

国家自然科学基金重点项目 (U1261205) 资助

国家自然科学基金面上项目 (51474139) 资助

国家自然科学基金青年基金 (51204103、51404147、51304128) 资助

山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助

山东煤炭安全高效开采技术与装备协同创新中心资助

山东科技大学杰出青年科技人才支持计划 (2014JQJH105) 资助

矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地资助

煤矿综放面 雾化降尘理论及应用

周刚 等著

MEIKUANG ZONGFANGMIAN
WUHUA JIANGCHEN LILUN JI YINGYONG



煤炭工业出版社

煤矿综放面雾化降尘 理论及应用

周 刚 程卫民 聂 文 王 刚 崔向飞 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿综放面雾化降尘理论及应用/周刚等著. --北京: 煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978-7-5020-4557-9

I. ①煤… II. ①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 (2014) 第 115818 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京市郑庄宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 880mm × 1230mm¹/₃₂ 印张 8

字数 210 千字

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 7422 定价 26.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 简 介

本书通过理论分析、数值模拟、实验测试、现场应用相结合的方法,对综放工作面喷雾降尘理论及工艺技术进行了研究,形成了针对综放工作面的较为系统的喷雾降尘知识体系。本书主要包括射流雾化及喷雾降尘的基础理论研究,喷雾降尘过程气体-颗粒两相流动的数学模型及数值模拟,粉尘场与雾滴场耦合关系的实验研究,降尘用表面活性剂的优选及其添加工艺,喷雾降尘工艺技术的工程应用等内容。

本书可作为普通高等学校、科研院所相关领域的研究和教学人员,以及从事煤炭行业的工程技术人员参考使用。

前 言

近年来,随着煤炭开采强度的不断增加和采掘机械化程度的不断提高,粉尘安全隐患和职业健康问题变得尤为突出。煤矿井下生产现场高浓度粉尘的危害主要表现在以下4个方面:煤尘的自然性和爆炸性;接尘矿工易患尘肺病;作业现场较低的能见度易导致其他安全事故;加速机械设备的磨损及降低精密仪器的可靠性。

本书提出的综放工作面喷雾降尘理论与技术工艺,可有效解决煤矿综放工作面高浓度粉尘治理的难题,有利于防止煤尘爆炸事故,改善人员的作业环境,从而进一步保障矿工的生命安全与身心健康,对于指导煤炭企业的安全生产具有重要的理论意义和实用价值。

通过对射流扰动控制方程及其解的分析,基于两相流的喷雾概念模型,引入了空穴、湍流和空气动力共同作用的雾化模型;基于液滴对尘粒的主动碰撞理论,对典型水雾捕尘机理进行了改进;运用显微颗粒图像分析仪和干粉激光粒度分析仪对采用滤膜法和人工法取样的综放工作面喷雾前后各生产工序产尘的粒度、粒径分布及矿尘的形状进行了测定,得到了喷雾降尘对各工序产尘的平均粒径及其分散度影响的定性变化规律。建立了基于 Eulerian - Eulerian 模型与 Eulerian - Lagrangian 模型相组合的综放工作面喷雾降尘过程气体-颗粒两相流动的流体力学数学模型;应用混合差分格式和基于同位网格的 SIMPLE 算法给出了气粒两相流动的数值解法;并以 FLUENT 软件作为计算平台对综放工作面形成全断面雾流时喷雾降尘过程的气体-粉尘-雾滴的流场进行了数值模拟。

利用自行设计与制造的实验装置在模拟综放工作面实际风速

的前提下,分不开启风机、开启风机无尘源、开启风机释放尘源三种情况进行了粉尘场与雾滴场耦合关系的喷雾降尘实验。根据实验数据,得到了雾滴在上述三种不同情况时在整个模型空间内的分布规律;提出了雾流雾化效果“三场”的概念;并采用数值分析方法在雾滴捕尘基本保证粒径 $40 \sim 160 \mu\text{m}$ 范围内分 $[40, 65] \mu\text{m}$ 、 $[65, 100] \mu\text{m}$ 、 $[100, 160] \mu\text{m}$ 三个粒径区间分别拟合了无尘液滴平均粒径 $D_{\text{无尘液滴}}$ 与其捕获尘粒平均粒径 ΔD 之间的函数表达式;提出了针对呼吸性粉尘的雾滴最佳捕尘粒径为 $15 \sim 70 \mu\text{m}$ 。基于表面活性剂单体溶液表面张力及接触角的实测结果,根据表面活性剂复配溶液的煤尘沉降 Walker 实验及其反向渗透实验结论,确定了降尘剂的最优配方 CZYNS-1;同时研发了表面活性剂定量添加工艺;通过对煤粉试片临界表面张力的测定分析、不同粒度煤粉试片及不同孔隙率煤样接触角的测定分析,完善和拓展了表面活性剂的降尘理论。

上述的理论和实验研究结论可针对综放工作面不同生产工序产尘粒度的特点优选喷嘴、喷雾降尘装置的优化设计、降尘剂配方优选提供依据。最后将研究成果在兖矿集团东滩煤矿 1303 综放工作面和兴隆庄煤矿 10301 综放工作面进行了工程应用,取得了较好的降尘效果。

感谢中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目 (MT-KJ2013-358)、山东省科技发展计划项目 (2013GSF12004)、高等学校博士学科点专项科研基金 (20113718110005、20133718120013)、山东科技大学矿业与安全工程学院科研创新团队 (2012ZHTD06)、矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放基金 (MDPC2013KF13)、矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室开放基金 (JSK200208)、煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金 (JYBSYS2014105)、山东科技大学人才引进科研启动基金项目 (2014RCJJ029) 在项目研究过程中给予的支持。

在本著的写作过程中,兖矿集团有限公司、山东能源集团有

限公司各级领导及基层各矿通防部门给予了大力支持和帮助，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，时间仓促，错误和不当之处在所难免，恳请读者批评指正！

作者

2014 年 7 月

目 次

1 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 综放工作面除尘工艺技术的国内外研究 历史及现状	4
1.3 射流雾化及喷雾降尘理论的国内外研究 历史及现状	8
1.4 内容概要	16
2 射流雾化及喷雾降尘的基础理论研究	18
2.1 颗粒的基本微观特性	18
2.2 喷雾射流雾化机理的完善及液滴的破碎方式	23
2.3 典型水雾捕尘机理及对其理论的改进	32
2.4 综放工作面各生产工序产尘喷雾前后的 显微颗粒图像测定与分析	39
2.5 综放工作面各生产工序产尘喷雾前后的 干粉颗粒粒度分布测定与分析	58
3 喷雾降尘过程气体-颗粒两相流动的数学模型及 数值模拟	65
3.1 气-粒两相流研究概述及数学模型	66
3.2 气相湍流-颗粒相湍流双流体模型	70
3.3 气相湍流-颗粒相湍流颗粒轨道模型	75
3.4 气体-颗粒两相流的数值解法	79
3.5 喷雾降尘过程气体-颗粒两相流动的数值模拟	86
4 粉尘场与雾滴场耦合关系的实验研究	122
4.1 实验用粉尘的干粉颗粒粒度分布测定与分析	123
4.2 喷雾降尘实验装置的设计	124

1 绪 论

1.1 研究意义

我国能源储量“富煤、缺油、少气”，决定了煤炭是我国重要的基础能源，形成了以煤炭为主体，电力为中心，油气、新能源全面发展的能源结构。2012 年全国原煤产量 36.5×10^8 t，消耗煤炭约 40×10^8 t，是世界上第三大煤炭资源国、第一大煤炭生产国和第一大煤炭消费国。随着对煤炭资源量需求的增加，煤矿开采强度逐步加大，随之而来的煤矿事故频繁发生，安全形势严峻。据国家安全生产监督管理总局统计，“十一五”时期，全国煤矿共发生事故 10339 起、死亡 16811 人，分别占工矿商贸企业事故起数和死亡人数的 22.34% 和 21.13%；全国煤矿共发生一次死亡 3~9 人重大事故 557 起，平均每年发生 112 起，占全国同类重大事故数的 9%；发生一次死亡 10~29 人特重大事故 88 起，平均每年发生 18 起，占全国同类特重大事故数的 25%；发生一次死亡 30 人以上特别重大事故 15 起，平均每年发生 3 起，占全国同类特别重大事故数的 41%。因此，我国煤矿安全高效开采是能源保障供给的关键。

近年来，煤炭采深不断增加，机械化、自动化程度开采水平逐步提高，煤矿生产过程中存在的“三高一扰”问题越发突出，粉尘、冲击地压、煤与瓦斯突出、地温等自然灾害危害程度不断升级，尤其是井下作业区粉尘危害严重威胁了矿井的安全生产和矿工身心健康。从目前我国采煤工作面的产尘情况来看，根据测定，在没有使用防尘措施的情况下，综采工作面的粉尘浓度可达 $2500 \sim 3000 \text{ mg/m}^3$ ，而综放工作面粉尘情况则比一般的综采工作面更为严重，综放工作面内产尘量可达矿井总尘量的 60% 以上，

采煤机割煤、移架和放煤等工序平行作业时,有些煤矿个别瞬时原始总粉尘浓度甚至高达 $8000 \sim 10000 \text{ mg/m}^3$,即使采取措施,多数工作面的粉尘情况依然相当恶劣,采煤机下风侧粉尘浓度最大可达 1000 mg/m^3 以上。上述这些粉尘浓度数据已远远超出国家标准的相关规定(《煤矿安全规程》中规定的作业场所空气中总粉尘和呼吸性粉尘最高浓度分别为 10 mg/m^3 、 3.5 mg/m^3)。

煤矿粉尘因其自身的理化特性,导致其在具有爆炸危险性的同时,还具有减少仪器设备的使用寿命和精度、降低生产现场可见度、容易自燃以及导致长期接尘人员患职业病(尘肺病)等危害。2000年初至2013年底,全国发生煤尘爆炸事故13起,致使459人遇难:如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。在历史上也曾发生过许多令人触目惊心的煤尘爆炸事故,如1906年法国古利耶尔煤矿发生煤尘爆炸,死亡1099人;1942年,本溪煤矿发生一起我国历史上最严重的煤尘爆炸事故,死亡1549人,致残246人。此外,粉尘会导致尘肺病,据原卫生部近三年发布的数据显示,2010年新发职业病27240例,其中尘肺病23812例,死亡病例679例;23812例尘肺病新病例中,94.21%的病例为煤工尘肺和硅肺,分别为12564例和9870例;煤炭行业报告职业病13968例,占全国报告职业病例数的51.28%。2011年共报告职业病29879例,其中尘肺病26401例,死亡病例699例;26401例尘肺病新病例中,煤工尘肺和硅肺分别为14000例和11122例;煤炭行业报告职业病15421例,占全国报告职业病例数的51.61%。2012年共报告职业病27420例,其中尘肺病24206例,煤工尘肺和硅肺分别为12405例和10592例;煤炭行业报告职业病病例13399例,共占报告总数的48.87%。自20世纪50年代以来,全国累计报告职业病80.7万多例,其中尘肺病72.7万多例,死亡15万多例。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,仅中国国有重点煤矿尘肺病患病率高达10%以上。每年国家用于治疗

尘肺病的医疗等费用就高达 80 亿元之巨,而且易造成十分不良的政治影响。专家预计今后 10~15 年中国煤炭行业尘肺病发病总数还将呈继续上升趋势。

在全球范围内,许多国家的煤矿都存在着粉尘灾害问题。世界主要采煤国家如美国、印度、澳大利亚、俄罗斯、德国、波兰等国,都不同程度地存在煤矿粉尘安全隐患和职业健康等问题。其中,工业发达国家的煤矿在采用机械开采煤炭的早期,由于防尘措施不健全,作业地点的粉尘浓度很高,致使许多矿工染患了尘肺病。据报道,美国宾夕法尼亚煤矿区的 47000 余名矿工中,有 5400 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,尘肺患病率为 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,上述这些国家的煤矿通过采取有效的防尘措施,尘肺病人数逐年下降。如德国煤矿 2001 年矿工尘肺患病率已几乎为零。但是对于我国来说,不但煤矿接尘工人数在全世界居于首位,而且尘肺病患病率居高不下,带来了一系列的负面影响。

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,甚至引发瓦斯爆炸事故,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下,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之一。所以,对综放工作面进行喷雾降尘理论及工艺技术的研究,不仅能大幅度降低综放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 综放工作面除尘工艺技术的国内外研究历史及现状

1.2.1 综放工作面除尘工艺技术的国外研究历史及现状

国外一些主要产煤国家,如美国、澳大利亚、俄罗斯等国家,煤矿生产机械化程度高,粉尘产生量成倍地增加。因此,国外对呼吸性粉尘的尘源抑制给予了很大的重视,美国、西欧早在20世纪50年代已开始研究。

国外煤矿非常重视综放工作面粉尘综合防治:一是普遍采取煤层注水并添加湿润剂预湿煤体等防尘措施;二是采用采煤机内外喷雾、高压喷雾、吸尘滚筒和隔离尘源等综合降尘措施;三是采用通风除尘。

国外各主要产煤国家都普遍认为,煤层注水预湿煤层是综放工作面最基本、最有效的防尘措施。如德国各产煤州矿山监察局都明文规定,回采工作面在采煤前对煤体必须进行注水。注水泵多采用压气驱动泵,并采用恒定流量控制阀,实现了多孔动压同时注水,最多可达40个孔。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,苏联乌克兰科学院矿山力学研究所等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。

采煤机割煤是综放工作面的主要尘源。英国研制成功的吸尘滚筒是降低采煤机割煤产生呼吸性粉尘的最有效途径之一,已在英国20%以上的长壁工作面推广使用。井下试验和应用表明,吸尘滚筒对呼吸性粉尘的捕集效率高达95%,与普通截齿冲洗喷雾的滚筒相比,切割时粉尘的产生量减少了40%~80%。此外,还可冲淡瓦斯、减少截齿与煤壁摩擦产生火花的可能性。原联邦德国也试验研究了另一种指数回转体形吸尘滚筒,可使割煤

时的粉尘浓度降低 25% ~ 30%。

美国、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,与传统的内喷雾相比,降尘率达到 77%。苏联煤矿机械设计研究院研制的采煤机高压水喷雾洒水用 TKO - CBO 全套设备,在外喷雾水压 8 MPa、内喷雾水压 1.2 ~ 1.5 MPa 时,降尘率可以达到 96% ~ 98%,而单位耗水量又可降低 30%。原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。

机组喷雾降尘主要包括喷嘴布置方式和无阻塞喷嘴。英国的研究表明,为了最大限度地湿润煤尘,需要在产生地点喷洒水雾,即在截齿与煤体接触处(向截缝洒水)湿润煤尘。美国矿业局研制成功无阻塞的喷水装置,其主要构件是一个直径为 7.5 cm 的水力旋流器。它可以垂直或水平安装,也可以任意倾斜安装。试验表明,它可减少停机时间,降低成本和提高生产率。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。德国通过提供足够的水压和水量,并采取细过滤器净化内喷雾的水质等技术措施,确保内外喷雾取得良好的降尘效果。美国使水经过粗过滤器、水力旋流器和精过滤器三级过滤系统,得到了高度净化水,解决了内喷雾堵塞问题。

此外,苏联还在卡拉干达煤田广泛使用压气喷雾、泡沫除尘等方法降低采煤机滚筒割煤时的粉尘产生量。美国试验研究并应用了降低滚筒转速、增大截深、风帘隔离尘源、水力除尘器和通风除尘等多种长壁工作面粉尘控制技术,取得了较为明显的防、降尘效果。英、美、澳等国还研究产尘少的采煤机,选择合理的切割参数,试验移架放顶时的自动喷雾等措施。

为了提高注水防尘效果,改善水对煤的湿润能力,许多国家都添加了湿润剂。在长壁开采中喷洒含有表面活性剂水溶液防尘是苏联、美国和德国井下广泛使用的降尘方法。苏联研制的低毒性、高效率 СИТАНОЛДТ-7 液体湿润剂和 СТС 固体湿润剂都具有良好湿润煤的能力,配合适宜的注水工艺,可使综放工作面的粉尘浓度降低 70% ~ 80%,比预注纯水降尘率提高了 20% ~ 30%。湿润剂的使用浓度一般为 0.1‰ ~ 1.5‰。美国在矿内用浓度为 0.1% 的表面活性剂 ALFONW₁₀₋₅₀。水除尘效果表明:采用普通水、表面活性剂水溶液及表面活性剂加 NaCl 的水溶液时,对 1.8 ~ 3.0 μm 粒级的粉尘减少量分别为 43%、78%、91%。德国选用氯化钙作为注水添加剂,显著提高了抑制粉尘产生的作用。

1.2.2 综放工作面除尘工艺技术的国内研究历史及现状

早在“七五”期间,煤炭科学研究总院和国内相关矿业类院校合作研究的“缓倾斜中厚煤层综采工作面综合防尘技术”(包括长钻孔非金属注水管深封孔煤层注水技术、采煤机含尘气流控制与净化装置及液压支架自动喷雾降尘装置),为我国煤矿综采工作面粉尘的防治提供了一套较为完整的技术,重点解决了长钻孔煤层注水中不留金属管,实现快速、深封孔以及液压支架自动喷雾控制等技术难题。

针对综采放顶煤工作面生产工艺的现状,我国还研究开发了包括厚煤层注水工艺、采煤机摇臂径向雾屏控制粉尘技术,用于液压支架移架、放煤时的多功能自动喷雾控制阀,破碎机、转载点密闭尘源等粉尘控制技术。

采煤机摇臂径向雾屏控制粉尘技术,是在采煤机摇臂的上侧,靠近滚筒的直线段布置一组喷嘴,在端部弧面布置一组喷嘴。当滚筒割煤时,两组喷嘴同时喷雾,即可在采煤机靠人行道一侧形成一道径向雾屏,一方面阻止粉尘向人行道扩散,避免污染作业环境,另一方面捕集和沉降粉尘。在喷雾压力为 1.8 MPa,喷嘴流量 11 L/min 的条件下,对总粉尘的降尘效率可达 80%。

综放工作面在自移式液压支架移架和放煤过程中将产生大量粉尘, 20 世纪七八十年代, 液压支架的防尘主要采用人工控制的手动喷雾, 使用不便、效果较差。为此, 中国矿业大学于 1989 年首先研制成功了 YZK 型液压支架自动喷雾控制阀, 它能使支架在降柱、移架、推移刮板输送机过程中自动喷雾降尘, 升柱完毕后停止喷雾, 实现了高效降尘之目的, 填补了国内空白。20 世纪 90 年代初, 经过多次修改、完善, 使其体积更趋小型化, 性能更加可靠。进入 21 世纪的近些年来, 又研制成功了用于综采放顶煤液压支架自动喷雾的多功能控制阀, 既能用于支架降柱、前移过程中的自动喷雾降尘, 又能对放煤口实施在放煤过程中的自动喷雾降尘。

此外, 在我国许多煤矿还采用煤层注水、采空区灌水湿润煤体等措施。回采工作面采用煤层注水防尘, 一般降尘率为 60%~90%。在机采工作面使用内外喷雾和煤层注水防尘方法, 可使煤尘浓度降到 30 mg/m^3 。

早在 20 世纪 60 年代, 我国冶金部门曾对表面活性剂除尘进行过研究, 80 年代才逐步兴起。特别是近三十年来发展很快, 并在部分煤和非煤矿山推广应用, 取得良好效果。目前, 我国对湿润剂的研究以实验为主, 采用的方法有表面张力测定法、沉降法、滴液法、毛细管上下向渗透法、动力试验法及 Z-电位测定法等, 研究内容集中于阴离子、阳离子及非离子表面活性剂对粉尘湿润能力的改善程度。目前, 我国矿山应用的湿润剂种类主要有: 降尘剂 FC-I、渗透剂 JFC、除尘剂 CHJ-I、高效化学除尘剂 J-85、化学除尘剂 T-85、湿润剂 SR-I、湿润剂 SR-II、除尘助剂 R₁-89、高效化学降尘剂 DS-I、降尘剂 DA-85、湿润剂 SDLY、湿润剂 HY、HB 等。北京科技大学的金龙哲研发的 NCZ-1 型粘尘阻燃粉剂和注水降尘用粘尘棒也达到了很好的除尘效果。

从以上对综放工作面除尘工艺技术国内外研究历史及现状的论述可以看出, 虽然现阶段国内外普遍采取了煤层注水、采煤机

4.3	实验用喷嘴的选定	127
4.4	实验方案的确定	130
4.5	实验数据的测定及尘雾场耦合关系的分析	132
5	降尘用表面活性剂的优选及其添加工艺	156
5.1	表面活性剂润湿煤体降尘机理	156
5.2	矿井防尘用水的理化性质测定	160
5.3	表面活性剂单体的优选实验	162
5.4	不同表面活性剂单体的复配实验及 降尘剂配方优选	189
5.5	表面活性剂添加工艺	196
6	喷雾降尘工艺技术的工程应用	201
6.1	喷嘴优选及喷雾降尘装置优化设计的 工程应用	201
6.2	表面活性剂降尘工艺技术的工程应用	219
	参考文献	228

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。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 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

E. Giffen 和 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。J. W Hoyt. 和 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。M. G Stockman. 和 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。Stockman 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成是弯曲或螺旋形。

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。但严格来说,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: