

尹光志, 何 兵, 王 浩 等. 深部采动影响下覆岩蠕变损伤破坏规律 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1390 - 1395. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1421

Yin Guangzhi, He Bing, Wang Hao, et al. Damage law of overlying rock induced by mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1390 - 1395. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1421

深部采动影响下覆岩蠕变损伤破坏规律

尹光志^{1,2}, 何 兵¹, 王 浩^{2,3}, 张先萌¹

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 重庆大学 数学与统计学院, 重庆 400044)

摘 要: 基于自主研发的 RLW-2000M 微机控制煤岩流变仪, 对煤层顶底板岩石试件进行了卸围压蠕变及周期加载蠕变实验, 得出了岩石试件在采动应力影响作用下的黏弹性变形特征。采用 Burgers 体模型对采动影响下的岩石蠕变损伤破坏机理进行了理论分析, 建立采动影响下的覆岩蠕变损伤模型, 研究了煤层顶底板岩体在采动影响下的破坏规律, 将利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件和钻孔成像技术对理论模型进行验证。研究表明, 建立的煤岩蠕变损伤模型可较好地反应岩体蠕变损伤破坏特征。研究成果揭示了中国平煤集团十矿戊₁₀ 煤层顶底板岩体的蠕变损伤破坏特性。

关键词: 蠕变; 覆岩破坏; Burgers 体模型

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)06-1390-06

Damage law of overlying rock induced by mining

YIN Guang-zhi^{1,2}, HE Bing¹, WANG Hao^{2,3}, ZHANG Xian-meng¹

(1. College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamic and Control, Chongqing 400044, China; 3. College of Mathematics and Statistics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The rock specimen from the roof of a mine was experimented using self-developed RLM-2000M, and the rock specimen's viscoelasticity characteristics was derived under the influence of mining stress. In this paper, Burgers model was implemented for the theoretical analysis of coal creep damage and fracture law under mining influence, and the overlying rock's creep damage and fracture model under mining influence was built. Therefore, the failure law of roof and floor under mining influence was studied. The FLAC3D and borehole imaging technology were applied in this study. The results show that the model developed can better reflect the rock creep failure. The results reveal the creep failure characteristics of roof and floor rock at E9-10 seam of Tenth Mine, Pingdingshan. The study can provide a theoretical evidence for the study of roof and floor's creep failure.

Key words: creep; damage of overlying rock; Burgers model

我国是煤炭资源大国,也是以煤为主要能源的国家。由于我国大部分矿区煤层瓦斯赋存明显地存在着“三高三低”(三高:煤层高可塑性结构、煤层高吸附瓦斯能力、煤层瓦斯高贮存量;三低:煤层瓦斯压力低、煤层在水力压裂等强化措施下形成的常规破裂裂

隙所占比例低、煤层瓦斯储层渗透率低)的特征,使得煤层采前预抽效果与美国、澳大利亚等国家勘探和利用煤层瓦斯资源相比不甚理想。因此,研究采动覆岩移动破坏规律,得到煤岩层裂隙分布特征、卸压范围及演化规律,进而研究采动裂隙时空演化与卸压瓦

斯的运移聚集关系,研究成果可为煤与瓦斯的安全高效开采提供借鉴,具有重要的工程实际应用价值。

流变作为岩石的一项重要力学性质与许多工程质量息息相关,且在实际过程中,一个工程的破坏通常要经历一个缓慢的过程,这也就要求在实际问题的研究过程中,对于岩石的流变特性进行大量的理论实验研究^[1-4]。Bai M、Palchik V 和 Yavuz H 等分析了煤层开采后覆岩存在的3个不同移动带的特点^[5-7];刘天泉、钱鸣高院士等提出了“横三区”、“竖三带”的特征^[8-9]。研究表明,覆岩采动裂隙分布形态随工作面推进而变化;钱鸣高院士等提出覆岩采动裂隙呈两阶段发展规律并形成“O”形圈分布特征^[10];李树刚提出覆岩采动裂隙在空间上的分布是一个“椭圆带”形态^[11];袁亮院士等提出了顶板环形裂隙圈的特征^[12];林柏泉得到了“回”形圈分布形态^[13];杨科等得到覆岩采动裂隙4阶段演化特征^[14-16]。

基于以上的研究成果,本文利用自主研发的RLW-2000M微机控制煤岩流变仪,对中国平煤集团十矿戊₉₋₁₀煤层顶底板岩层试件进行卸围压蠕变及周期加载蠕变实验,揭示其蠕变特性,测定煤岩在一定条件的蠕变强度,确定煤岩试件在蠕变条件下变形和时间的关系。进而采用 Burgers 体模型对采动影响下的岩体进行蠕变理论分析,建立采动下煤岩蠕变损伤模型,研究煤岩采动影响下覆岩破坏规律。

1 煤岩三轴蠕变实验

1.1 实验准备

煤层回采过程中,会出现初次来压、周期来压等矿山压力显现过程。煤岩体经历了卸荷-瞬间加载-周期加载-破坏的全过程。煤岩体的这种破坏过程表现为煤岩体的周期加载蠕变破坏过程。实验样品取自平煤集团十矿东区戊组煤层的顶底板,设置钻孔并取顶底板岩样200 kg,将所取原煤钻芯,制成直径50 mm、高100 mm的试件,打磨使试件上下表面平行光滑后将其烘干,放置于干燥箱内备用。

实验设备采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室的RLW-2000M微机控制煤岩流变仪,如图1所示。此设备的硬件部分主要由加载设备、控制系统、三轴压力室、围压系统、孔隙水压力系统、温度控制、输出打印设备等组成。控制系统采用德国DOLI公司原装进口的EDC全数字伺服测控器,其中分为轴压、围压和孔隙压力等3套独立的闭环控制系统。加载系统采用了伺服电机和滚珠丝杠加载工作系统,可以完成多种形式的长时间变形实验,在实验中可进行荷载控制、位移控制和变形控制。



图1 RLW-2000M 微机控制煤岩流变仪

Fig. 1 RLW-2000M microcomputer control of coal and rock rheometer

实验完成了静水压力12 MPa的稳定蠕变及卸围压蠕变实验。稳定蠕变实验中,先将围压与轴压加载到预定荷载12 MPa,然后增加轴压24 kN并保持压力状态不变,这种情况下进行蠕变实验。卸围压蠕变实验中,先将围压与轴压加载到预定荷载12 MPa,然后保持轴压不变,按每24 h卸围压2 MPa的速度进行卸围压蠕变实验。

1.2 实验结果分析

实验结果如图2、3所示。图2为煤岩稳定蠕变成果曲线,蠕变曲线平滑,其中减速蠕变与稳定蠕变过程明显。图3为卸围压蠕变成果曲线,轴向应变随卸围压呈阶梯状加速上升,表现出加速蠕变的状态。

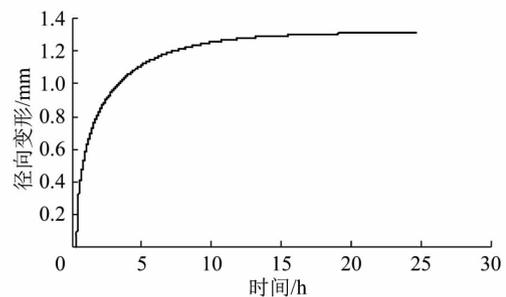


图2 岩石试件典型稳定蠕变曲线

Fig. 2 Typical coal and rock steady creep curve

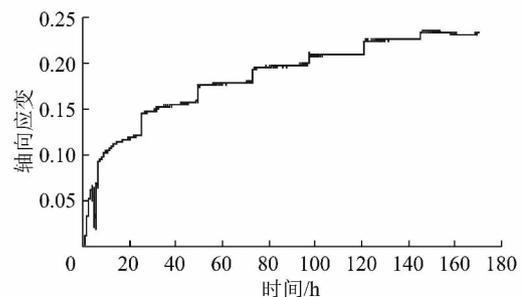


图3 岩石试件典型卸围压蠕变曲线

Fig. 3 Typical unloading confining pressure coal and rock creep curve

通过对砂岩及灰岩的三轴压缩蠕变实验曲线分

析发现,在低于某一荷载水平(即未出现加速蠕变荷载)之前煤岩的蠕变实验曲线具有如下 3 个特征:①在施加应力水平以后,试件立即产生瞬时弹性应变,可知蠕变模型中应包含弹性元件;②岩石试件蠕变应变随时间的增加而有增大的趋势,可知蠕变模型中还应包含黏性元件;③在一定应力水平下,随时间推移,应变有保持某一稳定数值的趋势。

因此,可以得出煤岩在未出现加速蠕变荷载作用下表现为典型的黏弹性特征。因此本文选用 Burgers 体模型对采动影响下的煤岩体进行蠕变理论分析,建立采动下煤岩蠕变损伤模型,研究煤岩采动下覆岩破坏规律。

2 蠕变理论分析

Burgers 模型^[17-20]为由马克思威尔模型(M 体)与开尔文模型(K 体)串联组合的结构模型。设马克思威尔模型与开尔文模型应变分别为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, 串联后的总应变为两个应变的相加,而应力相等,故有

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2, \sigma = \sigma_1 = \sigma_2$$

将上述方程式中的 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 消去,即可得到 Burgers 模型的蠕变本构关系:

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\sigma + P_1 \dot{\sigma} + P_2 \ddot{\sigma} = q_1 \dot{\varepsilon} + q_2 \ddot{\varepsilon} \quad (2)$$

式中 $P_1 = \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2}; P_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}; q_1 = \eta_1; q_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2}$ 。

三维张量方程为

$$S' + P_1 \dot{S}' + P_2 \ddot{S}' = 2q_1 \dot{\varepsilon}' + 2q_2 \varepsilon'' \quad (3)$$

应力条件为: $S' = S'_0 = \text{恒量}$; 初始条件为: $t^* = 0, \varepsilon' = \varepsilon'_0 = \frac{S'_0}{2E_1}$ 。这里应用拉普拉斯(Laplace)变换进行蠕变方程的推导,对于瞬时加载时间引入一个单位。

阶梯函数 $\Delta(t)$ 定义为

$$\Delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (4)$$

因而,应力 S' 可表示为

$$S' = S'_0 \Delta(t) \quad (5)$$

S', \dot{S}', \ddot{S}' 的拉普拉斯变换为

$$\begin{cases} \bar{S}' = S'_0/s \\ \dot{\bar{S}}' = s\bar{S}' - S'(0) = sS'_0/s - 0 = S'_0 \\ \ddot{\bar{S}}' = s^2\bar{S}' - sS'(0) - \dot{\varepsilon}'(0) = sS'_0 \end{cases} \quad (6)$$

应变 ε' 的拉普拉斯变化为 $\bar{\varepsilon}', \varepsilon'$ 导数的拉普拉斯变换为

$$\begin{cases} \bar{\dot{\varepsilon}}' = s\bar{\varepsilon}' - \varepsilon'(0) = s\bar{\varepsilon}' \\ \bar{\varepsilon}'' = s^2\bar{\varepsilon}' - s\dot{\varepsilon}'(0) - \dot{\varepsilon}'(0) = s^2\bar{\varepsilon}' \end{cases} \quad (7)$$

对三维本构方程式(3)进行拉普拉斯变换,以及将式(6)与式(7)代入式(3),得

$$\frac{S'_0}{s} + P_1 S'_0 + P_2 s S'_0 = 2q_1 s \bar{\varepsilon}' + 2q_2 s^2 \bar{\varepsilon}' \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}' = \frac{S'_0}{2} \left[\frac{1}{s^2(q_1 + q_2 s)} + \frac{P_1}{s(q_1 + q_2 s)} + \frac{P_2}{q_1 + q_2 s} \right] \quad (9)$$

对式(8)进行拉普拉斯逆变换,查表可知:令 $a =$

$\frac{q_1}{q_2}$, 即有

$$\begin{aligned} L^{-1}\left(\frac{1}{s}\right) &= 1, L^{-1}\left(\frac{1}{s+a}\right) = e^{-at} \\ L^{-1}\left[\frac{1}{s(s+a)}\right] &= \frac{1}{a}(1 - e^{-at}) \end{aligned}$$

代入式(9)整理后可得

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \frac{S'_0}{2} \left\{ \frac{t}{q_1} - \frac{q_2}{q_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{q_1}{q_2}t\right) \right] + \frac{P_1}{q_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{q_1}{q_2}t\right) \right] \right\} + \\ &\frac{P_2}{2} \left\{ \frac{t}{q_1} - \frac{P_1 q_1 - q_2}{q_1^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{q_1}{q_2}t\right) \right] + \frac{P_2}{q_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{q_1}{q_2}t\right) \right] \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

式(10)即为 Burgers 体蠕变方程,将 P_1, P_2, q_1, q_2 代入可得

$$\varepsilon' = \frac{S'_0}{2E_1} + \frac{S'_0}{2\eta_1}t + \frac{S'_0}{2E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right) \right] \quad (11)$$

Burgers 体蠕变模型描述介质具有初始瞬时弹性应变、衰减蠕变(I 阶段)以及稳态蠕变(II 阶段)。表 1 为 Burgers 体蠕变模型的拟合参数,其拟合相关系数(R^2)均在 0.95 以上,表示此模型可较好地反映煤岩体蠕变曲线特征。其中应力差、 E_1 和 E_2 的单位为 MPa; η_1 和 η_2 的单位为 MPa·h。

表 1 Burgers 蠕变模型参数

Table 1 Burgers model's parameters					
应力差	E_1	η_1	E_2	η_2	R^2
35	10 396.24	8 135 087.26	669 743.53	79 592.77	0.976
54	12 431.56	9 062 427.54	678 788.98	239 077.49	0.986
66	12 985.92	3 182 053.77	461 095.58	274 200.63	0.994

3 煤岩三轴蠕变实验

3.1 煤岩蠕变实验数值验证

利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件中本构自定义方法, 验证岩石黏弹塑性蠕变损伤模型的正确性。模型试件尺寸为高 100 mm、直径 50 mm, 共划分 8 000 个单元 8 888 个节点。模型底部在 Y 方向约束, 顶部施压缩蠕变实验相应的荷载, 计算模型如图 4 所示。



图 4 单轴蠕变数值模拟实验模型

Fig. 4 Test model of uniaxial creep

依据实验室单轴压缩蠕变实验结果拟合参数, 采用前述二次开发蠕变损伤本构模型进行了单轴压缩蠕变 FLAC3D 蠕变实验模拟, 图 5 为煤岩单轴压缩蠕变模拟实验结果, 图中曲线为试件顶点蠕变曲线, 二次开发本构模型表现出煤岩样的蠕变损伤破坏特征。

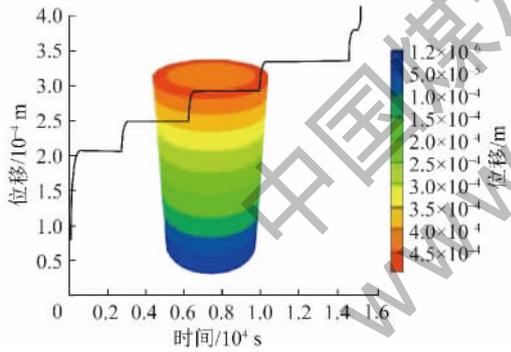


图 5 单轴压缩蠕变实验模拟

Fig. 5 Test model of uniaxial compress creep

图 6 为塑性区扩展, 图 7 为试样的蠕变破坏状态, 图 8 为单轴压缩实验试件破坏状态。岩石在蠕变失效条件的渐进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与其损伤随时间的逐渐积累, 并伴随有细、宏观裂纹的时效扩展结果。通过对比图 7 和图 8 可知, 观察试件的破坏状态, 可以看出试件破坏为沿着试件轴向多裂纹劈裂, 在试件底部出现局部张拉破坏, 与单轴压缩实验断裂一致。

3.2 基于蠕变损伤规律的覆岩破坏规律

利用 FLAC3D 数值模拟软件进行三维数值计算。模型(图 9) 研究对象为矿区北翼己₁₅-17200 综采工作面, 模型由己₁₅-17200 工作面向上延伸 282 m, 向

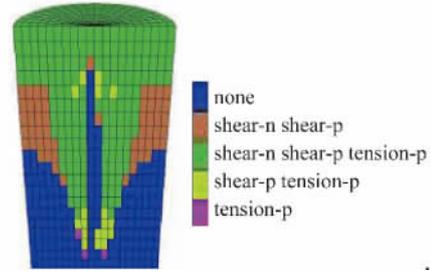


图 6 塑性区扩展

Fig. 6 Plastic zone graph



图 7 蠕变实验试件的破坏形态

Fig. 7 Break status of coal specimen creep

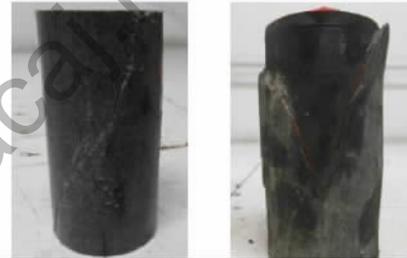


图 8 单轴压缩蠕变实验试件的破坏形态

Fig. 8 Break status of coal specimen creep in uniaxial compression



图 9 模型示意

Fig. 9 Schematic diagram of the model

下延伸 154 m, 煤层倾角 15°, 设计分段工作面推进共 300 m, 每步工作面推进 10 m。该综采工作面宽度约为 216 m, 长度约为 1 750 m, 平均厚度约为 4 m, 距戊₉₋₁₀ 煤层约为 170 m。通过对己₁₅ 煤层回采过程中上覆岩体的破坏断裂损伤规律, 并研究回采对戊₉₋₁₀ 煤层的影响。

图 10 为工作面推进 175 m 和 800 m 时, 由蠕变损伤本构模型计算的上覆岩层塑性区扩展情况。由

图 10 可知,与前述计算相同工作面顶板破坏首先是剪切破坏,由此顶板裂隙得到发育,进而发展为拉伸破坏,最终发生断裂或冒落。自煤层顶板由下而上,依次发育拉伸破坏区域、剪切破坏区域和未破坏区域,随着工作面的推进,发生拉伸破坏的区域范围逐渐增大,而上部剪切破坏区域也在不断扩大。采动裂隙带岩层处于塑性破坏状态,采动裂隙发育,采动裂隙带上方直至基岩面,岩层基本未遭破坏,在采空区边缘,由于边界煤柱的存在,岩体处于拉压应力区,破断现象发育充分,塑性区在此发育最高,形成两端高凸、中间低凹形状如马鞍状的分布形态。由图 10 可以看出,基本顶的破坏首先从岩梁两端及岩梁中下部出现拉破坏区,岩梁破坏的主要形式为拉破坏。随着推进距离的加大,开切眼一侧梁端上部扩展比较明显,岩梁中下部下侧的拉应力区向开切眼一侧发育也较充分,总体破坏区表现出不对称性。

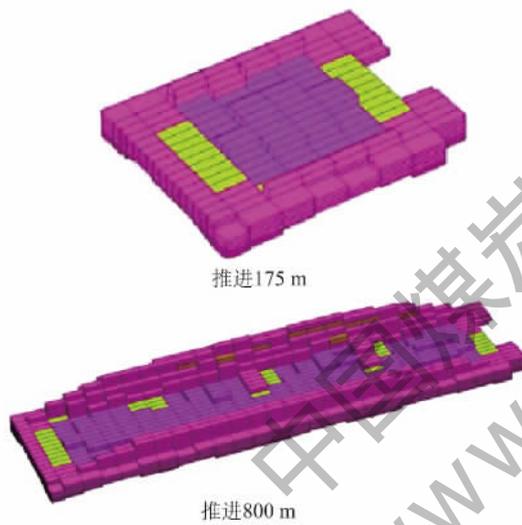


图 10 上覆岩层扩展区

Fig. 10 Overlying strata plastic expansion area

每次的进尺都对顶板围岩造成不同程度的损伤,在顶板形成连续的损伤区域。顶板围岩的损伤扩展区域一直扩展到戊₉煤层的底部,这对戊₉煤层内部瓦斯的释放起到了很好的作用。

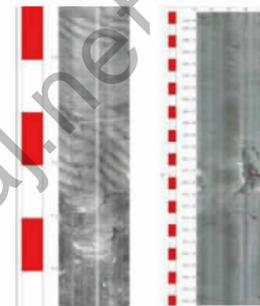
3.3 基于钻孔成像技术的裂隙场现场观测

为研究现场覆岩的破坏形态,在戊组煤层下方,设置瓦斯专巷并钻孔,利用 CXK6-Z 矿用本安型钻孔成像仪对钻孔中裂隙发育情况进行扫描,并统计己组煤层上方覆岩裂隙场发育情况。此瓦斯专巷位于己组和戊组煤层之间,在瓦斯专巷向下布置多组钻孔,钻孔参数见表 2。此钻孔即为瓦斯抽采钻孔,也可作为钻孔成像仪窥视钻孔。图 11(a) 为 1 组钻孔展开,图 11(b) 为统计所有钻孔展开统计后,描述的覆岩破坏状态。

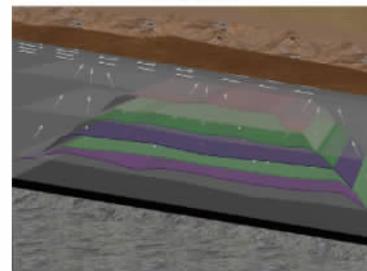
表 2 观测孔参数

Table 2 Observation hole parameters

编号	孔深/m	终孔与工作 面垂距离/m	终孔与工作 面水平距离/m	钻孔水 位/m
1 号	-90.0	90.80	109.40	-11.6
2 号	-150.0	39.50	170.54	-34.5
3 号	-184.0	34.30	221.15	-26.1
4 号	-160.0	64.30	139.29	-25.1
5 号	-91.0	91.85	108.69	-30.3
6 号	-91.5	91.27	109.01	-56.3
7 号	-129.0	61.50	152.75	-78.4
8 号	-94.5	101.89	109.70	-62.7
9 号	-73.5	94.91	109.13	-51.6
10 号	-67.5	105.40	109.97	-39.8
11 号	-69.0	109.10	108.89	-45.2
12 号	-66.0	107.57	109.05	-57.2



(a) 钻孔展开



(b) 覆岩破坏形态

图 11 钻孔展开和覆岩破坏形态

Fig. 11 Drilling expansion plan and overlying strata failure pattern

通过现场对钻孔成像仪探测结果,进行综合分析可知,己₁₅煤层覆岩的裂隙带高度均在己组煤层上方 100 m 处,覆岩的破坏形态呈现出两端高凸、中间低凹形状如马鞍状的分布形态,如图 11(a) 所示。这与前文数值模拟结果一致。通过对比所有钻孔展开图,所观测到的微小贯通裂纹最高出现在 150 m 处,此处为戊组煤层底板下方,对戊组煤层卸压和瓦斯预抽有一定影响,对戊组煤层具有一定卸压增透作用。

4 结 论

(1) RLW-2000M 微机控制煤岩三轴流变实验

机上完成了煤层顶底板岩样的稳定蠕变、卸围压蠕变实验,得到了岩样典型稳定蠕变曲线以及典型卸围压蠕变曲线,并分销处煤岩蠕变实验曲线的典型特征。

(2) 利用 Burgers 体模型对采动影响下的岩体蠕变损伤规律进行了理论分析,建立了采动煤岩蠕变损伤模型,可较好地反映岩体蠕变曲线特征。

(3) 自煤层顶板由下而上,依次发育拉伸破坏区域、剪切破坏区域和未破坏区域,随着工作面的推进,发生拉伸破坏的区域范围逐渐增大,而上部剪切破坏区域也在不断扩大。在采空区边缘形成形状如马鞍状的分布形态,在顶板易形成连续损伤区。

(4) 研究成果揭示了中国平煤集团十矿 σ_{9-10} 煤层顶底板岩层的蠕变特性,为现场煤岩体失稳破坏规律以及煤岩体长期稳定问题的研究提供了参考。

参考文献:

- [1] 赵延林,王卫军,万文,等. 节理剪胀耦合的岩体渗透特性数值研究与经验公式[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 91-96.
Zhao Yanlin, Wang Weijun, Wan Wen, et al. Numerical study of joint shear dilatation coupling seepage characteristic of rock mass and experiential formula[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 91-96.
- [2] 何峰,王来贵,王宏伟,等. 煤岩蠕变-渗流耦合规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 930-933.
He Feng, Wang Laigui, Wang Zhenwei, et al. Experimental study on creep-seepage coupling law of coal(rock) [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 930-933.
- [3] 李顺才,陈占清,缪协兴,等. 破碎岩体流固耦合渗流的分岔[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 754-759.
Li Shunca, Chen Zhanqing, Miao Xiexing, et al. Bifurcation of fluid-solid coupling flow in broken rock [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 754-759.
- [4] 陈占清,李顺才,茅献彪,等. 饱和含水石灰岩散体蠕变过程中孔隙度变化规律的实验[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 26-30.
Chen Zhanqing, Li Shunca, Mao Xianbiao, et al. Experimental on the porosity changing of water-saturated granular limestone during its creep [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 26-30.
- [5] Bai M, Elsworth D. Some aspects of mining under aquifers in China [J]. Mining Sci. Tech., 1990, 10(1): 81-91.
- [6] Palchik V. Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coalmines [J]. Environmental Geology, 2002, 42(1): 92-101.
- [7] Yavuz H. An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of long wall coalmines [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41: 193-205.
- [8] 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 1-5.
Liu Tianquan. Influence of mining activities on mine rockmass and control engineering [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 1-5.
- [9] 钱鸣高,刘昕成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [10] 钱鸣高,许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 466-469.
Qian Minggao, Xu Jialin. Study on the “O Shape” circle distribution characteristics of mining induced fractures in the overlaying strata [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466-469.
- [11] 李树刚. 综放开采围岩活动及瓦斯运移[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [12] 刘泽功,袁亮,戴广龙,等. 开采煤层顶板环形裂隙圈内走向长钻孔抽放瓦斯研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 32-38.
Liu Zegong, Yuan Liang, Dai Guanglong, et al. Study on coal seam roof gas drainage from the strike of annular fracture areas by the long drill method [J]. Engineering Science, 2004, 6(5): 32-38.
- [13] 赵保太,林柏泉. “三软”不稳定低透气性煤层开采瓦斯涌出及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [14] 杨科,谢广祥. 采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1092-1096.
Yang Ke, Xie Guangxiang. Caving thickness effects on distribution and evolution characteristics of mining induced fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1092-1096.
- [15] 刘悦,黄强兵. 模拟堆载作用的黄土边坡土体变形机理实验[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(2): 183-187.
Liu Yue, Huang Qiangbing. Test study for simulating soil deformation mechanism of loess slope under load condition [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(2): 183-187.
- [16] 刘妮娜,门玉明,刘洋. 地震动力作用下土-地铁隧道模型分析[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 295-298.
Liu Nina, Men Yuming, Liu Yang. Model test of soil and metro-tunnels interaction in earthquake activities [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(3): 295-298.
- [17] 姚兆明,周洋,徐颖,等. 人工冻土遗传分数阶导数加速伯格蠕变模型[J]. 工业建筑, 2013, 43(11): 73-76.
Yao Zhaoming, Zhou Yang, Xu Ying, et al. Genetic algorithms fractional order derivative burgers creep model for artificial frozen soil [J]. Industrial Construction, 2013, 43(11): 73-76.
- [18] 毛起绍. 半无限 Burgers 体的应力畸变和位移场[J]. 武汉建材学院学报, 1982, 1(4): 433-444.
Mao Qishao. Stress fields and displacement fields in semi-infinite burgers body [J]. Journal of Wuhan Institute of Building Materials, 1982, 1(4): 433-444.
- [19] 邵志刚,傅容珊,刘洋. 以 Burgers 体模型模拟震后黏弹性松弛效应[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 31-37.
Shao Zhigang, Fu Rongshan, Liu Yang. Simulating post seismic visco-elastic deformation based on burgers model [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 27(5): 31-37.
- [20] 康永刚,张秀娥. 岩石蠕变的非正常分数伯格蠕变模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3237-3241.
Kang Yonggang, Zhang Xiue. Nonstationary parameter fractional Burgers model of rock creep [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3237-3241.