

国家自然科学基金项目 (70673097、71273208、71271169、71403204、51504185) 资助
教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20116121110002、20126121110004) 资助
陕西省教育厅教育教学改革与研究项目 (13BY46、15BY46) 资助
西安科技大学教育教学改革与研究项目 (JG14049) 资助

基于三类危险源划分的 煤矿瓦斯爆炸事故机理与预警研究

王 莉 ○ 著

Research on Mechanism and Early-warning of
Coal Mine Gas Explosion Accidents Based on Three-Type of Hazards Division

中国矿业大学出版社

国家自然科学基金项目(70673097, 71273208, 71271169, 71403204, 51504185)资助

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20116121110002, 20126121110004)资助

陕西省教育厅教育教学改革与研究项目(13BY46, 15BY46)资助

西安科技大学教育教学改革与研究项目(JG14049)资助

基于三类危险源划分的煤矿 瓦斯爆炸事故机理与预警研究

王 莉 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

煤矿瓦斯爆炸危险源系统是一个复杂的涉及人-机-物-环-管理等诸多因素的集合。全面系统地开展瓦斯爆炸事故机理与预警研究是瓦斯管理中迫切需要解决的课题。本书基于三类危险源理论,对瓦斯爆炸危险源系统结构和事故机理进行分析,开展三类危险源的预警模型及预警方法研究,在新的视角下为煤矿瓦斯爆炸事故预防和预警提供了理论探索和尝试。

本书可供矿业工程、安全工程等相关专业的高等院校、科研院所的师生、研究人员及企业的技术管理干部参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于三类危险源划分的煤矿瓦斯爆炸事故机理与预警研究/王莉著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2837 - 6

I. ①基… II. ①王… III. ①煤矿—瓦斯爆炸—研究
IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 220423 号

书 名 基于三类危险源划分的煤矿瓦斯爆炸事故机理与预警研究

著 者 王 莉

责任编辑 徐 玮 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 9.75 字数 197 千字

版次印次 2016 年 3 月第 1 版 2016 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

瓦斯灾害是威胁我国煤矿安全的头号杀手。煤矿瓦斯爆炸危险源系统是一个复杂的社会技术系统,是含有人-机-物-环-管理等诸多因素的集合。全面系统地认识各种导致瓦斯事故的危险源,进行瓦斯爆炸事故机理与预警研究是目前煤矿安全生产工作中迫切需要解决的课题。因此,本书在三类危险源划分的基础上,对瓦斯爆炸危险源系统结构和事故的机理进行分析,进而开展三类危险源的预警研究,在新的视角下为煤矿瓦斯爆炸事故预防和预警提供了理论探索和尝试,具有一定的理论价值和现实意义。

首先,本书对三类危险源划分进行重新界定,并对煤矿瓦斯爆炸危险源的系统复杂性进行了探讨,认为瓦斯爆炸危险源系统具有高度动态性、复杂性和耗散结构特征;利用解释结构模型方法,建立了煤矿瓦斯爆炸三类危险源系统的解释结构模型,通过建立邻接矩阵和可达矩阵对系统的结构要素进行分析,按照对瓦斯爆炸事故的直接影响程度将危险源归纳为四个层次,为煤矿瓦斯爆炸事故机理分析和瓦斯爆炸危险源预警自愈调控机制的提出奠定了基础。

其次,本书从机理方法论的角度对瓦斯爆炸事故机理进行研究,通过分析事故的发生、发展、演化和应急过程,阐述了瓦斯爆炸的原则性机理、原理性机理以及事故的发生、发展、演化过程等流程性机理;认为煤矿生产过程中三类危险源之间动态的、交互的、反馈的作用是导致瓦斯爆炸事故发生、发展及演化的原因。

第三,本书提出了煤矿瓦斯爆炸危险源预警的自愈调控机制,明确了自愈调控的定义、机理和功能,认为瓦斯危险源预警系统应通过对三类危险源的控制和调节来实现其自愈调控机制;从熵的流动角度诠释预警系统自愈调控机制的实现过程,进而对煤矿瓦斯危险源预警管理的对象、目标体系和内容进行阐述,建立了煤矿三类危险源预警模型,为三类危险源预警方法研究提供了模型依据。

第四,本书提出了针对煤矿瓦斯爆炸三类危险源的不同特点采用对应的三种预警方法。对于第一类危险源,建立多传感器模糊数据融合的第一类危险源预警模型;对于第二类危险源,根据集对理论,构造了联系度函数公式簇,提出了基于集对分析联系度的瓦斯爆炸第二类危险源预警方法;针对第三类危险源,借鉴熵理论与和谐理论,提出了和谐熵的概念和公式表达,建立基于和谐熵分析的瓦斯爆炸第三类危险源预警方法,并分别通过实例验证三种预警方法是可行的。本书从和谐理论、熵理论的角度研究瓦斯爆炸第三类危险源的预警问题,是此领域研究新的窗

口和尝试。

第五,本书通过对瓦斯爆炸事故驱动因子的归纳与分解,得到瓦斯爆炸三类危险源预警初步指标体系;采用粗糙集理论应用工具箱 Rosetta 软件进行指标约简过程,通过属性约简将初步的 60 个瓦斯爆炸三类危险源预警指标约简到 54 个,降低模式匹配搜索量;采用结构方程模型方法,进行变量设计和结构方程模型设计;通过调查问卷的设计及数据收集,采用 AMOS7.0 软件对模型的拟合情况进行检验并进行修正;提出煤矿瓦斯爆炸三类危险源系统三类驱动因子之间影响机理的假设,并且运算得到各隐变量和显变量之间的路径系数,结果支持了煤矿瓦斯爆炸事故三类危险源之间的影响关系假设;按照不同驱动因子之间的影响关系排序,证实了三类危险源之间的相互影响和相互作用,证明了第三类危险源在事故致因中的重要作用,尤其是安全管理组织因素,是对诸多驱动因子影响最大且关系最强的因素,最终验证预警指标体系建立的合理性。

最后,本书对煤矿瓦斯爆炸危险源预警系统结构进行设计和构架,并对煤矿瓦斯爆炸危险源预警三个子系统进行功能和预警流程分析;对瓦斯爆炸应急推理中的案例知识表示、案例检索算法、案例学习与修正步骤等进行阐述,为瓦斯爆炸预警系统的信息化实现提供了依据。

目 录

1	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	国内外研究现状	4
1.3	主要研究内容及研究方案	16
2	煤矿瓦斯爆炸三类危险源系统结构分析	19
2.1	煤矿瓦斯爆炸危险源系统复杂性探讨	19
2.2	基于解释结构模型的煤矿瓦斯爆炸三类危险源系统结构分析	26
2.3	小结	34
3	基于机理方法论的煤矿瓦斯爆炸事故机理分析	36
3.1	机理方法论概述	36
3.2	煤矿瓦斯爆炸三类危险源分析	39
3.3	煤矿瓦斯爆炸事故机理分析	44
3.4	小结	47
4	基于三类危险源的煤矿瓦斯爆炸危险源预警模型构建	49
4.1	预警的机制、功能和内涵	49
4.2	煤矿瓦斯爆炸危险源预警研究的对象、目标体系和内容	54
4.3	煤矿瓦斯爆炸危险源预警模型的构建	57
4.4	小结	58
5	煤矿瓦斯爆炸三类危险源预警方法研究	59
5.1	基于信息融合的瓦斯爆炸第一类危险源预警方法研究	59
5.2	基于集对分析联系度的瓦斯爆炸第二类危险源预警方法研究	72
5.3	基于和谐熵分析的瓦斯爆炸第三类危险源预警方法研究	76
5.4	小结	84

6 瓦斯爆炸三类危险源预警指标体系的构建	85
6.1 煤矿瓦斯爆炸三类驱动因子的归纳和分解	85
6.2 基于粗糙集的瓦斯爆炸三类危险源预警指标约简	88
6.3 基于 SEM 的瓦斯爆炸三类驱动因子影响关系分析	97
6.4 小结	113
7 煤矿瓦斯爆炸三类危险源预警系统设计	114
7.1 煤矿瓦斯爆炸危险源预警系统结构	114
7.2 煤矿瓦斯爆炸危险源预警系统功能分析	116
7.3 基于案例推理的瓦斯爆炸预警应急推理研究	122
7.4 小结	130
8 结论	131
8.1 主要结论	131
8.2 创新点	133
8.3 展望	133
参考文献	135
附录	145

1 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 研究背景

煤矿瓦斯事故是当前对煤矿安全生产威胁最大且最突出的一个问题。瓦斯事故造成的危害最为严重,而且易造成群死群伤的恶性事故。2008~2013 年我国共发生瓦斯类事故 306 起,死亡 2 505 人,其中煤与瓦斯突出事故 99 起,占 32.35%,死亡 746 人,占 29.78%;瓦斯爆炸事故 122 起,死亡 1 354 人,占 39.86%,如图 1-1 和图 1-2 所示。新中国成立以来,全国煤矿共发生 17 起一次死亡百人以上矿难,其中 13 起是瓦斯爆炸事故,死亡 2 291 人,事故起数和死亡人数分别占总数的 76.47% 和 86.26%。近年来,在加强煤矿安全监管的形势下,安全技术和安全装备水平已有大幅度提高,但是煤矿事故尤其是瓦斯事故仍然屡禁不止,仍然有诸多因管理不善、违章违法操作和盲目越界开采造成的事故,如 2009 年 2 月 22 日发生的山西省古交市国家重点煤矿屯兰矿特别重大瓦斯爆炸事故,导致了 78 人死亡;2009 年 11 月 21 日黑龙江省龙煤控股集团鹤岗分公司新兴煤矿发生特别重大瓦斯爆炸事故,108 人死亡等。2010 年 3 月山西王家岭煤矿透水事故就是因为赶超进度、盲目追求生产工程进度及忽视对灾害的预探工作而引发的。煤矿瓦斯灾害防治研究依然是煤矿安全亟待解决的热点课题之一。因此,如何发现煤矿生产中潜在的风险,如何在瓦斯事故发生之前对可能发生的危险进行科学的辨识、评价、预警和预控,并应用于煤矿企业的日常生产中,便成为当前煤矿安全生产中需要尽快解决的问题^[1]。

众所周知,对瓦斯进行监测并实施科学有效的预警是防止瓦斯重大事故的关键对策之一。要研究解决防治对策,必先认识事故发生、发展和演化的规律。尽管人们早已认识了瓦斯爆炸的三要素,但究竟是什么“背后原因”导致了瓦斯积聚超限和引燃温度等“隐患”屡屡出现,造成群死群伤甚至井毁人亡的灾难悲剧?对于这一问题,还存在许多挑战和认识不清的地方。尽管有不少瓦斯爆炸机理研究在瓦斯爆炸微观过程、传播及抑爆等研究方面取得了一定成果,为瓦斯爆炸防治对策措施的研究和设计提供了较好的支撑,但仅靠“物理或化学过程”的研究无法取代事故综合致因研究,也无法从人-机-物-环-管理综合的角度提升人们对瓦斯发生规律的综合认识水平,更难以消除高达 90% 以上的人因导致的煤矿瓦斯事故,也难

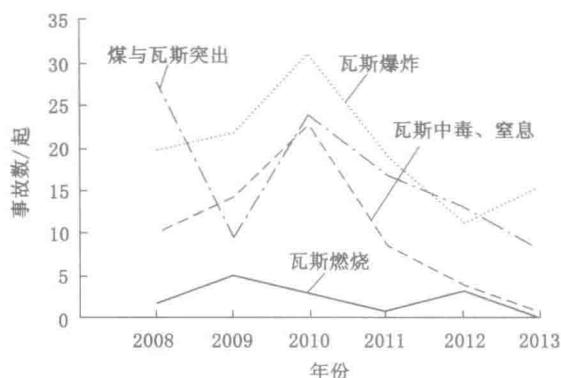


图 1-1 2008~2013 年瓦斯事故数变化

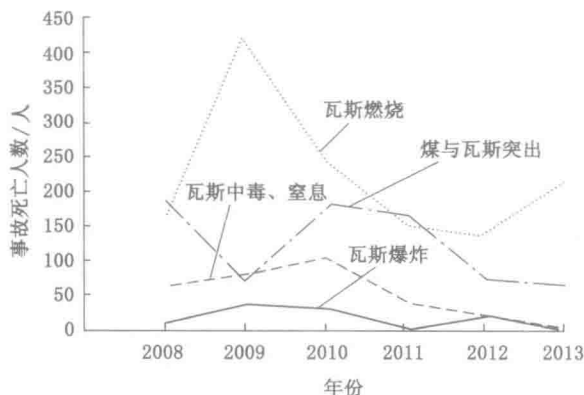


图 1-2 2008~2013 年瓦斯事故死亡人数变化

以有效提升瓦斯防治研究与实践水平。

一方面,人在煤矿生产中的失误或不安全行为的影响有增强趋势,人因失误比重增大。据统计,在所有导致我国煤矿重大事故的直接原因中,人因所占比例高达 97.67%;重大瓦斯爆炸事故中的人因比例达 96.59%,对国有重点煤矿而言,人因事故比例占 89.02%^[2]。煤矿井下存在复杂的人-机-物-环-管理因素交织的危险源系统,并在时间与空间上交织,目前从综合事故致因理论来看,重大瓦斯事故不仅与技术和硬件的配置有关,而且与人的行为、制度和管理密切相关,对其规律和防治对策的研究和认识还有待进一步提高。

虽然学者们对于瓦斯事故危险源的研究从“两类危险源”^[3]发展到“三类危险源”的划分^[4],将第三类危险源——不符合安全的组织因素(组织程序、组织文化与规则、制度等),包含组织人(不同于个体人)不安全行为和失误等分离出来作为研究对象,体现了人们对瓦斯事故机理探讨的深入过程,有利于揭示 90%以上重大瓦斯事故的

综合致因。但是关于“三类危险源”之间的影响作用程度以及哪些是煤矿瓦斯管理改善和控制的重点,目前仅仅靠经验,缺乏科学的数理论证作为支撑。

另一方面,虽然现有的瓦斯监控监测系统能提供较为丰富的数据,但由于预警的对象单一,主要针对瓦斯浓度、风速和温度等,加之瓦斯监控管理欠缺,致使数据的处理和利用相对简单,结构化或者半结构化的推理过程较为局限^[5],在警情出现的时候应急推理决策的智能性较差^[6],难以满足煤矿瓦斯预警管理的需求。因此,需要扩大预警的对象范围,深入探讨预警的内涵和机制,对不同的预警对象及其对应的预警方法开展研究。

所以,继续采用“单一学科”的理论和手段,仅仅面向化学过程或硬件技术,已经不能适应技术进步所引发的日趋复杂化的灾害系统的研究。需要引入交叉学科新理论、新方法和新视角及现代瓦斯事故灾害监测控制新理念和技术进行综合性交叉研究。鉴于此,本书在挖掘瓦斯爆炸事故“三类危险源”系统结构及事故综合机理的基础上,开展基于“三类危险源”划分的瓦斯爆炸事故预警的系统性研究,对于提升重大瓦斯事故防治对策的研究水平具有一定的意义。

1.1.2 研究意义

(1) 将丰富、扩展煤矿事故致因理论与瓦斯事故预防和控制的理论与方法。

通过安全科学和管理科学等多学科的交叉透视,从“三类危险源”的角度探寻煤矿瓦斯爆炸事故的发生、发展和演化机理,将丰富并扩展煤矿事故致因理论及瓦斯事故预防和控制的理论与方法,推进安全管理学和安全科学等的发展,将为煤矿瓦斯事故危险源及隐患的辨识、预防、预警和控制,遏制重大瓦斯及其他事故提供理论基础和借鉴。

(2) 将发展和验证“三类危险源”划分理论。

在对“三类危险源”系统结构分析的基础上,对较难辨识和控制的第二类 and 第三类危险源进行识别和量化分析,通过数理方法分析统计数据推算“三类危险源”之间的影响关系,是对“三类危险源”划分理论的发展和验证。

(3) 弥补瓦斯预警机制中防控人的不安全行为和组织管理等因素的不足。

通过掌握瓦斯爆炸事故发生的深层驱动因子,对潜在的危险源进行全面、科学地辨识、评价和预警,弥补瓦斯预警机制中防控人的不安全行为和组织管理等因素的不足,并阐明预警机制,对不同的预警对象研究不同的预警方法,能丰富煤矿事故预警理论,为重大瓦斯事故的实时、有效预警和应急一体化管理提供思路和依据,以更有效地预防和控制煤矿瓦斯重大灾害。

(4) 有利于指导煤矿瓦斯事故的预防和控制,现实意义显著。

基于“三类危险源”的煤矿瓦斯爆炸事故机理及预警研究,使得对瓦斯危险源的辨识和控制对策选取更全面、更有效,将为煤矿安全管理、事故防控对策的设计、选择和优化提供参考;为国家宏观安全管理和监察及煤矿安全评价等决策的制定和实施提供决策依据,有利于煤矿变事后处理为事前预测预防,变纵向单一管理为

综合管理,有利于提高矿井安全管理水平和防灾抗灾能力。

总之,开展基于“三类危险源”的瓦斯智能预警研究,既具有重要的安全科学理论价值,又对改善煤矿安全、促进煤矿事故预防和控制具有十分重要的现实意义,具有一定的社会效益和经济效益。

1.2 国内外研究现状

鉴于本研究涉及安全科学、管理科学及信息科学等多学科的综合交叉领域,内容包括对瓦斯事故致因和机理研究、危险源辨识与分类、预警机制及方法等内容,因此,从以下两个方面对国内外研究现状进行综述。

1.2.1 对煤矿瓦斯爆炸事故的研究现状

瓦斯灾害是煤矿中最严重的灾害之一。从每年的事故统计来看,煤矿发生一次死亡 10 人以上的特大事故中,绝大多数是由于瓦斯爆炸引起的,约占特大事故总数的 70%。瓦斯爆炸不仅造成大量人员伤亡,而且还会摧毁井巷设施,中断生产,有时还会引起煤尘爆炸、矿井火灾和井巷垮塌等二次灾害。瓦斯突出不仅能摧毁井巷设施、破坏矿井通风系统,而且使井巷充满瓦斯和煤抛出物,造成人员窒息和煤流埋人,甚至可能引起瓦斯爆炸与火灾事故^[7]。因此,控制瓦斯一直是各产煤国煤矿安全的主攻方向之一。

国外对瓦斯的研究主要集中在瓦斯的预测和抽采方面,执行先抽后采和严格控制瓦斯浓度的管理规定,因此瓦斯事故控制得力。近 20 年来,各国煤矿瓦斯监测系统发展很快,为防治瓦斯事故起了重要作用。另外,国外在不断完善瓦斯突出跟踪预测的基础上,开展了研究瓦斯突出的动态预测技术和突出危险区域预测技术。在我国,对煤矿瓦斯事故的研究“关口前移”,许多学者、研究院所都从不同角度开展了瓦斯防治技术和装备、瓦斯事故原因分析及控制、瓦斯事故应急管理等方面的研究,在“事前”、“事中”和“事后”各有侧重,并取得了一定的成果。

由于瓦斯突出事故主要取决于煤层中地应力和瓦斯压力,煤结构及力学性质是影响突出发生的因素^[8],该研究已自成体系,不是本研究的侧重点。本研究主要侧重于有人的活动参加并起影响作用的瓦斯爆炸事故。

1.2.1.1 对瓦斯爆炸事故的物理机理研究

目前,被公认的瓦斯爆炸事故机理即瓦斯爆炸“三要素”:爆炸点积聚了达到一定浓度的瓦斯气体、适当的点火源和充足的氧气^[9]。因此针对这“三要素”(实质上是瓦斯浓度和点火源两个要素,氧气浓度一般都满足),主要开展以下五个方面的研究。导致瓦斯爆炸事故的物理机理研究相对成熟,不是本书主要研究内容,因此仅作简要介绍。

(1) 瓦斯浓度的控制。主要通过风网解算、风网分区等方式优化通风网络及通风系统,以防止瓦斯积聚,控制瓦斯浓度。例如,王俭(2008)将煤矿生产系统的

安全管理划分为以采煤工作面和掘进工作面为基础的安全分区^[10],在研究致灾因素发展耦合规律的基础上构建煤矿安全逻辑系统;杨蔓(2009)开展了最短路径算法在煤矿安全分区分析中的应用研究^[11];魏引尚(2004)基于概率统计对通风巷道瓦斯积聚危险性进行分析^[12];万善福等(2008)采用集对分析法在煤矿通风系统进行评价研究^[13];王树刚等(2003)建立了矿井正常和灾变时期通风网络解算的数学模型^[14];谭家磊等(2006)对矿井通风系统 BP 网络评价法的可行性进行研究^[15];黄俊歆等(2012)对矿井通风系统优化调控算法与三维可视化关键技术展开研究,提出了用于风机优化选型的 FOMR 模型,利用风网按需分配解算的结果来计算待选风机的工况点,然后搜索风机数据库查找匹配的风机,提出了用于搜索通路的 GAFP 算法,并集成于 DIMINE 矿山数字化软件平台中。

(2) 瓦斯涌出量的预测、瓦斯抽采。研究煤层瓦斯的形成和迁移规律,测定煤层瓦斯含量,是正确预测矿井瓦斯涌出量的基础。例如,张大伟等(2009)应用灰色系统理论中的多维灰色评估方法,对煤与瓦斯突出灾害进行预测^[16];黄为勇等(2009)提出了一种基于支持向量机(SVM)的瓦斯涌出量非线性组合预测方法^[17];邵良杉(2009)应用粗糙集理论建立了煤矿瓦斯灾害预测的数据挖掘模型^[18];邵良杉、付贵祥(2008)基于数据融合理论解决了瓦斯预测过程中的不确定性和不精确性问题^[19];吕闰生等(2009)建立了瓦斯涌出量预测模型,通过瓦斯地质预测对未采区瓦斯涌出进行预测^[20];杨桢等(2008)将蚁群优化算法和 BP 神经网络技术结合并应用到瓦斯涌出量的预测中^[21];孙林嘉等(2009)建立了煤矿瓦斯预测知识获取模型^[22],解决煤矿瓦斯预测知识获取困难的问题;魏小红等(2014)基于流形学习算法和支持向量机进行了矿井瓦斯涌出量预测。

(3) 瓦斯监控系统研究。煤矿安全生产监控系统通过监测影响煤矿安全生产的环境参数因素,如瓦斯、一氧化碳、风量、温度、顶板压力、粉尘和风压参数等,以及机电设备的运行参数,来实时监测矿井的安全生产状况。瓦斯监控系统的研究处于瓦斯预防“事前”和“事中”的控制阶段。

国外研制矿井计算机监控系统始于 20 世纪 60 年代。20 世纪 70 年代和 80 年代,美国、法国和英国等先后研制应用了多种型号的矿井监控系统,其中有代表性的一些系统已陆续引入我国。如美国的 SCADA 系统、英国的 MINOS 系统、德国的 TF-200 系统、法国的 CTT63/40 系统、加拿大的森透里昂系统。上述系统均是综合型监测系统,但侧重于安全参数的监测和控制^[23-25]。引进的这些系统,普遍存在着性价比比较低,系统软件(特别在文档处理方面)不太符合我国国情等问题。

20 世纪 80 年代后,我国陆续从国外引入数十套监控系统,这在我国煤炭行业中发挥了积极的作用,也为我国研制矿用监控系统提供了很好的借鉴。我国对安全监测监控技术的应用较晚,始于 20 世纪 80 年代初期,先后研制出 KJ2、KJ4、KJ8、KJ10、KJ19、KJ38、KJ66、KJ75、KJ80、KJ92 等煤矿安全监控系统。随后,国内各主要科研单位和生产厂家又相继推出 KJ90、KJ95、KJ101、KJF2000、KJ2000

和 KJG2000 等监控系统,以及 MSNM、WEBGIS 等煤矿安全综合化和数字化网络监测管理系统。目前已出现了红外瓦斯传感器技术、采用了基于 IP 的工业以太网通信技术的 KJ90 分布式网络化煤矿综合监控系统,但是总的来说,由于这些系统监测参数单一、监测容量小、电缆用量大、系统性价比较低,难以满足煤矿安全生产的需要,现有系统只对监测信息作简单处理,监控系统缺乏智能化决策,因此无法由监测系统进行危险性评价,获得最优安全生产方案,所谓事故预警也只能根据监控系统得出的瓦斯浓度等指标超限进行报警。

(4) 火源的现场管理。对生产性火源主要通过加强现场管理、严格动火规章制度来实现;对于非生产性火源,一方面要预防内因火灾即煤炭的自然,另一方面要控制人的行为,预防外因火灾的发生,处于“事中”的防治阶段。对煤矿井下的爆破火花、电气火花、摩擦撞击火花、静电火花、煤炭自燃等火源都有一些相应的防治措施,除炸药安全性检验、电器防爆检验、摩擦火花检验外,还需防止火源与瓦斯积聚在同时同地点出现,如爆破时检测瓦斯浓度,采用风电闭锁、瓦斯电闭锁等措施。另外加强生产性火源的管理,严格动火制度,消除引爆瓦斯的火源。金小汉(2008)从煤矿井下引发瓦斯爆炸的火源种类出发^[26],分析了电气、摩擦撞击、静电、爆破、煤自燃等各种火花诱因,并从技术和管理两个层面,提出了相应的应对措施;屈庆栋、许家林等(2006)进行了综放开采顶板冒落撞击摩擦火花引爆瓦斯研究^[27]。

(5) 通过数值模拟、实验等方式对瓦斯爆炸过程进行分析。通过数值模拟软件等对瓦斯爆炸的物理过程、有限空间内瓦斯爆炸及其传播过程等进行模拟和分析,处于“事后”的实验、分析阶段。例如,秦波涛、王德明等(2009)对采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术进行研究^[28],理论分析了煤自燃引爆瓦斯的可能发生区域和参与过程;朱迎春、周心权等(2009)采用模拟软件 FLUENT 进行了封闭火区注惰气引发瓦斯爆炸的数值模拟^[29];匡伶俐(2008)开展基于粒子系统瓦斯爆炸模拟研究^[30];陈学习等(2004)研究了基于虚拟现实的矿井瓦斯爆炸模拟关键技术^[31];侯玮、曲志明等(2009)运用 Autoreagas 数值分析系统对掘进巷道置障条件下瓦斯与空气混合气体的燃烧爆炸进行分析和研究^[32];李树刚、李孝斌等(2010)进行了矿井瓦斯爆炸感应期确定方法的实验研究等^[33];周忠宁等(2009)对瓦斯爆炸过程中的流体力学行为给出了理论解释^[34];耿瑞雄等(2014)采用 FLUENT 流体力学软件,采用有限速率/涡耗散模型对巷道密闭与敞口条件下的巷道瓦斯爆炸进行瓦斯爆炸数值模拟。

1.2.1.2 对危险源辨识、评价及控制的研究

对煤矿危险源的研究内容集中表现为将煤矿生产中存在的危险源进行辨识、分类、分级,进而进行评价、提出控制措施等,处于“事前”和“事中”的防治阶段。

例如,孙猛、吴宗之等(2003)对煤矿重大危险源辨识评价进行研讨^[35];张甫仁、景国勋(2002)提出了从危险源系统事故的伤害模型来研究矿井瓦斯爆炸事故的严重程度方法^[36],并结合矿井瓦斯爆炸事故的实际,建立了瓦斯爆炸事故冲击波的伤害模

型;徐尚仲、朱传杰等(2007)基于模糊综合评判方法对煤矿瓦斯爆炸重大危险源进行辨识与风险评价^[37];姜光杰、郭德勇等(2006)从职业安全健康管理体系角度,探讨了煤矿危险源辨识问题,并设计了以煤矿安全信息管理系统为基础的危险源辨识系统^[38];李贤功、孟现飞(2009)研究了基于危险源的煤矿事故预警与管理方法^[39];张安元(2004)采用德尔斐法对煤矿重大危险源进行量化从而实现对重大危险源的分级控制^[40]。在煤矿安全评价方面,有将灰色理论应用于煤矿安全评价,并提出了灰色关联度评价法和灰色聚类评价法^[41];也有将神经网络(ANN)应用于煤矿通风系统、煤矿安全生产管理、矿井生产系统等方面的评价研究^[42]。此外,许满贵(2006)对煤矿的综合动态安全评价进行研究^[43];李江、林柏泉(2007)对煤矿动态安全评价及预测技术进行研究^[44];在非线性动力学研究方面,施式亮等(2001)探讨了具有非线性动力学完整特性的矿井安全生产系统神经网络评价方法和技术^[46]。

在危险源分类方面,田水承(2001)在陈宝智(1995)“两类危险源”理论基础上建立的“三类危险源”理论,是国内研究危险源分类的代表之一,详见表 1-1。其中,“第三类危险源”的概念自提出以来也得到许多业内人士的认可,魏绍敏等(2004,2005)在三类危险源的理论基础上,针对煤矿领域进行了人因事故发生机理及防范对策研究^[46,47],认为组织管理失误是诱发煤矿人因事故最隐蔽、最难发现的一种间接动态触发型危险源,应用灰色预测模型对煤矿人因事故进行了预测,并建立了煤矿生产系统人因组织行为安全控制综合模型。此外,还有江兵、白勤虎等(1999)提出的固有型和触发型危险源分类^[48],将生产系统中客观存在的各种能量的物质称为固有型危险源,把固有型危险源正常存在的条件遭到破坏的各种硬件和软件保障系统故障称为触发型危险源,这在本质上与两类危险源划分类似,也是对危险源研究领域的研究成果之一。

表 1-1

有代表性的危险源分类研究

名称	提出者	时间	内容		
两类危险源理论	陈宝智	1995	第一类危险源指能量物质或载体	第二类危险源指使能量物质或载体的约束、限制措施失效、破坏的原因因素	奠定了国内对危险源及事故致因研究的基础
固有型和触发型危险源	江兵、白勤虎等	1999	固有型危险源和触发型危险源共同造成事故。触发型危险源是引发固有型危险源能量失控的外在因素,是危险源监控管理的主要对象		
三类危险源理论	田水承等	2001	第一类危险源指能量载体或危险物质、致灾信息等	第二类危险源指物的故障、物理性环境因素,个体人失误	第三类危险源指由于安全管理决策失误、组织失误(组织程序、组织文化、组织规则等),组织人(不同于个体人)的失误造成系统失衡的不安全组织因素

虽然三类危险源划分理论也得到了一些学者的发展和引用,但是总的说来,目前对三类危险源的研究也仅局限于对危险源的分类、辨识与评价,三类危险源之间的作用关系和影响程度尚未得到系统、深入的研究。

1.2.1.3 从事故致因理论研究瓦斯事故机理

事故致因理论是从大量典型性事故的本质原因分析中所提炼出的事故机理和事故模型,能够反映事故发生的规律。对瓦斯事故分析主要建立在事故致因因素识别的基础上,对各因素影响模式的规律进行研究,重在“事前”的理论分析。具有代表性的事故致因理论的核心思想及特点见表 1-2。

表 1-2 具有代表性的事故致因理论列表

模型名称	提出者	年份	核心思想	特点
海因里希事故因果连锁理论,即“多米诺骨牌”理论	海因里希 (Heinrich, 美国)	1936	伤亡事故的发生不是一个孤立的事件,而是由一系列事件相继发生的结果	首先提出人的不安全行为和物的不安全状态的概念,但把人的不安全行为和物的不安全状态的产生原因完全归因于人的缺点
瑟利模型	瑟利 (J. Surry, 美国)	1969	根据人的认知过程分析事故致因的理论。把事故的发生过程分为危险出现和危险释放两个阶段。这两个阶段各自包括一组类似的人的信息处理过程,即感觉、认识和行为响应	不仅分析了危险出现、释放直至导致事故的原因,而且还为事故预防提供了一个良好的思路
威格里斯沃思模型	威格里斯沃思 (Wigglesworth, 英国)	1972	人失误构成了所有类型事故的基础。把人误定义为“人错误地或不适应地响应一个外界刺激”	把事故完全归因于人误,未考虑“机”、“环”的因素
劳伦斯模型	劳伦斯 (Laurence, 南非)	1974	在威格里斯沃思和瑟利等人的人失误模型的基础上提出的,针对金矿企业以人失误为主因的事故模型	以个体人行为作为分析对象,包含人的信息处理过程以及人的行为对事故的影响
博德事故因果连锁理论	博德 (Bird, 美国)	1974	在海因里希事故因果连锁理论基础上提出,认为事故的根本原因是管理失误	与现代安全观点更加吻合,但把事故原因完全归因于管理失误

续表 1-2

模型名称	提出者	年份	核心思想	特点
亚当斯事故因果连锁理论	亚当斯 (Adams, 英国)	20 世纪 60 年代	认为管理失误是造成事故的最根本原因, 处于事故链的最前端	对造成现场失误的管理原因进行了细致的分析
“瑞士奶酪” (也称 Reason 模型)	詹姆斯·瑞森 (J. Reason, 英国)	1991	强调在人因事故产生的过程中, 组织管理错误所起的作用最重要	提出了组织因素对系统安全的影响途径有现行失效路径和潜在失效路径
两类危险源事故致因理论	陈宝智等	1995	一起伤亡事故的发生往往是两类危险源共同作用的结果	第二类危险源的存在具有广泛性。奠定了国内对危险源及事故致因研究的基础
三类危险源事故致因理论	田水承等	2001	一起事故的发生往往是三类危险源共同作用、导致防御失效的结果。强调组织管理因素不良是事故发生的深层原因	强调预防事故的“第三双手”(安全文化等)和面向人及组织不安全行为控制的研究

海因里希事故因果连锁论在事故致因理论中具有里程碑意义, 奠定了事故因果连锁思想的基础。瑟利、威格里斯沃思和劳伦斯事故致因理论是“人失误论”的代表, 强调个体人(尤其是操作者)的失误是造成事故的根本原因^[49]。博德、亚当斯、J. Reason 的事故致因理论代表了现代事故致因的一个发展方向, 即“管理失误论”, 强调组织管理失误是事故发生的根本原因。

从事事故致因理论 100 余年的发展历程中可见, 对事故原因的探索经历了由个体向组织、由操作者向管理者、由人到物再到人与物综合的一系列转变。目前事故致因模型及理论已经越来越突显组织管理因素在事故链中的重要作用。这也有力地证明了研究事故中人和组织失误的重大意义, 尤其是针对事故频发的煤矿领域。

综上所述, 本书认为, 煤矿瓦斯爆炸事故是煤矿主要灾害之一, 煤矿瓦斯危险源系统是煤矿安全生产系统中重要的安全问题之一, 具有相互作用、高度动态、反馈性、非线性等复杂系统的特点, 这个复杂系统的安全程度在一定程度上决定了煤矿的安全水平。传统的安全思维方法和单纯从物理机理角度很难把握其特性和变化规律, 一般的工业事故致因理论也难以解释三类危险源并存的瓦斯爆炸事故发生机理, 已经显现出一定的局限性。

1.2.2 人与组织失误的研究现状

随着人-机系统的复杂化发展趋势, 人误对系统可靠性的负面影响在 20 世纪

40 年代以后得到重视。20 世纪 60 年代后期,人误研究得到了实质性的发展。1973 年《人的可靠性》论文集的出版标志着人误研究的正式确立。

国际上,人误的研究领域主要涉及数据收集(data collection techniques)、任务分析(task analysis techniques)、认知任务分析(cognitive task analysis techniques)、图表分析(charting techniques)、执行时间预测(performance time prediction techniques)等方向。涉及的行业主要分布在核电、武器制造、航空航天等复杂巨系统方面。其研究成果多集中于人误辨识、人误概率分布与预测技术,并相继出现了人员失误概率预测技术(technique for human error rate prediction, THERP)、人误评价与减少方法(human error assessment and reducing technique, HEART)、认知可靠性和失误分析方法(cognitive reliability and error analysis method, CREAM)、人失误分析技术(a technique for human error analysis, ATHEANA)等 20 余种分析方法^[50-53]。

在我国,人误的研究较国外相对滞后,始于 20 世纪 90 年代,较早研究人误的是黄祥瑞以及南华大学人因研究所的张力等^[54,55]。前者的研究主要分布在认知和人因可靠性方面,建立了人的失误心理学分类机制、动态认知可靠性模型及失误原因的认知心理学分析方法;后者对大规模复杂人-机系统中人员可靠性模型、人因事故分析与预防作了较深入的探讨,在人因事故分析理论方法及应用、人因可靠性分析技术及应用研究方面有一定研究成果,主要涉及核工业。

随着研究的进一步深入,人们逐渐发现组织管理因素往往是导致个体人误的根本原因^[56-62]。于是,20 世纪 90 年代以来,人类学者将从组织角度分析事故的趋势称为人误研究的组织定向,证实了组织管理因素的重要性,这种思想克服了传统人误仅以个体为对象研究分析个体人误类型、表现和个体行为安全性的局限与不足。

1990 年,英国曼彻斯特大学的心理学家 J. Reason(1990)在其著作《人误》(Human Error)中首次提出了“潜在错误”的概念^[63],即组织管理错误,强调组织失效对系统防御体系的潜在失效途径。德国心理学家 Wilpert 和挪威学者 Qvale(1993)在他们主编的《危险工作系统的可靠性与安全》一书中,总结出典型的组织错误包括:管理系统的缺陷、不充分的培训、不良的安全文化、管理者的错误决策等。此后,国外对组织错误的研究在航海、航空、核电、医疗等领域陆续展开。M. Grabowski 和 H. R. Karlene 提出大型系统中预防事故的 5 个制约因素^[64]:决策、沟通、组织结构、人-机界面和文化。

在我国,对人误的组织定向研究主要集中在 20 世纪末 21 世纪初。心理学、人因工程学、安全学、管理学等领域均有学者关注到了组织管理因素对系统安全性、可靠性有重要影响。中国科学院心理研究所的王二平、李永娟(1998,2003)在核电、航空领域认为组织错误也属于人误^[65,66],是人误研究的组织定向,并提出组织定向研究的概念。李永娟等(2001)通过事件再分析和编码研究方法,提出影响核