

分形及损伤力学在矿山开采沉陷中的应用研究

于广明

(辽宁工程技术大学 阜新 123000)

博士学位论文摘要 岩体是经过漫长的地质演化过程而形成的复杂结构体,由于地质构造运动的影响,其内部存在大量的断层、节理、层理和地质弱面。这些地质结构面(即损伤)的存在,破坏了岩体的整体性,影响着岩体的变形性质和强度特性,从而导致岩体开采沉陷更加复杂,即:在规律上的非规范性、在程度上的剧烈性和在损害上的严重性。因此,仅采用常规的开采沉陷理论来分析和解决矿山开采沉陷工程问题已暴露出诸多的缺陷和不足。

基于上述问题和认识,提出了矿山开采沉陷理论研究和实践应用的新思路:将损伤力学及分形几何等现代非线性科学应用于开采沉陷学科领域,在现有的开采沉陷理论基础上,进一步揭示岩体(特别是地质构造复杂的岩体)开采沉陷的更深层次的机理、特征和规律,进一步发展矿山开采沉陷学科,使其在理论上更完备、实践上更符合实际、工程预测上更准确、应用上切实可行。

在此研究思路的指导下,就节理对岩体采动沉陷规律的影响、采动岩体裂隙分形分布及演化规律、采动断层活化的分形界面效应等3个问题进行了一系列的理论研究和实验研究:

(1) 初始节理(初始损伤)对采动岩体沉陷规律的影响研究

为了研究岩体内初始损伤(初始节理)对开采沉陷的影响规律,分别制作无节理和考虑节理倾角单因素的相似材料模型,进行了系统的实验研究;

为了进一步得到岩体内初始损伤(初始节理)对开采沉陷的影响的定量规律,应用损伤力学原理统计研究了初始节理(初始损伤)在开采沉陷中的控制作用,建立了开采沉陷量值与损伤量值的数量关系;

应用损伤力学原理定性分析非贯通节理岩体采动沉陷的损伤岩梁弯曲效应,进一步验证实验研究成果。

(2) 采动岩体分形裂隙网络研究

制作一套考虑不同开采宽度的相似材料模型,在实验观测的基础上统计分析采动岩体裂隙分布随采宽增加(工作面推进)的变化规律和分形性质;

制作一套考虑不同岩性的相似材料模型,分析了岩性对采动岩体裂隙分布的影响和分形性质;

研究初始节理对采动岩体裂隙网络的影响规律,检验其分形性质。

(3) 采动断层活化的分形界面效应研究

进行野外实地勘查、勘测和研究断层面的结构形态与分形性质;

构造了自仿射分形曲线来模拟实际的断层面,制作一套含有这种分形断层面的相似材料模型,系统研究分形断面对断层活化的影响规律;

对采动断层活化的分形界面效应进行数值模拟。

通过上述实验和研究工作获得了如下的成果:

(1) 岩体内存在的初始节理打破了岩体采动破坏和地表移动的正常规律,与无节理岩体采动沉陷规律相比较(地表移动稳定后),初始节理在岩体采动沉陷过程中起催化作用,打破了采动岩体裂隙的分布规律和扩展方向,使覆岩破坏范围和地表移动范围增大,地表移动量值也随之增加。

(2) 通过实验现场观测发现:不同展布的初始节理,使岩体表现出不同的破坏机制。水平初始节理使岩体出现层裂、层滑现象,使岩体在采动过程中出现离层数量增多、离层高度增大、地表移动矢量增大;倾斜初始节理使采动覆岩中出现沿倾斜节理滑移的现象,从而导致岩体破坏区域和地表移动曲线出现偏态,最大下沉点和最大水平移动点均偏向节理的倾斜方向;高角度初始节理使岩体破坏出现尖角突变现象,使覆岩破坏更加剧烈。

(3) 考虑初始节理倾角单因素的影响,随着节理倾角的增大,采动岩体裂隙扩展角随之增大,覆岩破坏范围和地表移动范围随之增大,地表下沉值和水平移动值也随之增大,且地表下沉值的增加幅度较水平移动增加幅度大。

1999年1月29日收到初稿。1999年3月19日收到修改稿。

作者于广明简介:男,1963年1月生,1997年6月在中国矿业大学工程力学专业获博士学位,导师是谢和平教授,副导师是杨伦教授和张玉卓教授;现任辽宁工程技术大学研究生部副主任,兼辽宁省采矿损害鉴定中心副主任、辽宁工程技术大学与控制工程中心副主任。

(4) 初始损伤对岩体采动沉陷具有严重的影响, 损伤岩体采动沉陷量值较无损伤岩体采动沉陷量值要大。其中的垂直移动量主要以决于损伤岩体中初始孔隙在竖直平面内的总占位, 其占位越大, 下沉值越大; 水平移动量主要取决于损伤岩体中初始孔隙在水平面内的总占位, 其占位越大, 水平移动值越大。

(5) 在给定的研究条件下, 地表移动特征值(最大下沉值 W_{\max} 、下沉系数 q 、背离节理倾斜方向的最大水平移动值 U_{\max}^+ 和水平移动系数 b^+ 、顺着节理倾斜方向的最大水平移动值 U_{\max}^- 和水平移动系数 b^-) 与岩体损伤变量 y 存在如下明确的定量对应关系:

$$\begin{aligned} W_{\max} &= -416.667 \frac{y^2}{y} - 568.333 y + 1399.4 \\ q &= -0.1157 \frac{y^2}{y} - 0.42778 y + 0.881 \\ U_{\max}^+ &= 358.7960 \frac{y^2}{y} - 176.389 y + 386 \\ U_{\max}^- &= -1562.5 \frac{y^2}{y} + 771.677 y + 379.3 \\ b^+ &= 0.69444 \frac{y^2}{y} - 0.15 y + 0.286 \\ b^- &= -0.86417 \frac{y^2}{y} - 586.333 y + 1399.4 \end{aligned}$$

(6) 采动岩体裂隙形成、扩展、分布极其复杂, 处于明显的混沌状态, 具有分形特征, 用分形维数可以综合描述采动岩体裂隙演化程度(裂隙条数、迹线长度、张开度等)。

(7) 随着工作面的推进, 采宽的逐渐增加(或重复采动), 使采动岩体裂隙分布越趋复杂: 破坏范围增大、破坏程度增大、不规则性增加, 导致采动岩体分形裂隙网络出现升维现象, 在给定的研究条件下的采动岩体分形裂隙网络的分形维数 D 与采宽 L 具有很好的定量关系:

$$D = 0.000172432L^2 - 0.0102654L + 1.2596$$

(8) 岩体特性对采动岩体裂隙的分布规律有一定影响。抗压强度较大的岩体, 采动后形成的裂隙空间占位较大, 其形成的分形裂隙网络的分形维数值也较大; 而地表下沉值则较小, 地表下沉值与采动后岩体中形成的裂隙空间占位的分形维数成反比关系。

(9) 含有规则展布初始节理的岩体采动后形成的裂孙网络具有分形性质, 且随着初始节理倾角的增大, 采动岩体裂隙网络的分形维数值越趋减小。

(10) 在给定的研究条件下, 地表最大下沉值 W_{\max} 与采动岩体裂隙网络分形维数值 D 具有明确的定量关系:

$$W_{\max} = -16.8727D^3 + 64.117D^2 - 81.0602D + 75.3701$$

(11) 地质断裂面粗糙不平, 具有统计自相似分形性质, 且表现为各向异性分形特征。

(12) 地质断裂面具有多层次性, 分形维数反映了它的粗糙起伏程度, 很好地反映了断层面的逐级包络的形态特征, 分形维数是描述断裂面全貌起伏特征的有效数量指标。

(13) 地质断裂面在采动影响下的活化现象严重受控于断层面的分形几何形态, 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。

(14) 通过对含断层面的模型实验发现: 含有分形维数较小断层面的模型中, 覆岩破坏比较迅速, 移动比较充分, 弯曲带内的离层最终表现为不发育; 而含分形维数较大断层面的模型中, 覆岩破坏和移动表现为较前者缓慢和不充分, 弯曲带内的离层最终表现为较发育。

(15) 分形断层面打破了采动断层的正常活化规律, 导致地表移动随着断层面分形的减小而愈加剧烈(下沉速度愈趋增大) 断层两侧的台阶落差值和地表最大下沉值均随着断层面分形的减小而增大。在给定的研究条件下, 台阶落差值 H 、地表最大下沉值 W_{\max} 和某一时间段的平均下沉速度 V 与断面分形维数 D 的经验数量关系为

$$\begin{aligned} H &= 1528.5D^2 - 4654.29D + 3602.1 \\ W_{\max} &= 1200D^2 - 5832D + 4094 \\ V &= -15.00D^2 + 30.9D + 20.58 \end{aligned}$$

(16) 采动断层活化分形界面效应的数值模拟, 不仅有效地验证了实验成果, 而且获得了断层面分形性质对采动岩体内部应力分布的影响规律。断层面的分形性质对 X 方向的拉应力影响不大; 各模型的 X 方向压应力和 Y 方向拉应力在分形断层面的下部集中程度大体一致, 而靠近断层露头附近则随分形维数的增大, 集中程度越来越弱, 说明断层活化量越来越小, 从而造成断层面活化后其两侧岩体的接触程度越来越弱。 Y 方向的压应力随断层面分形维数的变化规律是: 随着断层面分形维数的增加, 整个采场上覆岩层的压应力值逐渐减小, 说明随着断层面分形维数增大, 断层两侧岩体互相约束性越趋增大, 导致采场上覆岩体向下的移动越趋减小, 其中的离层越趋增多。

上述研究成果表明, 将分形几何和损伤力学等先进的理论应用于矿山开采沉陷学科领域中, 有助于深入认识和理解复杂的矿山开采沉陷现象, 有助于研究矿山开采沉陷更深层次的机理、特征和规律以及此为出发点的控制开采损害的技术措施, 将推动矿山开采沉陷理论的进一步发展和工程实用。

关键词 矿山开采沉陷, 分形几何, 损伤力学, 节理, 采动岩体, 地表移动特征值, 损伤变量, 分形维数, 采动岩体分形裂隙网络, 采动断层活化, 分形界面效应