

反复冷却处理花岗岩的声发射特征及破坏机制研究

朱鹏¹,王振²,武文宾²,姚壮壮^{2,3},王婷⁴,李晓超¹,陈亮²

(1. 库车市榆树岭煤矿有限责任公司,新疆库车 842099; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037;

3. 煤炭科学研究总院,北京 100013; 4. 鄂尔多斯职业学院机电工程系,内蒙古鄂尔多斯 017010)

摘要:为探究反复冷却处理后花岗岩的声发射特征及破坏机制,使用岛津力学试验设备、声发射监测及扫描电子显微镜系统对不同温降等级、冷却循环次数等影响因素处理下的花岗岩试件进行单轴压缩力学试验研究。结果表明:经温降等级10、15和20℃处理后的花岗岩峰值应力分别降低了28.6%、12.9%和6.8%,温降等级越小,峰值应力降低幅值越大。不同冷却处理方式下的花岗岩声发射振铃计数均可划分为平静期和活跃期两个阶段,并随温降等级降低或冷却循环次数增加,花岗岩结构损伤加剧,平静期持续时间延长。花岗岩破坏模式受温降等级和冷却循环次数影响,温降等级10℃时以张拉破坏为主;温降等级15℃时,破坏模式随循环次数增加逐渐由拉剪混合破坏向张拉破坏转变;温降等级20℃时以拉剪混合破坏模式为主。

关键词:花岗岩;反复冷却;峰值应力;声发射特征;微观结构;破坏机制

中图分类号:TD325;TU45

文献标志码:A

Research on acoustic emission characteristics and failure mechanism of granite treated by repeated cooling

ZHU Peng¹, WANG Zhen², WU Wenbin², YAO Zhuangzhuang^{2,3},
WANG Ting⁴, LI Xiaochao¹, CHEN Liang²

(1. Kuche Yushuling Coal Mine Co. Ltd, Kuche 842099, China;

2. Chongqing Research Institute, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China;

3. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China;

4. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Ordos Vocational College, Ordos 017010, China)

Abstract: To investigate the acoustic emission characteristics and failure mechanism of granite after repeated cooling treatment, uniaxial compression mechanical tests were conducted on granite specimens treated with different temperature drop levels, cooling cycles, and other influencing factors by using Shimadzu mechanical testing equipment, acoustic emission monitoring, and scanning electron microscopy systems. The experimental results show that the peak stress of granite treated by temperature drop levels of 10, 15 and 20 °C decreased by 28.6%, 12.9%, and 6.8% respectively. The smaller the temperature drop level is, the greater the amplitude of peak stress reduction becomes. The acoustic emission ringing counts of granite under different cooling treatments can be divided into two stages: The calm period and the active period. As the temperature drop level decreases or the cooling frequency increases, the damage to the granite structure intensifies and the duration of the calm period extends. The failure mode of granite is influenced by the temperature drop level and cooling frequency. At a temperature drop of

收稿日期:2024-05-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3009003);天地科技重点项目(2022-2-TD-ZD008)

作者简介:朱鹏(1990—),男,河南项城人,工程师,主要从事煤矿安全一通三防方面工作及研究。

王振(1980—),男,山东德州人,研究员,博士,从事煤矿瓦斯灾害治理相关研究工作,本文通信作者。

E-mail:cumtwangzhen@126.com

10 °C, tensile failure is the main mode. At a temperature drop of 15 °C, the failure mode gradually changes from tensile shear mixed failure to tensile failure with increasing cycles. At a temperature drop of 20 °C, tensile shear mixed failure mode is the main mode.

Key words: granite; repeated cooling; peak stress; acoustic emission characteristics; microstructure; failure mechanism

随着地下岩体工程向深部延深,深地岩体工程领域涉及的高温问题更为普遍,如增强型地热开采、核废料储存、二氧化碳封存等,高温问题已成为制约深地岩体工程发展的主控因素之一^[1]。地下岩体工程建设过程中,受冷媒介质等外界因素干扰,工程岩体温度发生反复变化,轻则致使工程岩体力学性质劣化,严重可导致工程岩体失稳,造成惨重经济损失。因此,研究高温冷却循环次数及温降等级作用下的岩石力学行为及破坏特征,对深地岩体工程建设具有重要的指导意义。

针对高温冷却循环次数对岩石力学性能及破坏特征影响这一问题,国内外学者开展了大量研究工作。余莉等^[2]研究了高温循环作用花岗岩力学性能损伤演化规律,发现随循环次数增加,花岗岩抗压强度被弱化,试样破坏模式由张拉劈裂破坏向锥形剪切破坏转变。谢晋勇等^[3]认为,随着循环次数增加,花岗岩单轴抗压强度减少,塑性特征愈发显著,声发射信号特征呈减少趋势。Rong 等^[4]通过室内试验研究发现,300 °C 高温循环对花岗岩力学性能损伤受循环次数限制,当循环次数超过 12 次时,岩石抗拉及抗压强度基本保持稳定,损伤不再加剧。李春等^[1]通过室内巴西劈裂试验证实了花岗岩抗拉强度随冷却循环次数增加而降低,但岩石抗拉强度的衰减幅度受温度主控。Peng 等^[5]探讨了 600 °C 高温循环处理细粒大理岩微观热裂纹随循环次数的变化规律,发现高温处理后的大理岩以晶间裂纹为主,并且裂纹的长度与宽度随循环次数增加而增加。Gautam 等^[6]从室内试验角度分析了 250 °C 条件下不同类型花岗岩损伤随循环次数的变化趋势,研究结果表明不同种类花岗岩抗拉强度及弹性模量均随循环次数增加而减少,但当循环次数超过 5 次时,循环次数对花岗岩损伤影响较小。Yu 等^[7]得到了 300 °C 循环高温作用下花岗岩压缩模量与弹性模量的变化规律,随循环次数增加,花岗岩压缩模量与拉伸模量均呈降低趋势。Zhao 等^[8]认为温度是影响花岗岩孔隙结构的主要因素,高温循环次数对孔隙结构的影响可以忽略。

总结以上分析可以发现,国内外学者在高温冷却循环次数对岩石力学性质影响方面已取得了颇丰成果,但这些关于冷却循环次数的研究大都将每次循环的加热目标温度设为恒定值。深地岩体工程建设过程中经常遇到变高温冷却循环次数现象,即研究靶区岩体温度随冷却循环次数而降低的现象。如地热开采过程中,冷媒介质的注入常会导致地热储层岩体出现变高温冷却循环次数工况,加剧储层岩体损伤,如图 1 所示。与恒定高温循环处理工况不同的是,变高温工况对储层岩体的损伤会随循环次数增加而减弱,采用恒定高温循环工况下的研究结论指导变温循环工况忽略了岩体损伤随循环次数的弱化细节与规律,导致评价结果偏严重,维护等级偏高,维护成本增加。因此,有必要进一步开展变高温冷却循环次数作用下的岩石力学性能劣化及破裂特征研究。

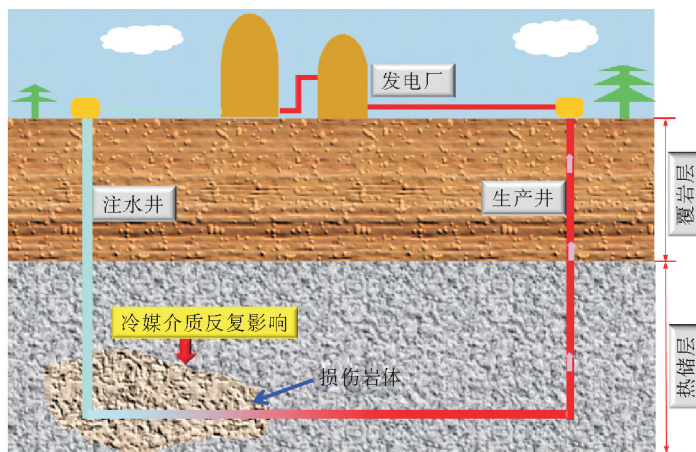


图 1 地热开采过程冷媒介质对换热通道岩体损伤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rock damage of heat channel in the process of geothermal mining

本研究以花岗岩为试验对象,分别开展温降等级 10、15 及 20 °C 工况下的花岗岩单轴压缩力学试验,获

取不同温降等级、冷却循环次数处理后的花岗岩声发射(acoustic emission, AE)特征及破坏特征,进而基于扫描电镜微细观分析揭示花岗岩破坏机制,试验结果可为深部地热开发提供理论指导。

1 试件制备与试验方案设计

采用的花岗岩试件为二长花岗岩,平均密度为 2.69 g/cm^3 。根据国际岩石力学试验规程建议方法,加工一批径高比为 1:2 的 $\Phi 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 圆柱试样,端面误差不超过 0.2 mm。

研究^[9]表明,干热岩热储层温度普遍在 $200 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$,试验设计以 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为试件最高温度,为控制其他因素的干扰,采用纵波测速的方法选取 9 个波速相近的花岗岩试件作为研究对象,如图 2 所示。首先,以 $5 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 速率^[10-12]将花岗岩试件加热至目标温度,为保证试件均匀受热,待达到目标温度后继续保持 8 h,然后将试件快速放入常温水中进行冷却处理,即为一个循环过程。按照以上步骤,依次进行温降等级 10、15 及 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的 4 次冷却循环、8 次冷却循环及 12 次冷却循环处理(以温降等级 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 为例,每冷却循环 1 次,加热目标温度降低 $10 \text{ }^\circ\text{C}$)。图 2 中,青色线代表 4 次冷却循环,橘色线代表 8 次冷却循环,红色线代表 12 次冷却循环。

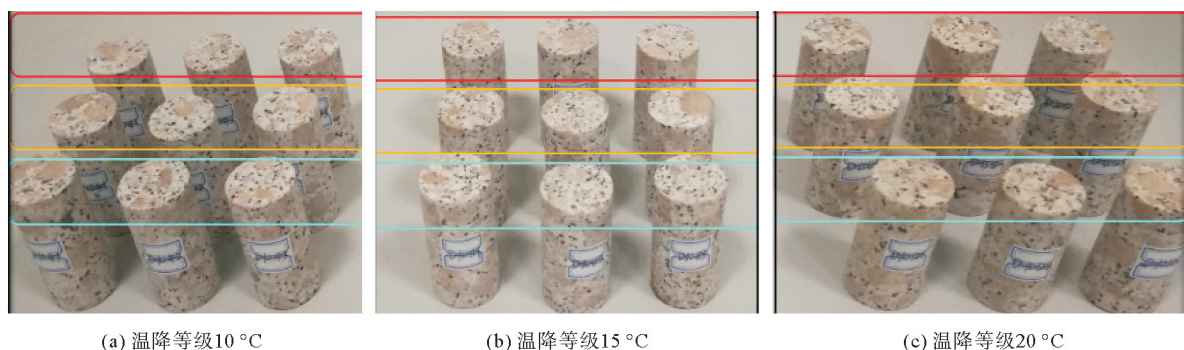


图 2 反复冷却处理后花岗岩试件

Fig. 2 Granite specimens treated by different repeated cooling cycles

采用岛津电子万能试验机对岩石试件进行力学性能测试,试验过程以 0.01 mm/s 速率加载至试件发生破坏。加载过程中采用德国 AMSY-6 声发射设备同步监测声发射信号,该监测装置配有 VS45-H 型号的高精度探头,前置放大器的增益值设为 35 dB,系统信号激发阈值设为 45 dB,监测频率设为 20 MHz,试验设备如图 3 所示。



图 3 试验设备图

Fig. 3 Diagram of test equipment

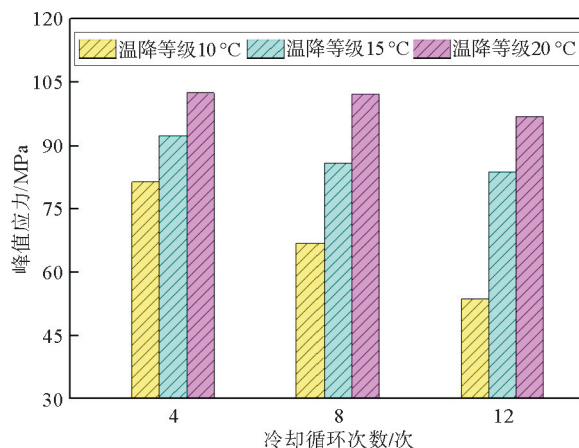


图 4 不同温降等级及循环处理后的花岗岩峰值应力

Fig. 4 Peak stress of granite treated by different repeated cooling cycles

2 试验结果与分析

2.1 花岗岩加载全过程声发射特征

由图4可知,相同冷却循环次数下,3种温降等级下的花岗岩峰值应力大小关系表现为:温降等级 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $>$ 温降等级 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ $>$ 温降等级 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;随循环次数由4次增至12次,温降等级10、15及 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理后的花岗岩峰值应力分别降低了28.6%、12.9%及6.8%,这表明温降等级越小,累积叠加的热应力对花岗岩结构损伤越严重,峰值应力降低幅度越大。8次循环后,经温降等级15及 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理后的峰值应力开始趋于稳定,表明8次冷却后,两种工况下因加热及冷冲击作用下产生的热应力均低于微裂隙二次激活条件,冷冲击对花岗岩力学性能的影响可以忽略。

不同工况下花岗岩加载全过程的声发射特征均可划分为平静期和活跃期两个阶段,如图5所示。常温下,花岗岩整体结构致密,试件破坏前均处于平静期,声发射振铃计数保持低值。

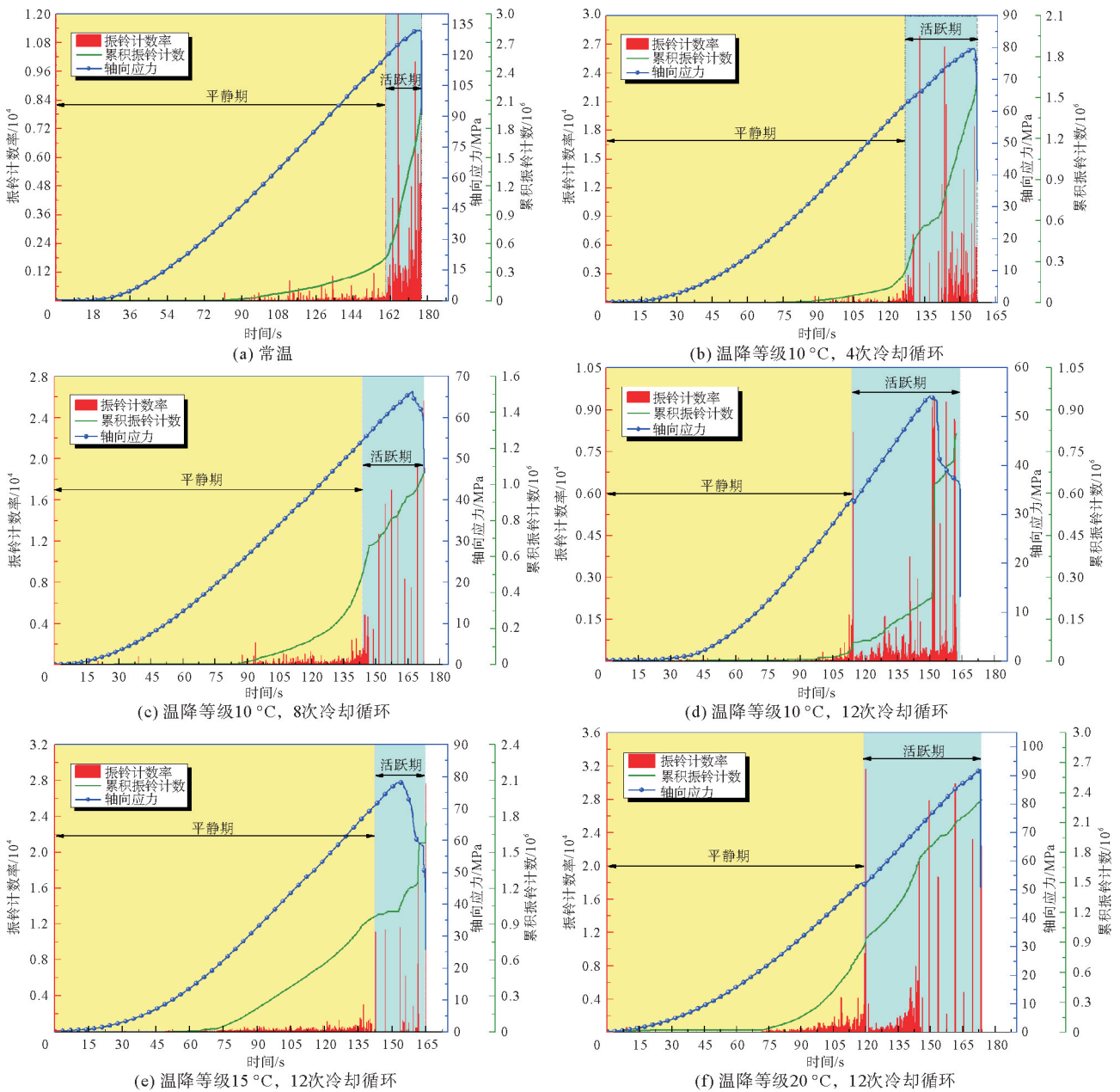


图5 反复冷却处理花岗岩应力-应变曲线与声发射信号关系

Fig. 5 Relationship between stress-strain curve and AE signal of granite treated by repeated cooling

与常温工况下的声发射特征不同,经温降等级 20 °C、4 次冷却循环处理后的花岗岩在峰前阶段表现出强烈的声发射活动,这是因为在加热及水冷冲击的双重作用下,花岗岩自身结构产生许多微裂隙,受轴向应力作用,微裂隙很快被激活、扩展及连通,岩石破坏过程反应强烈,大范围的波峰现象在峰前加载阶段出现,平静期持续时间明显缩短。但随冷却循环次数增加,声发射振铃计数平静期持续时间开始延长,累积声发射振铃计数出现降低,这主要是因为冷却循环次数的增加促进了微裂隙进一步发育,微裂隙长度及张开度增加,延长了加载过程微裂隙压密闭合时间,从而增加了平静期持续时间。

与温降等级 20 °C 相比,温降等级 15 °C、温降等级 10 °C 处理后的花岗岩声发射信号呈现一定规律性,以 12 次冷却循环为例,通过对比图 5(d)、图 5(e)及图 5(f)可以发现,随着温降等级的减小,平静期内的花岗岩声发射信号强度显著降低,这表明在冷却循环处理过程中,增加的温差热应力加剧了花岗岩结构的损伤,导致岩石内部能量得到提前释放。

2.2 花岗岩破坏热证

2.2.1 宏观破坏特征

岩石宏观破坏特征可以很好地反映岩石内部结构损伤程度。如图 6 所示,经不同温降等级及冷却循环次数处理花岗岩宏观破坏模式呈现以下规律。

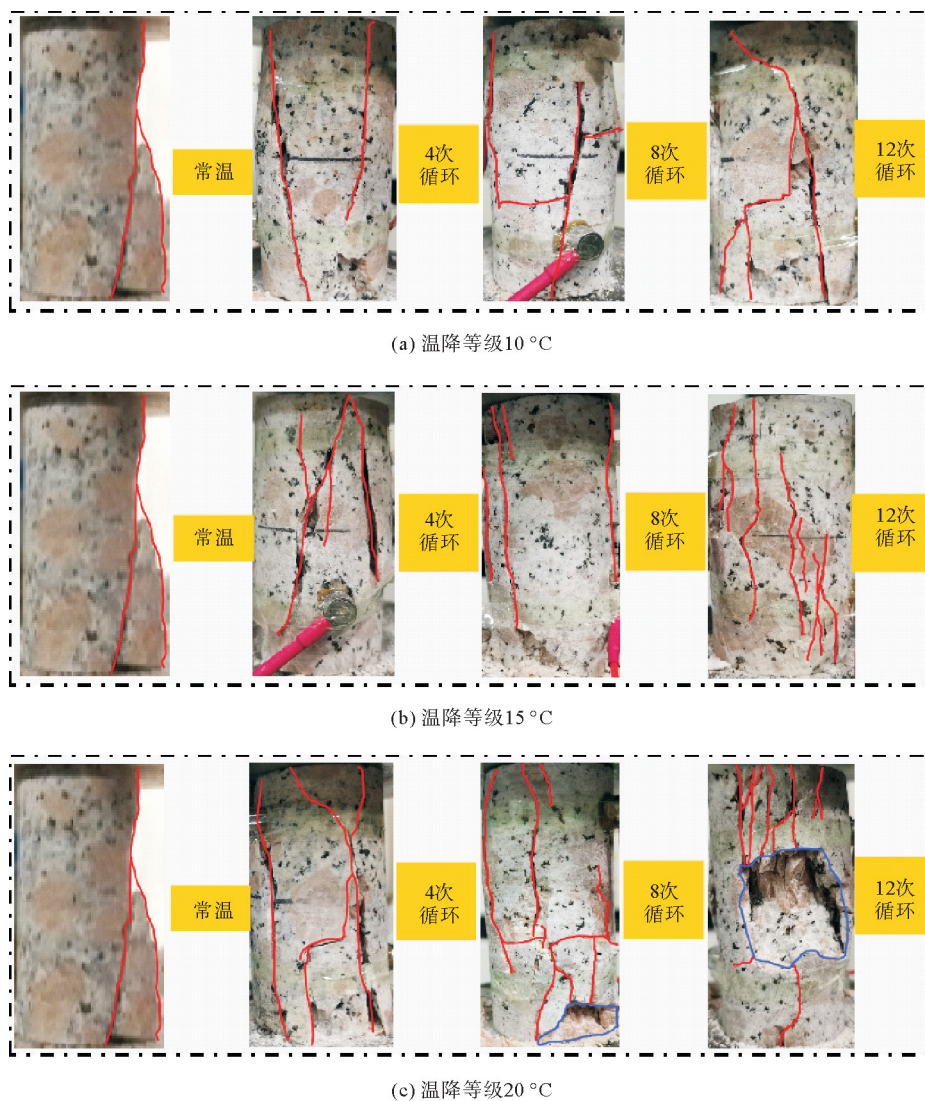


图 6 不同温降等级及冷却循环次数处理花岗岩宏观破坏特征

Fig. 6 Macro-failure characteristics of granite treated with different temperature drop levels and cooling cycles

1) 常温下,花岗岩以拉伸破坏为主^[13]。

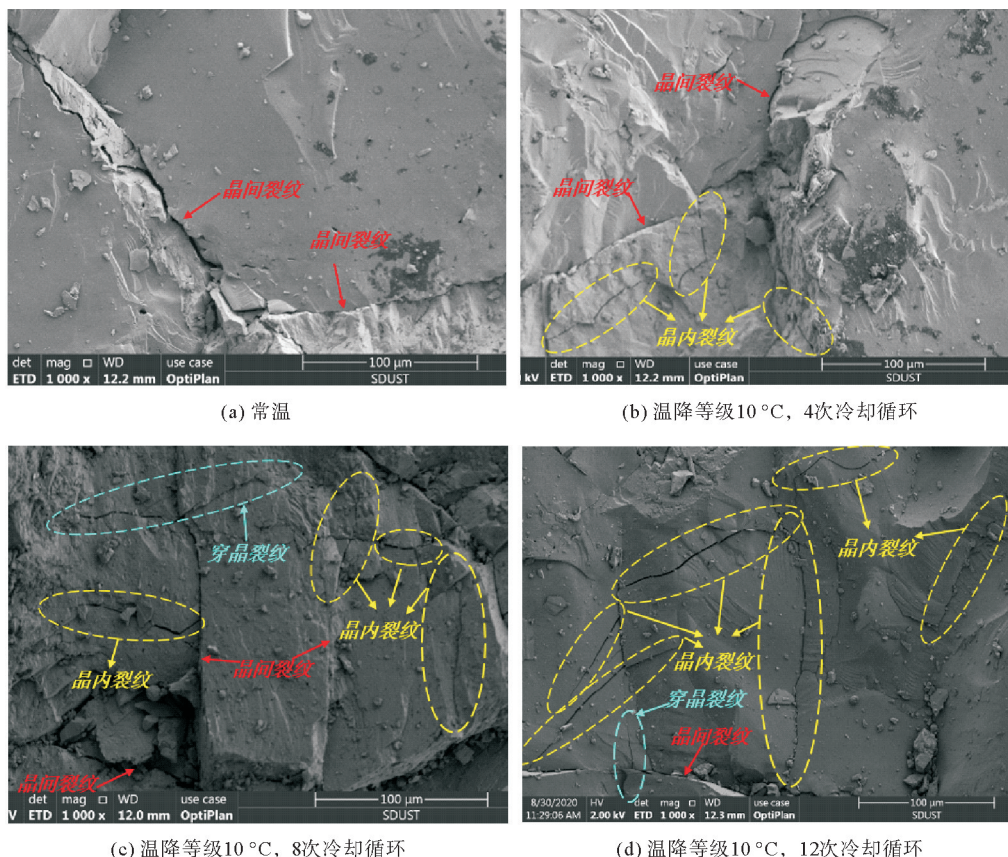
2) 在温降等级 10 °C 条件下,花岗岩均以张拉破坏为主,并且随循环次数增加,花岗岩出现局部剥落破坏现象。这表明,经温降等级 10 °C 处理后的花岗岩不仅形成大量弱面结构,而且形成了局部劣化损伤区,受到轴向荷载作用,局部劣化损伤区被激活,形成局部剥落区。

3) 当温降等级 15 °C 时,随着循环次数增加,花岗岩经历了由拉剪混合破坏模式到张拉破坏模式的转变,裂纹数量显著增多,破坏形态更为破碎。产生这种现象的主要原因是,该温降等级条件下的循环次数增加,促进了花岗岩在轴向加载开始前已形成许多弱面结构。当轴向加载作用于花岗岩时,众多弱面结构中近平行于加载方向的弱面结构优先发展,这些优先发展的弱面结构反过来又抑制了其他弱面结构发展,最终产生张拉破坏。

4) 经温降等级 20 °C 处理后的花岗岩产生热冲击损伤,岩石结构内部产生许多微裂隙,在轴向荷载作用下,微裂隙间相互连通形成多个小的弱面结构,持续增加的轴向应力促进了弱面结构的进一步发展,受应力集中区域影响,近似平行于加载方向的弱面结构率先突破自身抗拉强度形成张拉裂纹,与加载方向保持一定角度范围的弱面结构也超过自身抗剪强度形成剪切裂纹,最终形成拉剪混合破坏,并产生少量碎屑颗粒。随着冷却循环次数增加,花岗岩微裂隙密度增加,加载过程弱面结构形成区域范围增加,破坏时的宏观裂纹数量开始增多,但破坏仍为拉剪混合模式。

2.2.2 微观破坏特征

图 7 展示了不同温降等级及冷却循环次数处理后的花岗岩微观破坏特征。常温花岗岩主要以晶间断裂为主。当处理花岗岩温降等级为 10 °C 时,经 4 次冷却处理后的试件产生晶内裂纹。冷却循环次数增至 8 次时,试件晶内裂纹数量增多且整体裂纹长度增加,观察区域开始有穿晶裂纹生成。当冷却循环次数为 12 次时,观察区域中晶内裂纹及穿晶裂纹的长度和数量显著增加,这是花岗岩破坏时的剥落面积及深度随冷却循环次数增加而加剧的主要原因。



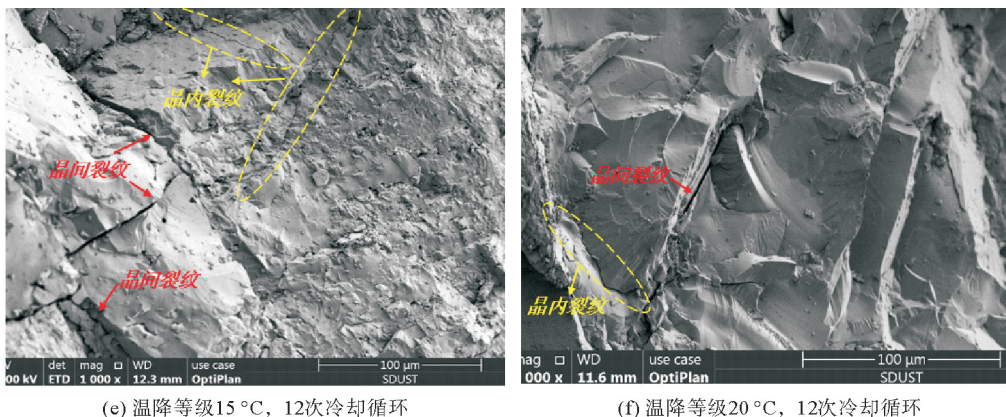


图 7 不同温降等级及循环处理花岗岩微观破坏特征

Fig. 7 Micro-failure characteristics of granites treated by different temperature drop levels and cooling cycles

同为 12 次冷却循环,与经温降等级 10 °C 处理的花岗岩相比,经温降等级 15 °C 处理的花岗岩晶内裂纹数量变少、裂纹长度减小,穿晶裂纹消失,宏观破坏现象为剥落面积及剥落深度减小;当处理花岗岩的温降等级为 20 °C 时,花岗岩晶内裂纹数量进一步减少,晶内裂纹长度也明显减小,花岗岩破坏未出现剥落现象,这是花岗岩宏观破坏模式随温降等级发生改变的根本原因。

3 花岗岩破坏机制

微裂隙的产生是花岗岩力学性能弱化的根本原因,岩石的裂隙扩展都是从岩石弱面结构开始的^[14]。花岗岩本身是一种不存在或存在极少微裂隙的结晶类岩体,岩体质地坚硬,具有较高的力学强度。但经不同温降等级及冷却循环次数处理后,力学性质会发生不同程度的劣化。

不同温降等级作用下的花岗岩结构损伤过程主要经过加热和水冷却两个阶段,如图 8 所示。第一阶段加热过程中,由于花岗岩不同晶体矿物间的热膨胀系数差异,高温作用下晶体矿物之间会产生不协调变形,晶体矿物间的相互约束作用生成热应力,一旦热应力超过晶体间胶结强度或晶体结构强度,就会生成微裂隙^[15]。第二阶段水冷却过程中,冷媒介质能够加快高温花岗岩温降速率。在这个阶段中,自花岗岩表面至花岗岩核心产生了温度梯度,进而生成较强结构热应力^[16],促进了花岗岩内新微裂隙萌生和原微裂隙之间相互贯通^[17-19],微裂隙伸长率、形状因子及张开度等物理参数得到提升,进一步加剧了岩样自身结构损伤,降低了花岗岩峰值应力。说明微裂隙的扩展及连通致使微裂隙张开度及形状因子提升,是花岗岩力学性能劣化的主要原因。

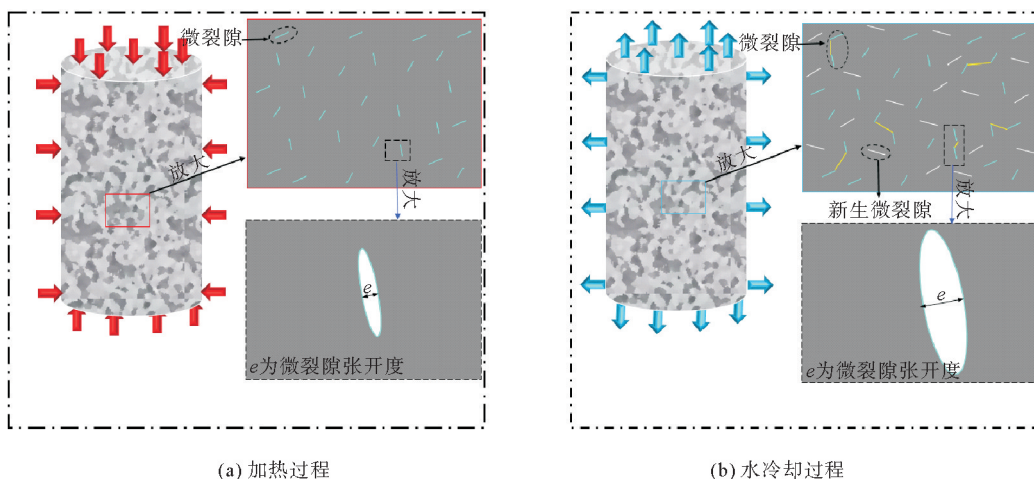


图 8 岩石微裂隙起裂、扩展及连通示意

Fig. 8 Schematic diagram of initiation, expansion and connection of rock microcracks

温降等级对花岗岩力学性能劣化影响显著。温降等级的减少能够生成更大的热应力,促使花岗岩微裂隙扩展及连通,形成更大尺寸弱面结构,提升了其张开度及伸长率。

冷却循环次数能够加剧花岗岩力学性能劣化,冷却循环处理花岗岩过程中,反复的热应力作用能够促使微裂隙间的连通、汇聚结核,形成局部劣化损伤区。但冷却循环次数对花岗岩的劣化作用并不是无界限的,当目标加热温度低于阈值温度时,加热及冷冲击作用下产生的热应力低于微裂隙的二次激活条件,冷却循环次数对花岗岩力学性能的劣化作用可以忽略。

4 结论

1) 随冷却循环次数由4次增至12次,经温降等级10、15及20℃处理后的花岗岩峰值应力分别降低了28.6%、12.9%及6.8%,温降等级越小,峰值应力降低幅值越大。

2) 声发射信号分析进一步验证了温降等级及冷却循环次数对花岗岩损伤程度。随温降等级减小或循环次数增加,花岗岩结构损伤加剧,声发射振铃计数平静期持续时间延长。

3) 温降等级10℃时花岗岩以张拉破坏为主;温降等级15℃时花岗岩破坏模式随循环次数发生了由拉剪混合破坏到张拉破坏模式的转变;温降等级20℃时,花岗岩以拉剪混合破坏模式为主。

4) 花岗岩宏观破坏模式受温降等级及冷却循环次数影响显著。随着温降等级减小或冷却循环次数增加,微观结构破坏由晶内破坏及穿晶破坏向晶间破坏转变,这是花岗岩宏观破坏模式发生改变的根本原因。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 余莉,彭海旺,李国伟,等.花岗岩高温-水冷循环作用下的试验研究[J].岩土力学,2021,42(4):1025-1035.
YU Li, PENG Haiwang, LI Guowei, et al. Experimental study on granite under high temperature-water cooling cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1025-1035.
- [3] 谢晋勇,陈占清,吴疆宇.循环高温-快速冷却处理后的花岗岩力学特性及声发射响应特征[J].工程地质学报,2021,29(2):508-515.
XIE Jinyong, CHEN Zhanqing, WU Jiangyu. Mechanical properties and acoustic emission response of granite after treatment of cyclic high temperature and rapid cooling[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 508-515.
- [4] RONG G, SHA S, LI B W, et al. Experimental investigation on physical and mechanical properties of granite subjected to cyclic heating and liquid nitrogen cooling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(5): 2383-2403.
- [5] PENG J, RONG G, TANG Z C, et al. Microscopic characterization of microcrack development in marble after cyclic treatment with high temperature[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(8): 5965-5976.
- [6] GAUTAM P K, DWIVEDI R, KUMAR A, et al. Damage characteristics of Jalore granitic rocks after thermal cycling effect for nuclear waste repository[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 54(1): 235-254.
- [7] YU L, PENG H W, ZHANG Y, et al. Mechanical test of granite with multiple water-thermal cycles[J]. Geothermal Energy, 2021, 9(1): 1-15.
- [8] ZHAO F, SUN Q, ZHANG W Q. Fractal analysis of pore structure of granite after variable thermal cycles[J/OL]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(24). DOI: 10.1007/s12665-019-8703-4.
- [9] 王贵玲,陆川.碳中和目标驱动下干热岩和增强型地热系统增产技术发展[J].地质与资源,2023,32(1):85-95.
WANG Guiling, LU Chuan. Stimulation technology development of hot dry rock and enhanced geothermal system driven by carbon neutrality target[J]. Geology and Resources, 2023, 32(1): 85-95.
- [10] SHAO S, RANJITH P G, WASANTHA P L P, et al. Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: An application to geothermal energy[J]. Geothermics, 2015, 54: 96-108.

- [11] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments[J]. *Engineering Geology*, 2017, 229: 31-44.
- [12] TANG Z C, SUN M, PENG J. Influence of high temperature duration on physical, thermal and mechanical properties of a fine grained marble[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 34-50.
- [13] 张乘蕊, 由爽, 纪洪广. 考虑矿物晶内结构特征的深部硬岩颗粒离散元模型与分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(增 2): 749-758.
ZHANG Chenghan, YOU Shuang, JI Hongguang. Grain-based model and analysis of deep hard rock considering intragranular structure characteristics of mineral[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 749-758.
- [14] 伍法权, 乔磊, 管圣功, 等. 小尺寸岩样单轴压缩试验尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(5): 865-873.
WU Faquan, QIAO Lei, GUAN Shengcong, et al. Uniaxial compression test study on size effect of smack size rock samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(5): 865-873.
- [15] 吴云, 李晓昭, 黄震, 等. 高温作用后花岗岩单轴压缩下变形破坏特征研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 240-245.
WU Yun, LI Xiaozhao, HUANG Zhen, et al. Deformation and failure characteristics of granite under uniaxial compression after high temperature[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 240-245.
- [16] 王涛, 杨建国, 刘雪松, 等. 含中心裂纹低匹配对接接头形状参数对形状因子的影响[J]. *焊接学报*, 2012, 33(1): 101-104.
WANG Tao, YANG Jianguo, LIU Xuesong, et al. Influence of joint geometric parameters on shape factor of under-matched butt joint with center crack[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(1): 101-104.
- [17] 邓龙传, 李晓昭, 吴云, 等. 不同冷却方式对花岗岩力学损伤特征影响[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(增 1): 187-199.
DENG Longchuan, LI Xiaozhao, WU Yun, et al. Mechanical damage characteristics of granite with different cooling methods[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 187-199.
- [18] 韩学贤, 张士川, 沈宝堂, 等. 不同角度充填节理花岗岩剪切裂纹扩展规律及断裂机制研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(2): 13-21.
HAN Xuexian, ZHANG Shichuan, SHEN Baotang, et al. Shear crack propagation laws and fracture mechanism of filled joint granite with different angle[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2024, 43(2): 13-21.
- [19] 黄冬梅, 朱盈盈, 乔书昱, 等. 含孔洞-双裂隙红砂岩宏细观损伤特征数值试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 32-42.
HUANG Dongmei, ZHU Yingying, QIAO Shuyu, et al. Numerical experiments on macro- and micro-damage characteristics of red sandstone with pore-double fractures[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2023, 42(4): 32-42.

(责任编辑:吕海亮)