

采动影响下覆岩垮落过程的数值模拟

Numerical simulation of failure process of overburden rock strata caused by mining excavation

刘红元¹, 刘建新¹, 唐春安^{1,2}

(1. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110006; 2. 中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080)

摘要: 应用岩层破断过程分析 SFPA^{2D} 系统, 分析了采动影响下覆岩破坏的动态发展过程。数值模拟再现了上覆岩层离层、弯曲、沉降、开裂直至冒落的全过程, 以及采动工作面推进过程中逐步演化的应力场和应变场。根据数值模拟的结果, 初步探讨了覆岩破断机理, 指出覆岩的破断特征受分步开挖引起的应力重新分布及其损伤积累以及岩梁的非均质性的影响。

关键词: 覆岩破坏; 数值模拟; 应力分布; 损伤

中图分类号: TD 327. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2001) 02- 0201- 04

作者简介: 刘红元, 男, 1974 年生, 东北大学博士生, 从事岩石破裂方面的实验与数值模拟工作。

LIU Hong-yuan¹, LIU Jian-xin¹, TANG Chun-an^{1, 2}

(1. Center for Rock Instability & Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006, China; 2. LNM, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Dynamic progressive process of failure of overlying rock strata caused by mining excavation is simulated by Strata Failure Process Analysis (SFPA^{2D}) system. The numerical simulation result reproduces the whole progressive process of vertical discontinuous displacement, bending, sagging, fracturing and caving of overlying rock strata. It also reproduces the evolution of the stress and strain fields as the working face advances. Fracture mechanism is discussed based on the numerical simulation result. It is pointed out that failure characteristic of overburden strata is influenced by stress redistribution and accumulated damage, which are induced by step excavation, and the heterogeneity of rock stratum.

Key words: overburden rock failure; numerical simulation; stress distribution; damage

1 引言^y

采动影响下覆岩的垮落过程实际上是不断开挖卸荷状态下的渐进破坏过程, 其垮落规律可采用“过程分析”方法进行研究。过程分析方法需要一种有效的手段来获取事物变化过程中的信息, 由于目前监测手段的局限性, 现场监测和相似材料模拟试验均不能获取分析问题所需的足够信息^[1]。随着计算机技术的发展, 数值模拟成为过程分析的有力手段。

数值模拟方法主要包括有限元方法和离散元方法。有限元法是迄今为止在应力和变形方面最为成熟的方法之一。例如宋扬等曾经利用有限元方法研究支承压力显现的过程^[2], 揭示其变化规律与上覆岩层运动之间的关系。但是连续性和均匀性假设一直限制着有限元在岩石力学领域的运用。岩石内部存在着大量的微孔隙、微裂纹等内部缺陷, 并在不同程度上受到非连续面的切割。这些都给岩石变形过程的数值模拟带来了极大的困难。对于具有明显层理面和节理面并且只受低应力作用的岩体, 近年发展较快的离散单元法得到了较多应用。王泳嘉、张玉卓、麻凤海、古全忠、林崇德等都是利用离散元法研究了岩层移动规律及其冒落、离层等问题^[1, 3~6]。但是离散单元法除了在参数

确定还有许多问题亟待解决以外, 更大的困难还在于如何将岩层离散成符合实际的块体单元。如果说有限元适宜于研究岩层破坏前的变形分析, 那么离散元则比较适宜于岩层破坏以后的运动分析, 从而使这两种数值方法只能给出数值计算的最终结果, 而不能进行过程模拟分析, 使许多理论与工程问题的分析仅停留在“结果分析”的方法上。而在岩层从变形、破坏直至运动过程的研究方面, 目前还没有比较成熟的数值模拟方法。本文拟用自行研究开发的岩层破断过程分析系统(SFPA^{2D})来研究采动影响下覆岩垮落的动态发展过程。

2 数值模拟模型

2.1 岩层破断过程分析系统概述

SFPA^{2D} 系统是一个能模拟岩梁从变形、破坏直至冒落过程的数值模拟工具^[7~9], 与其他已有的逐渐破坏模型一样^[10], SFPA^{2D} 包括两个方面的功能: 应力分析和破坏分析。SFPA^{2D} 的应力分析采用有限元法, 破

^y 基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(59472018); 中科院力学所非线性连续介质力学开放实验室开放基金资助项目

收稿日期: 2000- 03- 17

坏分析则根据修正的库仑(Coulomb)准则(包含拉伸截断 Tension cut-off^[11])来检查材料中是否有破坏单元。对破坏单元则采用刚度特性退化(处理分离)和刚度重建(处理接触)的办法进行处理。采用空单元法模拟采动工作面的变化,令挖去部分中单元的自重和弹性参数为一个无意义的数。每一步开挖即相当于一次卸载,首先进行应力计算,然后根据破坏准则检查模型中是否有破坏单元。如果没有,继续下一步开挖,并作应力计算。如果有破坏单元,则根据单元的拉或剪破坏状态进行刚度退化处理,然后重新进行当前步的应力计算。重复上述过程,直至岩梁形成宏观裂纹,并最终冒落而形成整个覆岩破坏的动态发展过程。

2.2 模型简述

地质学家把岩层定义为由同一岩性组成的、有两个平行或近于平行的界面所限制的层状岩石,即每一岩层具有相似的物理力学性质。若不考虑断层等大型地质构造的影响,则不连续面中对地表沉陷贡献最大的是层面,而且层面延展性强,分布范围广,因此可仅考虑分层效应^[12]。虽然岩体的每一个岩层具有复杂的力学性质,但许多文献表明^[13],仅考虑弹性或者弹脆性,而不考虑弱面,二者结果相近,但与现场实测资料相差较大;若考虑弹性和弱面与考虑弹脆性和弱面,二者结果相近,且与现场实测资料吻合。开采引起的地表下沉与工程岩体尺寸相比可视为小变形,据此,在过去的研究中将每一岩层视为均质、各向同性线弹性体^[12]。然而,岩石具有明显的非线性本构,将整个岩层视为均质、各向同性的线弹性体有失准确。建立在统计方法理论基础上的数值模拟方法被看成是解决这一问题的有效途径,其特点在于引入简单的基元本构模型,同时运用统计的方法来反映由简单基元构成的整体的复杂力学行为。在这方面已有不少有益的成果,如 DLNM 模型^[14]、Rule-based 模型^[15,16]、Micromechanics 模型^[17]、PFC 模型^[18]等。他们均认识到材料的非均匀性对宏观力学性质的影响,并通过物理统计的方法在各自的模型中引入了非均匀性。

在本文的数值模拟中,设定岩层中每一个基元为均质、各向同性线弹脆性体,每一岩层为非均匀的,其岩石的力学性质(单元的弹性模量、强度等)服从韦伯分布 $\varphi_c(m, u)$, 其中参数 m 为形状参数,反映岩石材料力学性质的均质度, m 越大,表明岩石的性质越均质; u 为反映岩石材料平均性质的参数,从而使每一岩层具有相似的力学性质。将开挖工程岩体介质概化为具有开挖孔洞的分层有相似力学性质的非均质各向同性的非线性空间体,如图1所示,其范围为水平方向无限大,垂直方向上至地表,向下延伸到煤层底部某一深

度的厚坚硬岩层或下位岩层的影响可以忽略的某一岩层处。

本文采用平面应变模型来模拟某矿覆岩的垮落过程。模型沿水平方向取 300 m,沿垂直方向取 100 m。煤层厚 6 m,赋存深度 84 m。模型共计 12 层,其主要岩体力学参数见表 1 所示。共划分为 30 000 单元,采用长壁式开采,开采强度 5 m/d,垮落法顶板管理。具体的数值模拟模型和参数分布见图 2 所示。图中每一层的灰度代表岩层力学参数(弹性模量、抗压强度等)的大小,灰度越高,值越大。



图1 开挖工程岩体等效介质模型

Fig. 1 Equivalent mass model for rockmass under excavation

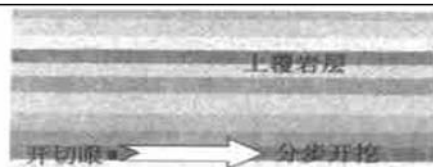


图2 覆盖破坏过程的数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model of failure process of overlying rocks

表1 数值模拟模型各岩层部分力学参数

Table 1 Mechanic parameters of overlying rock strata in numerical simulation model

岩性	序号	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	自重 /(10 ⁻⁵ N·mm ⁻³)	厚度 /m
风化砂岩	1	6	50	2.48	7
中砂岩	2	8	60	2.65	10
粉砂岩	3	10	60	2.56	8
泥岩	4	2	36	2.56	8
粉砂岩	5	8	50	2.56	8
页岩	6	4	45	2.6	10
中砂岩	7	8	30	2.5	12
细砂岩	8	6	20	2.5	10
泥岩	9	4	20	2.6	9
砂质泥岩	10	1.5	5	2.5	2
煤层	11	1	33	1.4	6
粉砂岩	12	10	100	2.5	10

3 数值模拟结果及分析

图3是采动影响下覆岩垮落的动态发展过程的数值模拟结果,因篇幅有限,仅将其中具有代表性的7步弹性模量分布图和工作面推进过程中应力场的动态演化图的对比结果示于图中。

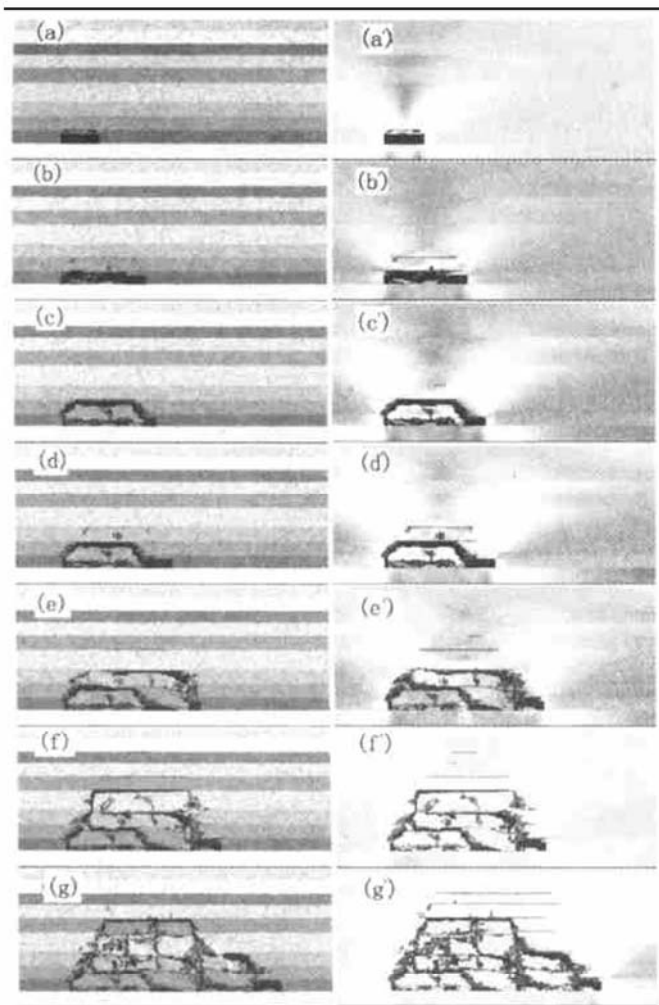


图3 采动影响下覆岩垮落的动态发展过程
(左为弹模分布图, 右为应力分布图)

Fig. 3 Dynamic failure process of overburden rock strata in mining engineering

3.1 顶板的破断过程与破坏形态

(1) 直接顶冒落

开切眼形成以后, 上覆岩层暴露, 直接顶受开挖而引起的卸荷膨胀变形的影响, 首先在中部产生离层, 随着采场工作面的推进, 在重力的作用下弯曲。岩梁暴露的跨度达到一定的跨度后, 弯曲沉降发展到一定的限度, 岩梁的端部首先开裂, 当工作面推进到 20 m 左右, 在岩梁的中部开裂形成“假塑性岩梁”, 如图 3(a) 所示。当岩梁的沉降值超过“假塑性岩梁”允许沉降值时, 暴露岩层即自行冒落, 冒落形态存在不对称性, 冒落高度为 2 m, 以后随着工作面的继续推进, 直接顶随采随冒。如图 3(b) 所示。

(2) 基本顶初次破断

随着采场工作面的进一步推进, 基本顶在重力的作用下弯曲下沉。当工作面推进到 45 m 时, 如图 3(b) 所示, 基本顶出现大范围移动, 采空区前后煤壁上方基岩的上部、中部出现拉裂隙。当工作面推进到 50 m

时, 如图 3(c) 所示, 基岩基本顶初次垮落, 垮落形态表现出不对称性, 基本顶破断岩块沿工作面煤壁切落, 基本顶失稳运动有回转切落的特点。

(3) 基本顶的周期性破断

基本顶初次破断后, 当工作面推进到 60 m 时, 如图 3(d) 所示, 上部顶板出现离层、端部中部断裂现象。当工作面推进到 70 m 时, 上位顶板在靠近工作面侧的 1/4 顶板跨度处又产生断裂, 即“二次断裂”, 并开始回转、下沉运动, 如图 3(e) 所示。当工作面推进到 75 m 时, 上位顶板第一次周期运动结束。随着工作面的推进, 直接顶自行冒落, 当工作面推进到 85 m 时, 由于上位顶板厚度大, 岩层暴露后只产生不大的弯曲, 暴露岩层端部开裂, 在岩层的中部开裂很少的情况下, 整体切断垮落, 出现岩梁剪切破坏的运动形式, 如图 3(f) 所示。当工作面推进到 105 m 时, 上位顶板出现第二次周期性运动。当工作面继续向前推进时, 上位顶板继续呈现出周期运动的特征, 如图 3(g) 所示。

3.2 顶板破断机理分析

随着采动工作面的推进, 首先在岩层的中部产生离层, 直接顶岩梁的中下部和两端上部应力集中明显, 由应力分布可知, 此处的应力集中为拉应力集中。当开挖扰动产生的拉应力超过直接顶的极限抗拉强度时, 首先在岩梁的中下部和岩梁两端的上部产生裂隙, 如图 3(a') 所示, 由此可见, 直接顶的破断机理为拉破坏。而后, 随着工作面的继续推进直接顶随采随冒, 如图 3(b') 所示。

随着采动工作面的推进, 基本顶也首先在岩梁的中部产生离层, 同时岩梁的两端和中部的拉应力致使其产生损伤积累, 当损伤积累达到一定的程度后, 首先在岩梁的端部和中下部出现宏观裂纹, 如图 3(b') 所示。当工作面继续往前推进时, 基本顶在开切侧始终受开挖所引起的拉应力的作用, 因而损伤严重, 而在工作面一侧随着分步开挖的进行, 基本顶岩梁最大拉应力区不断前移, 最大损伤区也不断前移, 从而形成基本顶的非对称破断, 如图 3(c') 所示, 而后随着开挖的进行, 基本顶重复着前述的破断过程, 如图 3(d') ~ (g') 所示, 所以基本顶的破坏也主要是拉应力所致。

3.3 工作面推进时上覆岩层的来压特点

工作面推进至 20 m 时, 煤层的直接顶初次垮落, 如图 3(a) 和 (a') 所示, 垮落的高度为 2 m。以后直接顶随采随冒, 垮落带高度逐渐向上发展, 推进至 50 m 时, 老顶初次来压, 垮落带高度发展至 11 m, 如图 3(c) 所示。当工作面推进至 75 m 时, 老顶出现第一次周期来压, 来压步距为 25 m, 垮落带高度发展至 21 m, 如图 3(e) 所示。

当工作面推进至 105 m 时,老顶出现第 2 次周期来压,本次来压步距为 30 m,垮落带高度发展至 43 m,由于本岩层的弹性模量、强度较高,按钱鸣高的岩体关键层理论^[19],本岩层可称为关键层,根据关键层理论,关键层对岩层的稳定起控制性作用,一旦关键层破断,其上较弱的岩层也随之垮落。本文的数值模拟恰好证明了这一点,如图 3(g) 所示。以后随着工作面的推进,岩层破断如前一样呈现出周期性的特征。

3.4 相似材料模拟试验

为了与数值模拟试验相对照,特做了相似材料的覆岩垮落过程模拟试验,结果如图 4 所示,可以看出,两者所得结果十分相似,说明文中数值模拟方法是可行的。

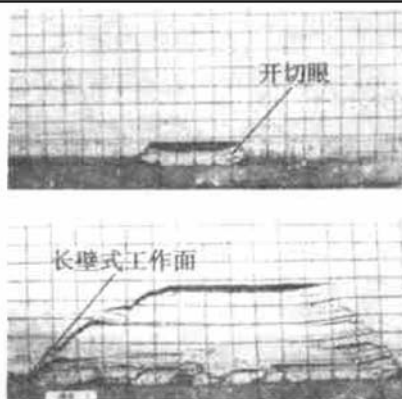


图 4 采动影响下覆岩垮落过程的相似材料模拟

Fig. 4 Similar material simulation of overburden rock strata failure in mining engineering

4 结 论

利用 SFPA^{2D} 系统模拟了开挖后岩梁暴露在重力作用下发生离层、弯曲、沉降、端部和中部开裂直至冒落的全过程,再现了采动影响下覆岩破坏的动态发展过程。初步探讨了采动影响下覆岩的破断机理,指出直接顶受开挖引起的卸荷膨胀变形的影响,基本顶主要受分步开挖引起的应力重新分布及其损伤积累的影响。研究表明,数值模拟方法有助于了解覆岩的破断机理和移动规律。

参考文献:

- [1] 林崇德. 层状岩石顶板破坏机理数值模拟过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 392~ 396.
- [2] 宋 杨, 宋振骥. 采场支撑压力显现规律与上覆岩层运动

的关系[J]. 煤炭学报, 1991, 9(1): 47~ 56.

- [3] 王泳嘉, 刑纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [4] 张玉卓. 煤矿上覆岩层运动竖向不连续位移分析[A]. 跨世纪的矿业科学与高新技术[M]. 谢和平, 等. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 10~ 15.
- [5] 麻凤海, 范学理, 王泳嘉. 岩层移动动态过程的离散单元法分析[J]. 煤炭学报, 1996, 21(4): 388~ 392.
- [6] 古全忠, 史元伟, 齐庆新. 放顶煤采场顶板运动规律的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 45~ 50.
- [7] 唐春安. 岩石破裂过程声发射的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 368~ 378.
- [8] Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34(2): 249~ 262.
- [9] 刘红元. 采动影响下覆岩破坏过程的虚拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2000.
- [10] 崔维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟. 复合材料学报, 1996, 13(4): 102~ 111.
- [11] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining[M]. 2nd ed. London: UK Chapman & Hall, 1993. 106~ 108.
- [12] 邹友峰. 条带开采地表沉陷预计新方法三维层状介质理论的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 1994.
- [13] Peng S S. Surface Subsidence Engineering[M]. London: Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc. 1992.
- [14] Kim Kunsu, Yao Cunying. Effects of micromechanical property variation on fracture processes in simple tension[A]. Daemen & Schultz. Rock Mechanics[C]. Balkema: Rotterdam, 1995. 471~ 476.
- [15] Blair S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: part I. A non-linear rule-based model[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(7): 837~ 848.
- [16] Blair S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: part II. Effect of microscale heterogeneity on macroscopic deformation[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(7): 849~ 861.
- [17] Liu Z, Myer L R, Cook N G W. Numerical simulation of the effect of heterogeneities on macro behavior of granular materials[A]. Siriwardane & Zaman. Computer Methods and Advances in Geomechanics[C]. Balkema: Rotterdam, 1994. 611~ 616.
- [18] Fairhurst C. Geomaterials and recent development in micromechanical numerical models[J]. News Journal, 1997, 4(2): 11~ 14.
- [19] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论[J]. 煤炭学报, 1996(3): 225~ 230.