

液氮冷却作用下高温花岗岩损伤实验

黄中伟, 温海涛, 武晓光, 李根生, 杨睿月, 李冉, 张诚成

(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:液氮作用于高温岩石能够损伤致裂岩石,因此可用于提高干热岩地层的钻井和压裂效率。为研究液氮快速冷却高温岩石对其物理和力学性质的影响规律,分别采用液氮冷却和自然冷却对不同温度(25~600℃)的干燥花岗岩岩样进行处理,通过对比两种处理方式下岩样的声波速度、渗透率、抗拉及单轴抗压强度的差异,得到液氮冷却对高温花岗岩的损伤特性。结果表明:液氮冷却可有效损伤高温花岗岩;对于实验中150~600℃的花岗岩,经液氮冷却产生的损伤能使其波速降低4.13%~10.04%,渗透率提高0.21~182.80倍,抗拉强度降低4.95%~34.54%,抗压强度降低13.95%~29.30%,弹性模量降低7.33%~45.74%;冷却前岩石温度越高,冷却过程中产生的热应力越大,冷却损伤程度越大。

关键词:液氮冷却;花岗岩;低温损伤;热应力

中图分类号:TU 452 **文献标志码:**A

引用格式:黄中伟,温海涛,武晓光,等.液氮冷却作用下高温花岗岩损伤实验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(2):68-76.

HUANG Zhongwei, WEN Haitao, WU Xiaoguang, et al. Experimental study on cracking of high temperature granite using liquid nitrogen[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(2): 68-76.

Experimental study on cracking of high temperature granite using liquid nitrogen

HUANG Zhongwei, WEN Haitao, WU Xiaoguang, LI Gensheng,
YANG Ruiyue, LI Ran, ZHANG Chengcheng

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University
of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: High temperature rocks can be cracked or damaged when they contact with liquid nitrogen, and thus this method can be used to improve the efficiency of drilling and fracturing in hot dry rock formations. To study the effect of liquid nitrogen cooling on the physical and mechanical properties of hot rocks, air and liquid nitrogen were used to cool dry granite rock samples at different temperature of 25–600 °C, and the sound velocity, permeability, tensile strength and uniaxial compressive strength of the rock samples were measured and compared. The experimental results show that liquid nitrogen cooling can effectively crack and damage the high temperature granite. The damage to the granite samples under 150–600 °C caused by liquid nitrogen cooling can lead the wave velocity decreasing 4.13%–10.04%, the permeability increasing 0.21–182.80 times, the tensile strength decreasing 4.95%–34.54%, the compressive strength decreasing 13.95%–29.30%, and the elastic modulus decreasing 7.33%–45.74%. It is notable that the higher of the temperature of rocks before cooling, the greater thermal stress can be resulted from the cooling process, and the greater degree of cooling damage can be caused.

Keywords: liquid nitrogen cooling; granite; low temperature damage; thermal stress

收稿日期:2018-05-18

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金项目(51725404);高等学校学科创新引智计划项目(110000203920170063)

作者简介:黄中伟(1972-),男,教授,博士,博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,研究方向为高压水射流技术在石油工程中的理论与应用。E-mail:huangzw@cup.edu.cn。

干热岩是一种不含水或含少量水或蒸汽的高温岩体,温度介于150~650℃,渗透性极差^[1]。干热岩通常是结晶花岗岩、火成岩或变质岩。低温致裂是提高干热岩储层渗透性的重要手段^[2]。低温致裂是指通过低温流体急速冷却高温干热岩储层,从而引起储层岩石损伤的过程,其作用表现在两方面:一方面是产生冷冲击,即岩石矿物颗粒和胶结物由于温度骤降发生急剧收缩,使岩石韧性降低,脆性增强;另一方面,由于岩石在热流作用下变形的各向异性,使当岩石在温度骤降时内部产生较大的拉应力,从而产生裂缝^[3]。在干热岩的低温致裂研究方面,Siratovich等^[2]通过调研实例,开展诱导裂缝实验得出地热储层裂缝的形成很大程度上取决于低温流体的热力刺激。Bradford等^[4]通过对现场注水数据进行分析,发现持续的冷水注入能提高地热井的性能,即地热储层的有效渗透率随着冷水的不断注入而增加。郜保平等^[5]研究了600℃内的花岗岩遇水冷却后的力学特性,发现冷水可以使高温花岗岩的力学性质发生明显劣化。这些研究都说明了冷水与热岩接触可以损伤岩石。相比于冷水,液氮具有更低的温度(-195.8℃),在岩石温度一定的条件下,可在岩石内部形成更高的热应力^[6-7]。该热应力能够对岩石产生显著的致裂作用,有效提高储层岩石的损伤程度,改善储层压裂效果^[8],因此在干热岩的压裂中具有很好的应用前景。在液氮超低温损伤岩石的研究方面,Cha等^[9]通过将液氮注入混凝土和砂岩中模拟液氮冻结井底岩石的过程,发现液氮的低温刺激不仅可以诱导裂缝的产生,同时也能扩大现有的裂缝,而且加快冷却速度可以提高刺激效果。Alqatahni等^[10]利用真三轴围压实验模拟了地层压力条件下液氮对页岩、混凝土、砂岩立方块的压裂效果,发现液氮的低温刺激可以大幅提高渗透率,而且这种刺激可能会改变岩石内部的应力场,同时高压液氮的附加压力有利于裂缝的延伸。任韶然等^[11]通过液氮对煤岩的冷冲击实验,发现液氮的超低温作用能使煤岩基质收缩,产生热应力裂缝,同时能使煤岩内部结构和力学强度发生较大改变。黄中伟、蔡承政等^[12-14]通过研究液氮冻结对岩石抗拉、抗压强度、孔隙结构的影响,发现液氮冻结能大幅降低岩石的抗拉、抗压强度,而且岩石在液氮冻结下损伤形式主要是微孔隙的发育和扩展。目前这些研究的主要对象都集中于常温岩样,高温岩石的液氮冷却损伤特性尚不明确。为探究高温岩石经液氮冷却后的损伤特性,笔者分别利用液氮和空气对不同温度(25~600℃)的高温花岗岩岩样进行冷却处理,通过

声波速度、渗透率、抗拉及单轴抗压强度等一系列测试,分析不同冷却方式对高温花岗岩的物性及力学性质的影响,得到液氮冷却下高温花岗岩的损伤特性。

1 实验材料与方法

1.1 岩样制备

实验选用花岗岩作为研究对象,将岩样加工成直径25 mm、高度50 mm的圆柱体及直径25 mm、高8 mm的圆盘试件,如图1所示。其中圆柱试样用于波速、渗透率、抗压强度的测试,圆盘试样用于抗拉强度的测试。剔除表面上有缺陷的岩样,进行干燥处理:将岩样放入烘箱中,在104℃下烘干,12 h内其质量变化不超过0.1%则可取出,冷却至室温。测试干燥后岩样的声波速度,剔除波速差异大的岩样,根据波速数据进行分组,以降低岩样物性上的离散性。实验所用花岗岩的波速平均值为4515.32 m/s,渗透率平均值为 $0.0075 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

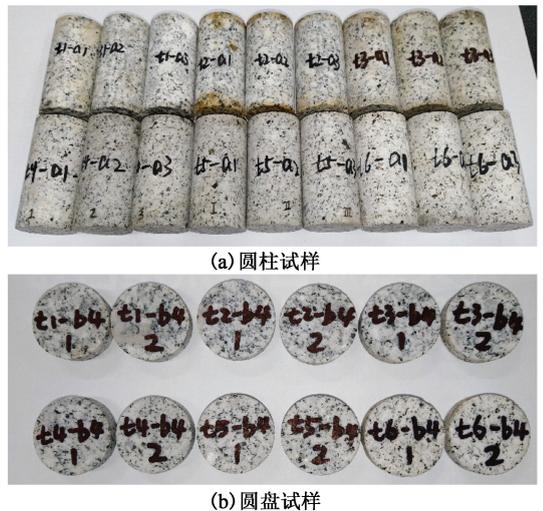


图1 部分圆柱和圆盘岩样

Fig. 1 Part of cylindrical and disk samples

1.2 实验方案

实验所用岩样依据温度分为6大组,代表温度依次为25、150、260、370、480和600℃。依据冷却方式,每大组分为自然冷却和液氮冷却两小组。每小组包含3个圆柱试样和2个圆盘试样,测试结果取平均值以降低岩样非均质性带来的实验误差。

1.3 实验步骤

- (1) 干燥岩样,测量原始岩样的直径、长度、声波速度,依据声波速度进行分组。
- (2) 测试各组原始岩样的渗透率数据。
- (3) 加热,将每组岩样放入马弗炉中以5℃/min速度缓慢加热至预定温度,恒温12 h。

(4)冷却,自然冷却:取出岩样在空气中自然冷却至室温;液氮冷却:取出岩样立即放入液氮罐中冷却12 h,然后取出恢复至室温。

(5)无损测试,测量冷却处理后岩样的直径、长度,声波速度及渗透率,之后进行单轴压缩测试和巴西劈裂测试。

2 实验结果

2.1 液氮快速冷却对高温花岗岩物理性质的影响

为了分析液氮冷却对高温花岗岩物理性质的影响,对岩样处理前后的波速和渗透率进行实验测试。

2.1.1 纵波波速变化

岩石的波速反映了岩石内部基质的完整性和裂缝的发育状况。图2为自然冷却和液氮冷却下岩样的波速变化。由图2可以看出,25~600℃内,随着岩样温度的升高,两种处理方式下岩样冷却后的波速降幅也随之升高。这是由于实验中的岩样经历了加热和冷却两个过程,一方面,加热引起的损伤程度会随着加热温度的升高而增大^[15],另一方面,岩样温度的升高必然导致岩样与冷却介质之间的温差增大,冷冲击作用增强,由冷却造成的损伤程度也会随之升高^[8],这两者是导致岩样波速降幅增大的主要原因。对比两种冷却方式下的波速变化,25~600℃,液氮冷却组岩样的波速降幅要比自然冷却组的降幅高出4.13%~10.04%。由于两种处理方式下岩样的加热温度相同,由加热造成的损伤程度基本一致,由此排除加热的影响,可以看出同温度的岩石由液氮冷却造成的损伤程度要明显比自然冷却造成的损伤程度大。

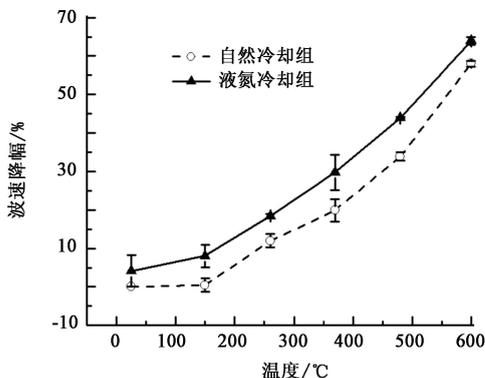


图2 两种处理方式下岩样的波速变化

Fig.2 Changes of wave velocity of rock samples treated in two different cooling ways

2.1.2 岩石渗透率变化

岩石的渗透性是表征流体在多孔介质内部流动能力的参数,渗透率的变化从一定程度也反映了岩

石内部的损伤程度。图3为150~600℃内自然冷却和液氮冷却下岩石渗透率增长量的对比。从图3中可以看出,随着温度升高,两种处理方式下岩样渗

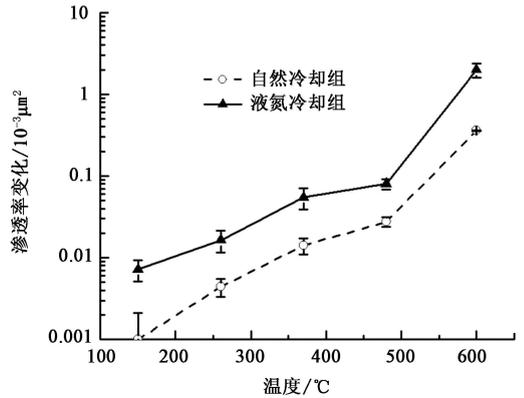


图3 两种处理方式下岩样的渗透率变化

Fig.3 Changes of permeability of rock samples treated in two different cooling ways

透率的增长幅度也越来越大。150~480℃,自然冷却处理组岩样的渗透率增长值最大为 $0.0274 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大提升了6.374倍,液氮处理组岩样的渗透率增长值最大为 $0.080 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大提升了7.377倍。480~600℃,岩样的渗透率出现数量级的变化,600℃时自然冷却组岩样的渗透率增大了 $1.0130 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,提高了41.18倍,液氮处理组岩样的渗透率增大了 $2.0011 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,提高了223.97倍,说明花岗岩在480~600℃之间内部结构发生了显著变化。其原因是由于实验中岩样经历了先加热后冷却的过程,在加热过程中,573℃时花岗岩内的石英发生了相态转化^[16]。在石英相态转化过程中,晶格遭受破坏,出现了大量的穿晶断裂,穿晶和晶界热裂纹共同发育使花岗岩内部出现了结构性的破坏,导致岩样的渗透率大幅升高。对比两种处理方式下岩样的渗透率变化,在150~600℃内,液氮冷却组岩样的渗透率提高了0.79~223.98倍,自然冷却组岩样的渗透率提高了0.15~41.18倍。由于两种处理方式下岩样的加热温度相同,加热损伤基本一致,由此排除加热的影响,可以看出对同一温度的岩石,液氮冷却对其渗透率的提升效果要明显强于自然冷却的效果,其原因是相对于自然冷却,液氮与高温岩石之间的温差更大,其产生的冷冲击作用更强,可使岩石内部的原有裂缝发生扩张^[8],这就导致了液氮冷却组的渗透率增幅比自然冷却组大。

2.2 液氮快速冷却对高温花岗岩岩石力学性质的影响

采用深水孔隙压力伺服实验系统 TAW-1000 对

冷却处理后的花岗岩试样进行单轴抗压强度测试和巴西劈裂测试(图4),得到了不同冷却方式下高温花岗岩岩样的抗拉强度、单轴抗压强度和弹性模量。



图4 深水孔隙压力伺服实验系统 TAW-1000

Fig. 4 Deepwater pore pressure servo system TAW-1000

2.2.1 抗拉强度变化

岩石的抗拉强度能直接反映岩石抵抗拉伸破坏的性能。图5为两种处理方式下岩样抗拉强度的对比。可以看出随着岩样温度的升高,岩样冷却后的抗拉强度整体上呈现递减趋势,说明岩石经过加热和冷却产生的损伤可以降低抗拉强度,且降幅会随

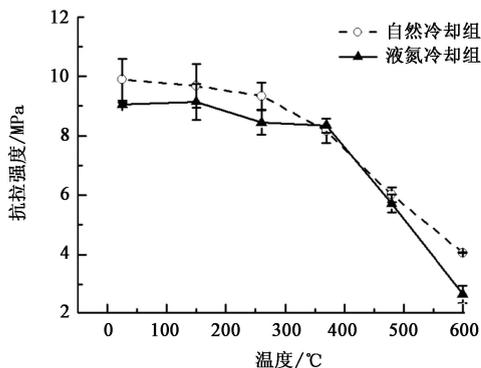


图5 岩样在两种处理方式下的抗拉强度

Fig. 5 Tensile strength of rock samples treated in two different cooling ways

加热温度的升高而增大。对比两种处理方式下岩样的抗拉强度,25~480℃,液氮处理组的抗拉强度分别比自然冷却组的抗拉强度低8.51%、5.50%、9.51%、-2.23%、4.95%,说明在此温度区间内,不同的冷却方式对岩样抗拉强度的影响差异并不明显。600℃时,自然冷却组的抗拉强度为4.07 MPa,液氮处理组的抗拉强度为2.66 MPa,比自然冷却组低34.54%,说明此温度下,液氮冷却对高温花岗岩抗拉强度的影响要比自然冷却组大。其原因是液氮冷却可使岩石内部的原有裂缝发生扩张,所以加热

损伤程度越大(即高温岩石冷却前的初始裂缝数目越多),由液氮冷却造成的裂缝扩展连通机会就越大,冷却造成的损伤越高。573℃后岩石内部裂缝大量增加,由液氮冷却造成的裂缝扩展体积也随之增大,导致冷却损伤程度变大,使岩石的抗拉强度明显低于自然冷却组的抗拉强度。

2.2.2 单轴抗压破坏特征

图6为不同温度及冷却方式下的12块花岗岩的单轴抗压破坏形态。从破坏的程度看,25℃时岩样破坏后基本保持完整结构。随着温度的增加,两组岩样的破坏程度加剧,出现了明显的掉块,这说明岩石内部的损伤程度随温度的增大而增大。从破坏的形式看,25~600℃,自然冷却组的断裂面角度平均值分别为79.5°、75.3°、68.5°、65.4°、64°和61.3°,液氮冷却组的断裂面角度平均值分别为81.2°、72.5°、69.4°、68.2°和60.3°。可以看出随着温度的增加,断裂面的角度逐渐减小,岩石逐渐由纵向破裂向剪切破坏过渡,这是由于损伤程度加剧,内部裂缝大量发育,造成岩石黏聚力下降,内摩擦角减小,断裂面的角度逐渐降低^[17]。对于同一温度花岗岩,在不同冷却条件下断裂面角度相差不大,故冷却方式对冷却后高温岩样的断裂角度影响不大。对比自然冷却组和液氮冷却组的破坏形态,可以发现液氮冷却组的岩样更加松散,掉块现象更加明显,破坏更加彻底,说明液氮冷却对岩样的内部颗粒胶结具有显著影响。

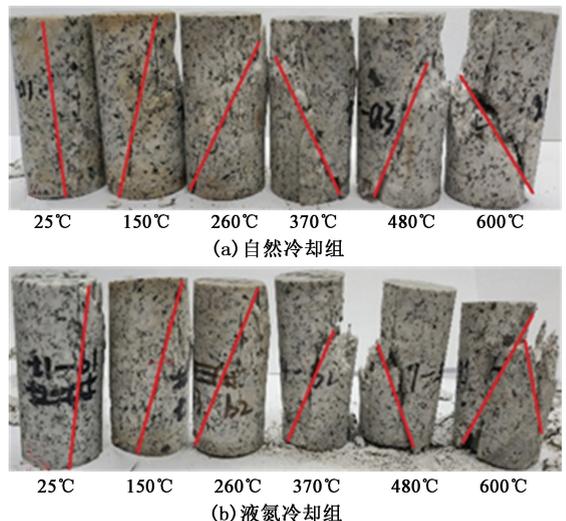


图6 单轴抗压岩样破坏形态

Fig. 6 Failure modes of rock samples in uniaxial compressive test

2.2.3 单轴抗压强度变化

岩石的抗压强度能直接反映岩石抵抗压缩破坏的性能。图7为两种处理方式下岩样的单轴抗压强

度对比。在 25~480 °C 内,自然冷却组的抗压强度基本不变,液氮冷却组的抗压强度先降低后保持稳定,说明在此温度区间内由加热和冷却造成的损伤对岩石抗压强度的影响并没有随着处理温度的升高而增大。600 °C 时,两种处理方式下岩样的抗压强度都发生了突变,液氮冷却组岩样的抗压强度为 74.50 MPa,相比常温岩样降低了 51.49%,自然冷却组岩样的抗压强度为 105.38 MPa,相比常温岩样降低了 31.67%,这与渗透率的变化基本一致,说明 480~600 °C 内的岩石出现了结构性破坏,内部黏聚力大幅下降。对比同温度下液氮冷却组和自然冷却组的单轴抗压强度,150~600 °C 内,液氮冷却组的抗压强度比自然冷却组低 13.95%~29.30%,说明液氮冷却产生的损伤对高温花岗岩抗压强度的影响比自然冷却大。

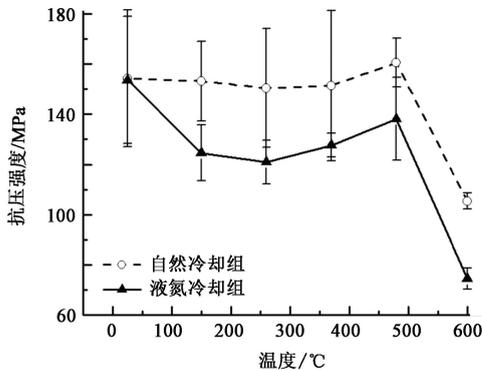


图7 岩样在两种处理方式下的单轴抗压强度
Fig.7 Uniaxial compressive strengths of rock samples treated in two different ways

2.2.4 弹性模量变化

岩石弹性模量反映了岩石弹性变形阶段变形的难易程度,对同一种岩石,弹性模量越大,越不易变形。图8为两种处理方式下岩样的弹性模量对比。可以看出,25~480 °C 内,自然冷却方式下岩样的弹性模量未发生显著变化,相对于常温下岩石弹性模量,其最大降幅仅为 2.66%。而液氮处理组的弹性模量总体上呈下降趋势,其最大降幅达 21.76%。当岩样加热到 600 °C 时,两种处理方式下岩样的弹性模量都发生了大幅度的突降,液氮冷却组岩样的弹性模量下降了 74.79%,自然冷却组岩样的弹性模量下降了 51.20%,说明在 480~600 °C 内岩石的岩石力学性质发生了明显劣化。对比两种冷却方式下的弹性模量,150~600 °C 内,液氮冷却组的弹性模量分别比自然冷却组低 13.91%、7.33%、9.92%、16.67%、45.75%,说明液氮冷却对岩石弹性模量的影响明显比自然冷却强。

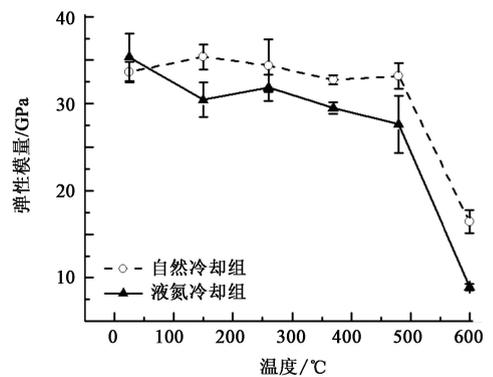


图8 岩样在两种处理方式下的弹性模量
Fig.8 Elastic modulus of rock samples treated in two different ways

3 分析与讨论

3.1 液氮冷却下高温花岗岩的损伤特性

由于实验中岩石需要加热到预定温度后再进行冷却,所以处理后岩石的损伤是由加热和冷却共同造成的。液氮冷却组和自然冷却组中的岩样都采用了 5 °C/min 的加热速率,以确保加温过程对岩石的影响程度相同,而且同组岩样所施加的温度相同,因此液氮冷却组和自然冷却组岩石物理性质的差异是由于液氮的低温特性造成的。即 150~600 °C 的花岗岩,由液氮的低温特性引起的损伤能使其波速降低 4.13%~10.04%,渗透率提高 0.21~182.80 倍,抗拉强度降低 4.95%~34.54%,抗压强度降低 13.95%~29.30%,弹性模量降低 7.33%~45.74%。同时液氮对高温花岗岩的损伤程度会随着岩石冷却前温度的升高而增大。

3.2 液氮冷却损伤机制

3.2.1 热应力的产生

花岗岩在冷却过程中,由于岩石自身束缚作用及组成矿物的热物性差异,内部会产生热应力。取花岗岩内部一微元体作分析,见图9。

当温度变化 ΔT 时,微元体在不受约束的情况下产生的应变为

$$\varepsilon = \alpha \Delta T. \quad (1)$$

式中, ε 为微元体的应变; α 为微元体的线性热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

由于微元体受到外在约束和内部约束的影响,上述应变不能自由发生^[11]。假设微元体被完全约束,即微元体不发生应变,则其受到的拉应力为

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha\Delta T. \quad (2)$$

式中, σ 为微元体受到的拉应力,MPa; E 为微元体

的弹性模量,MPa。

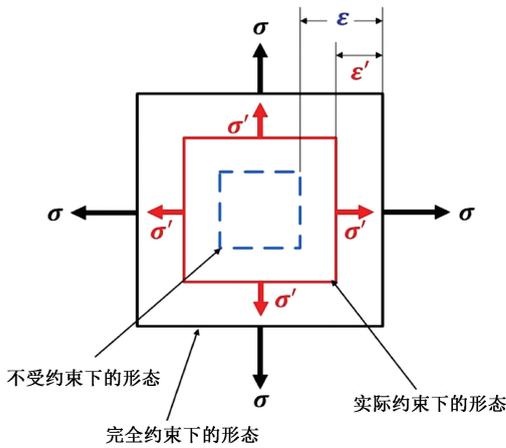


图 9 花岗岩冷却过程中热应力的产生

Fig. 9 Thermal stress caused by granite cooling

在实际岩石体中,微元体既不会被完全束缚也不会随温度变化而自由收缩,而是会随着岩石的整体收缩产生一个实际应变 $\epsilon' \neq 0$ 。此时,微元体所受到的拉应力为

$$\sigma' = \sigma - E\epsilon' = E\alpha\Delta T - E\epsilon'. \quad (3)$$

式中, σ' 为微元体受到的拉应力,MPa; ϵ' 为微元体的实际应变。

σ' 就是微元体受到束缚而产生的热应力。当 σ' 大于岩石的抗拉强度时,岩石内部结构发生破坏,产生热应力裂缝。以液氮冷却 480 °C 的花岗岩为例,微元体经受 676 °C 的温差(常压下液氮沸腾温度为 -196 °C),花岗岩线性热膨胀系数为 $3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,弹性模量为 $3.4 \times 10^4 \text{ MPa}$,假设冷却过程中微元体产生的应变为 1.5×10^{-3} ,则微元体表面会产生 17.952 MPa 的张力,大于该花岗岩的抗拉强度(小于 10 MPa),因此会产生如图 10 所示的大量微裂缝。

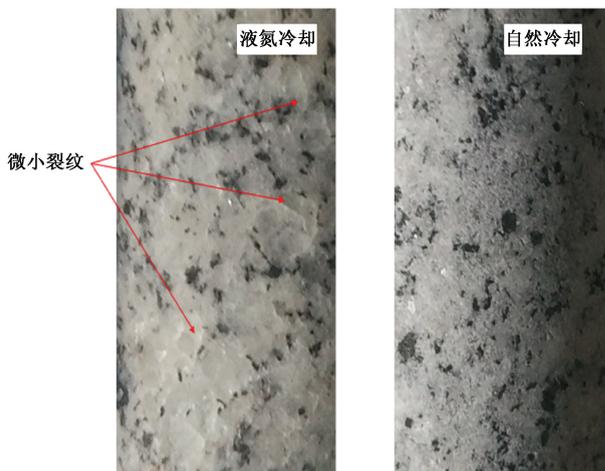


图 10 480 °C 的花岗岩冷却后的表面

Fig. 10 Surface of granite cooling down for 480 °C

3.2.2 热应力的损伤形式

在液氮冷却花岗岩的过程中,热应力产生损伤的形式主要有非均质性引起的损伤和岩石内部温度梯度引起的损伤。

(1) 非均质性引起的损伤。花岗岩是由石英、长石、云母等多种矿物颗粒组成的,而且内部矿物颗粒的排列无序,即岩石具有非均质性和各向异性。当花岗岩周围温度降低时,其内部矿物颗粒必然会产生收缩变形^[18]。由于岩石中不同矿物颗粒的热膨胀系数 α 不同,所以在冷却过程中,不同矿物颗粒的变形 ϵ 也不同。同时由于岩石是一个连续体,其变形具有连续性,各矿物颗粒不可能按各自的热膨胀系数随温度变化而自由变形。在实际岩石的内部,热膨胀系数大的颗粒会受拉伸,热膨胀系数小的颗粒会受压缩,而要维系这种状态,矿物颗粒之间就会产生热应力 σ' 。当热应力超过岩石的抗张应力屈服强度时,岩石内部结构就会发生破坏,从而产生微小裂缝。同时这种热应力如果产生在岩石内部原有裂缝附近,还会使原有裂缝发生扩张。由此可见,由于岩石非均质性而引发的热应力损伤是岩石内部微结构发生改变的主要原因^[19]。

(2) 岩石内部温度梯度引起的损伤。花岗岩的导热性能很差,导热系数仅为 $2.6 \sim 3.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。当液氮冷却花岗岩时,其外部会产生一个非常狭窄的传热过渡带^[7],如图 11 所示。在同一时刻,过渡带外层岩石温度迅速下降,而过渡带内层的岩

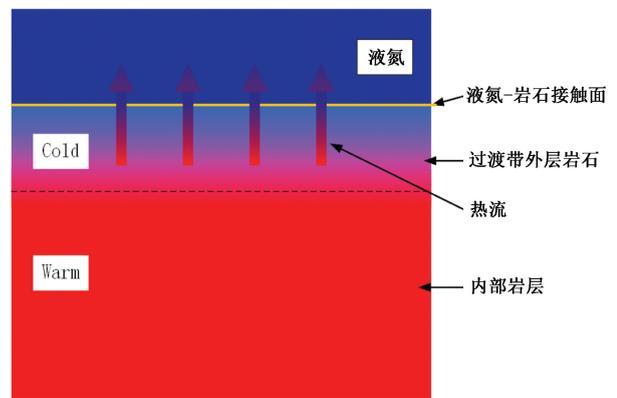


图 11 岩石传热过渡带

Fig. 11 Heat transfer zone of rock

石温度下降缓慢。由于 ΔT 不同,过渡带内外岩石基质的应变会有很大差异。在冷却过程中,过渡带内层岩石的形变较小,过渡带外层岩石受其影响,其实际应变 $\epsilon' < \epsilon$ 。外层岩石要保持其实际形变,就存在一个约束其继续变形的热应力。当热应力大于岩石的抗拉强度时,岩石过渡带外层产生裂缝。由此

可见,由于岩石的温度梯度而引发的热应力损伤是岩石产生裂缝的另一个原因。

3.2.3 热应力裂纹的生成和扩展

利用电镜扫描技术对原始岩样以及液氮冷却后岩样的微观结构进行观测。以液氮冷却 480 °C 花岗岩为例进行分析,图 12 为处理之前的花岗岩微观结构,图 13 为液氮冷却后不同放大倍数下观测到的微观结构。对比原始岩样可以看出,480 °C 的花岗岩经液氮冷却后内部有比较明显的裂纹。根据图 13 (a)所示,热应力作用下的裂纹在延伸的同时会在两侧形成与之垂直的微小分支裂纹,这些微小分支裂纹与主裂纹的结合有利于形成复杂缝网;根据图 13(b)所示,热应力裂纹产生于不同矿物颗粒胶结处,并沿着矿物颗粒边界延伸,从而形成了宽约几个微米的晶间裂纹。这种裂纹是由不同矿物颗粒热物性(热膨胀系数、弹性模量等)差异引起颗粒收缩变

形不匹配造成的。该种裂纹的萌生和扩展与岩石内部非均质性所致的岩石损伤相对应,为液氮低温冲击作用下岩石物理和力学性质变化的根本原因。

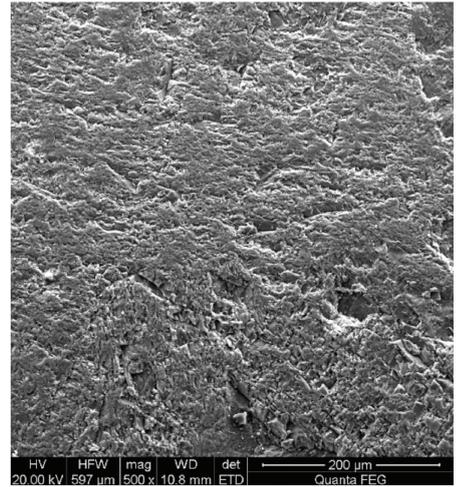
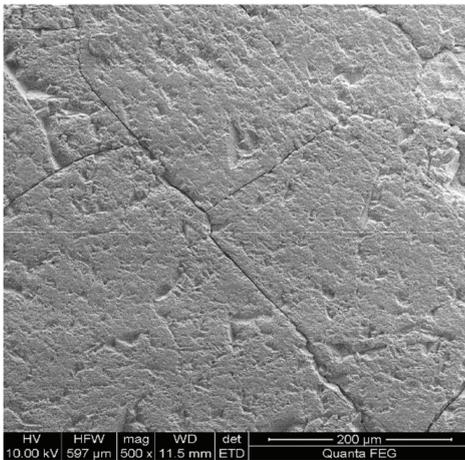
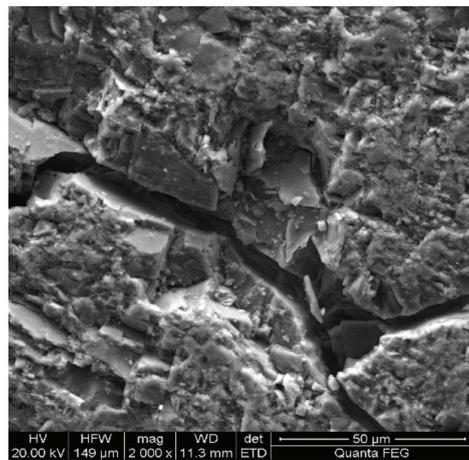


图 12 原始岩样电镜扫描照片(500 倍)

Fig. 12 SEM photo of granite in original state(500 times)



(a) 500倍



(b) 2000倍

图 13 480 °C花岗岩经液氮冷却后的电镜扫描照片

Fig. 13 SEM photos of granite under 480 °C cooled by liquid nitrogen

3.3 液氮在干热岩开发上的应用前景

干热岩的岩体致密,硬度大,抗压强度高,可钻性极差,而且几乎不含流体。在干热岩的压裂过程中,其井内压力高于液氮的临界压力(3.4 MPa),液氮在地层内主要以液态和超临界态存在。当液氮注入地层后,首先对表层岩石进行急速冷却,一方面使表层岩石发生破裂,另一方面使地层内部岩石产生微裂缝,如图 14 所示。裂缝提高了岩石的渗透率,降低了岩石的抗拉和抗压强度。当表层岩石产生裂缝后,液氮在注入压力作用下进入裂缝深处。此时液氮的温度不断上升,当温度高于其临界温度(-147 °C)时,液氮转变为超临界氮,其体积可以膨胀到原始体积的 8 倍^[6]。由于干热岩属于致密岩石,

超临界氮在干热岩中基本不发生滤失,其膨胀无法

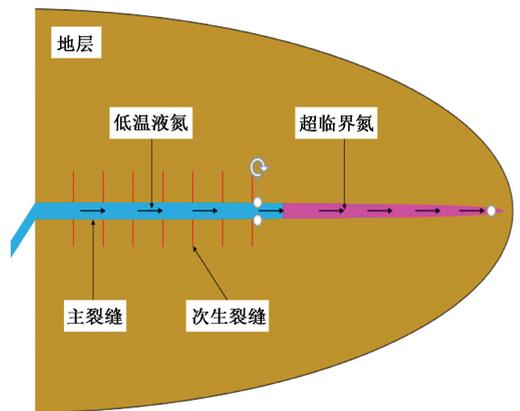


图 14 液氮压裂产生的裂缝

Fig. 14 Fractures caused by liquid nitrogen fracturing

自由进行,因此裂缝内压力不断升高,裂缝不断延长。同时随着低温液氮不断注入裂缝,裂缝两侧的岩石在冷冲击作用下产生拉应力,形成大量垂直于主裂缝的次生裂缝^[7]。主裂缝与次生裂缝以及微裂缝的形成,可有效增强压裂缝网的复杂程度,这对于增加取热介质与热储层的接触面积,提高干热岩储层的取热效率具有重要意义。

4 结 论

(1)液氮冷却高温岩石可降低岩石波速,提高岩石渗透率。在150~600℃内,液氮冷却引起的损伤会使花岗岩的波速降低4.13%~10.04%,渗透率提高0.21~182.80倍。

(2)液氮冷却高温岩石能使岩石的岩石力学性质发生明显劣化。液氮的冷却损伤能使150~600℃的花岗岩抗拉强度降低4.95%~34.54%,抗压强度降低13.95%~29.30%,弹性模量降低7.33%~45.74%。

(3)液氮冷却可有效损伤高温花岗岩。冷却前岩石温度越高,与液氮之间的温差越大,产生的热应力越高,冷却损伤程度越大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SIRATOVICH P A, SASS I, HOMUTH S, et al. Thermal stimulation of geothermal reservoirs and laboratory investigation of thermally-induced fractures: Geothermal Resources Council Annual Meeting[R]. San Diego, California, USA: Transactions Geothermal Resources, 2011: 1529-1535.
- [3] KIM K, KEMENY J. Effect of thermal shock and rapid unloading on mechanical rock properties: 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium, 28 Tune-1 July, Asheville, North Carolina [C]. Asheville, North Carolina, USA: American Rock Mechanics Association, 2009.
- [4] BRADFORD J, OHREN M, OSBORN W L, et al. Thermal stimulation and injectivity testing at raft river, ID EGS site[R]. Proceedings, Thirty-Ninth Workshop on

Geothermal Reservoir Engineering Stanford: Stanford University, 2014.

- [5] 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.
XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600℃[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 892-898.
- [6] GRUNDMANN S R, RODVELT G D, DIALS G A, et al. Cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid in the devonian shale[R]. SPE 51067, 1998.
- [7] MCDANIEL B, GRUNDMANN S R, KENDRICK W D, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid[R]. SPE 38623, 1997.
- [8] 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 Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experimental study on effect of liquid nitrogen on rock failure during cryogenic nitrogen fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 98-103.
- [9] CHA M, YIN X, KNEAFSEY T, et al. Cryogenic fracturing for reservoir stimulation—laboratory studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 436-450.
- [10] ALQATAHNI N B, CHA M, YAO B, et al. Experimental investigation of cryogenic fracturing of rock specimens under true triaxial confining stresses[R]. SPE 180071, 2016.
- [11] 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(增2):3790-3794.
REN Shaoran, FAN Zhikun, 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.
- [12] 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):694-700,834.
HUANG Zhongwei, WEI Jiangwei, LI Gensheng, et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 694-700, 834.
- [13] 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 Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experiment study of rock porous structure damage under cryogenic nitrogen freezing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4):965-971.
- [14] 蔡承政,李根生,黄中伟,等.液氮对页岩的致裂效应及在压裂中应用分析[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*. 2016, 40(1):79-85.
- CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Thermal cracking effect of liquid nitrogen on shale and its application analysis in hydraulic fracturing[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2016, 40(1):79-85.
- [15] 席道瑛,谢端,易良坤,等.温度对岩石模量和波速的影响[J].*岩石力学与工程学报*, 1998, 17(增):802-807.
- XI Daoying, XIE Duan, YI Liangkun, et al. Effects of temperature on rock's modulus and wave velocity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(sup):802-807.
- [16] 席道瑛.花岗岩中矿物相变的物性特征[J].*矿物学报*, 1994, 14(3):223-227.
- XI Daoying. Physical characteristics of mineral phase transition in the granite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1994, 14(3):223-227.
- [17] 李智慧,师俊平,汤安民.脆性材料压剪断裂方向影响因素的宏细观分析[J].*西安理工大学学报*, 2011, 27(3):280-284.
- LI Zhihui, SHI Junping, TANG Anmin. Discussions on fracture factors of brittle materials under the shear-compression condition[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(3):280-284.
- [18] KUMARI W, RANJITH P, PERERA M, et al. Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian strathbogie granite with different cooling treatments[J]. *Engineering Geology*, 2017, 229:31-44.
- [19] 周青春.温度,孔隙水和应力作用下砂岩的力学特性研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- ZHOU Qingchun. Study on the mechanical property of a sandstone under geothermal-mechanical and hydraulic-mechanical coupling [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.

(编辑 李志芬)