

烧变后粗砂岩抗拉特性试验研究

赵洪宝^{1,2}, 尹光志^{1,2}, 李小双^{1,2}

(1.重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400030; 2.重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: 对 40 块粗砂岩试件高温后的密度、纵波波速和抗拉强度变化规律进行了试验研究。结果表明, 高温后粗砂岩的密度随试验温度的升高减小幅度很小, 几乎可忽略不计; 高温后试件中纵波波速的传播随温度升高基本呈线性降低, 而减小率呈二次曲线规律变化; 存在一个温度点 R , 使高温后试件的抗拉强度呈开口向下抛物线关系变化, 且在 R 温度作用后试件抗拉强度达到最大; 当试验温度大于 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 试件的抗拉强度变得很小, 且当温度升高时变化幅度也很小。高温后纵波波速与抗拉强度关系复合 2 次曲线关系。

关 键 词: 粗砂岩; 高温; 纵波波速; 抗拉强度

中图分类号: TU 332

文献标识码: A

Experimental study of characteristics of tensile burned gritstone

ZHAO Hong-bao^{1,2}, YIN Guang-zhi^{1,2}, LI Xiao-shuang^{1,2}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing Univ., Chongqing 400044, China;

2.Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Eng. Min. of Edu. Chongqing 400044, China)

Abstract: All of the variational law of density, longitudinal wave velocity and tensile strength of gritstone after high temperature are studied. The results show that the density of gritstone is decreased gradually as the temperature increasing; so that it can be ignored; the longitudinal wave velocity is linearly decreased when the temperature increasing, and decrease rate of it follows the law of conic; R is one temperature point, which makes the law of tensile strength of gritstone after high temperature follows the law of parabola; and the maximal tensile strength appears when the operative temperature is R . After the temperature is higher than $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, tensile strength is small and change range is small when the temperature is increased. Relation between longitudinal wave velocity and uniaxial tensile strength is quadratic curve after high temperature.

Key words: gritstone; high temperature; longitudinal wave velocity; tensile strength

1 引 言

温度是影响岩体力学性质的一个重要因素。在很多情况下, 岩体可能遭受高温作用, 如煤炭地下气化炉围岩、地下核废料的储存空间围岩、火灾过程中的地下岩体工程等。而遭受高温作用后, 岩体的物理力学性质和参数将发生显著变化, 如强度降低、弹性模量减小^[1-3]等。物理力学参数的改变, 可能导致岩石工程在高温作用后发生破坏和灾难性事故。因此, 研究高温后的岩石力学性质变化规律逐渐成为科研工作者工作的新热点。

国内外广大学者已对岩石在不同温压状态下的力学性质进行了大量的研究, 并取得了一定成果,

但多集中在花岗岩、大理岩等岩石高温后的弹性波传播规律、抗压强度的试验研究等方面^[4-5], 如王颖轶^[1]等得出了大理岩高温过程中全应力-应变曲线, 杜守继^[2]等对花岗岩高温过程中的超声波传播规律进行了系统的研究, 谌伦建^[6]等对砂岩高温中的力学性质和超声波传播规律进行了研究, 并对砂岩试件在高温下物质组成变化影响进行了研究, 许锡昌^[7]等对高温下花岗岩的基本力学性质进行了研究。但对于粗砂岩高温后的性质变化和抗拉性质研究涉及较少。而高温后即使岩石工程受到微小的拉伸作用, 也将发生坍塌和其他形式的破坏。因此, 研究高温后岩石的拉伸强度变化具有一定实际意义。本文以平顶山煤业集团某矿煤层顶板粗砂岩为

研究对象, 对其遭受不同温度后抗拉强度的变化规律进行了试验研究, 其研究成果可以为火灾后岩石工程的稳定性维护提供借鉴。

2 试件制备及试验方案

2.1 试件制备

试验的岩样为取自平顶山煤业集团某矿的煤层顶板同一位置处的粗砂岩。根据煤矿现场资料, 该砂岩矿物组成成分主要为长石和石英, 石英含量约为 75%, 含有少许黑白云母碎屑, 石英颗粒排列不规则, 并且磨圆度较差, 颗粒粒度较大, 颜色呈灰色。

实验室采用水钻法钻岩取芯, 经切割、削磨制成尺寸为 $\phi=50\text{ mm}$ 、 $h=100\text{ mm}$ 的岩石标准试件 40 块, 其规格符合国际岩石力学学会标准。

2.2 试验装置及试验过程

本文主要研究内容包括高温后岩石密度、超声波速、岩石抗拉强度变化规律。高温前, 精确测量每个试件的几何参数和质量, 得到常温下试件的干密度作为粗砂岩的平均密度; 然后进行超声波检测, 得到常温下粗砂岩试件的平均纵波波速; 而后将试件分为 9 组, 利用马沸炉从 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间每隔 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一温度水平对试件进行高温加热, 以模拟岩石遭受到的不同温度水平的高温作用。其操作过程是: 首先把试件放入马沸炉, 然后以 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速度进行升温, 直至试验温度水平, 恒温 5 h, 最后关闭马沸炉电源, 使试件在炉中自然冷却至常温, 这样做的目的是防止温度突然改变使粗砂岩性质产生影响。然后进行超声波检测, 最后利用中国科学院武汉岩土力学研究所设计研制的 RMT-150B 伺服试验机进行巴西劈裂试验。

3 试验结果及分析

3.1 高温后砂岩密度变化规律

高温作用后, 岩石试件的几何尺寸可能发生变化。因此, 需再次测量试件的几何尺寸和质量, 以求得每组试件高温后的密度。

粗砂岩的密度计算公式为

$$\rho_1 = \frac{m_1}{\frac{1}{4}\pi D^2 h}, \rho_2 = \frac{m_2}{\frac{1}{4}\pi D_2^2 h_2}, v = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \quad (1)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 分别为高温前、后的试件密度 (g/cm^3); v 为高温后试件密度减少率; m_1 、 m_2 分别为高温前、后试件质量 (g); D 、 D_2 分别为高温前、后试件半径 (cm); h 、 h_2 分别为高温前、后试件的高度 (cm)。

根据式 (1) 和试验数据, 可得到高温作用后粗砂岩的密度随试验温度变化的规律, 如图 1 所示。

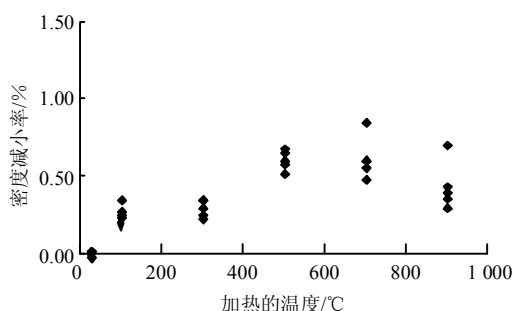


图 1 高温后粗砂岩试件密度散点分布图

Fig.1 Dispersal-plots-distribution of gritstone's density after high temperature

由图可知, 随着温度的升高, 粗砂岩冷却后的密度减小率呈上升趋势, 亦即遭受的温度越高, 砂岩密度的减小越大, 可能的原因是粗砂岩含有的长石和云母在较高温度作用下发生了分解反应, 造成试件质量下降; 几何尺寸的测量表明, 高温作用后, 试件在高温过程中发生的热膨胀不会完全消失, 几何尺寸的增加也是试件密度减小的原因之一。而密度减小率总体上是微小的, 说明试件在高温作用的过程中物质组成没有发生大的变化。就每一温度水平的试验来看, 粗砂岩试件的密度减小率均在 0.6% 左右, 高温前、后此密度变化率很小, 几乎可以忽略不计。另外, 同一温度水平密度减小还具有一定的离散性, 这可能是由于试件本身的离散性造成的。

3.2 高温后砂岩超声波速试验

超声波检测技术是进行岩土工程试验研究常用的方法之一, 它可以用来研究岩土体内部孔隙结构的变化情况。当试件受到高温作用后, 其内部的孔隙结构及数量必然也发生变化, 且在高温后这些变化仍有部分可恢复, 这可能是造成高温后岩石力学性质发生劣化的主要原因。本文采用科峰电子仪器厂生产的 UTA2001A 型超声检测仪对各试验温度水平的试件高温后的超声波纵波传播速度进行了测试研究。

经试验研究得到如下纵波波速随温度升高而变化的曲线, 如图 2 所示。

由图可知, 随着温度的升高, 试件内的纵波波速逐渐减小, 基本呈线性, 这说明温度对试件冷却后的遗留影响增加程度基本是一致的。造成试件内纵波波速减小的主要原因可能是试件内部的孔隙在

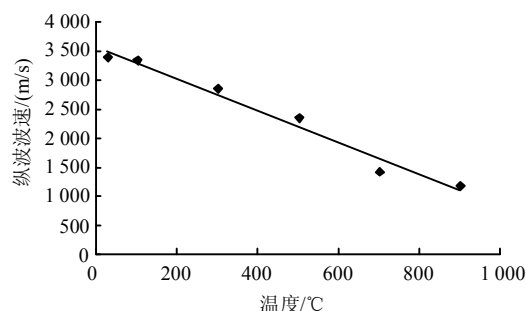


图2 试件纵波波速与温度关系曲线

Fig.2 Relationship between gritstone's longitudinal wave velocity and temperature

温度作用下发生了膨胀, 即使冷却至常温这种温度影响仍然部分保留, 致使试件内孔隙率增加, 纵波波速减小; 同时, 高温过程中试件内部物质组成发生的微小变化对此变化规律也有一定影响。另外, 前期对岩石热膨胀力进行试验研究时, 发现试件在加热过程中有明显的热应变发生, 而高温后的孔隙率测试研究也发现冷却至室温的岩石试件较未经温度作用的试件孔隙率明显增加, 这说明高温后的试件内部的孔隙结构发生了较大变化。根据最小二乘法原理, 对试验曲线进行拟合得到纵波波速与试验温度的关系方程为

$$V = -2.735 \cdot 5T + 3\,566.5 \quad R^2 = 0.978\,3 \quad (2)$$

通过对试验数据的分析, 本文得到温度变化对粗砂岩试件超声波纵波波速影响的规律曲线, 如图3所示。

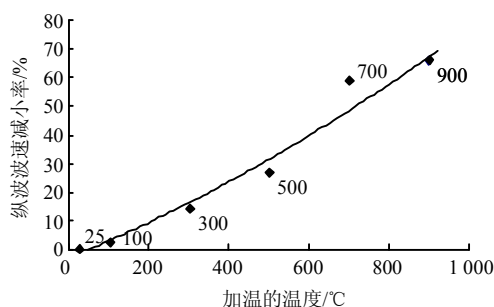


图3 试件纵波波速减小率与温度的关系曲线

Fig.3 Relationship between the slip of gritstone's longitudinal wave velocity and temperature after the action of high temperature

由图可知, 粗砂岩试件在每个试验温度水平之间纵波波速的变化幅度基本一致, 这说明导致温度对该种粗砂岩高温后产生影响的主要因素比较简单, 可能仅有孔隙结构的变化和微小物质组成两个

方面。通过最小二乘法拟合, 得到纵波波速减小率与试验温度的拟合方程为

$$V_{\text{减小率}} = 2E - 05T^2 - 3.884 \quad R^2 = 0.978 \quad (3)$$

由拟合方程可见, 该粗砂岩纵波波速减小率与温度的关系为2次非线性关系。

3.3 高温后砂岩抗拉强度试验

在很多岩石工程中, 岩石都可能受到拉伸作用, 而高温后岩石的抗拉强度也会发生变化, 笔者利用上述试验过程中的同批试件, 在中国科学院武汉岩土力学研究所设计制造的RMT-150B伺服试验机上进行了高温后粗砂岩抗拉强度试验研究, 试验方法为常用的巴西劈裂法。

根据对试验数据的分析, 得到了粗砂岩试件单轴抗拉强度与试验温度的关系曲线, 如图4所示。

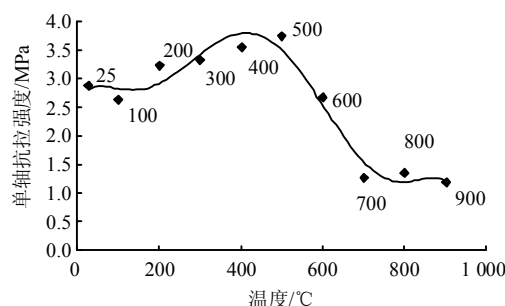


图4 粗砂岩试件单轴抗拉强与温度关系拟合曲线图

Fig.4 Fitting curve of the relationship between gritstone's uniaxial tensile strength and temperature

由图可知, 粗砂岩高温后抗拉强度随温度水平的变化规律较复杂, 且存在一温度 R 使粗砂岩的抗拉强度发生突变的温度点, R 介于 $400\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 此区间正是石英晶体发生晶形转变的温度区间。低于此温度点 R 时, 温度与单轴抗拉强度之间呈单调递增抛物线关系, 即随着温度的升高, 粗砂岩试件的抗拉强度单调增加; 但试验温度介于 $R \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度与单轴抗拉强度之间呈一段单调递减抛物线关系; 当试验温度超过 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 砂岩的抗拉强度很小, 原因是在此高温作用后, 试件已基本破碎。

造成试件抗拉强度如此变化的原因很多, 可能包括温度作用过程中孔隙膨胀造成的影响、加热过程中热应力对试件结构的破坏产生的影响、组成矿物颗粒的不均衡膨胀对试件产生的影响、石英晶体在某一温度发生晶形转变影响等因素。在这些因素综合作用下, 因而导致砂岩的抗拉强度高温后变化规律非常复杂。而超声波纵波检测结果和前面进行

的热膨胀应力测试研究也说明温度作用对试件内孔隙结构产生的影响是其抗拉强度降低的主要因素。

4 纵波波速与抗拉强度的关系

众所周知,材料的纵波波速和材料的力学性质存在一定联系。对于同一材料,纵波波速与抗拉强度的关系可写为

$$\sigma_r = aV_p^b \quad (4)$$

式中: σ_r 为抗拉强度, (MPa); V_p 为纵波波速, (m/s); a , b 为常数。

当岩石受温度作用时,温度对岩石产生一定的损伤作用,从而降低纵波波速、改变岩石抗拉强度,因此,可将上式修正为

$$\sigma_r = a(V_p + c)^b \quad (5)$$

式中: c 为纵波波速修正值; b 值可以确定为 2。而 a , c 的值则会根据岩石性质的不同而不同。

根据试验所得数据进行整理,得到如图 5 所示的纵波波速与抗拉强度关系曲线。

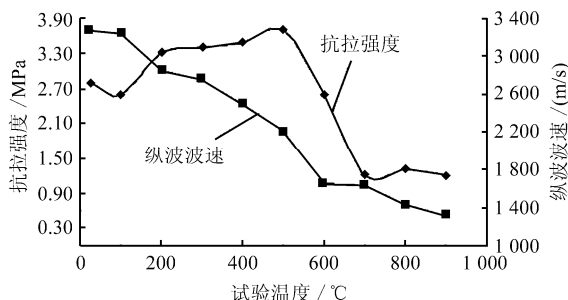


图 5 高温后纵波波速与抗拉强度关系
Fig.5 Relation between longitudinal wave velocity and uniaxial tensile strength after high temperature

从图中可以看出,纵波波速与抗拉强度的关系基本符合 2 次曲线关系。对曲线进行最小二乘法处理,得到纵波波速与抗拉强度的关系式为

$$\sigma_r = (-2e-6)V_p^2 + 0.009V_p - 7.45 \quad (6)$$

5 结 论

通过对粗砂岩试件高温后密度测试、超声波纵波波速测试及单轴抗拉强度测试研究,得到如下结论:

(1) 高温后粗砂岩试件的平均密度变化较小,在 0.6% 左右。说明低于 900 °C 的温度作用基本没有改变砂岩的主要矿物组成。

(2) 高温后粗砂岩的纵波波速随试验温度的升高呈单调减小趋势,其规律线性关系以式 (2) 表达;而其减小率则为 2 次曲线可以式 (3) 表示。

(3) 高温后,砂岩试件的抗拉强度变化复杂,且存在一温度点 R (介于 400 °C ~ 500 °C),当温度低于 R 时,抗拉强度随温度升高呈单调增加趋势的抛物线型;当温度介于 $R \sim 700$ °C 时,抗拉强度随温度升高呈单调减趋势的抛物线型;温度超过 700 °C 后,试件抗拉强度急剧减小,维持在一个较小的残余值附近。

(4) 造成高温后砂岩试件抗拉强度变化的原因较复杂,其中温度对高温后试件内部孔隙结构产生的影响为其主要因素。

(5) 高温后纵波波速与抗拉强度的关系可用 2 次曲线表示,即抗拉强度与纵波波速关系可写为式 (5) 的形式 (式中 $b=2$)。

参 考 文 献

- [1] 王颖轶, 黄醒春. 高温作用下大理岩应力应变全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 3(21): 2345—2349.
WANG Ying-yi, HUANG Xing-chun. Experimental study on whole stress-strain course of marble under the action of high temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 3(21): 2345—2349.
- [2] 杜守继, 刘华, 职洪涛, 等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2359—2364.
DU Shou-ji, LIU hua, Zhi Hong-tao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2359—2364.
- [3] 吴忠, 秦本东, 谌伦建, 等. 煤层顶板砂岩高温状态力学特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1863—1867.
WU Zhong, Qin ben-dong, Chen Lun-jian, et al. Experimental study on mechanical character of sandstone the upper plank of coal bed under high temperature[J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2005, 24(11): 1863—1867.
- [4] 张晶瑶, 金校元. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. 东北大学学报, 1996, 17(1): 5—9.
ZHANG Jing-yao, JIN Jiao-yuan. On rock structure under high temperature[J]. *Journal of Northeastern University*, 1996, 17(1): 5—9.

- [5] 秦本东, 谌伦建, 罗运军, 等. 煤层顶板砂岩高温下超声传播特征分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(1): 42—44.
QIN Ben-dong, CHEN Lun-jian, LUO Yun-jun, et al. Experimental research on character of ultrasonic wave spreading in sandstone on upper plank of coal bed at high temperature[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2006, 25(1): 42—44.
- [6] 谌伦建, 赵洪宝, 顾海涛, 等. 煤层顶板砂岩在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 and Technology**, 2005, 34(4): 443—446.
- [7] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质研究[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]. **China Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22 (3): 332—335.
- [8] 孟召平, 李明生, 陆鹏庆, 等. 深部温度、压力条件及其对砂岩力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1177—1181.
MENG Zhao-ping, LI Ming-sheng, LU Peng-qing, et al. Temperature and pressure under deep conditions and their influences on mechanical properties of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1177—1181.