

文章编号: 0253 - 9993(2000)05 - 0501 - 05

含瓦斯“试样”突出现象的 RFPA^{2D}数值模拟

唐春安^{1,2}, 芮勇勤^{1,3}, 刘红元¹, 刘建新¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110006; 2. 中国科学院 力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080; 3. 长沙交通学院 道路与桥梁工程系, 湖南 长沙 410076)

摘 要: 运用新近开发的岩石破坏过程分析 RFPA^{2D} (Rock Failure Process Analysis) 系统, 以含瓦斯煤岩的破坏过程分析为例, 通过对含瓦斯煤岩突出孕育机制及其声发射的数值模拟, 说明了数值模拟方法给含瓦斯煤岩突出机制及其预测理论的发展所带来的新契机. 数值模拟再现了含瓦斯煤岩突出的发生、发展过程, 模拟结果表明, 复杂的瓦斯煤岩断裂、突出现象可能是一些简单机理的演化结果.

关键词: 瓦斯; 煤岩突出; 非均匀性; 断裂破坏; 数值模拟

中图分类号: TD713^{+.2} **文献标识码:** A

由于含瓦斯煤岩突出是煤矿生产中的重大灾害之一, 因此有关含瓦斯煤岩突出的机理一直是煤炭开采技术研究所关注的焦点之一^[1,2]. 尽管在突出机理的研究中, 人们提出了诸如瓦斯主导作用、地压主导作用、化学作用等假说^[3,4], 但实际上由于煤层地质条件和开挖作业的复杂性, 诸多影响瓦斯突出的因素是互相作用的. 因此, 考虑多因素相互作用的综合作用假说对含瓦斯煤岩突出的复杂性更具有说服力. 在这种综合作用假说指导下, 几十年来, 有关煤岩突出机理的研究有了显著的进展^[4]. 由于综合作用假说目前仍停留在对突出过程模糊的、定性描述的阶段, 已有的理论描述方法也只是建立在连续介质力学的基础之上, 缺少对煤岩介质在瓦斯压力作用下变形、破坏过程的描述, 所以难以解释含瓦斯煤岩突出的发生、发展过程. 就目前数学力学发展的水平而言, 要想通过解析理论的方法对具有工程背景的含瓦斯煤岩的突出问题进行定量的描述还为时尚早. 在运用理论解决实际问题的过程中, 数值模拟方法在某种程度上起到了一种很好的桥梁作用. 本文试图通过对煤岩体在定常压条件下因瓦斯压力作用诱发煤岩破坏(突出)过程的数值模拟, 说明数值模拟方法给含瓦斯煤岩突出机理及其预测预报理论的发展所带来的新契机.

1 RFPA^{2D} 数值模拟方法

含瓦斯煤岩突出问题数值模拟方法的关键, 主要是对含瓦斯煤岩中裂纹在瓦斯压力作用下扩展问题的处理. 本文运用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统, 对含瓦斯煤岩突出问题进行了初步探索. 模拟所用的 RFPA^{2D} 系统, 是近年来由东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的模拟材料渐近破裂诱致失稳的数值模拟工具. 其最大特点是可以在模型中考虑材料的非均匀特性. RFPA^{2D} 包括几个方面的功能: 应力分析、变形分析、声发射和结构破坏分析^[5,6]. 对于含瓦斯煤岩非均匀脆性性质而言, 有: 当单元变形使应力达到一定强度值时作破坏处理, 强度准则从峰值强度跌落至残余强度; 破坏单元不具备抗拉能力(分离处理), 但具备抗挤压能力(接触处理); 材料的细观非均匀性可以通过单元力学参数分布的非均匀性来表达, 宏观非均匀性则通过设置实际几何尺寸的低强度区、裂隙、颗粒等单元组来模拟; 瓦斯压力以内压形式赋予任意单元中, 其压力值可以变化调整; 破坏单元的力学特性变化是不可逆的. 其中第 1 点可以处理裂纹萌生问题, 第 2 点可以处理裂纹的形成问题, 第 3 点可以处理裂纹的非规则路径问题,

收稿日期: 2000 - 05 - 29

基金项目: 国家杰出青年科学基金(59525408); 中国博士后科学基金; 中国科学院力学研究所 LNM 国家重点实验室开放基金资助

第 点与瓦斯压力有关, 第 点则可以处理裂纹的扩展与演化问题。

FRPA^{2D}系统的应力分析采用有限单元法进行, 破坏分析则是根据一定的破坏准则来检查材料中是否有单元破坏。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, 正如崔维成^[7]所指出的, 渐近破坏模型计算结果的好坏主要取决于破坏准则以及刚度矩阵退化规律选择得是否适当。到目前为止, 对于如何选择破坏准则还没有一个统一的认识^[7]。考虑到脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度, 因此笔者采用了修正后的摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则(包含拉伸截断 Tension cut-off^[8])作为单元破坏的强度判据, 从而可以利用数值计算方法, 对含瓦斯煤岩突出的复杂问题进行研究。

2 煤岩破裂体中裂纹(群)的萌生、扩展及其相互作用机制

(1) 非均匀性对裂纹扩展模式的影响 为了说明非均匀性对裂纹扩展模式的影响, 图 1 给出了一个翼形裂纹扩展的 FRPA^{2D}数值模拟结果。其中图 1 中的左图采用了均匀材料模型, 以便与经典断裂力学的现有结果进行对比。FRPA^{2D}系统所给出的非均匀材料的模拟结果如图 1 中的右图所示。模拟结果表明, 图 1 中的两个试样, 尽管其初始裂纹大小、长度、倾角及试样的加载方式完全一样, 但由于材料非均匀性的影响, 其裂纹的扩展模式有很大的差别, 非均匀材料中的翼形裂纹扩展模式变得极其复杂, 出现了裂纹的断续型扩展和所谓的“岩桥”现象。

(2) 裂纹群扩展相互作用机制 有关裂纹群的扩展及其相互作用机制问题, 仅在实验研究方面有许多成果出现。国际岩石力学的知名学者 Einstein^[9], Stephansson^[10]以及 Horii^[11]用试验方法研究了多裂纹扩展的相互作用问题。但有关裂纹群萌生、扩展, 特别是裂纹间的相互作用和贯通机制问题, 一直是断裂力学理论研究的难点。图 2 以 Horii 的试验结果为例, 用 FRPA^{2D}系统模拟了多裂纹扩展的相互作用和贯通机制问题。在单轴加载条件下, 分布于试样上的长裂纹较为活跃, 相互作用明显, 其扩展最终导致了劈裂破坏。而直至宏观破坏发生, 处于试样对角线上的短裂纹, 几乎都未出现明显的扩展, 说明短裂纹间的相互作用较弱。这一结果很好地说明了裂纹之间相互作用对裂纹扩展规律的影响。

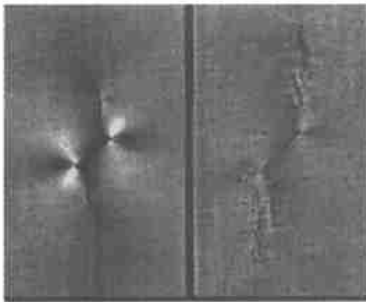


图 1 非均匀性对裂纹扩展模式的影响

Fig. 1 Effect of heterogeneity on crack propagation mode

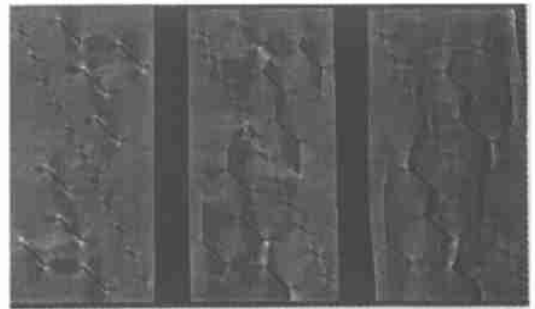


图 2 含裂纹试样单轴受压条件下的破坏模式

Fig. 2 Failure mode of sample with pre-existing crack under uniaxial compressive conditions

3 含瓦斯煤岩突出现象及其数值模拟初探

3.1 含瓦斯煤岩突出现象

在煤矿地下采掘过程中, 在很短时间内从煤岩壁内部向采掘工作面突然喷出煤岩和瓦斯的现象, 通常称为含瓦斯煤岩突出。它是一种伴有震动声响和强烈冲击的动力现象, 不仅破坏矿井通风系统, 使井巷充满瓦斯和含瓦斯煤岩抛出物, 同时可能引起瓦斯爆炸与火灾事故, 导致生产中断等。自从 1834 年法国鲁阿尔煤田伊萨克矿井在急倾斜厚煤层平巷掘进工作面发生了世界上第 1 次有记载的含瓦斯煤岩突出以来, 在许多煤矿地下采掘过程中就开始不断出现工作面煤壁外移, 巷道受含瓦斯煤岩突出而发生人员死亡, 或导致矿井、巷道关闭。特别是随着开采深度的增加, 瓦斯压力和地应力增大, 造成含瓦斯煤岩突出诱发的

灾害越来越多,含瓦斯煤岩突出的预测与防治工作难度也越来越大^[3,4].

3.2 含瓦斯煤岩突出数值模拟研究方法

含瓦斯煤岩突出机理的研究方法归纳起来主要有观察统计法、逻辑演绎法、实验法和数值分析法.以往以瓦斯压力为主和以地应力为主的含瓦斯煤岩突出假说只是从一个侧面来说明突出的内在机制,无法解释许多突出现象^[3,4,12~14].霍多特等人在实验室中对煤的性质进行了大量测定研究,在压力实验机上进行煤与瓦斯突出的模拟实验,阐述了煤与瓦斯突出的能量来源,用数学方法计算了煤层的变形潜能、围岩的动能、瓦斯的膨胀功和造成突出所需的功,提出了能量假说.但是对含瓦斯煤岩突出没有揭示含瓦斯煤的渐进破坏过程和破坏条件.周世宁、何学秋等提出的突出流变假说认为,含瓦斯煤岩在外力的作用下,当达到或超过其屈服载荷时,明显地表现为时间上的变形衰减阶段、均匀变形阶段和加速变形阶段.其中,前两阶段对应突出的准备阶段,后一阶段是煤与瓦斯突出的发生、发展阶段,突出是含瓦斯煤体快速流变的结果.如果外加载荷未达到屈服载荷,流变具有衰减的特征,将不会发生突出.

对于含瓦斯煤岩突出而言,煤岩在采动影响和瓦斯压力作用下渐进破坏诱致突变的过程是含瓦斯煤岩突出的主要特征.含瓦斯煤岩突出行为的最终表现取决于采掘、外部环境条件和其自身的物理力学性质.瓦斯压力、地应力和煤的物理化学力学性质是导致煤岩渐进破坏直至发生煤岩突出的重要影响因素.根据这一观点,可以建立含瓦斯煤岩渐进破坏导致灾变的数值计算模型,在此基础上定量和半定量地描述突出的发生、发展过程,把突出假说建立在定量化的理论基础之上,进而更加深入地认识突出的机理^[12~14].

3.3 含瓦斯煤岩破裂性质的数值模拟

(1) 数值模拟分析模型 模型如图3所示.数值模拟分析模型采用上下边界位移约束、侧边无约束、试样施加瓦斯压力至破坏的模型,试样的高、径比为2:1,其尺寸为200 mm × 100 mm.煤岩试样划分为200 × 100 = 20 000个单元.为了模拟瓦斯压力的作用,在试样中随意设置了8个含瓦斯煤岩包体.假定包体内含有瓦斯压力,而包体外为无瓦斯压力区.采用瓦斯压力控制的加载方式模拟含瓦斯煤岩破裂,共计加压20步,每步瓦斯压力增量为0.2 MPa.

为了研究介质非均匀性对含瓦斯煤岩破裂过程的影响,设定煤岩试样单元的力学性质(单元的弹性及强度性质)服从韦布尔分布 $w_c(m, \mu)$,其中 m 为形状参数,反映其材料力学性质的均质程度, m 越大,表明其性质越均匀; μ 反映材料平均性质的参数.模型中弹性模量和强度的分布参数 $E = 560$ MPa和 $\sigma_c = 32$ MPa,内摩擦角为30°,拉压强度比为1/15等.采用修正的莫尔-库仑判据作为单元破坏的准则,由此得到的模型材料可以模拟脆-塑性含瓦斯煤岩的材料性质^[5,6].

(2) 含瓦斯煤岩突出性质模拟分析 “空洞”的萌生与扩展.图4是含瓦斯煤岩在瓦斯压力作用下破坏过程的数值模拟结果.由此可见,随着瓦斯压力的不断增加,试样中逐渐出现微单元破坏,类似于变形试样应力增大区域出现了“空洞”,即微单元破坏——“空洞”的萌生,如图4(a)所示(图中灰度代表最大剪应力的大小).“空洞”的萌生与扩展是裂纹出现与扩展的前提条件,其规律和一般准则是:同一应力状态下的微弱单元首先破坏,处于高应力状态下的同类微单元首先破坏.试样中仅在某些低强度及剪应力较大的部位发生弥散的微破裂,产生较少的声发射数,此阶段对应突出前的稳定阶段; 裂纹出现与扩展.由于材料非均匀性的影响,微破裂在试样中的分布并非完全对称(模型的几何尺寸是对称的),而是在试样的某些部分发展较快,形成了明显的变形和微破裂局部化现象图(4(a)),并产生明显的声发射(图4(b)),此阶段对应突出前的前兆孕育阶段(极限突出阶段); 突出形成.随着瓦斯压力的继续增加,微裂纹扩展明显加剧,形成一个源自含瓦斯包体的主裂纹,最后迅速导致以瓦斯压力包裹煤岩试样的“突出”破坏.



图3 含瓦斯煤岩破裂性质数值模拟分析模型

Fig. 3 Numerical simulated model of coal (rock) containing gas

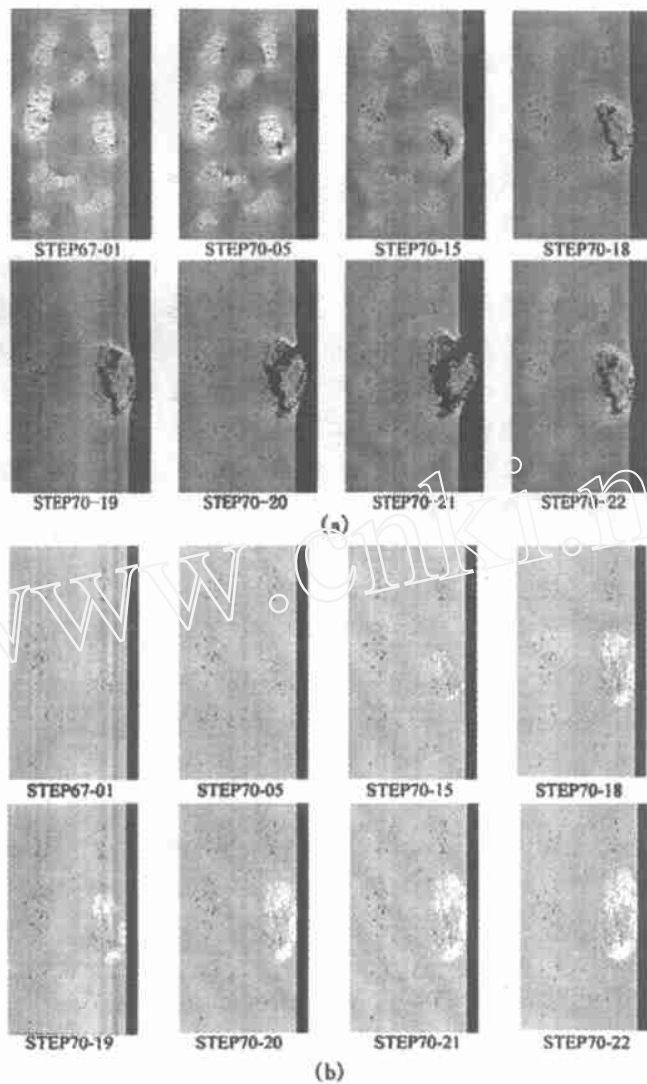


图 4 含瓦斯煤岩试样破裂过程中的应力、声发射变化规律

Fig. 4 Variable laws of stress and AE during the failure process of coal (rock) containing gas

(a) 含瓦斯煤岩试样破裂过程中的应力变化规律; (b) 含瓦斯煤岩试样破裂过程中的声发射变化规律

4 结 语

数值模拟再现了含瓦斯煤岩“试样”突出的发生、发展过程及其应力场演化和声发射规律。FRPA^{2D}系统计算实例表明,复杂的瓦斯煤岩断裂、突出现象可能是一些简单机理的演化结果^[15]。本文的数值模拟实例给人们一种新的启示,即对于含瓦斯煤岩类性质极其复杂的非均匀材料而言,是抛开它的复杂性在极度简化模型的基础上追求一种数学上高度精确的描述(或统计唯象学的研究),还是寻求一种数学上相对简单,但却能充分考虑含瓦斯煤岩性质复杂性的分析计算方法,是采矿工程研究中值得深思的问题。煤岩瓦斯突出问题极其复杂,本文只是涉及到在瓦斯压力作用下开采诱发的煤岩破坏过程和突出问题,没有涉及瓦斯压力在煤岩破裂过程中的变化规律,尤其是吸附瓦斯的解吸过程对突出机制的影响,有待通过与国内同行的广泛交流来推动这一研究的发展。

参考文献:

[1] 谢和平. 煤炭科学技术发展的展望 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (增刊): 10~17.

- [2] 张先尘. 采矿学科发展趋势的探讨 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (增刊): 25~29.
- [3] 俞启香. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [4] 何学秋, 王恩元. 矿井瓦斯灾害研究新发展. 煤炭学报, 1997, 22 (增刊): 274~280.
- [5] Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34 (2): 249~262.
- [6] Tang C A, Kaiser P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure - Part I: Fundamentals [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 35 (2): 113~121.
- [7] 崔维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟 [J]. 复合材料学报, 1996, 13 (4): 102~111.
- [8] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining [M]. London: Chapman & Hall, 1993. 106~108.
- [9] Reyse O, Einstein H H. Fracture mechanics of fracture rock—A fracture coalescence model [A]. Wittke W. 7th Int Congress on Rock Mech [C]. Deutschland: Aachen, 1991. 333~340.
- [10] Shen B, Stephansson O, Einstein H H, et al. Coalescence of fractures under shear stresses in experiments [J]. J Geophys Res, 1995, 100 (B4): 5 975~5 990.
- [11] Horii H, Nemat - Nasser S. Compression - induced microcrack growth in brittle solid: Axial splitting and shear failure [J]. J Geophys Res, 1985, 90: 3 105~3 125.
- [12] 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [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] 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.
- [15] 王省身, 俞启香. 矿井灾害防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1986.

作者简介:

唐春安 (1958 -), 男, 湖南黔阳人, 教授, 博士生导师. 主要从事岩石破裂过程失稳的基础理论研究, 包括地下工程稳定性、地表沉降、岩爆、地震等地质灾害的预测与防治理论以及脆性材料破坏机制的研究. 先后主持“用突变理论研究岩石破裂过程的失稳”、“岩石失稳破裂与地震机制”等国家自然科学基金和国家、部委级研究课题 10 余项, 并与英国、加拿大、瑞典等专家开展了多项国际合作. 发表各类学术论文 100 余篇.

Numerical simulation to outburst mechanism of coal or rock containing gas with FRPA^{2D} system

TANG Chun-an^{1,2}, RUI Yong-qin^{1,3}, LIU Hong-yuan¹, LIU Jian-xin¹

(1. CRISR, School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006, China; 2. LNM, Mechanics Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 3. Road and Bridge Engineering, Changsha Communications University, Changsha 410076, China)

Abstract: With a newly developed numerical simulation system, Rock Failure Process Analysis (FRPA^{2D}), some numerical simulations of coal or rock failure have been done to demonstrate the possibility of using numerical method to explain the outburst mechanism and predict the outburst phenomena. It is shown that the FRPA method is very promising to be used as a tool to study the outburst mechanism of coal or rock containing gas. Numerical simulation reproduces whole process of outburst of coal (rock) containing gas. The simulated result shows complicated fracture and outburst phenomena of coal (rock) containing gas may be the last results of some simple mechanism.

Key words: gas; coal or rock outburst; heterogeneity; fracture and failure; numerical simulation