

文章编号: 1001-4888(2017)01-0087-07

温度对灰砂岩物理特征及抗拉强度影响的试验研究^{*}

代金秋¹, 苏仲杰¹, 赵明超²

(1. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁信达监测有限公司, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为研究温度对灰砂岩物理特征及抗拉强度的影响, 利用对径压缩试验对经历不同温度的灰砂岩圆盘试件的力学特性进行分析, 结合动态信号测试分析系统实时监测并记录试件中部侧向应变, 采用非金属超声检测分析仪、SEM 等手段对经历不同温度的灰砂岩纵波波速、微观结构等特征进行表征。试验结果表明: ① 高温导致灰砂岩质量与纵波波速分别降低了 3.83% 与 50.03%, 损伤程度逐渐增大, 且在经历温度为 600℃ 时发生突变; ② 灰砂岩抗拉强度随经历温度的升高而减小, 近似服从负线性分布, 峰值压缩变形量与峰值侧向应变均随经历温度的升高而增大, 在经历温度为 600℃ 时发生突变; ③ 高温导致试件颜色由灰白色变为淡黄色, 断面起伏度降低, 裂隙数量与裂隙类型增加。上述研究成果可以为热作用下地下结构稳定性的研究提供参考。

关键词: 高温; 灰砂岩; 损伤程度; 抗拉强度; 微观结构

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-052

0 引言

砂岩作为一种沉积岩, 是构成煤、石油等储层的主要成分之一, 地热资源开发利用、地下煤炭气化以及核废料处理等均涉及砂岩高温作用问题^[1]。矿井火灾不仅直接威胁工作人员生命安全, 且劣化巷道围岩, 对巷道稳定性产生间接危害。有关温度对砂岩物理力学性质的影响, 国内外学者进行了很多研究。万国香等^[2]对高温后砂岩样品进行了冲击试验, 运用能量加速释放理论揭示了高温后砂岩试样在冲击载荷下临近破坏的能量释放特征。M. Hajpál^[3]分析了高温前后砂岩的纵波波速、成分等物理特性的变化规律。王鹏等^[4]对经过高温作用后的砂岩进行超声波纵波检测, 对砂岩试样接收波进行小波变换, 在时域和频域对其超声特性进行了研究。赵洪宝等^[5]研究了高温前后砂岩试件的均匀性、超声波传播规律及孔隙率变化规律, 发现砂岩经历高温后内部产生损伤, 并建立了超声波与损伤因子的关系。何国梁等^[6]研究发现砂岩在经历高温后内部结构发展, 结构致密性下降, 岩样波速改变与强度变化规律存在明显差异。苏海健等^[7]通过对 25~800℃ 之间 6 种不同温度作用后的砂岩试样分别进行不同加载速率下的单轴压缩试验, 结果表明高温后砂岩的峰值强度和峰值应变具有明显的加载速率效应, 且服从正线性分布, 砂岩的峰值强度及弹性模量均随温度的升高而减小。吴忠等^[8]对煤层顶板砂岩试件在高温下和高温后的力学性质进行试验研究, 揭示砂岩的强度和变形特征随温度的变化规律, 研究发现高温下和高温后的砂岩力学参数变化趋势相似, 但是高温后的力学参数大于高温下的力学参数。吴刚等^[9]详

^{*} 收稿日期: 2016-03-27; 修回日期: 2016-08-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51474121)

通讯作者: 代金秋(1984—), 女, 现为博士研究生, 主要从事矿井通风及安全等方面的研究。Email: lntudaijinqiu@126.com

细分析了加温后砂岩的表观形态、峰值应力、峰值应变、弹性模量、泊松比以及全应力—应变曲线等的变化情况,分析认为温度引起的热应力作用、矿物组分和微结构变化导致砂岩力学性质发生改变与高温劣化。陈腾飞等^[10]通过对经历不同温度的砂岩进行冲击试验,研究发现经历温度不超过 800℃ 时砂岩的峰值应变与动态压缩强度均随温度的升高而升高,超过 800℃ 后动态压缩强度陡然下降。

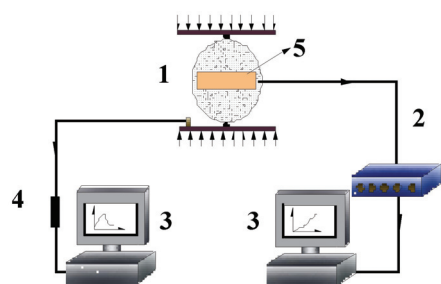
上述研究主要集中于砂岩宏观物理特性和单轴压缩状态下的力学性质与温度的关系,而有关砂岩经历不同温度后的抗拉性能及微观特征却鲜有报道。本文以经历 100℃、200℃、400℃、600℃ 与 800℃ 不同温度水平的灰白色细砂岩圆盘试件为研究对象,通过质量变化率、纵波波速等参量表征试件物理特征变化,采用动态信号测试分析系统记录并分析试件中部侧向应变,结合扫描电子显微镜(SEM)对灰砂岩微观结构进行了分析,研究成果可为热作用下地下建(构)筑物的稳定性及围岩变形特征分析提供参考。

1 试件制备及试验方案

试验用岩样均来源于辽宁阜新阜矿集团五龙矿煤层顶板,试件为灰白色细砂岩,主要成分为石英、方解石、斜长石、白云石等。工作人员于井下开凿大块岩样后立即密封并提升至地面,采用水钻法钻取直径 70mm 的岩芯,同一大型试块密集采样,以减少试样之间的差异。用全自动动岩切割机将岩芯切割为厚度约 35mm 的圆盘体,并静置于 35℃ 的恒温箱中 72h。试件取出后用精度为 $\pm 0.001\text{g}$ 的电子称测量不同温度水平作用前后试件的质量。

巴西劈裂法为国际岩石力学学会及国家行业标准推荐的岩石抗拉强度测试方法^[11-13]。试验采用辽宁省重点实验室 YAW-2000 电液伺服岩石压力试验机等速率加载,加载速率 0.006mm/s。同时试件上下垫条为直径 2mm 的钢丝,符合文献[14]推荐的方法。相同温度圆盘试件进行 5 次平行试验,并去除每组试验中劈裂裂纹明显偏离中心的圆盘试验值。

由弹性理论可知,在巴西劈裂试验中圆盘体中心的压应力为拉应力的 3 倍。但是,岩石作为典型的准脆性材料,抗拉强度远小于抗压强度,圆盘中心的拉应力对试件的破坏起主导作用。因而,圆盘试件的拉伸变形更能代表试件对径压缩状态下的变形特征。为实时监测并记录砂岩圆盘试件在对径压缩状态下的拉伸变形量,试验采用江苏东华测试技术股份有限公司生产的动态信号测试分析系统(DH5923N),最高采样频率 100kHz,输入方式为 DIF-DC。由于圆盘试件中部为拉应力最大的区域,因而将应变片牢固黏贴于试件中部,应变片采用浙江黄岩测试仪器厂生产的型号为 BX120-20AA 的应变片,敏感栅尺寸长 20mm、宽 3mm,敏感系数 $2.08 \pm 0.05\%$ 。试验系统如图 1 所示。



1—试件,2—动态应变仪,3—处理器,
4—岩石压力试验机,5—应变片

图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Experimental system

砂岩由石英、方解石等多种矿物构成,且内部存在大量天然裂隙、孔洞等缺陷,属于典型的成分非均质与结构非均匀材料。岩石经历不同温度作用后将会发生不同程度的热损伤^[4],超声波波速变化规律可以在一定程度上定性说明砂岩试件内部的损伤程度。本文采用成都科瑞达仪器有限公司生产的 NM-4A 非金属超声检测分析仪测试不同温度作用前后砂岩试件的纵波波速,仪器声时读测精度为 $\pm 0.05\mu\text{s}$,接收灵敏度 $\leq 10\mu\text{V}$,幅度读测范围 0~177dB,放大器带宽 5Hz~500kHz。

砂岩圆盘试件进行高温加热时,试件放置在余姚市长江温度仪表厂生产的 SX-2-8-10 型箱式电阻炉中加热,试验温度梯度为 100℃、200℃、400℃、600℃ 与 800℃,待炉膛达到指定温度后恒温 240min,加热结束后试件在炉膛内自然冷却至室温,取出在试验机上进行对径压缩试验,直至试件破坏。利用扫描电子显微镜(SEM)对试件断面观察并采集照片,分析试件微观结构随温度的变化规律。

2 试验结果分析

2.1 物理特征变化分析

试验用灰白色细砂岩经历不同温度水平后颜色会发生改变,图2所示为部分高温作用后的砂岩试件。从图中可以看到,试件颜色随温度的升高逐渐由灰白色转变为淡黄色,颜色变化程度随温度的升高而增大。试验用灰砂岩主要由石英、钠盐以及少量碳酸盐等构成,同时含有少量的有机物。在高温作用下石英将会与钠盐或碳酸盐等发生化学反应,使灰砂岩中的二氧化硅成分减少,同时有机质在高温作用下也会发生分解反应。上述分析表明高温导致灰砂岩内部成分发生变化,伴随相应化学反应发生,最终导致灰砂岩颜色发生变化。

通过对试验用电阻炉炉膛及经历不同温度作用后的试件表面进行观察,并未发现有粉末等固体颗粒脱离现象,因此,高温导致砂岩试件内部的自由水与结合水等水分脱离,有机物分解,是试件质量改变的直接原因。定义试件质量变化率为:

$$n = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \quad (1)$$

式中, m_t 为试件经历高温后的质量; m_0 为试件经历高温前的质量。目前通过纵波波速的变化特征判定混凝土、岩石等非金属材料损伤程度已得到岩土工程界的普遍认可。将试件质量变化率及纵波波速分别均值化处理后得到如图3与图4所示的平均质量变化率及平均纵波波速随温度的变化特征。

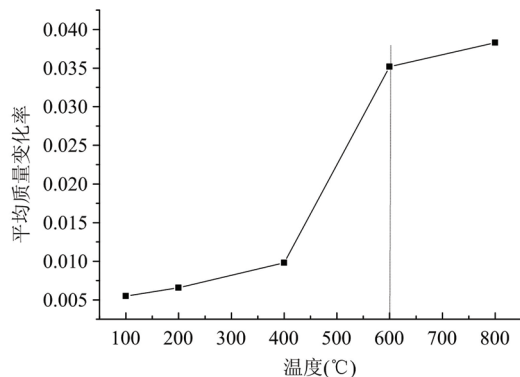


图3 平均质量变化率与温度的关系

Fig. 3 Relationship between rate of average mass change and temperature

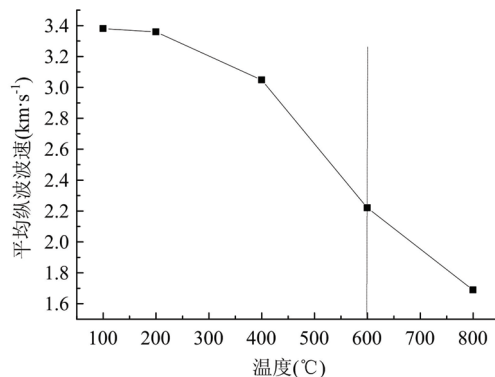


图4 平均纵波波速与温度的关系

Fig. 4 The relationship between average wave velocity and temperature

结合图3与图4可以看到,随着试件经历温度的升高,试件的质量变化率增大,平均纵波波速减小。平均质量变化率与平均纵波变化特征相同,可以近似分为两个阶段:经历温度为100~400℃时变化相对较为缓和,平均质量变化率由0.005496升高至0.009807,增大了0.004311;平均纵波波速由3.38km/s降低至3km/s,减小了11.2%。当经历温度为400~600℃时平均质量变化率及平均纵波发生突变,平均质量变化率由0.009807升高至0.035175,增大了0.025368;平均纵波波速由3km/s降低至2.2km/s,减小了27.2%。基于超声波在固气两相介质中的传播特性可知,随着温度的升高,灰砂岩试件在经历高温作用后内部裂隙或孔隙体积甚至数量均增加,试件损伤程度逐渐增大,当经历温度为600℃时,试验用试件中的裂隙与孔隙进一步发育,同时灰砂岩中的石英发生由 α 石英向 β 石英的晶体转型^[15],导致经历温度为600℃的砂岩试件纵波波速发生突变。

2.2 应力应变分析

在试件对径压缩过程中,岩石压力试验机实时监测并记录压缩变形量与荷载,经 Origin 分析处理后得到砂岩试样的拉应力—压缩变形量曲线(如图 5 所示)。从图 5 中可以看到,不同温度水平作用后的砂岩试样的拉应力—压缩变形量曲线存在较大差异。

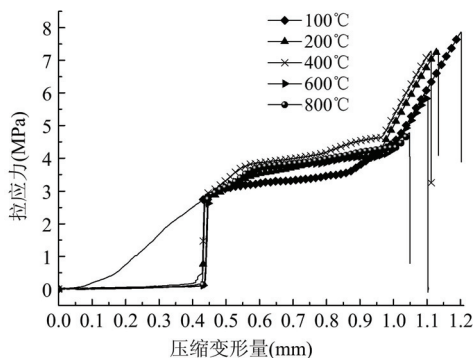


图 5 拉应力—压缩变形量曲线

Fig. 5 Curves of tensile stress-compression deformation

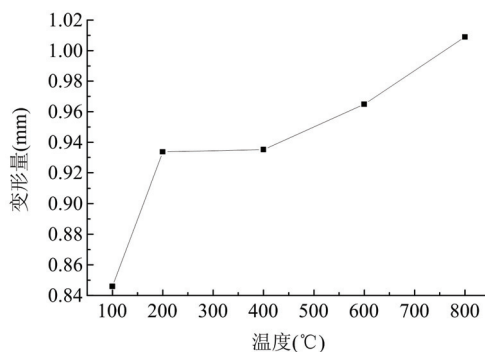


图 6 压密阶段压缩变形量与温度的关系曲线

Fig. 6 Curve of compression deformation in compaction stage-temperature

经历温度为 100℃ 的试件拉应力—压缩变形量曲线大致可以分为压密阶段、弹性变形阶段与峰后跌落阶段,同岩石单轴压缩试验应力—应变曲线特征相比,脆性特征明显。经历温度 200~800℃ 的试件拉应力—压缩变形量曲线特征相似,大致可以分为拉应力突跳阶段、压密阶段、弹性变形阶段以及峰后跌落阶段。经历不同温度水平作用后的试件在拉应力突跳阶段应力突变量非常接近,主要是由加载初期钢丝与试件接触部位的局部变形引起的。

试件的压缩变形量与线弹性变形量随试件经历温度的升高均降低。压密阶段是试件内部裂纹闭合的阶段,从图 6 中可以看到,压密阶段变形量随温度的升高而增大,当经历温度为 400℃ 时小幅增长,经历温度为 600℃ 时出现较大幅度增长,趋势表明随温度的升高,试件的损伤程度增大。

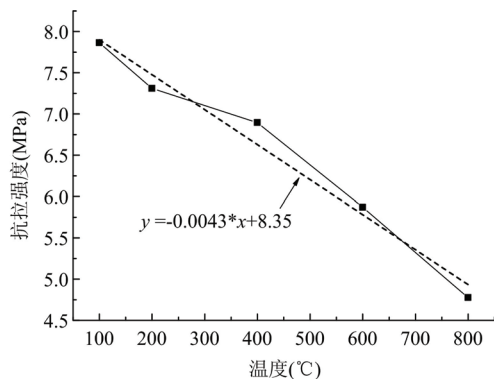


图 7 抗拉强度与温度的关系

Fig. 7 Relationship between peak tensile stress and temperature

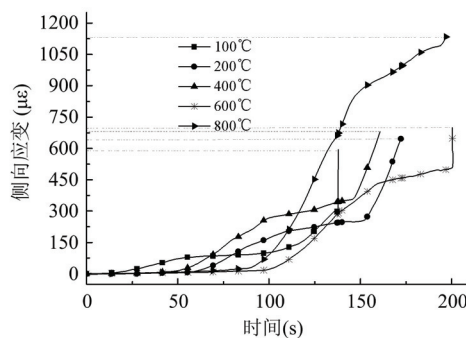


图 8 侧向应变—压缩变形量曲线

Fig. 8 Curve of lateral strain-compression deformation

图 7 所示为经历不同温度的试件抗拉强度均值化处理后得到的试件抗拉强度随温度升高的变化规律。从图中可以看出,随经历温度的升高,试件抗拉强度降低,200~400℃ 试件抗拉强度变化量最小,由 7.31MPa 降至 6.894MPa,仅降低了 5.69%;400~600℃ 试件抗拉强度变化量最大,由 6.894MPa 降至 5.87MPa,降低了 14.9%。抗拉强度随温度升高变化曲线在经历温度为 600℃ 时存在一次较大的突变,说明试件在经历此温度时损伤程度存在一次较大的突变。前人研究成果表明,石英在 573℃ 时将会发生相变,对砂岩纵波波速及力学性能产生影响,使砂岩的力学性质劣化,因而抗拉强度大幅降低^[15]。

砂岩圆盘试件中部侧向应变曲线如图 8 所示,从图中可以看到,圆盘试件中部拉伸变形特征与岩石

蠕变曲线相似,可以近似分为三个阶段:减速(或衰减)变形阶段、等速(或稳定)变形阶段与短暂的加速变形阶段。试件侧向应变等速变形阶段的变形量差异较大,但是侧向应变峰值随温度的升高一直在增大。将不同温度作用下试件的侧向应变峰值均值化后得到峰值侧向应变与温度的关系,如图9所示。从图9可以看到,温度为100~600℃时试件侧向应变峰值随温度的升高缓慢增长,由 $594.2\mu\epsilon$ 增长到 $700.2\mu\epsilon$,增长了17.84%;当温度为800℃时试件侧向应变峰值发生突变,由 $700.2\mu\epsilon$ 增长到 $1134.2\mu\epsilon$,增长了62%。试件侧向应变突变点温度与灰砂岩其余力学性质对应突变点温度不同。

2.3 显微观测结果分析

以经历不同温度水平后的砂岩试样为观测对象,利用扫描电子显微镜(SEM)观察断口表面形貌,得到经历不同温度砂岩试件的SEM形貌图,其中SEM型号为岛津SUPERSCAN SS-550。虽然灰砂岩具有成分非均质与结构非均匀等特征,但是基于对经历不同温度后灰砂岩试件断面形貌的大量观测结果发现,不同温度对于砂岩试件结构特征的影响具有一定的规律性。限于篇幅,分别选取具有代表性的经历温度为200℃与800℃的砂岩圆盘试件碎块SEM断面形貌图进行分析,如图10所示。图10

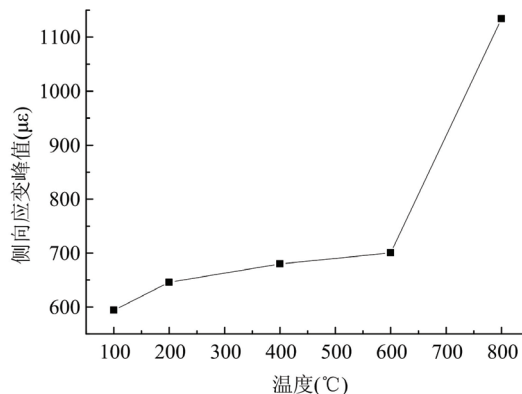


图9 试件侧向应变峰值与温度的关系

Fig. 9 Relationship between peak lateral strain and temperature

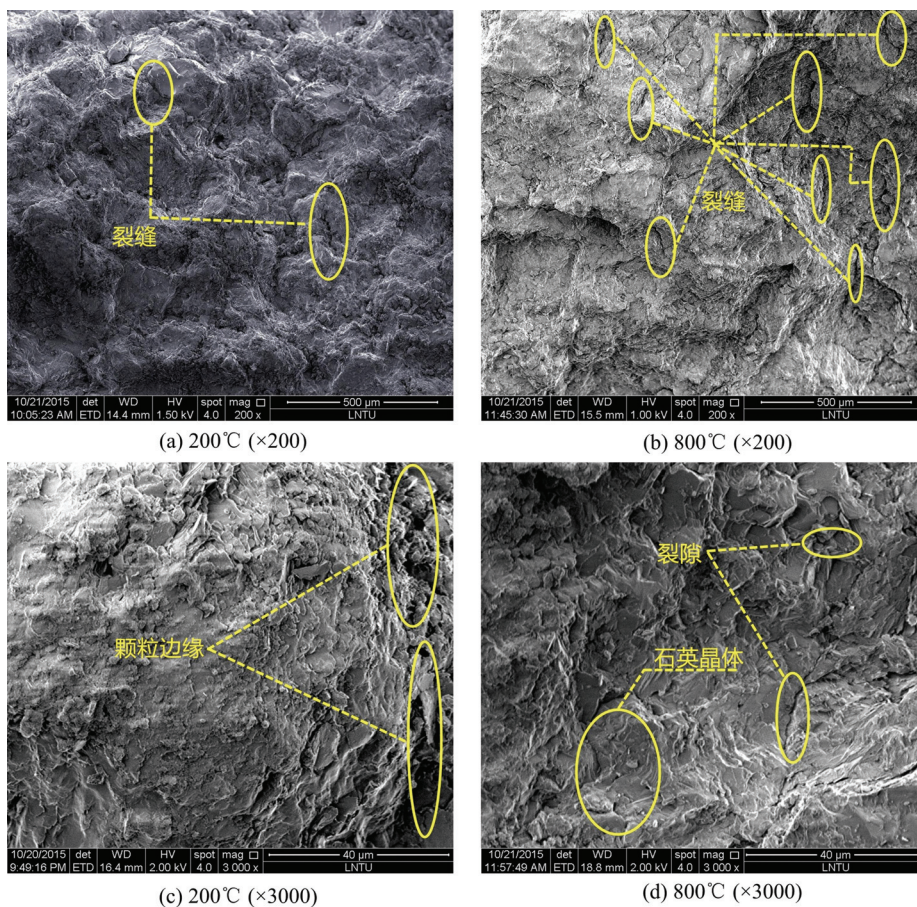


图10 砂岩表面SEM形貌

Fig. 10 SEM images of sandstone

(a)、(c)为经历温度为200℃时的SEM图,断口表面凹凸不平,颗粒特征明显,观测区域内只存在1~2

条裂纹,且仅分布于颗粒接触处。图 10(b)为经历温度 800℃时试件表面 SEM 图,与图 10(a)相比,试件表面相对平整,起伏度较低,颗粒特征并不明显,表明高温导致灰砂岩中矿物颗粒发生了熔融。同时,观测区域内存在多条裂纹(≥ 6 条),可以看到贯通的穿晶裂纹,且裂纹分布不均匀。对比图 10(d)与(b)可以看到,低温时(200℃)砂岩试件断面颗粒特征更明显,断面洁净,而高温时(800℃)表面存在大量半透明状的细小颗粒,表明经历温度为 800℃的试件在对径压缩状态下石英颗粒发生了破碎,试件发生了穿晶破裂。

3 结论

通过对经历不同温度的灰砂岩圆盘试件对径压缩试验,得到以下结论:

(1) 高温导致试验用灰砂岩颜色由灰白色逐步变为淡黄色,质量与纵波波速均随温度的升高而减小,试件损伤程度随温度升高而增大,且在经历温度为 600℃时发生突变。

(2) 灰砂岩的抗拉强度随温度的升高而降低,与温度接近负线性关系,峰值压缩变形量及侧向变形量均随温度的升高而增大,砂岩宏观力学特征在经历温度为 600℃时发生突变,变化趋势与物理性质变化趋势基本一致。

(3) 随温度的升高,砂岩内部裂纹数量增多,断面颗粒特征减弱,起伏度降低,当经历温度为 800℃时试件内部出现穿晶裂纹。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16):2803—2812 (HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):2803—2812(in Chinese))
- [2] 万国香,李夕兵,尹土兵. 高温后砂岩冲击破坏前兆的试验研究[J]. 金属矿山, 2008(7):129—131 (WAN Guoxiang, LI Xibing, YIN Tubin. Experimental research on destruction portent of post-high temperature sandstone[J]. Metal Mine, 2008(7):129—131(in Chinese))
- [3] HAJPÁL M. Changes in sandstone of historical monuments exposed to fire or high temperature[J]. Fire Technology, 2002, 38(4):373—382.
- [4] 王鹏,许金余,刘石,等. 热损伤砂岩力学与超声时频特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9):1897—1904 (WANG Peng, XU Jinyu, LIU Shi, et al. Mechanical properties and ultrasonic time-frequency characteristics of thermally damaged sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9):1897—1904(in Chinese))
- [5] 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(S1):2784—2788 (ZHAO Hongbao, YIN Guangzhi, CHEN Lunjian. Experimental study on effect of temperature on sandstone damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(S1):2784—2788(in Chinese))
- [6] 何国梁,吴刚,黄醒春,等. 砂岩高温前后超声特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4):779—784 (HE Guoliang, WU Gang, HUANG Xingchun, et al. Experimental study on ultrasonic properties of sandstone before and after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4):779—784(in Chinese))
- [7] 苏海健,靖洪文,赵洪辉. 高温后砂岩单轴压缩加载速率效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014(6):1064—1071 (SU Haijian, JING Hongwen, ZHAO Honghui. Experimental investigation on loading rate effect of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(6):1064—1071(in Chinese))
- [8] 吴忠,秦本东,谌伦建,等. 煤层顶板砂岩高温状态下力学特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11):1863—1867 (WU Zhong, QIN Bendong, CHEN Lunjian, et al. Experimental study on mechanical character of sandstone of the upper plank of coal bed under high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11):1863—1867(in Chinese))
- [9] 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 (WU Gang, XING Aiguo, ZHANG Lei. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures[J]. Chinese Journal

- of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10):2110—2116(in Chinese))
- [10] 陈腾飞, 许金余, 刘石, 等. 经历不同高温后砂岩的动态力学特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2):195—201 (CHEN Tengfei, XU Jinyu, LIU Shi, et al. Experimental study on dynamical damage properties of post-high-temperature sandstone[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(2):195—201(in Chinese))
- [11] Bieniawski Z T, Hawkes I. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(1):99—103.
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 水利水电出版社, 2001 (The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264—2001 specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001(in Chinese))
- [13] 苏承东, 张盛, 唐旭. 砂岩巴西劈裂疲劳破坏过程中变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1):41—48 (SU Chengdong, ZHANG Sheng, TANG Xu. Experimental research on deformation and strength characteristics in process of Brazilian split fatigue failure of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1):41—48 (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T23561—2009 煤和岩石物理力学性质测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009 (The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T23561—2009 methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese))
- [15] Kern H. The effect of high temperature and high confining pressure on compressional wave velocities in quartz-bearing and quartz-free igneous and metamorphic rocks[J]. Tectonophysics, 1978, 44:185—203.

Experimental Investigation on the Effect of Temperature on Physical Characteristics and Tensile Strength of Grey Sandstone

DAI Jin-qiu¹, SU Zhong-jie¹, ZHAO Ming-chao²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Liaoning Xinda Detection Co. LTD., Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to investigate the effect of temperature on physical characteristics and tensile strength of grey sandstone, radial compression experiment for gray sandstone disk specimen subjected to different high temperatures was carried out. Combined with dynamic signal testing and analysis system, the lateral strain in specimen's middle part was real-time monitored and recorded. By using non-metallic ultrasonic detecting instrument, SEM and other means, longitudinal wave velocity, microstructure characteristics of grey sandstone subjected to different high temperatures were characterized. Experimental results show that ① High temperature results in the longitudinal wave velocity and mass of grey sandstone decrease by 50.03% and 3.83% respectively, along with the rise of temperature, the damage degree of grey sandstone increases, meanwhile, both longitudinal wave velocity and mass change abruptly at temperature of 600℃. ②The tensile strength of grey sandstone decreases along with the increase of temperature, which approximately presents negative linear distribution; with the increase of temperature, peak compression deformation and peak lateral strain decrease, and both change abruptly at temperature of 600℃. ③High temperature results in sandstone color changes from gray white to light yellow, the waviness of cross section decreases, but the amount of crack and crack type increase with the temperature rising. Above results may provide reference for stability analysis of underground structure subjected to high temperature action.

Keywords: high temperature; grey sandstone; damage degree; tensile strength; microscopic structure