

# 深部灰岩单轴蠕变特性试验研究

刘东燕<sup>1</sup>, 赵宝云<sup>1</sup>, 刘保县<sup>2,3</sup>, 薛凯喜<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039;  
3. 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:**采用 MTS815 液压伺服岩石试验系统和 DISP-2 声发射监测系统, 对重庆市某煤矿深部灰岩进行了单轴蠕变压缩实验, 对单轴蠕变实验过程中伴随的声发射特征进行了研究, 认为岩石的声发射特征能很好的表征岩石整个蠕变变形过程, 包括岩石微观结构如晶格缺陷的扩散、孔隙裂隙的张合、粒间协调变形及微观破裂的产生、扩散贯通等岩石蠕变特征。同时对实验曲线进行了不同的模型参数的反演, 认为用对数函数型及指数函数型模型均能很好的表征该类灰岩蠕变变形性能, 且二类模型中对数模型为最佳模型。

**关键词:**蠕变; 声发射; 蠕变试验

**中图分类号:** TU451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0033-05

## Uniaxial Experimental Analysis on Creep Properties of Deep Limestone

LIU Dong-yan<sup>1</sup>, ZHAO Bao-yun<sup>1</sup>, LIU Bao-xian<sup>2,3</sup>, XUE Kai-xi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China; 3. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resource & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The uniaxial creep tests were carried out for deep limestone from Chongqing adopted by the MTS815 servo-controlled rock mechanical test system. Meanwhile, the DISP-2 based AE system was used to test acoustic emission (AE) signal. It is found that AE can better reflect rock microstructure such as diffusion of lattice defects, opening and close of the pore and fracture, compatible deformation among particles, the generation and connection of micro ruptures. Through different creep model parameter inversion, it is concluded that either the logarithmic function creep model or the exponential function can better reflect deep rock creep deformation behavior and the logarithmic function creep model is much better.

**Key words:** creep; acoustic emissions; creep experimentation

深部地下工程的开挖和施工, 往往会带来许多难以预测的问题, 如岩爆、瓦斯爆炸、突水、顶板大面积来压及采空区失稳等。为了避免这些突发性地质灾害对生命财产造成的危害, 同时也为了尽量减少重大事故的发生, 必须对深部岩体的力学特征进行深入细致的研究。岩石工程, 特别是矿山地下开采,

随着向深部进行, 围岩压力随之增大。高应力岩体的破坏方式主要分为岩爆和大变形 2 种, 而大变形是一种流变, 其中蠕变是主要因素<sup>[1]</sup>。

室内岩石蠕变试验是了解岩石流变力学特性的重要研究方法之一。如何根据蠕变试验资料, 了解岩石内部的破裂规律、选择适当的流变模型, 并确定

收稿日期: 2009-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(50504011); 重庆大学研究生科技创新基金(200909C1018)

作者简介: 刘东燕(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学及地下工程方面研究, (E-mail)liudy@cqu.edu.cn。

相应的流变参数,是岩石流变研究领域的重要课题。而岩石的声发射作为岩石破坏过程中的一种伴生现象越来越多的应用在岩石试验过程中<sup>[2-6]</sup>,就蠕变方面曹树刚等<sup>[7]</sup>对突出煤体单轴压缩和蠕变状态下的声发射对比进行了实验研究。对深部岩体而言,许多学者对其蠕变特性进行了研究<sup>[8-12]</sup>,而对蠕变状态下的声发射研究尚不多见。论文以重庆市万盛区某煤矿掘进巷道灰岩为例,对其单轴蠕变实验过程中伴随的声发射特征进行了研究,同时用对数函数型及指数函数型对实验曲线进行了模型参数的反演,依据实验数据,得到了反映其蠕变特性经验公式,并对参数进行了求解。

## 1 深部灰岩蠕变试验及声发射特性

### 1.1 蠕变试验装置

试验设备采用美国 MTS 公司生产的 MTS815<sup>[13-14]</sup> 岩石材料力学试验机。该材料试验机主要测试高强度高性能固体材料在复杂应力条件下的力学性质以及渗流特性。可以进行岩石的抗拉试验、单轴压缩试验、在常温 and 高温下的三轴压缩试验、循环压缩试验、蠕变试验、渗透性试验。轴向最大加载荷载 2 800 kN,围压最大 80 MPa,孔压最大 80 MPa,温度最高 200℃。测试精度高性能稳定,可以进行高低速数据采集,采用力、位移、轴向应变、横向应变等控制方式。通过轴向和横向传感器就可以测试材料的应力-应变全过程曲线。声发射装置采用美国物理声学公司生产的 DISP 系列 PCI-2 全数字化声发射监测系统。

### 1.2 试样及实验过程

试样选取重庆市某煤矿掘进巷道围岩中具代表性的石灰岩为研究对象,从现场钻取岩芯经实验室在加工,制备成  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的标准圆柱形试样。

蠕变试验过程中,室温调至 28℃ 以更好的反映岩石所处的温度环境,同时保持加载过程与声发射监测同步进行。加载速率选用单轴压缩荷载与时间曲线上直线段的平均斜率 13.78 kN/min 加载至设定荷载。对声发射监测系统,设定声发射监测的采样时间间隔为 50  $\mu\text{s}$ ,频率范围为 100~10 000 Hz。为减小端面效应的影响,试样两端面均涂固体硬脂酸。在岩样侧面磨 2 个边长为 8 mm $\times$ 8 mm 的对称平面,用以安装声发射传感器。传感器与岩样之间用黄油进行耦合,并用胶带固定。单轴蠕变实验装置(图 1)。

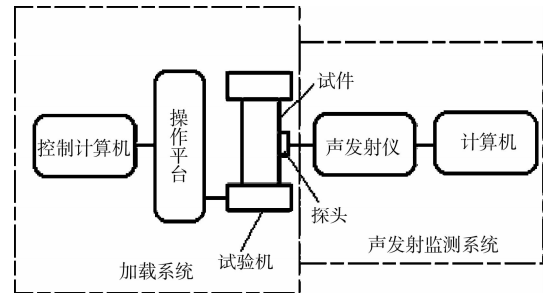


图 1 试验装置

### 1.3 深部灰岩声发射特性

就岩石而言其内部存在固有缺陷,在外力条件下,内部缺陷可能激活造成岩石等固体材料内部损伤、破坏,损伤破坏过程中释放应变能,并以弹性波的形式快速释放、传播,这种现象称作声发射 (Acoustic Emissions, 简称 AE)。深部巷道在高地应力作用下,高地应力的释放、卸荷使得临空一侧的岩体往往处于蠕变状态,条件具备时有可能发生破裂、突出。因此,认识岩体蠕变状态下的声发射特征,对探讨深部隧道、巷道开挖等施工过程中的变形和围岩破裂机理,进行有效的预测预防具有非常重要的意义。

图 2、3 分别为试样单轴轴向恒定荷载为 50 kN、70 kN、90 kN 时轴向应变、声发射振铃计数 counts 与时间关系曲线,以及单轴轴向应变、声发射累计振铃计数与时间关系曲线与对比图。

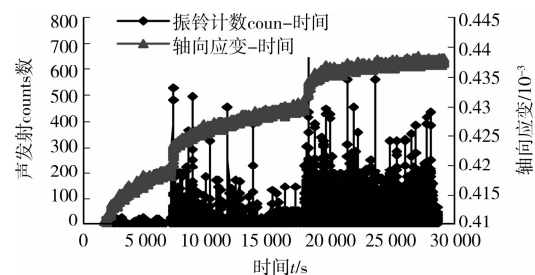


图 2 轴压 50 kN、70 kN、90 kN 下岩石单轴蠕变及声发射振铃计数关系曲线

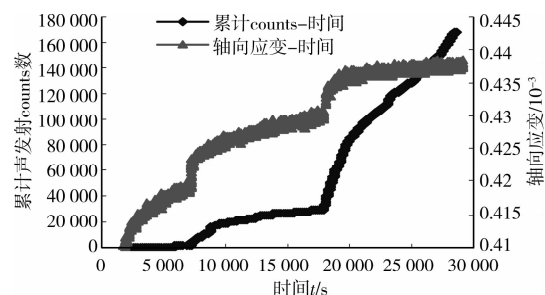


图 3 轴压 50 kN、70 kN、90 kN 下岩石单轴蠕变及声发射累积振铃计数关系曲线

实验表明:

1) 加载恒定初期,微裂纹进一步扩展,声发射振铃计数(counts 事件数)较为活跃随时间的推移,其幅度逐渐趋于平稳。当蠕变进入等速阶段,处于衰减蠕变过程,AE 振铃事件比呈快速递减趋势,至较低水平后趋于稳定。

2) 轴向荷载不同,声发射频率亦不同。随着轴向荷载的增加声发射振铃计数(counts 事件数)发生的次数越来越多,且越来越密集,反映岩体的微裂纹随着荷载的增加而进一步扩展,在较高恒定荷载下损伤扩展加剧,蠕变逐渐向加速蠕变阶段过渡。

3) 深部灰岩试件声发射累计振铃累积计数一时间关系曲线与轴向应变一时间曲线(蠕变曲线)很好的吻合,能够很好地体现蠕变的变化趋势。

4) 岩石在蠕变时效条件下的渐近破坏是损伤积累与断裂扩展的结果。岩石的蠕变行为及蠕变破坏起源于其损伤随时间的逐渐累积,并伴随有细、宏观裂纹的时效扩展。声发射特征能很好的表征岩石整个蠕变变形过程包括岩石微观结构如晶格缺陷的扩散、孔隙裂隙的张合、粒间协调变形及微观破裂的产生、扩散贯通等岩石蠕变特征。

## 2 深部灰岩蠕变模型及参数识别

通过实验—理论—应用证实,岩石的蠕变本构模型可用于描述岩石应力—应变关系随时间变化的规律。根据岩石蠕变试验资料建立(或选取)符合实际的蠕变模型并确定相应的参数是岩石蠕变学研究的一项重要内容。蠕变模型应能正确地描述岩石内在的本质规律,反映岩石的蠕变特性及其变形机理。然而,由于岩石材料的复杂性,要建立一种能全面反映岩石各种变形机制且普遍适用的本构模型几乎是不可能的,即使找到了这种模型,也会因为模型结构太复杂、参数太多且难以确定等原因而不能有效地应用于工程实际。因而,建立能较好地反映岩石的几种主要的变形特性且简单实用的本构模型是十分必要的。

在长期的研究工作中,相关学者曾提出过许多描述岩石蠕变特性的本构模型。从形式上看,这些本构模型大体上可以分为3类:经验公式,组合模型和积分形式的模型<sup>[15]</sup>。经验模型理论是从岩石的蠕变特性出发,根据岩石蠕变的试验曲线,直接拟合出岩石蠕变的经验本构关系式,经验模式一般可分为应力、应变关系的经验函数型和应力、应变速率关

系的经验函数型(即速率型本构关系)。对每种不同的岩石材料,甚至不同的试验条件,可以得到不同的经验模型。通常采用的岩石蠕变经验模型主要有:幂律型、对数型、指数型以及三者的混合方程。文章分别采用对数函数型、指数函数型蠕变模型展开研究:

1) 对数函数型 对数模型的蠕变方程有较多的相近形式,选用半经验的蠕变方程公式为:

$$\epsilon(t) = a + b \ln(t + c) \quad (1)$$

式中  $a$ 、 $b$  和  $c$  为蠕变常数,由试验确定。该模型右式3项分别表示弹性应变、瞬时蠕变和稳态蠕变。

2) 指数函数型

$$\epsilon(t) = A[1 - e^{f(t)}] \quad (2)$$

式中  $A$  为试验常数,  $f(t)$  是时间的函数依据试验取  $f(t) = -k(t - xc)$ , 其中,  $k$  与  $xc$  为试验常数。

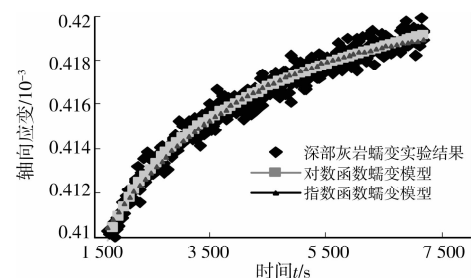


图4 恒载 50 kN 时 2 种模型拟合结果与试验值的对比

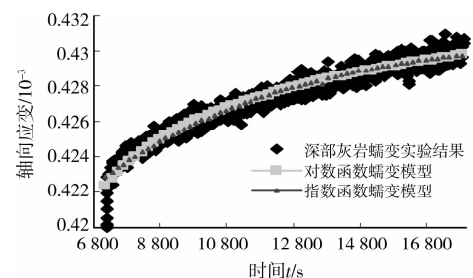


图5 恒载 70 kN 时 2 种模型拟合结果与试验值的对比

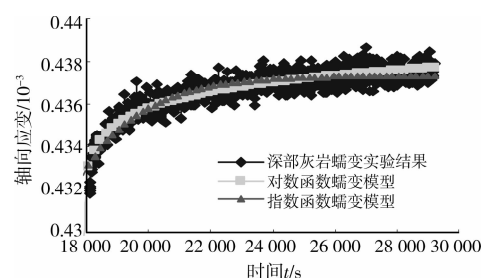


图6 恒载 90 kN 时 2 种模型拟合结果与试验值的对比

图 4、5、6 分别为不同荷载下 2 种模型拟合结果与试验值的对比,可以看出不管是对数函数型模型还是指数函数型模型均能与试验曲线很好的吻合较为理想,均能很好的表征该类灰岩蠕变变形性能。表 1 为该深部灰岩试件蠕变模型参数识别表,2 类

模型的相关系数  $R^2$  均接近 1,充分说明文中所提及的 2 类模型的适应性与合理性。通过对相关系数  $R^2$  的比较不难发现对数函数模型较指数函数模型反演效果要好。

表 1 深部灰岩蠕变模型参数识别表

模型	参数	荷载等级/kN		
		50	70	90
对数	$a$	0.384 19	0.396 89	0.426 9
	$b$	-0.004 01	-0.003 5	-0.001 16
	$c$	-1 140.77	-5 724.51	-17 874.07
	相关系数 $R^2$	0.975 81	0.944 47	0.883 51
指数	$A$	0.420 01	0.431 15	0.437 36
	$xc$	-7 683.75	-16 475.31	9 164.88
	$k$	0.000 4	0.000 17	0.000 52
	相关系数 $R^2$	0.971 42	0.937 83	0.841 2

### 3 结论

对重庆市某深部灰岩进行了单轴蠕变压缩试验,获得了该灰岩的蠕变与蠕变过程中伴随的声发射之间的关系,是研究该矿区深部灰岩的重要基础资料,同时也丰富了该地区深部灰岩蠕变研究的试验数据。主要结论:

1)岩石的蠕变行为及蠕变破坏表现为其损伤随时间的逐渐累积,并伴随有细、宏观裂纹的时效扩展。声发射特征能很好的表征岩石整个蠕变变形过程包括岩石微观结构如晶格缺陷的扩散、孔隙裂隙的张合、粒间协调变形及微观破裂的产生、扩散贯通等岩石蠕变特征。

2)蠕变过程中,AE 累计振铃数曲线与深部灰岩蠕变状态下体应变曲线相似。无论是 AE 振铃事件还是 AE 累计振铃数都能很好的反映该深部灰岩变形破坏规律。深部岩体受力变形过程中 AE 振铃事件比和 AE 累计振铃数的全面、深入的研究,有助于该矿巷道掘进过程中围岩变形控制,对深部岩体动力灾害的预测预报具有重要的指导意义。

3)对数函数型及指数函数型模型均能很好的表征该类灰岩蠕变变形性能,且 2 类模型中对数模型效果更佳。

#### 参考文献:

[1] 王永岩,齐王君,杨彩虹,等.深部岩体非线性蠕变规律研究[J].岩土力学,2005,26(1):117-121.

WANG YONG-YAN, QI WANG-JUN, YANG CAI-HONG, et al. A study of nonlinear creep law in deep rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 117-121.

[2] ZAGORSKII L N, SHKURATNIK V L, PUSTOVOITOVA N A. Increase information content of the resonance acoustic method for determination of the rock mass properties[J]. Journal of Mining Science, 2004, 40(4): 350-354.

[3] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等.单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2499-2503.

LI SHU-LIN, YIN XIAN-GANG, WANG YONG-JIA, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503.

[4] 谢强,张永兴,余贤斌.石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性[J].重庆建筑大学学报,2002,24(1):19-22,58.

XIE QIANG, ZHANG YONG-XING, YU XIAN-BIN. Study on acoustic emission of limestone in uniaxial compression test [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(1): 19-22, 58.

[5] 付小敏.典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J].成都理工大学学报:自然科学版,2005,32(1):17-21.

FU XIAO-MIN. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology, 2005, 32(1): 17-

- 21.
- [6] 谭云亮,周辉,王泳嘉,等. 模拟岩石声发射及混沌性的PCA模型[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(4): 802-807.  
TAN YUN-LIANG, ZHOU HUI, WANG YONG-JIA, et al. PCA model for simulating AE and chaos in rock failure process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(4): 802 - 807.
- [7] 曹树刚,刘延保,张立强,等. 突出煤体单轴压缩和蠕变状态下的声发射对比试验[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1264-1268.  
CAO SHU-GANG, LIU YAN-BAO, ZHANG LI-QIANG, Experimental on acoustic emission of outburst hazardous coal under uniaxial compression and creep[J]. Journal of China Coal Society, 2007. 32(12): 1264-1268.
- [8] 蒋斌松,蔡美峰,贺永年,等. 深部岩体非线性 Kelvin 蠕变变形的混沌行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1862-1867.  
JIANG BIN-SONG, CAI MEI-FENG, HE YONG-NIAN, et al. Chaotic behavior of nonlinear kelvin creep of rock mass in deep ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, 25(9): 1862-1867.
- [9] 刘建忠,杨春和,李晓红,等. 万开高速公路穿越煤系地层的隧道围岩蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3794-3798.  
LIU JIAN-ZHONG, YANG CHUN-HE, LI XIAO-HONG, et al. Testing study on creep of coal rocks in the tunnel of Wankai Speedway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3794-3798.
- [10] 丁志坤,吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数辨识[J]. 岩土力学, 2004, 25(S1): 37-40.  
DING ZHI-KUN, LU AI-ZHONG. Parameter identification of non-stationary creep equation of rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S1): 37-40.
- [11] FENG XIA-FING, CHEN BING-MI, YANG CHENG-XIANG, et al Identification of visco-elastic models for rocks using genetic programming coupled with the modified particle swarm optimization algorithm [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43: 789- 80.
- [12] 陈沅江,潘长良,曹平,等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 209-214.  
CHEN YUAN-QIANG, PAN CHANG-LIANG, CAO PING, et al. A new mechanical model for soft rock rheology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 209-214.
- [13] MTS. MTS rock and concrete mechanics testing systems[M]. MTS Systems Corporation, 2003.
- [14] MTS. Teststar materials testing workstation installation manual [M]. MTS Systems Corporation, 2003.
- [15] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.

(编辑 王秀玲)

(上接第 25 页)

- [14] 王钦华,顾明. 钢天线风振疲劳研究[J]. 同济大学学报, 2008, 36(8): 1040-1044.  
WANG QIN-HUA, GU MING. Directional wind-induced fatigue of a real steel antenna [J]. Journal of Tongji University, 2008, 36(8): 1040-1044.
- [15] 王钦华,顾明. 钢质天线结构风振疲劳寿命估算方法比较研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 78-81.  
WANG QIN-HUA, GU MING. Comparison between methods of structural fatigue life estimation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 78-81.
- [16] 胡毓仁,陈伯真. 船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [17] 王钦华,顾明. 圆形线状结构风致响应的分析方法[J]. 振动工程学报, 2010, 23(2): 151-157.  
WANG QIN-HUA, GU MING. Wind-induced response analysis for circular section structure [J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(2): 151-157.
- [18] ESDU. Mean force, pressures and flow velocities for circular cylindrical structures: finite-length cylinders in uniform and shear flow[R]. ESDU International. 1981, London.

(编辑 胡玲)