

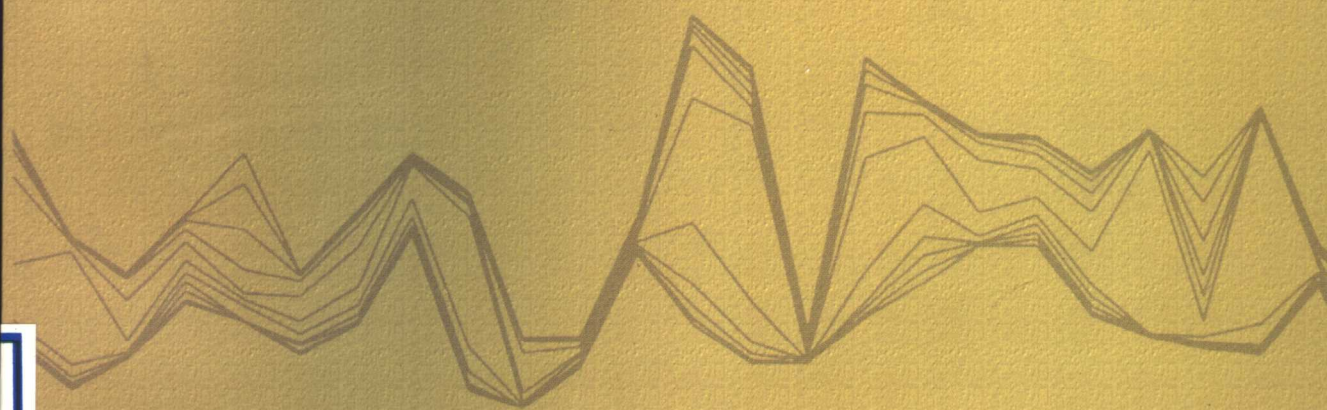
国家自然科学基金重点资助项目 (50134040)

国家自然科学基金资助项目 (50404016)

煤与瓦斯突出的 非线性特征及预测模型

Non-linear Characteristics and Prediction Model of Coal and Gas Outburst

王 凯 俞启香 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 提 要

煤与瓦斯突出是含瓦斯煤岩体在采掘活动扰动下发生的极其复杂的灾害动力现象,属于复杂非线性动力系统在时空演化过程中的灾变行为。本书应用非线性科学的理论和方法,论述了煤体结构的统计分形特征,提出了煤岩体强度的现场测定方法;分析了煤与瓦斯突出过程及其突变特征,通过突出模拟试验研究和大量突出实例统计分析得出了突出发生的强度规律;针对突出危险的重要前兆信息——煤体瓦斯涌出量的动态变化,通过数值模拟和理论研究,分析了钻孔瓦斯动态涌出的非线性特征和规律,研究了煤巷掘进工作面瓦斯动态涌出的混沌和多重分形特征;最后建立了基于人工神经网络的煤与瓦斯突出非线性预测模型,为突出危险性预测提供了一条新的途径。

本书可供矿山安全、安全技术及工程、防灾减灾工程与防护工程、岩土工程及相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤与瓦斯突出的非线性特征及预测模型/王凯,俞启香著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2005. 3

ISBN 7 - 81070 - 993 - 3

I. 煤… II. ①王…②俞… III. ①煤突出—预测—非线性—数学模型②瓦斯突出—预测—非线性—数学模型 IV. TD713

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第107582号

书 名 煤与瓦斯突出的非线性特征及预测模型

著 者 王 凯 俞启香

责任编辑 褚建萍

责任校对 孙 景

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

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

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 江苏徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 8.5 插页 4 字数 215 千字

版次/印次 2005年3月第1版 2005年3月第1次印刷

印 数 1~1000 册

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



王 凯

1972年8月生，河南遂平人。中国矿业大学能源与安全工程学院教授，博士，青年学术带头人。1992年毕业于中国矿业大学，获学士学位；1997年毕业于中国矿业大学，获安全技术及工程博士学位；1999年于中国矿业大学测绘科学与技术博士后科研流动站出站。主要从事安全技术及工程科研与教学工作，主持及参与了国家自然科学基金项目、国家重点科技攻关计划项目等多项研究课题，培养研究生10名。获省部级科技奖6项，国家发明专利1项，实用新型专利2项，出版专著2部，在国内外发表学术论文40余篇。



俞启香

1935年1月生，江苏宜兴人。中国矿业大学能源与安全工程学院教授，博士生导师，安全技术及工程国家重点学科带头人。1957年毕业于北京矿业学院，1980~1982年在加拿大蒙特利尔大学做访问学者。长期从事安全技术及工程科研与教学工作，主持了国家自然科学基金项目、国家重点科技攻关计划项目、部委基金项目等数十项研究课题，培养硕士、博士研究生20余名。获国家级科技奖及教学成果奖4项，省部级科技奖20余项，国家发明专利2项，出版《矿井瓦斯防治》、《煤和瓦斯突出的防治》等著作和教材10余部，在国内外发表学术论文90余篇。2001年被国家教育部和人事部授予“全国模范教师”称号。

序

我国是以煤炭为主要能源的国家,目前及今后 20 年煤炭在我国的一次能源结构中仍将占很大比重。煤矿瓦斯是同煤共生并存储在煤与围岩中的气藏资源,在煤炭生产过程中,它通常以涌出的形式排放出来,在一定的条件下,还可能以喷出或突出的形式突然释放。因瓦斯具有燃烧、爆炸和窒息性,所以它严重地威胁着煤矿安全,制约着煤炭工业的发展和效益的提高。

煤与瓦斯突出是一种极其复杂的瓦斯动力灾害现象,突发性和破坏性极强。我国是世界上突出灾害最严重的国家之一。深入认识突出发生的规律、特征和机理,实现对突出危险性的准确预测,是有效防治突出灾害并高效开发利用瓦斯资源的关键基础,也一直是矿山安全领域中的关键难题和重大研究课题。国内外学者对此进行了长期不懈的深入研究,取得了一定的成果。但由于突出的影响因素众多,发生原因复杂,到目前为止,对各种地质、开采条件下突出发生的规律还没有完全掌握。

从系统的观点来看,煤与瓦斯突出是边界条件复杂的含瓦斯煤岩非线性动力系统在采掘活动扰动下发生的灾变行为。本书作者立足于突出的非线性本质,将混沌动力学、分形理论、突变理论和人工神经网络理论等非线性科学理论与煤与瓦斯突出研究相结合,富有挑战性和开拓意义。书中论述了煤体结构的统计分形特征,提出了利用打钻过程在现场直接测定煤体强度的新方法;分析了突出的突变过程和突变条件,通过试验研究和统计分析得出了突出发生的强度规律;特别是针对突出危险的重要前兆信息——煤体瓦斯涌出量的动态变化,通过数值模拟和理论研究,对其基本规律、混沌和多重分形等非线性特征及其与突出危险性的内在联系进行了深入的研究和分析;进而建立了以突出前兆的非线性特征值为输入、基于人工神经网络的煤与瓦斯突出非线性预测模型,为突出危险性的智能化定量辨识开辟了新的思路和方法。这些创新性成果为深刻认识突出的内在本质提供了一种新的途径,对突出的预测和防治工作具有重要意义。

相信本书的出版将会对丰富和完善煤与瓦斯突出防治理论与技术体系起到积极的推进作用,同时也将促进非线性科学、智能科学、信息科学与矿山安全科学的渗透和交叉发展。

中国工程院院士

周世宁

前 言

煤与瓦斯突出(简称突出)是严重威胁煤矿安全生产的自然灾害之一,它是采掘工作面周围煤岩体快速破碎、伴随煤岩向巷道抛出或移动、并大量涌出瓦斯的一种极其复杂的动力现象,会造成人员伤亡和井巷机电设备被毁,破坏矿井通风系统,甚至引起瓦斯爆炸和火灾事故。自1834年法国伊萨克矿井发生世界上第一次有记载的突出以来,世界各主要采煤国家都发生过不同程度的突出,我国也是突出灾害最严重的国家之一。煤与瓦斯突出因其发生原因复杂,影响因素众多,突发性和破坏性极强而成为矿山安全领域中的重大研究课题。

为了保障突出矿井安全生产、提高其经济效益,必须对突出进行有效的防治。而深入研究可靠的突出预测手段和方法则是指导突出防治工作的重要技术基础。同时,突出预测的准确性和可靠性又依赖于人们对突出发生机理的认识深度。迄今人们在定性水平上对突出机理的认识已较为一致,即突出是由地应力、瓦斯和煤体物理力学性质等因素综合作用的结果,并表现出各种因素相互关联和制约的复杂机制。但鉴于突出的发生和发展过程特别复杂,目前还不能完全阐明突出的科学本质,自然也就难以从理论上确定预测突出的敏感指标及其临界值。

正是由于对突出机理的研究目前尚未达到令人信服的定量模型化阶段,因此,避开模型化问题而从宏观观测数据入手寻求含瓦斯煤体孕育突出危险的特征和判据应该是适宜的。从系统的观点来看,突出是边界条件复杂的开放的含瓦斯煤岩系统在采掘活动扰动下发生的动力失稳现象。从突出孕育到激发以至发展的过程中,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。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,作为这一过程的物理—力学响应,动态变化的突出前兆观测数据也必然依其数据顺序和数据大小蕴含着大量有关系统动态演化过程的痕迹和特征信息。从非线性科学的角度研究突出孕育非线性过程的规律和特征及其在突出预测中的应用,可以通过一种全新的途径,深刻地认识突出的内在本质,对突出的预测和防治工作具有重要意义。

全书共分6章。第1章介绍了煤与瓦斯突出现象,总结了前人在煤与瓦斯突出机理及突出危险性预测方面取得的研究成果,提出了本书的研究思路 and 主要研究内容。第2章首先综述了煤体结构的统计分形特征;然后通过理论分析和实验研究表明,向煤层打钻时,钻头切削破煤所消耗的钻削功率值能够反映被钻削煤体的坚固性系数大小;进而提出了利用打钻过程在现场直接测定煤体强度的新方法。第3章应用突变理论,分析了煤与瓦斯突出的突变过程和突变条件,并据此对防突措施原理作出了解释;通过突出模拟试验研究和大量突出实例统计分析,得出了突出发生的强度规律,为突出潜在规模和强度的预测提供了方法。第4章针对突出危险的重要前兆信息——煤体瓦斯涌出量的动态变化,通过理

论分析和数值模拟,系统地研究了钻孔瓦斯动态涌出的基本规律;应用时序分析的方法,证明了动态打钻过程中钻孔瓦斯涌出量序列具有混沌—分形特征。第5章则进一步研究了煤巷掘进工作面瓦斯涌出量动态时序数据的混沌和多重分形特征,分析得出了工作面有突出危险状态与无突出危险状态下,其瓦斯涌出量动态时序数据的多重分形特征的差异。第6章根据人工神经网络原理,建立了一种新的突出危险性预测模型——基于人工神经网络的煤与瓦斯突出非线性预测模型,并对其进行了试验验证和实例应用分析。

本书是在作者近年来关于煤与瓦斯突出的相关研究成果的基础上总结而成的。成书过程中广泛参阅了前人的研究成果和国内外有关著述,在此谨致谢意。衷心感谢中国矿业大学周世宁院士对作者的关心和支持;感谢何学秋教授、王德明教授、林柏泉教授、蒋承林教授、蒋曙光教授、罗新荣教授、朱湘冀博士、方健之博士、张仁贵工程师、河南理工大学魏建平博士、焦作煤业集团公司魏国营高级工程师给予作者的支持和帮助;感谢中国矿业大学出版社对本书出版所给予的大力支持。王轶波硕士参与了本书部分内容的研究工作,吴伟阳、郭灵强、位爱竹三位研究生进行了部分文字录入和绘图工作,在此一并表示感谢。作者衷心感谢本书编辑褚建萍硕士为本书出版所付出的辛勤工作。

本书中提出的许多新思想和新观点还有待于今后进行更深入细致的研究。由于作者水平所限,书中疏漏不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2004年12月

目 录

1 绪论	1
1.1 矿井煤岩瓦斯动力现象及其特征	1
1.1.1 突出	1
1.1.2 压出	2
1.1.3 倾出	2
1.2 煤与瓦斯突出概况	2
1.3 煤与瓦斯突出的特点与规律	3
1.4 煤与瓦斯突出机理研究现状	5
1.5 煤与瓦斯突出预测研究现状	8
1.5.1 煤与瓦斯突出区域预测	8
1.5.2 工作面突出危险性预测	9
1.5.3 突出预测敏感指标及其临界值确定方法的研究现状	15
1.6 本书的研究思路与主要内容	17
2 煤体结构的分形特征与强度的现场测定方法	19
2.1 煤的物理结构	19
2.2 煤体结构的分形特征	20
2.2.1 分形和分维的基本概念	20
2.2.2 煤体孔隙裂隙的分形特征	21
2.2.3 煤体碎裂后的块度分形特征	22
2.3 煤体强度的现场测定方法	24
2.3.1 钻孔法测定煤体强度的原理和方法	24
2.3.2 实验分析	27
2.3.3 现场实测分析	28
3 煤与瓦斯突出过程及其突变特征	30
3.1 突变理论基础	30
3.1.1 基本概念	30
3.1.2 基本突变类型	35
3.1.3 尖点突变	36
3.2 煤与瓦斯突出过程实测	39
3.3 煤与瓦斯突出的起动和发展机制	41

3.4 煤与瓦斯突出过程的突变特征.....	43
3.4.1 突出起动过程的突变势函数.....	43
3.4.2 煤与瓦斯突出的突变条件.....	44
3.4.3 突变理论对防突措施机理的解释.....	46
3.5 煤与瓦斯突出发生的强度规律.....	46
3.5.1 突出强度的模拟试验研究.....	46
3.5.2 煤层发生突出及发生千吨级突出的瓦斯压力最小值的统计规律.....	49
4 钻孔瓦斯动态涌出的非线性特征.....	51
4.1 概述.....	51
4.2 钻孔瓦斯动态涌出量的理论计算模型.....	52
4.2.1 钻孔瓦斯连续动态涌出过程的基本特点.....	52
4.2.2 理论计算的基本假设.....	52
4.2.3 钻孔瓦斯径向不稳定流动微分方程.....	54
4.2.4 钻孔瓦斯动态涌出量的有限差分—复化求积计算模型.....	54
4.2.5 模型中间参数的确定.....	56
4.2.6 钻孔瓦斯动态涌出数值模拟程序及其验证.....	58
4.3 钻孔瓦斯动态涌出规律的数值分析.....	59
4.3.1 数值计算结果及分析.....	59
4.3.2 每米钻孔瓦斯涌出初速度及停钻衰减涌出量的确定.....	63
4.4 实际打钻过程中瓦斯动态涌出的基本特点.....	64
4.5 钻孔 Q 序列分析的相空间理论模型	66
4.6 对实测钻孔 Q 序列的计算分析	67
4.7 关于钻孔 Q 序列分形特征的分析与讨论	69
5 煤巷掘进工作面瓦斯动态涌出的混沌和多重分形特征.....	70
5.1 概述.....	70
5.2 煤巷掘进工作面前方煤体的动态显现与瓦斯涌出的特点.....	72
5.3 煤巷掘进工作面 Q 序列的获取	72
5.3.1 位村矿 14141 下风巷掘进工作面概况.....	73
5.3.2 原始监测数据的获取.....	74
5.3.3 Q 序列数据预处理.....	75
5.4 煤巷掘进工作面 Q 序列的混沌特征	76
5.4.1 相空间重构.....	77
5.4.2 关联维 D_2	79
5.4.3 二阶 Renyi 熵 K_2	83
5.4.4 Lyapunov 指数	84
5.4.5 综合分析.....	86

5.5 煤巷掘进工作面 Q 序列的多重分形特征	88
5.5.1 Renyi 多重分维 D_q 和指数谱 $f(\alpha)$	88
5.5.2 多重分形计算	90
5.5.3 Q 序列的多重分形	92
5.5.4 关于 Q 序列多重分形特征的讨论	96
6 基于 ANN 的煤与瓦斯突出非线性预测模型	97
6.1 人工神经网络基础	97
6.1.1 概述	97
6.1.2 人工神经网络理论基础	99
6.1.3 误差反向传播(BP)神经网络	103
6.2 基于 ANN 的煤与瓦斯突出非线性预测方法	109
6.2.1 突出危险性 BP 人工神经网络预测模型	109
6.2.2 预测突出的基本特性指标集的确定	111
6.2.3 突出危险程度分类评价集的确定	112
6.3 突出危险性 BP 人工神经网络预测模型的试验验证	113
6.3.1 试验结果对模型的验证	113
6.3.2 四因素对突出的影响程度	114
6.4 基于煤巷 Q 序列多重分形特征的模型实例应用	114
6.4.1 BP 人工神经网络模型的构建	115
6.4.2 煤巷突出危险性预测	115
6.4.3 结果分析	117
参考文献	118

1 绪 论

1.1 矿井煤岩瓦斯动力现象及其特征^[1~5]

矿井煤岩瓦斯动力现象,是指发生在煤矿井下的有瓦斯(以甲烷或二氧化碳气体为主)参与抛出煤岩的具有运动和声响特征的现象,它包括煤与瓦斯突出、岩石与瓦斯突出(简称突出);煤体压出并伴随大量瓦斯涌出(简称压出);煤体倾出并伴随大量瓦斯涌出(简称倾出)等。

1.1.1 突出

1.1.1.1 煤与瓦斯突出

煤与瓦斯突出是指煤与瓦斯在很短的时间内突然连续地自煤壁暴露面抛向巷道空间所引起的动力现象。在煤与瓦斯突出过程中,抛出的煤体有的只有几吨、几十吨,有的则达几百吨,特大型的突出甚至高达几千吨以上。同时涌出大量的瓦斯,充斥整个巷道空间。根据目前的研究结果,发动煤与瓦斯突出的主要作用力是地应力和瓦斯压力,作用介质为软煤和瓦斯,而实现突出的基本能源是煤内积聚的高压瓦斯潜能。煤与瓦斯突出的基本特征有:

① 抛出的固体物具有明显的气体搬运特征。在突出现场可以看到突出的煤和岩块从突出口搬至较远的地方,甚至可随巷道拐弯、分流乃至抛向高处;煤、岩块的堆积角度小于自然安息角;堆积物中大的颗粒落在近处和下部,小的颗粒飘到远处并覆盖在突出物的上方,表现出分选性堆积和轮回性沉积。

② 突出物中呈现出明显的高压气体爆炸的特征。软煤被抛出后,由于其中的高压气体迅速膨胀,破碎煤体,因而突出物中含有大量的手捻无颗粒感的微尘。有时候突出过程中前期突出物还会被后期突出物重新固结和捣实,需要镐刨才能运走。

③ 突出的孔洞具有一些特殊的形状。有的呈梨形、倒瓶形,口小腔大,孔洞中心线倾角可为任意角度,突出孔洞深几米到几十米不等。有时不见孔洞而只见位移的虚煤区。

④ 突出过程中伴随有大量的瓦斯涌出,吨煤瓦斯涌出量大大超过突出煤本身的瓦斯含量。瓦斯风暴逆流运动,逆流可达数十米,甚至数百米、上千米,对矿井通风系统和设施造成严重破坏。

⑤ 由于煤体对二氧化碳的吸附能力大大高于对甲烷的吸附能力,因此对于具有相同气体压力的煤层,由二氧化碳参与的突出比由甲烷参与的突出动力现象强烈得多。

1.1.1.2 岩石与瓦斯突出

岩石与瓦斯突出的基本特征和煤与瓦斯突出相同,一般突出的固体物是岩石,气体是

二氧化碳。突出的岩石一般是具有较大储存二氧化碳能力和较小力学强度的砂岩,孔隙率较高(15.1%~23.2%),坚固性系数较小($f < 1$),裂隙节理发育,有时用手可捏碎。岩石与瓦斯突出的另一个特征是在具有突出危险的地点,取出的岩芯呈凹凸岩饼状或带有环状裂缝。

1.1.2 压出

压出是掘进工作面或采煤工作面的软煤突然呈整体压出或碎体抛出而导致的一种动力现象。发生压出时,在煤壁形成一口大腔小的孔洞,孔洞形状为袋形或楔形,有时抛出煤体的位置被碎煤所充填而不见孔洞。在压出的同时,短时间内涌出大量的瓦斯,使巷道中的瓦斯浓度达到10%以上,在大强度的压出时,瓦斯涌出量更大,甚至有冲击气浪产生,但一般无瓦斯逆流现象。发动与实现压出的主要作用力是地应力,瓦斯压力与煤的自重是次要因素,而实现压出的基本能源是煤岩所积聚的变形潜能。压出的基本特征有:

① 压出的煤是从软分层中压出的。软煤压出后,在煤壁留下袋形或楔形的孔洞,外宽内窄,孔洞长一般为几米。

② 抛出的煤为块煤或碎煤。软煤从煤壁中压出后,堆积在孔洞的前方,抛掷距离一般为1~3 m,呈块状或碎煤状,煤粉较少,堆积的角度小于或等于自然安息角,无分选现象。

③ 压出的煤量不大,一般为几吨到数十吨,个别情况下能达数百吨。

④ 压出时有大量瓦斯涌出,但极少有瓦斯逆流现象。

⑤ 压出时有动力现象。压出时的煤体能将支柱推倒和折断,有时还有顶板开裂、溜槽翻转、铁轨扭曲等现象发生。

1.1.3 倾出

倾出是结构松软、干燥、内聚力较弱的煤体在较高地应力作用下,突然破坏,失去平衡,同时受重力作用与内部煤体脱离、垮落而发生的一种动力现象。因此,实现倾出的主要作用力是失稳煤体自身的重力。发生这种动力现象时,地压显现不大,动力效应较小,瓦斯涌出虽然异常但涌出量增加不大。煤体下落后,堆积在原来位置的下方,大小煤块混杂,无分选性,堆积的角度为自然安息角。形成的孔洞呈舌形、梨形或袋形,孔洞沿倾斜方向延伸,深度从几米到几十米,孔洞的轴线与水平面的夹角一般大于45°。倾出的煤量一般不大,只有几吨到几十吨,但在倾出后,如果不及时处理或处理的方法不当,倾出的现场又具备继续垮落的条件时,这种倾出可能继续沿煤层发展,倾出的煤量越来越多,直至堵塞整个孔洞。

1.2 煤与瓦斯突出概况^[1,3,6]

在各种矿井煤岩瓦斯动力灾害中,危害性最大的是煤与瓦斯突出(参与气体以甲烷为主,下同)。其原因有二:一是这种灾害事故在煤矿中发生的次数多;二是一旦发生这种灾害事故,就会造成大量的煤与瓦斯抛向巷道,推倒设备和支架,煤流埋人,使人窒息。由于瓦斯具有爆炸性和可燃性,一旦遇上火源,又会导致瓦斯爆炸和燃烧事故,危及整个矿井

的生产和工人的生命安全。本书主要以煤与瓦斯突出灾害作为研究对象。

世界上第一次有记载的突出于 1834 年 3 月 22 日发生在法国鲁阿尔煤田伊萨克矿井。当 3 名工人在急倾斜厚煤层平巷掘进工作面架设棚子时,突然发现工作面煤壁外鼓,3 名工人立即向外撤离,但突出时抛出的煤和瓦斯迅速涌入整个掘进头,整个巷道煤尘弥漫,1 人被煤流掩埋,1 人被瓦斯窒息,仅有 1 人逃生。这次突出抛出的煤沿巷道堆积长度达 13 m,煤粉撒落的长度达 15 m,工作面迎头的支架被推倒。

随着采矿工业的发展,世界上各产煤国家都陆续发生了煤与瓦斯突出事故。据不完全统计,截至 1982 年,全世界发生的突出次数就达 28 000 次之多,突出的煤种从褐煤到无烟煤都有,突出中涌出的气体有瓦斯、二氧化碳及这两种气体的混合物。其中突出次数超过千次以上的国家有中国、法国、前苏联、波兰和日本等。目前世界上最大的一次突出于 1969 年 7 月 13 日发生在前苏联的顿巴斯加加林矿,当在 710 m 水平主石门揭开厚度仅为 1.03 m 的一个煤层时,发生了强度为 14 000 t 的突出,突出时涌出的瓦斯量达 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

我国是世界上突出最严重的国家。1950 年吉林省辽源矿务局富国西二坑在垂深为 280 m 的煤巷掘进巷道时发生了国内第一次有记载的突出,到 1981 年底就有 205 个矿井发生过突出,突出的次数达 9 845 次,其中突出次数超过和接近千次的省份有湖南、辽宁、四川和山西。目前我国发生的强度最大的一次突出在天府矿务局三汇坝一矿主平硐,该平硐的标高为 +280 m,1975 年 8 月 8 日,当采用震动性放炮的方法揭开 6 号煤层时,突出煤岩达 12 780 t (其中煤占 60%,岩石占 40%),涌出的瓦斯量达 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。目前我国发生千吨以上的突出达 70 多次。近些年来,由于大力推广“四位一体”的综合防突配套技术,大型突出已很少出现。

随着开采深度的增加,地应力与瓦斯压力都在增大,一些含瓦斯的软岩中也发生了突出。前苏联的顿巴斯煤田在 1955~1975 年期间就有 14 个矿井发生了 3 293 次砂岩和瓦斯突出,最大的一次突出强度为 3 500 t。原民主德国于 1953 年 7 月 7 日在韦拉地区的门寸格拉本矿发生了一次突出强度为 100 000 t 的钾盐与二氧化碳突出。我国的吉林营城五井在 1975 年 6 月 13 日于垂深为 439 m 处掘进巷道时第一次发生了砂岩与二氧化碳突出,突出的砂岩为 1 005 t,涌出的二氧化碳量为 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.3 煤与瓦斯突出的特点与规律^[1~3]

在煤矿中,不同类型的巷道中均发生过煤与瓦斯突出现象。由于巷道类型不同,突出的条件也不一样,从而形成各自不同的特点。在表 1-1 中列出了一些矿区各类巷道的突出强度及次数。从表中可以看出:石门揭煤突出的平均强度最大,这表明石门揭煤最容易导致突出。在各类巷道发生的突出中,平巷的突出次数较多,这可能与我国的开采方法中煤层巷道布置较多有关。

根据多年来对突出事件的统计与分析,煤与瓦斯突出的发生一般具有以下规律:

① 突出的次数和强度随着开采深度的增加而增加。在许多矿井,刚刚开采时并非突出矿井,而是开采到一定深度时才发生突出。开始发生突出时的深度称为始突深度,始突

深度一般都在 100 m 以上。超过始突深度,随着深度的增加,突出的次数增多,突出的强度增大,突出的煤层层数增加,突出危险区的面积扩大。

表 1-1 部分矿区各类巷道突出情况统计表

地 点	项 目	石门	平巷	上山	下山	回采	打钻
重 庆 地区	突出次数	54	240	131	5	127	38
	平均强度/ $t \cdot \text{次}^{-1}$	451	47	35.5	41.6	56.7	37.6
北票 矿务局	突出次数	97	320	496	2	18	15
	平均强度/ $t \cdot \text{次}^{-1}$	138	34.5	24.3	11	60	6.2
红卫 煤矿	突出次数	13	116	33	9	27	13
	平均强度/ $t \cdot \text{次}^{-1}$	1 090	93.3	40.5	14.9	32.8	13.3
六枝 矿务局	突出次数	5	20	46	9	0	4
	平均强度/ $t \cdot \text{次}^{-1}$	1 168	34	111	98	0	4
合 计	突出次数	169	696	706	25	172	70
	平均强度/ $t \cdot \text{次}^{-1}$	342	48.6	32.8	49.8	53.3	24.4

② 突出的次数和强度随着煤层厚度特别是软分层厚度的增加而增加。突出最严重的往往是最厚的主采煤层。

③ 突出的煤层中瓦斯压力越高,突出的危险性越大。根据目前的统计,发生突出时伴随涌出的气体种类主要是甲烷,个别矿井(如吉林的营城、甘肃的窑街)涌出的则是二氧化碳。煤层对这些气体都有吸附性,并且吸附性越强,同等条件下突出的危险性越大。如含二氧化碳气体的煤层中突出的强度相比含甲烷的煤层要大些。在含瓦斯的煤层中,煤层孔隙内瓦斯压力越高,越容易发生突出,并且其突出的强度也越大。

④ 突出时的吨煤瓦斯涌出量均比该处煤层的原始瓦斯含量高。发生煤与瓦斯突出后,用涌出的瓦斯体积除以抛出孔洞外的煤的重量就得到吨煤瓦斯涌出量,它比煤层的原始瓦斯含量高许多,每吨煤达数十至数百立方米瓦斯。

⑤ 突出煤层的特点是强度低;在地应力较大时透气性低,而当地应力减小时煤体内裂隙大量增多、透气性增大;瓦斯放散初速度较高;煤的原生结构遭到破坏,层理紊乱,有遭受搓揉的迹象,裂隙面上有滑动镜面。有的煤层是整个煤层都具有这种特征,有的只是在软分层中具有这些特征。在一些经受过多次地质构造破坏的煤层中,软硬煤体相互混杂,很不均匀。

⑥ 由上向下的突出占大多数,由下向上的突出只占极少数。突出的危险随着煤层的倾角增大而增加。

⑦ 突出与地质构造有密切的关系。尽管在煤层赋存稳定的地方也有突出,但突出更多的是发生在有地质构造的地方。例如,向斜的轴部地区,向斜构造中局部隆起的地区,向斜轴部与断层或与褶曲交汇的地区,火成岩侵入形成变质煤与非变质煤交混的地区,煤层发生扭转的地区,煤层倾角突然变陡的地点,煤层走向突然拐弯的地点,煤层厚度突然变化特别是软分层突然变厚的地点,断层地带等等都是经常发生突出的地点,甚至是发生大

型突出的地点。

⑧ 由采掘形成的应力集中的地区,突出危险性剧增。如在邻近层的煤柱上下、相向采掘的接近区、巷道开口或贯通前、采煤工作面的集中应力带内掘进巷道(上山)时,不仅发生突出的次数多,而且突出的强度也大。

⑨ 绝大多数突出发生在落煤时,尤其是在爆破时。

⑩ 从巷道类型来看,石门揭煤的全过程中,突出危险性最大,突出强度也最大,一般在 100 t/次以上,喷出的瓦斯量超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$,瓦斯逆流数百米,易造成重大事故。

⑪ 突出的危险性因煤层顶底板存在硬而厚的围岩(硅质灰岩、砂岩)而增加。

⑫ 突出前一般有预兆:煤体和支架压力增大;煤壁移动加剧;掉渣,有劈裂声、煤炮声、似跑车一样的闷雷声;煤尘变大;瓦斯浓度忽高忽低;煤体表面附近温度升高或降低;顶钻或夹钻;沿煤层的硬度发生变化;煤质干燥、光泽变暗、层理紊乱等等。这些预兆不一定每次突出都一样,有时即使出现这些预兆也不一定发生突出。

1.4 煤与瓦斯突出机理研究现状

煤与瓦斯突出是一种复杂的自然现象,要防止突出带来的危害,必须了解和掌握这种自然灾害发生和发展的规律,以便采取正确的防治方法和措施。因此,自从 1834 年法国发生世界上第一次突出以来,人们就一直在研究煤与瓦斯突出。它是怎样发生的?是由哪些原因引起的?突出过程又是如何发展的?这些问题统称为突出的机理问题。特别是自 20 世纪以来,人们在突出现场和实验室对突出进行了细致的观察,积累了成千上万次的突出记录,总结了历年来突出防治的成功经验与失败教训,对突出发生机理的认识也经历了从单项因素作用假说到综合因素作用假说的过程,在此过程中,国内外学者提出了几十种关于突出机理的假说,归纳起来,主要有以下几种类型^[1,3]。

(1) 瓦斯作用说

这类假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。这类假说的主要代表有“瓦斯包说”、“粉煤带说”、“煤孔隙结构不均匀说”等等。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。瓦斯包中煤体松软,孔隙与裂隙发育,具有较大的储存瓦斯的能力;但这些煤体被透气性差的煤(岩)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。

(2) 地应力作用说

这类假说认为突出主要是高地应力作用的结果。这类假说的主要代表有“岩石变形潜能说”、“应力集中说”、“应力叠加说”等等。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张开来,将煤体破碎,引起煤与瓦斯突出。

(3) 综合作用假说

这类假说认为突出是由地应力、瓦斯压力及煤的物理力学性质等因素综合作用的结果。这类假说较全面地考虑了突出发生的作用力和介质两个方面的主要因素,因而得到了国内外大多数学者的普遍承认。在这类假说中,有代表性的是“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”等等。

前苏联的 И. М. 彼图霍夫提出的“分层分离说”认为,突出是地压和瓦斯共同作用的结果。突出过程分为三个阶段:第一阶段是准备阶段,工作面附近的煤体在地压的作用下压缩,增加了瓦斯向巷道方向渗透的困难,促使煤体内保持较高的瓦斯压力,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,当突出危险带突然暴露时,由于瓦斯压力梯度作用使分层承受拉伸力,拉伸力大于分层的强度时,即发生分层从煤体上的分离。分层分离是一切突出的重要组成部分,影响着突出的主要特征,但并没有全面反映突出过程的多种形式。例如,分层分离波绕过部分压碎带,通常决定于地压作用,伴随着声响激发此时暴露面上的分层分离。突出常常是重复的破坏组合,一部分是瓦斯参与下的分层分离而破坏,另一部分是地压破坏。在急倾斜煤层的某些部分,则在自身重力的作用下分离。总之,无论是在突出的准备阶段还是颗粒分离波的传播阶段,地压都是重要的。第三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,速度继续加快。当遇到阻碍时,速度降低而压力增高,直到增高的压力不能超过破坏条件,过程才停止。

前苏联学者 B. B. 霍多特提出的“能量假说”认为^[7],突出是煤体的变形潜能 W 与瓦斯内能 Q 突然释放所引起的近工作面煤体的高速破碎。激发突出的第一个条件是:

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

式中 W ——煤的变形潜能;

ϑ ——顶板岩石的动能;

Q ——煤体内游离瓦斯所含的内能;

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:

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

式中 v_p ——煤的破碎速度;

v_x ——煤裂隙中的瓦斯压力下降速度,取决于煤的裂隙性。

激发突出的第三个条件是要求煤破碎完成之前,瓦斯压力应保持在比已破碎煤的抛出阻力更大的水平上,即:

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

式中 p ——瓦斯压力;

A ——煤破碎区段的横截面积;

μ ——煤沿某一表面移动时,该面的摩擦因数;

α ——煤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(惯性力);

$\pm$ ——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 围岩作用于煤层的动载荷;
- ③ 放炮落煤时,巷道迅速进入煤层;
- ④ 放炮揭开煤层。

20 世纪 80 年代以来,对突出机理的研究有了新的进展^[8~20]。包尔申斯基等测得孔隙压力增加可使煤样拉伸变形增大。郑哲敏进行了突出过程中能量来源的量纲分析理论研究,就我国特大型突出实例所做的能量分析表明,突出煤层中瓦斯内能要比煤体的弹性潜能大 1~3 个量级。氏平增之通过实验发现瓦斯压力梯度是导致煤体拉应变增加从而破坏的直接原因,而后他又首次用有限元方法分析了突然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的增加;L. Paterson 用有限元方法分析了由于二维渗流所造成的有效应力场,得到了与氏平增之同样的结论。丁晓良等进行了煤在瓦斯渗流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。俞善炳进行了突出的一维恒稳推进模型和起动判据理论研究。王佑安等对煤的极限粒度与突出危险的关系进行了理论上的探讨。章梦涛等提出了突出与冲击地压的统一失稳理论。

何学秋、周世宁通过对含瓦斯煤样在三轴受力状态下流变特性的研究,建立了含瓦斯煤流变本构方程,提出了关于煤与瓦斯突出的流变假说,认为瓦斯、地应力、煤的物理力学性质和时间过程是突出的重要影响因素。含瓦斯煤体在外力的作用下,当达到或超过其屈服载荷时,明显地表现出时间上的三个阶段,即变形衰减阶段、均匀变形阶段和加速变形阶段,其中变形衰减阶段和均匀变形阶段对应于煤与瓦斯突出的准备阶段,加速变形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时,流变具有衰减的特征,将不会发生突出^[21,22]。

蒋承林、俞启香提出了关于煤与瓦斯突出的球壳失稳机理,认为在突出过程中,地应力首先破坏煤体,使煤体内产生裂纹,形成球盖状煤壳,然后煤体向裂隙内释放并聚集起高压瓦斯,瓦斯使煤体裂纹扩张并使形成的煤壳失稳破坏并抛向巷道空间,使应力峰移向煤体内部,继续破坏后续的煤体,形成一个连续发展的突出过程。因此,煤体在地应力的作用下破坏仅是突出发生的必要条件但不是充分条件,因为在地应力破坏煤体后如果裂隙中没有积聚足够的瓦斯压力,裂纹将不会大面积地扩展,暴露面附近已被地应力破坏的煤体将承受一定的切向应力和径向应力而不会被抛出,动态应力场逐渐趋向于稳态应力场,暴露面将处于稳定状态,其内部的瓦斯气体将以缓慢的方式向巷道释放。如果煤体在地应力作用下破坏后能快速释放出足够的瓦斯量并积聚起较高的瓦斯压力使煤体撕裂,并使球盖状煤壳失稳抛出,则突出必定发生。因此,裂纹及裂隙能否在瓦斯压力的作用下扩展并且使煤体失稳抛出是发生突出的充分条件。从整个突出过程来看,突出的发生与发展是以球盖状煤壳的形成、发展及失稳抛出为特点的^[5,23]。

对煤与瓦斯突出机理研究的深入推动了人们对突出这一复杂现象的认识,也为煤矿现场采取合理的防突措施提供了理论依据。时至今日,虽然人们对于突出的发生与发展过程还没有得出统一的认识,对各种因素在突出中所起的作用及其相互作用的机制仍存在不同的看法和争论,但越来越多的研究者已普遍认同这样一个观点,即突出是由地应力、瓦斯和煤的物理力学性质等因素综合作用的结果。

1.5 煤与瓦斯突出预测研究现状

由于煤与瓦斯突出严重威胁着矿井安全生产,制约着矿井经济效益的提高,因此对突出进行有效地防治成为保障突出矿井安全生产和提高其经济效益的重要技术手段。而研究可靠的突出预测方法则是突出防治工作的基础,它可以指导人们更加合理地应用防突措施、减少防突工作的盲目性、节约防突工程费用,从而有效地保障矿井安全生产,提高矿井经济效益。

国内外开采突出煤层的实践表明,突出的发生具有区域性分布或带状分布的特点,突出危险带的面积一般还不到突出煤层总面积的10%^[24]。原煤炭工业部制定的《防治煤与瓦斯突出细则》(简称《细则》)中,把煤层突出危险性预测分为区域突出危险性预测(简称区域预测)和工作面突出危险性预测(简称工作面预测),突出煤层经区域预测后可划分为突出危险区、突出威胁区和无突出危险区,在突出危险区内,工作面进行采掘之前,应首先进行工作面预测^[25]。

1.5.1 煤与瓦斯突出区域预测

区域预测的任务是根据突出规律,综合区域瓦斯地质和开采技术条件对煤层及煤层区域的突出危险性做出判断。目前,区域预测方法主要有指标预测法、瓦斯地质单元法和物探法。

1.5.1.1 指标预测法

指标预测法包括单项指标法和综合指标法^[25]。单项指标法是根据煤的破坏类型、瓦斯放散初速度 Δp 、坚固性系数 f 、煤层瓦斯压力 p 等指标进行综合判定,其判断煤层突出危险性的临界值应根据矿井实测资料确定,如无实测资料时,可参考表1-2所列数据,只有全部指标达到或超过其临界值时,方可划为突出煤层。

表 1-2 预测煤层突出危险性单项临界指标值

煤层 突出危险性	煤的 破坏类型	煤的瓦斯放散 初速度 Δp	煤的坚固性 系数 f	煤层瓦斯压力 p/MPa
突出危险	Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ	10	0.5	0.74

煤炭科学研究总院抚顺分院与一些突出矿区合作,提出了突出预测的综合指标 K 和 D ^[26,27]。它们被列入我国防突细则,并得到了广泛应用。煤层区域性突出危险性,可按下列两个综合指标判断: