

付 华 邵良杉 著

煤矿瓦斯灾害特征 挖掘与融合预测



科学出版社

煤矿瓦斯灾害特征挖掘与融合预测

付 华 邵良杉 著

本书由国家自然科学基金(50874059)、辽宁省著作出版基金、教育部博士点基金(200801470003)、辽宁省优秀人才基金(2007R24)、辽宁省创新团队项目(2007T071)资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了煤矿瓦斯灾害的类型及危害、煤矿瓦斯灾害信息的获取方法、瓦斯灾害信息的特征分析和特征提取技术、瓦斯灾害多传感器决策级信息融合、瓦斯预测的数据挖掘理论与方法、瓦斯灾害特征数据的识别与挖掘、瓦斯灾害预测模型等内容。此外,本书还结合实际,介绍了煤矿瓦斯灾害信息挖掘与融合预测技术在煤矿安全生产中的应用。

本书对从事煤矿安全监测监控、智能检测与信息处理技术、工业生产过程自动化监测与控制方面的科技人员有较高的使用和参考价值,也可作为自动化专业、测控技术专业的教学参考书,或作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿瓦斯灾害特征挖掘与融合预测/付华,邵良杉著. —北京:科学出版社,2011.2

ISBN 978-7-03-029983-3

I. ①煤… II. ①付…②邵… III. ①煤矿-瓦斯监测 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 006615 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:林青梅
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2011 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 2 月第一次印刷 印张:15

印数:1—2 500

字数:287 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目前,瓦斯已成为威胁我国煤矿安全的突出问题,防治瓦斯灾害成为当前煤矿最首要的任务。在美国等西方国家,煤矿已经实现高度机械化,井下工作人员很少,巷道畅通,一旦发生事故,易于撤离,伤亡不大。而在我国,大小煤矿统算在内,采煤机械化程度仅为45%。在这样的情况下,只能在瓦斯的预测、检测和防范上下苦功,加大科技投入力度,在瓦斯监测方面实现科学技术的突破。

近几年来,矿井环境监测技术发展很快,各种各样的矿井瓦斯监测系统在煤矿得到广泛应用,但由于缺少对矿井瓦斯灾害的预警监测,即没有可靠的瓦斯灾害预测手段,还是难以防止矿井瓦斯爆炸事故的发生。

本书作者前期研制了几种矿井瓦斯监测监控及预测系统,取得了一定的成果,但由于监测系统长期处于不间断的工作状态,而且煤矿井下的工作环境较为恶劣,各种干扰会对监测系统的测量产生严重的影响,如何提高测量准确度成为整个监测系统的关键。传统的方法是在监测系统中采用算术平均值的数字滤波方法来克服干扰,但是当传感器失效致使信息无从获得时,此方法便无能为力了。为了能更准确地进行瓦斯监测监控,就要利用监测系统中的多源信息,以挖掘有用数据,变被动监测为主动预测和防范,通过多源数据融合来获得可靠准确的瓦斯监测信息。本书旨在这方面与同行进行学术探讨,以期探索更多的途径来得到瓦斯灾害的监测信息与预兆信息,研究这些信息的特征的提取方法及融合方法,为煤矿瓦斯安全监测技术的发展奠定理论基础。

近年来,作者先后承担了多项相关课题的研究工作,其中,国家级和省部级以上基金项目有:煤矿瓦斯融合决策与预测控制研究、煤矿安全在线集成决策技术研究、煤矿瓦斯电子监控技术研究、煤矿瓦斯预测控制关键技术研究、灾害煤矿瓦斯灾害特征提取与信息融合技术研究、煤矿生产安全计算集成控制系统研究、矿井瓦斯监测中的多传感器信息融合的基础理论研究、煤矿瓦斯智能监测及预测预报技术研究等。

瓦斯灾害同其他客观事物一样,也有一个发生、发展的过程,甚至是从量变到质变的过程。在事故发生前,会有一些征兆出现。只要及时捕捉到这些信息,加以分析处理,及时采取得力措施,就能够将灾害带来的损失降至最低,甚至避免灾害的发生。因此,如何对瓦斯灾害信息进行采集、征兆提取和融合预测,即如何对瓦斯灾害实现快速诊断、建立有效的预测控制系统,是本书要阐述的内容。

科学技术的发展促进了学科交叉与融合。计算机技术、电子技术、信息科学与

技术的发展,为人们更深层次地认识世界提供了有效的方法和手段。本书是利用现代信息处理技术来研究煤矿瓦斯灾害的辨识与预测问题,这是多学科相交叉和相融合的新领域。

煤炭行业是灾害多、危险大、安全隐患严重的领域。煤矿瓦斯灾害的发生往往具有潜在性、突发性特点,并极具破坏性和灾难性,煤矿瓦斯灾害一直是煤矿灾害治理的重点和难点。煤矿企业的安全是至关重要的。本书所介绍的煤矿瓦斯灾害特征提取与信息融合技术对煤矿安全具有非常重要的意义,它可最大限度地降低或排除煤矿瓦斯的危险因素,提高煤矿生产的安全性,保障煤矿工人的生命安全。这种社会效益是无法用经济指标来衡量的,它必将为煤炭企业带来极大的间接经济效益。

在本书出版之际,特别感谢国家自然科学基金、辽宁省著作出版基金、辽宁省优秀人才基金、辽宁省创新团队项目及教育部博士点基金的资助。

作 者

2010年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 煤矿瓦斯灾害的类型及危害	2
1.2.1 瓦斯爆炸	3
1.2.2 煤与瓦斯突出	4
1.2.3 瓦斯燃烧	5
1.3 瓦斯灾害信息获取的硬件基础平台	5
1.3.1 井下瓦斯浓度及相关参数采集与监测	5
1.3.2 瓦斯突出灾害信息的获取技术	6
1.4 瓦斯灾害信息的特征提取与信息融合技术	7
1.4.1 瓦斯灾害特征提取技术	8
1.4.2 信息融合技术	9
1.5 煤矿瓦斯监测信息的获取方法	10
1.5.1 煤矿瓦斯监测信息的获取原理	10
1.5.2 煤矿瓦斯监测信息的获取步骤	10
1.6 煤矿瓦斯灾害预测的研究现状	12
第 2 章 瓦斯灾害信息的特征分析	17
2.1 瓦斯灾害信息的时域特征分析	17
2.1.1 瓦斯灾害信号的时域直观特征指标分析	17
2.1.2 瓦斯灾害信号的时域间接特征参量分析	18
2.2 瓦斯灾害信息的频域特征分析	19
2.2.1 功率谱分析	19
2.2.2 瓦斯信号的频谱特征分析	20
2.3 瓦斯灾害信息的时频联合特征分析	21
2.3.1 基于 Gabor 变换的瓦斯信号的时频特征分析	21
2.3.2 用 Zak 变换计算 Gabor 展开的系数	25
2.3.3 基于 Wigner-Ville 变换的瓦斯信号时频特征分析	28
2.4 瓦斯灾害信息的多分辨率时频分析	32
2.4.1 多分辨率时频分析原理	32

2.4.2	瓦斯灾害多分辨率的时频分析步骤	32
2.5	基于独立分量分析的瓦斯灾害信息特征分析	33
2.5.1	瓦斯灾害监测信息的多元数据表示	33
2.5.2	瓦斯灾害监测信息的盲源分离	34
2.5.3	瓦斯灾害信息特征的独立分量分析模型	36
2.5.4	独立分量分析的改进与优化	40
2.5.5	算法实验	43
第3章	瓦斯灾害信息的特征提取	47
3.1	瓦斯灾害信息特征提取的原则	47
3.1.1	瓦斯灾害信息特征提取的过程	47
3.1.2	瓦斯灾害信息特征提取的评价准则	48
3.1.3	瓦斯灾害信息特征提取模型的分类	49
3.1.4	进行特征提取时应考虑的因素	50
3.2	基于时频分布奇异值的瓦斯灾害信息特征提取	51
3.2.1	基于时频分布的瓦斯灾害信息的特征矢量表示	51
3.2.2	煤矿瓦斯灾害信息的奇异值分解	52
3.2.3	基于奇异值分解的瓦斯灾害信息特征提取模型	54
3.2.4	对瓦斯灾害信息的目标特征的评价	57
3.3	基于最大熵的瓦斯灾害信息特征提取模型	59
3.3.1	建立最大熵模型的依据	60
3.3.2	瓦斯灾害信息特征提取的最大熵模型	61
3.3.3	最大熵模型的参数训练算法	62
3.4	基于支持向量机的瓦斯灾害特征提取	63
3.4.1	基于支持向量机的瓦斯灾害特征提取相关理论	63
3.4.2	基于支持向量机的瓦斯灾害特征提取模型	68
3.4.3	基于自动加权支持向量机的瓦斯灾害特征提取模型	69
3.4.4	特征提取模型算法分析	70
3.5	仿真实验研究	71
3.5.1	应用奇异值分解算法的瓦斯灾害特征提取实验	71
3.5.2	应用最大熵算法的瓦斯灾害特征提取实验	77
3.5.3	应用支持向量机算法的瓦斯灾害特征提取实验	81
第4章	瓦斯灾害多传感器特征级信息融合	83
4.1	瓦斯灾害特征级融合的结构模型与方法	83
4.1.1	信息融合的概念	83
4.1.2	瓦斯灾害特征级融合的结构模式	85

4.1.3 瓦斯灾害特征级融合的方法	86
4.2 瓦斯灾害特征级信息融合的特征匹配	90
4.2.1 瓦斯灾害特征级融合的坐标匹配	91
4.2.2 瓦斯灾害特征级融合的时间匹配	92
4.2.3 瓦斯灾害信息的特征匹配与合并	93
4.3 基于贝叶斯理论的瓦斯灾害特征级融合	94
4.3.1 贝叶斯网络的构建	94
4.3.2 基于贝叶斯网络的特征级融合的推理模式	98
4.3.3 基于贝叶斯网络的特征级融合的推理算法	99
4.4 基于 Dempster-Shafer 理论的瓦斯灾害特征级融合	106
4.4.1 瓦斯灾害特征级融合的概率分配函数的确定	106
4.4.2 瓦斯灾害多特征信息融合的组合算法	109
4.4.3 瓦斯灾害特征级决策融合方法	110
4.5 实验研究	110
4.5.1 特征级信息融合的贝叶斯方法实验	110
4.5.2 特征级信息融合的证据理论方法实验	121
第 5 章 瓦斯灾害多传感器决策级信息融合	123
5.1 基于模糊逻辑的决策级融合	124
5.1.1 瓦斯灾害决策融合的模糊逻辑方法	125
5.1.2 瓦斯灾害决策融合的模糊积分方法	126
5.1.3 模糊积分密度的学习算法	128
5.2 基于粗糙集理论的瓦斯灾害决策级融合方法	131
5.2.1 决策级融合的粗糙集推理数据准备	132
5.2.2 建立基于粗糙集规则的决策级融合模型	134
5.2.3 决策级融合模型中粗糙集属性关系分析	136
5.2.4 实例研究	138
5.3 基于模糊粗糙集理论的瓦斯灾害决策级融合方法	140
5.3.1 基于模糊粗糙理论的瓦斯灾害决策级融合模型的建立	141
5.3.2 基于模糊粗糙理论的决策级融合模型的检验	142
5.3.3 实例研究	143
第 6 章 瓦斯预测的数据挖掘理论与方法	149
6.1 数据挖掘概述	149
6.1.1 瓦斯数据挖掘研究面临的主要问题	149
6.1.2 瓦斯数据挖掘的算法研究进展	150
6.1.3 数据挖掘的研究方向	150

6.2	瓦斯数据挖掘的预测功能	151
6.2.1	数据挖掘的预测任务	152
6.2.2	数据挖掘的瓦斯灾害预测模式类型	152
6.3	煤矿瓦斯预测的数据挖掘过程	155
6.3.1	数据准备	156
6.3.2	瓦斯数据开采	156
6.3.3	瓦斯灾害预测结果的评估	156
6.3.4	基于数据挖掘瓦斯预测的步骤	157
6.4	瓦斯数据挖掘预测的相关方法	158
6.4.1	数据挖掘中的神经网络预测方法	158
6.4.2	基于粗糙集理论的瓦斯预测方法	159
6.4.3	基于 K-最邻近的瓦斯预测方法	159
6.4.4	基于序列模式挖掘的预测方法	160
6.4.5	基于遗传算法的瓦斯灾害预测方法	161
6.4.6	基于分类的瓦斯预测方法	162
第 7 章	瓦斯数据的在线挖掘与识别	164
7.1	瓦斯特征数据的在线挖掘存在的问题	164
7.1.1	渐近式瓦斯灾害特征数据的在线挖掘算法	164
7.1.2	多尺度瓦斯数据在线挖掘算法	166
7.1.3	多尺度瓦斯数据在线挖掘算法的实现	169
7.2	瓦斯灾害特征数据识别算法	169
7.2.1	算法模型	170
7.2.2	算法分析	172
7.3	瓦斯数据的离散化	174
7.3.1	瓦斯数据的离散化描述	174
7.3.2	瓦斯数据的离散化方法	175
7.3.3	瓦斯数据离散化的候选断点集合的确定	180
7.3.4	基于断点权重的离散化算法	183
7.3.5	基于聚类的连续属性离散化算法	186
第 8 章	瓦斯灾害预测模型	190
8.1	基于 K-最近邻分类的瓦斯灾害预测	190
8.2	K-最近邻分类预测的改进算法	191
8.2.1	瓦斯训练样本集的编辑和压缩	191
8.2.2	属性权值的调整	192
8.3	K-最近邻混合分类预测算法	194

8.3.1	基于神经网络的属性权重调整	195
8.3.2	K-最近邻混合算法	195
8.4	基于带移动窗的神经网络瓦斯分类预测	197
8.4.1	瓦斯时变数据的最小二乘学习算法	197
8.4.2	神经网络移动窗的最小二乘学习算法	198
8.4.3	局部化递推算法	203
8.5	基于人工神经网络的时序预测模型	204
8.5.1	瓦斯灾害预测模型的基本结构与数学描述	204
8.5.2	基于反馈神经网络的预测模型	205
8.5.3	对角回归神经网络结构	205
8.6	煤矿瓦斯多维预测模型	208
8.6.1	问题的提出	208
8.6.2	基于自回归神经网络的预测模型结构	209
8.6.3	基于自回归神经网络模型的数学描述	209
8.6.4	基于自回归神经网络模型的并行学习算法	210
8.6.5	基于自回归神经网络模型的学习流程	211
8.6.6	输入调正法	212
第9章	煤矿瓦斯预测实例	213
9.1	煤矿瓦斯预测的数据挖掘准备	213
9.1.1	数据挖掘的测试内容	213
9.1.2	煤矿瓦斯预测的数据预处理	213
9.2	煤矿瓦斯数据库的分类预测	213
9.2.1	标准数据库的分类预测	213
9.2.2	煤矿瓦斯灾害时序数据库	214
9.3	煤矿瓦斯涌出量实际预测	215
9.4	预测结果分析	217
9.4.1	数据库分类预测结果比较	217
9.4.2	多维模型瓦斯预测的结果分析	218
参考文献		220

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

从我国的一次性能源构成来看,煤炭占全国一次性能源结构的 70%,石油、天然气等占 30%。《国务院关于促进煤炭工业健康发展的若干意见》中进一步强调了煤炭工业在国民经济中的重要战略地位,指出了煤炭将长期是我国的主要能源。当前,煤矿安全成为制约煤炭工业发展的主要问题,预防和控制煤矿重特大事故的发生,促进煤矿安全生产形势的根本好转已成为国家和政府层面上急需解决的重大问题,煤矿安全工作是全国工业安全工作的重中之重。

我国煤炭生产以井工开采为主,其产量占煤炭总产量的 95%。由于我国地质条件的特殊性^[1,2],所有矿井均为含瓦斯矿井,并且一半以上的矿井处于高瓦斯区或瓦斯突出区^[3,4],加之煤层透气性低,不易在开采前抽放,采掘时极易发生瓦斯突出现象^[5]。美国、澳大利亚等煤矿地质条件较好、储量丰富的国家,对于高瓦斯矿一般采取停产关闭措施。而我国一直以煤炭为主要能源,由于资源有限,条件再复杂、环境再恶劣的煤矿,都不得不纳入开采范围^[6]。全国已有相当数量的矿井开采到了 600m 以下的高瓦斯和瓦斯突出区,条件十分困难,而每向下开掘垂深 100m,作业面温度就会升高 3~4℃,瓦斯的相对涌出量呈线性增长(不同地区梯度值不一样),瓦斯灾害就容易发生^[7]。

长期以来,我国煤矿伤亡事故频发,瓦斯爆炸事故居于榜首^[8]。从煤矿事故统计分析看,特别重大事故几乎都是瓦斯爆炸事故。新中国成立以来,全国煤矿共发生一次死亡百人以上事故 19 起,死亡 3162 人。其中,18 起是瓦斯事故,死亡 3052 人,事故起数和死亡人数分别占 95%和 97%。2001 年至 2005 年 2 月底,全国煤矿发生一次死亡 30 人以上的事故 28 起,死亡 1689 人。其中,瓦斯事故 24 起,死亡 1558 人,事故起数和死亡人数分别占 86%和 92%^[9,10]。

防止瓦斯事故发生的有效手段之一是提高煤矿瓦斯监测监控水平^[11]。目前我国煤矿瓦斯灾害监测技术已有很大发展^[12~14],但还存在一些迫切需要解决的关键技术问题,如在硬件设施方面,瓦斯灾害监测系统的技术装备水平落后,各种监测传感器与国外先进水平差距较大,有些仪器设备的可靠性差,监控网络需要解决互联互通与资源共享问题等。在软件技术方面,监控系统信息处理技术落后,只能对原始数据进行简单转换、存储、显示和打印,有限的数据库资源“挖掘”、分析深度不

够,灾害隐患判别和应急救援决策的信息量不足,不能及时发现重大灾害隐患;电磁辐射、瓦斯涌出特征等的非接触式突出日常连续预测技术和装备,还存在声源定位、噪声信号滤除等许多信息处理技术的难题,使设备应用受到了限制,技术装备的精度和可靠程度还达不到现场实用的要求。

针对煤矿瓦斯监测系统中存在的技术难题,本书重点介绍了煤矿瓦斯灾害信息的处理问题。现代煤矿瓦斯监测技术^[13]、瓦斯灾害电磁辐射^[15~17]、声发射等监测技术的研究^[18],为本书内容的研究奠定了基础;现代信号处理理论^[19,20]、数据挖掘^[21,22]、人工智能和信息融合^[23,24]等理论的发展又为本书内容的研究提供了新的理论依据。同时,高性能高速度信息处理硬件的发展,为获取更丰富的瓦斯灾害信息、提取瓦斯灾害特征及进行融合决策提供了高效实时的实现手段。特别是将多传感器信息融合技术应用在瓦斯灾害信息处理与决策预警方面,通过国内外查新,未见有关研究项目。在这一技术方面,我国与世界其他先进的采煤国家,如美国、俄罗斯、法国、澳大利亚、波兰、日本等类似,都在开展煤矿瓦斯突出危险性评价研究,不论是国内还是国外,大多是针对单一灾害的危险源进行静态评价,没有对灾害发生前的所有监测信息进行融合决策,如对煤层瓦斯压力、煤层温度、AE 声发射监测信息^[25~27]、电磁辐射监测信息、探地雷达监测信息^[28]等多种信息进行信息融合^[29,30],综合判断是否存在瓦斯灾害危险性。

计算机技术的发展推动了监测监控技术的发展^[31],监测系统从独立的仪器设备发展到了集成硬件和软件于一体的虚拟仪器测量系统(即软仪器仪表系统),测量技术从依靠仪器设备的传统测量技术发展为可利用计算机作依托平台的“软测量技术”。“The software is the instrument”(软件就是仪器),这是美国 National Instrument 公司(国家仪器公司)提出的口号。监测信息的分析和处理问题与监测系统的硬件技术在瓦斯灾害监测过程中是同等重要的,在现有监测监控硬件技术水平的基础上,通过对采集到的数据进行挖掘分析、辨识分类等加工处理,不仅可提高监测监控的准确性和可靠性,还能预测煤矿瓦斯变化趋势,捕获瓦斯灾害信息。

瓦斯灾害同其他客观事物一样,也有一个发生、发展的过程,甚至是从量变到质变的过程。在灾害发生前,会有一些征兆出现。只要及时捕捉到这些信息,加以分析处理,及时采取得力措施,就能够将灾害带来的损失降至最低,甚至避免灾害的发生。因此,如何对瓦斯灾害信息进行采集、征兆提取和融合决策,以实现瓦斯灾害实现自我诊断,这对保障煤矿安全和矿工生命安全具有重要意义。

1.2 煤矿瓦斯灾害的类型及危害

瓦斯是井下采掘过程中从煤和围岩中涌出的有害气体的总称,如甲烷(CH_4)、

二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H_2S)、乙烷(C_2H_6)、乙烯(C_2H_4)、氢气(H_2)、二氧化硫(SO_2)等。由于甲烷占90%以上,因此煤矿瓦斯一般指甲烷。

在开采过程中,瓦斯会从煤体中释放出来,弥漫在矿井中^[32]。由于煤矿井下瓦斯的主要成分是甲烷,易燃易爆,故瓦斯爆炸是煤矿最严重的瓦斯灾害。

瓦斯是煤炭生成过程中的伴生气体,它以吸附和游离两种状态存在于煤体及周围岩层之中,这两种状态不是一成不变的,它们处于不断变化的动态平衡之中,在一定条件下会相互转化。在采掘过程中,会造成地应力的变化,破坏煤体中瓦斯的动态平衡状态,诱发煤与瓦斯突出^[33]。瓦斯突出又会导致瓦斯爆炸、瓦斯窒息等瓦斯灾害的发生。

1.2.1 瓦斯爆炸

1. 瓦斯爆炸的条件

并不是当煤矿井下有瓦斯气体时就能发生瓦斯爆炸,瓦斯爆炸必须同时满足三个条件:①瓦斯浓度处于爆炸界限(5%~16%)内;②有足以引爆瓦斯的火源或能量;③空气中氧气含量大于12%。

在瓦斯爆炸三要素中最容易获得的条件是空气中的氧气含量,爆炸发生要求的条件是大于12%。在正常通风风流中氧气的含量通常大于20%,而引起其浓度下降的原因有两个:自身的消耗和其他气体涌入后的稀释。

在井下,引起瓦斯爆炸的点燃源较多。从空间上来看,点燃是从很小的一个点发展开来的,因此,集中放散的任何形式的能量都很容易点燃瓦斯,而均匀加热的一块热板,只有达到很高的温度(如接近瓦斯的自燃温度650℃)才能点燃瓦斯。例如,从顶板落下的一块岩石,如果是落在输送机胶带上,则能量被柔软的胶带分散,因此很难引燃瓦斯;而如果是落在坚硬的机械设备表面或岩石上,能量集中在撞击点上放散,则很可能产生足以引燃瓦斯的火花。煤矿井下引起瓦斯爆炸的点燃源主要有如下几类:一是机械类,包括机械运行中的摩擦、坚硬岩石及钢铁支架、设备之间的撞击;二是电气类,与输电线路、电气设备有关的电火花、电弧、电器失爆等;三是火焰类,有燃烧反应的点燃,如吸烟、火灾、气体切割和焊接等;四是炸药类,与炸药爆破有关的点燃,如使用非许可炸药、钻孔充填不当引起爆破火焰等。此外还有其他上述不包含的点燃,如闪电、压缩管路破裂气体喷出等。

如果井下的瓦斯浓度处于爆炸界限5%以下,即使有引爆火源(点燃源),也不会引起瓦斯爆炸。可见,风流中的瓦斯浓度是爆炸三要素中最容易控制的因素,也是防治瓦斯爆炸最根本的方法^[34]。

2. 瓦斯爆炸造成的危害

煤矿井下一旦发生瓦斯爆炸,将会给矿井带来严重的损害,其危害主要体现在

以下几方面:

(1) 人员伤亡。瓦斯爆炸后产生的冲击波超压给附近人员造成冲击伤害,爆炸的高温火焰能造成人员烧伤^[35]。我国煤矿伤亡事故中瓦斯爆炸伤亡人数占居首位,其中掘进工作面发生瓦斯爆炸事故的次数为最多。

(2) 诱发煤尘爆炸。若井巷中沉积着足够量具有爆炸危险的煤尘时,冲击波将煤尘扬起,引起煤尘爆炸,迅速增强爆炸威力。一般局部瓦斯爆炸的破坏范围不会太大,但如果诱发巷道中沉积煤尘爆炸,则必然扩大破坏范围,有时会波及整个矿井。另外煤尘燃烧反应不完全时会产生大量 CO,致使井下人员中毒死亡。煤矿中的重大恶性事故通常是瓦斯、煤尘同时参与爆炸造成的。

(3) 造成火灾。矿井火灾易引发瓦斯爆炸,反之瓦斯爆炸也易引起矿井火灾。瓦斯爆炸时产生大量热量,使周围环境温度可升高到 1850℃ 以上,瓦斯爆炸产生的高温火焰能使井下坑木、煤炭等易燃物体燃烧,引起矿井火灾。

(4) 破坏设备及通风系统。瓦斯爆炸时井下气体迅速膨胀,使有限空间内气压迅速增加,高温高压气体形成强大的冲击波,会使波及的通风、生产设备受到不同程度的损害,有的甚至造成巷道垮塌和整个通风系统破坏。

1.2.2 煤与瓦斯突出

煤与瓦斯突出是煤矿矿井中的严重灾害^[36],是瓦斯特殊涌出中危害性最大的一种。煤与瓦斯突出是指随着煤矿开采深度的增加、瓦斯含量的增加,软弱煤层突破抵抗线,瞬间释放大量瓦斯和煤并伴有震动声响和强烈冲击的地质动力灾害。瓦斯突出的强度与煤体中瓦斯含量、煤层中瓦斯压力、地应力等因素有关。在煤与瓦斯突出过程中,游离瓦斯可以自由逸出,吸附瓦斯亦可从煤体中解吸。显然,煤体中的瓦斯含量越高,突出的强度及瓦斯涌出量亦会越大,煤矿开采深度越深,瓦斯瞬间释放的能量也会越大。霍多特先生提出了煤与瓦斯突出的“综合假说”,他认为:①煤与瓦斯突出是地压、高压瓦斯、煤体的结构性能三个因素综合作用的结果;②地压和瓦斯压力是引发突出的能源,地压破碎煤体是造成突出的首要原因,瓦斯压力是完成突出的主要能源;③煤的结构和强度制约和影响突出的发生。

含瓦斯煤岩突出是在很短时间内从煤岩壁内部向采掘工作面突然喷出煤岩和瓦斯的现象,它不仅破坏矿井通风系统,使井巷充满瓦斯和含瓦斯煤岩抛出物,同时可能引起瓦斯爆炸与火灾事故,导致生产中断等。特别是随着开采深度的增加,瓦斯压力和地应力增大,煤与瓦斯突出的危险性也在增加,突出危险区域也在扩大,部分原无突出危险的煤矿也开始出现动力现象,造成含瓦斯煤岩突出诱发的灾害越来越多。从系统的观点来看,煤与瓦斯突出是相应的含瓦斯煤岩系统在外界扰动下发生的动力失稳现象。

1.2.3 瓦斯燃烧

瓦斯燃烧对于煤矿井下也是一种灾害。

瓦斯在空气中浓度低于5%时,瓦斯遇火可以燃烧,但没有足够的燃烧热量向外传播,所以不会发生爆炸。

瓦斯浓度超过16%时,由于混合空气中氧气的含量不足,混合气体也没有爆炸性,但遇有新鲜空气时,瓦斯可在混合体与新鲜空气的接触面上燃烧。

瓦斯燃烧能引起矿井火灾,瓦斯燃烧也可能转化为瓦斯爆炸。从广义上说,瓦斯燃烧实际上是一种反应速度较慢、威力较小的爆炸。

1.3 瓦斯灾害信息获取的硬件基础平台

瓦斯灾害信息是依靠瓦斯监测系统和瓦斯灾害监测仪这一硬件平台来获取的。这些监测设备获取瓦斯灾害信息的方式有两种:一是利用瓦斯监测系统直接获取井下瓦斯浓度等参数,监测系统通过这些监测数据对灾害进行判断;二是对于不能直接获取的瓦斯灾害信息,如瓦斯突出灾害信息,则需利用瓦斯灾害监测设备对瓦斯灾害的相关参数进行监测,间接获取瓦斯灾害信息。

1.3.1 井下瓦斯浓度及相关参数采集与监测

煤矿瓦斯监测系统是多参数监测系统,主要是对甲烷(CH_4)、一氧化碳(CO)等有毒有害气体的浓度、风速、负压、温度等井下环境参数及主要运行设备的运行状态进行监测。

国外煤矿监控技术是20世纪60年代开始发展起来的,至今已有四代产品,基本上5~10年更新一代产品。从技术特性来看,主要是从信息传输方式的进步来划分监控系统发展阶段的。国外最早的煤矿监控系统的信息传输采用空分制来传输信息,第二代产品的主要技术特征是信道的频分制技术的应用,第三代是以时分制为基础的煤矿监控系统,第四代是以分布式微处理器为核心、全数字通信为基础的煤矿监控系统。我国在20世纪80年代中期,从欧美国家先后引进了数十套矿井监测系统及配套的敏感元件的制造技术,由此推动了我国矿井安全生产监测技术的发展,将瓦斯监测系统发展到集计算机、通信、传感技术于一身的多参数多功能的监测监控系统。

近年来,国内相继研制出一批煤矿监控系统和地面工业集中控制系统,出现集环境安全监测监控、煤矿生产监控、皮带监控、瓦斯抽放泵站监控、信息管理于一体的多功能综合性监测监控系统,技术水平有较大提高。目前,煤矿安全生产监测监控系统正向着集成化、智能化、网络化、柔性化、可视化的方向发展。无线传感器网

络、现场总线技术以及远程无线通信技术的应用,将推动煤矿安全监测监控系统的进一步发展。

1.3.2 瓦斯突出灾害信息的获取技术

从 160 多年前世界上第一次发生煤与瓦斯突出灾害以来,人们就在为防治这种灾害做着不懈的努力。

在预测煤与瓦斯突出危险性技术方面,苏联学者根据勘探钻孔积累的大量测井资料预测煤层突出危险性,如煤层瓦斯含量、瓦斯压力、煤的瓦斯放散初速度、煤的普氏硬度系数、煤的电阻率、煤的基团结构、煤的孔隙结构、 γ 射线测井深度等;德国、英国等国学者根据煤的瓦斯解吸指数、解吸量预测煤层的突出危险性;澳大利亚、美国等国学者根据直接法测定煤层瓦斯含量预测煤层突出危险性;苏联学者根据钻孔测定采掘工作面前方煤体中的钻孔瓦斯涌出初速度、钻屑量指标预测突出危险性^[37,38]。我国学者从 20 世纪 80 年代开始对预测煤与瓦斯突出危险性技术进行了深入研究,已经形成构造煤分布、顶底板封闭性能、瓦斯地质统计、地质动力区划、物探法探测构造煤和瓦斯富集区、石门揭煤测定相关指标、瓦斯压力、煤的普氏硬度系数、煤的破坏类型、煤的瓦斯放散初速度、煤的比表面积、煤的孔隙结构等预测煤层和区域突出危险性技术,钻屑瓦斯解吸指标法、钻孔瓦斯涌出初速度法、钻屑量指标法、煤壁和钻屑温度指标法等预测采掘工作面突出危险性技术,并研究了不同煤层条件下预测突出危险性敏感指标及临界值确定方法。这些预测技术已在国内各矿区推广应用。

目前使用的瓦斯突出灾害超前探测仪器主要有两类。一类是电磁波原理的,主要有地质雷达等,其特点是探测精度高,但探测距离近。发生突出的煤层的重要特征是存在受构造严重破坏并具有发生瓦斯突出的瓦斯能(含有大量瓦斯)介质条件的煤体,根据文献[13]~[15]可知,突出煤和非突出煤的电阻率和介电常数存在很大的差异,同时越来越多的生产实践证明灾害易发区煤层的电磁波场具有独特性。根据瓦斯突出灾害的这一规律特性,近几年,国内研制了煤岩电磁辐射等非接触式探测瓦斯突出危险的仪器设备。

另一类是弹性波原理的,其特点是探测距离远。煤矿开采过程,会造成地应力的变化,破坏原有的平衡状态,因而诱发瓦斯突出。煤体受外力作用产生变形、断裂或内部应力超过屈服极限而进入不可逆的塑性变形阶段,以瞬态弹性波形式释放应变能的现象,亦称声发射^[39]。声发射弹性波能反映出煤体状态和性质,声发射检测技术就是根据瓦斯突出前煤体自动发出瞬态弹性波的这一特征进行的。它是无损检测中的一种新方法^[40],与超声等常规无损检测方法相比,声发射检测技术具有三大优点:①声发射检测的信号来自检测对象本身,因此能够对检测对象实现实时监测;②检测覆盖面广,不需要移动传感器做繁杂的扫查操作,只需要布置

好足够数量的传感器就可以实现对某一区域内的声发射监测^[41]；③应用面广，几乎所有的材料都可以进行声发射检测，并且声发射检测不受检测对象的尺寸、几何形状、工作环境等影响^[42]。因此，如今声发射检测已经广泛地应用在石油化工工业、电力工业、材料试验、民用工程、航天和航空工业、金属加工、交通运输业等领域，而且应用领域正在生物等领域拓宽。更甚者，在某些场合，如压力容器、油罐等大型构件的在役检测，声发射技术已经成为唯一可行的检测手段。

自20世纪60年代以来，苏联基于人工监听AE声发射的预测技术已在其各矿区得到了应用。波兰等国在研究和应用以声发射检测技术为基础的突出预测方法和监测系统方面做了大量工作。其后在德国、美国和日本等国的煤矿也有新的发展和应用。

美国、加拿大对于矿山的冲击地压预测、地热开发中人工裂隙的评价、地下废弃物处理设施对岩体稳定性的要求等也进行了研究工作。

德国在鲁尔矿区的煤矿中利用AE声发射技术对瓦斯突出进行预测，并在20世纪70年代中期开始在煤层内设置地震检波器进行观测。波兰从1963年开始为预测采煤时发生的冲击地压和瓦斯突出引进了AE法，并加以深入研究。

我国自20世纪80年代初开始研究声发射探测技术，起初主要在航天、航空领域，以后发展到锅炉、机械、医学领域，主要利用AE声发射技术的无损探伤特点。煤炭系统从“七五”期间开始对声发射技术做了一些初步的探索和研究，从实验室建设到现场实验方面都积累了一些经验。煤炭科学研究总院重庆分院、抚顺分院都进行了主要用于预测煤与瓦斯突出危险性的AE声发射预测技术的研究，重庆分院于1995年研制，1997年完善定型了以AE声发射、瓦斯涌出动态变化、煤体温度变化预测煤与瓦斯突出危险性的安全监测系统，西安分院于1998年研制了AE声发射预测矿井冲击地压危险的监测技术和系统。煤炭科学研究总院重庆分院、东北大学、中国矿业大学、重庆大学等对岩石硅材料在载荷作用下的AE声发射特征进行了实验研究。长沙矿山研究院、中国科学院、武汉安全环保研究院等研制了带显示和耳机的AE声发射监测系统，主要靠人工监听信号来判断工程稳定性情况。

制约声发射技术在矿井中的推广应用的一个主要因素就是信息处理问题，即干扰噪声的排除问题。目前，如何对声发射信号进行分析和处理来获取有用的声发射源信息是声发射检测技术应用的关键问题。本书的研究为解决这一问题提供了理论依据和科学方法。

1.4 瓦斯灾害信息的特征提取与信息融合技术

特征是存在于时间或者空间中可观察的事物，如果可以区别它们是否相同或是否相似，都可以称之为特征。特征不是指事物本身，而是从事物获得的信息，因