

矿用泡沫除尘剂研究

KUANGYONG PAOMO CHUCHENJI YANJIU

■ 马有营 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

矿用泡沫除尘剂研究

马有营 著



北 京

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书主要针对泡沫除尘技术做了综述,介绍了除尘泡沫的基本性质及泡沫捕尘机理,采用复配实验的方法,在综合考虑发泡能力和润湿性的基础上,对现有泡沫除尘剂配方进行了改良,获得了一种新型泡沫除尘剂配方,并在现场取得了良好的降尘效果,实现了降低矿井粉尘浓度的目的。

本书供矿山安全管理人员、工程技术人员以及设计人员阅读,也可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

矿用泡沫除尘剂研究/马有营著. —北京:冶金工业出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-5024-7915-2

I. ①矿… II. ①马… III. ①煤矿开采—泡沫防尘—研究 IV. ①X752

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 236974 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7915-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2018 年 10 月第 1 版, 2018 年 10 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 3.625 印张; 136 千字; 107 页

30.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着煤矿采掘工作面机械化程度的提高,工作面现场的高浓度粉尘严重影响着工人的身体健康,威胁矿井的安全生产,因此,从保护现场作业人员职业安全健康以及企业安全生产的角度考虑,必须将采掘工作面的粉尘浓度控制在可容许的范围以内。本书采用理论分析、实验室研究与现场应用相结合的研究方法,提出了矿用泡沫除尘剂的研究思路。

本书研究分析了除尘泡沫的基本性质及泡沫捕尘机理,在此基础上优选出 12 种可用于泡沫除尘技术的发泡剂和 3 种润湿剂。进而采用改进 Ross-Miles 法,通过发泡剂单体初选实验及发泡剂复配实验,确定出了 3 种发泡剂的最优配方;通过 3 种发泡剂与 3 种润湿剂复配实验,确定出发泡剂与润湿剂的最优配比及浓度,从而初步确定了 9 种泡沫除尘剂配方;通过 DSA100 视频光学接触角测量仪,分别测量了初步确定的泡沫除尘剂配方对不同煤质矿井粉尘的润湿性,通过润湿性测定结果,对初步确定的泡沫除尘剂配方进行筛选,进而采用搅拌法和发泡器法测定了经接触角实验筛选之后的泡沫除尘剂的发泡倍数,最终确定出了 3 种发泡倍数高、润湿性好的泡沫除尘剂,其发泡倍数分别达到了 30.78 倍、38.61 倍和 34.92 倍。为了考察最终确定的泡沫除尘剂除尘效果,在综掘工作面进行了现场应用,通过测定使用泡

沫除尘剂前后粉尘浓度，得出了泡沫除尘剂的降尘率，结果显示：课题研发的泡沫除尘剂对整个综掘工作面而言，全尘平均降尘效率达到了 92.6%，对呼吸性粉尘的降尘效率是 85.4%，降尘效果显著。

本书在编写过程中，得到了山东科技大学程卫民教授的悉心指导，辛嵩教授、刘伟韬教授、周刚副教授、聂文老师、王昊博士、于海明硕士给予了无私的帮助，在理论推导、实验室研究以及现场数据采集分析方面，他们都做了大量的工作。本书的出版还得到了国家自然科学基金项目“综掘工作面截割区域多级泡沫分区捕尘机理基础研究（编号：51804034）”和滨州学院的资助，在此一并表示感谢。

限于作者水平，书中若有不当之处，诚请读者批评指正！

马有营

2018 年 7 月

目 录

1 绪论	1
1.1 课题的提出	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 泡沫除尘国外研究现状	3
1.2.2 泡沫除尘国内研究现状	5
1.3 课题研究的目的与意义	6
1.4 研究内容与方法	7
1.4.1 研究内容	7
1.4.2 研究方法	8
1.5 本章小结	9
2 除尘泡沫基本性质及泡沫捕尘机理研究	10
2.1 除尘泡沫的基本性质	10
2.1.1 泡沫分类	10
2.1.2 泡沫的形成机制	10
2.2 泡沫捕尘机理	15
2.2.1 截留作用	15
2.2.2 惯性碰撞	16
2.2.3 扩散效应	17
2.2.4 黏附效应	18
2.3 本章小结	19
3 矿用泡沫除尘剂配方初选	20
3.1 泡沫除尘剂性能测定方法	20

3.1.1	泡沫除尘剂发泡性能测定方法	20
3.1.2	泡沫除尘剂润湿性能测定方法	21
3.2	除尘泡沫对泡沫除尘剂性质的要求及其选择原则	21
3.2.1	除尘泡沫对泡沫除尘剂的要求	21
3.2.2	泡沫除尘剂单体的选择原则	22
3.3	泡沫除尘剂实验室研究	22
3.3.1	实验材料和实验仪器	23
3.3.2	发泡剂单体实验及优选	23
3.3.3	发泡剂单体复配实验	36
3.3.4	发泡剂与润湿剂复配实验	40
3.4	泡沫除尘剂配方的初步确定	48
3.5	本章小结	58
4	泡沫除尘剂润湿性测定及配方优选	60
4.1	煤尘的润湿性	60
4.1.1	润湿类型	60
4.1.2	接触角和杨氏方程	63
4.2	泡沫除尘剂润湿性实验	64
4.2.1	无烟煤粉尘润湿性测定	65
4.2.2	褐煤粉尘润湿性测定	70
4.2.3	焦煤粉尘润湿性测定	75
4.3	泡沫除尘剂配方优选	80
4.4	本章小结	81
5	泡沫除尘剂发泡倍数测定及配方确定	83
5.1	发泡倍数常用测量方法	83
5.2	泡沫除尘剂发泡倍数测定	84
5.2.1	搅拌法泡沫倍数测定实验	84
5.2.2	发泡器法泡沫倍数测定实验	88
5.3	泡沫除尘剂配方的最终确定	92
5.4	本章小结	93

6 现场应用	95
6.1 应用条件及技术参数	95
6.2 掘进工作面的应用	96
6.2.1 兴隆庄煤矿 3904 综掘工作面概况	96
6.2.2 系统运行与粉尘浓度测定	96
6.2.3 测定结果分析	99
6.3 本章小结	99
7 主要结论与创新点	100
7.1 主要结论	100
7.2 创新点	103
参考文献	104

绪 论

1.1 课题的提出

粉尘是可以长时间以浮游状态悬浮于空气中的一种微细固体颗粒,煤矿粉尘是矿井在生产作业过程中所产生的各种岩矿微粒的总称。煤矿井下各个作业环节都会产生大量粉尘,其中以采掘工作面产尘量最大,占煤矿井下产尘总量的 85% 以上,严重影响着煤矿井下安全生产和矿工的身心健康。据统计,在未实施任何防尘措施的情况下,综掘工作面总尘浓度高达 $2500\text{mg}/\text{m}^3$,综采工作面总尘浓度高达 $5000\text{mg}/\text{m}^3$,综放工作面总尘浓度高达 $8000\text{mg}/\text{m}^3$,掘进工作面最高粉尘浓度可达 $6000\text{mg}/\text{m}^3$ 。矿井粉尘浓度过高,会引发粉尘爆炸;此外,矿工长期在高浓度粉尘环境中工作,还会引发尘肺病。

据国家安全生产监督管理总局统计^[1],2000~2016 年期间,全国共发生煤尘爆炸事故 15 起,致使 548 人遇难:2000 年 9 月 27 日,贵州水城矿务局木冲沟煤矿由于局扇无计划停电停风,引起特大恶性煤尘瓦斯爆炸事故,死亡 162 人;2001 年 12 月 27 日,山东新汶矿业集团汶南煤矿-650 水平后一上山采区 11310 东断层切眼掘进面发生一起煤尘爆炸事故,死亡 17 人,受伤 23 人;2002 年 3 月 26 日,四川达州市宣汉县楠木沟煤矿(乡镇)发生煤尘爆炸事故,死亡 3 人;2002 年 4 月 2 日,江西宜春市宜丰县新庄镇煤矿(乡镇)



16 号煤巷因维修通风设备引起瓦斯煤尘爆炸,死亡 16 人;2002 年 5 月 20 日,新疆昌吉州米泉市第二煤矿发生煤尘爆炸事故,9 人死亡,9 人重伤,5 人轻伤;2003 年 2 月 5 日,贵州遵义市仁怀县车田煤矿(乡镇)发生煤尘爆炸事故,死亡 3 人;2004 年 2 月 8 日,山东兖矿集团济三煤矿 4304 综放工作面发生煤尘爆炸事故,2 人死亡,16 人受伤;2005 年 11 月 27 日,黑龙江龙煤集团七台河分公司东风煤矿发生一起特大煤尘爆炸事故,171 人遇难;2006 年 2 月 23 日,山东枣庄矿业集团联创公司(原陶庄煤矿)-525 水平 16108 回采面发生煤尘爆炸事故,18 人死亡,9 人轻伤;2006 年 10 月 28 日,新疆建设兵团农六师兴亚公司第一煤矿(国有地方)井下发生煤尘爆炸,14 人死亡;2007 年 4 月 16 日,河南平顶山市宝丰县王庄煤矿(私营)井下发生煤尘爆炸事故,31 人死亡;2008 年 6 月,山西孝义安信煤业有限公司发生煤尘爆炸事故,造成 34 人遇难;2010 年 12 月,河南义煤集团巨源煤矿发生煤尘爆炸事故,造成 26 人遇难;2012 年 9 月,江西萍乡高坑煤矿发生煤尘爆炸事故,造成 15 人遇难;2014 年 8 月,东方煤矿发生重大煤尘爆炸事故,造成 27 人遇难。

此外,尘肺病作为一类职业病,是一种“隐性”矿难和“隐形杀手”,较之瓦斯爆炸等“显性”矿难更具有杀伤力,它损害的群体更多、更广,潜在的危害性更重,破坏性更强。据统计,死于尘肺病的患者数达矿难和其他工伤事故死亡人数的 6 倍之多^[2-9]。例如:山西省累计查出煤矿尘肺病患者 3.6 万名,约占全省总人口的千分之一。据卫生部的统计数据表明,到 2016 年年末,全国煤矿(包括乡镇小煤矿、小煤窑)累计尘肺病患者达 70 余万人,接近我国各行业尘肺病人数的一半,尘肺患者累计死亡 18.6 万人。目前每年尘肺新发病人达 25000 人,死亡约 5600 人,而且尘肺病的发病情况仍呈逐年上升的趋势。据不完全统计,我国国有重点煤矿尘肺病患病率高达 10% 以上。数量众多的职业尘肺病患者,要花费大量的人力、物力、财力来进行治疗,不仅经济损失巨大,而且也给患者及家属带来了很大的痛苦。每年国家用于治疗尘肺病的医疗等费用就高达 50 亿元人民币。

由此可见,煤矿井下生产现场的高浓度粉尘,轻则降低矿工的劳动生产率,影响矿井的产量和效益;重则导致矿工患尘肺病长期不能治愈而死亡,或导致粉尘爆炸,甚至引发粉尘爆炸事故,造成重大人员伤亡和经济损失。因此,针对目前我国煤矿安全生产形势非常严峻的情况,控制尘肺病的发生和防止煤尘爆炸事故,已成为煤炭行业头等重要的大事。所以,对综掘工作面泡沫除尘技术进行实验研究,不仅能大幅度降低综掘工作面空气中的粉尘浓度,而且对井下其他产尘作业点的防尘工作具有积极的借鉴作用,对于保障煤矿企业的安全生产、改善作业地点的工作环境、保护煤矿工人的身心健康具有重大的现实意义。

1.2 国内外研究现状

长期以来,由于人们对粉尘对人体危害的长期性、对生产威胁的潜在性认识的不足,使粉尘研究工作处于停滞不前和小改小革的状态。防尘防治理论与技术领域的理论研究和应用技术研究非常薄弱,至今没有形成成套的理论系统和技术体系,以至于掘进工作面粉尘污染问题随着机械化程度的提高越来越严重,不仅恶化了作业环境,影响工人的身体健康,也大大地影响了掘进工作面的生产效率,同时工作空间漂浮着大量的爆炸性粉尘也给掘进作业带来了潜在的安全威胁^[10]。近年来,随着各国对粉尘危害的认识加强,矿山粉尘治理技术的研究工作处于逐步发展时期,并取得了一定的研究成果。

1.2.1 泡沫除尘国外研究现状

泡沫除尘是用无空隙泡沫体覆盖尘源,使刚产生的粉尘得以湿润、沉积,失去飞扬能力的除尘方法。泡沫除尘技术问世于20世纪50年代,英国最先开展了这方面的研究,继后美国、苏联、联邦德国、日本等国陆续开展了这方面的工作,并取得了一定的效果。

1966~1967年,苏联卡拉干达煤田对泡沫除尘做了大量的研究。其研究人员试验了数十种不同浓度的阴离子表面活性剂物质,研制

了高倍数空气机械泡沫发生器，并在放炮点、采煤机、凿岩机等多个产尘点进行了试验^[11-13]。其中，在岩石掘进工作面的测定试验结果显示，凿岩机司机作业处降尘率为 93.6%；距转载点约 10m 处的降尘率则为 97.1%；应用于采煤机时，可使联合采煤机的除尘效能较通常的防尘措施提高 2~5 倍^[14]。苏联科学家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，与国立煤矿机械设计与实验研究所、顿涅茨克煤矿机械设计院共同研制了一种在急倾斜煤层工作面 and 1K-101 型采煤机上使用的泡沫除尘设备，并在顿巴斯中心区的 7 个煤层进行泡沫除尘试验^[15]，结果表明，这种设备的技术指标为：每采 1t 煤消耗泡沫 2~3m³，起泡液为 15~20L，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%~90%。可见，这一时期的研究主要集中在高倍数泡沫，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止粉尘向外扩散。

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^[16-18]。Monsanto 公司和 Dayton 实验室自 1969 年 11 月至 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（或者氮气）压入发泡器中，喷射到发泡网上，再由空气鼓吹发泡网发泡^[19]，如图 1-1 所示。

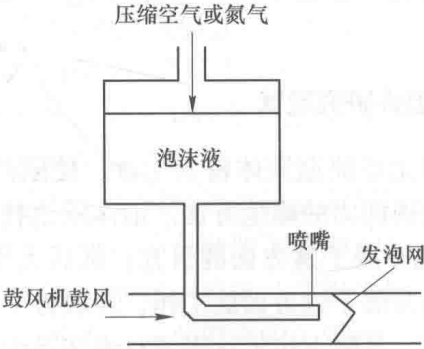


图 1-1 Monsanto 公司和 Dayton 实验室所采用的发泡器结构示意图

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,影响泡沫除尘效率的关键因素是泡沫的结构。他们认为,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,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 $100\sim 200\mu\text{m}$ 之间的微泡沫,除尘效率最高^[7]。另外,该公司设计了微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皮带运输转载点迅速建立了200多套泡沫除尘系统。

20世纪70年代中期,随着美、苏、波兰等国表面活性剂行业的发展,泡沫除尘技术在生产中得到广泛的应用,并研制出了多种规格的廉价发泡剂;此后,根据不同尘源的要求,开发出不同型号的泡沫除尘配套系列产品。

20世纪80年代初,原美国矿业局研制出了压缩空气型泡沫除尘装置。它是先将压缩空气、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^[8]。他们用该装置于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进行试验,结果表明,其除尘效率高出喷雾降尘50%,而耗水量只有喷雾降尘的 $1/10\sim 1/5$,缺点是成本太高。

1983年,日本的山尾信一郎、梅津富等人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^[20]。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%~70%。

1.2.2 泡沫除尘国内研究现状

我国泡沫除尘的研究起步较晚。1984年年底,煤科院上海研究所开始了泡沫除尘的探索,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。

但由于当时条件的限制,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,湖北省劳保所开始研究凿岩泡沫除尘技术,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。但由于其所研发的设备中发泡液是间断添加,不能实现连续工作,导致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,北京科技大学也开展了泡沫除尘相关内容的研究,从理论上分析了泡沫除尘机理,网式发泡器的结构、性能及其工作参数,其研究内容主要集中在高倍数泡沫^[21]。2005年以来,中国矿业大学对泡沫除尘机理、井下泡沫除尘发生器、发生装置及除尘系统进行了较深入的研究和实践,取得了显著进展。

1.3 课题研究的目的与意义

在相当长的一段时期内,国家经济建设对能源需求将持续增加,而我国以煤炭为主要能源的局面也暂时不会改变。我国连续十几年煤炭产量及消耗的递增印证了这一点。随着国家能源需求的上升,以高产、高效的大型机械化为主要标志的现代矿井不断涌现出来。而伴随着机械化程度的不断提高,采掘工作面的粉尘产生量也与日俱增,造成工作面作业环境的严重污染,对工人的职业健康及煤矿的安全生产带来了威胁。因此,煤矿粉尘不但严重威胁着井下工作人员的职业安全健康,也影响着企业生产的发展和社会的稳定。虽然目前国内各个煤矿对粉尘治理十分重视,且采取了一系列降尘措施,但粉尘浓度高的问题一直没有得到很好地解决,随着矿井的发展,粉尘治理工作显得越来越重要^[11]。因此,为了搞好采掘工作面的防尘工作,有效降低采掘工作面粉尘浓度,保障煤矿的安全生产以及提高工人的职业安全健康程度,针对现有采掘工作面除尘技术存在的问题,提出“矿用泡沫除尘剂研究”这一研究课题。

目前国内矿井泡沫降尘技术还处于初级阶段,现有的泡沫除尘剂泡沫率低、降尘能力弱,这些因素直接导致了现有的矿井泡沫

降尘技术降尘效率低,没能得到普遍的推广应用。本课题通过实验室研究,采用单体实验及复配实验、接触角测定实验以及发泡倍数测定实验等方法,研发出发泡倍数高、除尘效果好的泡沫除尘剂。

本课题的研究成果对于有效防治煤矿采掘工作面现场粉尘浓度高的问题,提高井下矿工的职业安全健康程度,指导矿山企业的安全生产,具有重要的理论意义和实用价值,经济效益和社会效益较大。

1.4 研究内容与方法

1.4.1 研究内容

本书的主要研究内容分为以下5个方面:

(1) 除尘泡沫基本性质及泡沫捕尘机理研究。根据发泡液的组成成分,结合物理化学、表面化学、流体力学等知识从理论上研究分析除尘泡沫的形成机理,同时对泡沫捕尘和泡沫与粉尘的黏附机理进行研究,为泡沫除尘剂的研制提供理论基础。

(2) 矿用泡沫除尘剂配方初选。在对除尘泡沫对泡沫除尘剂性质的要求及其选择原则进行研究的基础上,筛选出若干种可用于泡沫除尘技术的发泡剂和润湿剂,进而采用改进 Ross-Miles 法,通过发泡剂单体初选实验、发泡剂单体复配实验以及发泡剂与润湿剂复配实验,初步确定泡沫除尘剂配方。

(3) 泡沫除尘剂润湿性测定及配方优选。利用 DSA100 视频光学接触角测量仪,分别测量初步确定的泡沫除尘剂对无烟煤煤尘、褐煤煤尘以及焦煤煤尘的润湿性,筛选出润湿性好的泡沫除尘剂配方。

(4) 泡沫除尘剂发泡倍数测定及配方确定。分别采用实验室搅拌法和发泡器法测定经润湿性实验筛选之后的泡沫除尘剂的发泡倍数,通过发泡倍数测定实验,最终确定出发泡倍数最高的配方,作为矿用泡沫除尘剂的最终配方。

(5) 现场应用。将研发出的矿用泡沫除尘剂在兖矿集团兴隆庄煤矿进行现场应用，测定使用泡沫除尘剂前后粉尘浓度情况，以此考察课题研发的矿用泡沫除尘剂除尘效果。

研究技术路线见图 1-2。

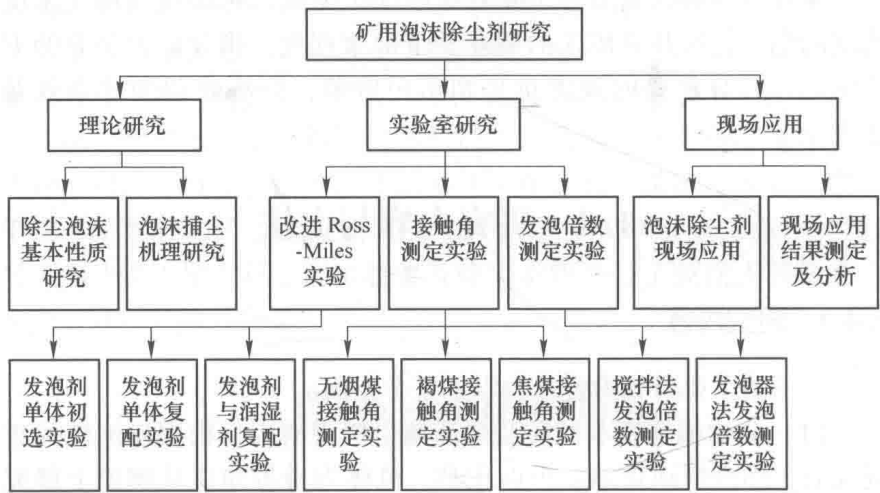


图 1-2 研究技术路线图

1.4.2 研究方法

本课题采用理论分析、实验室研究与现场应用相结合的研究方法，在对除尘泡沫的基本性质及泡沫捕尘机理进行研究的基础上，优选出了若干种发泡剂和润湿剂。进而采用改进 Ross-Miles 法，通过发泡剂单体初选试验及发泡剂复配实验，确定出发泡剂的最优配方，通过发泡剂与润湿剂复配实验，确定出发泡剂与润湿剂的最优配比，从而初步确定泡沫除尘剂配方；通过 DSA100 视频光学接触角测量仪，分别测量初步确定的泡沫除尘剂对不同煤质煤尘的润湿性，从而筛选出润湿性较好的泡沫除尘剂；通过实验室搅拌法和发泡器法，分别测量经润湿性实验筛选之后的泡沫除尘剂的发泡倍数，通过对实验结果进行分析，选出发泡倍数最高的泡沫除尘剂配方作为最终配方；通过现场应用，测定使用泡沫除尘剂前后粉尘浓度的变化情况，以此考察研发的矿用泡沫除尘剂的实用效果。

1.5 本章小结

本章针对近几年我国煤矿粉尘爆炸时有发生及尘肺病持续递增的严峻形势,提出进行矿井粉尘防治的必要性和紧迫性,从而引出本书所研究的矿用泡沫除尘剂,并从国内外两个方面阐述了目前关于矿井粉尘防治主要技术手段以及泡沫除尘技术的研究现状,指出了其中的不足。根据不足之处,提出了本书研究的目的、意义、内容与方法。