

DOI: 10.11779/CJGE201406011

高温后砂岩单轴压缩加载速率效应的试验研究

苏海健¹, 靖洪文^{1, 2}, 赵洪辉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 221116; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 温度是影响岩石材料物理力学性质的重要因素, 为考察温度对砂岩加载速率效应的影响规律, 对 25℃~800℃ 之间 6 种温度水平后的砂岩试样分别进行不同加载速率下的单轴压缩试验。试验结果表明: ① 高温后砂岩的物理性质出现一定的劣化, 由 25℃ 升高至 800℃, 密度和纵波波速分别减小了 5.89% 和 73.72%; ② 随着温度的升高, 砂岩峰值强度和弹性模量逐渐减小, 峰值应变逐渐增大, 而峰值强度随温度的变化过程受加载速率的影响较大; ③ 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, 且服从正线性关系, 相关性参数 A 表征了材料受加载速率影响的显著程度, 随着温度的升高参数 A 呈现先减小后又增大的趋势; ④ 随着温度和加载速率的增大, 砂岩破坏形态由拉剪混合破坏逐步转化为单一斜剪破坏, 破坏程度愈渐剧烈, 分形维数也逐渐增大。

关键词: 高温; 砂岩; 加载速率; 破坏形态; 分形维数

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)06-1064-08

作者简介: 苏海健(1988-), 男, 江苏启东人, 博士研究生, 主要从事岩石力学与工程等方面的研究。E-mail: 631441969@qq.com。

Experimental investigation on loading rate effect of sandstone after high temperature under uniaxial compression

SU Hai-jian¹, JING Hong-wen^{1, 2}, ZHAO Hong-hui²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The temperature is a very important factor affecting the physical and mechanical properties of rock. Uniaxial compression tests on sandstone after high temperature with six temperature levels between 25℃ to 800℃ under different loading rates are conducted to investigate the influence of temperature on loading rate effect. The results show that the physical properties of sandstone after high temperature appear to have a certain degradation, and that the density and longitudinal wave velocity respectively decrease by 5.89% and 73.72% with temperature rising from 25℃ to 800℃. With the increase of the temperature, the peak strength and elastic modulus decrease little by little, but the peak strain increases gradually, and the evolutionary process of the peak strength along with the temperature is strongly influenced by the loading rate. The peak strength and peak strain of sandstone after high temperature have an obvious loading rate effect, and they obey the positive linear relationship. The correlation parameter A characterizes the impact degree by loading rate, and with the increase of temperature, parameter A first decreases and then increases. The failure mode of sandstone transforms from mixing failure of tensile and shear gradually into a single shear failure with the increase of the temperature and loading rate, the damage degree becomes increasingly more serious, and the fractal dimension also increases gradually.

Key words: high temperature; sandstone; loading rate; failure mode; fractal dimension

0 引言

近年来随着地热资源开发、核废料高温处理、煤炭地下气化工程等的蓬勃发展, 高温下(后)岩石的物理力学性质及演化规律的研究成为岩石力学领域的热点和新方向。国内外众多学者已经对高温岩石特性进行了一定的探索和研究, 取得了诸多成果。Kilic^[1]对 600℃~1050℃ 高温后石灰岩的物理性质进行了探

索和分析; 吴刚等^[2-3]对高温后砂岩的峰值应力、峰值应变、弹性模量、泊松比和声发射等力学性质进行了系统的研究; Mao 等^[4]对高温作用下石灰岩的强度和

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB036003); 国家自然科学基金项目(51374198); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0935)

收稿日期: 2013-11-18

变形特性进行研究, 并建立了相应的热损伤方程; 赵金昌等^[5]揭示了高温高压条件下花岗岩的冲击旋转破碎规律; 尹士兵等^[6]利用分离式霍普金森压杆装置, 对高温后砂岩动态压缩力学特性进行了研究; 孙强等^[7]对高温影响下岩石的相变与物理力学性质变化进行了探索。

加载速率是岩石力学试验中的基本参量, 变化幅度较大, 但至今没有一个固定的标准。所谓加载速率效应就是指材料力学特征随试验加载速率的变化而发生变化的行为。吴绵拔等^[8]对中等应变速率下花岗岩和煌斑岩的强度和变形模量的变化特征进行了探讨; 李永盛^[9]考察了红砂岩应变率在 $2.43 \times 10^{-6} \sim 4.38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内单轴压缩力学性质的变化, 并得到了相应的经验公式; 杨仕教等^[10]对不同加载速率下石灰岩的峰后力学行为进行了研究; 廖红建等^[11]和纪文栋等^[12]分别对硅藻质软岩和软弱盐岩在三轴压缩作用下的加载速率效应进行了试验分析; 尹小涛等^[13]采用颗粒流程序进行单轴压缩试验, 获得了加载速率对岩石破坏形态、裂纹扩展及能量响应等力学行为的影响规律; 苏承东等^[14]对应变速率与应力速率、弹性模量、弱化模量以及破裂形式的相关性特征进行了描述。

然而纵观国内外文献, 关于高温损伤后岩石加载速率效应的研究却鲜有报道, 张连英等^[15]对 200°C 高温下石灰岩的加载速率特征进行了探讨, 并获得了相关规律, 但未涉及不同温度对加载速率效应的影响特征。基于此, 本文对 25°C (常温) $\sim 800^\circ\text{C}$ 高温后砂岩进行了 5 种加载速率水平下的室内单轴压缩试验, 考察了加载速率效应随温度的响应特征。

1 试验方案

选取地层结构中最常见的砂岩材料作为试验对象, 采自于山东省临沂市, 自然状态下呈暗红色, 质地均匀, 无明显纹理, 平均密度为 2.41 g/cm^3 , 矿物成分以石英、长石、伊利石、高岭石为主。将砂岩加工成直径和高度分别为 50 mm 和 100 mm 的标准圆柱体试样, 选用中国轻工业陶瓷研究所窑炉开发中心研制的 GWD-02A 型高温炉进行高温加热, 温度水平分别为 25°C (常温)、 200°C , 400°C , 500°C , 600°C 和 800°C , 升温速率为 5°C/min , 达到指定温度水平后恒温 60 min , 保证岩样内部受热均匀, 最后自然冷却至常温, 高温后部分砂岩样品如图 1 所示。

分别对不同温度后的试样进行直径、高度和质量的量测, 由此来获得砂岩的密度值。同时采用 PDS-SW 型声波检测仪对试样的纵波波速进行测试, 并将每组

中波速值离散性较大的试样进行剔除。砂岩试样的单轴压缩试验在中国矿业大学的 YNS2000 型万能伺服系统上进行, 采用位移加载方式进行加载, 加速速率分别为 $0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 \text{ mm/min}$ 等 5 个水平。试验过程中在试样上下端面均匀地抹一层凡士林润滑剂, 以减小端部摩擦对试验结果的影响。



图 1 高温后砂岩样品

Fig. 1 Sandstone samples after high temperature

2 试验结果与分析

2.1 物理性质变化特征

分别对相同温度水平砂岩试样的密度和纵波波速进行平均化处理, 获得平均密度和平均纵波波速随温度的变化特征如图 2, 3 所示, 变化过程总体可以分为 3 个阶段。

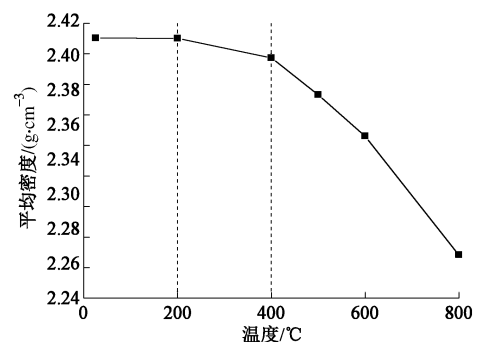


图 2 平均密度与温度的关系

Fig. 2 Relationship between average density and temperature

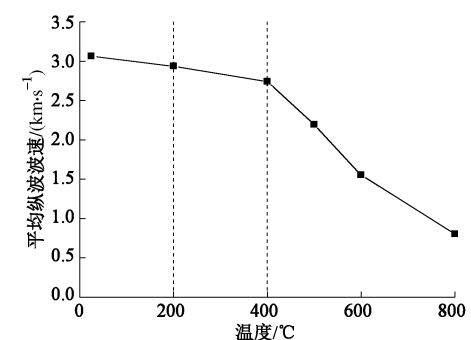


图 3 平均纵波波速与温度的关系

Fig. 3 Relationship between wave velocity and temperature

(1) 25℃~200℃, 这一阶段主要发生矿物内部颗粒吸附水和层间水的脱离, 但自然冷却后部分过程是可逆的, 所以这一阶段密度和波速变化不大, 由 25℃升高至 200℃, 密度和波速分别仅减小了 0.01% 和 4.20%。

(2) 200℃~400℃, 缓慢衰减阶段, 这一阶段矿物结合水开始丧失, 黏土矿物发生一定的热膨胀, 物理性质出现轻微的变化, 由 200℃升高至 400℃, 砂岩密度由 2.41 g/cm³ 减小为 2.40 g/cm³, 减小了 0.53%, 而波速也由 2.94 km/s 减小为 2.74 km/s, 减小了 6.80%。

(3) 400℃~800℃, 这一阶段水分丧失基本完成, 黏土矿物发生剧烈的热膨胀, 部分弱黏土矿物开始发生热分解, 砂岩体积急剧增大, 密度减小, 当温度由 400℃升高至 800℃, 密度由 2.40 g/cm³ 减小为 2.27 g/cm³, 减小了约 5.42%, 波速也由 2.74 km/s 减小为 0.81 km/s, 减小了 70.44%。

2.2 应力应变曲线变化特征

高温后砂岩部分应力应变曲线如图 4 所示, 初始压密阶段比较明显, 呈上凹状, 且有轻微的上下波动。温度较低时, 应力应变曲线的峰前阶段较为光滑, 峰值点破坏前试样保持很好的完整性, 表面无次生裂纹出现, 达到峰值点时伴随着一声巨大的声响, 轴向应力短时间内跌落为零, 试样即完全破裂, 峰后曲线并不明显。

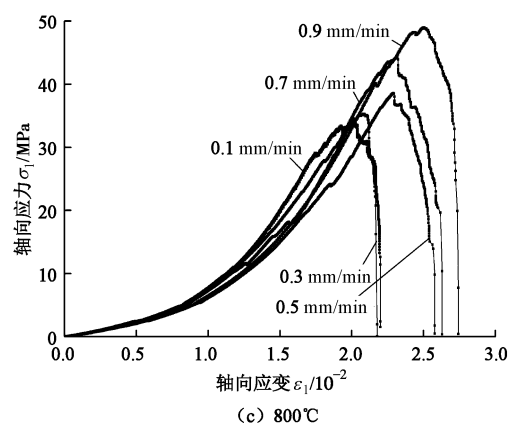
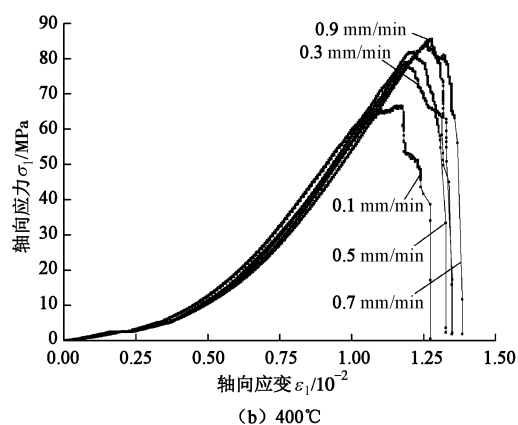
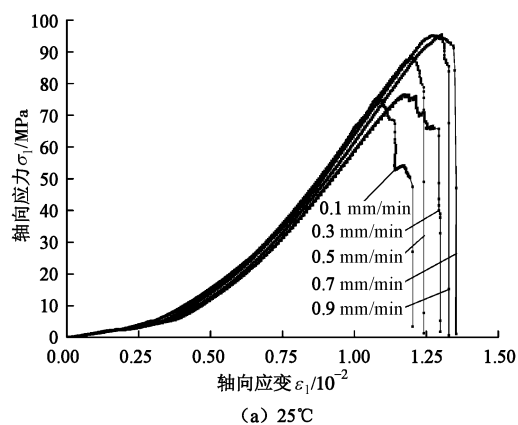


图 4 砂岩轴向应力应变曲线

Fig. 4 Axial stress-axial strain curves of sandstone

随着温度的升高, 特别是 800℃时, 砂岩应力应变曲线出现了多次峰前跌落, 同时伴随有清晰的脆性崩裂声, 发生峰值破坏时破裂声变得较为沉闷, 且峰值点以后经历较长一段时间的弱化变形, 轴向应力才逐渐跌落为零, 与低温时相比, 峰后曲线较为漫长, 说明随着温度的升高, 砂岩峰后软化特征逐渐明显。

温度较低时, 加载速率对峰前曲线的演化过程影响较小, 基本沿同一路径发展, 如 25℃时, 不同加载速率下弹性模量标准差为 1.17 GPa, 最大值与最小值仅相差 1.21 GPa。随着温度的升高, 不同加载速率下峰前路径开始发生变化, 变得参差不齐, 弹性模量的变化幅度较大, 如 800℃时不同加载速率下弹性模量最大值和最小值相差 10.00%。

2.3 宏观力学参数变化特征

高温后砂岩峰值强度、峰值应变和弹性模量随温度的变化规律如图 5 所示。随温度的升高, 砂岩的峰值强度和弹性模量逐渐减小, 峰值应变逐渐增大。不同加载速率下砂岩的宏观力学参数主要表现出以下 2 个特征:

(1) 不同加载速率下, 峰值强度受温度的影响表现出明显的差异性。加载速率为 0.1 mm/min 时, 温度为 25℃~600℃之间时峰值强度的变化较为平缓, 仅变化了 16.56%, 800℃时发生了突变, 与 600℃相比降低了 45.97%; 加载速率为 0.3~0.5 mm/min 时, 峰值强度在 400℃~600℃~800℃之间分别出现了 2 次大的突变, 以加载速率为 0.5 mm/min 为例, 温度由 25℃升高至 400℃, 峰值强度仅变化了 7.36%, 温度由 400℃升高至 600℃, 峰值强度发生第 1 次突变, 劣化了 19.82%, 温度由 600℃升高至 800℃, 峰值强度出现第 2 次突变, 劣化了 41.25%, 随着温度的升高, 峰值强度劣化趋势逐渐增大; 加载速率为 0.7~0.9 mm/min 时, 随温度的升高, 峰值强度的劣化幅度较为均匀, 没有出现明显的突变。除此之外, 材料非均质性对试样的承载力也具有轻微的影响, 如加载速率为 0.3

mm/min 时, 温度由 25℃ 升高至 400℃, 峰值强度出现了略微上升的趋势 (变化幅度为 3.10%)。

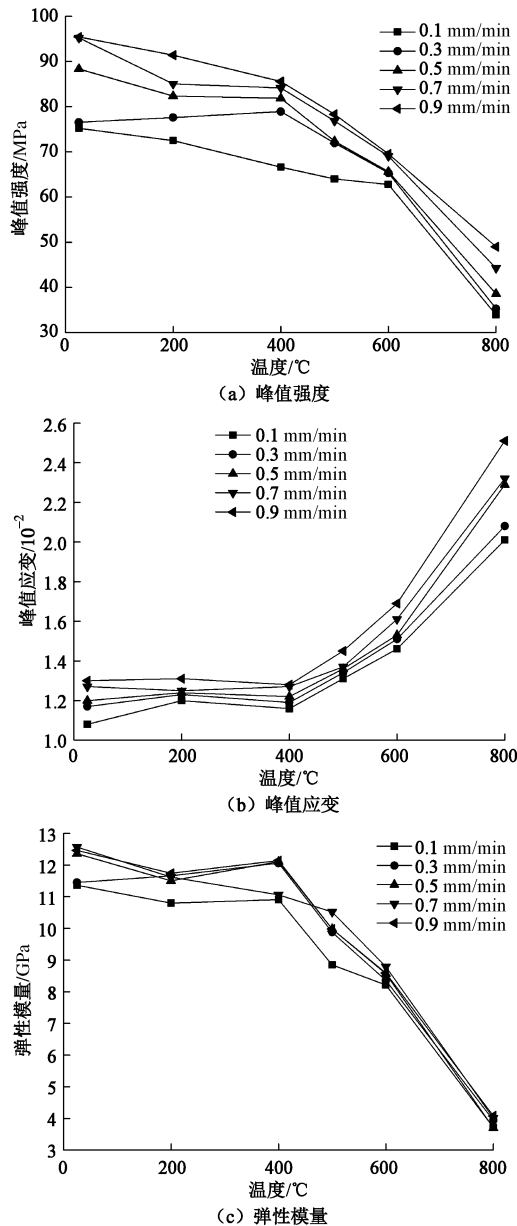


图5 峰值强度、峰值应变和弹性模量随温度的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of peak strength, peak strain and elastic modulus with temperature

(2) 不同加载速率下砂岩峰值应变和弹性模量随温度的升高均出现 2 次大的突变。以加载速率为 0.1 mm/min 为例, 25℃~400℃ 之间峰值应变和弹性模量的变化较小, 分别仅变化了 7.41% 和 3.96%; 由 400℃ 升高至 600℃, 峰值应变和弹性模量发生第 1 次突变, 峰值应变由 1.16×10^{-2} 增大为 1.46×10^{-2} , 增大了 25.86%, 弹性模量由 10.91 GPa 减小为 8.2 GPa, 减小了 24.75%; 由 600℃ 升高至 800℃, 峰值应变和弹性模量发生第 2 次突变, 峰值应变由 1.46×10^{-2} 增大为 2.01×10^{-2} , 增大了 37.67%, 弹性模量由 8.21 GPa 减小为 3.71 GPa, 减小了 54.81%。

通过对高温后砂岩的物理参数 (密度、纵波波速) 和宏观力学参数 (峰值强度、峰值应变和弹性模量) 的变化特征进行比较发现: 25℃~600℃ 之间, 物理参数和力学参数的变化特征相互吻合; 600℃~800℃, 物理参数的变化与 400℃~600℃ 并无多大差别, 而力学参数在 800℃ 时发生了巨大的劣化。根据文献[7]的说法, 400℃~600℃ 之间主要是石英发生相变, 由 α 相转变为 β 相, 而 600℃~800℃ 岩石内部很多矿物发生熔融和相变, 金属键断裂, 微观裂隙剧增, 所以 400℃~600℃ 和 600℃~800℃, 物理性质变化特征较为相似, 但力学性质会出现明显的区别, 本文的试验结果与文献[7]说法不谋而合。

3 高温后砂岩加载速率效应分析

3.1 加载速率对力学参数的影响

不同加载速率下砂岩的峰值强度和峰值应变变化特征如图 6 所示, 随着加载速率的增大, 峰值强度和峰值应变均表现出逐渐增大的趋势。25℃ 时, 加载速率由 0.1 mm/min 增大为 0.9 mm/min, 砂岩峰值强度和峰值应变分别由 75.22 MPa 和 1.08×10^{-2} 增大为 95.41 MPa 和 1.30×10^{-2} , 分别增大了 26.84% 和 20.37%; 800℃ 高温后也同样如此, 砂岩峰值强度和峰值应变分别由 33.91 MPa 和 2.01×10^{-2} 增大为 48.99 MPa 和 2.51×10^{-2} , 分别增大了 44.47% 和 24.88%。由试验结果分析发现, 砂岩弹性模量随加载速率的变化特征并不明显。

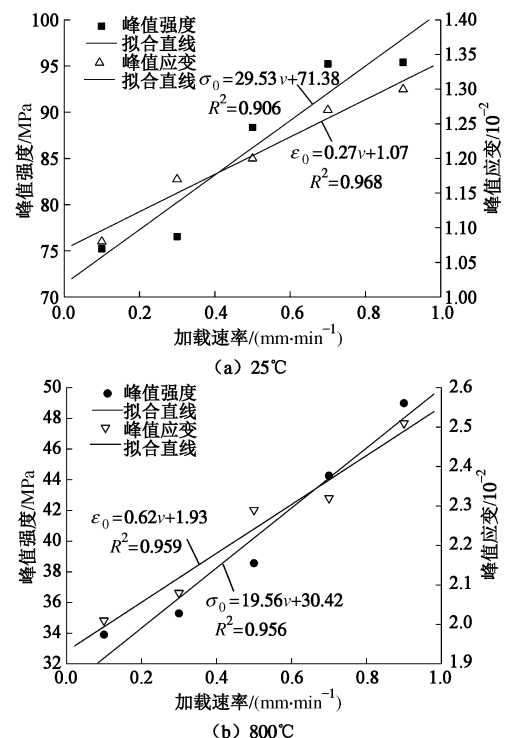


图6 峰值强度、峰值应变随加载速率的变化

Fig. 6 Variation characteristics of peak strength and peak strain with loading rate

通过对不同加载速率下砂岩单轴压缩试验结果分析发现, 峰值强度、峰值应变与加载速率呈线性增长关系, 即 $y = Av + B$, 其中, y 为峰值强度或峰值应变, 分别采用 σ_0 和 ε_0 来表示, v 为加载速率, A 和 B 为材料参数, 部分拟合结果如图 6 所示, 具体拟合参数如表 1、2 所示。25℃~800℃ 高温后砂岩峰值强度与加载速率的线性拟合系数 R^2 在 0.808~0.988 之间, 峰值应变的拟合系数 R^2 在 0.880~0.973 之间, 说明高温后砂岩的峰值强度、峰值应变与加载速率均存在较好的正线性关系, 这与李永盛^[9]、苏承东等^[14]的观点吻合, 而与张连英等^[15]获得的变化规律有所不同, 可能是由于岩性、加载速率幅度和压力伺服机等条件不同而导致。

表 1 峰值强度拟合参数

Table 1 Fitting parameters of peak strength

温度	A	B	R^2
25℃	29.53	71.38	0.906
200℃	22.60	70.46	0.988
400℃	21.55	68.64	0.808
500℃	16.74	64.31	0.899
600℃	8.65	62.14	0.937
800℃	19.56	30.42	0.956

表 2 峰值应变拟合参数

Table 2 Fitting parameters of peak strain

温度	A	B	R^2
25℃	0.27	1.07	0.968
200℃	0.12	1.19	0.883
400℃	0.16	1.14	0.973
500℃	0.16	1.29	0.880
600℃	0.28	1.42	0.956
800℃	0.62	1.93	0.959

3.2 参数 A 、 B 的变化特征

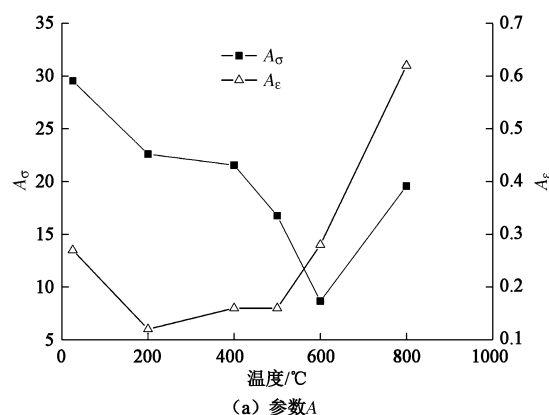
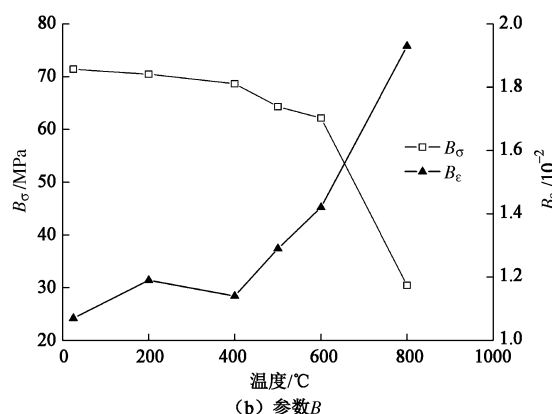
由峰值强度和峰值应变与加载速率的相关性公式 $y = Av + B$ 可以看出, 参数 A 表征了材料受加载速率的影响程度, A 越大, 加载速率效应越明显, 可采用量纲为一的量来表述; 参数 B 表征了加载速率趋近于零时, 即理想静水压条件下材料的单轴压缩峰值强度或峰值应变水平, 量纲与 y 相同。

参数 A 、 B 随温度的变化关系如图 7 所示, 为易于辨识, 图中峰值强度对应的参数用 A_σ 和 B_σ 表示, 峰值应变对应的参数用 A_ε 和 B_ε 表示。由表 1、2 和图 7 中参数 A 、 B 的变化特征可以看出:

(1) 峰值强度对应的参数 A 随温度的升高表现出先减小后又增大的趋势, 分别在 25℃ 和 600℃ 时达到最大值和最小值, 说明峰值强度在 25℃ 时加载速率效应最明显, 随着温度的升高逐渐劣化, 在 600℃ 时达到最低谷, 随后又有所上升。峰值强度对应的参数 B 随着温度的升高逐渐减小, 25℃~600℃ 范围内参数 B 的衰减相对平稳, 由 25℃ 升高至 600℃, 参数 B 由 71.38 MPa 减小为 62.14 MPa, 仅减小了 12.94%, 而

800℃ 时参数 B 发生了突变, 与 600℃ 时相比降低了 51.05%。

(2) 峰值应变对应的参数 A 随温度的升高同样表现为先减小后又逐渐增大, 分别在 200℃ 和 800℃ 时达到最小值和最大值。峰值应变对应的参数 B 随着温度的升高总体呈现逐渐增大的趋势, 在 200℃ 时出现一定的反常, 分析原因可能是由于温度水平较低时砂岩的力学性质变化尚不明显, 材料的非均质性容易掩盖真实的变化规律。

(a) 参数 A (b) 参数 B 图 7 参数 A 、 B 随温度的变化Fig. 7 Variation characteristics of parameters A and B with temperature

4 高温后砂岩破坏特征分析

4.1 基本破坏形态

不同加载速率下部分高温后砂岩破坏形态如图 8 所示, 演化过程可以采用图 9 来表述: ①加载速率和温度都较低时, 砂岩主要发生拉剪混合破坏, 纵向劈裂面与斜剪面交错布置; ②随着温度的升高, 逐渐向单一斜剪转化, 形成 2 个大的锥形斜剪块体, 断口沙化严重, 且具有明显的剪切痕迹; ③随着加载速率的增大, 拉剪混合破坏逐渐向“Y”型双剪转化, 2 个斜剪面交错发生, 随着加载速率的继续增大, 逐渐演化为单一斜剪破坏。随着温度和加载速率的增大, 砂岩的破坏程度愈渐剧烈。

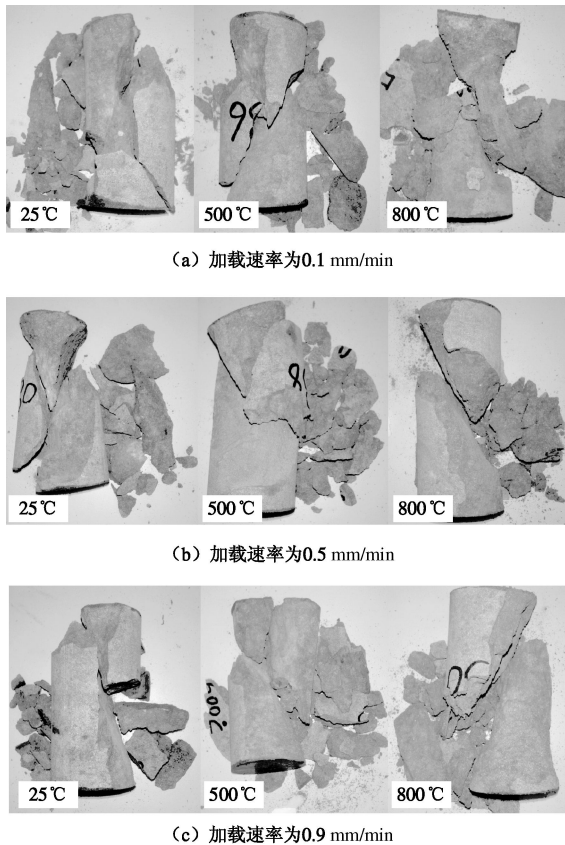


图8 砂岩破坏形态

Fig. 8 Failure modes of sandstone

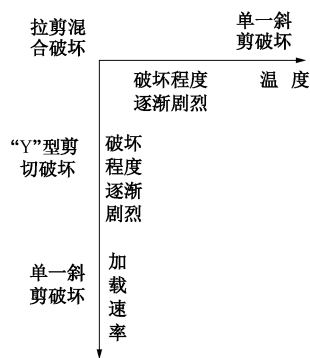


图9 破坏形态随温度、加载速率的演化过程

Fig. 9 Evolutionary process of failure modes with temperature and loading rate

4.2 分形维数特征

岩石在压缩作用下发生损伤、起裂、破坏的过程是一个能量演化的过程,并具有分形特性。分形维数反映了岩石的破碎程度,是岩石细观结构、破坏方式及试样形状尺寸等因素的综合反映^[16]。以尺度-频率来表征的分形描述^[17]为

$$N = N_0 (R/R_{\max})^{-D}, \quad (1)$$

式中, R 为特征尺寸, N 为尺度大于等于 R 的碎块数, R_{\max} 为最大特征尺寸, N_0 为具有最大特征尺度 R_{\max} 的碎块数, D 为分形维数。

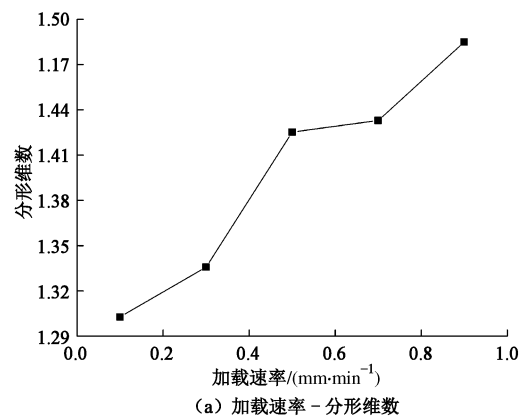
然而由于碎块的尺度存在不规则性,通常采用质量-频率关系来描述分形特征:

$$N = N_0 (M/M_{\max})^{-b}, \quad (2)$$

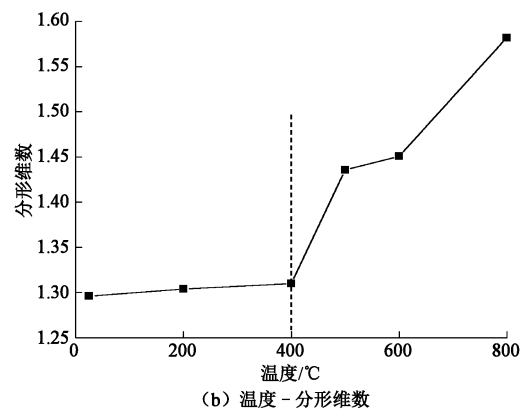
式中, M_{\max} 为最大碎块质量, N_0 为具有最大质量 M_{\max} 的碎块数, M 为碎块质量, N 为质量大于等于 M 的碎块数, b 为质量-频率分布指数。近似化处理下碎块质量与尺寸存在一定的相关性: $M \propto R^3$, 所以, 有

$$D = 3b. \quad (3)$$

为试验操作方便,本文分形维数计算时仅对质量大于等于 1.0 g 的破碎块体进行统计和计算,并对同一指标下试样的分形维数值进行平均化处理,获得分形维数与加载速率和温度的关系如图 10 所示。



(a) 加载速率-分形维数



(b) 温度-分形维数

图10 加载速率和温度对分形维数的影响

Fig. 10 Influence of loading rate and temperature on fractal dimension

随着加载速率的增大,分形维数基本呈线性增大的趋势,当加载速率由 0.1 mm/min 增大为 0.9 mm/min,分形维数由 1.302 增大为 1.485,增大了 14.06%。加载速率在 0.5~0.7 mm/min 之间出现平缓阶段,分形维数仅变化了 0.56%。

随着温度的逐渐升高,分形维数总体呈现增大的趋势,但 400°C 前后增长幅度差异较大:温度由 25°C 升高至 400°C,分形维数由 1.296 增大为 1.310,仅增大了 1.08%;温度由 400°C 升高至 800°C,分形维数由

1.310 增大为 1.582, 增大了 20.76%。

5 结 论

分别对 25℃~800℃ 高温后砂岩试样进行 0.1~0.9 mm/min 五种加载速率水平下的单轴压缩试验, 得出以下 4 点结论。

(1) 随着温度的升高, 砂岩物理参数逐渐劣化, 由 25℃ 升高至 800℃, 密度和纵波波速分别衰减了 5.89% 和 73.72%, 随着温度的升高, 物理参数的劣化幅度逐渐增大。

(2) 砂岩的宏观力学参数随着温度的升高出现明显的变化, 峰值强度和弹性模量逐渐减小, 而峰值应变逐渐增大, 峰值强度随温度的变化特征同时又受加载速率的影响。

(3) 高温后砂岩的峰值强度和峰值应变随着加载速率的增大呈线性增大的趋势, 具有明显的加载速率效应, 峰值强度和峰值应变分别在 25℃ 和 800℃ 时加载速率效应最明显, 而分别在 600℃ 和 200℃ 时加载速率影响最弱。

(4) 砂岩的破坏形态随着加载速率的增大表现为拉剪混合→“Y”型斜剪→单一斜剪的演变趋势, 而随着温度的升高, 破坏形态由拉剪混合破坏向单一斜剪破坏转化, 分形维数也同样随温度和加载速率的增大逐渐增大。

然而需要说明的是, 本文针对的是经历高温损伤并自然冷却后砂岩加载速率效应的研究, 而高温状态下与高温后岩石的力学特性具有一定的差异, 其加载速率规律也必然存在区别, 研究其变化行为同样具有很好的科学价值, 当然这也正是笔者下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] KILIC O. The influence of high temperatures on limestone P-wave velocity and Schmidt hammer strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2006, **43**(6): 980 - 986.
- [2] 吴 刚, 邢爱国, 张 磊. 砂岩高温后的力学特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(10): 2110 - 2116. (WU Gang, XING Ai-guo, ZHANG Lei. Mechanical characteristics of sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(10): 2110 - 2116. (in Chinese))
- [3] 吴 刚, 王德咏, 翟松韬. 单轴压缩下高温后砂岩的声发射特征[J]. 岩土力学, 2012, **33**(11): 3237 - 3242. (WU Gang, WANG De-yong, ZHAI Song-tao. Acoustic emission characteristics of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(11): 3237 - 3242. (in Chinese))
- [4] MAO Xian-biao, ZHANG Lian-ying, LI Tian-zhen, et al. Properties of failure mode and thermal damage for limestone at high temperature[J]. Mining Science and Technology, 2009, **19**(3): 290 - 294.
- [5] 赵金昌, 赵阳升, 李 义, 等. 花岗岩高温高压条件下冲击旋转破碎规律研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 856 - 860. (ZHAO Jin-chang, ZHAO Yang-sheng, LI Yi, et al. Percussive rotary drilling law of granite under high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 856 - 860. (in Chinese))
- [6] 尹士兵, 李夕兵, 王 斌, 等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(5): 777 - 784. (YIN Tu-bing, LI Xi-bing, WANG Bin, et al. Study of mechanical properties of sandstones after high temperature under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(5): 777 - 784. (in Chinese))
- [7] 孙 强, 张志镇, 薛 雷, 等. 岩石高温相变与物理力学性质变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(5): 935 - 942. (SUN Qiang, ZHANG Zhi-zhen, XUE Lei, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(5): 935 - 942. (in Chinese))
- [8] 吴绵拔, 刘远惠. 中等应变速率对岩石力学特性的影响[J]. 岩土力学, 1980(1): 51 - 58. (WU Mian-ba, LIU Yuan-hui. The effect of intermediate strain rates on mechanical properties of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 1980(1): 51 - 58. (in Chinese))
- [9] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 同济大学学报, 1995, **23**(3): 265 - 269. (LI Yong-sheng. Experimental analysis on the mechanical effects of loading rates on red sandstone[J]. Journal of Tongji University, 1995, **23**(3): 265 - 269. (in Chinese))
- [10] 杨仕教, 曾 晟, 王和龙. 加载速率对石灰岩力学效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(7): 786 - 788. (YANG Shi-jiao, ZENG Sheng, WANG He-long. Experimental analysis of mechanical effects of loading rates on limestone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(7): 786 - 788. (in Chinese))
- [11] 廖红建, 蒲武川, 殷建华. 软岩的应变速率效应研究[J].

- 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(18): 3218 - 3223. (LIAO Hong-jian, PU Wu-chuan, YIN Jian-hua. Study of strain rate effect of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(18): 3218 - 3223. (in Chinese))
- [12] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2507 - 2513. (JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2507 - 2513. (in Chinese))
- [13] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 2610 - 2615. (YIN Xiao-tao, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 2610 - 2615. (in Chinese))
- [14] 苏承东, 李怀珍, 张 盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(5): 943 - 950. (SU Cheng-dong, LI Huai-zhen, ZHANG Sheng, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(5): 943 - 950. (in Chinese))
- [15] 张连英, 茅献彪. 高温状态下加载速率对石灰岩力学效应研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3511 - 3515. (ZHANG Lian-ying, MAO Xian-biao. Experimental study of the mechanical effects of loading rates on limestone at high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3511 - 3515. (in Chinese))
- [16] 高峰, 谢和平, 赵 鹏. 岩石块度分布的分形性质及细观结构效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, **13**(3): 240 - 246. (GAO Feng, XIE He-ping, ZHAO Peng. Fractal properties of size-frequency distribution of rock fragments and the influence of meso-structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, **13**(3): 240 - 246. (in Chinese))
- [17] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂与破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, **23**(4): 1 - 9. (XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(4): 1 - 9. (in Chinese))

中西部岩土力学与工程论坛第一号通知 (2014 年 5 月)

2014 年 8 月 1~3 日 中国 太原

随着我国大规模基础工程建设的快速发展, 岩土工程日益成为国内最热点的研究领域之一, 国家对岩土力学与工程的研究投入也逐步加强。近年来随着博士、硕士研究生队伍规模的扩大以及留学归国人员数量的增多, 岩土工程领域的研究队伍和团队也日益壮大, 有力推动了岩土力学与工程的发展和日渐繁荣。为促使相互交流学习, “中西部岩土力学与工程论坛”将于 2014 年 8 月 1~3 日在山西太原将召开。本次论坛将围绕岩土力学微观到宏观、复杂条件下岩土力学与工程问题、地下空间开发中的新理论新方法与新方向、特殊土的力学特性与工程问题等方面进行广泛的学术交流。热诚欢迎全国从事岩土力学与工程及相关研究和实践的专家、学者及工程技术人员参加本次论坛。

主办单位: 中国力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 太原理工大学; 山西省土木建筑学会地基基础专业委员会; 中北大学; 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室; 山西省勘察设计研究院。

主要学术议题: 岩土力学——从微观到宏观; 复杂条件下

岩土力学与工程问题; 地下空间开发中的新理论、新方法与新方向; 特殊土的力学特性与工程问题。

重要日期: 2014 年 6 月 30 日前将“会议回执”通过 Email 或快递形式返回大会秘书处。

大会秘书处: 联系人: 马富丽 13934208584, 何 斌 13623601272, 申纪伟 15535374168, 联系邮箱: zxbyltt@163.com; mafuli_0309@163.com。

通信地址: 山西省太原市迎泽西大街 79 号太原理工大学建工学院 030024。

学术会议安排: 大会特邀和主题报告由大会学术委员会提名并邀请, 每人报告 30 分钟。分组学术报告及讨论: 每人 15 分钟。

本次论坛只印刷内部会议报告文集, 不公开发表; 参会者请根据各议题撰写文章, 投稿文章的内容可以是已经发表的优秀成果和未公开发表的论文, 也可以直接提交学术报告的 PPT 文件。

(大会组委会 供稿)