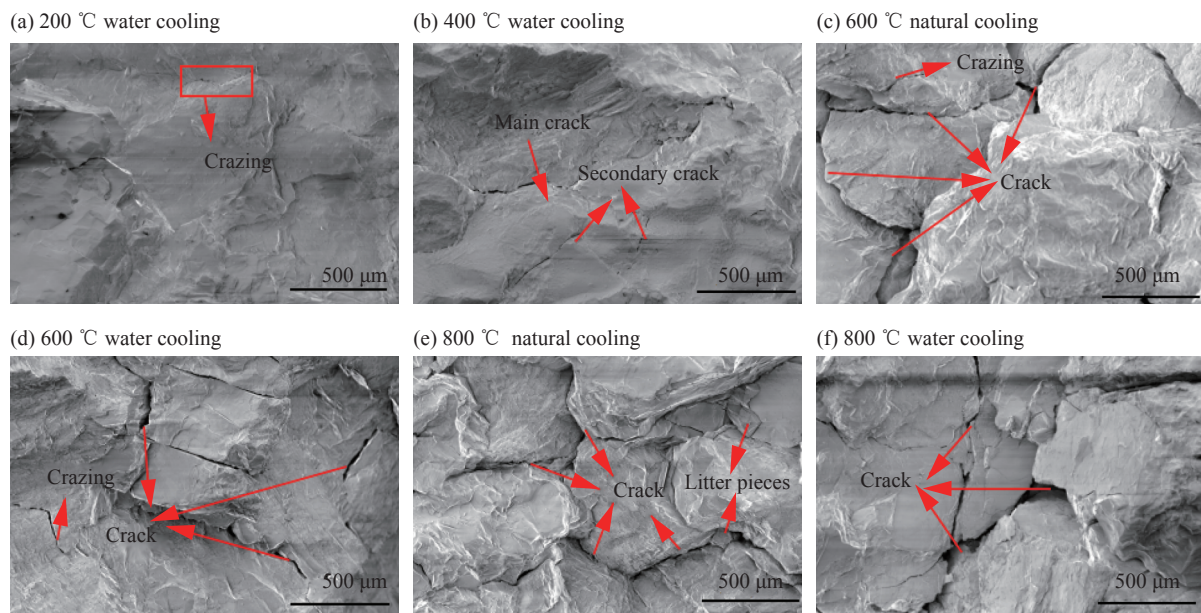


图 13 冲击破坏后的 SEM 形貌

Fig. 13 SEM image after impact damage

5 结 论

(1) 高温花岗岩, 不论采用自然冷却还是水冷却, 与常温时对比, 其波速均呈现非线性下降趋势。采用水冷却花岗岩, 在各个温度等级其纵波波速均低于自然冷却。最大纵波波速差异在 600 °C 时出现, 大小为 344 m/s, 最小纵波波速差异则发生在 800 °C 时, 高温岩石经水冷却后纵波波速仅比自然冷却后纵波波速低 36 m/s。

(2) 核磁共振扫描结果显示, 经温度作用后, 花岗岩岩样内 T_2 谱曲线均出现两个峰值。小孔径孔隙在 200 °C 时最小, 小于原始岩样。水冷却处理后的高温花岗岩试样大孔隙的孔径大小与数量均随着温度增大而增大, 且大孔隙的孔径大小与数量均比自然冷却后岩样大。

(3) 随着温度升高, 水冷却后花岗岩动态峰值应力减小, 峰值应变增大, 弹性模量先增大后减小。水的急剧降温诱发更多的孔隙, 使得水冷却高温花岗岩应力应变曲线上压密段比自然冷却的要显著。水的冷淬作用降低了花岗岩强度、提高了其硬度, 因而水冷却后花岗岩的峰值应力与应变小于自然冷却, 而弹性模量大于自然冷却。

(4) 温度大小和冷却方式对高温花岗岩冲击破碎形态以及断面形态有一定影响, 自然冷却后花岗岩冲击破碎以粉末和小颗粒碎块为主, 而水冷却则含有一定数量的大颗粒碎块。从 600 °C 开始自然冷却后花岗岩冲击断面呈不规则蜂窝状, 而水冷却后冲击断面则相对平整。

参考文献:

- [1] 熊良宵, 虞利军. 高温作用下和高温后岩石力学特性的研究进展 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2018, 29(1): 76–82. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4362.2018.01.015.
XING Liangxiao, YU Lijun. Advances of mechanical properties of rock under high temperature and after high temperature [J]. *Journal of Geolocial Hazards and Environment Preservation*, 2018, 29(1): 76–82. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4362.2018.01.015.
- [2] 徐小丽, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(3): 402–406. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1964.2008.03.024.
XU Xiaoli, GAO Feng, GAO Ya'nan, et al. Effect of high temperatures on the mechanical characteristics and crystal structure

- of granite [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(3): 402–406. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1964.2008.03.024.
- [3] CHEN Y L, NI J, SHAO W, et al. Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, 56(15): 62–66. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.07.026.
- [4] LIU S, XU J. Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 188–193. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.07.008.
- [5] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(3): 303–315. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.05.008.
- [6] 蔡燕燕, 罗承浩, 俞缙, 等. 热损伤花岗岩三轴卸围压力学特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 37(7): 1173–1180. DOI: 10.11779/cjge201507002.
- CAI Yanyan, LUO Chenghao, YU Jin, et al. experimental study on mechanical properties of thermal-damage granite rock under triaxial unloading confining pressure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 37(7): 1173–1180. DOI: 10.11779/cjge201507002.
- [7] 刘石, 许金余, 支乐鹏, 等. 高温后大理岩的冲击力学特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(2): 273–280. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.02.008.
- LIU Shi, XU Jinyu, ZHI Lepeng, et al. Experimental research on mechanical behaviors of marble after high temperatures subjected to impact loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 273–280. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.02.008.
- [8] 李明, 茅献彪, 曹丽丽, 等. 高温后砂岩动力特性应变率效应的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3479–3488. DOI: 1000-7598(2014)12-3479-10.
- LI Ming, MAO Xianbiao, CAO Lili, et al. Experimental study of mechanical properties on strain rate effect of sandstones after high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3479–3488. DOI: 1000-7598(2014)12-3479-10.
- [9] 陈腾飞, 许金余, 刘石, 等. 经历不同高温后砂岩的动态力学特性实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(2): 195–201. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0195-07.
- CHEN Tengfei, XU Jinyu, LIU Shi, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of post-high-temperature sandstone [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(2): 195–201. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0195-07.
- [10] 尹土兵, 李夕兵, 周子龙, 等. 粉砂岩高温后动态力学特性研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(6): 1060–1063. DOI: 1673-0836(2007)06-1060-04.
- YIN Tubing, LI Xibing, ZHOU Zilong, et al. Study on mechanical properties of post-high-temperature sandstone [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(6): 1060–1063. DOI: 1673-0836(2007)06-1060-04.
- [11] 尹土兵, 李夕兵, 王斌, 等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(5): 777–784. DOI: 1000-4548(2011)05-0777-08.
- YIN Tubing, LI Xibing, WANG Bin, et al. Mechanical properties of sandstones after high temperature under dynamic loading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(5): 777–784. DOI: 1000-4548(2011)05-0777-08.
- [12] 刘石, 许金余. 高温作用对花岗岩动态压缩力学性能的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(4): 195–198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.04.035.
- LIU Shi, XU Jinyu. Effect of high temperature on dynamic compressive mechanical properties of granite [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(4): 195–198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.04.035.
- [13] 支乐鹏, 许金余, 刘志群, 等. 高温后花岗岩冲击破坏行为及波动特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1): 135–142. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.01.019.
- ZHI Lepeng, XU Jinyu, LIU Zhiqun, et al. Research on impacting failure behavior and fluctuation characteristics of granite exposed to high temperature [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 135–142. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.01.019.
- [14] 卢志堂, 王志亮. 温度与冲击荷载耦合下花岗岩动力性质 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(6): 143–149. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.023.

- LU Zhitang, WANG Zhiliang. Dynamic properties of granite subjected to coupling action of impact loading with actual temperature [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(6): 143–149. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.023.
- [15] 黄真萍, 张义, 吴伟达. 遇水冷却的高温大理岩力学与波动特性分析 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(2): 367–375. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.008.
- HUANG Zhenping, ZHANG Yi, WU Weida. Analysis of mechanical and wave properties of heat-treated marble by water cooling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 367–375. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.008.
- [16] 黄真萍, 张义, 孙艳坤, 等. 高温遇水冷却石灰岩力学与声学性质研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016(12): 4181–4189. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.12.029.
- HUANG Zhenping, ZHANG Yi, SUN Yankun, et al. Mechanical and acoustic characteristics of high temperature limestone with water cooling treatment [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016(12): 4181–4189. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.12.029.
- [17] 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): 892–899.
- XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of tercooled granite under high temperatures within 600 °C [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 892–899.
- [18] 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(S2): 169–175. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0967.
- ZHU Zhennan, TIAN Hong, DONG Nannan, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of heat-treated granite by water cooling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2): 169–175. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0967.
- [19] 梁铭, 张绍和, 舒彪. 不同冷却方式对高温花岗岩巴西劈裂特性的影响 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 138(2): 189–196. DOI: cnki:sun:xbsz.0.2018-02-031.
- LIANG Ming, ZHANG Shaohu, SHU Biao. Effect of different cooling ways on Brazilian tension characteristics of heat-treated granite [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 138(2): 189–196. DOI: cnki:sun:xbsz.0.2018-02-031.
- [20] 翟越, 王思维, 石蕴美, 等. 高温-水冷却对混凝土抗冲击性能影响试验研究 [J]. *工业建筑*, 2017, 47(7): 127–131. DOI: 10.13204/j.gyjz201707024.
- ZHAI Yue, WANG Siwei, SHI Yunmei, et al. Research on effects of high temperature cooling method on concrete impact-resistance properties [J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(7): 127–131. DOI: 10.13204/j.gyjz201707024.
- [21] 邓红卫, 刘传举, 柯波, 等. 循环动力扰动下花岗岩细观损伤特性试验研究 [J]. *工程科学学报*, 2017, 39(11): 31–36. DOI: cnki:sun:bjkd.0.2017-11-004
- DENG Hongwei, LIU Chuanju, KE Bo, et al. Experimental study on microscopic damage characteristics of granite under cyclic dynamic disturbances [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(11): 31–36. DOI: cnki:sun:bjkd.0.2017-11-004
- [22] 孙中光, 姜德义, 谢凯楠, 等. 基于低场磁共振的北山花岗岩热损伤研究 [J/OL]. *煤炭学报*. <https://DOI.org/10.13225/j.cnki.jccs.2019.0164>.
- SUN Zhongguang, JIANG Deyi, XIE Kainan, et al. Thermal damage study of Beishan granite based on low field magnetic resonance [J/OL]. *Journal of China Coal Society*. <https://DOI.org/10.13225/j.cnki.jccs.2019.0164>.
- [23] 俞缙, 张欣, 蔡燕燕, 等. 水化学与冻融循环共同作用下砂岩细观损伤与力学性能劣化试验研究 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(2): 41–50. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1450.
- YU Jin, ZHANG Xin, CAI Yanyan, et al. Meso-damage and mechanical properties degradation of sandstone under combined effect of water chemical corrosion and freeze-thaw cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 41–50. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1450.
- [24] 席道瑛. 花岗岩中矿物相变的物性特征 [J]. *矿物学报*, 1994(3): 223–227. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4734.1994.03.003.
- XI Daoying. Physical characteristics of mineral phase transition in the granite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1994(3): 223–227. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4734.1994.03.003.
- [25] 唐世斌, 罗江, 唐春安. 低温诱发岩石破裂的理论及数值模拟研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 39(7): 1596–1607. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0027.

TANG Shibin, LUO Jiang, TANG Chun'an. Theoretical and numerical study on the cryogenic fracturing in rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 39(7): 1596–1607. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0027.

Effect of water cooling on microscopic damage and dynamic properties of high-temperature granite

ZHU Yaoliang^{1,2}, YU Jin¹, GAO Haidong³, LI Gang³, ZHOU Xianqi¹, ZHENG Xiaoqing²

(1. *Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University,*

Xiamen 361021, Fujian, China;

2. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

3. China Railway 18 Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The microscopic damage and dynamic mechanical properties of high-temperature granite after water cooling were studied through wave velocity test, nuclear magnetic resonance (NMR) test, split Hopkinson pressure bar (SHPB) impact test and scanning electron microscope (SEM) test. The variation of porosity and dynamic mechanical parameters of granite were analyzed. The results show that the wave velocity of high-temperature granite decreases nonlinearly after water cooling and the components of porosity with large pore increase with the increase of temperature. Moreover, water cooling leads to the more cracks and greater crack sizes than that of natural cooling. The dynamic parameters of high-temperature granite after water cooling show that the increase in temperature results in a decrease in the peak stress, an increase in the peak strain, and an increase at first then decrease in the elastic modulus. Additional thermal stress, resulted from sharply decrease in surface temperature of the high-temperature granite, leads to increased internal damage and decreased wave velocity and peak stress. Compared with natural cooling, the plasticity of high-temperature granite is reduced, because the cold hardening effect improves the hardness of surface granite. After water cooling, the granite specimens exhibit the brittle failure characteristics and their peak strain decreases but their elastic modulus increases. Cooling way has a minor effect on the cracks induced by shock before 400 °C. As the temperature up to 800 °C, the impact fracture surface of granite after natural cooling is characterized by honeycomb and irregular shape, in contrast, the impact fracture surface of granite after the water cooling is relatively flat.

Keywords: high-temperature granite; water cooling; microscopic damage; dynamic mechanical properties; cold hardening effect

(责任编辑 曾月蓉)