



移动扫码阅读

王嘉敏,王守光,李向上,等.热冲击花岗岩力学响应及损伤特征显微 CT 试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(8):58-72.

WANG Jiamin, WANG Shouguang, LI Xiangshang, et al. Study on mechanical properties and damage characteristics of granite under thermal shock based on CT scanning[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 58-72.

热冲击花岗岩力学响应及损伤特征显微 CT 试验研究

王嘉敏¹,王守光¹,李向上¹,卜墨华²,栾兆龙²,张鹏²

(1. 煤炭科学研究总院有限公司 深部开采与冲击地压防治研究院,北京 100013;

2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083)

摘要:在深部地热资源开发过程中,通常利用低温流体的冲击作用诱导高温岩石热破裂来提高储层的渗透特性。为了揭示热冲击作用下岩石的损伤破裂机理,对高温加热后的花岗岩(20℃、150℃、300℃、450℃、600℃和750℃)进行了自然冷却和水冷却处理,并对处理后的花岗岩开展了波速测试、单轴压缩试验和CT扫描试验,探讨了热冲击作用对花岗岩纵波波速、抗压强度、弹性模量等力学参数以及细观结构损伤的影响。研究表明:①随着热处理温度升高,花岗岩的纵波波速、抗压强度与弹性模量逐渐减小,峰值应变逐渐增加,且相比于自然冷却,水冷却作用后岩石的波速与力学性质劣化更显著。②通过CT扫描试验,获得了不同加热温度与热处理方式作用下花岗岩的孔隙结构空间分布特征,可以直观反映岩石细观结构的热损伤程度。当热处理温度小于等于450℃时,花岗岩扫描切片中的热致裂纹数量较少,裂隙连通性较差;超过450℃后,花岗岩内部微裂纹快速发育和扩展,并逐渐有形成裂隙网络的趋势,且水冷却对花岗岩的细观损伤致裂效果更明显。③基于三角网格离散技术,结合椭球模型重构算法和裂隙张量计算理论,对热冲击后花岗岩的三维裂隙场进行定量表征,并建立了裂隙组构张量与峰值强度的关系,进一步揭示了热冲击花岗岩细观结构对其力学性质的影响机理。

关键词:花岗岩;热冲击;力学性质;CT扫描;细观结构;裂隙张量

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2023)08-0058-15

Study on mechanical properties and damage characteristics of granite under thermal shock based on CT scanning

WANG Jiamin¹, WANG Shouguang¹, LI Xiangshang¹, BU Mohua², LUAN Zhaolong², ZHANG Peng²

(1. Deep Mining and Rock Burst Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory for Geo-Mechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: During the exploitation of deep geothermal resources, the thermal fractures of high-temperature rocks are usually induced by the impact of low-temperature fluids to improve the permeability of reservoir rocks. In order to reveal the damage and fracture mechanism of rock after thermal shock, the granites heated at high temperature (20 °C, 150 °C, 300 °C, 450 °C, 600 °C and 750 °C) were treated by natural cooling and water cooling respectively, and the wave velocity test, uniaxial compression test and CT scanning were carried out on the treated granites. The mechanical effect of thermal shock on P-wave velocity, compressive strength and elastic modulus of granite were also discussed. The experimental results show that with the increase of heat treatment temperature, the P-wave velocity, compressive strength, and elastic modulus of rock gradually decrease, and the peak strain gradually increases. Compared with natural cooling, the wave velocity and mechanical properties of rock deteriorate more significantly after water cooling. Based on CT scanning, the spatial distribution charac-

收稿日期:2023-02-16 责任编辑:朱恩光 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2023-0180

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204094);中国博士后科学基金资助项目(2021M701541);中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项面上资助项目(2022-MS001)

作者简介:王嘉敏(1994—),女,山西运城人,助理研究员,博士。E-mail:jasmin1029@163.com

通讯作者:李向上(1991—),男,河北石家庄人,助理研究员,博士。E-mail:xiangshang_li@126.com

teristics of pore and fracture structure of granite under different heating temperatures and heat treatment methods were obtained, which can directly reflect the thermal damage degree of rock microstructure. When the heat treatment temperature is not higher than 450 °C, the number and size of thermally induced cracks in granite scanning slices are less and the connectivity of cracks is relatively poor. When the temperature exceeds 450 °C, the micro-cracks in granite develop and expand rapidly, and tend to form fracture network gradually, and the damage and cracking effect of water cooling on the microstructure of granite is more obvious than that of natural cooling. In addition, based on triangular mesh discretization technique, ellipsoid model reconstruction algorithm and fracture tensor calculation theory, the three-dimensional fracture field of granite after thermal shock is quantitatively characterized, and the relationship between fracture fabric tensor and peak strength was established, which further reveals the influence mechanism of granite microstructure on its mechanical properties under thermal shock.

Key words: granite; thermal shock; mechanical property; CT scanning; microstructure; fracture tensor

0 引 言

干热岩型地热资源是未来地热能发展的重要领域,具有分布广泛、低碳清洁、热储温度高等优点^[1-2]。干热岩热储层以花岗岩为主,温度介于 150 ~ 650 °C,天然裂隙发育但联通性差,使用常规手段难以获取具有经济利用价值的热能,必须进行储层致裂增渗改造。在储层压裂过程中,钻井附近高温花岗岩与低温水接触瞬间,产生温度梯度剧变,热冲击导致岩石内部矿物颗粒体积收缩、胶结程度弱化、裂隙萌生发育,从而提高了储层的渗透性^[3-6]。因此,研究快速冷却作用下高温岩石物理力学性质及微观结构演化规律,对提高干热岩开采效率具有重要的理论指导意义。

温度是影响深部岩石力学性质的关键因素之一^[7-9]。近年来,国内外学者针对花岗岩在热冲击作用下的损伤破裂机理开展了大量的试验研究,在物理力学性质方面,主要集中于花岗岩热处理前后的质量、密度、弹性波速、热导率等物性参数以及强度、弹性模量、破坏模式、断裂特征等力学行为的变化规律^[10-14]。例如, QIN 等^[15]对 20 ~ 1 000 °C 高温作用后的花岗岩开展了单轴与三轴试验,发现随热处理温度升高,花岗岩逐渐表现出软化特性,应力应变曲线压密阶段与屈服阶段变长;徐小丽等^[16]研究了 1 200 °C 以内的高温花岗岩在自然冷却作用后的力学性质,认为热处理温度超过 400 °C 后,岩石强度会急剧衰减,黏聚力逐渐下降;黄中伟等^[17]对 25 ~ 600 °C 的高温花岗岩进行自然冷却和液氮冷却,发现液氮冷却对花岗岩的致裂效果更显著,且岩石损伤程度与温度梯度变化成正比;邵保平等^[18]得到了热损伤花岗岩的抗压与抗拉强度、弹性模量等力学参数演变规律,揭示了温度对花岗岩脆性-延性转变的影响;靳佩桦等^[19]研究了冷却速率对花岗岩物理力学性质的影响,发现岩石密度、波速、抗压强度、弹性模量随温度梯度增大而单调下降,岩石热破裂程度

增加。

在岩石细观结构损伤方面,学者们利用先进的科学试验技术,例如光学显微镜、扫描电镜、压汞试验、X 射线衍射试验、核磁共振、CT 扫描等,研究了高温热处理后岩石细观结构特征,直观反映岩石孔隙率、裂隙密度、晶体形貌等的变化情况^[20-24]。例如,贾蓬等^[25]借助偏光显微镜观察了高温花岗岩水冷却后的微细观破裂特征,发现温度梯度越大,穿晶裂纹越多,破坏后的样品碎块化程度加剧; ISAKA 等^[26]利用 X 射线 CT 扫描系统分析了冷却速率对高温花岗岩孔隙率和孔隙连通性的变化情况,并建立了孔隙网络模型。GOMAH 等^[27]通过电镜扫描试验研究了花岗闪长岩热处理后的细观结构,发现当温度升高至 400 °C 后花岗岩开始出现穿晶裂缝,600 °C 时出现了贯通裂纹; WU 等^[28]基于核磁共振试验 (NMR) 得到了高温花岗岩水冷却后的孔隙率和孔径分布特征,认为热处理温度达到 450 °C 时,花岗岩孔隙度由缓慢增加变为快速增加,且大孔数量逐渐增加,微小孔隙数量减少;邓申缘等^[29]对经过 50 ~ 800 °C 加热处理后的花岗岩进行气体渗透性测试和 CT 扫描,结果表明花岗岩孔隙率、渗透率均随着热处理温度的升高逐渐增大,热损伤会导致花岗岩内部产生大量微裂隙。

综上所述,热冲击诱导岩石热破裂本质上是其细观结构特征与宏观力学行为跨尺度损伤演化的互馈过程。鉴于此,以我国干热岩靶区——福建漳州盆地的花岗岩为研究对象,开展了不同温度(20 ~ 750 °C)的花岗岩分别在自然冷却和水冷却作用下的物理力学试验,探讨热冲击对花岗岩弹性波速、单轴抗压强度、峰值应变、弹性模量等参数的影响。同时,开展热冲击后花岗岩的 CT 扫描试验,利用 Avizo 三维可视化软件,建立三维裂隙重构模型,获取不同温度与冷却方式作用下花岗岩孔隙率结构的分布特征及演化规律。此外,基于三角网格离散技术、椭球模型重构算法和裂隙张量计算理论,对花岗岩三

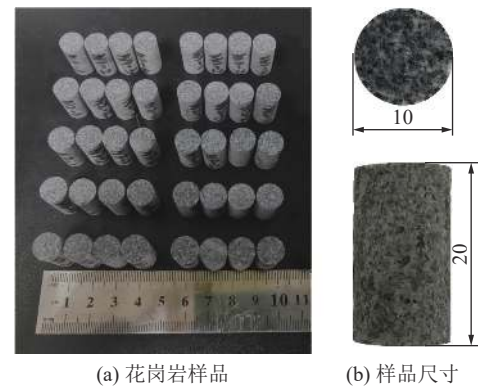
维裂隙场进行定量表征,建立了裂隙组构张量与峰值强度的相关关系,揭示了热损伤花岗岩细观结构对其力学性质的影响机理。研究结果可以为干热岩的开发利用和热储层连通性评价提供重要的理论依据和指导建议。

1 试验样品及方法

1.1 试验样品

福建漳州盆地位于欧亚板块与菲律宾板块的俯冲带,构造运动十分活跃,具有良好的干热岩赋存背景^[30-31]。以漳州盆地埋深 600 m 左右的高强度致密花岗岩为试验对象,开展不同高温与冷却方式作用下花岗岩的物理力学性质研究。为了尽可能提高 CT 扫描精度,将花岗岩加工成直径 10 mm,高 20 mm 的圆柱形,分别用于力学性质测试与 CT 扫描试验,如图 1 所示。利用非金属超声回弹综合检测仪(图 2b)测定花岗岩样品的声速及回弹值,筛选出测

试结果接近的花岗岩作为试验样品,尽可能减少物性误差,经测试,试验花岗岩的纵波波速大约为 $(4\ 100 \pm 150)$ m/s。试验样品分为自然冷却组与水冷却组,进行不同温度热处理。对花岗岩试验样品进行 X 射线衍射测试,其矿物成分主要为斜长石、正长石、石英和云母,还有极少量的阳起石、角闪石等。



(a) 花岗岩样品

(b) 样品尺寸

图 1 花岗岩试验样品

Fig.1 Experimental granite samples



(a) 马弗炉

(c) 恒温干燥箱

(d) 微机控制电子万能试验机

(e) CT 扫描综合分析系统

(f) CT 扫描系统内部结构

图 2 试验设备与试验方法

Fig.2 Experimental equipment and method

1.2 花岗岩的热冲击试验

干热岩温度范围很广,一般在 $150 \sim 650$ °C。花岗岩主要矿物成分石英在 573 °C 附近会发生相变,矿物体积膨胀使得岩石内部微裂隙增多,力学性质会受到一定影响^[15]。综合考虑,本研究将花岗岩的试验温度分别设置为 150 °C、 300 °C、 450 °C、 600 °C、 750 °C,并将室温 (20 °C 左右)的花岗岩力学试验及细观结构测试结果作为对比。采用一体式马弗炉(图 2a)对花岗岩样品进行高温热处理,加热速率设置为 5 °C/min,可以避免因升温过程温度梯度剧烈变

化产生的热致裂纹。达到设定的目标温度后,持续恒温保持 2 h,确保花岗岩样品整体温度场均匀。自然冷却组的花岗岩样品从马弗炉中取出后冷却至室温;水冷却组的花岗岩从马弗炉中取出后,在 15 °C 左右的循环水中冷却至室温后取出,擦干样品表面水分,并放置于 60 °C 的恒温干燥箱(图 2c)中烘干至质量恒定^[32]。

1.3 单轴压缩试验

花岗岩单轴压缩试验的加载设备为济南时代试验机有限公司生产的 WDW-100E 微机控制电

子万能试验机 (图 2d)。系统采用微机闭环控制, 具有准确的加载速度和测力范围, 对载荷、位移的测量和控制有较高的精度和灵敏度。通过全数字化测量控制系统, 同步显示试验过程的荷载、峰值、位移、速度及试验曲线等。该力学试验采用位移加载方式, 加载速率设置为 0.05 mm/min。通过岩石的抗压强度测试, 可以观察不同加热与冷却方式作用下花岗岩的力学行为, 获得峰值强度、杨氏模量、峰值应变等力学参数。

1.4 CT 扫描试验

花岗岩的 CT 扫描试验采用中煤科工集团的 nanoVoxel-4000 超高分辨率原位加载成像 CT 扫描综合分析系统 (天津三英精密仪器有限公司生产), 由 X 射线源、样品台、平板探测器三部分组成, 如图 2e、图 2f 所示, 其基本原理是运用 X 射线对物体穿透力的差异产生投影数据, 并结合现代计算机技术和数字图像相关技术对投影数据进行处理和分析^[33-34]。CT 扫描系统的分辨率与样品的尺寸直接相关, 因此在合理范围内, 尽可能减少样品尺寸, 可以最大程度提高扫描的精细程度。选择对直径 10 mm, 高度 20 mm 的花岗岩圆柱样品进行 CT 扫描成像, 其扫描分辨率可以达到 5.65 μm , 即在花岗岩热损伤过程中, 尺寸大于 5.65 μm 的孔裂隙均可以被有效识别与提取, 确保了细观结构测试的精准度。

当 CT 扫描系统工作时, X 射线源产生的 X 射线穿透被测岩石后强度会发生衰减, 岩石中不同矿物成分对 X 射线的吸收能力不同, 矿物的密度越大, 对 X 射线的吸收能力越强, 表现在 CT 图像上的亮度越高。因此, 在花岗岩样品的主要矿物成分中, 云母的密度最大, 对 X 射线的吸收能力最强, 反映在 CT 灰度图像中的亮度最亮, 其次是石英, 最暗的矿物为长石。此外, 热冲击作用后花岗岩内部结构会产生微裂纹, 在 CT 扫描图像中的呈现会接近黑色, 可以通过阈值分割方法将裂隙与矿物基质分开。图 3 给出了对高温冷却处理后花岗岩的 CT 扫描及定量分析流程:

1) 将花岗岩样品放置在样品台的中心, 射线源发射出 X 射线束穿透被测样品, 样品台在旋转 360° 的过程中, 平板探测器会持续接收穿透被测样品衰减后的射线强度, 并将各个角度采集的数据转换成二维的 CT 横断面切片图像序列。

2) 在获得花岗岩的 CT 扫描图像后, 利用 Thermo Scientific 公司的 Avizo 软件, 对扫描图像进行硬化矫正、图像增强、滤波降噪等处理, 提高扫描

图像呈现质量。

3) 基于 CT 扫描灰度值的阈值分割方法, 将花岗岩扫描图像中的热损伤裂隙与矿物基质分开, 获得孔裂隙结构的二维切片图像序列。

4) 通过计算机重建技术将二维切片在空间内叠加, 形成三维体积数据, 对花岗岩的裂隙等细观结构特征进行三维可视化展示和定量分析。

5) 在三维数字岩心的基础上生成表面网格, 提取裂隙结构的坐标点与平面信息文件 (.obj 格式), 导入自主开发的煤岩面裂隙方向张量与组构张量计算软件 (FTCS)^[35], 对三维裂隙结构的方向张量和组构张量进行统计分析。

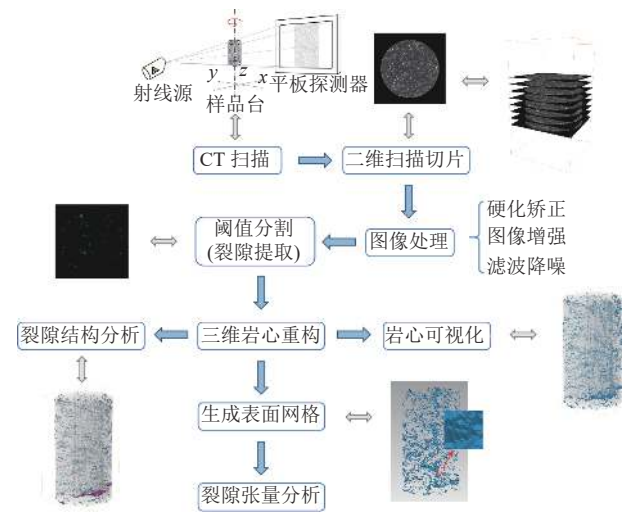


图 3 CT 扫描图像定量分析流程

Fig.3 Flow of quantitative analysis of CT scanning images

2 试验结果与分析

2.1 热冲击花岗岩的物理性质变化

2.1.1 表观特征变化

高温花岗岩在自然冷却与水冷却作用后的表观颜色变化情况如图 4 所示。由图 4 可以观察到, 150 $^{\circ}\text{C}$ 与 300 $^{\circ}\text{C}$ 热处理作用后, 花岗岩样品的颜色无明显变化, 未观察到表面裂纹; 450 $^{\circ}\text{C}$ 高温处理后的样品表面的整体颜色有略微变浅的趋势, 但棕黄色区域逐渐显现、变亮, 这可能与花岗岩中黑云母等含铁矿物的氧化有关, 此时岩石表面未观察到明显裂纹; 当热处理温度升高至 600 $^{\circ}\text{C}$ 与 750 $^{\circ}\text{C}$ 时, 花岗岩表面可以观察到明显微裂纹, 表面整体颜色从暗灰色转变为白灰色, 这可能是与长石矿物出现白化现象有关。同时, 棕色与黄色区域分布增多, 颜色加深, 可能是由于花岗岩矿物中铁镁质成分在高温作用下氧化程度加剧^[15]。

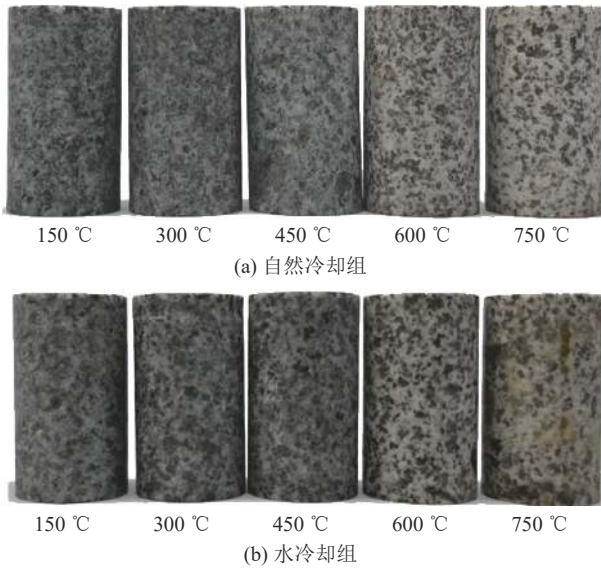


图 4 热冲击作用后花岗岩表现颜色变化

Fig.4 Color change of granite after thermal shock

2.1.2 纵波波速

岩石细观结构损伤会影响其弹性波波速。通过对比热冲击作用前后花岗岩样品的纵波波速来评估岩石的热损伤程度。利用 MC-6310 非金属超声检测仪采集花岗岩沿轴向方向的纵波波速,不同热处理方式作用下每个样品重复测试 3 次,取纵波波速的平均值作为测试结果。热冲击作用下花岗岩纵波波速变化如图 5 所示,可以看出,初始状态花岗岩的纵波波速为 $(4\ 100 \pm 150)$ m/s,并且岩石的纵波波速与其热处理温度呈明显的负相关关系。当热处理温度在 $20 \sim 450$ °C,自然冷却与水冷却 2 种方式作用后花岗岩的纵波波速衰减率呈线性增加的趋势,说明该温度范围内,高温冷却作用对花岗岩细观结构的影响程度有限,产生的微裂纹较少。当热处理温度超过 450 °C 后,花岗岩的纵波波速衰减率显著增加,热损伤程度加剧,自然冷却与水冷却组花岗岩样品的纵波波速分别下降了 65.0% 和 68.1%(600 °C),70.5% 和 73.7%(750 °C),这是由于石英在 573 °C 时会发生 α - β 相变体积膨胀,进一步加速了岩石内部裂纹的产生与扩展^[36]。此外,在整个热处理过程中,自然冷却组花岗岩的纵波波速衰减率始终略低于水冷却组,水冷却产生的降温速率更大,有助于岩石内部微裂纹的扩展,同时水与岩石之间的物理化学作用也在一定程度上影响了岩石细观结构的完整性。

2.2 热冲击花岗岩的力学性质变化

2.2.1 应力-应变曲线

图 6 展示了高温花岗岩在自然冷却与水冷却条件下的应力-应变曲线。从图 6 可以看出,花岗岩的

应力-应变曲线可以分为压密、弹性、屈服和破坏四个阶段。随着热处理温度的升高,曲线的初始斜率逐渐减小,屈服阶段逐渐延长,说明花岗岩的破坏逐渐由脆性向延性转变。当热处理温度不高于 450 °C 时,2 种冷却方式作用后花岗岩的应力-应变曲线差别不大,岩石表现出脆性断裂的性质,轴向应变大致呈逐渐增加的趋势,岩石破坏后应力突然下降;当温度超过 450 °C 时,花岗岩延性明显增强,在达到峰值应力后,应变仍能缓慢增加。在相同的热处理温度下,水冷却后的花岗岩表现出更明显的非线性行为,最大轴向应变略大于自然冷却试样,峰值应力却略低于自然冷却试样,这表明水冷却作用可以进一步弱化花岗岩的脆性,提高其韧性。

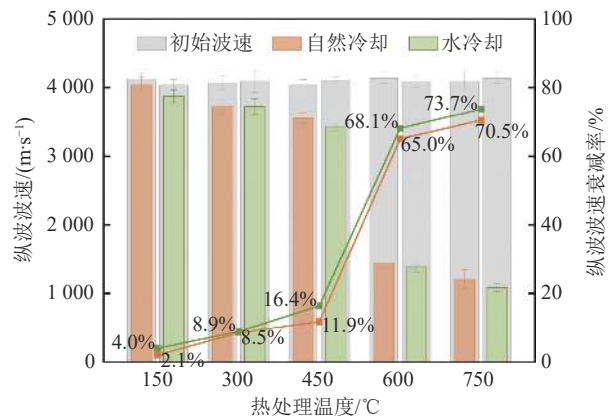


图 5 热冲击作用下花岗岩的纵波波速变化规律

Fig.5 Variation of longitudinal wave velocity of granite after thermal shock

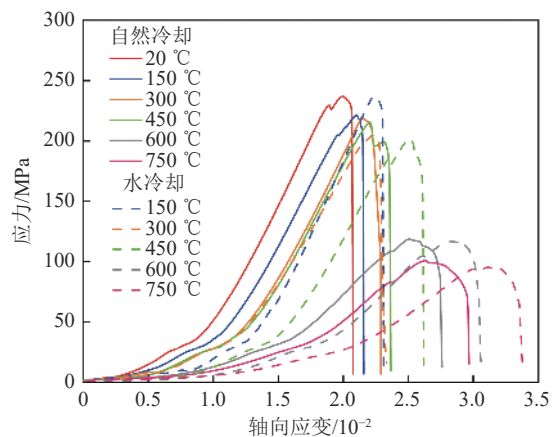


图 6 热冲击作用下花岗岩的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of granite after thermal shock

2.2.2 单轴抗压强度

根据花岗岩的应力-应变曲线,还可得到热冲击作用后花岗岩的平均单轴抗压强度、弹性模量、峰值应变等力学指标,见表 1。

图 7 直观反映了自然冷却与水冷却条件下花岗

表 1 热冲击花岗岩的力学性质指标
Table 1 Mechanical property parameters of granite after thermal shock

热处理温度/℃	冷处理方式	极限荷载 F/kN	抗压强度 σ/MPa	峰值应变 $\epsilon/10^{-2}$	弹性模量 E/GPa
20	未处理	18.61	236.92	1.99	21.54
150	自然冷却	18.25	232.35	2.05	19.67
300	自然冷却	16.60	211.33	2.12	19.24
450	自然冷却	16.05	204.39	2.24	18.82
600	自然冷却	11.12	141.54	2.48	12.79
750	自然冷却	8.93	113.70	2.53	9.38
150	水冷却	18.77	240.98	2.05	21.28
300	水冷却	16.29	207.35	2.19	18.44
450	水冷却	14.88	189.41	2.47	16.95
600	水冷却	9.48	120.68	2.79	10.23
750	水冷却	8.11	103.25	3.01	8.91

岩单轴抗压强度的变化规律。未处理的花岗岩样品的平均单轴抗压强度为 236.92 MPa, 随着热处理温度的升高, 自然冷却花岗岩的单轴抗压强度总体呈下降趋势, 而水冷却花岗岩的强度在 20 ~ 150 °C 有一个轻微的提升, 继而呈下降趋势。在 150 ~ 450 °C, 所有测试样品的单轴抗压强度变化程度较小, 而当热处理温度超过 450 °C 时, 花岗岩的强度显著降低。在 600 °C 和 750 °C 时, 自然冷却、水冷却花岗岩的单轴抗压强度分别下降了 40.26% 和 52.01%, 49.06% 和 56.42%, 可以看出, 与自然冷却相比, 水冷却对花岗岩抗压强度的弱化作用略微明显。热冲击作用后花岗岩试件以剪切破坏为主, 岩石表面出现 X、Y 型或单斜面的贯穿裂纹, 如图 8 所示。但在不同的处理条件下, 试件破坏后的完整性存在较大差异。随着热处理温度的升高, 花岗岩破坏后的完整性变差, 靠近贯穿裂纹的微小裂纹增多, 并伴有大量的碎屑剥落, 岩石的破坏程度加剧。

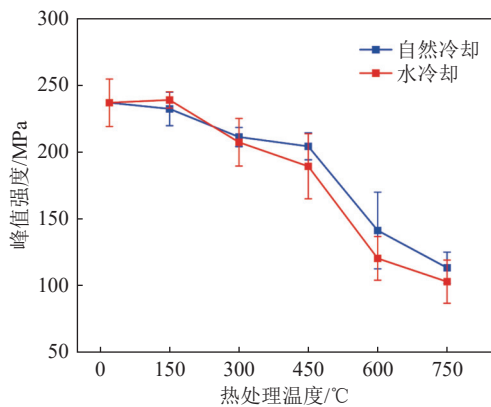


图 7 花岗岩的单轴抗压强度随温度变化规律

Fig.7 Variation of uniaxial compressive strength of granite with temperature

2.2.3 弹性模量

从花岗岩应力-应变曲线的线性阶段计算得到了不同冷却方式下花岗岩的弹性模量, 如图 9 所示。自然冷却条件下加热至 150 °C、300 °C、和 450 °C 高温与自然冷却处理后花岗岩的平均弹性模量分别为 19.67、19.24 和 18.82 GPa, 与未处理的花岗岩样品相比, 分别下降了 8.68%、10.68% 和 12.63%; 相同温度条件下水冷却组花岗岩样品的平均弹性模量分别为下降了 1.21%、14.39%、21.30%。可以看出, 当热处理温度在 450 °C 及以下时, 温度与冷却方式对花岗岩弹性模量的影响较小, 这可能是由于该温度范围内花岗岩的弹性特性对温度的敏感性较低。而当热处理温度升高至 600 °C 与 750 °C 后, 花岗岩的弹性模量显著下降, 幅度均超过 40%, 此时花岗岩结构损伤严重, 其力学性质显著劣化。此外, 相较于自然冷却, 水冷却组花岗岩的弹性模量进一步降低, 这是由于水冷却作用引起的温度变化更快, 热应力进一步

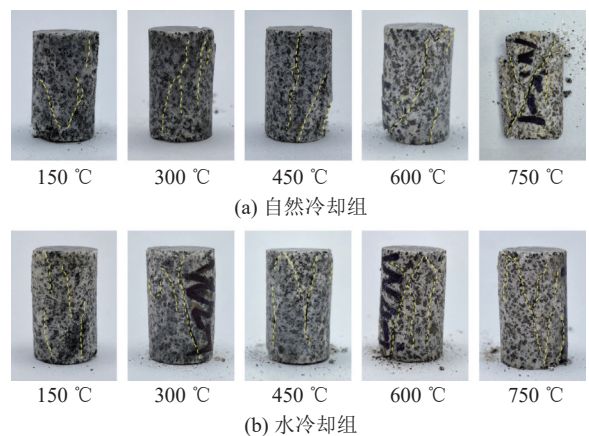


图 8 花岗岩单轴压缩试验破坏

Fig.8 Failure of granite under uniaxial compression test

加剧了热致裂纹的扩展。水还可以通过微裂纹侵入岩石内部,破坏矿物之间的接触,导致花岗岩力学性质劣化更显著。

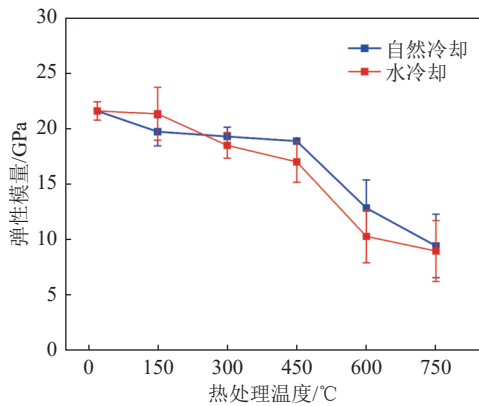


图9 花岗岩的弹性模量随温度变化规律

Fig.9 Variation of elastic modulus of granite with temperature

2.2.4 峰值应变

峰值应变可以定义为花岗岩的峰值强度相对应的轴向应变。图10给出了不同冷却方式下花岗岩的峰值应变随热处理温度的变化情况。结果表明,热处理温度与冷却方式对岩石峰值应变的影响显著。未处理的花岗岩样品的峰值应变在0.02左右,当热处理温度为150 °C时,2组花岗岩的峰值应变几乎相同,说明较低的热处理温度与冷却方式对花岗岩的力学性能几乎没有影响。随热处理温度的升高,峰值应变逐渐增加,水冷却组花岗岩样品的峰值应变在不同热处理温度下均比自然冷却条件的大,且两者的差距随着热处理温度增加而增大。当温度超过450 °C后,所有花岗岩试样的峰值应变都急剧增加,岩石逐渐转变为延性破坏。

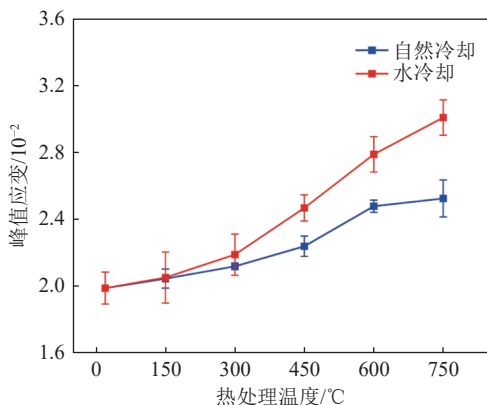


图10 花岗岩的峰值应变随温度变化规律

Fig.10 Variation of peak strain of granite with temperature

2.3 热冲击花岗岩的细观结构变化规律

2.3.1 花岗岩CT扫描切片与三维裂隙重构模型

图11展示了花岗岩在经历冷却处理后的二维

CT扫描切片图像,扫描分辨率为5.65 μm。当热处理温度为150 °C和300 °C,自然冷却与水冷却后的花岗岩CT扫描切片图像中不同矿物组分之间结合紧密,较难观察到明显的微裂纹。同时,与自然状态下花岗岩的力学性质相比,150 °C和300 °C的高温冷却处理对花岗岩的力学性能没有显著的影响,因此,可以认为300 °C及以下的高温作用形成的热应变不足以产生诱导花岗岩破裂的热应力。当热处理温度为450 °C时,CT扫描切片中的微裂纹主要以石英与长石晶界间的开裂为主,这是由于石英矿物的热膨胀系数较高、与其他矿物之间的热膨胀系数相差较大,所以在石英边界会产生不匹配变形和局部高热应力,导致晶界开裂。热致微裂纹多产生于岩石的边缘或端部,尤其是水冷却组的花岗岩样品,在温度梯度剧变过程中岩石边缘的空间梯度变化程度更大。随着热处理温度升高至600 °C,花岗岩的CT扫描图像中微裂纹显著增加,且仍然以矿物的晶间裂纹为主,但同时也可以明显观察到长石与石英内部的晶内裂纹。长石的强度相对较低,易于产生内部裂纹,而石英在573 °C的高温作用下会发生相变,晶体结构的改变加速了石英晶粒内部热破裂过程。当热处理温度升高至750 °C,花岗岩内部的热致裂纹进一步扩展、贯通,并有形成裂隙网络的趋势。云母颗粒内部仍然较难观察到微裂纹,这是由于云母矿物在800 °C的高温作用下仍能保持较好的力学性能。整体上说,水冷却组花岗岩的扫描切片与自然冷却组相比,微裂纹更多,岩石的破裂程度更显著,是由于水冷却引起的热应力积累更大^[26]。此外,水的存在也导致花岗岩中某些矿物晶粒间的胶结物质发生溶解或部分晶粒随水脱落,加剧了岩石的细观损伤。

图12展示了热冲击作用下花岗岩的三维重构模型,淡橙色方框表示分析区域,灰色区域为花岗岩基质,蓝色区域表示经过阈值分割后提取出的岩石内部热损伤裂隙。在热处理温度较低时(450 °C及以下),花岗岩样品中仅产生了少量的细微裂缝,离散分布在花岗岩内部,裂隙联通性较差。当热处理温度升高至600 °C时,热致裂纹显著增多,细小裂缝逐渐扩展合并成较大的裂缝。当热处理温度继续升高至750 °C时,整个分析区域的热损伤更加明显,花岗岩内部结构严重损坏,裂纹逐渐扩展、贯通,有形成复杂裂隙网络的趋势,导致岩石力学性质显著劣化。此外,还可以发现微裂纹更多出现在岩石样品的表面及端部位置,尤其是水冷却组的样品,这是由于在冷却过程中,岩石样品边缘与内部结构之间存

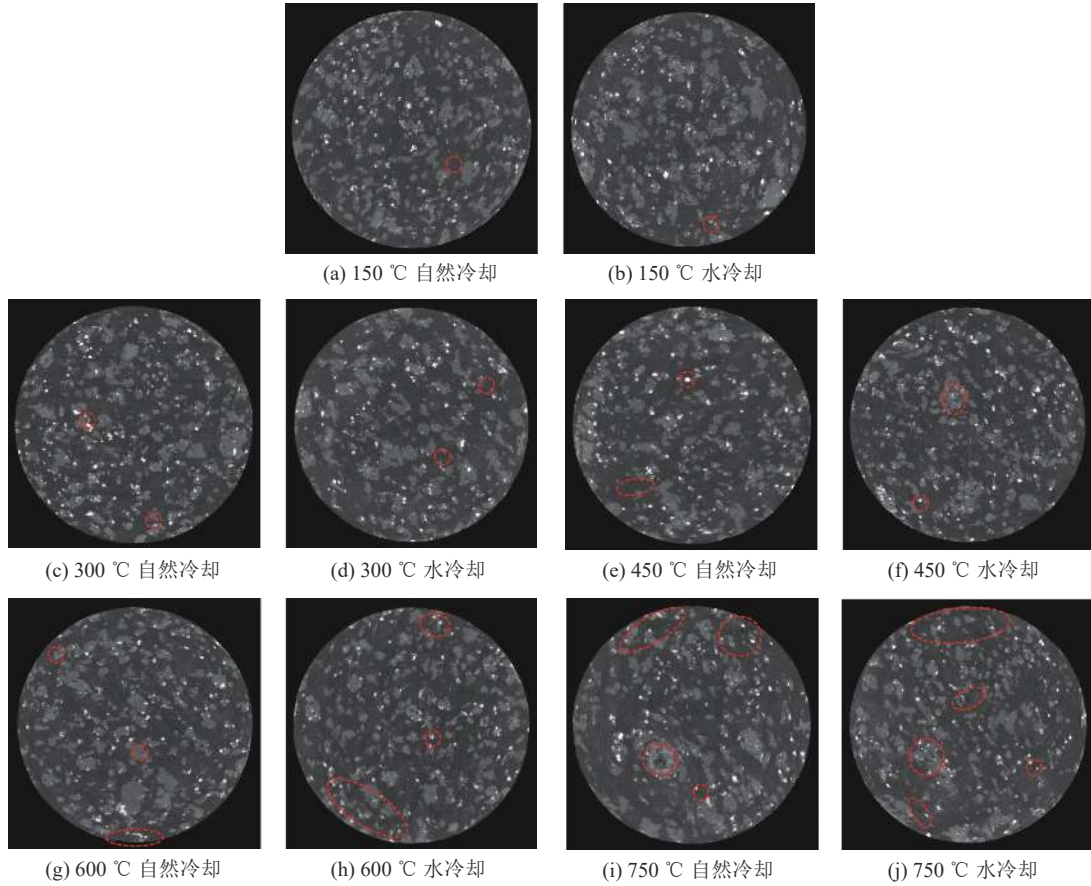


图 11 热冲击花岗岩的 CT 扫描切片

Fig.11 CT scanning images of granite after thermal shock

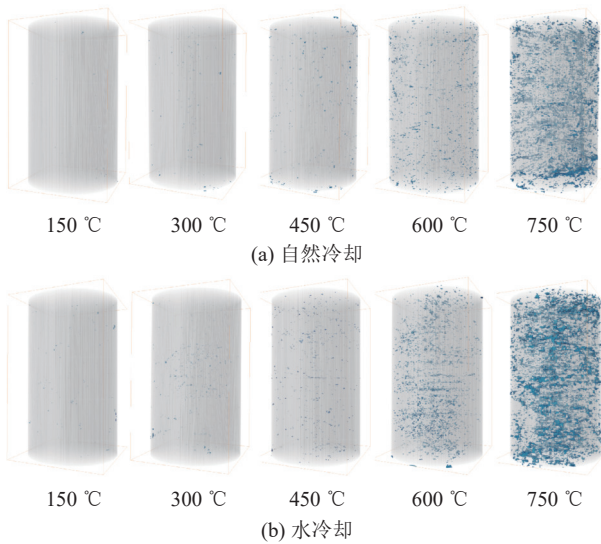


图 12 热冲击花岗岩的三维裂隙重构模型

Fig.12 3D fracture reconstruction model of granite after thermal shock

在时间梯度和空间梯度, 导致岩石边缘处的裂纹密度更大。

2.3.2 孔裂隙结构的 空间分布特征

体素是数字图像数据在三维空间的最小存储单

元, 对应于二维图片中像素的概念。花岗岩的三维重构模型通常可以看作是由大量体素组成的集合, 并且每一个像素与体素都有唯一确定的灰度值^[26,37]。利用三维重构软件 Avizo, 可以实现对所分割区域像素与体素数量的自动统计。因此, 可以定义二维的面孔隙率 P_s 为分析区域内的二维面裂隙的像素个数与总面积的像素个数的百分比, 以及三维体积孔隙率参数 P_v 为体积裂隙体素个数与总体积体素个数的百分比, 用以评价热损伤效应对花岗岩面孔隙率或体积孔隙率的影响。

$$P_s = \frac{N_{\text{pores-2D}}}{N_{\text{total-2D}}} \quad (1)$$

$$P_v = \frac{N_{\text{pores-3D}}}{N_{\text{total-3D}}} \quad (2)$$

式中: P_s 、 P_v 分别为高温冷却处理后花岗岩的面孔隙率与体积孔隙率; $N_{\text{pores-2D}}$ 和 $N_{\text{total-2D}}$ 分别为花岗岩二维 CT 扫描切片中孔裂隙所占的像素与整个平面的像素总数; $N_{\text{pores-3D}}$ 和 $N_{\text{total-3D}}$ 分别为花岗岩三维重构模型中孔裂隙所占的体素与整个花岗岩的体素总数。

图 13 和图 14 分别展示了不同热处理温度与冷却方式作用后花岗岩沿着垂直直径方向的逐层孔隙

率分布情况及体积孔隙率的变化规律。由于岩石矿物非均质分布及不同矿物颗粒之间的热膨胀性差异,导致花岗岩结构内部的热致裂纹在二维CT扫描切片的分布也是随机的,且裂纹密度随着热处理温度的升高而逐渐增大。与水冷却组相比,自然冷却组花岗岩样品的面孔隙率相对更小。从图14可以看出,当热处理温度不高于450℃时,2种冷却方式作用下花岗岩的整体孔隙率差异不大,均在0.01%以下。当热处理温度升高至600℃与750℃,自然冷却与水冷却花岗岩的体积孔隙率分别增长至0.032%、0.078%(600℃),0.510%、0.722%(750℃),岩石内部微裂纹占比显著增加,细观结构损伤加剧。

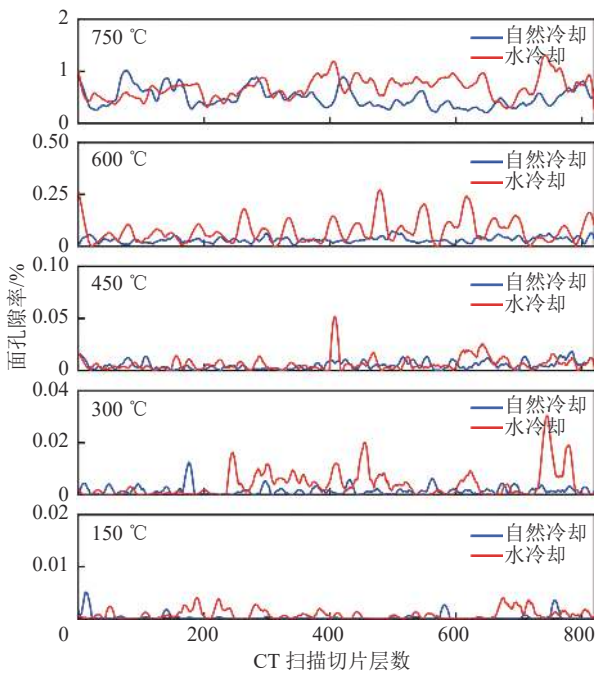


图13 热冲击花岗岩CT扫描切片逐层面孔隙率分布规律
Fig.13 Porosity distribution of CT scanning slices of granite after thermal shock

为了定量统计与分析热冲击作用对花岗岩细观结构的影响,利用Avizo软件对自然冷却与水冷却组花岗岩的孔裂隙体积分布频数进行了统计,如图15和图16所示。可以看出,当热处理温度为150℃时,自然冷却与水冷却处理后花岗岩结构内部的孔裂隙体积均小于 $10^6 \mu\text{m}^3$,且体积小于 $10^5 \mu\text{m}^3$ 的极微小孔隙分布频数更多,说明该温度作用下花岗岩的热损伤程度非常小;当温度升高至300℃和450℃时,出现了体积 $10^6 \sim 10^7 \mu\text{m}^3$ 的孔隙,但数量上仍以极微小孔隙为主,2种冷却处理方式对孔隙分布频数的影响不大。当热处理温度为600℃时,水冷却组花岗岩内部出现了体积大于 $10^7 \mu\text{m}^3$ 的微孔隙,自然冷

却组的孔隙体积分布范围仍为 $10^4 \sim 10^7 \mu\text{m}^3$ 。此外,2种冷却作用后的花岗岩内部的孔隙数量显著增多,分布频数曲线出现了明显的右移,热损伤程度进一步加剧。当温度继续升高至750℃后,孔隙体积的最小值已逐渐接近 $10^5 \mu\text{m}^3$,且分布频数曲线继续右移,岩石内部出现了体积大于 $10^8 \mu\text{m}^3$ 的孔隙,说明该温度作用下岩石内部不断有裂纹产生、扩展、贯通,并明显有形成裂隙网络的趋势,此时花岗岩结构严重破坏。

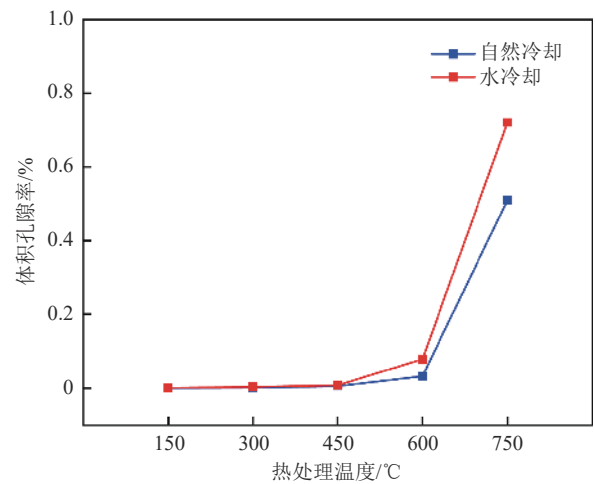


图14 热冲击花岗岩体积孔隙率变化规律

Fig.14 Variation of volume porosity of granite after thermal shock

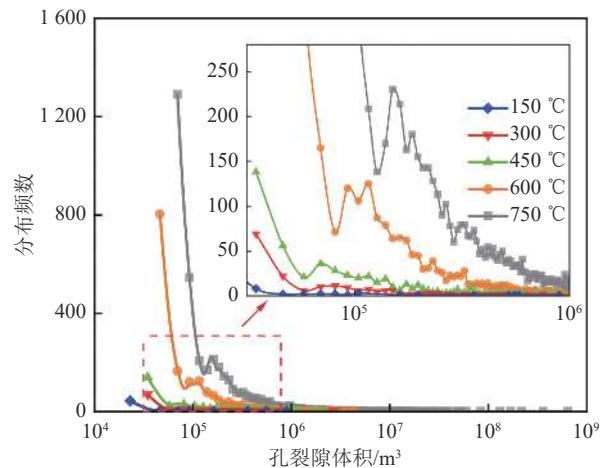


图15 自然冷却组花岗岩的孔裂隙体积分布频数

Fig.15 Frequency of pore volume distribution of granite after natural cooling

自然冷却与水冷却组花岗岩的孔裂隙体积在不同体积分布区间的占比情况,如图17和图18所示。热处理温度在600℃及以下时,自然冷却组与水冷却组花岗岩的孔隙体积大多分布在 $\leq 10^5 \mu\text{m}^3$ 、 $10^5 \sim 10^6 \mu\text{m}^3$ 、 $10^6 \sim 10^7 \mu\text{m}^3$,且随着热处理温度的升高,孔隙体积在 $\leq 10^5 \mu\text{m}^3$ 区间的占比不断减小,

$10^6 \sim 10^7 \mu\text{m}^3$ 区间的孔隙开始出现且占比不断增大。 600°C 高温与水冷却作用后花岗岩出现了体积分布在 $10^7 \sim 10^8 \mu\text{m}^3$ 的孔裂隙。当热处理温度升高至 750°C 后, 2 组花岗岩样品均出现了体积 $\geq 10^7 \mu\text{m}^3$ 的孔裂隙, 且占比接近一半, 意味着该温度作用会导致花岗岩结构内部裂隙网格形成, 热损伤破坏严重。

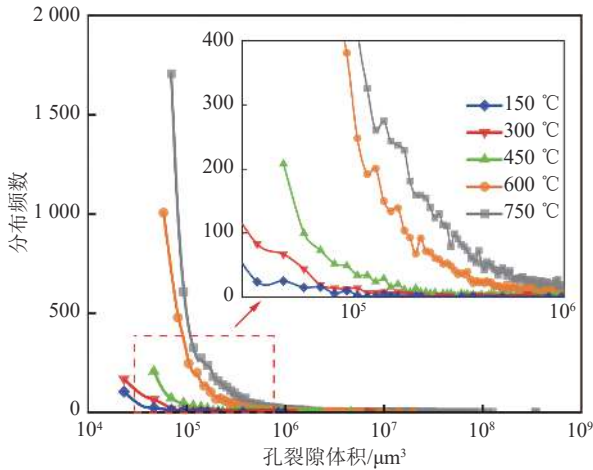


图 16 水冷却组花岗岩的孔裂隙体积分布频数

Fig.16 Frequency of pore volume distribution of granite after water cooling

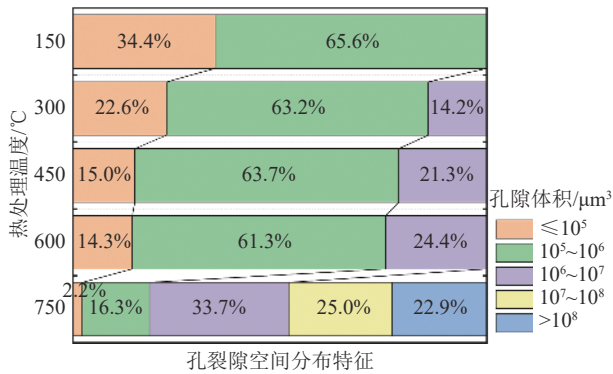


图 17 自然冷却组花岗岩的孔裂隙体积分布占比

Fig.17 Pore volume distribution ratio of granite after natural cooling

2.3.3 孔裂隙结构的张量表征

花岗岩在热冲击作用下, 内部裂隙结构表现出较强的各向异性, 仅仅通过孔隙率、体积等单一的标量指标难以准确描述花岗岩热损伤裂隙场。因此, 引入裂隙张量理论对花岗岩 CT 扫描得到的三维裂隙场进行定量表征^[35,38-39]。基于三角网格离散技术, 利用 Avizo 软件生成花岗岩三维重构后真实裂隙结构 (图 12 中的蓝色区域) 的表面网格, 相当于是用大量的三角形面片覆盖裂隙结构的表面, 导出.obj 格式的网格数据文件, 存储三角形网格的节点坐标与编

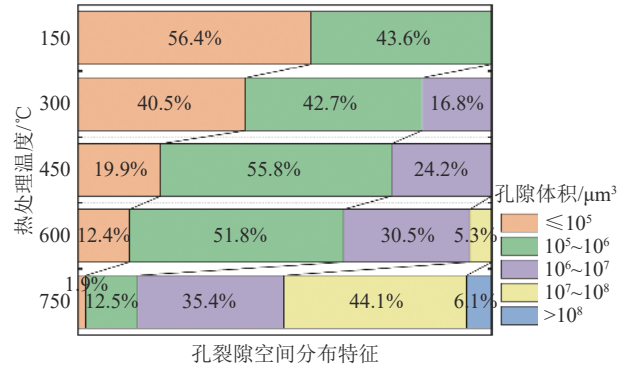


图 18 水冷却组花岗岩的孔裂隙体积分布占比

Fig.18 Pore volume distribution ratio of granite after water cooling

号信息。如果导出的表面网格文件过大, 还可借助 Geomagic、Hypermesh 等网格处理软件进行合理简化和修复处理。然后, 将网格文件导入自主开发的煤岩面裂隙方向张量与组构张量计算软件中, 通过生成一系列的旋转扁椭球, 模拟真实三维面裂隙结构的分布特征, 设计面裂隙椭球重构算法, 得到三角形裂隙网格的椭球体拟合最优解。最后, 基于椭球体计算热损伤岩石的裂隙张量 (包括方向张量与组构张量), 定量表征花岗岩三维真实裂隙场的性质。

裂隙的方向张量与裂隙面的法线方向有关, 可以根据三角形裂隙网格的顶点坐标直接计算得到, 它反映了所有空间裂隙面的加权平均方向 (权重为裂隙面的面积)。裂隙组构张量反映了裂隙面的尺寸特征, 裂隙尺寸越大, 裂隙组构张量的主对角线元素和越大。根据前期的研究基础^[35], 结合 CT 扫描后岩石面裂隙结构的性质, 提出两类裂隙张量的计算方法:

面裂隙方向张量 O :

$$O = \text{Norm} \left[\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \mathbf{n}_{\alpha} \otimes \mathbf{n}_{\alpha} \right] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{n}_{\alpha} = \mathbf{n}_{\min}\{r_{V1}, r_{V2}, r_{V3}\}$ 为椭球体圆截面法向单位向量; Norm 表示矩阵归一化; λ_{α} 为与裂隙面积相关的权重系数, $\alpha = 1, 2, \dots, n$ 。

面裂隙组构张量 F :

$$F = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{i=1}^3 r_{Vi,\alpha}^2 \mathbf{n}_{Vi,\alpha} \otimes \mathbf{n}_{Vi,\alpha} \quad (4)$$

式中: $V_{i,\alpha}$ 为第 α 个椭球的第 i 个主轴, $\alpha = 1, 2, \dots, n$; $i = 1, 2, 3$; $r_{Vi,\alpha}$ 为椭球体 3 个主轴长度; $\mathbf{n}_{Vi,\alpha}$ 为椭球体 3 个主轴的方向向量。

以式 (3)、(4) 为基础, 开发了一套煤岩面裂隙方向张量与组构张量计算软件, 并对 CT 扫描得到的花

花岗岩三维热损伤裂隙场进行张量表征,计算得到热冲击过程中裂隙方向张量 O 与方向张量增量 ΔO , 组构张量 F 与组构张量增量 ΔF , 分别如图 19 与 20 所

示。在两类裂隙张量基础上,提出以第一不变量(主对角线元素和)作为张量的衡量指标,即裂隙张量的迹。

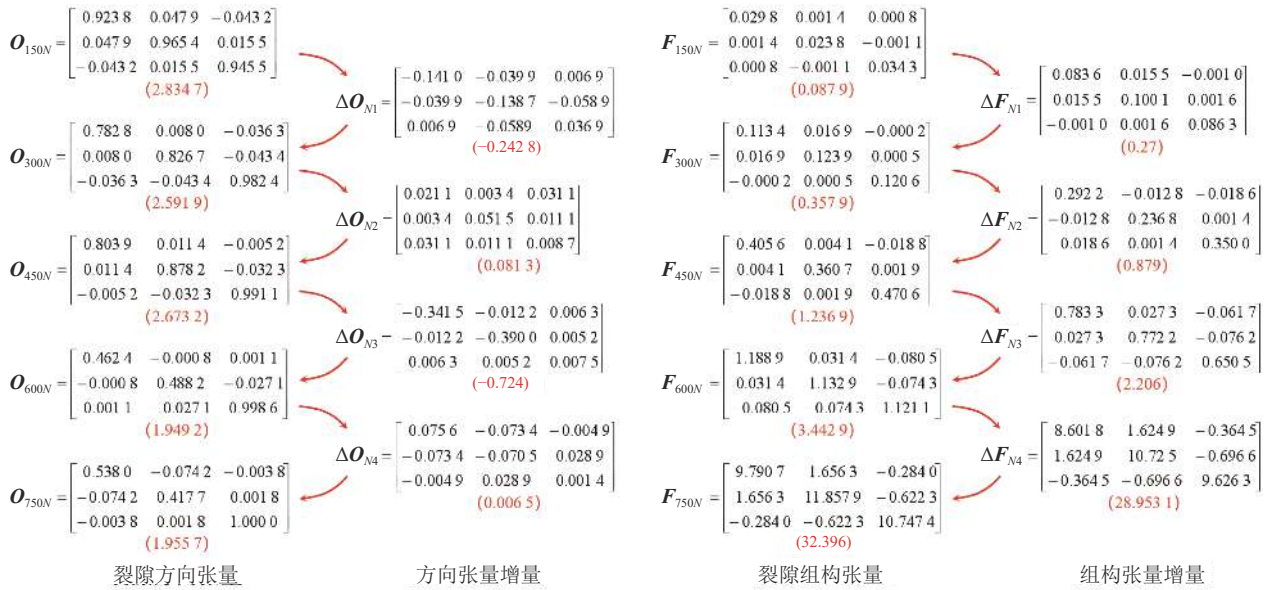


图 19 自然冷却组花岗岩的裂隙张量分析
Fig.19 Fracture tensor analysis of granite after natural cooling

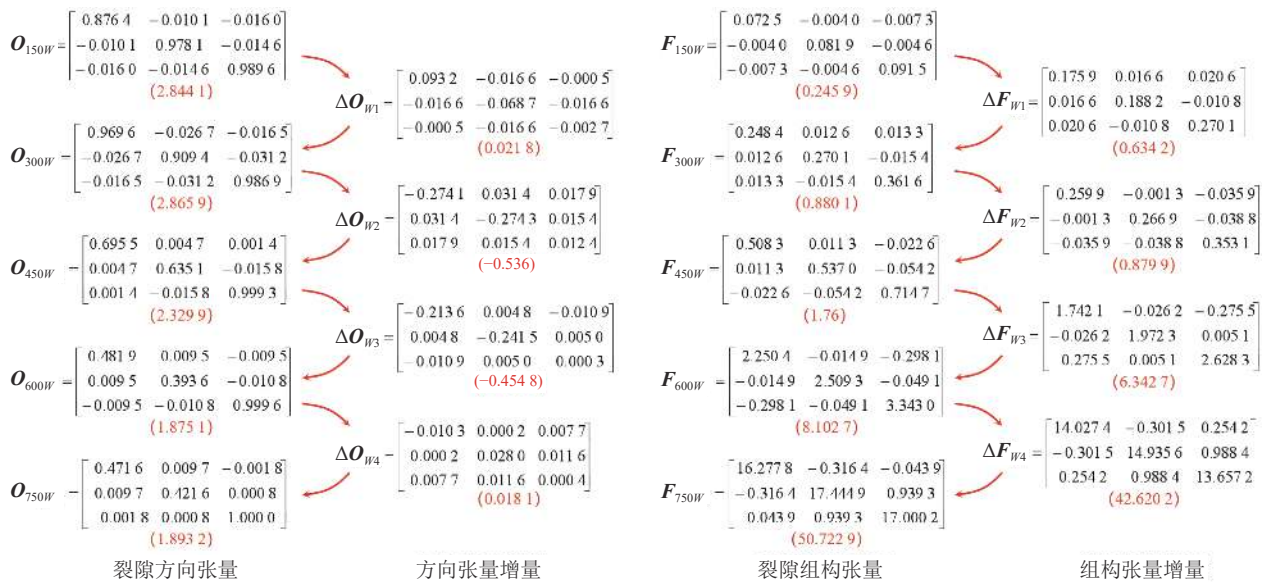


图 20 水冷却组花岗岩的裂隙张量分析
Fig.20 Fracture tensor analysis of granite after water cooling

花岗岩热损伤裂隙场的张量计算结果表明,随着热处理温度的升高,自然冷却与水冷却条件下花岗岩裂隙方向张量的迹有减小的趋势,说明裂隙平均方向出现了改变,可能出现了优势裂隙组(也可以理解为出现了体积较大的扩展裂隙)。但总体上说,方向张量增量的迹变化量远小于方向张量的迹,意味着不同程度的热损伤对裂隙平均方向的影响较小。

组构张量的迹可以大致反映裂隙尺寸的变化规律,如图 21 所示。可以看出随着热处理温度的增加,两种冷却方式作用后花岗岩裂隙组构张量的迹呈非线性增大,说明温度越高,花岗岩内部结构的裂隙扩展与贯通趋势越明显,热损伤程度越大。在相同的热处理温度下,水冷却组比自然冷却组裂隙组构张量的迹更大,反映了水冷却作用后花岗岩的损伤破裂

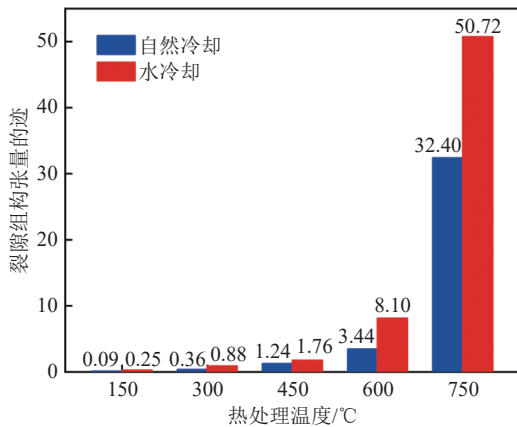


图 21 花岗岩裂隙组构张量的迹随热处理温度的变化规律
Fig.21 Trace of fracture fabric tensor of granite with heat treatment temperature

程度更显著。

裂隙组构张量的迹可以大致反映不同热处理温度与冷却方式作用后花岗岩内部结构裂隙尺寸,进一步对岩石的力学性质产生影响。图 22 建立了热冲击作用后花岗岩裂隙组构张量的迹与单轴抗压强度之间的相关关系,蓝色与红色的点分别表示自然冷却与水冷却组花岗岩组构张量的迹和对应的峰值强度。从图 22 可以看出,2 种冷却方式作用下花岗岩峰值强度随热损伤裂隙组构张量的迹的衰减趋势是一致的,即随着裂隙组构张量的迹的增大,花岗岩的单轴抗压强度逐渐衰减。当热处理温度较低时,自然冷却与水冷却组花岗岩热损伤裂隙组构张量的迹对峰值强度影响的差异性不大,但随着热处理温度继续升高,水冷却作用后热损伤裂隙对强度衰减的影响更加显著。因此,利用组构张量的迹,可以很好地评估花岗岩热损伤后力学性质的衰减程度,二者的关系可以通过对数函数来反映,如式(5)、(6)所示。

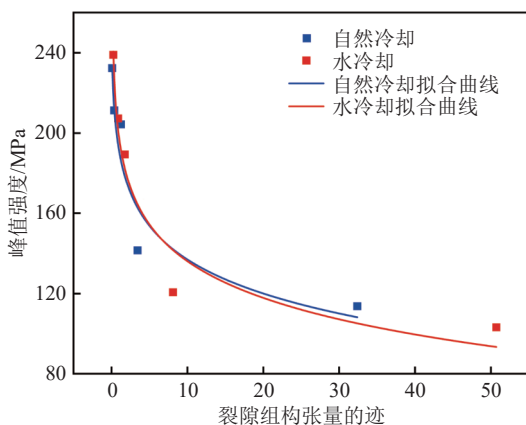


图 22 花岗岩裂隙组构张量的迹与峰值强度的相关关系
Fig.22 Correlation between trace of granite fracture fabric tensor and peak strength

自然冷却:

$$\sigma = 193.95 - 24.62\ln(x + 0.11) \quad (5)$$

水冷却:

$$\sigma = 196.29 - 26.20\ln(x - 0.06) \quad (6)$$

其中: σ 为花岗岩单轴抗压强度; x 为裂隙组构张量的迹。

拟合曲线的决定系数 R^2 分别为 0.922 和 0.954, 拟合结果较好,也验证了热损伤花岗岩裂隙组构张量的迹与单轴抗压强度之间存在较强的相关关系。在今后的研究中,可以进一步探索通过 CT 扫描获取的三维裂隙结构特征的定量分析结果,达到预测热损伤花岗岩力学性质的目的。

3 讨论与展望

在页岩气、石油开采等领域,通常利用水、液氮等低温介质对高温岩体的快速冷却冲击诱导岩石热破裂,该方法在增强型地热系统(EGS)中也有良好的应用前景^[17-19,26]。通过有计划的向深部高温岩体中注入冷却介质形成温度梯度,在岩体内部产生热应力,诱导矿物颗粒收缩和裂隙萌生发育,提高深部岩体的裂隙连通性和储层渗透性。研究结果也表明,热冲击作用对岩石的物理力学性质及微观结构影响显著。在不同冷却速率影响下,岩石的力学响应和微观损伤不同,尤其是对超过 450 °C 的高温岩体,水冷却相比自然冷却对致密花岗岩的损伤致裂效果更好。CT 扫描等先进技术在岩石力学领域的应用和发展也为热冲击花岗岩微观结构的深入研究奠定了基础。此外,值得注意的是,随着热冲击效应的增强,岩石的力学性能持续降低,这也意味着要合理设计冷却冲击致裂方案,避免因热应力过大,超出围岩系统的稳定阈值,诱发微地震等人工灾害^[14]。

4 结 论

1) 岩石微观结构损伤会影响其弹性波波速。当热处理温度在 20 ~ 450 °C,自然冷却与水冷却两种方式作用后花岗岩的纵波波速衰减率呈线性增加,该阶段产生的热损伤裂纹较少;当热处理温度超过 450 °C 后,花岗岩的纵波波速衰减率急剧增加,热损伤程度加剧。水冷却组花岗岩的纵波波速始终略低于自然冷却组,说明水的存在一定程度上加剧了岩石微观结构损伤。

2) 随着热处理温度升高,花岗岩的单轴抗压强度与弹性模量逐渐减小,平均峰值应变逐渐增加。当热处理温度低于 450 °C,花岗岩内部微裂纹较少,

力学性质变化不明显,花岗岩表现出脆性破坏特征。而超过 450 °C 时,花岗岩力学性质显著劣化,岩石逐渐转变为延性破坏。相比自然冷却,水冷却的降温速率更快,以及水岩相互作用促进了微裂纹的扩展和发育,导致岩石力学性质衰减更明显。

3) 花岗岩微观结构孔隙率与热处理温度呈正相关关系。岩石矿物非均质分布及不同矿物颗粒之间的热膨胀性差异,导致热损伤裂纹的分布具有随机性,且热致裂纹数量与裂纹密度随着热处理温度的升高而逐渐增大。600 °C 及以上的高温作用导致花岗岩内部裂纹逐渐扩展、贯通,并形成裂隙网络,且石英矿物发生了 α - β 相变而体积膨胀,促使热损伤裂纹进一步扩展。

4) 随着热处理温度增加,热冲击作用下花岗岩裂隙方向张量的迹变化量较小,说明不同程度的温度变化对裂隙平均方向的影响较小。在相同的热处理温度下,水冷却组比自然冷却组裂隙组构张量的迹更大,反映了水冷却作用后花岗岩裂隙扩展与贯通趋势越明显,损伤破裂程度更显著。热损伤花岗岩裂隙组构张量的迹与单轴抗压强度之间存在较强的相关关系,随着裂隙组构张量的迹的增大,花岗岩的单轴抗压强度逐渐降低。

参考文献(References):

- [1] 汪集暘,胡圣标,庞中和,等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 25-31.
WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, *et al.* Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science and Technology Review*, 2012, 30(32): 25-31.
- [2] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 1-9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, *et al.* The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 1-9.
- [3] 郭建春,肖勇,蒋恕,等. 深层干热岩水力剪切压裂认识与实践[J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1582-1593.
GUO Jianchun, XIAO Yong, JIANG Shu, *et al.* Understanding and practice of hydraulic shearing in deep hot dry rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1582-1593.
- [4] WEI Xin, FENG Zijun, ZHAO Yangsheng. Numerical simulation of thermo-hydro-mechanical coupling effect in mining fault-mode hot dry rock geothermal energy[J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 120-135.
- [5] 邓潇. 温度交变对干热岩的损伤实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017: 32-49.
- [6] 许天福,张延军,于子望,等. 干热岩水力压裂实验室模拟研究[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 35-39.
XU Tianfu, ZHANG Yanjun, YU Ziwang, *et al.* Laboratory study of hydraulic fracturing on hot dry rock[J]. *Science and Technology Review*, 2015, 33(19): 35-39.
- [7] 张洪伟,万志军,周长冰,等. 干热岩高温力学特性及热冲击效应分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(1): 138-145.
ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHOU Changbing, *et al.* High temperature mechanical properties and thermal shock effect of hot dry rock[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(1): 138-145.
- [8] 成泽鹏,邵保平,杨欣欣,等. 热冲击作用下花岗岩渗透性演变规律试验研究[J]. *太原理工大学学报*, 2021, 52(2): 198-202.
CHENG Zepeng, XI Baoping, YANG Xinxin, *et al.* Experimental study on the evolution of granite permeability under thermal shock[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2021, 52(2): 198-202.
- [9] GAO Yanan, WANG Yunlong, LU Taiping, *et al.* An experimental study on the mechanical properties of high-temperature granite under natural cooling and water cooling[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021: 9018462.
- [10] 蔡承政,任科达,杨玉贵,等. 液氮压裂作用下页岩破裂特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(11): 2183-2203.
CAI Chengda, REN Keda, YANG Yugui, *et al.* Experimental research on shale cracking characteristics due to liquid nitrogen fracturing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(11): 2183-2203.
- [11] 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.
- [12] FAN Lifeng, GAO Jingwei, DU Xiuli, *et al.* Spatial gradient distributions of thermal shock-induced damage to granite[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(5): 917-925.
- [13] 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.
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.
- [14] SHEN Yanjun, HOU Xin, YUAN Jiangqiang, *et al.* Thermal de-

- terioration of high-temperature granite after cooling shock: multiple-identification and damage mechanism[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(10): 5385–5398.
- [15] QIN Yan, TIAN Hong, XU Nengxiong, *et al.* Physical and mechanical properties of granite after high-temperature treatment[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 305–322.
- [16] 徐小丽, 高峰, 张志镇. 高温后围压对花岗岩变形和强度特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 2246–2252.
XU Xiaoli, GAO Feng, ZHANG Zhizhen. Influence of confining pressure on deformation and strength properties of granite after high temperatures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2246–2252.
- [17] 黄中伟, 温海涛, 武晓光, 等. 液氮冷却作用下高温花岗岩损伤实验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2): 68–76.
HUANG Zhongwei, WEN Haitao, WU Xiaoguang, *et al.* Experimental study on cracking of high temperature granite using liquid nitrogen[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2019, 43(2): 68–76.
- [18] 邵保平, 吴阳春, 王帅, 等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 69–83.
XI Baoping, WU Yangchun, WANG Shuai, *et al.* Experimental study on mechanical properties of granite taken from Gonghe basin, Qinghai province after high temperature thermal damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1): 69–83.
- [19] 靳佩桦, 胡耀青, 邵继喜, 等. 急剧冷却后花岗岩物理力学及渗透性质试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2556–2564.
JIN Peihua, HU Yaoqing, SHAO Jixi, *et al.* Experimental study on physico-mechanical and transport properties of granite subjected to rapid cooling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2556–2564.
- [20] 王登科, 张平, 浦海, 等. 温度冲击下煤体裂隙结构演化的显微CT实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2243–2252.
WANG Dengke, ZHANG Ping, PU Hai, *et al.* Experimental research on cracking process of coal under temperature variation with industrial micro-CT[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2243–2252.
- [21] ZHAO Zhihong, DOU Zihao, XU Haoran, *et al.* Shear behavior of Beishan granite fractures after thermal treatment[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 213: 223–240.
- [22] 韦文术, ZHANG Jeffery, 张健恺, 等. 煤矿井下水处理反渗透膜的污染机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(4): 103–110.
WEI Wenshu, ZHANG Jeffery, ZHANG Jiankai, *et al.* Study on mechanism of reverse osmosis membrane pollution of water treatment in underground coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 103–110.
- [23] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合, 等. 显微CT试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 28–34.
ZHAO Yangsheng, MENG Qiaorong, KANG Tianhe, *et al.* Micro-CT Experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 28–34.
- [24] YANG Zhen, YANG Shengqi, TIAN Wenling. Peridynamic simulation of fracture mechanical behaviour of granite specimen under real-time temperature and post-temperature treatments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 138: 104573.
- [25] 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.
- [26] ISAKA B L A, RANJITH P G, RATHNAWEERA T D, *et al.* Quantification of thermally-induced microcracks in granite using X-ray CT imaging and analysis[J]. *Geothermics*, 2019, 81: 152–167.
- [27] GOMAH M E, LI Guichen, BADER Salah, *et al.* Damage evolution of Granodiorite after heating and cooling treatments[J]. *Minerals*, 2021, 11(7): 779.
- [28] WU Xinghui, GUO Qifeng, ZHU Yu, *et al.* Pore structure and crack characteristics in high-temperature granite under water-cooling[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101646.
- [29] 邓申缘, 姜清辉, 商开卫, 等. 高温对花岗岩微结构及渗透性演化机制影响分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(6): 1601–1611.
DENG Shenyuan, JIANG Qinghui, SHANG Kaiwei, *et al.* Effect of high temperature on micro-structure and permeability of granite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1601–1611.
- [30] 蔺文静, 陈向阳, 甘浩男, 等. 东南沿海厦门湾-漳州盆地地热地质特征及干热岩勘查方向[J]. *地质学报*, 2020, 94(7): 2066–2077.
LIN Wenjing, CHEN Xiangyang, GAN Haonan, *et al.* Geothermal, geological characteristics and exploration direction of hot dry rocks in the Xiamen bay-Zhangzhou basin, southeastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 2066–2077.
- [31] 滕吉文, 司芴, 庄庆祥, 等. 漳州盆地精细壳、幔异常结构与潜在干热岩探讨[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(5): 1613–1632.
TENG Jiwen, SI Xiang, ZHUANG Qingxiang, *et al.* Fine structures of crust and mantle and potential hot dry rock beneath the Zhangzhou basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(5): 1613–1632.
- [32] FAN Lifeng, LI Han, XI Yan. Evaluation of the effects of three

- different cooling methods on the dynamic mechanical properties of thermal-treated sandstone[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81: 154.
- [33] KUMAR Susheel, VARMA Atul Kumar, MENDHE Vinod Atmaram, *et al.* Multi-scale pore characterization of Barakar shale in the Mand-Raigarh Basin, India: scientific upshots from geochemical approaches and imaging techniques[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: 2188.
- [34] 毛伟泽, 吕庆, 郑俊, 等. 基于CT图像的花岗岩矿物组分与细观结构分析[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(1): 216–222.
MAO Weize, LYU Qing, ZHENG Jun, *et al.* Analysis of mineral composition and meso-structure of granite using CT images[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(1): 216–222.
- [35] 王守光, 穆鹏宇, 王嘉敏, 等. CT扫描的煤岩面裂隙椭球模型重构与张量表征及其应用[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2593–2608.
WANG Shouguang, MU Pengyu, WANG Jiamin, *et al.* Ellipsoid reconstruction and tensor characterization of planar fractures in coal obtained by CT-scanning and the applications[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2593–2608.
- [36] ZHU Zhennan, KEMPKA Thomas, RANJITH Pathegama Gamage, *et al.* Changes in thermomechanical properties due to air and water cooling of hot dry granite rocks under unconfined compression[J]. *Renewable Energy*, 2021, 170: 562–573.
- [37] 闫国亮, 孙建孟, 刘学锋, 等. 储层岩石微观孔隙结构特征及其对渗透率影响[J]. *测井技术*, 2014, 38(1): 28–32.
YAN Guoliang, SUN Jianmeng, LIU Xuefeng, *et al.* Characterization of microscopic pore structure of reservoir rock and its effect on permeability[J]. *Well Logging Technology*, 2014, 38(1): 28–32.
- [38] ODA M. A method for evaluating the effect of crack geometry on the mechanical behavior of cracked rock masses[J]. *Mechanics of Materials*, 1983, 2(2): 163–171.
- [39] YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Weiyuan. Effective stress and vector-valued orientational distribution functions[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2008, 17: 101–121.