

国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目:

预防煤矿瓦斯动力灾害的基础研究(编号 2005CB221500)

国家自然科学基金重点项目:

煤与瓦斯突出机理及探测预防基础研究(编号 50534080)

资
助

煤与瓦斯突出的 耦合灾变机理研究

赵志刚 谭云亮 著

煤炭工业出版社

国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目: 预防煤矿瓦斯

动力灾害的基础研究 (编号 2005CB221500)

国家自然科学基金重点项目: 煤与瓦斯突出机理及探测预防

基础研究 (编号 50534080)

资助

煤与瓦斯突出的耦合灾变 机 理 研 究

赵志刚 谭云亮 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤与瓦斯突出的耦合灾变机理研究 / 赵志刚, 谭云亮著.
—北京: 煤炭工业出版社, 2009
ISBN 978-7-5020-3565-5

I. 煤… II. ①赵…②谭… III. ①煤突出-机理-研究
②瓦斯突出-机理-研究 IV. TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 125482 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 880mm × 1230mm^{1/32} 印张 4^{1/4}
字数 104 千字 印数 1—1,500
2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷
社内编号 6375 定价 15.00 元

、 版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书利用 ANSYS/LS-DYNA 软件的隐式-显式分析功能对应力波作用下巷道围岩的响应进行了数值模拟,研究了应力波对煤与瓦斯突出的诱发作用;运用断裂力学、有限元方法和自组织理论研究了瓦斯压力和应力波作用下单裂纹的扩展、相邻裂纹的贯通和层裂体的形成机理;将煤与瓦斯突出的过程简化为层裂体在地应力和瓦斯压力的耦合作用下发生失稳的过程,对层裂体失稳的准静态过程进行了折迭突变分析,计算了煤与瓦斯突出时释放的能量和煤与瓦斯突出的强度,并给出了双曲扁壳层裂结构的动力学方程的统一形式。

本书可供从事煤与瓦斯突出研究的科技工作者、研究生和大学本科生参考。

前 言

我国发生的煤与瓦斯突出事故无论从数量上还是从规模上均居世界首位，是世界上煤与瓦斯突出最严重的国家。对此，国内外的专家学者和工程技术人员一直在瓦斯突出机理和瓦斯灾害防治方面进行着不懈的努力，取得了很多重要成果，但突出机理这一难题却一直未能从根本上得到解决。本书主要从非线性动力学角度，对煤与瓦斯突出的耦合突变机理进行探讨。

本书紧紧抓住岩体动力演化的非线性本质，对非线性动力学理论在含瓦斯煤岩破坏过程中的应用研究进行了有益的尝试。针对工作面煤壁，研究在石门揭煤、爆破落煤等突然卸载和动力扰动情况下煤岩的破坏过程。采用断裂力学和非线性动力学理论研究、实验室实验、数值模拟相结合的方法，研究在爆破应力波、地应力和瓦斯压力共同作用下层裂体的形成机理，层裂体在地应力和瓦斯压力作用下物理失稳的突变过程，层裂体的失稳判据和煤与瓦斯突出发生和发展的条件，层裂体在不同动力扰动和瓦斯压力作用下的演化过程，以及地应力和瓦斯压力对煤与瓦斯突出的控制作用，为制定合理有效的局部防突措施提供理论依据。

由于作者水平和学识有限，书中错误难免，恳请读者批评指正。

作 者

2009 年 5 月

目 次

1 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容	11
2 煤与瓦斯突出的影响因素	12
2.1 煤与瓦斯突出的影响因素分析	12
2.2 应力波对煤与瓦斯突出的诱发作用分析	15
2.3 小结	29
3 瓦斯作用下煤壁裂纹扩展机理	31
3.1 单裂纹扩展的研究	31
3.2 相邻裂纹的贯通机理	42
3.3 层裂体形成的自组织特征	55
3.4 小结	62
4 煤与瓦斯突出的耦合灾变机理及非线性研究	63
4.1 概述	63
4.2 煤与瓦斯突出的一维突变分析	65
4.3 地应力与瓦斯压力共同作用下煤与瓦斯 突出的突变分析	74
4.4 双曲扁壳层裂结构破坏演化的混沌特征	97
4.5 小结	119
参考文献	120

1 绪 论

1.1 研究意义

煤与瓦斯突出是指煤矿采掘过程中煤与瓦斯在一定条件下的突然喷出,即从煤层深部排出大量的煤和瓦斯,并伴有强烈的声响^[1]。这种喷出在较短时间内(数十秒至数分钟)会产生很大的冲击力,破坏工作面煤壁。我国发生的煤与瓦斯突出事故无论从数量上还是从规模上均居世界首位,是世界上煤与瓦斯突出最严重的国家,仅2002年至2003年全国煤矿就发生一次死亡3人以上重特大突出事故29起,死亡人数达213人,仅次于瓦斯爆炸(以上数字来自国家煤矿安全监察局的统计数字)。煤与瓦斯突出时释放的能量能够摧毁井下的巷道支护、通风设施及生产设备,造成巨大的经济损失;涌出的瓦斯气体使工人窒息甚至引发剧烈的瓦斯爆炸事故,严重威胁作业工人的生命安全,因此,煤与瓦斯突出是煤矿最为严重的自然灾害之一^[2]。近年来,随着开采深度的不断加大、开采条件的日趋复杂和生产机械化程度的提高,煤与瓦斯突出发生的强度及造成的人员伤亡呈增长趋势^[3]。因此,煤与瓦斯突出的预测与防治工作形势相当严峻。

在防治煤与瓦斯突出的研究中,人们一直在进行着不懈的努力,一方面,研究煤与瓦斯突出的机理^[3-5],掌握突出的发生发展规律,以便用理论指导实践;另一方面,研究煤矿现场适用的突出预测方法和突出防治技术^[6-8]。

但是,由于煤与瓦斯突出的机理和发生过程非常复杂,已有的研究尚不能很好地解释和预测这一灾害。目前,国内外关于矿震、冲击地压、煤爆、煤与瓦斯突出的认识大都依据经典的刚度

理论^[8]、能量及冲击倾向性理论^[9]和弹塑性失稳理论^[10]等,对于上述灾害的预测多采用经验类比分析、地音监测和钻屑法测量等手段^[11]。从根本上看,上述研究还停留在静态的或牛顿确定论的水平上。但大量现场监测表明,即使地质条件和开采条件相同,系统的演化结果却表现出很大差异。人们将这一现象归因于监测数据噪声的干扰,并提出了滤波^[12]、伪数据剔除^[13]等处理方法,但仍不能从根本上解决问题,因为,面对复杂的监测曲线,尚没有充足的理由来判定是否真正有外界噪声的干扰,即没有搞清楚造成这种不规则现象的内在机理。

非线性动力学理论的出现从根本上改变了人们的思维。20世纪后期,随着对非线性动力学理论的深入研究,不同的研究领域相继掀起了转变认识观的伟大变革。在岩体动力行为的研究中,一些学者敏锐地观察到其非线性特征,并进行了大量基础性研究^[14-17],取得了重大进展。他们的研究证实了岩体的动力行为是典型的非线性现象。煤与瓦斯突出也是一个非线性过程,从系统的观点来看,突出是含瓦斯煤岩系统在外界扰动下发生的动力失稳现象。突出从孕育、激发到发展的过程中,系统内部各要素之间及其与外部系统的相互作用具有明显的非线性特征,主要体现在:岩石的受力破坏具有高度非线性和不可逆性^[18];煤岩体内孔隙、裂隙结构具有分形几何特征;瓦斯在煤岩体内的渗流是非线性的;影响突出的各因素之间非线性耦合(包括地应力与媒体透气性及瓦斯压力与媒体强度的非线性关联);系统内部及系统本身与外部系统的非线性能量耗散等。因此,突出的发生是一个复杂的非线性动力系统在时空演化过程中的灾变行为。系统的复杂性与系统内部各部分之间相互的非线性作用密切相关,由非线性而导致的系统不稳定性和对初始条件的极度敏感是形成系统复杂性的最终根源。用传统的确定论观点研究煤与瓦斯突出即是用静止的眼光来分析运动的问题,这就可能造成误差甚至错误。

因此,突破牛顿的确定论,从非线性角度探讨煤与瓦斯突出的机理,寻求煤与瓦斯突出新的预测方法,是从本质上认识和解决煤与瓦斯突出问题的一条正确途径。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 关于煤与瓦斯突出

对煤与瓦斯突出的研究主要集中在两个方面,一是突出机理的研究;二是突出预测研究。

1. 突出机理

研究人员通过现场观察和实验室模拟积累了大量的突出记录,提出了煤与瓦斯突出机理的各种假说,归纳起来主要有以下几类。

1) 瓦斯作用说

瓦斯作用说认为煤体内储存的高压瓦斯是突出中起主要作用的因素,其代表观点有“瓦斯包说”、“粉煤带说”、“煤孔隙结构不均匀说”等。如“瓦斯包说”认为,在煤层中存在着瓦斯压力和瓦斯含量比邻近区域高得多的煤窝,也就是瓦斯包,其煤体松软,孔隙与裂隙发育,具有较大的储存瓦斯的能力,这些煤体被透气性差的煤(岩)体所包围。一旦巷道揭开这些瓦斯包,在瓦斯压力的作用下,松软的煤体将被瓦斯破碎并抛出从而形成突出^[19]。

2) 地应力作用说

地应力作用说认为突出主要是高地应力作用的结果,其代表观点有“岩石变形潜能说”、“应力集中说”、“应力叠加说”等。当巷道接近储存有高构造应变能的岩层时,这些岩层将像弹簧一样伸展开来,将煤体破碎,引起煤与瓦斯突出^[20]。

3) 综合作用说

综合作用说认为突出是地应力、瓦斯压力及煤的力学性质等因素综合作用的结果。由于综合作用说考虑了引起突出发生的作

用力和介质两个方面的主要因素，因此，被国内外大多数学者接受。其代表观点有“振动说”、“分层分离说”、“游离瓦斯说”、“能量假说”及“应力分布不均匀说”等^[21]。徐涛等^[22]用数值模拟的方法证实了上述观点，唐春安等^[23]研究了多因素的耦合效应。

前苏联佩图霍夫提出的“分层分离说”认为，突出是地应力和瓦斯压力共同作用的结果，并把突出过程分为3个阶段：第一个阶段是准备阶段，工作面附近的煤体在地应力作用下压缩，增加了瓦斯向巷道方向渗透的困难，使煤体内保持有较高的瓦斯压力，煤体强度降低，煤柱易于从煤体内分离；第二个阶段是颗粒分离波的传播阶段，在突出时，颗粒的分离过程是一层一层地进行的，当突出危险带急剧暴露时，由于瓦斯压力梯度作用使煤岩分层并受到拉力作用，拉应力大于煤岩的抗拉强度时，即发生分层、分离，分层、分离是突出的重要组成部分；第三个阶段是瓦斯和颗粒混合物的运动阶段，从煤体分离的煤颗粒和瓦斯急速冲向巷道，随着混合物的运动，瓦斯进一步膨胀，直到瓦斯热力学能和煤体变形潜能全部释放出来，突出才停止。

前苏联学者霍多特提出的“能量假说”认为，突出是煤体的变形潜能 W 与瓦斯热力学能 Q 突然释放所引起的工作面附近煤体的高速破碎。激发突出的第一个条件是

$$\begin{cases} \text{对于回采: } W + \theta > F + U \\ \text{对于掘进: } W > F + U \\ \text{对于石门揭煤: } W + Q > F + U \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 W ——煤体的变形潜能；

θ ——顶板岩石的动能；

Q ——煤体内游离瓦斯所含的热力学能；

F ——煤向巷道的移动功；

U ——煤体的破碎功。

激发突出的第二个条件是

$$v_p > v_s \quad (1-2)$$

式中 v_p ——煤的破碎速度；

v_s ——煤裂隙中的瓦斯压力下降速度。

激发突出的第三个条件是煤破碎完成之后，瓦斯压力 p 应大于已破碎煤的抛出阻力，即

$$p > \frac{m}{s} [g(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + a] \quad (1-3)$$

式中 s ——煤体破碎区段的横截面积；

f ——煤体移动时滑动面的摩擦因数；

α ——煤体沿某一表面移动时该面与水平面所成的倾角；

g ——重力加速度；

m ——煤的质量；

a ——为了把煤抛出必须给煤的加速度，煤移动方向向上时取“+”，向下时取“-”。

霍多特认为，只有当煤中的应力状态突然改变时，煤层才可能产生高速破碎，下述原因可以引起煤中应力状态突然改变：

(1) 煤中坚硬区段或坚硬包裹体的承载能力以脆性破碎的形式消失。

(2) 煤层受到围岩施加的动荷载。

(3) 爆破落煤时，巷道迅速进入煤层。

(4) 爆破揭开煤层。

20 世纪 80 年代，突出机理的研究有了新的发展。包尔申斯基等测得孔隙压力增长可使煤样拉伸变形增加^[24]。李火银等^[25]研究了瓦斯渗流的通道结构。郑哲敏^[26]对我国特大型突出实例所作的能量分析表明，突出煤层中瓦斯热力学能要比煤体的弹性潜能大 1~3 个数量级。氏平通过试验发现瓦斯压力梯度是导致煤体拉应变增高从而破坏的直接原因，采用有限元方法分析了突出暴露面附近的有效应力场，证明瓦斯压力梯度增大可引起有效拉应力增加^[5]。Paterson^[27]用有限元方法分析了瓦斯渗流所造成

的有效应力场,得到了与氏平同样的结论。丁晓良^[28]进行了煤在瓦斯作用下的破坏与持续扩展的研究,认为突出的发生是煤体的破坏与瓦斯渗流耦合的结果。俞善炳等^[29]首次建立了煤层暴露面外气固两相各以不同速度作一维运动,相间有质量运输的气相质量守恒与动量守恒方程。谈庆明等^[30]用破裂间断波模型讨论了含瓦斯煤在突然卸压条件下的开裂破坏,考虑煤样的抗拉强度和瓦斯初始压力的影响,计算了破裂波的传播和破裂段的长度。梁冰^[10]根据煤体变形破坏与瓦斯渗流的相互影响和相互作用机理,提出了煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论。蒋承林等^[5]提出了“球壳失稳”理论。何学秋^[31]提出了流变假说。郭德勇等^[32]提出了粘滑机理。曹运兴等^[33]从煤矿地质学的角度研究了逆向断层的瓦斯突出。李火银等^[34]研究了瓦斯突出时煤层剪切区的结构特征。李晓昭^[35]和 S D Butt^[36]研究了砂岩中的瓦斯突出现象。Klaus Noack^[37]研究了通过控制瓦斯渗流防止瓦斯突出的方法。

值得注意的是,黄弘读等^[38]用激波管试验模拟煤与瓦斯突出时发现,按瓦斯初压大小存在两种破坏模式:低压开裂和高压突出。在低压开裂模式中发现了层裂现象(图1-1):破坏区煤样分成数段,每段的厚度大致相等,段间裂缝的宽度在毫米量级。层裂区前方 s 离自由面的距离为层裂区的原始长度 l_s , l_s 随瓦斯初压 p_0 呈阶梯上升的规律(图1-2)。这说明层裂现象不是随机的,而是由破坏的内在规律控制的。

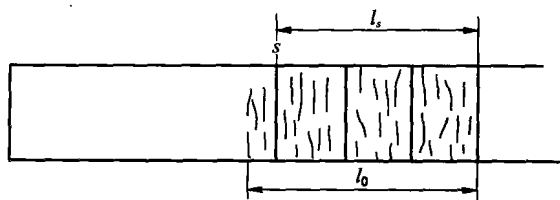


图1-1 层裂现象

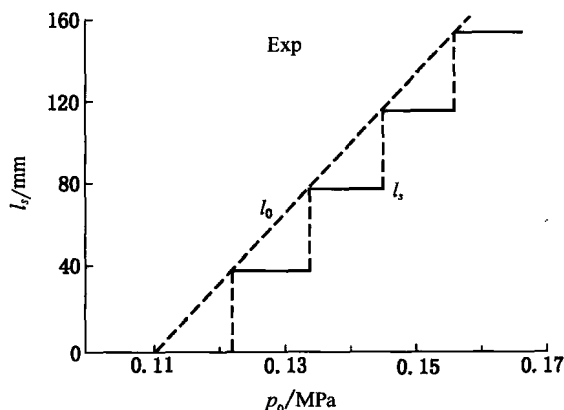


图 1-2 l_0 随瓦斯初压的变化规律

雷光宇等^[39]用有限元方法模拟了应力波作用下巷道的响应,发现围岩破坏是以层裂体的形式表现的。张晓春等^[40]的研究也得出了类似的结论。

2. 突出预测研究

煤与瓦斯突出预测的传统方法有单项指标法^[41,42]、综合指标法^[43]、地质指标法^[44]、地质统计法、瓦斯地质单元法^[45]、无线电波透视探测技术^[6,7,46]、地质动力区划法^[47,48]等。近年来,混沌预测方法得到了很大的发展^[49-53]。

1.2.2 非线性动力学在岩石力学领域的进展

岩体是一种复杂的地质材料,它经受长期的地质运动作用,在一定的地质环境中形成一定的结构,显现出多变的物理力学特性。与其他工程材料相比,岩体最大的特点是具有结构上的不连续性,是被多层面和节理所切割而形成的几何体。在力学性质上,由于漫长的地质作用使岩体呈现出明显的非均质、各向异性,这使得经典的弹塑性力学对其变形、破坏的力学行为难以作出符合实际的描述。但是,非线性科学的发展,给岩石力学的发展

展带来了契机。

1. 突变理论

在突变理论研究方面, H. Peter. Alesso^[54]用突变理论研究了核爆引发地震时系统的 Duffing 方程的解。Cubitt J. M 等^[55]分析了恒稳态机制的地质学含义。Henley S. J^[56]总结了地质学中常用的突变模型。Alberto Carpinteri^[57]用尖点模型解释了岩石的破裂过程。刘鼎文等^[58]用突变理论研究了地震发生的条件并进行了地震预测。G. P. Cherepanov 等^[59]将突变理论应用于断裂力学中并给出了脆断判据。秦四清等^[60]把煤柱视为应变软化介质并采用 Weibull 分布描述它的损伤本构模型, 研究了坚硬顶板和煤柱组成的力学系统的演化失稳过程, 发现系统失稳主要取决于系统的刚度比 k 与材料的均匀性或脆性指标 m , 并给出了失稳的力学判据和失稳突跳量的表达式。秦四清等^[61,62]还研究了应变软化介质材料组成的平面滑动型斜坡, 建立了斜坡系统的尖点突变模型, 结合应变软化介质的黏性, 建立了斜坡演化的非线性动力学模型和物理预报模型, 并给出了根据滑坡位移观测数据反演非线性动力学模型的方法和稳定性判别准则。勾攀峰等^[63]用突变理论建立了巷道围岩系统的尖点突变模型, 提出了一种确定深井巷道临界深度的方法。唐春安^[64]应用突变理论来描述岩石的破坏过程, 并提出了岩石破坏过程中的灾变模型。徐增和^[65]建立了坚硬顶板条件下煤柱岩爆的尖点突变模型。潘岳等^[66,67]率先利用折迭突变模型研究了煤柱和圆形硐室的失稳破坏。周辉等^[68]建立了薄隔水层井筒底板突水的突变模型, 并利用突变理论较准确地计算出井筒底板的最小隔水层安全厚度。李造鼎^[69]建立了岩石动态开挖的灰色尖点突变模型。J. A. Wang 等^[70]研究了狭窄含水岩层上方开采时的突变模型。Christina Magill 等^[71]研究了新西兰奥克兰火山的突变模型。Ellis L 等^[72]研究了近东地区发生洪水时的地震和土壤液化情况。T. Nagao 等^[73]研究了 1995 年神户地震中的电磁信号不规则联合现象。

2. 分形理论

在分形理论研究方面,谢和平等^[74,75]对岩石断口的不规则性进行了统计意义上的分形分析,建立了晶界和穿晶相结合的微观模型及裂纹分叉的分形模型,对岩石微孔隙受压后演化过程的分形特征进行了深入研究,创立了分形-岩石力学。谭云亮等^[76,77]率先对煤矿顶板运动过程中声发射分形特征进行了研究,并结合顶板离层遥测系统在煤矿坚硬顶板预报中的实践,分析了数字滤波、模糊数学、分形方法及小波识别方法对岩层灾变前兆信息处理的优缺点,认为小波技术可有效地对岩层突变所蕴涵的异常前兆信息点进行多尺度辨析,可做到对顶板冒落灾变前兆信息的有效把握。彭涛等^[78]运用煤矿软岩的混沌力学特性提出了软岩工程的非线性大变形设计方法,并给出了软岩工程产生混沌的原因。Andreas C. W.^[79]模拟了沙丘的形成过程。

3. 其他理论

另外,在岩体协同演化研究方面,于广明^[80]和刘宁^[81]率先开展了岩土体、地基和结构的协同作用研究及施工对环境的影响研究。张后全等^[82]运用数值模拟方法探讨了岩石破裂过程中的自组织临界特征,认为岩石破裂过程中的自组织行为是一个动态的力学过程,在临界状态点前后都能发生。于广明等^[83]利用协同学的基本原理,对混凝土破裂过程中的声发射现象进行了探索性研究,并通过混凝土破裂过程中内部结构的变化(损伤演化)和声发射特征的对应关系,从更深层次上理解混凝土的破裂机理。余学文等^[84]将混凝土受载破坏看成是混凝土材料本身各组成部分在外界作用下的自组织行为,论证了混凝土损伤演化的自组织特征,考虑热力学参量在混凝土损伤演化中的作用,并结合力学参量构造系统的动力学方程,从协同学观点出发,将混凝土材料的破坏过程视为非平衡相变现象,通过线性稳定性分析,寻求混凝土材料的弹性极限方法,给岩石力学特性的研究以很好的启示。汤士杰等^[85]用重正化群方法研究岩石内部微元累进破坏

过程,发现存在一个可用微元临界破坏概率来表征的自组织临界状态,在该临界状态以前,微元的破裂是随机、独立和短程相关的,岩石蠕变为稳定蠕变;在该临界状态以后,微元的破裂便是相互协同和长程相关的,并且原来随机、无序分布的破裂微元会逐渐向某一吸引域集中而形成宏观贯通的破裂面,岩石蠕变为不稳定蠕变。冯夏庭等^[86]用弹塑性细胞机模拟了岩石在单轴受压下的非线性破裂过程。John B. Rundle 等^[87]用数值模拟的方法研究了地震发生时应力的转移情况,并进行了地震预测。Natalia Smirnova 等^[88]研究了强震前超低频率电磁场的分形特征。V. I. Keilis - Borok^[89]研究了断层地震失稳前的前兆信息。谭凯旋等^[90]研究了岩石的断裂作用强度和断裂渗透率演化的关系,发现断裂与岩石、流体间的耦合产生正反馈和自组织作用,使得断裂渗透率的空间非均匀性增强并产生聚流作用。

总的来看,非线性动力学在岩石力学中的应用研究主要集中在突变理论和分形理论方面,对工程的实际应用尚有一定的差距,而运用混沌理论和自组织理论对岩体动力行为的研究才刚起步,且大都停留在定性分析的水平上,还很不系统,在煤与瓦斯突出方面的研究更不多见。从根本上看,岩体动力行为的混沌特征是控制其发展方向的主导因素,是决定系统突变和协同演化等特性的本质因素;而对岩体系统演化的准确预测又是工程实践的主要目标之一,因此,岩体系统演化过程的混沌性规律和非线性预测方法是目前亟待研究的问题。

综上所述,传统理论不能解决对煤与瓦斯突出等岩体灾变的动力行为的认识和预测的难题,急需寻求一种新的理论和方法,而非线性科学在大气、地球物理和岩石力学等领域的研究成果显示了其广阔的应用前景,可以为煤与瓦斯突出的研究提供正确的思路和方法。因此,开展煤与瓦斯突出过程的混沌性特征研究和非线性预测理论研究不仅是十分必要的,而且也是很有希望的。

1.3 研究内容

煤与瓦斯突出是一种复杂的自然现象,而掌握突出的机理和正确的预测方法是采取合理的防治措施的前提,本书的研究内容如下:

(1) 煤与瓦斯突出的诱发作用分析。霍多特认为,只有当煤中的应力状态突然改变时,煤与瓦斯突出才有可能发生,可以将引起煤中应力状态突然改变的原因统一表示为煤岩受到应力波的作用。本书对掘进工作面模型进行有限元分析,先利用 ANSYS/LS-DYNA 软件的隐式分析功能对工作面受到上覆岩层的作用进行分析,把分析结果作为模型下一步计算的初始条件,然后利用其显式分析功能分析应力波作用下工作面的响应,得到巷道围岩的位移、应力随应力波强度和时间的变化规律。

(2) 层裂体的形成机理研究。煤与瓦斯的突出是一个复杂的过程,其中掘进工作面层裂体的形成是一个必经的环节,层裂体的形成与工作面周围的应力状态、煤岩力学特性、瓦斯压力等因素有关。

(3) 层裂体的失稳机理研究。层裂体在瓦斯压力和地应力的作用下失稳而发生瓦斯突出,突出的过程是一个突变过程,通过建立层裂体的力学模型,并利用突变理论来研究瓦斯压力和地应力耦合作用下层裂体的失稳机理。

(4) 建立层裂体演化的非线性动力学模型,对突出过程中层裂体的演化过程进行了研究。