

KUANGJINGWASI JIJU
BUQUEDINGXING
FENXI LILUN

■ 魏引尚 著

矿井瓦斯积聚不确定性

分析理论

■ 陕西科学技术出版社

陕西省自然科学基金资助项目(2006E₂05)

矿井瓦斯积聚不确定性分析理论

魏引尚 著

陕西科学技术出版社

内容提要

本书针对瓦斯爆炸灾害发生的基本条件之一——矿井通风巷道瓦斯积聚问题进行了研究。在分析了国内外有关矿井瓦斯积聚防治技术和方法的基础上,结合矿井通风巷道中瓦斯涌出与运移所表现出的特性,建立了矿井瓦斯流动分布的理论研究模型以及矿井通风巷道瓦斯积聚危险性分析的理论架构。具体内容可分为相互关联的几个部分:研究矿井瓦斯涌出的统计规律,建立了应用 Monte-Carlo 模拟算法进行矿井瓦斯涌出预测及不确定性分析的模型。针对矿井通风系统的稳定性,探讨了巷道风流对于通风网络变化的敏感性问题,得出了基于网络解算模型的通风系统稳定性评价指标。建立了瓦斯流经巷道区域的计算模型,得到矿井瓦斯积聚危险区域计算以及瓦斯流动分布特征的表征方法。引入信息熵作为瓦斯积聚危险特征指标,研究了巷道瓦斯浓度、瓦斯流量信息熵计算方法。最后以韩城象山矿为例,应用所建立的瓦斯积聚危险性分析方法,得出该矿瓦斯积聚危险性规律。

本书研究成果综合矿井通风安全技术、计算数学理论、计算机技术以及安全监测信息技术。所提出的安全分析方法,为煤矿瓦斯灾害防治提供了新的理论基础和方法手段,本书可供大专院校安全工程专业本科/研究生,煤矿安全技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井瓦斯积聚不确定性分析理论/魏引尚著. —西安:
陕西科学技术出版社, 2007. 4
ISBN 978-7-5369-4223-3

I. 矿… II. 魏… III. 矿井—瓦斯积聚—研究
IV. TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 051546 号

出版者 陕西科学技术出版社

西安北大街 131 号 邮编 710003

电话(029)87211894 传真(029)87218236

<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社

电话(029)87212206 87260001

印刷 西安建筑科技大学印刷厂

规格 787mm × 1092mm 16 开本

印张 8.75

字数 250 千字

版次 2007 年 5 月第 1 版

2007 年 5 月第 1 次印刷

定价 20.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

目前,矿井瓦斯灾害已经成为国人的心头之痛。作者自从1996年开始从事煤矿通风安全方面的研究以来,就跟矿井瓦斯结下了不解之缘。其时师从西安矿业学院常心坦教授进行矿井通风安全基础性研究工作,在数次煤矿现场的调研实践中,对于瓦斯爆炸问题产生了兴趣,于是在硕士研究阶段将瓦斯爆炸的机理研究作为毕业论文的选题。在其后的研究过程中,随着认识的不断深入,感觉瓦斯爆炸问题是一个非常复杂的研究课题,再加之实验条件、课题经费的匮乏,于是在1999年攻读博士阶段,将研究课题定位到瓦斯积聚上面来了。

理论上讲,瓦斯积聚是促成瓦斯发生燃烧爆炸的重要的前提条件。瓦斯自从其赋存的地质状况受到破坏之后,就以不同的方式、不同的速度向空间涌出发散,涌出的瓦斯在矿井巷道中被通风系统风流稀释并排放到地表大气中去。可是,在这个过程中,不同区域的瓦斯运动状态,以及瓦斯浓度的变化情况是受到多方面因素影响的,这是一个可以应用多种理论、从多个角度入手来研究的问题。考虑到生产实际需要,作者选择了涌出瓦斯在矿井巷道运动变化的规律研究作为切入点,其中以瓦斯积聚的状况为目标,研究瓦斯运动过程中积聚变化的特征。

瓦斯从涌出源开始就在一定的因素影响下而发生变化,由于作用因素类型是非单一的,各种因素对于瓦斯运动的作用机理也很复杂,使得瓦斯在井下巷道的浓度变化呈现复杂的变化形式。所有这些因素呈现不确定性特征,因而可以应用不确定性理论来进行探讨。采用不确定性理论研究矿井生产系统内瓦斯积聚问题,这是作者在矿井瓦斯灾害研究领域进行的尝试性创新。书中应用了数理统计、Monte-Carlo模拟计算、通风网络解算以及信息熵估计等原理和方法来分析矿井瓦斯涌出、瓦斯在巷道流动分布的运动,以及确立瓦斯积聚危险性特征指标,所研究的成果在现场得到过成功应用。

在确立瓦斯积聚不确定性分析理论过程中,现场的实践认识为理论模型的建立奠定了坚实的基础。在最近的4~5年里,作者先后深入过陕西铜川矿区、蒲白矿区、韩城矿区、黄陵矿区和彬长矿区,甘肃的华亭矿区和靖远矿区,宁夏的石炭井矿区、石嘴山矿区和宁东矿区,新疆焦煤公司,江苏大屯煤电公司以及山西焦煤公司等,在30多个大中型煤矿进行了实地测定和考察工作,收集掌握了大量的第一手资料。另外,在该瓦斯积聚不确定性分析理论完善过程中,得到了西安科技大学常心坦教授和刘冠姝教授的关怀和指点,在此向他们致以真诚的感谢!

因作者本人水平有限,书中所述理论难免有不完善之处,恳请读者给予批评指正。

作 者

2007年2月20日

主要符号表

a	巷道分支基本属性向量	N	样本容量
A	随机事件, 巷道基本参数矩阵	n_i	频数
α	显著性水平, 涌出量分布不对称系数	n_{ri}	理论频数
B'	关联矩阵	P	概率事件
Be'	基本关联矩阵	p_i	概率
C	回路矩阵	Q_{fi}	巷道风量, m^3/s
Cs	巷道瓦斯浓度, %	q_s	巷道瓦斯流量, m^3/min
D	灵敏度(敏感度)矩阵	R	相关系数矩阵
$d(x, y)$	欧几里德范数	r_i	巷道风阻, Nm^2/s^8
E	网络分支数, 存在	γ_{ij}	变量和的相关系数
e_i	网络分支编号	γ_{si}	影响因素的偏态系数
F	风流稳定程度系数矩阵	γ_{ki}	影响因素的峰度系数
$F_g(n)$	分布函数	RX	矩阵 F 行极差
$F(x)^{-1}$	经验分布函数的反函数	RY	矩阵 F 列极差
f_i	风流稳定程度系数	r_k	秩
$f(x)$	概率密度函数	S	巷道断面积, m^2
G	有向图	SX	矩阵 F 行偏差
G	无向图	SY	矩阵 F 列偏差
G'	子图	s	标准偏差
g	随机变量	T	周期
g_1	样本的偏度系数	t	时间, s
g_2	样本的峰度系数	μ	数学期望
$H(A)$	信息熵	μ_3	样本三阶中心矩
$H(gv)$	瓦斯积聚危险性信息熵	μ_4	样本四阶中心矩
h_{hN}	自然风压, Pa	V	分布检验统计量, 网络节点数
h_{ff}	风机风压, Pa	v_i	经验频数
k_i	分布系数	v_s	巷道风速, m/s
$Ln(x)$	插值函数	X	矩阵 F 行均值
$l_k(p_j)$	插值函数的基函数	$\bar{x}$	样本均值
m	统计样本分组数	x	笛卡尔坐标, m
M	模	Y	矩阵 F 列均值
$modM$	对 M 取余运算	y	笛卡尔坐标, m

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 瓦斯积聚性分析的问题提出及其意义	(2)
1.2.1 瓦斯灾害的类型及危害	(2)
1.2.2 瓦斯灾害的防治措施	(3)
1.2.3 课题的提出及其意义	(4)
1.3 瓦斯积聚危险性分析国内外研究现状	(5)
1.3.1 国外瓦斯积聚危险的分析与评价	(5)
1.3.2 国内瓦斯积聚危险的分析与评价	(6)
1.4 主要研究内容	(8)
1.4.1 研究内容	(8)
1.4.2 研究路线	(10)
第 2 章 通风巷道瓦斯积聚危险性分析模型结构的确定	(11)
2.1 引言	(11)
2.2 通风巷道瓦斯浓度变化特点	(11)
2.2.1 通风巷道瓦斯浓度的动态性	(12)
2.2.2 通风巷道瓦斯浓度的随机性和不确定性	(12)
2.2.3 通风巷道瓦斯浓度的相关性	(13)
2.2.4 通风巷道瓦斯浓度状态的常规性和偶然性	(13)
2.3 基于信息熵的瓦斯积聚表示模型	(13)
2.3.1 信息熵及其性质	(13)
2.3.2 瓦斯积聚信息熵表示	(15)
2.4 巷道瓦斯涌出量概率统计模型	(16)
2.4.1 瓦斯涌出规律的统计模型	(16)
2.4.2 巷道瓦斯流量规律研究模型	(17)
2.5 巷道风流稳定性研究模型	(18)
2.5.1 矿井通风系统风流稳定性研究模型	(18)
2.5.2 矿井通风系统瓦斯涌出分布计算	(19)
2.6 小结	(19)
第 3 章 巷道瓦斯涌出规律的统计分析	(21)
3.1 引言	(21)

3.2	巷道瓦斯涌出量的确定	(21)
3.2.1	瓦斯涌出量的计算	(21)
3.2.2	瓦斯涌出量的现场测定	(22)
3.3	瓦斯涌出量统计性特征及分析	(22)
3.3.1	瓦斯涌出量分布的统计方法	(22)
3.3.2	现场瓦斯涌出量分布的统计分析	(24)
3.4	瓦斯涌出特征规律的概率模拟	(28)
3.4.1	研究瓦斯涌出特征规律的基本方法	(28)
3.4.2	瓦斯涌出量经验分布函数的 Lagrange 插值法表示	(29)
3.4.3	瓦斯涌出特征规律的模拟计算	(29)
3.5	通风巷道瓦斯涌出不确定性指标确定	(31)
3.5.1	正态分布	(31)
3.5.2	非正态分布	(32)
3.6	小结	(33)
第 4 章	通风巷道风流稳定性的分析	(34)
4.1	引言	(34)
4.2	通风系统角联巷道的动态特性	(34)
4.2.1	巷道系统角联巷道的判断	(35)
4.2.2	巷道系统角联巷道动态特性分析	(37)
4.3	通风巷道风流稳定性的指标	(37)
4.3.1	巷道灵敏度	(38)
4.3.2	巷道敏感度	(38)
4.3.3	风流稳定度系数	(39)
4.4	通风巷道风流稳定程度系数的特征分析	(39)
4.4.1	风路稳定性系数矩阵 F	(39)
4.4.2	风阻变化影响网络趋势指标	(40)
4.4.3	网络中风路风流波动程度指标	(40)
4.4.4	网络中风流影响范围指标	(40)
4.4.5	通风巷道稳定性分析方法	(41)
4.5	通风系统巷道风流稳定性分析示例	(41)
4.5.1	矿井通风系统基本概况	(41)
4.5.2	分析方法及步骤	(42)
4.5.3	计算结果及其分析	(43)
4.6	小结	(45)
第 5 章	涌出瓦斯在通风巷道的分布区域及其特性研究	(46)
5.1	引言	(46)
5.2	涌出瓦斯在通风系统内流动模型	(46)
5.2.1	瓦斯运移网络范围边界条件	(46)

5.2.2	在网络中瓦斯分布计算模型	(47)
5.2.3	对网络中瓦斯分布计算模型的讨论	(48)
5.3	涌出瓦斯在通风系统流经范围的分析	(49)
5.3.1	分析方法	(49)
5.3.2	计算过程	(50)
5.4	瓦斯流经区域各分支瓦斯浓度计算	(50)
5.4.1	与节点相连的各分支的瓦斯浓度计算原理	(50)
5.4.2	通风系统内瓦斯流经区域内各分支瓦斯浓度计算方法	(51)
5.5	在通风巷道瓦斯浓度的监测布置	(52)
5.5.1	通风系统中瓦斯分布区域的拓扑分析	(53)
5.5.2	网络中待测瓦斯浓度巷道的加边查找法	(54)
5.6	瓦斯在通风系统分布区域及其特性的模拟计算	(56)
5.6.1	模拟计算内容	(56)
5.6.2	模拟计算举例	(58)
5.7	小结	(63)
第 6 章	瓦斯在通风系统积聚危险性的综合性分析	(64)
6.1	引言	(64)
6.2	通风网络中瓦斯分布特征规律	(64)
6.2.1	各巷道分支瓦斯流量统计指标	(64)
6.2.2	通风巷道瓦斯流量数据的获取方法	(65)
6.2.3	通风巷道瓦斯流量计算过程	(65)
6.2.4	通风巷道瓦斯流量统计规律分析	(68)
6.3	通风网络中各分支瓦斯流量相关性分析	(68)
6.3.1	巷道瓦斯流量相关性系数的计算	(68)
6.3.2	通风系统瓦斯分布区域的相关系数集	(69)
6.3.3	通风巷道相关系数集的表示	(69)
6.3.4	相关系数分析结果	(70)
6.4	巷道瓦斯积聚影响因素的不确定性分析	(71)
6.4.1	瓦斯浓度信息熵与不确定性的关系	(71)
6.4.2	瓦斯浓度信息熵	(71)
6.5	巷道瓦斯积聚危险信息熵的计算方法	(72)
6.5.1	瓦斯积聚危险信息熵的理论计算	(72)
6.5.2	瓦斯积聚危险信息熵的估计	(72)
6.5.3	瓦斯积聚危险信息熵的实际计算	(73)
6.6	巷道瓦斯积聚危险信息熵的计算示例	(73)
6.6.1	瓦斯涌出量的信息熵计算——基于测量数据大样本的信息熵估计	(74)
6.6.2	巷道风量的信息熵计算——基于测量数据小样本的信息熵估计	

(74 )	.....	( 75)
(84)	6.6.3 巷道瓦斯浓度的信息熵估计	(75)
(84)	6.6.4 两种表征瓦斯浓度信息熵的比较	(75)
(84)	6.7 小结	(77)
	第 7 章 通风巷道瓦斯积聚危险性分析的应用	(78)
(82)	7.1 矿井概况	(78)
(82)	7.2 井下瓦斯涌出量的统计分析	(78)
(82)	7.2.1 瓦斯涌出源涌出量的统计规律	(80)
(82)	7.2.2 矿井监测点控制区域瓦斯流量统计规律	(81)
(82)	7.3 矿井通风系统稳定性分析	(83)
(82)	7.4 矿井通风网络中各分支瓦斯流量相关性分析	(85)
(82)	7.5 矿井瓦斯积聚危险信息熵的计算分析	(86)
(82)	7.5.1 巷道瓦斯涌出量的信息熵计算	(86)
(82)	7.5.2 巷道风量的信息熵计算	(86)
(82)	7.5.3 巷道风量的信息熵计算及结果分析	(88)
(82)	7.6 小结	(88)
	参考文献	(90)
	附录 在煤矿现场采集的数据样本	(95)
(43 )	.....	1.2.0
(50 )	.....	2.2.0
(50 )	.....	3.2.0
(80 )	.....	4.2.0
(80 )	.....	5.0
(80 )	.....	6.2.0
(80 )	.....	7.2.0
(80 )	.....	8.2.0
(80 )	.....	9.2.0
(80 )	.....	10.2.0
(80 )	.....	11.2.0
(80 )	.....	12.2.0
(80 )	.....	13.2.0
(80 )	.....	14.2.0
(80 )	.....	15.2.0
(80 )	.....	16.2.0
(80 )	.....	17.2.0
(80 )	.....	18.2.0
(80 )	.....	19.2.0
(80 )	.....	20.2.0
(80 )	.....	21.2.0
(80 )	.....	22.2.0
(80 )	.....	23.2.0
(80 )	.....	24.2.0
(80 )	.....	25.2.0
(80 )	.....	26.2.0
(80 )	.....	27.2.0
(80 )	.....	28.2.0
(80 )	.....	29.2.0
(80 )	.....	30.2.0
(80 )	.....	31.2.0
(80 )	.....	32.2.0
(80 )	.....	33.2.0
(80 )	.....	34.2.0
(80 )	.....	35.2.0
(80 )	.....	36.2.0
(80 )	.....	37.2.0
(80 )	.....	38.2.0
(80 )	.....	39.2.0
(80 )	.....	40.2.0
(80 )	.....	41.2.0
(80 )	.....	42.2.0
(80 )	.....	43.2.0
(80 )	.....	44.2.0
(80 )	.....	45.2.0
(80 )	.....	46.2.0
(80 )	.....	47.2.0
(80 )	.....	48.2.0
(80 )	.....	49.2.0
(80 )	.....	50.2.0
(80 )	.....	51.2.0
(80 )	.....	52.2.0
(80 )	.....	53.2.0
(80 )	.....	54.2.0
(80 )	.....	55.2.0
(80 )	.....	56.2.0
(80 )	.....	57.2.0
(80 )	.....	58.2.0
(80 )	.....	59.2.0
(80 )	.....	60.2.0
(80 )	.....	61.2.0
(80 )	.....	62.2.0
(80 )	.....	63.2.0
(80 )	.....	64.2.0
(80 )	.....	65.2.0
(80 )	.....	66.2.0
(80 )	.....	67.2.0
(80 )	.....	68.2.0
(80 )	.....	69.2.0
(80 )	.....	70.2.0
(80 )	.....	71.2.0
(80 )	.....	72.2.0
(80 )	.....	73.2.0
(80 )	.....	74.2.0
(80 )	.....	75.2.0
(80 )	.....	76.2.0
(80 )	.....	77.2.0
(80 )	.....	78.2.0
(80 )	.....	79.2.0
(80 )	.....	80.2.0
(80 )	.....	81.2.0
(80 )	.....	82.2.0
(80 )	.....	83.2.0
(80 )	.....	84.2.0
(80 )	.....	85.2.0
(80 )	.....	86.2.0
(80 )	.....	87.2.0
(80 )	.....	88.2.0
(80 )	.....	89.2.0
(80 )	.....	90.2.0
(80 )	.....	91.2.0
(80 )	.....	92.2.0
(80 )	.....	93.2.0
(80 )	.....	94.2.0
(80 )	.....	95.2.0
(80 )	.....	96.2.0
(80 )	.....	97.2.0
(80 )	.....	98.2.0
(80 )	.....	99.2.0
(80 )	.....	100.2.0

第1章 绪论

1.1 引言

煤炭在我国是国民经济和社会发展的基础,并在相当长的时期内仍将是我国的主要能源。所以,煤炭的安全生产和科学利用在我国具有现实的和战略性的重大意义。然而,煤炭开采却是我国工业灾害最严重的行业,从建国初到现在的半个多世纪时间,采矿业是最危险的行业,这在公众心目中已成为不争的事实。特别是煤炭开采业仍然是我国工业生产高危行业之一^[1]。图 1.1 是我国近十年来煤矿百万吨死亡率变化情况,从中可以看出煤矿安全状况起伏不定,其原因是 2000 年前后,我国经济发展迅速,对煤炭需求猛增,伴随而来的煤矿安全形势恶化。进入 21 世纪以来,在国家经济快速发展的情况下,我国政府和企业相继采取了各种措施来保障煤矿的生产安全,使得煤矿安全生产滑坡的情况得到遏制。不过,新形势下,特别是在我国加入世贸组织(WTO: World Trade Organization)之后,国际职业安全健康标准一体化的强烈要求,使得我国安全生产工作面临更大的挑战。如 2004 年 2 月 23 日,黑龙江省鸡西市梨树区鸡西煤业公司百兴煤矿发生特大瓦斯爆炸事故,造成 37 人死亡。这起事故给国家造成很大政治影响,也给人民群众带来莫大的身心创伤,这一切说明煤矿安全状况仍不容乐观,表明煤矿生产事故的防治工作依然严峻。

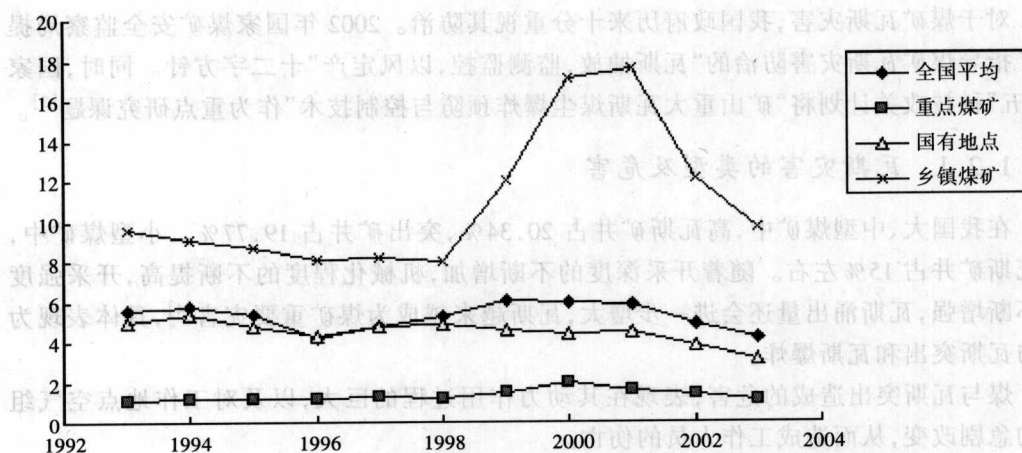


图 1.1 1993~2003 年我国煤矿百万吨死亡率图

煤矿事故中,瓦斯事故、冒顶片帮和高处坠落事故所占比重大,从表 1.1 统计的近几年我国煤矿事故发生频率以及人员死亡情况^[2]看出,瓦斯爆炸事故最为突出。如 2002

年,煤矿事故中,顶板事故、瓦斯事故所占比重大。全国煤矿发生顶板事故 1 738 起,死亡 2 009人,比 2001 年增加 35 起,少死亡 81 人,分别上升 2.1%和下降 3.9%。全国煤矿发生瓦斯事故 549 起,死亡 2 083 人,比 2001 年减少 178 起,少死亡 260 人,分别下降 24.5%和 11.1%。其中,10 人以上瓦斯事故 37 起,死亡 838 人,分别占一次死亡 10 人以上事故起数、死亡人数的 72.5%和 78.5%。而 2003 年全国煤矿发生事故起数和死亡人数同比分别下降 5.9%和 4.2%;一次死亡 10~29 人的特大事故起数和死亡人数分别下降6.4%和 6.5%;发生一次死亡 30 人以上的特别重大事故 7 起,死亡 360 人,分别下降 22.2%和 13.7%。2003 年全年共发生瓦斯事故 596 起,死亡 2 118 人,同比分别下降 6.6%和 7.4%^[2]。

表 1.1 2000~2003 年我国煤矿死亡事故与瓦斯事故统计

	煤矿死亡事故	瓦斯事故	
	死亡人数/人	死亡人数/人	死亡率 / %
2000 年	5 798	2 600	44.8
2001 年	5 670	2 446	43.1
2002 年	5 791	2 083	36.0
2003 年	5 548 *	2 118	38.2

* 根据有关报道数据推算得到。

从表 1.1 的分析预测看来,2004 年我国煤矿的百万吨死亡率有望降低到 4 以下,但仍是美国的 100 多倍^[2],说明我国的煤矿安全生产水平与发达国家相比存在较大差距。

综上所述,瓦斯灾害仍然为我国煤矿企业中危害最大、死亡比例最高的重大事故,进行瓦斯灾害的防治方法和技术创新,仍然是值得深入研究的课题。

1.2 瓦斯积聚性分析的问题提出及其意义

对于煤矿瓦斯灾害,我国政府历来十分重视其防治。2002 年国家煤矿安全监察局提出了指导煤矿瓦斯灾害防治的“瓦斯抽放,监测监控,以风定产”十二字方针。同时,国家“十五”科技攻关计划将“矿山重大瓦斯煤尘爆炸预防与控制技术”作为重点研究课题^[3]。

1.2.1 瓦斯灾害的类型及危害

在我国大、中型煤矿中,高瓦斯矿井占 20.34%,突出矿井占 19.77%。小型煤矿中,高瓦斯矿井占 15%左右。随着开采深度的不断增加,机械化程度的不断提高,开采强度的不断增强,瓦斯涌出量还会进一步增大,瓦斯越来越成为煤矿重要灾害^[4],具体表现为煤与瓦斯突出和瓦斯爆炸。

煤与瓦斯突出造成的危害,表现在其动力作用过程的巨大,以及对工作地点空气组成的急剧改变,从而造成工作人员的伤亡。

瓦斯爆炸危险在我国煤矿普遍存在,这种可燃性气体一旦爆炸,能产生巨大冲击波和极高的温度等,是矿井生产中,经济损失最大、人员伤亡最多的事故,是造成社会影响最大的重、特大事故,也是本书研究的重点。

1.2.2 瓦斯灾害的防治措施

矿井瓦斯灾害,特别是瓦斯爆炸,是目前受到广泛关注的一类事故。瓦斯爆炸的发生必须具备三个条件^[5]:①氧气浓度 12% ~ 20%;②引火源(或达到瓦斯气体着火点的高温);③瓦斯浓度 5% ~ 15%,并且三者同时具备。在井下生产环境中,氧气浓度是生产活动所要求的,不易人为地进行改变。只要后两者条件同时具备,在生产区域就会发生瓦斯爆炸。因此,控制矿井瓦斯浓度和火源隐患就成为预防瓦斯爆炸事故的切入点^[6,7]。

(1) 技术措施

目前,瓦斯爆炸灾害防治在技术方面所采取的措施,目标是防止瓦斯积累,消除瓦斯突出。前苏联及其他一些国家对瓦斯灾害的防治措施基本上与我国一致^[8],为了防止瓦斯积累,在技术上:①采用的主要方法是减少瓦斯向采掘空间涌出,稀释采掘空间的瓦斯浓度^[9],其中瓦斯抽放是减少瓦斯涌出的一种最有效途径^[10,11],加强矿井通风是稀释采掘空间瓦斯浓度最有效的方法^[12];②消除瓦斯突出等动力现象的主要技术途径是释放煤层中的瓦斯和地压^[13];③对于高瓦斯矿井,从事煤层气工业化开采,可大大减少了矿井通风费用,改善了生产安全条件,从根本上防止瓦斯灾害事故的发生^[14],并向市场销售大量的高质量可燃气体,产生显著的社会、经济效益^[15]。为此,我国已有研究人员提出研究煤气共采的问题,并探讨了岩体内瓦斯运移聚集的规律^[16],以消除开采过程中由瓦斯引起的事故威胁。

瓦斯爆炸灾害防治技术的辅助手段包括控制井下火源,建立防爆、隔爆、抑爆和个人防护体系,加强瓦斯监测,以及使用煤矿许用安全爆破器材、有效防治煤层自然发火、有效控制外因火灾等措施^[17]。

(2) 管理措施

在管理方面,根据灾害发生的系统理论模式,事故的发生是由于人的不安全行为和物的不安全状态综合作用的结果^[18]。所以,对瓦斯爆炸事故从管理方面进行分析与评价,是预防矿井瓦斯爆炸事故的另外一个切入点^[19,20]。这不仅是我国工业企业与 WTO 接轨的要求,也是企业注重履行社会职责,维持社会持续发展的需要^[21]。其中的职业安全卫生管理体系(OSHMS: Occupational Safety & Health Management System)标准化越来越为国内外企业所采用,而危害辨识和危险评价是 OSHMS 中实现事故预防的精髓^[22]。有关煤矿瓦斯事故的各种危险评价方法的研究,是实现安全生产的当务之急。

管理的另一个重要手段,就是安全生产监察管理,我国自 2000 年成立了国家安全生产监督管理局,并建立起煤矿安全监察行政管理体系。这对于我国在经济高速发展的情况下,保障煤矿安全生产健康运行,起到了巨大的促进作用。

(3) 综合治理

由于煤矿生产环境的复杂性,在瓦斯灾害防治方面,结合现代采矿技术进步,正在向着综合治理瓦斯的方向发展^[23]。“瓦斯抽放,监测监控,以风定产”十二字指导方针,体现了综合治理瓦斯的技术要点。而业已实施的煤矿安全评价工作,是实施关口前移、有效监控和治理煤矿事故隐患,减少事故发生的重要手段,更是建立煤矿安全生产

长效机制,实现煤矿安全生产状况稳定好转的制度保障^[1]。煤矿安全评价正在成为对煤矿系统中存在的危险源、有害因素进行辨识与分析,从而深入查找事故的潜在诱因,准确判断矿井系统事故和职业危害严重程度的重要措施^[24]。

(4) 发展趋势

防治煤矿瓦斯灾害,需要从技术和管理角度进行综合性的探索和研究。技术上,控制矿井瓦斯浓度的方法,莫过于对含瓦斯煤层进行瓦斯抽放。由于我国高瓦斯煤层的低渗透率、高可塑性及其赋存地质条件的复杂性,这项技术的效果目前仍然不能达到令人满意的程度,仍将继续是我国科技攻关的难题^[25]。对于瓦斯浓度进行监测并通过通风系统将其稀释并排放,这是现场生产中使用的最重要的措施。瓦斯爆炸事故的频繁发生,说明了在瓦斯积聚的监测或预测中仍存在严重的管理和技术上的漏洞。

本着“预防为主,安全第一”的生产指导,对瓦斯爆炸危险进行安全性分析和评价,并深入探讨和利用核工业安全评价技术^[26]、以及大型化工厂成熟的安全评价方法,将其引入到煤矿安全生产之中,研究适应煤矿环境下定量化的安全评价方法,包括了对于矿井各类重大危险源识别、危险因素的准确计算是目前矿山安全评价的前沿课题^[8]。此外,深入到技术层面,应用概率统计的方法研究各种危险因素风险概率,以及相关的控制技术,则成为矿井安全工程研究的重点问题。总体上,我国煤矿地下作业系统的结构特性以及可以与其相适应的安全评价理论和技术研究尚需进一步的深入和完善,矿山重大伤亡事故的客观存在也说明了事故控制的重大理论和技术研究的重要性^[27]。

1.2.3 课题的提出及其意义

从上述分析瓦斯灾害的防治现状以及发展趋势知道,针对矿井瓦斯灾害的安全分析及评价,作为整个矿山瓦斯爆炸灾难的应急救援技术方法,不仅是安全科学研究的事故预防前瞻性关键技术,也是我国目前煤矿安全形势所紧迫的研究课题。

自20世纪80年代我国煤炭行业开展安全评价方法研究以来,虽然取得一定成果^[28,29],如目前广泛应用的安全检查表是以定性分析评价为主线的一种评价方法,能够系统地对一个生产系统或设备进行科学地分析,从中找出各种不安全因素,依据检查项目,把找出的不安全因素以问题清单的形式列制成表,以便进行检查和避免漏检^[30]。从整个煤炭行业的安全生产形势不难得出,这种定性的安全评价方法细节比较粗糙,人为因素占主导作用,如果一些未知的影响因素没有罗列出来,则评价的效果不能达到安全生产的实际需求,其原因是多方面的,而矿井生产系统的复杂性无疑是阻碍安全评价方法应用的主要因素。只有对矿井每一类事故从技术上进行层次分解,分解到其本原技术层面,再利用恰当的评价技术以及相关的数学工具,才能得出可靠的安全评价结论。

对于煤矿瓦斯爆炸事故,前面已经述及其发生的三条前提条件,只要控制了其中的任意一个条件,就可以阻止瓦斯爆炸发生。在现实生产中,受到关注最多的是瓦斯浓度。达到爆炸界限的瓦斯浓度,是矿井瓦斯涌出量和巷道风量两者共同作用的结果^[31]。因

此,分析瓦斯积聚的关键是从这两方面入手,分别从各自特征规律及其相互关系来探讨导致通风巷道瓦斯积聚的过程,研究出分析和评价瓦斯在矿井巷道中积聚危险性的评价方法。

基于概率统计的矿井通风巷道瓦斯积聚危险性分析研究是在复杂条件下应用概率统计分析法的一种尝试。通过应用统计学原理分析煤矿井下瓦斯涌出、瓦斯浓度以及风量分布的概率特征,以及对矿井通风系统稳定性的分析评价,从而对瓦斯积聚风险情况做出比较准确的判断。分析结果对于制定安全生产措施、预防瓦斯积聚及其可能的爆炸后果,以及准确地掌握瓦斯源气体积聚的规律和预测瓦斯源危险状态的概率分布规律等具有重要的指导意义。

1.3 瓦斯积聚危险性分析国内外研究现状

为防止煤矿瓦斯爆炸事故发生,分析和评价矿井瓦斯积聚可能性以及相关的爆炸危险性,一直受到国内外煤矿安全工作者的重视。

1.3.1 国外瓦斯积聚危险的分析与评价

对于矿井瓦斯积聚的危险性问题,目前国外还没有专门以该课题为核心的研究报告,学者们从三个不同侧面来研究、分析了其危险性:

(1) 与通风系统有关的瓦斯流动问题

作为消除瓦斯灾害的重要措施,通风系统一直受到安全管理部门的重视。对于通风系统的研究领域除了净化井下空气,保障环境卫生及工人健康等达标之外^[32],进行技术及工程方面的优化,减小通风能耗,是通风安全技术研究关注的重点^[33]。由于地下巷道布置的复杂性,多采用计算机程序预先计算通风系统,再行测量并校准用风地点的风量,以达到消除有害气体的目的^[34]。同时,对于瓦斯等有害气体在通风系统的分布研究,则对于矿井救灾预防处理计划的制定有着重要影响^[35]。可见,通风系统的优化及其合理性分析,对于防治井下瓦斯灾害是一种重要举措。

为了保障通风系统及瓦斯涌出的安全程度,基于计算机技术的煤矿安全监测监控系统日益得到普及^[36],这是综合了各种技术的组合系统,将会在传感器技术、多媒体技术、网络技术、通信技术和软件分析系统等方面继续保持创新研究^[37],使矿井抗灾能力得到很大提高。在监控方面,Koroleva利用计算机对矿井通风网络系统进行非线性控制,统筹分析网络拓扑结构^[38],通过优化计算来调度井下工人处理井下通风系统各处的安全隐患,其中部分包括了巷道瓦斯积聚隐患。

(2) 基于系统工程的瓦斯危险性分析

根据系统工程发展起来的各种安全评价方法,在非煤炭行业的应用要比煤炭行业,无论是研究的深度或是广度都要深入^[39]。20世纪60年代后期,随着航空航天、核工业等高新技术高风险行业的快速发展,概率风险评价(PRA: Probability Risk Assessment)方法得到了发展。该法以1974年Rasmussen N.C.评价民用核电站的安全性开始,继而有1977年的英国Canvey岛石油化工联合企业安全评价,1979年荷兰Rijnmond六项大型石油化工装置的安全评价等^[40]。这些评价项目都耗费了大量的人力物力,在方法模型确定、数据的

取舍、不确定性的研究以及灾害模型的研究等方面均有所创建。首先是对安全损失评价^[40,41],为政府决策提供依据。其次,将不同种类事故的伤亡统计与造成的损失结合起来作为各类事故危险性的度量^[42],以此找出事故原因和可能的预防方法。此外,基于事件树分析(FTA: Fault Tree Analysis)和事故树分析(ETA: Event Tree Analysis)模型的矿井瓦斯涌出危险性分析与评价^[43~47]方法,由于工作环境的复杂性,都只能从不同的侧面得出研究成果并部分应用。

而以矿山概率风险评价为基础^[48]的评价技术,就是把矿井生产系统中的隐患导致事故的概率与隐患造成的损害的乘积作为系统状态的危险度。隐患发生的概率和造成的损害经过统计数据获得,但是对隐患发生的概率和损害统计不够细致,缺乏实用性,且只需讨论这些数据的模糊性问题^[27]。其他的安全评价方法,如 R.V. 罗曼尼教授提出的安全性指数法^[49]、澳大利亚的 A.R. 格材提出的煤矿操作安全评价法^[50]、波兰的 M 费利·卫皮提出的以人-机为主的安全评价^[51,52]和灾害预测^[53],以及日本的隧道安全评价方法^[54,55]等。从这些文献来看,国外的矿山安全评价尚停留在研究阶段,没有达到实用程度^[27],比不上其他行业的应用和发展水平。不过,由此扩展开来的对于矿井事故隐患的不确定性问题的研究^[39],目前正在成为研究的热点问题。至于本书中所要讨论的矿井通风巷道瓦斯积聚危险性的安全分析与评价问题,目前尚未见到文献报道。

(3) 为消除瓦斯危害的瓦斯抽放研究

瓦斯抽放是当前发达国家和世界主要产煤国治理瓦斯灾害的有效方法^[56]。由于世界能源问题日趋严重,而瓦斯是一种洁净能源,同时又是温室气体,以甲烷为主要成分的煤层气的开发利用^[57],正在成为一种新型能源而备受重视。据统计,全世界每年约有 $29 \times 10^9 \sim 41 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的瓦斯被释放,其中只有 $2.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的瓦斯得到了利用。根据文献^[56],中国是世界最大的瓦斯排放国家,瓦斯利用却极低,相比较而言,美国、波兰、南非等国家在煤层气的开发利用上做得非常成功^[14, 58]。

与瓦斯抽放相关的研究课题是瓦斯涌出量的统计分析 & 预测研究。瓦斯涌出受到自然的和工程的多种因素影响,采掘速度和强度是其涌出量的主要因素,因而可以对瓦斯涌出量进行预测^[59]。在此基础上,进行合理的抽放设计,如进行地面钻孔预抽瓦斯,掘进顺槽预抽放煤层瓦斯,优化瓦斯预抽放系统等,达到回采过程中控制瓦斯涌出量^[60,61]、防止瓦斯突出的目的。

1.3.2 国内瓦斯积聚危险的分析与评价

国内主要从两个方面入手进行矿井瓦斯积聚危险性的分析:

(1) 以瓦斯爆炸防治为目的瓦斯积聚危险分析

防治矿井瓦斯爆炸,是我国煤炭开采行业管理机关和企业非常重视的研究课题^[3,62]。其中基于系统安全工程的各种瓦斯爆炸事故的分析法^[28,63~65]目前仍占据着主导地位,如安全检查表法、张秉义爆炸指数法、隧道安全法等。特别是安全检查表法,已经在我国煤矿推广应用,说明在我国目前的情况下,以安全管理为主要特征的具有经验性的安全评价,对于预防矿井瓦斯积聚以及爆炸仍起重大地指导作用。

我国“九五”“十五”科技攻关项目,对于瓦斯等易燃、易爆性气体等危险源的安全评价技术^[62,66],瓦斯爆炸防爆、抑爆技术等方面的研究,已经深入到技术层面。即从客观的基础数据进行分析,利用相关数学工具,研究导致瓦斯爆炸灾害发生的几率大小。虽然一些瓦斯爆炸的事故树分析(ETA)模型^[29,66],也从基本单元的部件或子系统事故的发生概率入手,来计算整个矿井系统瓦斯爆炸发生的概率^[67],但是,其中人为的、主观性因素影响较大,对于一个复杂的矿井生产系统而言,欲达到理想的实际应用效应仍有一定的困难。确切地说,这些评价技术对于一些瓦斯影响因素不确定性的把握精度不够高,其应用性研究将是进一步研究的重点^[68]。周长春曾研究过用概率危险评估(PRA)法分析矿井瓦斯爆炸危险源危险性^[69~71]的问题,虽然缺少一定的实用性和可操作性(原因是其中的各种因素状态不明确,人员、环境等不确定因素比例高,对系统作完整分解非常困难),但仍是对量化分析和评价煤矿瓦斯灾害所进行的有益探讨。要达到对煤矿整个系统的安全性进行科学评价,应该选择由浅及深的策略,先从简单的子系统开始,深入研究并达到一定的程度后,再进行较高一级系统的安全评价研究工作,以至达到最终地对整个系统安全性综合评价的目的。

此外,一些具有优化以及预测功能数学模型的瓦斯爆炸危险性评价方法^[72~74],对于预测瓦斯爆炸的危险程度,以及指导现场安全生产也具有一定意义。不过,这些定式化的解决矿井安全问题的评价理论、技术和方法的研究在深度和广度上不够深入,因此研究针对性好、可靠性强和操作容易的系统评价技术和方法对加强矿井安全状态的过程管理等具有重大的理论意义和应用价值^[27]。此外,对矿井生产系统现有的安全状况、动态不确定性因素的分析以及矿井安全性科学、准确的预测,也是安全评价理论与技术研究的重要内容,是量化评价矿井瓦斯灾害危险性的基础^[75]。

上述分析评价方法所反映出来的是影响矿井安全生产的要素的复杂性,具有一定的不确定性特点。而有关信息熵的理论、方法和应用,目前国内外均有丰硕研究成果,如极大熵原理、信息传递方法、模糊熵、熵权和复熵理论等^[76],其应用领域涉及自然科学、社会科学、管理科学和决策论等。信息熵的应用范围、研究前景之广阔几乎涉及所有研究不确定性问题的科学领域。但是在矿井安全生产,特别是通风安全方面应用信息熵作为分析手段的研究,截至目前还鲜见有研究成果出现,因而有必要在这方面进行一些尝试性研究。

(2) 以瓦斯抽放及通风安全为目的的瓦斯涌出危险性分析

矿井瓦斯抽放是为了防止瓦斯事故、保证煤矿安全生产、提高生产能力、保护环境和开发资源的工程技术^[77],《煤矿安全规程》规定了对于“一个采煤工作面绝对瓦斯涌出量大于 $5\text{m}^3/\text{min}$, 或一个掘进工作面绝对瓦斯涌出量大于 $3\text{m}^3/\text{min}$, 采用通风方法解决不合理的”,都要进行瓦斯抽放^[78]。其中对于瓦斯灾害有重要的基础性影响的是矿井瓦斯涌出量。

从煤壁、采空区涌出的瓦斯是造成矿井瓦斯灾害的根源,由于煤矿生产要持续进行,所以这种瓦斯连续涌出是不可避免的。由于我国煤层低压、低渗、低饱和等煤层气地质条件复杂的特点导致抽放困难,而煤层的渗透性是影响煤层气抽放最为主要的因素,影响渗透性的因素又很多^[79],所以,由于瓦斯涌出造成积聚危险性、煤层瓦斯抽放难易度、