

·成果简介·

# 矿山开采沉陷的非线性机制和规律研究\*

于广明\* 谢和平† 孙洪泉‡ 张玉卓‡ 杨伦\*

(\* 辽宁工程技术大学, 阜新 123000; † 中国矿业大学, 北京 100083; ‡ 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

[关键词] 矿山开采沉陷, 非线性, 分形, 耗散结构

矿山开采沉陷是一个复杂的非线性力学问题, 从岩体的初始损伤在采动应力作用下的演化, 到采动岩体冒落、断裂、离层形成的裂隙网络, 再到众多裂隙扩展, 从而导致整个上覆岩层乃至地表移动、变形和破坏的全过程中, 均表现出极强的非线性机制和规律。

## 1 采动岩体沉陷的初始损伤效应

岩石(体)中的结构面(初始损伤)削弱了岩石(体)的力学强度, 控制着岩石(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和再破坏过程。研究这种具有很长受力历史和变形历史的岩体在采动条件下的变形和破坏时, 必须考虑它过去的受力历史、破坏特征及形成的结构。因此, 我们就初始节理对开采沉陷的影响问题进行了研究, 旨在揭示初始损伤对岩体的非线性作用机制和对开采沉陷的影响规律, 指导地质构造复杂、富存节理的矿区开采沉陷规律研究和预测。

我们构造了一组含有不同分布的节理(初始损伤不同)岩体相似材料模型, 进行开挖实验, 观测地表的移动和变形值。根据损伤力学原理统计计算出各模型的损伤变量, 并与各模型观测的地表移动值一一对应起来。回归出地表移动特征值(最大下沉值  $W_{MAX}$ , 背离节理倾向的最大水平移动值  $U_{MAX}^+$ , 顺着节理倾向的最大水平移动值  $U_{MAX}^-$ )与岩体损伤变量  $\Omega_Y$  (下标  $Y$  是沿着竖向的损伤变量)的经验数量关系:

$$W_{MAX} = -416.67\Omega_Y^2 - 568.33\Omega_Y + 1399.40$$

$$U_{MAX}^+ = 358.80\Omega_Y^2 - 176.39\Omega_Y + 386.00$$

$$U_{MAX}^- = -1562.50\Omega_Y^2 + 771.68\Omega_Y + 379.30$$

研究表明, 初始损伤对岩体采动沉陷具有严重影响, 损伤岩体采动沉陷量值较同等条件下的无损伤岩体采动沉陷量值要大, 其中垂直移动量(下沉)和水平移动值分别取决于岩体初始孔隙(损伤)在竖直平面和水平面内的总占位, 占位越大, 下沉值和水平移动值越大。造成这种结果的原因, 即初始节理(初始损伤)对开采沉陷的非线性作用机制是: 采场上覆岩体自下而上依次发生冒落、断裂、离层、弯曲并向上传递到地表, 形成下沉盆地, 在此沉陷过程中, 上覆岩体在距采场一定高度内往往形成拱式平衡结构, 阻止开采空间向上传递, 从而使地表最大下沉小于开采空间的高度, 而节理的存在破坏了拱式平衡结构, 使拱式平衡结构上移, 并伴有岩块体沿节理的突变滑移; 同时, 节理使岩体的整体强度严重削弱, 采动岩体变形量值增加。因此, 节理(初始损伤)使采动岩体移动更充分, 使采出空间传递到地表的量值更大<sup>[1]</sup>。

## 2 采动岩体分形裂隙网络及其演化规律

在矿山开采沉陷过程中, 伴随着多种物理性质和力学性能的变化, 如裂隙扩展演化、体积膨胀、强度降低等, 既然是伴随现象, 他们之间及其与开采沉陷过程必然存在着内在的联系, 并遵循一定的规律性。所以, 研究采动岩体裂隙网络及其演化规律对采动岩体沉陷更深层次机理和规律的认识、采动岩体再生结构系统强度评估及稳定性评价、地表沉陷量值预测时所需的力学参数的拟定等, 具有重要理论研究价值; 同时, 采动岩体裂隙分布也是水体下采矿时岩体透水性的评价因素。因此, 该项研究对安全合理地进行水体下、铁路下、建筑物下采矿具有重

国家自然科学基金重点项目, 批准号 59634030(子课题); 国家自然科学基金项目, 批准号 59674005

本文于 1998 年 6 月 22 日收到。

要的实践意义。采动岩体裂隙分布交错复杂, 单条裂隙的生成扩展路径弯弯曲曲, 裂隙张开程度大小不等, 用常规几何理论很难描述, 而由 B. B. Mandelbrot(1975, 1983) 创立的分形几何理论是描述这种不规则现象或事物的有力工具。

我们借助于相似材料模拟实验, 再现了采动岩体的破坏形态和裂隙分布状态, 并用分形几何理论来研究采动岩体裂隙分布的分形特征, 以实现采动岩体裂隙分布的定量描述。通过大量实验发现, 无论岩体岩性如何、岩体中是否有初始节理、开采宽度 ( $L$ ) 如何变化、采厚如何, 采动后形成的裂隙分布都具有很好的自相似性和普适的分形特征。因此, 我们将采动岩体裂隙网络称作采动岩体分形裂隙网络。

通过对一个模型不断增加采宽条件, 对采动岩体分形裂隙演化规律研究发现: 随着采宽  $L$  的增大, 采动岩体分形裂隙网络的分形维数值  $D$  不断随之增大, 并使已形成的分形裂隙网络上不断迭加新的分形裂隙网络。迭加后的裂隙网络仍是分形的, 且更复杂, 岩体破裂程度更大, 使之出现升维现象。 $L$  和  $D$  的经验关系为:  $D = 0.00017L^2 - 0.00103L + 1.25960$ 。

为探讨地表下沉值与采动岩体裂隙的关系, 通过对一组相似材料模型的实验研究发现: 地表下沉值  $W_{\max}$  与  $D$  值具有很好的对应关系, 即采动岩体内部裂隙的空间占位越大,  $D$  越大, 从而采出空间传递至地表导致其下沉量值越小, 两者的经验数量关系为:

$$W_{\max} = -16.86D^3 + 64.12D^2 - 81.06D + 75.37$$

### 3 采动断层活化的分形界面效应

大量研究表明<sup>[2]</sup>, 地质断裂面具有明显的统计分形性质, 且表现为各向异性分形特征; 进一步研究表明, 地质断裂面是自仿射分形。为了模拟这种分形断裂面对岩体采动沉陷规律的影响, 我们首先采用 Weaerstrass-Mandelbrot 函数构造了自仿射意义下的分形曲线, 并在实验室进行相似材料模拟, 模拟地下开挖引起分形断层面活化现象, 总结分形断面对采动岩体沉陷的影响规律。研究表明, 地质断裂面在采动影响下的活化现象严重受控于断裂面的分形几何形态, 具有明显的分形界面效应, 表现为断层面分形维数越大, 断层面两侧岩体互相约束性越大, 从而导致断层面两侧的台阶落差值随着断层面分形的减小而增大。

## 4 矿山开采沉陷孕育和发展过程的耗散结构特征

根据十几年来对矿山开采沉陷现象的研究, 我们认识到: 矿山开采沉陷的主体是地壳岩石圈的表层部分, 它受地心和日月潮汐引力作用, 不断与外界有着能量和物质的交换, 是一个开放系统; 然而, 随着地下开挖的进行, 岩体自重应力重新分布, 即产生应力差, 从而使岩体系统远离平衡态, 寻求新的平衡, 导致岩体冒落、断裂、离层, 发生沉陷过程; 采动岩体沉陷过程中, 岩体内部的各级结构单元(可视为子系统)自身分岔、互相影响、互惠合作、协同发展, 表现出明显的非线性相互作用; 岩体中存在的结构缺陷是随机分布的, 对采动应力的响应也是随机的, 即存在随机涨落, 并导致岩体有序结构组的形成。可见, 矿山开采沉陷孕育和发展过程中表现出的开放性、非均衡性、非线性作用和涨落导致有序, 正是形成耗散结构的 4 个必要条件。因此, 矿山开采沉陷孕育和发展过程恰是一个形成耗散结构的过程。利用耗散结构理论从根本上来认识和研究矿山开采沉陷的孕育和发展过程, 对开采沉陷的正确预测、矿山开采沉陷的深入研究和发 展无疑是极其有益的。为实现这一目标, 必须对矿山开采影响范围内的岩体内部结构(子系统)的开裂和演化机制、岩体内的无序因素如何影响其力学性能等问题进行深入细致的研究, 以便建立岩体系统开采沉陷的演化方程<sup>[3-5]</sup>。

## 5 覆岩离层形成的突变机理

地下煤层采出后, 采区中央上覆岩层会在自重作用下处于纯拉应力状态, 致使岩层层裂, 产生离层。离层的产生是在拉应力逐渐积累到一定程度而发生的突变过程。通过大量研究, 根据力学系统平衡稳定原理建立了离层突变过程的基本力学模式:

$K_N + K_C = 0$ , 离层产生的临界条件;

$K_N + K_C > 0$ , 不产生离层;

$K_N + K_C < 0$ , 产生离层;

式中:  $K_N$  为层下位岩层支撑作用的刚度;

$K_C$  为层界面本身(粘结作用)的刚度。上式可以看出, 采动岩体层裂离层实际上决定于上下介质的本构关系。

## 参 考 文 献

[1] 于广明, 谢和平. 节理岩体采动沉陷实验及损伤力学分析. 岩石

- 力学与工程学报, 1998, 17(1): 16—23.
- [2] 于广明, 谢和平, 王金安. 地质断裂面分形性研究. 煤炭学报, 1996, 16(5): 24—29
- [3] 于广明. 当今采动地层塌陷与控制途径研究. 自然灾害学报, 1996, 15(3): 34—39.
- [4] 于广明. 非线性科学在矿山开采沉陷中的应用研究. 阜新矿业学院学报, 1997, 16(4, 5): 385—525.
- [5] 于广明. 井筒煤柱合理留设相似模拟研究. 实验力学, 1996, 21(3): 48—53.

## STUDIES ON THE NONLINEAR MECHANISM AND LAWS OF MINING SUBSIDENCE

Yu Guangming<sup>①</sup> Xie Heping<sup>②</sup> Sun Hongquan<sup>③</sup> Zhang Yuzuo<sup>③</sup> Yang Lun<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> Liaoning Technical University, Fuxin 123000; <sup>②</sup> Beijing Graduate School, China University of Mining, Beijing 100083;

<sup>③</sup> Central Coal Mining Research Institute, Beijing 100013)

**Key words** mining subsidence, nonlinear, fractal, dissipative structure, self-organization, synergetics, catastrophe

·资料·信息·

### 1998年度获国家自然科学基金面上项目 资助的前20所高等院校名单 (按资助金额排序)

单位名称	项数(项)	资助金额(万元)
清华大学	107	1 374.10
北京大学	95	1 189.00
浙江大学	74	907.60
中国科学技术大学	63	836.30
复旦大学	61	757.01
南京大学	56	695.00
四川联合大学	49	646.00
天津大学	51	614.60
北京医科大学	48	579.50
中国人民解放军第四军医大学	47	547.00
中国农业大学	43	544.50
南开大学	47	525.70
中山大学	46	518.90
中国人民解放军第三军医大学	43	488.00
华南理工大学	34	457.30
华中理工大学	36	455.90
浙江农业大学	35	452.00
武汉大学	40	451.60
中国人民解放军第二军医大学	36	441.00
上海交通大学	34	419.40

(综合计划局信息处 供稿)