



热损伤花岗岩物理力学特性及损伤机制研究进展

吴 杨, 谭 立

(中冶建工集团有限公司, 重庆 400080)

摘要: 温度效应对岩石产生的损伤破坏一直被岩石力学界广为关注, 花岗岩作为深部开采、地热开发、高放射性核废料处置库等的常见基岩, 对其在温度作用后物理力学特征及损伤机制研究至关重要。文章通过整理分析国内外花岗岩热损伤相关文献, 系统综述了温度作用后花岗岩的物理力学特性及损伤机制研究进展与成果。研究表明: 1) 花岗岩宏观物理力学特性变化受温度影响较为明显, 如温度升高, 花岗岩体积、渗透率等物理参数呈上升趋势, 抗拉、抗压强度等力学参数呈下降趋势, 受岩石的各项异性影响, 不同花岗岩物理力学参数对温度的响应程度不同; 2) 细微观形貌特征可以从矿物成分和裂纹演化角度解释花岗岩宏观物理力学特性变化原因, 不同温度效应下花岗岩的不同矿物成分会发生系列反应, 裂纹的发育扩展会致使花岗岩产生不同程度损伤; 3) 基于纵波波速、弹性模量和岩石强度等参数可建立花岗岩的热损伤方程, 采用数字图像和声发射等实时监测技术和有限元、离散元等数值模拟方法均能直观分析温度效应下花岗岩的裂纹演化规律及损伤特征。研究结果可为温度效应下花岗岩宏观、细观、微观尺度响应特征及损伤关联机制研究提供参考。

关键词: 花岗岩; 温度效应; 耦合作用; 数值模拟

中图分类号: P588.12⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)11-0001-10

doi:10.13402/j.gcjs.2025.11.132

Research progress on physical and mechanical properties and damage mechanism of thermally damaged granite

WU Yang, TAN Li

(China Metallurgical Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 400080, China)

Abstract: The damage and failure of rock caused by temperature effect has been widely concerned by the rock mechanics community. As a common bedrock of deep mining, geothermal development and high-level radioactive nuclear waste disposal, granite is very important for the study of its physical and mechanical characteristics and damage mechanism after temperature action. In this paper, the research progress and achievements of physical and mechanical properties and damage mechanism of granite after temperature action are systematically reviewed by sorting out and analyzing the relevant literatures on thermal damage of granite at home and abroad. The results show that: 1) The change of macroscopic physical and mechanical properties of granite is obviously affected by temperature. For example, with the increase of temperature, the physical parameters such as volume and permeability of granite show an upward trend, while the mechanical parameters such as tensile strength and compressive strength show a downward trend. 2) The fine and microscopic morphology characteristics can explain the reasons for the change of macroscopic physical and mechanical properties of granite from the perspective of mineral composition and crack evolution. Under different temperature effects, different mineral compositions of granite will undergo a series of reactions, and the development and expansion of cracks will cause granite to produce

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 重庆市博士后科学基金(CSTB2023NSCQ-BHX0234)

作者简介: 吴 杨(1996—), 男, 工程师, 从事岩石力学与工程方面的研究。

different degrees of damage. 3) The thermal damage equation of granite can be established based on the parameters such as longitudinal wave velocity, elastic modulus and rock strength. The crack evolution law and damage characteristics of granite under temperature effect can be intuitively analyzed by real-time monitoring technology such as digital image and acoustic emission and numerical simulation methods such as finite element and discrete element. The research results are expected to provide reference for the study of macro, meso and micro scale response characteristics and damage correlation mechanism of granite under temperature effect.

Key words: granite; temperature effect; coupling effect; numerical simulation

能源是人类社会生存和发展的基础性资源,在“碳达峰·碳中和”战略目标下,大力开发高效、清洁的可再生能源对于推动能源结构优化有着积极作用。地热资源是一种典型的清洁能源,因其具有储量大、分布广、运行稳定等特点而备受关注^[1-3]。中国作为世界能源消费第一大国,在可持续发展理念和生态文明建设的背景下,积极开发利用地热资源对于缓解我国能源压力具有重要的现实意义和长远的战略意义^[4-5]。此外,在当前能源转型的大格局下,矿产开采领域也已经逐步向深部资源迈进,深部岩石不同于浅层岩石,始终处于高应力、高温度的环境之中^[6-7]。相关研究表明:不论是干热岩开发过程中的储层致裂技术探索,还是深部开采及高放射性核废料处置库稳定性分析,都离不开深部花岗岩储层^[8-10]。目前,针对温度效应下花岗岩的物理力学特性及损伤机制研究已然成为热点课题之一。

本文针对温度效应下花岗岩热损伤问题,通过整理分析国内外研究成果,从宏观物理力学特性、细观形貌结构、损伤特征研究 3 个方面总结归纳花岗岩在温度效应下的演化规律,展望今后热损伤花岗岩的研究趋势,以期丰富温度效应下花岗岩的理论研究,以便更好地应用于工程实际,提高资源开发效率,保障生产作业安全。

1 温度效应对花岗岩宏观物理力学特性影响

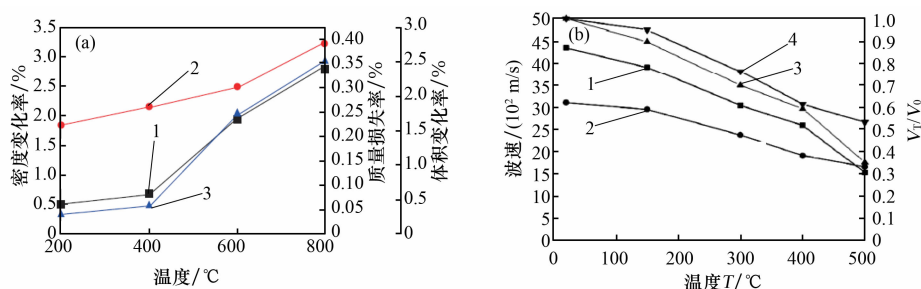
岩石作为一种非均质材料,内部含有各种数量不一、大小不同的原生裂纹和微孔洞等缺陷,在外部环境的影响下,这些缺陷将无时无刻发生细微变化,从而影响岩石原始结构。处于深地高温环境中的花岗岩储层,在温度效应影响下,其物理力学特性将较浅层自然状态下的花岗岩大不相同,在高温和应力耦合作用下,深地花岗岩内

部微裂纹将不断发育、扩展和相互贯通,从而导致自身强度降低。国内外众多学者通过温度处理试验来探索花岗岩在热损伤过后的物理力学特性变化,并取得了丰富的研究成果。

1.1 物理特性影响研究

吴星辉等^[11]研究了 1 050 ℃ 范围内花岗岩的各项物理参数,得到花岗岩的质量损失率、密度降低率和波速衰减率与目标温度升高呈现指数型增长的规律,建立了花岗岩质量、体积和纵波波速与导热系数间的函数关系。贾蓬等^[12]对花岗岩进行了 200 ~ 800 ℃ 高温处理,其质量损失率、体积膨胀率和密度变化率与目标温度的线性关系显著,且体积膨胀主要发生在 400 ~ 600 ℃。ZHANG 等^[13]和 ZHAO 等^[14]从矿物角度认为花岗岩质量损失主要归因于内部附着水、结合水及结晶水在不同目标温度下发生蒸发,其中,附着水在 70 ~ 100 ℃ 蒸发,结合水在 150 ~ 300 ℃ 蒸发,结晶水在 450 ~ 500 ℃ 蒸发。邵保平等^[15]研究了 100 ~ 600 ℃ 内不同目标温度花岗岩的渗透率与体积应力、孔隙压的演化规律,当目标温度超过 500 ℃ 时,花岗岩渗透率将发生阶跃性增长,并通过数据拟合建立了渗透率与目标温度及有效应力的关系式。FENG 等^[16]开展了实时高温下花岗岩的三轴压缩试验,判定 300 ℃ 是鲁灰花岗岩渗透率变化的阈值温度,与 GAUTAM 等^[17]对印度 Jalore 花岗岩应力-应变行为研究结果类似,认为 300 ℃ 是 Jalore 花岗岩物理力学性质急剧变化的临界温度。

图 1 展示了花岗岩典型物理特性随热处理温度的变化规律,温度效应对花岗岩物理特性势必会产生系列影响。总体而言,随着热处理温度升高,花岗岩的质量、波速呈下降趋势,而体积、渗透率呈上升趋势,不同区域、不同埋深花岗岩由于岩石的各向异性,其物理特征参数对热处理



(a) 质量体积试验结果^[18]; (b) 波速试验结果^[19]

1—平均纵波波速; 2—平均横波波速; 3—平均纵波波速归一值; 4—平均横波波速归一值。

图 1 花岗岩典型物理特性随热处理温度的变化规律

温度的响应也各不相同。

1.2 力学特性影响研究

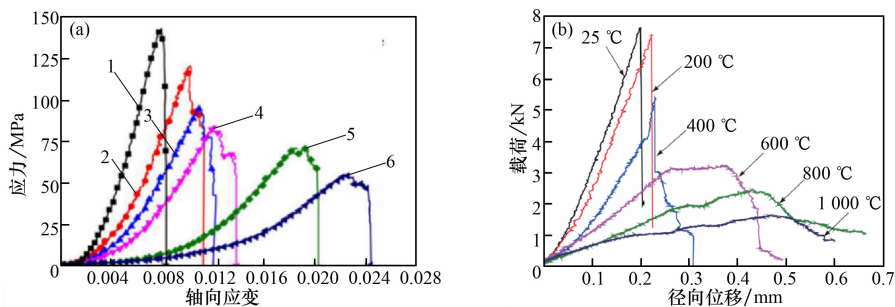
LIU 等^[20]研究了 800 °C 内花岗岩的抗压特性, 认为峰值应力降低主要是花岗岩内部结构损伤引起的, 指出 600 °C 为花岗岩应力-应变曲线脆延转变的临界温度。DWIVEDI 等^[21]研究了 30 ~ 160 °C 范围内印度粉色花岗岩的热力学特性, 认为温度效应产生的热膨胀导致花岗岩原始裂缝闭合, 使得花岗岩更致密, 反而提高了抗压强度。王亚超等^[22]基于巴西劈裂试验和声发射技术研究了不同目标温度下花岗岩的抗拉特性, 其抗拉强度与目标温度呈负相关, 花岗岩断裂面形态随着目标温度升高由光滑平整逐渐向粗糙曲折转化。章蓝月等^[23]采用恒法向力直剪试验研究了 600 °C 内花岗岩的剪切破坏特征, 其抗剪强度与目标温度呈负相关, 在 300 ~ 400 °C 区间力学特性降幅显著, 主要归因于矿物颗粒间的胶结物质在此温度区间被大量分解。黄彦华等^[24]基于半圆盘三点弯曲试验研究了花岗岩在 200 ~ 800 °C 的断裂特性, 其断裂韧度与目标温度呈负相关。图 2 展示了花岗岩典型力学特性随热处理温度的变化规律, 高温作用

下, 花岗岩的抗压、抗拉、抗剪等强度均会发生不同程度降低。

1.3 冷却方式影响研究

除了对高温直接作用后花岗岩物理力学特性的研究之外, 众多学者对高温花岗岩在不同冷却方式后的各项物理力学性能变化也展开了系统研究。

解元等^[27]对比了高温花岗岩在自然冷却和遇水冷却时物理性质变化差异, 认为自然冷却下花岗岩的表观颜色变化比遇水冷却下更明显, 主要是由于自然冷却降温速率慢, 增加了黑云母等矿物的氧化反应时间。靳佩桦等^[28]对花岗岩遇水冷却后的孔隙结构和渗透特性进行了研究, 判定高温花岗岩遇水冷却后孔隙率和渗透率变化的阈值温度为 500 ~ 600 °C。邵保平等^[29]对花岗岩遇水冷却后的力学特性进行了研究, 认为遇水冷却会引起花岗岩的内部温度骤降, 形成热冲击加速岩体结构损伤, 并且遇水冷却对花岗岩抗拉强度的影响程度远高于抗压强度。崔翰博等^[30]开展了 100 ~ 800 °C 热处理温度下花岗岩自然冷却和遇水冷却后的力-声特性试验研究, 在自然冷却工况



(a) 单轴压缩试验结果^[25]; (b) 巴西劈裂试验结果^[26]

1—室温对照组; 2—100 °C; 3—200 °C; 4—400 °C; 5—600 °C; 6—800 °C。

图 2 花岗岩典型力学特性随热处理温度的变化规律

下,花岗岩纵波波速、抗压强度、抗拉强度随热处理温度升高呈直线性下降,而在遇水冷却工况下呈凹线性下降,下凹温度区间在 400 ~ 600 ℃。朱要亮等^[31]对经历自然冷却和遇水冷却的花岗岩开展了动态冲击试验,认为遇水冷却所产生的附加温度应力会加剧花岗岩劣化,导致动力学参数随热处理温度的变化规律要比自然冷却时更明显。KANG 等^[32]对 200 ~ 800 ℃ 这 4 种热处理温度的花岗岩进行了自然冷却、遇水冷却和液氮冷却处理,通过物理力学参数测试发现冷却介质温度越低,对热处理后造成的损伤会越严重,并认为单次作用下由于冷处理时间较短,热处理占据花岗岩劣化原因的主导因素。

2 温度效应对花岗岩细微观形貌结构影响

温度效应下岩石的矿物成分变化和微裂纹扩展是导致其宏观力学性质变化的重要因素,探究热损伤后花岗岩的各种细微观结构变化对于研究温度效应下花岗岩损伤机制具有重要意义。已有相关研究表明:低孔隙率岩石材料在受到高温影响后物理力学性能衰减会更加显著,原因是热应力引起的微裂纹萌生、扩展^[33-34]。然而,岩石材料是多矿物的集合体,各种矿物晶体之间的热膨胀系数不同,所以在温度效应下,裂纹的扩展演化是十分复杂的问题。

INSERRA 等^[35]认为花岗岩在受热条件下,微裂纹随着热处理温度的增加而增加。VaZQUEZ 等^[36]认为岩石热力学行为不仅取决于矿物成分,还与矿物的比例和含量息息相关。为探究矿物成分的影响,何爱林等^[37]和徐小丽等^[38]基于 XRD 试验对温度作用前后花岗岩矿物变化规律进行了总结,石英、云母、长石等主要矿物的最大衍射强度随热处理温度的升高呈现先增加后减小的规律。VAZQUEZ 等^[39]通过模拟花岗岩热弹性行为,认为有限元建模也能很好地观察矿物成分对热力学行为和微裂纹扩展模式的影响。刘贵等^[40]研究了 700 ~ 850 ℃ 区间里花岗岩矿物反应与变形的相互关系,石英和云母以塑性变形为主;长石和辉石以脆-性塑性变形为主。张卫强^[41]总结了高温作用下花岗岩内部矿物发生分解、脱水、相变等

物理化学反应,为热损伤理论研究提供了基础性工作(图 3)。

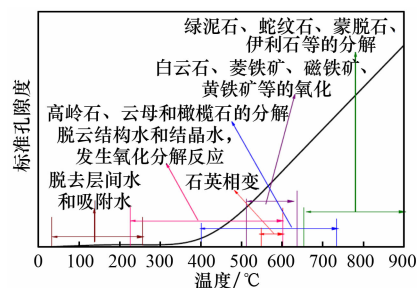


图 3 加热过程中不同热处理温度花岗岩的物理化学反应^[41]

目前针对岩石孔隙结构的研究方法可以划分为定性分析与定量分析两种。定性分析是通过借助于各类显微镜对切片后的岩石试样进行观察分析,包括光学显微镜、扫描电子显微镜和透射电子显微镜^[42-44]。定量分析则是借助于相关仪器对处理后的岩石试样进行孔隙测量,量化试样内部孔隙的数量和类型进行分析,包括小角 X 射线散射、小角中子散射、压汞法、氮吸附法、CO₂ 吸附法、纳米 X 射线显微镜和核磁共振法^[45-48]。图 4 归纳了各类孔隙结构的测试方法和测试范围。

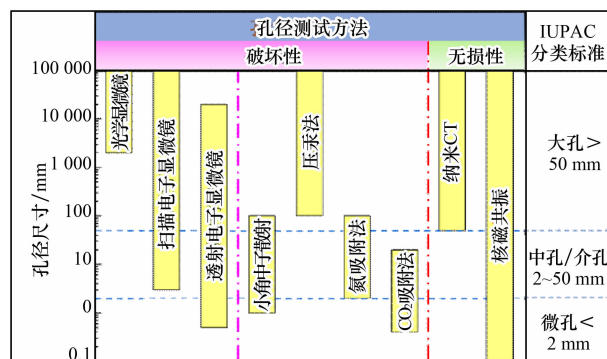


图 4 孔径测试方法及测试范围比较

温度效应引起花岗岩微裂纹扩展是导致物理力学特性变化的关键,且热损伤是不可逆的^[49-50]。CHEN 等^[51]通过电镜扫描总结出 300 ℃ 和 573 ℃ 两个温度阈值,热处理温度为 100 ~ 573 ℃ 时,主要发育晶间裂纹;热处理温度大于 573 ℃ 时,主要发育晶内裂纹。GAUTAM 等^[52]通过电镜扫描观察不同目标温度下花岗岩的断口形态,认为 300 ~ 600 ℃ 温度范围属于花岗岩脆-延破坏的过渡区,花岗岩断口形貌复杂,晶粒间的摩擦力增加,晶界间的胶结能力逐渐减弱。上述各类测试方法虽然已经在岩石细微观结构研究中广泛应用,

但部分测试方法具有一定的局限性和破坏性, 例如, 光学显微镜的分辨率较低, 电镜扫描的分析视域伴随分辨率增加而减小, 并且立体结构成像困难, 透射电镜对于测试样品要求较高, 压汞法的测试误差伴随压力增大而增大, 液氮吸附法无法检测大孔径等等。因此, 以上技术针对特定的研究需求仍略有不足。要想深入了解温度效应下花岗岩的细微观结构, 必须清楚地认识花岗岩在热处理前后孔隙结构、裂纹发育状态, 而无损检测手段将更加有助于在不同温度作用后花岗岩细微观结构变化的研究。如图 5 所示, 邓申缘等^[53]通过 CT 扫描后的三维重构技术分析了花岗岩在 800 °C 内裂纹扩展情况, 发现热处理目标温度在 400 °C 之前矿物的热膨胀性不均匀, 仅发育少量的孔隙, 孔隙率的变化幅度较小, 而在 600 °C 之后逐渐受热破裂影响已逐步形成孔隙 - 裂隙网络, 同时孔隙率也呈现激增现象。

YANG 等^[54]为研究高温作用后花岗岩的热损伤机制, 基于 X 射线 CT 扫描将花岗岩的裂纹扩展划分为 3 个区段, 在 25 ~ 300 °C 时, 裂纹几乎不发育, 矿物颗粒的受热膨胀会进一步强化岩石; 在 400 ~ 600 °C 时, 热损伤主要是由晶界裂纹(长石晶粒和石英晶粒)和穿晶裂纹引起; 在 700 ~ 800 °C 时, 热损伤主要是由晶界裂纹和穿晶裂纹大量聚集引起。而关于花岗岩在 300 °C 范围性能强化的原因, BARTON^[55]研究表明: 节理岩石的强化可以归因于自身受热引起的体积膨胀使裂纹闭合; NASSERI 等^[56]研究表明: 相对较低的温度会导致岩石裂缝的粗糙度增加, 从而降低流动性能, 对于相同的花岗岩类型, 试验结果已经确定相对较低的温度处理会提高强度性能, 这进一步证实了由于热致体积膨胀导致孔隙空间减少。KUMARI

等^[57]研究表明淬火后岩石产生的热膨胀对流动性能降低有显著影响。

然而, 关于 300 °C 范围内岩石材料弱化还是强化的关键因素仍取决于矿物成分、原始缺陷等, 并不能一概而论的认为热膨胀压缩了原生裂隙, 也可能存在部分原生裂隙被压实, 更多次生裂隙新发育导致岩石材料弱化。ZHAO 等^[58-59]通过 CT 扫描研究了花岗岩从室温到 500 °C 时的裂纹扩展规律, 花岗岩在 200 °C 时只有少量微裂纹产生, 而在 500 °C 时晶粒结构呈糜棱状, 明显观察到穿晶破坏, 可认为花岗岩在高温高压下热开裂行为是由于晶内和晶间的热应力引起的。WU 等^[60]基于核磁共振试验定量分析了高温花岗岩水冷却和空气冷却下孔隙演化规律, 试验结果表明水冷条件下孔隙的发育速度更快。如图 6 所示, 孙中光等^[61]基于核磁共振成像技术研究了不同温度作用后花岗岩的微观孔隙结构, 从成像结果上认为热处理温度小于 500 °C 时花岗岩内部结构基本比较稳定。

细微观尺度下, 矿物成分变化与微裂纹萌生、扩展都是导致宏观物理力学特性变化的关键, 并且孔隙度变化对热力学的影响比矿物成分更加显著^[62]。借助细微观尺度矿物成分变化及裂纹演化规律, 不但能更好地解释宏观物理力学参数的变化原因, 更是深入探究温度效应下花岗岩热损伤机制的有效方法。

3 温度效应下花岗岩损伤特征研究

在温度、应力等外界条件耦合作用下, 岩石材料内部微裂纹的发育、扩展将导致岩石的宏观物理力学特性出现及细微观结构产生不可逆损伤。例如干热岩在开发过程中, 储层损伤一方面对裂隙网络扩展有着促进作用, 另一方面又影响着注

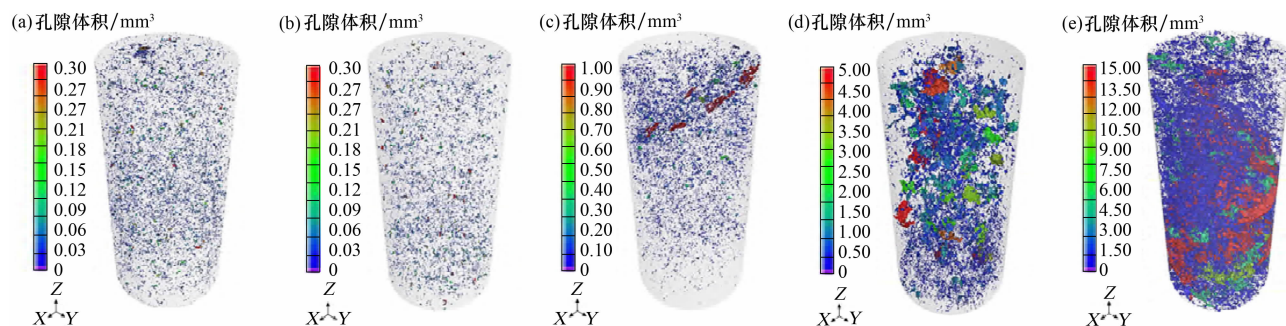


图 5 基于 CT 扫描的不同温度作用花岗岩内部三维孔隙裂隙结构^[53]

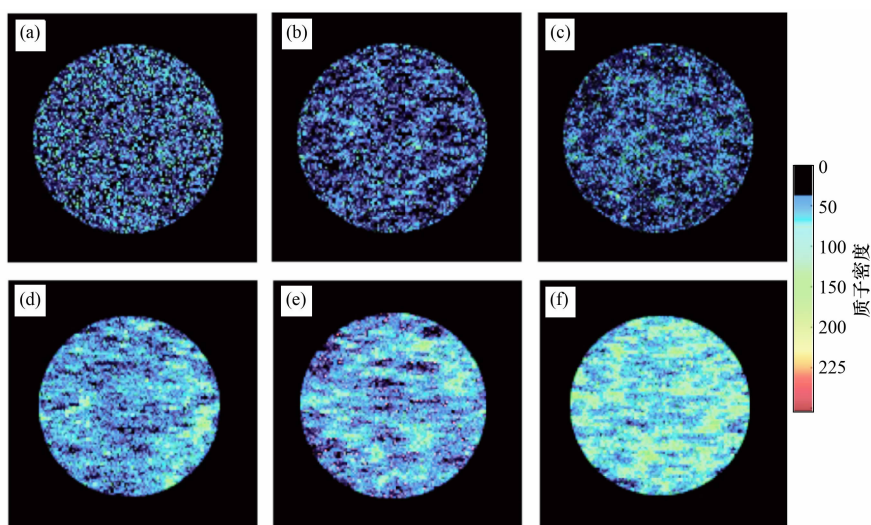
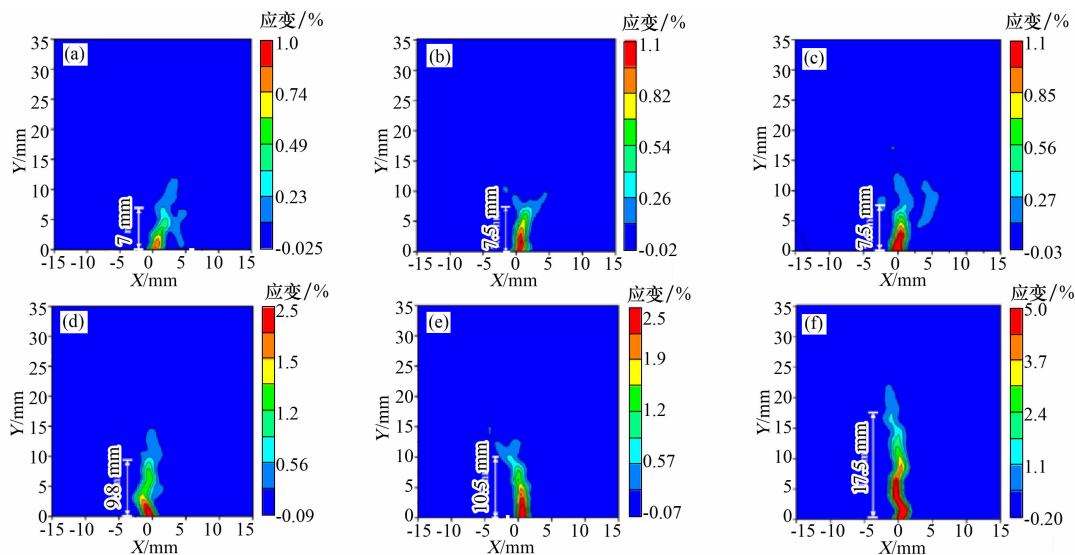


图 6 基于 NMR 成像的不同温度作用后花岗岩水平截面质子密度加权图像^[61]

入井和生产井的井筒稳定性。

邵保平等^[63]采用自主研发的热冲击破裂试验台对不同热冲击作用后的花岗岩进行了单轴压缩试验、巴西劈裂试验和变角剪切试验,并提出可以表征热冲击破坏的热冲击因子。支乐鹏^[64]表示花岗岩在高温作用后的损伤程度与波速变化之间相关联,并基于纵波波速建立了热损伤方程。刘泉声等^[65]和吴阳春等^[66]为描述温度作用后花岗岩的劣化程度,均采用基于弹性模量的损伤因子来定义温度作用后花岗岩的损伤程度。张洪伟等^[67]考虑高温对花岗岩弹性模量和峰值应变的影响,通过进行实时高温(25 ~ 500 °C)下的单轴压缩试验得出花岗岩力学特性随目标温度的演化规律,

并且对比实时高温和热冲击两种状态对花岗岩损伤程度的影响。为比较不同冷却方式下花岗岩的损伤程度,张洪伟将邵保平等的研究进行归一化处理,建立了热损伤本构模型,并揭示了热冲击损伤破岩机理。陈亮等^[68]根据北山花岗岩的主要力学特性构建了弹塑性损伤模型,可以准确地反映塑性和损伤的耦合作用机制。宿辉等^[69]利用颗粒流模型观察了温度场中花岗岩损伤破裂模式。YU 等^[70]借助数字图像技术(DIC)和声发射技术来探索花岗岩在循环热冲击后加载过程中的损伤特征,并且提出了连续损伤模型来描述加载过程中循环热冲击下花岗岩损伤演化规律。如图 7 所示, MIAO 等^[71]在对 25 ~ 600 °C 的花岗岩进行三点弯



温度/°C: (a) 20; (b) 100; (c) 200; (d) 300; (e) 400; (f) 500; (g) 600

图 7 基于 DIC 技术的不同温度下花岗岩断裂过程水平峰值应变等高线^[71]

曲时同样采用了 DIC 技术,通过全场位移和全场应变的图像分析发现断裂过程区长度与热致裂纹密切相关。

GUO 等^[72]考虑弹性模量和泊松比对水力裂缝的重要影响,通过三轴压缩试验获得了温度(30 ~ 150 °C)、围压(0.1 ~ 60 MPa)耦合作用下花岗岩弹性模量和泊松比的变化规律,并建立损伤方程。CHEN 等^[73]以弹性模量建立了加热过程中花岗岩的损伤方程,并得出疲劳寿命与损伤因子存在线性关系的结论。YOUG^[74]总结了两种热开裂机制,一是由矿物颗粒热弹性行为的各向异性导致花岗岩在高温下产生沿晶方向的压应力和拉应力,从而导致一旦温度超过阈值,就会出现新的微裂纹,二是目标温度的局部变化所产生的热应力也会引起裂纹的形成和扩展。JUNIQUE 等^[75]定义弹性模量为损伤因子建立了损伤方程,并研究了渗透率随损伤因子的变化关系。HU 等^[76]认为在干热岩开发过程中主要是两种效应导致储层热损伤:一种是高温岩体在冷水中的淬火效应,又称热冲击效应;另一种是反复淬火过程中对干热岩储层产生热疲劳效应。FAN 等^[77]研究结果表明高温储层遇水冷却产生的热冲击效应要高于自然冷却。

综上所述,温度效应下花岗岩的损伤特征研究主要划分为三类。第一种是通过定义损伤因子,如通过纵波波速、弹性模量、抗压强度、抗拉强度等建立损伤方程,或者根据相关特征参数建立损伤耦合模型;第二种是通过各种监测技术实时监测花岗岩在加载过程中的内部变化,如数字图像技术和声发射技术等;第三种是基于有限元、离散元等数值分析方法模拟热损伤下花岗岩的裂纹演化规律。

4 结论与展望

针对温度效应下花岗岩的热损伤问题,通过梳理总结国内外相关研究成果,从温度效应对花岗岩宏观物理力学特性影响、细微观形貌结构影响及损伤特征这 3 个方面进行了分析和总结,展望了以下 3 个研究趋势,以便更好地完善热损伤花岗岩理论研究体系,为今后深地工程发展提供理论指导价值。

(1) 增加热处理保温时间和交变周期次数,探究花岗岩在温度效应下的破坏的极限周期。

(2) 采用数值模拟分析极限环境下花岗岩损伤机制,例如超高温、超高压,探究温度场、应力场等多场耦合作用下花岗岩损伤劣化全过程;

(3) 通过宏观、细观和微观尺度定性、定量分析温度效应下花岗岩多尺度响应特征及其损伤关联机制。

参考文献:

- [1] ALIMONTI C, SOLDI E, SCROCCA D. Looking forward to a decarbonized era: Geothermal potential assessment for oil & gas fields in Italy [J]. *Geothermics*, 2021 (93): 102070.
- [2] 贾艳雨, 常青, 王俞文, 等. 我国地热能开发利用现状及双碳背景下的发展趋势[J]. *石油石化绿色低碳*, 2021, 6(6): 5-9.
- [3] 周博睿. 我国地热能开发利用现状与未来趋势[J]. *能源*, 2022(2): 77-80.
- [4] 郑金栋. 核废料处置库花岗岩围岩综述[J]. *河南科技*, 2013, 522(16): 56.
- [5] 杨联萍, 黄坚, 王庆华, 等. 长三角地区地热资源开发利用与管理[J]. *科技导报*, 2023, 41(12): 66-74.
- [6] 汪集暘, 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.
- [7] 杨小聪, 蒋合国. 深部金属矿山卸荷开采与预处理技术综述[J]. *中国矿业*, 2025, 34(4): 64-75.
- [8] ZHUANG D, YIN T, LI Q, 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] 王连成, 邵安林, 曲福明, 等. 金属矿山开采技术发展现状与展望[J]. *工程科学学报*, 2025, 47(5): 971-983.
- [10] 常俊松. 深部花岗岩物理力学参数随赋存深度变化的变异性试验[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2022, 74(5): 122-128.
- [11] 吴星辉, 蔡美峰, 任奋华, 等. 不同热处理作用下花岗岩纵波波速和导热能力的演化规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 41(3): 457-467.
- [12] 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.
- [13] ZHANG W Q, SUN Q, HAO S Q, et al. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, (98):1297–1304.
- [14] ZHAO Z H. Thermal Influence on Mechanical Properties of Granite: A Microcracking Perspective[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2016, 49(3):747–762.
- [15] 邵保平, 成泽鹏, 何水鑫, 等. 高温后花岗岩渗透性及其演变规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S1):2716–2723.
- [16] FENG Z J, ZHAO Y S, ZHANG Y, et al. Real-time permeability evolution of thermally cracked granite at triaxial stresses[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133:194–200.
- [17] GAUTAM P K, VERMA A K, JHA M K, et al. Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 159:460–474.
- [18] 刘成磊, 李贺庆, 赵容鹤等. 高温花岗岩动态力学性能研究[J]. *现代矿业*, 2022, 38(6):111–114.
- [19] 朱振南, 田红, 董楠楠等. 高温花岗岩遇水冷却后物理力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(增刊2):169–176.
- [20] LIU S, XU J Y. An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks [J]. *Engineering Geology*, 2015, 185:63–70.
- [21] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(3):303–315.
- [22] 王亚超, 窦斌, 喻勇, 等. 不同冷却方式下高温花岗岩巴西劈裂及声发射特性试验研究[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3):200–207.
- [23] 章蓝月, 王志文, 韦猛, 等. 高温后水冷却花岗岩物理力学性能及其微观特性研究[J/OL]. *矿物岩石*, 2025;1–13[2025–11–13]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1143.td.20250117.1457.012>.
- [24] 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.
- [25] 尹士兵, 舒荣华, 李夕兵, 等. 高温作用下和加热冷却后花岗岩力学性能的比较[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(7):1926–1937.
- [26] 闵明, 张强, 蒋斌松, 等. 实时高温下北山花岗岩劈裂试验及声发射特性[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(3):108–113.
- [27] 解元, 徐能雄, 秦严, 等. 遇水快速冷却与自然冷却对高温花岗岩物理性质影响实验研究[J]. *工程勘察*, 2019, 47(4):1–5.
- [28] 靳佩桦, 胡耀青, 邵继喜, 等. 高温花岗岩遇水冷却后孔隙结构及渗透性研究[J]. *太原理工大学学报*, 2019, 50(4):478–484.
- [29] 邵保平, 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.
- [30] 崔翰博, 唐巨鹏, 姜昕彤. 自然冷却和遇水冷却后高温花岗岩力–声特性试验研究[J]. *固体力学学报*, 2019, 40(6):571–582.
- [31] 朱要亮, 俞缙, 高海东, 等. 水冷却对高温花岗岩的微观损伤及动力学性能影响[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8):84–95.
- [32] KANG F, JIA T, LI Y, et al. Experimental study on the physical and mechanical variations of hot granite under different cooling treatments[J]. *Renewable Energy*, 2021, 179:1316–1328.
- [33] HOMAND-ETIENNE F, TROALEN J P. Behaviour of granites and limestones subjected to slow and homogeneous temperature changes[J]. *Engineering Geology*, 1984, 20(3):219–233.
- [34] B. MENÉNDEZ C D, M. DAROT. A study of the crack network in thermally and mechanically cracked granite samples using confocal scanning laser microscopy[J]. *Physics Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth Geodesy*, 1999, 24(7):627–632.
- [35] INSERRA C, BIWA S, CHEN Y. Influence of thermal damage on linear and nonlinear acoustic properties of granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 2013, 62(5):96–104.
- [36] Vázquez P, SIEGISMUND S, Alonso F J. Bowing of dimensional granitic stones[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(7–8):1603–1612.
- [37] 何爱林, 王志亮, 石恒. 温度作用后花岗岩强度特性及矿物成分变化特征[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(4):501–506.
- [38] 徐小丽, 高峰, 张志镇, 等. 高温后花岗岩能量及结构效应研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(5):961–968.
- [39] VAZQUEZ P, SHUSHAKOVA V, GOMEZ-HERAS M.

- Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase; Experimental observations and stress simulation[J]. *Engineering Geology*, 2015, 189: 58 – 67.
- [40] 刘贵, 周永胜. 花岗岩剪切变形与矿物成分变化的高温高压实验[J]. *地质通报*, 2020, 39(11): 1840 – 1849.
- [41] 张卫强. 岩石热损伤微观机制与宏观物理力学性质演变特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [42] 鹿宇. 不同冷却方式作用下高温花岗岩/砂岩力学特性试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [43] 黄彦华, 张坤博, 杨圣奇, 等. 高温后花岗岩微观特征及其对强度影响规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(2): 359 – 372.
- [44] 张塑彪, 张帆, 李康文, 等. 高温对不同粒径花岗岩剪切特性影响研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(10): 2981 – 2993.
- [45] 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.
- [46] 李春, 马文成, 张纯旺, 等. 冷热交替循环作用后花岗岩渗流特性及微观结构演化规律研究[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(5): 712 – 722.
- [47] 鹿宇. 不同冷却方式作用下高温花岗岩/砂岩力学特性试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [48] 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): 131 – 136.
- [49] JIN P H, HU Y Q, SHAO J X, et al. Influence of different thermal cycling treatments on the physical, mechanical and transport properties of granite[J]. *Geothermics*, 2019, 78: 118 – 128.
- [50] KANT M A, AMMANN J, ROSSI E, et al. Thermal properties of Central Aare granite for temperatures up to 500 °C: Irreversible changes due to thermal crack formation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2): 771 – 776.
- [51] CHEN S, YANG C, WANG G. Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1533 – 1542.
- [52] GAUTAM P K, VERMA A K, JHA M K, et al. Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 159: 460 – 474.
- [53] 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.
- [54] YANG S Q, RANJITH P G, JING H W, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. *Geothermics*, 2017, 65: 180 – 197.
- [55] BARTON N. Thermal over-closure of rock joints and rock masses[C]. *ISRM Congress*, Lisbon, 2007.
- [56] NASSERI M, TATONE B, GRASELLI G, et al. Fracture Toughness and Fracture Roughness Interrelationship in Thermally treated Westerly Granite[J]. *Pure Applied Geophysics*, 2009, 166(5 – 7): 801 – 822.
- [57] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: An application to geothermal energy extraction[J]. *Geothermics*, 2017, 65: 44 – 59.
- [58] ZHAO Y S, WAN Z J, FENG Z J, et al. Evolution of mechanical properties of granite at high temperature and high pressure[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2017, 3(2): 199 – 210.
- [59] ZHAO Y S, FENG Z J, ZHAO Y, et al. Experimental investigation on thermal cracking, permeability under HTHP and application for geothermal mining of HDR[J]. *Energy*, 2017, 132: 305 – 314.
- [60] WU X, GUO Q, ZHU Y, et al. Pore structure and crack characteristics in high-temperature granite under water-cooling[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101646.
- [61] 孙中光, 姜德义, 谢凯楠, 等. 基于低场磁共振的北山花岗岩热损伤研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 1081 – 1088.
- [62] JUNIQUE T, VAZQUEZ P, GERAUD Y, et al. Microstructural evolution of granitic stones exposed to different thermal regimes analysed by infrared thermography[J]. *Engineering Geology*, 2021, 286: 106057.
- [63] 邵保平, 吴阳春, 赵阳升. 热冲击作用下花岗岩宏观力学参量与热冲击速度相关规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2194 – 2207.
- [64] 支乐鹏, 许金余, 刘志群, 等. 高温后花岗岩冲击破坏行为及波动特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1): 135 – 142.
- [65] 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(4): 408 – 411.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 陈亮,刘建锋,王春萍,等. 北山深部花岗岩弹塑性损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(2):289-298.
- [69] 宿辉,朱谊,刘世伟,等. 基于颗粒流热固耦合模型的片麻花岗岩损伤特性分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(5):2009-2013.
- [70] YU P Y, PAN P Z, FENG G L, et al. Physico-mechanical properties of granite after cyclic thermal shock[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020,12(4):693-706.
- [71] MIAO S, PAN P-Z, YU P, et al. Fracture analysis of Beishan granite after high-temperature treatment using digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020,225:106847.
- [72] GUO L L, ZHANG Y B, ZHANG Y J, et al. Experimental investigation of granite properties under different temperatures and pressures and numerical analysis of damage effect in enhanced geothermal system[J]. Renewable Energy, 2018,126:107-125.
- [73] CHEN Y L, NI J, SHAO W, et al. Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading[J], 2012,56(Complete):62-66.
- [74] YONG C, WANG C. Thermally induced acoustic-emission in westerly granite [J]. Geophysical Research Letters, 1980,7(12):1089-1092.
- [75] JUNIQUE T, VAZQUEZ P, BENAVENTE D, et al. Experimental investigation of the effect of quenching cycles on the physico-chemical properties of granites[J]. Geothermics, 2021,97:102193.
- [76] HU J, XIE H, SUN Q, ET AL. Changes in the thermodynamic properties of alkaline granite after cyclic quenching following high temperature action[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021,31(5):843-852.
- [77] FAN L, GAO J, DU X, et al. Spatial gradient distributions of thermal shock-induced damage to granite[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020,12(5):917-926.