

岩体采动沉陷的损伤效应^①

于广明

(辽宁工程技术大学, 阜新 123000)

杨 伦

(辽宁工程技术大学, 阜新 123000)

谢和平

(中国矿业大学北京研究生部, 北京 100083)

张玉卓

(煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘 要 矿山开采沉陷是具有初始损伤的岩体在采动应力作用下所发生的再变形和再破坏过程, 岩体中的初始损伤影响着岩体的力学行为和变形破坏特征, 因此, 研究和预测岩体采动沉陷, 必须考虑岩体的损伤效应。通过构造具有初始损伤的岩体采动沉陷实验模型, 研究了岩体采动沉陷的损伤效应。研究表明, 岩体采动沉陷量值主要取决于岩体中初始损伤在空间中的总占位, 其中的垂直移动量(下沉)取决于岩体中初始损伤在竖直平面内的总占位, 其占位越大, 下沉值越大; 水平移动量取决于岩体中初始损伤在水平面内的总占位, 其占位越大, 水平移动值越大。

关键词 岩体 采动沉陷 损伤效应

中图法分类号 TD325.1

岩石(岩体)是经过漫长的地质演化过程而形成的复杂结构体^[1]。大量研究表明, 无论是岩石, 还是岩体均具有明显的结构特征, 岩石内部自然存在着大量的具有统计分布的微裂纹、微孔洞; 岩体在各种地质作用下, 产生永久的变形和构造破坏形迹, 如褶皱、断裂、节理、层理、劈理、隐微裂隙、假整合、不整合等结构弱面。岩石(体)中的结构面(初始损伤)削弱岩石(体)的力学强度, 控制着岩体变形、破坏机制及力学法则^[2-5], 现以岩石(体)的应力应变曲线为例(图1)加以说明。

无论是岩石还是岩体, 它们的变形过程可用图1进行描述。图中, $o-p$ 段是应变硬化区, $p-q$ 段是应变软化区, 应变硬化区又分为: $o-e$, $e-f$ 和 $f-p$ 三个曲线段, 分别是初始非线性形变域、线性(弹性)形变域和非线性(包括塑性)形变域。出现的初始非线性形变域是岩石(体)中的结构面压密所造成的, 而出现 $f-p$ 段的非线性形变域是由于压密的结构面重新张开、扩展和滑移等造成的, $p-r$ 段

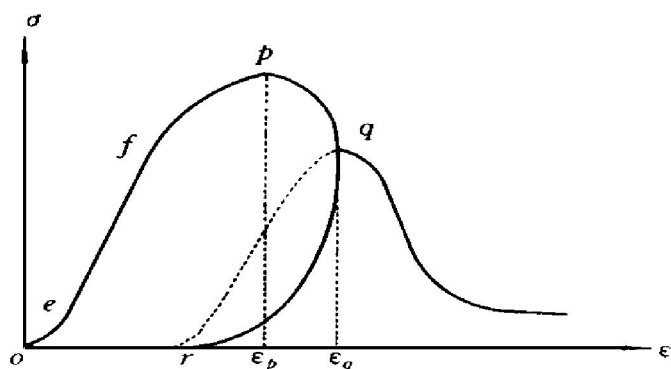


图1 岩石(体)的应力应变曲线

Fig. 1 Curves of stress-strain for rockmass

是非线性破坏阶段, 岩石(体)的应力达到屈服极限 σ_p 后进入软化阶段, 变形随应力下降而增长, 岩石(体)内的大量结构面产生不稳定扩展、汇合而导致破坏。若对岩石(体)重新加载, 显然它只能沿虚线继续变形而再也达不到它原来的最大应力值 σ_p , 说明两次加载的力学响应完全不同, 这显然是由于岩石(体)内的原生结构面和再生结构面(统称损伤)所致^[2-4]。可见, 岩石(体)中的结构面影响着岩石(体)的

① 国家自然科学基金项目 59674005 和辽宁省自然科学基金资助项目
于广明, 男, 36岁, 博士, 副教授

收稿日期: 1997-06-02; 修回日期: 1998-10-23

再变形和再破坏过程,而采动岩体沉陷就是岩体的再变形、再破坏过程,因此,我们今天来研究具有很长且复杂受力历史和变形历史的岩体在采动条件下变形和破坏时,就必须考虑它过去的受力变形和破坏特征及形成的结构(初始损伤)^[6-8]。

1 损伤岩体采动沉陷实验模型

本文模拟原型是以砂质页岩为主的含煤地层,煤系地层富存节理(初始损伤),均匀排列,垂直剖面上的密度为1条/8m×8m,节理迹长4m,节理面内闭合无充填。煤层赋存深度为50m,倾角为0°,采厚为1.6m,采宽为60m。将原型按1:100的比例尺和物理力学参数之间应满足的相似条件缩制成4个模型,在4个模型中分别以节理倾角为0°,30°,60°,90°切割了节理(用以模拟损伤),研究了考虑节理倾角单因素的岩体采动沉陷规律^[4,5](图2)。按相同的开采方案进行开挖实验^[8-11]。

在本项研究中,采用光学透镜法对地表移动进行了观测,获得了损伤岩体采动沉陷导致地表移动的特征值。

2 岩体采动沉陷的损伤效应研究

根据村上与大野提出的描述物体或岩石内部裂隙与空穴的损伤模型,并假定岩体内的节理裂隙面为一平面而且损伤沿微裂隙的界面扩展,则可以推出岩体的损伤张量为^[2,4,12,13]:

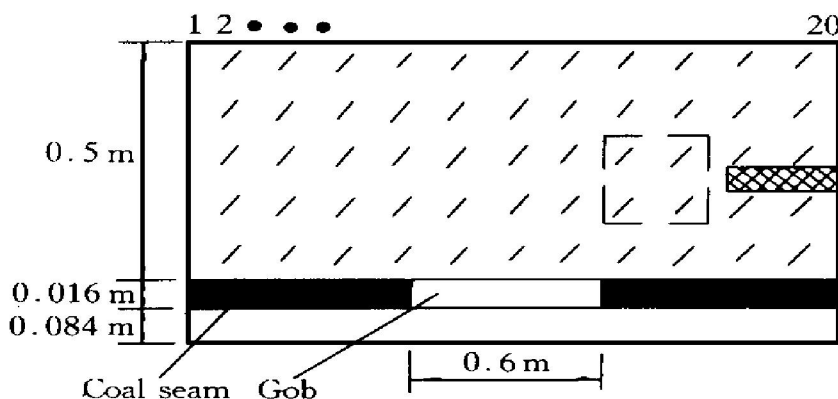


图2 相似材料模型设计示意图

Fig. 2 Sketchy view of physical model

$$\Omega = \frac{L}{V} \bar{N} \bar{a} (\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) =$$

$$\frac{L}{V} \bar{N} \bar{a} [(n_1, n_2, n_3) \otimes (n_1, n_2, n_3)]$$

$$= \frac{L}{V} \bar{N} \bar{a} \begin{bmatrix} n_1 n_1 & n_1 n_2 & n_1 n_3 \\ n_2 n_1 & n_2 n_2 & n_2 n_3 \\ n_3 n_1 & n_3 n_2 & n_3 n_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3) = (\sin \alpha, \cos \alpha, 0)$$

对于平面问题:

$$\Omega = \frac{L}{V} \bar{N} \bar{a} \begin{bmatrix} n_1 n_1 & n_1 n_2 \\ n_2 n_1 & n_2 n_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2) = (\sin \alpha, \cos \alpha)$$

式中 V —模型体积, $\bar{N}$ —模型中所有节理数, $\bar{a}$ —节理表面积, l —节理迹长。

我们按上式可计算出上节介绍的实验模型中初始节理裂隙的损伤张量如下(其中节理布设数量 $N = 150$):

(1) 当 $\alpha = 0^\circ$, 有 $\mathbf{n} = (n_1, n_2) = (0, 1)$, 故

$$\Omega = \frac{80 \times 150 \times 40 t}{2000 \times 500 t} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.48 \end{bmatrix} t$$

(2) 当 $\alpha = 30^\circ$, 有 $\mathbf{n} = (n_1, n_2) = (\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$, 故

$$\Omega = 0.48 \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{3}{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.2078 \\ 0.2078 & 0.36 \end{bmatrix}$$

(3) 当 $\alpha = 60^\circ$, 有 $n = (n_1, n_2) = (\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2})$, 故

$$\Omega = 0.48 \begin{vmatrix} \frac{3}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{4} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.36 & 0.2078 \\ 0.2078 & 0.12 \end{vmatrix}$$

(4) 当 $\alpha = 90^\circ$, 有 $n = (n_1, n_2) = (1, 0)$, 故

$$\Omega = 0.48 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.48 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

将计算出的不同倾角节理引起的岩体损伤量和相应的地表移动特征值列于表1。表1中各项含义是: Ω_x 为 x 方向上损伤, Ω_y 为 y 方向上的损伤, $W_{\max}$ 为地表最大下沉值, $U_{\max}^+$ 为地表逆节理方向最大水平移动值, $U_{\max}^-$ 为地表顺节理方向最大移动值, q 为地表下沉系数, b^+ 为地表逆节理方向水平移动系数, b^- 为地表顺节理方向水平移动系数。

从上述计算可知, 对于一组节理, 损伤张量所对应的矩阵值为零, 其对应矩阵元素大小受节理密度、长度和方向的控制。对于本文实验给定了密度、长度和间距的初始节理群, 其损伤张量仅为节理外法线矢量 $n \otimes n$ 的函数。

表1 不同倾角节理引起的岩体损伤量统计及相应的地表移动值和移动参数

Table 1 Damage variables of different models and corresponding character values of surface displacement

Item	Parameters			
$\alpha / (^\circ)$	0	30	60	90
Ω_x	0.0	0.12	0.36	0.48
Ω_y	0.48	0.36	0.12	0.0
$W_{\max} / \text{mm}$	1020	1162	1304	1410
$U_{\max}^+ / \text{mm}$	388	361	378	382
$U_{\max}^- / \text{mm}$	389	456	448	380
q	0.64	0.73	0.81	0.89
b^+	0.380	0.311	0.290	0.280
b^-	0.381	0.392	0.344	0.280

从表1可以看出, 不同损伤状态下, 地表移动的变化规律是: 地表最大下沉值和地表下

沉系数 q 随着 y 方向的损伤减少(x 方向上的损伤增大)而增加, 说明地表的竖向位移量主要取决于竖直断面的孔隙总占位, 由表1可以回归出地表最大下沉值和下沉系数与损伤变量的关系为:

$$W_{\max} = -416.667 \Omega_y^2 - 568.333 \Omega_y + 1399.4$$

$$q = -0.1157 \Omega_y^2 - 0.42778 \Omega_y + 0.881$$

同时我们也能看出, 地表的水平移动规律: 背离节理倾斜方向的最大水平移动值在 $\alpha \leq 30^\circ$ 时, 随 y 方向的损伤减小而减小, 而在 $\alpha \geq 60^\circ$ 时, 随 y 方向的损伤量值的减小有所增加; 顺节理倾斜方向的最大水平移动值在 $\alpha \leq 30^\circ$ 时, 随着 y 方向的损伤量值的减小而增加, 在 $\alpha \geq 60^\circ$ 时, 随着 y 方向的损伤量值减小而减小。水平移动系数仅在顺节理方向上随 Ω_y 的减小在 $\alpha = 30^\circ$ 时有弱增加, 其它情况均随 Ω_y 的减小而逐渐减小。由表1可以回归出地表最大水平移动值和最大水平移动系数与 Ω_y 的经验关系

$$U_{\max}^+ = 358.7960 \Omega_y^2 - 176.389 \Omega_y + 386$$

$$U_{\max}^- = -1562.5 \Omega_y^2 + 771.677 \Omega_y + 379.3$$

$$b^+ = 0.69444 \Omega_y^2 - 0.15 \Omega_y + 0.286$$

$$b^- = -0.86417 \Omega_y^2 - 568.333 \Omega_y + 1399.4$$

由以上分析可知, 竖直面内发展的空隙加剧了下沉的发生, 而阻碍了水平移动的传播; 水平面内发展的空隙加剧了水平移动的传播。

3 结语

本文通过初始损伤对采动岩体沉陷规律的影响的定性和定量分析研究, 揭示了岩体采动沉陷的损伤效应。研究表明, 岩体采动沉陷量值主要取决于岩体中初始损伤在空间中的总占位, 其中的垂直移动量(下沉)取决于岩体中初始损伤在竖直平面内的总占位, 其占位越大, 下沉值越大; 水平移动量取决于岩体中初始损伤在水平面内的总占位, 其占位越大, 水平移

动值越大。这对结构化岩体采动沉陷更深层次机理的认识、开采沉陷预测建模等具有重要的理论价值；同时在生产实践中，如果在采动前探测出预采区上覆岩体的初始损伤(统计初始节理)状况，就可能根据本文的研究结果，去预测岩体破坏特征、开采影响范围、裂隙分布状态以及地表沉陷量值，为地表和地下工程设施保护提供可靠依据。本文虽然受实验条件的限制，仅研究了单组规则节理对开采沉陷规律的影响，但获得了开采沉陷量值与损伤岩体中初始孔隙总占位的数量关系，所以无论几组节理、规则与否，只要统计出所有初始节理在岩体中的总占位，就可能去预测它对开采沉陷量值的影响。

REFERENCES

- 1 Sun Guangzhong(孙广忠). *Mechanics of Rock Mass* (岩体结构力学). Beijing: Science Press, 1988: 36.
- 2 Xie Heping(谢和平). *Damage Mechanics of Rock & Concrete*(岩石、混凝土损伤力学). Xuzhou: Press of China Mining University, 1990: 12.
- 3 Tang Chun'an(唐春安). *Disaster During Rock Damage*(岩石破裂过程中的灾变). Beijing: Coal Industry Press, 1993: 31–41.
- 4 Yuan Jianxin(袁建新). *Rock and Soil Mechanics*(岩土力学), 1993, 14(1): 1–31.
- 5 Yu Guangming(于广明) and Xie Heping(谢和平). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*(岩土工程学报), 1998, 20(6): 30–34.
- 6 Yu Guangming(于广明). *Non-Linear Theory and Practice Director on Subsidence in Mining*(矿山开采沉陷非线性理论与实践导引). Beijing: Coal Industry Press, 1998: 22–66.
- 7 Yu Guangming(于广明) and Xie Heping(谢和平). *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (岩石力学与工程学报), 1998, 17(1): 16–23.
- 8 Yu Guangming(于广明). *Journal of China Safety Science*(中国安全科学学报), 1998, 8(5): 6–10.
- 9 Yu Guangming(于广明) and Xie Heping(谢和平). *Experiment Mechanics*(实验力学), 1998, 13(3): 20–28.
- 10 Chaboche J L. *J Appl Mech*, 1988, (55): 59–63.
- 11 Krajcinovic D. *Appl Mech Reviews*, 1984, 37(1): 1–6.

INFLUENCE OF STATISTICAL INITIAL DAMAGE ON SURFACE DISPLACEMENT IN JOINTED ROCKS

Yu Guangming, Xie Heping[†], Yang Lun and Zhang Yuzhuo^{††}

Liaoning Engineering and Technology University, Fuxin 123000, P. R. China

[†] *Beijing Graduate School, China University of Mining and Technology,
Beijing 100083, P. R. China*

^{††} *Central Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, P. R. China*

ABSTRACT Surface displacement caused by coal mining is an extremely complex process, the existence of joints makes rock stratum express the behavior of nonlinearity, heterogeneity and anisotropy in macro-structure and deformation. Two kinds of physical model, one containing no initial joints and another containing some initial joints, were employed to investigate systematically the influence of initial joints on the surface subsidence. Moreover, within the framework of damage mechanics, the influence of initial joints on the surface displacement was investigated, and the empirical relations between the character value of surface displacement and damage variable were obtained.

Key words jointed rocks surface subsidence displacement damage variable

(编辑 何学锋)