

液氮冷却作用下三类高温岩石力学性能试验研究

董 硕¹, 沙 松¹, 蒙世仟², 荣 冠¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院有限责任公司, 广西 南宁 530023)

摘 要: 为了研究液氮冷却对高温岩石物理力学性能的影响, 对不同温度下(25 ~ 350 ℃)的花岗岩、片麻岩和砂岩试样进行液氮冷却处理, 开展了一系列的物理力学试验研究, 结合微观观察结果分析了各类岩石的损伤机理。结果表明, 提高加热温度能够加剧液氮对岩石内部结构的损伤, 随温度的升高, 岩石的孔隙率、峰值应变逐渐增大, 而纵波波速、抗压强度和弹性模量则相反。高温和液氮冷却所产生的热应力导致岩石内部裂纹的萌生和扩展, 且微裂纹主要沿石英矿物边界发育。随着加热温度的升高, 微裂纹的数量呈逐渐增加的趋势, 这是岩石宏观特性退化的主要原因。三类岩石对加热和液氮冷却处理的敏感度不同, 这与岩石在成岩作用、矿物成分、胶结类型以及孔隙结构方面的差异有关。

关 键 词: 干热岩; 液氮冷却; 高温; 力学性能; 微观观察

中图分类号: TP 20 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2021)11-1591-09

Experimental Investigation of Mechanical Properties of Three Types of High Temperature Rocks After Liquid Nitrogen Cooling

DONG Shuo¹, SHA Song¹, MENG Shi-qian², RONG Guan¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Guangxi Water & Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530023, China. Corresponding author: RONG Guan, E-mail: rg_mail@163.com)

Abstract: In order to investigate the effect of liquid nitrogen on the physical and mechanical properties of high-temperature rocks, a series of laboratory tests were carried out on granite, gneiss and sandstone specimens cooled with liquid nitrogen at different temperatures (25 ~ 350 ℃). The damage mechanisms of the three types of rocks were analyzed in combination with microscopic observations. The results show that the increase in temperature exacerbates the damage to the internal structure of the rock induced by liquid nitrogen. With the increase of temperature, the porosity and peak strain of the rock gradually increase, while the P-wave velocity, compressive strength and elastic modulus of the rock decrease. Thermal stresses generated by heating and liquid nitrogen cooling lead to the initiation and propagation of microcracks mainly along quartz mineral boundaries within the rock. The sensitivity of the three types of rocks to heating and liquid nitrogen cooling differs, depending on the lithogenesis, mineral composition, type of cementation, and pore structure of rocks.

Key words: hot dry rock; liquid nitrogen cooling; high temperature; mechanical property; microscopic observation

与化石能源相比,干热岩地热能是一种可再生的环境友好型能源,具有广阔的发展前景^[1-2]。适于开发的干热岩储存温度在150 ~ 500 ℃之间,

以变质岩、结晶类岩体为主,也可见于沉积岩体^[3-4]。目前采用有效手段对致密的地热储层岩体进行增透处置是提高干热岩地热能开采效率的

收稿日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772305); 广西壮族自治区重点研发计划项目(桂科 AB18126046)。

作者简介: 董 硕(1998-),男,河南濮阳人,武汉大学硕士研究生; 荣 冠(1971-),男,江西修水人,武汉大学教授,博士生导师。

关键. 与传统水力压裂相比,液氮压裂是一种新兴的无水压裂技术,液氮在大气压下约为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$,与高温岩体接触将产生强烈的冷冲击,在岩石表面产生较大的拉应力,从而造成拉伸破坏,促进裂隙网络的形成^[5-8]. 低温液氮压裂试验结果也集中在油气资源领域,而在干热岩开发应用上还存在许多需要解决的问题.

近年来,国内外学者逐步开展了液氮对岩石的冻结损伤及压裂试验,并取得了一些研究成果. 基于核磁共振技术,蔡承政等^[9-12]发现液氮可对岩石的孔隙结构造成严重的破坏,且损伤程度与岩石孔隙率和饱和度呈正相关. 黄中伟等^[13-14]指出低温液氮冲击导致了岩石内部微观缺陷的发展,而孔隙水结冰产生的冻胀力进一步加剧了岩石的损伤程度,当液氮作为钻井液和压裂液使用时,有助于提高破岩效率. 杨兆中等^[15]通过研究发现液氮产生的低温损伤会导致煤岩渗透率升高,含水煤岩渗透率升高幅度大于干燥煤岩. Cha 等^[16]和 Alqatahni 等^[17]在真三轴加载条件下进行了液氮低温压裂试验,结果表明,液氮低温处理在促进岩石内部微裂纹发育、增强岩石渗透性和降低起裂压力方面具有优异的表现,而裂缝的扩展方向受围压水平和各向异性的控制. Qin 等^[18-19]开展了三轴条件下液氮单次和循环注入诱发煤破坏的试验,研究发现,循环注入的压裂效率远远高于单次注入. 任韶然等^[20]利用液氮对煤岩进行冷冲击试验,发现液氮使煤岩内部结构及力学强度发生较大变化. Cai 等^[21]研究液氮处理前后煤岩渗透率变化规律,表明液氮处理后岩石

渗透率提升. Wu 等^[22]研究了加热-液氮冷却循环对花岗岩物理力学性能的影响,发现加热-液氮冷却循环处理导致岩石渗透率增强和力学特性劣化,加剧试样损伤. Yang 等^[23]对不同温度花岗岩($100\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$)在三轴围压下进行液氮压裂试验,发现经液氮低温处理后,花岗岩破裂压力降低了 $10\%\sim 51\%$.

目前,液氮对岩石损伤作用的研究大多是针对常温条件下的煤岩和页岩开展的,高温岩石在液氮冷却处理后的力学特性和损伤机理尚不清楚. 因此,本文选取花岗岩、片麻岩和砂岩为研究对象,利用液氮对处于不同高温状态下($25\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$)的岩石试样进行冷却处理,通过开展一系列的室内试验,研究液氮冷却对三类岩石物理力学特性的影响,并分析其损伤机理.

1 试验材料与方法

1.1 试样描述与制备

选取花岗岩、片麻岩和砂岩开展试验研究. 从矿山开采完整性较好、无明显裂隙的大尺度岩块. 其中,花岗岩采自河南泌阳,灰白色,质地相对均匀,主要矿物为钾长石、钠长石和石英,含有少量云母、方解石和绿泥石;片麻岩采自福建南平,深灰色,片麻状构造,深浅条带相间排列,矿物成分包括钾长石、透闪石、石英、云母和绿泥石;砂岩采自四川自贡,黄褐色,泥质胶结,由石英、伊利石和高岭石组成. 三类岩石的基本物理力学特性如表 1 所示.

表 1 三类岩石基本物理力学特性
Table 1 Physical and mechanical properties of three types of rocks

岩石类别	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙率/%	纵波波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
花岗岩	2.50	0.73	4 112	177.89	56.34
片麻岩	2.62	0.30	4 447	186.32	62.16
砂岩	2.38	10.54	2 641	69.83	15.96

根据试验需求,将岩块加工成直径 50 mm ,高度 100 mm 的圆柱体试样,其中,片麻岩的取芯方向平行于层理平面. 试样的加工制备过程严格按照国际岩石力学学会 (ISRM) 的建议方法^[24]进行. 试样的直径和高度误差控制在 0.3 mm 以内,两端面的不平行度不超过 0.05 mm . 加工完成的岩石试样如图 1 所示. 为了保证试样性质的均一性,同一类岩石试样均取自同一个岩块. 此外,为了减少试验结果的离散性,将纵波波速明显偏离

平均值的试样剔除.

1.2 试验设备与方案

1.2.1 试样加热及液氮冷却

采用 SX3-10-12 箱型马弗炉对试样进行高温处理. 各类岩石试样被分为 7 组,每组包含 3 个试样. 其中,一组试样不进行高温处理($25\text{ }^{\circ}\text{C}$),剩余各组试样分别加热至 $100, 150, 200, 250, 300$ 和 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$,以模拟干热岩储层岩石的环境温度. 加热速率设置为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,以避免热冲击诱发额外

的热裂纹. 为了使试样充分受热, 将试样加热至设定温度后继续保温 4 h. 此后, 将试样从马弗炉中取出, 立刻浸泡在液氮中冷却, 不断加入液氮, 直到试样表面没有剧烈反应, 则岩石试样完全冷却. 试样完全冷却后取出放入密封袋中, 待其恢复至室温. 岩石的加热冷却过程如图 2 所示.

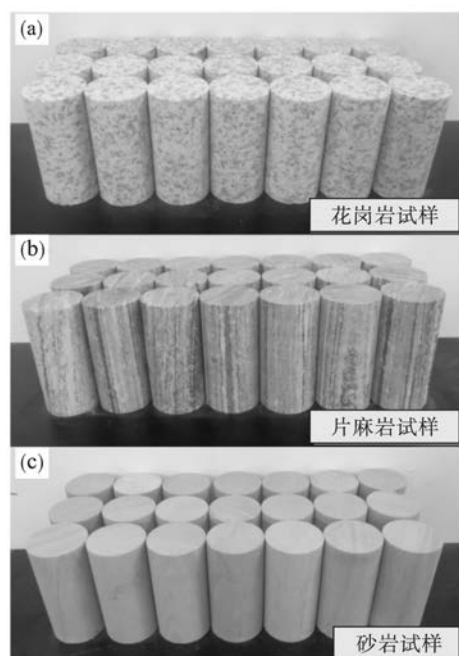


图 1 三类岩石标准圆柱体试样

Fig. 1 Standard cylindrical specimen of three types of rock

(a)—花岗岩试样; (b)—片麻岩试样; (c)—砂岩试样.

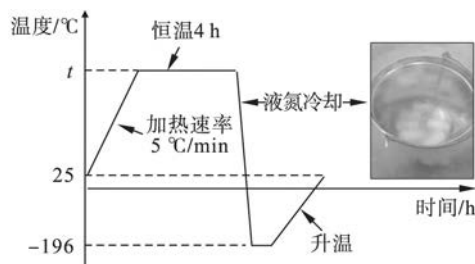


图 2 岩石试样加热冷却过程示意图

Fig. 2 Diagram of the heating and cooling process of rock specimens

1.2.2 基本物理参数测定

基于超声脉冲技术, 采用 RSM - SY5 (T) 声波测试仪对高温加热前后试样的纵波波速进行测定. 每种条件下测量三个试样的纵波波速, 取平均值作为最终结果. 另外, 根据 ISRM 的建议方法^[24], 对高温加热前后岩石试样的孔隙率进行测定. 借助 ZK - 270 真空饱和装置, 将试样在 0.1 MPa 的真空环境中浸水 24 h, 称重得到饱和质量 M_{sat} ; 然后, 将试样放在 DHG - 101 型鼓风干燥箱中, 在 105 °C 的温度下干燥 24 h, 称重得到干燥

质量 M_s . 试样的孔隙率为

$$n = \frac{100(M_{\text{sat}} - M_s)}{V\rho_w} \quad (1)$$

式中: n 是孔隙率, %; M_{sat} 是饱和质量, g; M_s 是干燥质量, g; V 是表观体积, cm^3 ; ρ_w 是水的密度, g/cm^3 .

1.2.3 单轴压缩试验

单轴压缩试验在 TAW - 3000 型岩石三轴伺服多场耦合试验系统上开展, 如图 3a 所示. 该系统最大加载力 3 MN, 控制精度 0.01%. 试验采用轴向变形控制, 加载速率恒定为 0.02 mm/min. 试样的轴向和径向变形由对应的线性可变差动变压器 (LVDT) 监测 (图 3b), 其测量范围分别为 $\pm 2.5 \text{ mm}$ 和 $\pm 6.5 \text{ mm}$, 测量精度均为 0.01%. 试验过程中产生的所有数据由控制软件自动记录 (图 3c). 同样, 在每种条件下对三个试样开展单轴压缩试验, 以减少离散误差.

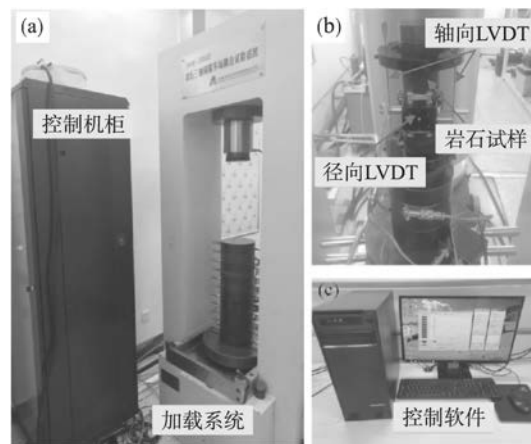


图 3 试验系统

Fig. 3 Test system

(a)—单轴加载设备; (b)—试样及 LVDT 安装; (c)—控制软件.

2 试验结果与分析

2.1 表观特征

对经过加热和液氮冷却后的岩石试样进行仔细的外观检查. 花岗岩和片麻岩试样在各温度下未发生明显的颜色改变, 而砂岩试样在经过 250 °C 的高温处理后, 外观颜色有所加深, 由最初的黄褐色变为红褐色, 如图 4a 所示. 这是由于砂岩矿物中的铁离子在热作用下由低价态逐渐向高价态转变所致^[25]. 此外, 三类岩石表面粗糙度随着加热温度的升高而更加显著.

在各温度条件下, 未在花岗岩试样表面发现明显的宏观裂纹 (图 4b), 而在 350 °C 时, 经过液

氮冷却的片麻岩和砂岩试样表面发生了局部宏观破裂,如图 4c,图 4d 所示.液氮快速冷却使试样表面发生高速收缩变形并产生拉应力,在较大的温差条件下,拉应力超过了矿物间的抗拉强度,会造成宏观拉伸破坏^[7,9].

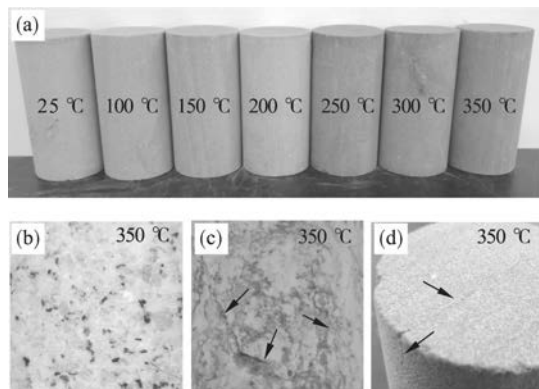


图 4 岩石试样表面观察

Fig. 4 Macroscopic observations of rock specimens

(a)—砂岩颜色变化; (b)—花岗岩局部照片;
(c)—片麻岩局部照片; (d)—砂岩局部照片.

2.2 孔隙率

孔隙率是岩石重要的基础物理特性之一,反映了岩石内部结构的密实度,对岩石材料的强度和变形特性有着显著影响.图 5 呈现了液氮冷却处理后三类岩石的孔隙率随加热温度的变化规律.从图 5 可以看出,三类岩石的孔隙率与加热温度总体呈正相关,表明在较高的温度下进行液氮冷却处理能够促进试样内部微观缺陷的发展.在室温条件下,花岗岩、片麻岩和砂岩的孔隙率分别为 0.73%、0.30% 和 10.54%,花岗岩和片麻岩具有相对致密的孔隙结构,而砂岩内部孔隙发育.这主要是因为岩石的成岩作用和矿物间的胶结类型不同所致.在 350 °C 的高温条件下,经液氮冷却后花岗岩和片麻岩试样的孔隙率分别为 0.93% 和 0.47%,较室温条件下增加 27.40% 和 56.67%.由图 5 可以看出,花岗岩孔隙率变化呈现增大的趋势,增幅较平缓.这是由于花岗岩试样经历了先加热后液氮冷却的过程,在高温及温差冷冲击效应的作用下,使得试样内部结构发生变化,温度越高,对试样的损伤程度越大,故而曲线呈上升趋势.但由于试验花岗岩试样结构致密,350 °C 的高温加热及冷冲击作用还未使得花岗岩内部晶体结构产生大的破坏,未造成石英的相态转化,故而升幅较缓.

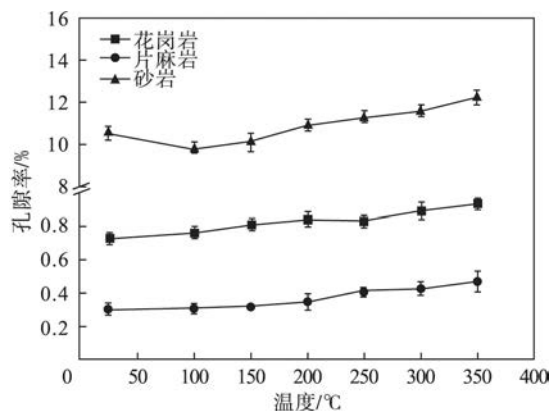


图 5 液氮冷却后三类岩石孔隙率随温度的变化

Fig. 5 Variations in porosity of three types of rocks with temperature after liquid nitrogen cooling

与花岗岩相比,片麻岩试样虽然具有更低的初始孔隙率,但在 200 °C 之后,其孔隙率的增长较大.这是因为片麻岩层理薄弱区处的原生裂纹在强烈的热冲击作用下逐渐沿层理面发育,导致裂隙通道的扩展,从而导致孔隙率的大幅提高^[25].砂岩试样的孔隙率在 200 °C 之前略有下降,而后表现为逐渐增加的趋势.这是因为在 25 ~ 200 °C 较低温度条件下,随着温度上升,试样内部微孔隙及小孔隙逐渐增加,由于砂岩内部孔隙发育,中孔隙及大孔隙数量逐渐减少.该温度区间矿物颗粒膨胀,中、大孔隙逐渐闭合,从而导致砂岩孔隙率降低.当温度超过 200 °C 后,中、大孔隙数量逐渐增多,孔隙率增大.相比而言,砂岩对热冲击的敏感性较低,在 350 °C 下,其孔隙率为 12.26%,较室温条件下仅增长 16.32%.砂岩疏松的孔隙结构为矿物提供了热变形空间,有助于减少局部热应力和热破坏的产生^[26].

2.3 纵波波速

纵波波速对岩石内部微观缺陷的发育非常敏感,因此可以作为评价岩石微观结构损伤的有效指标.经过液氮冷却后三类岩石的纵波波速随温度的变化如图 6 所示.对于完整的花岗岩和片麻岩试样,其纵波波速分别为 4 112 和 4 447 m/s.相比而言,片麻岩比花岗岩具有更密实的内部结构,这与孔隙率的结果一致.而对于孔隙发育的砂岩试样,其纵波波速为 2 641 m/s,远小于花岗岩和片麻岩波速.从图 6 可以看出,随着加热温度的升高,花岗岩和片麻岩的纵波波速呈近似线性降低,砂岩试样的纵波波速表现为先增加后减少的波动变化.在 350 °C 的加热温度下,经液氮冷却后的花岗岩、片麻岩和砂岩试样的纵波波速较常温条件下分别减小了 21.69%、23.34%、6.51%.

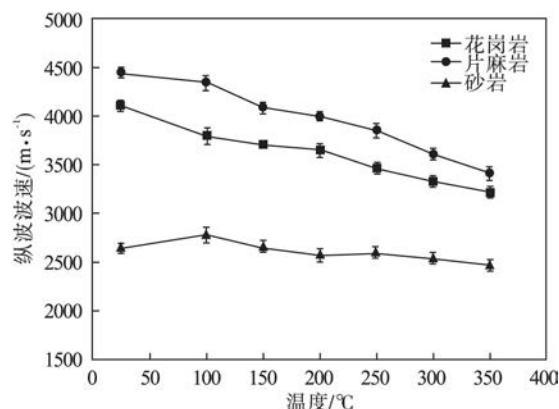


图 6 液氮冷却后三类岩石纵波波速随温度的变化

Fig. 6 Variations of P-wave velocity of three types of rocks after liquid nitrogen cooling

液氮冷却对高温岩石产生的热冲击损伤取决于两者之间的温差,温差越大,试样内部产生的热应力则越大,对岩石内部结构造成损伤也就越显著^[27]. 同样,液氮冷却处理对片麻岩产生的热冲击损伤最为显著,花岗岩次之,而对砂岩内部结构的破坏相对较小.

2.4 应力-应变曲线

图 7 显示了三类岩石试样在不同处理条件下的典型应力-应变曲线. 从应力-应变曲线可以看出,岩石在加载过程中经历了裂纹闭合、弹性变形、裂纹稳定扩展、裂纹加速扩展以及峰后变形 5 个渐进破坏阶段. 在初始加载阶段,试样的应力-应变曲线表现出非线性变形,曲线呈上凹状,这与岩石内部微裂纹在荷载作用下的闭合有关^[23]. 随着轴向应力的进一步增大,应力-应变曲线进入线弹性阶段,试样的变形参数,如弹性模量和泊松比,可以根据此阶段曲线的线性变化来确定. 随后,随着岩石微裂纹的不断萌生、发展和合并,应力-应变曲线逐渐偏离线性,产生塑性变形,直至达到峰值强度. 最后,曲线进入峰后变形阶段,轴向应力逐渐降低,试样产生宏观破裂面. 从图 7 可以看出,随着加热温度的升高,三类岩石在初始变形阶段的非线性均逐渐增强,表明温度的提高加剧了液氮冷却对岩石产生的热冲击损伤,即岩石内部产生了更多的微裂纹. 与花岗岩和砂岩的光滑曲线不同,在各温度下,片麻岩试样的应力-应变曲线在弹性阶段后多次出现明显的应力突变点,曲线呈现锯齿状(图 7b). 这主要是因为,在加载过程中片麻岩试样沿层理面发生了多次局部破裂. 此外,加热和液氮冷却处理对试样峰后变形的影响并不显著. 几乎所有岩石试样在峰值应力后都出现应力骤降,这意味着它们均以脆性破坏的

形式失效.

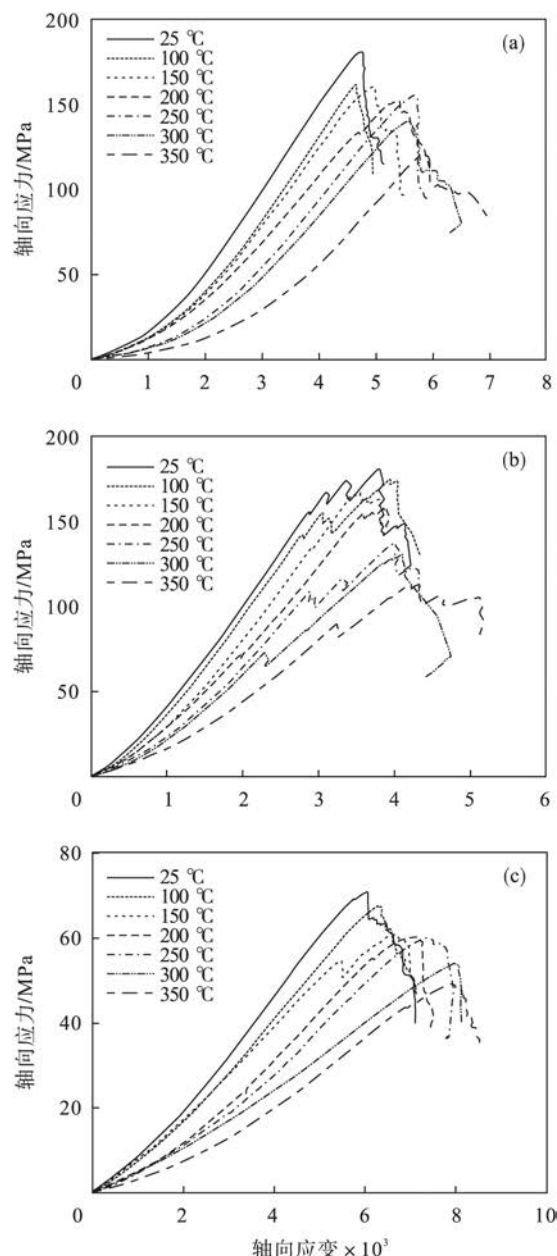


图 7 三类高温岩石液氮冷却后应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of three types of rocks after liquid nitrogen cooling

(a)—花岗岩; (b)—片麻岩; (c)—砂岩.

2.5 强度变形参数

经液氮冷却后,三类岩石的抗压强度随温度的变化如图 8 所示. 在室温下,花岗岩、片麻岩和砂岩的强度分别为 177.89、186.32 和 69.83 MPa. 随着加热温度的提高,三类岩石的强度总体呈下降趋势. 在 250 °C 之前,片麻岩的抗压强度高于花岗岩,此后则呈现出更大的降幅. 在 350 °C 时,花岗岩和片麻岩抗压强度较常温条件分别下降了 30.25% 和 40.66%. 片麻岩的层理面胶结较弱,在高温和液氮冷却冲击的双重作用下,片麻岩的强度退化更为显著. 对于砂岩试样,其在任意加热

温度下始终具有最低的抗压强度. 相比于花岗岩和片麻岩, 砂岩对高温和液氮冷却处理并不敏感, 在 350 °C 时, 砂岩的抗压强度较室温条件仅下降 22.76%.

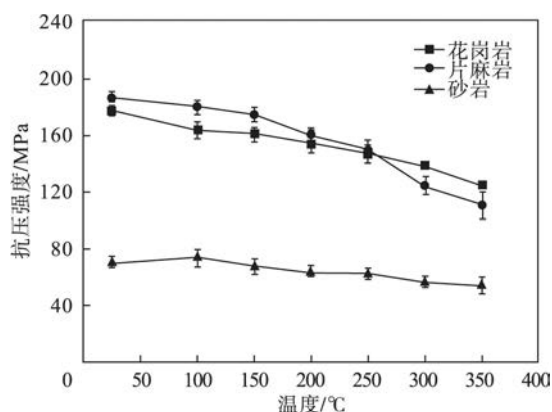


图 8 液氮冷却后三类岩石抗压强度随温度的变化
Fig. 8 Variations of compressive strength of three types of rocks with temperature after liquid nitrogen cooling

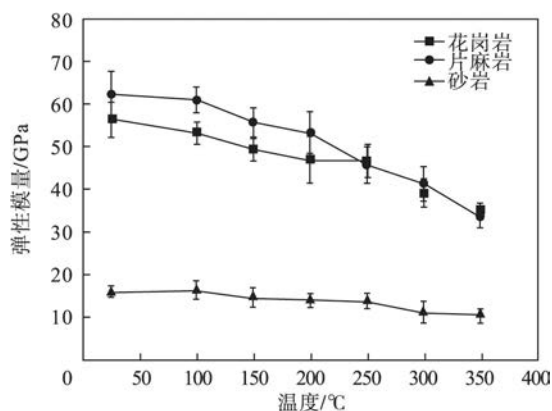


图 9 液氮冷却后三类岩石弹性模量随温度的变化
Fig. 9 Variations of Young's modulus of three types of rock with temperature after liquid nitrogen cooling

弹性模量是衡量岩石抵抗弹性变形能力大小的尺度. 在本研究中, 不同处理条件下岩石试样的弹性模量通过应力-应变曲线中 40% ~ 60% 峰值应力对应的线性部分确定(图 9), 从图 9 可以看出, 高温和液氮冷却对岩石的弹性模量有着显著影响. 总的来说, 岩石试样的弹性模量随着加热温度的升高而逐渐降低. 花岗岩、片麻岩和砂岩试样在室温下的弹性模量分别为 56.34, 62.16 和 15.96 GPa. 经 350 °C 高温处理及液氮冷却后, 花岗岩和片麻岩的弹性模量分别降低 37.79% 和 46.16%, 而砂岩变化相对较小, 仅降低 34.71%, 进一步说明液氮冷却对花岗岩和片麻岩的损伤用更强, 而对砂岩的影响相对较小. 图 10 为三类岩石在不同处理条件下的峰值应变. 结果表明, 在更高的

温度条件下进行液氮冷却处理会导致岩石峰值应变近似线性地增加, 这反映出试样内部结构的劣化程度逐渐增强.

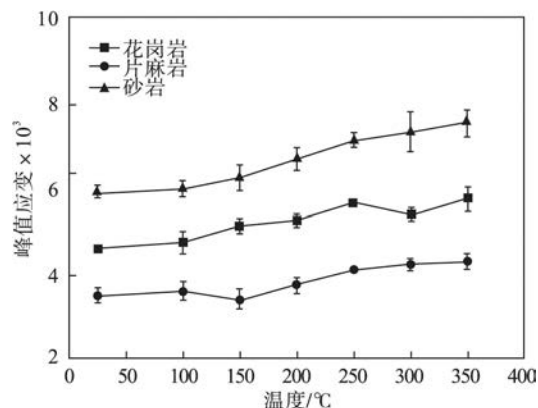


图 10 液氮冷却后三类岩石峰值应变随温度的变化
Fig. 10 Variations of peak strain of three types of rock with temperature after liquid nitrogen cooling

2.6 岩石破坏形态

经历不同加热-液氮冷却处理后, 三类岩石的破坏模式如图 11 所示. 从图中可以看出, 三类岩石的破坏模式总体都以脆性拉伸劈裂破坏为主, 在试样表面可以观察到一个或多个近似垂直的拉伸裂纹. 由于片麻岩层理结构发育, 层间矿物的胶结作用远小于层内矿物间的结合强度, 其破坏大多沿层理面发生. 在不同的加热温度下, 试样破坏后的完整性有着明显的不同. 随着温度的升高, 三类岩石试样破坏后的完整性逐渐变差, 表现为主断裂附近局部裂纹数量的增加. 当加热温度在 300 °C 时, 三类岩石局部裂纹更为发育, 且有更多大块碎片从试样脱落. 这是由于在较高的温度下, 液氮快速冷却引起的热冲击效应进一步加剧了岩石的初始损伤.

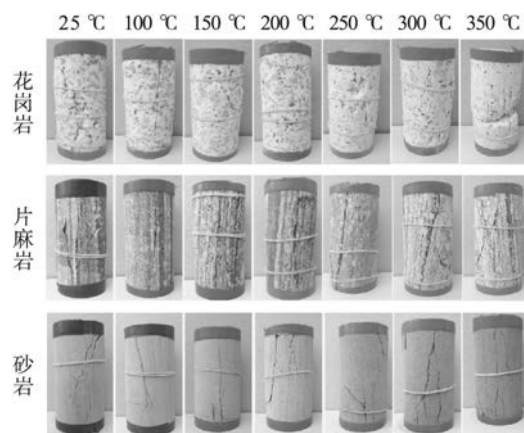


图 11 不同加热-液氮冷却处理后三类岩石失效模式
Fig. 11 Failure modes of three types of rocks after different heating-liquid nitrogen cooling treatments

3 微观观察与损伤机理

3.1 微观结构观察

采用 Olympus BX53M 偏光显微镜对在不同温度下进行液氮冷却处理后的三类岩石试样的微观结构进行观察. 为了有效识别微裂纹的发展, 将岩石试样的微观结构放大 50 倍. 部分温度条件下三类岩石的微观结构如图 12 所示.

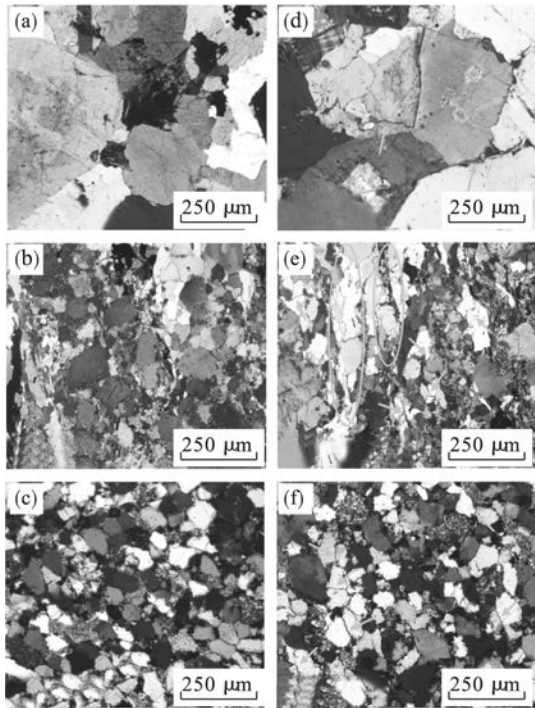


图 12 液氮冷却后三类岩石微观结构
Fig. 12 Microstructure of three types of rocks after liquid nitrogen cooling
(a)—25 °C—花岗岩; (b)—25 °C—片麻岩;
(c)—25 °C—砂岩; (d)—350 °C—花岗岩;
(e)—350 °C—片麻岩; (f)—350 °C—砂岩.

由图 12a ~ 图 12c 可以看出, 在室温条件下, 三类岩石中的矿物晶体排列紧密, 除了原生的矿物边界以外, 在岩石薄片上均未观察到明显的微裂纹, 表明未损伤岩石的内部结构完好. 随着加热温度的升高, 岩石的微观结构逐步受到破坏, 微裂纹在矿物边界, 甚至晶体内部逐渐萌生、发育, 微裂纹数量逐渐增加. 图 12d ~ 图 12f 分别为 350 °C 时花岗岩、片麻岩和砂岩的显微结构照片. 可以看出, 经 350 °C 高温处理后, 三类岩样矿物颗粒内裂纹较常温明显增多, 石英和长石颗粒内部裂纹发育显著. 在此温度条件下, 晶界裂纹为主要的裂纹形式, 晶内裂纹仅在部分矿物晶体中存在. 对于三类岩石而言, 石英均为其主要的矿物成分, 由于石英具有较大的热膨胀系数, 因此大多数的微裂纹

沿石英矿物边界发育. 此外, 相比于花岗岩试样, 片麻岩试样在 350 °C 时的微裂纹发育更为显著, 且沿矿物排列方向集中分布. 砂岩由沉积作用形成, 矿物间存在胶结物, 初始孔隙率较大. 高温加热液氮快速冷却后其内部矿物不均匀性变形得到一定程度协调, 因此其微观结构的破坏程度相对不明显, 以石英边界的晶界裂纹发育为主.

3.2 热冲击损伤评价

上述试验结果表明, 加热和液氮冷却处理对岩石内部结构产生了显著的热冲击损伤, 造成岩石物理力学性能的恶化. 为了对三类岩石损伤程度进行定量评价, 基于弹性应变理论, 定义了与弹性模量相关的损伤变量, 即

$$D = 1 - \frac{E_T}{E} \tag{2}$$

式中: D 是损伤变量; E 为室温下岩石的弹性模量; E_T 为不同加热温度下岩石的弹性模量. 三类岩石损伤变量的计算结果见表 2.

表 2 三类岩石热损伤变量
Table 2 Thermal damage variables of three types of rocks

温度/ °C	100	150	200	250	300	350
花岗岩	0.06	0.12	0.17	0.18	0.31	0.38
片麻岩	0.02	0.11	0.15	0.27	0.34	0.46
砂岩	-0.03	0.09	0.13	0.14	0.31	0.35

图 13 显示了液氮冷却后三类岩石损伤变量随加热温度的变化. 结果显示, 三类岩石损伤变量总体随温度的升高而增大, 损伤变量随加热温度的变化可以通过二次多项式拟合获得. 观察可知, 三类岩石损伤变量随温度变化的敏感性不同. 当温度低于 200 °C 时, 花岗岩损伤变量最大, 由于其内部矿物颗粒排列紧密, 经加热和液氮冷却处理

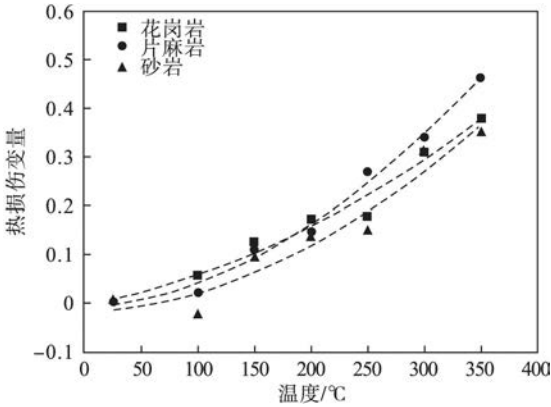


图 13 热损伤变量随温度的变化及拟合结果
Fig. 13 Variation of thermal damage variables with temperature and fitting results

后,矿物颗粒裂纹较常温明显发育,故损伤变量增大.但在200℃之后,片麻岩的损伤程度最为显著,这与片麻岩层理结构在热冲击作用下的损伤破裂有关.相比而言,在各温度条件下,砂岩的损伤变量始终保持在较小的水平,由于其初始孔隙率较大,高温加热过程中砂岩内部矿物的不均匀变形能够得到一定程度的协调.

总的来说,损伤变量能够反映岩石试件内部损伤随温度的变化,与试验结果吻合较好.

3.3 损伤机理分析

试验结果表明,高温和液氮冷却处理对岩石的物理力学特性有着显著的劣化影响,这是多种因素综合作用的结果.一般来说,岩石中的矿物具有不同的热膨胀系数,并且可以沿着不同的晶轴发生膨胀^[29].在高温加热过程中,热应力会使相邻的矿物之间发生不协调变形.一旦热应力超过了矿物颗粒间的胶结强度,热裂纹就会沿着矿物边界萌生^[30].加热温度升高时岩石内部的热应力进一步增强,从而加剧了对岩石微观结构的损伤.采用液氮对岩石进行快速冷却处理时,较大的温度梯度使岩石内部发生强烈的热交换,会导致热应力的产生.对于经过液氮冷却的高温岩石试样来说,其内部热应力是温度和热冲击共同作用的产物.此外,介质之间的温度差异与热应力的大小存在正比例关系,即温差越大,热应力越显著^[28].因此,加热温度的升高进一步提高了液氮对岩石试样物理力学特性的劣化程度.

由于三类岩石在成岩作用、矿物学特征、胶结类型以及孔隙结构等方面的差异,它们对热冲击损伤的响应程度有所不同.花岗岩是侵入上层地层的熔融岩浆经缓慢冷却结晶而形成的火成岩,其内部的矿物颗粒排列紧密,并通过生长的晶体牢固地胶结在一起.因此,花岗岩具有较低的初始孔隙率和较少的原生缺陷.本研究所用的片麻岩是由岩浆岩经变质作用而成的为正片麻岩,其矿物成分与花岗岩基本一致,同样具有较为致密的孔隙结构.在高温下,花岗岩和片麻岩的矿物晶体之间由于缺少足够的变形空间,其晶体间的热应力明显高于砂岩试样,从而更容易产生损伤破坏.此外,由于片麻岩层理发育,层间矿物的胶结作用远小于层内矿物间的结合强度,在热荷载的作用下容易破裂,为液氮进入试样内部提供了裂隙通道.因此,在较高的加热温度下,液氮冷却对片麻岩物理力学特性的劣化程度显著大于花岗岩.砂岩是由风化沉积物因压实和胶结而形成的典型沉积岩,岩石内部的石英矿物经伊利石和高岭石等

黏土矿物胶结,矿物颗粒排列相对松散,这使得砂岩具有较强的适应热变形的能力.在一定的条件下,液氮冷却对高温砂岩试样的损伤并不显著,矿物的热膨胀变形甚至可以增强砂岩孔隙结构的密实度,从而提高岩石的宏观力学特性.然而,随着加热温度的进一步提高,液氮冷却所产生的热应力足以破坏砂岩矿物间的胶结作用,造成砂岩强度特性的弱化.

4 结 论

1) 加热温度的升高加剧了液氮冷却对岩石物理力学特性的劣化,在350℃条件下经液氮冷却后的片麻岩和砂岩产生了宏观裂纹,而花岗岩表观保持完好,三类岩石的孔隙率、峰值强度随温度总体呈增大趋势,而纵波波速、抗压强度和弹性模量变化相反.

2) 高温和液氮冷却所产生的热应力导致岩石内部晶界和晶内裂纹的萌生和扩展,且微裂纹主要沿石英矿物边界发育.随着加热温度的升高,微裂纹的数量呈逐渐增加的趋势,这是岩石宏观特性退化的主要原因.

3) 由于在成岩作用、矿物学特征、胶结类型以及孔隙结构等方面的差异,三类岩石对热冲击损伤的响应程度有所不同.砂岩疏松的孔隙结构能够减少热应力造成的损伤,对高温和液氮冷却处理的敏感性相对较低.与花岗岩相比,在较高的温度下,液氮冷却产生的热冲击效应更容易对片麻岩的层理面造成破坏,导致其物理力学特性的劣化更为显著.

参考文献:

- [1] 许天福,胡子旭,李胜涛,等.增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J].地质学报,2018,9(9):1936-1947.
(Xu Tian-fu, Hu Zi-xu, Li Sheng-tao, et al. Enhanced geothermal systems: international research progress and China's current research status [J]. *Geological Journal*, 2018, 9(9): 1936-1947.)
- [2] Caulk R A, Ghazanfari E, Perdril J N, et al. Experimental investigation of fracture aperture and permeability change within enhanced geothermal systems[J]. *Geothermics*, 2016, 62: 12-21.
- [3] Breede K, Dzebisashvili K, Liu X L, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future [J]. *Geothermal Energy*, 2013, 1(1): 1-27.
- [4] 那金,许天福,魏铭聪,等.增强地热系统热储层-盐水-CO₂相互作用[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(5):1493-1501.
(Na Jin, Xu Tian-fu, Wei Ming-cong, et al. Enhanced thermal reservoir-salt water-CO₂ interactions in geothermal systems

- [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science)*, 2015, 45 (5):1493–1501.)
- [5] Sinal M L, Lancaster G. Liquid CO₂ fracturing: advantages and limitations [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1987, 87(5):26–30.
- [6] Huang P P, Huang Z W, Yang Z Q, et al. An innovative experimental equipment for liquid nitrogen fracturing[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(3):036104
- [7] McDaniel B W, Grundmann S R, Kendrick W D, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid[R]. San Antonio: SEP Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, SPE 38623, 1997.
- [8] 张璐璐, 李波, 张强, 等. 液氮冷浸煤岩孔隙损伤和渗透率演化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (sup2): 3938–3946.
(Zhang Lu-lu, Li Bo, Zhang Qiang, et al. Study on pore damage and permeability evolution properties of coal rock caused by liquid nitrogen soaking [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37 (sup2): 3938–3946.)
- [9] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮冻结条件下岩石孔隙结构损伤试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4):965–971.
(Cai Cheng-zheng, Li Gen-sheng, Huang Zhong-wei, et al. Experimental study on structural damage of rock pore under freezing condition of liquid nitrogen [J]. *Geotechnics*, 2014, 35(4):965–971.)
- [10] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮压裂中液氮对岩石破坏的影响试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4):98–103.
(Cai Cheng-zheng, Li Gen-sheng, Huang Zhong-wei, et al. Experimental study on effect of liquid nitrogen on rock failure during cryogenic nitrogen fracturing [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2014, 38 (4):98–103.)
- [11] Cai C Z, Li G S, Huang Z W, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 507–517.
- [12] Cai C Z, Li G S, Huang Z W, et al. Rock pre structure damage due to freeze during liquid nitrogen fracturing[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(12): 9249–9257.
- [13] 黄中伟, 李根生, 蔡承政, 等. 岩石液氮低温致裂实验及在油气开采中应用前景[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(sup1):158–162.
(Huang Zhong-wei, Li Gen-sheng, Cai Cheng-zheng, et al. Cryogenic fracturing experiments with liquid nitrogen in rocks and its application in oil and gas extraction [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36 (sup1): 158–162.)
- [14] 黄中伟, 位江巍, 李根生, 等. 液氮冻结对岩石抗拉及抗压强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3):694–701.
(Huang Zhong-wei, Wei Jiang-wei, Li Gen-sheng, et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3):694–701.)
- [15] 杨兆中, 张云鹏, 贾敏, 等. 低温对煤岩渗透性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2):354–360.
(Yang Zhao-zhong, Zhang Yun-peng, Jia Min, et al. Experimental research on influence of low temperature on coal permeability [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38 (2):354–360.)
- [16] Cha M S, Alqahtani N B, Yin X L, et al. Laboratory system for studying cryogenic thermal rock fracturing for well stimulation [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 156:780–789.
- [17] Alqatahni N B, Cha M S, Yao B W, et al. Experimental investigation of cryogenic fracturing of rock specimens under true triaxial-confining stresses[C]//SPE Europe Featured at 78th EAGE Conference and Exhibition. Vienna, 2016:1271–1289.
- [18] Qin L, Zhai C, Liu S M, et al. Infrared thermal image and heat transfer characteristics of coal injected with liquid nitrogen under triaxial loading for coalbed methane recovery [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118:1231–1242.
- [19] Qin L, Zhai C, Liu S M, et al. Mechanical behavior and fracture spatial propagation of coal injected with liquid nitrogen under triaxial stress applied for coalbed methane recovery[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233:1–10.
- [20] 任韶然, 范志坤, 张亮, 等. 液氮对煤岩的冷冲击作用机制及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (sup2): 3790–3794.
(Ren Shao-ran, Fan Zhi-kun, Zhang Liang, et al. Mechanisms and experimental study of thermal-shock effect on coal-rock using liquid nitrogen [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32 (sup2): 3790–3794.)
- [21] Cai C Z, Li G S, Huang Z W, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 507–517.
- [22] Wu X G, Huang Z W, Cheng Z, et al. Effects of cyclic heating and LN₂-cooling on the physical and mechanical properties of granite [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156:99–110.
- [23] Yang S Q, Ranjitha P G, Jinga 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.
- [24] Ulusay R, Hudson J A. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006 [S]. Ankara: ISRM Commission on Testing Methods, 2007.
- [25] Qiang S, Geng J S, Zhao F. Experiment study of physical and mechanical properties of sandstone after variable thermal cycles [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 10:377–3784
- [26] 王晓雷, 詹思博, 闫顺玺, 等. 单轴压缩下层理方向对片麻岩声发射特性影响试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(1):1–8.
(Wang Xiao-lei, Zhan Si-bo, Yan Shun-xi, et al. Experimental research of the effect of different bedding direction on acoustic emission characteristics of gneiss under uniaxial compression [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Nature Science)*, 2021, 40(1):1–8.)
- [27] Wu X G, Huang Z W, Zhang S K, et al. Damage analysis of high-temperature rocks subjected to LN₂ thermal shock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8):2585–2603.
- [28] Sha S, Rong G, Chen Z H, et al. Experimental evaluation of physical and mechanical properties of geothermal reservoir rock after different cooling treatments [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(11):4967–4991.
- [29] Sirdesa N N, Singh T N, Ranjith P G, et al. Effect of varied durations of thermal treatment on the tensile strength of red sandstone [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(1):205–213.
- [30] Sha S, Rong G, Tan J, et al. Tensile strength and brittleness of sandstone and granite after high-temperature treatment: a review [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13:598.