

高温花岗岩热冲击引发阈值试验研究

余成祥¹, 李响^{2*}, 陈江¹, 杨俊义³, 付杰³

1. 中铁十二局集团股份有限公司, 山西 太原 030024;
2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519000;
3. 中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原 030032



摘要:利用自主研发的试验平台,对花岗岩试样进行多种热冲击处理,获取其内部非均匀温度场的时空演化数据。结合温度梯度和降温速率的分布特性及声发射信号,阐明了热冲击引发阈值(即热冲击导致可检测微裂纹萌生并持续扩展的最低热载荷水平,以声发射活动显著增强为标志)随加热温度和降温过程剧烈程度的变化规律。研究发现:热冲击过程中试样内部降温速率与温度梯度峰值的峰值位置由外层向内层转移,且峰值大小随时间衰减。利用常温乙二醇溶液进行降温的试验表明,当加热温度低于300℃时,试样未产生明显热冲击损伤;当温度为400~800℃时,引发热冲击的温度梯度阈值为15.95~26.45℃/mm,降温速率阈值为3.03~5.10℃/s。经600℃加热并在不同温度(26~40℃)乙二醇溶液中降温的试样,其温度梯度阈值为19.24~25.49℃/mm,降温速率阈值为3.23~5.31℃/s。上述阈值随加热温度的升高和降温介质的温度降低而增大。本研究建立的量化热冲击引发阈值的试验框架,为准确定义岩石中的热冲击现象提供了实现路径,相关成果可为应对岩石工程中的热冲击现象提供理论基础和数据支撑。

关键词:热冲击;降温速率;温度梯度;阈值;力学特性;高温花岗岩

中图分类号: TU45 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2026)03-0687-16 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2026.03.286
引用格式: 余成祥, 李响, 陈江, 等. 高温花岗岩热冲击引发阈值试验研究[J]. 黄金科学技术, 2026, 34(3): 687-702. YU Chengxiang, LI Xiang, CHEN Jiang, et al. Experimental Study on the Thermal Shock Initiation Threshold in High-Temperature Granite[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(3): 687-702.

在深部采矿、煤炭气化开采、地热能开发和放射性核废料地质处置等深部岩石工程中,高温的影响不可忽视(吴阳春等,2020;朱振南等,2026)。在实际工程中,岩体并非始终处于稳态高温场中,在某些工况下必须考虑温度分布的急剧变化。例如:在增强型地热系统开发的钻井过程中,井周高温岩体受到循环钻井泥浆的降温作用(Espinosa-Paredes et al, 2004),由于岩石导热性较差,井眼远端岩体因无法实现同步降温仍保持较高的温度,从而形成显著的温度梯度,由此产生的热应力会诱发

热破裂,这一过程即为热冲击现象(Hall et al, 2014)。在此情况下,热冲击诱发的热破裂容易导致井眼失稳,进而危及地热系统的安全性。另一方面,热冲击也有其积极意义,例如人工热储的构建是通过注入低温流体压裂干热岩(武治盛等,2021)实现的,该过程中产生的热裂纹能够增强岩体渗透性,从而提高地热储层的热交换效率(Zhao et al, 2021)。因此,深入研究热冲击的作用机制和效果,对于在深部岩石工程中趋利避害地利用热冲击现象具有重要意义。

收稿日期:2025-10-08;修订日期:2026-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目“深部高温岩石热冲击致裂特征及力学性能劣化机制研究”(编号:52274106)和广东省自然科学基金项目“深部高温岩石损伤破裂演化的时间相关性研究”(编号:2026A1515010933)联合资助

作者简介:余成祥(1976—),男,安徽太湖人,高级工程师,从事地铁、公路和桥梁施工管理及研究工作。E-mail:381085628@qq.com

*通信作者:李响(1983—),男,河南郑州人,副教授,从事岩石力学相关研究工作。E-mail:lixiang85@mail.sysu.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

高温岩石快速降温时,热交换边界与内部区域间会产生较大的温度梯度。当热应力超过岩石强度时即引发热破裂,导致力学性能劣化(何将福等, 2024;李春等, 2024)。增大温差可有效提高降温过程中的温度梯度(Shen et al, 2020),因此利用低温介质对高温岩石进行快速降温,会加剧其力学性能的劣化(张乐等, 2022)。此外,降温介质的传热系数也是关键因素(Tang et al, 2020)。由于液体的对流传热系数远高于气体,在空气、液氮和水/低温溶液等常用降温介质中(薛熠等, 2024;詹金武等, 2024;张翔等, 2025),低温溶液更适用于实现对高温岩样的剧烈热冲击。温度变化速率(降温速率)可反映瞬时温度梯度大小,进而表征热冲击的剧烈程度(Hall, 1999; Ghaffarian, 2001)。在玻璃和陶瓷等脆性材料的热冲击研究中,临界冷却速率(即材料在不发生破坏的前提下所能承受的最大降温速率)已被广泛用作衡量抗热震性能的核心参数(Hasselmann, 1969)。然而,目前对岩石材料热冲击的温度变化率阈值尚未形成统一认识(李柏锦等, 2021;贾蓬等, 2023),也缺乏判定热冲击引发条件的系统方法。现有研究中,岩样温度多取自试样表面(Li et al, 2019; Shen et al, 2020; Jiang et al, 2021; Li et al, 2022),但快速降温过程中岩石的温度变化速率随时间变化,且在不同位置存在差异(Zhao et al, 2021)。因此,以温度变化率作为热冲击引发条件的表征因素时,应充分考虑其时空分布特征。

针对当前研究中亟待解决的问题,本文系统研究了高温花岗岩经历热冲击后的热损伤效应,利用自主研发的热冲击试验平台,实现了对高温岩样进行不同剧烈程度的热冲击处理,在热冲击过程中实时监测试样内部温度场和声发射(AE)信号,利用纵波波速、弹性模量和单轴抗压强度等物理力学参数,量化表征不同热冲击过程对试样承载能力的劣化程度。基于快速降温过程中温度监测数据,揭示了热冲击过程中岩样内部温度场、降温速率和温度梯度的时空演化规律,通过同步分析降温过程中的声发射能量变化,对引发热冲击的降温速率和温度梯度阈值进行量化表征。需要注意的是,本文所指“引发阈值”是指热冲击导致可检测微裂纹萌生并持续扩展的最低热载荷水平,以声发射活动显著增强为标志。

1 试验方法

1.1 试样制备

本试验所用岩样采自中国湖北省罗田县,岩性为二云母花岗岩。为最大限度地保持岩相均匀性,所有圆柱形试样(规格为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$)[图 1(a)]均取自同一完整岩块,并严格按照国际岩石力学学会(ISRM)推荐的加工标准(Bieniawski et al, 1979)进行制备。额外制备了一组带孔花岗岩试样,孔洞自顶面钻取,孔径控制为 4 mm,各孔设置不同深度,使孔底位置呈自试样中心向表面扩散的分布形式[图 1(a)]。钻孔采用分散式空间布局,以减少因热电偶材料替代原岩而对热传导性能造成的影响。在热冲击试验中,将热电偶放置于各孔底,实时测量温度数据,便于试验后重建试样内部温度场的时空演化过程。热电偶安装完成后,采用 GX-3 高温胶黏剂封孔固结,以避免冷液渗入影响测温精度。该胶体固化后的热导率接近常见硅酸盐矿物,且因填充体积有限,预计对整体温度场的扰动较小。

1.2 热冲击试验

岩样的加热处理在马弗炉内完成[图 1(b)]:以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,将不同组花岗岩试样分别加热至 $100\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (共有 8 个不同高温级别,温度间隔为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$)。炉内温度达到设定值后保持恒温 2 h,以确保试样内部温度均匀分布。加热完成后,将高温试样迅速转移至 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (常温)乙二醇溶液中进行降温处理,另一组试样置于常温空气中降温,作为对照组。为了实现不同剧烈程度的热冲击效果,对经 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热的试样放入 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (常温)、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的乙二醇溶液(56%)中进行快速降温处理。其中, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷液通过工业冰箱制备[图 1(c)]。额外设置 2 组岩样作为对照组,分别采用 2 种不同的降温方式:一是在切断电源的马弗炉内缓慢降温;二是在室温空气中自然冷却,目的是与上述利用冷液进行的剧烈热冲击效果进行对比。

为实现利用冷液进行快速降温处理的同时实时监测岩样内部温度场和声发射信号,自行研制了热冲击试验平台[图 1(d)],该平台集成一个容积为 30 L 的冷液容器。试样加热完成后,先通过与热冲击平台搭配的夹持装置固定高温岩样,然后迅速浸入装有乙二醇溶液的容器内进行降温处理。该夹

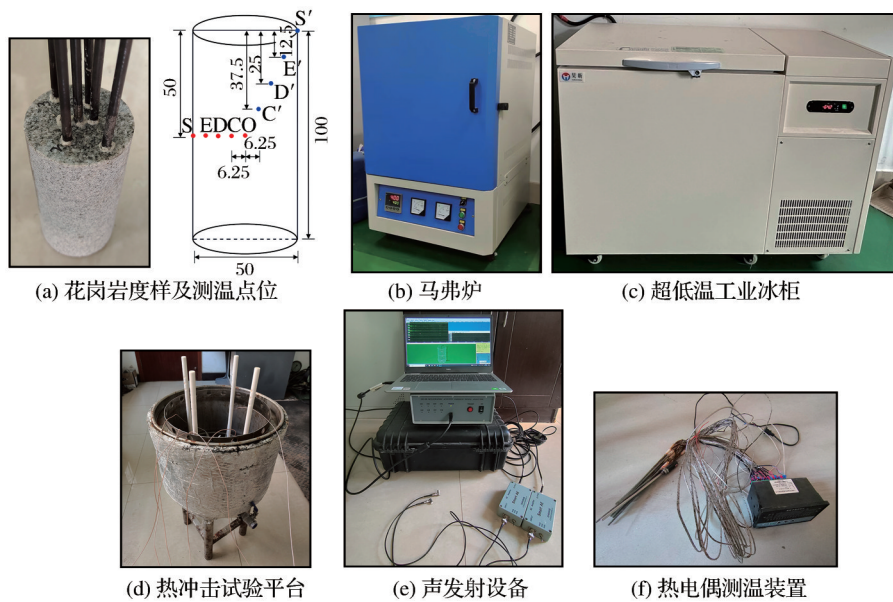


图1 花岗岩试样热冲击试验

Fig. 1 Thermal shock test of granite specimens

持装置设有声发射传感器连接部件,传感器经由增益为40 dB的前置放大器进行信号处理,并接入DS5-8B型声发射测试系统[图1(e)],实时采集岩样在热冲击过程中的声发射信号,降温过程中试样内部温度场由热电偶测温装置实时监测[图1(f)]。

1.3 热冲击岩样物理、力学试验

为评估热冲击过程对岩石热损伤程度的差异,利用超声波无损检测仪测试经历不同剧烈程度的热冲击后岩样内部的纵波波速,如图2(a)所示,2个传感器通过高真空硅脂耦合于试样上下端面,以确保声波在测试过程中具有最优的传输效能。然后对岩石试样开展单轴压缩试验,以获取热冲击影响下岩样力学性能变化规律,试验采用YAW-2000电液伺服控制试验系统[图2(b)],以0.5 MPa/s的恒定速率施加载荷,在试样中部高度位置粘贴应变片,用于监测加载过程中轴向应变的变化。将6个声发射传感器布置于试样顶部和底部表面,采集加载全过程的声发射信号,传感器具体布设位置如图2(c)所示。

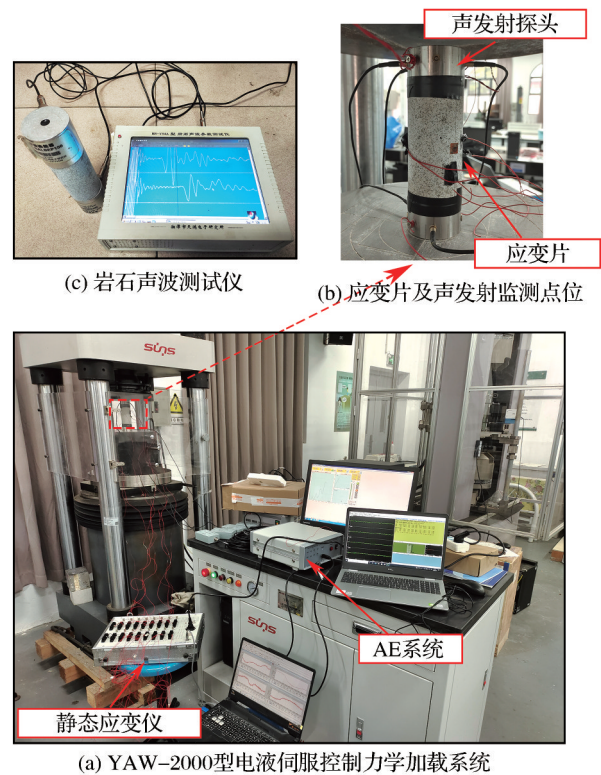


图2 热冲击处理后岩样力学试验

Fig. 2 Mechanical tests on rock specimens after thermal shock treatment

2 试验结果

2.1 热冲击损伤岩样力学响应

通过单轴压缩试验获得的经过加热处理后岩样的应力—应变曲线如图3所示,总体上可将曲线

划分为初始压密阶段、线弹性阶段以及直至峰值应力前的屈服阶段。当加热温度低于300℃时,试样

在破坏前基本表现出线弹性力学行为,这与未经过加热的试样相似;经 400~500 °C 加热处理后,应力—应变曲线中的初始压密段显著延长,说明经此温度级别加热后岩样内部热开裂显著加剧;当加热温度升至 600 °C 时,这一趋势更为明显:初始压密段结束时,应变值大于 0.005,该应变水平远超低于此温度加热后试样的破坏应变;经 700 °C 和 800 °C 加热后,试样的初始压密段继续增长,同时承载能力显著下降。

无论岩样是在常温空气[图 3(a)]还是在溶液中降温[图 3(b)],均出现上述规律。图 3(c)展现了不同剧烈程度的降温过程对岩样力学响应的影响,经同样的高温加热后(以 600 °C 为例),按下述

降温方式的变化顺序,岩样的抗压强度呈现降低趋势,而破坏应变呈现增大趋势:(1)在断电的炉内缓慢降温;(2)常温空气中降温;(3)常温溶液降温;(4)-20 °C 和 -40 °C 低温溶液降温。值得注意的是,当溶液温度从常温过渡到 -20 °C 时,抗压强度下降幅度较大,而从 -20 °C 进一步降低至 -40 °C 时,抗压强度下降幅度明显减缓,呈现出“边际效应递减”的特征。这一现象可能与热冲击致裂的饱和效应有关:当降温剧烈程度达到一定阈值后,试样内部可扩展的微裂隙逐渐趋于饱和,继续增加热应力冲击所产生的额外损伤增量有限,因此力学性能的劣化速率随之减缓。综上所述,随着降温剧烈程度的增加,岩样的抗压强度逐渐降低,而破坏应变逐渐增大。

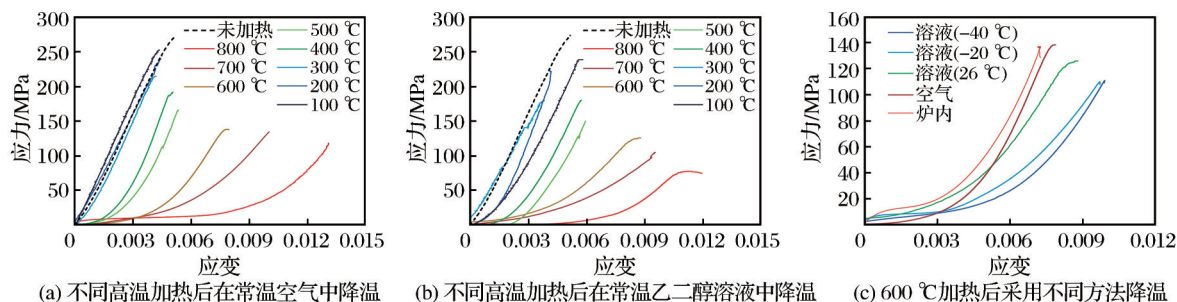


图 3 单轴压缩试验中试样的应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of the specimens in uniaxial compression tests

图 4 展示了花岗岩试样力学性能在不同加热温度下的变化规律。总体来说,弹性模量与单轴抗压强度均随加热温度的升高而下降[图 4(a)],纵波波速和累积声发射能量也呈现类似的变化趋势[图 4(b)]。这表明随着加热温度的升高,热裂纹的扩展和数量增加逐渐破坏了试样的结构完整性,从而导致力学性能发生明显劣化。具体而言,与未经加热的试样相比,经 100 °C 和 200 °C 加热处理后试样的力学性质未发生明显改变;当加热温度升至 300 °C 时,岩样力学性能开始出现明显劣化;尤其是,当加热温度从 500 °C 升至 600 °C 时,弹性模量和纵波波速显著降低,这主要源于石英在 573 °C 时发生的 α - β 相变所引发的额外的裂隙发育(Ohno et al, 2006; Wang et al, 2020);当加热温度超过 600 °C 后,岩样力学性能的劣化程度随温度的继续升高逐渐趋缓,直到 800 °C 时岩石的承载能力降至最低。值得注意的是,在相同加热温度下,相比空气中降温

的试样,经溶液降温的试样表现出更低的单轴抗压强度[图 4(a)]和更低的累积声发射能量[图 4(b)],这说明更剧烈的降温过程(如液体降温)会诱发更严重的热冲击损伤(热开裂),从而导致在后续加载过程中,能够产生声发射事件的新生微裂隙的数量少于经历更缓和降温过程(如常温空气中降温)的试样,因此加载过程中的累积声发射能量反而较低。

在相同高温(600 °C)条件下对试样进行加热,经不同方式降温后岩样的力学性质变化规律如图 5 所示。随着降温过程剧烈程度的提高,试样的力学性能(纵波波速和累积声发射能量)呈现降低的趋势。以单轴抗压强度为例:(1)与在炉内缓慢降温相比,常温空气中降温并没有对试样的单轴抗压强度产生明显影响;(2)相较常温空气中降温,在常温乙二醇溶液中降温的试样的单轴抗压强度降低了 9%;(3)当乙二醇溶液温度降至 -20 °C 时,单轴抗压强度进一步降低 12.2%,而当使用的溶液温度降低

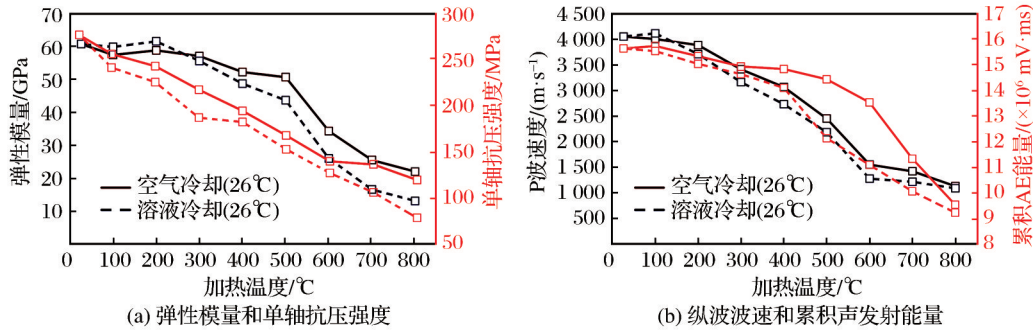


图4 试样力学性能随加热温度的变化规律

Fig. 4 Variation law of mechanical properties of the specimens with heating temperature

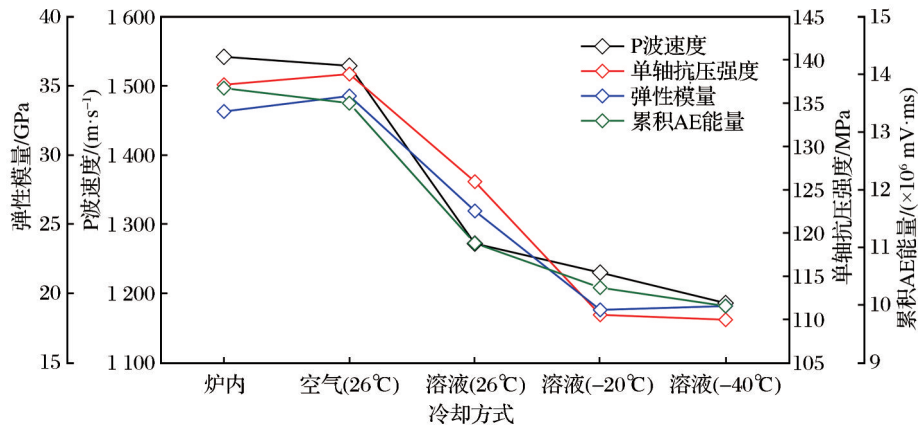


图5 不同降温方法对试样力学性能的影响(加热至600 °C)

Fig. 5 Effect of different cooling methods on the mechanical properties of the specimens (heated to 600 °C)

至-40 °C时,单轴抗压强度仅继续降低0.5%。特别地,累积声发射能量随降温过程剧烈程度的增大而减小,这与图4(b)中声发射能量呈减小趋势的原因类似,即更剧烈的降温过程加剧了热裂纹的发育,导致岩样基质损伤更为严重,从而削弱了其在后续力学测试中产生声发射信号的能力。该推断将在后续第3.3小节中通过分析在不同热冲击过程中采集到的声发射能量数据的变化规律进行验证。

2.2 热冲击岩样温度场演化

由于热冲击过程中岩样内部温度场实时发生变化,因此对热冲击温度变化率阈值的量化表征需充分考虑温度场的时空分布特征。为此,重点分析降温过程中试样内部的温度演化规律。图6和图7分别展示了经不同高温处理(相同降温方式,以常温乙二醇溶液中降温为例)和经不同方式降温(相同加热温度)后试样内部的温度监测结果[测点位置见图1(a)]。从时间维度来看,温度曲线大致可

划分为3个典型阶段:测点在初始的较短时间内仍维持高温状态;随后进入快速降温阶段;最终降温速率逐渐减缓,直至趋于环境温度。值得注意的是,靠近传热边界处(如S点和S'点),维持高温的第一阶段持续时间极短甚至难以识别,而越靠近试样中心(如O点),高温阶段持续时间越长。这一现象可归因于岩石较低的热导率,当边界区域发生显著降温时,内部仍能基本保持初始高温状态。此外,在发生快速降温的阶段(第二阶段),越靠近边界的测点,温度曲线下降越剧烈,表明岩样外层部分降温的速率远高于内部。因此,在快速降温过程中形成了具有明显时空演化特征的动态温度场,即在时间维度上,降温持续时间沿岩样外层向内递增;在空间维度上,对于热冲击过程中的任一时刻,岩样外层的温度低于内层。上述规律在不同加热温度和降温方式下均存在(图6和图7),体现了其普适性和规律性。

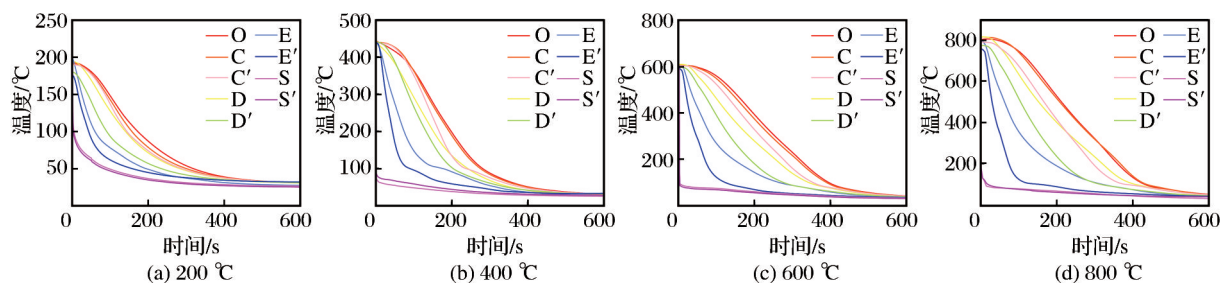


图6 经不同高温加热后在常温乙二醇溶液中降温的试样温度—时间曲线

Fig. 6 Temperature-time curves of specimens cooled in ambient-temperature ethylene glycol solution after heating at different high temperatures

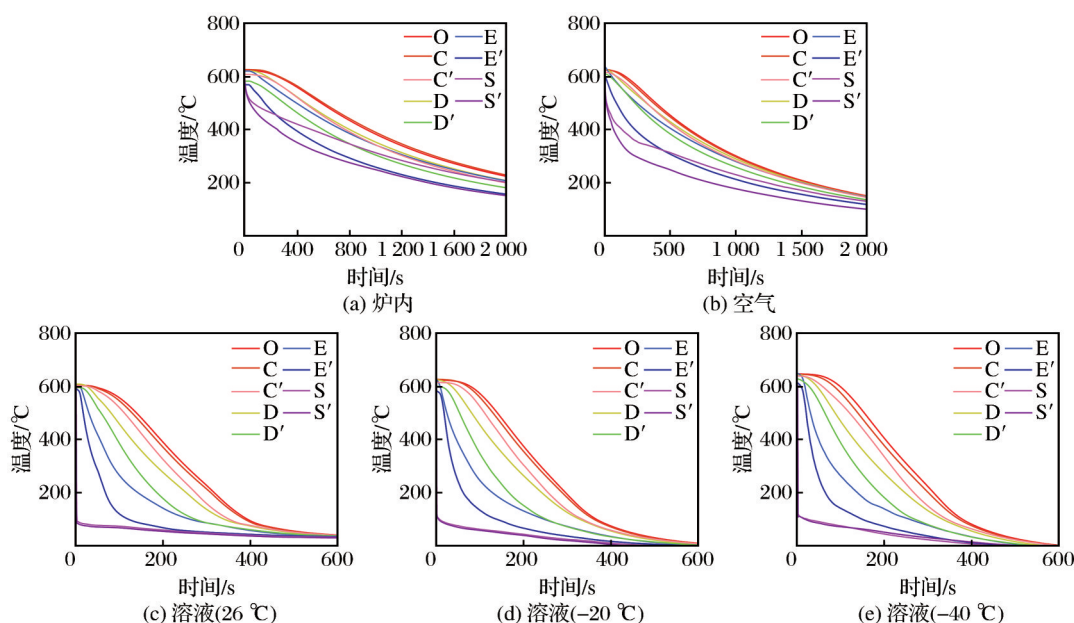


图7 经600 °C加热通过不同方式降温后试样的温度—时间曲线

Fig. 7 Temperature-time curves of the specimen cooled with different methods after 600 °C heating

通过计算图6和图7中温度曲线的斜率,获得降温过程中试样内部不同测点处实时降温速率(温度变化率)的变化规律,分别如图8和图9所示。当降温开始后,岩样外层测点处的降温速率首先迅速达到峰值,随后以较快的速率下降,最后下降至0;越靠近试样内部的测点处的降温速率变化过程越趋于平缓,即越靠近试样中心处,降温速率的升高和下降过程越缓慢。通过提取图8和图9中各测点处的降温速率峰值和峰值出现的时间可以看出,各测点降温速率的峰值均随加热温度的升高[图10(a)]和降温剧烈程度的增大[图10(b)]而升高。从空间位置上来看,越靠近传热边界的位置(即试样外层),降温速率峰值越大[图10(a)、

10(b)],且峰值出现时刻也越早[图10(c)、10(d)]。这反映出快速降温过程中峰值降温速率在时空上的传播规律:降温速率的峰值首先出现在试样表层,随后此峰值逐渐向试样中心传播,并在此传播过程中不断衰减。

基于岩样降温过程温度监测数据(图6和图7),推导出试样不同位置处温度梯度的分布如图11和图12所示。与降温速率的变化趋势相似,温度梯度在试样外层同样呈现为快速上升和下降的过程,测点位置越靠近试样中心,上述变化过程越缓慢。通过提取试样内部不同位置处的温度梯度的峰值(图13)可知,试样内特定区域的峰值温度梯度随加热温度的升高[图13(a)]和降温剧烈程度的增大

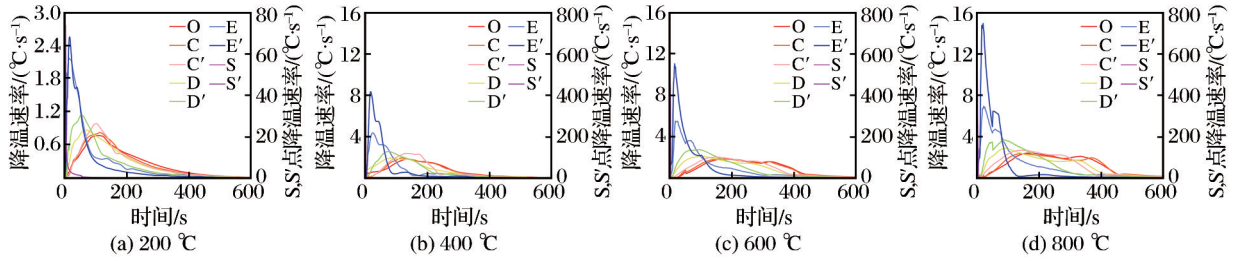


图8 经不同高温加热后在常温乙二醇溶液中降温的试样内部降温速率分布

Fig. 8 Distribution of the cooling rate inside specimens during cooling in ambient-temperature ethylene glycol solution after heating at different high temperatures

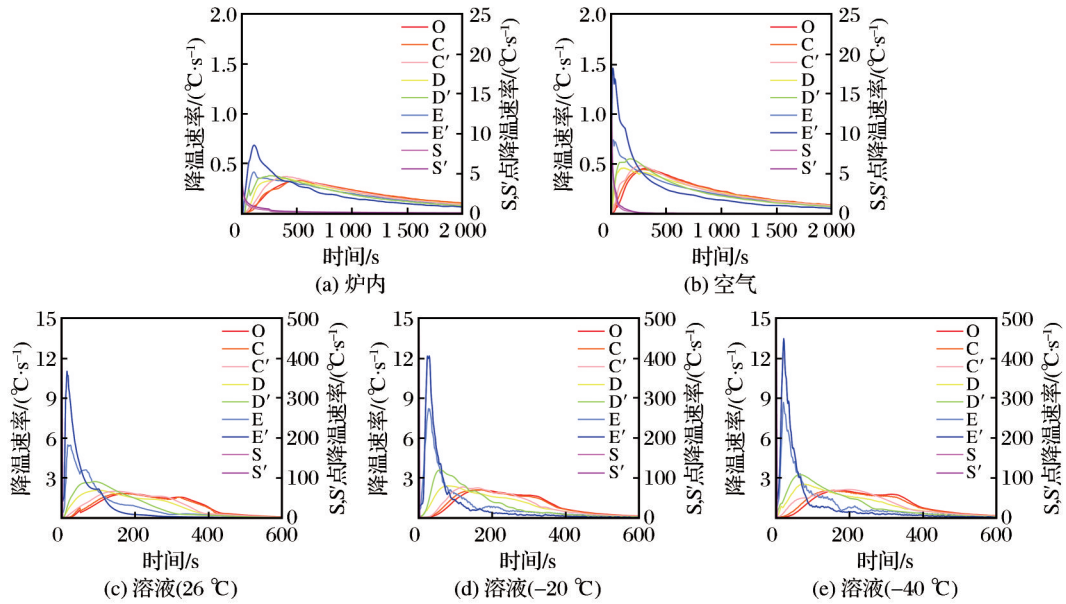
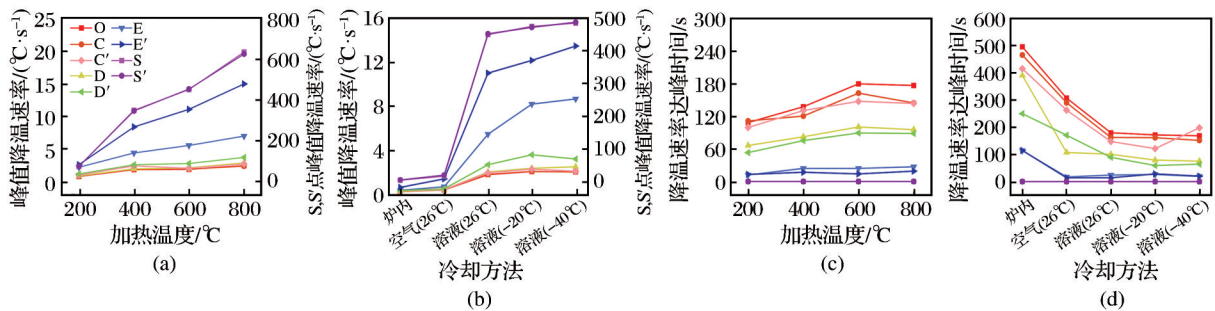


图9 600 °C加热后通过不同方式降温后试样内部降温速率分布

Fig. 9 Distribution of the cooling rate inside the specimens cooled with different methods after 600 °C heating



(a)、(c)经不同高温加热后通过常温乙二醇溶液降温;(b)、(d)600 °C加热后采用不同方法降温

图10 试样内部峰值降温速率及其出现时间的变化规律

Fig. 10 Variation law of the peak cooling rate and its occurrence time inside the specimens

[图 13(b)]而增加。此外,在降温过程中,温度梯度的峰值在试样表面附近最早出现,越靠近试样内部,温度梯度峰值出现的时间依次延后[图 13(c)、13(d)],且峰值幅度也依次衰减[图 13(a)、13(b)]。

以加热至 800 °C 的试样为例[图 11(d)],最外层区域 E'-S' 的温度梯度在降温开始后约 80 s 即达到峰值,约为 43.9 °C/mm,随后该区域温度梯度开始下降,同时较内侧区域 D'-E' 的梯度上升至峰值,其值

略高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, 之后该区域温度梯度开始下降, 而核心区域 O-C' 才达到其峰值温度梯度, 其值略低于 $12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, 与此同时, 外层区域 (如 D'-E' 和 E'-S') 的温度梯度仍处于持续下降阶段。因此, 与

降温速率的峰值演化规律相似, 快速降温过程中温度梯度的峰值首先出现在试样表层, 随着降温过程的持续, 峰值逐渐向试样内部位置传播, 此过程中峰值的大小也逐渐衰减。

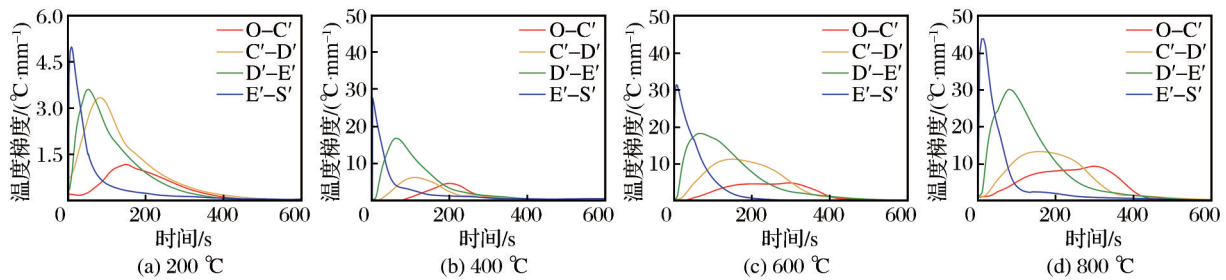


图 11 经不同高温加热后在常温乙二醇溶液中降温的试样内部温度梯度演化规律

Fig. 11 Evolution law of the temperature gradient inside the specimens during cooling in ambient-temperature ethylene glycol solution after heating at different high temperatures

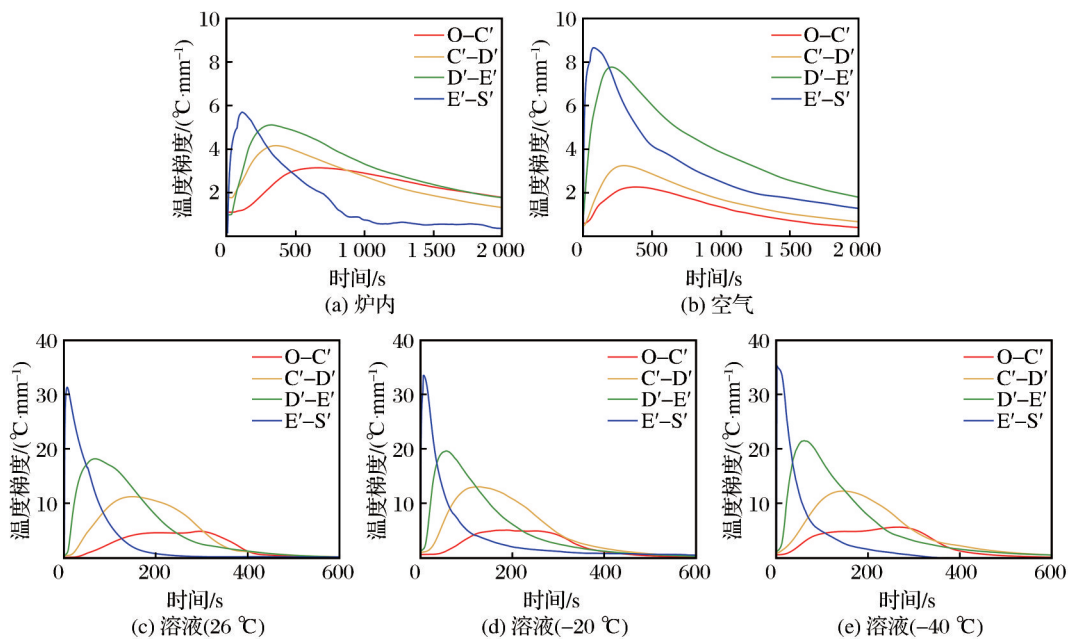
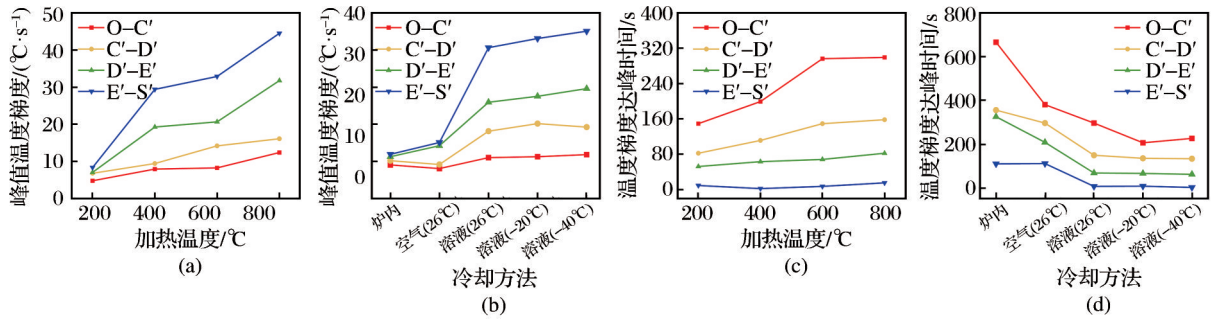


图 12 经 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热后通过不同方式降温后试样内部温度梯度演化规律

Fig. 12 Evolution law of the temperature gradient inside the specimens cooled with different methods after $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ heating

快速降温过程中温度监测数据表明, 更高的加热温度和更剧烈的降温过程会提高试样内部降温速率, 从而产生更高的温度梯度, 这种情况有助于热裂纹的萌生。此外, 对降温速率和温度梯度的时空演化规律的分析进一步支持以下推论: 由于降温速率和温度梯度的峰值首先出现在试样外层, 随着降温过程的持续, 逐渐向试样内部传播, 且峰值大

小逐渐衰减, 因此, 热冲击损伤主要集中在岩石试样的外层区域, 更可能发生在降温过程的初期, 其原因是该阶段同时具备较高的降温速率和温度梯度。如存在引发热冲击的降温速率和温度梯度阈值, 则该值会将热冲击损伤效果限制在降温开始后的一段时间之内, 且将热冲击的影响范围局限在从试样表面延伸到试样内部一定深度的区域之内。



(a)、(c)经不同高温加热后在常温乙二醇溶液中降温;(b)、(d)600 °C加热后采用不同方法降温

图 13 试样内部峰值温度梯度及其出现时间的变化规律

Fig. 13 Variation law of the peak temperature gradient and its occurring time inside the specimens

2.3 热冲击引发阈值分析

根据前述快速降温过程岩样内部温度场的演化规律,若存在表征热冲击引发条件的降温速率阈值或温度梯度阈值,则该阈值将使热冲击的作用效果在时间上被限制在降温开始后的一段时间之内,在空间上被局限在试样表面到内部一定深度的区域之内,即该阈值在时间上确定热冲击作用效果的结束时刻,在空间上限定热冲击作用效果的影响范围。结合声发射数据对该阈值进行量化表征,经不

同高温加热和采用不同方式降温的试样在降温过程中产生的声发射数据分别如图 14 和图 15 所示。高能量声发射事件在降温开始时即出现,反映了降温初期热裂纹的萌生与扩展,此后,声发射活动持续,直至能量显著衰减,反映了热开裂现象的停止,则其高能量持续时间指示热冲击的活跃阶段。随着加热温度的增加(图 14)和降温过程的加剧(图 15),声发射能量显著增大,表明热冲击损伤程度加剧,这也解释了这个过程中岩样力学性能劣化加剧的试

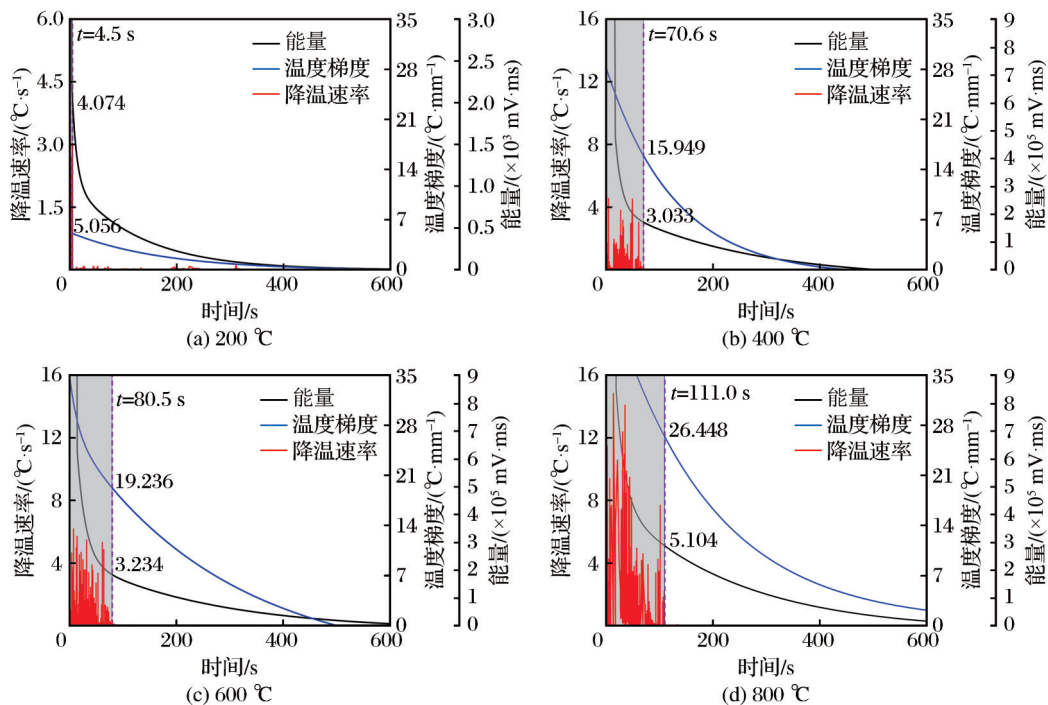


图 14 经不同温度加热后在常温乙二醇溶液中降温试样的声发射能量分布

Fig. 14 Distribution of AE energy of specimens cooled in ambient-temperature ethylene glycol solution after heating at different high temperatures

验结果(图4)。值得注意的是,在经200℃[图14(a)]和600℃加热后于常温空气中降温[图15(a)]的试样

中,仅观察到短暂的低能量声发射活动,说明在这2种条件下热冲击的损伤效果极为有限。

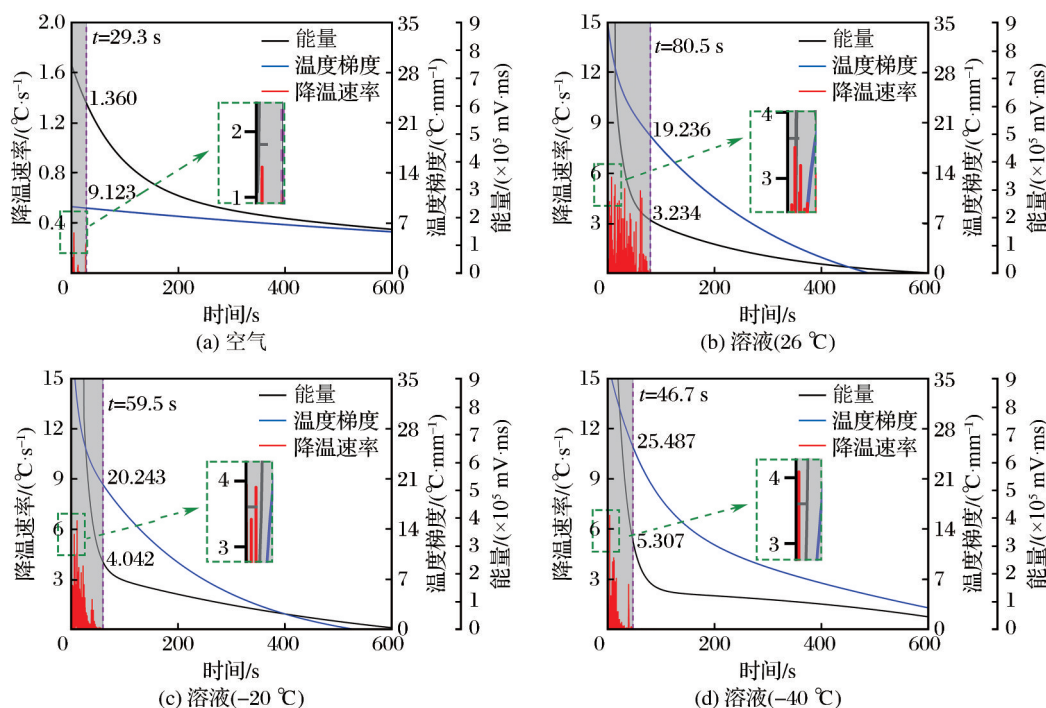


图15 600℃加热后采用不同方式降温后试样的声发射能量变化

Fig. 15 Distribution of AE energy of specimens cooled with different methods after 600 °C heating

为探究热冲击过程中花岗岩内部微裂纹的萌生机制,本研究根据式(1)和式(2)计算了热冲击过程中声发射撞击的平均频率(AF值)和上升时间/幅度比(RA值),并进行归一化处理后绘制了AF-RA散点图(图16和图17)。AF值与RA值的分布特征可用于区分裂纹类型,高AF值和低RA值区域通常对应张拉型裂纹,而低AF值和高RA值区域则对应剪切型裂纹。

$$AF = \frac{A_c}{A_d} \quad (1)$$

$$RA = \frac{A_{RT}}{A_A} \quad (2)$$

式中: A_c 为振铃计数; A_d 为持续时间; A_{RT} 为上升时间; A_A 为上升幅度。由图16可知,在所有加热温度层级的组别中,高AF值和低RA值区域的分布点数均显著多于低AF值和高RA值区域,表明热冲击过程中花岗岩在热应力作用下主要产生张拉裂纹。统计结果显示,张拉型裂纹数量占裂纹总数的60%~80%,且加热温度对这一占比的影响不显著。

值得注意的是,经200℃加热的试样(W200)因热冲击作用微弱,声发射信号数量少且强度弱,AF值和RA值均集中在较低水平,因此归一化后散点图较为稀疏分散;在热冲击作用效果较明显的其他试样中,大部分AE事件的AF值和RA值分布在0.2以内,且随着AF值和RA值的升高,对应的事件数(裂纹数)逐渐减少,反映出热冲击诱发的裂纹多为微小尺度裂纹。由图17可知,在不同冷却方式下,花岗岩在热冲击过程中的微裂纹仍以张拉裂纹为主,其在总开裂数目中占比为60%~80%,表明冷却方式对热开裂模式占比的影响有限。这一结果与热冲击损伤的物理机制相符,即在快速降温过程中,试样表层受拉应力主导,因此张拉破裂成为主要的损伤形式。

由于图8、图9、图11和图12中各曲线代表试样中各测点的降温速率或温度梯度,则这些曲线的外包络线代表降温过程中任一时间点试样内部的最大降温速率或最大温度梯度。将上述曲线的外包络线与降温过程中试样的声发射数据叠加入

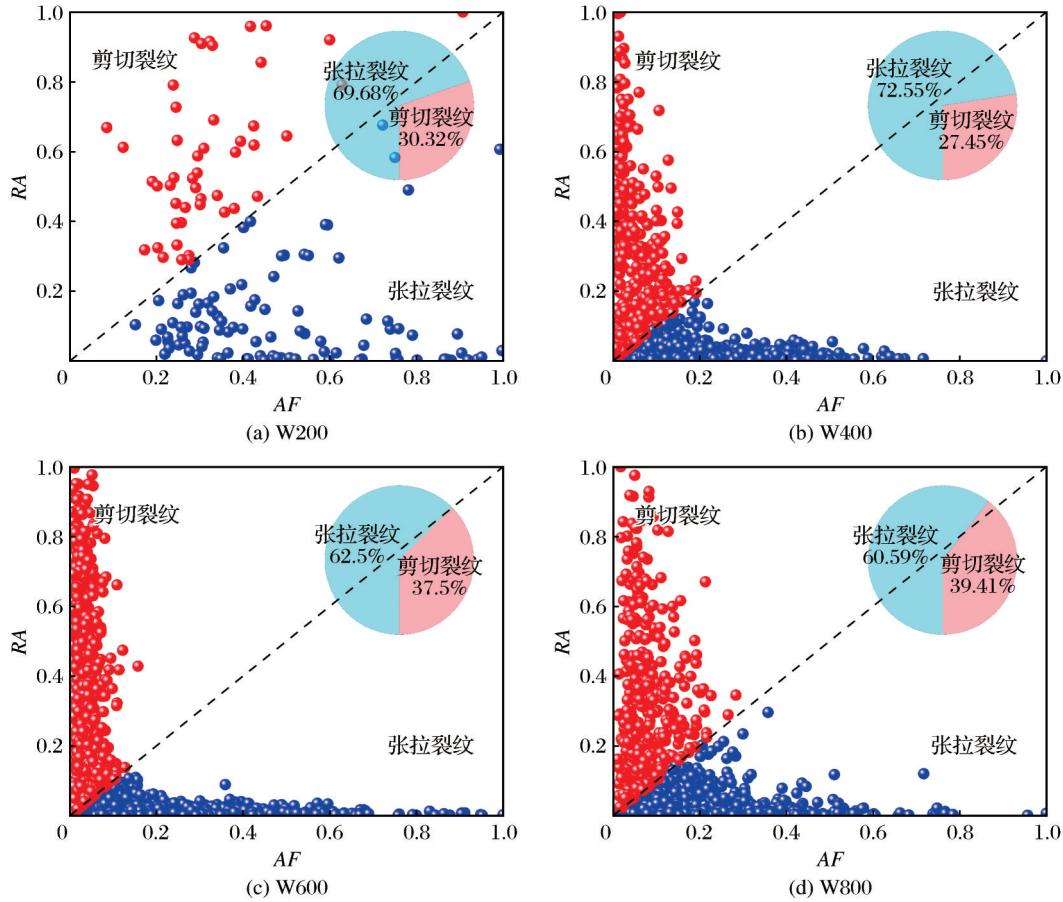


图 16 花岗岩热冲击过程 AF-RA 演化规律 (不同加热温度)

Fig. 16 Evolution law of AF-RA during thermal shock process of granite (different heating temperatures)

图 14(对应图 8 和图 11)和图 15(对应图 9 和图 12), 则根据前述降温速率和温度梯度的演化规律, 图中高声发射能量衰减时所对应的包络线上数值可作为热冲击阈值的保守估计。在不同加热温度和不同降温方式下所得到的该阈值如图 18 所示。根据图 18(a)可知, 热冲击持续时间随加热温度的上升而延长。在相同降温方式(常温乙二醇溶液中降温)下, 岩样降温速率阈值和温度梯度阈值随加热温度的升高均呈递增趋势。对图 18(a)中数据进行拟合, 得到热冲击持续时间 $R_w(s)$ 与加热温度 $T(^{\circ}C)$ 的关系表达式为

$$R_w = -193.6 + 1.44683T - 0.0026T^2 + 0.00000158T^3 \quad (3)$$

冷却速率阈值 $L_w(^{\circ}C/s)$ 与加热温度 $T(^{\circ}C)$ 的关系表达式为

$$L_w = 6.6772^5 - 0.01655T + 0.0000182T^2 \quad (4)$$

温度梯度阈值 $W_w(^{\circ}C/mm)$ 与加热温度 $T(^{\circ}C)$ 的

关系表达式为

$$W_w = -0.1935 + 0.03373T \quad (5)$$

在 400~800 $^{\circ}C$ 加热范围内, 降温速率阈值由 3.03 $^{\circ}C/s$ 逐渐上升至 5.10 $^{\circ}C/s$, 温度梯度阈值则由 15.95 $^{\circ}C/mm$ 上升至 26.45 $^{\circ}C/mm$ 。特别地, 加热至 200 $^{\circ}C$ 的试样中热冲击仅持续了 4.5 s, 同时, 此情况下的声发射能量比其他加热温度情况低 2 个数量级[图 14(a)], 说明此级别的高温加热对岩样几乎没有热冲击损伤效应(热开裂现象), 这与前述力学试验结果一致, 即 200 $^{\circ}C$ (及以下)高温加热对岩样的力学性质不会产生明显影响。

岩样在相同高温(以 600 $^{\circ}C$ 为例)条件下加热, 再经历不同剧烈程度的降温过程后, 降温速率阈值和温度梯度阈值的变化规律[图 18(b)]如下: 降温速率与温度梯度阈值均随降温过程剧烈程度的提高而增大。

特别地, 对于在乙二醇溶液中降温的试样, 随

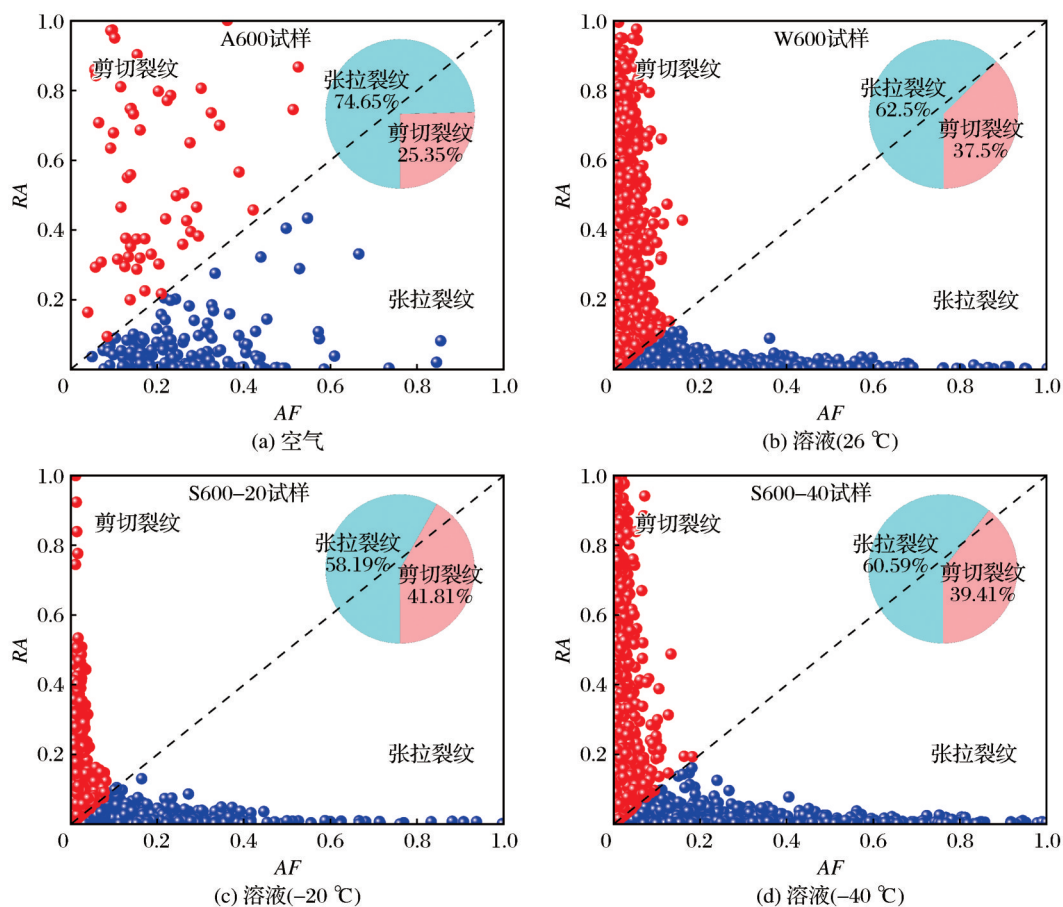


图 17 花岗岩热冲击过程 AF-RA 演化规律 (不同冷却方式)

Fig. 17 Evolution law of AF-RA during the thermal shock process of granite (different cooling methods)

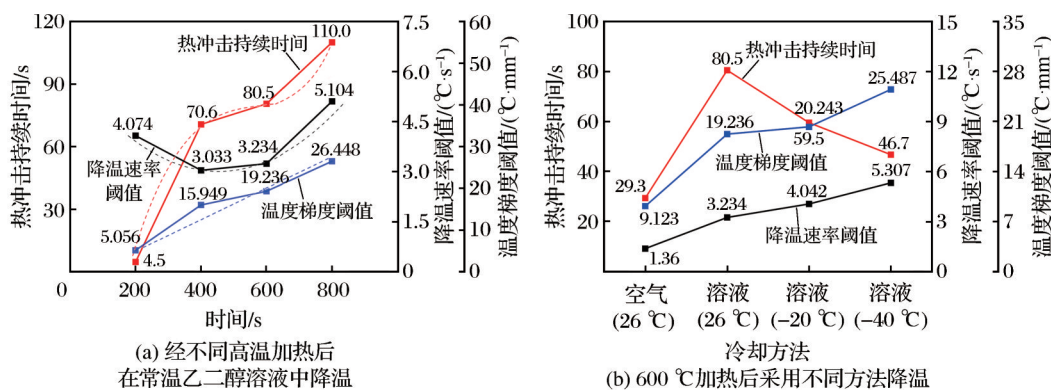


图 18 引发热冲击的降温速率阈值与温度梯度阈值变化规律

Fig. 18 Variation law of the TS-inducing thresholds for cooling rate and temperature gradient

着溶液温度从常温降低至-40 °C,降温速率阈值从3.23 °C/s增高至5.31 °C/s,温度梯度阈值从19.24 °C/mm上升至25.49 °C/mm,而热冲击持续时间则从80.5 s缩短至46.7 s。此外,在常温空气中降温的试样的热冲击持续时间最短,且其声发射能量消散时的峰

值降温速率和温度梯度均显著低于液冷试样。这表明尽管在常温空气中冷却的岩样的热冲击阈值较低,但其实际能达到的峰值温度梯度和降温速率也较低,因此总体损伤程度仍远低于在液冷中降温的情况。

3 讨论

本研究发现一个值得关注的现象,即热冲击引发阈值随加热温度的升高而增大。例如,经 400~800 °C 加热后在常温乙二醇溶液中降温的试样,其温度梯度阈值由 15.95 °C/mm 上升至 26.45 °C/mm,降温速率阈值由 3.03 °C/s 上升至 5.10 °C/s。现有研究表明,温度越高材料越易受损,但此处阈值反而升高,结合图 4(a)所示的弹性模量演化规律,可从热弹性理论角度对此进行解释,材料在温度变化过程中产生的热应力可表示为

$$\sigma_{th} = E\alpha\Delta T / (1 - \nu) \quad (6)$$

式中: E 为弹性模量; α 为线膨胀系数; ΔT 为温度变化量; ν 为泊松比。热冲击损伤发生的临界条件是热应力 σ_{th} 超过材料的抗拉或抗压强度。

由图 4(a)可知,随着加热温度的升高,花岗岩的弹性模量 E 呈现出显著的下降趋势:与常温状态相比,经 300 °C 加热后弹性模量开始出现明显下降;当温度升至 500~600 °C 时,由于石英在 573 °C 发生 α - β 相变引发额外热开裂,弹性模量出现陡降;当温度升至 800 °C 时,弹性模量下降 70%~80%。这意味着,在相同的温度梯度 ΔT 下,高温处理后试样内部产生的热应力 σ_{th} 大幅降低。因此,要引发足以造成宏观损伤的热冲击,则需更大的温度梯度(即更剧烈的降温条件),从而使得测得的阈值相应升高。此外,高温处理引起的微观结构变化也在其中发挥作用。当加热温度超过 300 °C 后,矿物颗粒间的热失配逐渐引发微裂隙萌生;当温度升至 500~600 °C 时,石英相变导致体积突变,进一步加剧裂隙扩展;当温度继续升高至 800 °C 时,长石和云母等矿物也发生热分解和相变,内部微裂隙网络逐渐发育完善。这种高温下的“损伤预积累”使得材料在后续热冲击过程中具有一定的“应变容让空间”——新生热应力部分被已有裂隙吸收或通过裂隙面滑移释放,而非直接用于扩展新裂纹,从而提高了材料抵抗进一步热冲击损伤的能力,表现为阈值升高。

此外,本研究使用乙二醇溶液作为降温介质,对于经 600 °C 高温加热后裂隙极为发育的花岗岩试样,液态介质可能通过毛细作用进入微裂隙内部。在快速降温过程中,裂隙内的液体可能会产生

以下 2 种附加效应:(1)孔隙压力效应——裂隙中的液体在降温过程中体积收缩,但若裂隙闭合速率快于液体排出速率,可能形成局部负压或毛细张力,对裂隙壁产生附加拉应力;(2)潜在化学效应——液体介质的化学作用可能对裂隙尖端产生影响,但在本研究的快速降温过程中(秒级),此类化学效应的贡献可忽略不计。综上所述,孔隙压力效应可能与热应力产生叠加,共同加剧岩石的损伤劣化。因此,本研究所观测到的热冲击损伤阈值,实际上是热应力冲击与流体—固体耦合效应共同作用的结果,而非单纯由温度梯度主导。在本试验条件下,由于试样尺寸较小($\Phi 50$ mm)、降温过程迅速(秒级),裂隙内液体能否在如此短的时间内充分渗入并产生显著的孔隙压力,尚需进一步验证。未来研究可通过对比干燥与饱和试样的热冲击响应、采用不同黏度液体介质等方式,对这一机制进行深入探究。

综上所述,热冲击阈值随加热温度的升高而增大,这是由弹性模量下降(热应力产生效率降低)与微裂隙网络发育(应力释放机制增强)共同作用的结果。

4 结论

(1)花岗岩的力学性能随加热温度的升高和热冲击剧烈程度的加剧而劣化,且热冲击损伤存在 300 °C 门槛,低于此温度时的热冲击损伤可忽略不计。

(2)热冲击引发阈值由加热温度和降温剧烈程度共同控制,二者升高均导致阈值增大。常温乙二醇溶液降温下(加热温度为 100~800 °C),温度梯度阈值为 15.95~26.45 °C/mm,降温速率阈值为 3.03~5.10 °C/s;在 600 °C 加热条件下(26~-40 °C 乙二醇溶液降温),温度梯度阈值为 19.24~25.49 °C/mm,降温速率阈值为 3.23~5.31 °C/s。

(3)本研究建立了量化热冲击引发阈值的试验框架,为准确定义岩石中的热冲击现象和建立岩石热冲击损伤判据提供了基础,对高温相关深部岩石工程稳定性和高温辅助破岩具有启发意义。

本研究的结论是基于特定尺寸($\Phi 50$ mm $\times$ 100 mm)和组分的花岗岩试样。由于大尺寸岩体

热扩散路径更长、边界条件更复杂,温度场的演化与试验结果存在差异,在将结论外推至工程尺度时需考虑尺寸效应和岩性影响。

参考文献 (References):

- Bieniawski Z T, Bernede M J, 1979. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16(2): 138-140.
- Espinosa-Paredes G, Garcia-Gutierrez A, 2004. Thermal behaviour of geothermal wells using mud and air-water mixtures as drilling fluids [J]. Energy Conversion and Management, 45(9/10): 1513-1527.
- Ghaffarian R, 2001. Thermal cycling/shock behavior of CSP assemblies [R]. NASA Electron, 7(2): 5.
- Hall K, 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions [J]. Geomorphology, 31(1/2/3/4): 47-63.
- Hall K, Thorn C E, 2014. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: an attempt to unravel the geomorphic processes and products [J]. Geomorphology, 206: 1-13.
- Hasselman D P H, 1969. Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 52(11): 600-604.
- Jiang C B, Wang Y F, Duan M K, et al, 2021. Experimental study on the evolution of pore-fracture structures and mechanism of permeability enhancement in coal under cyclic thermal shock [J]. Fuel, 304: 121455.
- Li M, Liu X S, Pan Y H, et al, 2022. Experimental studies on the effect of cyclic thermal shock and cooling methods on the mechanical properties and fracture behavior of prefabricated fissured sandstone [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 122: 103576.
- Li X, Zhang Z Y, Chen W, et al, 2019. Mode I and mode II granite fractures after distinct thermal shock treatments [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(4): 06019001.
- Ohno I, Harada K, Yoshitomi C, 2006. Temperature variation of elastic constants of quartz across the α - β transition [J]. Physics and Chemistry of Minerals, 33(1): 1-9.
- Shen Y J, Hou X, Yuan J Q, et al, 2020. Thermal cracking characteristics of high-temperature granite suffering from different cooling shocks [J]. International Journal of Fracture, 225(2): 153-168.
- Tang S B, Wang J X, Chen P Z, 2020. Theoretical and numerical studies of cryogenic fracturing induced by thermal shock for reservoir stimulation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 125: 104160.
- Wang F, Konietzky H, Frühwirth T, et al, 2020. The influence of temperature and high-speed heating on tensile strength of granite and the application of digital image correlation on tensile failure processes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 53(4): 1935-1952.
- Zhao Z R, Hu Y Q, Jin P H, et al, 2021. Experimental study on the physico-mechanical properties and temperature field evolution of granite subjected to different heating-cooling treatments [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(11): 8745-8763.
- 何将福, 任成程, 何坤, 等, 2024. 循环热冲击花岗岩微观裂隙表征与渗透特性演化规律 [J]. 煤田地质与勘探, 52(12): 131-142.
- He Jiangfu, Ren Chengcheng, He Kun, et al, 2024. Microscopic fracture characterization and permeability evolutionary patterns of granites under cyclic thermal shock [J]. Coal Geology & Exploration, 52(12): 131-142.
- 贾蓬, 王茵, 李博, 等, 2023. 高温遇水冷却岩石循环卸载力学性能试验研究 [J]. 北京理工大学学报, 43(2): 126-134.
- Jia Peng, Wang Yin, Li Bo, et al, 2023. Experimental study on mechanical properties of water-cooled high temperature rock under cyclic loading [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 43(2): 126-134.
- 李柏锦, 李响, 王彦, 等, 2021. 温度冲击对花岗岩动态拉伸力学性能的影响 [J]. 黄金科学技术, 29(4): 545-554.
- Li Baijin, Li Xiang, Wang Yan, et al, 2021. Effect of thermal shock on the dynamic tensile mechanical behavior of granite [J]. Gold Science and Technology, 29(4): 545-554.
- 李春, 马文成, 张纯旺, 等, 2024. 冷热交替循环作用后花岗岩渗流特性及微观结构演化规律研究 [J]. 矿业科学学报, 9(5): 712-722.
- Li Chun, Ma Wencheng, Zhang Chunwang, et al, 2024. Experimental study on seepage characteristics and evolution of granite after alternating cooling and heating [J]. Journal of Mining Science and Technology, 9(5): 712-722.
- 吴阳春, 邵保平, 王磊, 等, 2020. 高温后花岗岩的物理力学特性试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 51(1): 193-203.
- Wu Yangchun, Xi Baoping, Wang Lei, et al, 2020. Experimental study on physico-mechanical properties of

- granite after high temperature[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 51(1): 193-203.
- 武治盛, 冯子军, 惠峥, 等, 2021. 干热岩体热冲击后纵波波速演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 49(10): 58-65. Wu Zhisheng, Feng Zijun, Hui Zheng, et al, 2021. Study on law of longitudinal wave velocity evolution of dry hot rock after thermal shock[J]. Coal Science and Technology, 49(10): 58-65.
- 薛熠, 张智豪, 刘嘉, 等, 2024. 高温加热—液氮冷冲击处理后花岗岩声发射演化特征及损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 46(9): 1849-1859. Xue Yi, Zhang Zhihao, Liu Jia, et al, 2024. Acoustic emission evolution characteristics and constitutive model for damage of granite after high-temperature heating and liquid nitrogen cold shock treatment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 46(9): 1849-1859.
- 詹金武, 周亚来, 王雨, 等, 2024. 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, 45(8): 2362-2372, 2386. Zhan Jinwu, Zhou Yalai, Wang Yu, et al, 2024. Experimental study on physical damage and mechanical degradation of granite subjected to high-temperature cooling impact cycling[J]. Rock and Soil Mechanics, 45(8): 2362-2372, 2386.
- 张乐, 张伟, 贺甲元, 等, 2022. 急剧冷却作用下高温岩石微观损伤与增渗机制研究[J]. 地球物理学进展, 37(2): 551-560. Zhang Le, Zhang Wei, He Jiayuan, et al, 2022. Study on meso damage and seepage enhancement mechanism of high temperature rocks under rapid cooling[J]. Progress in Geophysics, 37(2): 551-560.
- 张翔, 陈莹, 雷真, 等, 2025. 高温冷热循环对花岗岩物理力学性能的影响[J]. 科学技术与工程, 25(2): 737-752. Zhang Xiang, Chen Ying, Lei Zhen, et al, 2025. Effect of high temperature cyclic cooling on the physical and mechanical properties of granite[J]. Science Technology and Engineering, 25(2): 737-752.
- 朱振南, 梁缘, 解经宇, 等, 2026. 高温后花岗岩三轴压缩条件下力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 48(1): 33-44. Zhu Zhennan, Liang Yuan, Xie Jingyu, et al, 2026. Experimental investigation on mechanical behaviors of granite specimens after thermal treatment under conventional triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 48(1): 33-44.

Experimental Study on the Thermal Shock Initiation Threshold in High-Temperature Granite

YU Chengxiang¹, LI Xiang², CHEN Jiang¹, YANG Junyi³, FU Jie³

1. China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. School of Civil Engineering, SUN Yat-sen University, Zhuhai 519000, Guangdong, China;

3. China Railway 12th Bureau Group 2nd Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030032, Shanxi, China

Abstract: This study utilized a custom-developed experimental platform to perform thermal shock tests on granite specimens, with the objective of investigating the evolution of thermal shock triggering thresholds under varying heating temperatures and cooling methodologies. During rapid cooling, the spatiotemporal evolution of the internal non-uniform temperature field within the specimens was monitored. This monitoring facilitated the derivation of the distribution characteristics of the temperature gradient and cooling rate. By integrating synchronously acquired acoustic emission signals, the study elucidated the variation of the thermal shock triggering threshold—characterized by temperature gradient and cooling rate—in relation to heating temperature and cooling intensity. In this context, the “triggering threshold” is defined as the minimum thermal load level that initiations and sustains the propagation of detectable micro-cracks, as indicated by a marked increase in acoustic emission activity. The findings reveal that, during thermal shock, the peaks of the cooling rate and temperature gradient migrate from the outer layer toward the inner layer of the specimen and gradually attenuate over time. For specimens subjected to heating up to 800 °C and subsequently cooled in an ethylene glycol

solution at ambient temperature, no significant thermal shock damage was detected when the heating temperature remained below 300 °C. Within the temperature range of 400~800 °C, the threshold for the temperature gradient necessary to induce thermal shock varied between 15.95 and 26.45 °C/mm, while the threshold for the cooling rate ranged from 3.03 to 5.10 °C/s. In experiments where specimens were heated to 600 °C and cooled in ethylene glycol solutions at temperatures spanning from ambient to -40 °C, the temperature gradient threshold was observed to range from 19.24 to 25.49 °C/mm, and the cooling rate threshold from 3.23 to 5.31 °C/s. These thresholds exhibited an increase with elevated heating temperatures and reduced temperatures of the cooling medium. This study introduces an experimental framework designed to quantify the conditions that trigger thermal shock in rock, thereby providing a methodological reference for the precise characterization of the thermal shock phenomenon in geological materials. The results furnish a theoretical basis and technical support for both the mitigation and exploitation of thermal shock effects in rock engineering applications.

Key words: thermal shock; cooling rate; temperature gradient; threshold value; mechanical properties; high-temperature granite