

国家自然科学基金面上项目 (51474139, 51574123, 51774198)

湖南省自然科学基金青年基金项目 (2017JJ3076)

中国博士后科学基金项目 (2015M582118)

矿山灾害预防控制—省部共建国家重点实验室培养基地开放基金 (MDPC201709)

湖南省矿产

同创新中心

湖南科技大

煤矿采掘工作面喷雾降尘 理论及应用

王鹏飞 程卫民 周刚 著

Meikuang Caijue Gongzuomian Penwu Jiangchen Lilun Ji Yingyong

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

面上项目(51474139,51574123,51774198)

湖南省自然科学基金青年基金项目(2017JJ3076)

中国博士后科学基金项目(2015M582118)

矿山灾害预防控制-省部共建国家重点实验室培养基地开放基金(MDPC201709)

湖南省矿产资源安全绿色开发 2011 协同创新中心

湖南科技大学学术著作出版基金

煤矿采掘工作面喷雾 降尘理论及应用

王鹏飞 程卫民 周 刚 / 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书通过理论分析、实验研究、现场应用相结合的方法,对煤矿采掘工作面喷雾降尘理论和技术工艺进行了系统的研究,形成了针对煤矿采掘工作面较为系统的喷雾降尘知识体系。全书共分为6章,主要包括绪论、喷雾降尘理论研究、煤尘润湿特性研究、高压喷雾雾化特性实验研究、高压喷雾降尘效果实验研究,以及采掘工作面高压喷雾降尘技术的工程应用等内容。

本书可供矿业工程、安全科学与工程、环境工程等领域的科研人员、高等学校教师、研究生及高年级本科生,以及从事煤炭行业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿采掘工作面喷雾降尘理论及应用/王鹏飞,程卫民,周刚著. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.5

ISBN 978-7-5646-3369-1

I. ①煤… II. ①王… ②程… ③周… III. ①综采工作面—喷雾防尘—研究 IV. ①TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 096334 号

书 名 煤矿采掘工作面喷雾降尘理论及应用

著 者 王鹏飞 程卫民 周 刚

责任编辑 孙 景 陈红梅

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 徐州市今日彩色印刷有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 10.25 字数 190 千字

版次印次 2018年5月第1版 2018年5月第1次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤炭是我国的主体能源,并且 95% 的煤矿开采是地下作业。随着采深和采掘机械化水平的不断提高,随之而来的矿井生产自然灾害问题也愈发突出,尤其是井下作业区域粉尘等有害物质严重地威胁着矿井的安全生产和矿工的身心健康。煤矿井下粉尘危害主要有两方面:引起煤尘爆炸和导致尘肺病。采掘工作面是煤矿井下主要产尘源,开展采掘工作面喷雾降尘理论及应用研究,对改善煤矿采掘工作面作业环境、缓解我国职业病危害问题具有重要的理论和现实意义。

本书借助流体力学与气溶胶等相关理论,建立了煤矿井下高压喷雾降尘数学模型,推导出分级效率的理论计算式,并采用 Matlab 软件绘制出分级效率与各影响因素的关系曲线;同时,结合粉尘粒径和频率分布式,建立了全尘降尘效率与呼吸性粉尘降尘效率的理论计算式,并分析了粉尘特征参数对各降尘效率的影响。采用表面张力、接触角、沉降等实验,对煤尘湿润特性及其影响因素进行了分析,为煤矿采掘工作面喷雾降尘提供基础参数。基于自行设计喷雾降尘实验平台,对高压喷雾雾化特性及降尘效果展开了系统的实验研究,得到了供水压力、巷道风速、喷嘴结构以及喷嘴孔径等对喷嘴雾化特性参数及降尘效率的影响规律。最后将研究成果在高庄煤矿综放工作面和唐口煤矿南部回风大巷全岩综掘工作面开展工程现场应用,取得了较好的降尘效果。

本书在编写过程中,研究生张奎、谭烜昊、汤梦、桂哲、苟尚旭、王健、李泳俊、石伏捷、田畅、裴叶等在喷嘴雾化特性及降尘效果实验研究方面给予了大力支持和帮助,在此一并表示感谢;同时,本书引用和参考了大量书籍、文献及资料,在此特向原作者致以谢意。

由于编写时间仓促和水平所限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

著 者

2018 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 采掘工作面防尘理论及方法国内外研究现状	3
1.3 采掘工作面喷雾降尘理论国内外研究现状	9
1.4 内容概要	16
第 2 章 喷雾降尘理论研究	17
2.1 颗粒的基本微观特性	17
2.2 雾化机理	20
2.3 粉尘及雾滴运动规律	26
2.4 喷雾降尘机理	34
2.5 喷雾降尘效率研究	36
2.6 煤矿井下高压喷雾降尘效率的理论计算与分析	40
第 3 章 煤尘润湿特性研究	51
3.1 煤尘的润湿性	51
3.2 煤尘润湿性测量方式简介	53
3.3 实验方案	57
3.4 煤尘润湿特性实验结果与分析	61
第 4 章 高压喷雾雾化特性实验研究	75
4.1 喷嘴雾化特性测试实验系统	75

■ 煤矿采掘工作面喷雾降尘理论及应用 ■

4.2	实验方案·····	79
4.3	实验结果及分析·····	82
第5章	高压喷雾降尘效果实验研究·····	107
5.1	喷雾降尘效果测试实验系统·····	107
5.2	实验过程及结果分析·····	111
第6章	采掘工作面高压喷雾降尘技术的工程应用·····	130
6.1	高庄煤矿 3 _E 1109 综放工作面喷雾降尘装置设计及 工程应用·····	130
6.2	唐口煤矿南部回风大巷综掘工作面喷雾降尘设计及 工程应用·····	139
参考文献	·····	148

第 1 章

绪 论

随着科学技术的不断进步,煤矿机械化程度的日益提高,矿井的开采正朝着高产、集约化生产方向发展。现代煤矿开采技术的运用致使煤矿采掘工作面粉尘浓度极高,这无形中加大了矿井粉尘的治理难度。根据相关测定数据,无防尘方案时,在采煤机截割过程中工作面的粉尘浓度往往超过 $2\ 500\text{ mg/m}^3$,有的甚至更严重。因此,粉尘是影响采煤工作面环境和煤矿生产安全的重要因素。基于此,为了优化采掘工作面的环境、提高工作面的安全水平和确保现场工人的人身安全健康,开展控制并降低采掘工作面粉尘浓度的研究工作势在必行。

1.1 研究意义

能源是人类社会赖以生存和发展的重要自然资源,是社会生产的重要物质基础,对国民经济的发展举足轻重。《能源中长期发展规划纲要(2004~2020)》确定,中国将“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”。我国能源储量富煤、缺油、少气,这一现状决定了煤炭是我国重要的基础能源。我国的煤炭生产量居世界第一,同时也是世界上第一大煤炭消耗国。截至2015年年底,已探明保有储量1.57万亿t,居世界第三位,同年我国煤炭消费量约为33.8亿t。因此,煤炭为我国国民经济的持续快速发展提供了强有力的能源保障^[1-2]。

煤炭给我们带来巨大经济效益的同时,也造成了巨大的安全隐患,其中采煤过程中的煤尘安全问题尤为突出^[3]。煤尘的主要危害有:

(1) 对人体的危害。长期在粉尘环境下工作的职工,会导致职业病——尘

肺病^[4,5]。煤尘肺病对工人的身体的伤害是极大的,尘肺发病率高主要是因为工作环境的粉尘浓度超限以及在粉尘环境中工作的工人多,患病基数大。截至2013年,累计尘肺病有746 541例,病死率超过20%^[3]。

(2) 煤尘在一定条件下可以爆炸。煤尘爆炸会造成重大的人员伤亡和财产损失,对矿井的生产安全是个极大挑战。煤尘爆炸事故教训在煤矿开采史上是惨痛的。1906年,法国某煤矿发生特大煤尘爆炸,造成1 099人死亡;1960年,大同老白洞煤矿发生特大煤尘爆炸,死亡684人等^[6]。

(3) 影响工作场所视野,导致工伤事故的发生。由于煤矿环境特殊,其照明条件有限,光线不足,有些采煤工作面割煤时,粉尘浓度超过1 000 mg/m³。工作面因能见度非常低,容易造成工人操作失误或者无法及时发现并排除事故隐患,导致事故的发生。

(4) 机械磨损加快,减少精密仪器使用年限。现在煤矿井下现代化的机械设备应用的程度不断提升,而这些设备对运行环境有着一定的要求,高浓度的粉尘对设备的影响更加明显,如损坏液泵、支架组件、降低测量仪表的精度等。

近年来,随着煤矿机械化程度的不断提高,开采强度的不断加大,煤矿井下采掘工作面的粉尘浓度剧增,作业环境恶化,严重地威胁着矿井的安全生产和工人的身心健康。2000年年初至2015年年底,全国共发生煤尘爆炸事故14起,致使587人遇难^[2]。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,造成171人死亡,48人受伤,直接经济损失4 293万元人民币,是近年来最为严重的一次煤尘爆炸事故。根据国家卫生健康委员会近三年发布的数据显示,2014年共报告职业病29 972例,其中尘肺病26 873例,煤工尘肺和矽肺分别为13 846例和11 471例;从行业分布看,煤炭开采和洗选业、有色金属矿采选业和开采辅助行业职业病病例数较多,分别为11 396例、4 408例和2 935例,煤炭行业占报告总数的42.41%^[3]。自20世纪50年代以来,全国累计报告职业病86.4万余例,其中尘肺病78万余例,死亡16万多例。据不完全统计,死于尘肺病的患者是矿难和其他工伤事故死亡人数的6倍之多,仅我国国有重点煤矿尘肺病患率高达10%以上。每年国家用于治疗尘肺病的医疗费用就高达80亿元。据专家预计,今后10~15年我国煤炭行业尘肺病发病总数还将呈上升趋势。

采掘工作面是煤矿井下主要产尘点之一,采掘工作面粉尘防治工作开展的好坏将对煤矿安全生产起着至关重要的作用。据统计,目前国内采掘工作面在

未采取措施时粉尘浓度一般在 $1\ 000\sim 2\ 500\text{ mg/m}^3$, 甚至高达 $3\ 000\text{ mg/m}^3$ 以上。即使采取措施, 多数工作面的粉尘情况依然相当恶劣, 掘进机司机工作地点粉尘浓度最大可达 $400\sim 900\text{ mg/m}^3$ ^[7-10]。《煤矿安全规程》规定, 作业场所空气中总粉尘和呼吸性粉尘浓度最高分别为 10 mg/m^3 和 3.5 mg/m^3 , 上述地点的粉尘浓度已远远超出国家规程的上限值^[11]。在全球范围内, 许多国家的煤矿都存在着粉尘灾害问题。世界上主要的采煤国家, 如美国、印度、澳大利亚、俄罗斯、德国、波兰等国家, 都不同程度地存在着煤矿粉尘安全隐患和职业健康等问题。据报道, 美国宾夕法尼亚煤矿区的 47 000 余名矿工中, 有 5 400 名工人因患尘肺病而丧失了劳动能力。该矿区一煤矿的在职矿工中, 尘肺病患率为 24.7%, 因尘肺已离职的矿工高达 48.9%。法国的统计资料表明, 法国 3 个煤矿区的尘肺病人数占接尘人员的 14.8%。自 20 世纪中后期以来, 上述国家的煤矿通过采取有效的防尘措施, 尘肺病人数在逐年下降。对于我国来说, 不但煤矿接尘人员在全世界居于首位, 而且尘肺病患率居高不下。如何采取有效的防尘措施, 降低采掘工作面粉尘浓度, 这些问题已迫在眉睫。

1.2 采掘工作面防尘理论及方法国内外研究现状

1.2.1 产尘机理研究方面

采掘工作面是煤矿生产过程中的主要产尘点之一, 其粉尘主要来源有截割头截割产尘和装运产尘两大类。其中, 采掘机截割头截割产尘占整个工作面产尘量的 80%~95%^[12]。为了实现从源头上降低产尘量与控制粉尘扩散, 需要掌握采掘工作面掘进机截割产尘机理。为此, 国内外学者采用现场实测与相似模拟实验方法开展了大量有关采掘工作面掘进机截割产尘机理的研究工作。

目前, 国内外学者研究采掘机截割产尘的主要手段为现场实测与实验室测定。

(1) 现场实测方面, 1983 年, 美国矿业局特温市的割煤技术研究小组通过现场实测, 分析了镐形截齿的磨损对截割力及呼吸性粉尘产生量的影响, 提出降低截齿转速、增大切割深度可减少产生量^[13]; 英国、德国等国家相关学者也通过大量现场实践证明了以上结论, 并确立了截齿转速、截割深度与产生量的数学关

系^[14]；2006年，白鹏通过对兰屯矿某采掘工作面进行产生实测和分析，得出了截齿的形式、几何参数和磨损程度是影响截割产生量的主要因素，煤层性质、煤层厚度及含水率也会对产生量有一定的影响^[15]。

(2) 实验室测定方面，目前主要有两种方式，即重锤冲击实验与截齿截割实验。澳大利亚昆士兰大学矿物研究中心、中煤科工集团重庆研究院及太原理工大学等单位均采用重锤冲击实验对煤与岩石的产生特性和粉尘粒径分布规律开展了实验研究，确定了产生的粒径服从罗来-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布，并对破碎程度指标 λ 和破碎性指标 n 进行了测定^[16-18]。辽宁工程技术大学李晓璐、姜健等人基于自行设计的截割产生实验平台，对影响掘进机截割产生的影响因素进行了分析，建立了煤层性质、截齿类型及运动参数等影响因素与掘进机截割产生的数学关系，初步确定了掘进机截割产生机理^[19-22]。

关于采掘工作面粉尘产生机理的研究，国内外主要集中在采掘机切割破岩作用，通过研究来优化采掘机截煤滚筒上的截齿结构参数和采掘机运行参数，而对采掘工作面其他尘源(如切割下来的岩块垮落、冲击、运输、转载、工作面清底及打锚杆支护等)研究得较少。关于掘进机截割产生机理的研究也存在很多不足，主要体现在重锤冲击及单个或多个截齿截割产生实验与采掘工作面掘进机截割头截割煤岩体的情况不相符合，测定结果不能指导生产实际，而与现场条件较为相同的实验装置由于耗资与技术等方面原因至今尚未建立。现场实测受掘进进度、地质等复杂条件限制，难以全面、系统地分析各因素对截割产生的影响，致使对掘进机截割产生机理的认识仍停留在定性阶段，无法得出准确的截割产生量。

1.2.2 采掘工作面风流特性及粉尘分布规律方面

在采掘工作面风流特性及粉尘分布规律方面，国外的研究起步较早。20世纪30年代初，苏联学者阿斯阔成斯基等人对粉尘运动速度与风速之间的关系进行了系统研究，确定了尘粒随风流运动的必要条件^[23]。1955年霍尔(Hall)通过对采掘工作面粉尘浓度和风速的实测，确立了二者之间的关系式，并且提出了最佳排尘风速^[24]。1957年霍金森(Hodkinson)通过粉尘弥散实验，得出了粉尘浓度沿风流方向变化规律以及风流流场与粉尘浓度场的关系，并提出了实现风、尘分流的技术措施^[25]。1986年考特尼(Courtney)等人对呼吸性粉尘在巷道中的沉降规律进行了研究，并提出了沿程粉尘浓度分布表达式^[26]。法国的安萨特

(Ansart)、雷诺(Renaud)等人通过建立双阶段的数学模型,对大空间的粉尘分布情况进行了模拟,能够有效地预测大幅度降尘空间内的粉尘分布情况。美国的部分学者通过建立粉尘团的抽象数学模型,运用空气动力学的原理,对工作面作业空间内的粉尘流动情况进行了大量的数值实验分析^[27]。20世纪80年代,巴斯卡(Bhaskar)等在研究总结粉尘在风流中扩散、碰撞、二次飞扬等作用机理及实际情况后,对粉尘在风流中的流动状况进行研究,建立了在一维稳态均匀流动情况下的尘粒对流扩散方程,并运用有限差分法来求解该一维方程^[28]。苏绍礼(S. L. Soo)将粉尘颗粒视为研究对象,在此基础上建立了颗粒群的流体模型。在进行研究的过程中,将颗粒群视为连续介质,认为含尘气流是颗粒与气体共同作用下形成的气体—颗粒两相互相耦合的流体,并在此基础上建立了两相流的物理模型,完整且详细地对各研究相之间的湍流扩散和速度滑移进行了考虑分析,对粉尘运移规律的研究具有重要的影响和借鉴价值^[29]。

20世纪80年代以来,国内学者通过理论分析、现场实测、数值模拟及模型实验等手段对矿井风流流场和粉尘运移规律开展了大量的研究工作。东北大学李恩良、王秉权等人,对污染物(粉尘和有害气体)在井巷道中的运移和扩散问题开展进一步研究。根据质量守恒、菲克定律和布辛涅斯克(Boucassinesq)假设,导出了井巷污染物紊流传质数学模型和弥散系数计算式^[30-33]。重庆大学游葵、吴泽源提出了井巷粉尘弥散和沉降的数学模型,并对李恩良等提出的纵向弥散系数计算式进行了修正^[31,35]。中国矿业大学胡方坤、王德明、秦跃平等,基于CFD离散相解算模拟技术,通过建立全尺寸掘进巷道模型,研究了粉尘在掘进巷道中的横向与纵向运移规律,并与现场实测进行了对比分析^[36-38]。湖南科技大学王海桥、刘荣华等,以流体力学、气溶胶力学及空气动力学等相关理论,分析了掘进工作面射流通风流场及粉尘浓度分布,并通过数值模拟得到了掘进工作面粉尘和风流分布的基本规律^[39-43]。北京科技大学蒋仲安、杜翠凤等,运用气、固两相流理论,建立了采掘工作面粉尘运移数学模型,根据采掘工作面具体特点和实测数据,采用Fluent软件对长抽短压通风与抽出式通风掘进工作面的粉尘运动规律进行了数值模拟^[44-46]。山东科技大学程卫民等,对采掘工作面粉尘浓度分布进行了数值模拟和现场实测^[47]。

综上所述,目前有关采掘工作面粉尘分布和运移规律的所有研究,主要是针对单一尘源,很少考虑工作面多个尘源共同作用并相互影响。然而,在分析粉尘运移扩散动力方面,一般只考虑通风风流的搬用作用,并没有涉及掘进机截割头

旋转切割产生的扰动气流、煤岩体垮落产生的诱导、冲击气流及喷雾射流诱导气流等对粉尘扩散运移的影响。

1.2.3 采掘工作面粉尘防治方法研究方面

采掘工作面粉尘防治主要通过三个方面来实现,一是在掘进之前,通过注水工艺来提高煤体的润湿性或采取合理的开采工艺,来实现降低煤体产生的可能性;二是在掘进时,利用特定的防尘技术控制尘源,使粉尘存在于特定的空间和位置,不能进一步扩散;三是利用相关除尘技术或设备,及时地把产生的粉尘过滤或排除掉。

1.2.3.1 煤层注水

煤层预先注水的基本防尘机理是通过打钻孔向煤体中注水,提高煤体的含水量和润湿性,从而减少掘进时粉尘的产生。世界各主要产煤国家都普遍认为,煤层注水预湿煤层是采掘工作面最基本、最有效的防尘措施。如德国各产煤州矿山监察局规定,采煤工作面在采煤前必须对煤体进行注水。注水泵多采用压气驱动泵,并采用恒定流量控制阀,实现多孔动压同时注水,最多可达40孔。封孔方式有液力自动胀紧封孔器、PVR快速凝固物封孔和针对瓦斯压力很高等特殊条件下的双回路封孔器。为了使煤层注水状况适应于被湿润煤体的渗透特点,乌克兰矿山科学院研制出能自动调节注水参数的YHP型注水泵,它能根据煤层的渗透性和注水压力自动调整注水量,实现了最佳的煤层注水参数,提高了液体在煤体中分布的均匀性。法国煤炭中心研制了流量控制器和连续注水装置,使煤层注水实现了自动化。

石炭井矿务局于20世纪70年代开始推广试使用煤体的注水防尘。中煤科工集团重庆研究院的杜泽渊曾仔细阐述长钻孔煤层注水防尘的具体操作和方法,并对比分析了注水系统及加压方式的不同对防尘效果的影响。河南工程学院吴金刚针对现有松软、低透气性及底板起伏较大的煤层注水防尘效果不理想的问题,提出高位钻场煤层注水防尘技术方案^[48]。根据煤层实际特点,确定了钻孔技术参数和注水工艺参数,通过实践表明实施该技术后,工作面各工序产尘量均大幅降低,工作面及平巷劳动环境显著改善。河北联合大学董宪伟针对不同的工作面煤层分别采用浅孔、中孔和深孔联合注水降尘新工艺,并从注孔深度、间距等各工艺参数进行研究和应用,通过对注水前后工作面粉尘质量浓度进行比较,得出降尘效果显著^[49]。

添加表面活性剂可以改善水对煤的湿润能力,如德国选用氯化钙作为注水添加剂,其抑尘效果得到显著提高。山东科技大学刘伟曾对表面活性剂抑尘性能进入了深入研究,通过对相同条件下的不同表面活性剂和复配试剂进行接触角及表面张力测定实验,优选出使用方便、抑尘效果好、价格低廉的新型复配抑尘剂,并通过风流增压式液体定量混合装置来实现表面活性剂的定量动态混合,最后通过实践证明该复配抑尘剂对呼吸性粉尘防治具有较好的效果^[50]。

1.2.3.2 喷雾降尘

喷雾降尘是矿山防尘最传统的一项降尘技术,也是采掘工作面较常用的一项防尘技术措施。采掘工作面的喷雾降尘包括掘进机内外喷雾降尘、转载点喷雾降尘及风流净化水幕,其中掘进机内外喷雾降尘是采掘工作面喷雾降尘的主体。掘进机内喷雾喷嘴一般安装截割头靠近齿座的位置,其主要作用是在截齿下的产尘区形成水膜,覆盖尘源,实施湿式截割,抑制煤(岩)尘的产生。内喷雾降尘效果与采用的喷嘴型号、类型、喷嘴的布置、喷雾参数、煤(岩)尘性质及运动参数等很多因素有关。因此,各个国家或不同矿井所取得的降尘效果均有差异。国内外经验表明,掘进机内喷雾降尘效率一般在50%~70%。掘进机外喷雾一般固定于掘进机的悬臂段上,其主要作用是在截割和落煤(岩)区形成水幕,覆盖产尘区,黏结采落煤岩块中所含的粉尘和把已悬浮起来的粉尘降下来^[5]。

为了提高喷雾降尘效果,尤其是呼吸性粉尘的降尘效果,近年来国内外学者对喷雾降尘机理以及高压喷雾降尘^[51-60]、泡沫降尘^[61-63]、化学抑尘剂降尘^[64,65]、磁化水喷雾降尘^[66,67]、超声波雾化降尘^[68,69]、预荷电高效喷雾降尘^[70-72]等新技术开展了广泛的研究。研究结果表明,上述新技术能在一定程度上提高喷雾降尘效果,但由于技术、工艺、经济等原因,目前还难以在采掘工作面推广应用。此外,对于目前采掘工作面常规的内外喷雾降尘技术,还普遍存在以下两个方面问题:一是机组内喷雾系统在截割头切割煤岩体时很容易堵塞,导致内喷雾失效不能正常工作,而外喷雾降尘效果不够理想,尤其是对于呼吸性粉尘,降尘效率不到30%;二是喷雾降尘系统耗水量大,由于喷射雾化造成工作面雾气太重,导致作业人员工作在雨雾环境中,难以接受,因此目前许多采掘工作面作业人员,宁可在无喷雾降尘条件下冒着严重粉尘工作,也不愿实施喷雾降尘。鉴于上述种种原因,目前喷雾降尘技术在采掘工作面实施效果并不理想,这就造成了采掘工作面工人仍长期处于高浓度粉尘环境中作业,对其身心健康构成严重威胁。气水喷雾是以压力水和压缩空气作为双动力的一种新型喷雾方式,相对于常规喷

雾方式,其具有耗水量小、雾化粒径小及降尘效率高等优势,将该技术应用于采掘工作面外喷雾降尘系统,既能够提高喷雾降尘效率(尤其针对呼吸性粉尘),又可以改善工作面作业环境。

1.2.3.3 通风除尘

通风除尘是采掘工作面目前最有效的控尘方法之一。采掘工作面最早普遍采用的是压入式射流通风,该通风方法在一定程度上能够排出工作面粉尘和瓦斯,降低工作面气温,改善工作面劳动环境和生产安全状况,但由于排出的风流未经过净化处理,含尘风流直接从工作面沿着掘进巷道排出,使得整个掘进巷道的空气受到污染。为了改善采掘工作面及整个掘进巷道劳动环境,开始采用配置除尘装置的压抽混合式通风方法,即将掘进头的含尘风流吸入除尘器中加以净化后再排入巷道。实践证明,这种通风方法控尘效果明显,因此在采掘进工作面得到推广应用。目前,在现场主要采用的是长压短抽混合式通风,该种通风方式控尘与降尘效果主要取决于两个因素,即通风除尘系统粉尘收集的有效性与除尘器的除尘效率。经过国内外多年的研究,目前已开发出多种高性能的除尘器,除尘器的除尘效率已不是主要问题。而在通风除尘系统粉尘收集方面,由于普通的长压短抽混合式通风,是通过导风筒直接向工作面压入新鲜风流,常会把掘进机切割煤岩体时所产生的粉尘吹扬起来,向四处弥漫,不利于除尘器收尘,影响了除尘效果。

为了防止工作面含尘气流向外扩散以及巷道顶板瓦斯积聚,20世纪70年德国研究出一种控尘装置——附壁风筒,即在压入式风筒的末端安装附壁风筒改善机掘工作面风流分布状况,使压入风流变为轴向前进的旋转风流,形成一道旋转风幕,既可以封住工作面粉尘向外扩散,提高集尘装置的集尘效果,改善机掘工作面作业环境,又能吹散积聚瓦斯,提高矿井生产安全性。德国鲁尔矿区August-Victoria矿等煤矿机掘工作面目前普遍采用这种控尘装置,均获得了较好的通风防尘效果。随后,欧美一些国家(如波兰、美国等)煤矿也开始应用掘进通风新技术,并在此基础上,为了解决附壁风筒缝隙出口风速太低的问题,对附壁风筒进行了改进。其中,改进较大的是波兰柯玛格采矿机械化中心将带自动控制阀的附壁风筒改进为局部通风机配套的附壁风筒,改进后的附壁风筒能利用局部通风机叶轮产生的涡流改变风筒中的风流方向,从而提高了附壁风筒缝隙出口风速,取得了较好的防尘效果。20世纪90年代,我国引进该通风技术,在一些现代化矿井采掘工作面对通风方法进行了现场试验研究。近年来,一些

科研单位,如中煤科工集团重庆研究院、中国矿业大学、山东科技大学、湖南科技大学等单位,针对国内采掘工作面的具体情况,对附壁风筒的结构形式和材质开展了一些研究工作,取得了一些研究进展,使这种通风方法在国内能逐步得到推广应用^[73-77]。此外,为了阻止掘进头粉尘向外(司机处)扩散,辽宁工程技术大学、山东科技大学等学者开展了空气幕控尘方法研究,理论和试验研究表明,这种控尘方法能有效阻止掘进头掌子面的粉尘向外(司机处)扩散,但对采掘工作面其他尘源难以控制^[78,79]。中国矿业大学(北京)秦跃平提出了压风分流降尘方法,同时通过提高抽吸比来提高收尘效果,研究表明当抽吸比大于1时,采掘工作面粉尘扩散能得到较好的控制^[80]。

1.3 采掘工作面喷雾降尘理论国内外研究现状

对综放工作面喷雾降尘理论进行研究,喷嘴射流雾化机理是基础,粉尘和雾滴场的计算机数值模拟是依据,而尘雾场耦合机理则是核心。

1.3.1 喷嘴射流雾化机理的国外研究历史及现状

1.3.1.1 射流分裂分析

1879年,液体射流在气流中的破碎作为流体动力稳定性的研究由瑞利勋爵(Lord Rayleigh)提出,经过一个世纪多的研究,对于射流的分裂破碎机理提出了几种解释,概略如下。

(1) 空气动力干扰说

空气动力干扰说是目前发展得比较充分,也是最有发展前途的一种关于射流分裂的假说。最早由卡斯特曼(R. A. Castleman)于1932年提出,他认为射流与周围空气间的气动干扰,使射流表面产生不稳定的波动,随着射流速度的增加,不稳定波所作用的长度越来越短,直到微米量级,于是射流散布成雾状。

(2) 湍流扰动说

1931年,德加哈兹(K. J. Dejuhasz)最早提出射流的分裂雾化过程发生在喷嘴内部,而液体自身的湍流度可能起着重要作用。施韦策(Schweitzer)认为湍流管运动的喷嘴内部液体的径向分速会在喷嘴出口处立即引起扰动,从而产生雾化。霍尔罗伊德(Holroyd)和西特基(Sitkei)也提出过类似的说法。

(3) 空穴扰动说

贝格准克(Bergweik)认为所谓雷诺数范围内的湍流分速不足以引起雾化,他把射流的分裂雾化归因于喷嘴内液体空穴产生的大振幅压力扰动。萨德克(Sadek)也持同样观点。

(4) 边界突变说

一些学者认为,在喷嘴出口处,液体的边界条件发生的突变是引起射流雾化的原因。如什卡多夫(Shkadov)研究了气液交界面边界层内切应力的变化,证实此处存在不稳定的短波长的表面波,表面波的增长引起射流的分裂雾化。

(5) 压力振荡说

吉芬(E. Giffen)和格默拉泽夫(Muraszew)等注意到液体供给喷射系统产生的压力振荡也在一定程度上影响射流的雾化。由于一般的喷射系统都普遍存在着压力振荡,因而它可能对雾化起着重要作用。

随着出射速度提高,射流稳定性问题变得越来越复杂,除了轴对称波外,非轴对称波也有可能对液体射流的破碎起着主导作用。因而液体射流的非轴对称稳定性问题多年来一直受到研究者的关注。霍伊(J. W. Hoyt)和泰勒(J. J. Taylor)曾用先进的高速摄影技术捕捉到了液体射流表面波的发展情况,他们的实验结果清楚地展示了液体射流的非轴对称结果。Hoyt 和 Taylor 认为,这种非轴对称结构是螺旋形的。斯多玛(M. G. Stockma)和比扬(A. Bejan)用闪光摄影法研究了液体射流的几何形状。实验发现,在较大的雷诺数 Re 和韦伯数 We 范围内,普遍存在着非轴对称弯曲结构,并且轴向波长随着远离喷嘴而增大。Stockma 和 Bejan 认为他们以及其他文献所介绍的实验结果都可以用弯曲理论来解释。但这些实验工作并没有考虑到射流在结构上的差异,而只是简单地将它们看作是弯曲或螺旋形。

我国天津大学史绍熙等应用线性稳定性理论对液体射流破碎机理进行了详细的讨论。并采用色散方程将液体射流表面及发展分为时间模式和空间模式两种。严格地说,两种模式均不能完全真实地反映液体射流的实际情况。

1.3.1.2 雾化机理分析

对于喷嘴雾化特性的研究,许多研究者从三个方面进行:一是研究各参数对喷嘴雾化特性的影响规律;二是在分析试验数据的基础上整理出一些经验方程,来描述这些参数的影响规律,并用于工程估算;三是通过实验研究与分析,提出相应的物理模型。与此同时,众多学者提出的各式各样的理论解释也孕育而生,

如 TAB 模型、KH 模型、RT 模型等。

对雾化机理的理论研究最早可以追溯到 1878 年,瑞利(Rayleigh)用经典方法从低速射流的不稳定性角度出发,提出了雾化的射流不稳定理论。但该理论比现在常用的直射式喷嘴的实际雾化结果偏大,因为 Rayleigh 当时所研究的是很低速射流的破碎过程,并且只假设液体的表面张力是唯一抵抗液体破碎的力,而没有考虑液体的黏滞力。

1892 年,Rayleigh 又对其工作进行了完善,分析了液体黏性对射流破碎的影响。1909 年,玻尔(Bohr)对 Rayleigh 忽略的非线性问题进行了研究,对其理论进行了进一步的完善。1931 年,海伦林(Haehnlein)和韦伯(Weber)综合考虑了黏度、表面张力以及液体密度等因素的综合影响,对射流雾化理论进行了真正的系统的深入研究。1932 年,卡斯莱曼(Castleman)假设雾化是由液体与气体之间的相互空气动力作用引起的,这种相互作用造成了液体射流表面不稳定波的增长,而导致射流的破碎。后来许多学者对这个射流雾化模式进行了研究,如列维奇(Levich)等。

布拉德利(Bradley)在雾化机理方面的研究取得了突破性的进展,提出了利用稳定性理论来解决喷射雾化的问题,这些研究在判断雾化产生方面取得了成功。

德斯特(F. Durst)、阿雷伯(N. Allebor)和拉斯里耶(H. Raszillier)对空心圆柱射流进行了较为系统的研究,得出了射流内外表面不稳定扰动最大区域的计算公式:

外表面:

$$We \left(\frac{1}{a^2} - \widehat{k_{sa}}^2 \right) + \widehat{k_{sa}} D_a \frac{I_0(\widehat{k_{sa}} a)}{I_1(\widehat{k_{sa}} a)} = 0 \quad (1-1)$$

内表面:

$$We \left(\frac{1}{b^2} - \widehat{k_{sb}}^2 \right) + \widehat{k_{sb}} D_a \frac{I_0(\widehat{k_{sb}} b)}{I_1(\widehat{k_{sb}} b)} = 0 \quad (1-2)$$

式中 $\widehat{k_{sa}}, \widehat{k_{sb}}$ ——不稳定扰动的最大区域值;

a ——内半径;

b ——外半径, $b = a + h$;

h ——液体薄膜厚度;