

# 三轴压缩下含瓦斯煤样蠕变特性试验研究

王登科<sup>1</sup>, 刘建<sup>1</sup>, 尹光志<sup>2,3</sup>, 韦晓吉<sup>4</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 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 400044; 4. 云南省地方煤矿事业局 云南省地方煤矿设计研究院, 昆明 云南 650011)

**摘要:** 介绍自主研发的含瓦斯煤岩三轴蠕变试验系统。利用三轴蠕变试验系统对含瓦斯煤样进行一系列三轴蠕变试验, 得到不同蠕变载荷、不同围压和不同瓦斯压力条件下的蠕变结果。试验结果显示, 蠕变载荷、围压和瓦斯压力是影响含瓦斯煤样蠕变特性的重要因素; 含瓦斯煤样的蠕变行为可以表现出衰减蠕变和非衰减蠕变 2 种形态; 减速蠕变阶段是弹性后效的结果; 稳态蠕变速率受蠕变载荷、围压和瓦斯压力的影响, 并且随蠕变载荷和瓦斯压力的增大而增大, 随围压的增大而减小; 加速蠕变阶段是含瓦斯煤样破坏的开始。基于试验结果, 详细分析含瓦斯煤样的减速蠕变和稳态蠕变阶段的蠕变速率, 给出能分别描述减速和稳态蠕变阶段蠕变速率的幂函数和指数函数方程。利用规范化方法建立能反映稳态蠕变速率、蠕变载荷、围压和瓦斯压力之间关系的数学方程, 利用该方程可以很容易地预测各种应力状态下稳态蠕变速率的大小。

**关键词:** 采矿工程; 含瓦斯煤岩; 三轴压缩; 蠕变试验; 蠕变速率

**中图分类号:** TD 32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)02 - 0349 - 09

## TEST STUDY OF CREEP PROPERTIES OF GAS-BEARING COAL SPECIMENS UNDER TRIAXIAL COMPRESSION

WANG Dengke<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, YIN Guangzhi<sup>2,3</sup>, WEI Xiaoji<sup>4</sup>

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China*; 3. *Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China*; 4. *Yunnan Local Mine Design and Research Institute, Bureau of Local Coal Mines in Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650011, China*)

**Abstract:** A self-developed triaxial creep system of gas-bearing coal is introduced firstly. A series of triaxial creep tests on gas-bearing coal specimens are carried out by using the creep system, and results of the creep tests under different creep stresses, confining pressures and gas pressures are obtained. The results show that creep stress, confining pressure and gas pressure are the important factors affecting the creep properties of the coal specimens; the creep behaviors of the specimens can be split into two parts mainly: one is the attenuating creep, the other is the non-attenuating creep. Decelerating creep stage is caused by elastic aftereffect; by the actions of creep stress, confining pressure and gas pressure during creep tests, steady-state creep rate increases with the increasing of confining stress and gas pressure, and decreases with the increasing of confining pressure. Accelerating creep

**收稿日期:** 2009 - 07 - 30; **修回日期:** 2009 - 10 - 09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50874124, 50534080); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221502); 重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC, 2008BA6028)

**作者简介:** 王登科(1980 - ), 男, 博士, 2003年毕业于湖南科技大学采矿工程专业, 主要从事岩石力学与矿业工程方面的研究工作。E-mail: wangdengke99@yahoo.com.cn

stage marks the starting of the failure of coal specimens. Based on the creep results, the creep rates at decelerating creep stage and steady-state creep stage are analyzed in detail; and in addition, a power function and an exponent function are proposed which can effectively describe the creep rates at transient creep stage and steady-state creep stage respectively. By a normalized method, a mathematical equation is constructed which can model the relationship among the steady-state creep rate, creep stress, confining pressure and gas pressure. And using this equation, the value of steady-state creep rate under various stress conditions can be estimated easily.

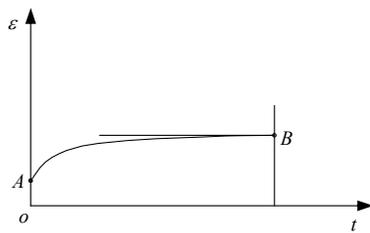
**Key words:** mining engineering; gas-bearing coal; triaxial compression; creep test; creep rate

### 1 引言

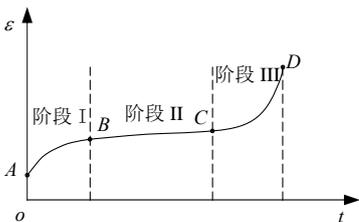
煤与瓦斯突出是煤矿井下动力灾害现象之一，大多数产煤国家都发生过煤与瓦斯突出，煤与瓦斯突出已经成为煤炭工业中重大灾害的主要原因之一<sup>[1]</sup>。自从第一次报道法国鲁尔煤田 1843 年发生煤与瓦斯突出以来，30 000 多起煤与瓦斯突出事件在全世界范围内发生。最近报道显示已经有 14 000 多起煤与瓦斯突出在我国 200 多个煤矿发生<sup>[2]</sup>。煤与瓦斯突出已经成为煤矿安全专家面前最为棘手的问题之一<sup>[1~3]</sup>。

煤与瓦斯突出可以看成一种时效性问题<sup>[4]</sup>。基于时效的岩石类材料变形受其矿物组成和结构特性的影响，并且主要通过蠕变试验、松弛试验和准静态单调加载试验等手段来研究<sup>[5]</sup>。在蠕变试验过程中，煤样在不同载荷工况下的蠕变特性是不一样的，一般可分为衰减蠕变和非衰减蠕变，如图 1 所示<sup>[6]</sup>。煤样的总蠕变变形可表示为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon(t) \tag{1}$$



(a) 衰减蠕变



(b) 非衰减蠕变

图 1 蠕变变形与时间的关系图<sup>[6]</sup>

式中： $\varepsilon_0$  为减速变形， $\varepsilon(t)$  为与衰减蠕变和非衰减蠕变相关的变形。

最近几十年，人们利用各种设备和手段对岩石类材料在不同载荷条件下的蠕变行为进行了大量的试验及理论研究<sup>[4, 5, 7~14]</sup>。这些工作的开展为岩石类材料蠕变特性的研究提供了一个良好的试验和理论平台。然而，在采矿工程和地下工程中，岩石类材料(或煤岩材料)一般都处于受压应力状态，并且被一种或几种流体所饱和或部分饱和。煤岩属于一种典型的多孔介质，并具有很强的瓦斯吸附能力<sup>[4, 15]</sup>。因此，本文在研究煤岩在不同载荷条件下的蠕变特性时，需要考虑瓦斯吸附作用所带来的影响。在前人的研究基础上，以含瓦斯煤样为研究对象，首先描述了自主研发的含瓦斯煤样三轴蠕变试验系统；然后给出了含瓦斯煤样在各种应力状态下的三轴蠕变试验结果；最后对煤样蠕变的 3 个阶段进行了分析，重点研究了减速蠕变和稳态蠕变的蠕变速率，并构造出了相应的蠕变速率计算公式。

### 2 试验系统描述

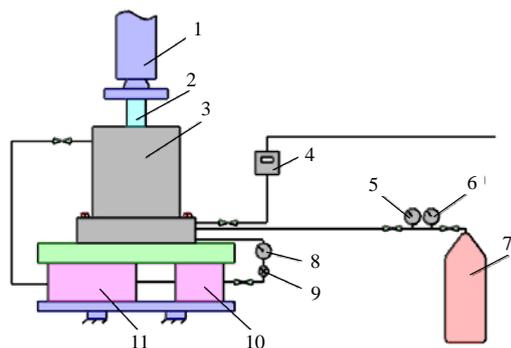
本文中所有的三轴蠕变试验都是在装配有自主研发的三轴瓦斯渗流装置的伺服控制材料系统中完成的。整套试验装备由加载系统、测量系统和瓦斯供给系统组成，如图 2 所示。加载系统由材料试验机和三轴瓦斯渗流装置构成，测量系统由位移传感器和数据采集软件构成，瓦斯供给系统由高压瓦斯罐和减压阀构成。

在蠕变试验过程中，施加在煤样上的蠕变载荷由材料试验机提供，围压由液压油泵提供，瓦斯压力则通过减压阀来控制。试验开始后，瓦斯气体自高压瓦斯罐出来后，经由减压阀、瓦斯入口、紫铜管和煤样上部压头后，最后到达煤样内部。

### 3 含瓦斯煤样三轴蠕变试验

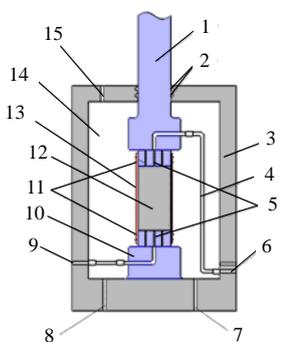
不同围压和不同瓦斯压力条件下的三轴蠕变

Fig.1 Relationship curves of creep deformation vs. time<sup>[6]</sup>



1—材料试验机; 2—煤样上部压头; 3—三轴压力室; 4—流量计;  
5—气压表; 6—减压阀; 7—高压瓦斯罐; 8—油压表; 9—液压控制阀;  
10—液压油泵; 11—液压油缸

(a) 试验系统组成



1—煤样上部压头; 2—密封环; 3—筒体; 4—紫铜管; 5—通气孔; 6—瓦斯入口; 7—液压油入口; 8—液压油出口; 9—瓦斯出口; 10—金属底座; 11—金属箍; 12—煤样; 13—热缩管; 14—液压室; 15—排气孔

(b) 三轴压力室内部结构

图 2 试验系统示意图

Fig.2 Sketch diagram of testing system

试验都是在常温常压下完成的, 并且试验过程中不考虑温度影响。根据蠕变试验结果, 所有的蠕变变形过程都可以分为衰减蠕变和非衰减蠕变。在固定围压( $\sigma_3$ )和瓦斯压力( $p$ )条件下, 含瓦斯煤样在相对较低的蠕变载荷( $\sigma_1$ )下表现出衰减蠕变特性, 在相对较高蠕变载荷下则表现出非衰减蠕变特性(见图 3); 在固定蠕变载荷( $\sigma_1$ )和瓦斯压力( $p$ )条件下, 含瓦斯煤样在相对较高的围压下表现出衰减蠕变特性, 在相对较低的围压下则表现出非衰减蠕变特性(见图 4); 在固定蠕变载荷( $\sigma_1$ )和围压( $\sigma_3$ )条件下, 含瓦斯煤样在相对较低的瓦斯压力下表现出衰减蠕变特性, 在相对较高的瓦斯压力下则表现出非衰减蠕变特性(见图 5)。因此, 含瓦斯煤样的蠕变变形可分别随着蠕变载荷和瓦斯压力的增加以及围压的减小, 从衰减蠕变阶段过渡到非衰减蠕变阶段中去。

由图 3~5 可知, 蠕变载荷( $\sigma_1$ )、围压( $\sigma_3$ )和瓦斯压力( $p$ )对含瓦斯煤样的蠕变行为有着不可忽

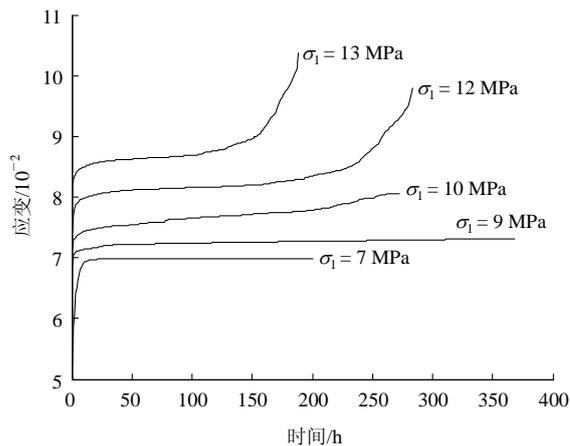


图 3  $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$  及  $p = 0.2 \text{ MPa}$  时不同蠕变载荷( $\sigma_1$ )条件下的蠕变曲线

Fig.3 Creep strain vs. time for different creep stresses with  $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$  and  $p = 0.2 \text{ MPa}$

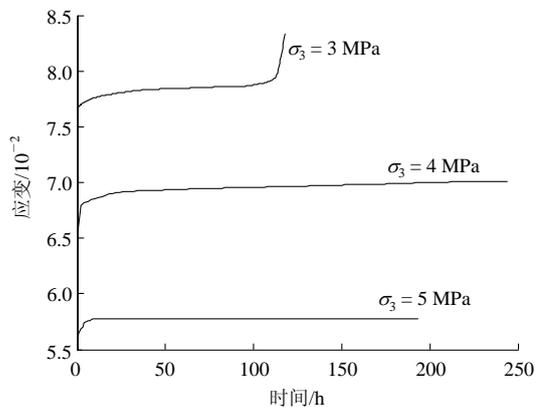


图 4  $\sigma_1 = 13 \text{ MPa}$  及  $p = 0.4 \text{ MPa}$  时不同围压( $\sigma_3$ )条件下的蠕变曲线

Fig.4 Creep strain vs. time for different confining pressures with  $\sigma_1 = 13 \text{ MPa}$  and  $p = 0.4 \text{ MPa}$

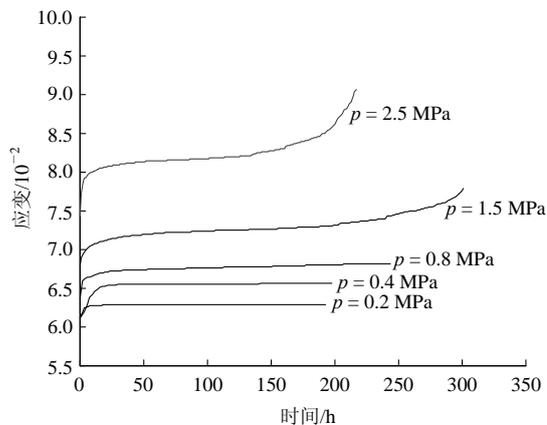


图 5  $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$  及  $\sigma_1 = 15 \text{ MPa}$  时不同瓦斯压力( $p$ )条件下的蠕变曲线

Fig.5 Creep strain vs. time for different gas pressures with  $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$  and  $\sigma_1 = 15 \text{ MPa}$

视的影响。

一个典型的非衰减蠕变由减速蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段组成(见图 1(b))。根据 E. Maranini 等<sup>[7, 11, 16]</sup>的相关研究成果,这 3 个蠕变阶段皆受主偏斜应力( $s_1$ )的影响。主偏斜应力可表示为

$$s_1 = \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

由于煤样在试验过程中是一种被瓦斯气体饱和的多孔介质,所以必须考虑瓦斯吸附的影响。当煤样吸附瓦斯时会产生膨胀应力,并对煤样的蠕变特性产生重要影响。膨胀应力可表示<sup>[17]</sup>为

$$\sigma_s = \frac{2a\rho RT(1-2\nu)\ln(1+bp)}{3V_m} \quad (3)$$

式中:  $a$  和  $b$  均为瓦斯吸附常数;  $\nu$  为煤岩泊松比;  $\rho$  为密度;  $R$  为摩尔气体常数,  $R = 8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ ;  $T$  为绝对温度;  $V_m$  为摩尔体积,  $V_m = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ 。

对于被流体饱和的介质而言,通常利用 K. Terzaghi<sup>[18]</sup>提出的有效应力来描述各种载荷条件下的应力状态。考虑到式(3),总应力与有效应力之间的关系可表示<sup>[19, 20]</sup>为

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij} - \left[ \varphi p + \frac{2a\rho RT(1-2\nu)\ln(1+bp)}{3V_m} \right] \delta_{ij} \quad (4)$$

式中:  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号,  $\varphi$  为材料的孔隙度。

因此,根据式(2), (4), 含瓦斯煤样的有效主偏斜应力可表示为

$$s'_1 = \frac{2}{3}(\sigma'_1 - \sigma'_3) = \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) = s_1 \quad (5)$$

根据图 3, 4, 很容易理解含瓦斯煤样的蠕变特性随蠕变载荷( $\sigma_1$ )及围压( $\sigma_3$ )的变化而变化,因为根据式(5),只要改变蠕变载荷或围压大小,就等于改变了有效主偏斜应力的大小。根据式(5)还可以发现瓦斯压力( $p$ )的改变是不会带来有效主偏斜应力大小改变的,但是含瓦斯煤样的蠕变特性确实是随着瓦斯压力的改变而发生了变化了(见图 5)。导致这种变化的原因是:当煤样中吸附瓦斯气体后,煤样的物理力学性质发生了改变<sup>[4, 21~24]</sup>。所以,虽然瓦斯压力改变不了煤样所受的有效主偏斜应力大小,但是它却能改变煤样内部的物理力学性质,从而成为影响煤样蠕变行为的重要因素之一。

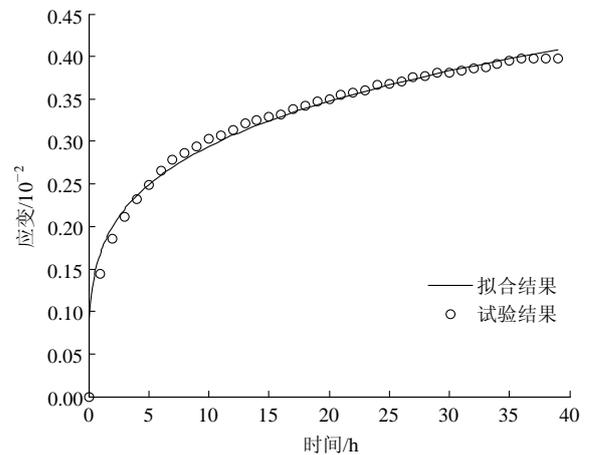
## 4 含瓦斯煤样三轴减速蠕变描述

减速蠕变是煤样非弹性流动的最初阶段。不同载荷条件下的减速蠕变持续时间会有所不同。在减速蠕变阶段中,蠕变速率会逐渐变小,直到进入稳态蠕变阶段。本文采用 L. Ma 和 J. J. K. Daemen<sup>[13]</sup>提出的幂函数来描述含瓦斯煤样的减速蠕变变形:

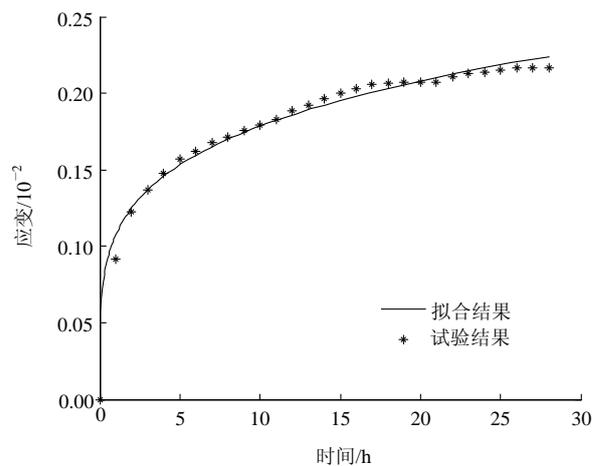
$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \alpha t^\beta \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  均为材料常数。

图 6 给出了部分不同载荷条件下的减速蠕变结果。为统一起见,图 6 中这些蠕变曲线在应变轴上都已调至截距为 0。常数  $\alpha$  和  $\beta$  可以通过 Matlab 程序利用非线性回归方法拟合得到(见表 1)。



(a)  $\sigma_1 = 4.66 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ ,  $p = 0.4 \text{ MPa}$



(b)  $\sigma_1 = 11.6 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$ ,  $p = 0.8 \text{ MPa}$

图 6 减速蠕变试验结果及拟合曲线

Fig.6 Test results of decelerating creep and their fitting curves

表 1 常数  $\alpha$  和  $\beta$  的拟合结果  
Table 1 Fitting results of constants  $\alpha$  and  $\beta$

$\sigma_3/\text{MPa}$	$\sigma_1/\text{MPa}$	$p/\text{MPa}$	$\alpha/10^{-3}$	$\beta$
2	4.66	0.2	0.83	0.341
3	10.00	0.2	0.52	0.344
4	10.00	0.2	1.37	0.213
4	11.00	0.2	1.14	0.325
4	12.00	0.2	2.31	0.188
4	13.00	0.2	2.46	0.262
5	13.80	0.2	1.84	0.283
3	10.00	0.4	2.32	0.280
4	12.00	0.4	2.78	0.307
5	11.00	0.4	4.75	0.335
5	12.00	0.4	3.34	0.275
5	13.00	0.4	2.64	0.224
5	13.80	0.4	3.44	0.328
3	11.00	0.8	2.67	0.303
3	10.00	0.8	1.37	0.242
4	10.00	0.8	1.07	0.221
4	11.00	0.8	2.57	0.282
4	12.00	0.8	2.31	0.243
5	11.00	0.8	1.82	0.307
5	12.00	0.8	4.03	0.194
5	13.00	0.8	1.56	0.255
5	13.80	0.8	3.21	0.302
6	11.00	0.8	1.92	0.368
6	12.00	0.8	2.15	0.425
6	13.00	0.8	3.24	0.213
6	14.00	0.8	1.58	0.362
6	15.00	0.8	2.54	0.291
4	12.00	1.5	1.48	0.374
5	12.00	1.5	3.62	0.188
5	13.80	1.5	2.51	0.127
6	10.00	1.5	2.52	0.356
6	11.00	1.5	2.23	0.162
6	12.00	1.5	1.74	0.303
6	13.00	1.5	1.58	0.263
5	13.80	2.5	3.51	0.378

对式(6)求时间导数, 便可得到减速蠕变阶段的蠕变速率:

$$\dot{\epsilon}_t = \alpha\beta t^{\beta-1} \quad (7)$$

根据 L. Ma 和 J. J. K. Daemen<sup>[13]</sup>的研究结果, 时间  $t$  的幂为  $-0.68$ 。根据表 1 中的数据, 可以得到

$t$  的幂的平均值为  $-0.72$ , 其标准差为  $0.067$ 。

图 7 给出了应力条件  $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$ ,  $p = 0.8 \text{ MPa}$  及  $\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$  下减速蠕变速率的试验结果和拟合结果的比较情况, 可以看出两者吻合得很好。

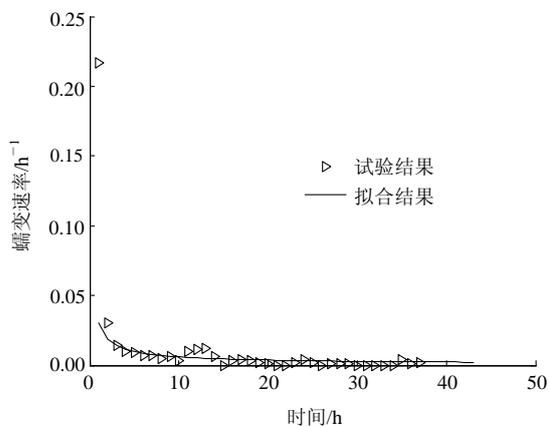


图 7 应力条件  $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$ ,  $p = 0.8 \text{ MPa}$  及  $\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$  下的减速蠕变速率曲线

Fig.7 Decelerating creep rate vs. time with  $\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$ ,  $p = 0.8 \text{ MPa}$  and  $\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$

根据试验结果, 含瓦斯煤样的减速蠕变本质上是由弹性后效引起的。弹性后效是由于材料的热弹性性质决定的, 相关详细讨论见 S. P. Timoshenko<sup>[25]</sup>的研究。从图 3~5 可以看出, 不同的应力状态对应于不同的蠕变行为。总之, 如果蠕变载荷低于长期强度, 煤样就会表现出衰减蠕变行为, 相反地, 如果蠕变载荷高于长期强度则会表现出非衰减蠕变行为<sup>[4, 6, 14, 26, 27]</sup>。实际工程中, 为简单起见人们往往将最终的长期强度取为材料的屈服应力<sup>[27]</sup>。所以, 判断非衰减蠕变是否出现, 只要判断施加在煤样上的蠕变载荷是否超过屈服应力即可。

## 5 含瓦斯煤样三轴稳态蠕变描述

在稳态蠕变阶段, 蠕变曲线可以用直线来近似, 直线的斜率即稳态蠕变速率。由于在工程应用中需要知道材料何时进入稳态蠕变阶段以及稳态蠕变速率的大小, 因此稳态蠕变速率已经成为人们的主要研究动力<sup>[13, 28]</sup>。

根据试验结果, 处理后得到了含瓦斯煤样在不同载荷条件下的稳态蠕变速率值。表 2 给出了在固定围压, 固定瓦斯压力及不同蠕变载荷条件下的蠕变速率; 表 3 给出了在固定蠕变载荷、固定瓦斯压力及不同围压条件下的蠕变速率; 表 4 则给出了在固定蠕变载荷、固定围压及不同瓦斯压力条件下的

表 2 固定  $\sigma_3$  和  $p$  时不同蠕变载荷( $\sigma_1$ )条件下的稳态蠕变速率  
Table 2 Steady-state creep rates for different creep stresses( $\sigma_1$ ) with fixed  $\sigma_3$  and  $p$

$\sigma_3$ /MPa	$p$ /MPa	蠕变速率/h <sup>-1</sup>							
		$\sigma_1 = 10.0$ MPa	$\sigma_1 = 11.0$ MPa	$\sigma_1 = 11.6$ MPa	$\sigma_1 = 12.0$ MPa	$\sigma_1 = 13.0$ MPa	$\sigma_1 = 13.8$ MPa	$\sigma_1 = 14.0$ MPa	$\sigma_1 = 15.0$ MPa
4.0	0.2	$1.10 \times 10^{-5}$	$3.20 \times 10^{-5}$		$5.8 \times 10^{-5}$	$14.2 \times 10^{-5}$			
4.0	0.8	$1.20 \times 10^{-5}$	$3.10 \times 10^{-5}$	$7.5 \times 10^{-5}$					
5.0	0.4		$1.30 \times 10^{-5}$		$3.6 \times 10^{-5}$	$7.7 \times 10^{-5}$	$19.6 \times 10^{-5}$		
5.0	0.8		$1.70 \times 10^{-5}$		$4.5 \times 10^{-5}$	$8.6 \times 10^{-5}$	$20.5 \times 10^{-5}$		
6.0	0.8		$0.78 \times 10^{-5}$		$2.3 \times 10^{-5}$	$5.5 \times 10^{-5}$		$12.7 \times 10^{-5}$	$26.9 \times 10^{-5}$
6.0	1.5	$0.35 \times 10^{-5}$	$0.93 \times 10^{-5}$		$2.1 \times 10^{-5}$	$7.6 \times 10^{-5}$			

表 3 固定  $\sigma_1$  和  $p$  时不同围压( $\sigma_3$ )条件下的稳态蠕变速率  
Table 3 Steady-state creep rates for different confining pressures( $\sigma_3$ ) with fixed  $\sigma_1$  and  $p$

$\sigma_1$ /MPa	$p$ /MPa	蠕变速率/h <sup>-1</sup>			
		$\sigma_3 = 3$ MPa	$\sigma_3 = 4$ MPa	$\sigma_3 = 5$ MPa	$\sigma_3 = 6$ MPa
11.0	0.8	$6.5 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$0.78 \times 10^{-5}$
12.0	1.5		$9.7 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-5}$	$2.10 \times 10^{-5}$

表 4 固定  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  时不同瓦斯压力( $p$ )条件下的稳态蠕变速率  
Table 4 Steady-state creep rates for different gas pressures( $p$ ) with fixed  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$

$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	蠕变速率/h <sup>-1</sup>				
		$p = 0.2$ MPa	$p = 0.4$ MPa	$p = 0.8$ MPa	$p = 1.5$ MPa	$p = 2.5$ MPa
10.0	3.0	$3.2 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-5}$		
12.0	4.0	$5.8 \times 10^{-5}$	$6.1 \times 10^{-5}$	$7.8 \times 10^{-5}$	$9.7 \times 10^{-5}$	
13.8	5.0	$18.3 \times 10^{-5}$	$19.6 \times 10^{-5}$	$20.5 \times 10^{-5}$	$22.7 \times 10^{-5}$	$26.2 \times 10^{-5}$

蠕变速率。

根据表 2~4 中的数据, 不难得到: 稳态蠕变速率随着蠕变载荷和瓦斯压力的增加而增加, 随着围压的增加而减小。显然, 稳态蠕变速率的大小与蠕变载荷、围压及瓦斯压力有密不可分的关系, 且可以表示为此三者的函数。根据 K. S. Chan 等<sup>[28, 29]</sup>研究成果, 忽略温度影响后, 稳态蠕变速率可以统一地描述为

$$\dot{\epsilon}_s = f(\sigma_1)g(\sigma_3)h(p) \quad (8)$$

式中:  $f(\sigma_1)$ ,  $g(\sigma_3)$  和  $h(p)$  分别表示蠕变载荷、围压和瓦斯压力对蠕变速率的影响。

同时根据表 2~4 中的数据, 还可以分别绘制出受以上 3 个因素影响的稳态蠕变速率变化情况。图 8 给出了受蠕变载荷影响的稳态蠕变速率变化情况, 图 9 给出了受围压影响的稳态蠕变速率变化情况, 图 10 则给出了受瓦斯压力影响的稳态蠕变速率变化情况。

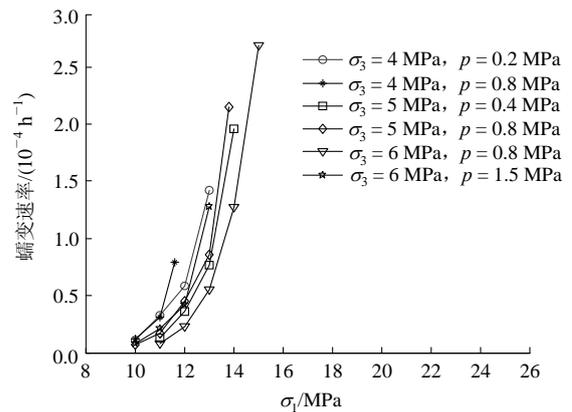


图 8 固定  $\sigma_3$  和  $p$  时稳态蠕变速率受蠕变载荷( $\sigma_1$ )的影响情况  
Fig.8 Steady-state creep rate vs. creep stress( $\sigma_1$ ) with fixed  $\sigma_3$  and  $p$

可以利用一个指数函数来拟合表 3 中的试验结果:

$$\dot{\epsilon}_s = A \exp(m\sigma_3) \quad (9)$$

式中:  $A$  和  $m$  均为常数。

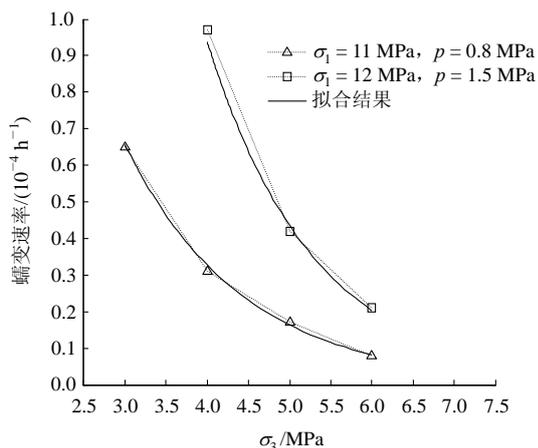


图 9 固定  $\sigma_1$  和  $p$  时稳态蠕变速率受围压( $\sigma_3$ )的影响情况  
Fig.9 Steady-state creep rate vs. confining pressure( $\sigma_3$ ) with fixed  $\sigma_1$  and  $p$

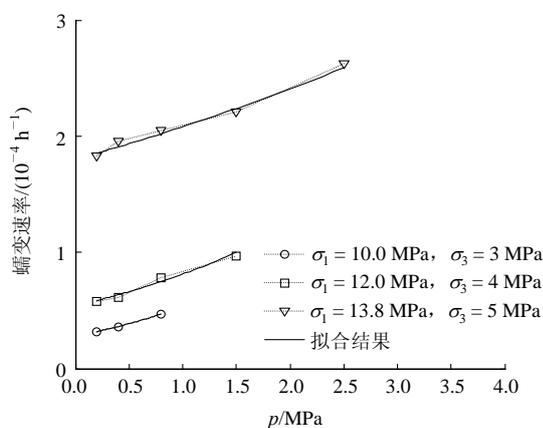


图 10 固定  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  时稳态蠕变速率受瓦斯压力( $p$ )的影响情况  
Fig.10 Steady-state creep rate vs. gas pressure( $p$ ) with fixed  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$

根据式(9), 可得到 2 条分别对应于 2 组应力条件的拟合曲线(见图 9), 可以看出拟合结果与试验结果吻合得很好。同样地, 也可以通过另一个指数函数来拟合表 4 中的试验数据:

$$\dot{\epsilon}_s = B \exp(np) \tag{10}$$

式中:  $B$  和  $n$  均为常数。

拟合结果如图 10 所示, 同样可以看出拟合值与试验值吻合得很好。常数  $A, B, m, n$  的拟合值如表 5 所示。

由表 5 可以看出, 常数  $m$  和  $n$  的值波动相对较小,  $m$  和  $n$  的平均值分别为  $-0.731$  和  $0.399$ 。因此, 围压和瓦斯压力对稳态蠕变速率的影响可以分别用式(9)和(10)描述, 即  $g(\sigma_3) = A \exp(m\sigma_3)$ ,  $h(p) = B \exp(np)$ 。

表 5 常数  $A, B, m, n$  的拟合值  
Table 5 Values of constants  $A, B, m$  and  $n$

应力状态/MPa		拟合值			
$\sigma_1$	$p$	$A$	$m$	$B$	$n$
11.0	0.8	$5.5 \times 10^{-4}$	$-0.696$		
12.0	1.5	$2.0 \times 10^{-3}$	$-0.765$		
10.0	3.0			$2.8 \times 10^{-4}$	0.644
12.0	4.0			$5.4 \times 10^{-4}$	0.409
13.8	5.0			$1.8 \times 10^{-4}$	0.145

图 8 中的稳态蠕变速率经过对数处理后的表示结果如图 11 所示。

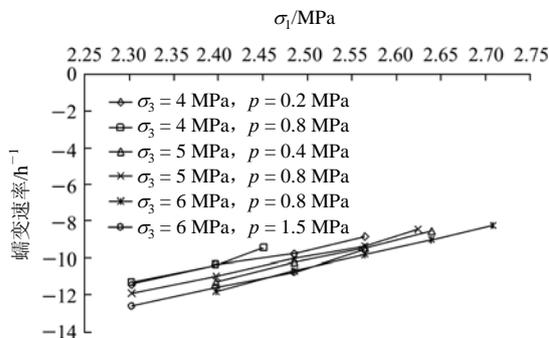


图 11 经过对数处理后固定  $\sigma_3$  和  $p$  时稳态蠕变速率受蠕变载荷的影响情况  
Fig.11 Steady-state creep rate vs. creep stress with fixed  $\sigma_3$  and  $p$  by logarithmic method

图 11 中的稳态蠕变速率可以用  $\exp(m\sigma_3)$  和  $\exp(np)$  来进行规范化处理, 结果如下:

$$\dot{\epsilon}_{s, n} = \dot{\epsilon}_s^2 / [\exp(m\sigma_3) \exp(np)] = \dot{\epsilon}_s^2 / \exp(m_a \sigma_3 + n_a p) = \dot{\epsilon}_s^2 / \exp(0.399p - 0.731\sigma_3) \tag{11}$$

式中:  $m_a, n_a$  分别为  $m, n$  的平均值。

在式(11)中, 根据  $p$  和  $\sigma_3$  前面的系数(0.399 和  $-0.731$ )可知, 围压对稳态蠕变速率的影响要大于瓦斯压力的影响, 这也符合试验中的结果(见表 3, 4)。于是便可以得到规范化的稳态蠕变速率为  $\dot{\epsilon}_{s, n} = \dot{\epsilon}_s / \sqrt{\exp(0.399p - 0.731\sigma_3)}$ , 再根据图 11 中的数据, 便可以得到规范化后的稳态蠕变速率与蠕变载荷之间的关系, 如图 12 所示。

比较图 11 和 12 可知, 规范化后的稳态蠕变速率数据都落到了一个更小的区域内。显然可以用一个对数坐标系下的线性方程来拟合图 12 中的数据, 最终可以得到

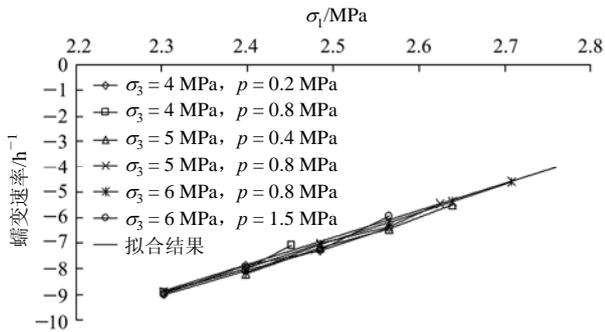


图 12 经过对数处理和规范化后稳态蠕变速率与蠕变载荷的关系

Fig.12 Normalized steady-state creep rate vs. creep stress in logarithmic coordinates by logarithmic method

$$\dot{\epsilon}_{s, n} = C\sigma_1^r \tag{12}$$

式中:  $C$  和  $r$  均为常数,  $C = 1.08 \times 10^{-15}$ ,  $r = 11.02$ 。

这样以来, 蠕变载荷对稳态蠕变速率的影响就可以用式(12)来表示, 最早使用该形式方程的学者是 D. E. Munson<sup>[30]</sup>。于是便有  $f(q) = C\sigma_1^r$ 。

利用式(11)和(12), 就很容易得出稳态蠕变速率、蠕变载荷、围压和瓦斯压力四者之间的关系:

$$\dot{\epsilon}_s = 1.08 \times 10^{-15} \left[ \frac{1}{2} (0.399p - 0.731\sigma_3) \right] \sigma_1^{11.02} \tag{13}$$

通过式(13), 蠕变载荷、围压和瓦斯的影响都可以包含在一个统一形式的方程中, 而且很容易就可以计算得到特定应力条件下的稳态蠕变速率。

### 6 含瓦斯煤样三轴加速蠕变特征

加速蠕变阶段是煤样蠕变变形的最后一个阶段。根据前面的结论, 加速蠕变阶段只有在蠕变载荷超过了屈服应力时才会出现。在加速蠕变阶段, 蠕变速率会在短时间内迅速增大, 从而导致煤样的最终破坏(如图 3~5 中的非衰减蠕变曲线)。在该阶段中, “软化效应”起了很重要的作用, 它不但会导致煤样在短时间内发生破坏还会使得蠕变速率变得波动起伏而不稳定<sup>[4, 6]</sup>。除此之外, 由于加速蠕变速率具有很高的非线性, 以至于不再像减速蠕变和稳态蠕变阶段的蠕变速率那样有规律。赵延林等<sup>[31]</sup>曾经尝试利用幂函数来描述加速蠕变阶段的蠕变速率, 但效果并不理想。由于加速蠕变阶段的开始意味着煤样破坏的开始, 因此在实践中不太注重加速蠕变阶段的蠕变速率的研究。

根据前人的研究, 加速蠕变阶段的启动原因由于研究人员侧重点的不同而存在多样性。L. Ma<sup>[32]</sup>认

为只有达到了临界应力值才会导致加速蠕变的发生, 并且提出了这个临界应力的值大约为材料最终强度的 90%; D. M. Cruden 等<sup>[33, 34]</sup>认为加速蠕变的启动是由于达到了材料内部的临界微裂纹密度而引起的; S. S. Vyalov<sup>[6]</sup>则认为材料内部微结构的变化导致了加速蠕变阶段的发生。但不论是何种原因导致加速蠕变阶段的启动, 最终都会产生宏观裂纹而导致煤样的破坏, 如图 13 所示。



图 13 含瓦斯煤样的破坏形式

Fig.13 Failure form of a gas-bearing coal specimen

### 7 结 论

通过研究含瓦斯煤样在各种应力状态下的蠕变行为, 得到如下主要结论:

- (1) 蠕变载荷、围压和瓦斯压力对含瓦斯煤样的蠕变行为有着不可忽视的作用。
- (2) 利用幂函数可以很好地描述含瓦斯煤岩的减速蠕变变形及其蠕变速率的变化情况。
- (3) 稳态蠕变速率随着蠕变载荷和瓦斯压力的增加而增大, 随着围压的增加而减小。稳态蠕变速率与围压之间的关系, 以及稳态蠕变速率与瓦斯压力的关系可以用指数函数来描述; 稳态蠕变速率与蠕变载荷之间的关系可以用幂函数来描述。通过规范化处理后, 最终得到稳态蠕变速率、蠕变载荷、围压和瓦斯压力四者的关系, 从而可以方便地计算出不同应力条件下的稳态蠕变速率。
- (4) 加速蠕变阶段中, 蠕变速率会在短时间内迅速增大, 最终导致煤样的破坏。加速蠕变的启动标志着含瓦斯煤样破坏的启动。

### 参考文献(References):

[1] LAMA R D, BODZIONY J. Management of outburst in underground

- coal mines[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1): 83 - 115.
- [2] FLORES R M. Coalbed methane: from hazard to resource[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1 - 4): 3 - 36.
- [3] BEAMISH B B, CROSDALE J P. Instantaneous outburst in underground coal mines: an overview and association with coal type[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1 - 4): 27 - 55.
- [4] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.(HE Xueqiu. Rheological dynamics of coal or rock containing gas[J]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1995.(in Chinese))
- [5] FABRE G, PELLET F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(6): 950 - 960.
- [6] VYALOV S S. Rheological fundamentals of soil mechanics[M]. New York: Elsevier, 1986: 147 - 154.
- [7] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behavior of a weak rock: experimental characterization[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(1): 127 - 138.
- [8] COGAN J. Triaxial creep tests of Ophongong limestone and Ophir shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1976, 13(1): 1 - 10.
- [9] PRICE N J. A study of time-strain behavior of coal-measure rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(2): 277 - 303.
- [10] CRISTESCU N D. Rock rheology[M]. Dordrecht: Kluwer, 1989.
- [11] YANG C H, DAEMEN J J K, YIN J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(2): 233 - 242.
- [12] GASC-BARBIER M, CHANCHOLE S, BÉREST P. Creep behavior of Bure clayey rock[J]. *Applied Clay Science*, 2004, 26(1 - 4): 449 - 458.
- [13] MA L, DAEMEN J J K. An experimental study of creep of welded tuff[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(2): 282 - 291.
- [14] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩三维蠕变特性及蠕变模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增1): 2 631 - 2 636. (YIN Guangzhi, WANG Dengke, ZHANG Dongming, et al. Research on triaxial creep properties and creep model of coal containing gas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.1): 2 631 - 2 636.(in Chinese))
- [15] SUPING P, JINCAI Z. Engineering geology for underground rocks[M]. New York: Springer, 2007.
- [16] 任中俊, 彭向和, 万玲, 等. 三轴加载下岩盐蠕变损伤特性的研究[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(2): 212 - 217.(REN Zhongjun, PENG Xianghe, WAN Ling, et al. Thermo-mechanically consistent constitutive model for rock salt creep[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(2): 212 - 217.(in Chinese))
- [17] 吴世跃, 赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(10): 1 674 - 1 678.(WU Shiyue, ZHAO Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1 674 - 1 678.(in Chinese))
- [18] TERZAGHI K. Theory soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [19] CHUANLIANG L, XIAOFAN C, ZHIMIN D. A new relationship of rock compressibility with porosity[C]// SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. [S.l.]: [s. n.], 2004: 163 - 167.
- [20] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J]. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(4): 419 - 426.(LI Peichao, KONG Xiangyan, LU Detang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(4): 419 - 426.(in Chinese))
- [21] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 12 - 18.(LIANG Bing, ZHANG Mengtao, PAN Yishan. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 12 - 18.(in Chinese))
- [22] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 两种含瓦斯煤岩变形特性与抗压强度的试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 410 - 417. (YIN Guangzhi, WANG Dengke, ZHANG Dongming, et al. Test analysis of deformation characteristics and compressive strength of two types of coal specimens containing gas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 410 - 417.(in Chinese))
- [23] 王登科. 含瓦斯煤岩本构模型与失稳规律研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2009.(WANG Dengke. Research on constitutive models and instability rules of gas-saturated coal[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.(in Chinese))
- [24] 刘建军, 梁冰, 章梦涛. 煤和瓦斯突出过程中瓦斯作用机制的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2000, 10(3): 63 - 66.(LIU Jianjun, LIANG Bing, ZHANG Mengtao. Study of the mechanism of gas in the coal and gas outburst[J]. *China Safety Science Journal*, 2000, 10(3): 63 - 66.(in Chinese))
- [25] TIMOSHENKO S P. History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures[M]. New York: McGraw-Hill, 1953: 336 - 357.
- [26] HE X Q, ZHOU S N, LIN B Q. The rheological properties and outburst mechanism of gaseous coal[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 1991, 2(1): 29 - 36.
- [27] BOUKHAROV G N, CHANDA M W, BOUKHAROV N G. The three processes of brittle crystalline rock creep[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(4): 325 - 335.
- [28] CHAN K S, BODNER S R, FOSSUM A F, et al. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1997, 6(2): 121 - 152.
- [29] CARTER N L. Rheology of salt rock[J]. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15(10): 1 257 - 1 272.
- [30] MUNSON D E. Preliminary deformation mechanism map for salt (with application to WIPP)[M]. Albuquerque: [s. n.], 1979.
- [31] 赵延林, 曹平, 文有道, 等. 岩石弹黏塑性流变试验和非线性流变模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 477 - 486. (ZHAO Yanlin, CAO Ping, WEN Youdao, et al. Elastovisco-plastic rheological experiment and nonlinear rheological model of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 477 - 486.(in Chinese))
- [32] MA L. Experimental investigation of time dependent behavior of welded topopah spring tuff[M]. Ann Arbor: [s. n.], 2004.
- [33] CRUDEN D M. The static fatigue of brittle rock under uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1974, 11(2): 67 - 73.
- [34] KRANZ R L, SCHOLZ C H. Critical dilatant volume of rocks at the onset of tertiary creep[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(30): 4 893 - 4 898.