

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.023

不同温度后红砂岩力学性质及微观结构 变化规律试验研究

戎虎仁¹, 白海波¹, 王占盛²

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 对 20℃、70℃、140℃、200℃、300℃、400℃、600℃、800℃等 8 种不同温度后红砂岩的力学特性进行了试验研究, 结合压汞、SEM 扫描电镜微观试验分析不同温度后红砂岩孔隙结构变化及微裂纹产生规律, 并对红砂岩的不同温度劣化微观机制作初步探讨。研究表明: (1) 不同温度后红砂岩单轴抗压强度在 300℃达到峰值为常温的 1.4 倍; 红砂岩劣化阈值温度为 600℃, 单轴抗压强度降幅达 32.5%; (2) 不同温度后红砂岩产生的裂纹宽度绝对多数分布在 0~0.01 μm 区间内, 该区间内各阶段裂缝的分布比值与单轴抗压强度呈较好的相关性; (3) 沿晶和穿晶裂纹产生以及裂纹均质性变差是红砂岩劣化的主要影响因素。

关 键 词: 红砂岩; 裂纹分布; 劣化; 孔隙结构

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)02-0463-07

Experimental research on mechanical properties and microstructure change law of red sandstone after different temperatures

RONG Hu-ren¹, BAI Hai-bo¹, WANG Zhan-sheng²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Researches are carried out on the mechanical properties of red sandstones treated at 20 °C, 70 °C, 140 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C, respectively. Based on the researches, the regular patterns of the pore structure and micro fracture of the heated red sandstones are investigated combined with mercury and scanning electron microscope analyses. It is concluded that: (1) the maximum uniaxial compressive strength of heated red sandstones at 300 °C is 1.4 times as much as that of red sandstones at room temperature. The uniaxial compressive strength decreases by 32.5% when red stones are heated to 600 °C. (2) The crack widths of heated red sandstones are mainly ranged from 0 to 0.01 μm, during which there are better correlation between the distribution ratio of cracks and the uniaxial compressive strength. (3) The main affecting factors of the deterioration of red sandstones are the transgranular cracks and heterogeneity of cracks.

Key words: red sandstone; distribution of cracks; degradation; pore structure

1 引 言

随着地热能、油气田、煤层气的开发, 岩石所处的温度环境随之而改变, 在此特殊温度环境下, 岩石力学特性、内部结构的改变直接影响着资源开采。所以研究温度对岩石物理、化学等方面的性质具有重要意义。

Inada 等^[1]从宏观、微观角度出发, 认为不同温度荷载循环作用和孔隙结构等因素对岩石强度影响

极为重要。张品瑶等^[2]从晶体角度研究了温度变化对两类石英岩微结构变化的影响。许锡昌等^[3], 刘泉声等^[4]研究了在 20~600 °C 温度范围内, 花岗岩单轴压缩状态下主要力学参数随温度的变化规律, 得到了花岗岩弹性模量和单轴抗压强度的门槛温度。朱合华等^[5]对不同温度后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学性质进行了研究, 得到 3 种岩石峰值强度均随温度的升高而降低, 且温度越高, 降幅越大。吴刚等^[6]分析了砂岩在 100~

收稿日期: 2013-12-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2013CB227900); 江苏省研究生培养创新工程 (No. CXZZ13_0934)。

第一作者简介: 戎虎仁, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事采矿安全方面的研究工作。E-mail: ronghuren_1986@163.com

1 200℃温度作用后表观形态、峰值应力、弹性模量等因素后认为,砂岩性质劣化的根本原因是矿物吸附水脱水、矿物晶体晶型的转变、重结晶以及结合水的逸出。赵洪宝等^[7]依托不同温度后砂岩孔隙率的变化得到岩石损伤随温度的变化规律。徐小丽等^[8,10]对花岗岩在温度作用下(常温~1 300℃)的宏观力学性质及微孔隙结构特征进行了较为系统的研究,认为岩样孔隙率随温度升高总体呈增大趋势,孔隙率的变化存在一个突变过程,花岗岩的阈值温度在 800℃左右。张渊等^[11-12]在显微镜镜下对不同温度细砂岩裂缝的发育规律进行统计得到裂缝发育的 2 个温度阈值;谌伦建等^[13]通过扫描显像得到不同温度作用下砂岩主要产生沿颗粒边界裂隙和穿过颗粒裂隙。刘向君等^[14]研究了温度和围压对砂岩孔隙度影响,得到温度对孔隙度的影响高于围压对孔隙度的影响。

过去针对不同温度后砂岩力学参数以及孔隙率(度)变化进行了大量研究,本文在前人研究基础上,更进一步地定性和定量分析不同温度后红砂岩微观裂纹演化过程和裂纹宽度分布随着温度变化情况,以及微观裂纹对力学特性的影响。本文基于单轴压缩试验和压汞、SEM 扫描电镜试验,以经历不同温度后红砂岩试样为研究对象,通过对比分析不同温度后微观结构变化特征和力学特性。从微观角度探讨不同温度后红砂岩力学特性变化机制。

2 试验概况

2.1 岩样

试验选用采自山东临沂的红砂岩,X 射线荧光光谱仪(XRF)测得红砂岩主要成分如表 1 所示。常温下孔隙结构为正态分布(歪度 $SK_p = 0.0087$)。试验所用红砂岩为不同温度作用并自然冷却后的岩样,共计 8 种工况,分别为:20℃后、70℃后、140℃后、200℃后、300℃后、400℃后、600℃后和 800℃后。

表 1 红砂岩主要化学成分(单位:%)
Table 1 Main chemical composition of red sandstone

试样编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
1	3.66	2.43	13.80	60.84	2.22	4.80	2.87
2	3.39	2.30	12.67	58.49	2.13	5.87	2.28
3	3.72	2.31	13.21	59.74	2.31	6.24	2.65

2.2 试验设备和方法

选定 100 mm×50 mm 圆柱体标准岩样(力学试验)和 50 mm×20 mm 的微观试验圆柱体岩样进行

编号,每种工况下各选 3 个试件。首先,利用 GWD-02A 型高温炉以 5℃/min 升温速率加温至指定温度,然后恒温 2 h。其次,对 100 mm×50 mm 的岩样进行单轴压缩试验,对 50 mm×20 mm 的岩样进行压汞、SEM 电镜试验。测试设备分别为 YNS2000 压力伺服系统(试验机测试范围 0-2000KN)和美国麦克仪器公司(MICROMERITICS)的 AutoPore IV 9510 全自动压汞仪(Mercury Porosimetry)最大压力为 414 MPa,孔径测量范围为 $30 \times 10^{-4} \sim 1\,000\ \mu\text{m}$;扫描电子显微镜(SEM)Quanta250 放大倍数为 $6 \sim 100 \times 10^4$ 倍。

压汞试验是把非润湿相水银注进到岩芯孔隙中,注入水银的每一个压力就代表一个相应的孔隙大小下的毛管压力,在这个压力下进入孔隙系统的水银量就代表这个相应大小的孔隙体积,降压后退汞量表征试样有效孔隙和孔隙连通性。每个温度下选取 3 个试样,共计 24 个样;试验时首先将试样在 70~80℃的烘箱中干燥 10 h,然后装入膨胀仪中抽真空,当真空度达到 50 m 汞柱时,将汞液注入膨胀计中,然后通过逐步加压,汞液在压力驱使下克服岩石孔隙的毛细力而侵入岩样孔隙。汞首先侵入较大的孔隙,随着压力增大逐步侵入较小的孔隙,压入岩样中的汞液体积由露出液面的铂丝电阻的变化而求得。试验结果可以通过毛细压力曲线和孔隙喉道及其连通孔隙总体积的频率直方图来分析岩样的孔隙体积、分布及其连通性等。

SEM 扫描电镜试验是在加速高压作用下将电子枪发射的电子经过多级电磁透镜汇集成细小的电子束。在末级透镜上方扫描线圈的作用下,得到的一个反应试样表面状况的扫描图像。试验方法:每个温度下选取 3 个试样,共计 24 个样;首先,对试样进行烘干和表面除尘后,对试样表面镀金,最后,放入扫描电镜 Quanta250 进行实时观测和抓拍成像。

通过压汞试验和 SEM 扫描电镜试验分析不同温度后红砂岩孔隙结构变化及微裂纹产生规律,结合岩样的力学指标进行对比分析,力求在微观层次上解释不同温度作用下红砂岩力学指标差异的原因。

3 不同温度后红砂岩力学性质

通过对不同温度后红砂岩单轴压缩试验数据的处理分析,得到不同温度作用后各红砂岩岩样的力学参数,如表 2 所示。表中岩样的弹性模量是选用应力-应变全过程曲线上达到峰值应力前近似直线段的数据,进行线性拟合得出的。

3.1 单轴抗压强度

图1为不同温度作用后红砂岩的单轴抗压强度峰值应力随温度的变化曲线图。单轴压缩试验下岩样的峰值应力即为单轴抗压强度。图1表明,红砂岩在20~800℃温度作用后的峰值强度随温度升高呈先降低再上升最终下降的趋势。其中20~140℃后红砂岩的平均峰值强度下降不明显;200~300℃后红砂岩的平均峰值强度急剧上升,至300℃达到峰值;300℃~600℃峰值强度急剧下降,600℃后平均峰值应力已降至45.39 MPa,较20℃后平均峰值应力(63.47 MPa)下降幅度达28.49%。600℃~800℃,峰值强度有进一步下降,但下降幅度不大。

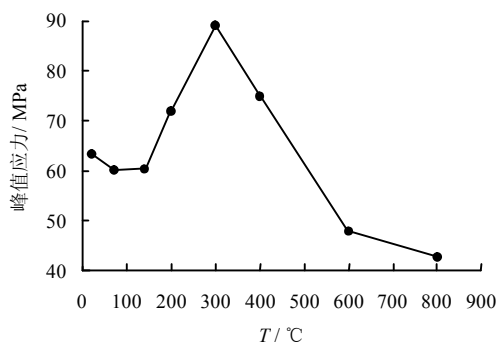


图1 峰值应力随温度变化图

Fig.1 Change curve of peak stress variation with temperature

3.2 峰值应变

图2为不同温度作用后红砂岩的峰值应变随温度的变化曲线图。从图可以看出,平均峰值应变随温度上升而上升,其中20~400℃后平均峰值应变随温度变化不大;400~800℃后平均峰值应变随温度上升急剧上升;800℃后平均峰值应变上升到 18.92×10^{-3} ,较20℃后平均峰值应变(11.68×10^{-3})增幅达61.99%。

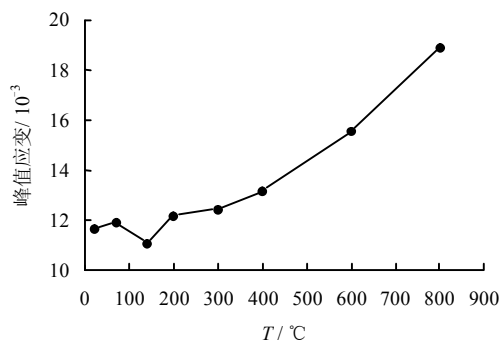


图2 峰值应变随温度变化图

Fig.2 Change curve of peak strain variation with temperature

3.3 弹性模量

图3为不同温度作用后红砂岩的弹性模量随温度变化曲线图。由图可见,20~140℃后红砂岩的弹性模量随温度的升高小幅度上升,即由9.77 GPa增至11.69 GPa;140~200℃后红砂岩的弹性模量随温度的升高呈下降趋势,200℃后的弹性模量已略小于20℃后的弹性模量;200~400℃后红砂岩的弹性模量随温度的升高先急速增大后又急速减小,最大值为300℃后的13.16 GPa,最小值为400℃后的9.05 GPa;600~800℃后红砂岩的弹性模量随温度的升高而大幅减小,800℃后平均弹性模量已降至4.16 GPa,较20℃后平均弹性模量降幅达87.42%。

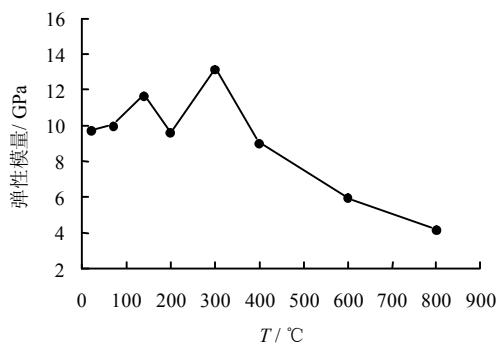


图3 弹性模量随温度变化图

Fig.3 Change curve of modulus of elasticity variation with temperature

表2 不同温度后各红砂岩在单轴压缩下的力学参量(均值)

Table 2 Mechanical parameters of red sandstone under uniaxial compression under different temperatures

温度 / °C	峰值应力 / MPa	峰值应变 / 10 ⁻³	弹性模量 / GPa
20	63.47	11.68	9.77
70	60.09	11.93	10.02
140	60.32	11.08	11.69
200	72.01	12.22	9.63
300	89.13	12.45	13.16
400	74.94	13.18	9.05
600	47.94	15.57	5.96
800	42.84	18.92	4.16

4 不同温度后红砂岩裂纹产生及分布规律

4.1 高温后红砂岩 SEM 裂纹产生规律

通过 SEM 扫描电镜采集照片:由图4(a)、(b)可见,140~200℃时,岩样无明显微观裂隙产生;由图4(c)可见,300℃后非黏土矿物开始产生微裂纹,且沿晶裂隙、孔裂隙之间岩桥开始产生裂纹;但裂纹延伸很短,尤其是孔裂隙之间岩桥并未贯通;由图4(d)可见,400℃高温后图片可见部分孔

裂隙之间岩桥开始贯通;由图 4(e)可见, 600℃ 高温后图片可见岩桥裂纹贯通, 数量急剧增加, 密度增大;由图 4(f)可见, 800℃ 高温后可见贯通的穿晶裂纹。

4.2 裂纹宽度分布

通过对不同温度后红砂岩进行压汞试验, 依据红砂岩测得常温和不同温度下孔隙结构参数, 对比分析高温后裂纹产生规律。由图 5 可见, 不同温度后红砂岩内部结构变化可以分为 3 个阶段:

(1) 70~200℃ 时, 此阶段随着温度升高, 孔隙度和有效孔隙度整体上呈增大趋势, 但变化不明显。在此温度范围内的不同区间, 变化趋势又有所差异, 具体如下: ①在 70~110℃ 区间, 此阶段并未大量产生新的微裂隙, 因此孔隙度变化很小, 但有效孔隙度在 110℃ 时急剧下降; ②在 110~140℃

区间, 此阶段弱结合水脱去, 部分黏土矿物膨胀发生崩解, 充填堵塞原有孔隙, 所以有效孔隙度降低; ③在 140~200℃ 区间, 此阶段强结合水脱去, 黏土矿物崩解更加彻底, 但对原有喉道堵塞作用有限, 有效孔隙度反而有所升高。

(2) 200~400℃ 时, 此阶段岩样的微裂纹数量在不断增加, 孔隙度也呈增大趋势, 但其明显低于有效孔隙度增大趋势, 说明此段微裂纹主要产生于盲孔之间和孔喉狭窄处。岩样出现裂纹, 裂纹宽度主要集中在 0~0.01 μm 和 0.01~0.1 μm 区间。

(3) 600~800℃ 时, 此阶段岩样的孔隙度呈增大趋势, 且微裂纹数量在不断增加; 岩样裂纹宽度在 0.1~0.01 μm 和大于 1 μm 区间内的数量比例降低, 小于 0.01 μm 区间内的裂纹大量涌现, 增幅约为 10%。

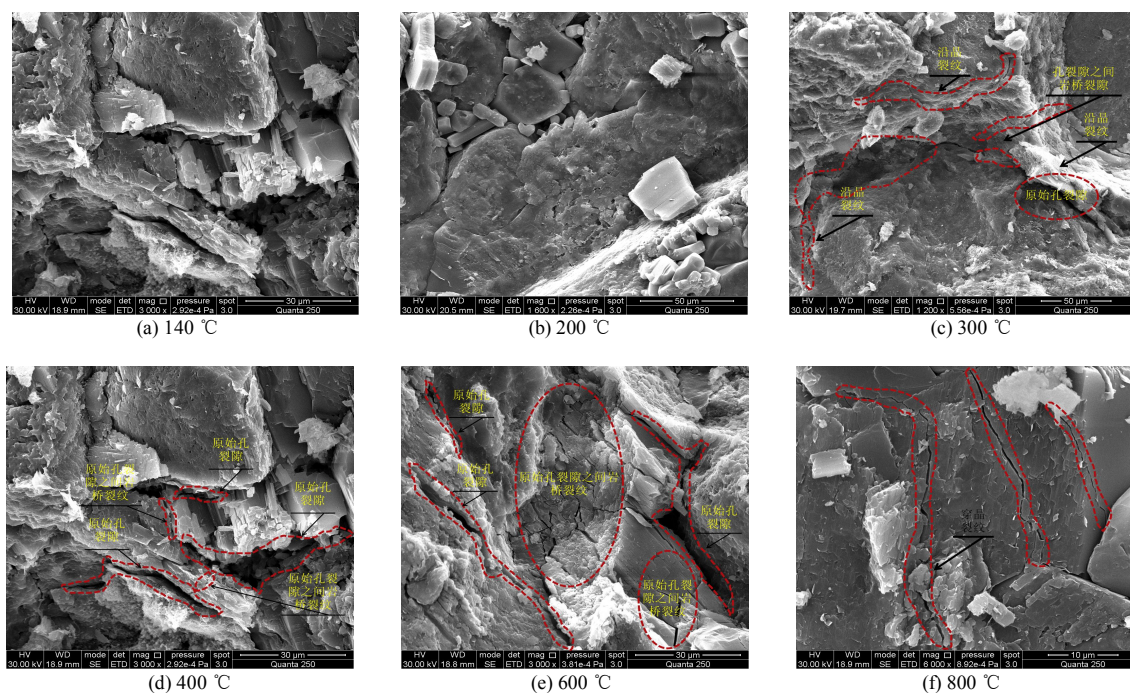


图 4 红砂岩随温度变化的裂纹发展图

Fig.4 Crack development maps of red sandstone with temperature changes

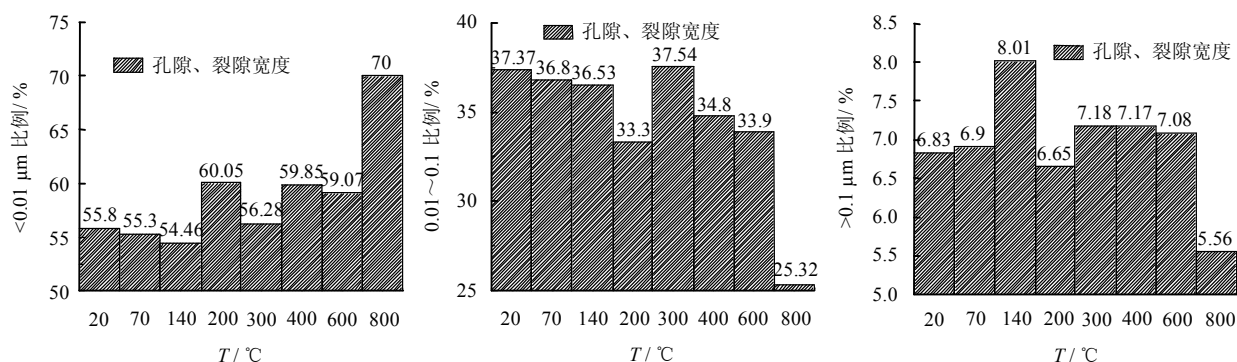


图 5 裂纹宽度分布与温度关系图

Fig.5 Diagrams between distribution of crack width and the temperature

4.3 裂纹均质性

常温下, 红砂岩的均质性特别好。由图 6 可以看出, 试验温度在 70~200 °C 时, 岩样的孔隙、裂纹分布趋向于小孔隙, 再次验证了此阶段黏土矿物崩解为细小颗粒。试验温度在 200~400 °C 时, 岩样的歪度呈变大趋势, 但变化幅度很小。试验温度在 600~800 °C 时, 歪度急剧增大, 产生的微裂隙宽度集中于 0.01 μm 附近。综合分析图 5 和图 6, 对比分析 200~400 °C 和 600~800 °C 两个区间岩样的裂纹宽度和均质性变化可以得出, 600~800 °C 阶段产生宽度小于 0.01 μm 的裂纹, 也是导致歪度值变大的原因; 而 200~400 °C 区间的岩样产生的裂纹宽度大于 0.1 μm , 200~400 °C 阶段裂纹数量产生少且裂纹宽度呈正态分布产生, 所以试样的均质性变化不大。

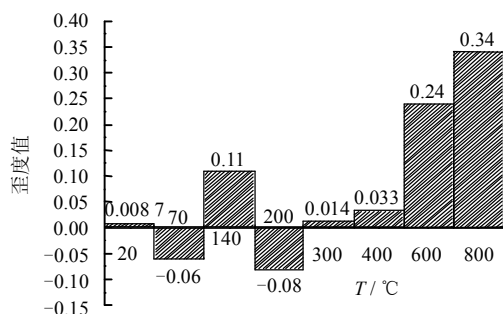


图 6 裂纹均质性(歪度)与温度关系图

Fig.6 Diagram between crack heterogeneity (skewness) and temperature

5 不同温度后红砂岩力学性质变化浅析

由图 1、3、4、7、8 可知, 不同温度后红砂岩单轴抗压强度峰值随温度升高先增大后减小。曲线大致分为 4 个阶段: (1) 20~140 °C, 此阶段红砂

岩单轴抗压强度峰值减小, 减小幅度的不明显, 弹性模量增大; 据图 4 所示 SEM 图像可知: 20~140 °C 为不同温度后红砂岩矿物颗粒膨胀和黏土矿物脱弱结合水阶段, 无次生裂纹产生, 红砂岩歪度变大(即小孔隙、裂隙闭合, 原生孔隙、裂隙宽度分布趋于较大部分), 因此, 红砂岩强度降低而弹性模量变大;

(2) 200~300 °C, 此阶段红砂岩单轴抗压强度峰值和弹性模量都随温度升高而急剧增大(见图 7(a)、8(a)), 此阶段红砂岩各个宽度的裂纹比例和体积都在减小, SEM 图像显示极少部分裂纹产生, 但此阶段整体为红砂岩黏土矿物脱强结合水发生崩解后充填了红砂岩原有的裂纹和裂隙, 从而使得红砂岩强度增大; (3) 300~400 °C, 此阶段红砂岩单轴抗压强度峰值和弹性模量都随温度升高而减小, 减大幅度较小(见图 7(b)、8(b)), 此阶段红砂岩内部开始产生新的裂纹, 但裂纹产生速率较小, 所以红砂岩强度降低, 依据歪度趋于 0 说明产生的裂纹呈正态分布, 因此, 单轴抗压强度峰值和弹性模量降低幅度较小; (4) 600~800 °C, 此阶段红砂岩单轴抗压强度峰值和弹性模量都随温度升高而急剧减小(见图 7(c)、8(c)) 此阶段宽度 0~0.01 μm 裂纹急剧增多, 且呈非正态分布(歪度值为 0.34), SEM 图像显示穿晶裂纹产生, 因此, 红砂岩强度急剧降低。对比 400 °C 和 600~800 °C 高温后裂纹产生情况以及分布规律: 400 °C 高温后红砂岩已产生裂纹, 主要为沿晶裂纹(见图 4), 裂纹宽度呈正态分布, 均质性较好(歪度值=0.03), 此时红砂岩强度降低较小; 而 600~800 °C 高温后红砂岩产生穿晶裂纹, 且裂纹宽度呈非正态分布, 均质性极差(歪度值=0.24~0.34)。故沿晶、穿晶裂纹产生以及沿晶裂纹非正态分布是红砂岩急剧劣化的主要因素。

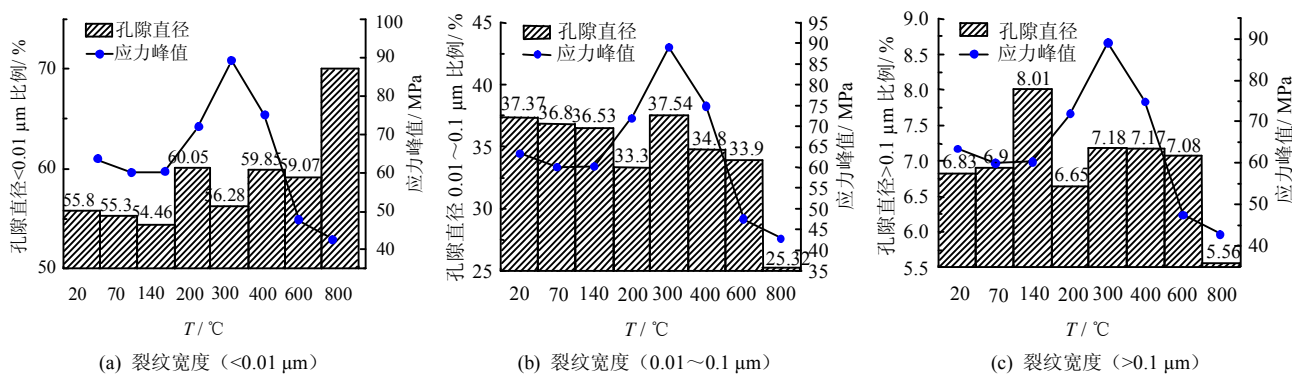


图 7 不同裂纹宽度比例随温度变化图

Fig.7 Diagrams for proportion of different crack widths with temperature changes

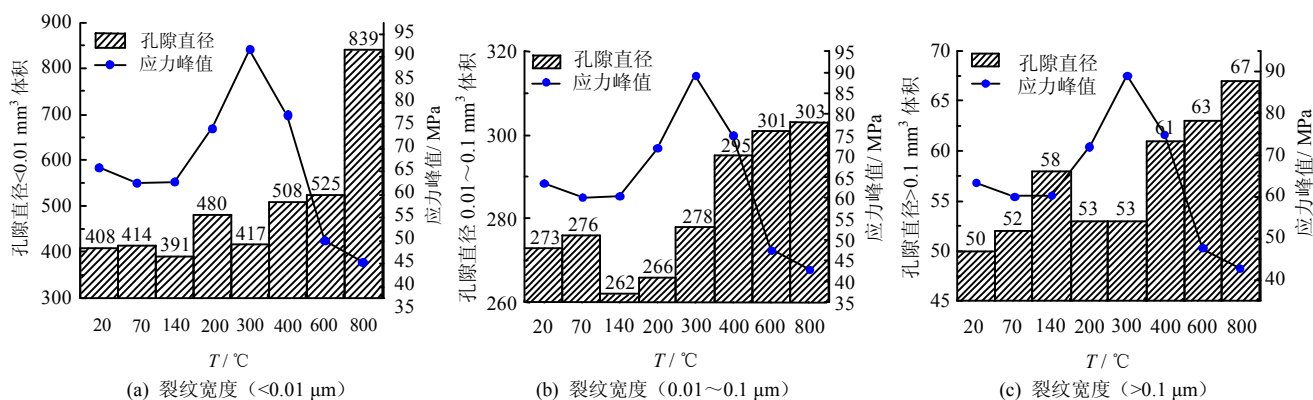


图8 不同裂纹宽度体积随温度变化图

Fig.8 Diagrams for crack volume of different crack widths with temperature changes

6 结 论

(1) 从20~800℃红砂岩的峰值强度随温度升高呈先降低后上升再下降趋势, 峰值应变随温度逐渐上升, 弹性模量随温度升高先增大后减小。

(2) 当试验温度在20~200℃区间, 无微裂隙产生; 200~400℃区间, 沿晶裂纹产生, 裂纹数量少、宽度呈正态分布。600~800℃区间, 沿晶裂纹密度增大, 均质性变差。

(3) 呈正态分布沿晶裂纹的产生并未对均质性降低太多, 且红砂岩强度降低较少。

(4) 沿晶、穿晶裂纹产生以及沿晶裂纹非正态分布是红砂岩急剧劣化的主要因素。

参 考 文 献

- [1] INADA Y, KINOSHITA N L, BISAWA A, et al. Strength and deformation characteristics of rocks after undergoing thermal hysteresis of high and low temperatures International[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3): 688—701.
- [2] 张晶瑶, 马万昌, 张风鹏, 等. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 1996, 17(1): 5—9.
ZHANG Jing-yao, MA Wan-chang, ZHANG Feng-peng, et al. On rock structure character under high temperature[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1996, 17(1): 5—9.
- [3] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性能初步研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 332—335.
XU Xi-chang, LIU Quan-sheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 332—335.
- [4] 刘泉声, 许锡昌, 山口勉, 等. 三峡花岗岩与温度及时间相关的力学性质试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(5): 715—719.
LIU Quan-sheng, XU Xi-chang, YAMAGUCHI T, et al. Felting study on mechanical properties of the Three Gorges granite concerning temperature and time[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(5): 715—719.
- [5] 朱合华, 闰治国, 邓涛, 等. 3种岩石高温后力学性质的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 1945—1950.
ZHU He-hua, YAN Zhi-guo, DENG Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff granite and breccia after high temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 1945—1950.
- [6] 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): 1945—1950, 2110—2116.
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): 1945—1950, 2110—2116.
- [7] 赵洪宝, 尹光志, 谌伦建. 温度对砂岩损伤影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊1): 2784—2788.
ZHAO Hong-bao, YIN Guang-zhi, CHEN Lun-jian. Experimental study on effect of temperature on sandstone damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup.1): 2784—2788.
- [8] 徐小丽, 高峰, 沈晓明, 等. 高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6): 1752—1758.

- XU Xiao-li, GAO Fen, SHEN Xiao-ming, et al. Research on mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1752—1758.
- [9] 徐小丽, 高峰, 张志镇. 高温作用后花岗岩三轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3177—3183.
- XU Xiao-li, GAO Feng, ZHANG Zhi-zhen. Research on triaxial compression test of granite after high temperatures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3177—3183
- [10] 张志镇, 高峰, 徐小丽. 花岗岩力学特性的温度效应试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2346—2352.
- ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng, XU Xiao-li. Experimental study of temperature effect of mechanical properties of granite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(8): 2346—2352.
- [11] 张渊, 张贤, 赵阳升. 砂岩的热破裂过程[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 656—659.
- ZHANG Yuan, ZHANG Xian, ZHAO Yang-sheng. Process of sandstone thermal cracking[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2005, 48(3): 656—659.
- [12] 张渊, 赵阳升, 万志军, 等. 不同温度条件下孔隙压力对长石细砂岩渗透率影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 53—58.
- ZHANG Yuan, ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, et al. Experimental study on effect of pore pressure on feldspar fine sandstone permeability under different temperatures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 53—58.
- [13] 谌伦建, 赵洪宝, 顾海涛, 等. 煤层顶板砂岩再高温下微观结构变化的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 443—446.
- CHEN Lun-jian, ZHAO Hong-bao, GU Hai-tao, et al. Study on microstructure of coal roof sandstone under high temperature[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2005, 34(4): 443—446.
- [14] 刘向君, 高涵, 梁利喜. 温度围压对低渗透砂岩孔隙度和渗透率的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3771—3778.
- LIU Xiang-jun, GAO Han, LIANG Li-xi. Study of temperature and confining pressure effects on porosity and permeability in low permeability sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.1): 3771—3778.
- 上接第 456 页
- [10] CHEN Z Y, MORGENSTERN N R. Extensions to the generalized method of slice for stability analysis[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1983, 20(1): 104—119.
- [11] 邓东平, 李亮. 两种滑动面型式下边坡稳定性计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 372—380, 410.
- DENG Dong-ping, LI Liang. Research on calculation methods of slope stability under two types of sliding surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(2): 372—380, 410.
- [12] 陈昌富. 仿生算法及其在边坡和基坑工程中的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [13] 朱大勇, 李焯芬, 黄茂松, 等. 对 3 种著名边坡稳定性计算方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 183—194.
- ZHU Da-yong, LI Chao-fen, HUANG Mao-song, et al. Modifications to three well-known methods of slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 183—194.
- [14] 中华人民共和国水利部. SL386—2007 水利水电工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [15] 肖专文, 张奇志, 梁力, 等. 遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, (1): 44—46.
- XIAO Zhuan-wen, ZHANG Ji-zhi, LIANG Li, et al. Application of genetic evolutionary algorithm for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, (1): 44—46.
- [16] 弥宏亮, 陈祖煜. 遗传算法在确定边坡稳定最小安全系数中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, (6): 671—675.
- MI Hong-liang, CHEN Zu-yu. Genetic algorithm used in determining the global minimum factor of safety of slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, (6): 671—675.
- [17] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutations in genetic algorithms[J]. **IEEE Trans System Man and Cyber**, 1994, 24(4): 656—667.
- [18] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(4): 314—323.
- [19] HULL T S, POULOS H G. Design method for stabilization of slopes with piles(discussion)[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1999, 125(10): 911—913.