

国家重点基础研究发展计划973项目(2014CB047100)资助
国家自然科学基金科学仪器专项(51327007)资助
国家自然科学基金面上项目(51674189)资助
国家自然科学基金青年项目(51304154)资助
陕西省青年科技新星项目(2016KJXX-37)资助

Microseismic Monitoring and Its Analysis for Failure Process of Gas-saturated Coal

含瓦斯煤岩破裂过程 微震监测与分析

刘 超 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家重点基础研究发展计划 973 项目(2014CB047100)资助

国家自然科学基金科学仪器专项(51327007)资助

国家自然科学基金面上项目(51674189)资助

国家自然科学基金青年项目(51304154)资助

陕西省青年科技新星项目(2016KJXX-37)资助

含瓦斯煤岩破裂过程 微震监测与分析

刘 超 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书通过理论分析、数值模拟、数理统计理论、非线性分形理论以及现场工业性试验等手段,提出了煤与瓦斯突出致灾机理及危险性预警的新思路、新方法和新技术。揭示了采动煤岩瓦斯突出机理与灾变特征,分析了煤与瓦斯突出致灾过程的微震效应和微震监测原理,设计、改进并研发了煤矿井下微震监测系统,建立了煤与瓦斯突出危险性评价指标及预警模型,利用微震监测技术,对掘进巷道及含断层掘进巷道煤与瓦斯突出危险性进行了评价与预警,研究了覆岩采动裂隙演化特征及瓦斯富集区分布规律,分析了地面煤层气水力压裂钻孔间裂缝形成及扩展规律,并提出了矿井动力灾害应急救援微震监测方法。形成了矿井煤与瓦斯突出致灾机理、监测技术、危险性评价与预警方法、动力灾害应急救援方法的成套理论与技术体系。

本书补充和完善了煤与瓦斯突出灾害的致灾机理和监测技术领域研究,可对矿井煤与瓦斯突出的防治工作提供一定的参考和指导,以最大限度地减少瓦斯动力灾害的发生及产生的后果,保障煤炭企业的安全高效生产。本书可供从事安全科学与工程、采矿工程、岩土工程等领域研究和学习的科研工作者、研究生和本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

含瓦斯煤岩破裂过程微震监测与分析/刘超著. —

徐州:中国矿业大学出版社,2017.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3466 - 7

I. ①含… II. ①刘… III. ①瓦斯煤层—煤岩—岩石
破裂—地震监测 IV. ①TD823.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 049090 号

书 名 含瓦斯煤岩破裂过程微震监测与分析

著 者 刘 超

责任编辑 黄本斌

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 11 字数 275 千字

版次印次 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

煤与瓦斯突出是复杂的矿山动力灾害现象之一,目前是煤矿工程中的世界性难题。严重的瓦斯突出灾害不仅造成巨大的经济损失,而且还可能造成重大的人员伤亡。近年来煤矿动力灾害事故更是频频发生,特别是煤矿日渐转入深部开采后,煤岩高地应力、高瓦斯压力及高渗透性的现象愈加明显,以瓦斯突出等为主的煤矿动力灾害已成为我国工业安全领域的主要灾害,给煤矿的安全高效开采带来诸多的技术难题。本书采用理论分析、数值模拟、数理统计理论、非线性分形理论以及现场工业性试验等手段,系统地研究了矿井煤与瓦斯突出动力灾害的致灾机理和防控技术,取得了一些有意义的研究成果。

基于含瓦斯煤岩破裂过程气固耦合作用模型,采用 RFPA^{2D}-GasFlow 程序一方面分析并完善了应力场—损伤场—瓦斯渗流场的多场耦合时空演化规律;另一方面模拟再现了瓦斯突出过程背景应力场演化特征及其微破裂前兆活动信息的规律,指出微破裂前兆特征是预警采动煤岩瓦斯动力灾害的有效途径。

运用 RFPA^{2D} 软件模拟了载荷下煤岩样的初始裂纹出现及扩展过程,揭示了煤岩破坏过程的微震效应及其演化规律,进一步验证了煤岩破裂过程中存在的微震现象。研究表明,微震效应在研究煤岩体微裂纹、微缺陷的演化规律和力学机制以及局部变形特征方面有着独特的优势,借助于该特征可以实现对煤岩破坏过程的实时动态监测,从而为瓦斯突出动力灾害的预测预报提供了技术基础。

为了满足煤矿井下对微震监测系统的要求,研制开发、改进并重新设计了系统的部分软硬件设备与安装装置及其安装方法;采取人工爆破试验标定波速模型的方法,研究了监测区域煤岩波速的优化选取及其对震源定位精度的影响,并提出了传感器的布置原则;基于长短项平均值法(STA/LTA)信号检测滤除原理,建立了一套多参量识别与滤除噪声的综合分析方法,并对滤出后的信号在三维可视化图中进行了标定。

结合微震参数的特点,考虑到评价指标的时间效应,建立了突出危险性长短时评价指标;基于正态分布函数理论,建立了描述突出危险性的 2σ 预警模型,并采取人工爆破诱发煤与瓦斯突出的方法,验证了上述预警模型的可行性,确定了危险性预警临界值。

详细分析了掘进巷道的突出灾变机制,结合淮南矿区强突出危险 62113 工作面煤巷掘进的实例分析,揭示了突出过程与采动煤岩破裂规律之间的演化关系,深入研究了 2σ 预警模型评价掘进巷道突出危险性的过程,并采取数值模拟与突出危险性预测敏感性指标(钻屑量指标 S 和钻屑解吸指标 K_1)的方法对预警结果进行了校检,证明了 2σ 预警模型的准确性。

研究了断层滑移失稳力学机制及准则,推导了断层结构力学模型,阐述了断层带活动规律与突出之间的关系。结合淮南矿区强突出危险含断层 62110 工作面煤巷掘进的实例分析,揭示了掘进巷道断层“活化”过程的演化规律,深入分析了 2σ 预警模型评价含断层掘进

巷道突出危险性的过程,并采取二维地震勘探结果比对与现场实际断层揭露考察的方法对预警结果进行了校检,结果比较吻合。

结合覆岩破坏的基本理论,建立了采动覆岩的力学模型,揭示了覆岩内分别形成了拉应力及剪应力区,且拉应力区主要分布在冒落带破断线之内,剪应力区主要分布在竖向裂隙带内。采用数值模拟的方法对覆岩采动裂隙的初始萌发、扩展直至宏观裂纹贯通的过程及其声发射、能量的动态演化规律进行了详细的分析。并运用分形几何理论,定量地描述了覆岩破坏是一个降维有序、耗散结构的发展过程。在留巷钻孔法抽采卸压瓦斯机理的基础上,提出了覆岩裂隙区内存在着一个不规则闭合的“圆柱形横卧体”竖向裂隙场的观点,并依据该裂隙场的分布规律对顶板倾向低位钻孔进行了优化。

研究了地面煤层气水力压裂致裂原理,探寻了水力压裂裂缝起裂机制,主要可分为剪切机理和张拉机理,分析了影响裂缝形态的主要因素,可归结为地应力、煤岩组合关系、煤岩性质和压裂施工作业等方面,自主研发了煤矿地面煤层气水力压裂微震监测系统,对潞安矿区地面水力压裂裂缝扩展进行了实时监测试验,形成了煤矿地面水力压裂裂缝几何参数监测与评估方法,并优化了水力压裂工艺方案。

提出了基于微震监测的矿井动力灾害应急救援方法,建立了井下动力灾害救援微震监测系统,并进行了井下传感器敲击和喊话试验,对敲击和喊话位置进行了精确定位,为井下灾后救援的搜救工作提供了一条新途径。

在本书所涉及研究的过程中,得到了深部煤炭开采与环境保护国家重点实验室、煤矿瓦斯防治国家工程研究中心主任袁亮院士、副主任薛俊华、研发部部长余国锋以及新庄孜矿矿长柏发松、地质测量科科长党保全、副科长周胜健的大力支持与无私帮助,在此,对于淮南矿业集团及其新庄孜矿提供的良好广阔的科研平台,致以崇高的谢意!

我的恩师唐春安教授在百忙之中抽暇审阅了全书的手稿,在此对我的导师表示衷心的感谢和最诚挚的敬意。李树刚教授、林海飞副教授对本书的出版给予了诸多的关心、支持和帮助,作者向他们表示衷心的感谢。成连华、肖鹏、张超、李莉、严敏、赵鹏翔、丁洋、魏宗勇、成小雨、程成、崔娜、杨铭扬、赵亚婕等老师和研究生对书稿的资料进行了收集和整理,在此表示深深的感谢。中国矿业大学出版社对本书的出版付出了辛勤的劳动,在此表示感谢。

由于作者水平所限,书中错误之处在所难免,所提观点也有待进一步探讨,希望得到相关专家和同行的指正,作者将不胜感激。

作 者

2016年8月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景及意义	1
1.2	国内外研究现状	4
1.3	研究存在问题与发展趋势	18
1.4	主要研究内容与方法	19
2	采动煤岩瓦斯突出机理与灾变特征	22
2.1	煤与瓦斯突出的特点	22
2.2	煤与瓦斯突出的基本力学与能量原理	24
2.3	煤岩突出的应力场—损伤场—渗流场耦合效应	27
2.4	煤与瓦斯突出灾变过程的前兆规律	31
2.5	本章小结	36
3	煤与瓦斯突出致灾过程的微震效应及其监测原理	38
3.1	概述	38
3.2	煤岩产生微震的发生机制	38
3.3	声发射(微震)特性	42
3.4	微震监测原理及其技术要点	45
3.5	本章小结	46
4	煤矿井下微震监测系统开发、改进及其设计构建	48
4.1	概述	48
4.2	数据可视化及远程传输系统研制开发	49
4.3	微震仪器改进设计与实现	51
4.4	微震震源定位精度提高方法	54
4.5	噪声识别与滤除综合分析方法	63
4.6	微震监测系统网络构建	69
4.7	本章小结	72
5	煤与瓦斯突出危险性评价指标及预警模型研究	74
5.1	概述	74
5.2	突出危险性评价指标	74
5.3	突出危险性预警模型	75
5.4	预警模型检验与临界值确定	79

5.5 本章小结	81
6 掘进巷道煤与瓦斯突出危险性评价与预警	82
6.1 概述	82
6.2 掘进巷道突出危险性评价与预警	83
6.3 工程实例分析	83
6.4 本章小结	92
7 含断层掘进巷道煤与瓦斯突出危险性评价与预警	93
7.1 概述	93
7.2 含断层掘进巷道突出危险性评价与预警	93
7.3 工程实例分析	95
7.4 本章小结	101
8 采场覆岩采动裂隙演化特征及瓦斯富集区分布规律	102
8.1 概述	102
8.2 采场覆岩结构破坏规律	103
8.3 卸压开采采动裂隙演化规律	106
8.4 采空侧卸压瓦斯富集区分布规律	114
8.5 工程实例分析	116
8.6 本章小结	124
9 地面煤层气水力压裂钻孔间裂缝形成规律分析	126
9.1 概述	126
9.2 水力压裂致裂原理及特点	126
9.3 地面水力压裂微震系统设计	130
9.4 工程实例分析	135
9.5 本章小结	143
10 矿井动力灾害应急救援微震监测方法研究	145
10.1 概述	145
10.2 井下动力灾害救援方法	145
10.3 动力灾害救援微震监测技术	147
10.4 工程实例分析	149
10.5 本章小结	153
11 主要结论	154
参考文献	156

1 绪 论

全世界每年因矿难死亡的人数超过万余人,其中因煤矿动力灾害事故死亡的人数占矿山事故中最主要的部分,而煤与瓦斯突出事故又是煤矿动力灾害事故中最为严重、危害性极大的事故,已成为世界各采煤国家关注的焦点。尤其是我国,每年煤与瓦斯突出矿井数目、年总次数及平均强度等方面都处于世界前列,特别是随着国家经济发展对煤炭能源的需求增大,煤矿瓦斯防治工作面临的任务更为艰巨和复杂。从目前国内外煤与瓦斯突出研究现状及发展趋势来看,煤与瓦斯突出的理论及控制技术尚不成熟。因此,开展煤与瓦斯突出机理与预测防治方法的研究,有效预警并遏制煤与瓦斯突出灾害事故的发生,保障煤炭资源安全、高效、绿色开采及我国煤炭能源的可持续发展,已成为目前采矿工程及岩石力学等领域急需解决的关键科学技术问题。本章主要介绍研究背景与研究意义,国内外相关领域的研究现状,目前研究存在的问题和发展趋势,并阐述了本项研究的主要内容及方法。

1.1 研究背景及意义

能源是人类活动的物质基础。近年来,能源的发展,能源和环境,是全世界、全人类共同关心的问题。从整个人类文明发展的进程来看,文明的积累和提升,人类社会的可持续发展,无不以能源利用为基础^[1]。据 IEA 发布的《世界能源展望 2008》预测,从 2006 年至 2030 年世界一次能源需求从 117.3 亿 t 油当量增长到了 170.1 多亿吨油当量,增长了 45%。作为世界上最大的发展中国家,中国是一个能源生产和消费大国。能源生产量仅次于美国和俄罗斯,居世界第三位;基本能源消费占世界总消费量的 1/10,仅次于美国,居世界第二位^[2]。近年来能源安全问题也日益成为国家生活乃至全社会关注的焦点,日益成为我国战略安全的隐患和制约经济社会可持续发展的瓶颈。

我国是一个多煤少油的国家,已探明的煤炭储量占世界煤炭储量的 33.8%,可采量位居第二,产量位居世界第一位^[3]。煤炭在我国一次性能源结构中处于绝对主要位置,《中国可持续能源发展战略》研究报告认为,到 2050 年,煤炭所占比例不会低于 50%。可以预见,煤炭工业在国民经济中的基础地位,将是长期的和稳固的,具有不可替代性^[4]。在国家《能源中长期发展规划纲要(2004~2020 年)》中已经确定,中国将“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”。近来,有关研究制订新能源发展规划的种种说法,频频见诸媒体,未来 10 年国家将在新能源领域投入 3 万亿元巨资、新目标将几倍于现有《可再生能源中长期发展规划》,专家指出新能源的发展规划不应忽视煤^[5]。显然,煤炭工业的健康、稳定及可持续发展是关系国家能源安全的重大问题。近十年来,国家煤炭产量总体呈现增长态势,但从 2012 年开始,煤炭产量增速放缓,2015 年出现了首次下降,但总产量还是很高,如图 1-1 所示。而且,从近十年煤炭进出口情况来看,我国逐渐由煤炭出口大国转

变成进口国,在 2009 年第一次成为煤炭净进口国,绝对量也很大,而 2011 年超过日本成为全球进口煤炭最多的国家,净进口高达 1 亿多吨,如图 1-2 所示。因此,为了保证我国高速的经济增长及其对能源的强劲需求,煤炭在相当长一段时间内将一直是我国的基础能源。

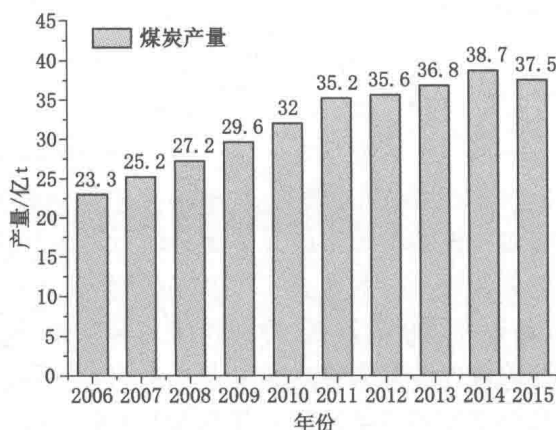


图 1-1 我国煤炭产量

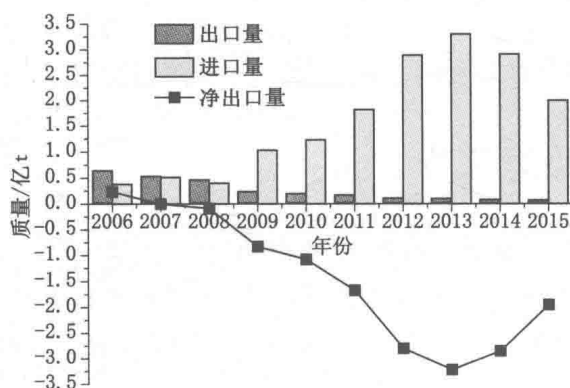


图 1-2 我国煤炭进出口情况

但近年来由于煤炭能源承担了我国很大的经济任务,而煤炭原有的理论及技术已难以适应当前煤矿安全高效生产的迫切需求,特别是每年以 15~20 m 的开采速度向深部延伸,以致煤岩层自然赋存条件更趋复杂,导致我国煤矿动力灾害事故居高不下,以煤与瓦斯突出、冲击地压及突水等为主的煤矿动力灾害已成为我国工业安全领域的主要灾害。尤其是煤与瓦斯突出或瓦斯爆炸事故更是屡见报端,损失惨重,社会影响深远。从 2005 年以来瓦斯事故呈逐年下降趋势。2005 年全国煤矿发生瓦斯事故 414 起,死亡 2 171 人;2006 年有了下降,发生瓦斯事故 327 起,死亡 1 319 人;2007 年下降到 272 起,死亡 1 084 人;2008 年下降到 182 起,死亡 778 人;2009 年发生瓦斯事故 157 起,死亡 755 人。连续四年,煤矿瓦斯事故起数和死亡人数都有较大幅度的下降。但是 2009 年,下降幅度就比较慢了,而且发生了 4 起 30 人以上的瓦斯事故,其中 3 起超过了 50 人。第一起是山西焦煤屯兰煤矿“2·22”瓦斯爆炸事故,死亡 78 人;第二起是重庆松藻“5·30”煤与瓦斯突出事故,死亡 30 人;第三起是河南平顶山新华四矿“9·8”瓦斯爆炸事故,死亡 76 人;第四起是黑龙江龙煤集团鹤岗分公司新兴煤矿“11·21”瓦斯爆炸事故,死亡 108 人^[6]。2010 年瓦斯事故发生不

断,其中一次死亡10人以上的事故近10起,死亡超过20人事故共4起。2011年我国煤矿发生瓦斯事故119起,死亡533人,同比分别减少36起、90人。2012年全国瓦斯事故72起,死亡350人,同比减少47起、183人,分别下降39.5%、34.3%。2013年全国煤矿发生瓦斯事故59起,死亡348人。2014年,全国煤矿发生瓦斯事故47起,死亡266人,同比减少15起、101人,分别下降24.2%和27.5%。2015年,全国煤矿发生瓦斯事故45起,死亡171人,同比减少4起、101人,分别下降8.2%、37.1%。虽然近几年全国煤矿瓦斯事故数量和死亡人数均逐年下降,但瓦斯事故数量和死亡人数仍然偏多。另外,国外煤矿也发生了严重的爆炸事故,如美国、俄罗斯、印尼及新西兰等国,尤其是新西兰的煤矿爆炸事故更是打破了该国42年无矿难的纪录。从近几年国内外发生的煤与瓦斯突出或爆炸重、特大事故(表1-1),不难看出,煤与瓦斯突出等动力灾害事故安全形势不容乐观,需要继续引起重视并不断地加大投入。

表 1-1 近几年国内外重大瓦斯事故

时间	地点	死亡人数/人	事故原因
2004-10-20	河南郑州市大平煤矿	148	瓦斯爆炸
2004-11-28	陕西省陈家山煤矿	166	瓦斯爆炸
2005-02-14	辽宁阜新市孙家湾煤矿	214	瓦斯爆炸
2005-12-07	河北唐山市刘官屯煤矿	108	瓦斯爆炸
2006-11-05	山西大同市焦家寨煤矿	47	瓦斯爆炸
2007-08-07	山西省瑞之源煤业	105	瓦斯爆炸
2008-09-04	辽宁省阜新市第八煤矿	27	瓦斯爆炸
2009-02-22	山西省屯兰煤矿	77	瓦斯爆炸
2009-11-21	黑龙江省新兴煤矿	108	瓦斯爆炸
2010-02-09	俄罗斯新库兹涅茨克市	25	瓦斯爆炸
2010-03-31	河南伊川国民煤业	46	瓦斯爆炸
2010-04-06	美国西弗吉尼亚州蒙特科尔	29	瓦斯爆炸
2010-05-13	贵州省安顺市远洋煤矿	21	煤与瓦斯突出
2010-06-16	印尼西苏门答腊省	37	瓦斯爆炸
2010-10-16	河南平禹煤电四矿	37	煤与瓦斯突出
2010-11-19	新西兰南岛西岸一处煤矿	27	瓦斯爆炸
2010-12-07	河南义煤集团巨源煤业	26	瓦斯爆炸
2011-10-16	陕西铜川田玉煤业有限公司	11	瓦斯爆炸
2012-08-13	吉林白山市吉盛矿业有限公司	17	瓦斯爆炸
2012-08-29	四川肖家湾煤矿	45	瓦斯爆炸
2013-05-11	四川省泸州市泸县桃子沟煤矿	28	瓦斯爆炸
2014-06-04	重庆硯石台煤矿	22	瓦斯爆炸
2015-10-09	江西上饶市上饶县永吉煤矿	10	瓦斯爆炸

近十年以来,我国煤矿百万吨死亡率逐年下降,年死亡人数也有所减少,但与世界主

要产煤国相比,仍然是其他国家的几倍,甚至几十倍。据统计^[7],我国煤矿百万吨死亡率是美国的 42.2 倍,南非的 14.8 倍,印度的 7.7 倍,波兰的 7.0 倍,俄罗斯的 6.2 倍。近年来,虽然启动了煤矿企业兼并重组计划,关闭了数万个乡镇和个体煤矿,但我国煤矿伤亡事故严重的局面仍然没有得到有效控制,重特大事故尚未得到有效遏制,部分地区事故仍然持续反弹,煤矿因煤与瓦斯突出或爆炸等动力灾害事故频繁发生,严重制约着矿产资源的合理开发与利用,严峻的煤矿安全形势严重影响了人民群众生命财产安全以及社会的安定和谐。“十三五”时期,我国经济将持续保持平稳较快发展势头,煤炭开采的复杂难度和深部开采诱发的安全问题日益突出,煤矿安全生产科技面临着巨大挑战。尽管多年来我国已开展了大量的煤矿动力灾害机理及防治技术的研究,但目前煤矿安全生产依然严峻的形势表明,如果短期内不能在煤矿动力灾害机理、预测预警及控制方面有所突破,特别是煤与瓦斯突出方面,势必成为制约煤矿发展乃至我国国民经济发展的瓶颈。

为了防范煤矿重特大事故的发生,党中央和国务院高度重视,研究部署了加强煤矿安全生产工作,并采取七项措施开展瓦斯集中整治,其中有三项技术措施比较重要:① 对瓦斯灾害严重和存在重大隐患的煤矿逐个进行安全评估,帮助制定具体的防范措施;② 推广数字化瓦斯远程监控系统,高瓦斯和高突矿井没有建立瓦斯抽采和监测系统的,一律限期整改;③ 加快煤与瓦斯突出机理及预测预报科研攻关,尽快取得突破^[8]。另外,为了从根本上解决煤矿瓦斯治理的问题,改善煤矿生产安全状况,力争在瓦斯发生的机理和规律方面有所突破,开发有效的瓦斯监测、预警方法和手段,提高瓦斯灾害治理的技术和装备水平,国家煤矿瓦斯部际协调领导小组成立,充分表明了党中央、国务院采取综合措施治理瓦斯灾害的决心。科技部也决定紧急启动了“煤矿生产安全科技行动专项”,主要包括以下三方面的内容:① 加强技术筛选和系统集成,强化科技成果推广应用,建立煤矿生产安全技术示范区;② 以预防为重点,突破瓦斯灾害的实时监测和预警技术、瓦斯灾害治理技术、煤矿瓦斯灾害的应急救援技术三大关键技术,形成准确、快速、实时的煤矿生产安全技术体系;③ 加强基础理论研究,为控制与减少瓦斯灾害提供科学基础^[9]。

一直以来,在煤与瓦斯治理研究领域,人们主要致力于两个方面的研究,即煤与瓦斯突出机理及防治方法,而在工程现场主要采取以瓦斯抽采卸压等为主的技术手段实现消突的目的。但相关的研究主要着眼于煤与瓦斯突出的结果,没有关注煤与瓦斯突出孕育过程中的微破裂前兆规律及其时空演化特征。因此,煤与瓦斯突出事故难以得到有效遏制的关键在于人们对突出机理没有从力学等领域的更高、更深层次上去认识,缺乏有效指导突出预警与防治的系统新思路、新方法。基于我国煤矿煤与瓦斯突出的现状与特点,结合国家对能源的重大战略需求,突破以瓦斯表观信息为依据预报突出的传统思路,研究突出前兆特征及煤岩破坏机理,对突出的裂隙通道形成过程与灾变机制进行深入分析,探讨突出灾害孕育的内在动因及有效的预警方法,揭示采动应力场、损伤场及渗流场的耦合效应机制,系统开展煤与瓦斯突出机理及预警方法的研究具有重要的理论与现实意义。

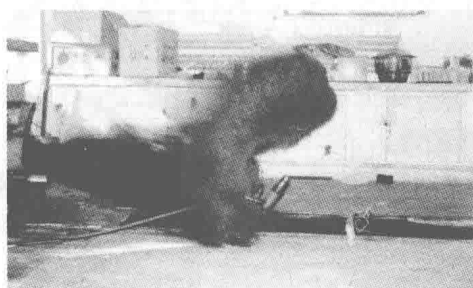
1.2 国内外研究现状

1.2.1 煤与瓦斯突出概述

煤矿瓦斯一般指的是天然气。主要成分是烷烃,其中甲烷占绝大多数,另有少量的乙

烷、丙烷和丁烷,此外一般还含有硫化氢、二氧化碳、氮和水汽,以及微量的惰性气体,如氦和氩等。植物在成煤过程中生成的大量气体,又称煤层气。腐殖型的有机质,被细菌分解,可生成瓦斯;其后随着沉积物埋藏深度增加,在漫长的地质年代中,由于煤层经受高温、高压的作用,进入煤的碳化变质阶段,煤中挥发分减少,固定碳增加,又生成大量瓦斯,保存在煤层或岩层的孔隙和裂隙内^[10]。

煤与瓦斯突出是一种煤体动力现象,属于另一种类型的瓦斯特殊涌出。通常在压力作用下,破碎的煤与瓦斯由煤体内突然向采掘空间大量喷出,并在煤体中形成某种特殊形状的空洞,喷出的粉煤被瓦斯流所携带运动,并造成一定的动力效应(推倒矿车,破坏支架等),大突出时粉煤可以充填数百米巷道,而喷出的瓦斯-粉煤流有时带有暴风般的性质,可逆风流充满数千米长的巷道。煤与瓦斯突出是煤矿井下生产中的一种自然灾害,它严重威胁着煤矿的安全生产^[11-13],如图 1-3(a)所示^[14]。而瓦斯爆炸是一种热-链式反应,是一定浓度的甲烷和空气中的氧气在一定温度作用下产生的激烈氧化反应。通常瓦斯爆炸产生的高温高压,促使爆源附近的气体以极大的速度向外冲击,造成人员伤亡,破坏巷道和器材设施,扬起大量煤尘并使之参与爆炸,产生更大的破坏力。另外,爆炸后生成大量的有害气体,造成人员中毒死亡^[15],如图 1-3(b)所示^[16]。



(a)



(b)

图 1-3 煤与瓦斯事故

(a) 煤与瓦斯突出;(b) 瓦斯爆炸

(1) 煤与瓦斯突出的基本特征^[17]

通常,突出的煤向外抛出距离比较远,具有分选现象;抛出的煤破碎程度较高,含有大量的块煤和手捻无粒感的煤粉;抛出的煤堆积角小于煤的自然安息角;抛出过程有较为明显的动力效应,破坏和抛出安装在采掘空间内的设施;有大量的瓦斯涌出,瓦斯涌出量远远超过突出煤的瓦斯含量,有时会使风流逆转;突出孔洞呈口小腔大的倒瓶形、梨形以及其他分岔形等。

(2) 煤与瓦斯突出的预兆^[18]

煤与瓦斯突出的预兆分为无声预兆和有声预兆两类:

① 无声预兆:采掘工作面煤体与支架压力增大,煤壁外鼓、掉渣等;煤层结构变化,层理紊乱,煤层由硬变软、由薄变厚,倾角由小变大,煤由湿变干,光泽暗淡,煤层顶、底板出现断裂,煤岩严重破坏等;瓦斯增大或忽小忽大,煤尘增多。

② 有声预兆:煤爆声、闷雷声、深部煤岩石的破裂声、支柱折断等。

每次突出前都有预兆出现,但出现预兆的种类和时间是不同的,熟悉和掌握预兆,对于

及时撤出人员、减少伤亡具有重要的意义。

(3) 煤与瓦斯突出的类型^[19]

根据突出的介质的不同,煤与瓦斯突出可分为煤与甲烷突出、岩石与甲烷突出、煤与CO₂突出、岩石与CO₂突出等。

根据突出时的原动力和所表现现象的不同,煤与瓦斯突出可分为突出、倾出和压出3种情况。

(4) 煤与瓦斯突出的一般规律^[20]

① 突出与地质构造的关系:突出多发生在地质构造带附近,如断层、褶曲和火成岩侵入区附近。

② 突出与瓦斯的关系:煤层中的瓦斯压力与含量是突出的重要因素之一,瓦斯压力和瓦斯含量越大,突出的危险性越大。但突出与煤层的瓦斯含量和瓦斯压力之间,没有固定的关系。瓦斯压力低、含量小的煤层可能发生突出;反之,瓦斯压力高、含量大的煤层也可能不突出,因为突出是多种因素综合作用的结果。

③ 突出与地压的关系:地压愈大,突出的危险性愈大。当采深增加时,突出的次数和强度都可能增加,在集中压力区内突出的危险性增加。

④ 突出与煤层构造的关系:煤层构造主要指煤的破坏类型和强度,煤的破坏类型愈高、强度愈小,突出的危险性愈大,多发生在软煤层或软分层中。

⑤ 突出与围岩性质的关系:若煤层顶底板是坚硬而致密的岩层且厚度较大时,其集中应力较大,瓦斯不易排放,故突出危险性愈大;反之则小。

⑥ 突出与水文地质的关系:煤层如果比较湿润,矿井涌水量较大,则突出危险性较小;反之则大。这是由于地下水流动,可带走瓦斯,溶解某些矿物,给瓦斯流动创造了条件。

⑦ 突出具有延期性,突出的延期性变化就是震动爆破后没有诱导突出而相隔一段时间后才发生突出,其延迟时间从几分钟到几小时。

自从1834年法国鲁阿尔(Loire)煤田伊萨克(Issac)矿井发生了世界上第一次煤与瓦斯突出以来,目前大约有20个国家发生了煤与瓦斯突出事故^[21],如中国、俄罗斯、日本、波兰及南非等国家均不同程度地受到煤与瓦斯突出事故的威胁。我国是世界上煤与瓦斯突出最严重的国家,自1950年吉林省辽源矿务局富国煤矿发生第一次有记载的煤(岩)与瓦斯突出以来^[22-25],国内煤矿主产省份矿区均发生过煤与瓦斯突出现象。下面是近几年来我国煤矿所发生的几起较为严重的煤与瓦斯突出或爆炸事故。

(1) 2005年2月14日15时1分,辽宁省阜新矿业(集团)有限责任公司孙家湾煤矿海州立井发生一起特别重大瓦斯爆炸事故,造成214人死亡,30人受伤,直接经济损失4 968.9万元。事故发生地点为3316准备工作面的架子道。该架子道是3316掘进工作面的回风道,平巷15 m,斜巷50 m,于2004年9月23日开始施工,2004年11月4日与3316风道贯通。事故地点为平巷段,设计断面为10.2 m²,采用锚杆、锚网、锚索联合支护。直接原因是由于冲击地压造成3316风道外段大量瓦斯异常涌出,3316风道里段掘进工作面局部停风造成瓦斯积聚,瓦斯浓度达到爆炸界限;工人违章带电检修架子道距专用回风上山8 m处临时配电点的照明信号综合保护装置,产生电火花引起瓦斯爆炸事故。

(2) 2006年11月5日11时38分,山西省同煤集团轩岗煤电公司焦家寨煤矿发生一起特别重大瓦斯爆炸事故,造成47人死亡、2人受伤,直接经济损失1 213.03万元。焦家寨煤

矿是国有重点煤矿,隶属于轩岗煤电公司。属高瓦斯矿井。该矿证照齐全有效。2005年矿井核定生产能力为150万t/a。2006年1~10月份生产原煤116万t。事故的直接原因是由于51108进风掘进巷,局部通风机无计划停电停风造成瓦斯积聚,并达到瓦斯爆炸界限;由于瓦斯-电不闭锁,在未采取排放瓦斯措施的情况下,违章送电、送风;距巷口630m处的动力电缆两通接线盒失爆产生火花,引爆瓦斯。

(3) 2007年12月5日23时15分左右,山西省临汾市洪洞县瑞之源煤业有限公司井下发生一起特别重大瓦斯爆炸事故,井下有128名当班作业人员,事故发生后该矿盲目组织施救又下井37人。此次事故经抢救共有60人脱险,其中7人重伤、1人轻伤;105人遇难;直接经济损失4275.08万元。该矿前身为洪洞县新窑煤矿,2004年改制为民营企业。事故发生前“六证”齐全,均在有效期内,核定生产能力21万t/a,批准开采2号煤层,实际开采2号、9号煤层,严重超层越界进行开采。2号煤层采用长壁式开采,瓦斯绝对涌出量 $0.49\text{ m}^3/\text{min}$,相对涌出量 $1.37\text{ m}^3/\text{t}$,为低瓦斯矿井,煤尘有爆炸性,为自燃倾向煤层。事故直接原因是非法开采的9号煤层未进行瓦斯等级鉴定及自燃倾向性鉴定。

(4) 2008年9月4日,辽宁省阜新市清河门区河西镇第八煤矿发生瓦斯爆炸事故,造成27人死亡、2人重伤、4人轻伤,直接经济损失887.4万元。直接原因是河西镇第八煤矿二平巷掘进工作面与一平巷的六上山采空区煤柱小于最小爆破抵抗线,六上山采空区瓦斯积聚的浓度达到爆炸界限,掘进工作面爆破引起采空区瓦斯爆炸。事故表明:生产无视政府监管,违法组织生产,安全管理机构不健全,安全管理制度不落实,井下安全管理混乱。该矿为低瓦斯矿井,事故工作面以掘代采,无风微风作业,未对采空区进行及时密闭,造成瓦斯积聚,监控系统传感器数量不足,没有执行“一炮三检”制度,违章爆破引起瓦斯爆炸。

(5) 2009年11月21日1时37分,黑龙江省龙煤矿业集团股份有限公司鹤岗分公司新兴煤矿三水平南二石门15号煤层探煤巷发生煤(岩)与瓦斯突出,突出的瓦斯逆风流至二水平,2时19分发生瓦斯爆炸事故,造成108人死亡、133人受伤(其中重伤6人),直接经济损失5614.65万元。事故直接原因是该矿为高瓦斯矿井,在地质构造复杂的三水平南二石门15号煤层探煤巷,爆破作业诱发煤(岩)与瓦斯突出;突出的瓦斯逆流进入二段钢带机巷,在二水平南大巷与新鲜风流汇合,然后进入二水平卸载巷附近区域,达到瓦斯爆炸界限,由于卸载巷电机车架线并线夹接头产生电火花引起瓦斯爆炸。

(6) 2010年3月31日19时22分,河南省洛阳市伊川县国民煤业有限公司发生一起特别重大煤与瓦斯突出事故,并引起瓦斯涌出井口发生爆炸和燃烧。事故发生后,经全力抢救,井下作业人员安全升井67人,事故造成44人遇难,4人失踪,2人受伤。事故直接原因是该矿井下1102工作面回风巷掘进施工中诱发煤与瓦斯突出,并导致风流发生逆转,井下瓦斯涌到副井口遇明火发生爆炸,随即又引起副井筒瓦斯燃烧。该矿属整合技改矿井,是明令禁止一切采掘活动的停工停产整顿矿井,期间严重违法组织生产。在被鉴定为煤与瓦斯突出矿井后,没有制定“四位一体”综合防突措施;以包代管,井下作业无序、人员不清;矿井通风系统紊乱、通风设施不可靠,且在多处盲巷中掘进;矿井瓦斯监控系统不完善,且不能正常运转。

(7) 2011年10月16日11时10分,陕西省铜川市耀州区照金镇田玉煤业有限公司发生一起重大瓦斯爆炸事故,造成11人死亡,直接经济损失965.6万元。田玉煤业有限公司非法越界布置4-2煤层系统,该系统胶带巷机尾正头掘进工作面曾与老空区打透,未密闭,

由于矿井负压作用,导致瓦斯不断涌出;该系统通风管理混乱,通风设施不可靠,漏风严重,风量严重不足,局部通风机吸循环风,致使掘进工作面、3号联络巷、回风巷交岔口处瓦斯积聚,瓦斯浓度达到爆炸界限;耙斗机在扒煤过程中,因打结且有毛刺的钢丝绳与耙斗机绞车右滚筒左翼板摩擦产生火花引起瓦斯爆炸,导致11名矿工遇难。

(8) 2012年8月29日18时左右,四川省攀枝花市西区正金工贸公司肖家湾煤矿发生特别重大瓦斯爆炸事故,造成45人遇难。事故发生时,井下有154人正在作业。肖家湾煤矿对“打非治违”专项行动的相关部署要求不落实、走过场,违法违规超能力、超强度、超定员组织生产;安全生产管理极其混乱,无风微风作业,以掘代采,乱采滥挖,生产方式落后,毫无安全保障可言;安全监测监控设施不健全、形同虚设,瓦斯聚积超标仍没有停产撤人,矿井图纸与实际严重脱离;安全监管存在漏洞,检查验收把关不严。

(9) 2013年5月11日14时15分,泸州市泸县桃子沟煤业有限公司发生重大瓦斯爆炸事故,造成28人死亡、18人受伤(其中8人重伤),直接经济损失3747万元。桃子沟煤业有限公司违法违规组织生产的3111采煤工作面6支巷采煤作业点区域处于无风微风状态,瓦斯积聚达到爆炸浓度;爆破后,残药燃烧,引爆积聚瓦斯。

(10) 2014年6月3日16时58分,重庆市能源投资集团南桐矿业公司硃石台煤矿发生重大瓦斯爆炸事故,造成22人死亡、7人受伤,直接经济损失1654.59万元。工作面掩架平架上方未严格按该矿4406S2段采煤工作面采煤作业规程规定设置板墙,掩架背的垫层局部未达到规定的1m厚度,向采空区漏风增大。工作面采空区未按该矿4406S2段采煤工作面强制放顶安全技术措施规定布置炮眼放顶,增大了采空区瓦斯聚积的空间,导致了瓦斯聚集发生爆炸事故。

(11) 2015年10月9日22时,江西省上饶县枫岭头镇永吉煤矿-200m西翼上山作业区域发生瓦斯爆炸事故,造成10名作业人员遇难。该矿安全生产许可证2015年1月9日过期、矿长安全资格证2015年5月4日过期,已被上饶市政府相关部门责令停产整顿,但该矿违反停产指令,继续违法组织生产。该矿以整改维修巷道的名义,在井下布置两个巷道高落式采煤工作面,工作面没有实现全负压通风,致使高落区积存大量瓦斯等有害气体。矿井通风瓦斯管理混乱,工作面局部通风机设置不合理,供风量不足,导致井下部分区域存在循环风、无风区、微风区。煤矿安全监控系统不完善,事故区域的-200m水平东翼上山作业面和西翼上山作业面均没有安装瓦斯、一氧化碳传感器。

从上面的煤与瓦斯事故可以看出,它们具有以下相似的典型特征:① 开采矿井属于瓦斯矿井,具有突出或爆炸危险性;② 事故多发生在煤巷等掘进工作面,尤其是煤岩体含弱面结构(断层、褶曲、节理)的复杂构造带附近;③ 没有采取及时与合理的瓦斯抽采措施,从而实现对突出煤层卸压消突的目的;④ 忽视掘进工作面煤岩体表现出来的前兆特征,缺乏足够的突出预警理念与技术手段;⑤ 盲目非法开采,违章作业,防突措施不到位。

1.2.2 煤与瓦斯突出机理

如此频繁的瓦斯突出灾害事故促使了各国的学者对煤与瓦斯突出机理展开了大量的理论和试验研究工作。世界上一些煤与瓦斯突出严重的国家对煤与瓦斯突出的机理都作了深入的研究,提出了各种关于瓦斯突出机理的假说。早期的这些瓦斯突出机理假说从影响的因素来看,可分为单因素假说和多因素假说,其中的单因素假说根据其作用的因素又可以分为瓦斯主导作用说、地应力主导作用说和煤质主导作用说,而多因素假说即是综合作用假

说^[26-29]。上述各种假说使得人们普遍认识到:煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯压力及煤的物理力学性质三者综合作用的结果。详细的内容如下^[30-32]:

(1) 瓦斯主导假说

苏联的 E. H · 沙留金和英国的 R · 威廉姆斯等提出的“瓦斯包”说是这个领域的主要学说,该假说认为瓦斯是煤体发生破坏的主要因素,煤层内存在瓦斯压力及瓦斯含量比邻近区域高得多的煤窝。该区域煤松软,孔隙与裂隙发育,具有较大的存贮瓦斯的能力,它被透气性差的煤(岩)所包围、储存着高压瓦斯。当巷道或工作面接近此区域时,煤壁受到高压瓦斯作用破坏而发生突出。

(2) 地应力主导假说

该假说认为在煤体破坏发生煤与瓦斯突出的过程中起主导作用的是地压,即煤体应力。苏联的别楚克、法国的莫连等分别提出了含瓦斯煤体内储存了大量的弹性势能,当工作面接近该区时,高应力区的弹性势能释放使煤体破坏而发生突出。

(3) 煤质主导假说

煤质主导作用说也就是化学本质说,它认为煤质在突出过程中起主导作用,即煤体破坏时是否发生煤与瓦斯突出现象主要是由煤质决定的。而且,苏联 B. T · 巴利维列夫、马柯贡和 T. K · 柯留金等提出了瓦斯水化物假说。目前,煤质主导作用假说在现场观察和实验室实验两个方面都没有得到支持,已被绝大多数研究者所抛弃。

(4) 综合作用假说

这类假说认为煤与瓦斯突出是由于地应力、瓦斯(含量、压力)及煤的物理力学性质这三种主要因素综合作用的结果。该假说最早是由苏联的聂克拉索夫于 20 世纪 50 年代提出的,他认为煤与瓦斯突出是由于瓦斯和应力的联合作用使煤体破坏而发生的。其后其他许多学者又对其进行了补充,认为突出的发生还要考虑煤的物理力学性质、煤的宏微观结构、煤层构造及煤的自重等。尤其是,苏联的著名学者 B. B · 霍多特^[33]提出了“能量假说”,他认为突出是煤体的变形潜能与瓦斯内能突然释放所引起的近工作面煤体的高速破碎,使突出的综合假说更加完善,该假说由下式表示:

$$W + \lambda = A \quad (1-1)$$

式中: W 、 λ 与 A 分别代表煤的弹性势能、瓦斯膨胀能以及煤破碎到突出物粉煤时的能量, J。

$$W = \frac{1}{2E}\sigma^2 \quad (1-2)$$

式中: σ 与 E 分别代表煤体的平均应力及弹性模量, MPa。

$$\lambda = \frac{10^6 VRT}{22\,414(\theta - 1)} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^\theta - \frac{1}{\theta} \right] \quad (1-3)$$

式中 V —— 气体瓦斯量, m^3/t ;

R —— 气体常数, $R = 8.29 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T —— 煤-瓦斯体系的绝对温度, K;

θ —— 绝热系数, 对于瓦斯 $\theta = 1.3$;

p_1, p_2 —— 初始和最终的瓦斯压力, MPa。

这类综合作用假说由于全面考虑了突出发生的作用力和介质两方面的主要因素,从而得到国内外大多数学者的普遍认可。

由以上早期的这些关于煤与瓦斯突出的发生理论和假说可以看出,假说基本上对突出发生的原因、条件、过程和能量来源作了定性的解释和近似定量计算,但仅仅是针对某类具体条件提出的,只是对煤体突然破坏原因的简单回答,而对于哪个因素如何起主导作用并没有给予定量的分析解释。另外,实际突出过程也说明其都有一定的局限性,较难用某种假说来解释所有的突出现象。

1980年以来,随着问题研究的深入,人们开始将瓦斯突出作为一个力学现象和力学过程,按照近代的力学理论和力学方法来加以研究,国内外学者在突出机理的研究方面有了新的发展。

苏联学者 V. I. Karev 和 Y. F. Kovalenko^[34] 提出了煤层瓦斯渗流流动的理论模型。

I. Gray^[35] 认为突出过程中可能发生两种瓦斯诱发的破坏机理,即煤体的拉伸破坏和煤岩体的剪切管涌破坏。

澳大利亚学者 L. Paterson^[36] 提出了煤层瓦斯突出的数学模型,但是其模型中没有考虑煤岩体的变形,只是从渗流的角度解释了煤壁裂纹的产生。

波兰科学院院士 J. Litwinisz^[37] 提出了煤与瓦斯突出的数学模型。

于不凡^[30] 提出并不断发展了中心扩张学说。

周世宁院士等^[38-40] 对煤层瓦斯的流动理论进行了数值模拟研究。

郑哲敏院士^[41] 通过量纲分析和能量对比方法研究,定性分析了瓦斯突出的孕育、启动、发展和停止的过程。

李中成^[42] 认为突出过程是煤体所积存的弹性应变能和瓦斯内能突然释放的过程。

谈庆明等^[43] 提出了煤与瓦斯突出的破裂间断波模型。

俞善炳^[44] 给出了定量化的突出发生判据,煤体的破坏有强、弱两种模式,分别对应于煤体的突出和层裂。

余楚新、鲜学福等^[45-46] 从煤体变形及瓦斯运移的角度对煤与瓦斯突出进行了研究。

李萍丰^[47] 提出了二相流体假说。认为突出的本质是在突出中心形成了煤粒和瓦斯的二相流体,从而导致了瓦斯突出。

丁晓良等^[48] 认为突出的发生是煤体的破坏与瓦斯渗流耦合的结果。

1990年以来,H. M. 佩图霍夫^[49] 提出了煤与瓦斯突出和冲击地压统一理论模型。

S. Valliappan^[50]、W. Dziurzynski^[51] 等分别提出了煤层瓦斯突出的耦合作用模型,对煤层瓦斯的流动进行了数值模拟研究。

何学秋^[52] 提出了煤与瓦斯突出的流变假说,阐述了煤与瓦斯突出发生的流变机理。

林柏泉等^[53] 提出了煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯、煤的物理力学性质和卸压区宽度 4 部分作用的结果。

蒋承林、俞启香^[54] 根据突出孔洞的形状及煤岩体受力状况的分析,提出了煤与瓦斯突出的球壳失稳假说,如图 1-4 所示。

吕绍林、何继善^[55] 认为瓦斯突出的发生和发展取决于赋存在煤岩体中诸多因素的综合作用。

章梦涛、梁冰等^[56] 提出了煤与瓦斯突出固流耦合失稳理论。

赵阳升^[57] 首先提出了煤体-瓦斯耦合作用的数学模型与数值解法。

刘建军等^[58] 建立了应力作用下煤层气-水两相流固耦合渗流的数学模型。