

文章编号:1001-4888(2021)01-0105-09

高温对砂岩宏细观损伤及 BP 神经网络 单轴强度预测研究^{*}

秦楠, 葛强, 梁忠豪, 孙嘉彬, 王永岩

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东青岛 266061)

摘要: 为了研究高温后砂岩的力学特性和宏细观损伤变化,对高温作用后的砂岩进行单轴压缩试验、声波损伤检测、X射线衍射试验、扫描电镜试验,分析应力—应变曲线、峰值应力、峰值应变、弹性模量、质量损失率、X射线衍射成像和电镜扫描图像,得到砂岩的细观损伤变化对其单轴抗压强度的影响。利用BP神经网络模型对不同物理量进行训练,预测不同高温作用后砂岩单轴抗压强度。研究表明:随着温度升高,砂岩峰值应力和弹性模量均降低,峰值应变、质量损失率和体积均增大,砂岩的外观颜色由黄色过渡到棕红色直至呈土灰色;微缺陷(微裂隙和孔洞)的发育明显,晶体结构破坏加剧,内部生成CaO和CO₂,孔隙率、热损伤程度增大,声速减小,强度降低。建立BP神经网络模型,利用文献数据验证模型可行性,模型预测值与试验值最大误差8.25%,可靠度较高。

关键词: 砂岩; 温度; 单轴抗压强度; BP神经网络

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-049

0 引言

高温作用后岩石热损伤、成因机制和强度预测问题是岩石力学中的难题,尤其是在地热资源开发、矿山瓦斯爆炸、岩石工程火灾后重建和高放射性核废料处置库的建设上,工程岩体受到高温作用,矿物发生了多晶转变,其成分和物理力学参数发生变化,会影响工程安全稳定。国内外学者针对以上问题在强度理论、高温作用后岩石细观机制变化以及强度预测方面进行了大量研究,并得出一些有价值的结论。秦严^[1]研究了高温对花岗岩物理性质、抗压强度、峰值应变、弹性模量、黏聚力、内摩擦角的影响规律。李杰林等^[2]研究了孔隙度和谱面积与峰值强度之间的关系,并将岩石核磁共振成像与力学破坏性质进行关联分析,发现孔隙的发育程度对岩石的力学损伤有重要影响。吴刚等^[3]研究发现温度引起的热应力、矿物组分和微结构变化导致砂岩力学性质发生了改变。Brotons等^[4]研究了钙质岩的物理力学性质与温度的关系,当温度升高时,单轴抗压强度、弹性模量和泊松比均表现为逐渐减小趋势。陈耕野等^[5]进行了岩石压缩过程应力—应变—磁感强度效应的试验研究,发现岩石裂隙变化能够引起磁感强度的改变,应力、应变、磁强存在一一对应的数值关系。徐小丽等^[6]通过试验得出高温作用后花岗岩的孔隙率随温度上升而增大,强度随温度升高而减小。左建平^[7]通过扫描电镜试验,研究温度—拉应力共同作用下砂岩破坏的断口形貌,证实了热损伤对岩石断裂的微观机制影响较大。谢卫红等^[8]利用

^{*} 收稿日期: 2020-03-11; 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51674149); 山东省自然科学基金(ZR2018PEE005); 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放研究基金(JYBSYS2018204); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金(SKLCRSM19KF015); 矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放研究基金(MDPC201915); 青岛科技大学博士科研启动金(210-010022667)

通信作者: 秦楠(1987—),男,讲师,主要从事工程材料力学行为研究与预测、岩石强度理论。Email: qinnan_qust@126.com

高温疲劳试验机和扫描电镜,得到了在不同载荷和温度作用下岩石中微裂纹萌生、扩展、断裂破坏等各个阶段的 SEM 图像和数据。陈昌彦等^[9]以大量工程实例为训练模型基础,提出了一种可以预测边坡岩体稳定性的人工神经网络法。张传栋等^[10]研究了 BP 神经网络模型隐含层节点数对模型精度的影响,采用最佳优化模型对数值进行预测,其预测平均相对误差仅为 4.25%。

目前,有关高温下和高温后岩石的力学特性和细观分析研究较多,但研究温度梯度少,温度区间短;微细观结构变化和岩石力学特性联系较少;BP 神经网络样本数据考虑因素单一,且容量较少,影响预测数值的准确性。因此,本文对多个高温梯度作用下的砂岩进行了单轴压缩试验、声波损伤检测、X 射线衍射试验和扫描电镜试验,分析了温度对砂岩强度特性、宏观物理量、细观组分变化的影响;并利用 BP 神经网络模型对已获得数据进行训练,建立环境变量、宏细观参数与砂岩强度联系,预测不同高温作用后砂岩峰值强度。

1 试验材料与方法

研究对象是颗粒细腻、质地较软的伊斯米黄砂岩,试样高 100mm,直径 50mm。将砂岩试样分为 8 组,每组 5 个,其中 1 组试样保持室温(25℃),另外 7 组试样按照 200℃至 800℃不同温度处理,温度梯度设为 100℃。岩样放入马弗炉,以 5℃/min 的加热速率升温至设定温度,恒温 1h,使其受热均匀。取出试件空冷,待恢复到室温再进行单轴压缩试验。由所得数据可找出对砂岩强度影响较大的温度敏感区,将其细化继续试验,温度梯度设为 10℃。将压缩后的岩块按照 X 射线衍射和扫描电镜试验要求处理,分别进行成分定性分析和微观形貌检测。每组剩余岩样进行孔隙率、导热系数和声波损伤检测,对比高温前后试样的损伤情况,试验流程如图 1 所示。



图 1 试验流程图

Fig. 1 Flow-process diagram

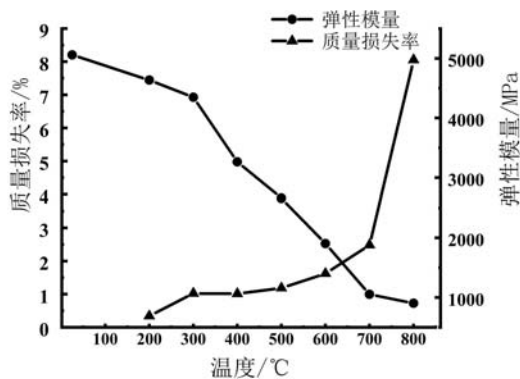


图 2 弹性模量和质量损失率
随温度变化曲线

Fig. 2 Curve of elastic modulus and mass
loss rate with temperature

2 砂岩宏观物理性质变化分析

测量和统计高温作用前后的砂岩质量得到质量损失率 Δm , 计算公式为

$$\Delta m = \frac{m_a - m_b}{m_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Δm 是质量损失率; m_a 、 m_b 是高温作用前、后试件的质量。

如图 2 所示,随着温度升高,砂岩的质量损失率逐渐增大,曲线分为 2 个阶段:(1) 200℃~600℃之间,质量损失率增长缓慢,200℃质量损失率为 0.34%,600℃质量损失率为 1.6%,质量损失率增幅为 1.26%。(2) 600℃~800℃之间,质量损失率增长迅速,从 1.6%迅速增长到 8.05%。

其中,700℃~800℃区间尤为明显,此阶段的增长值是第一阶段增长值的 4.3 倍。造成这种情况的原因是:砂岩微孔隙含有水,随着温度升高,水分蒸发,造成了砂岩质量损失率变小。伴随着 CaCO_3 受热分解,生成 CaO 和 CO_2 。水蒸发与 CO_2 的生成造成了砂岩内部孔隙气压受热膨胀,促进了微裂纹的产生和扩展,水与 CO_2 更容易逸出岩样,最终导致质量损失率迅速增加。

砂岩的弹性模量随温度的升高而降低^[11,12],变化规律大致分为3个阶段:(1)常温至300℃,该阶段曲线变化缓慢,弹性模量降低约14%。(2)300℃~700℃,该阶段弹性模量的下降趋势明显,从4349.36 MPa降到1053.87 MPa,降幅达75.7%,说明砂岩受到高温作用刚度减弱,胶结能力下降。图3是用线性方程拟合的弹性模量,相关系数 $R^2=0.9902$ 。(3)700℃~800℃,该阶段与第二段相比曲线下降幅度不大,800℃时弹性模量降到905.01 MPa,且与第一阶段曲线近似平行。之所以下降幅度减少,原因是砂岩经历了前两个阶段的高温作用,砂岩组构已发生本质变化,呈现松、散、软、弱状态,与软岩描述性定义有相似之处。体现在从高温炉取出时,砂岩很容易被夹破,且放置在空气中冷却,砂岩表面也会有脱皮掉块现象。

高温后砂岩表征颜色会有所不同,如图4所示。岩石外观颜色主要由所含矿物决定,高温会造成矿物组分和结构的变化,人眼看到的颜色是岩石内多种矿物的综合反映。600℃之前,随着温度升高,砂岩颜色由黄色变棕红色^[13]。600℃~800℃,砂岩逐渐呈现深灰色,可以通过颜色的变化推断加热温度(注:颜色可到编辑部网站查看电子版)。

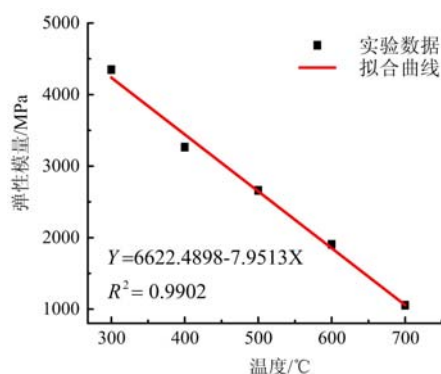


图3 300℃~700℃的拟合弹性模量曲线

Fig. 3 Fit elastic modulus curve of 300℃~700℃

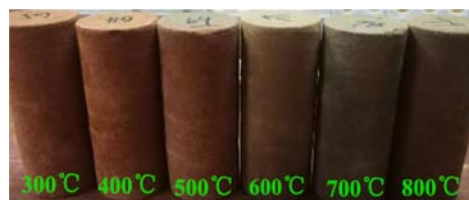


图4 300℃~800℃试件颜色

Fig. 4 Specimen color of 300℃~800℃

3 砂岩细观热损伤分析

3.1 声波损伤检测

图5为KON-NM-4B非金属超声检测分析仪测得的砂岩试样的声速^[14]变化曲线,曲线分为两个阶段:(1)25℃~500℃,声速从3.109 km/s降到500℃时的1.435 km/s,降幅为53.8%,声速曲线近似呈线性下降。(2)500℃~800℃,声速曲线在该阶段比上阶段平缓,800℃时声速为1.039 km/s,与700℃时相比数值下降27.6%。到达800℃,砂岩试件水分基本丧失,而且砂岩产生化学反应生成了CO₂,势必造成内部微孔隙和孔洞的增多,原有的固态结构转变为固气状态,且成颗粒剥离状态,仅靠较小的黏聚力维持。一般情况下,声速传播速度是固态>液态>气态,很明显,微孔隙增多和颗粒剥离状态已使固态结构变化,声速下降。温度达到800℃时,砂岩组构已经基本稳定,故声速趋于平稳。

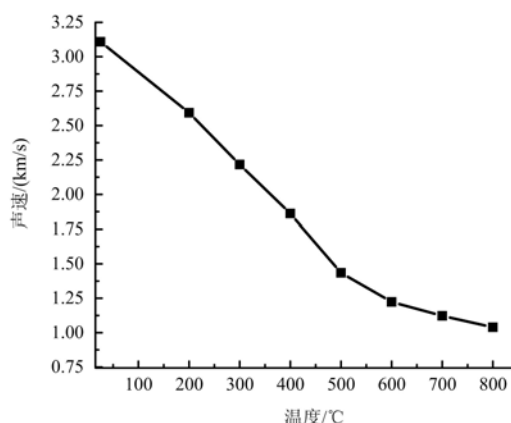


图5 温度—声速曲线

Fig. 5 Temperature-acoustic velocity curve

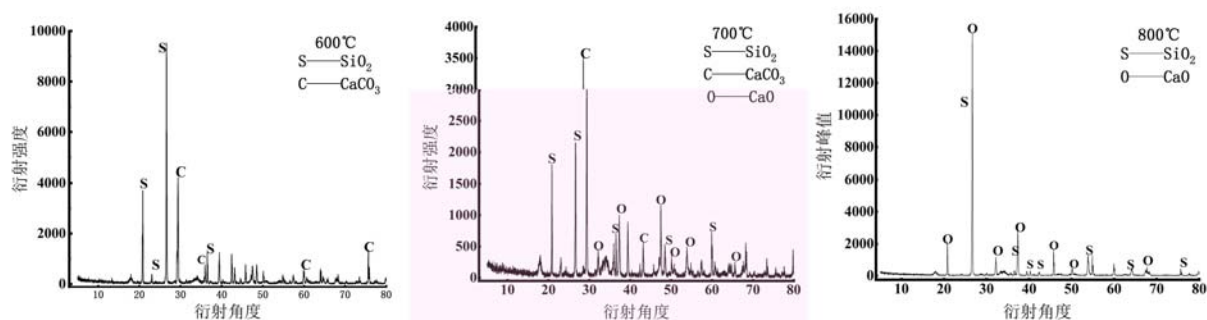


图 6 600℃~800℃试件衍射分析图

Fig. 6 Diffraction analysis diagram of specimen at 600℃~800℃

3.2 X 射线衍射试验

图 6 为试件衍射分析图,200℃~600℃砂岩试样的主要成分没有变化,表明矿物成分在 600℃前是稳定的,主要成分是 SiO_2 与 CaCO_3 。试验超过 600℃时, CaCO_3 和 SiO_2 由于热力作用导致其衍射强度大幅度下降,伴随有新物质 CaO 生成;在 $26^\circ\sim 28^\circ$ 衍射角范围内 SiO_2 的衍射峰值由 9000~10000 降到 2250;在 $28^\circ\sim 30^\circ$ 衍射角范围内 CaCO_3 的衍射峰值由 4000~5000 降到 3750。温度达 800℃时,X 射线衍射试验检测不到 CaCO_3 。高温导致试样矿物成分、分子晶体结构^[15]发生变化,在 600℃~700℃敏感区间内砂岩单轴抗压强度下降较快,此区间砂岩的成分主要有 SiO_2 、 CaCO_3 以及 CaO 和 CO_2 ,其化学方程式为

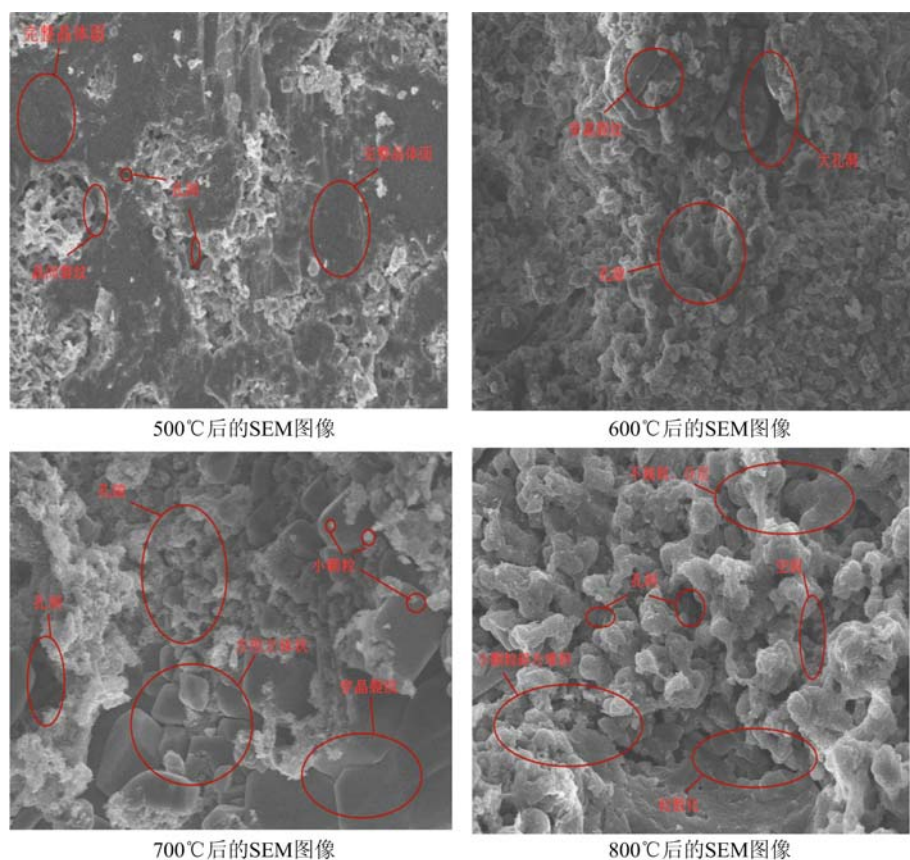


图 7 600℃~800℃试件 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of 600℃~800℃

3.3 扫描电镜试验

图 7 是 4 种温度作用后的 SEM 图像,500℃时砂岩整体结构紧密,晶体周围有孔隙分布,存在少量

大孔洞。内部晶体结构完整,伴有沿晶裂纹,未见穿晶裂纹的发育,平整光滑,没有分层和堆积现象发生。600℃时砂岩试样孔隙明显增多,内部空洞增大,结构大致呈现凹凸状,晶体结构损伤,穿晶裂纹出现。700℃时砂岩晶体大颗粒粒径减小,颗粒形状呈现方形立体状,颗粒间联结薄弱且胶结物减少;结构松散化,微裂纹、空洞增大增多,表面粗糙度增大,局部呈絮状。800℃时小颗粒碎片出现堆积,表现出不规则排列和分层现象,该温度下试样表面空洞数量增多,面积增大,结构表面出现众多的孔隙,空隙的累积造成大空洞的形成。结构变得更加稀疏松散,表面粗糙度加重,节理面软化,最终导致砂岩强度较低。

4 砂岩单轴压缩试验和分析

图8为不同高温作用后砂岩的单轴压缩应力—应变曲线,随着温度升高,砂岩单轴抗压强度减小,弹性模量降低,峰值应变增大,脆延转化现象明显。在达到强度极限前非弹性变形增加很快,反映其抗变形能力迅速下降,在达到强度极限后,有出现屈服流动趋势。呈脆性破坏^[16]的试件单轴抗压强度相对较高,温度升高后破坏形式由脆性破坏向塑性破坏转变。

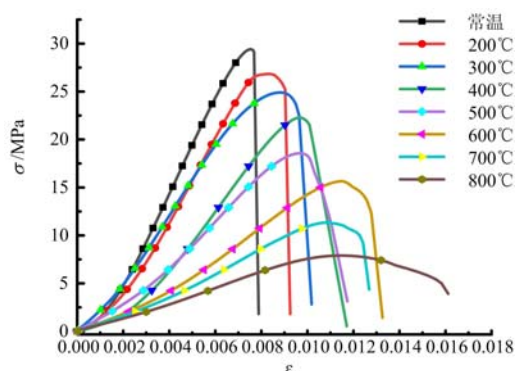


图8 高温后砂岩应力—应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of sandstone after high temperature

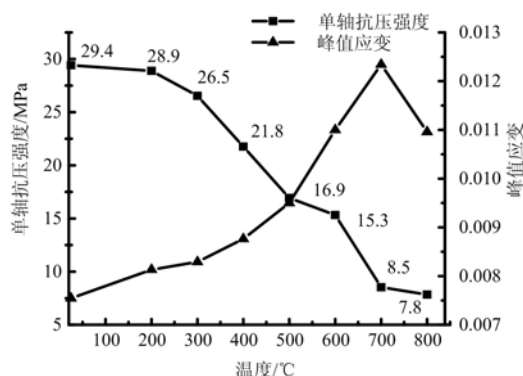


图9 单轴抗压强度—峰值应变曲线

Fig. 9 Uniaxial compressive strength-peak strain curves

由图9可以看出,在25℃~600℃,单轴抗压强度在300℃~500℃时下降约20%,两端下降较平缓;在600℃~700℃时,强度平均下降44%,近似断崖式跌落^[17],说明单位温度的变化对砂岩强度的影响比较大,此温度范围可看作是砂岩的温度敏感区。700℃后曲线走势平稳,原因是高温导致的热损伤,使试件出现大的孔洞、裂隙,甚至宏观裂纹。峰值应变整体呈上升趋势,随着温度升高,砂岩内部遭受不同程度的损伤:孔隙增大,裂隙萌发、扩展,内部水分缺失。在700℃之前,峰值应变逐渐上升,且增长速度逐渐增大,从常温时的0.0076直到700℃的0.0124。温度达到700℃后,高温对砂岩损伤严重,内部松散化,800℃时峰值应变下降。

整体上来看,砂岩细观组构的变化影响了宏观物理力学参数。在较低温度时,砂岩内晶体结构完整,孔隙数量和体积较小,矿物元素稳定,砂岩处于轻微损伤,宏观物理参数变化不大,单轴抗压强度缓慢较低。在较高温度时,矿物发生分解,晶体结构受损,裂纹、孔洞快速发育,骨架软化。砂岩处于高损伤,宏观物理力学参数加速劣化,最终显现为单轴抗压强度快速下降。

5 基于BP神经网络单轴抗压强度预测试验

构造出3层的BP神经网络模型,以不同高温和单轴抗压强度的复杂映射关系为切入点,利用其逼近任意复杂的非线性关系^[18]的能力,把多组不同物理量和单轴抗压强度值作为训练样本的输入和输出,可以动态调节神经网络内多个神经元节点之间的分布式,进而预测不同高温后砂岩的单轴抗压强度。设置网络第1层有 w 个单元,第2层有 x 个单元,第3层有 v 个单元。在编制程序时,将试样温度、密度、质量、孔隙率、声速、导热系数作为神经网络的输入,单轴抗压强度作为神经网络的输出,即神经网络的输入层有6个节点,输出层有1个节点。隐含层神经元的个数选取公式为

$$\gamma = \sqrt{w + v} + c \quad (3)$$

式中: γ 、 w 和 v 分别代表隐含层神经元个数、输出层神经元个数、输入层神经元个数; c 取 1~10 之间的常数。

如图 10 所示,通过 BP 神经网络结构图对数据进行多次训练^[19],经验证当隐含层取 7 个节点时最合适,利用常温下的 21 组试验数据作为 BP 神经网络样本数据。

表 1 BP 神经网络样本数据表

Tab. 1 Sample data of BP neural network

编号	温度 /℃	密度 /(g/cm ³)	质量 /g	孔隙率 /%	声速 /(km/s)	导热系数 /(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	单轴抗压强度 /MPa
1	200	2.002	385.0	20.74	3.109	0.169	28.719
2	200	2.011	383.9	20.66	3.211	0.173	26.721
3	200	2.033	389.2	20.86	3.117	0.170	31.213
4	300	1.997	386.7	21.25	2.593	0.167	24.763
...							
20	800	1.786	348.0	24.62	1.216	0.118	7.829
21	800	1.824	357.6	24.49	1.122	0.159	7.856

该模型选择 S 型传递函数进行调节,在函数调节模型中: $f(i) = (e^{-i} + 1)^{-1}$,通过误差函数 E 反传误差函数可以更好地调节网络权值,使阈值达到极小。

$$E = \frac{\sum_m (R_m + G_m)^2}{2} \quad (4)$$

式中: R_m 为期望输出; G_m 为计算输出。

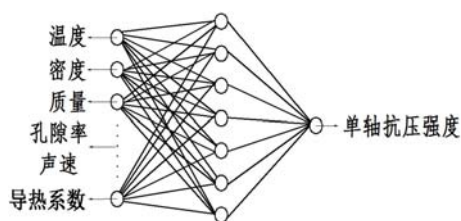


图 10 BP 神经网络结构图

Fig. 10 BP-neural network structure diagram

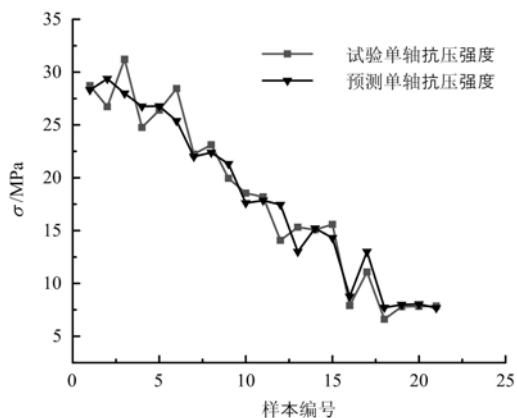


图 11 样本数据的训练结果

Fig. 11 Sample data training results

基于上述过程描述,借助 MATLAB 软件预测砂岩单轴抗压强度,图 11 为样本数据训练结果。

通过样本数据的预测结果可得出,模型预测曲线与试验曲线基本吻合,相似度较高。为验证 BP 神经网络模型方法的可行性,针对文献[20]中的试验数据进行训练及预测,文献中编号为 4、7、10、16 的预测结果分别为 190.01MPa、171.18MPa、175.07MPa、153.54MPa,预测结果中最大误差为 8.25%,最小误差为 1.53%,平均误差为 4.32%,进一步证明了模型的可靠性。

对 600℃~700℃ 温度敏感区间试验数据进行预测,结果如图 12 所示。由图 12 可知,利用 BP 神经网络模型预测的单轴抗压强度与试验值相对误差较小,最大误差为 6.1%,最小误差为 0.3%,因此输出参数合理。BP 神经网络模型在对数据进行反复的训练后,可以准确地预测砂岩单轴抗压强度。

采用 BP 神经网络建立环境变量、细观参数与宏观参数的关系;即输入层为温度、密度、质量、孔隙率、声速、导热系数,与输出层弹性模量建立关联,利用已经测得的样本数据,预测敏感区间弹性模量。当选择隐含层个数为 5 时,由图 13 可知,试验值与预测值最大误差为 9%,最小误差为 0.3%,关联较完善。

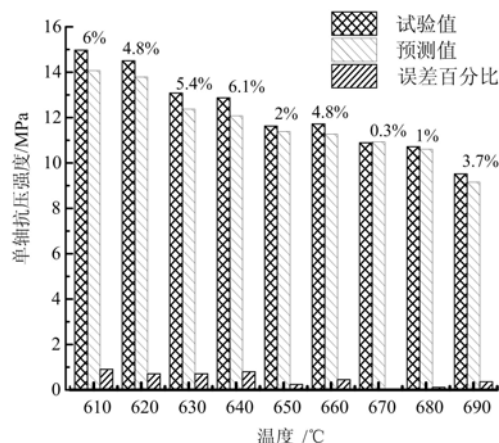


图 12 600℃~700℃单轴抗压强度试验值、预测值和误差
Fig 12 600℃~700℃ Uniaxial compressive strength test value, predicted value and error

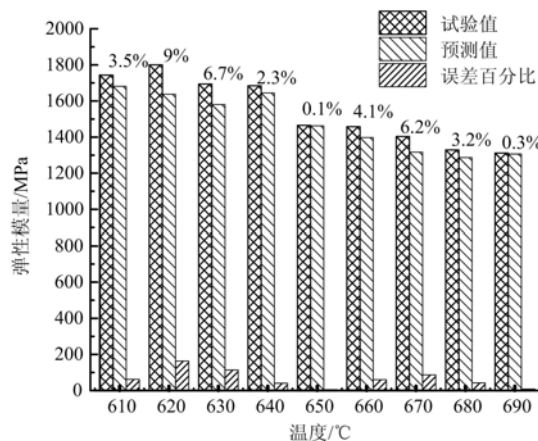


图 13 600℃~700℃弹性模量试验值、预测值和误差
Fig. 13 600℃~700℃ Elastic modulu test value, predicted value and error

6 结论

通过单轴压缩试验、声波损伤检测、X 射线衍射试验和扫描电镜试验,分析了高温作用后砂岩的宏观变化和强度特性,得到以下结论:

(1) 高温使砂岩内部严重空洞化,声速随温度升高而降低。通过 X 射线衍射试验和扫描电镜检测,发现 600℃后矿物反应分解,有晶体晶形转变,孔隙、孔洞和裂纹大量发育,颗粒剥离状态已使原有骨架呈现松散软弱状态。

(2) 质量损失率随温度升高而增加,在 600℃前上升平缓,700℃~800℃时急剧上升。弹性模量随温度的升高而降低,其中,300℃~700℃时线性变化明显。随着温度升高,砂岩颜色逐渐变红加深,600℃后灰色开始出现且逐渐加深。对单轴压缩下砂岩的应力—应变曲线进行分析后得出,温度升高,砂岩延性增大,破坏形式由脆性向塑性转变,单轴抗压强度逐渐降低,峰值应变整体呈上升趋势。

(3) 高温作用后砂岩矿物的分解和成分变化,孔隙、裂纹的产生、发育和拓展,晶体结构破坏,骨架、节理面软化等一系列微观组构变化影响砂岩的峰值应变、弹性模量、质量损失率、外观颜色等宏观物理力学参数,最终导致砂岩单轴抗压强度降低。

(4) 基于 BP 神经网络模型,利用自学习性对 21 组数据进行训练,预测 600℃~700℃温度敏感区间砂岩单轴抗压强度,发现预测值与试验值误差较小,最大误差为 6.1%。同时,利用文献数据验证了该模型方法的可行性,建立环境变量、细观参数与宏观参数弹性模量的关系,经模型获得的预测值与试验值最大误差为 9%,关联较完善。

参考文献:

- [1] 秦严. 高温后花岗岩物理力学性质试验研究[D]. 中国地质大学(北京), 2017 (QIN Yan. High-temperature influence on physical and mechanical properties of diorite [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2017 (in Chinese))
- [2] 李杰林, 周科平, 柯波. 冻融后花岗岩孔隙发育特征与单轴抗压强度的关联分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1783—1789 (LI Jielin, ZHOU Keping, KE Bo. Association analysis of pore development characteristics and uniaxial compressive strength property of granite under freezing-thawing cycles[J]. Journal of China Coal Society,

- 2015, 40(8):1783—1789 (in Chinese))
- [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(10):2110—2116 (WU Gang, XIANG Aiguo, ZHANG Lei. Mechanical characteristics of sandstone after high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(10):2110—2116 (in Chinese))
- [4] Brotóns V, Tomás R, Ivorra S, et al. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite[J]. Engineering Geology, 2013, 167:117—127.
- [5] 陈耕野, 夏克迪, 于莹, 等. 岩石压缩过程应力—应变—磁感强度效应的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(6): 669—676 (CHEN Gengye, XIA Kedi, YU Ying, et al. Experimental research on stress-strain-magnetic induction intensity effect in the process of rock compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(6): 669—676 (in Chinese))
- [6] 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 Xiaoli, GAO Feng, SHEN Xiaoming, et al. Research on mechanical characteristics and micro-pore structure characteristics of granite under high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6):1752—1758 (in Chinese))
- [7] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 温度—拉应力共同作用下砂岩破坏的断口形貌[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(12):2444—2457 (ZUO Jianping, XIE Heping, ZHOU Hongwei, et al. Fractography of sandstone failure under temperature-tensile stress coupling effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(12): 2444—2457 (in Chinese))
- [8] 谢卫红, 高峰, 谢和平. 细观尺度下岩石热变形破坏的实验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(4):628—634 (XIE Weihong, GAO Feng, XIE Heping. Experimental study on thermal deformation and failure of rock at mesoscale [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4):628—634 (in Chinese))
- [9] 陈昌彦, 王思敬, 沈小克. 边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J]. 岩土工程学报, 2001(2):157—161 (CHEN Changyan, WANG Sijing, SHEN Xiaoke. Artificial neural network prediction model of slope rock mass stability[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001(2):157—161 (in Chinese))
- [10] 张传栋, 何存富, 刘秀成, 等. 基于 BP 神经网络的钢轴表面硬度磁巴克豪森噪声定量检测技术[J]. 实验力学, 2020, 35(1):1—8 (ZHANG Chuandong, HE Cunfu, LIU Xiucheng, et al. Magnetic barkhausen noise technology for surface hardness evaluation in steel shaft based on BP neural network[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35 (1):1—8 (in Chinese))
- [11] Vagnon F, Colombero C, Colombo F, et al. Effects of thermal treatment on physical and mechanical properties of Valdieri Marble-NW Italy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 116:75—86.
- [12] Dwivedi R D, Goel R K, Prasad V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 45(3):303—315.
- [13] 刘天毅. 高温后层状砂岩各向异性蠕变特性及本构模型研究[D]. 成都理工大学, 2017 (LIU Tianyi. Anisotropic creep characteristics and constitutive model of layered sandstone after high temperature[D]. Chengdu University of Technology, 2017 (in Chinese))
- [14] 陈世万, 杨春和, 刘鹏君, 等. 北山花岗岩热破裂室内模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1):547—556 (CHEN Shiwan, YANG Chunhe, LIU Pengjun, et al. Laboratory simulation test of thermal cracking of Beishan granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1):547—556 (in Chinese))
- [15] 何爱林, 王志亮, 石恒. 温度作用后花岗岩强度特性及矿物成分变化特征[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(4):501—506 (HE Ailin, WANG Zhiliang, SHI Heng. Strength characteristics and mineral component variations of heat-treated granite[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2018, 41(4): 501—506 (in Chinese))
- [16] 张连英, 茅献彪, 孙景芳, 等. 高温状态下大理岩力学性能实验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(6):46—50 (ZHANG Lianying, MAO Xianbiao, SUN Jingfang, et al. Mechanical properties of marble at high temperature [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(6):46—50 (in Chinese))
- [17] 夏小和, 王颖轶, 黄醒春, 等. 高温作用对大理岩强度及变形特性影响的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6):996—998, 1002 (XIA Xiaohe, WANG Yingyi, HUANG Xingchun, et al. Experimental study on high temperature effect's influence to the strength and deformation quality of marble[J]. Journal of Shanghai

- Jiaotong University, 2004, 38(6):996—998, 1002 (in Chinese))
- [18] 葛宏伟, 梁艳春, 刘玮, 等. 人工神经网络与遗传算法在岩石力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(9): 1542—1550 (GE Hongwei, LIANG Yanchun, LIU Wei, et al. Application of artificial neural network and genetic algorithm in rock mechanics[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(9):1542—1550 (in Chinese))
- [19] 陈晓君, 陈小根, 宋刚, 等. 基于人工神经网络模型的岩石特性预测[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(1):34—38 (CHEN Xiaojun, CHEN Xiaogen, SONG Gang, et al. Prediction of rock properties based on artificial neural network model[J]. Prospecting Engineering (Geotechnical Drilling Engineering), 2019, 46(1):34—38 (in Chinese))
- [20] 晏斌, 郭永成, 朱千凡, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的砂岩三轴抗压强度预测[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(3):51—54 (YAN Bin, GUO Yongcheng, ZHU Qianfan, et al. Prediction of triaxial compressive strength of sandstone based on PSO-BP neural network[J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science Edition), 2019, 41(3):51—54 (in Chinese))

Experimental study on macro/micro damage of sandstone caused by high temperature and prediction of uniaxial strength by BP neural network

QIN Nan, GE Qiang, LIANG Zhonghao, SUN Jiabin, WANG Yongyan

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and macro/micro damage of sandstone after high temperature treatment, the uniaxial compression test, acoustic damage detection, X-ray diffraction test and scanning electron microscope tests are conducted. The influence of micro damage variation on the uniaxial compression strength of sandstone is obtained by analyzing the stress-strain curve, peak stress, peak strain, elastic modulus, mass loss rate, X-ray diffraction images and scanning electron microscope images. Based on the BP neural network model, different physical quantities can be trained, and the uniaxial compressive strength of sandstone under different high temperatures can be predicted. The results show that as the temperature increases, the uniaxial compressive strength and elastic modulus of sandstone decrease, while the peak strain, mass loss rate and volume increase, and the appearance color of sandstone gradually turns red with grey intensified. Furthermore, the development of micro defects (micro cracks and holes) is obviously obtained, the crystal structure is damaged dramatically, the internal CaO and CO₂ are generated, the porosity and the degree of thermal damage increase, and the sound velocity and intensity decrease. The BP neural network model is established, and the feasibility of the model is verified based on the literature data. The maximum error between the predicted value and the tested value is about 8.25%, indicating the high reliability of the model.

Keywords: sandstone; temperature; uniaxial compressive strength; BP neural network