

# 煤岩流变模型与地表二次沉陷研究

吴立新 王金庄

(中国矿业大学北京研究生部)

孟顺利

(河北省煤炭工业厅资源处)

**摘要** 通过流变实验研究发现,煤岩流变具有低流变系数和高蠕变门槛值特征,并符合对数型经验公式和修正的伯格理论模型。作者以河北峰峰矿区为例,求出了各级应力水平下煤岩流变经验公式的典型参数集,并结合峰峰二矿工业广场建筑物下条带开采地表沉陷实例进行了分析。

**关键词** 煤岩 流变 理论模型 经验公式 开采沉陷

## 1 概述

岩石或岩体的强度、变形乃至流动与该岩石或岩体的结构状况有关。通常,岩石由多种矿物组成,矿物粒径或节理裂隙系切割后的岩体孤立单元块体的尺度为米级或厘米级;而对于煤岩材料可达毫米级。与岩石材料一样,煤岩材料的强度也是时间的函数,即在长期载荷的作用下,煤岩会产生流变效应,强度会逐渐降低,屈服时的强度低于实验测得的单轴抗压强度;但煤岩材料的流变特性又不同于岩石材料,因为煤岩本身的组成和内部结构要比普通岩石复杂得多。关于这方面的研究,国内外还未见详细资料。

煤矿地下条带式开采和房柱式开采,在设计时应考虑开采以后煤柱受上覆载荷长期作用的流变效应及其后期屈服,才能避免出现地表二次沉陷灾害。但事实上,国内外迄今为止在进行各类煤柱设计时都没有或没有明确考虑煤柱的流变特性,只是笼统地给定一个安全系数并据此来适当增加煤柱的宽度。为使煤柱设计更科学、更合理、更安全,作者认为必须进行煤岩流变实验,以便揭示煤岩受长期载荷作用下的流变特性,如蠕变系数、流变方程等,并将在有限的时间与空间条件下所获得的流变实验成果,作某种工程预测性的时空延拓。

## 2 流变实验条件与措施<sup>[1]</sup>

本文选取河北峰峰矿区二矿山青煤,采用干锯干磨法制作试块。试块尺寸为 80×80×

1997年 5月 8日收稿;1997年 6月 9日修改稿。

国家自然科学基金项目(编号:59674004)

60mm,分别对试块进行常规单轴压缩与单轴压缩流变实验。常规单轴压缩实验结果表明,该煤层煤岩的单轴压缩强度为 12.6MPa

本次研究以 Boltzmann 变形叠加原理为基础,采用对单一岩样分级加载的流变实验方法,即“陈氏加载法”(陈宗基,1965)<sup>[2]</sup>。流变实验在千斤顶强力弹簧实验台上进行,千斤顶加载能力为 60—500kN,活塞行程 50—100mm;采用底弹簧感应式测力,用千分表、百分表在试块底平面对角线方向联合监测试块产生的压缩变形,取平均值作为试块的即时压缩变形。实验是在常温常压条件下进行的,实验季节为夏季和秋季(4—10月),室内温度为 15—23.7℃(平均 19℃),湿度为 21.5—25.7(平均 23.5)。

实验采取的具体措施为:

- ① 逐级加载 各级载荷作用到出现近似稳定流变,即连续 3天压缩量相差小于 0.001mm 为止;
- ② 每天上、下午各观测一次,并及时对由于压缩引起的载荷降低进行补偿;
- ③ 控制每级载荷加载时间尽量相等,即 5天或 6天。

### 3 蠕变参数与流变曲线

实验表明,当各试块载荷达到其蠕变强度的 60—80% 时,试块内部开始发出零星的劈裂声;继续加载,试块外侧出现裂纹并逐渐扩展、张开,且试块下部边角部位开始片落;当试块受载达到其蠕变强度的 90% 以上时,试块变形加速;加载一旦接近或达到蠕变强度极限时,试块迅速溃屈,加载装置失效,溃屈体承受的载荷为零。

山青煤各试块的流变实验结果见表 1。作者结合矿山工程特点,将实验测得的山青煤试块蠕变强度 ( $\epsilon_1$ ) 与单轴强度 ( $\epsilon_c$ ) 的比值称为流变系数 ( $Z$ ),即  $Z = \epsilon_1 / \epsilon_c$ ,也列于表 1 中。

国内外研究资料表明,岩石的流变系数一般为 0.65—0.9。夏熙伦等人<sup>[3]</sup>实验测得,三峡船闸区弱风化和微风化的闪云斜长岩和花岗岩的流变系数分别为 0.837 和 0.9。本文实验测得的煤岩的流变系数仅为 0.463,比岩石材料的流变系数小得多,即煤岩的蠕变强度尚不及其瞬时强度的一半,这一实验结果对于建筑物下采煤具有非常重要的意义,应予重视。

表 1 二矿山青煤流变实验结果

Table 1 The results of the creep experiment on Shanqing coal of No. 2 Mine

试块号	A	B	C	平均值
单轴强度 $\epsilon_c$ (MPa)	12.6			
蠕变强度 $\epsilon_1$ (MPa)	5.8	6.0	5.7	5.83
流变系数 $Z$	0.460	0.476	0.452	0.463
蠕变门槛值 $\epsilon_{th}$ (MPa)	5.5	5.5	5.3	5.4
蠕变门槛系数 $\lambda$	0.95	0.92	0.93	0.93

将实验数据按“陈式加载法”进行分析处理后,进一步绘制出如图 1 所示等时-应变曲线。由图可见,在低应力水平:经过短时间(1—3天)的初期蠕变后,变形趋于稳定;在较高应力水平:除瞬时弹性应变和较明显的第 I 阶段减速蠕变外,还产生了一定程度的第 II 阶段定常蠕变,即变形随时间增加不收敛,而是随时间有缓慢增加的趋势,尽管增加的趋势不太明显,但毕竟表明试块变形随时间延长将无限制地增加下去,甚至会由于疲劳积累而在某个时刻出现加

速蠕变,最后导致试块完全屈服。我们把该临界应力水平称为蠕变门槛值,记为  $\sigma_{th}$ 。由图 1 可见,当试块 A、B 和 C 的应力分别小于 5MPa、5MPa 和 4.6MPa 时,试块只发生减速蠕变,没有出现定常蠕变;而当应力分别达到 5.5MPa、5.5MPa 和 5.3MPa 时,则分别出现了定常蠕变;故可取两者之间的内插平均应力作为试块的蠕变门槛值,列在表 1 中。 $\sigma_{th}$  与  $\sigma_c$  的比值称为蠕变门槛系数  $\lambda$ ,也列在表 1 中。文献 [3] 介绍三峡船闸区弱风化和微风化的闪云斜长岩和花岗岩的蠕变门槛系数分别为 0.82 和 0.86; 本文实验测得的煤岩的蠕变门槛系数为 0.93, 比岩石材料的蠕变门槛系数要高一些。

这一结果说明:与普通岩石材料相比,煤岩材料的蠕变门槛强度更接近其蠕变强度,即煤柱开始出现第 II 阶段蠕变时,其应力水平已接近其蠕变强度,煤柱很快就要屈服。因此,煤柱屈服前兆即开始出现定常蠕变的时刻来得较晚,即使把握到,也增加了煤柱失稳和突出预测预报的难度。

## 4 煤岩流变模型

### 4.1 对数型经验模型

一般岩石材料流变过程所发生的总应变包括以下 4 部分:弹性应变,第 I 阶段蠕变,第 II 阶段蠕变和第 III 阶段加速蠕变,即:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (1)$$

本次实验的数据表明:第 III 阶段加速蠕变部分所占比例非常小,可以不考虑。因此,采用如下的经验模型来描述第 I 和第 II 阶段的蠕变情况:

$$\dot{\epsilon}(t) = a + b \times \ln t + c \times t \quad (2)$$

经验公式中,参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均根据实验数据,采用最小二乘法进行回归拟合; $\dot{\epsilon}$  的单位为 mm/m,  $t$  为时间 (d)。现将 3 个试块在不同应力水平下的参数拟合结果列于表 2 中。将上述数据分别按各试块 0.1、0.2、0.3……0.9、0.93 倍的蠕变强度进行内插,并对应取三者的平均值,即得到该煤层煤岩在上述应力级作用下的典型经验蠕变曲线和典型参数分布曲线,见图 2,数据结果列于表 3。

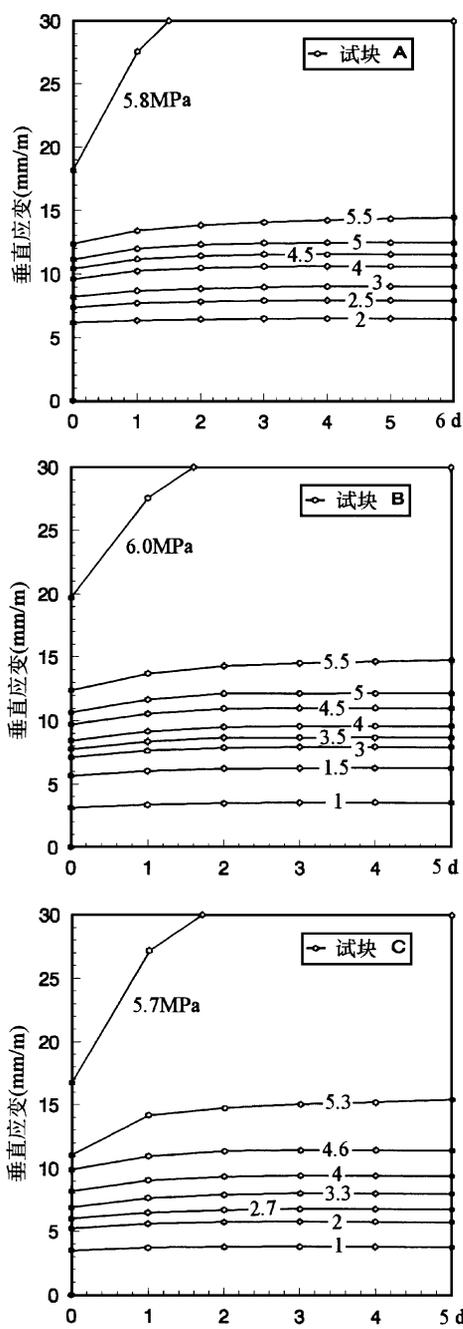


图 1 煤岩蠕变等时-应变曲线

Fig. 1 The time-strain curves of coal creep

并得到该煤层煤岩在上述应力级作用下的典型经验蠕变曲线和典型参数分布曲线,见图 2,数据结果列于表 3。

表 2 各试块参数回归结果

Table 2 The regression results of the creep parameters of each sample

试块	A							
$\epsilon_1$ (MPa)	2	2.5	3	4	4.5	5	5.5	
$a$	6.16	7.57	8.42	9.9	10.65	11.45	12.6	
$b$	0.22	0.31	0.45	0.46	0.68	0.58	0.8	
$c$	0	0	0	0	0	0	0.1	
试块	B							
$\epsilon_1$ (MPa)	1	1.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
$a$	3.2	5.8	7.3	7.9	8.6	9.9	11.0	12.6
$b$	0.23	0.35	0.47	0.52	0.66	0.73	0.84	1.1
$c$	0	0	0	0	0	0	0	0.12
试块	C							
$\epsilon_1$ (MPa)	1	2	2.7	3.3	4	4.6	5.3	
$a$	3.5	5.4	6.1	7.1	8.4	10.2	12.8	
$b$	0.21	0.35	0.46	0.65	0.70	0.86	1.3	
$c$	0	0	0	0	0	0	0.1	

表 3 典型经验蠕变曲线参数

Table 3 The experimental parameters of the typical creep curves

$\epsilon_1 / \epsilon_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.93
$a$	1.85	3.8	5.5	6.4	7.2	8.4	9.5	10.5	12.15	12.7
$b$	0.11	0.21	0.29	0.36	0.46	0.53	0.64	0.76	0.98	1.06
$c$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11

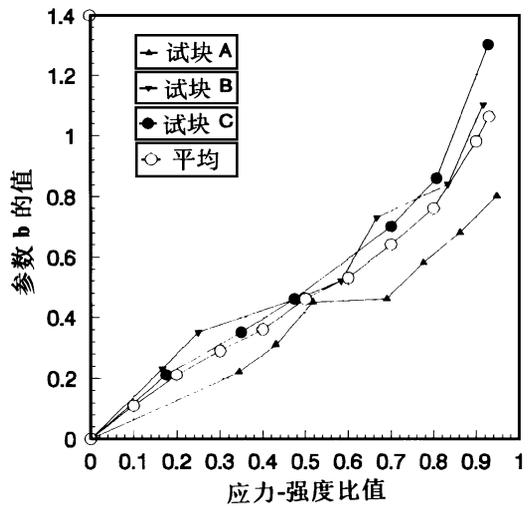
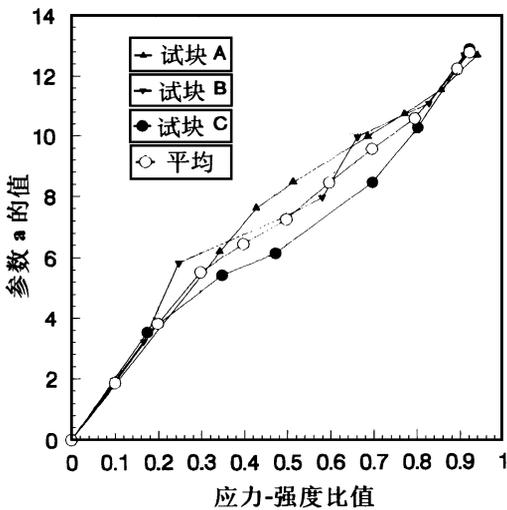


图 2 经验公式的典型参数分布

Fig. 2 The distribution of the typical parameters of the experimental formulae

## 4.2 修正的帕格斯理论模型

从流变曲线可以看出,本次实验的煤块流变具有以下特征:(1)在低应力水平下,应变速率逐渐减小,当  $t \rightarrow \infty$  时,应变将趋近于某一定值,与广义开尔文模型的应变-时间曲线类似;(2)当应力水平大于某一值  $\epsilon_s$  ( $\epsilon_s$  为名义屈服应力,相当于蠕变门槛值)后,应变随时间增长不收敛于某一定值,而是逐渐增大,这一现象符合帕格斯模型。煤岩循环加载实验还表明,在较低应力水平下,若不考虑反复损伤引起的应变累积效应,卸载时煤岩应变能基本恢复,这一特征与开尔文模型是相似的。

综上所述,当应力  $\epsilon_1 \leq \epsilon_s$  时,煤岩的蠕变模型符合广义开尔文模型;当  $\epsilon_1 > \epsilon_s$  时,煤岩的蠕变模型与帕格斯模型相似,可用修正的帕格斯模型(西原模型)来近似模拟,如图 3 所示。常应力  $\epsilon_1$  作用下,修正的帕格斯模型的本构方程为:

$$\chi(t) = \begin{cases} \frac{\epsilon_1}{E_0} + \frac{\epsilon_1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1}{Z_1} t}) & \epsilon_1 \leq \epsilon_s \\ \frac{\epsilon_1}{E_0} + \frac{\epsilon_1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1}{Z_1} t}) + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_s}{Z_2} t & \epsilon_1 > \epsilon_s \end{cases} \quad (3)$$

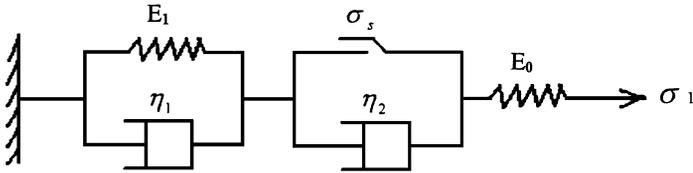


图 3 煤岩流变的修正伯格斯模型

Fig. 3 The remedied Bu-model of coal creep

$E_0$ , 弹性常数 0;  $E_1$ , 弹性常数 1;  $Z_1$ , 粘性常数 1;  $Z_2$ , 粘性常数 2;  $\epsilon_1$ , 常应力;  $\epsilon_s$ , 粘滞力

式中  $\chi(t)$  为  $t$  时刻的应变。 $\epsilon_s$  由实验获得,其它 4 个未知参数可利用进入第 II 阶段蠕变前  $t = 0$ ,  $t = \infty$ ,  $t =$  任意时刻  $t_1$  及进入第 II 阶段蠕变后任意时刻  $t_2$  的应变  $\chi(t_1)$ ,  $\chi(t_2)$ ,  $\chi(\infty)$ ,  $\chi(0)$  为边界条件,分别求出如下:

$$\begin{cases} E_0 = \frac{\epsilon_1}{\chi(0)}; \\ E_1 = \frac{\epsilon_1}{\chi(\infty) - \chi(0)}; \\ Z_1 = \frac{E_1 t_1}{\ln \epsilon_1 - \ln[\epsilon_1 - E_1(\chi(t_1) - \chi(0))]}; \\ Z_2 = \frac{\chi(t_2) - \frac{\epsilon_1}{E_0} - \frac{\epsilon_1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1}{Z_1} t_1})}{(\epsilon_1 - \epsilon_s) t_2}; \end{cases} \quad (4)$$

限于篇幅,各试块不同应力水平下的上述参数的具体计算不做介绍。

## 5 地表沉陷实例

1986-1992 年,峰峰二矿在其工业广场建筑区下进行了多煤层重复条带开采,即先采上部中硬的大煤层,待地表稳定之后采中间中硬的山青煤层,待地表再次稳定之后最后采下部

的软弱小青煤层。地质采矿条件为:采深 100—200m,覆岩平均容重  $2.45\text{t/m}^3$ ;采宽 12—15m,留宽 15—18m;煤柱所荷载荷  $\epsilon_1$  平均为 6.7MPa;自上而下 3层煤的厚度分别为 1.5m, 1.5m 和 1.7m,总采厚 4.7m,实验室测试样品的单轴抗压强度  $\epsilon_c$  分别为 12.6MPa, 15.5MPa 和 3.1MPa(现场煤柱实际强度比实验室测试强度要高,可进行转换<sup>①</sup>),平均为 10.4MPa

煤层开采之后地表总下沉量为 0.47m,条带煤柱监测表明,除个别煤柱因对齐问题发生屈服外,绝大部分条带煤柱是稳定的。1992年停采至今,每隔一定时间对地表高程进行一次水准测量,发现最初 1年地表以约  $45\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$  的速度继续下沉(以总采厚和最后采的下部小青煤层厚度计算,相当于煤柱变形分别为  $9.6\text{mm}/\text{m}\cdot\text{a}$  和  $26.5\text{mm}/\text{m}\cdot\text{a}$ );此后地表下沉速度逐渐减小,地表缓慢沉降。

现以本文理论与实验结果检验如下:

由于  $\epsilon_1/\epsilon_c = 6.7/10.4 = 0.64 < \lambda$ ,故  $\epsilon_1$  小于蠕变门槛值  $\epsilon_{th}$ ,煤柱只发生弹性应变和第 I 阶段蠕变,应分别按经验公式(2)(取  $c=0$ )和理论公式(3)的第一项进行计算。参考表 3 的典型参数及实验结果,内插确定蠕变参数如下:  $a=8.8, b=5.7, E_0=417\text{MPa}, E_1=196\text{MPa}, Z_1=17320\text{MPa}\cdot\text{d}$ 。计算结果如表 4 所示:

表 4 煤柱蠕变增量的经验与计算理论结果

Table 4 The calculated creep increments of coal pillar  $\xi$  on experimental formula and Bu-model

蠕变时间 $t(\text{a})$		1	2	3	4	5
蠕变增量	按经验公式	3.36	0.40	0.23	0.16	0.13
$\Delta X(\text{mm}/\text{m})$	按理论模型	20.07	0.32	0.01	0	0

由此可见,煤柱流变效应的存在是显而易见的。理论公式计算 1年之内的变形具有较好的计算精度;经验公式对 1年之后的计算结果更符合实际情况。因此,1年之内的相对短期的煤柱蠕变行为可以用修正的伯格理论模型来进行预计;1年之后的相对长期的煤柱蠕变行为应该用对数型经验公式来进行预计。可以预见,由于地下煤柱蠕变,数十年后,峰峰二矿工广地表的长期沉陷量的累积将达到相当程度;一旦煤柱受外部应力扰动(如地震)或遇地下水侵蚀弱化而发生第 II 阶段定常蠕变甚至第 III 阶段加速蠕变,采空区煤柱就有可能发生大范围屈服,并导致地表提前出现二次沉陷现象。

## 参 考 文 献

- 1 吴立新,王金庄,煤岩流变特性及其微观影响特征初探. 岩石力学与工程学报, 1996(4)
- 2 刘雄著,岩石流变学概论. 北京:地质出版社, 1994
- 3 夏熙伦,徐平,丁秀丽,岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析. 岩石力学与工程学报, 1996(4)
- 4 陈 编著,地壳岩石力学性质——理论基础与实验方法. 北京:地震出版社, 1988

<sup>①</sup> 吴立新,煤岩强度机制及矿压红外探测基础实验研究. 中国矿业大学北京研究生部博士论文, 1997

# COAL CREEP AND GROUND SUBSIDENCE OF FENGFENG COAL MINE II

Wu Lixin Wang Jinzhuang

(Beijing Grad. Sc. of C. U. M. T.)

Meng Shunli

(Coal Bureau of Hebei Province)

**Abstract** Creep experiments of coal under uniaxial load show a low creep factor ( $Z = \epsilon_1 / \epsilon_c$ ) and a high threshold stress ( $\epsilon_{th}$ ). The samples are taken from the Fengfeng coal field in Hebei Province. Creep parameter sets determined at different stress levels were presented. Calculations of ground subsidence due to underground mining of Fengfeng coal mine II using the present experiment results call for farther precautions.

**Key words** coal, creep, theoretical model, experimental formula, mining subsidence

## 第一作者简介

吴立新,男,1966年生,副教授,博士。1988年毕业于中国矿业大学,1991-1997年分别获硕士、博士学位。现留校从事矿山开采沉陷、岩石力学与红外遥感、矿山地理信息系统研究与教学工作。通讯地址:北京市学院路丁11号中国矿业大学北京研究生部测量室。邮编:100083