

国家自然科学基金资助项目 (51464016)
江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

陈祖云 / 著

煤与瓦斯突出前兆的非线性特征及 支持向量机识别研究

Mei Yu Wasi Tuchu Qianzhao De Feixianxing Tezheng Ji
Zhichixiangliangji Shibie Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金资助项目(51464016)

江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

煤与瓦斯突出前兆的非线性特征及 支持向量机识别研究

陈祖云 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书利用煤矿瓦斯监控系统监测的瓦斯浓度数据信息来研究煤与瓦斯突出的发生、发展及其动力学等非线性特征,以及基于支持向量机预测煤与瓦斯突出及非突出。开发了煤与瓦斯突出前兆的支持向量机识别系统,与原有的煤矿瓦斯监测监控系统进行数据通信,实现连续非接触式地识别煤与瓦斯突出及非突出,具有重要的现实意义。

本书可供矿山安全、安全科学与工程、防灾减灾工程与防护工程及相关领域的工程技术人员参考使用,同时也能为在校本科生和研究生相应的学习和研究提供帮助。

图书在版编目(CIP)数据

煤与瓦斯突出前兆的非线性特征及支持向量机识别研究 / 陈祖云著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3775 - 0

I. ①煤… II. ①陈… III. ①煤突出—预防—研究
②瓦斯突出—预防—研究 IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 271648 号

书 名 煤与瓦斯突出前兆的非线性特征及支持向量机识别研究
著 者 陈祖云
责任编辑 吴学兵
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 850×1168 1/32 印张 7.125 字数 185 千字
版次印次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤炭是我国能源的主体。在矿井煤岩体瓦斯动力灾害中,危害性最大的是煤与瓦斯突出,应按我国目前煤与瓦斯突出防治能力和技术水平,实现现代化管理,用科学方法管理矿井瓦斯,对矿井煤与瓦斯突出进行科学预测预警,正确识别和评价突出事故灾情,及时提出抗灾对策。因此,加强防范,建立煤与瓦斯突出及非突出的连续识别系统是个非常现实的问题;研制瓦斯异常涌出应用支持向量机预报煤与瓦斯突出识别系统,具有很大的应用价值和前景,对瓦斯事故的预防和矿井安全生产具有重大的现实意义。

本书利用煤矿瓦斯监控系统监测的瓦斯浓度数据信息来研究煤与瓦斯突出的发生、发展及其动力学等非线性特征,以及基于支持向量机的煤与瓦斯突出及非突出的预测。主要成果体现在如下几个方面:

(1) 分别从能量和动量守恒的角度,建立了煤与瓦斯突出的尖点突变模型,得出了突出的突变机理和发生条件,从而为煤与瓦斯突出灾害预测与防止提供了新的理论依据。

(2) 分析了煤巷掘进工作面瓦斯涌出量的影响因素。理论和监测表明:工作面瓦斯涌出量动态,与工作面前方的突出危险性存在着较好的一致性,突出前工作面瓦斯涌出量变化异常;而非突出时瓦斯浓度比较均匀且较小。指出了工作面瓦斯涌出量动态特征是一项较好的非接触式预测指标,连续动态预测的优势,能弥补现在的瓦斯监测监控系统不能预测煤与瓦斯突出的缺陷。

(3) 运用混沌动力学理论,研究了突出发生前与不发生突出的对比混沌运动特征。计算了煤巷掘进工作面瓦斯涌出量的 Hurst 指数;采用复自相关函数法计算了相空间的延迟时间,发现了突出前瓦斯浓度的相空间延迟时间不小于不发生突出的相空间延迟时间。指出了传统计算关联维方法的缺陷,提出了适用于高维混沌系统的新的关联维算法。发现了突出前瓦斯浓度的关联维都大于不发生突出的;而最小饱和嵌入维却正好相反。改进了考虑到较小演化向量长度及较小的演化角度要求的 Wolf 算法,发现了突出前瓦斯浓度 Lyapunov 指数的最大值都大于不发生突出的规律。

(4) 指出了局域预测法中的不足是最邻近点与中心点的关联程度,提出了计算最邻近点的新方法,能有效地防止产生伪邻近点。指出了 Lyapunov 预报模式预测值的正负取舍对瓦斯浓度预报的整体精度有较大影响,提出了 Lyapunov 预报模式预测值的判定思路,并且也提出了相应的判定算法。提出了基于小波与混沌集成的混沌时间序列的预测方法。本书改进的加权一阶局域预测法、改进的 Lyapunov 指数模式预测法及基于小波与混沌集成的混沌预测法,具有相当高的精度。

(5) 提出了利用支持向量机来识别掘进工作面监测信息中的突出危险性。研究了突出危险性模式识别的核函数构造原理和算法。得出了煤与瓦斯突出及非突出的掘进工作面的监测瓦斯浓度的时域特征向量、频域特征向量、小波域特征向量、分形与混沌特征向量。而且支持向量机能应用于常规煤与瓦斯突出预测和 KBD7 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪的数据处理。结果表明,支持向量机模型识别器解决了小样本、非线性、高维数、局部极小值等实际问题,具有良好的分类识别效果。

全书共分 7 章,第 1 章为绪论;第 2 章为煤与瓦斯突出的突变特征;第 3 章为煤巷掘进工作面瓦斯涌出量预测煤与瓦斯突出的

理论;第4章为煤巷掘进工作面瓦斯涌出量的非线性特征;第5章为煤巷掘进工作面瓦斯涌出量的非线性预测;第6章为基于支持向量机的煤与瓦斯突出预测;第7章为支持向量机识别煤与瓦斯突出系统的开发与应用。

本书的研究得到了国家自然科学基金资助项目(51464016)和江西理工大学优秀学术著作出版基金的资助。本书研究内容是在中国矿业大学安全工程学院杨胜强教授的悉心指导下完成的,杨胜强教授渊博的知识、严谨的治学态度、敏锐的研究思路和海人不倦的风范使作者受益匪浅。同时,本书还得到了江西理工大学邬长福教授的指导和帮助。在此向他们表示衷心的感谢并致以深深的敬意!

本书在研究和撰写过程中,得到了云南地质大队的苗琪队长及相关技术人员,云南恩洪煤矿的相关技术人员以及云南师宗县大舍煤矿的金建莱矿长及相关技术人员在取样、收集资料方面提供的帮助;得到了昆明理工大学信息及自动化工程学院院长张云生教授及相关老师在研究中提供的帮助;得到了中国矿业大学安全工程学院蒋承林教授、林柏泉教授、蒋曙光教授的悉心指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于影响煤与瓦斯突出的因素众多,发生原因复杂,相关的研究工作还在深入进行中,加上作者的学识水平有限,书中难免有不妥或错误之处,敬请读者批评指教。

作者

2017年4月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 本书研究的目的和意义	2
1.3 国内外研究动态和趋势	3
1.4 本书研究的主要内容、创新点及难点	17
2 煤与瓦斯突出的突变特征	21
2.1 突变理论基础	21
2.2 煤与瓦斯突出机理	25
2.3 煤与瓦斯突出过程的突变分析	29
2.4 基于动量守恒的煤与瓦斯突出突变分析	34
2.5 本章小结	41
3 煤巷掘进工作面瓦斯涌出量预测煤与瓦斯突出的理论	43
3.1 煤与瓦斯突出的影响因素	43
3.2 煤巷掘进工作面瓦斯涌出过程的基本特点	46
3.3 煤巷掘进工作面瓦斯涌出量动态指标预测突出的理论	47
3.4 瓦斯涌出量异常预报煤与瓦斯突出	56
3.5 本章小结	70

4	煤巷掘进工作面瓦斯涌出量的非线性特征	72
4.1	煤巷掘进工作面瓦斯涌出量时间序列的 Hurst 特性	73
4.2	相空间重构	81
4.3	相空间延迟时间	83
4.4	关联维数	87
4.5	煤巷掘进工作面瓦斯浓度的 Lyapunov 指数分析	94
4.6	本章小结	101
5	煤巷掘进工作面瓦斯涌出量的非线性预测	103
5.1	预测概述	103
5.2	瓦斯涌出量时间序列预测算法	105
5.3	基于 Lyapunov 指数的掘进工作面瓦斯涌出量序列的混沌预测	122
5.4	应用实例	125
5.5	小波分析基本理论	130
5.6	基于小波与混沌集成的煤巷掘进工作面瓦斯涌出量预测	134
5.7	实例对比研究	136
5.8	本章小结	141
6	基于支持向量机的煤与瓦斯突出预测	143
6.1	支持向量机分类	144
6.2	核函数特征空间	149
6.3	支持向量机的优化算法	157

6.4	特征选择与提取	161
6.5	瓦斯涌出量表征煤与瓦斯突出的特征提取	164
6.6	支持向量机在常规煤与瓦斯突出识别中的 应用	185
6.7	本章小结	192
7	支持向量机识别煤与瓦斯突出系统的开发与应用	194
7.1	支持向量机识别煤与瓦斯突出的功能需求	194
7.2	支持向量机在电磁辐射仪预测煤与瓦斯突出 中的应用	195
7.3	支持向量机预测煤与瓦斯突出系统设计	197
7.4	本章小结	202
	参考文献	203

1 绪 论

1.1 研究背景

我国产煤量占世界总产煤量的 45% 左右,但是煤矿事故死亡人数却占世界煤矿事故总死亡人数的 70% 左右。煤矿安全生产形势近年来虽有大幅好转,但总体来看依然非常严峻,重特大事故频繁发生,安全管理水平与发达国家相比还有很大的差距,特别是安全方面的投资远远不够。煤矿事故造成极为不良的社会影响,导致巨大的经济损失。

在煤矿煤岩体灾害中,危害性最大的是煤与瓦斯突出。随着煤与瓦斯突出的快速扩展,人们对突出的认识也逐渐在增强,我国防治突出的整体水平不断提高。目前广泛采用的“四位一体”综合防突措施^[1],使防突效果更严密有效。但是在“四位一体”综合防突措施执行过程中,由于受到突出技术水平的限制,突出对部分地区煤炭的生产产生较大的影响。其原因主要体现在以下几个方面^[2]:① 突出预测方法有缺陷。目前的突出预测方法是在多次现场实验中统计分析得出的,缺乏突出机理的支撑,造成预测方法和指标体系有所偏差,直接的结果是预测值长期超标。② 突出预测指标选择及临界值确定不准确。③ 某些指标测试过程难以把握,容易产生较大的预测误差。

突出预测水平的缺陷造成了安全与生产之间的不协调,给煤矿的安全生产及经济效益造成了较大的影响。为了降低煤炭行业

安全事故,提高采掘速度,减少煤与瓦斯突出的影响,需要突出预测更加准确,在突出预测理论、突出预测指标敏感性及临界值、突出预测方法等方面进行深入研究并不断完善。

1.2 本书研究的目的和意义

矿井瓦斯事故是煤矿五大自然灾害之一,根据煤矿事故统计分析,瓦斯事故在各类事故中所占比例最大。矿井瓦斯是井下有害气体的总称。矿井瓦斯具有燃烧性、爆炸性和窒息性。瓦斯爆炸是危害性极大的灾害,它的发生将严重危及矿井生产和井下工人的生命安全;有害气体直接影响工人的身体健康甚至使人死亡。

煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯压力、煤岩物理力学性质等多因素综合作用的结果,是矿井生产过程中最重要的自然灾害之一。中华人民共和国成立以来,我国煤矿发生的特大、重大人身伤亡事故中瓦斯灾害占90%以上。依据文献[3],2008年至2014年我国煤矿共发生事故567起,死亡人数共3572人。根据国家煤矿安全监察局事故查询系统,2012年1月~2015年8月,共发生瓦斯事故76起,死亡608人,受伤105人,分别占总事故起数的48.4%,占总死亡人数的57.7%,占总受伤人数的68.2%。因此,研究分析瓦斯事故有很大的必要性。矿井瓦斯灾害事故是煤矿生产的大敌,应加以预防,杜绝这类事故的发生。

按我国目前瓦斯防治能力和技术水平,应进一步采取措施,实现现代化管理,用科学方法管理矿井瓦斯,对矿井瓦斯灾害进行科学预测,以便掌握矿井瓦斯动态,正确识别煤与瓦斯突出及非突出,及时提出抗灾对策。

从现有的技术水平来看,高瓦斯矿井及煤与瓦斯突出矿井都已安装瓦斯浓度监测监控系统,并能投入运用于煤炭开采过程,但对于安全生产过程来说,我们认为现有的监测监控系统对于预防

突发性的瓦斯事故缺乏对事态发展发生的前期预警功能,这是安全管理的一个瓶颈,如果此瓶颈不能突破,则现在的安全管理只能停留在完善设置、强化制度等被动管理上,对于重特大的突发事件,难以提前或及时作出相应的事件可能趋势及主动预测预防措施。

所以,如果能预先对煤与瓦斯突出进行连续正确的预测,对瓦斯事故的预防和矿井安全生产将有重要的现实意义。该课题的研究将有很大的应用价值和应用前景,对煤矿煤与瓦斯突出的预测将起到很好的作用。

1.3 国内外研究动态和趋势

我国煤炭分布范围广泛,埋藏地形复杂,煤炭生产一直受到各种灾害,如瓦斯、涌水、火灾、煤尘及冒顶等的威胁,其中以煤与瓦斯突出事故后果最为严重,因此瓦斯事故预测方面的研究就显得尤为重要。

矿井瓦斯爆炸危险性分析方法很多,其中以事故树分析应用最为广泛。由于定量分析中基本事件的概率难以确定,以及定量分析计算的复杂性,目前主要采用事故树的定性分析。传统的事故树分析法虽然可以利用概率理论来有效处理具有大量统计数据的故障事件,但由于在实际资料的统计中有时候存在着许多不准确性因素,构成事故树的各个事件在许多时候都是由客观不定性因素表示的,这就使得传统的事故树分析方法很难对目前复杂的系统中不确切的因素用数学模型或公式来分析和计算。故此,Usha Sharma、Msudhakar 等人在概率可靠性理论研究中引入了模糊数学的思想和方法,使得经典概率模糊化。这不仅提高了概率表示客观对象灾变频率的可能性和适用范围,并且为用概率客观真实地描述评价对象灾变的可能性提供了理论基础^[3-8]。美国

控制论专家 L. A. Zadeh 首先提出,模糊数学理论是表达与处理不精确数据、模糊信息条件的重要手段。国内外不少学者采用模糊评判理论结合统计学方法定量评价矿井瓦斯赋存规律、瓦斯灾害危险性等问题。

煤与瓦斯突出内在机理极为复杂,突出影响因素与突出事件之间相关规律存在一定的不精确性和模糊性,基于经验的传统预测技术预测方法的应用已受到了很多的限制。

霍多特^[9]等人基于实验室模拟,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,但仍无法解释含瓦斯煤岩的渐近破坏过程和破坏条件。马尚权等提出的突出流变假说,对含瓦斯煤岩突出过程和突出机理作了较形象的描述^[10]。

唐春安等^[11-16]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,该系统的显著特点是在模型中考虑材料的非均匀特性,主要包括以下几方面的功能:应力分析、变形分析、声发射和结构破坏分析等。

神经网络是 20 世纪 80 年代后期迅速发展起来的人工智能科学的又一重要分支,除在非线性动态处理及自动控制等领域显示出了强劲的生命力外,在预测、评价等方面也取得了良好的应用效果。最近几年,以自适应突出强度预测的 BP 神经网络模型为代表的模糊神经网络技术在煤与瓦斯突出预测领域里也取得了一定的成效^[17-24]。

专家系统是一个模拟人类专家解决某一问题所用知识和经验的计算机程序。英国煤炭公司的 UPFL 专家系统可用于预测煤矿井下开采过程中煤与瓦斯突出危险性。中国科学院地质研究所也正在研制预测突出的专家系统 GAS-BURST,它根据用户提供的矿区地质构造、地下水、瓦斯、钻孔粉尘、地应力和已经发生突出的资料,划出煤矿突出危险区、危险带,预测突出危险程度随开采

深度增加的变化趋势,预报突出点的位置,同时还能在计算机屏幕上显示突出危险区的位置、井下突出点的位置,各次突出间的相关联系等^[25-29]。

分形几何理论作为研究非线性问题有力的理论工具和方法,近几年在煤炭行业也得到了广泛的应用。如吕绍林等进行了突出煤体的粒度分形研究,结果表明,突出煤体的分形特征不仅可以对突出煤体抵抗外力破坏的能力进行定量的描述,从介质的力学行为认识突出煤体与非突出煤体的差别,而且可以对煤体吸附和放散瓦斯的能力进行综合评价。傅雪海等进行了煤储层孔隙、裂隙系统分形研究,分析了分形维数与煤层的孔隙、裂隙发育程度及煤变质程度的关系,为评价煤层气的吸附与解吸、扩散与渗流、煤与瓦斯突出预测以及煤层有效渗透率估算提供了一种更加精确的方法^[30]。

长期以来,研究人员做了大量的工作,提出了种种假说和经验公式,如用煤的瓦斯放散初速度、煤层瓦斯压力、钻孔瓦斯涌出初速度和钻屑量等作为评价突出危险程度的指标。这些方法在预测煤与瓦斯突出的时候起到了一定的积极作用,但也存在一些缺陷:

(1) 这些预测方法都是静态地预测煤与瓦斯突出,只能预测某个时刻某一点的瓦斯突出危险程度。

(2) 预报的准确性差,以前的突出预测只是根据给定的条件进行单指标预测,没有将这些因素作为一个系统来考虑,所以缺乏一定的准确性。

1.3.1 煤与瓦斯突出机理的研究概况

煤与瓦斯突出是煤矿井下生产中经常遇到的动力现象,尽管所有的这些动力现象均体现了瓦斯携带煤体瞬间向地下空间涌出的特点,但其表现形式却是千差万别的。有的突出表现出较强烈的破坏特征,所喷出的含瓦斯煤岩体可摧毁采掘工作面设施,破坏通风系统,甚至造成风流逆转;喷出的瓦斯可达数万立方米,并会

迅速充满井巷,造成人员窒息,甚至出现瓦斯燃烧或爆炸;喷出的煤岩可达数千吨以上,会造成人员或设施被埋,井巷严重受损。对于煤与瓦斯突出是如何发生的,受何种因素影响,各种因素间如何相互作用,目前在学术界尚无定论。自 1834 年世界上首次在法国伊萨克矿井发生煤与瓦斯突出的一个多世纪以来,各国学者在探索煤与瓦斯突出发生发展的机理中提出了大量的学说,到目前为止这些学说均不能对煤与瓦斯突出现象给予令人满意的解释,学术界将各种学说均称之为“假说”。突出机理的假说分为以下几类^[31-36]:

(1) 瓦斯主导假说

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。其主要代表有“瓦斯包说”、“粉煤带说”、“煤的孔隙结构不均匀说”等等,如“瓦斯包说”认为煤中存在着瓦斯压力和瓦斯含量比邻近区域高得多的煤带,也就是瓦斯包,其煤体松软裂隙发育,具有较大的储存瓦斯的能力。一旦巷道揭露这些瓦斯包,在压力的作用下,瓦斯便会携带着煤体出来形成突出。

(2) 地应力作用说

这类假说认为突出是较高的地应力作用的结果,如“岩石变形能说”、“应力集中说”、“应力叠加说”、“剪应力说”、“顶板位移不均匀说”、“振动波说”等等。当巷道接近储存高构造应变能的岩层时,这些岩层将像弹簧一样张开来,将煤体破碎,引起煤与瓦斯突出。

(3) 综合假说

这类假说是多数人持有的观点,认为突出是由地应力、瓦斯压力和煤的力学性质三者共同作用的结果,认为煤与瓦斯突出是一种能量突然释放的现象,从能量平衡角度分析,研究其能量集中和释放的全过程,就能有效地进行突出防治。研究工作表明,地应力在煤与瓦斯突出发生的初级阶段,扮演着非常重要的角色。地应

力通过应力叠加和应力集中使煤体遭到破坏。瓦斯含量和解吸速度也是影响突出的重要因素,瓦斯压力梯度用来破坏煤体,煤层快速解吸出来的瓦斯所形成的瓦斯气流将破碎的煤搬运出工作面,使煤与瓦斯突出得以实现和扩展。煤的力学性质是指煤的强度,容易破碎的粉煤是突出容易发生的主要原因。

(4) 流变假说

流变假说是中国矿业大学何学秋教授提出来的^[36-40],认为煤与瓦斯突出本质上是属于含瓦斯煤体的流变行为。实践表明,一次大的突出往往是由几次小的突出所组成,在煤层中波及的范围从几米到几十米,延续的时间从几十秒到几天。突出在某些情况下表现为整体位移,在另一些情况下又表现为猛烈突出。通过含瓦斯煤的流变行为,可以比较好地解释这一过程。“流变假说”把煤与瓦斯突出过程从时间上分为四个流变破坏阶段,即突出的流变准备阶段,高速动态流变的发动阶段,持续流变破坏发展阶段和结束阶段,从空间上可分为流变松弛区、强流变区和弱流变区三个区域。在采掘工作面前方,依次存在着三个区域,它们是松弛区域、应力集中区和原始应力区^[41]。

(5) 球壳失稳假说

球壳失稳假说是中国矿业大学蒋承林教授提出来的^[66,149-153],认为在突出过程中,突出煤体首先在地应力的作用下破坏,产生裂隙,释放出瓦斯,然后瓦斯使裂隙扩展,形成球盖状煤壳,再将球盖状煤壳抛向巷道空间,推动地应力峰移向煤体内部,继续产生同样的破坏,形成连续不断的突出。

1.3.2 煤与瓦斯突出工作面预测技术的发展状况

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不到突出煤层总面积的10%^[42]。原煤炭工业部制定的《防治煤与瓦斯突出细则》中,把煤层突出危险性预测分为区域突出危险性预测和工作面突出危

险性预测,突出煤层经区域性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,应进行工作面预测^[43]。

1.3.2.1 区域预测指标

区域预测有以下几种方法:

(1) 单项指标法

单项指标一共有四个,即煤的破坏类型、瓦斯放散初速度、煤的坚固性系数、煤层瓦斯压力。

(2) 瓦斯地质统计法

该法的实质是根据已采区域突出点的分布与地质构造的关系,结合未采区的地质构造条件来大致预测突出可能发生范围。因为不同矿区控制突出的地质构造因素不同,所以根据矿区的地质构造因素来预测。

(3) 综合指标 D 与 K 法

D 与 K 指标是由煤炭科学研究总院抚顺分院、北票矿务局与红卫矿共同提出的,它们被列入我国的防突细则,并得到了广泛应用。下面是 D 和 K 的算术表达式:

$$D = (0.0075H/f - 3)(P - 0.74)$$

$$K = \Delta P / f$$

式中 D ——煤层突出危险性综合指标;

K ——煤层突出危险性综合指标;

H ——开采深度, m;

P ——煤层瓦斯压力, MPa;

ΔP ——软分层煤的瓦斯放散初速度指标;

f ——软分层煤的平均坚固性系数。

(4) 煤厚的变异系数

煤厚的变化特别是构造引起的煤厚次生变化与突出有密切的关系,因此也可作为一项指标。