

高温和液氮循环作用后花岗岩孔隙结构演化及其劣化机制

王振强, 狄佳, 吴杨*, 李艳, 谷智, 高爽

中冶建工集团有限公司, 重庆 400080

摘要 以漳州花岗岩为研究对象, 开展了单轴压缩试验和细微观孔隙结构测试, 分析了不同特征参数随循环次数变化的演化规律, 探究花岗岩在高温和液氮循环作用后的劣化机制。试验结果表明: 在高温和液氮循环处理过程中, 花岗岩内部小孔隙呈现随机和动态分布, 大孔隙呈现广泛分布; 随着循环次数增加, 花岗岩核磁孔隙度和峰值应变逐渐增大, 抗压强度和弹性模量逐渐减小; 未经处理的花岗岩破裂模式以单破裂面的剪切或劈裂破坏为主, 高温和液氮循环后的花岗岩破裂模式以多破裂面的剪切和劈裂破坏为主; 矿物热膨胀系数差异及强度和孔隙结构变化是诱导花岗岩在高温和液氮循环作用下损伤劣化的关键因素。

关键词 干热岩; 温度效应; 低场核磁共振; 岩石损伤

地热资源是一种典型清洁能源, 因其储量大、分布广、运行稳定等特点而备受关注^[1-3]。干热岩作为地热资源的一种, 通常指埋藏于地下数千米的高温岩体, 因其独特的储层特性, 原生裂隙、裂缝不能达到直接生产的要求, 故而提高干热岩储层渗透性是其高效开采的关键因素^[4]。目前, 类似干热岩等低渗储层改造主要采用水力压裂进行储层增透, 该技术在取得一定成效的同时也带来一系列问题,

如水资源的过度消耗, 储层黏土矿物遇水膨胀堵塞孔隙喉道等^[5-6]。针对这类情况, 无水压裂技术和少水压裂技术更值得深入研究。

目前, 众多研究者针对温度作用后花岗岩的物理力学特性进行了相关研究并已取得丰富成果。吴星辉等^[7]研究了1050℃内花岗岩的各项物理参数, 其质量损失率、密度降低率和波速衰减率均随热处理温度升高呈指数型增长, 并建立了花岗岩质

收稿日期: 2024-01-13; 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项 (cstc2017shmsA30028); 国家资助博士后研究人员计划 (GZC20233338); 重庆市博士后科学基金项目 (CSTB2023NSCQ-BHX0234); 重庆市博士后特别资助项目 (2023CQBSHTB3024)

作者简介: 王振强, 高级工程师, 研究方向为岩土工程及装配式结构, 电子信箱: 271377568@qq.com; 吴杨 (通信作者), 工程师, 研究方向为岩石力学及金属矿山地下开采工艺, 电子信箱: wy_9654@163.com

引用格式: 王振强, 狄佳, 吴杨, 等. 高温和液氮循环作用后花岗岩孔隙结构演化及其劣化机制[J]. 科技导报, 2024, 42(24): 70-78;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.00090

量、体积和纵波波速与导热系数间的函数关系。Zhang 等^[8]从矿物成分角度分析,认为花岗岩质量损失主要归因于内部附着水、结合水和矿物结晶水在不同热处理温度的蒸发,其中,附着水在 70~100℃蒸发,结合水在 150~300℃蒸发,矿物结晶水在 450~500℃蒸发。郜保平等^[9]研究了不同热处理温度花岗岩渗透率与体积应力、孔隙压的演化规律,建立了渗透率与热处理温度的关系式。此外,也有研究人员对高温花岗岩急速冷却后的各项性能开展研究。Kim 等^[10]对 100、200 和 300℃高温的花岗岩使用风扇进行降温,其断裂韧性和抗拉强度显著降低。解元等^[11]对不同冷却方式下的花岗岩展开了物理特性研究,由于自然冷却降温速率慢,将增加黑云母等矿物的氧化反应时间,故而自然冷却下花岗岩表观颜色变化比遇水冷却下更明显。靳佩桦等^[12]对 20~600℃花岗岩遇水冷却后的孔隙结构和渗透特性进行了研究,确定孔隙率和渗透率变化的阈值温度区间位于 500~600℃。郜保平等^[13]对比了不同初始温度(100~600℃)花岗岩在 2 种冷却条件下(自然冷却、遇水冷却)的力学特性,认为遇水冷却会引起花岗岩内部温度骤降,产生的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。Kang 等^[14]对 200~800℃的花岗岩进行了自然冷却、遇水冷却和液氮冷却处理,通过测试物理力学参数发现冷却介质的温度越低,对热处理后的花岗岩造成的损伤越严重。

以上研究成果主要集中于温度单次作用或改变冷却介质,针对花岗岩在高温和冷却介质反复作用下的研究相对较少。液氮作为无色、无味、无污染的超低温介质,在与高温储层接触时所产生的温度应力会促使储层的原生裂隙扩展与新生裂隙的增生,大幅提高致密储层的渗透性,并在温度应力循环作用下,这种交替的温度变化将加速提高储层的渗透率。基于上述背景,为进一步优化干热岩开发过程中低渗储层的改造方法,实现储层增产的最终目标,针对干热岩储层常见基岩-花岗岩,开展高温和液氮循环作用后花岗岩的物理力学特性、微观结构演化特征及损伤破裂机制等基础研究,探

究高温和液氮循环作用后的花岗岩损伤劣化机制。

1 试验概况

1.1 试样制备及预处理

花岗岩试样均取自福建省漳州市东南地区,该区域以中生代酸性花岗岩发育为主,是中国最主要的高放射性花岗岩分布区,具有广阔的干热岩开发潜能^[15]。按照国际岩石力学学会(ISRM)推荐方法,将花岗岩加工成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准试样。通过纵波测试和 X 射线衍射试验对试样进行筛选和矿物组分分析,在自然状态下花岗岩试样的纵波波速处于 3.82~4.04 km/s,主要矿物成分包括钾长石、钠长石、石英、白云母和高岭石,矿物含量如图 1 所示。

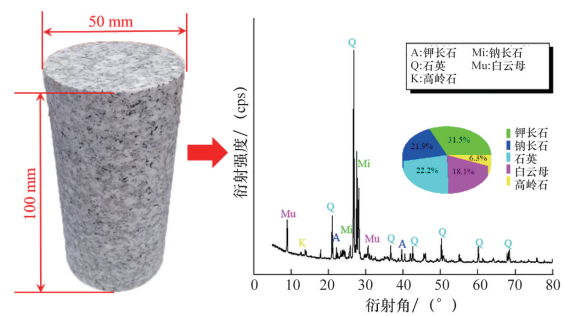


图 1 自然状态下花岗岩标准试样及其 XRD 试验结果

温度对岩石所产生的损伤几乎是不可逆的,尤其是较高温度作用下,不管是在实时温度下的测试结果还是温度预处理后测试的结果,其各项性质的演化趋势基本保持一致^[16]。结合当前国内外干热岩的探测温度和花岗岩在 573℃时各项性质突变等原因,设置温度梯度为 600℃,采用液氮冷却,循环次数设置为 0(对照组)、1、5、10、15 和 20 次。

将花岗岩试样放入控温马弗炉以 5℃/min 的加热速率加热至 600℃,采用 5℃/min 的低升温速率将减少温度冲击对岩石的结构损伤^[17],待温度加热至 600℃后,保持该温度在炉内放置 4 h 以确保试件受热完全均匀^[18],最后打开腔体将试样取出后立即置于液氮中进行冷却,预处理方案如图 2 所示。

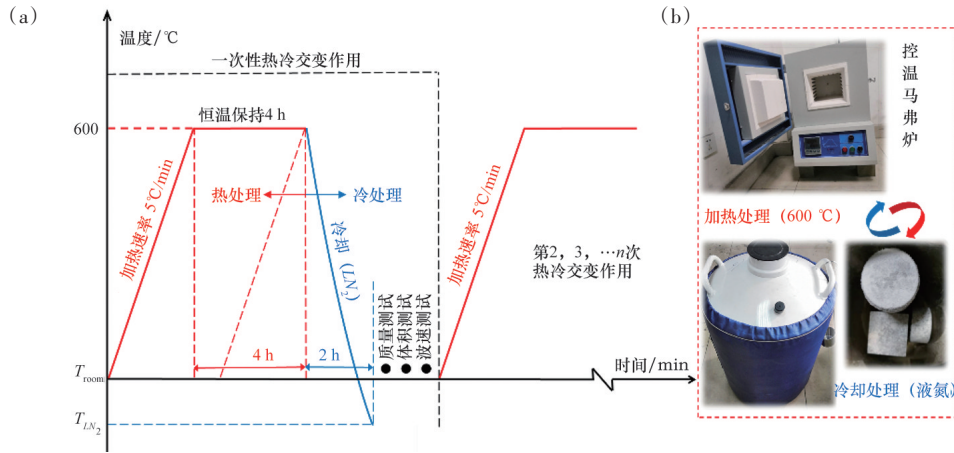


图2 高温和液氮循环作用方案设计示意(a)及预处理设备(b)

1.2 核磁共振技术原理

岩石孔隙中流体的横向弛豫机制包含表面弛豫(\$T_{2s}\$)、自由弛豫(\$T_{2b}\$)和扩散弛豫(\$T_{2D}\$)3种,横向弛豫时间\$T_2\$可表示为

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2s}} + \frac{1}{T_{2b}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (1)$$

对于岩石中的孔隙,\$T_{2s}\$发生在流体与岩石颗粒相互作用的液固表面,是引起横向弛豫时间的主导因素,而\$T_{2b}\$和\$T_{2D}\$均可以忽略不计,因此,式(1)可进一步简化为

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2s}} = \rho \frac{S}{V} \quad (2)$$

式中,\$T_2\$是横向弛豫时间(ms);\$\rho\$是横向表面弛豫强度因子;\$S\$是孔的表面积(\$cm^2\$);\$V\$是孔的体积(\$cm^3\$)。

由式(2)可以发现,岩石中各个孔径都对应着唯一的\$T_2\$,利用CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill, 脉冲序列)记录下一系列\$T_2\$值。

1.3 试验方案设计

为揭示高温和液氮循环作用对试样孔隙结构特征的影响,采用MacroMR12-150H-I低场核磁共振系统对预处理前后的花岗岩孔隙分布进行检测,该系统磁场强度为\$(0.3 \pm 0.05)\$ T,可测试纳米至微米范围内的孔径分布,在测试试验前,必需对试样进行饱水处理。MacroMR12-150H-I低场核磁共振如图3所示。

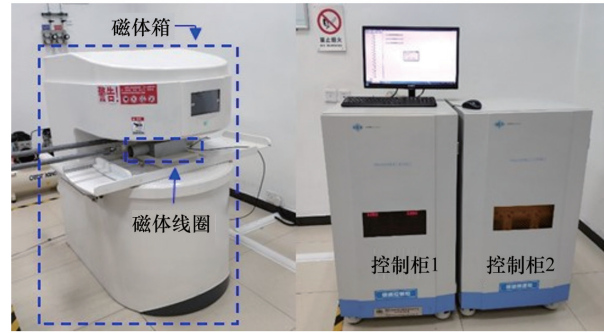


图3 MacroMR12-150H-I低场核磁共振系统

单轴压缩试验采用MTS815岩石力学测试系统,设备最大轴向力为2800 kN,为减少水分对力学试验参数影响,对全部试样孔隙结构测试完毕后进行干燥处理后置于真空皿中待测。单轴压缩试验采用位移加载控制,速率设置为0.1 mm/min。图4为MTS815岩石力学测试系统。



图4 MTS815岩石力学测试系统

2 花岗岩孔隙结构演化特征

2.1 横向弛豫时间曲线

图5为高温—液氮循环作用后花岗岩横向弛豫时间曲线,由式(2)可知, T_2 值与孔隙半径成正比关系,即 T_2 值越小,花岗岩孔径越小, T_2 值越大,花岗岩孔径越大。幅值大小表示对应孔隙半径的分布数量,当幅值较低时表示该孔隙半径的分布较少,当幅值较高时表示该孔隙半径的分布较多。未

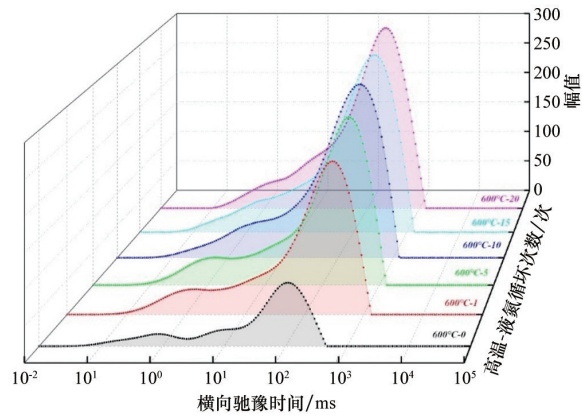


图5 高温—液氮循环作用后花岗岩横向弛豫时间曲线

经历高温和液氮处理的花岗岩横向弛豫时间曲线呈现3个峰,而当花岗岩经历600℃和液氮处理后,横向弛豫时间曲线峰的个数由3个缩减为2个,随着循环周期增加,曲线第2个峰逐渐向右移动,且对应幅值增加,说明在高温和液氮循环作用下,花岗岩内部小孔隙正在向大孔隙发育,且已有的大孔隙也将持续扩展。

2.2 孔径与孔喉变化

目前国内针对花岗岩的孔径划分还没有统一标准,例如Chalmers等^[19]和Yan等^[20]都将花岗岩的孔径划分为小孔、中孔和大孔3类,但前者划分孔径的尺寸分别对应为小于0.002、0.005~0.05和0.05~0.3 μm ,而后者划分孔径的尺寸分别对应为小于0.01、0.01~1和大于0.1 μm 。由于花岗岩孔径大小与核磁共振测试 T_2 值之间存在定量关系,本研究参考周科平等^[21]基于核磁共振横向弛豫时间对岩石孔径定义的方法,将 T_2 值小于10 ms的孔隙类型定义为小孔径, T_2 值大于10 ms的孔隙类型定义为大孔径,通过Origin绘图软件对横向弛豫时间曲线分段积分后,将高温—液氮循环作用后花岗岩的孔隙大小及分布比例汇总于表1。

表1 高温—液氮循环作用后花岗岩核磁共振 T_2 谱面积

试样编号	T_2 谱面积	小孔隙谱峰面积	小孔隙谱峰比例/%	大孔隙谱峰面积	大孔隙谱峰比例/%
600℃-0	21477.310	165.303	0.770	21312.007	99.230
600℃-1	164087.369	376.940	0.230	163710.429	99.770
600℃-5	186462.919	428.341	0.230	186034.578	99.770
600℃-10	194976.537	536.346	0.275	194440.191	99.725
600℃-15	211803.133	584.156	0.276	211218.977	99.724
600℃-20	272113.911	621.489	0.228	271492.422	99.772

根据以上分类方法,漳州花岗岩内部以大孔隙分布居多,约占据整体孔隙总量的99.5%以上。花岗岩每经历1、5、10、15、20个循环周期的高温 and 液氮处理, T_2 谱面积较未处理的花岗岩增加了6.64、7.68、8.08、8.86、11.67倍,小孔隙谱面积增加了1.28、1.59、2.24、2.53、2.76倍,大孔隙谱面积增加了6.68、7.73、8.12、8.91、11.74倍。随着循环周期增

加,小孔隙和大孔隙的谱面积均呈增大趋势,但小孔隙和大孔隙的比例却分别呈减小和增大趋势,这是由于在高温和液氮循环作用下,小孔隙不断发育,大孔隙持续扩展,均导致大孔隙的含量在不断增加,而小孔隙的数量变化主要源于次生孔隙的萌生。结合图5的横向弛豫时间曲线分布特征,以10 ms为大、小孔径分界点,小孔隙的曲线分布较

大孔隙的曲线分布更多样化,因此在高温和液氮循环作用下,花岗岩内部小孔隙分布呈随机性和动态性,而大孔隙分布呈广泛性。

岩石孔隙结构由孔隙和孔喉组成,孔隙是多孔材料中流体的存储空间,孔喉为孔隙之间的连接通道,故而孔喉的大小可反映流体在岩石中流通的难易程度,孔喉越大则越易于流体的流通。经历高温和液氮循环作用后花岗岩孔喉分布特征如图6所示,花岗岩作为致密岩石储层,孔喉尺寸分布位于0~25 μm 。随着循环次数增加,在0~0.10 μm 间小孔喉含量呈减少趋势,1.60~25.00 μm 大孔喉含量呈增加趋势。在高温和液氮共同作用下,花岗岩孔喉逐渐由小向大转换。

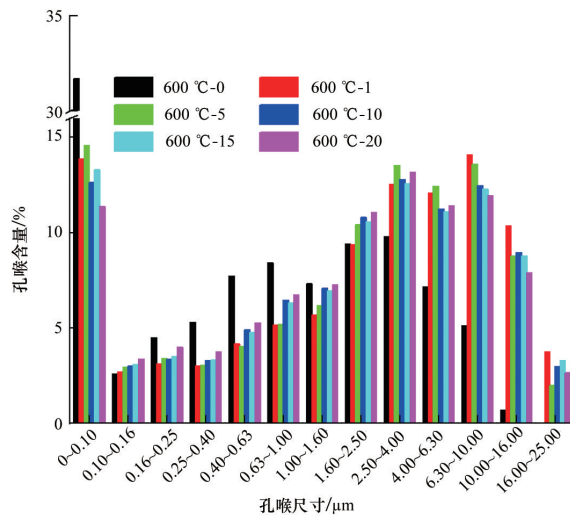


图6 高温—液氮循环作用后花岗岩孔喉分布特征

2.3 核磁孔隙度变化

花岗岩核磁孔隙度可以通过 T_2 谱积分面积进行反演,是反映岩石孔隙变化的重要参数之一。由于花岗岩在饱水过程中,水分只能进入岩样的连通孔隙,而难以到达内部的闭合孔隙,以及在测试过程中岩样表面宏观裂纹无法锁水等原因,致使核磁孔隙度会略小于岩石的真实孔隙度。 T_2 谱积分面积的大小与被检测试样中的流体含量大小成正比关系,因此经历热冷交变作用后的核磁孔隙度可以很好地反映岩石内部孔隙总量的变化规律,也能间接地表征岩石内部损伤程度。由图7可知,循环周

期每增加1、5、10、15、20次,花岗岩的核磁孔隙度分别增加了1.40、1.73、2.15、2.32、2.40倍,说明高温和液氮循环作用对花岗岩内部的孔隙发育及扩展起到了明显的促进作用,这种持续损伤将有利于改造低渗透层。

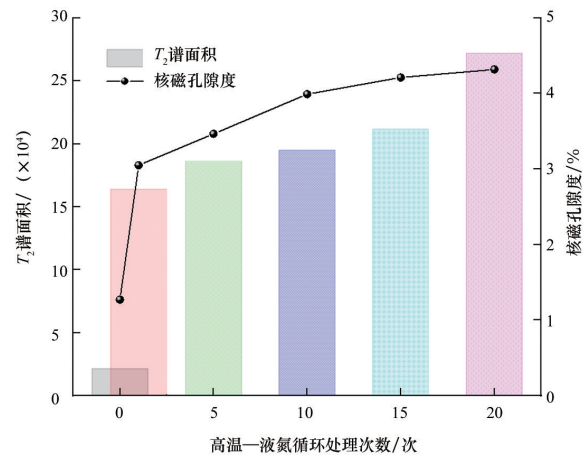


图7 高温—液氮循环作用后花岗岩核磁孔隙率变化规律

3 花岗岩宏观力学损伤特性

3.1 应力-应变曲线

岩石应力-应变曲线是了解其力学特性变化规律的关键,图8绘制了经历不同高温和液氮循环作用后的花岗岩在单轴压缩下的应力-应变曲线。

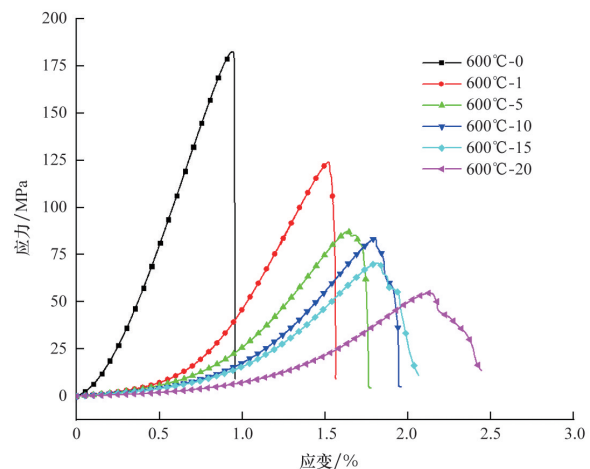


图8 花岗岩应力-应变曲线

加载全过程花岗岩的变形可划分为孔隙压密阶段、弹性变形至裂纹稳定扩展阶段、裂纹非稳定扩展阶段和破裂后阶段4个阶段。

在孔隙压密阶段,随着应力增加,花岗岩内部原生裂隙和张开型结构面被压实,曲线呈现下凹型,并且随着循环周期增加,曲线压密阶段逐渐增加,表明高温和液氮作用后将致使花岗岩内部裂隙逐渐增多。在弹性变形至裂纹稳定扩展阶段,应力和应变呈现出明显的线性关系,该阶段曲线斜率即为花岗岩的弹性模量,随着循环周期增加,弹性模量逐渐减小。在裂纹非稳定扩展阶段,曲线呈现上凸形。达到峰值应力后,曲线进入破裂后阶段,该阶段应变增加,应力减小,未经历高温和液氮作用的花岗岩应力在达到应力峰值后迅速跌落,几乎没有峰后变形阶段。

3.2 特征参数演化规律

根据经历不同高温和液氮循环后的花岗岩在单轴压缩下的应力-应变曲线,计算出抗压强度、弹性模量和峰值应变等特征参数,汇总于表2。为更直观反映高温和液氮循环作用对花岗岩特征参数的影响,绘制出图9特征参数与循环处理次数的关系曲线。

表2 高温-液氮循环作用后花岗岩特征参数变化

循环次数	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	峰值应变/%
600°C-0	182.61	24.79	0.96
600°C-1	124.07	15.50	1.56
600°C-5	87.41	10.94	1.78
600°C-10	83.52	9.43	1.96
600°C-15	70.59	8.50	2.07
600°C-20	54.73	6.03	2.44

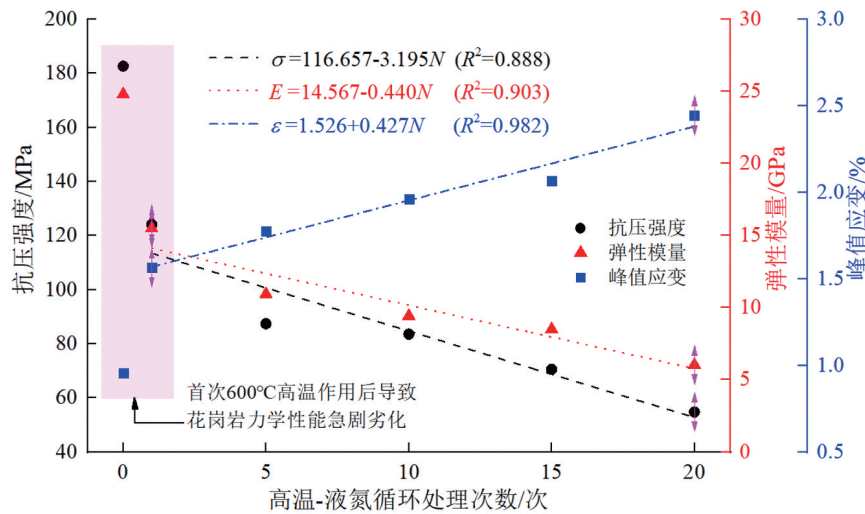


图9 花岗岩特征参数与循环处理次数关系曲线

随着循环次数增加,花岗岩的抗压强度和弹性模量逐渐降低,峰值应变逐渐增加,且循环次数每增加1、5、10、15、20次,抗压强度降低了32.06%、52.13%、54.26%、61.34%、70.03%,弹性模量降低了37.48%、55.86%、61.97%、65.71%、75.66%,峰值应变增加了63.43%、85.58%、104.70%、115.78%、155.38%,并依此得到了抗压强度、弹性模量和峰值应变与循环次数之间的线性拟合公式。

3.3 单轴压缩破坏形态

岩石破坏后的形态对于研究其破坏机理具有重要意义,图10为经历不同高温和液氮处理后的花岗岩在单轴压缩下的破坏形态图,当花岗岩经历高温和液氮循环处理后,其破裂模式主要以轴向劈裂破坏和剪切破坏为主。并且随着循环次数的增加,试样的破坏程度越显著,未经历高温和液氮处理的试样破裂面单一,破坏后试块的重合度高,经

历1次和20次高温和液氮处理的试样可以明显发现其破裂面更多且更复杂。由于循环作用对花岗岩产生的持续损伤作用,导致岩石颗粒胶结能力降

低,在外力作用下,岩石颗粒更容易解体分离,故而经历更多次高温和液氮循环处理后的试样破裂面更粗糙,破坏后试块的重合度低。

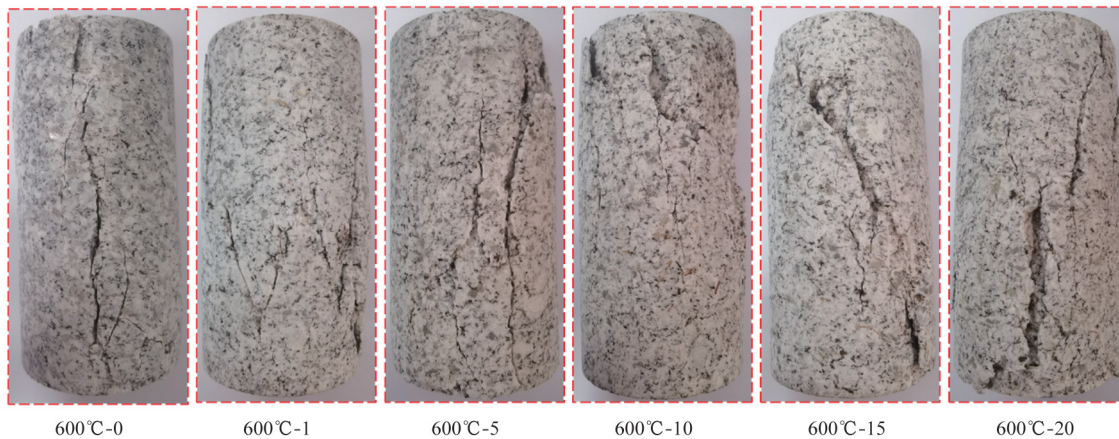


图10 花岗岩单轴压缩破坏形态图

4 高温和液氮循环作用后花岗岩劣化机制

温度效应对岩石物理力学性质的影响,是多因素共同作用的结果。温度升高,岩石内部水分丢失,矿物组分的不均衡膨胀、相变、氧化反应等,都会改变岩石原有的孔隙结构与力学性质。漳州花岗岩是由石英、长石、云母等多种矿物组成的集合体,这些矿物颗粒的热膨胀系数不同,在高温条件下会发生不同程度的热膨胀。当液氮接触高温花岗岩时,试样的表面温度骤降,石英、长石等矿物立即收缩,由于相邻矿物之间的热变形差异,液氮冷却也会在矿物边界产生局部热应力,造成低温损伤。在液氮冷却高温花岗岩的初始阶段,试样内部的温度仍处于较高状态,在液氮的刺激下呈现外部受冷收缩、内部继续膨胀的不协调状态,进而引起花岗岩表面微裂纹快速发育、扩展。当花岗岩进入下个循环周期,试样表面温度又将提前升高,此时花岗岩内部的温度仍处于较低状态,在高温的作用下呈现外部受热膨胀、内部继续收缩的不协调状态。由此可见,当花岗岩受到高温和液氮循环作用时,其微裂纹将先产生于岩石表面,随着循环次数增加,无论是高温作用还是液氮冷却,所产生的温

度应力都将由外向内逐渐加剧花岗岩损伤。

基于低场核磁共振无损检测技术,结合单轴压缩力学试验可以发现,花岗岩内部微观孔隙结构与宏观力学性质之间是存在相互作用的,其微观尺度上孔隙的发育、扩展会直接影响宏观尺度上的损伤破坏。如图11所示,未经历高温和液氮作用的花岗岩核磁孔隙度小、抗压强度高,其破裂面在微观尺度下故而十分平整,宏观破坏模式基本以单破裂面剪切或者轴向劈裂破坏为主,破坏后的岩样比较完整。而经历高温和液氮作用后的花岗岩,抗

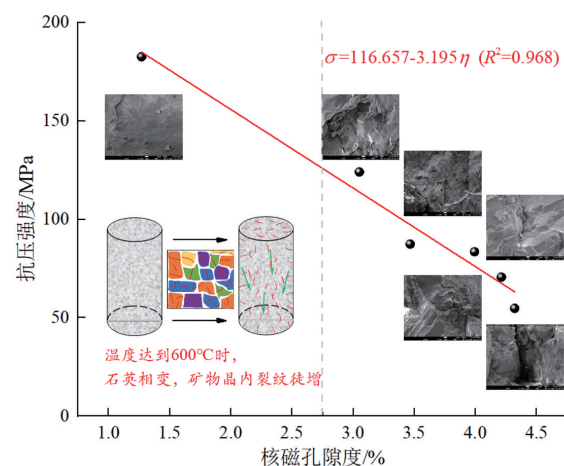


图11 核磁孔隙度与抗压强度拟合关系曲线

压强度和核磁孔隙度分别随着循环次数而降低和增加,其破裂面在微观尺度下的平整度逐渐降低,已有明显的裂隙、孔隙生成,微观结构较为复杂,宏观破坏模式基本以多破裂面剪切和轴向劈裂复合破坏为主,破坏后的岩样比较松散,脱落的岩石碎屑较多。

5 结论

1) 漳州花岗岩以大孔隙分布为主,随着循环次数增加,小孔隙谱峰比例由0.770%降至0.228%,大孔隙谱峰比例由99.230%增至99.772%,由于花岗岩内部的微裂纹逐渐发育、扩展,使得小孔隙分布呈随机性和动态性,大孔隙分布呈广泛性。

2) 单轴压缩条件下花岗岩的破坏模式以轴向劈裂破坏和剪切破坏为主,并基于强度和变形参数建立了抗压强度 σ 、弹性模量 E 、峰值应变 ε 与循环次数 N 的线性拟合关系式, $\sigma=116.657-3.195N(R^2=0.888)$ 、 $E=14.567-0.440N(R^2=0.903)$ 、 $\varepsilon=1.526+0.427N(R^2=0.982)$ 。

3) 升温状态时,花岗岩外部膨胀内部收缩;液氮冷却时,花岗岩外部收缩内部膨胀,这种不协调变形导致花岗岩随循环周期增加持续劣化,因岩石表面优先感应外界温度变化,故而裂纹扩展机制也是由表面逐渐向内部延伸。

参考文献(References)

- [1] Alimonti C, Soldo 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] Parvizi H, Rezaei-Gomari S, Nabhani F. Robust and flexible hydrocarbon production forecasting considering the heterogeneity impact for hydraulically fractured wells[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(8): 8481-8488.
- [5] Cui G D, Ren S R, Zhang L, et al. Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission fluid in a horizontal well[J]. *Energy*, 2017, 128: 366-377.
- [6] Rehman M K, Muhammad A, Rahman A F U, et al. Influence of cryogenic liquid nitrogen cooling and thermal shocks on petro-physical and morphological characteristics of Eagle Ford shale[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 96: 104313.
- [7] 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*, 2022, 41(3): 457-467.
- [8] 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.
- [9] 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(Suppl 1): 2716-2723.
- [10] Kim K, Kemeny J, Nickerson M. Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(6): 2005-2019.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 邵保平, 赵阳升. 600℃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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 翟松韬. 高温下岩石的宏观特性试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [17] Wu X G, Huang Z W, Song H Y, et al. Variations of physical and mechanical properties of heated granite after rapid cooling with liquid nitrogen[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(7): 2123-2139.
- [18] Rfo L M S D, Miguel M M S, Argandoña V G R D, et al. Emisión acústica/actividad microsismica generada bajo ciclos térmicos en una roca granítica[J]. 1986, 97: 96-102.

- [19] Chalmers G R L, Bustin R M. Porosity and pore size distribution of deeply-buried fine-grained rocks: Influence of diagenetic and metamorphic processes on shale reservoir quality and exploration[J]. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 2015, 12: 134-142.
- [20] Yan Z, Chen C, Fan P, et al. Pore structure characterization of ten typical rocks in China[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 20(2): 479-494.
- [21] 周科平, 胡振襄, 李杰林, 等. 基于核磁共振技术的大理岩卸荷损伤演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(Suppl 2): 3523-3530.

Evolution and damage mechanism of pore structure in granite after high-temperature and liquid nitrogen cycling

WANG Zhenqiang, DI Jia, WU Yang*, LI Yan, GU Zhi, GAO Shuang

China Metallurgical Construction Engineering Group CO., LTD., Chongqing 400080, China

Abstract The mechanical properties and pore structure changes caused by the circulation of low-temperature cooling medium in high-temperature granite are of great significance to further understand the high-temperature rock engineering such as dry hot rock development. Taking Zhangzhou granite as the research object, uniaxial compression tests and micro pore structure tests were conducted to analyze the evolution of different characteristic parameters with the number of cycles, and to explore the degradation mechanism of granite after high-temperature and liquid nitrogen cycling. The experimental results showed that during high temperature and liquid nitrogen cycling treatment, the small pores inside the granite exhibited random and dynamic distribution, while the large pores exhibited widespread distribution. As the number of cycles increased, the nuclear magnetic porosity and peak strain of granite gradually increased, while the compressive strength and elastic modulus gradually decreased. The fracture mode of untreated granite was mainly shear or splitting failure with a single fracture surface, while the fracture mode of granite after high temperature and liquid nitrogen cycling was mainly shear and splitting failure with multiple fracture surfaces. The differences in mineral thermal expansion coefficients and changes in strength and pore structure were key factors inducing damage and deterioration of granite under high temperature and liquid nitrogen cycling.

Keywords dry hot rock; temperature effect; low field nuclear magnetic resonance; rock damage ●



(责任编辑 傅雪)