

石门揭煤突出过程的数值模拟研究*

唐春安^{1,2} 刘红元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重点实验室 北京 100080)

摘要 运用岩石破裂过程分析 RFPA2D 系统,对急倾斜含瓦斯煤层中的石门揭煤突出过程进行了数值模拟研究。模拟结果再现了含瓦斯岩中裂纹的萌生、扩展、贯通直至煤岩抛出的突出全过程,并通过含瓦斯煤岩变形、破裂过程中的应力场演化说明了地应力、瓦斯压力以及煤体力学性质对诱发突出的综合作用。

关键词 含瓦斯煤岩,石门,突出,数值模拟,变形与破裂

分类号 TD 713⁺, 1

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)10-1467-06

1 引言

含瓦斯煤岩的突出是煤矿开采过程中一种复杂的工程诱发灾害。研究含瓦斯煤岩的突出机理,对于解释突出现象,促进含瓦斯煤岩突出预报与防治的研究,具有重要的理论与实际意义。然而,尽管人们在长期的生产与研究中,对含瓦斯煤岩突出现象的认识有许多重要进展^[1~19],对瓦斯突出灾害的防治积累了丰富的经验,但由于含瓦斯煤岩突出问题的复杂性,以及研究含瓦斯煤岩突出在实验条件上的困难,目前还没有一种有效的理论方法能对含瓦斯煤岩从裂纹诱发、扩展、贯通到抛出的突出全过程进行系统的分析。

在含瓦斯煤岩突出的诸多模式中,石门揭煤突出是最主要的突出模式之一。我国发生的特大型含瓦斯煤岩突出中,80%发生在石门揭煤过程中^[14]。就粗略的现象描述而言,石门揭煤含瓦斯煤岩突出的基本过程还是清楚的。根据经验积累所知^[14],通常处于有突出危险性的含瓦斯煤层附近,围岩的透气性都要比煤层本身小得多。在石门巷道揭开煤层之前,煤层内的瓦斯如果未经排放,将会保持较高的瓦斯压力。当爆破揭开煤层的瞬间,具有突出危险性的煤体由于侧向应力突然释放,可能导致暴露面附近煤体迅速破坏。由于新暴露的煤体表面上可以看作只受大气压力作用,在距煤体表面不远处的

煤体内部则仍处于原始瓦斯压力状态,两者的瓦斯压力梯度很大,受地应力作用破坏的煤体在这个瓦斯压力梯度的作用下抛向巷道,又使内部的煤体再暴露、破坏、抛出等,形成延续一定时间的连锁过程,直至达到稳定。

本文运用自行研究开发的岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统^[19~24],通过在模型中引入瓦斯压力的作用,对急倾斜含瓦斯煤层中的石门揭煤诱发突出的过程进行了初步的数值模拟研究,模拟结果较好地再现了含瓦斯煤岩突出的发生、发展过程。

2 数值模型及其参数

由东北大学岩石破裂与失稳研究中心研究开发的岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统,是一个基于有限元应力分析模块和细观单元破坏分析模块的岩石变形、破裂过程研究的数值分析程序。RFPA^{2D} 将细观力学与数值计算方法有机地结合,通过考虑岩石性质的非均匀性特点,模拟岩石变形和破裂的非线性行为,是一种运用连续介质力学方法解决非连续介质力学问题的新型数值分析工具。在 RFPA^{2D} 基础上,通过在单元中引入有效应力模拟瓦斯压力的作用。同时,假定在裂纹的扩展瞬间,含瓦斯煤体对裂纹空间瓦斯压力的补给是恒定的,即随着裂纹的扩展,裂纹中的瓦斯压力保持恒定。这相当于在裂纹的扩展过程中,煤岩中不断有瓦斯析出。这可

2001年2月9日收到初稿,2001年5月4日收到修改稿。

* 国家自然科学基金重点项目(50134040)与国家自然科学基金资助项目(59525498)。

作者 唐春安 简介:男,43岁,博士,1981年毕业于中南矿冶学院矿山系采矿专业,现任教授,主要从事岩石破裂与失稳的基础性理论研究。

以是吸附瓦斯的解吸、某些化合物的分解或其他机制所形成的结果^[8]。当某些裂纹在扩展过程中与外部贯通时，这些与外部贯通的裂纹中的瓦斯压力即降为零。因此，在模拟的过程中，将存在两种不同性质的裂纹。一种是不与外部贯通的含有瓦斯压力的裂纹，而另一种则是已与外部贯通的不含有瓦斯压力的裂纹。

实际煤层的赋存情况往往是在煤层的上方和下方存在着煤层的顶板和底板，并且它们通常由较为坚硬的页岩、砂岩组成^[14]。通常，由于这些岩石对瓦斯的吸附量较小，在地应力作用下破坏后，释放出来的瓦斯量极少，很难诱发突出。因此，顶底板岩石在突出过程中的作用，以阻碍和限制突出为主。此外，在开采实践中，人们还发现^[14]，无论是石门揭煤条件下的突出，还是煤巷掘进中的突出，在突出开始之前，都存在一个有突出危险煤层从深部到表面的暴露过程。这种暴露过程可以通过在工作面的爆破作业来完成，也可能是暴露面的硬煤或硬岩在地应力的作用下破坏而自行揭开来完成的。本文拟模拟岩巷掘进过程中石门被揭穿而导致含瓦斯煤层的突出情况。即假定工作面前方煤层中的瓦斯在石门揭开前没有泄露，同时假定采掘工作面是逐渐接近含瓦斯煤层的。由于篇幅所限，对于其他形式石门揭煤突出的模拟，将在另文中讨论。

图1所示为煤层数值模型。模型基层为相对坚硬的岩体，并假定岩体中不含有瓦斯压力。设岩体中含有一急倾斜煤层。为了使模型更接近实际地质条件，设煤层的边界为不规则形状。模拟过程的开挖从煤层的下盘开始，逐渐向煤层推进。

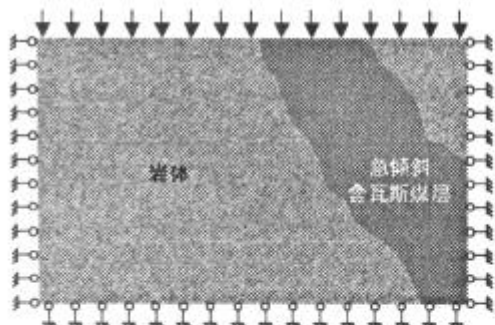


图1 石门揭煤突出过程数值模拟模型
Fig.1 Numerical model for simulating outburst during excavation from rock to coal seam

模型共计分为 130×190 个细观单元。为了考虑煤岩介质的非均匀性，假设煤层介质是非均匀的，即细观单元的弹模和强度服从某种统计分布，本文

采用 Weibul 分布^[20]。由于含瓦斯煤岩的突出过程与地应力、瓦斯压力和煤体强度因素有关^[11, 13, 14]，因此数值模型中必须考虑这 3 种因素的综合作用。其中地应力通过模型的边界条件给定 5 MPa 的分布力(见图 1)，瓦斯压力设为 2 MPa，煤体弹模和强度值分别为 10 000 和 15 MPa。岩体的弹模和强度均远大于煤层。

3 模拟结果

模拟过程中的开挖是分步进行的，共计进行了 5 步开挖。图 2 是由 RFPA^{2D} 模拟得到的石门揭煤突出过程的数值模拟结果。可以看出，当开挖到第 5 步时，发生了突出。整个突出的发动、发展过程描述如下：

- (1) 在开挖的初期(第 1~3 步)，岩巷推进工作面离含瓦斯煤层较远，岩体与煤体均处于完好状态，见图 2(a)~2(c)。
- (2) 然后，当开挖进入第 4 步，工作面推进至煤层边缘时，煤体与岩体的交界面靠近煤体一侧有微破裂产生，见图 2(d)。
- (3) 开挖进入第 5 步，达到石门揭煤的临界点，在接近岩巷的煤层部位，微破裂急剧增加。由于底板岩石比较坚硬，微破裂主要在煤层中发生。此时，位于顶板处的破裂煤体有少量已被抛出，见图 2(e)。
- (4) 微破裂迅速演化成突出，见图 2(f)。
- (5) 突出孔洞迅速扩大，直至孔洞结构达到稳定，突出过程停止，见图 2(g)~2(j)。

值得指出的是，模拟得到的突出孔洞，口小腔大。由于下盘的岩体比较坚硬，含瓦斯煤体的突出沿岩体与煤体的交界面向上下深部扩展，并在孔洞口处形成了一个门坎。

4 讨论

由于含瓦斯煤岩由破裂到突出是一个复杂的依赖于地压、瓦斯及煤体力学性质 3 因素的力学过程，因此从应力分析的角度研究含瓦斯煤岩突出的过程，对于了解含瓦斯煤岩的突出机理具有重要的作用。

图 3 是模拟得到的相应于图 2 破坏过程的应力分布及其应力场的演化过程图。由此可见，从应力场的演化过程进一步分析石门揭煤含瓦斯煤岩的突出过程，可以将整个过程分成如下 3 个阶段。

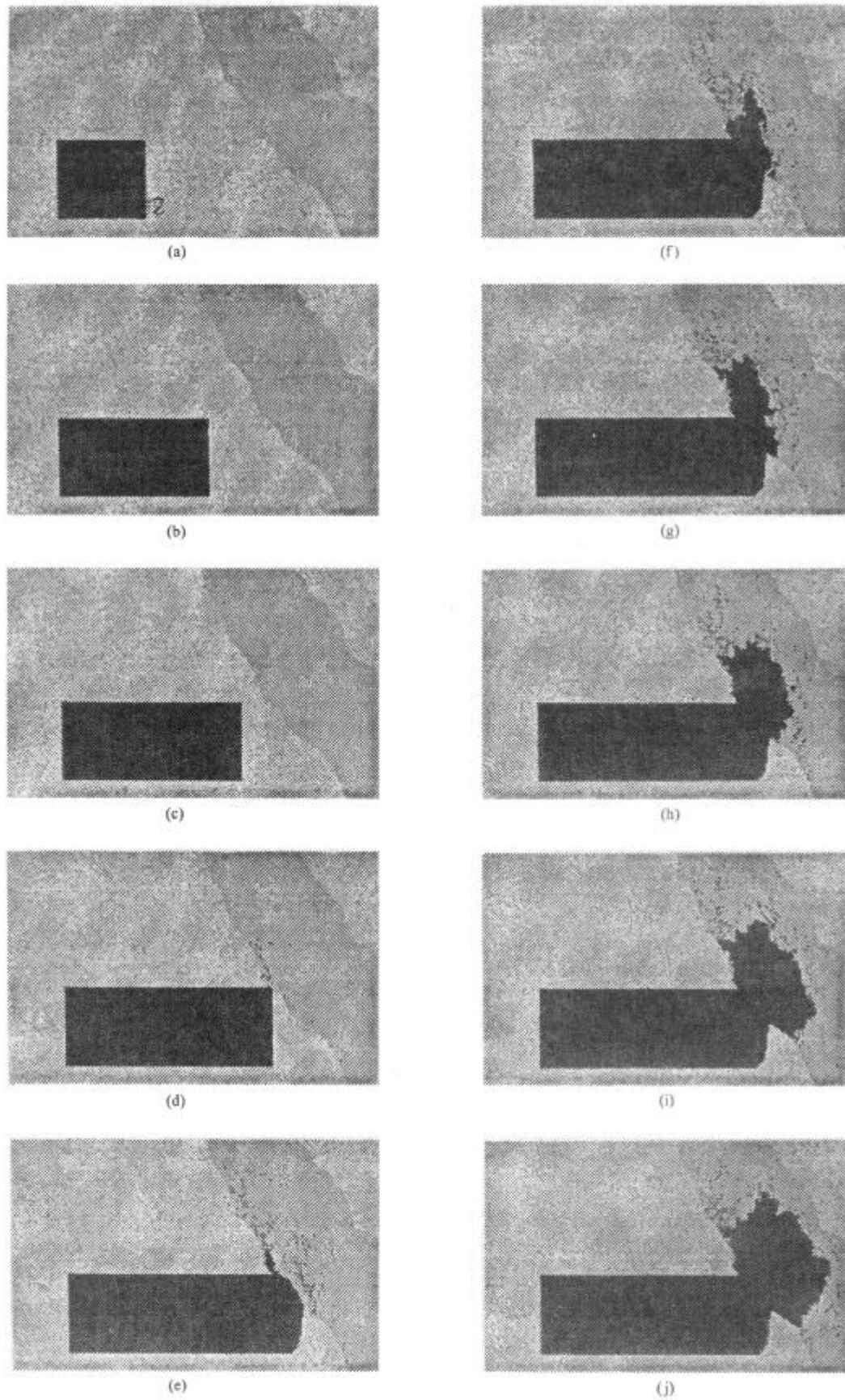


图 2 石门揭煤突出过程的数值模拟结果(RFPA^{2D})

Fig.2 Numerical results by RFPA^{2D} on outburst process in crosscutting in coal seam

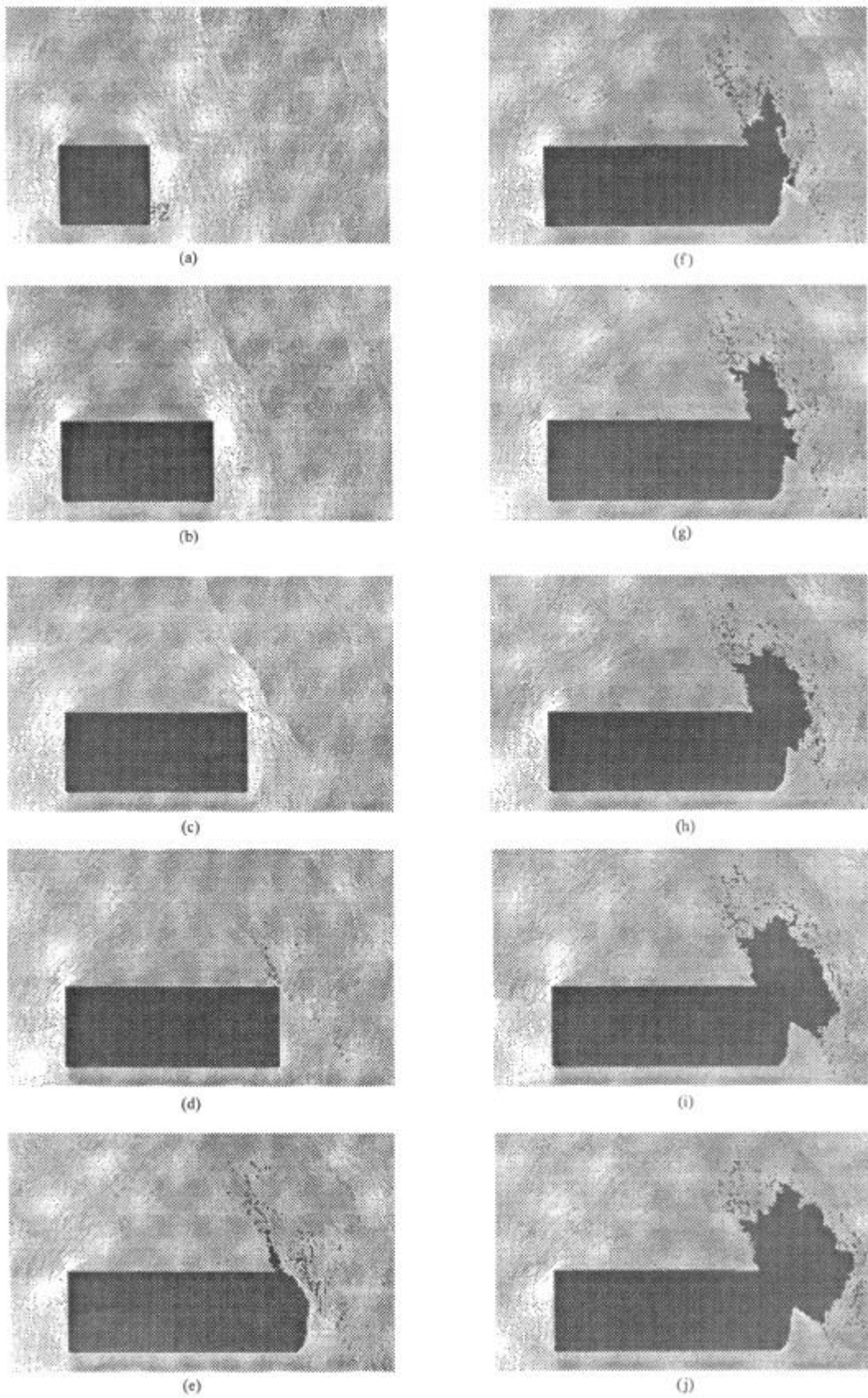


图3 石门揭煤突出过程中剪应力场变化的数

Fig.3 Variation of shear stress field during outburst in crosscutting in coal seam by RFPA^{2D}

(1) 地应力集中阶段

第 1 步开挖时, 推进工作面远离煤层, 高应力集中主要在巷道断部的拐角处, 见图 3(a)。由于岩体的刚度和强度远大于煤体, 因此主要由工作面与煤层之间的岩体(即石门)担负了较大的垂直载荷, 此时分布在煤体上的地应力不足以破坏煤体。随着开挖的进行(第 2~4 步), 工作面不断向煤体推进, 石门的厚度越来越小, 石门中的地应力集中, 特别是沿着岩体与煤体交界面一带的应力集中越来越高, 见图 3(b)~3(d)。值得注意的是, 由于在模型中考虑了煤体介质的非均匀性, 因此所获得的应力分布, 从微观层次上看也是不均匀的。

(2) 地应力诱发煤岩破裂阶段

模拟结果证明, 含瓦斯煤岩的初始破坏是由地应力完成的。由图 3 可知, 随着开挖步的增加, 煤体附近地应力集中的不断增加。开挖到达第 4 步时, 在新的采掘空间形成的瞬间, 原较厚石门顶部处的地应力因石门厚度越来越小, 更多地转移到煤体之中, 在暴露面附近形成较高的应力集中, 见图 3(d)。这一阶段, 在暴露面附近, 由于应力集中的影响, 加之作用在煤体质点上的侧向应力被逐渐释放, 暴露面周围的煤体逐渐失去侧向支承, 煤体的抗拉强度又远低于抗压强度(本文模型中的拉压强度比假设为 1:10), 因此, 在暴露面附近的煤体中诱发了在卸载方向的拉裂纹, 见图 3(e)。此外, 沿岩体与煤体交界面一带的煤体质点在地应力作用下发生大量微破裂。

(3) 瓦斯压力驱动裂纹扩展阶段

伴随着破裂区的形成过程, 破裂区的弹性能得到释放, 此区域内煤体质点上的地应力随之减小, 地应力的高峰则向煤体的深部推移。按照 RFPA^{2D} 的设定, 如果裂纹在含瓦斯煤岩中形成且未与外界贯通, 则瓦斯压力立即在裂纹中形成。因此, 在开挖步没有继续增加的情况下, 煤体中的裂纹扩展过程显然主要是由瓦斯压力驱动的, 见图 3(e)。

(4) 瓦斯压力抛射煤块阶段(即突出)

瓦斯压力驱动裂纹扩展的过程, 造成对煤体的撕裂作用, 并导致大量裂纹相互贯通, 裂纹空间体积在不断增大, 并且瓦斯压力充满整个裂纹空间。由于暴露面处的压力为零(忽略大气压力), 形成了被撕裂煤块内外很大的压力差, 最终造成对破裂煤体的抛射, 形成突出, 见图 3(f)。

对于含瓦斯煤岩突出的机理, 不只看有没有煤体抛出, 关键应考察引起抛出的煤岩破裂过程如何能持续进行的机制, 这一点似乎更为本质。初次突

出发生之后出现的新暴露面, 在地应力、瓦斯压力及煤体强度等因素综合作用下继续满足突出的条件时, 暴露的煤体又在地应力的作用下破坏, 破坏后又又被瓦斯压力抛向巷道, 这种连锁破碎及抛出煤体的过程使突出阵面不断向煤体内部推进, 形成连续的突出, 直至地应力、瓦斯压力及其煤体强度之间的综合作用不再满足突出的条件, 突出才会停止。由于图 3(g)~(j)演示的连续过程均是在第 5 步完成的, 因此它说明突出从图 3(f)一直到图 3(j)是连续推进的, 即突出使内部的煤体再暴露、破坏、抛出等, 形成延续一定时间的连锁过程, 直至达到稳定。

上述由数值模拟得到的石门揭煤突出的全过程, 基本符合根据经验积累对石门揭煤突出过程的认识, 它反映了从地应力集中、地应力诱发破裂、瓦斯压力驱动裂纹扩展, 直至抛射的突出全过程 4 阶段。

5 结 语

本文运用自行研究开发的岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统, 通过对急倾斜煤层中石门揭煤突出过程的数值模拟, 较好地再现了含瓦斯煤岩突出的发生、发展过程。通过分析阐明了地应力、瓦斯压力、含瓦斯煤岩力学性质等基本因素对突出的影响, 对含瓦斯煤岩突出的机理有了进一步的认识。数值模拟的结果与通常的经验认识以及突出的基本规律是相符的。为了使研究结果更加符合实际, 下一步还将进一步在模型中考虑渗流与流变过程的影响, 并进一步探讨含瓦斯煤体在破裂过程中瓦斯压力的变化规律, 使突出过程的模拟更能真实地反映煤矿开采实践中突出现象的复杂性。

参 考 文 献

- 1 霍多特 B B. 煤与瓦斯突出机理[M]. 宋世钊, 王佑安译. 北京: 中国工业出版社, 1966
- 2 中国矿业学院瓦斯组. 煤和瓦斯突出的防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1979
- 3 郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤和瓦斯突出的机理[A]. 见: 力学与生产建设[C]. 北京: 北京大学出版社, 1982
- 4 Ujihira M, Higuchi K, Nabeya H. Scale model studies and theoretical considerations on the mechanism of coal and gas outbursts[A]. In: Proceedings of the International Conference of Safety in Mines (21th)[C]. Sydney: NSW Publisher, 1985, 121~127
- 5 于不凡. 煤和瓦斯突出机理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985
- 6 Paterson L. A model for outbursts in coal[J]. Int. J. Rock Mech. Min.

- Sci. 1986, 23: 327~332
- 7 余善炳. 恒稳推进的煤与瓦斯突出[J]. 力学学报, 1988, 20(2): 97~105
- 8 丁晓良. 煤在瓦斯一维渗流作用下的初次破坏[J]. 力学学报, 1990, 22(2): 154~162
- 9 章梦涛. 冲击地压与突出的统一失稳理论[J]. 煤炭学报, 1991, 16(4): 48~53
- 10 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992
- 11 周世宁, 何学秋. 煤和瓦斯突出机理的流变假说[J]. 中国矿业大学学报, 1990, 23(2): 2~8
- 12 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型与数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 229~239
- 13 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995
- 14 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 中国矿业大学出版社, 1998
- 15 蒋承林. 爆破对矿井突出的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 502~507
- 16 梁冰, 刘建军, 范厚彬等. 非等温条件下煤层中瓦斯流动的数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 19(1): 1~5
- 17 蒋承林. 煤壁突出孔洞的形成机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 225~228
- 18 郭立稳, 俞启香, 蒋承林等. 煤与瓦斯突出过程中温度变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 366~368
- 19 唐春安, 芮勇勤, 刘红元. 含瓦斯“试样”突出现象的 RFA^{2D} 数值模拟[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 501~505
- 20 Tang C A. Numerical simulation on progressive failure leading to collapse and associated seismicity[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1997, 34(2): 249~260
- 21 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[J]. 力学与实践, 1999, 21(2): 21~24
- 22 Tang C A. Numerical tests on micro-macro relationship of rock failure under uniaxial compression (part I: effect of heterogeneity)[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2000, 37(5): 555~569
- 23 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 468~471
- 24 刘红元, 唐春安, 黄勇勤. 多煤层开采时岩层垮落过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 190~196

NUMERICAL APPROACH ON OUTBURST IN CROSSCUTTING IN COAL SEAM CONTAINING GAS

Tang Chun^{1,2}, Liu Hongyuan¹

¹ Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006 China

² National Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083 China

Abstract Rock failure process analysis code, PFDA^{2D}, is used to simulate the outburst in crosscutting in steep coal seam containing gas. The results demonstrate the process of outburst from the crack initiation, propagation, coalescence and the outburst. The numerically obtained stress field during coal deformation and failure process indicate the synthetic interaction in outburst process among stress, gas pressure and mechanical properties of coal.

Keywords coal seam containing gas, crosscutting, outburst, numerical simulation, deformation and failure

新书简介

《工程渗流力学及应用》一书由苑莲菊、李振栓、武胜忠编著，中国建材工业出版社 2001 年出版，全书 451 页，定价 51.00 元。

该书系统地阐述了工程渗流力学基本理论、计算方法、野外试验和室内模拟实验，全面地总结了工程实践中的渗流问题。该书主要内容包括：渗流基本理论，水平集水建筑物的渗流计算，垂直集水建筑物的渗流计算，工程渗流的数值模拟，工程渗流的物理模拟，水利工程、建筑工程、农业工程、矿业工程中的渗流问题及计算，与渗流有关的环境问题。

《可靠性工程原理》一书由郭永基编著，清华大学出版社 2002 年出版，全书 257 页，定价 24.00 元。

该书介绍了可靠性工程的内容和分析方法，指数分布等 7 种典型函数和强度应力模型，不可修复系统的可靠性评估方法，包括串联系统、并联系统、表决系统等可靠性模型，以及用最小路集和最小割集分析系统可靠性的方法等内容。