

国家自然科学基金项目(51504249)资助

中国博士后科学基金项目(2016M590520)资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015XKMS009)资助

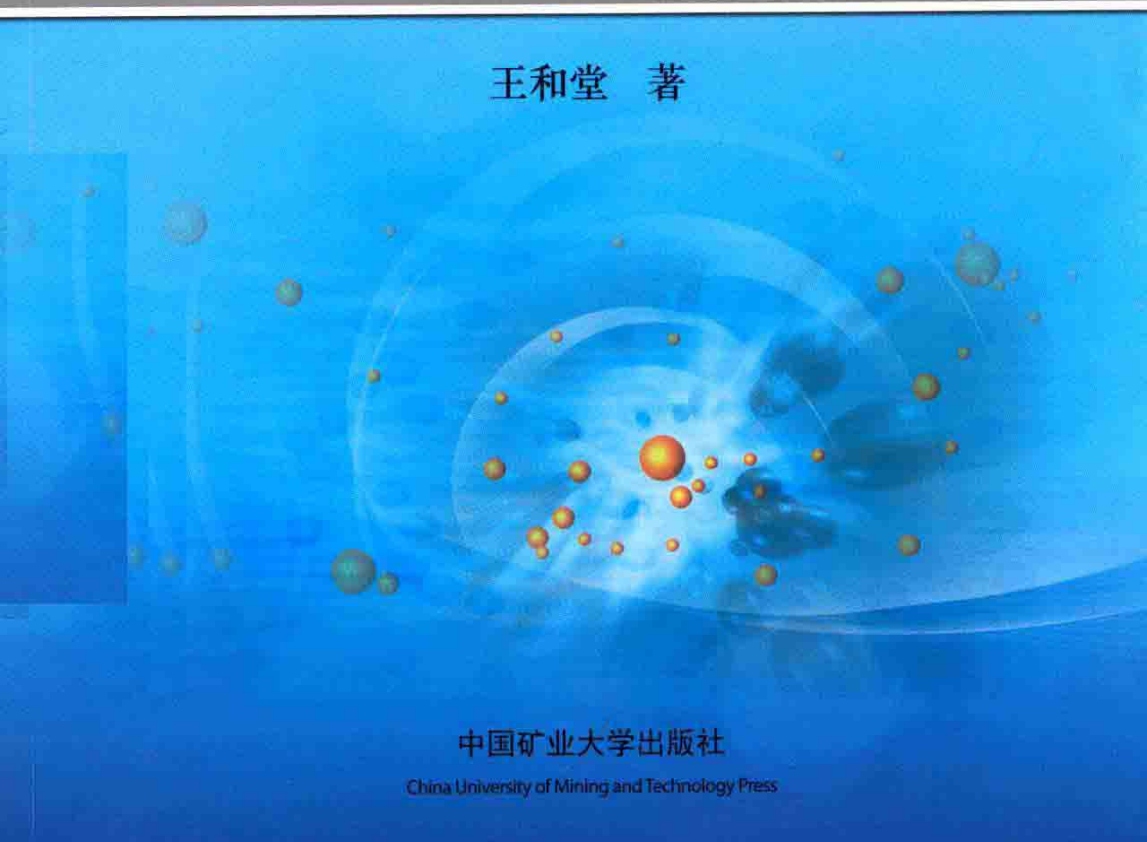
江苏省博士后科研资助计划项目(1601234C)资助

江苏高校优势学科建设工程二期项目(安全科学与工程)资助

自吸空气-发泡剂旋流产泡原理及 矿山抑尘应用

*Foam Generation Principle of Rotational Flow
With Air and Foaming Agent Self-suction and Its
Dust Suppression Application in Mines*

王和堂 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51504249)资助

中国博士后科学基金项目(2016M590520)资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015XKMS009)资助

江苏省博士后科研资助计划项目(1601234C)资助

江苏高校优势学科建设工程二期项目(安全科学与工程)资助

自吸空气-发泡剂旋流 产泡原理及矿山抑尘应用

王和堂 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以高效低耗制备矿山抑尘泡沫为出发点和落脚点,全面阐述自吸旋流法产泡原理、方法及其矿山抑尘应用。全书共分为8章,包括抑尘泡沫形成的理论基础、自吸空气-发泡剂旋流产泡理论分析、紊动射流自吸空气特性、射流自吸发泡剂特性、气液旋流低阻产泡特性、自吸式泡沫抑尘系统及现场应用等内容。

本书可供安全工程、矿业工程、环境工程、工业卫生等相关专业的高校师生和科研院所的研究人员及企业的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

自吸空气-发泡剂旋流产泡原理及矿山抑尘应用/

王和堂著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3332 - 5

I. ①自… II. ①王… III. ①矿山—除尘—研究

IV. ①TD78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 263043 号

书 名 自吸空气-发泡剂旋流产泡原理及矿山抑尘应用

著 者 王和堂

责任编辑 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 191 千字

版次印次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 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

煤矿粉尘可导致尘肺病和爆炸事故,是煤矿中最严重的危害之一。全国尘肺病患者已超过 100 万人,其中近 50% 为煤矿工人,“尘肺村”、“开胸验肺”和尘肺病人“跪着等死”等事件或现象的报道不断折射出尘肺之殇。我国 80% 以上煤矿的煤尘具有爆炸危险性,煤尘爆炸是煤矿中伤亡最惨重的事故类型,新中国成立以来煤矿发生的 25 起一次死亡百人以上の特大事故中,14 起为煤尘爆炸或瓦斯煤尘爆炸,占比 56%。因此,防治煤矿粉尘是煤矿职业健康与安全工作的核心,是贯彻落实以人为本的科学发展观和实现煤矿清洁文明生产的必然要求。

近年来,随着矿井综合机械化程度的大幅提高和开采强度的持续增加,总产尘量急剧上升,疏水性的呼吸性粉尘比重增大,迫切需要进行高效除尘技术的研究、开发和应用。与水雾相比,泡沫的表面积和流量大、黏附和湿润能力强,是提高捕尘效率的极为有效的途径之一。其中,泡沫的高效可靠制备是泡沫抑尘的核心内容,不仅是实施泡沫抑尘的先决条件,还直接影响抑尘效果和运行成本。然而,现有的泡沫制备技术存在适用性差、安全可靠性低、制备成本高、产泡能力弱等问题,严重阻碍了泡沫抑尘技术的发展和应川。

为解决上述问题,作者基于对本领域研究前沿的把握和关键科学技术问题的理解,提出了自吸空气-发泡剂旋流产泡的学术思想,并采用理论分析、实验室实验、数值模拟与现场试验相结合的综合研究方法,较为系统地研究了这一新课题,取得的主要成果有:发明了自吸空气-发泡剂旋流产泡方法与装置,实现了从供压风发泡到自吸空气产泡的突破,提高了泡沫制备的适用性、可靠性和经济性;通过研究紊动射流自吸空气、射流自吸发泡剂特性和气液旋流低阻高效产泡特性,阐释了自吸空气-发泡剂旋流产泡原理;针对井下条件及采掘机械产尘特点,开发了矿山自吸空气式泡沫抑尘技术,并在淮北朱仙庄煤矿采掘工作面成功进行了工业性试验。实践证明,自吸空气-发泡剂旋流产泡原理与方法实现了压力水和发泡剂小流量供给条件下的低阻高效产泡,解决了泡沫制备困难、可靠性低和制备成本高的问题,为泡沫抑尘技术的应用开辟了新途径。该项研究已获授权发明专利 6 件,发表 SCI 论文 7 篇,获“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛二等奖、中国煤炭工业协会科学技术一等奖和中国职业安全健康协会科

学技术一等奖各 1 项。

值本书付梓之际, 特别感谢导师王德明教授多年来对作者的启迪、指导、培养和关怀。是王老师带我走进矿山安全与环保科学研究的前沿领域。恩师高尚的道德情操、求真务实的治学态度, 充满激情的工作作风和开拓进取的创新精神深深地影响着我。淮北矿业集团朱仙庄煤矿的有关领导及瓦斯办、通风区、综掘二区、综采一区的技术人员在现场试验研究过程中给予了密切配合, 仲晓星、任万兴等师兄, 刘伟、高庆丛、郭新安、曹凯等同学, 汤研、王庆国、张义坤、贾志强、王旭东、何飞、韩方伟、张祎、陆新晓、刘建安、朱小龙、汤笑飞、沈威等师弟在本书研究方面提供了不少帮助, 在此向他们表示衷心的感谢!

感谢国家自然科学基金项目(51504249)、中国博士后科学基金项目(2016M590520)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015XKMS009)、江苏省博士后科研资助计划项目(1601234C)和江苏高校优势学科建设工程二期项目(安全科学与工程)对本书的资助。

中国矿业大学出版社及相关编辑在本书出版过程中给予了大力支持, 在此一并表示感谢!

作 者

2016 年 10 月

主要变量注释表

符号	含义	符号	含义
R_m	面积比	A_i	i 断面的截面积
R_{td}	距径比	L_{tn}	喉管入口到射流喷嘴出口的距离
d_m	吸液室出口直径	R_{ld}	长径比
L_m	喉管长度	R_q	气水比
q_i	吸入第 i 种物质的体积流量	R_{aga}	发泡剂添加比例
ρ_l	发泡剂密度	ρ_0	水的密度
E_t	发泡倍数	q_f	生成泡沫的体积
R_h	能量比	p_{ij}	i 流体在 j 断面处的压力
ρ_{ij}	i 流体在 j 断面处的密度	u_{ij}	i 流体在 j 断面处的速度
Re	射流的雷诺数	b_0	射流特征半厚度
u_0	射流初始流速	ν_i	射流工作流体的运动黏度
u_i	i 方向的瞬时流速	$\overline{u_i}$	i 方向的时均流速
u'_i	i 方向的脉动流速	p_{atm}	大气压的静压强
p_t	喉管入口处的静压强	α_{ki}	i 断面的动能修正系数
ξ_{a1}	吸气孔入口(断面突然缩小)的局部阻力系数	ξ_{a2}	吸气孔出口(断面突然扩大)的局部阻力系数
ξ_{b1}	吸液管入口的局部阻力系数	ξ_{b2}	吸液孔出口的局部阻力系数
F_i	质量力	T_1	喉管入口的绝对温度
T_2	发泡室出口的绝对温度	k	气体绝热指数
n	气体多变过程指数	c_m	液相的比热
φ_1	射流喷嘴的流速系数	φ_2	吸气室收缩段的流速系数
φ_3	吸液室收缩段(亦为喉管入口段)流速系数	φ_4	喉管进口段流速系数
f_i	i 断面的过流面积	h_{4-5}	发泡室的沿程损失
h_{3-4}	扩散室的沿程损失	$\dot{m}_{g0}$	从空气传递到水相的质量
$\dot{m}_{0g}$	从水相传递到空气的质量	$\overline{\tau}_0$	水相的应力-应变张量
$\overrightarrow{F_0}$	外部体积力	$\overrightarrow{F_{lift,0}}$	升力
$\overrightarrow{F_{vm,0}}$	虚拟惯性力	$\overrightarrow{R_{0g}}$	水相与空气相之间的相互作用力
h_0	水相的比焓	$\overrightarrow{q_0}$	热通量
S_0	包含焓的源项	Q_{0g}	水相与气相之间的热传导强度
h_{g0}	相间的焓值	α_h	吸气室收缩半角
S_p	c_i 和 c_j 的协方差	c	粉尘浓度

续表

符号	含义	符号	含义
S_c	c 的标准差	$\overline{\eta}$	某防尘措施的平均降尘效率
$\overline{\eta_{\text{rf}}}$	总粉尘降尘效率	$\overline{\eta_{\text{rf}}}$	呼吸性粉尘降尘效率
Δp_{f}	发泡室压力降	p_{m}	混合室入口负压
$\overline{c_0}$	采取某种防尘措施前的平均粉尘浓度	$\overline{c_1}$	采取某种防尘措施后的平均粉尘浓度
S_{c0}	c_0 的标准差	S_{c1}	c_1 的标准差
S_{c0c1}	c_0 与 c_1 的协方差		

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 我国矿尘防治技术的发展	4
1.3 泡沫除尘技术的应用现状	6
1.4 除尘泡沫制备技术研究综述	8
1.5 本书提出与研究的科学问题	11
1.6 研究内容与技术路线	12
2 射流自吸式低阻产泡及抑尘基础	14
2.1 喷射传质与气液两相流动	14
2.2 表面活性剂水溶液的发泡	19
2.3 表面活性剂湍流减阻	28
2.4 抑尘泡沫的基础特性	31
3 自吸空气-发泡剂旋流产泡理论分析	37
3.1 自吸空气-发泡剂旋流产泡装置设计原理	37
3.2 发泡装置内紊动射流特性分析	45
3.3 气液自吸与混合过程的理论分析	49
3.4 本章小结	56
4 射流自吸空气特性的数值模拟与实验研究	57
4.1 吸气特性数值模拟策略	57
4.2 模拟结果与分析	61
4.3 吸气特性实验方案	64
4.4 实验结果	67
4.5 结果讨论	72
4.6 本章小结	78

5 压力水射流自吸发泡剂特性实验	80
5.1 发泡剂物性测试	81
5.2 自吸发泡剂特性实验方案	85
5.3 实验结果	88
5.4 结果讨论	91
5.5 本章小结	94
6 气液旋流产泡特性数值模拟与实验研究	96
6.1 旋流构件的数值模拟与设计	96
6.2 产泡特性实验方案	101
6.3 实验结果	105
6.4 结果讨论	107
6.5 本章小结	111
7 自吸旋流法产泡原理的矿山抑尘应用	113
7.1 朱仙庄煤矿Ⅱ1051综采工作面泡沫抑尘实践	113
7.2 朱仙庄煤矿810轨道上山综掘工作面泡沫抑尘实践	122
7.3 本章小结	129
8 全书总结	130
8.1 主要结论	130
8.2 创新与特色	132
参考文献	133

1 绪 论

1.1 研究背景

煤炭工业是关系国家经济命脉和能源安全的重要基础产业,为国民经济的健康可持续发展提供了重要能源保障。我国是世界上最大的煤炭生产和消费国,2012年原煤产量达36.5亿吨,煤炭消费量达37.466亿吨,分别占2012年世界煤炭总产量和总消费量的47.5%和50.2%^[1,2]。煤炭在我国一次能源结构中一直占70%左右,在未来相当长的时期内,其作为主体能源的地位不会改变^[3,4]。

但是,我国煤炭赋存及地质条件复杂,95%以上的煤矿为井工开采^[5],面临瓦斯、矿尘、火灾、顶板、突水等自然灾害和矿尘、高温、噪声等职业危害的严重威胁,重特大灾害事故和恶性职业病事件仍时有发生,安全生产和职业健康形势相当严峻^[6,7]。其中,矿尘作为伴随煤炭开采过程产生并能较长时间悬浮于空气中的细微煤岩颗粒,不仅是煤矿最严重的职业危害因素,广泛导致矿工尘肺病^[8,9],还是煤矿主要的灾害源之一,时常造成重特大煤尘爆炸事故。

尘肺病是由于在职业活动中长期吸入生产性粉尘并在肺内存留而引起的以肺纤维化为主的全身性疾病,广泛存在于世界各主要产煤国。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^[10]。英国煤矿1996~2011年新增尘肺病7 800例,1993~2010年因尘肺病死亡3 741人,即平均每年有约208人死于尘肺病^[11],而该国1993年以来每年煤矿事故死亡人数一直在20人以内^[12]。

我国是世界上接触粉尘和患尘肺病人数最多的国家^[13],接尘工人超过2 000万人^[14],截至2010年年底,全国累计报告尘肺病676 541例,死亡149 110例,现患527 431例,其中2010年新发患者已突破2万人^[15]。较之其他行业,煤炭行业的尘肺病问题最为严重,全国煤矿有数百万接尘矿工,患尘肺病人数占全国尘肺病患者总数的50%左右^[16]。如2012年新报告煤工尘肺12 405例,占全国尘肺病报告总例数的51.23%^[17],且发病工龄缩短。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 1 400 人以下,而尘肺病死亡则多达 1 800 人^[18],尘肺病防治形势日趋严峻。

煤尘爆炸是煤矿重特大事故的主要形式之一。与煤矿其他灾害事故相比,煤尘爆炸的灾难性更强,造成的伤亡程度十分惨重,且往往出现瓦斯爆炸引起沉积煤尘爆炸的现象,使灾情进一步扩大^[19]。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^[20],事故起数占 88.9%,死亡人数占 91.6%。

表 1-1 世界各国煤矿死亡 300 人以上的特大事故

序号	时间	事发煤矿	事故类型	死亡人数/人
1	1942-04-26	中国辽宁本溪湖煤矿	瓦斯煤尘爆炸	1 549
2	1906-03-10	法国 Courrières 煤矿	煤尘爆炸	1 099
3	1914-12-15	日本九州 Mitsubishi Hojyo 煤矿	瓦斯煤尘爆炸	687
4	1960-05-09	中国山西老白洞煤矿	煤尘爆炸	684
5	1972-06-06	津巴布韦 Wankie 二矿	煤尘爆炸	472
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
8	1960-01-21	南非 Coalbrook 煤矿	顶板岩石冒顶	437
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
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 Dhorī 煤矿	火灾	375
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
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

我国煤矿具有煤尘爆炸危险的矿井普遍存在,国有重点煤矿中具有煤尘爆炸危险性的煤矿占 87.4%,其中具有强爆炸性的占 60%以上^[21]。爆炸性煤尘达到一定浓度时,在引爆源的作用下可发生猛烈的爆炸,煤尘爆炸还可引起瓦斯爆炸、瓦斯爆炸又可引起煤尘爆炸,造成更大的灾难^[22,23]。煤尘及瓦斯煤尘爆

炸事故具有突发性和严重灾难性,新中国成立以来全国煤矿共发生死亡百人以上特大事故 25 起^[24,25],死亡 3 953 人,其中 14 起为煤尘爆炸事故或瓦斯煤尘爆炸事故,死亡 2 359 人,事故起数占 56%、死亡人数占 59.7%。

当前,国内外在煤矿粉尘治理中主要采用喷雾、煤层注水、除尘风机等技术^[26-32]。喷雾因工艺简单、使用成本低而得到广泛应用,但由于水雾粒径小,润湿粉尘能力弱,导致喷雾降尘效率低,且耗水量大、恶化作业环境。除尘风机吸入和净化含尘气流的能力有限,且设备管理复杂、噪声大,特别是在高瓦斯及突出矿井使用存在安全隐患,故其应用受到限制。煤层注水难以将大面积煤体湿润均匀,降尘率较低;注水工艺系统复杂,工程量及运行维护工作量大;易受煤层赋存条件的限制,如在松软、破碎煤层或孔隙率低于 4% 的煤层中实施注水困难。

由于以上原因,我国煤矿井下粉尘防治形势日趋严峻,作业场所粉尘浓度频繁超标。特别是随着综采放顶煤技术、综采一次采全高技术、大断面岩巷综掘技术等现代化开拓、开采技术的普遍推广和矿井开采强度及开采深度的持续增加,采掘作业场所的产尘量及呼吸性粉尘比重迅速增加,如综掘作业时的呼吸性粉尘(属 PM_{10.0} 和 PM_{2.5} 范畴)浓度常常在 300 mg/m³ 以上^[29],超过地面空气严重污染时的 1 000 倍,仅仅依靠传统的防尘技术已不能满足矿尘防治的现实需要。因此,不断研发和应用高效的防尘新技术,是新形势下煤矿井下粉尘防治的迫切需求和必然选择。

与喷雾等传统技术相比,泡沫作为一种含有降尘剂的气液两相介质,具有接尘面积大、湿润粉尘速度快、黏附粉尘能力强的高效捕尘特性,尤其是对呼吸性粉尘有很强的抑制能力,因此泡沫除尘方法与技术受到国内外许多学者的关注。但由于关于除尘泡沫制备的基础及应用研究十分薄弱,如采用压风管路提供压缩空气、采用定量泵添加发泡剂、采用文丘里管和增阻部件实现气液混合,导致泡沫制备过程复杂、安全可靠低、适用性差,且发泡剂和水的消耗量大、制备成本高,严重阻碍了泡沫抑尘技术的应用和推广。因此,研究可靠性高、成本低和适用性强的泡沫制备原理与方法是突破泡沫抑尘技术瓶颈的必由之路。

在此背景下,作者提出进行自吸空气-发泡剂旋流产泡原理及抑尘技术的研究,旨在开辟一条高效低耗制备抑尘泡沫的新路子,并付诸实践。通过本书的研究,将在抑尘泡沫制备的基础研究及应用方面取得进展,能为泡沫抑尘技术的突破提供支持,并对改变煤矿井下受矿尘严重危害的局面、保护矿工免遭尘肺病和防止矿井发生煤尘爆炸事故有重要科技支撑作用。本书研究成果还能应用于非煤矿山及地面尘害严重的各类工矿企业,对贯彻落实国务院《大气污染防治行动计划》、建设生态文明和美丽中国都具有十分重要的意义。

1.2 我国防尘防治技术的发展

如前所述,采取积极的防尘技术,有效降低煤矿作业场所的粉尘浓度,是预防尘肺病、防止煤尘爆炸事故的根本性措施。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,有力支撑了尘害治理工作。回顾起来,我国防尘技术可以说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 $120 \sim 180 \text{ mg/m}^3$ 、煤尘浓度平均高达 $400 \sim 1\,000 \text{ mg/m}^3$ ^[33],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 mg/m^3 以下^[34]。1956~1957年,煤炭部抚顺科学研究所在本溪彩屯矿进行了国内第一次长钻孔煤层注水的试验^[35]。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。1963年起开始在岩巷掘进工作面采用加强通风、湿式凿岩、爆破喷雾、装岩洒水、冲洗岩帮等综合防尘措施^[34],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应用^[36,37]。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^[38]。

20世纪70年代末至80年代,党中央发布了《关于认真做好劳动保护工作的通知》(1978),国务院发布了《关于加强防尘防毒工作的决定》(1984)、颁布了《中华人民共和国尘肺病防治条例》(1987),使得防尘防治工作得到进一步重视,有力推动了防尘工作。这一时期,煤炭科学研究总院重庆分院等科研院所及石炭井、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,使得煤层注水技术得到进一步发展和推广^[39-44]。煤炭科学研究总院重庆分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^[45-48],进行了采煤机内外喷雾装置及高压水喷雾的试验与应用^[49-52],有力促进了我国喷雾降尘技术的发展。东北大学、煤炭科学研究总院重庆分院以及双鸭山、兖州、淮南、徐州、阳泉矿务局等单位进行了掘进工作面通风排尘、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^[53-61]。在个体防护方面,研制了 AFK-1 型送风式防尘口罩和 AFM-1 型防尘安全帽以及适用于锚喷作业场所使用的 AYH 型压风呼吸器^[62-65]。在防隔爆方面,建成了大型瓦斯煤尘爆炸试验巷道^[66],初步形成了煤尘爆炸危险性鉴定方法,研制成功的被动式隔爆水槽棚和水袋棚得到推广应用^[67-71],此外还研制出可近距离自动喷射灭火剂的 ZGB-Y 型自动隔爆装置^[72],推动我国煤矿防隔爆技术的发展。至此,我国煤矿基本形成了一套相对完整的综合防尘技术措施,很大程度上改变了我国矿尘防治技术的落后局面。

20 世纪 90 年代以来,随着现代化采掘技术的大力推行,产尘强度也随之增大,给防尘工作带来了新的挑战,全国也因此兴起了研发、应用新型防尘技术的热潮。在煤层注水方面,兖州矿区先后探索出了提高注水渗透率的“工作面超前动压区长钻孔双巷静压注水”技术,使煤体内水分增加率达到 1.8% 左右,缓解了低孔隙率煤层注水困难的问题^[73,74];煤炭科学研究总院重庆分院、北京科技大学等单位进行了添加湿润剂或渗透棒以及磁化水注水的研究,以提高煤层注水效果^[75-79]。在通风除尘方面,新汶等矿区研制并应用了湿式振弦除尘风机^[80,81]。在喷雾降尘方面,煤炭科学研究总院重庆分院等研究机构,兖州、新汶、平顶山、潞安、晋城等矿区,北京科技大学、西安科技大学等院校进行了高压喷雾降尘技术的研究,并在综采、综掘工作面得到了应用,取得了较好的降尘效果^[82-93];兖矿集团与中国矿业大学合作开发出综放工作面采煤机二次负压降尘技术,之后该技术在新汶、潞安、淮南等矿区得到了进一步拓展与应用^[94-98];煤炭科学研究总院重庆分院等单位试验了声波雾化喷雾降尘技术、磁化水喷雾降尘技术和预荷电喷雾降尘技术^[99-103];山东科技大学等单位还探索了湿润剂喷雾降尘技术^[104,105]。

应该说,我国矿尘防治技术已经有了长足的发展。然而,从总体上看,我国矿尘问题仍然比较突出,还很不适应煤炭工业发展形势,已然是煤炭工业的沉重包袱和严重障碍,且与其他主要产煤国家相比,差距越来越大。澳大利亚、美国、德国、英国等都已有效地控制了矿尘危害,如澳大利亚煤矿尘肺病发病率以长期低至 0.5% 以下^[106]、美国也仅为 2.8%^[107],而我国煤矿的尘肺病发病率逐年上升,病死率已超过 20%^[108];美国、英国、澳大利亚、南非、波兰等已基本杜绝了重特大煤尘爆炸事故^[109,110],而我国重特大煤尘爆炸事故还时有发生,如 2005 年黑龙江七台河东风煤矿发生一起煤尘爆炸,造成 171 人死亡,2007 年山西临汾新窑煤矿发生一起瓦斯煤尘爆炸,造成 105 人死亡。

特别是随着综采放顶煤技术、综采一次采全高技术、大断面岩巷综掘技术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,采掘作业场所的产尘量及呼吸性粉尘比重迅速增加,仅仅依靠传统的防尘技术已不能满足矿

尘防治的现实需要。因此,不断发展先进、实用的矿尘防治新技术,对于实现我国矿尘防治形势的持续稳定好转具有重要的理论意义和现实意义。

1.3 泡沫除尘技术的应用现状

1.3.1 国外应用现状

自 20 世纪中叶以来,国外先后在矿山钻孔凿岩地点、运输胶带转载点、机采工作面 and 机掘工作面试验和应用了泡沫除尘技术。

早在 1946 年,英国肯特(Kent)、约克郡(Yorkshire)和南威尔士(South Wales)矿区的一些煤矿就在硬岩打钻时试验了泡沫抑尘方法,即将泡沫注入钻眼,使粉尘在排出钻孔之前被泡沫湿润和抑制,取得了较好的抑尘效果,如 C. R. Mullins 在 Park Mill 煤矿的测量结果显示,采用泡沫抑尘后,凿岩作业中的平均粉尘浓度从干式打眼的 $2\,000\sim 3\,000$ 粒/ cm^3 降到了 410 粒/ cm^3 ^[111-113]。20 世纪 60~70 年代,匈牙利劳工协会中央委员会安全生产研究所^[114]以及加拿大麦吉尔大学 C. K. Park^[115]、V. L. Gordon^[116]等也进行了类似的应用研究,抑尘效果也较为显著。如匈牙利劳工协会的实测结果表明:泡沫凿岩、湿式凿岩和干式凿岩时粉尘平均浓度分别为 278 粒/ cm^3 , 452 粒/ cm^3 和 $2\,250$ 粒/ cm^3 ,即泡沫凿岩时的粉尘浓度较湿式凿岩时降低 38.4%。

1972~1976 年,美国矿业局(USBM)与 DeTer 公司^[117,118]在俄亥俄州一处煤矿的采区胶带巷转载点采用泡沫抑制输煤过程粉尘的产生和飞扬,并与喷雾进行了比较。测试结果表明,采用泡沫除尘后,该转载点总粉尘浓度由 68.6 mg/m^3 降低到 5.3 mg/m^3 (降尘效率 92.3%),呼吸性粉尘浓度从 5.7 mg/m^3 降低至 0.2 mg/m^3 (降尘效率 96.5%);而采用喷雾时的总粉尘降尘效率为 57.7%,呼吸性粉尘的降尘效率为 56.1%,即泡沫除尘的总粉尘降尘效率和呼吸性粉尘的降尘效率分别是水喷雾的 1.6 倍和 1.7 倍。

国外房柱式采煤方法常采用连续采煤机(continuous miner,简称连采机)掘进巷道,1971~1973 年,美国矿业局与 Monsanto Research 公司^[119]在 Joy 10CM 和 12CM 连采机掘进工作面进行了高倍数泡沫抑制煤尘的试验。测试数据显示,泡沫对总粉尘的降尘效率比水雾高出 50%。为了获得足够的统计数据,1973~1975 年,美国矿业局又与矿山安全设备研究公司^[120]在 Lee Norse 连采机掘进工作面进行了进一步的评估和一系列粉尘浓度采样测试,结果表明,在司机处泡沫对呼吸性煤尘的降尘效率比水喷雾提高了 27%~32%。

20 世纪 70~80 年代,苏联、美国、日本、波兰等国家无毒廉价型发泡剂的研制成功,使泡沫除尘技术的应用得到了较快发展。1970~1972 年,苏联卡拉干达矿区在联合采煤机上采用高倍数泡沫降尘,降尘效率比普通喷雾提高 2~5

倍,耗水量减少 80%~90%^[121];在急倾斜采煤工作面使用泡沫的降尘效率比水喷雾提高 1~1.5 倍,耗水量减少 2/3~3/4^[122]。1982 年,日本山尾信一郎等^[123]在采煤机上进行泡沫喷射器不同安装方式的除尘试验,结果显示泡沫比水雾的除尘效率高 40%~50%。1983 年 3 月和 1984 年 3 月,美国矿业局与国际工程(Engineers International)公司分别在西弗吉尼亚州和犹他州的两个煤矿的长壁工作面双滚筒采煤机上进行了泡沫除尘试验,结果表明,在司机处,泡沫系统的除尘效率比水喷雾提高 60% 左右,而耗水量比喷雾降尘系统减少 50%^[124,125]。此外,波兰在长壁采煤工作面采用泡沫除尘亦取得了比采煤机内外喷雾好的粉尘治理效果。然而,受泡沫制备工艺和成本等因素制约,自 20 世纪 90 年代以来,国外在泡沫除尘领域进展缓慢。

1.3.2 国内应用现状

泡沫除尘技术在我国的发展始于 20 世纪 80 年代末。1984~1986 年,煤炭科学研究总院上海研究所陈东生^[126]进行了掘进机泡沫灭尘模拟试验,但未进行现场应用。1988~1990 年,湖北省劳动保护科学技术研究所在国内最早将泡沫除尘技术应用于矿山凿岩作业,即将产生的泡沫通过凿岩机的中心孔送入炮孔底部抑制粉尘逸出,其在湖北省来凤县五台煤矿的毛口灰岩钻孔凿岩地点进行的试验结果表明:钻孔泡沫抑尘效率达到了 90% 以上,且用水量为湿式凿岩的 1/50~1/25^[127,128]。

20 世纪 90 年代后期,蒋仲安等^[129,130]探讨了泡沫除尘模拟试验中的相似准则数,对泡沫除尘机理和发泡剂配方的要求进行了总结分析,实验研究了泡沫发生器的结构和性能,探索了用于胶带转载点(或卸料口)和爆破凿岩作业的泡沫除尘系统,指出泡沫比喷雾的除尘效率可提高 2~3 倍,特别是对呼吸性粉尘有很高的除尘效率,但未进行煤矿井下的泡沫除尘试验与应用。

进入 21 世纪以来,王德明教授领导的课题组开展了泡沫除尘理论与技术的研究,探究了泡沫除尘机理^[131,132],开发了一套针对掘进工作面特点的泡沫除尘系统^[133],先后在枣庄新安煤矿、平顶山一矿的煤巷掘进工作面进行了泡沫除尘试验,取得了较好的效果^[134,135]。该课题组还在平顶山一矿的一个转载点实施了泡沫除尘技术,通过煤仓上方安装的扇形泡沫喷头向下喷射泡沫,阻断粉尘扩散通道,粉尘浓度得到有效控制,总粉尘除尘效率达 89.73%,呼吸性粉尘除尘效率达 83.75%^[136]。但在进一步的实践中发现,现有的泡沫制备方法复杂、安全可靠低,且泡沫系统的运行成本仍然较高,制约着泡沫除尘技术的长期实施和大范围推广。

综上所述,国内外在矿山泡沫除尘的现场应用方面取得了一些成果,普遍证实泡沫较喷雾具有高除尘效率、低用水量的优越性。但由于在泡沫制备理论与技术的基础问题上缺少针对性研究,面临除尘泡沫制备困难、制备成本高的瓶

颈,严重阻碍了泡沫除尘技术的发展和應用,如由于缺乏适用于采煤机的泡沫制备方法和装备,我国还未見有采煤工作面应用泡沫除尘技术的文献报道。

1.4 除尘泡沫制备技术研究综述

针对泡沫除尘技术应用中的迫切需要,本书提出研究自吸空气-发泡剂旋流产泡机理及其抑尘技术,其涉及的研究领域主要属于泡沫制备的范畴。

除尘泡沫由水、发泡剂和空气组成,其制备过程主要涉及水和空气的供给、发泡剂的配制与添加以及气-液介质相互作用成泡三个环节。其中,向泡沫制备系统输入压力水是提供水源唯一可行的途径,而国内外对于发泡剂配制的研究已较为成熟,研制出了多种无毒无害、易溶于水且较为廉价的抑尘发泡剂^[137-140]。有鉴于此,下面主要从空气的供给、发泡剂的添加和气液介质混合产泡三个方面阐述和剖析除尘泡沫制备技术的研究现状及其存在的问题。

(1) 泡沫制备中空气的供给

稳定可靠地提供气源是制备除尘泡沫的前提。国内外目前普遍采用人为供压风(压缩空气)的方式,即采用压风管路向发泡装置提供气源^[141-143],并且,压风还是目前绝大多数泡沫发生器的驱动力。这种供风方式供入空气的流量较大,但在煤矿井下使用存在以下问题:需额外敷设压风管路,增加了泡沫除尘系统的复杂性和占地空间,现场安装、操作困难,不适应采掘工作面等受限空间条件;在大部分综采、综放工作面和—些综掘工作面,长距离铺设压风管路至采煤机或掘进机上相当困难,导致泡沫抑尘技术在这些高浓度产尘地点无法实施,适用范围受到极大限制;牵涉到风水两趟管路,而井下风压、水压波动较大且不易调控,常出现压力水进入压风管路(“反水”)或压缩空气串入压水管路和发泡剂储存罐(“反风”)的现象,降低产泡过程的可靠性和稳定性,甚至导致整个除尘系统失效。因此,亟须开展无需压风管路的空气供给技术的研究。

(2) 泡沫制备中发泡剂的添加

发泡剂添加是泡沫制备中的关键环节之一。国内外现主要有定量泵添加、压风置换式正压添加和文丘里式负压添加三种类型。定量泵(计量泵)是以电机为动力,将发泡剂以设定的流量加入水管路,其添加量稳定,可实现既定流量的准确添加^[144-146],但随着采掘工作面对带电设备管理的提高,定量泵在井下的使用受到限制。压风置换式是向发泡剂(或预混好的发泡剂溶液)容器上方通入压风,利用压缩空气的正压将发泡剂添加到供水管路或将预混好的发泡剂溶液压入泡沫发生器中^[127,128,147-149],该添加方式压力损失小,但使用时需将压风分成两路(另一路供给泡沫发生器),气量调节困难,导致泡沫除尘系统运行不稳定。需要指出的是,井下防尘供水压力和流量经常变化,而定量泵和压风置换两种方式