

花岗岩热 – 液氮冲击作用下 I / II 复合型断裂行为研究

罗宇晴^{1,2,3}

1. 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 广东 深圳 518060

2. 深圳大学深地科学与绿色能源研究, 广东 深圳 518060

3. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060

DOI: 10.61369/SSSD.2026070039

摘 要 : 为揭示热 – 液氮冲击作用下花岗岩 I / II 复合型断裂行为及其演化机制, 采用缺口深梁 (NDB) 试样三点弯曲试验与数字图像相关 (DIC) 技术, 系统研究了不同热处理温度 (150、300、450、600 °C) 及裂隙倾角 (15°、30°、48°) 条件下花岗岩的断裂响应特征。结果表明: 热 – 液氮冲击显著削弱花岗岩的承载能力与抗裂性能, 温度为控制断裂劣化的主导因素。DIC 结果显示, 裂纹尖端应变场具有显著局部化特征, 应变集中程度随温度升高而增强, 高倾角条件下剪切应变占主导地位。

关 键 词 : 干热岩; 热 – 液氮冲击; I / II 复合型断裂; 断裂韧度; 数字图像相关 (DIC); 应变场演化

Study on the I/II Mixed Mode Fracture Behavior of Granite under Thermal-Hydrothermal Nitrogen Shock Loading

Luo Yuqing^{1,2,3}

1. National Key Laboratory for Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Earth Engineering, Shenzhen, Guangdong 518060

2. Research on Deep Earth Science and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060

3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060

Abstract : To investigate the mixed-mode I/II fracture behavior and its evolution mechanism of granite under thermal – liquid nitrogen shock, three-point bending tests on notched deep beam (NDB) specimens combined with digital image correlation (DIC) were conducted. The effects of different heat-treatment temperatures (150, 300, 450, and 600 °C) and crack inclination angles (15°, 30°, and 48°) on fracture responses were systematically analyzed. The results indicate that thermal – liquid nitrogen shock significantly degrades the load-bearing capacity and fracture resistance of granite, with temperature being the dominant factor controlling fracture deterioration. DIC results reveal pronounced strain localization near the crack tip, with increasing concentration intensity at higher temperatures. Under larger inclination angles, shear strain becomes dominant in the fracture process.

Keywords : dry hot rock; thermal-hydrogen nitrogen shock; type I/II composite fracture; fracture toughness; digital image correlation (DIC); strain field evolution

随着全球经济的快速发展, 对能源的需求与日俱增。传统化石能源面临着资源枯竭和环境污染等问题, 寻求清洁、可持续的新型能源成为当务之急。地热能因其资源丰富、供应稳定、零碳排放等特性, 被认为是最具开发潜力的可再生能源之一^[1-3]。其中, 深部高温岩体蕴藏的热能尤为巨大, 是地热能中最具利用潜力的部分。干热岩一般埋藏于地壳 3~10 km 深处, 温度介于 150 ~ 650 °C, 其能量主要以显热形式储存于岩体中, 几乎不含可流动的地下水^[4]。

在干热岩开发过程中, 需要通过人工压裂或造缝技术在高温致密岩体中建立裂隙网络, 注入冷流体以吸收岩体热能并回收地表发电^[5]。液氮因其温度极低 (约 -196 °C)、无水损害和环保特性, 在干热岩储层改造中表现出良好的致裂潜力。在这一过程中, 高温会导致矿物热膨胀失配与晶界弱化, 随后施加的低温冲击 (如液氮冷却) 进一步放大温差效应, 诱发更强烈的热应力集中, 从而促进裂纹萌生与扩展。在复杂应力场与热 – 冷耦合作用下, 岩体断裂通常表现为张开型与剪切型的混合断裂模式, 这种混合断裂不仅控制裂纹的起裂方向和扩展路径, 还决定了裂缝网络的几何结构、导流能力及热能提取效率^[6]。因此深入研究高温 – 液氮冷却作用下花岗岩 I/II 型混合断裂的机理与演化规律, 对于揭示深部高温岩体的热 – 力耦合破坏机制、优化储层改造设计及提升地热能提取效率具有重要工程意义。

一、试验材料与方案

（一）试验材料

本试验中所用的花岗岩试样采自山东济南市，由同一块完整岩体加工而成，表面无明显纹理，整体性和均匀性良好。通过单轴压缩试验确定了基本力学参数，接着，使用切割和研磨机制作几何构型为长×宽×厚为40mm×20mm×10mm的NDB试件，在这个过程中，严格保持样品的任何两个相邻的面彼此垂直。然后对试样进行精细研磨，以确保样品的表面粗糙度小于0.2 mm，最后使用一个极薄的锯片在NDB试件中加工出预制贯穿裂缝。

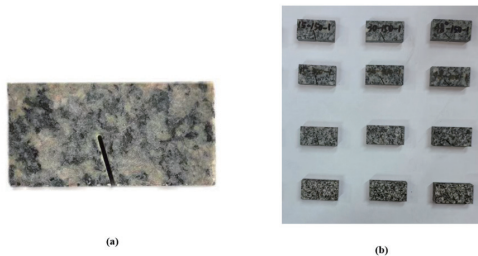


图 11 (a) 花岗岩样品; (b) NDB 试样

（二）试验方案及热处理过程

本实验预制裂隙倾角设为15°、30°、48°，如图1-1所示。在热冲击试验中，以5℃/min的升温速率在马弗炉内将试样进行加热，加热等级分别为150℃、300℃、450℃和600℃。到达预设温度后保温12 h，随后立即将试样浸入液氮中进行降温，直到试样的温度降至室温后取出。并对试件进行编号，定义编号为“裂纹角度+加热温度”。热处理过程如图1-2所示。



图 12 热处理花岗岩过程

（三）实验装置与数据采集

本研究系统包括加载系统、变形采样系统和后期处理系统三部分，如图1-3所示。加载系统采用 AGS-X 试验系统为样品提供边界条件、加载路径、加载时间、位移、力等数据。变形系统采用数字图像相关技术，同时启动 DIC 监测系统。后期处理由数字图像相关技术的数据分析处理软件组成。

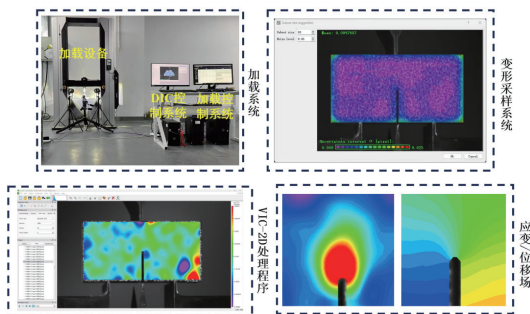


图 13 三点弯曲实验设备及 DIC 处理流程示意图

二、实验结果分析

（一）荷载位移曲线

花岗岩试件的三点弯曲试验荷载-位移如图2-1所示。在初始阶段，随着加载的进行，曲线的斜率逐渐增大，每条花岗岩曲线都表现出不同程度的下凸。与三轴压缩试验引起的裂纹闭合不同，三点弯曲试验中的下凸是由于花岗岩内部结构的不均匀性导致受载薄弱区域出现微裂纹，且随着载荷的增加而逐渐扩展 [7]。试验结果显示，在150℃与300℃范围内，试件峰值荷载变化相对平缓，然而当温度升高至450℃时，各倾角试件峰值荷载均出现明显下降，曲线初始斜率减小。至600℃时，强度退化进一步加剧，曲线峰值显著降低，同时峰值位移明显增加，局部曲线出现较为平缓的“拖尾”特征。

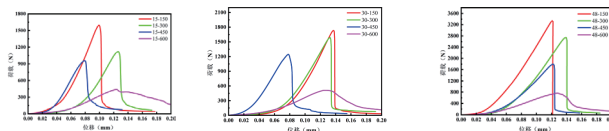


图 21 花岗岩试件的三点弯曲试验荷载-位移图

（二）I / II 复合型断裂韧度

花岗岩试件的断裂韧度如表2-1所示。在热处理作用下，各倾角试件的断裂韧度整体呈现出不同程度的衰减趋势，但不同断裂模式的衰减幅度并不一致。15°试件中，150℃时，等效韧度与未加热状态接近；但至600℃时等效韧度仅0.096，说明混合断裂模式下张开与剪切分量同步退化。30°试件同样表现出随温度升高两分量共同降低的趋势，48°试件在150℃时仍保持较高II型断裂韧度，但在600℃时下降至0.296，衰减幅度超过75%，说明高温损伤对剪切抗力同样具有显著削弱作用。

表 21 花岗岩试件的断裂韧度

试样编号	裂纹 倾角 α	峰值 荷载 (N)	K_I /(Mpa· $m^{1/2}$)	K_{II} (Mpa· $m^{1/2}$)	K_{eff} (Mpa· $m^{1/2}$)
15-150	15°	1515.13	0.360	0.246	0.436
15-300	15°	1345.53	0.320	0.219	0.388
15-450	15°	916.01	0.218	0.149	0.264
15-600	15°	331.62	0.079	0.054	0.096
30-150	30°	2135.64	0.283	0.122	0.308
30-300	30°	1756.89	0.233	0.101	0.253
30-450	30°	1414.78	0.187	0.081	0.204
30-600	30°	660.56	0.087	0.038	0.095
48-150	48°	3417.49	0.000	1.403	1.403
48-300	48°	2788.19	0.000	1.145	1.145
48-450	48°	2205.26	0.000	0.906	0.906
48-600	48°	721.68	0.000	0.296	0.296

（三）水平应变场分布特征

花岗岩试件的水平应变场分布特征如图2-2所示。整体来看，各试样裂纹尖端均形成明显的高应变集中区，其空间形态以裂尖为中心向外逐渐衰减。随着裂隙倾角由15°增加至48°，裂尖前方的高应变区逐渐呈现出沿裂纹扩展方向拉伸的椭圆状或舌

形分布。随着热处理温度由150℃升高至600℃，裂纹尖端水平应变峰值总体呈逐渐增大的趋势，同时高应变区域的范围也有所扩大。在液氮冷却条件下，高温热处理所产生的热损伤在瞬时强烈降温过程中进一步受到热冲击作用的强化，使岩石内部微裂隙更加发育并发生连通，材料整体刚度显著降低，从而在峰值荷载作用下裂纹尖端更容易产生较大的张拉应变集中。

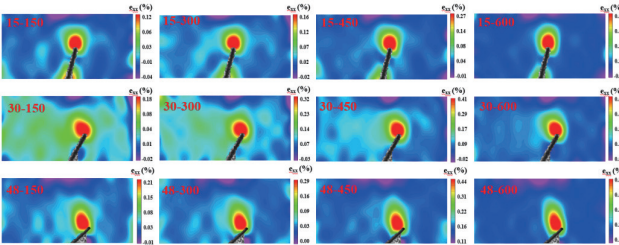


图 22 花岗岩试件的水平应变场分布特征

（四）切应变场分布特征

液氮冷却下不同加热温度、不同裂隙倾角花岗岩试件的切应变场分布特征如图2-3所示。随着热处理温度由150℃升高至600℃，各试样裂纹尖端的切应变峰值整体呈持续增加趋势，同时高应变区域的空间范围也逐渐扩大。在较低温度条件下，裂尖附近的剪切应变集中区相对较小，应变等值线分布较为分散，裂尖局部剪切变形尚未充分发展；而在高温条件下，高应变区明显向裂纹前方扩展，应变等值线逐渐变得密集，显示出裂尖区域剪切变形显著增强。

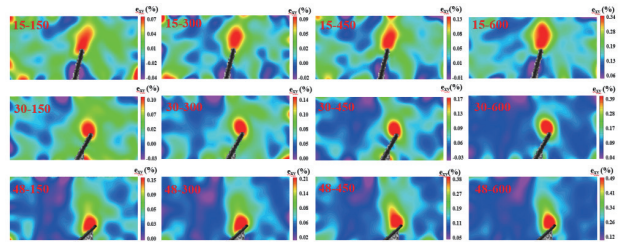


图 23 花岗岩试件的切应变场分布特征

三、结论

本文基于三点弯曲试验与 DIC 技术，系统研究了液氮冷却条件下不同热处理温度（及裂隙倾角对花岗岩复合型断裂行为的影响。结果表明，热-液氮冲击显著削弱花岗岩力学性能并改变裂纹扩展机制，其中温度主导材料劣化程度，裂隙倾角控制断裂模式及其响应特征。

（1）荷载-位移曲线均呈现压密、弹性、非线性扩展及失稳破坏四阶段特征。随着温度升高，峰值位移增加，材料由脆性破坏向渐进失稳转变，表明高温损伤与液氮冲击共同作用下结构完整性显著降低。

（2）断裂初度整体随温度升高呈递减趋势，并表现出阶段性退化特征。150℃阶段变化有限，300℃进入缓慢衰减区间，450℃后初度快速降低，600℃出现显著劣化。48°试件以Ⅱ型断裂为主，初始初度较高但降幅最大，说明剪切主导断裂对热-液氮冲击更为敏感。

（3）裂纹尖端应变场显示明显局部化特征，水平应变与切应变均在裂尖区域形成高值集中区。随温度升高，应变集中范围扩大、强度增强。水平应变高值区随裂隙倾角增大向裂纹扩展方向偏移，切应变在高倾角试件中显著增强。液氮冷却促进高温损伤裂纹的扩展与连通，提高裂尖变形集中程度，加速裂纹起裂与贯通。

参考文献

[1] 巩亮, 韩东旭, 陈峥, 等. 增强型地热系统关键技术研究现状及发展趋势 [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7).

[2] 李根生, 武晓光, 宋先知, 等. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战 [J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 343-364.

[3] 张二勇. 干热岩资源调查与勘查试采示范工程简介 [J]. 中国地质, 2022, 49(02):350.

[4] Jiang G, Li W, Rao S, et al. Heat flow, depth - temperature, and assessment of the enhanced geothermal system (EGS) resource base of continental China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(22): 1432.

[5] Lin W, Wang G, Gan H, et al. Heat source model for Enhanced Geothermal Systems (EGS) under different geological conditions in China[J]. Gondwana Research, 2023, 122: 243-259.

[6] 吴秋红, 夏宇浩, 赵延林, 等. 基于 DIC 及 CPG 技术的热冷循环后花岗岩 I 型断裂特性 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3102-3117.

[7] Zuo J P, Huang Y M, Liu L F. Investigation on meso-fracture mechanism of basalt with offset notch based on in-situ three-point bending tests[J]. Chin J Rock Mech Eng, 2013, 32(4): 740-746.