

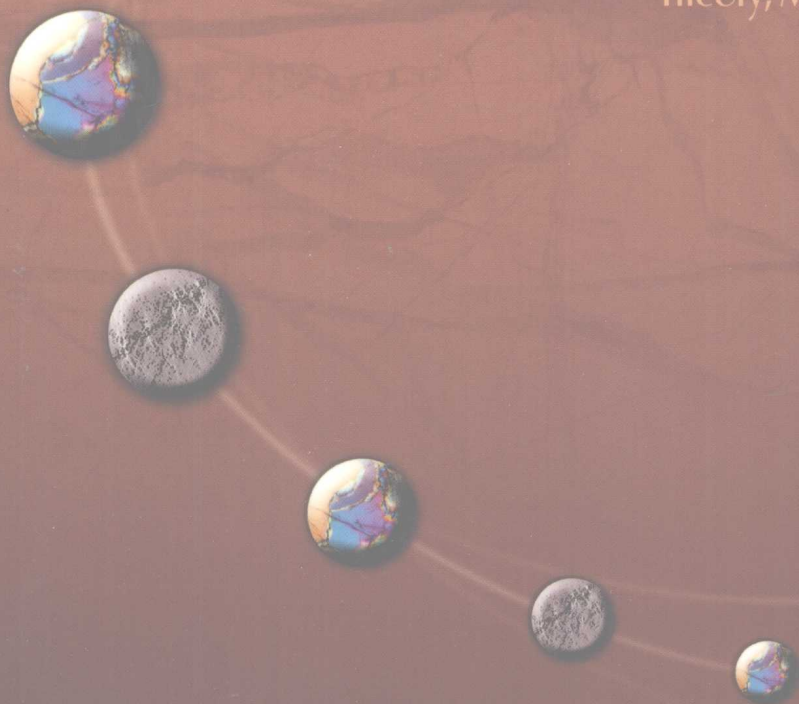
徐 涛 唐春安 杨天鸿 著



含瓦斯煤岩 破裂过程与突出机理

—— 理论、模型 与 数值试验 ——

Gassy Coal-Rock Failure Process and Outburst Mechanism
—— Theory, Model and Numerical Tests



煤炭工业出版社

国家自然科学基金青年基金项目 (50504003)

国家自然科学基金重点项目 (40638040)

中国科学院岩土力学重点实验室资助课题 (Z110603)

大连市人民政府资助出版

Gassy Coal - Rock Failure Process and Outburst Mechanism

——Theory, Model and Numerical Tests

含瓦斯煤岩破裂过程与突出机理

——理论、模型与数值试验

徐 涛 唐春安 杨天鸿 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

含瓦斯煤岩破裂过程与突出机理: 理论、模型与数值试验/徐涛, 唐春安, 杨天鸿著. —北京: 煤炭工业出版社, 2009. 3

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3443 - 6

I. 含… II. ①徐…②唐…③杨… III. 瓦斯煤层 - 煤岩 - 岩石破裂 - 数值模拟 IV. P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 188187 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 787mm × 960mm^{1/16} 印张 13^{1/4}

字数 240 千字 印数 1—1,500

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

社内编号 6248 定价 26.00 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

本书介绍了含瓦斯煤岩破裂过程气固耦合作用的基本理论及作用机理，建立了含瓦斯煤岩破裂过程气固耦合作用的数值模型，对含瓦斯煤岩的基本力学性质、渗流性质及含瓦斯煤岩介质从变形、破裂直至突出全过程进行了模拟，为含瓦斯煤岩突出机理及瓦斯抽放预防突出的力学机制研究提供了一种新的研究方法。

本书主要供地质、采矿、岩土工程及其他工程领域从事煤岩材料破坏研究的科研及教学人员使用。同时，本书采用的 RFPA^{2D}-Flow 系统，也可作为高校和科研单位进行岩石力学、煤层瓦斯渗流力学等力学性质及煤岩损伤破裂过程的研究中使用。

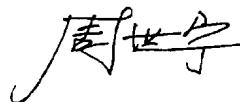
序

煤岩是大自然的产物，物理力学性质复杂。由含瓦斯煤岩破坏而导致的煤与瓦斯突出，是煤炭开采过程中一种复杂的工程诱发灾害，是保证煤矿安全正常生产和矿业发展亟待解决的重大问题。含瓦斯煤岩渗流与应力、损伤耦合问题是涉及岩石力学、渗流力学等诸多学科的交叉学科，通常研究渗流与应力耦合问题只着重于应力应变“状态”分析，而对应力诱发煤岩体损伤破裂过程中渗流与应力耦合机制缺少深入研究，用通常的方法难以研究煤岩介质在破裂过程中孔隙与裂隙相互作用及其贯通、扩展等符合工程实际情况的复杂机制。

通读了《含瓦斯煤岩破裂过程与突出机理》书稿之后，我对书中的许多观点和方法颇感兴趣。该书作者深入系统地研讨了含瓦斯煤岩破裂过程中渗流-损伤耦合力学机制，建立了一种描述煤岩介质渗流、应力、损伤耦合作用的力学模型，提出了煤岩破裂“过程”中渗流与应力耦合分析方法，具有创新性。作者用自己提出的理论模型和数值方法进行了含瓦斯煤岩应力应变渗透率全过程及其渗流引起的含瓦斯煤岩破裂突出、瓦斯抽放等方面的模拟研究，取得了许多卓有成效的研究成果。在复杂的岩石破裂渗流与损伤耦合机制的成因、特征及应用方面，都有一定的学术深度，为流固耦合作用下含瓦斯煤岩破坏机制这一复杂问题的研究提供了新途径。与国内外同类书籍相比，该书在渗流-应力-损伤耦合作用的力学模型、破坏过程中的应力场和渗流场分析、应用领域、实验结果对比以及模拟结果的可视化和模拟系统的可操作性等方面，均具有独到之处，体现了作者的创新精神和新的研究成果。我为本书作者充满活力的构思与创新精神所鼓舞，相信该书的出版可以弥补国内这方面研究的不足、对促进该研究领域的发展都具有重要意义。

该书内容丰富，是作者在自己创新架构的基础上，参阅了国内外大量文献撰写而成，是煤矿等相关行业科研、设计及现场工程技术人员值得参考的

好书之一。对此，我感到由衷的高兴，相信本书的付梓，会引起同行们的广泛兴趣，并推动岩石力学和渗流力学领域的学术进步。我期待着本书的早日问世，并乐意为之作序。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '周世宗' (Zhou Shizong). The signature is fluid and stylized, with the characters connected together.

2008 年 12 月 20 日

前 言

含瓦斯煤岩的变形破坏过程，是一个极其复杂和极富挑战的研究课题，是力学、材料和工程等学科的研究热点和难点之一。由含瓦斯煤岩破坏而导致的煤与瓦斯突出，是煤炭开采过程中一种复杂的工程诱发灾害，是保证煤矿安全生产和矿业发展亟待解决的重大问题。因此，作为含瓦斯煤岩突出机理研究的理论基础，研究含瓦斯煤岩破裂过程中瓦斯气体与煤岩固体的耦合作用机理，对于人们进一步深入认识含瓦斯煤岩的突出机理、煤层瓦斯抽放机理并进而采取相应的防治措施等具有重要的理论意义和工程实用价值。实验室试验和现场测试作为最直接的研究手段，为促进含瓦斯煤岩破坏过程的研究发展起了决定性作用。但由于受人力、物力、财力和安全等因素的制约，含瓦斯煤岩的破坏试验和现场测试工作往往受到限制。理论解析通过对材料进行简化，运用数学和力学等研究方法，对其破坏过程的应力与应变关系及诱发的声发射等进行解析，为研究含瓦斯煤岩的破坏过程提供了重要途径。然而，限于目前数学、力学等的发展水平，解析方法还难以解析煤岩材料内部微破裂之间以及煤岩破裂过程中瓦斯气体与煤岩固体的耦合作用问题，因此数值方法为研究含瓦斯煤岩的破坏过程提供了重要手段。基于煤岩材料的细观结构特征和细观基元的本构关系，将统计随机分布理论和计算力学相结合，对含瓦斯煤岩破坏的全过程进行分析；细观损伤力学由于对材料的“损伤”赋予了真实的几何形象和具有力学意义的损伤演化方程，为研究煤岩材料的破坏过程提供了力学理论基础；而煤层瓦斯渗流力学理论的迅猛发展又可实现对煤岩变形破裂过程中煤层瓦斯流动的仿真模拟。此外，计算机硬件及计算力学的飞速发展，为从细观结构层次上研究含瓦斯煤岩固体材料的破坏过程提供了强有力的数值计算工具。

为此，本书首先从煤岩材料的细观结构和渗流特征出发，采用 Weibull

随机统计分布理论, 引入材料的非均匀性, 提出了细观基元的弹性损伤本构关系, 同时, 考虑煤岩损伤演化过程中透气性的变化, 引入煤岩透气系数-应力作用方程, 在此基础上, 考虑煤岩损伤过程的时间因素影响, 引入细观基元蠕变损伤本构方程, 建立了考虑流变效应的煤岩破裂过程固气耦合作用 $\text{RFPA}^{2\text{D}}\text{-Flow}$ 数值模型, 给出了耦合模型的有限元数值解法, 并分别从煤岩破裂过程和瓦斯流动过程两个方面对模型进行了模拟验证。其次, 应用岩石破裂固气耦合 $\text{RFPA}^{2\text{D}}\text{-Flow}$ 数值系统对含瓦斯煤岩的基本力学性质 (包括变形性质、强度性质、非均匀性特点、流变性质和渗流性质等) 进行了数值试验研究, 分析了含瓦斯煤岩试件破裂过程中的围压效应、孔隙压力效应、卸荷效应、含瓦斯煤岩试样在常应力水平作用下的蠕变损伤破坏和含瓦斯煤岩试件在应力作用下的透气性变化规律。此外, 对石门揭煤诱发的煤与瓦斯突出、煤层巷道掘进诱发的上山突出以及石门爆破掘进过程中发生的延期突出从裂纹诱发、扩展、贯通到突出全过程进行了系统的模拟研究, 分析了地应力、瓦斯压力以及煤岩力学性质等综合作用下诱发煤岩突出破裂过程中应力场、变形场、渗流场以及微震场的演化过程, 并对抽放作用下煤层瓦斯的流动过程以及通过瓦斯抽放防治瓦斯突出的机理进行了基础性模拟研究。最后, 应用 $\text{RFPA}^{2\text{D}}\text{-Flow}$ 固气耦合数值模拟系统, 结合矿井地质条件, 对远程卸压瓦斯抽放和水力松动瓦斯抽放防治煤与瓦斯突出进行了数值模拟研究。

本书的特点是抓住了渗流、应力与损伤耦合作用下岩石破裂过程的本质, 即非均匀介质细观损伤引起透气性演化及其力学响应诱发宏观破裂的非线性过程, 建立了渗流-应力-损伤耦合模型, 并开发出相应的软件系统, 对采动影响下含瓦斯煤岩体中裂纹的萌生、扩展和贯通过程中透气性演化规律及其渗流-应力耦合机制进行模拟分析, 得到了渗流-应力-损伤耦合作用机制及其参数物理意义的规律性认识, 从细观力学的层次上解释了宏观含瓦斯煤岩渗流-应力-损伤耦合作用下的破坏、失稳及突出行为。

本书是第一作者徐涛博士目前主持进行的国家自然科学基金青年基金项目“基于并行计算技术的含瓦斯煤岩突出大规模数值试验研究 (编号: 50504003)”、辽宁省教育厅高等学校科学研究项目青年基金计划“采动诱

发煤与瓦斯突出孕育过程微震前兆规律研究(编号:05L031)”、中国科学院岩土力学重点实验室资助课题“煤岩突出灾害孕育过程中多物理场耦合作用机理研究(编号:Z110603)”及第二作者唐春安教授主持的国家自然科学基金重点项目“采动煤岩地质环境劣化诱发矿山动力灾害机理研究(编号:40638040)”、国家自然科学基金重点项目“煤矿瓦斯灾害预防及煤层气开采中的应用基础研究(50134040)”子课题的主要研究成果,其中研究中心成员朱万成教授、王述红副教授、梁正召副教授、左宇军副教授、李连崇博士、张永彬博士、马天辉博士以及唐世斌博士等都做出了较大的贡献,在此作者向他们表示衷心的感谢。

在本书的完成过程中,得到了中国矿业大学周世宁院士、俞启香教授、林柏泉教授,西澳大利亚大学刘继山博士,山东科技大学宋振骐院士,东北大学徐小荷教授,河南理工大学尤明庆教授、李化敏教授、张子敏教授、周英教授,辽宁工程技术大学梁冰教授、王来贵教授等的悉心指导和无私帮助,此外,在瑞士联邦理工学院访问期间得到该岩石力学中心主任赵坚教授的指导,在此向他们表示诚挚的感谢。在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢。在本书出版过程中得到了大连大学校长助理宋力教授、科技处陈辉远老师,国家安全生产监督管理局研究中心颜爱华高级工程师的大力协助,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在错误与疏漏之处,敬请各位专家和读者批评指正。

著 者

2008年11月

FOREWORD

The complex deformation and failure process of gassy coal and rock has challenged many researchers from engineering mechanics and materials science to devote themselves to it. Coal and gas outbursts followed by the failure and fracture of gassy coal and rock have been the major disasters in the world mining industry and it has occurred in virtually all the major coal producing countries of the world. The disastrous mine outburst has resulted in great loss of life in many countries and even today it is not well understood. Thus, as a theoretical foundation of the mechanisms of coal and gas outbursts, this has forced mining leaders and researchers to develop an understanding of the coupling mechanisms between gas flow and coal or rock deformation during coal or rock failure process, and the mechanisms of coal and gas outbursts and gas drainage, and furthermore, to adopt some safety procedures to minimize the effect of outbursts or eliminate them completely. Therefore, it is of great importance and significance to investigate the deformation and failure process of gaseous coal and rock under a variety of conditions. Laboratorial tests and in – situ observations have been an effective and direct ways of studying the failure process of gaseous coal and rock, and these ways play a crucial role in the study of material failure process. Nevertheless, the applications of these methods in the study of gaseous coal and rock are limited because of safety. Analytical method such as mathematics and engineering mechanics is also important in investigating the stress – strain relation and the induced acoustic emission by some simplifications to materials. However, the mathematical and mechanical methods are seemed to be weak in dealing with the complex interactions among micro – cracks and the coupling interaction between gas flow and coal or rock deformation. As a

result, numerical method, a most widely used and effective method, can serve as a tool to study the failure process of gassy coal and rock. Based on the microscopic structures and constitutive relation of coal and rock on a meso - level, the whole failure process of coal and rock can be solved combined with computational mechanics and statistics. The combinations of damage mechanics and coal methane seepage mechanics make it possible to numerically simulate the gas flow in the failure process of coal and rock. In addition, the quick development of computer hardware and computational mechanics make it a powerful tool to investigate the failure process of gassy coal and rock on a meso - level.

Therefore, in the book, firstly, the elastic damage constitutive law for element on a meso - level was proposed considering the heterogeneity of coal and rock, meanwhile, considering the relationship equation between damage induced gas permeability and stress and the time - dependent equation of creep damage evolution, the solid - gas coupling model (RFPA^{2D} - Flow) for gaseous coal and rock was established, and the numerical FEM implementation for the model was also given. Furthermore, the coupled model was also validated from two aspects of the failure process of coal and rock and gas flow in the coal and rock. Secondly, numerical tests on basic mechanical characteristics of gaseous coal and rock, such as deformation and strength, heterogeneity, rheology and seepage, were conducted using the RFPA^{2D} - Flow code, the effects of confining pressure, pore pressure, unloading were respectively analyzed, moreover, the creep failure of gaseous coal and rock under a constant long - term stress and the gas permeability evolution of gaseous coal and rock under different stress were also numerically investigated. Thirdly, the instantaneous outbursts induced by cross - cut driving and rise driving and the delay outbursts induced by cross - cut driving were numerically performed, respectively. Numerical results reproduced the whole process of micro - cracking, propagation, coalescence and ejection of coal or rock. In addition, the associated stress fields, displacement vectors, gas pressure and microseismicities during the outbursts were clearly visualized. The gas flow process during gas drainage and the

mechanism of gas drainage to prevent the outbursts were studied. In the end, combined with the geological settings, numerical tests on gas drainage by relief pressure from a long – distance and gas drainage by hydraulic fracturing were conducted to prevent the occurrence of coal and gas outbursts. It is shown that numerical results well with the observations in the field.

The features of this book including: the understanding of the failure essence of rock under the coupled flow, stress and damage is the macroscopic nonlinear process of damage induced permeability evolution and in turn induced cracking, the establishment of the coupled flow, stress and damage model and the development of the RFPA – flow code. The RFPA – flow code can simulate the permeability evolution and flow – stress interaction during the initiation, propagation and coalescence of cracks in gaseous coal or rock under mining conditions, gain an insight into the coupling mechanism of flow, stress and damage and the physical interpretation of seepage parameters, and help to understand the instable failure and outburst of gaseous coal and rock under the flow, stress and damage coupling interaction.

The study in the book are jointly sponsored by the National Natural Science Foundation of China (Project NO. 50504003, 40638040 and 50134040), the Youth Project of the Educational Department of Liaoning Province (Project NO. 05L031) and Open Research Fund of the Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences (Project NO. Z110603). Cordial thanks to our research team of collaborators including Prof. Zhu Wancheng, Associate Prof. Wang Shuhong, Zuo Yujun, Liang Zhengzhao, Dr. Li Lianchong, Dr. Zhang Yongbin, Dr. Ma Tianhui and Tang Shibin some postgraduate students from Center for Rock Instability & Seismicity Research and Center for Material Failure Modeling Research.

The edition of the book owes special debts to many people. We wish to acknowledge the valuable advice and kind help of the following researchers: Prof. Zhou Shining, Prof. Yu Qixiang, Prof. Lin Baiquan from China University of

Mining and Technology; Dr. Liu J from the University of West Australia; Prof. Song Zhenqi from Shandong University of Science and Technology; Prof. Xu Xiaohe from Northeastern University; Prof. You Mingqing, Prof. Li Huamin, Prof. Zhang Zimin, Prof. Zhou Ying from Henan Polytechnical University; Prof. Liang Bin, Prof. Wang Laigui from Liaoning Technical University, Prof. Zhao Jian from Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne during my academic visist in EPFL. Besides, cordial thanks to Prof. Song Li, Teacher Chen Huiyuan from University of Dalian. Senior Engineer Yan Aihua from Research Center of State Administration of Work Safety.

Finally, it should be said that, although every care has been taken to avoid errors, it would be oversanguine to hope that none had escaped detection; for any suggestions that readers may make concerning needed corrections the author will be grateful.

目 次

1 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究现状和特点	8
1.3 目前研究存在的问题	18
1.4 本书的主要内容	19
参考文献	20
2 岩石结构及渗流基本特性	25
2.1 岩石的空隙结构特征	25
2.2 岩石的渗流特性	35
2.3 岩石渗透率的测量	41
2.4 岩石破裂过程渗透性演化	45
2.5 小结	47
参考文献	48
3 多孔介质流体运移基本方程	52
3.1 多孔介质的基本性质	52
3.2 流体的基本性质	54
3.3 多孔介质中流体的运动方程	57
3.4 多孔介质中流体渗流的连续性方程	59
3.5 小结	62
参考文献	63
4 含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合模型	64
4.1 耦合数值模型的基本思路	65
4.2 岩石细观统计损伤本构方程	66

4.3	含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合方程·····	71
4.4	RFPA ^{2D} -Flow 固气耦合模型数值解法·····	77
4.5	RFPA ^{2D} -Flow 固气耦合数值模型验证·····	83
4.6	小结·····	91
	参考文献·····	92
5	煤岩细观结构对透气性的影响·····	97
5.1	孔隙瓦斯压力下煤岩透气性演化规律·····	97
5.2	非均匀性对透气性演化的影响·····	101
5.3	裂隙对煤岩透气性的影响·····	105
5.4	小结·····	109
	参考文献·····	109
6	含瓦斯煤岩破裂过程的力学及渗透特性·····	110
6.1	含瓦斯煤岩破裂过程围压效应·····	111
6.2	含瓦斯煤岩破裂过程孔隙压力效应·····	117
6.3	含瓦斯煤岩破裂过程围压效应的理论分析·····	121
6.4	含瓦斯煤岩破裂过程卸荷效应·····	127
6.5	煤岩的蠕变损伤破裂·····	132
6.6	含瓦斯煤岩破裂过程渗透性演化·····	138
6.7	小结·····	139
	参考文献·····	140
7	煤与瓦斯突出过程的数值模拟·····	144
7.1	石门突出·····	144
7.2	上山突出·····	150
7.3	延期突出·····	155
7.4	小结·····	162
	参考文献·····	163
8	煤层瓦斯抽放模拟·····	165
8.1	抽放作用下瓦斯渗流过程·····	165
8.2	抽放对瓦斯突出的影响·····	168

8.3 远程卸压瓦斯抽放	168
8.4 水力松动瓦斯抽放	182
8.5 小结	188
参考文献	189
9 结论及展望	190
9.1 结论	190
9.2 展望	191

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

煤炭是我国能源的主体,在国家《能源中长期发展规划纲要(2004—2020年)》中明确指出,我国将“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”。显然,煤炭工业是我国的基础产业,其能否健康、稳定、持续发展,关系到国家能源安全。在我国一次能源消费结构中,煤炭约占67%,预计2050年仍将占50%以上,因此,煤炭在相当长的一段时期内将一直是我国居支配地位的主要能源。然而,伴随煤炭开采的冲击地压、瓦斯、水灾和火灾等矿业灾害事故,不仅造成人民生命财产的巨大损失和环境灾害,而且还制约着煤炭工业生产的发展,乃至整个国民经济和社会的可持续发展。我国的矿业灾害事故是所有工伤事故中最为严重的,其造成的死亡人数仅次于公路交通,在各种人为显性事故灾害中居第二位。而瓦斯灾害事故在矿业灾害事故中最为突出(图1-1),是我国矿业发展中亟待解决的重大问题^[1]。

瓦斯是指埋藏在地下的煤在其变质过程中生成的烃类气体的总称,其中以甲烷

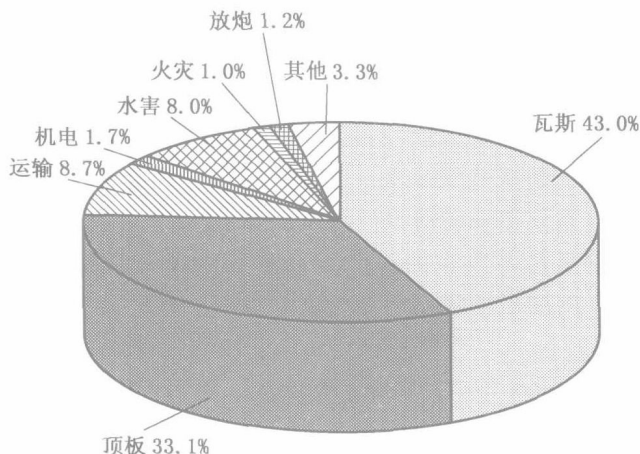


图 1-1 2001 年中国煤矿伤亡事故构成对比图