

多煤层开采时岩层垮落过程的数值模拟*

刘红元¹ 唐春安^{1,2} 芮勇勤¹

(¹东北大学岩石破裂与失稳研究中心 沈阳 110006) (²中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 北京 100080)

摘要 运用自行开发的岩层破断过程分析(SFPA^{2D})系统模拟了多煤层开采时岩层的垮落过程。数值模拟结果表明,虽然上部煤柱的存在改变了上覆岩层结构,但岩层的垮落仍具有明显的周期性,地表的水平移动和垂直下沉仍具有明显的对称性;当垮落带高度达到上部煤柱后,可能出现大面积的垮落,产生较大的次生来压现象,从而影响下部长壁工作面的安全。通过和相似材料模拟以及理论分析结果的对比,本次数值模拟基本上反映了多煤层开采时采动岩体的动态发展过程,SFPA^{2D}系统可以作为模拟采动覆岩破坏过程的一种新方法。

关键词 覆岩破坏,数值模拟,支承压力,开采沉陷

分类号 TD 325, O 242.1

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)02-0190-07

1 前言

采动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,要探索垮落规律就必须采用所谓的“过程分析”方法研究其变形破坏过程。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,现场监测与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,数值模拟已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。如文[2]曾利用有限元方法研究支承压力显现的过程,揭示其变化规律与上覆岩层运动间的关系。但是连续性和均匀性假设这两个致命弱点一直限制着有限元在岩石力学领域的真正运用。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,近年有了较快发展的离散单元法得到了较多应用。文[1,3~6]等都利用了离散元法研究了岩层移动规律及其冒落、离层等问题。但是离散单元法除了在参数确定方面还有许多问题亟待解决外,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,从而使得这两种数值方法只给出数值计算的最终结果,而不能进行过程模拟分析,这就使得许多理论与工程问题的分析停留在“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。

随着我国煤炭工业的高速发展,开采强度逐年增大,矿井平均采深增加,有些煤矿的开采是在已采煤层之下再行开采,这就形成多煤层开采问题。如神华集团大柳塔矿就是在房柱式采煤法采完 1^2 煤层后,下部用长壁开采方法采 2^2 煤层^[7]。由于上部采空区的存在,影响了下部煤层的安全开采。本文旨在用数值方法模拟多煤层开采时岩层的垮落过程,进而说明SFPA^{2D}系统可以模拟岩梁从端部和中部开裂—回转—触矸—冒落的破断过程,以及随着工作面的推进采场的压力分布及显现、上覆岩层移动的全过程,可以作为一种研究采动覆岩破坏过程的新方法。

2 煤岩力学参数的确定

本文所模拟的某煤矿房柱式采区上覆岩层层位如图1所示,各岩层力学参数的选取参见文[7]。开

1999年8月20日收到初稿,1999年11月25日收到修改稿。

* 国家杰出青年基金(59525408)和中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)开放基金资助项目。

作者 刘红元 简介:男,1974年生,1997年于东北大学采矿系采矿工程专业获博士学位,现主要从事岩石破裂失稳机制及相关数值方法等方面的研究工作。

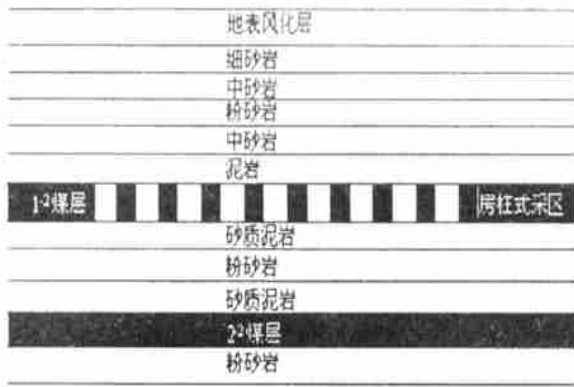


图 1 上覆岩层示意图

Fig. 1 Diagram of overburden strata

采方式为煤层群下行开采；上部煤层采用房柱式采煤法，最大采高为 7.5 m，留设永久煤柱；下部煤层采用走向长壁采煤法，采高为 4.0 m，垮落法顶板管理。上下煤层层间距为 26 m，下部煤层长壁工作面推进速度为 3 m/d。

3 数值分析模型简介

本文运用 SFPA^{2D} 系统来进行数值模拟，SFPA^{2D} 系统是基于有限元的计算方法，但又不同于有限元的基本思路^[8,9]。其基本思想是：(1) 通过考虑细观单元力学参数(弹性模量、强度)的非均质性，模拟岩石宏观变形、破坏的非线性行为；(2) 通过考虑材料破坏后单元的参数弱化(包括刚度退化)，模拟材料的非连续和不可逆行为。

岩体是地壳的一部分，由于岩石的建造和改造，使得岩体内出现了不连续面，具体表现为岩石的层面、断裂、劈理、节理等^[10]。因此，岩体具有复杂的力学特性，如弹性、塑性、粘性等。在理论研究中，由于岩体地质结构和岩体工程结构的复杂性，人们不得不将复杂的问题抽象成各种简单的问题来进行理论分析。如将岩层简化为弹性梁结构。尽管数值模拟方法在描述岩体的力学性质方面具有解析法无可比拟的优越性，然而企图完全真实地描述岩体的所有特性是不现实的，也没有必要，只能根据岩体的生成特点和工程需求，抓住岩体的主要特征，对其进行概化，得出工程岩体的等效介质模型。

从煤系地层的沉积过程来看，岩体具有明显的“成层”性，所以又称之为岩层。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。在过去的研究中，人们将每一岩层视为均质、各向同性线弹性体^[11]。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。

本文将各岩层视为非均质岩石，设定各层岩石的力学性质(单元的弹性及强度性质)服从韦布尔分布 $c(m, \mu)$ ，其中 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匀； μ 为反映岩石材料平均性质的参数。在本模型中，上部煤层(1⁻²煤层)第一步开采完毕，最大采高为 8 m，留设永久煤柱，模拟在开采下部煤层(2⁻²煤层)时上部煤层已用房柱式采煤法采完的采矿条件。下部煤层从第二步开始开采，采用分步开挖的方法，每步开挖 3 m，采高为 5 m，模拟走向长壁采煤法时采动所引起的岩层动态发展过程。上下煤层层间距为 32 m。具体模型的形状和参数分布如图 2 所示。图中的灰度代表单元弹性模量值的大小，灰度越高，模量值越大。

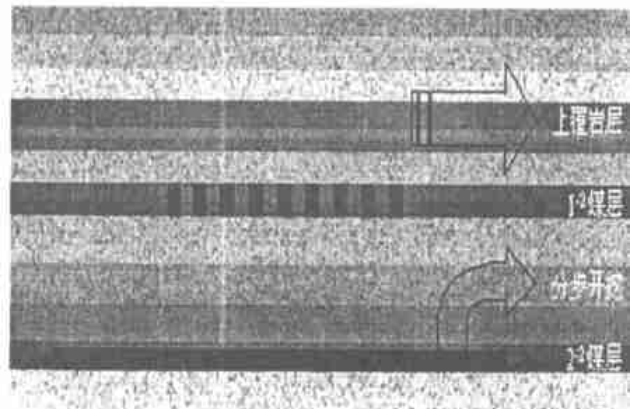


图 2 上覆岩层的数值模拟模型

Fig. 2 Numerical model of overburden strata

4 数值模拟结果及分析

本文应用 SFPA^{2D} 系统模拟了多煤层开采时采动岩体的动态发展过程，具体的数值模拟结果如图 3 所示。

4.1 模拟现象简述

随着工作面推进，破坏首先从岩梁两端及岩梁中下部出现拉破坏区，见图 3(a)。随着推进距离的加大，直接顶初次垮落，垮落带高度为 2 m，以后直接顶随采随冒，见图 3(b)，(c)。工作面推进至 51 m 时，老顶初次来压，见图 3(d)。随着工作面的进一步推进，上位顶板在煤壁附近出现破坏点，见图 3

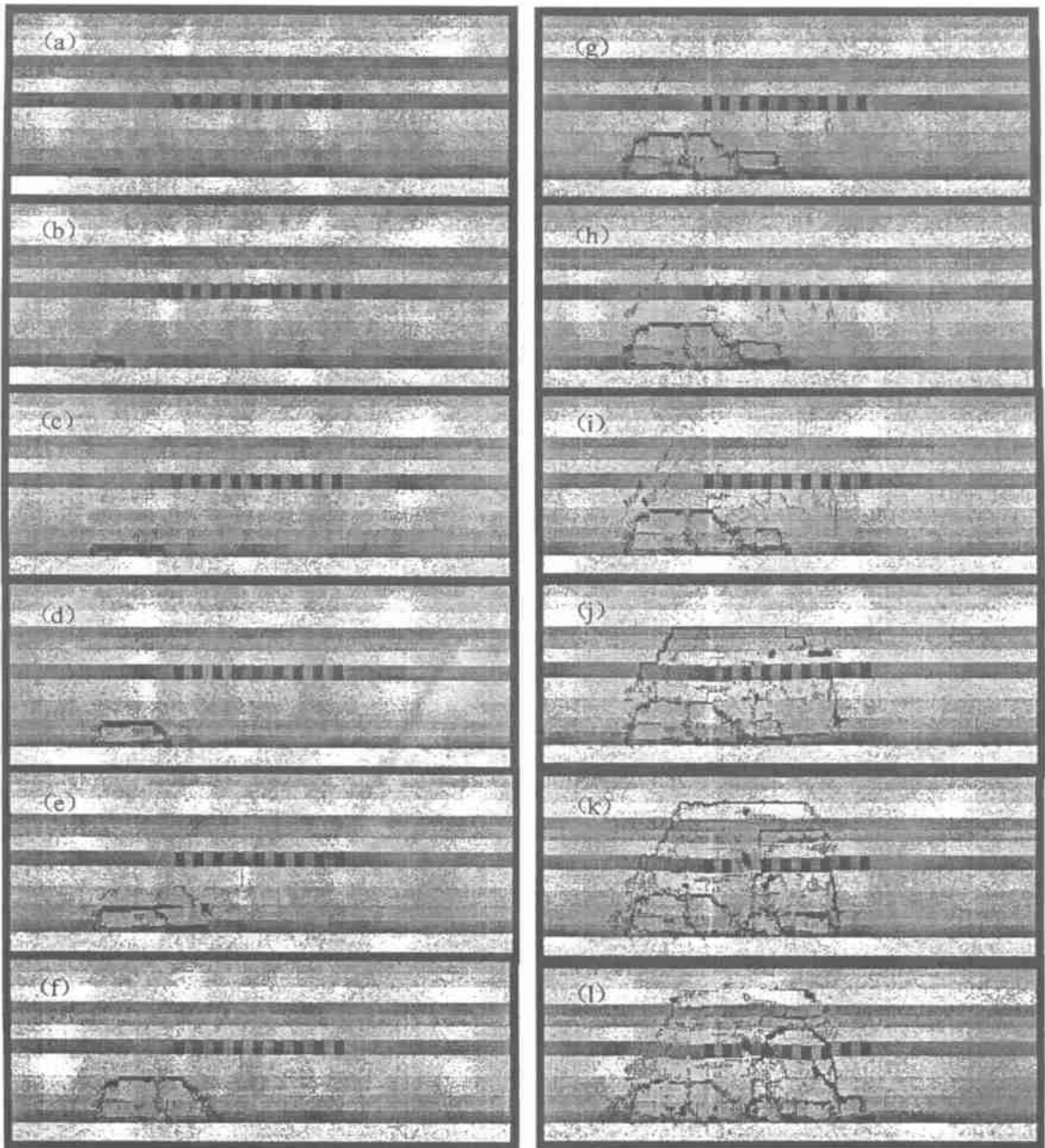


图 3 覆岩破坏过程的数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of overburden failure process

(e)。而后，老顶出现第一次周期来压，见图 3(f)。随着工作面的继续向前推进，老顶出现第二次周期来压，垮落带高度接近上方房柱式开采保留煤柱，见图 3(g)。从数值模拟的岩层垮落过程中可以看出，在垮落带高度接近保留煤柱位置之前，随着下部工作面的推进，采空区面积的扩大，顶板岩层的垮落仍具有明显的周期性。这与相似材料的模拟结果^[10]

是一致的。当工作面继续向前推进时，煤柱上方岩层突然出现大面积垮落，见图 3(j)。这是由于上部岩层的结构引起的，因此属于“次生来压”，这种来压伴随着较大的能量释放，对下部煤层长壁工作面的开采有较大影响。相似材料的模拟也得到类似的结果^[10]。当工作面再继续向前推进时，岩层又呈现出周期垮落，见图 3(l)。

4.2 工作面推进过程中支承压力的规律

随着采场工作面的推进, 通过处于相对稳定状态的老顶岩梁传递至煤层上的压力逐渐增加。但是, 由于各点的应力没有达到煤体的破坏极限, 因此, 包括煤壁在内的整个煤层都处于弹性压缩状态, 支承压力的分布是一条高峰在煤壁处的单调下降曲线, 如图 4(a), (b) 所示, 以及(c), (d), (e), (f) 的右煤壁所示。

随着采场工作面的进一步推进, 靠煤壁附近的应力值达到了煤层的强度极限, 随着煤体的破坏, 其支承能力开始降低, 如图 4(c), (d) 所示。岩梁断裂结束时, 以断裂线为界将支承压力的分布明显地分为两个部分, 即在断裂线与煤壁之间由已断裂岩梁

自重所决定的“内应力场”, 以及在断裂线外由上覆岩层整体重量所决定的“外应力场”, 如图 4(e) 的左边界煤柱所示。两应力场形成后, 随工作面推进, 各自的应力高峰以断裂线为界向相反的方向发展, 如图 4(f), (g), (h) 的左边界煤壁所示。上述的数值模拟结果与理论分析的结果^[12]是一致的。

当垮落带的高度接近上部煤柱时, 工作面继续向前推进, 由于上部岩层的结构引起了大面积的垮落, 从而使工作面一侧的煤壁出现较大的塑性区, 降低了煤壁的承载能力, 如图 4(g), (h), (i), (j) 所示。在采空区中的应力为垮落的岩层充填采空区后形成的矸石上的应力, 它承担上方冒落岩体的重量, 如图 4(g), (h), (i), (k), (l) 所示。

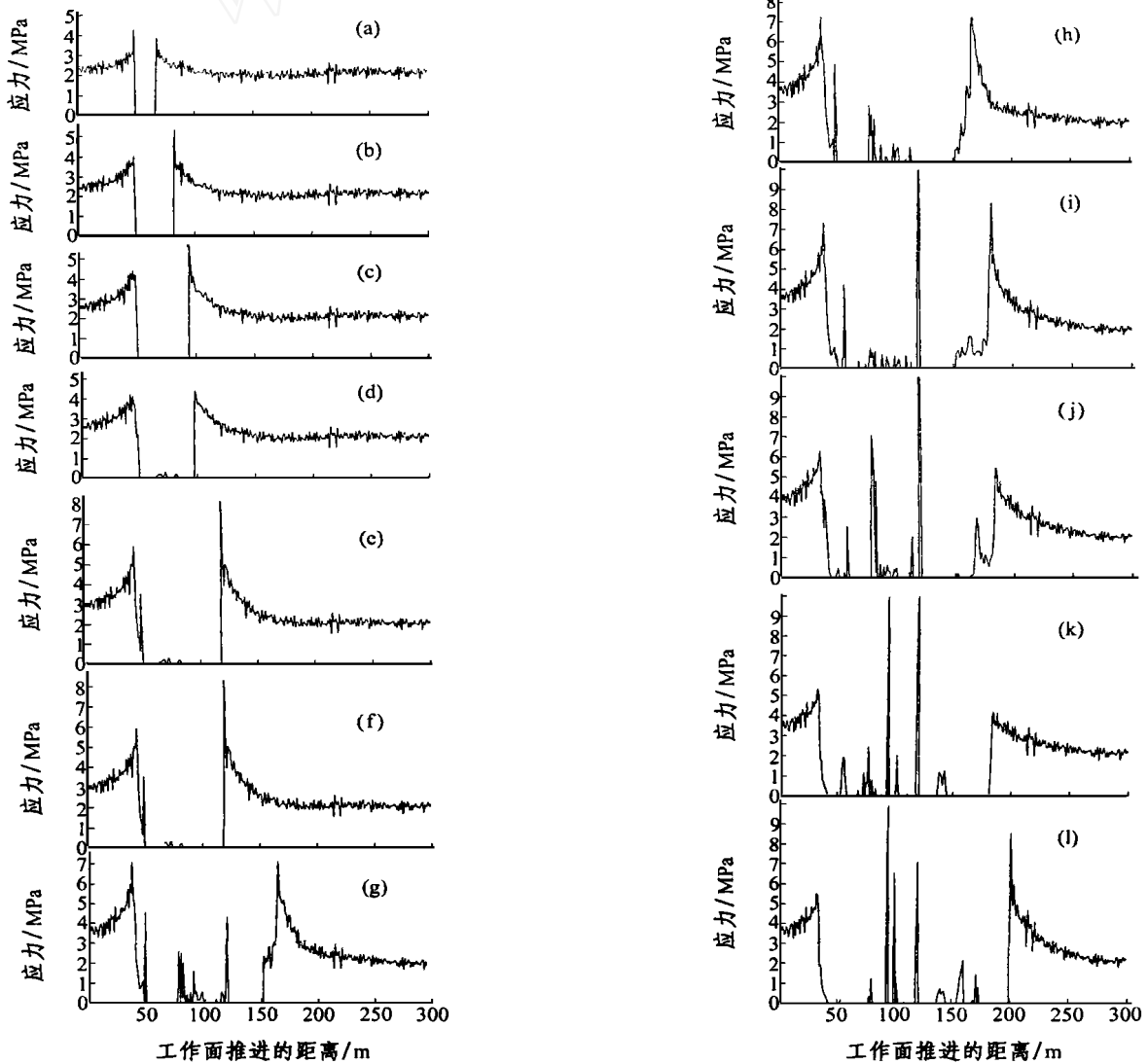


图 4 长壁工作面推进时支承压力的变化

Fig. 4 Variation of supporting stress with advance of longwall face

4.3 工作面推进时上部煤柱应力变化特点

随着下部工作面的推进, 左边界煤柱的应力缓慢增加, 如从图 5(a) 中的 1.1 MPa 增加到图 5(l) 中的 2 MPa 左右 (由于本文的数值模拟模型考虑了岩石的非均质性, 所以应力曲线不是一条平滑的曲线, 而是在一定的范围内波动)。随着工作面的进一步推进, 左边界煤柱靠近工作面一侧煤柱的应力又开始缓慢下降, 说明当下部煤层采空后, 顶板岩层出现挠曲现象, 引起应力的重新分布。挠曲引起的支承压力作用于煤壁边缘, 引起边界煤柱靠近工作面一侧煤柱上的应力升高, 如图 5(a), (b) 所示, 但随着垮落带高度的发展, 支承压力的作用位置逐渐向煤

壁内部转移, 煤壁边缘出现塑性区, 所以边界煤柱靠近工作面一侧的应力又缓慢下降, 如图 5(c), (d), (e), (f) 所示。

从图 5 中可以看出, 煤柱 1~9 在工作面推进过程中均为“凸”字形, 说明煤柱的边缘出现塑性区, 挠曲产生的支承压力引起煤柱的应力增加, 其作用峰值位置略微向煤壁内部转移。受采动的影响, 煤柱 1~9 所受的应力先是随着采空区的增大逐渐升高, 垮落后煤柱的应力又逐渐降低。随着上位岩层的进一步垮落, 先垮落的煤柱充当研石的作用, 煤柱承担部分垮落岩层, 因此其上的应力又有所增加。随着工作面的推进, 具体各煤柱上的应力发展变化

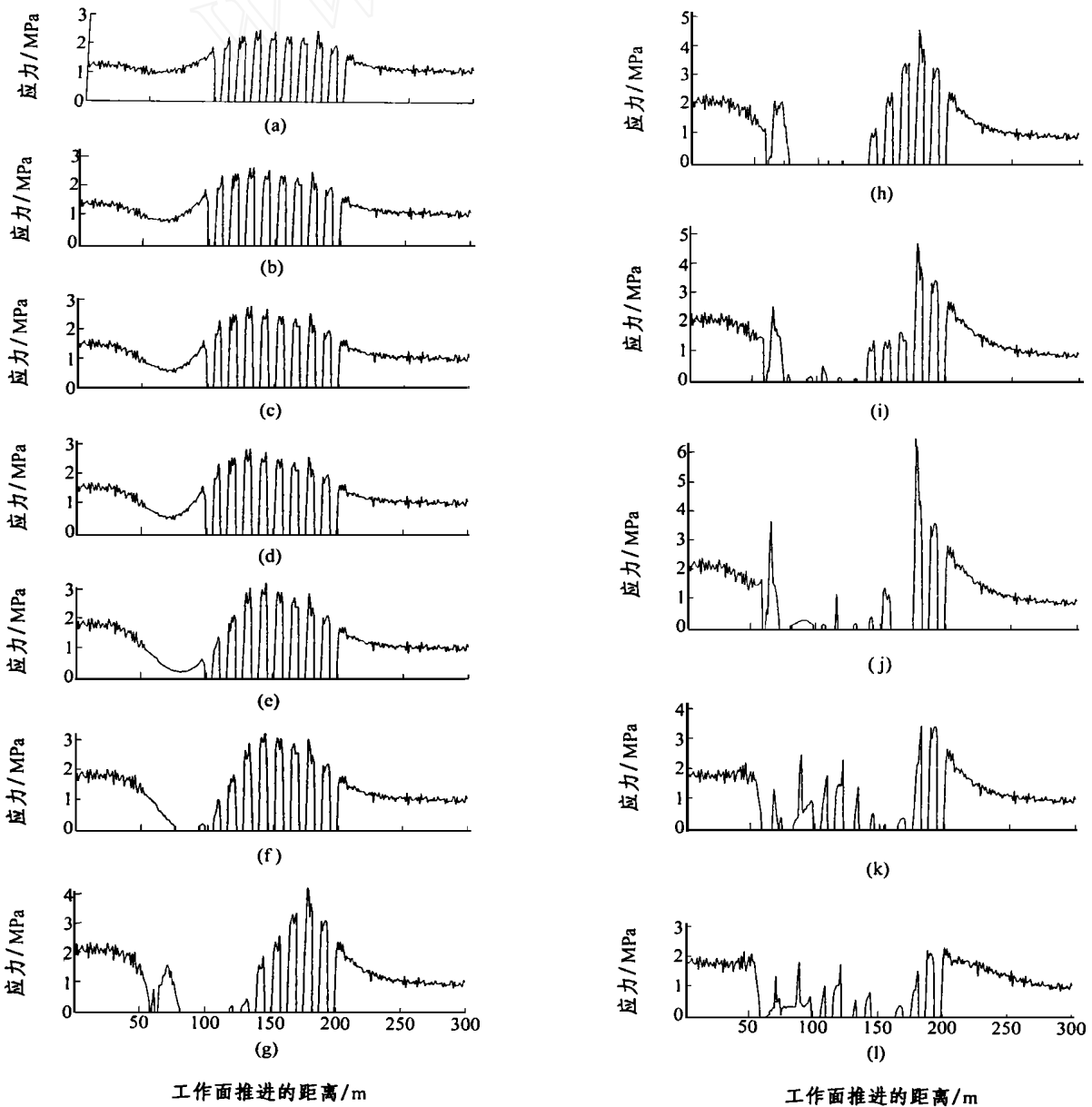


图 5 长壁工作面推进时上部煤柱应力的变化

Fig. 5 Variation of pillar stress with advance of lower longwall face

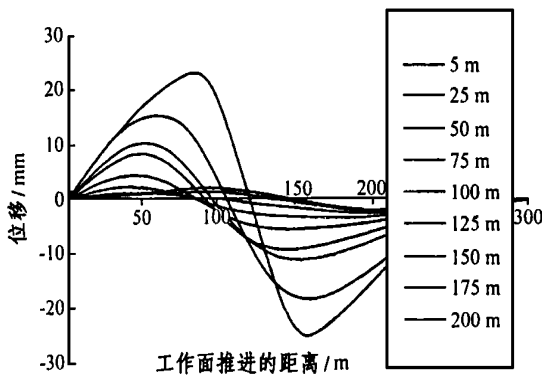


图6 地表岩层的水平移动曲线

Fig. 6 Horizontal movement of surface strata

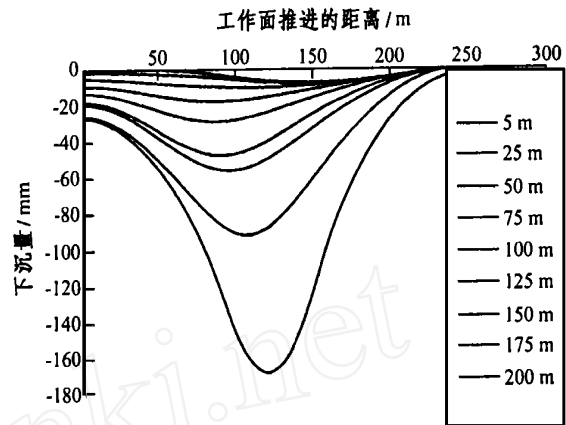


图7 地表岩层的垂直下沉曲线

Fig. 7 Vertical subsidence curve of surface strata

如图5所示。

4.4 上覆岩层水平移动与地表下沉

在下部长壁工作面推进距离很小时,地表的水平移动和垂直下沉主要受上部房柱式开采的影响。如图6,7中系列1,2所示。随着工作面推进距离的加大,地表的移动主要受下部长壁工作面的影响。因为此时的水平移动曲线和垂直下沉曲线的对称点的位置明显变化,如图6,7中1,2以后的系列所示。数值模拟结果表明,随着长壁工作面的推进,地表的水平移动和垂直下沉量逐渐增加,尽管上部煤柱的存在改变了上覆岩层结构,但地表水平移动和垂直下沉仍具有明显的对称性,说明 2^2 煤层长壁开采对上覆岩层的破坏起主要作用, 1^2 煤层中煤柱的存在对覆岩移动的影响不大。

5 结论

本文通过SFPA^{2D}系统用数值方法模拟了多煤层开采时岩梁破坏过程以及随着工作面的推进采场的压力分布、显现及上覆岩层移动的全过程。通过和相似材料模拟以及理论分析的对比,本文的数值模拟基本上反映了采动岩体的动态发展过程,所开发的SFPA^{2D}系统可以作为一种研究采动覆岩破坏过程的新方法。本次模拟得出了如下结论:

房柱式采区的存在虽然改变了上覆岩层的结构,但下部开采时所引起的岩层垮落高度接近上部煤柱前,覆岩层的周期来压现象仍很明显,地表的水平移动和垂直下沉仍具有明显的对称性。在长壁工作面老顶的某次大规模周期来压发生后,可能会发生破坏力较大的次生来压现象,这种来压对工作面有

一定的危险性。

工作面推进过程中煤壁处的支承压力及其显现呈现出规律性的变化,处于垮落带上方煤柱的应力往往降低;而处于岩梁前方下部煤层顶板发生大规模周期来压时,煤体及其上方煤柱的应力将升高。

参考文献

- 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
- 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
- 王泳嘉, 邢纪波. 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, 1~4
- 张玉卓. 煤矿上覆岩层运动竖向不连续位移分析[A]. 见: 谢和平主编. 跨世纪的矿业科学与高新技术[C]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996, 10~15
- 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
- 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
- 王明立. 房柱式采煤法煤柱稳定性及覆岩破坏规律研究[博士学位论文][D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 1999
- 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
- Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity[J]. Int J Rock Mech. & Min. Sci., 1997, 34(2): 249~262
- 武汉地质学院编. 构造地质学[M]. 武汉: 地质出版社, 1981
- 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[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 1994
- 宋振骥. 实用矿山压力控制[R]. 泰安: 山东矿业学院矿压研究所, 1992, 80~84

NUMERICAL SIMULATION OF STRATA FAILURE PROCESS WITH MULTI-COAL STRATA MINED

Liu Hongyuan¹, Tang Chun an^{1,2}, Rui Yongqing¹

(¹ CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006 China)

(² LNM, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract The strata failure process is simulated with multi-coal strata mined by Strata Failure Process Analysis System, which is developed by ourselves. The result of numerical simulation reveals that though the upper pillar changed the structure of overburden stratum, the stratum failure is of periodic law and surface subsidence of symmetry obviously with the advance of longwall face. Large-scale failure may cause large sub-weighting to affect the longwall face, when the height of failure arrives at upper pillar. Compared with similar material model test and theoretical analysis, the numerical simulation reflects the dynamic progress process of mining rock. It is pointed out that SFPA^{2D} is a new approach to research the rock stratum movement.

Key words overburden failure, numerical simulation, supporting stress, mining subsidence

Cosserat 介质理论及其在岩土工程中的应用

刘 俊

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

博士学位论文摘要 Cosserat 介质理论考虑了介质特征尺度的影响,适合于研究具有一定微结构介质的力学行为,受到了工程界广泛重视。传统连续理论是它在特征尺度为零时的特殊情形。

鉴于国内工程界对 Cosserat 介质理论不很熟悉,首先对 Cosserat 介质理论作了全面的介绍,给出了它的基本控制方程。另外,将它在岩土工程中的应用归纳为层状模型、粒状模型及块状模型,并分别进行了讨论。

为了给求解提供依据,证明了 Cosserat 介质理论的能量原理和解的唯一性定理,并导出了 Cosserat 介质理论变分法及相应的有限元模式,采用 C 语言编制了有限元程序 CTFE、CPPO,算例证明计算所得应力场是真实可信的。

孔洞周围的应力集中问题是工程结构计算中经常遇到且需给予高度重视的。文中对无限平板小孔应力分布问题,从应力函数与偶应力函数出发,根据叠加原理,采用分离变量法求得了 Cosserat 封闭解。由此解释了一些试验情况下小孔应力集中系数小于 3 的情况,并证明 Mindlin 解和经典弹性解都是文中解答的特殊退化情形。

最后,首次将 Cosserat 粒状模型应用于大体积混凝土结构。分别采用 Cosserat 介质方法与传统连续介质方法对某重力坝的应力及位移场进行了模拟,利用自编的后处理程序进行分析对比表明:Cosserat 介质法计算所得的坝体及岩基的应力与位移分布合理,在坝踵、趾,Cosserat 解的应力集中现象相对缓和,应更加真实。

关键词 Cosserat 介质理论,应力集中,封闭解,有限元

COSSERAT CONTINUUM THEORY AND ITS APPLICATION IN GEOMECHANICS

Liu Jun

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

2000 年 8 月 30 日收到来稿。

作者 刘 俊 简介:女,1971 年生,2000 年 8 月在中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位,导师是葛修润院士;现在上海交通大学船舶与海洋工程学院从事计算结构力学方面的教学和科研工作。