

# 节理化岩体开采沉陷的损伤统计研究<sup>1)</sup>

谢和平

于广明 杨 伦

(中国矿业大学北京校区,北京 100083)(辽宁工程技术大学,阜新 123000)

张玉卓

(煤炭科学研究总院,北京 100013)

**摘要** 构造了一台无初始节理和一套有初始节理的岩体采动沉陷相似材料模型,进行模拟开挖实验,系统研究初始节理对岩体采动沉陷的影响规律,然后运用损伤力学理论研究节理在岩体采动沉陷中的作用,建立了地表移动特征值与岩体损伤变量的经验关系。

**关键词** 节理化岩体,开采沉陷,地表移动特征值,损伤变量

## 1 引 言

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,其中的结构面如节理、层理等弱面(损伤)削弱了岩石(体)的力学强度,影响着岩石(体)的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<sup>[1~3]</sup>。所以,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。因此,本文就节理对开采沉陷的影响问题进行研究,旨在指导地质构造复杂、富存节理的矿区开采沉陷规律研究、预测及“三下采煤”生产实践。但是,岩体结构面在岩体内部的赋存状况及其在采动影响下的扩展和再生过程均是极其复杂的,利用原位岩体研究是无法实现的,而国内外广泛采用的相似材料模拟实验却能很好地对这些问题进行研究。本文利用相似材料模型研究节理化岩体采动沉陷规律,并利用损伤力学理论加以分析和研究。

## 2 节理化岩体采动沉陷实验

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,均匀排列,垂直剖面上的密度为 1 条 / 8 m × 8 m,节理迹长 4 m,节理面内闭合无充填。煤层赋存深度为 50 m,倾角为 0°,采厚为 1.6 m,采宽为 60 m。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 5 个模型,其中 4 个模型中切割了

节理,节理倾角分别为 0°, 30°, 60°, 90°,依次编号为模型 II、模型 III、模型 IV、模型 V;另一个为无节理的模型(模型 I),以便对比,研究了考虑节理倾角单因素的岩体采动沉陷规律<sup>[4~5]</sup>(图 1)。按相同的开采方案进行开挖实验。采用光学透镜法观测位移,观测到的地表移动特征值列于表 1。

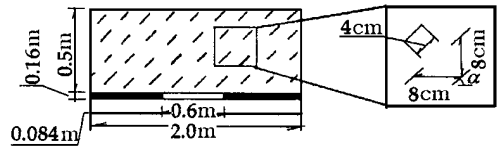


图 1 相似材料模型设计图

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

节理倾角 / °	0	30	60	90
X 方向的损伤 $x$	0.0	0.12	0.36	0.48
Y 方向的损伤 $y$	0.48	0.36	0.12	0.0
地表最大下沉值 $W_{\max}$ (mm)	1020	1162	1304	1410
地表逆节理方向最大水平移动值 $U_{\max}^+$ (mm)	388	361	378	382
地表顺节理方向最大水平移动值 $U_{\max}^-$ (mm)	389	456	448	380
地表下沉系数 $q$	0.64	0.73	0.81	0.89
地表逆节理方向水平移动系数 $b^+$	0.380	0.311	0.290	0.280
地表顺节理方向水平移动系数 $b^-$	0.381	0.392	0.344	0.280
备注	无损伤岩体采动沉陷量及参数: $W_{\max} = 1001$ mm, $U_{\max}^+ = U_{\max}^- = 363$ mm, $q = 0.62, b^+ = b^- = 0.363$			

1) 国家自然科学基金重点项目(59634030)子项目,国家自然科学基金项目(59674005)、煤炭优秀青年科学基金项目资助。  
1997-05-29 收到第 1 稿,1998-06-06 收到修改稿。

### 3 节理岩体采动沉降的损伤张量计算及沉降量值的统计损伤分析

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<sup>[1~3,6]</sup>

$$= \frac{1}{V} Na(n \odot n) =$$

$$\frac{1}{V} Na[(n_1, n_2, n_3) \odot (n_1, n_2, n_3)] =$$

再 
$$\frac{1}{V} Na \begin{bmatrix} n_1 n_1 & n_1 n_2 & n_1 n_3 \\ n_2 n_1 & n_2 n_2 & n_2 n_3 \\ n_3 n_1 & n_3 n_2 & n_3 n_3 \end{bmatrix}$$
 程

式中  $n = (n_1, n_2, n_3) = (\sin \alpha, \cos \alpha, 0)$ .

对于平面问题

$$节理 = \begin{bmatrix} x & xy \\ y & yx \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1+n^2}} \begin{bmatrix} n_1 n_1 & n_1 n_2 \\ n_2 n_1 & n_2 n_2 \end{bmatrix}$$

式中  $n = (n_1, n_2) = (\sin \alpha, \cos \alpha)$ .

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:

1) 对于模型 II 因  $\alpha = 0^\circ$ , 所以  $n = (n_1, n_2) = (0, 1)$ , 故

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

2) 对于模型 III, 因  $\alpha = 30^\circ$ , 所以  $n = (n_1, n_2) =$

$$\left( \frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{4} \right), \text{故}$$
$$= 0.48 \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{3}{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.2078 \\ 0.2078 & 0.36 \end{bmatrix}$$

3) 对于模型 IV, 因  $\alpha = 60^\circ$ , 所以  $n = (n_1, n_2) =$

$$\left( \frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2} \right), \text{故}$$
$$= 0.48 \begin{bmatrix} \frac{3}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.36 & 0.2078 \\ 0.2078 & 0.12 \end{bmatrix}$$

4) 对于模型 V, 因  $\alpha = 90^\circ$ , 所以  $n = (n_1, n_2) =$

$(1, 0)$ , 故

$$= 0.48 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.48 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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.

从表 1 可以看出,不同损伤状态下,地表移动的变化规律是:最大下沉值和下沉系数  $q$  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

$$W_{\max} = -416.667 \frac{2}{y} - 568.333 y + 1399.4$$

$$q = -0.1157 \frac{2}{y} - 0.42778 y + 0.881$$

同时也能看出,地表水平移动变化规律: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  $y$  的减小在  $\alpha = 30^\circ$  时有所增加,其它情况均随  $y$  的减小而逐渐减小,回归出最大水平移动系数与  $y$  的变化规律

$$U_{\max}^+ = 358.7460 \frac{2}{y} - 176.389 y + 386$$

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

$$b^+ = 0.69444 \frac{2}{y} - 0.15 y + 0.286$$

$$b^- = -0.86416667 \frac{2}{y} - 568.333 y + 1399.4$$

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.

### 4 主要结论

节理是岩体中广泛存在的结构面,对岩体采动沉降规律具有严重的影响,但因其量大,研究每一个节理对于岩体采动沉降影响不切实际,同时因其尺寸相对岩体尺寸来说是低一阶小量,所以用损伤的宏观效应来研究采动岩体中节理对沉降影响的总体效应是合理的,损伤力学是节理岩体采动沉降研究的有效理论.

通过初始节理(初始损伤)对采动岩体沉降规律的影响的定性和定量分析研究,认清了节理对采动岩体

内部破坏机理和地表移动特征的影响规律,这对开采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. 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,为地上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.

参 考 文 献

1 谢和平著. 岩石、混凝土损伤力学. 徐州:中国矿业大学出版社,1990. 2  
 2 Chaboche J L. Continuum Damage Mechanics Part I - General Concepts. *J of Applied Mechanics*, 1988 (55): 59 ~ 63  
 3 Krajcinovic D. Continuum Damage Mechanics. *Appl Mech Reviews*, 1984, 37(1): 1 ~ 6  
 4 于广明. 节理岩体开采沉陷规律与实验验证. 中国煤炭学会第四届青年科技学术会文集, 北京:煤炭工业出版社, 1996. 162 ~ 166  
 5 于广明. 分形及损伤力学在开采沉陷中的应用. 博士论文, 北京:中国矿业大学北京研究生部, 1997  
 6 袁建新. 岩体损伤问题. 岩土力学, 1993, 14(1): 1 ~ 31  
 7 Chaboche J L. Continuum Damage mechanics Part I - General Concepts. *J of Applied Mechanics*, 1988 (55): 59 ~ 63  
 8 Krajcinovic D. Continuum Damage Mechanics. *Appl Mech Reviews*, 1984, 37(1): 1 ~ 6  
 8 Dougill J W, Lau J C, Burt N J. *Mechanics in Eng.*, AS CE. EMD., 1976. 333 ~ 355  
 9 Dragon A, Mroz Z. A Continuum Model for Plastic - Brittle Behaviour of Rock and Concrete. *Int J Engineering Sciences*, 1979 (17): 121 ~ 137

10 谢和平, 鞠 杨, 董毓利. 经典损伤定义中的‘弹性模量法’探讨. *力学与实践*, 1997, 19(2): 1 ~ 5  
 11 杨更社. 岩体损伤力学特征及细观损伤的 CT 识别(博士论文). 西安: 西安理工大学. 1995. 11  
 12 顾大钊. 相似材料与相似模型. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995. 12  
 13 袁建新. 岩体损伤问题. *岩土力学*, 1993, 14(1): 1 ~ 31

STATISTICAL RESEARCH ON  
 DAMAGE OF SURFACE SUBSIDENCE  
 IN JOINTED ROCK

XIE Heping

(Beijing Graduate School, China University of Mining  
 and Technology, Beijing 100083, China)

YU Guangming YANG Lun

(Liaoning Engineering and Technology University,  
 Fuxin 123000, China)

ZHANG Yuzhuo

(Central Coal Mining Research Institute,  
 Beijing 100013, China)

**Abstract** In this paper, two simulated material models, one contains some initial joints and another contains no initial joints, are employed to investigate systematically the influence of initial joints on the surface subsidence. Moreover, within the framework of damage mechanics, the influence and effect of initial joints on the surface subsidence are investigated, and the empirical relation between the characteristic value of surface subsidence and damage variable is obtained.

**Key words** jointed rock, surface subsidence, characteristic value of surface subsidence, damage variable

更正 本刊第 4 期庄锦华的‘拉压性能不同材料厚壁圆筒和厚壁球壳的极限压力分析’一文中公式(7)的第 2 式(第 40 页),因校对错误,应将

$$\sigma = - \frac{r_s^2 \sigma}{b^2 \left( 1 + \frac{r_s^2}{2} + r_s^2 (1 - \dots) \right) \left( \frac{b^2}{r^2} + 1 \right)} \quad \text{调整为} \quad \frac{\text{随}}{\text{随}} = \frac{r_s^2 \sigma}{b^2 \left( 1 + \frac{r_s^2}{2} + r_s^2 (1 - \dots) \right) \left( \frac{b^2}{r^2} + 1 \right)}$$

