

国家自然科学基金项目(51104153)资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNB11)资助

中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目资助

煤矿井下泡沫除尘 理论与技术研究

任万兴 著



PAOMO CHUCHEN

Meikuang Jingxia Paomo Chuchen Lilun Yu Jishu Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



金项目(51104153)资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNB11)资助

中国矿业大学“211 工程”三期创新人才培养项目资助

煤矿井下泡沫除尘 理论与技术研究

任万兴 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对我国煤矿井下粉尘灾害严重及现有常规除尘技术的不足,介绍了泡沫除尘技术和相关理论。该技术具有覆盖性能好、接触面积大、湿润速度快、黏附性能好的高效的除尘特点。全书共八章,主要内容包括:泡沫捕尘模型与机理,除尘泡沫的基本性质,除尘发泡剂的研制及性能实验,发泡器的结构设计及优化,除尘工艺的确定及泡沫喷头的研制,泡沫除尘技术在采掘工作面的应用。

本书可供从事煤炭行业的科研、工程技术人员参考,也可作为普通高等学校采矿工程、安全技术及工程及相关专业研究生、本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿井下泡沫除尘理论与技术研究/任万兴著. —
徐州:中国矿业大学出版社, 2013.4
ISBN 978 - 7 - 5646 - 1869 - 8

I. ① 煤… II. ① 任… III. ① 煤矿—矿井空气—泡沫
防尘 IV. ① TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第080111号

书 名 煤矿井下泡沫除尘理论与技术研究

著 者 任万兴

责任编辑 杨 廷

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 787×960 1/16 印张 8 字数 129 千字

版次印次 2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

定 价 15.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

粉尘是煤矿生产过程中面临的主要职业危害和自然灾害之一,它不仅能引起职业病,而且会导致煤尘爆炸,严重威胁着矿井的安全生产。特别是近年来随着采矿机械化程度的提高,粉尘的产生量也大幅度增加,使井下作业点空气中粉尘浓度达到很高的程度。2010年11月9日在枣庄矿业集团举行的全国煤矿职业安全健康经验交流会暨全国煤矿尘肺病防治现场会上报道:“全国煤矿有265万接尘人员,据测算,每年有5.7万人患上尘肺病,因尘肺病死亡的则有6000余人,是安全生产事故死亡人数的两倍”。此外,据卫生部的统计,截至2007年底,全国煤矿企业累计尘肺病患者31.2万例(不包括乡镇煤矿),尘肺病检出率高达7.2%。另外,我国80%以上的煤矿属于开采有煤尘爆炸危险煤层的矿井,其中50%以上具有强爆炸性,据作者不完全统计,2000~2008年全国累计发生重特大煤尘爆炸事故12起,造成826人死亡和上百亿元经济损失。粉尘灾害给煤矿工人及其家庭带来了极大的痛苦和灾难,也给企业 and 国家造成了巨大的经济损失,

为了防治粉尘危害、杜绝煤尘爆炸事故,目前广泛采取了煤层注水、喷雾、除尘器等多种降尘技术,这些技术降尘效果较显著,对改善井下作业环境、保护工人健康和防止矿尘事故的发生起到了重要作用,但这些技术还存在一定的局限性,特别是对采掘工作面降尘的效果还不够理想。为了提高粉尘防治的科技水平,作者开展了泡沫降尘技术的研究。

本书在前人研究的基础上,研究了泡沫除尘机理和除尘泡沫的基本性质,通过建立泡沫捕尘的理论模型,详细分析了泡沫捕尘的微观过程,提出了泡沫具有隔绝性能好、接触面积大、湿润速度快和黏附性能好的除尘特点。研究了除尘泡沫的管道输运特性,导出了泡沫在输送管道出口的膨胀倍数,定义了泡沫的压缩系数,给出了压缩系数与泡沫初始体积、膨胀后体积以及前后的压差三者之间的函数关系式;研制出了一种发泡倍数高、湿润能力强的除尘泡沫发泡剂;发明了适应矿井除尘用的发泡器,并对其内部结构进行了CFD模拟和优化;发明了覆盖范围广、射程远的泡沫专用喷头,并就其内部结构参数对喷射性能的影响进行了系统的实验和分析;结合应用实例,介绍了作者发明的一套由发泡剂添加剂、

泡沫专用喷头、发泡器等部件组成的风水联动与发泡剂自动添加的泡沫除尘系统,并对泡沫除尘技术的应用效果进行了测试。

目前,该技术已经获得授权发明专利 2 项,实用新型专利 3 项,受理公示发明专利 2 项,实用新型专利 1 项,并于 2011 年获得了江苏省科学技术奖二等奖。该项技术已经在徐州矿务集团、大屯煤电公司、皖北煤电集团、淮北矿业集团、中平能化集团、枣庄矿业集团、西山煤电集团、中煤华晋等 10 多家大型煤炭企业的 40 多个矿井获得成功应用。降尘效率达到了原有技术的 2~5 倍,从一定程度上改善了煤矿井下的工作环境。

在作者的研究过程中,得到了导师王德明教授的悉心指导和资金的大力支持,本书的每一部分内容和研究成果都凝聚着导师的心血,在此,向我的导师表示深深的感谢!还得到了周福宝教授、秦波涛教授的具体指导和热情关怀,另外也得到了王和堂、韩方伟、巫斌伟、王兵兵、高庆丛、郭新安、陆新晓等博(硕)士研究生的热情帮助和积极配合。在现场研究工作中,得到了枣庄矿业集团、滨湖煤矿和新安煤矿的领导和工程技术人员的大力支持。借此机会,作者向他们表示衷心的感谢!

由于作者经验和水平有限,书中难免有疏漏和欠妥之处,敬请读者不吝指正。联系地址:江苏省徐州市中国矿业大学安全工程学院;邮编:221116;E-mail:rwxcumt@163.com。

作者

2013 年 4 月

目 录

前 言	1
第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 国内外矿尘防治技术研究现状及分析	2
第二章 泡沫捕尘模型与机理	11
第一节 泡沫捕尘模型	11
第二节 泡沫捕尘机理	15
第三节 泡沫捕尘的特点	19
本章小结	20
第三章 除尘泡沫的基本性质	21
第一节 除尘泡沫的流变性质	21
第二节 除尘泡沫在管道内的流动特性	25
第三节 除尘泡沫的黏度	31
第四节 除尘泡沫的弹性	32
第五节 液膜的排液规律	35
本章小结	43
第四章 除尘发泡剂的研制及性能实验	46
第一节 发泡剂发泡性能的评价方法	46
第二节 粉尘颗粒湿润性评价方法	48
第三节 除尘泡沫对发泡剂性质的要求及其选择原则	50
第四节 发泡剂发泡性能实验与复配	52
第五节 泡沫液对粉尘颗粒的湿润性能	58
第六节 除尘泡沫的实验室制备	62

本章小结	64
第五章 发泡器的结构设计与优化	65
第一节 国内外发泡器的应用现状及工作原理	65
第二节 除尘泡沫发泡器的设计思路	70
第三节 除尘泡沫发泡器设计的流体动力学依据	70
第四节 发泡器关键参数的 CFD 模拟结果与分析	74
第五节 发泡器中泡沫的形成机制	79
本章小结	83
第六章 除尘工艺的确定及泡沫喷头的研制	85
第一节 除尘工艺的确定	85
第二节 泡沫喷头的研制	89
本章小结	97
第七章 泡沫除尘技术在采掘工作面的应用	98
第一节 应用条件及技术参数	98
第二节 掘进工作面的应用	99
第三节 泡沫除尘系统在综采工作面的安装方法	105
本章小结	106
第八章 总结	107
第一节 主要结论	107
第二节 主要创新点	109
第三节 今后研究工作的展望	110
参考文献	112

第一章 绪 论

第一节 引 言

煤炭是我国的主要能源,在我国一次能源生产和消费结构中占 70% 左右^[1,2]。2008 年全国原煤产量已经突破 27 亿 t,在原煤产量快速增长的同时,必须保证煤矿安全、高效地开采。而矿尘是煤矿生产的主要灾害之一。在煤炭生产过程中,几乎所有的作业均可产生粉尘。例如,打眼、爆破、掘进、开采、落煤、运输、转运和支架、移架等都会产生大量粉尘,特别是近年来采矿的机械化程度提高,使井下作业点空气中粉尘浓度达到很高的程度,如在综采放顶煤工作面有时高达 $1\,400\text{ mg/m}^3$ 。特别是呼吸性粉尘对工人的健康有极大的危害,工人长期吸入呼吸性粉尘,可引起肺部病变,造成尘肺病。煤矿尘肺病的发病情况十分严重。据卫生部的不完全统计,截至 2007 年底,全国 62.7 万例尘肺病中煤矿尘肺病患者多达 30 万人,占全国尘肺病患者的近 50%,在 2007 年新增的 10 963 例尘肺新病例中,89.37% 的病例为煤工尘肺和矽肺,分别为 5 351 例和 4 447 例^[3-9]。并且全国煤矿行业内的尘肺病患者还以每年约 1 万例的速度递增,平均每年死亡 2 500 人以上。尘肺病给煤矿工人及其家庭带来了极大的痛苦和灾难,也给企业 and 国家造成了巨大的经济损失,据统计,煤炭行业每年因尘肺病造成直接经济损失数十亿元^[10]。

粉尘不仅导致矿工身患尘肺病,同时还会爆炸,造成重特大恶性事故。我国煤矿具有煤尘爆炸危险的矿井普遍存在,据 2002 年统计,原国有重点煤矿有 532 处矿井煤尘有爆炸危险,占 87.4%。小煤矿中 91.35% 煤矿的煤尘具有爆炸危险,其中高达 57.71% 的具有强爆炸性^[11]。据不完全统计,2000~2008 年全国发生特大煤尘爆炸的事故有 12 起,造成 826 人死亡,对国家、企业和矿工家庭造成了巨大的损失,也对社会的稳定、和谐发展造成了恶劣的影

响。表 1-1 是近几年发生的特大煤尘爆炸事故的不完全统计。

表 1-1 近几年国内发生的特大煤尘爆炸事故^[12-24]

事故时间	事故煤矿	死伤人数	事故类型
2000 年 9 月 27 日	贵州水城木冲沟煤矿	死亡 162 人, 受伤 37 人	瓦斯、煤尘爆炸
2001 年 7 月 22 日	徐州贾汪岗子五副井	死亡 92 人	煤尘爆炸
2001 年 8 月 20 日	枣庄市西夹埠煤矿	死亡 13 人	煤尘爆炸
2001 年 12 月 27 日	山东新汶汶南煤矿	死亡 22 人, 受伤 24 人	煤尘爆炸
2003 年 5 月 13 日	淮北芦岭煤矿	死亡 86 人, 受伤 28 人	瓦斯、煤尘爆炸
2003 年 10 月 21 日	内蒙古乌海骆驼山矿	死亡 6 人	煤尘爆炸
2004 年 5 月 18 日	山西吕梁梁家沟煤矿	死亡 33 人	煤尘爆炸
2005 年 2 月 14 日	辽宁阜新孙家湾煤矿	死亡 214 人	瓦斯、煤尘爆炸
2005 年 11 月 27 日	黑龙江七台河东风煤矿	死亡 146 人	瓦斯、煤尘爆炸
2006 年 10 月 29 日	新疆建设兵团某矿	死亡 14 人	煤尘爆炸
2007 年 4 月 16 日	河南平顶山王庄煤矿	33 人失踪	煤尘爆炸
2008 年 5 月 21 日	山西阳泉地区万隆矿	死亡 5 人, 受伤 1 人	煤尘爆炸

为了防治粉尘, 目前广泛采取了煤层注水、喷雾降尘等多种除尘技术, 这些除尘技术都存在除尘效率低、效果差的不足。为了提高粉尘防治的效果, 作者在导师的指导下对泡沫除尘理论与技术开展了系统研究。

第二节 国内外矿尘防治技术研究现状及分析

一、国内外常用的矿尘防治技术现状及评述

随着煤矿综采、综掘、高产高效工作面的发展, 煤矿井下的粉尘产生量也显著增加, 这不仅增大了引起煤尘爆炸的危险性, 而且严重危害作业人员的健康。目前, 国内外煤矿广泛采用的粉尘控制技术主要有煤层注水、喷雾降尘、利用除尘器除尘、通风除尘、化学抑尘等^[25]。

1. 煤层注水^[26-27]

早在 1890 年, 德国人迈斯尔提出了煤层注水技术并在萨尔煤田进行了试验, 20 世纪的五六十年代, 世界各国开始广泛试验和应用。我国在 20 世纪五

六十年代开展了煤层注水防尘、湿式凿岩打眼等防尘技术的试验研究工作,在 20 世纪七八十年代以后以煤层注水为主的综合防尘技术得到了广泛应用。目前在煤层注水防尘方面,研究出厚煤层动压注水、深孔煤层动压注水、坚硬煤层动压脉冲注水和煤层静压注水等煤层注水成套技术。

2. 喷雾降尘

在喷雾降尘方面,我国研究出了采煤工作面机组行走自动光控喷雾技术、采煤机高压外喷雾降尘技术、负压二次降尘、喷吸结合降尘技术、采煤机径向雾屏及液压支架探梁辅助喷雾降尘技术、液压支架移架自动喷雾降尘技术,并在多家煤矿进行试验和推广应用。另外,为了防止巷道运输、转载点等地点粉尘的扩散,已研制成功多种类型的自动喷雾装置^[28,30-32]。

美国、前苏联和德国等还先后应用或试验研究了高压水喷雾对降低滚筒割煤时呼吸性粉尘产生量的影响。美国矿业局匹茨堡研究中心试验研究的长壁工作面高压水辅助切割技术,在工作水压 12.7 MPa 时,可以显著降低割煤时的呼吸性粉尘产生量。前苏联煤矿机械设计研究院研制出了采煤机高压水喷雾洒水用的 TKO—CBO 全套设备。联邦德国在瓦尔苏姆矿也试验研究了高压水喷雾对滚筒截割区内粉尘湿润、沉降的影响,试验表明,在工作水压 6~6.5 MPa 条件下,采煤机周围的粉尘浓度平均降低 30%~35%。此外,澳大利亚和英国也在试验研究采煤机高压喷雾降尘技术^[33,34]。

采煤机内外喷雾降尘效果的首要问题是保证水质洁净,其次是合理的喷雾参数。目前井下所用除尘水均是井下污水经过地面简单处理后的循环应用,里面难免出现煤泥等颗粒杂质,容易堵塞喷头;再加上雾化喷头非常细小,采煤机割煤等采掘活动,也容易在喷头上沉积煤泥,造成喷头堵塞。

3. 除尘器除尘

除尘器有机械式除尘器、干式过滤除尘器、湿尘除尘器和电除尘器。20 世纪 70 年代以来,干式布袋除尘器在德国获得了广泛应用,它对呼吸性粉尘的捕集效率高达 99% 以上。波兰研制出了利用涡流风筒控制掘进头粉尘扩散和利用复合除尘器净化含尘气流的机掘工作面综合防尘技术^[36]。利用涡流风筒内部的专用“风机”将压入式风筒出口的风流由轴向供风变为径向供风,沿整个巷道断面形成十分均匀的朝着工作面推进的螺旋风流,使工作面的高浓度粉尘被限制在掘进头附近,以便除尘器高效率地收集粉尘。实践证明:

该风筒形成的附壁效应比德国研制的附壁风筒还强,更为重要的是它实现了除尘器、涡流风筒出口又自动将径向供风转变为轴向供风,保证工作面的安全生产;复合除尘器利用高速旋转的旋转式雾化器,将水流雾化形成水幕,净化抽进的含尘气流。净化后的风流再通过旋流器改变为旋转气流,产生强大的离心力将水尘混合物引向器壁再一次除尘和脱水^[37]。波兰柯马克采矿机械化中心(KOMAG Mining Mechanization Centre)研制出了湿式复合除尘器。该除尘器对呼吸性粉尘的除尘效率达 99.8%,它和配套的涡旋风筒在波兰马尔才尔煤矿的马甲 1 号矿井的某掘进工作面使用后,使掘进机司机位置和除尘器后方 10 m 处的粉尘浓度大幅度降低,所测的平均呼吸性粉尘浓度仅为 3.7 mg/m³。

4. 通风除尘

通风除尘是利用风流的作用对粉尘的扩散进行控制。国内曾有学者提出采用“无形透明屏障”的空气幕控制粉尘的扩散并进行了相关的应用^[38]。

前苏联矿用机器中央科学研究院和斯阔琴斯基矿业学院共同研究了用于综掘工作面的压入抽出式通风除尘设备。其工作原理是:在工作面附近形成一道防尘风幕,阻止粉尘向外扩散,再利用吸风管将含尘空气抽出^[39]。德国采用附壁风筒的设备将沿巷道的轴向风流变成螺旋推进的均匀旋转风流,形成一道空气幕,将掘进工作面的粉尘都挤压在迎头前形成高浓度粉尘,再利用风机将粉尘抽入除尘器进行处理。英国使用风帘(设于司机和掘进机之间)、集尘器和抽出式除尘风机等综合防尘措施,也取得了一定的降尘效果^[29]。另外,由英国煤炭公司和海德拉公司共同研制的吸尘滚筒^[40],是根据高压水射流的引射效应原理,将小型引射器均匀布置在滚筒轴附近的圆周上,当水从喷嘴喷出时,含尘风流通过引射器沿滚筒向工作面采空区方向运动,粉尘通过引射器时被湿润,出来时碰上反射板被沉降下来。部分净化后的空气(约 70% 以下)再返回到工作面一侧被重复利用,剩余的空气被风流带走。

5. 化学抑尘

为了提高注水、喷雾的防尘效果,改善水对煤的湿润能力,许多国家都添加了湿润剂。在 20 世纪 70 年代末,我国一些科研院校的研究人员开始研究有关的化学抑尘剂,80 年代取得了显著的进展,目前,我国具有专利权的矿用降尘剂已达 20 余种^[41]。德国、前苏联、日本、英国和美国也研制了多种降尘

剂并进行了应用^[34,42]。

这些技术对井下矿尘的防治起到了重要的作用,各种技术的优缺点和除尘效率如表 1-2 所列^[43,50]。

表 1-2 常用各种除尘技术优缺点比较

除尘技术	优点	缺点	除(抑)尘效率
煤层注水	预先湿润煤体,湿润范围大,煤体湿润得均匀	设备复杂,耗水量大,工程量大,一次性投入大,存在封孔工艺及注水方法和设备上的难题,除尘效率低	7%~50%
喷雾除尘(包括采煤机内、外喷雾技术和采煤机高压喷雾负压二次降尘技术)	设备简单,造价低,占地空间小,维修少,维修费用低,管理工作量小	大多数煤尘有一定的疏水性,水的表面张力较大,很多煤尘不易被水完全润湿和捕捉,除尘效率低,尤其对呼吸性粉尘除尘效率低、耗水量大、喷头容易堵塞	20%~70%
除尘器除尘	除尘效率高	一次性投资大,设备自身结构复杂、体积大、较笨重,处理风量有限 ^[23]	70%~95%
通风除尘	操作简单,方便快捷,成本低	除尘效率低,易造成二次污染	60%以下

二、泡沫除尘技术的研究现状及评述

泡沫除尘技术于 20 世纪 50 年代问世,英国最先开展了这方面的研究,继后美国、苏联、联邦德国、日本等国都相继开展了这方面的工作,并取得了一定的效果。70 年代中期,随着美国、苏联、波兰等国表面活性剂工业的发展,该技术在生产中得到广泛的应用,并已研究出定型的符合安全卫生和使用要求的廉价发泡剂,还根据不同的尘源要求,研究出不同型号的泡沫除尘配套系列产品^[52-54]。1966~1967 年,苏联的卡拉干达煤田的工程师小组对泡沫除尘做了大量的研究,试验了数十种不同浓度的阴离子表面活性剂物质,并研制了高倍数空气机械泡沫除尘器,在工作面控制区爆破时用泡沫覆盖爆区防尘,防止

有毒有害气体,同时该小组还对凿岩机泡沫除尘、采煤机采煤时泡沫除尘方面进行了大量试验。在岩石掘进工作面泡沫除尘的测定结果表明,凿岩机司机工作处空气含尘量可从 313 mg/m^3 降到 20 mg/m^3 ;距转载点约 10 m 处,可以从 733 mg/m^3 降到 21 mg/m^3 。并把该除尘器应用于井下多个地点,其中应用于采煤机上时可使联合采煤机的除尘效能较通常的防尘措施提高 $2 \sim 5$ 倍^[55,56]。另外,几乎同时代的苏联马克尼在这方面也做了大量工作,他和全苏表面活性物质科研所联合研制了一种符合卫生和技术要求的起泡剂,他还与国立煤矿机械设计与实验研究所以及顿涅茨煤矿机械设计院,共同研制了一种在急倾斜煤层工作面和 $1\text{K}-101$ 型采煤机上使用的泡沫除尘设备。并曾在顿巴斯中心区的 7 个煤层进行泡沫除尘试验,经过广泛的试验研究后,这种设备的特征指标如下:每采 1 t 煤消耗泡沫 $2 \sim 3 \text{ m}^3$,起泡液为 $15 \sim 20 \text{ L}$,在缓倾斜煤层的除尘效率为 94% 以上,在急倾斜煤层的除尘效率为 $80\% \sim 90\%$,每采 1 t 煤花费 $8 \sim 12$ 戈比^[57]。表 1-3 是前苏联泡沫除尘应用实例。资料显示,这一时期对泡沫的研究主要集中在高倍数,泡沫除尘的应用工艺主要是淹没式,即由发泡器产生大量的高倍数泡沫充填整个作业地点阻断粉尘向外扩散。在目前电气化程度如此高的矿井中,淹没式除尘方法显然会影响设备运转和工人操作。

表 1-3 前苏联泡沫除尘应用实例

应用地点	起泡剂名称	使用浓度	除尘效率
卡拉干达矿区采煤机	高倍数泡沫 No. 1	$3\% \sim 4\%$	95.2%
卡拉干达矿区转载点	高倍数泡沫 No. 1	$3\% \sim 4\%$	94%
顿巴斯矿区采煤机	中倍数泡沫 No. 1	$2\% \sim 3\%$	88% 以上
罗斯托夫煤矿采煤机	低倍数泡沫 No. 1	1%	69%
基洛夫矿	环亚胺	$0.0005\% \sim 0.005\%$	比 0.1% 的 No. 1 降低 60%

1969 年美国矿业局委托 Monsanto 公司和 Dayton 实验室研究泡沫除尘技术^[58,59]。Monsanto 公司和 Dayton 实验室从 1969 年 11 月到 1970 年 10 月对泡沫除尘技术进行了实验室模拟研究,建立了实验室粉尘产生装置和泡沫除尘系统,并改进了原有的泡沫发生器,将预混好的发泡液由压缩空气(或氮气)压入发泡器中,喷射到发泡网上,再由空气鼓吹发泡网发泡,如图 1-1 所示。

研究单位只是在实验室进行了泡沫除尘模拟试验,没有进行工业性试验和实际应用,其研究成果的实用性尚不清楚。

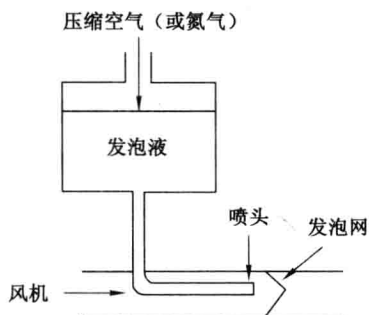


图 1-1 Monsanto 公司和 Dayton 实验室所采用的发泡器结构示意图

1971 年美国矿业局和 Deter 公司签订协议,委托该公司研究泡沫除尘技术,Deter 公司在随后的几年里研究了泡沫粒径分布和除尘效率之间的关系。研究发现,泡沫除尘的效率关键在于泡沫的结构,他们指出,微小泡沫比大泡沫更稳定,粉尘颗粒在与泡沫发生接触后,泡沫基本上不发生变化,捕尘效果好;另外,粉尘颗粒容易穿入到微小泡沫内部之后,导致泡沫破裂,进而湿润粉尘。据此,Deter 公司通过试验确定直径在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间的微小泡沫除尘效率最高。另外该公司设计了微小泡沫除尘的应用系统,系统采用孔隙填充物式发泡器制备泡沫。Deter 公司在多家煤矿和水泥厂等企业的胶带运输转载点建立了 200 多套泡沫除尘系统^[60-62]。

美国矿业局研制出的压泡沫除尘系统,其方法是先将压缩空气、水、表面活性物质用混合机强行混合后,再送至发泡装置的金属网处,形成小泡沫,再通过导管,向指定地点喷射。1983 年和 1984 年,分别在位于西弗吉尼亚州和犹他州的两处煤矿的长壁工作面用该方法进行试验,全尘的除尘效率大大高于高压喷雾降尘,而耗水量只有喷雾降尘的 $1/10 \sim 1/5$ ^[63,64]。但是对呼吸性粉尘的除尘效率提高不大。

1983 年,日本的山尾信一郎进行了泡沫除尘的研究,分析了网式泡沫喷射器的工作参数,并在采煤机上进行泡沫喷射器不同安装方式的除尘试验,试验结果显示泡沫除尘比水雾除尘可使空气中悬浮煤尘含量降低 $50\% \sim 70\%$ ^[65]。

泡沫除尘在国内的起步较晚,1984 年底,煤炭科学研究总院上海研究所的陈东生开始了泡沫除尘的探索研究,他初步研究了泡沫除尘的机理,并在实验室模拟了泡沫除尘,试验结果表明,泡沫除尘是一种有效的除尘方法^[66]。但由于条件限制,没有进行工业型试验,更没有在煤矿上建立一套实用的泡沫除尘系统。1986 年湖北省劳保所周长根开始研究泡沫凿岩除尘技术,发明了凿岩泡沫除尘器,并在五台煤矿的毛口灰岩和武钢程潮铁矿的花岗岩凿岩工作面进行了现场试验,取得了良好的效果^[67-69]。所研发的设备中发泡液只是间断添加,不能实现连续工作,所以研究成果只适用于钻孔施工地点,不适用于采掘工作面和转载点等空间狭小、连续产尘的地点。1995 年以来,北京科技大学蒋仲安教授也开展了泡沫除尘相关内容的研究,他从理论上分析了网式发泡器的结构及其工作参数,其研究内容主要集中在高倍数泡沫,也缺乏在煤矿井下的工业性试验和实际应用^[70-73]。

利用泡沫进行粉尘控制是一项复杂的系统工程,必须对系统中的每个环节进行研究。国内外学者和技术人员对发泡剂和除尘泡沫本身性质的研究状况,目前从检索到的相关资料上无法考证,但是文献上所介绍的关于该技术的实验系统及应用工艺方面的研究成果主要存在三个方面的不足:

第一是发泡方式对目前井下条件不适用。泡沫除尘的研究过程中科研人员设计的发泡器主要有两种,一种是网式发泡器,另一种是孔隙填充物式发泡器。网式发泡器的工作原理是泡沫液由喷头喷洒至发泡网上,形成液膜,压缩空气鼓吹液膜发泡。如果泡沫液的压力过大会导致发泡网上形不成液膜,如果压缩空气压力过大,会导致发泡网上的液膜雾化,不能产生泡沫,而煤矿井下的水和压缩空气的压力都很大,不利于网式发泡器在井下应用。孔隙填充物式发泡器的工作原理是靠发泡器中具有微小孔隙的填充物增加气液混合强度而形成泡沫,由上可知,虽然 Deter 公司的研究成果获得了应用,但其设计的发泡器对于煤矿井下的水质而言,使用过程中很容易堵塞,且清洗比较困难。

第二是发泡剂研制的缺陷。国外以往的泡沫除尘技术在研制发泡剂时仅仅考虑了发泡能力的因素,忽略了发泡剂对粉尘湿润性能的改变这一重要因素。矿尘大多数属于疏水性质,水很难对其湿润,从能量的角度来考虑,在水中添加发泡剂降低液体的表面张力,不但有利于泡沫的形成,而且应能使泡沫

液迅速改变固—液界面的性质,大幅度提高对粉尘颗粒的湿润程度。发泡和湿润是除尘发泡剂的两个重要性能,因此,要想提高除尘效率,必须在研制发泡剂时同时考虑这两个重要因素,以这两个性能作为评价除尘发泡剂好坏的标准。

第三是应用工艺方面的不足。以往的泡沫除尘技术几乎均采用产生大量泡沫覆盖产生点防止粉尘向外扩散的工艺。如今的煤矿井下机械化程度比以前高出了很多,巷道及采掘工作面放置了许多机械电气设备,如果在作业地点产生大量泡沫会阻挡操作工人的视线,影响安全生产。另一方面,大量泡沫在巷道和工作面受风流的影响而运动,会越聚越多,容易发生封堵巷道,影响井下风流的畅通。

三、主要研究内容

(1) 建立数学模型研究泡沫捕尘时泡沫与粉尘的作用过程,研究泡沫捕尘和泡沫与粉尘的黏附机理。

(2) 研究除尘泡沫的流体特性,求出不同倍数泡沫流体的本构方程。推导除尘泡沫的状态方程,进而得出其在管道输送过程中的管中流速、膨胀倍数和压缩系数。分析除尘泡沫的弹性和黏性,实验和理论结合阐述弹性与黏性随倍数的变化规律。

(3) 分析除尘泡沫的衰变机理,实验研究不同倍数泡沫的排液规律以及粉尘颗粒的黏附对其排液的影响。

(4) 在实验室设计正交实验,复配出发泡能力强、除尘效率高、绿色环保的除尘发泡剂,研究发泡剂不同添加浓度对不同粒径粉尘的润湿速度之间的关系,找出适合井下除尘的最佳泡沫状态及发泡剂添加比例。

(5) 分析已有发泡器的优缺点,根据煤矿井下水和压风压力大、水质差的特点,提出除尘用泡沫发生器的设计原理,研制出适应能力强、发泡效果好的发泡器。研究发泡器内部流体的流动规律和不同发泡器的关键尺寸对气液扰动及涡流影响强度的分布状态,得出最佳参数。分析泡沫在发泡器中的生成过程及机理。

(6) 确定泡沫喷头的设计原则,并研究泡沫喷头的内部结构及其关键参数设计方法,研制出满足工艺要求的泡沫喷头。

(7) 在实验室构建完善的泡沫实验系统,试验制备出满足要求的高性能泡沫,为现场应用提供实验数据。

(8) 研究煤矿井下采掘工作面粉尘的产生机理和扩散规律,有针对性地设计泡沫除尘的应用工艺及系统的安装方法,并在煤矿井下进行应用,分析应用效果。