

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 13

不同裂隙倾角花岗岩热-力耦合卸荷破坏特性

曾维豪¹, 陈正红¹, 陈秋南¹, 熊广为², 陈英¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411100; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410000)

摘要:川藏铁路沿线隧道围岩常存在大量不同倾角的构造裂隙,且常处于高地温和高应力耦合环境。为研究裂隙倾角对高温和高应力耦合下硬岩卸荷破裂特征的影响,采用室内试验和数值模拟方法,通过卸荷试验对川藏铁路某隧道花岗岩试样在50℃实时温度场下的卸荷破裂特征进行了分析。结果表明:卸荷强度随裂隙倾角的增大而增大,当裂隙倾角为0°时,50℃实时温度场下试样的卸荷强度明显小于室温下的卸荷强度;卸荷条件下裂隙试样具有较强的张性破坏特征,且裂隙倾角为30°的试样在50℃实时温度场下的体积扩容现象更为明显;裂隙倾角为0°的试样在卸荷破坏时产生贯穿预裂隙中心的贯穿裂纹;50℃实时温度场下,裂隙倾角越大,试样在卸荷过程中微裂纹发育越分散,预裂隙倾角越小,裂纹发育加速点出现的时间越早。

关键词:高应力卸荷;热力耦合;裂隙倾角;花岗岩

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0517-11

Thermal-Force Coupled Unloading Failure Characterization in Granite with Different Fracture Inclinations

Zeng Weihao¹, Chen Zhengong¹, Chen Qiunan¹, Xiong Guangwei², Chen Ying¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411100, P. R. China;
2. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, P. R. China)

Abstract: A large number of different inclinations of tectonic fracture exist for the Sichuan-Tibet Railway along the tunnel peripheral rock, and often in the high ground temperature and high stress coupling environment. In order to study the influence of fracture inclination on the unloading failure characteristics of hard rock under high temperature and high stress coupling, this paper analyzes the unloading rupture characteristics of granite specimens of a tunnel of Sichuan-Tibet Railway under 50℃ real-time temperature field through unloading test by adopting indoor test and numerical simulation method. The results show that: the unloading strength decreases with the increase of fracture inclination angle, when the fracture inclination angle is 0°, the unloading strength of the specimen under the 50℃ real-time temperature field is obviously smaller than the unloading strength at room temperature; the fracture specimen under the unloading condition has strong tensile damage characteristics, and the dilatancy phenomenon of the specimen under the 50℃ real-time temperature field is more obvious when the fracture inclination angle is 30°; When the fracture inclination angle is 0°, a penetrating fracture through the center of the pre-fracture is generated; under the real-time temperature field of 50℃, the larger the fracture inclination angle is, the more dispersed microcracks are developed in the unloading process of the specimen, and the smaller the

收稿日期: 2025-04-29(修改稿)

作者简介: 曾维豪(2000—),男,湖南长沙人,硕士生,主要从事岩体力学,地下工程开挖等方向的研究。

E-mail: weihaozeng@yeah.net

通讯作者: 陈正红(1992—),女,湖南湘潭人,博士,副教授,主要研究方向为地下工程开挖、岩体力学、岩石断裂与裂纹扩展理论等。E-mail: zhchen@hnust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52004328);湖南省自然科学基金(2022JJ40149);湖南省教育厅科学研究项目(22B0518)

inclination angle is of the pre-fracture, the earlier the accelerated point of fracture development occurs.

Keywords: high stress unloading; thermal-force coupling; fracture inclination; granite

0 引言

川藏铁路自成都至拉萨全长近 1 750 km,其建设对我国社会经济发展有重大意义。然而,川藏铁路沿线地形、地质条件复杂,不良工程地质问题十分突出,修建难度实属罕见。特别是在川藏铁路沿线特长隧道修建过程中,工程开挖不仅要面临高地应力、高地温,而且开挖的硬岩岩体常具有裂隙发育程度高的问题,给川藏铁路隧道工程建设带来了很大的难题。除川藏铁路的建设外,可预见的未来中,我国还有大批的深部硬岩工程需要进行开挖建设,而高应力、高地温对裂隙硬岩开挖过程中带来的隐患及危害是我们无法回避的问题,亟需进行更多关于高地温、高应力耦合即热-力耦合条件下裂隙硬岩的开挖卸荷破坏机理分析研究。

受构造运动的影响,川藏铁路沿线穿越十余条深大断裂带及大型缝合带,次级断裂或规模小一些的活断层更是不计其数,致使岩体中大量存在裂隙,深刻影响着岩石的力学性质^[1-3]。工程实践表明,在裂隙发育度高的岩体中进行工程开挖将导致灾害发生频率更高、危害程度更大。为此,近年来众多学者针对裂隙岩石的力学特性研究进行了大量的室内试验和数值模拟研究。Wong 等^[4-6]利用多种岩石、有机玻璃、石膏等材料制作预制裂隙试样,在单轴、三轴条件下系统研究了裂隙角度与裂隙深度对裂纹扩展的影响,首次发现反翼状裂纹。Xu 等^[7]利用声发射技术与数字图像相关技术(DIC)进行了预制裂隙红砂岩单轴试验,发现裂隙试样的裂纹扩展规律、峰值强度、声发射特征都与裂隙倾角密切相关。肖桃李等^[8]通过单裂隙试样的常规三轴压缩试验,发现三轴压缩条件下围压是影响单裂隙试样宏观破坏模式的主要影响因素,预制裂隙角度则是新裂隙起裂的诱因。余明坤等^[9]通过预埋聚乳酸材料制作类岩石裂隙试样,通过聚乳酸的热熔特性进行分步开挖卸载试验,研究表明,预制裂隙尖端在靠近开挖面时起裂有拉伸以及剪切裂纹,在远离开挖面时则仅有拉伸型翼状裂纹。裂隙岩石的数值模拟研究方面,陈鹏宇^[10]根据模拟裂隙岩石裂纹扩展研究现状重点对单裂隙岩体在不同加载方式下的裂纹扩展特征进行了总结,探寻断裂韧度对裂隙岩体裂纹扩展的影响。Huang 等^[11]通过 PFC^{3D} 建立预制裂隙试样进行常规三轴试验,研究分析了试样的裂纹萌生、发育、贯

通过程以及试样应力应变曲线与微裂纹数量的关系。郭颖泉等^[12]使用 PFC^{2D} 对裂隙岩体进行卸荷模拟,发现卸荷条件下裂隙试样的张性破坏要远大于双轴而略小于单轴条件,裂隙尖端会产生应力集中现象导致岩体开裂。岩体中的裂隙对受到应力扰动作用下岩体的起裂、扩展具有主导作用,裂隙的几何形状对岩体的物理力学性质以及破裂特征有着显著影响。

温度对岩石的影响作用可以分为两个方面:一是温度对岩石基本力学参数的影响,二是在温度作用下对岩石破坏形式的影响。许锡昌等^[13]探寻了花岗岩 20 °C ~ 600 °C 单轴压缩条件下的力学参数变化,发现 75 °C 和 200 °C 是花岗岩力学参数发生变化的两个门槛值。Zhang 等^[14]探讨了从室温至 800 °C 下 3 种硬岩的峰值强度、峰值应变和弹性模量的变化规律,发现砂岩在室温至 200 °C 时砂岩强度呈下降趋势,弹性模量略有变化。李建林等^[15]通过三轴卸荷试验发现高温处理后的岩石抗拉强度出现明显降低。温度对岩石破坏形态方面的影响上,陈国庆等^[16]开展不同温度环境下花岗岩加卸载三轴试验,发现花岗岩加卸载三轴试验存在 60 ~ 100 °C 的温度门槛值,当温度未超过此范围门槛值时,随着温度的增加,岩石峰后变形由延性向脆性转换,温度增强了硬岩的脆性破坏特性。Yin 等^[17]使用 PFC^{2D} 模拟花岗岩在受热过程中的内应力以及热裂纹演化特征,发现超过 300 °C 后花岗岩内部发育大量热裂纹在试样端部及边缘发生宏观破坏。热损伤岩石的物理力学特性以及破坏形态得到了广泛的研究,高温作用会使得岩石强度劣化而峰值变形量增加,但对于弹性模量和泊松比随温度均匀变化的阈值,目前尚无普遍认可的数值。

深埋硬岩在初始高应力条件下的隧道开挖过程会发生高应力的卸荷扰动,容易诱发灾害频发,如岩爆、片帮等,严重制约工程施工顺利进行,对工程人员和机械设备安全造成极大的工程危害。正确认知高应力卸荷条件下硬岩变形破坏规律和卸荷力学特性是防治此类灾害的前提和基础。为此,众多学者通过卸荷试验对开挖卸荷过程进行了模拟重现。例如,黄润秋等^[18]对完整花岗岩试样进行卸荷试验,发现花岗岩在卸荷过程中体积扩容现象明显且破坏时具有较强的张性破裂特征,对比单轴加载试验,卸荷岩石的黏聚力有明显的下降。邱

士利等^[19]开展了深埋大理岩卸荷试验,发现初始损伤程度和卸荷路径对深埋大理岩卸荷变形破坏过程有强烈的控制作用,不同初始损伤程度和卸荷路径下大理岩强度特征和变形规律差异显著。吴刚等^[20]通过裂隙岩体模型的卸荷破坏试验,从应力-应变关系、变形及强度特性等方面,对裂隙岩体在卸荷条件下的变形破坏特性进行了分析,发现在卸荷破坏试验中,不同的裂隙岩体具有不同的变形破坏特征。李夕兵等^[21-22]利用 PFC 对岩石进行不同卸荷速率的卸荷试验发现,卸荷速率对卸荷强度以及卸荷过程中微裂纹发育扩展规律影响明显。上述研究表明卸荷试验可以作为一种科学的方法模拟高应力赋存条件下隧道开挖过程中围岩应力场变化及破裂特征。

在有关裂隙岩体的热-力耦合研究方面, Yang 等^[23]对高温处理后的含预制裂隙砂岩进行了压缩试验,研究发现高温对裂隙试样有软化作用,试样破坏时的峰值变形明显增加,不同温度下试样发育出的主裂纹类型以及裂纹扩展方向有明显差异。Yang 等^[24]对单裂隙花岗岩试样进行了循环热处理之后的单轴压缩试验,结果表明,裂隙倾角对试样裂隙起裂、扩展有显著影响,高温处理后的试样张拉翼状裂纹发育受到限制,试样破坏主要由张拉反翼状裂纹主导。龙运丁等^[25]开展真三轴作用下高温裂隙花岗岩压缩试验,高温增强了花岗岩的塑性,常温状态花岗岩受压条件下表面裂纹数量明显减少,高温条件下裂隙花岗岩的径向应变增长速率要明显高于常温条件下。现有研究试验中试样加载条件大多为均匀应力场,缺乏卸荷应力条件下的裂隙岩体热-力耦合研究。

综上所述,已有研究充分证明了裂隙、温度、高应力卸荷过程以及热力耦合环境对岩石力学性质和破裂模式有明显影响,但是目前鲜有对于裂隙硬岩在实时温度场和高应力卸荷耦合条件下力学特性的相关研究。为此,本文以川藏铁路某隧道工程为研究对象,通过对不同预裂隙倾角的花岗岩试样开展常规三轴卸荷试验和数值模拟,揭示裂隙硬岩在高温高应力条件下的卸荷破坏响应机制,旨在为高温高应力硬岩隧道的开挖以及稳定性分析提供一定的借鉴作用。

1 试验设计与试验过程

1.1 试样制备

根据现场勘察结果,川藏铁路新都桥至昌都段某隧道围岩是以花岗岩为主的侵入岩,隧道地处金沙江断裂带内,隧道穿越罗麦乡断层、夏日断层等

25条断层,隧道围岩节理裂隙发育程度高,节理与隧道开挖方向的夹角在 $0\sim 90^\circ$ 之内均有分布。因此,为研究不同裂隙倾角对试验结果的影响,首先对取自隧道围岩的花岗岩岩块进行标准试样加工,加工精度按照《水利水电工程岩石试验规程》^[26]严格执行,然后在标准试样的基础上,利用水刀对试样进行切割,制备不同倾角 θ 的裂隙试样, θ 取 0° 、 30° 、 60° 、 90° 共4种代表性角度,裂隙长度均为20 mm;宽度均为2 mm。标准试样以及裂隙试样如图1所示。

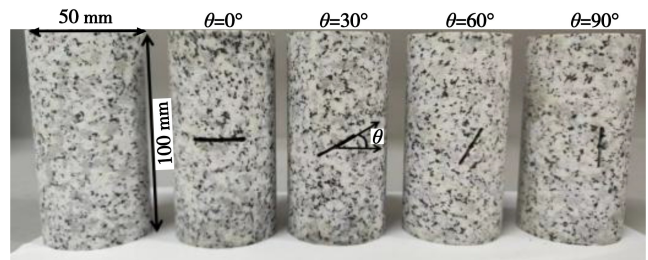


图1 花岗岩试样

Fig. 1 Granite specimens

对标准试样进行单轴压缩试验,测得花岗岩试样单轴抗压强度为156.8 MPa,弹性模量为47.66 GPa,泊松比为0.29。通过对标准试样的X射线衍射分析,得到其主要矿物组成成分与含量为:石英(41.5%)、斜长石(27.7%)、钾长石(18.2%)、云母(11.8%),如图2所示。

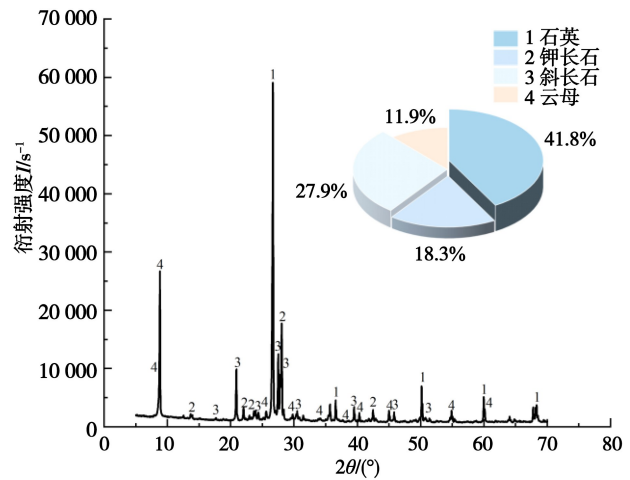


图2 花岗岩矿物组成成分

Fig. 2 Granite mineral composition

1.2 试验设计及试验过程

关于热-力耦合问题,试样经过高温处理后冷却以及实时高温作用下的岩体存在力学物理性质上的差异,本文所依托研究的隧道钻孔地温梯度为 $4.32\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$,其受到孕玛龙1号断层导热影响属于异常地温梯度,隧道左线最高地温 $52.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据现场条件以及研究目标,设置室温(约 $25\text{ }^\circ\text{C}$)

与 50 ℃ 两个温度分组进行实时高温作用下的花岗岩卸荷试验。

根据所研究的隧道钻孔水压致裂地应力测试数值,其最大水平主应力为 46.17 MPa,因此本文选取 40 MPa 作为水平主应力,在常规三轴卸荷试验中,初始围压设置为 40 MPa。根据应力路径以及温度的不同,对 4 种不同的裂隙倾角的试样进行 2 组不同温度下的常规三轴卸荷试验。具体试验条件以及试样分组如表 1 所示。

表 1 试验条件以及试样分组

试样编号	围压/MPa	温度/℃	裂隙倾角 $\theta/(\circ)$
TU-A	40→0	室温	0
TU-B	40→0	室温	30
TU-C	40→0	室温	60
TU-D	40→0	室温	90
TU-A ₁	40→0	50	0
TU-B ₁	40→0	50	30
TU-C ₁	40→0	50	60
TU-D ₁	40→0	50	90

常规三轴卸荷试验中应力路径示意图如图 3 所示,其中 50 ℃ 下的常规三轴卸荷试验过程如下:

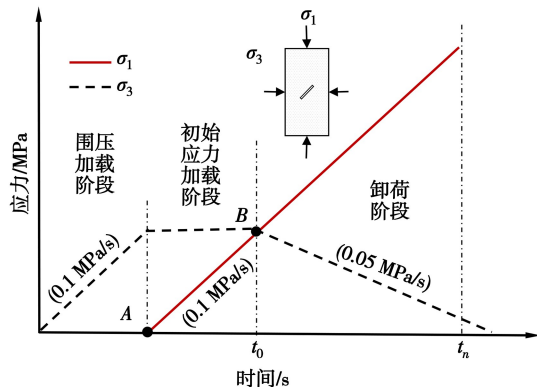


图 3 应力路径示意图

Fig. 3 Stress path schematic

(1) 升温阶段:通过三轴腔室内置加热体以恒定功率加热三轴腔室内的高温硅油,加热至 50 ℃ 后降低加热体功率使三轴腔室内温度维持不变,保持 30 min 使得岩样受热均匀,后续试验过程中温度保持不变。

(2) 围压加载阶段:以 0.01 MPa/s 的速度控制围压腔室内压力,直至围压 σ_3 达到 40 MPa(点 A)。

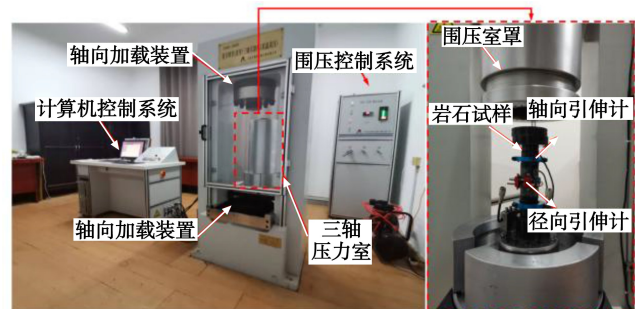
(3) 初始应力加载阶段:以 0.1 MPa/s 的速度控制轴向加载平台,使得轴压 σ_1 加载至 40 MPa,

如图 3 中点 B 所示。

(4) 卸荷阶段:轴压保持 0.1 MPa/s 的加载速度不变,以 0.05 MPa/s 的速度卸载围压,直至试样达到峰值强度破坏,试验结束。

1.3 试验仪器

本文试验使用湖南科技大学 TAW-2000 岩石力学三轴试验机,试验机最大轴向压力为 2 000 kN,最大围压 120 MPa。配套引伸计可对变形进行监测:轴向 0~5 mm,径向 0~3 mm,测量分辨率 0.000 1 mm,测量精度 $\pm 1\%$,变形速度控制范围 0.01 mm~50 mm/min。仪器装载加热系统,最高加载温度为 150 ℃。试验仪器如图 4 所示。



(a) TAW-2000岩石力学三轴试验机

(b) 三轴压力室

图 4 TAW-2000 岩石力学三轴试验机

Fig. 4 TAW-2000 rock mechanics triaxial testing machine

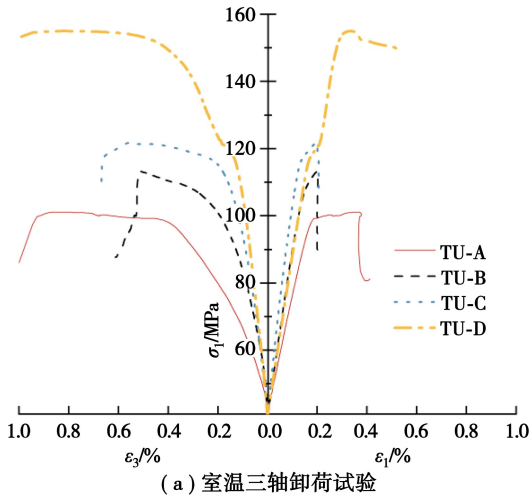
2 试验结果及分析

2.1 应力-应变曲线分析

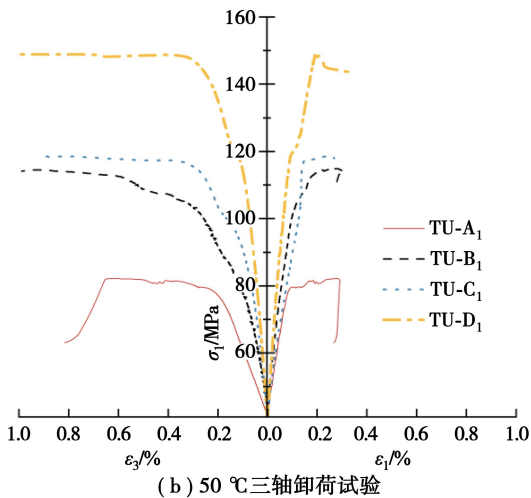
试验得到的不同裂隙倾角试样在室温及 50 ℃ 下常规三轴卸荷试验的应力-应变结果如图 5 所示。从图中可以看出,不同裂隙倾角下岩石的应力-应变曲线特征存在显著差异,在峰值应力前,2 组卸荷试验中相同轴向应力 (σ_1) 下试样的径向应变 (ε_3) 随着倾角的增大而减小,在轴向应力达到 120 MPa 左右时 90° 倾角试样出现应变突增的情况;在峰值应力后,当裂隙倾角 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 时,试样岩体出现应力跌落现象而轴向应变 (ε_1) 及径向应变 (ε_3) 变化较小,应力-应变曲线具有明显的脆性变形特征,当裂隙倾角 $\theta = 90^\circ$ 时,这种脆性变形特征变得不明显。另一方面,相比 50 ℃,室温条件下 $\theta = 30^\circ$ 和 60° 的试样在峰后表现出的脆性变形特征更明显,但 $\theta = 0^\circ$ 以及 $\theta = 90^\circ$ 的试样在 50 ℃ 和室温条件下的变形差异不大。

2.2 强度及变形特征

根据上述应力-应变结果可以发现,不同试样在卸荷过程中的轴向应力峰值,即卸荷强度不同,图 6 给出了 2 组卸荷试验所测得的试样卸荷强度与裂隙倾角的关系。对 2 种温度下花岗岩的卸荷



(a) 室温三轴卸荷试验



(b) 50 °C三轴卸荷试验

图 5 卸荷试验应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of unloading test

强度进行线性拟合,两者拟合优度 $R^2 > 0.9$,表明裂隙试样的卸荷强度与裂隙倾角之间存在良好的线性关系,卸荷强度伴随裂隙倾角的增加而增加。另外,当裂隙倾角 0° 时,试样在 50°C 下的卸荷强度明显小于室温下的卸荷强度,而其他裂隙倾角的试样其卸荷强度受温度的影响较小,说明 50°C 的实时高温卸荷对裂隙倾角为 0° 试样的卸荷强度具有明显的劣化效果。

除了卸荷强度外,根据上述应力-应变结果可以发现,不同裂隙倾角花岗岩在室温和 50°C 下的卸荷变形特征也有明显区别。图 7 给出了室温和 50°C 下不同裂隙倾角的花岗岩试样在卸荷试验中的弹性模量、峰值应变以及轴向变形速率的规律。

从图 7(a) 可以看出, 50°C 条件下卸荷时,裂隙倾角 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 的试样卸荷弹性模量均大于室温条件卸荷的试样,而裂隙倾角 $\theta = 60^\circ$ 的试样其卸荷弹性模量异常小。另外,裂隙倾角 $\theta = 90^\circ$ 的试样在 50°C 条件下卸荷时其卸荷弹性模量较其他试样明显增大。

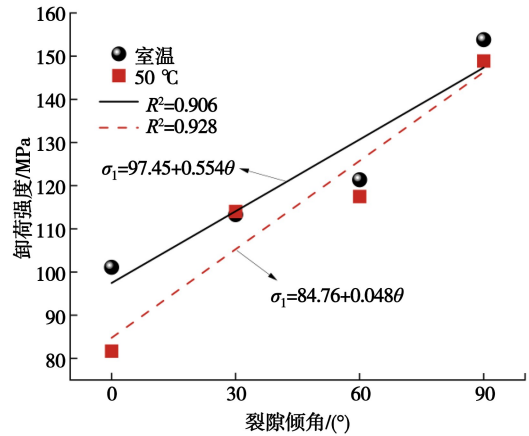


图 6 不同裂隙倾角下试样的卸荷强度变化规律

Fig. 6 Changing law of unloading strength of specimens under different crack inclination angles

从图 7(b) 可以看出,卸荷试验中试样的径向峰值应变均大于轴向峰值应变,具有较强的张性破坏特征。并且,室温和 50°C 条件下卸荷时不同裂隙倾角试样的轴向峰值应变较为接近,但是 50°C 条件下卸荷时, $\theta = 30^\circ$ 试样的径向峰值应变明显较大,说明在 50°C 条件下卸荷时, $\theta = 30^\circ$ 的试样径向扩容现象更为明显。

通过计算 90% 峰值强度至峰值强度这一阶段中的轴向变形量的平均变化速率 (mm/MPa), 得到如图 7(c) 所示的轴向应变变化速率。从图 7(c) 可以看出,不同裂隙倾角对变化速率的影响较之温度作用的影响更为明显, 50°C 条件下卸荷时,轴向应变变化速率随裂隙倾角的增大而降低,但是室温条件下卸荷时, $\theta = 0^\circ$ 的试样轴向应变变化速率明显大于其他裂隙倾角。

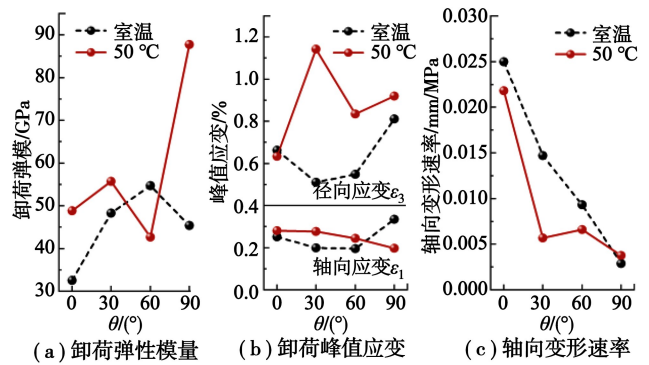


图 7 不同裂隙倾角花岗岩试样卸荷变形规律

Fig. 7 Unloading deformation law of granite specimens with different fissure inclination angles

2.3 破坏形态分析

对于花岗岩等脆性岩石,微裂纹产生、连通和扩展是造成岩石力学性能劣化,进而导致岩石最终

破坏的主要原因。裂纹的扩展是决定岩石强度的重要因素,因此,裂纹扩展机制和规律分析是认识花岗岩长破裂特征的关键,根据易婷等^[27]的研究结果,裂隙花岗岩在破坏过程中裂纹扩展类型主要可以分为:翼状裂纹(Y)、反翼状裂纹(F)、远场裂纹(S)、次生共面裂纹等,如图 8 所示。

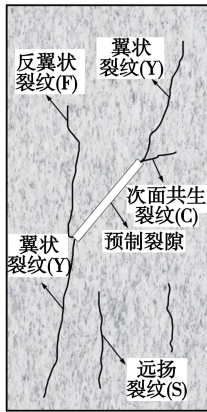


图 8 裂纹扩展类型示意图^[25]

Fig. 8 Schematic diagram of fracture extension types^[25]

在裂纹扩展过程中,预制裂隙起到类似“桥接”的作用,对裂纹发育方向也起到一定的引导作用,因此不同裂隙倾角的试样破坏形态呈现巨大差异。图 9 为不同裂隙倾角下试样在室温和 50 ℃ 实时温度下的卸荷破坏形态及相应的示意图,从图 9(a)中可以发现,室温下的常规三轴卸荷试验中,不同裂隙倾角下试样卸荷破坏模式有明显区别:对于 $\theta=0^\circ$ 的试样,其在卸荷破坏时预制裂隙尖端产生向试样侧面扩展的翼状裂纹(Y),同时,其在卸荷破坏时产生了一条贯穿预制裂隙中心点的独特裂纹类型,即贯穿裂纹(G)。对于 $\theta=30^\circ$ 的试样,在室温下沿预制裂隙两端发育出反翼状裂纹(F),贯通至试样两个端面以致试样破坏。 $\theta=60^\circ$ 的试样预制裂隙尖端发育出翼裂纹和反翼裂纹贯通至试样上下端面,沿裂纹有一部分区域存在掉块现象。 $\theta=90^\circ$ 的试样在预制裂隙尖端向上下端面发育出多条次生共面裂纹(C),并且在远离预制裂隙处发育出一条远场裂纹。

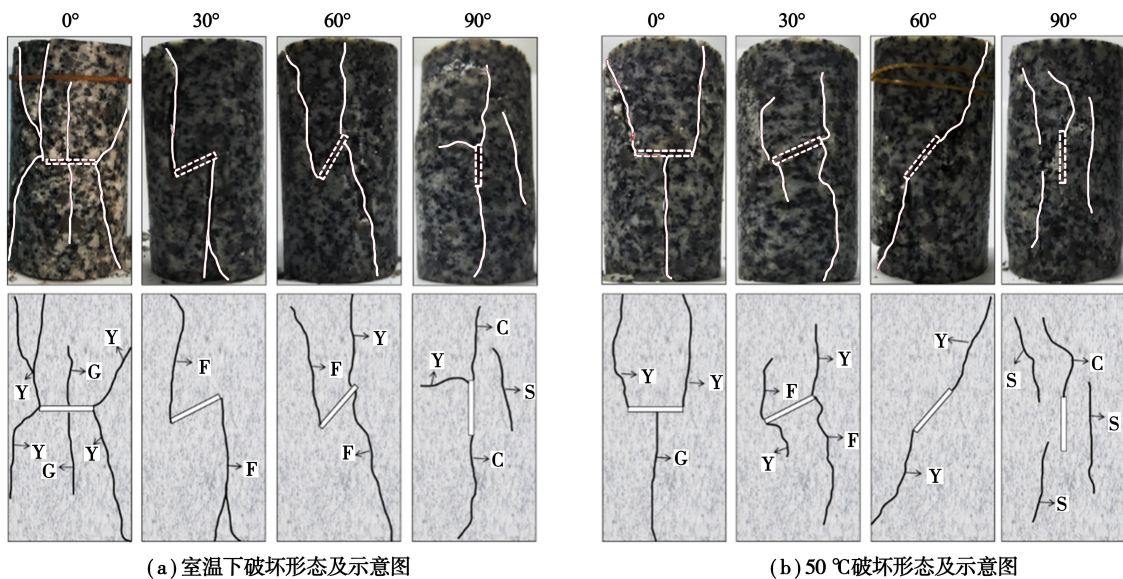


图 9 不同裂隙倾角下试样在室温和 50 ℃ 实时温度下的卸荷破坏形态及其示意图

Fig. 9 Unloading damage patterns and their schematic diagrams for specimens with different fracture inclinations at room temperature and 50 °C real-time temperature

从图 9(b)中可以看出 50 ℃ 实时温度下,4 种裂隙倾角的试样卸荷破坏形态的不同,且与对应室温的破坏形态有所差异:裂隙倾角 $\theta=0^\circ$ 的试样在预制裂隙尖端向试样上端面发育出 2 条贯通至试样上端面的翼状裂纹(Y),在预制裂隙中心点向下端面发育出 1 条贯通至试样下端面的贯穿裂纹(G),3 条裂纹均垂直于卸荷方向,说明试样发生压致拉裂破坏,即劈裂破坏,正是由于劈裂破坏

的产生使得其上文所述的卸荷强度较低,同时,对比图 9(a)中室温下 $\theta=0^\circ$ 的试样发现,50 ℃ 下 $\theta=0^\circ$ 的试样其翼状裂纹更少,且翼状裂纹扩展方向由室温下向侧面扩展转变为向上端面扩展; $\theta=30^\circ$ 的试样翼状裂纹(Y)与反翼状裂纹(F)发育程度相当,翼状裂纹与反翼状裂纹的共同发育致使试样出现碎胀现象,故如图 7(b)所示其径向扩容明显,同时,对比图 9(a)中室温下 $\theta=30^\circ$ 的试样发现,

50 °C 下 $\theta=30^\circ$ 的试样破坏模式由反翼状裂纹主导转变为翼状裂纹主导; $\theta=60^\circ$ 的试样则发育出 2 条与预裂隙角度一致的翼状裂纹贯(Y)通试样整体,呈现出典型的剪切破坏形态,与图 9(a) 中室温下 $\theta=60^\circ$ 的试样由反翼状裂纹(F)主导明显不同。 $\theta=90^\circ$ 的试样仅在预制裂隙尖端上发育出 1 条较短的次生共面裂纹(C),而在垂直于卸荷方向产生数条短小的远场裂纹(S),这说明其变形和破坏过程受预裂隙的影响较小,故如上文所示其卸荷弹模较其他试样更大,与图 9(a) 中室温下 $\theta=90^\circ$ 的试样次生共面裂纹(C)多,远场裂纹(S)少有明显差异。

3 颗粒流数值模型的建立与验证

上文通过室内常规三轴卸荷试验确定了裂隙倾角与 50 °C 实时温度场对所研究隧道的花岗岩试样卸荷破坏基本规律,但是无法确定在整个卸荷过程中的裂纹起裂、扩展以及微观断裂机理。为此,采用离散元数值模拟软件 PFC (Partical Flow Code),进行微观分析。通过将试验中破坏后的典型试样(TU-C₁) (图 10) 进行拆分发现,三维空间上的裂纹发育与试样二维表面观测到的裂纹发育一致,沿预制裂隙端部产生起裂点后向试样上下端面扩展,所以为便于观测和分析,所建立的数值模型为二维模型。

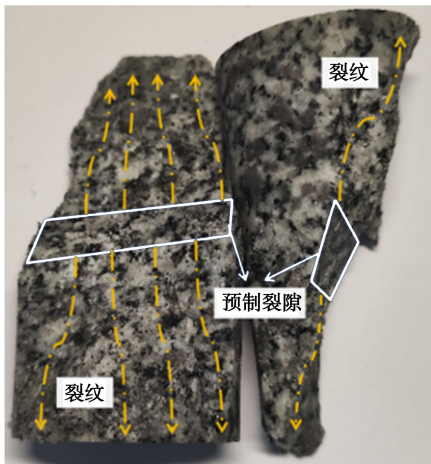


图 10 破坏后的典型试样(TU-C₁)

Fig. 10 Typical specimen after destruction (TU-C₁)

3.1 花岗岩数值模型的建立

由于花岗岩试样为典型的硬岩试样,选取适用于硬岩的平行粘结模型建立花岗岩数值模型。为使得数值模型的基本力学参数与室内试验所取得的数据相匹配,需对模型的微观参数进行赋值,并

通过一系列的试错试验来模拟室内单轴压缩试验,最终所确定的模型微观参数如表 2 所示。以此组微观参数建立的模型在进行单轴压缩模拟试验时所得到的基本力学参数、应力-应变曲线以及破坏模式与室内单轴压缩试验结果基本一致,如图 11 所示,故用此数值模型可以合理地模拟本文试验所用的花岗岩。

表 2 花岗岩模型微观参数

Table 2 Granite model micro-parameters

参数类型	细观参数	数值
颗粒基本参数	颗粒密度 $r / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 400
	最小颗粒半径 R_{\min} / mm	0.14
	粒径比 R_{\max} / R_{\min}	1.66
	颗粒接触模量 E_c / GPa	46.6
	颗粒刚度比 k^n / k^s	2.1
	颗粒摩擦因数 μ	0.5
	平行黏结模量 E_c / GPa	46.6
平行粘结参数	平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c / \text{MPa}$	45
	平行黏结切向强度 $\bar{\tau}_c / \text{MPa}$	70
	粘结法向与切向刚度比 \bar{k}_n / \bar{k}_s	1.15

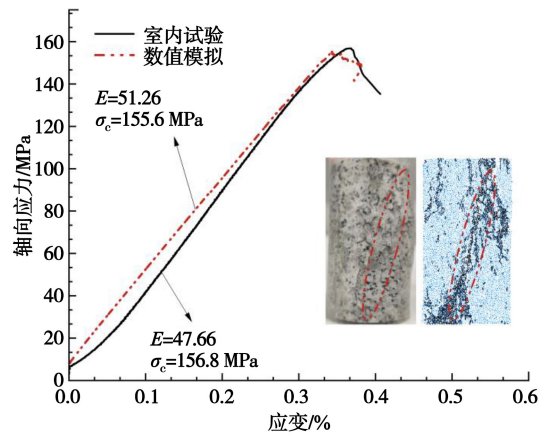


图 11 数值模型与室内试验单轴压缩试验结果对比

Fig. 11 Comparison of numerical modeling and uniaxial compression test results from indoor tests

如前文所述,利用 X 射线衍射分析(XRD) 测得川藏铁路某隧道工程的花岗岩主要矿物组成为石英、钾长石、斜长石、云母。为了准确反映川藏铁路某隧道工程的温度场对花岗岩开挖卸荷过程的影响,需要对花岗岩各个矿物组份进行热导率、线性热膨胀系数、比热等热物性参数赋值。为此,依据 Zhao 等^[28] 的研究确定了花岗岩各矿物组成热力学参数,参数设置如表 3。

表 3 花岗岩各矿物组成热力学参数
Table 3 Thermodynamic parameters of each mineral composition of granite

矿物成分	热膨胀系数 / $10^{-6}K^{-1}$	热导率 / $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	比热 / $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
石英	24.3		
钾长石	8.7		
云母	3.0	3.5	1 015
斜长石	14.1		

通过给颗粒编号分组区别不同矿物组成部分,然后分别设置其膨胀系数,同时通过在预制裂隙区域内删除特定的颗粒,形成含有不同裂隙倾角的花岗岩数值模型。在数值模型建立后,通过编写伺服程序对试样进行卸荷模拟试验。由于本文的室内试验加载参数为:轴向加载速率 0.1 MPa/s,卸荷速率为 0.05 MPa/s。为了在数值模拟中保持这种比例关系,利用墙体伺服机制在每一时步计算中调整径向墙体速度来控制径向墙体的应力,以匹配室内试验中的卸荷速率与轴向加载速率的比例关系。数值模拟试验中在轴向应力 σ_1 下降至峰值轴向应力,即卸荷强度的 80%时结束试验。4 种不同裂隙倾角的花岗岩数值模型以及相应的卸荷模拟试验应力路径图如图 12 所示。

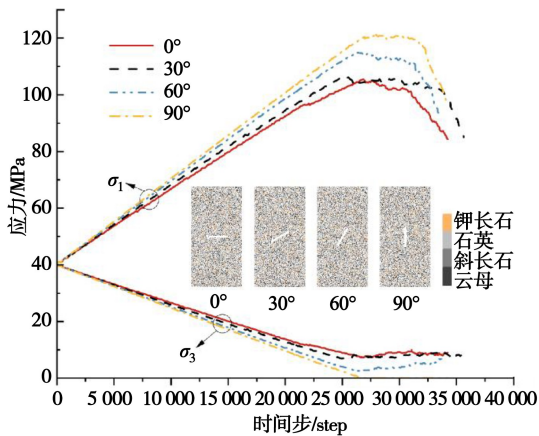


图 12 花岗岩数值模型以及卸荷模拟试验应力路径图
Fig. 12 Numerical modeling of granite and stress path diagrams for unloading simulation tests

3.2 数值模拟结果分析

50 °C 实时温度条件下的卸荷模拟试验得到的试样裂纹扩展图如图 13 所示,图中灰色颗粒为数值模型的微观颗粒, N 代表微裂纹数量,黑色短线为张拉微裂纹,红色短线为剪切微裂纹。为观测试样裂纹扩展过程,取每个试验中 4 个典型的时刻进

行分析,即裂纹起裂时刻、主裂纹发育时刻、卸荷强度时刻、卸荷结束时刻。从图 13 可以发现,不同裂隙倾角的花岗岩卸荷模拟试验的破坏模式与室内试验基本一致。从裂纹起裂时刻的微裂纹分布可以看出, $\theta = 0^\circ$ 的试样在预制裂隙中间及两端起裂, $\theta = 30^\circ$ 以及 60° 的试样均在预制裂隙端部开始起裂, $\theta = 90^\circ$ 试样的微裂纹分布则较为分散。从主裂纹发育时刻的微裂纹分布可以看出,预制裂隙倾角越大,试样在卸荷过程中微裂纹的发育越分散,试样越不易发生整体破坏,这正是卸荷强度随裂隙倾角的增大而递增的原因。对比卸荷强度时刻和卸荷结束时刻的微裂纹分布可以看出,试样中微裂纹数量在达到卸荷强度后才发生急剧上升,出现最终的破坏形态。

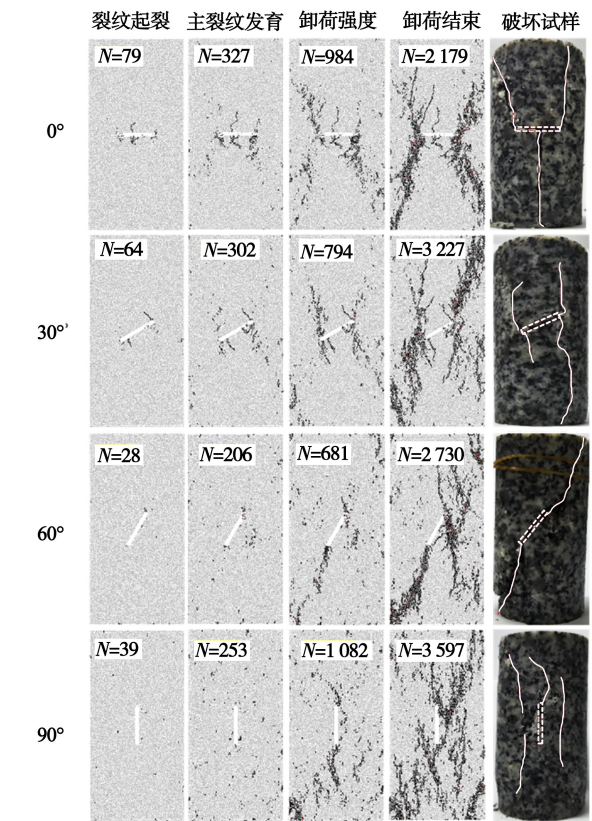


图 13 50 °C 卸荷下不同裂隙倾角试样的裂纹扩展规律
Fig. 13 Fracture extension patterns of specimens with different fracture inclination angles under unloading at 50 °C

图 14 为 50 °C 实时温度条件下的卸荷模拟试验中试样在卸荷结束时的微裂纹数量对比图。从图中可以看出,其中张拉微纹数量占比远超剪切微纹数量,验证了前文所述卸荷试验中试样具有较强的张性破坏特征。同时,比较不同预制裂隙倾角下的试样微裂纹结果可以发现: $\theta = 90^\circ$ 试样的剪切微裂纹数最少而张拉微裂纹最多,说明其张性破坏特征

最强。 $\theta=60^\circ$ 试样的剪切裂纹数最多而张拉裂纹最少,说明其宏观剪切带虽然由张拉微裂纹控制,但仍存在一定数量的剪切微裂纹。

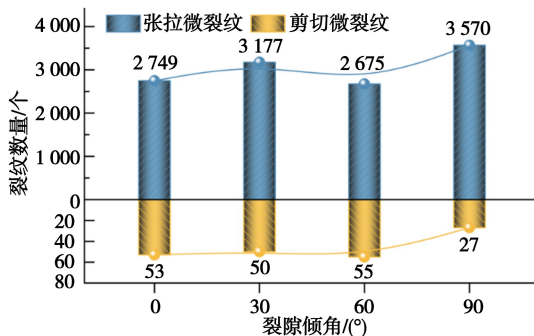


图 14 卸荷模拟试验中试样在卸荷结束时微裂纹数量对比

Fig. 14 Comparison of the number of microcracks at the end of unloading for specimens in unloading simulation tests

0° 裂隙倾角试样在 50°C 实时温度下卸荷时,由预制裂纹中心产生一条沿轴向力方向发育的裂纹即贯穿裂纹(G),为研究此独特裂纹的成因,对 $\theta=0^\circ$ 试样颗粒速度矢量图进行了分析。如图 15 所示,试样在轴向方向颗粒速度方向与轴向方向平行,预裂隙端部颗粒速度方向与预制裂隙平行向试样左右端面扩散,预裂隙随之被挤压拉伸变形。颗粒的速度方向体现了试样的受力状态,如图 15 中的速度方向示意图所示,预裂隙处的受力状态如同“简支梁”一般,在预裂隙中心点承受最大弯矩,即预制裂隙中心点受到最大拉应力,因此该区域颗粒向左右两侧运动。表现在破坏形态上就是由预裂隙中心出发沿轴向方向发育的贯穿裂纹(G)。

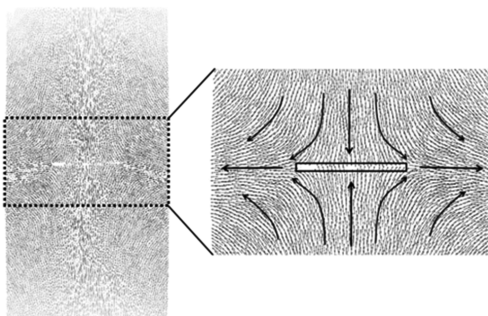


图 15 0° 裂隙倾角试样颗粒速度矢量图

Fig. 15 Vector plot of particle velocity for specimen with 0° fissure inclination angle

前文从空间分布及形态上研究了卸荷条件下不同裂隙倾角试样的裂纹扩展规律,而裂纹扩展规律随时间的变化规律将直接影响隧道工程施工实际中的支护施作时机。为此,基于 PFC 的裂纹实时监测程序,对不同裂隙倾角试样在 50°C 实时温度下卸荷时裂纹扩展规律随时步的变化规律进行

了分析。从图 16 中可以看出,微裂纹的发育可以主要分为稳定发育阶段与加速发育阶段。在微裂纹稳定发育阶段微裂纹数量较少,不同裂隙倾角的试样之间的微裂纹数量差异也较小。在微裂纹加速发育阶段, $\theta=0^\circ$ 、 30° 、 60° 的试样裂纹发育速度较为接近,而 $\theta=90^\circ$ 试样裂纹发育速度则明显高于前三者。另外,在微裂纹加速发育阶段的前期,将出现一个“裂纹发育加速点”,在越过“裂纹发育加速点”之后,随着卸荷的继续进行,微裂纹将进入一个急速增加的过程,并且试样在卸荷过程中预裂隙倾角越小,“裂纹发育加速点”出现的时间越早,从这一规律可以得知,在工程实际当遇到围岩中存在的天然裂隙倾角越小,特别是与开挖卸荷方向平行(0°)的天然裂隙时,为了避免开挖卸荷过程导致围岩中裂纹的急剧扩展应越早实施防治处理措施。

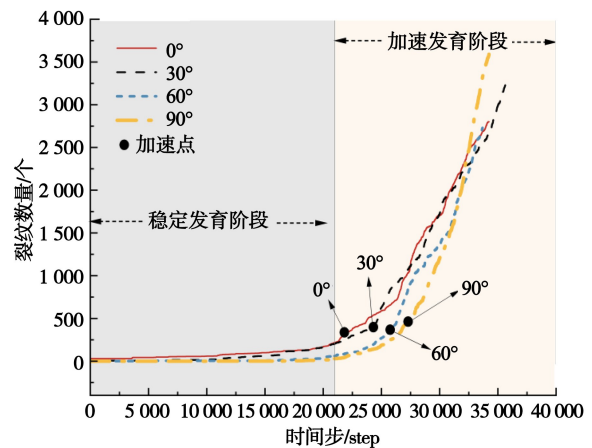


图 16 50°C 卸荷模拟试验中预裂隙试样的微裂纹数量随时步的变化规律

Fig. 16 Rhythmic change of microcrack number in pre-cracked specimens at any time step in 50°C unloading simulation test

4 结论

(1) 裂隙试样的卸荷强度随着裂隙倾角的增大而增大,当 $\theta=0^\circ$ 时,试样在 50°C 实时温度场下的卸荷强度明显小于室温下的卸荷强度,而其他裂隙倾角的试样其卸荷强度受温度的影响较小。

(2) 裂隙试样在卸荷试验中的径向峰值应变均大于轴向峰值应变,具有较强的张性破坏特征,并且不同裂隙倾角试样的轴向峰值应变受 50°C 实时温度场的影响小,但 $\theta=30^\circ$ 的试样在 50°C 实时温度场下卸荷时径向扩容现象更为明显,同时 50°C 实时温度场下卸荷时,轴向应变变化速率随

裂隙倾角的增大而降低。

(3) $\theta=0^\circ$ 的试样在卸荷破坏时产生贯穿预制裂隙中心点的独特裂纹类型,即贯穿裂纹。对于不同裂隙倾角的试样,其在50℃实时温度场下的卸荷破坏形态相较室温下的卸荷破坏形态有所差异。

(4)在50℃实时温度场下,预裂隙倾角越大,试样在卸荷过程中微裂纹的发育越分散,且试样中张拉微纹数量远超剪切微纹数量。在微裂纹加速发育阶段,试样在卸荷过程中预裂隙倾角越小,“裂纹发育加速点”出现的时间越早。

参考文献(References)

- [1] 彭建兵,崔鹏,庄建琦.川藏铁路对工程地质提出的挑战[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2377-2389. (Peng Jianbing, Cui Peng, Zhuang Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan—Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2377-2389. (in Chinese))
- [2] 杨继华,崔臻,万伟锋,等.引黄济宁工程隧洞穿越活动性断裂响应特征研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(1):283-292. (Yang Jihua, Cui Zhen, Wan Weifeng, et al. Study on the Response Characteristics of Tunnel Crossing Active Faults of the Yellow River to Xining Water Diversion Project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(1): 283-292. (in Chinese))
- [3] 曹振生,徐海斌,虎晓敏,等.穿越断裂带隧道变形机制及NPR支护数值模拟研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(6):2122-2132. (Cao Zhensheng, Xu Haibin, Hu Xiaomin, et al. Study on the deformation mechanism of tunnels crossing fault zones and numerical simulation of NPR support[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(6): 2122-2132. (in Chinese))
- [4] Wong R H C, Huang M L, Jiao M R, et al. The mechanisms of crack propagation from surface 3-d fracture under uniaxial compression [J]. Key Engineering Materials, 2004(261-263): 219-224.
- [5] Wong R H C, Law C M, Chau K T, et al. Crack propagation from 3-D surface fractures in pmma and marble specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 43(3): 360.
- [6] Robina H C, Wong Y S H, Guo L Y, et al. Anti-wing crack growth from surface flaw in real rock under uniaxial compression [A]// Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures [C]. Alexandroupolis: Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [7] Xu R C, Zhao Y, Hu Y B, et al. Experimental investigation on the effect of preexisting orthogonal cross flaws on cracking behaviors and acoustic emission characteristics of red sandstone [J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2022(122): 103634.
- [8] 肖桃李,李新平,郭运华.三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J].岩土力学,2012,33(11):3251-3256. (Xiao Taoli, Li Xinping, Guo Yunhua. Experimental study of failure characteristic of single jointed rock mass under triaxial compression tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3251-3256. (in Chinese))
- [9] 余明坤,许国伟,唐国栋,等.预制裂隙类岩石材料的分步卸载试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1672-1681. (Yu Mingkun, Xu Guowei, Tang Guodong, et al. Experimental study on stepped unloading of rock-like materials with pre-existing fissure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1672-1681. (in Chinese))
- [10] 陈鹏宇.PFC2D模拟裂隙岩石裂纹扩展特征的研究现状[J].工程地质学报,2018,26(2):528-539. (Cheng Pengyu. Research progress on PFC2D simulation of crack propagation characteristics of cracked rock [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 528-539. (in Chinese))
- [11] Huang Y H, Yang S Q, Tian W L. Crack coalescence behavior of sandstone specimen containing two pre-existing flaws under different confining pressures (Article) [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019(99): 118-130.
- [12] 郭颖泉,岑夺丰,李悦,等.卸荷条件下岩体裂隙扩展贯通及能量演化机制[J].地下空间与工程学报,2022,18(5):1521-1531. (Guo Yingquan, Cen Duofeng, Li Yue, et al. Mechanism of Crack Propagation, Coalescence and Energy Evolution of Rock Mass under Unloading Condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(5): 1521-1531. (in Chinese))
- [13] 许锡昌,刘泉声.高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J].岩土工程学报,2000(3):332-335. (Xu Xichang, Liu Quansheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature) [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000(3): 332-335. (in Chinese))
- [14] Zhang L Y, Mao X B, Lu A H. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature[J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(3): 641-646.

- [15] 李建林, 陈星, 党莉, 等. 高温后砂岩三轴卸荷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1587-1595. (Li Jianlin, Chen Xing, Dang Li, et al. Triaxial unloading test of sandstone after high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1587-1595. (in Chinese))
- [16] 陈国庆, 李天斌, 何勇华, 等. 深埋硬岩隧道卸荷热-力效应及岩爆趋势分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1554-1563. (Chen Guoqing, Li Tianbin, He Yonghua, et al. Thermo-mechanical coupling and rockburst tendency analysis of deep hard rock tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1554-1563. (in Chinese))
- [17] Yin T B, Zhuang D D, Li M J, et al. Numerical simulation study on the thermal stress evolution and thermal cracking law of granite under heat conduction[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148: 104813.
- [18] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(11): 2205-2213. (Huang Runqiu, Huang Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(11): 2205-2213. (in Chinese))
- [19] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1686-1697. (Qiu Shili, Feng Xiating, Zhang Chuanqing, experimental research on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and unloading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1686-1697. (in Chinese))
- [20] 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998(6): 615-621. (Wu Gang, Sun Jun. Deformation and strength characters of jointed rock mass under unloading stress states [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998(6): 615-621. (in Chinese))
- [21] 李夕兵, 陈正红, 曹文卓, 等. 不同卸荷速率下大理岩破裂时效特性与机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1565-1574. (Li Xibing, Chen Zhenghong, Cao Wenzhuo, et al. Time-effect properties and mechanisms of marble failure under different unloading rates [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1565-1574. (in Chinese))
- [22] Li X B, Chen Z H, Weng L, et al. Unloading responses of pre-flawed rock specimens under different unloading rates (Article) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2019, 29(7): 1516-1526.
- [23] Yang S Q, Jing H W, Huang Y H, et al. Fracture mechanical behavior of red sandstone containing a single fissure and two parallel fissures after exposure to different high temperature treatments [J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69: 245-264.
- [24] Yang Z, Yang S Q, Chen M. Peridynamic simulation on fracture mechanical behavior of granite containing a single fissure after thermal cycling treatment [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 120: 103414.
- [25] 龙运丁. 真三轴条件下高温裂隙花岗岩的力学及声发射特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023. (Long Yunding. Study on the mechanics and acoustic emission characteristics of high temperature treatment fractured granite under true triaxial conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese))
- [26] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程(SL 264-2001) [S]. 北京: 水利水电出版社, 2001 (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering (SL 264-2001) [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2001. (in Chinese))
- [27] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 98-106, 134. (Yi Ting, Tang Jianxin, Wang Yanlei. Effect of fracture dip angle and number on mechanical properties and failure modes of rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 98-106, 134. (in Chinese))
- [28] Zhao Z H. Thermal influence on mechanical properties of granite: Amicrocracking perspective [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 747-762.