

节理对开采沉陷的影响规律研究*

Study on influence of joints on mining subsidence

于广明

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)

谢和平

中国矿业大学北京研究生部, 北京, 100083)

杨伦

辽宁工程技术大学, 阜新, 123000)

中图法分类号 TD 325

作者简介 于广明,男,1963年生,1997年在中国矿业大学北京校区获博士学位。现任辽宁工程技术大学开采损害与控制工程研究中心副主任,兼任辽宁工程技术大学研究生部副主任,副教授。主要从事矿山工程力学、工程测量、采矿工程等专业的科研工作。

1 引言

矿业开采沉陷是一个严重的灾害性力学问题^[1]。进行地下矿物开采是出于国民经济发展对矿物资源的需要,但对矿山工程本身及周围岩体直至地表的损害却影响到矿业、矿区工农业、交通运输业及人民生活等各个方面,包括城镇和农村广大地区,是一个重大的社会和环境问题。研究岩体采动沉陷,实现减少和控制开采损害的目标,对国民经济建设和人民生活有着重大的实际意义。但是,岩体是经过漫长的地质演化过程而形成的复杂结构体,其中的结构面削弱了岩体的力学强度,控制着岩体变形、破坏机制及力学法则,影响着岩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^[2-6],所以,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,这样就给开采沉陷带来了新的研究内容。

2 节理岩体开采沉陷模拟实验

本文用相似材料构造了五个模型,五个模型均以分层形式铺设而成,其中模型I为无节理的岩体模型,另外四个模型在铺设时以1条/8m×8m的密度均匀切割并埋设两面光的透明胶片,用以模拟节理,节理倾角分别为0°,30°,60°,90°,对应于模型II,III,IV,V。五个模型行同等条件的开挖实验,在实验现场观察、素描和观测覆岩破坏性态^[7],用光学透镜法观测地表移动值。

3 节理对采动覆岩破坏的影响

1)模型I(无初始节理):地下煤层采出后,从煤层的直接顶板开始,由下向上依次发生冒落、断裂、弯曲、离层,表现出明显的四域分布,本文称为:冒落域、断裂域、离层域和同步弯曲域。整个采动影响区形态大致以采

区竖向中心线对称,大部分断裂发生在采空区边缘的上方,且形成对称分布的“S”型断裂对,两侧的断裂角基本相近于 $45^\circ + \varphi/2$ (φ 为岩体的内摩擦角,本实验模拟的岩石的内摩擦角为 43°),开切眼一侧的断裂角为 68° ,停采线一侧的断裂角为 69° 。采动覆岩破坏模式有:弯折拉裂形成的冒落或断裂、拉剪层裂形成的离层和层间滑动、采区边缘的高应力区的压碎。

2)模型II(初始节理倾角 $\alpha = 0^\circ$):地下煤层采出后,覆岩破坏也表现出明显的四域分布,破坏区域形态与模型I大体一致,但因水平初始节理的存在,导致水平方向的拉触面积减小,岩体在水平方向的初始损伤增大,从而与公式 $\epsilon_{损} = \sigma/E(1-D)$ 中的 D 增大导致竖向变形 $\epsilon_{损}$ 增大相一致,即冒落域高度与模型I相比要高,沿层面开裂即离层域的位置也相应增高,最上的离层到采区垂高比模型I的大20mm。覆岩破坏模式除了模型I三种外,还有沿节理的开裂、节理连接组合形式。

3)模型III(初始节理倾角 $\alpha = 30^\circ$):覆岩破坏也表现出四域分布,但最上岩层开裂而产生的离层位置很高,距采区垂高为32cm。而且各时期的离层被倾斜初始节理切割,初始节理开裂并进一步滑移,致使处于离层下位的、初始节理两侧的岩层形成两个简支梁,随后两个简支梁发生断裂,形成层裂(离层)、滑移、断裂的组合破坏形式。覆岩破坏形态上出现了偏态,开切眼一侧的断裂角约为 77° ,停采线一侧的断裂角约为 70° 。

4)模型IV(初始节理倾角 $\alpha = 60^\circ$):覆岩破坏过程较剧烈,初始节理滑移更明显,上下位岩层中的初始节理之间的岩桥发生明显的破坏,使上下岩层中的初始节理连通,离层仍然出现,但表现为明显的楔形。开切眼一侧的断裂角约为 78° ,停采线一侧的断裂角约为

* 国家自然科学基金重点项目(No.59634030)子项目,国家自然科学基金项目(No.59674005)。
到稿日期:1997-06-16。

74°。覆岩破坏模式有:开切眼一侧的上下位岩层中的节理滑移并连通,停采线一侧的初始节理产生滑移,岩层中产生雁式断裂和楔型离层。

5)模型V (初始节理倾角 $\alpha = 90^\circ$):高角度初始节理使采动覆岩破坏更剧烈,四域中的昌落域、断裂域、弯曲域明显,但离层域不发育。在覆岩沉陷过程中,常形成离层和初始节理组成的T形破坏,初始节理两侧岩体不再产生相对滑移,而是初始节理开裂后的同步回转下落,形成拱式平衡结构。该平衡系统又在自重及上覆岩层的压迫下,迅速发生突变失稳。采动覆岩破坏范围较宽,形态关于采区中心轴对称,采区两侧的断裂角为 80° ,断裂线以外还产生沿初始节理开裂的垂直裂纹。

综上所述,岩体中初始节理打破了采动覆岩破坏的正常规律。不同展布的节理,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;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;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;水平初始节理显著提高了离层的高度范围,倾斜初始节理和高角度初始节理提高了非连续性破坏区域,同时,随着节理倾角的增大,覆岩破坏范围随之增大。

4 节理对采动岩体裂隙分布规律的影响

研究采动岩体裂隙网络及其演化规律对水体下采矿岩体透水性的评价、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的强度评估及稳定性评价、地表沉陷量值预测时所用的力学参数的拟定等具有重要的理论研究价值,对安全合理进行“三下”开采具有重要的实践意义。但节理的存在,使岩体采动裂隙发展过程和分布规律更加复杂。通过实验现场观察、素描和分析,获得了节理对采动岩体裂隙发展过程和分布规律的影响:节理对采动岩体裂隙的开裂、扩展及分布起着主控作用,水平初始节理与无节理的比较,使采动裂隙数量增多,分布高度增大,其它特征与无节理的大致相同;倾斜初始节理 ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ$)使裂隙分布失去了对称性,闭合型裂隙数量增多;高角度初始节理 ($\alpha = 90^\circ$)使裂隙分布恢复关于采区中心对称性,闭合型裂隙数量增加。

岩体中的初始节理对采动岩体裂隙的扩展方向也有很大影响:倾斜节理与高角度节理使裂隙扩展角 θ 增大, $\alpha = 30^\circ$ 时, θ 平均为 70° 左右, $\alpha = 60^\circ$ 时, θ 平均为 80° 左右; $\alpha = 90^\circ$ 时, θ 大多在 80° 以上,且多数裂隙沿 $\theta = 90^\circ$ 方向扩展,可见,节理打破了裂隙的分布规律和

扩展方向,随着节理倾角的增大,裂隙的扩展角有扩大的趋势;节理在采动沉陷过程中起催化作用,导致采动破坏范围扩大。

笔者还应用分形理论进一步分析了节理对采动岩体裂隙发展过程和分布规律的影响,首先将采动岩体裂隙分布图数字化,自动生成裂隙分布数据文件,然后接口于平面不连续面的分形维数计算程序 (Fractal. for) [7],进行采动岩体裂隙分布的分形维数计算。计算表明,采动岩体裂隙分布具有很好的自相似性,具有分形特征,分形维数能够很好地定量描述采动岩体的裂隙化程度。具有初始节理的岩体采动后形成的裂隙网络的分维值随着初始节理的倾角增大而减小,说明岩体内部的裂隙空间占位越来越小,所以采区空间传递至地表导致其下沉的量值越来越大。将观测的地表最大下沉值和计算的采动岩体裂隙分布的分形维数与节理倾角的关系描绘于图1、图2中。

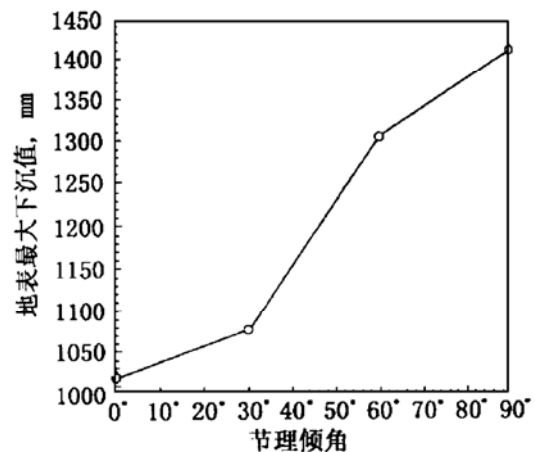


图1 地表最大下沉值与节理倾角的关系

Fig. 1 Relation between the maximum subsidence and the dip angle of joint

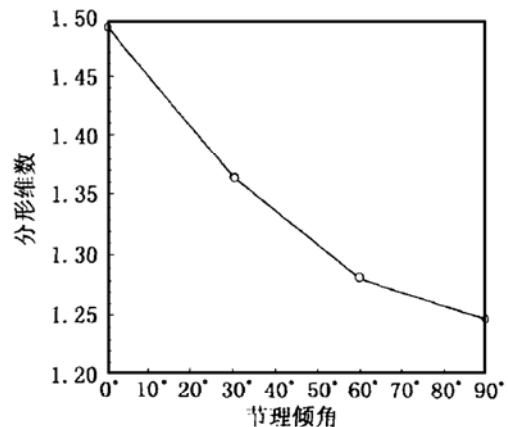


图2 采动岩体裂隙分布的分形维数与节理倾角的关系

Fig. 2 Relation between the fractal dimension of fractures in rock and the dip angle of joint

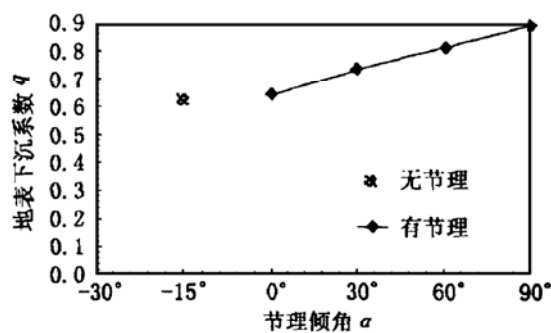
5 节理对地表移动和变形规律的影响

无节理 模型I)岩体采动沉陷引起地表移动表现为常规的规律,即地表下沉曲线关于采空区竖向中心线对称;当岩体中分布着抗拉强度为0的水平初始节理时 模型II),地表移动仍表现出正常规律,但因水平初始节理使岩体垂直方向的强度降低,采动岩体内部的层裂发育,从而导致地表下沉值在采动过程中较模型I为小。但是,待地表稳定后,采动岩体内部的离层被压实,导致地表下沉值有所增大;同时,因水平节理导致层面间滑移现象增多,从而使地表的水平移动增加,地表的移动范围也有所增加;当初始节理倾角为 30° 时 模型III),地表下沉曲线和水平移动曲线失去了对称性,位移矢量偏向初始节理方向。下沉曲线较模型II为陡;水平移动表现出的特征是:指向初始节理倾斜方向的水平移动值比另一侧为大,这是岩层沿初始节理滑移的结果;当初始节理倾角为 60° 时 模型IV),地表下沉曲线和水平移动曲线仍然失去对移性,下沉曲线变得更陡,指向初始节理倾斜方向的水平移动值比另一侧大,最大下沉值增大;当初始节理倾角为 90° 时 模型V),地表下沉曲线和水平移动曲线恢复了关于采空区竖向中心线对称的形态,下沉曲线变得更陡,最大下沉值增大,水平移动值也有所增加,但增加幅度与模型IV相比不大。

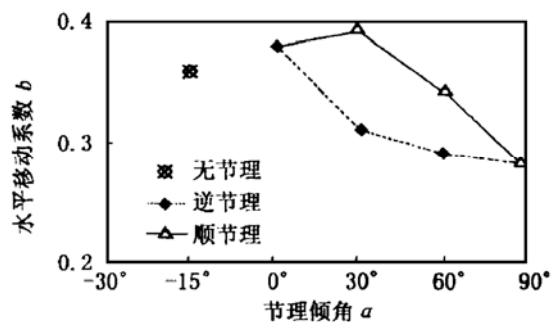
可见,初始节理的存在打破了地表移动的正常规律。水平初始节理使地表下沉范围增大,倾斜初始节理使地表移动出现偏态,高角度初始节理使地表移动剧烈。从节理角度因素考虑,随着节理倾角的增大,地表的下沉值、下沉系数均有所增大。地表的水平移动规律比较复杂,逆节理倾斜方向的最大水平移动值在 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,随节理倾角增大而减小,而在 $\alpha \geq 60^\circ$ 时,随节理倾角增大有所增加;顺节理倾斜方向的最大水平移动值在 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,随着节理倾角增大而增加,在 $\alpha \geq 60^\circ$ 时,随着节理倾角增大而减小。水平移动系数表现的规律是,顺节理方向的水平移动系数在 $\alpha = 30^\circ$ 时有弱增加,而后开始逐渐减小,逆向节理方向的水平移动系数随节理倾角增大而减小(图3)。

6 结 语

本文研究表明:岩体内存在的初始节理影响着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,改变了采动岩体裂隙的分布规律以及裂隙的扩展方向,使覆岩破坏范围和地表移动范围扩大,使地表移动量值增加。



(a) q 与 α 的关系



(b) b 与 α 的关系

图3 地表下沉系数 q 和水平移动系数 b 随节理倾角 α 的变化关系

Fig.3 Variations of the coefficients of subsidence and horizontal movement (q and b) with the dip angle of joint α

通过初始节理对采动岩体沉陷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一定的理论价值。但是仍有一些问题如节理采动起裂扩展的分形增长规律及在开采沉陷过程中的作用,采动岩体分形裂隙网络的形成机理、动态演化规律及其数值模拟验证方法和途径,开采沉陷过程中的其它一些非线性机制和规律,多组和非规则展布的初始节理对开采沉陷的影响规律,实际岩体中初始节理的探测(地质方法)或预测(分形岩石力学方法)等问题有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 郑哲敏,周恒,张涵信. 21 世纪的力学发展趋势. 力学进展, 1995, 25(4): 433 ~ 411.
- 2 于广明. 分形及损伤力学在开采沉陷中的应用研究 [博士学位论文]. 中国矿业大学北京研究生部, 1997.
- 3 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988.
- 4 谢和平著. 岩石混凝土损伤力学. 中国矿业大学出版社, 1990.
- 5 Chaboche J L. Continuum damage mechanics part I - General Concepts, J of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 59 ~ 63.
- 6 Krajcinovic D. Continuum damage mechanics. Appl Mech Reviews 1984, 37(1): 1 ~ 6
- 7 陈剑平. 采动岩体裂隙分形分布的数值模拟. 工程地质学报, 1995 5(1): 34 ~ 42.