



MINE DUSTS

矿尘学

王德明 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

矿 尘 学

Mine Dusts

王德明 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结矿尘学的发展历程及内容体系,阐述矿尘灾害及其防治的原理、方法和技术,包括尘肺病和煤尘爆炸灾害特性、煤层注水减尘、通风排尘与控尘、除尘器除尘、喷雾降尘、泡沫降尘、个体防尘、矿尘检测与监测等内容。

本书可供矿业工程、安全工程等相关专业的高等院校师生和科研院所的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

矿尘学=Mine Dusts/王德明著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-043282-7

I. ①矿… II. ①王… III. ①矽尘-除尘-研究 IV. ①TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 021003 号

责任编辑:耿建业 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 晴 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:390 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

矿尘是矿井生产过程中产生的固体物质细微颗粒的总称,是煤矿重大灾害之一,也是导致尘肺病发生的根源。据统计,新中国成立以来发生的25起死亡百人以上特大事故中14起为煤尘爆炸事故或瓦斯煤尘爆炸事故;2013年,全国共报告尘肺病新增病例2.3万例,其中煤矿尘肺病1.4万例,占全国新增病例的60%;另据相关分析,我国煤矿尘肺病死亡人数相当于当年煤矿事故死亡人数的62%左右,煤矿防尘降尘和尘肺病防治任务十分艰巨。

依靠科技进步,从源头上控制粉尘浓度,是预防尘肺病和煤尘爆炸的根本途径。我国自20世纪50年代后期以来,在湿式作业、煤层注水、喷雾降尘、通风除尘等技术领域进行了大量的研究与实践,矿尘防治技术有了长足的发展,特别是近年来取得了许多具有较大实用价值的成果,但由于缺乏关于这些最新成果的全面分析和系统总结,导致这些技术在实际应用中存在较大的盲目性,未能发挥其应有的作用。特别是近年来,随着综采放顶煤、综采一次采全高和大断面岩巷综掘等现代化开采技术的普遍推广和矿井开采强度及开采深度的增加,采掘作业场所的总产尘量及呼吸性粉尘比重迅速增加,传统的防尘技术已不能满足煤矿现场的迫切需要。因此,不断研发高效的防尘技术是提高矿尘防治科学化水平的必由之路。

在这样的背景下,王德明教授带领中国矿业大学通风防灭火与防尘团队,在国家“211工程”“985优势学科创新平台”“江苏省优势学科建设工程”等专项资金的支持下,自2003年以来,在矿尘防治理论与技术方向上进行了富有成效的研究,较为准确地掌握了国内外煤矿粉尘防治的研究动态和发展趋势,构建了国内领先水平的矿尘防治理论与实验研究平台,开发了以泡沫抑尘为代表的高效防尘新技术,培养出一批该方向的优秀博士后、博士和硕士;相关研究成果获授权发明专利10项,发表学术论文30余篇;在全国十多个矿区的几十个煤矿获成功应用,取得了较显著的社会、经济和环境效益;获中国职业安全健康协会科学技术一等奖1项、江苏省科学技术二等奖1项。在这些研究工作的基础上,再通过系统性地总结、凝练和修改完善,完成了《矿尘学》这本专著。

该书选材广泛、内容新颖,系统总结和阐述了国内外矿尘防治领域的专业知识和最新研究成果,对具有原创性的泡沫抑尘技术进行了深入阐述,对提高我国矿尘灾害防治水平、推动煤矿安全科技进步具有重要的学术价值和应用价值。希望该书的出版对推动煤矿防尘降尘技术进步,提高煤矿安全保障能力和职业健康水平起到积极的作用。

中国煤炭工业协会会长
中国煤矿尘肺病防治基金会理事长



前 言

粉尘能导致尘肺病和发生爆炸,严重威胁矿工的职业健康与矿井的安全生产,是矿山开采面临的主要自然灾害之一。近年来,我国矿山安全生产形势持续稳定好转、重特大灾害事故的数量明显减少,但粉尘灾害依然十分严重,尘肺病发病率和发病人数居高不下,大多数煤矿还面临煤尘爆炸的严重威胁,我国粉尘防治工作责任重大,任务艰巨。

粉尘学就是研究矿井粉尘发生、扩散、运移规律及其防治的一门科学。早在1911年,原美国矿山局乔治·莱斯就编写出版了*Coal-dust explosions*(《煤尘爆炸》)一书。1920年,苏联科学院斯科钦斯基(Skochinski)院士在列宁格勒矿业学院首次将“粉尘防治”作为一章列入矿井通风教程中。1973年,波兰学者茨布尔斯基(Cybulski)出版了*Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie*(《煤尘爆炸及其防治》),较系统地介绍了煤尘爆炸及其防治技术。我国在粉尘防治领域的专门研究始于20世纪50年代。1960年,煤炭工业部抚顺科学研究所编写了一本《煤尘爆炸与煤矽肺病预防》的小册子,介绍了煤尘爆炸性及其影响因素、撒布岩粉隔爆和长钻孔预先湿润煤体的注水技术等内容。之后,国内在该领域陆续出版了10余部著作与教材。近些年来,随着矿业科技的快速发展,综采放顶煤和综采一次采全高、大断面岩巷综掘等现代开采技术广泛应用和矿井开采强度大幅增加,采掘作业场所的产尘量大幅增加,现有的粉尘防治技术已不能满足矿业发展的迫切需要,现有的著作与教材已不能反映粉尘灾害的现状、防治需求和最新研究成果。

作者作为中国矿业大学“安全科学与工程”学科的带头人,长期从事矿井通风与安全的科研与教学工作,在亲历我国矿业发展的过程中,认识到我国矿业安全工作的重点必将由防治重大安全生产事故向保障矿工生命安全与健康转变,粉尘防治是矿山职业健康与安全工作的重中之重,也是矿业安全科技工作者的主要使命之一。针对现有的矿井防尘喷雾易堵塞和雾化环境不利工人作业、除尘风机在高瓦斯和突出矿井使用不安全、煤层注水降尘率低等现有降尘技术的不足,自2003年起,作者带领中国矿业大学通风防灭火与防尘团队系统开展了泡沫降尘理论与技术的研究。在中国矿业大学安全技术及工程国家重点学科“211工程”项目、“985优势学科创新平台”项目和“江苏高校优势学科建设工程”等项目的支持下,建成了国内领先水平的矿用泡沫降尘试验系统。针对井下采掘工作空间狭小和安全条件差的特点,发明了集风水联动控制、发泡剂自动添加、无运动部件的发泡装置和专用喷射泡沫喷头等性能于一体的高效泡沫降尘技术。该技术充分发挥泡沫比水雾表面积大、湿润性和黏附性强的抑尘和捕尘优势,降尘效率较普通喷雾提高30个百分点以上,而耗水量降低60%~80%,已在国内几十个煤矿获成功应用。这些年来,作者还指导研究生和博士后在粉尘防治方向完成了4篇博士论文、13篇硕士论文和1篇博士后报告。

为总结国内外在该领域的最新研究成果,作者到我国防尘技术先进的神东、潞安、淮南、淮北、枣庄、开滦、平朔、大屯等矿区进行了调研,也赴美国、澳大利亚、波兰、南非等这

些世界采矿技术先进的国家进行了考察。在广泛调研、考察与深入研究的基础上,作者对国内外粉尘防治知识、技术及原理,包括本团队的原创性成果等进行了系统总结、归纳与凝练,完成了本书的写作。全书共 10 章。第 1~4 章介绍粉尘学基础知识,包括研究背景、粉尘防治技术发展概况、粉尘的产生及性质、粉尘的危害(尘肺病与煤尘爆炸)等基础内容。第 5~8 章介绍粉尘防治关键技术及原理,包括煤尘注水、通风除尘、喷雾降尘、泡沫降尘等核心内容,这些是本书的重点。第 9~10 章介绍个体防尘和粉尘的检测与监测。

应当指出的是,本书是作者所领导的学术团队多年潜心研究、集体智慧的结晶,凝聚了团队成员的艰苦劳动和心血,没有他们的努力,本书不可能完成。参与研究工作的有:王和堂、王庆国、朱小龙、沈威、姜家兴、陆新晓、汤研、刘建安、李永生、韩方伟、陈贵、鲍庆国、徐超航、曹凯、任万兴、何飞、张祎、汤笑飞、黄本斌、巫斌伟、王兵兵、高庆丛、张义坤、郭新安、胡方坤、贾志强等博士和硕士研究生。这些研究生们常常为研究工作废寝忘食,为现场试验工作长期深入煤矿第一线,为完成本书付出了艰辛的劳动,值本书完成之际,向他们表示衷心的感谢。

中国煤炭工业协会会长、中国煤矿尘肺病防治基金会理事长王显政长期以来特别关心矿工的职业健康与安全,特别重视粉尘的防治工作,当他得知本书完成,非常高兴,欣然为本书作序,使作者及团队人员深受鼓舞,在此特别感谢王显政会长。

本书出版得到了 2014 年度国家科学技术学术著作出版基金(2014-E-089)和国家自然科学基金项目(51474216)的资助,在此表示感谢。科学出版社在本书出版过程中给予了大力支持,编辑在排版、校稿等过程中付出了大量的劳动,在此一并敬致谢忱。

王德明

2014 年 10 月于中国矿业大学南湖校区

目 录

序

前言

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 矿尘的危害 | 1 |
| 1.1.1 尘肺病 | 1 |
| 1.1.2 煤尘爆炸 | 2 |
| 1.2 矿尘防治技术的发展 | 4 |
| 1.2.1 世界矿尘防治技术的发展 | 4 |
| 1.2.2 我国矿尘防治技术的发展 | 6 |
| 1.3 本书的内容与特色 | 8 |
| 1.3.1 本书主要内容 | 8 |
| 1.3.2 本书主要特色 | 8 |
| 参考文献 | 9 |
| 第 2 章 矿尘的性质及产生特性 | 13 |
| 2.1 矿尘的基本性质 | 13 |
| 2.1.1 矿尘的粒径 | 13 |
| 2.1.2 矿尘的粒径分布 | 15 |
| 2.1.3 矿尘中游离 SiO ₂ 含量 | 18 |
| 2.1.4 矿尘的密度 | 19 |
| 2.1.5 矿尘的比表面积 | 20 |
| 2.1.6 矿尘的湿润性 | 21 |
| 2.1.7 矿尘的燃烧性和爆炸性 | 21 |
| 2.2 矿尘的空气动力特性 | 22 |
| 2.2.1 重力沉降 | 22 |
| 2.2.2 布朗运动 | 25 |
| 2.3 矿尘的产生及影响因素 | 26 |
| 2.3.1 矿尘的产生 | 26 |
| 2.3.2 产尘量的影响因素 | 34 |
| 2.3.3 矿尘浓度标准 | 36 |
| 2.4 本章小结 | 38 |
| 参考文献 | 38 |
| 第 3 章 尘肺病 | 41 |
| 3.1 尘肺病的定义 | 41 |

| | | |
|------------|---------------|-----------|
| 3.2 | 粉尘与呼吸系统的作用关系 | 42 |
| 3.2.1 | 粉尘在呼吸系统的沉积 | 43 |
| 3.2.2 | 呼吸系统对粉尘的清除作用 | 45 |
| 3.3 | 尘肺病理学 | 46 |
| 3.3.1 | 尘肺分类 | 46 |
| 3.3.2 | 尘肺的发病机制 | 47 |
| 3.3.3 | 尘肺的病理和临床表现 | 47 |
| 3.3.4 | 尘肺发病的影响因素 | 48 |
| 3.3.5 | 尘肺病的防治 | 49 |
| 3.4 | 本章小结 | 52 |
| | 参考文献 | 52 |
| 第4章 | 煤尘爆炸 | 55 |
| 4.1 | 煤尘爆炸的认识历程 | 55 |
| 4.2 | 煤尘爆炸机理 | 56 |
| 4.3 | 煤尘爆炸特征 | 56 |
| 4.3.1 | 产生高温高压 | 56 |
| 4.3.2 | 易产生连续爆炸 | 57 |
| 4.3.3 | 产生大量有毒有害气体 | 58 |
| 4.3.4 | 产生“黏焦”且挥发分减少 | 58 |
| 4.3.5 | 感应期 | 59 |
| 4.4 | 煤尘爆炸发生条件 | 59 |
| 4.4.1 | 煤尘爆炸性的判别 | 59 |
| 4.4.2 | 悬浮煤尘浓度 | 61 |
| 4.4.3 | 点火源 | 62 |
| 4.5 | 煤尘爆炸的影响因素 | 62 |
| 4.5.1 | 煤尘粒度 | 62 |
| 4.5.2 | 挥发分 | 63 |
| 4.5.3 | 灰分 | 64 |
| 4.5.4 | 水分 | 64 |
| 4.6 | 煤尘爆炸的防治 | 65 |
| 4.6.1 | 防爆 | 65 |
| 4.6.2 | 隔爆 | 69 |
| 4.6.3 | 抑爆 | 70 |
| 4.7 | 本章小结 | 71 |
| | 参考文献 | 71 |
| 第5章 | 煤层注水减尘 | 73 |
| 5.1 | 注水减尘原理 | 73 |
| 5.1.1 | 注水的减尘作用 | 73 |

| | |
|-----------------------|------------|
| 5.1.2 水在煤层中的运动 | 74 |
| 5.1.3 影响注水效果的因素 | 75 |
| 5.2 煤层注水方式 | 77 |
| 5.2.1 长钻孔注水 | 77 |
| 5.2.2 短钻孔注水 | 79 |
| 5.2.3 深孔注水 | 79 |
| 5.3 煤层注水工艺 | 80 |
| 5.3.1 钻孔工艺 | 80 |
| 5.3.2 封孔工艺 | 82 |
| 5.3.3 注水工艺 | 83 |
| 5.4 本章小结 | 87 |
| 参考文献 | 88 |
| 第6章 通风除尘 | 89 |
| 6.1 通风排尘 | 89 |
| 6.1.1 掘进巷道通风排尘 | 89 |
| 6.1.2 采煤工作面通风排尘 | 95 |
| 6.2 通风控尘 | 96 |
| 6.2.1 附壁风筒 | 97 |
| 6.2.2 空气幕 | 104 |
| 6.2.3 控尘风帘 | 107 |
| 6.3 除尘器除尘 | 111 |
| 6.3.1 设备除尘系统 | 111 |
| 6.3.2 湿式除尘器 | 112 |
| 6.3.3 干式除尘器 | 124 |
| 6.4 本章小结 | 129 |
| 参考文献 | 130 |
| 第7章 喷雾降尘 | 133 |
| 7.1 喷雾降尘机理 | 133 |
| 7.1.1 抑尘 | 133 |
| 7.1.2 捕尘 | 134 |
| 7.2 雾化原理及方法 | 140 |
| 7.2.1 雾化机理 | 141 |
| 7.2.2 雾化方法及雾化效果 | 142 |
| 7.3 矿用喷雾降尘技术 | 154 |
| 7.3.1 采煤工作面喷雾降尘 | 154 |
| 7.3.2 掘进工作面喷雾降尘 | 166 |
| 7.3.3 运输作业喷雾降尘 | 174 |
| 7.3.4 巷道全断面喷雾降尘 | 179 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 7.4 本章小结 | 181 |
| 参考文献 | 181 |
| 第8章 泡沫降尘 | 185 |
| 8.1 国内外矿用泡沫降尘技术概况 | 185 |
| 8.2 泡沫基础特性及降尘原理 | 187 |
| 8.2.1 泡沫的形成 | 187 |
| 8.2.2 矿用降尘泡沫系统 | 188 |
| 8.2.3 泡沫降尘原理 | 189 |
| 8.3 降尘发泡剂 | 191 |
| 8.3.1 降尘发泡剂的基本要求 | 192 |
| 8.3.2 普通发泡剂特性 | 192 |
| 8.3.3 一种高效环保的降尘发泡剂 | 193 |
| 8.4 发泡剂添加装置 | 196 |
| 8.4.1 定量泵添加装置 | 197 |
| 8.4.2 负压自吸添加装置 | 197 |
| 8.5 泡沫发生器 | 203 |
| 8.5.1 常规网式泡沫发生器 | 203 |
| 8.5.2 文丘里式泡沫发生器 | 204 |
| 8.5.3 射流泡沫发生器 | 205 |
| 8.6 泡沫喷射装置 | 208 |
| 8.6.1 泡沫喷嘴 | 209 |
| 8.6.2 泡沫喷嘴安装支架 | 212 |
| 8.7 泡沫降尘技术的应用 | 215 |
| 8.7.1 综掘工作面泡沫降尘的应用 | 215 |
| 8.7.2 综采工作面泡沫降尘应用 | 218 |
| 8.7.3 皮带转载点泡沫降尘应用 | 222 |
| 8.8 本章小结 | 224 |
| 参考文献 | 224 |
| 第9章 个体防尘 | 227 |
| 9.1 个体防尘装备的发展 | 227 |
| 9.2 过滤式防尘装备 | 228 |
| 9.2.1 自吸过滤式 | 228 |
| 9.2.2 送风过滤式 | 229 |
| 9.3 隔绝压风式防尘装备 | 230 |
| 9.4 本章小结 | 231 |
| 参考文献 | 231 |
| 第10章 矿尘的检测与监测 | 232 |
| 10.1 矿尘浓度的监测 | 232 |

| | |
|--|-----|
| 10.1.1 粉尘采样器 | 232 |
| 10.1.2 粉尘浓度监测仪及在线监测系统 | 238 |
| 10.2 粉尘分散度及游离 SiO ₂ 含量的检测 | 243 |
| 10.2.1 粉尘分散度的检测 | 243 |
| 10.2.2 粉尘中游离 SiO ₂ 含量的检测 | 246 |
| 10.3 本章小结 | 248 |
| 参考文献 | 249 |

第 1 章 绪 论

矿业是国民经济的基础产业,但矿井建设及生产过程产生的矿尘对矿山从业人员的健康和生命安全造成严重危害及威胁。为防治矿尘灾害,实现矿业安全健康发展,国内外科技工作者进行了长期而卓有成效的研究,不断推出矿尘防治的研究成果,使矿尘防治的理论和技術得到不断完善和成熟,形成了一套较完整的反映矿尘产生、危害及其防治的科学与技术体系,作者对此进行了系统总结与概括,编写了本书,以进一步推动矿尘防治的科技进步。本章简要介绍矿尘的危害、矿尘防治技术的发展及本书的主要内容与特色。

1.1 矿尘的危害

矿尘是矿山开采中的最主要职业危害与自然灾害之一。矿尘的危害主要体现在两个方面:一方面,矿山工人长期吸入高浓度的呼吸性粉尘,可导致其肺部组织发生不可治愈性的纤维性病变(即尘肺病),使其终生痛苦不堪,甚至因尘肺病而丧失生命;另一方面,具有爆炸危险性的煤尘在一定条件下可发生煤尘爆炸,造成重大人员伤亡。尘肺病和煤尘爆炸造成的经济损失都是十分巨大的,并带来极其不良的社会影响。

1.1.1 尘肺病

1. 人类认识尘肺的过程

1866年,德国学者曾克尔(Zenker)首先提出了“尘肺”这一名词,用以概括因吸入粉尘所致的肺部疾病^[1],从而使尘肺作为一种独立疾病列入了肺疾病的分类之中。1896年,德国物理学家威廉·康拉德·伦琴发明了X光机,为识别尘肺病提供了手段。1930年,在南非约翰内斯堡召开的第一届国际尘肺会议上,将尘肺定义为“吸入游离SiO₂所致的肺部疾病状态”^[2],以后认识到其他粉尘亦能引起尘肺病,尘肺病被定义为“吸入粉尘而发生的以肺组织纤维化为主的疾病”。

2. 矿山尘肺病现状

尘肺病是矿山最主要、最严重的职业病。与安全生产事故相比,尘肺病更具普遍性,广泛存在于世界各主要产煤国。例如,美国井工煤矿工龄在25年以上的工人的尘肺病检出率高达8%,1970~2004年因尘肺病死亡69 337人,远多于同时期煤矿事故死亡人数总和;此外,1980~2005年因尘肺病造成直接经济损失超过390亿美元^[3]。英国煤矿1996~2011年新增尘肺病7800例,1993~2010年因尘肺病死亡3741人,即平均每年有约208人死于尘肺病^[4],而该国1993年以来每年因煤矿事故死亡的人数一直在20人以內^[5]。

我国是世界上接触粉尘和患尘肺患者数最多的国家^[6],接尘工人超过2000万人^[7],

据卫生部通报数据,截至 2012 年年底,全国累计报告尘肺病 727 148 例,死亡 149 110 例,其中 2012 年共报告尘肺病新病例 24 206 例,占 2012 年职业病报告总例数的 88.28%;2013 年共报告尘肺病新病例 23 152 例。与其他行业比较,煤炭行业的尘肺病问题最为严重,全国煤矿有数百万名接尘矿工,患尘肺患者数占全国尘肺病患者总人数的 50%左右^[8]。当前,我国煤矿每年因尘肺病死亡人数已超过各类事故死亡人数的总和,如 2012 年煤矿事故死亡人数已控制在 1400 人以下,但尘肺病死亡人数则高达 1800 人,尘肺病防治形势日趋严峻^[9]。

1.1.2 煤尘爆炸

1. 人类认识煤尘爆炸的过程

1803 年,英国沃尔德逊煤矿发生的一起煤尘爆炸事故,是世界上有记载的第一起煤尘爆炸事故。1880 年,英国化学家弗雷德里克·亚伯(Frederick Abel)对英国锡厄姆(Seaham)发生一起导致 164 人死亡的爆炸事故进行调查,对煤尘的爆炸性进行了试验并确认了煤尘的爆炸性。1906 年,在法国考瑞尔斯矿(Courriers mine)发生了一起煤尘爆炸事故,导致 1096 人死亡,这次事故震惊了全世界,自此各国加快了研究煤尘爆炸防治理论与技术的步伐^[10,11]。

2. 煤尘爆炸的灾难性

煤尘爆炸是煤矿中致灾性最严重的灾害。与瓦斯爆炸相比,煤尘爆炸的强度和致死范围更大、破坏性更强,造成的灾难更为严重。在世界煤炭开采史上,死亡人数最多的矿难几乎都是煤尘或瓦斯煤尘爆炸事故。如表 1.1 所列,世界上有记载的 18 起死亡 300 人以上煤矿特大事故中,16 起为煤尘爆炸或瓦斯煤尘爆炸事故^[12],事故起数占 88.9%,死亡人数占 91.6%。

表 1.1 世界煤矿死亡 300 人以上的特大事故

| 序号 | 时间 | 煤矿 | 事故类型 | 死亡人数 | 备注 |
|----|------------|--------------------------|--------|------|-----------------|
| 1 | 1942.04.26 | 中国辽宁本溪湖煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 1549 | 世界最大矿难 |
| 2 | 1906.03.10 | 法国 Courrières 煤矿 | 煤尘爆炸 | 1099 | 法国最大矿难 |
| 3 | 1914.12.15 | 日本九州 Mitsubishi Hojyo 煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 687 | 日本最大矿难 |
| 4 | 1960.05.09 | 中国山西老白洞煤矿 | 煤尘爆炸 | 684 | 中国 1949 年以来最大矿难 |
| 5 | 1972.06.06 | 津巴布韦 Wankie 二矿 | 煤尘爆炸 | 472 | 津巴布韦最大矿难 |
| 6 | 1963.11.09 | 日本九州 Mitsui Miike 煤矿 | 煤尘爆炸 | 458 | |
| 7 | 1913.10.14 | 英国威尔士 Senghenydd 煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 439 | 英国最大矿难 |
| 8 | 1960.01.21 | 南非 Coalbrook 煤矿 | 顶板岩石冒顶 | 437 | 南非最大矿难 |
| 9 | 1914.11.28 | 日本北海道 New Yubari 煤矿 | 煤尘爆炸 | 422 | |
| 10 | 1946.02.20 | 德国 Grimberg 3/4 煤矿 | 煤尘爆炸 | 405 | 德国最大矿难 |
| 11 | 1917.12.21 | 日本九州 Onoura 煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 376 | |
| 12 | 1965.05.28 | 印度比哈尔邦 Dhori 煤矿 | 火灾 | 375 | 印度最大矿难 |

续表

| 序号 | 时间 | 煤矿 | 事故类型 | 死亡人数 | 备注 |
|----|------------|--------------------------|--------|------|--------|
| 13 | 1975.12.27 | 印度比哈尔邦 Sudamdih 煤矿 | 煤尘爆炸 | 372 | |
| 14 | 1907.07.20 | 日本九州 Hokoku 煤矿 | 煤尘爆炸 | 365 | |
| 15 | 1907.12.06 | 美国西弗吉尼亚州 Monongah 煤矿 | 煤尘爆炸 | 362 | 美国最大矿难 |
| 16 | 1866.12.12 | 英国约克郡 Oaks 煤矿 | 煤尘爆炸 | 361 | |
| 17 | 1908.11.12 | 德国 Radbod Schacht 1/2 煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 348 | |
| 18 | 1910.12.21 | 英国 Pretoria Pit 煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 344 | |

我国的煤尘爆炸灾害十分严重,国有重点煤矿中有 532 处煤矿的煤尘具有爆炸危险性,占 87.37%,具有煤尘强爆炸性的煤矿占 60%以上^[13]。1949~2013 年全国煤矿发生死亡百人以上特大事故 25 起^[14],死亡 3953 人,其中 14 起为煤尘爆炸事故或瓦斯煤尘爆炸事故,死亡 2359 人,事故起数占 56%,死亡人数占 59.7%,见表 1.2。

表 1.2 全国煤矿死亡百人以上的大事故(1949~2013 年)

| 序号 | 时间 | 煤矿 | 事故类型 | 死亡人数 |
|----|------------|--------------------|--------------|------|
| 1 | 1950.02.27 | 河南省宜洛煤矿 | 瓦斯爆炸 | 187 |
| 2 | 1954.12.06 | 内蒙古包头矿务局大发煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 104 |
| 3 | 1960.03.16 | 辽宁抚顺矿务局胜利煤矿 | 火灾 | 113 |
| 4 | 1960.05.09 | 山西大同矿务局老白洞煤矿 | 煤尘爆炸 | 684 |
| 5 | 1960.05.14 | 重庆松藻矿务局同华煤矿 | 煤与瓦斯突出 | 125 |
| 6 | 1960.11.28 | 河南平顶山矿务局龙神庙煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 187 |
| 7 | 1960.12.15 | 重庆中梁山煤矿南井 | 瓦斯煤尘爆炸 | 124 |
| 8 | 1968.10.24 | 山东新汶矿务局华丰煤矿 | 煤尘爆炸 | 108 |
| 9 | 1969.04.04 | 山东新汶矿务局潘西煤矿 | 煤尘爆炸 | 115 |
| 10 | 1975.05.11 | 陕西铜川矿务局焦坪煤矿前卫斜井 | 瓦斯煤尘爆炸 | 101 |
| 11 | 1977.02.24 | 江西丰城矿务局坪湖煤矿 | 瓦斯爆炸 | 114 |
| 12 | 1981.12.24 | 河南平顶山矿务局五矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 133 |
| 13 | 1991.04.21 | 山西洪洞县三交河煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 147 |
| 14 | 1996.11.27 | 山西大同市新荣区郭家窑乡东村煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 110 |
| 15 | 2000.09.27 | 贵州省水城矿务局木冲沟煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 162 |
| 16 | 2002.06.20 | 黑龙江鸡西矿业集团公司城子河煤矿 | 瓦斯爆炸 | 124 |
| 17 | 2004.10.20 | 河南郑州矿务局大平煤矿 | 煤与瓦斯突出引发瓦斯爆炸 | 148 |
| 18 | 2004.11.28 | 陕西省铜川矿务局陈家山煤矿 | 瓦斯爆炸 | 166 |
| 19 | 2005.02.14 | 辽宁阜新矿业(集团)公司孙家湾煤矿 | 瓦斯爆炸 | 214 |
| 20 | 2005.08.07 | 广东省梅州市兴宁市黄槐镇大兴煤矿 | 透水 | 123 |
| 21 | 2005.11.27 | 黑龙江龙煤集团七台河分公司东风煤矿 | 煤尘爆炸 | 171 |
| 22 | 2005.12.07 | 河北唐山市开平区刘官屯煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 108 |
| 23 | 2007.08.07 | 山东新泰华源煤矿 | 灌水 | 172 |
| 24 | 2007.12.05 | 山西临汾洪洞县瑞之源煤业公司新窑煤矿 | 瓦斯煤尘爆炸 | 105 |
| 25 | 2009.11.21 | 黑龙江鹤岗新兴煤矿 | 煤与瓦斯突出引发瓦斯爆炸 | 108 |

1.2 矿尘防治技术的发展

1.2.1 世界矿尘防治技术的发展

自 1803 年英国发生有史记载的最早一起煤尘爆炸事故和 1866 年德国学者提出“尘肺”概念以来,世界各采矿国家为防治矿尘灾害进行了艰苦卓绝的探索,经过上百年的发展,国际上已经形成了涵盖煤层注水减尘、通风除尘、喷雾降尘、泡沫降尘、个体防尘、阻隔爆技术、矿尘检测与监测等技术的综合防尘技术体系。

1. 煤层注水减尘

20 世纪 40 年代,苏联为解决由于机械化采煤中的粉尘问题,首次开展了煤层注水减尘的试验并取得较显著效果,煤层注水技术被列入了煤矿作业规程^[15]。德国于 1943 年在鲁尔区开始短钻孔注水试验,1948 年在该煤田所有矿井推广。自 20 世纪 50 年代起,波兰、英国、比利时和美国等主要产煤国都开展了煤层注水试验研究与推广^[16],煤层注水成为采煤工作面的一项基本防尘措施。为提高煤层注水的减尘效果,苏联研制出能自动调节注水参数的注水泵^[17],德国研制出注水恒定流量控制阀和动压多孔注水控制技术,美国矿业局研制出一种高效和低成本的注水钻孔封孔器^[18,19]。经过半个多世纪的发展,煤层注水现已成为世界上采煤国家适宜注水煤层广泛采用的一项成熟技术。

2. 通风除尘

通风除尘包括通风排尘、通风控尘与除尘器除尘。通风排尘是矿井通风最基本的任务之一。德国人格奥尔格·阿格里科拉(Georgius Agricola)在 1556 年完成第一部涉及采矿的著作 *De Re Metallica* (《矿冶全书》)中,首次对通风排尘作用进行了描述^[20],以后经过不断发展,形成了较完善的矿井通风理论。自 20 世纪 50 年代起,除尘器开始在煤矿获得应用,主要用于当通风排尘不能满足要求的地点。除尘器除尘包括干式除尘器和湿式除尘器^[21~23]。湿式除尘器分为湿式过滤、湿式洗涤以及湿式旋流除尘器,70 年代中期,英国、美国分别研制出在连采机上使用的小型湿式过滤除尘器,因其体积小、能耗低、运行可靠,对呼吸性粉尘除尘效率高,后成为煤矿中使用最为普遍的除尘设备^[24]。干式除尘器分为重力、旋风以及袋式除尘器,其中重力除尘器与旋风除尘器用于多级除尘的预处理,干式除尘器以袋式除尘器为主要代表,可用于大型掘进巷道的除尘,目前在矿井应用较少。通风控尘是配合通风排尘和除尘器使用的控风设施,包括附壁风筒、风幕和挡尘帘等。附壁风筒是在 60 年代由德国学者克·雷内尔提出的一种利用对流附壁效应的风筒,用于改变掘进面的风流状态,现主要与除尘器配合使用,以保障含尘风流能有效进入到除尘器中^[25,26]。

3. 喷雾降尘与泡沫降尘

人类对喷雾捕尘的认识始于雨滴洗涤大气中的尘埃。早在 1911~1925 年,英国、美

国等国家开始利用喷雾、洒水等措施进行降尘^[27]。20世纪30~40年代中期,雾化方式以直射雾化为主,50年代后,离心雾化、旋转雾化、撞击雾化等方式开始出现。喷雾降尘的作用主要是通过水的雾化,利用雾滴捕尘,但效率不高,美国矿业局测定的结果为20%~60%,平均降尘率为30%。70年代,各国大力研究高压水射流辅助截割技术,美国矿业局匹茨堡研究中心在研究中发现,当工作水压达到12.7MPa时,可以显著降低割煤时的呼吸性粉尘产生量,此后苏联、德国、英国、澳大利亚等国也陆续开始了高压喷雾降尘技术的研究^[28]。70年代,美国提出了内喷雾技术,最初是为预防采掘机械产生摩擦火花,防止瓦斯燃烧与爆炸,随后研究表明内喷雾能在煤尘未进入空气中之前将其润湿,可避免大量浮尘的产生,显著降低采煤工作面的粉尘浓度。由于密封和堵塞问题难以解决,直到90年代初,美国才开始强制使用内喷雾系统^[29],目前内喷雾技术在世界范围内受到广泛关注,被认为是能够大幅降低呼吸性粉尘的浓度的关键技术。

为提高降尘率,20世纪40年代后期,英国最先进行矿山泡沫降尘的研究,之后苏联、匈牙利、美国、比利时、德国、日本围绕井下采掘主要产尘地点的泡沫降尘技术进行了研究,在应用中也取得了高效降尘的效果,但因面临泡沫制备技术复杂和运行成本高的问题,导致泡沫降尘技术的发展和应用受到制约。

4. 个体防尘

矿井的一些重点产尘环节,尽管采取了防尘措施,但也难以使粉尘浓度达到卫生标准,有时还严重超标,所以,个体防护是综合防尘工作中的最后一个关口。20世纪初期,欧洲的一些工业化程度较高的国家为了保障工人的身体健康,率先采用海绵防尘口罩作为个体防尘护具;50年代,欧洲、美国开始采用纱布口罩作为自吸过滤式的防尘护具,但是纱布口罩只能过滤 $5\mu\text{m}$ 以上的颗粒;70年代后期,美国研究出一种直径 $5\mu\text{m}$ 以下的气流喷射法纺的超细纤维,近年来又研制出熔喷布的纤维,以聚丙烯为主要原料,纤维直径可达 $0.5\sim 0.1\mu\text{m}$,成为个体防护装备主要的过滤材料。美国、法国等在80年代研发出电动送风正压防尘口罩和电动送风防尘头盔,克服了自吸过滤式呼吸阻力偏高的缺点,缓解了阻尘率与呼吸阻力之间的矛盾,但也存在造价高和较笨重的不足。

5. 阻隔爆技术

1910年,法国人塔法内尔(Taffanel)设计出了世界上第一个以搁板式粉尘隔爆棚^[30]。此后,德国又提出了水槽棚的隔爆措施,至今这两种方式仍为煤矿阻隔爆的必备手段。现在使用最广泛的隔爆棚是波兰提出的搁板式岩粉隔爆棚和德国提出的水槽棚。为解决搁板式岩粉防潮湿的难题,南非提出了吊挂式岩粉隔爆袋。世界各国还广泛采用在煤矿井下开采具有煤尘爆炸危险性的地点撒布岩粉作为预防煤尘爆炸的措施,也是防止事故扩大的有效方法。近年来,南非、波兰、澳大利亚等发达采矿国家已研制出主动(自动)抑爆装置,并在一定范围内进行了试验应用。随着科技的不断进步,自动抑爆装置将会得到更多应用。

6. 粉尘检测与监测

20世纪中叶,英国医学研究委员会(BMRC)和美国原子能委员会(AEC)分别提出了

粉尘采样标准曲线,并于1959年在南非国际尘肺会议上得到承认。该会议期间同时确定了以计重法表示粉尘浓度。此后,粉尘浓度检测与监测仪器即依据上述粉尘采样标准曲线进行研制和校验。粉尘浓度监测仪器经历了由单纯采样向采样兼实时测定等功能的发展,其采样方式经历了由短时到长时、单点到多点、个体采样与定点采样相结合的转变。目前国内外矿山企业使用较多的粉尘浓度监测仪器为个体采样器和基于光散射和 β 射线吸收等原理的粉尘直读仪以及粉尘浓度传感器。粉尘中游离 SiO_2 含量检测技术经历了由化学方法(焦磷酸重量法)向物理方法(X射线衍射法和红外分光光度法)的转变。国际常用的粉尘分散度检测技术有安德逊移液管法、滤膜溶解涂片法和激光粒度分析法等。

1.2.2 我国防尘技术的发展

新中国成立以来,我国在防尘防治技术方面进行了长期而艰辛的探索与实践,经历了一个从无到有、从单一手段到综合防尘、从常规手段到新兴技术不断涌现的发展过程。

新中国成立初期,我国煤矿井下基本没有防尘措施,普遍采用干式作业,作业场所岩尘浓度平均高达 $120\sim 180\text{mg}/\text{m}^3$ 、煤尘浓度平均高达 $400\sim 1000\text{mg}/\text{m}^3$ ^[31],粉尘危害逐步显现出来,引起了党和国家的高度重视。1956年,国务院发布了《关于防止厂、矿企业中矽尘危害的决定》,明确规定:矿山应采用湿式凿岩和机械通风;厂矿企业工作地点,游离 SiO_2 含量超过10%的粉尘,浓度必须降到 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下^[32]。1956~1957年,煤炭部抚顺科学研究院在本溪彩屯矿进行了国内第一次长钻孔煤层注水的试验^[33]。从1958年起,国有重点煤矿绝大多数全岩及半煤岩掘进工作面实现了湿式凿岩。从1963年起开始在岩巷掘进面采用加强通风、湿式凿岩、放炮喷雾、装岩洒水、冲洗岩帮等综合防尘措施^[32],该五项措施加上水封爆破后来纳入“岩巷掘进十六项经验”和“煤巷半煤岩巷掘进十五项经验”,从而形成了煤矿掘进综合防尘经验,并在开滦、资兴、鹤壁等多个矿区得到了推广^[34]。对于采煤工作面的防尘,20世纪60~70年代,抚顺、石炭井、本溪、阳泉、新汶、开滦、萍乡等多个矿区试验了煤层注水和采空区灌水预湿煤体技术,有效降低了工作面浮尘浓度,从而使得该技术成为我国采煤工作面的一项积极、有效的防尘措施^[35]。

20世纪70年代末至80年代,党中央发布了《认真做好劳动保护工作的通知》(1978年),国务院发布了《关于加强防尘防毒工作的决定》(1984年)、颁布了《中华人民共和国尘肺病防治条例》(1987年),防尘防治工作受到高度重视,有力推动了防尘工作。这一时期,煤炭科学研究总院重庆研究院(简称“重庆煤科院”)等科研院所及石炭井焦煤公司、阳泉矿务局等企业开展了煤层注水工艺及配套设备的研究,研制出用于动压注水的注水泵、高压水表、封孔器和分流器及注水专用钻机,实现了用一台注水泵向多孔等量注水、自动封孔和注水量的自动记录,使煤层注水技术得到进一步发展和推广^[36~41]。重庆煤科院等单位研制了标准化的喷雾用喷嘴、用于转载运输系统的自动喷雾控制器及降尘装置^[42~45],进行了采煤机内外喷雾装置及高压水喷雾的试验与应用^[46~49],有力促进了我国喷雾降尘技术的发展。东北大学、重庆煤科院以及双鸭山矿务局、兖州矿务局、淮南矿务局、徐州矿务局、阳泉矿务局等单位进行了掘进面通风排尘、掘进机除尘器、水射流除尘风机、湿式除尘风机、掘进巷道抽压混合式通风除尘系统的研究及应用,推动了我国煤矿通风除尘技术的发展^[50~58]。在个体防护方面,研制了送风式防尘口罩和防尘安全帽以及适