

循环热冲击花岗岩微观裂隙表征与渗透特性演化规律

何将福 任成程 何坤 余启航 李欣儒 邓旭

引用本文:

何将福, 任成程, 何坤, 等. 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, 2024, 52(12): 131–142.

HE Jiangfu, REN Chengcheng, HE Kun, et al. Microscopic fracture characterization and permeability evolutionary patterns of granites under cyclic thermal shock[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(12): 131–142.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.05.0321>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同冷却方式下高温花岗岩细观损伤量化和机理分析

Quantification and mechanism analysis of meso-damage of high-temperature granite under different cooling modes
煤田地质与勘探. 2022, 50(2): 106–114 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.06.0346>

液态CO₂水蒸气循环冲击煤体增透及瓦斯抽采效果模拟

Coal permeability enhancement *via* cyclic percussion using low-temperature liquid CO₂ and high-temperature water vapor and simulations of resultant gas drainage performance
煤田地质与勘探. 2024, 52(9): 67–79 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.01.0020>

岩石导热热阻对裂隙对流换热的影响机制

Influencing mechanism of rock thermal resistance on convective heat transfer of fracture
煤田地质与勘探. 2023, 51(3): 113–122 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.05.0394>

深部地热能系统主要挑战与耦合储能的增强型创新开发模式

Major challenges of deep geothermal systems and an innovative development mode of REGS integrated with energy storage
煤田地质与勘探. 2024, 52(1): 1–13 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.12.0848>

裂缝分布对CO₂-EGS热提取的影响研究

Effects of fracture distribution on heat extraction through CO₂-EGS
煤田地质与勘探. 2024, 52(1): 117–128 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.12.0827>

富油煤热解特性及其孔裂隙结构演化规律

Pyrolysis characteristics and pore-fracture evolutionary patterns of tar-rich coals
煤田地质与勘探. 2024, 52(7): 46–53 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.12.0825>



移动阅读

何将福, 任成程, 何坤, 等. 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, 2024, 52(12): 131–142. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.05.0321

HE Jiangfu, REN Chengcheng, HE Kun, et al. Microscopic fracture characterization and permeability evolutionary patterns of granites under cyclic thermal shock[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 131–142. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.05.0321

循环热冲击花岗岩微观裂隙表征与渗透特性演化规律

何将福^{1,2}, 任成程², 何 坤², 余启航², 李欣儒², 邓 旭²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘要: 【目的】为揭示增强型地热系统(EGS)热储开发过程中, 钻井液、循环取热介质等低温流体与高温花岗岩储层循环热冲击致裂微观损伤特性与渗透率演化规律。【方法】开展了不同冷却方式、循环热冲击次数、冷却温度等条件下高温花岗岩致裂特征实验研究, 得到了循环注水冷却和自然冷却状态下 25~700 °C 花岗岩的纵波波速、孔隙体积分数、分形维数等微观结构特征参数, 并基于 CT 扫描三维重构技术与 Avizo-COMSOL 交互式联合建模技术, 构建了花岗岩微观孔隙渗透率演化特征模型, 揭示了孔隙流体流动过程中渗流场、压力场和速度场的流线分布规律, 并计算了 X、Y、Z 方向的绝对渗透率。【结果和结论】结果表明: (1) 热处理温度与循环热冲击次数均与纵波波速呈负相关, 循环次数越大, 波速下降越明显, 岩石损伤越严重, 水冷却组波速下降速率整体大于空气自然冷却组。(2) 当花岗岩温度 $t \leq 300$ °C 时, CT 扫描切片中的微裂纹数量较少, 连通性较差; 当温度 $t \geq 400$ °C 时, 花岗岩内部微裂纹及孤立孔隙迅速发育, 并逐渐形成裂隙连通网络, 且水冷却对花岗岩内部损伤致裂效果更显著。(3) 由于微观孔隙结构的非均质性导致 X、Y、Z 三个方向渗流计算结果存在差异, 沿流动方向孔隙压力减小、流量变大, 在裂缝通道较窄的地方流量突然增加, 但在一些复杂的孔隙结构中, 不可避免地导致流体停滞或回流。研究结果揭示了循环热冲击对高温花岗岩损伤机制与渗透率演化规律, 为热刺激法干热岩储层改造提供了可靠参数。

关 键 词: 高温花岗岩; 循环热冲击; CT 扫描三维重构; 裂隙标准; Avizo-COMSOL; 增强型地热系统(EGS)

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)12-0131-12

Microscopic fracture characterization and permeability evolutionary patterns of granites under cyclic thermal shock

HE Jiangfu^{1,2}, REN Chengcheng², HE Kun², YU Qihang², LI Xinru², DENG Xu²

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the microscopic damage characteristics and permeability evolutionary patterns of high-temperature granite reservoirs fractured under cyclic thermal shock produced by low-temperature fluids like drilling fluids and circulating heat recovery media in the exploitation process of the enhanced geothermal systems (EGSs). [Methods] Using experiments on the fracturing characteristics of high-temperature granites under the conditions of varying cooling methods, numbers of thermal shock cycles, and cooling temperatures, this study determined microstructural characteristic parameters such as compressional wave (P-wave) velocity, pore volumetric fraction, and fractal dimension of granites across a temperature range of 25 to 700 °C under cooling via cyclic water injection and nat-

收稿日期: 2024-05-16; 接收日期: 2024-08-05

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(Z20201294)

第一作者: 何将福, 1988 年生, 男, 重庆人, 博士(后), 副教授。E-mail: hejf2016@cqu.edu.cn

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

ural cooling. Using the CT scan-based 3D reconstruction technology and the interactive joint modeling technology based on Avizo-COMSOL, this study built a model describing the evolutionary characteristics of microscopic pore permeability. Employing this model, this study revealed the streamline distribution patterns of the seepage, pressure, and velocity fields during pore fluid flow and calculated the absolute permeability in the X , Y , and Z directions. [Results and Conclusions] Key findings are as follows: (1) The heat treatment temperature and the number of thermal shock cycles were negatively correlated with the P-wave velocity. Specifically, more thermal shock cycles corresponded to a more significant decrease in the P-wave velocity and more severe rock damage. Furthermore, the water cooling led to a more significant overall reduction in the P-wave velocity than air cooling. (2) In the case of granite temperature $t \leq 300$ °C, CT scan slices revealed a small number of microcracks in granites, indicating poor connectivity. In contrast, at $t \geq 400$ °C, microcracks and isolated pores occurred rapidly within granites, gradually forming an interconnected fracture network. Moreover, water cooling caused more significant internal damage-induced fracturing of granites. (3) The heterogeneity of microscopic pore structures resulted in differences in the calculation results of seepage in the X , Y , and Z directions. Consequently, the pore pressure decreased and the flow rate increased along the flow direction, with the flow rate surging sharply at locations where fracture channels narrowed. However, fluid retention or backflow was inevitable in some complex pore structures. The results of this study reveal the damage mechanisms and permeability evolutionary patterns of high-temperature granites under cyclic thermal shock, providing reliable parameters for the thermal stimulation of hot dry rock (HDR) reservoirs.

Keywords: high-temperature granite; cyclic thermal shock; CT scan-based 3D reconstruction; fracture criterion; Avizo-COMSOL; enhanced geothermal system (EGS)

根据国家“碳达峰、碳中和”发展战略目标,急需寻求新的清洁可再生能源来代替传统化石能源。地热能作为极具前景的可再生清洁能源,在国家能源结构调整体系中占据了有利条件^[1]。地热能主要包含水热型(含水)和干热岩型(不含水)两类,目前我国地热能开发仍以水热型为主,中低温地热资源直接利用居世界首位,而干热岩(hot dry rock, HDR)型地热资源的开发利用尚处于起步阶段^[2-3]。我国干热岩资源分布广泛^[4],主要分布在东北、华北、西北以及东南沿海地区,蕴含的资源储量相当于860万亿t标准煤燃烧所具有的能量^[5]。干热岩埋藏深度3~10 km,温度大于150 °C,储层岩石主要为低渗致密的高温花岗岩,使用传统方法很难将储层中的热量提取出来^[6]。增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS)^[7]被认为是最有效的干热岩开发方式,其主要通过水力压裂^[8]、无水压裂^[9]、化学刺激^[10]、热刺激等方法^[11-12]对干热岩地热储层进行增渗改造,再注入循环取热介质将高温地热资源提取至地面进行发电利用。

目前地热能开采主要是以水作为主要采热介质^[13],且地热能的开采是一项长期性的工程,需要频繁地注水和采水。低温流体与储层高温花岗岩反复循环接触产生热应力对岩石造成热冲击效应^[14]。当热应力超过岩石的极限抗拉强度和抗剪强度时,会产生新的裂纹并扩展原有天然裂缝,增加渗透率。储层渗透性是决定EGS工程取热效率的关键。循环热刺激储层作用一方面能增产,但也可能影响井壁稳定性。因此,研究高温花岗岩循环热冲击作用下微观裂隙结构与渗透特性演化机

制,对提高EGS热提取效率和井壁稳定性具有重要意义。

近年来,国内外学者针对高温花岗岩循环热冲击损伤后物理力学性质^[15-17]展开了大量实验研究,包括质量、密度、弹性模量、纵波波速、物性参数、抗压抗拉^[18]、抗剪强度等力学参数在热冲击前后的变化规律^[19]。Zhu Dong等^[20]研究表明试样温度大于550 °C且循环次数超过15次后,岩石呈现出迅速开裂的趋势。Cui Yuan等^[21]重点探讨了高温循环作用下声发射相应特征,随着循环次数增加AE事件显著增加,表明岩石内部由小孔隙演变大尺度断裂事件。随着显微技术的迅速发展,扫描电镜、压汞实验、CT扫描、核磁共振等技术从微观角度定性与定量表征岩石内部孔隙分布情况,并通过三维可视化对裂隙进行重构展示。赵阳升等^[22]基于CT扫描技术揭示了花岗岩在500 °C内微观晶粒空间三维不规则破裂机制。王嘉敏等^[23]通过CT扫描获得了花岗岩热裂纹分布,并结合裂隙张量计算理论对三维裂隙场进行定量表征。M. B. Bird等^[24]基于Avizo与COMSOL对接技术,模拟了微观孔隙结构中的流动并将计算的渗透率与实验室结果进行比较。Fan Nan^[25]、Ni Xiaoming^[26]等通过对煤岩CT扫描选取合适REV应用COMSOL Multiphysics模拟了甲烷在微观孔隙中流动过程。夏彬伟等^[27]基于分形理论与渗透率模型开展真三轴应力条件下的渗流实验,研究成果可准确预测煤岩储层渗透率,揭示煤储层中煤层气的流动机理。

综上所述,目前关于花岗岩孔裂隙渗流研究多基于简化模型,对真实微观复杂孔隙结构渗透特性研究仍有不足。笔者利用CT扫描和三维重构技术获取高温花

岗岩循环热冲击损伤后孔隙结构, 采用盒维数计算其分形维数^[28-29], 结合体积分数和纵波波速来定量描述损伤情况。并通过 Avizo-COMSOL 对接技术构建渗透率演化模型。在三维空间上模拟流体在孔隙中的流动, 分析了压力场和速度场分布特征及流动规律, 计算了 X 、 Y 、 Z 方向的绝对渗透率。研究结果为热刺激法开发利用干热岩项目提供科学理论依据。并提供基于真实岩样裂隙结构的三维网络模型建模方法, 为深层地热开发提供了新的研究思路。

1 循环热冲击实验准备

1.1 试样制备

花岗岩试件取样于山东济宁, 其属于微风化粗颗粒花岗岩, 外观呈现为灰白色。所有岩样均来自地下 100 m 深处的同一块岩石取样, 属于高热流花岗岩型干热岩资源分布区, 符合干热岩储藏特征。通过 XRD 衍射测试可知花岗岩的主要矿物成分为: 20.8% 石英、58.5% 斜长石、16.3% 正长石、4.4% 云母等矿物组成^[30]。根据 ISRM 建议将试件加工成直径 50 mm, 高度 100 mm 的圆柱形标准试件。利用超声波测试仪测定花岗岩样品的初始纵波波速(3.72 ± 0.12) km/s, 筛选出结果接近的花岗岩并分组编号, 自然冷却试样编号为“N”, 注水冷却编号为“W”, 花岗岩样品如图 1 所示。

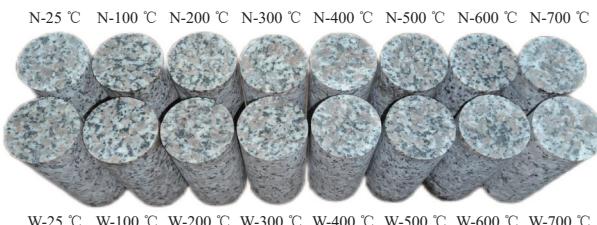


图 1 花岗岩样品
Fig.1 Granite samples

1.2 循环热冲击损伤实验

干热岩的温度范围很广, 一般在 150~650 °C, 本次实验将花岗岩热冲击目标温度设定为: 25(对照组)、100、200、300、400、500、600、700 °C; 循环热冲击次数设定为: 5 次、10 次、15 次。加热设备采用 SX2-10-12A 型箱式马弗炉。试样加热前先置于干燥箱中烘干, 再将样品放入马弗炉内, 以 5 °C/min 的速率加热到目标温度^[31], 试样在炉内恒温 2 h 保证花岗岩试样受热均匀。然后按分组对岩样进行自然冷却与水冷却, 采用红外温度仪每隔一定时间测定岩样表面温度, 记录冷却时间。待花岗岩完全冷却至室温后, 对水冷却岩样干燥处理。完成以上热冲击实验记为一次循环, 重复以上步骤至设定循环次数, 即可视为完成实验。

1.3 CT 扫描实验

通过 CT 扫描实验对试样内部裂隙结构进行三维成像分析, 采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室的 CT 扫描设备 SOMATOMC cope CT, 其空间分辨率可以达到 330 μm。

鉴于 600 °C 高温花岗岩浸水冷却在第 9 次循环时全部破碎, 700 °C 岩样在第 5 次循环时全部碎裂, 而自然冷却条件下岩样在第 12 次循环时完全碎裂。因此, 本次试验选取以下配置: 200 °C 组、300 °C 组、400 °C 组浸水冷却和自然冷却全部岩样, 以及 600 °C 组 5 次循环浸水冷却和自然冷却岩样。共计 20 块花岗岩岩样进行 CT 扫描实验。

2 热冲击致裂实验结果与分析

2.1 表观特征

花岗岩试样在经历多次循环热冲击损伤实验后, 随着试样温度上升, 试样表观由最初的灰白色逐渐出现红褐色斑点, 然后逐渐恢复到灰白色。100~300 °C 的热处理过程中, 试样表观特征没有明显变化, 未观察到裂纹产生。但是, 由于试样含铁矿物的氧化, 经 400 °C 高温处理后的试样表面出现少量裂纹, 试样整体颜色略微变浅, 并出现了棕黄色区域。随着热处理温度升高到 600~700 °C 时, 试样表面能明显观察到裂纹产生, 颜色由暗灰色转变为灰白色, 表明长石矿物经高温白化。同时, 由于铁镁质成分氧化程度加剧, 试样表观颜色加深, 棕色与黄色区域增多。值得注意的是, 注水冷却组变化程度明显大于空气自然冷却组。随着循环热冲击次数和温度的增加, 试样裂纹数量明显增加, 部分组试样发生了破裂与破碎, 如图 2 所示。

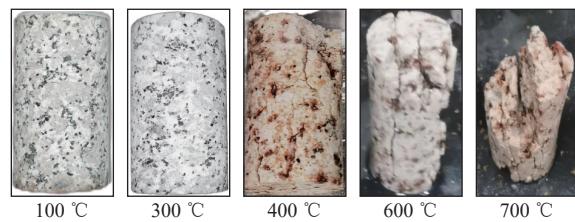


图 2 花岗岩表观特征变化
Fig.2 Changes in the apparent characteristics of granites

2.2 CT 扫描结果

CT 成像过程中, X 射线在穿过被检测岩体后, 其强度将受到一定程度的衰减, 而不同的矿物组分对 X 射线的吸收能力也各不相同, 随着矿物密度增大, 其对 X 射线的吸收能力也随之增大, 从而在 CT 影像上显示出较高的亮度。测试结果表明, 花岗岩的主要矿物成分中, 密度最大的是云母, 它能很好地吸收 X 射线, 在 CT 灰度图上显示出最亮的灰度, 石英次之, 最后是长石, 表

现很暗。另外,岩石在循环热冲击过程中会出现裂隙,在 CT 图像表现出近似于黑色区域。因此,可以采用阈值分割^[32-33]将其从岩石基质中分离出来。图 3 为 CT 扫描和定量分析的具体流程。

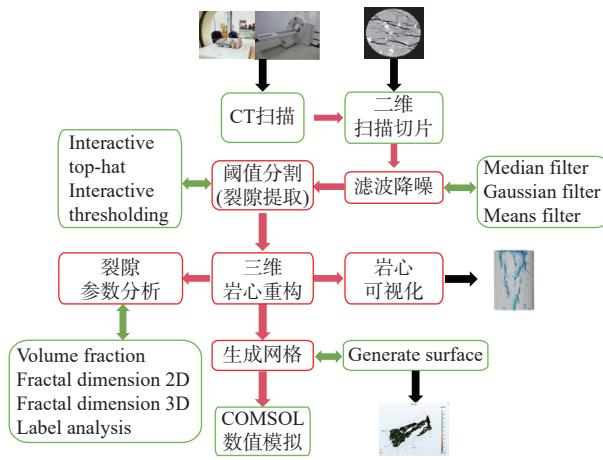


图 3 CT 处理流程

Fig.3 Flow chart of CT scans and quantitative analysis

2.2.1 二维扫描切片与三维重构模型

通过上述流程对花岗岩扫描结果进行处理,二维 CT 扫描切片图像如图 4 所示。当温度和循环次数较低时,切片图像观察到花岗岩矿物成分十分紧密结合,未发现微裂纹。当温度达到 300 °C、循环次数 15 次时,可观察 2~3 条少许微裂纹产生;继续加热到 400 °C,微裂纹数量增加,并随循环次数增加产生了更大裂隙,试件表面能够明显观察到裂纹产生。直到 600~700 °C 高温条件下,试样表面发生破损,水冷却组破裂程度远大于自然冷却组。CT 扫描切片中微裂纹主要以石英与长石晶界间的开裂为主,因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。循环热冲击产生的微裂纹多集中于岩石边缘或端部,特别是注水冷却的花岗岩样品,在温度梯度剧变过程中岩石边缘的裂隙变化程度更大。

图 5 展示了 5 次循环热冲击后花岗岩 CT 扫描三维重构结果与裂隙空间分布特征。图中灰色区域为花岗岩基质,深蓝色表示经过阈值分割后提取出的岩石内部热损伤裂隙。根据图 3 数据处理流程,对分割后的裂隙结构进行 Label Analysis 分析,可以获得裂隙的开度、产状、孔隙体积等参数。

当热处理温度较低时(200 °C 以下)基本无裂隙产生。温度升高到 200 °C 时有少量微裂纹产生,离散分布于花岗岩内部,连通性较差。200 °C 自然冷却条件下花岗岩的平均孔隙体积为 $1.77 \times 10^8 \mu\text{m}^3$, 200 °C 注水冷却条件下孔隙体积为 $2.75 \times 10^8 \mu\text{m}^3$ 。花岗岩内部微裂

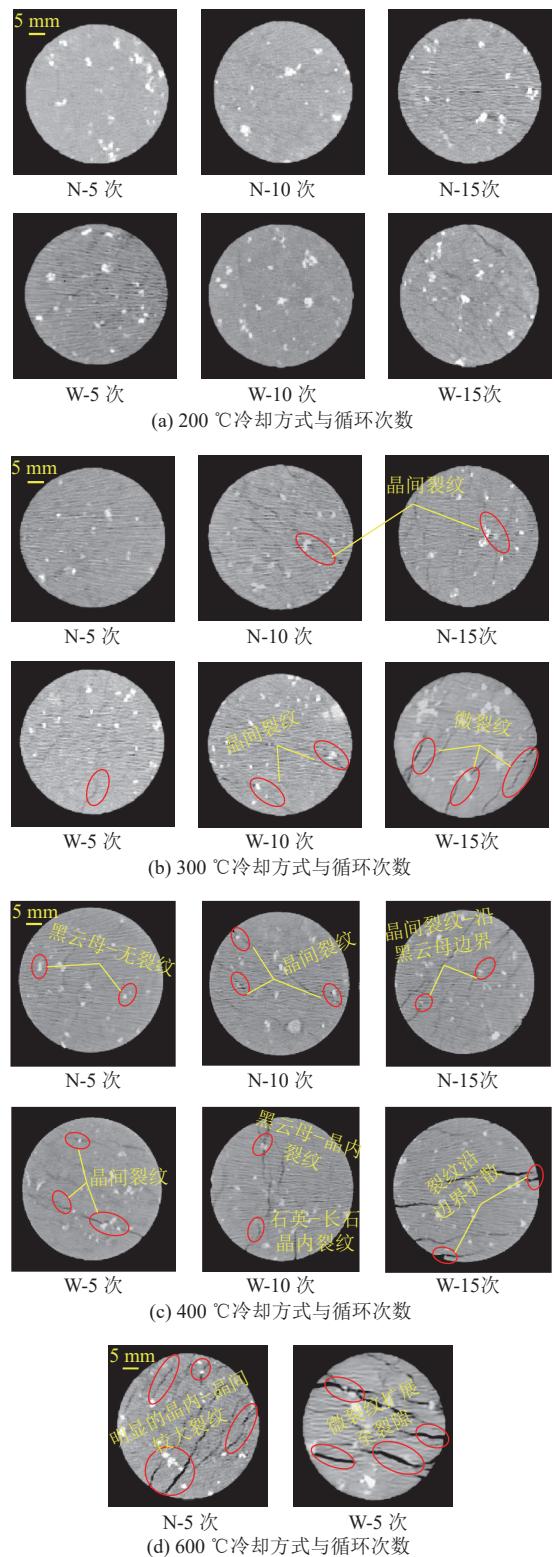


图 4 花岗岩 CT 扫描二维切片

Fig.4 2D CT scan slices of granites

隙结构极其微小且分布十分离散,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 °C 时,出现了体积为 $10^9 \mu\text{m}^3$ 的孔裂隙,但数量上仍以极微小孔隙为主。

随着热处理温度升高至 400 °C 时裂隙显著增加,

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。孔隙体积大多为 $(10^8 \sim 10^9) \mu\text{m}^3$, 数量上仍以微小孔隙为主, 水冷却组裂隙结构明显多于自然冷却组, 并且裂隙大多数沿边界扩展。由于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 β 相变^[34], 矿物体积膨胀使得岩石内部微裂隙增多, 其力学性质受到一定影响。晶体结构改变加速了石英晶粒内部热破裂过程。因此, 当温度达到 600°C 及以上时, 热致裂纹显著增多, 细小裂缝逐渐扩展合并成较大的裂缝, 并产生大量裂隙。 600°C 水冷却组花岗岩内部出现了平均体积为 $4.69 \times 10^9 \mu\text{m}^3$ 的微孔隙, 其裂隙开度最大达到 3.05 mm , 平均裂隙开度 0.48 mm , 裂隙倾角最大 90° , 平均裂隙倾角

71.58° , 裂隙方位角 $[180^\circ, -180^\circ]$, 平均方位角 1.45° 。自然冷却组孔隙平均体积 $2.46 \times 10^9 \mu\text{m}^3$ 。此时, 花岗岩试样表面发生严重损伤, 其裂隙体积最大达到 $10^{12} \mu\text{m}^3$, 花岗岩内部的孔隙数量亦显著增多。岩石整个分析区域热损伤更严重, 花岗岩内部结构损坏, 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地出现在岩样表面及端部位置, 尤其是水冷却组样品, 这是由于在注水冷却过程中, 岩石样品边缘与内部结构之间温度存在时间梯度和空间梯度, 导致岩石边缘处的裂纹密度更大。并且, 水还会与矿物颗粒之间的胶结物质发生溶解反应, 进一步加剧岩石的损伤程度。

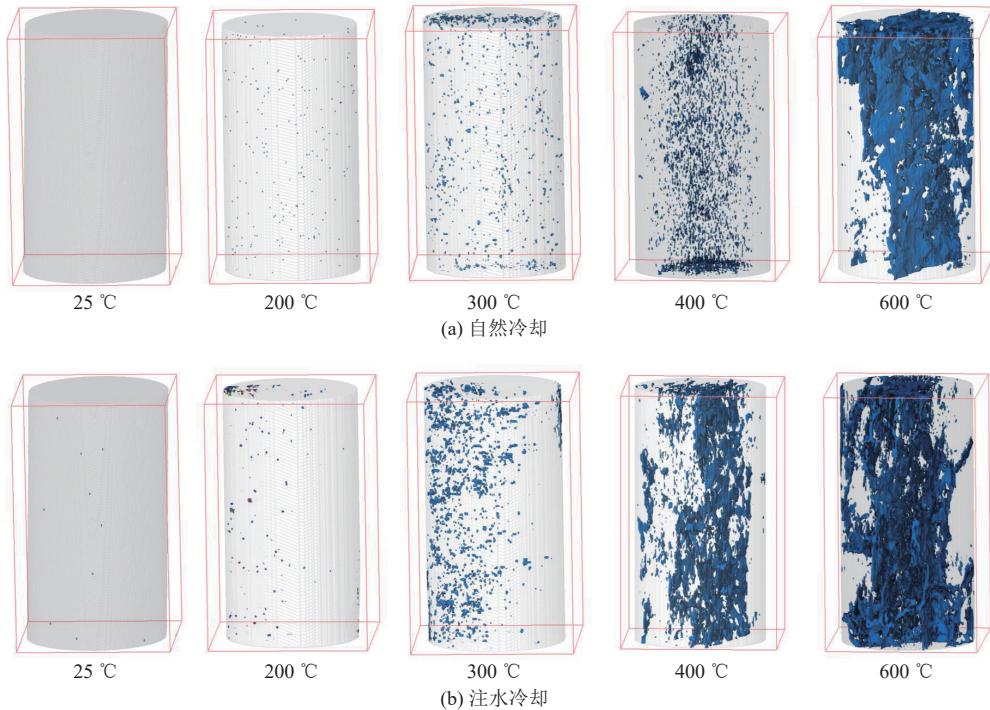


图 5 经 5 次循环热冲击作用下花岗岩裂隙三维重构模型

Fig.5 Reconstructed 3D models of fractures in granites subjected to five thermal shock cycles

2.2.2 分形维数与体积分数

裂隙分形维数^[35]通常采用盒子维数来统计分析岩石热破裂裂隙密度^[36], 相较于其他方法, 该方法更简单且数据结果相似程度更高。

盒子分形维数的基本原理就是使用不同边长的方格去覆盖目标图像, 算出其中所包含目标区域内的方格数量, 再通过不断变化方格边长 δ 的大小, 得到对应的方格数量 $N(\delta)$, 然后绘制 $\lg N(\delta)$ 对 $\lg N(1/\delta)$ 的曲线, 通过线性回归拟合求得该曲线的斜率即为分形维数 D 。盒子分形维数表达式:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(\delta)}{\lg N(1/\delta)} \quad (1)$$

通过上述方法开展高温花岗岩在不同温度梯度、循环冲击次数与冷却方式下孔隙分形特征变化规律研究, 总共选取了 130 张质量较好的 CT 切片进行分析处理, 从上到下依次编号 1~130, 计算阈值分割后每层切片对应的二维分形维数 D_1 和裂隙体积分数并绘制 CT 扫描切片层数与之对应关系如图 6 所示。通常二维 D_1 一般取值 1~2; 三维 D_2 取值一般 2~3。

由图 6 可以看出, 分形维数与体积分数沿着切片层数方向分布不均匀, 表明花岗岩内部孔隙随机分布。随着温度升高、循环次数增多, 分形维数与体积分数越大。整体对比来看, 注水冷却组分形维数与体积分数远大于自然冷却组, 说明水冷却对岩石致裂效果更加显著。最

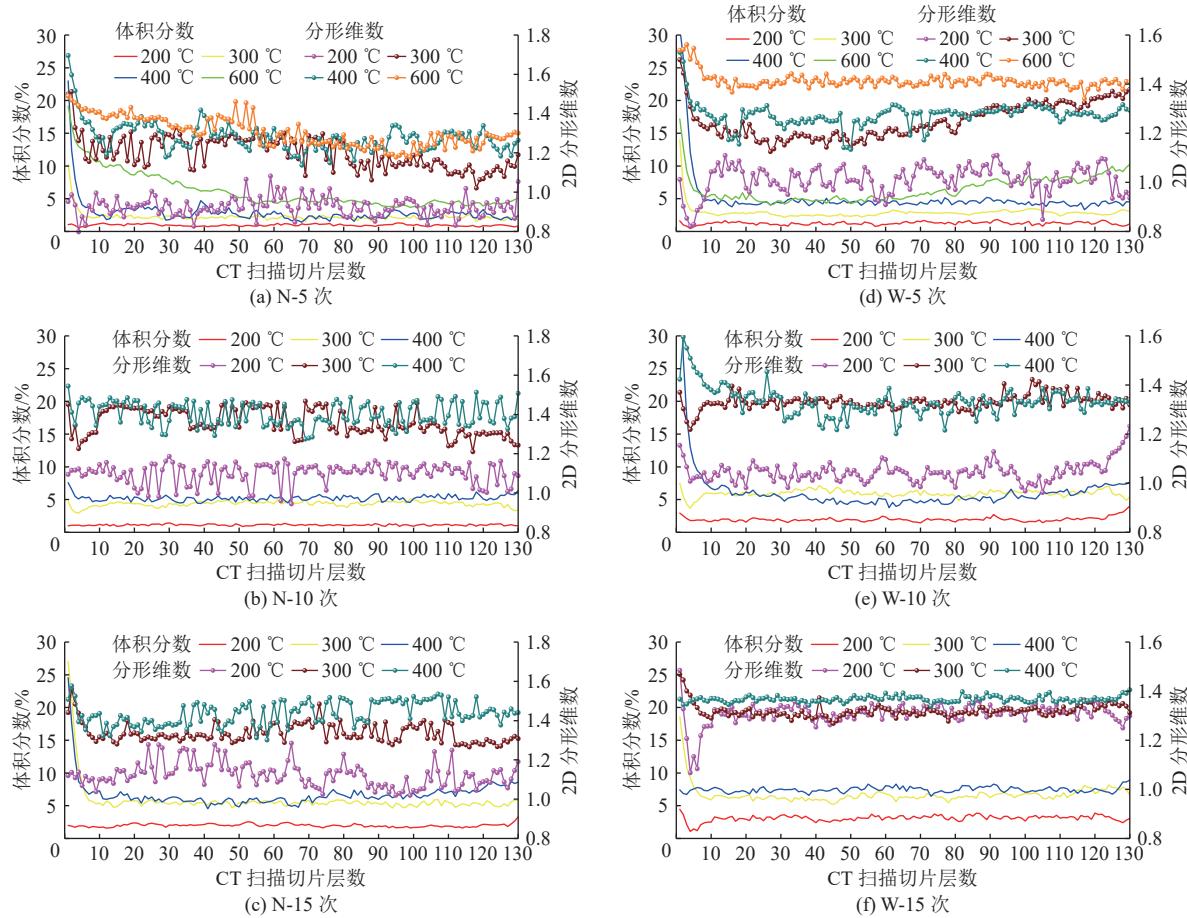


图 6 二维分形维数与体积分数在每层切片上分布情况

Fig.6 Distributions of 2D fractal dimensions and volumetric fractions on various CT scan slices

后计算了三维分形维数 D_3 , 以及每组温度循环下二维分形维数与裂隙体积分数平均值(表 1)。

两种冷却方式下 2D 平均分形维数与 3D 分形维数的关系如图 7 所示, 以 2D 平均分形维数为横坐标、3D

分形维数为纵坐标, 绘制数据点并拟合关系曲线。由此可见 2D 平均分形维数与 3D 分形维数具有高度线性相关性, 因此可以应用体积分数、分形维数等特征对热冲击损伤后岩石内部裂隙进行定量表征。

表 1 裂隙分形维数与体积分数
Table 1 Fractal dimensions and volumetric fractions of fractures

实验方案	2D 平均分形维数			平均体积分数/%			3D 分形维数		
	5次	10次	15次	5次	10次	15次	5次	10次	15次
N-200	0.93	1.10	1.13	0.96	1.12	2.02	1.84	1.98	2.01
W-200	1.01	1.05	1.31	1.25	2.03	3.12	1.90	2.03	2.25
N-300	1.21	1.36	1.34	2.27	4.36	5.83	2.25	2.21	2.23
W-300	1.20	1.33	1.32	2.91	5.97	6.72	2.15	2.23	2.24
N-400	1.25	1.41	1.44	2.88	5.29	6.74	2.08	2.24	2.28
W-400	1.28	1.34	1.37	5.02	6.30	7.49	2.22	2.24	2.30
N-600	1.31			6.11			2.23		
W-600	1.42			6.47			2.36		

注: N-200 表示花岗岩试样加热至 200 °C 后自然冷却; W-200 表示花岗岩试样加热至 200 °C 后注水冷却, 其他同。

2.3 纵波波速

岩石细观结构损伤会对其弹性波波速产生显著影响, 通过纵波波速衰减率和波速损伤因子评估热冲击前

后花岗岩的热损伤程度。使用 ZBL-U5100 非金属超声探测仪沿轴向方向进行 5 次测试, 并取平均值作为结果。纵波波速岩石损伤因子 D_p 表达式如下^[37]:

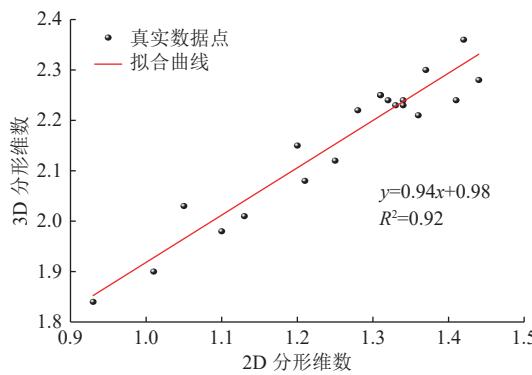


图 7 2D、3D 分形维数拟合关系

Fig.7 Fitted relationship between 2D and 3D fractal dimensions

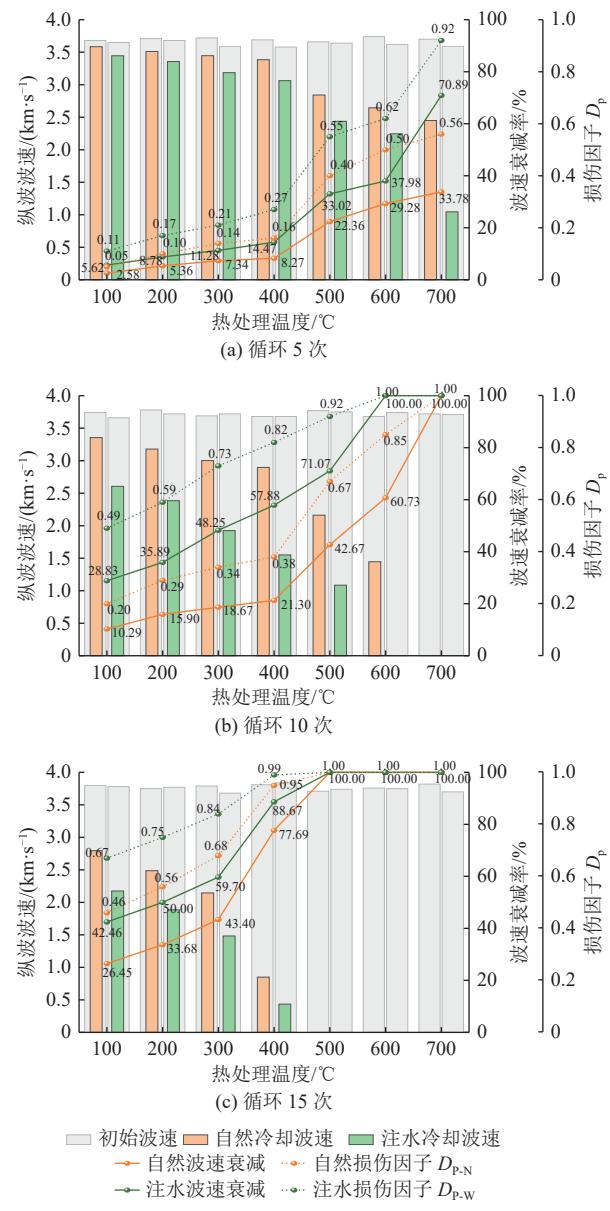
$$D_p = 1 - \left(\frac{v_p}{v_f} \right)^2 \quad (2)$$

循环热冲击作用下花岗岩样品纵波波速变化如图 8 所示。经测试, 初始状态花岗岩平均纵波波速为 3.72 km/s, 最大值为 3.84 km/s, 最小值 3.58 km/s。以 5 次循环冲击为例, 当热处理温度为 100~400 ℃ 时, 自然冷却与注水冷却两种方式作用后花岗岩纵波波速衰减率呈线性缓慢增加趋势, 说明该温度范围内高温冷却循环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。当温度为 400 ℃ 时, 自然冷却组与注水冷却组的波速衰减率突然有一个急剧上升趋势。此时, 自然冷却与注水冷却花岗岩波速分别下降 8.27%、14.47%。当热处理温度超过 400 ℃ 后, 花岗岩纵波波速衰减率显著增加, 热损伤程度加剧, 并产生大量微裂纹。随着循环次数增多, 波速衰减率变大, 500 ℃ 时自然冷却在 5 次、10 次、15 次循环热冲击作用下波速分别下降了 22.36%、42.67%、100.00%, 且注水冷却组分别下降了 33.02%、71.07%、100.00%。由于石英在 573 ℃ 时会发生 α - β 相变体积膨胀^[38], 当温度达到 600~700 ℃ 时, 岩石损伤进一步加剧, 产生更大的裂隙甚至试样发生破碎。

实验结果表明, 两种冷却方式下损伤后纵波波速都有显著下降, 且随温度升高、循环次数增加, 纵波波速下降更为明显。在整个热处理过程中, 水冷却组的波速衰减率大于自然冷却组, 表明注水冷却处理的花岗岩内部受损更严重。注水冷却形成了更高的温度梯度, 导致高温花岗岩急剧冷却, 从而引起岩石内部产生较大的热应力, 这种热应力的增大促进了岩石内部裂纹的扩展。部分试样甚至发生了完全破坏, 导致无法测得纵波波速数据。

3 基于微观孔隙结构特征的 COMSOL 数值模拟

岩体内连通孔隙裂隙结构是流体运移的主要通道,

图 8 花岗岩波速衰减率与损伤因子
Fig.8 P-wave velocity attenuation rates and damage factors of granites

渗透率是影响地热开发利用的关键因素。研究基于热冲击循环致裂花岗岩实验使岩样产生裂隙, 通过 CT 扫描裂隙提取获得真实三维裂隙网络。据图 3 处理流程, 对裂隙花岗岩三维重构, 如图 9 所示, 首先提取出三维裂隙结构再对模型进行简化, 通过删除孤立孔隙、生成面网格, 并输出 STL 模型文件。利用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合软件中单相流模块来模拟微观孔隙空间的流体渗流。

3.1 边界条件与网格划分

根据 CT 扫描结果对数字岩心裂隙结构切割划分为 24 000 $\mu\text{m} \times 24 000 \mu\text{m} \times 91 000 \mu\text{m}$ 的矩形区域。对划分出的裂隙结构生成网格, 导出 STL 格式, 经过 Magics 对网格出现数据冗余, 网格不闭合等错误修复, 如

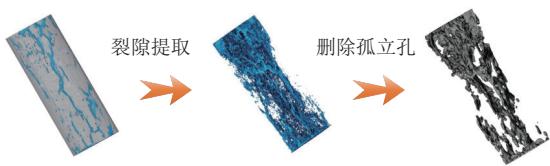


图 9 三维重构裂隙提取与模型优化
Fig.9 Extraction of reconstructed 3D fractures and model optimization

图 10 所示。最后导入 COMSOL 中, 得到网格质量效果良好, 其网格参数分布, 如图 11 所示。据统计网格定点

66 867, 四面体单元 224 612, 三角形单元 110 624, 边单元 30 607, 顶点单元 11 681, 最小单元质量 0.005 494, 平均单元质量 0.563 9, 网格体积 $5.96 \times 10^{12} \mu\text{m}^3$ 。

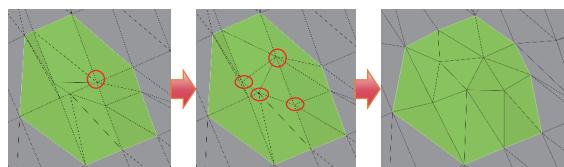
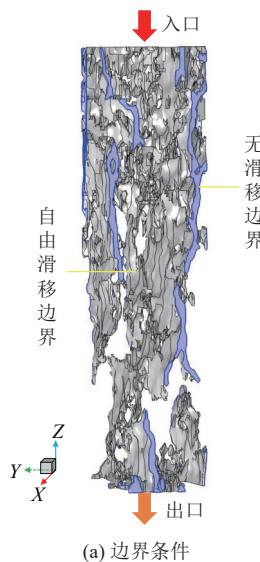


图 10 Magics 网格修复
Fig.10 Magics grid repair



(a) 边界条件

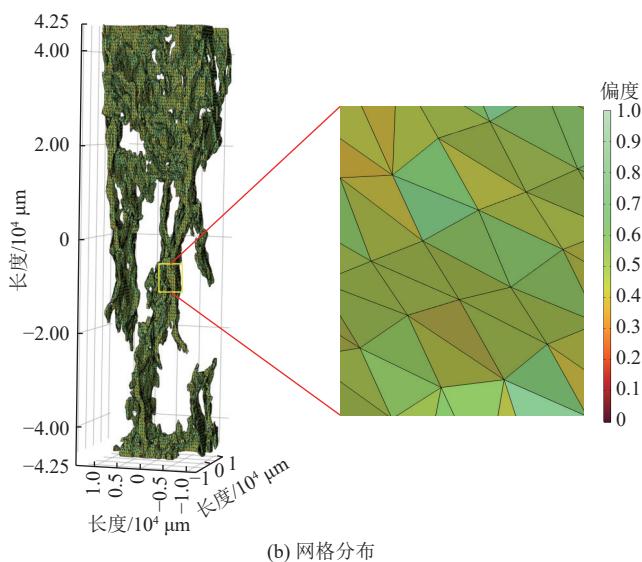


图 11 边界条件与网格单元质量分布
Fig.11 Boundary conditions and quality distributions of grid cells

假设孔隙流体不可压缩, 忽略惯性项(斯托克斯流)

与重力作用, 流动为蠕动流。本研究采用 COMSOL 单相流模块蠕动流来模拟微观孔隙空间的流体流动。该模块基于不可压缩流体 Navier-Stokes(N-S) 方程来模拟孔隙中的流动^[39]。该方程遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。

$$\nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (5)$$

在入口和出口处采用恒压边界条件, 即:

$$p = p_{\text{in}}, \mathbf{n} \cdot \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$p = p_{\text{out}}, \mathbf{n} \cdot \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

无滑移壁:

$$\mathbf{u} = 0 \quad (8)$$

自由滑移壁:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_n - (\mathbf{K}_n \times \mathbf{n}) \mathbf{n} = 0, \mathbf{K}_n = \mathbf{K} \mathbf{n} \quad (10)$$

本文对分割好的模型进行了 X 、 Y 、 Z 三个方向的流动模拟, 分别得到了渗流压力场、速度场流场分布。根据达西定律计算渗透率, 以 Z 轴渗流模拟为例, 加载边界条件(图 11a、表 2)。

采用水作为渗流流体, 并在软件中设置基本参数, 见表 2。

表 2 边界条件
Table 2 Boundary conditions

流体密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	入口水压 $p_{\text{in}} / \text{MPa}$	出口水压 $p_{\text{out}} / \text{MPa}$
1 000	1.01×10^{-3}	1.1	0.1

3.2 渗流压力场与速度场流线分布特征

基于 COMSOL 自带后处理模块分析(渗流压力场、速度场与速度流线)描述了流体流动过程中孔隙压力、渗流速度和流道变化。在 X 、 Y 、 Z 三个方向, 每个方向上压力场分布不同。在流场图像中, 由于孔隙结构的非均质性, 孔隙模型各部分速度是不同的。在微裂缝中速度迅速增加, 特别是当裂缝通道较窄时, 流体流速急剧

增加。由于孔隙结构高度不规则性分布差异, 流体的流动路径并没有覆盖整个孔隙空间, 不可避免地会导致流体流动停滞或回流。从图 12 中的速度流线来看, 虽然所有孔隙都是连接的, 但孔隙渗流路径只出现在部分孔

隙空间。造成这一现象的原因是流体在孔隙空间结构真实流动很复杂, 且非达西流动不符合 Navier-Stokes 方程。如图 13 所示, 在几何模型中, 各方向的渗流压力场分布都不同, 这也反映了各向异性特征。

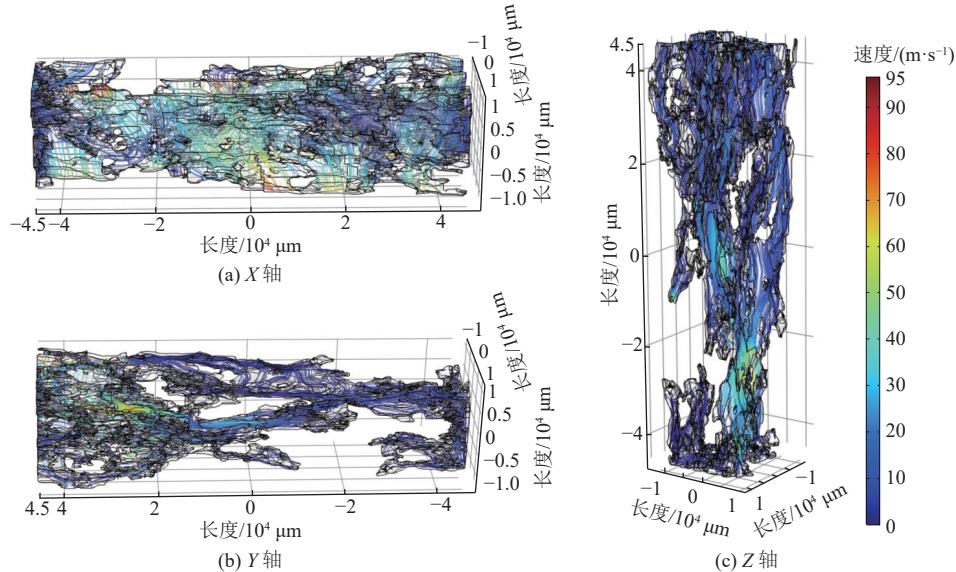


图 12 速度场流线分布
Fig.12 Streamline distribution of the velocity field

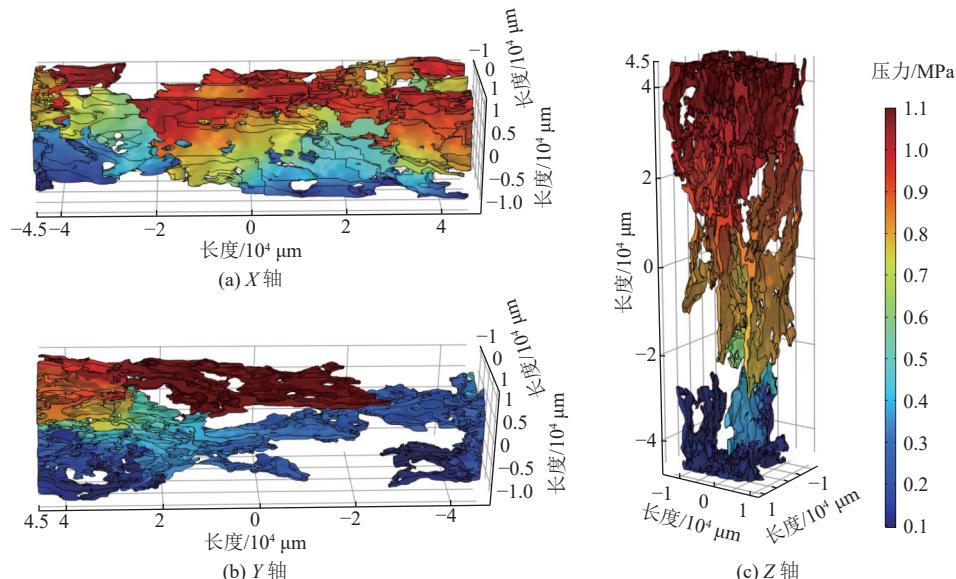


图 13 渗流压力场分布
Fig.13 Distribution of the seepage pressure field

对出口边界流速进行表面积分, 获得通过裂隙花岗岩出口体积流量, 并应用达西定律推导出绝对渗透率计算式。可以得到单相流在 X、Y 和 Z 方向上的绝对渗透率^[40]。达西定律^[41]计算公式可以表示为:

$$k = \frac{\mu QL}{A \Delta p} \quad (11)$$

表 3 为绝对渗透率的模拟结果, X 轴方向渗透率最

高达到了 $1.19 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, Y 轴和 Z 轴方向相对较低, 3 个方向平均渗透率为 $5.74 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, 整体渗透率较高。为进一步评估这一结果的意义, 参考了相关文献中关于花岗岩渗透率的测试结果。据文献所述, 花岗岩的渗透率通常在 $(10^{-12} \sim 10^{-17}) \text{ m}^2$ ^[42-46]。与文献中所报道的典型渗透率范围相比, 模拟结果的平均渗透率显著高于这一范围, 表明经过循环热刺激后, 花岗岩的渗透率得到了

显著的提升。这一结果的主要原因是所选定的模型是 600 ℃ 下 5 次循环注水冷却组的岩样, 其内部受到严重的损伤, 形成了较大的连通裂隙。3 个方向上的渗透率

的差异性也证实了裂隙非均匀分布, 此结果突显了循环热刺激方法的有效性。

表 3 在不同方向上的渗透率模拟结果
Table 3 Simulation results of permeability in different directions

测试方向	$Q/(10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$A/10^{-4} \text{ m}^2$	$L/10^{-2} \text{ m}$	渗透率 $k/10^{-10} \text{ m}^2$	平均渗透率 $/10^{-10} \text{ m}^2$
X	8.387 1	1.655 7	2.351 6	11.90	
Y	1.845 0	1.884 1	2.390 6	2.34	5.74
Z	0.837 4	2.570 5	9.114 0	2.97	

4 结论

(1) 研究分析了热刺激致裂高温花岗岩微观结构参数及纵波波速变化, 并提出了构建真实三维孔隙裂隙网络模型的方法。这为深层地热开发和复杂地质条件下的流体渗流研究提供了新的思路和工具。

(2) 对热处理后的花岗岩试样进行 CT 图像三维重构, 明晰了岩样内部孔隙、裂隙分布特征。计算了分形维数、体积分数和孔隙体积等参数。在 100~300 ℃ 体积分数约为 2%, 分形维数约为 1.2。随着循环次数的增加, 这些量也呈正相关增大。在 400 ℃ 之后, 内部孔隙迅速扩展连通形成大的孔隙裂隙, 平均孔隙体积达到 $10^9 \mu\text{m}^3$ 量级, 体积分数也是增长到了 5% 左右。随着温度继续升高, 石英发生相变, 导致内部严重损伤, 裂隙体积最大达到 $10^{12} \mu\text{m}^3$, 裂隙开度最大达到 3.05 mm, 造成试样破碎。

(3) 弹性波波速能够反映岩石细观结构损伤情况。测试结果表明: 当花岗岩温度 $t \leq 400$ ℃ 时, 自然和注水两种方式作用下花岗岩的纵波波速衰减率呈线性缓慢增加。当 $t \geq 400$ ℃ 后, 纵波波速衰减率急剧增加, 产生较多微裂纹并连通形成大的裂纹。整个过程中, 水冷却组损伤因子始终大于自然冷却, 表明水中冷却会加剧岩石内部结构损伤。此外, 研究认为 400 ℃ 是一个重要的阈值温度。

(4) 基于 600 ℃ 下 5 次循环注水冷却后 CT 扫描结果, 构建了真实孔隙裂隙网络模型。在空间 X 、 Y 、 Z 三个方向上进行渗流模拟, 所得平均渗透率: $5.74 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。与相关文献渗透率测试相比, 这显著提高了花岗岩的渗透性, 验证了循环热刺激方法的有效性。

(5) 由于扫描 CT 精度有限, 微米和纳米级别的微小孔隙无法识别, 这在一定程度上影响了裂隙三维重建结果的准确性。本研究的主要目基于真实岩样内部裂隙情况构建三维网格, 实现流体数值模拟计算, 为深层地热开发提供了一种新的研究思路。目前的研究多集中于均质孔隙和随机生成的裂隙结构, 无法模拟真实的

地质情况。因此, 后续研究将继续改进模型, 加入多场耦合因素结合渗流场、温度场、固体力学场和化学场等, 更准确地模拟真实地质情况。该研究可为今后裂隙岩体三维重构、细观孔隙结构定量化表征及流体渗流研究提供一定借鉴。

符号注释:

A 为模型横截面积, m^2 ; F 为体积力, N/m^3 ; \mathbf{I} 为单位矩阵; L 为沿流向方向长度, m ; \mathbf{n} 为方向向量; p 为压强, Pa ; p_{in} 、 p_{out} 分别为入口和出口的压力值, Pa ; Δp 为试样上的压降, Pa ; Q 为出口的速度表面积分, m^3/s ; u 为流速, m/s ; v_f 为损伤前岩石中的纵波波速, km/s ; v_p 为损伤后岩石的纵波波速, km/s ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\mu \nabla^2 u$ 为黏性力; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- 汪集旸, 孔彦龙, 段忠丰, 等. “双碳”目标下煤田区地热资源开发利用与储能技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 1–11.
WANG Jiyang, KONG Yanlong, DUAN Zhongfeng, et al. Geothermal energy exploitation and storage in coal field under the dual carbon goal[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 1–11.
- 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.
LI Gensheng, WU Xiaoguang, SONG Xianzhi, et al. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 343–364.
- ZHU Jialing, HU Kaiyong, LU Xinli, et al. A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects[J]. Energy, 2015, 93: 466–483.
- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 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 & Technology Review, 2012, 30(32):

- 25–31.
- [5] 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 等. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1139–1152.
XU Tianfu, YUAN Yilong, JIANG Zhenjiao, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: International experience and China prospect[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(4): 1139–1152.
- [6] 李德威, 王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2015, 40(11): 1858–1869.
LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 2015, 40(11): 1858–1869.
- [7] BREEDE K, DZEBISASHVILI K, LIU Xiaolei, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future[J]. *Geothermal Energy*, 2013, 1(1): 4.
- [8] ZHUANG Dengdeng, YIN Tubing, LI Qiang, et al. Effect of injection flow rate on fracture toughness during hydraulic fracturing of hot dry rock (HDR)[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 260: 108207.
- [9] KALAM S, AFAGWU C, AL JABERI J, et al. A review on non-aqueous fracturing techniques in unconventional reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 95: 104223.
- [10] 冯波, 许佳男, 许天福, 等. 化学刺激技术在干热岩储层改造中的应用与最新进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(5): 577–591.
FENG Bo, XU Jianan, XU Tianfu, et al. Application and recent progresses of chemical stimulation on hot dry rock reservoir modification[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(5): 577–591.
- [11] PAN Jiliang, XI Xun, WU Xu, et al. Physical properties evolution and microscopic mechanisms of granite modified by thermal and chemical stimulation[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 41: 102633.
- [12] SIRATOVICH P A, VILLENEUVE M C, COLE J W, et al. Saturated heating and quenching of three crustal rocks and implications for thermal stimulation of permeability in geothermal reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 265–280.
- [13] 巩亮, 韩东旭, 陈峰, 等. 增强型地热系统关键技术研究现状及发展趋势[J]. *天然气工业*, 2022, 42(7): 135–159.
GONG Liang, HAN Dongxu, CHEN Zheng, et al. Research status and development trend of key technologies for enhanced geothermal system[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 135–159.
- [14] 邹保平, 赵阳升. 600 °C 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 892–898.
XU Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600 °C[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 892–898.
- [15] WU Yangchun, HUANG Linqi, LI Xibing, et al. Effect of cooling methods on mechanical behaviors and thermal damage distributions of granite: Experiments and simulations[J]. *Geothermics*, 2023, 114: 102796.
- [16] SHI Xiangchao, GAO Leiyu, WU Jie, et al. Effects of Cyclic Heating and Water Cooling on the Physical Characteristics of Granite[J]. *Energies*, 2020, 13(9): 1–18.
- [17] 古启雄, 黄震, 钟文, 等. 高温循环后花岗岩孔隙结构与物理力学特性演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(6): 1450–1465.
GU Qixiong, HUANG Zhen, ZHONG Wen, et al. Study on the variations of pore structure and physico-mechanical properties of granite after high temperature cycling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(6): 1450–1465.
- [18] 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 property evolution of granite after cyclic cooling at different temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1797–1807.
- [19] 朱振南, 王殿永, 杨圣奇, 等. 不同冷却速率下干热花岗岩渗透率演化特征对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(2): 385–398.
ZHU Zhennan, WANG Dianyong, YANG Shengqi, et al. A comparative study on permeability evolution of hot dry granite under different cooling rates[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(2): 385–398.
- [20] ZHU Dong, JING Hongwen, YIN Qian, et al. Mechanical characteristics of granite after heating and water-cooling cycles[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(4): 2015–2025.
- [21] CUI Yuan, XUE Lei, ZHAI Mengyang, et al. Experimental investigation on the influence on mechanical properties and acoustic emission characteristics of granite after heating and water-cooling cycles[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 88.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] BIRD M B, BUTLER S L, HAWKES C D, et al. Numerical modeling of fluid and electrical currents through geometries based on synchrotron X-ray tomographic images of reservoir rocks using Avizo and COMSOL[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 73: 6–16.
- [25] FAN Nan, WANG Jiren, DENG Cunbao, et al. Quantitative characterization of coal microstructure and visualization seepage of macropores using CT-based 3D reconstruction[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 81: 103384.
- [26] NI Xiaoming, MIAO Jie, LV Runsheng, et al. Quantitative 3D spatial characterization and flow simulation of coal macropores based on μ CT technology[J]. *Fuel*, 2017, 200: 199–207.
- [27] 夏彬伟, 廖传斌, 罗亚飞, 等. 基于分形理论的煤岩裂隙网络渗

- 透率模型[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8): 107–115.
- XIA Binwei, LIAO Chuanbin, LUO Yafei, et al. Fractal theory-based permeability model of fracture networks in coals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 107–115.
- [28] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温影响下花岗岩孔隙分布的分形结构及模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2426–2438.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Fractal structure and model of pore size distribution of granite under high temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2426–2438.
- [29] CAO Rihong, FANG Lei, QIU Xianyang, et al. Effect of heating–water cooling cycle treatment on the pore structure and shear fracture characteristics of granite[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 286: 109263.
- [30] 黄彦华, 陶然, 陈笑, 等. 高温后花岗岩断裂特性及热裂纹演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 739–747.
- HUANG Yanhua, TAO Ran, CHEN Xiao, et al. Fracture behavior and thermal cracking evolution law of granite specimens after high-temperature treatment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4): 739–747.
- [31] 姜德义, 郭朋煜, 范金, 等. 升温速率对高温作用后砂岩的宏观性质影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2675–2688.
- JIANG Deyi, GUO Pengyu, FAN Jinyang, et al. Effect of heating rate on macro and mesoscopic properties of sandstone after high temperature[J]. *Geotechnics*, 2022, 43(10): 2675–2688.
- [32] 王凯, 付强, 徐超, 等. 考虑射束硬化的煤岩 CT 数据阈值分割方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 11–22.
- WANG Kai, FU Qiang, XU Chao, et al. Threshold segmentation method of CT scanning data of coal and rock samples considering beam hardening effect and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(4): 11–22.
- [33] 吴国铭, 李熙喆, 高树生, 等. 基于分形理论探究碳酸盐岩 CT 图像二值化最佳阈值[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5): 1025–1032.
- WU Guoming, LI Xizhe, GAO Shusheng, et al. Optimal thresholding in carbonate reservoir CT image binarization based on fractal theory[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(5): 1025–1032.
- [34] 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(1): 305–322.
- [35] 董赟盛, 邵保平, 何水鑫, 等. 石灰岩热冲击破裂二维分形参数演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 2823–2833.
- DONG Yunsheng, XI Baoping, HE Shuixin, et al. Study on the evolution law of two-dimensional fractal parameters of thermal shock fracture of limestone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Sup.1): 2823–2833.
- [36] 马新仿, 张士诚, 郎兆新. 分形理论在岩石孔隙结构研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 1): 2164–2167.
- MA Xinfang, ZHANG Shicheng, LANG Zhaoxin. Application of fractal theory to pore structure research[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(Sup.1): 2164–2167.
- [37] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 408–411.
- LIU Quansheng, XU Xichang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(4): 408–411.
- [38] ZHU Zhennan, KEMPKA T, RANJITH P G, 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.
- [39] 王刚, 杨鑫祥, 张孝强, 等. 基于 DTM 阈值分割法的孔隙率数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 119–129.
- WANG Gang, YANG Xinxiang, ZHANG Xiaoqiang, et al. Numerical simulation of gas flow in pores and fissures of coal based on segmentation of DTM threshold[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(1): 119–129.
- [40] ZHAO Yixin, SUN Yingfeng, LIU Shimin, et al. Pore structure characterization of coal by synchrotron radiation nano-CT[J]. *Fuel*, 2018, 215: 102–110.
- [41] SHARP J M Jr, SIMMONS C T. The compleat Darcy: New lessons learned from the first English translation of Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon[J]. *Ground Water*, 2005, 43(3): 457–460.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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): 198–203.
- 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): 198–203.
- [45] 张凯, 段志波, 张帆, 等. 循环高温冷却作用后花岗岩渗透率演变试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9753–9759.
- ZHANG Kai, DUAN Zhibo, ZHANG Fan, et al. Experiment on evolution of granite permeability after cyclic high temperature cooling[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(22): 9753–9759.
- [46] 高红梅, 兰永伟, 郭楠. 温度作用后花岗岩微观孔隙结构和渗透率的研究[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 127–132.
- GAO Hongmei, LAN Yongwei, GUO Nan. Study on microscopic pore structure and permeability of granite after temperature action[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(13): 127–132.

(责任编辑 郭东琼)