

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0232

不同冷却条件对高温砂岩物理力学性质的影响

金爱兵^{1,2}, 王树亮^{1,2}, 魏余栋^{1,2}, 孙 浩^{1,2}, 韦立昌^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 岩石工程可能会经受高温环境。岩石高温后冷却方式的不同往往会导致岩石物理力学性质产生重大变化, 这对岩石工程的稳定性、渗透性等都会产生重要影响。采用核磁共振 (MRI)、电镜扫描 (SEM) 和单轴压缩试验对 100、300、500、600、800 °C 5 种不同温度砂岩经两种不同冷却方式 (自然冷却和水中冷却) 后的孔隙率、孔径分布、峰值强度、峰值应变、应力-应变关系以及微观结构变化等进行研究。试验结果表明: 自然冷却时, 高温砂岩强度并非随温度升高而持续降低, 而水冷却会导致砂岩强度持续降低, 且降低幅度远超自然冷却; 500 °C 可以看作不同冷却方式对砂岩孔隙率影响的临界值, 超过 500 °C, 水冷却方式会导致孔隙率急剧增长, 大孔径 ($\phi > 10 \mu\text{m}$) 孔隙所占比例也高于自然冷却, 因此, 高温砂岩工程采用水冷却方式 (如隧道着火后用水灭火) 要充分考虑由此可能带来渗透危害; SEM 测试表明, 当温度 $T > 500$ °C 时, 水冷却对裂纹的增宽和扩展产生促进作用; 当温度达到 800 °C 时, 水冷却砂岩孔洞变大, 裂隙更加发育, 并贯通连成网络, 这会导致透水性大幅提高, 同时, 这也是该温度水冷却导致强度急剧降低的原因之一。

关 键 词: 砂岩; 热处理; 冷却条件; 孔隙; 核磁共振; 电镜扫描

中图分类号: TU 521

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 11-3531-10

Effect of different cooling conditions on physical and mechanical properties of high-temperature sandstone

JIN Ai-bing^{1,2}, WANG Shu-liang^{1,2}, WEI Yu-dong^{1,2}, SUN Hao^{1,2}, WEI Li-chang^{1,2}

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Rock engineering may be subjected to high temperature environment. Different cooling methods of high-temperature rock often lead to significant changes in the physical and mechanical properties of the rock, which will have an important impact on the stability and permeability of rock engineering. Magnetic resonance imaging (MRI), scanning electron microscope (SEM) and uniaxial compression test were used to study the porosity, pore size distribution, peak strength, peak strain, stress-strain relationship and microstructure changes of five temperatures for sandstone samples at 100, 300, 500, 600 and 800 °C under two cooling methods (natural cooling and water cooling). The test results show that: (1) When the rock samples used the natural cooling method, the strength of high-temperature sandstone does not decrease continuously with the increasing of temperature. However, rock samples using water cooling method show continuous decrease of sandstone strength, and the decreasing extent is far greater than that of natural cooling; (2) 500 °C can be considered as the critical value of the influence of different cooling methods on the porosity of sandstone. When the temperature is above 500 °C, the water cooling method will cause the rock porosity increase rapidly, and the proportion of pores with large pore diameter ($\phi > 10 \mu\text{m}$) is also higher than that of the natural cooling method. In this consideration, in the field of high-temperature sandstone engineering, the possible seepage hazards should be fully considered when water cooling is used (i.e., fire extinguishing with water after a tunnel is on fire); (3) The SEM test results shows that when the temperature is above 500 °C, water cooling promotes the widening and expansion of cracks. When the temperature reaches to 800 °C, the pore size of water-cooled sandstone becomes larger, and the fracture is largely developed and connects into a network. This will lead to a substantial increase in water permeability. At the same time, it is one of the reasons for the sharp decrease in rock strength that caused by water cooling at this temperature.

Keywords: sandstone; heat treatment; cooling conditions; pore; MRI; SEM

收稿日期: 2020-03-05

修回日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51674015); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. FRF-TP-19-026A1)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51674015) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (FRF-TP-19-026A1).

第一作者简介: 金爱兵, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn

通讯作者: 孙浩, 男, 1992 年生, 博士, 讲师, 主要从事采矿工艺与理论、岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: sunhao2019@ustb.edu.cn

1 引言

矿产资源深部开采、地下热源利用、城市地下空间、放射性核废料的深地处置以及煤炭地下气化等都会涉及到高温岩石力学问题,目前该方向已经成为岩石力学研究的热点问题^[1-2]。岩石经历高温后冷却方式的不同,往往会导致其物理力学性质产生重大变化,从而影响相应岩石工程的稳定性、渗透性等,如发生火灾并经过水灭火后的隧道,岩体经水冷却后,其力学性质以及孔隙度、孔隙分布的变化往往会对隧道稳定性以及透水性产生影响。因此,有必要对高温以及不同冷却方式导致的岩石物理力学性质变化状况进行研究,这对岩石工程稳定性研究具有重要意义。

对于高温砂岩的研究目前主要集中在高温砂岩物理性质、力学性质及其变化规律,研究方法主要是室内试验,包括声波测试、单轴三轴压缩试验、巴西劈裂试验、电镜扫描(SEM)、偏光显微镜、声发射(AE)以及霍布金森压杆(SHPB)试验等。

吴刚^[3]、张连英^[4]等通过单轴压缩试验对砂岩在高温作用后的力学特性进行试验研究,分析了高温后砂岩强度和变形特性。苏承东等^[5]研究了高孔隙度粗砂岩经历高温后物理力学性质随温度的变化规律,得出力学性质劣化的原因是由于裂隙扩展和热应力。王鹏等^[6]通过定义基于压密模量的热损伤因子,分析其随温度变化的规律,从而把握高温砂岩破坏规律。Wu等^[7]通过波速测试以及单轴压缩试验的方法,对20~1200℃作用后砂岩弹性波速、力学参数等进行了测试和分析,分析了动弹性模量、动泊松比、纵横波速比等力学参数,得出随温度升高,不同矿物颗粒异向膨胀引起的抗压强度以及应力-应变曲线随温度变化关系。Y. L. Zhang等^[8]对砂岩在高温下的孔隙特征与力学特性进行了研究,发现高温会使砂岩孔隙率上升,力学性质变差。W. Q. Zhang等^[9]通过试验手段研究了砂岩和花岗岩在高温作用下内部矿物组分、内部结构和含水率的变化。Y. L. Zhang等^[8]通过压汞试验和压力试验研究了不同温度下孔隙特征和力学性质的变化规律,得出高温下水分流失和矿物颗粒分解使得岩石孔隙率增加和力学性质降低的结论。Zhu等^[10]对含单裂隙砂岩在不同温度条件下的物理力学性质进行了研究,获得其抗压强度等参数随温度变化的规律,并研究了相应的温度门槛值,认为波速门槛值为100℃,力学性质门槛值为500℃。赵怡晴等^[11]通过电镜扫描、X射线衍射、单轴压缩等试验手段对25~900℃

下砂岩微观结构及力学性质的变化情况进行了研究,分析不同温度区间砂岩孔隙和力学变化规律,并从孔隙变化以及矿物反应方面对600℃后砂岩强度反常增长进行了分析。

高温岩石冷却方式主要有自然冷却、常温冷却(水冷却、风冷却)和超低温冷却3种,其中,超低温冷却是利用超低温流体(如液氮等)对岩石进行冷却,这种方式主要用于油气开采行业^[12-14]。

邵保平等^[15]通过声波测试和单轴压缩试验研究了600℃内花岗岩遇水冷却后的超声波速、单轴抗压强度、抗拉强度及弹性模量,并探讨了它们与温度之间的关系。王朋等^[16]通过单轴压缩试验对高温状态的花岗岩在自然冷却和水中快速冷却后的力学性能进行研究,探讨了水中快速冷却对花岗岩高温残余力学性能的影响。Kumari等^[17]利用单轴压缩、声发射、图像分析等多种手段对高温澳大利亚Strathbogie花岗岩在两种冷却方式(快速和慢速)下的力学特性和破裂性状进行研究,结果表明,超过400℃的花岗岩冷却后会产生热损伤,高温冷却花岗岩的破坏模式由脆性向准脆性断裂转变,快速冷却的影响大于缓慢冷却。梁铭等^[18]利用声波测试和巴西劈裂试验对不同热处理温度下的花岗岩在不同冷却条件下的物理特性参数、巴西劈裂特性进行了研究,研究认为,低于热处理温度200℃时,冷却方式的不同对于上述参数影响较小,但温度超过200℃时,水冷却下参数衰减加快。靳佩桦等^[19]利用声波测试、单轴压缩、巴西劈裂以及压力脉冲衰减法对不同高温条件下花岗岩水冷却后的力学特性、渗透性进行了研究,归纳总结了不同温度花岗岩在水冷却条件下的力学特性以及渗透变化规律。邵保平等^[20]通过热冲击试验探究了花岗岩的力学性质随冷却温度的演变规律,发现相同加热温度的花岗岩经不同温度冷却介质热冲击破裂后,其单轴抗压强度、抗拉强度、黏聚力会随着冷却介质温度的升高呈现降低趋势,而内摩擦角则呈升高趋势。

黄真萍等^[21-22]通过对高温后石灰岩和大理岩遇水冷却后的力学、声学 and 波动特性进行研究,得出随温度变化,力学性质与波速或波动特性有很好的相关性。Han等^[23]通过单轴压缩、声波测试、AE和SEM对100~800℃砂岩在水冷却下的物理力学性质进行研究,得到了不同温度砂岩水冷却下声波波速下降规律、弹性模量下降的3阶段特性以及单轴压缩下延展性变化不大的结论。Liu等^[24]利用单轴压缩、AE、SEM等手段对常温到500℃冷热循环下红砂岩宏观物理力学性质进行了研究,分析

了声发射与冷热循环之间的关系以及冷热循环下微观结构和矿物颗粒之间的关系。朱振南等^[25]研究了 500 °C 内高温花岗岩遇水冷却后的物理力学特性, 发现了高温花岗岩遇水冷却后物理力学特性随温度变化规律。韩观胜等^[26]利用波速测试、单轴压缩试验及 AE 信号监测对 800 °C 范围内砂岩遇水冷却后的不同参数变化规律进行了研究。

综上, 高温岩石力学问题研究中, 岩石高温后物理力学性质变化研究相对较多, 岩石高温冷却后的反应近年来也开始受到关注。

高温冷却后岩石性质研究手段和方法主要体现在 3 个方面: ①通过力学试验分析不同冷却方式下高温岩石力学性质变化, 包括强度劣化性质、应力-应变关系等; ②利用声波测试方式获得波速变化从而分析岩石内部裂隙变化; ③通过 AE 和 SEM 来分析破裂模式。

研究对象主要集中于花岗岩, 对砂岩这种分布广泛、黏土矿物含量较高、孔隙率大、高温条件下性质变化大且复杂^[27]的储层岩石, 其研究相对不多。

本文以砂岩为研究对象, 采用核磁共振(MRI)、SEM 和单轴压缩试验等手段对遇水冷却和自然冷却的高温砂岩孔隙率、孔径分布、孔隙扩展和内部裂隙贯通、强度变化及其与孔隙变化间的关系进行分析, 探讨不同冷却方式对砂岩力学特性及渗透性质的影响规律和原因, 为高温冷却砂岩工程的稳定性评价、渗透特性分析和类似工程防护提供借鉴。

2 岩样加热及冷却

2.1 岩样制备

岩样为取自陕西汉中地区的黄砂岩, 表观土黄色, 如图 1 所示, 在自然状态下测得岩样平均密度为 2.19 g/cm³, 孔隙率为 13.86%, 单轴压缩峰值强度为 50.38 MPa。按照国际岩石力学学会 (ISRM) 的制样要求加工岩样, 其中核磁分析岩样尺寸为



图 1 试验所用岩样

Fig.1 Specimens used in the tests

$\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 单轴压缩岩样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。岩样采用 A-X-Y、B-X-Y 进行编号, 试验时将其标在岩样上以便直观区分 (见图 1), 其中首字母 A、B 分别代表自然冷却和水冷却; X 为 1、2、3、4、5、6 分别代表 25、100、300、500、600、800 °C 6 个温度; Y 为 1、2、3 分别代表第几个岩样。为了保证试验结果可靠, 首先剔除含明显裂隙等缺陷岩样, 再通过声波测试方式挑选波速相近的岩样, 每组试验 3 个岩样, 试验前置于常温干燥环境中。

2.2 岩样加热及冷却

岩样加热采用合肥科晶材料技术有限公司制造的型号为 KSL-1200X-J 的小型箱式电阻炉, 见图 2。电阻炉最大功率为 2.5 kW, 最高工作温度为 1 200 °C, 长期工作温度为 1 100 °C, 控温精度为 $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



图 2 KSL-1200X-J 箱式电阻炉

Fig.2 KSL-1200X-J box resistance furnace

加热温度分别设置为 100、300、500、600、800 °C 共 5 组。以 5 °C/min 的加热速率升温, 达到目标温度后恒温 2 h, 使试样均匀受热。

岩样加热后分别进行炉内自然冷却和水中快速冷却。自然冷却最终温度为 25 °C, 水中快速冷却时将加热岩样从加热炉内夹出并快速放入预先准备好的 100 L、25 °C 水中, 浸泡时间不低于 8 h, 以保证试样完全冷却。

3 MRI 试验

3.1 设备及方案

为了获得不同冷却条件下高温砂岩内部孔径分布及孔隙变化, 采用 MRI 对两种冷却方式各温度砂岩孔隙进行测定。核磁共振成像分析仪为苏州纽迈分析仪器股份有限公司的 MesoMR23-060H-I, 如图 3 所示。

首先将岩样抽真空, 并进行饱水, 使岩样孔隙充满水。试验中强制饱水条件: 真空度 -0.095 MPa, 浸泡 24 h; 然后, 运用核磁共振成像分析仪对一定体积的已知孔隙度的标样测核磁信号, 得到核磁信

号大小与孔隙度的相关性曲线,即定标;最后,将待测岩芯试件放到检测仓中,利用定标曲线(见图4)对未知孔隙度的样品进行测量。



图3 MesoMR23-060H-I 核磁共振成像分析仪
Fig.3 MesoMR23-060H-I magnetic resonance imaging analyzer

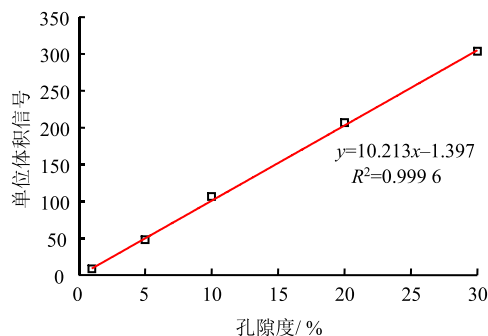


图4 定标曲线
Fig.4 Calibration curve

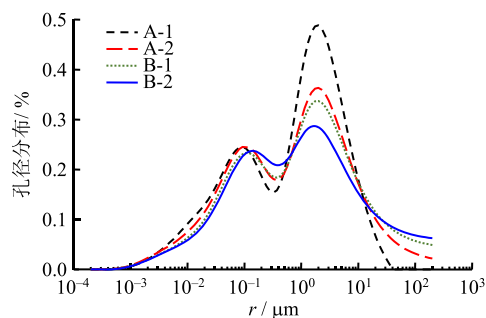
3.2 孔径分布

利用 MRI 可以检测每个孔隙内水的信号强度和总孔隙内水的信号强度,它们之间的比值,可以表征岩石内部不同孔径孔隙所占总孔隙的比例,即孔径分布。为了避免不同岩样测定带来的误差,每个岩样先在 25 °C 下测定一次,然后加热至某一温度进行冷却后再测定一次,测定数据取 3 个岩样的平均值。最终得到各岩样孔径分布如图 5 所示,其中横坐标 r 为孔径大小。

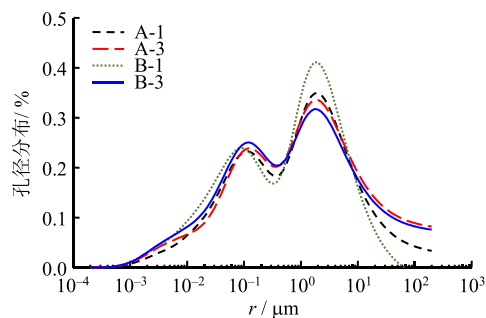
根据温度区间可以将孔径分布分为 3 组:

第 1 组 (100 °C), 自然冷却, 中小孔 (10 μm) 占比减少, 大孔 (> 10 μm) [8] 占比增加, 即加热后使得砂岩试样内部中孔减少, 大孔增多; 水冷却, 中孔减小比例和大孔增加比例均比自然冷却下有所下降, 说明水冷却使得岩石内部孔隙快速受冷而部分收缩。

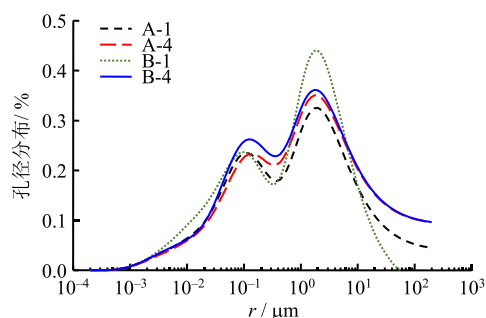
第 2 组 (100~600 °C), 该温度区间内, 两组曲线之间的差别不大, 均是在加热后岩石内部孔隙



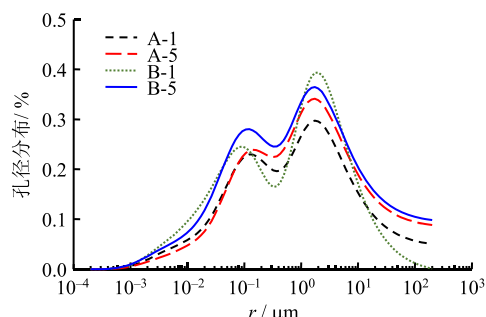
(a) 100 °C 热处理两种冷却方式对比



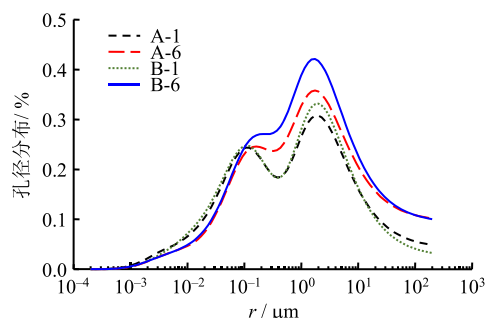
(b) 300 °C 热处理两种冷却方式对比



(c) 500 °C 热处理两种冷却方式对比



(d) 600 °C 热处理两种冷却方式对比



(e) 800 °C 热处理两种冷却方式对比

图5 不同冷却条件下热处理砂岩孔径变化示意图
Fig.5 Pore size distributions of heat-treated sandstone under different cooling conditions

变大,而在水冷却的作用下使得曲线变化趋势变为中孔占比减少,小孔和大孔占比增加;

第 3 组 (600~800 °C), 加热后自然冷却和水冷却图形趋势相似, 均为岩石内部孔隙变大, 但水快速冷却使得大孔占比要大于自然冷却。这是由于在 600~800 °C 时与 25 °C 相比温度梯度大, 岩样内部会产生热应力, 且结合电镜扫描 (SEM) 结果来看, 此高温热处理后内部存在热应力的岩样遇水快速冷却, 造成其内部开裂急剧增加, 裂纹扩展更加明显, 因此, 即便水冷却使孔洞有所收缩, 总体上还是表现为大孔隙增加, 占比大于自然冷却。

3.3 孔隙率

核磁共振测得的不同工况下平均孔隙率如表 1 所示。其中, 25 °C 指未进行加热处理, 因此也未做水中冷却处理。

表 1 各不同工况平均孔隙率

Table 1 Average porosity in different working cases

热处理温度 /°C	孔隙率/%	
	自然冷却	水中冷却
25	13.86	—
100	12.96	13.20
300	14.96	14.39
500	15.66	15.35
600	15.79	16.17
800	15.97	17.48

为了准确表征不同冷却条件对孔隙率的影响, 避免采用不同岩样原始孔隙差异给孔隙对比带来误差, 采用 3 个岩样的平均孔隙变化率来表示不同冷却方式引起的孔隙率变化, 孔隙变化率 δ 定义为

$$\delta = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: n_1 为 25 °C 试件的孔隙率; n_2 为冷却后孔隙率。

不同冷却条件下热处理砂岩孔隙变化率随温度变化如图 6 所示。由图 6 可以看出:

(1) 砂岩加热温度较低时, $\delta < 0$, 即相对于 25 °C 时的岩石而言, 加热并冷却后岩石孔隙率降低, 热处理岩孔隙率降低主要是由矿物颗粒膨胀, 部分孔隙闭合引起的^[11, 28];

(2) 热处理温度 $T > 100$ °C 后, 两种砂岩孔隙变化率都呈上升趋势, 表明随着热处理温度升高, 岩样微裂隙和微孔隙萌生和扩展, 此阶段孔隙度有较大幅增加; 热处理温度 $T < 500$ °C 时, 两种冷却方式对砂岩总孔隙率影响不大;

(3) 热处理温度 $T > 500$ °C 时, 自然冷却下砂岩孔隙变化率基本保持不变, 而水冷却后砂岩孔隙

变化率持续升高, 由于高温快速冷却所产生的温度梯度比供给稳定热流所产生的温度梯度要大得多, 致使岩石内部产生热冲击, 加剧了裂隙裂纹的产生和发展^[16], 因此孔隙率继续以较高速率增大。500 °C 可以看作不同冷却方式对砂岩孔隙率影响的温度临界值, 对于 $T > 500$ °C 的高温环境下的砂岩工程, 采用水冷却方式 (如隧道着火后用水灭火) 要充分考虑其孔隙率的急剧增长带来的危害。

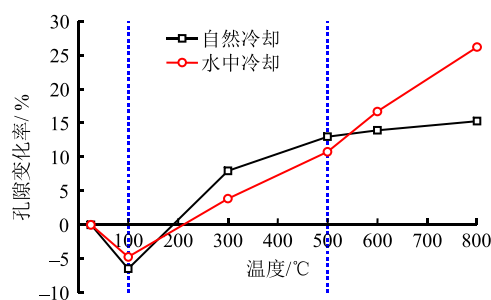


图 6 不同冷却条件下热处理砂岩孔隙变化

Fig.6 Porosity change rates of heat-treated sandstone under different cooling conditions

4 单轴压缩试验

4.1 试验设备及方案

待水中冷却的岩样干燥后, 将经过两种冷却方式处理后的岩样进行单轴压缩试验, 每个温度下 3 个岩样, 取平均值。单轴压缩试验采用 GAW-2000 微机控制电液伺服刚性压力试验机, 见图 7, 最大荷载为 2 000 kN。试验轴向和径向应变均采用位移引伸计测量, 压缩过程中控制初期加压速率 500 N/s, 等观察到曲线即将进入屈服阶段后改为变形控制。控制加载速率为 0.01 mm/min, 直至试件破坏。

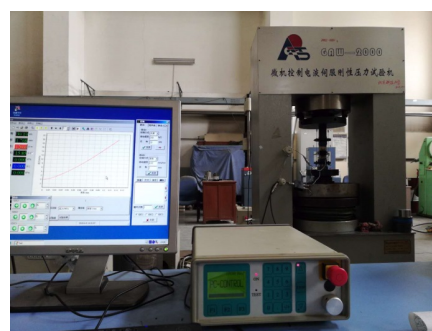


图 7 刚性压力试验机

Fig.7 Rigid pressure testing machine

4.2 单轴压缩试验结果

各岩样单轴压缩峰值强度如表 2 所示, 各数值为 3 个岩样的平均值, 同表 1 孔隙率一样, 由于 25 °C 状态未做加热处理也未做水中冷却, 其强度值为自

然状态下的强度值。图 8 为其所对应的强度变化趋势。

表 2 单轴压缩峰值强度
Table 2 Peak strength of uniaxial compression

热处理温度/℃	单轴压缩峰值强度/MPa	
	自然冷却	水中冷却
25	50.38	—
100	52.24	41.72
300	55.69	40.96
500	42.70	29.40
600	56.92	26.76
800	49.55	17.34

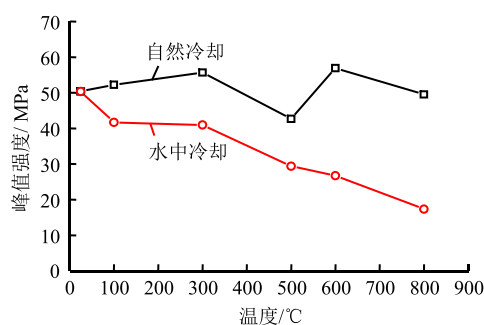


图 8 不同冷却条件下峰值强度变化趋势

Fig.8 Variation trend of strength under different cooling conditions

将表 2 和图 8 相结合可以得到:

(1) 在自然冷却条件下, 较低热处理温度下 ($T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) 其强度与常温砂岩强度基本相当, 当温度 $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 热处理对砂岩强度有明显影响, 呈现先降低后升高再降低的形式, 这与砂岩内部矿物相变及裂隙发展有关^[11];

(2) 在水冷却条件下, 热处理砂岩强度会低于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 砂岩强度, 且随着热处理温度的升高, 强度持续降低, 当加热温度达到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 相比 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低 33.04 MPa , 降低幅度可达 65.6% , 说明热处理砂岩在水中急速冷却使得岩样内部产生剧烈反应, 同时伴随强烈的热冲击, 且温度越高, 热冲击作用愈加明显, 宏观表现为强度降低幅度也更大。

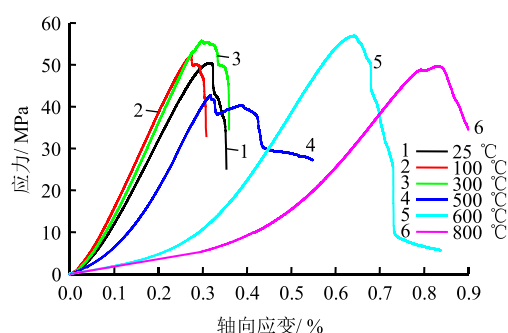
图 9 为两种冷却条件下不同温度砂岩应力-应变关系。从图中可以看出:

(1) 无论何种冷却方式以及多高热处理温度, 砂岩基本呈现与常温砂岩类似的 4 阶段应力-应变曲线, 即孔隙压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段和破坏后阶段。

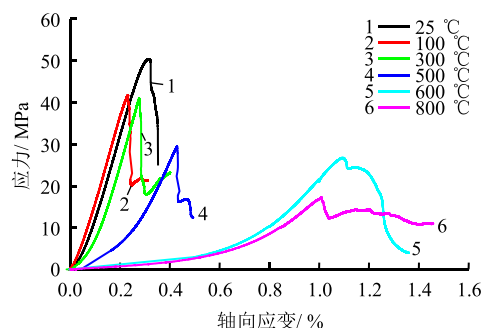
(2) 无论采用何种冷却方式, 在低温热处理条件下, 其峰值应变差别不大, 但当温度 $T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 峰值应变都急剧增加, 这是由于石英在 $573\text{ }^{\circ}\text{C}$

左右会发生相变, 由 α 相转变为 β 相^[29], 且结合图 10 及其分析可知, 此时岩石内部的高岭石含量急剧降低, 发生脱水反应, 生成偏高岭石, 还可与砂岩中游离的 Ca^{2+} 离子结合形成铝酸钙等新相矿物, 使砂岩微观结构间的胶结物发生改变, 造成砂岩脆性减弱, 延性增强, 且水冷却高温砂岩应变增量更加明显, 延性更强。

(3) 温度 $T > 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 自然冷却下峰值应变继续增加, 而水中冷却下的峰值应变开始减小, 由于水冷使岩样从 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温快速降温, 造成岩样内部受热膨胀的矿物颗粒急速收缩, 内部反应停止, 岩样处于一个向脆性转变的“延脆性”状态。



(a) 自然冷却下应力-轴向应变曲线



(b) 水中冷却下应力-轴向应变曲线

图 9 不同冷却条件下应力-应变曲线图

Fig.9 Stress-strain curves under different cooling conditions

5 SEM 试验

5.1 试验方案

为了进一步研究高温砂岩在不同冷却条件下微观结构, 采用蔡司 Crossbeam 550 电镜扫描仪对砂岩进行 SEM 试验。试件来源于单轴压缩后的破坏岩样, 首先进行切割, 然后磨片、喷炭, 最后扫描。

5.2 SEM 结果分析

图 10 为两种冷却方式下不同热处理温度砂岩 SEM 图像。由图可以看出:

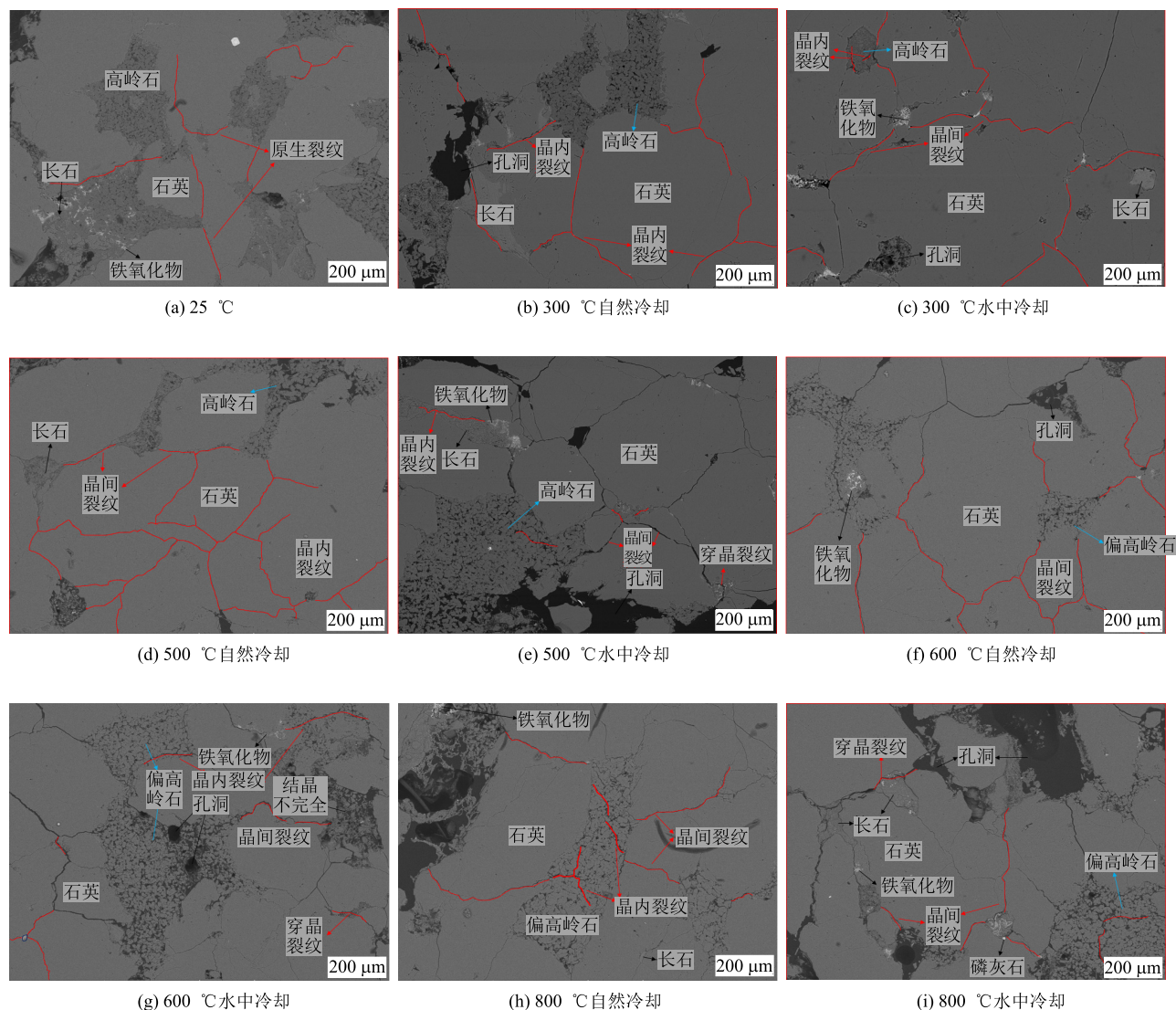


图 10 不同冷却条件下热处理砂岩 SEM 图

Fig.10 SEM images of heat-treated sandstone under different cooling conditions

(1) 砂岩在 25℃时,可以看到其内部结构比较复杂,由各种砂粒胶结而成,石英含量较高,还有高岭石、长石、铁氧化物等矿物成分;此外,岩石内部含少量微裂纹,主要以矿物颗粒边缘扩展的原生裂纹为主,如图 10(a)所示。

(2) 相对 25 °C 砂岩而言,当热处理温度 T 达到 300 °C 时,岩样内部开始出现少量晶内裂纹和晶间裂纹,但此时裂纹尚未完全发育,宽度较小,彼此之间亦未完全贯通。对比图 10(b)、10(c)可知,此温度范围内两种冷却条件对砂岩微观裂纹的扩展影响差别不大,这在宏观上表现为此温度下的孔隙变化趋势一致且变化幅度相差不大。

(3) 当温度 $T \geq 500$ °C 时,由于内部矿物颗粒的不均匀膨胀引起内部热应力,导致不同矿物颗粒边界原裂纹扩展程度增大,形成更多的新裂纹,且

裂纹密度显著增加;此外,对比图 10(d)、10(e)、10(f)、10(g)、10(h)和 10(i),可以发现,水冷却条件下裂纹密度更大,彼此贯穿连通程度更重,裂纹宽度也显著加大,在开裂严重处出现较多孔洞,因此宏观表现为此后孔隙变化率不断上升,自然冷却下则相对不变。这主要是由砂岩高温下遇水快速冷却导致膨胀的矿物颗粒快速受冷收缩,产生较大的热应力和不协调收缩造成的。

(4) 当温度进一步从 600 °C 升高到 800 °C,发现此时岩石内部高岭石含量减少,偏高岭石大幅增多,这是由于高温下高岭石会发生脱水反应^[27],生成偏高岭石。与此同时裂纹发育程度亦大幅增加,已经贯通形成裂隙网络,使得水冷却砂岩样内遍布大量晶内裂纹和穿晶裂纹,孔洞亦进一步扩大,这会形成导水通道导致透水性大幅提高,也是该温度

下水冷却导致砂岩强度大幅度降低的原因之一。

6 结 论

(1) 相对于自然冷却, 水冷却对于砂岩强度影响较大, 随热处理温度升高, 强度持续降低, 最大降幅可达 65.6%; $T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 两种冷却方式下高温砂岩内部石英皆发生相变, 高岭石变为偏高岭石, 导致砂岩脆性减弱, 延性增强, 峰值应变突增, 水冷却高温砂岩应变增量更加明显, 延性更强。

(2) $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可以看作两种冷却方式对砂岩孔隙率影响的临界温度。热处理温度 $T < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 两种冷却方式对砂岩总孔隙率影响不大; $T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 自然冷却下砂岩孔隙率变化率基本保持不变, 而水冷却后砂岩孔隙率从 13.86% 持续升高到 17.48%, 最大升高率可达 26.19%, 大孔径 ($10\text{ }\mu\text{m}$) 孔隙占比也有显著增长, 这主要是由于砂岩高温下遇水快速冷却导致膨胀的矿物颗粒快速受冷收缩, 产生了较大的热应力以及发生不协调收缩, 造成裂纹密度和宽度显著加大, 彼此贯穿连通程度更重, 产生许多新的进一步扩大的孔隙。

(3) SEM 图显示, 温度 $T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 岩样内部矿物颗粒的不均匀膨胀, 导致不同矿物颗粒边界原裂纹扩展程度增大, 形成更多的新裂纹; 此外, 当温度进一步升高到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 裂纹扩展发育程度亦大幅增加, 已经贯通形成裂隙网络, 使得水冷却砂岩样内遍布大量晶内裂纹和穿晶裂纹, 孔洞亦进一步扩大, 这从裂纹扩展角度解释了高温冷却时强度显著降低这一现象。

(4) 采用水冷却高温砂岩时, 无论是孔隙率、大孔隙占比还是内部裂隙网络发育及贯通等因素都对防渗不利, 因此在类似高温环境采用水冷却时(如隧道着火后用水灭火)要充分考虑该冷却方式可能带来的工程灾害。

参 考 文 献

- [1] SYGAŁA A, BUKOWSKA M, JANOSZEK T. High temperature versus geomechanical parameters of selected rocks-the present state of research[J]. **Journal of Sustainable Mining**, 2013, 12(4): 45-51.
- [2] KONG B, WANG E Y, LI Z H, et al. Fracture mechanical behavior of sandstone subjected to high-temperature treatment and its acoustic emission characteristics under uniaxial compression conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(12): 4911-4918.
- [3] 吴刚, 邢爱国, 张磊. 砂岩高温后的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2110-2116.
- [4] WU Gang, XING Ai-guo, ZHANG Lei. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2110-2116.
- [5] 张连英, 卢文厅, 茅献彪. 高温作用下砂岩力学性能实验[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 293-297.
- [6] ZHANG Lian-ying, LU Wen-ting, MAO Xian-biao. Experimental research on mechanical properties of sandstone at high temperature[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(3): 293-297.
- [7] 苏承东, 郭文兵, 李小双. 粗砂岩高温作用后力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1162-1170.
- [8] SU Cheng-dong, GUO Wen-bing, LI Xiao-shuang. Experimental research on mechanical properties of coarse sandstone after high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1162-1170.
- [9] 王鹏, 许金余, 刘石, 等. 砂岩的高温损伤与模量分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 211-216.
- [10] WANG Peng, XU Jin-yu, LIU Shi, et al. Analysis of high temperature damage and modulus of sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.2): 211-216.
- [11] WU G, WANG Y, SWIFT G, et al. Laboratory investigation of the effects of temperature on the mechanical properties of sandstone[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2013, 31(2): 809-816.
- [12] ZHANG Y L, SUN Q, HE H, et al. Pore characteristics and mechanical properties of sandstone under the influence of temperature[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2017, 113(6): 418-429.
- [13] ZHANG W Q, SUN Q, HAO S H, et al. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2016, 98(5): 1297-1304.
- [14] ZHU T T, JING H W, SU H J, et al. Physical and mechanical properties of sandstone containing a single fissure after exposure to high temperature[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2016, 26(2): 319-325.
- [15] 赵怡晴, 吴常贵, 金爱兵, 等. 热处理砂岩微观结构及力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2233-2240.
- [16] ZHAO Yi-qing, WU Chang-gui, JIN Ai-bing, et al. Experimental study on microstructure and mechanical

- properties of sandstone after heat treatment at high temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(7): 2233-2240.
- [12] SIRATOVICH P A, SASS I, HOMUTH S, et al. Thermal stimulation of geothermal reservoirs and laboratory investigation of thermally induced fractures[J]. **Transactions-Geothermal Resources Council**, 2011, 35(10): 1529-1535.
- [13] SIRATOVICH P A, VILLENEUVE M C, COLE J W, et al. Saturated heating and quenching of three crustal rocks and implications for thermal stimulation of permeability in geothermal reservoirs[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 80(10): 265-280.
- [14] AXELSSON G, THORHALLSSON S. Review of well stimulation operations in Iceland[J]. **Geothermal Resource Council Transactions**, 2009, 33: 795-800.
- [15] 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 Bao-ping, ZHAO Yang-sheng. 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.
- [16] 王朋, 陈有亮, 周雪莲, 等. 水中快速冷却对花岗岩高温残余力学性能的影响[J]. **水资源与水工程学报**, 2013, 24(3): 54-57.
- WANG Peng, CHEN You-liang, ZHOU Xue-lian, et al. Impact of rapid cooling in water on residual mechanical properties of granite under high temperature[J]. **Journal of Water Resources & Water Engineering**, 2013, 24(3): 54-57.
- [17] 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.
- [18] 梁铭, 张绍和, 舒彪. 不同冷却方式对高温花岗岩巴西劈裂特性的影响[J]. **水资源与水工程学报**, 2018, 29(2): 186-193.
- LIANG Ming, ZHANG Shao-he, SHU Biao. Effect of different cooling ways on Brazilian tension characteristics of heat-treated granite[J]. **Journal of Water Resources & Water Engineering**, 2018, 29(2): 186-193.
- [19] 靳佩桦, 胡耀青, 邵继喜, 等. 急剧冷却后花岗岩物理力学及渗透性质试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2018, 37(11): 2556-2564.
- JIN Pei-hua, HU Yao-qing, SHAO Ji-xi, et al. Experimental study on physico-mechanical and transport properties of granite subjected to rapid cooling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37 (11): 2556-2564.
- [20] 邵保平, 吴阳春, 王帅, 等. 热冲击作用下花岗岩力学特性及其随冷却温度演变规律试验研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(增刊 1): 83-94.
- XI Bao-ping, WU Yang-chun, WANG Shuai, et al. Evolution of mechanical properties of granite under thermal shock in water with different cooling temperatures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.1): 83-94.
- [21] 黄真萍, 张义, 孙艳坤, 等. 高温遇水冷却石灰岩力学与声学性质研究[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2016, 47(12): 4181-4189.
- HUANG Zhen-ping, ZHANG Yi, SUN Yan-kun, et al. Mechanical and acoustic characteristics of high temperature limestone with water cooling treatment[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2016, 47(12): 4181-4189.
- [22] 黄真萍, 张义, 吴伟达. 遇水冷却的高温大理岩力学与波动特性分析[J]. **岩土力学**, 2016, 37(2): 367-375.
- HUANG Zhen-ping, ZHANG Yi, WU Wei-da. Analysis of mechanical and wave properties of heat-treated marble by water cooling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 367-375.
- [23] HAN G S, JING H W, SU H J, et al. Effects of thermal shock due to rapid cooling on the mechanical properties of sandstone[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2019, 78(5): 1-9.
- [24] LIU Q S, QIAN Z C, WU Z J. Micro/macro physical and mechanical variation of red sandstone subjected to cyclic heating and cooling: an experimental study[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2019, 78: 1485-1499.
- [25] 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.
- ZHU Zhen-nan, TIAN Hong, DONG Nan-nan, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of heat-treated granite by water cooling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl.2): 169-176.