

DOI:

不同冷却方式下高温花岗岩巴西劈裂力学行为及细观破坏机制

孟尧尧^{1,2}, 靖洪文^{*2}, 李慧³, 刘晓伟⁴, 尹乾^{1,2}, 张涛^{1,2}, 于美鲁¹, 孙治民⁵

(1. 安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 延安大学西安创新学院 数据科学与工程学院, 陕西 西安 710100; 5. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100071)

摘要: 为探究不同冷却方式下高温花岗岩巴西劈裂力学行为及其细观破坏机制, 利用 ABAQUS 软件中的内聚力热-力耦合模型开展了高温花岗岩拉伸力学特性的数值模拟研究。通过深入分析试件内微裂纹随加载的起裂、扩展演化全过程揭示了不同冷却方式下高温花岗岩试件的细观破坏机理, 并进一步探讨了晶粒边长和晶粒边界强度对高温花岗岩拉伸力学行为的影响。结果表明: 采用内聚力热-力耦合模型不仅解决了矿物晶粒间的温度传递问题, 同时能够有效模拟温度和冷却方式的变化对花岗岩力学特性的影响; 随晶粒边长的增加, 花岗岩抗拉强度不断增大, 晶粒边界裂纹占比不断减少而穿晶裂纹占比不断增大, 晶粒边界的控制作用在不断减弱; 随晶粒边界强度的增加, 花岗岩抗拉强度不断增大, 晶粒边界裂纹数不断减少, 总裂纹和穿晶裂纹数表现为不断减少和先增多后减少两种变化趋势。

关键词: 岩石力学; 高温花岗岩; 冷却方式; 内聚力热-力耦合模型; 破坏机制

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号:

作者简介: 孟尧尧(1994—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: mengyaoyao0317@163.com。

Mechanical behavior and mesoscopic failure mechanism of high-temperature granite under different cooling methods in Brazilian tensile tests

MENG Yaoyao^{1,2}, JING Hongwen², LI Hui³, LIU Xiaowei⁴, YIN Qian^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, YU Meilu¹, SUN Zhimin⁵

(1. State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. School of Data Science and Engineering, Xi'an Innovation College of Yan'an University, Xi'an 710100, China; 5. China Construction Second Engineering Bureau Co. Ltd, Beijing 100071, China)

Abstract: In order to investigate the Brazilian tensile mechanical behavior of high temperature granite and its mesoscopic failure mechanism under different cooling methods, the numerical simulation of tensile mechanical properties of high temperature granite was carried out by using the cohesive thermo-mechanical coupling model in ABAQUS software. The mesoscopic failure mechanism of high temperature granite specimens under different cooling methods was revealed through in-depth analysis of the initiation, expansion and evolution of microcracks during the loading process. The effects of grain boundary length and grain boundary strength on tensile mechanical behavior of high temperature granite were further discussed. The results showed that the cohesive thermo-mechanical coupling model could not only solve the problem of temperature transfer between mineral grains, but also effectively simulate the effect of temperature and cooling method on the mechanical properties of granite. With the increase of grain edge length, the tensile strength of granite increased, the proportion of grain boundary cracks decreased and the proportion of transgranular cracks increased, and the control effect of grain boundary decreased. With the increase of grain boundary strength, the tensile strength of granite increased, the number of grain boundary cracks decreased, the number of total cracks and transgranular cracks showed two trends of decreasing continuously and increasing first and then decreasing.

Key words: rock mechanics; high temperature granite; cooling method; cohesive thermo-mechanical coupling model; failure mechanism

基金项目: 安徽理工大学基本科研业务费专项资金资助 (2024JBQN0008)

收稿日期: 2024-10-17

*通信作者 (E-mail: jing_hwcumt@163.com)

0 引言

近年来,随着地热开采、矿产开发、火灾后矿山重建及核废料的存储等工程持续发展,工程实践中高温对岩体的力学性质的影响不容忽视,高温条件下岩体会产生一定程度的损伤和劣化。因此,研究高温条件下岩体的力学行为和破坏机理对于工程项目建设具有重要意义^[1-5]。

针对高温岩石的力学行为,国内外专家学者开展了大量的试验研究工作。吴阳春、周磊、贾蓬等对高温后花岗岩的力学特性及破坏特征进行研究^[6-9]。郭奇峰等^[10]探讨了高温花岗岩热冲击后的损伤变化规律。闵明等^[11]对热损伤后粗粒花岗岩的力学特性进行研究,表明温度和围压均会使试样的变形能力增强。李春和余莉等研究了循环次数对高温花岗岩力学特性的影响,表明随次数增加试件破坏程度加剧、强度不断减小^[12-13]。针对不同冷却方式下高温岩石的力学行为,郇保平、金爱兵等开展了高温后自然冷却和遇水冷却条件下花岗岩的物理、力学试验研究,结果表明不同温度条件下遇水冷却方式对花岗岩的损伤劣化程度更为显著^[14-16]。

为了探究高温岩石在外荷载作用下的细观破坏机理,需要借助考虑岩石细观结构的数值模型开展进一步研究。国内外专家学者经常采用颗粒流程序(PFC)等商业软件构建岩石的细观数值模型,基于此模型再现岩石在高温及加载阶段微裂纹的萌生、扩展、贯通全过程,揭示高温岩石的破坏机理^[17-20]。

在干热岩开采等过程中,花岗岩会经历高温过程,其中水的循环使得周围岩石的温度发生冷热交替的变化。同时花岗岩材料作为典型的品质结构,由不同几何尺寸和类型的矿物颗粒相互黏聚构成。在复杂的地质构造作用下,矿物尺寸及颗粒粘结强度存在很大差异。高温作用下花岗岩力学特性及破坏机制与其矿物尺寸、矿物颗粒粘结强度密切相关。不同的高温环境及花岗岩颗粒尺寸及颗粒边界强度等都会对花岗岩的力学特性产生显著影响。为此,本文对不同冷却方式下高温花岗岩在巴西劈裂条件的力学行为及破坏机理进行数值模拟研究,分析不同温度花岗岩抗拉强度、微裂纹扩展、破坏模式等随晶粒(Vornoni)尺寸和晶粒边界强度的变化规律。

1 数值分析模型构建

1.1 花岗岩巴西劈裂数值模型构建

通过 Python 语言编写代码,在 ABAQUS 有限元分析软件前处理中生成近似边长为 2 mm 的晶粒构成直径为 50 mm 的巴西圆盘,室内试验中采用的花岗岩取自江苏省徐州市,其矿物晶粒占比和常温下的基本参数分别如图 1 和表 1 所示。数值模型构建过程如图

2 所示,首先通过自主编写的随机分布程序对花岗岩中的晶粒进行投放,随后将各 Voronoi 多边形划分为 0.5 mm 的基质颗粒,最后通过自主开发的插件全局插入 0 厚度的内聚力(cohesive)单元,并以集合形式区分 Voronoi 多边形晶体颗粒边界和晶内基质颗粒间两种内聚力单元。

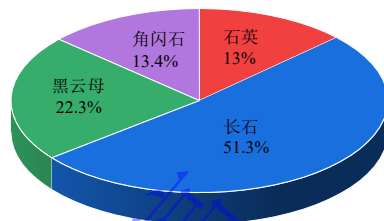


图 1 花岗岩矿物占比

Fig. 1 Mineral composition percentage of granite

表 1 花岗岩常温下的基本参数

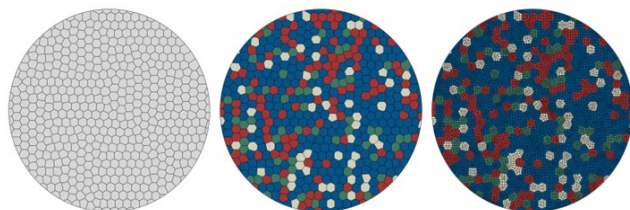
Table 1 Basic parameters of granite at room temperature

密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	波速 / $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
2751	2.65	83.35	7.38

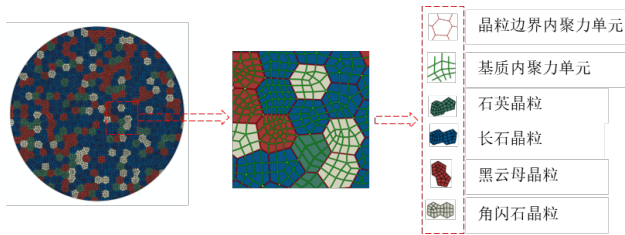
1.2 高温过程模拟

ABAQUS GUI 界面设置可实现实体单元的热传导升温 and 降温过程,还可在材料设置部分添加热膨胀系数将温度与热应力联系起来,即为热-力耦合的实现。不同矿物颗粒具有不同的热膨胀系数,使得温度升高和降低时产生的热应力也不尽相同。但 GUI 界面设置无法实现内聚力单元热传递,为实现此功能,首先需将“inp”文件中的“COH2D4”单元属性修改为具有温度自由度的“COH2D4T”单元,然后在“inp”文件截面属性里添加和修改部分代码。为了使模型均匀受热,升温达到设定温度后继续保持 2 小时,再进入降温(自然冷却和遇水冷却)分析步。为了模拟石英发生 α - β 相变,当模拟温度超过 573°C 时,赋值石英颗粒热膨胀系数扩大 1.0045 倍。在 ABAQUS 中,此分析步采用温度-位移分析步,瞬态响应。

通过设置不同热交换系数来模拟遇水冷却和自然冷却过程。通过反复调试参数,最终确定自然冷却和遇水冷却热交换系数分别为 0.6 和 0.9,高温过程模拟见图 3。



(a) 随机分布矿物颗粒及网格划分



(b) 全局插入 0 厚度内聚力单元过程

图 2 花岗岩巴西劈裂数值分析模型构建过程

Fig. 2 The process of constructing a numerical analysis model for the Brazilian splitting test of granite

1.3 巴西劈裂试验过程模拟

将高温后的模型作为预定义模型导入软件中进行巴西劈裂试验模拟(见图 4)。试样两端采用刚性本构,矿物颗粒采用弹性本构,上压板单向位移加载,底板固定,内聚力单元损伤演化满足最大主应力准则(Maxs Damage),截面属性满足牵引-分离响应。

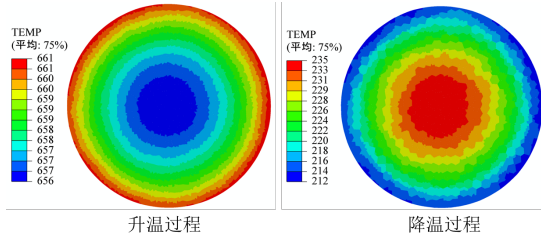


图 3 高温过程模拟

Fig. 3 High-temperature process simulation

2 花岗岩拉伸力学特性的变化

2.1 参数标定及力学特性的变化

(1) 参数标定

花岗岩不同矿物晶粒的物理参数如表 2 所示。在 ABAQUS 中,cohesive 单元相关参数须通过与试验荷载-位移曲线及试件破坏模式匹配进行细观参数的标定。将 cohesive 单元分为晶粒边界和晶粒内两种。通过反复调整,得到晶粒边界及晶粒内相关细观参数见表 3。为准确捕捉试样破坏的临界状态,试样最终破坏状态均选取峰后 0.5 倍抗拉强度对应时刻。

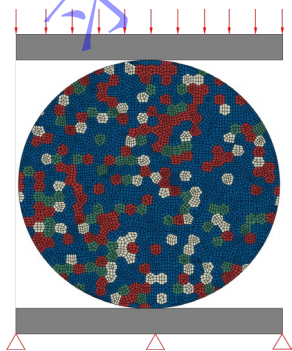


图 4 巴西劈裂圆盘数值分析模型

Fig. 4 Brazilian splitting disc numerical analysis model

表 2 花岗岩矿物晶粒的细观参数

Table 2 Micro parameters of granite minerals

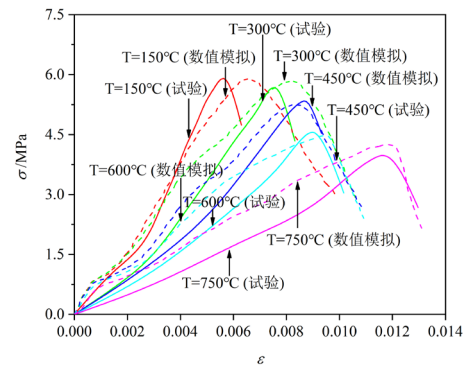
参数类型	矿物颗粒			
	长石	黑云母	角闪石	石英
密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2600	2850	2600	2650
杨氏模量 /GPa	32	15	25	32
泊松比	0.22	0.23	0.21	0.24
热导率 / $\text{mW}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	3.0	3.1	2.9	3.2
比热容 / $\text{mJ}\cdot\text{tonne}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$8.12\cdot 10^8$	$7.82\cdot 10^8$	$8.32\cdot 10^8$	$9.0\cdot 10^8$
热膨胀系数 / K^{-1}	$14.1\cdot 10^{-6}$	$3\cdot 10^{-6}$	$8.7\cdot 10^{-6}$	$24.3\cdot 10^{-6}$

为验证表 2 和表 3 中参数的选取是否合理,将数值模拟与试验结果进行逐一对比。巴西劈裂试验采用准静态加载,加载速率为 0.02 m/s,数值模拟与试验条件相同。由图 5 和图 6 可知:数值模拟的应力-应变曲线与试验曲线变化趋势相似,破坏模式和抗拉强度均与试验结果接近,验证了数值计算模型的有效性。

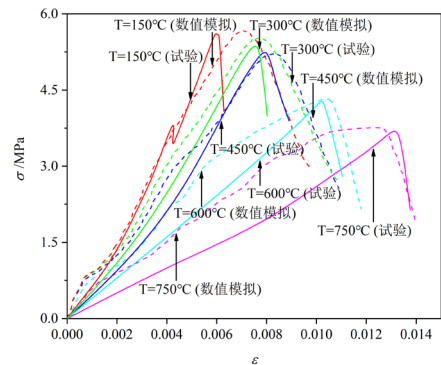
表 3 内聚力单元的细观参数

Table 3 Micro parameters of cohesive elements

内聚力单元参数类型	内聚力单元位置	
	晶粒边界	晶粒内部
法向刚度 / $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$	600	1000
切向刚度 / $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$	800	1200
法向强度 /MPa	4	6
切向强度 /MPa	16	24
失效位移 /mm	0.1	0.15



(a) 自然冷却



(b) 遇水冷却

图 5 试验与数值模拟应力-应变曲线对比

Fig. 5 Comparison of stress-strain curves between Brazilian splitting tests and numerical simulations for granite

(2) 破坏模式及微裂纹变化规律

图 6 为不同冷却条件和温度下花岗岩试件的破坏模式，由图可知：

随着温度的升高，试件上、下端部的破坏程度不断加剧，数值模拟试件（MMIXDME 图，图中绿色为拉伸裂纹、红色为剪切裂纹）两端裂纹的密集程度和分布范围不断增大，数值模拟试件边缘出现的次生裂纹数目不断增多，试件边缘粗糙，主破裂面的粗糙度不断增大。

在遇水冷却条件下试件主破裂面的粗糙度明显高于自然冷却条件下，遇水冷却条件下巴西圆盘试件边缘的晶粒“脱落”更为严重；遇水冷却条件下数值模拟试件主裂纹表现出较强的不连续性，且主裂纹两侧出现更多细小的次生裂纹，试件边缘裂纹数目较自然冷却条件下更多。由此可见，不同温度下遇水冷却方式对花岗岩试件的损伤程度更大，试件内部产生的微裂纹数目更多。

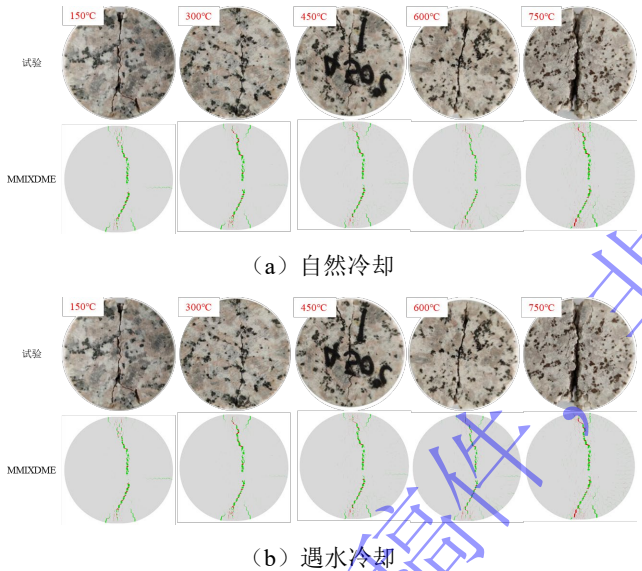
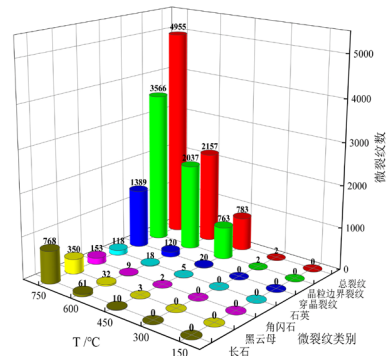


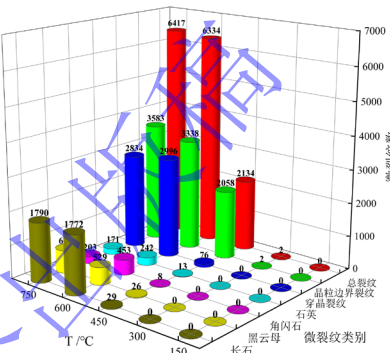
图 6 试验与数值模拟破坏模式对比

Fig. 6 Comparison of failure modes between experimental and numerical simulation results

图 7 为高温后花岗岩试件内部微裂纹的数目及分布，可知：T=150°C和 300°C时，高温阶段几乎没有微裂纹的产生，温度升高到 450°C时微裂纹数明显增多，随着温度的升高，总裂纹、晶粒边界裂纹和穿晶裂纹数均不断增加；由于高温遇水冷却后花岗岩试件内部损伤程度更大，导致 T=450°C、600°C和 750°C时，总裂纹、晶粒边界裂纹和穿晶裂纹数均大于自然冷却条件；自然冷却下均主要产生沿晶粒边界的裂纹，而遇水冷却下温度较低（T<600°C）时主要产生沿晶粒边界的裂纹，T=600°C和 750°C时穿晶裂纹数迅速增大。



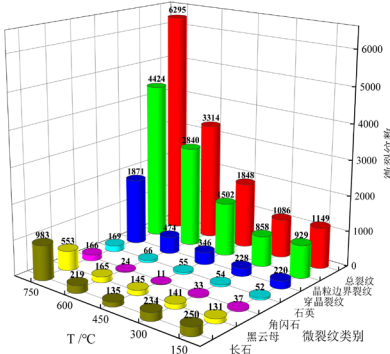
(a) 自然冷却



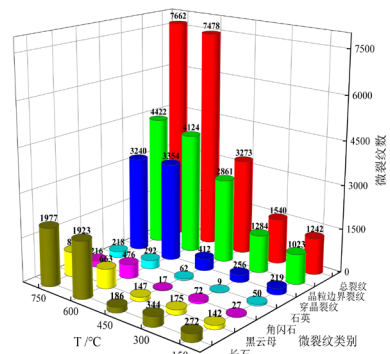
(b) 遇水冷却

图 7 高温阶段试件内部的微裂纹分布

Fig. 7 Microcracks distribution in the specimen during high temperature stage



(a) 自然冷却



(b) 遇水冷却

图 8 巴西劈裂试验后试件内部的微裂纹分布

Fig. 8 Microcracks distribution in the specimen after Brazilian tensile test

图 8 为巴西劈裂试验后试件内部微裂纹的数目及分布特征，试验后微裂纹随温度的变化规律与高温阶段基本保持一致，即随着温度的升高，总裂纹、晶粒边界裂纹和穿晶裂纹数整体不断增加；自然冷却下不同温度花岗岩试件均主要沿晶粒边界发生破坏，而遇水冷却下温度较低（ $T < 600^{\circ}\text{C}$ ）时花岗岩试件主要沿晶粒边界发生破坏， $T = 600^{\circ}\text{C}$ 和 750°C 时穿晶裂纹数迅速增大，试件破坏由晶粒边界裂纹和穿晶裂纹共同作用，穿晶裂纹中主要以沿长石矿物的微裂纹为主。

3 晶粒边长和边界强度的影响

3.1 晶粒边长的影响

(1) 抗拉强度

由于篇幅的限制，仅选取 $T = 450^{\circ}\text{C}$ 和 600°C 时的结果分析晶粒边长的影响。选取矿物种粒尺寸（ V ）分别为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm，高温花岗岩抗拉强度随晶粒边长的变化规律如图 9 所示。可知：不同温度和冷却方式下抗拉强度随晶粒边长的增加均近似线性增大，这表明晶粒尺寸的增加对花岗岩抗拉强度存在不同程度的提升作用。产生这一现象的主要原因将在微裂纹变化规律一节进行详细解释。

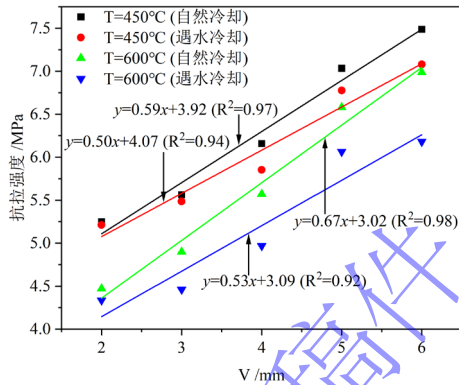


图 9 抗拉强度随晶粒边长的变化规律

Fig. 9 Variation of tensile strength with the grain side length

(2) 破坏模式

图 10 和图 11 分别为不同冷却方式下试件破坏模式随晶粒边长的变化，可知：不同晶粒边长花岗岩试件均发生沿加载方向的劈裂破坏，且破坏主裂纹以拉伸裂纹为主；随着晶粒边长的增加，不同温度和冷却方式花岗岩试件主破裂面粗糙程度不断增大，主要是由于部分主裂纹沿晶粒边界起裂和扩展。

(3) 微裂纹

图 12 和图 13 分别为不同冷却方式下试件最终破坏时微裂纹随晶粒边长的变化，随晶粒边长的增加，总裂纹和穿晶裂纹数整体不断增加、晶粒边界裂纹表现为不断减小和先增加后减小两种趋势，晶粒边界裂纹占比不断减小，这表明晶粒边界的控制作用不断减

小。晶粒边界的力学参数弱于晶粒内部，是试件的“薄弱区”。因此，随晶粒边长的增加，试件的整体力学性能得到提升，抗拉强度不断增大。高温花岗岩巴西劈裂试验是十分复杂的过程，在高温阶段试件内部微观结构的异质性、加载过程中高温阶段产生的微裂纹扩展和二次裂纹等因素的共同作用下，使得裂纹数随晶粒边长的增加表现出不同的变化趋势。

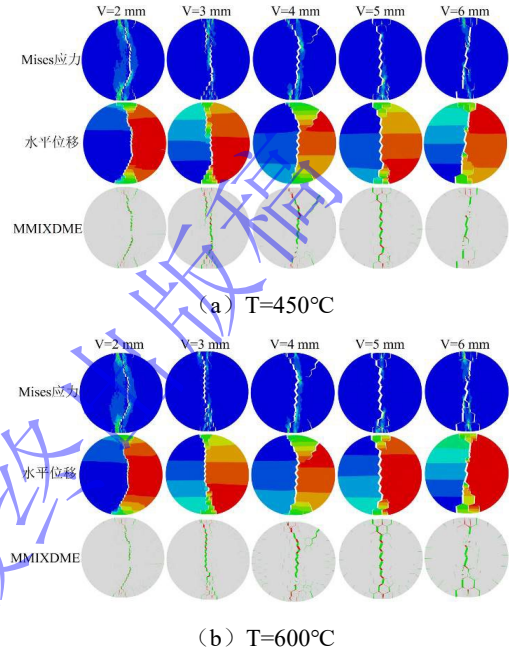


图 10 自然冷却后试件破坏模式随晶粒边长变化

Fig. 10 Failure mode changes of specimens after natural cooling with the grain side length

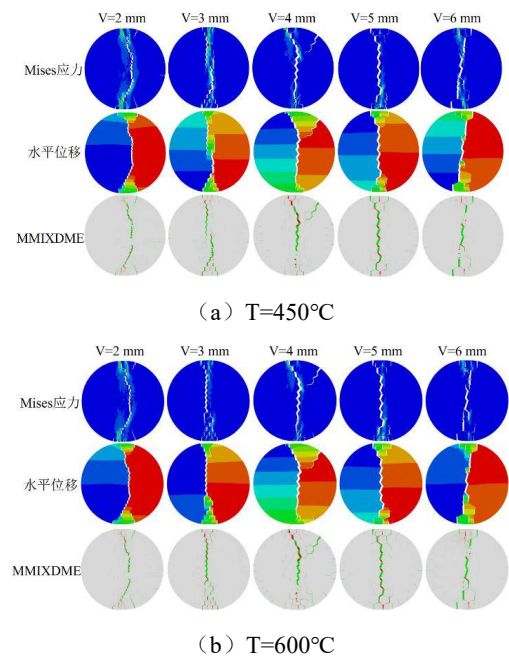
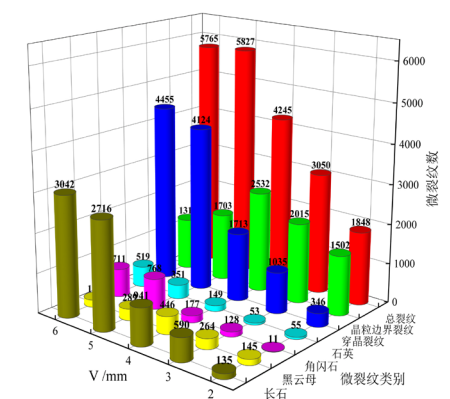
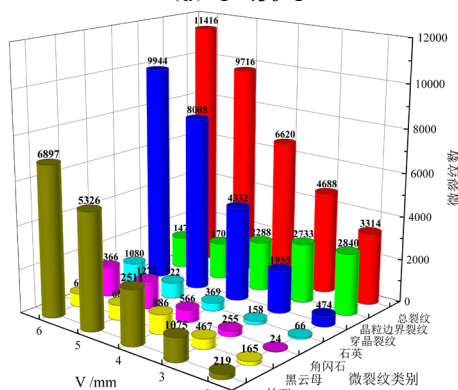


图 11 遇水冷却后破坏模式随晶粒边长变化

Fig. 11 Failure mode changes of specimens after water cooling with the grain side length



(a) T=450°C



(b) T=600°C

图 12 自然冷却后巴西劈裂试验阶段试件微裂纹数随晶粒边长的变化规律

Fig. 12 Variation of the number of microcracks during the Brazilian tensile test stage after natural cooling with grain side length

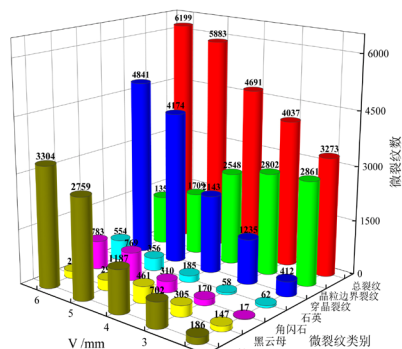
3.2 晶粒边界强度

(1) 抗拉强度

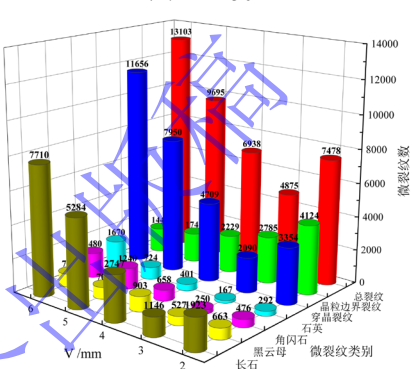
本节引入强度系数 F (F 为模拟试件晶粒边界强度与标定试件边界强度的比值, 取 $F=0.8、0.9、1.0、1.1、1.2$) 定量分析晶粒边界强度对高温花岗岩拉伸力学行为的影响。图 14 为高温花岗岩抗拉强度随强度系数的变化, 随 F 的增加, 试件抗拉强度均表现不断增大, 抗拉强度在 $F=1.2$ 时取得最大值, 在 $F=0.8$ 时取得最小值, 抗拉强度和强度系数之间的关系均可用二次函数描述。

(2) 破坏模式

图 15 和图 16 为花岗岩试件的破坏模式随强度系数的变化, 不同强度系数花岗岩试件均发生沿加载方向的劈裂破坏; 不同强度系数下试件破坏行为的差异主要体现在二次裂纹方面, F 值较小时试件破坏时宏观破坏形态更复杂, 二次裂纹数目明显增多, 主要由于 F 值较小时, 晶粒边界强度较低, 在高温和外荷载作用下微裂纹极易沿晶粒边界萌生和扩展。



(a) T=450°C



(b) T=600°C

图 13 遇水冷却后巴西劈裂试验阶段微裂纹数随晶粒边长的变化规律

Fig. 13 Variation of the number of microcracks during the Brazilian tensile test stage after water cooling with grain side length

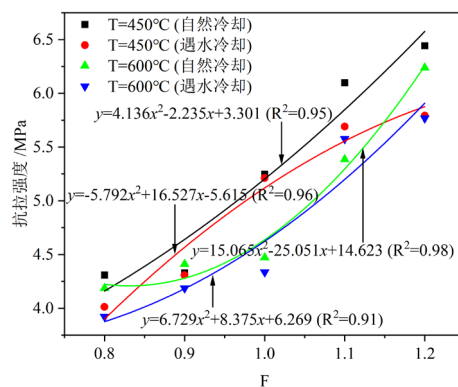
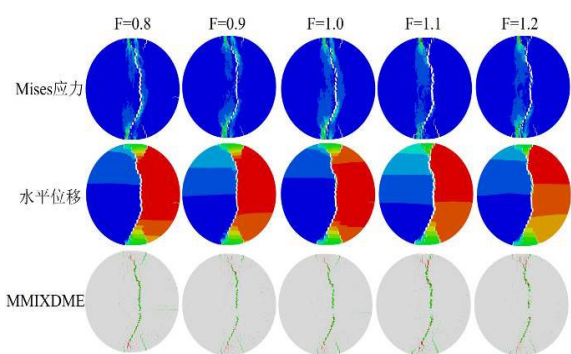


图 14 抗拉强度随强度变化系数的变化规律

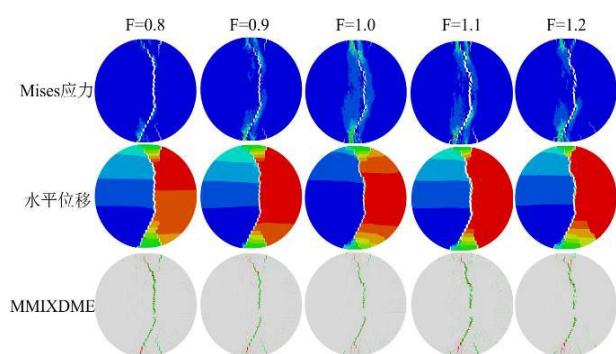
Fig. 14 Variation of tensile strength with the strength coefficient

(3) 微裂纹数

图 17 和图 18 为试件微裂纹随强度系数的变化, 表现为两种典型的变化规律。T=450°C 时、T=600°C 自然冷却下花岗岩试件总裂纹、晶粒边界裂纹和穿晶裂纹数随强度系数的增加分别不断减少、不断减少和不断增多。此时试件的拉伸力学行为主要受晶粒边界控制, 晶粒边界强度增大, 对微裂纹沿晶粒边界的萌生和扩展起到抑制作用, 试件的拉伸力学行为得到显著提升, 抗拉强度增大。



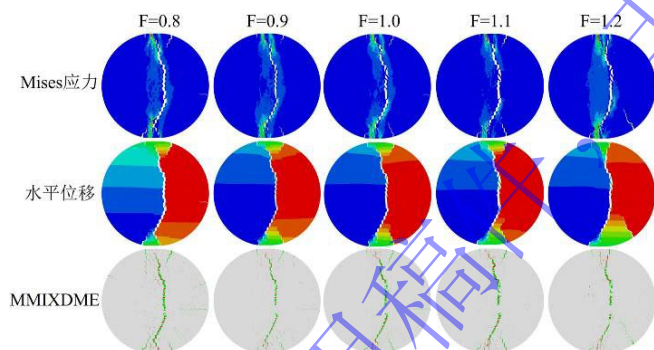
(a) $T=450^{\circ}\text{C}$



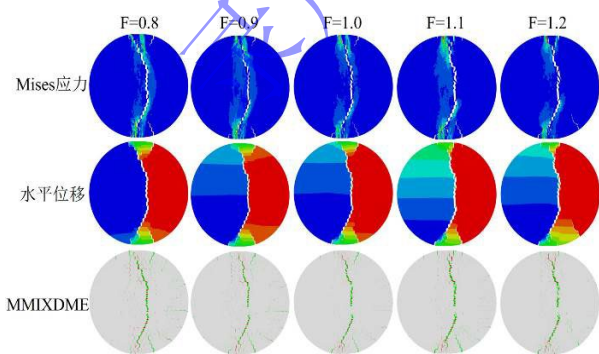
(b) $T=600^{\circ}\text{C}$

图 15 自然冷却后试件破坏模式随强度系数的变化

Fig. 15 Failure mode changes of specimens after natural cooling with the strength coefficient



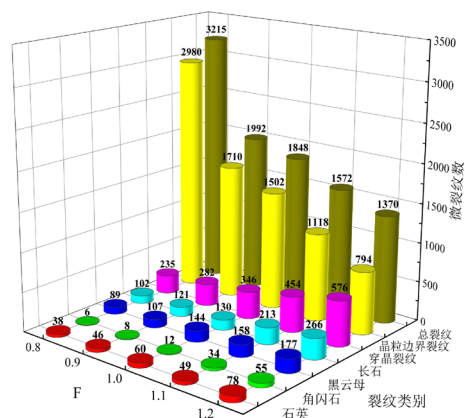
(a) $T=450^{\circ}\text{C}$



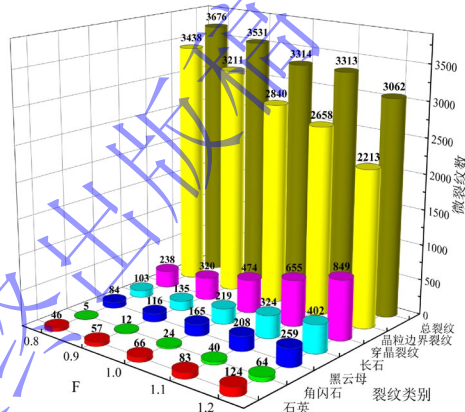
(b) $T=600^{\circ}\text{C}$

图 16 遇水冷却后试件破坏模式随强度系数的变化

Fig. 16 Failure mode changes of specimens after water cooling with the strength coefficient



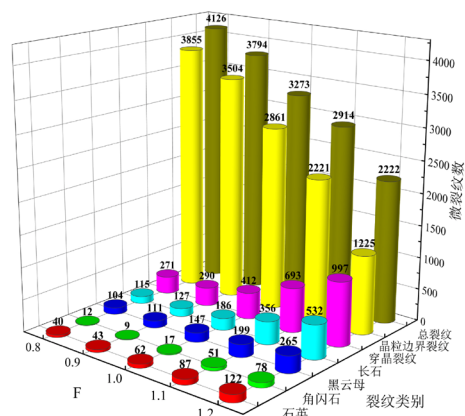
(a) $T=450^{\circ}\text{C}$



(b) $T=600^{\circ}\text{C}$

图 17 自然冷却后巴西劈裂试验阶段试件微裂纹数随强度系数的变化规律

Fig. 17 Variation of the number of microcracks in specimens during the Brazilian tensile test stage after natural cooling with strength coefficient



(a) $T=450^{\circ}\text{C}$

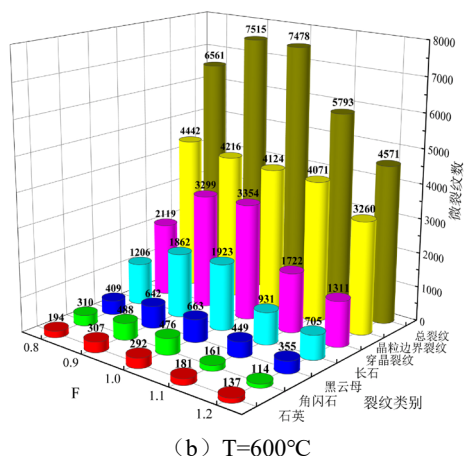


图 18 遇水冷却后巴西劈裂试验阶段试件微裂纹数随强度系数的变化规律

Fig. 18 Variation of the number of microcracks in specimens during the Brazilian tensile test stage after water cooling with strength coefficient

T=600°C遇水冷却条件下花岗岩试件微裂纹随强度系数的变化规律明显不同。随F值的增加,总裂纹数先增多后减少、晶粒边界裂纹数不断减少、穿晶裂纹数先增多后减少,F=0.9时总裂纹和穿晶裂纹数取得最大值,F=1.2时总裂纹和穿晶裂纹数取得最小值。同样地,随F值的增加,晶粒边界强度增大,晶粒边界裂纹数不断减小,但数量变化相对较少,总裂纹的变化主要受穿晶裂纹数控制。由2.2节可知,T=600°C遇水冷却条件下试件在高温阶段沿晶粒边界和矿物晶粒内均产生大量微裂纹,试件破坏由晶粒边界裂纹和穿晶裂纹共同作用,导致此条件下试件微裂纹随强度系数的变化规律存在显著差异。

4 结 论

(1) 内聚力热-力耦合模型可较好地反映实际花岗岩试件的晶粒组成及晶粒间的粘结与咬合,可较好地模拟高温阶段和巴西劈裂试验阶段花岗岩损伤破坏过程,克服了普通内聚力模型不能区分晶粒边界和晶粒内内聚力单元的不足。

(2) 遇水冷却方式对于花岗岩试件内部损伤程度更大,遇水冷却后花岗岩的抗拉强度均小于自然冷却的抗拉强度,试件主破裂面粗糙度较高,数值模拟试件主裂纹表现出较强的不连续性,主裂纹两侧及试件边缘处产生更多的次生裂纹。

(3) 随晶粒边长的增加,不同温度和冷却方式下花岗岩抗拉强度不断增大,试件主破裂面粗糙程度不断增大,晶粒边界裂纹占比整体不断减小而穿晶裂纹占比整体不断增大,表明晶粒边界的控制作用在不断减弱。

(4) 随晶粒边界强度的增加,不同温度和冷却方

式下花岗岩抗拉强度不断增大,二次裂纹数明显减少,晶粒边界裂纹数不断减少,总裂纹和穿晶裂纹数均表现为不断减少和先增多后减少两种变化趋势。

参考文献:

- [1] ABU BAKAR M Z, ALI H, MAJEED Y. Effects of heat treatment and confining pressure on rock abrasivity and its ramifications for bit wear and drillability in deep geothermal reservoirs[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(11): 8191-8208.
- [2] GUO P Y, BU M H, ZHANG P, et al. Mechanical properties and crack propagation behavior of granite after high temperature treatment based on a thermo-mechanical grain-based model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(9): 6411-6435.
- [3] WU R Y, CHEN S W, YANG F B, et al. Experimental study on the thermal healing effect on stress-damaged granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(9): 6615-6629.
- [4] LIU H, ZHANG K, Shao S S, et al. Numerical investigation on the cooling-related mechanical properties of heated Australian Strathbogie Granite using discrete element method[J]. Engineering geology, 2020, 264: 1-19.
- [5] HU X J, HU H B, XIE N, et al. The effect of grain size heterogeneity on mechanical and microcracking behavior of pre-heated Lac du Bonnet granite using a grain-based model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(8): 5923-5954.
- [6] 吴阳春, 邵保平, 王磊, 等. 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), 2020, 51(1): 193-203. (WANG Yangchun, XI Baoping, WANG Lei, et al. Experimental study on physico-mechanical properties of granite after high temperature[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(1): 193-203.)
- [7] 周磊, 董玉清, 朱哲明, 等. 高温对花岗岩微观及宏观力学断裂特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 1381-1391. (ZHOU Lei, DONG Yuqing, ZHU Zheming, et al. Influence of high temperature on micro and macro mechanical fracture characteristics of granite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(4): 1381-1391.)
- [8] 贾蓬, 杨其要, 刘冬桥, 等. 高温花岗岩水冷却后物理力学特性及微观破裂特征[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1568-1578. (JIA Peng, YANG Qiyao, LIU Dongqiao, et al. Physical and mechanical properties and related microscopic characteristics of high-temperature granite after water-cooling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6):

1568-1578.)

- [9] 贾蓬, 钱一锦, 王茵, 等. 基于声发射信息的热损伤花岗岩单轴压缩破裂机制及破裂前兆[J]. 工程科学学报, 2023, 45(12): 2129-2139. (JIA Peng, QIAN Yijin, WANG Yin, et al. Fracture mechanism and precursors of thermally damaged granite uniaxial compression based on acoustic emission information[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(12): 2129-2139.)
- [10] 郭奇峰, 钱志海, 潘继良, 等. 高温花岗岩热冲击后力学特性及损伤演化规律研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1746-1754. (GUO Qifeng, QIAN Zhihai, PAN Jiliang, et al. Mechanical properties and damage evolution of granite under high temperature thermal shock[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1746-1754.)
- [11] 闵明, 张强, 郭强, 等. 热损伤粗粒花岗岩强度与变形破裂特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2186-2198. (MIN Ming, ZHANG Qiang, GUO Qiang, et al. Experimental study on strength and deformation fracture characteristics of coarse granite with thermal damage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(6): 2186-2198.)
- [12] 李春, 胡耀青, 张纯旺, 等. 不同温度循环冷却作用后花岗岩巴西劈裂特征及其物理力学特性演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1797-1807. (LI Chun, HU Yaoqing, ZHANG Chunwang, et al. Brazilian split characteristics and mechanical properties evolution of granite after cyclic cooling at different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1797-1807.)
- [13] 余莉, 彭海旺, 李国伟, 等. 花岗岩高温-水冷却循环作用下的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1025-1035. (YU Li, PENG Haiwang, LI Guowei, et al. Experimental study on granite under high temperature-water cooling cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1025-1035.)
- [14] 邵保平, 吴阳春, 赵阳升, 等. 不同冷却模式下花岗岩强度对比与热破坏能力表征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 286-300. (XI Baoping, WU Yangchun, ZHAO Yangsheng, et al. Experimental investigations of compressive strength and thermal damage capacity characterization of granite under different cooling modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 286-300.)
- [15] 金爱兵, 王树亮, 魏余栋, 等. 不同冷却条件对高温砂岩物理力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3531-3539, 3603. (JIN Aibing, WANG Shuliang, WEI Yudong, et al. Effect of different cooling conditions on physical and mechanical properties of high-temperature sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3531-3539, 3603.)
- [16] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华, 等. 花岗岩高温高压损伤破裂微观机制模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1810-1819. (TIAN Wenling, YANG Shengqi, HUANG Yanhua, et al. Mesofracture mechanism of granite specimens under high temperature and confining pressure by numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1810-1819.)
- [17] 孙浩, 苏楠, 金爱兵, 等. 温度对不同尺寸砂岩巴西劈裂特性影响[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 26-38. (SUN Hao, SU Nan, JIN Aibing, et al. Effects of temperature on Brazilian splitting characteristics of sandstone with different sizes[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 26-38.)
- [18] 乔兰, 刘建, 李庆文, 等. 巴西圆盘劈裂二维及三维数值模拟研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 131-142. (QIAO Lan, LIU Jian, LI Qingwen, et al. Numerical study of the Brazilian tensile test: 2D and 3D simulations[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 131-142.)
- [19] 沙鹏, 杨丹莲, 郭一鑫, 等. 花岗岩巴西劈裂渐进破坏特征与能量演化研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1258-1266. (SHA Peng, YANG Danlian, GUO Yixin, et al. Progressive failure characteristics and energy evolution of granite in Brazilian disc tests[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1258-1266.)
- [20] 徐浩淳, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 热处理砂岩不同接触角巴西劈裂数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 588-597. (XU Haochun, JIN Aibing, ZHAO Yiqian, et al. Numerical study on Brazilian splitting of heat-treated sandstone under different contact angles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 588-597.)