

Theory and Technology of
Ultra-fine High-Pressure Water Jet Comminution

高压水射流 超细粉碎理论与技术

宫伟力 王炯 杨军 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高压水射流 超细粉碎理论与技术

**Theory and Technology of Ultra-fine
High-Pressure Water Jet Comminution**

宫伟力 王炯 杨军 著

北京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

本书系统地介绍了高压水射流超细粉碎的理论、技术与实际应用,包括水射流粉碎技术的现状、湍射流结构红外热成像实验、自激振动磨料水射流超细粉碎的原理、自激振动磨料射流喷头的结构设计、水射流粉碎系统与工艺、自振式水射流粉碎机结构参数的实验优化方法,以及水射流超细、超微粉碎技术在制备永磁铁氧体超细粉体、珠光云母粉和精细水煤浆等方面的应用。自激振动射流是水射流超细粉碎的关键技术,其中亥姆霍兹谐振器是用于产生射流自激振动的基础性元件,书中介绍了其谐振频率、自激振动模型的理论分析方法,以期水射流粉碎机的设计提供理论参考。

本书可作为高等院校选矿、材料、流体力学等专业研究生和高年级本科生的参考教材,也可供从事超细及超微粉体制备技术、选矿技术和高压水射流技术等研究的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压水射流超细粉碎理论与技术 / 宫伟力, 王炯,
杨军著. —北京: 冶金工业出版社, 2014. 9
ISBN 978-7-5024-6658-9

I. ①高… II. ①宫… ②王… ③杨… III. ①水射流
破碎—研究 IV. ①TD231.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 212142 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.cnmip.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 郑娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6658-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京佳诚信缘彩印有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版, 2014 年 9 月第 1 次印刷

169mm × 239mm; 9 印张; 173 千字; 133 页

35.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip.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 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

高压水射流超细粉碎，是利用自激振动产生脉动射流的冲击，在颗粒界面产生张应力波，使材料拉伸破坏，具有解理性好、可保持材料颗粒原有形貌的特点。利用水射流进行超细粉碎可以获得高性能粉体，对材料创新具有重要意义。

然而，迄今为止，高压水射流粉碎技术在许多方面仍未成熟，从而限制了其在工业上的应用。水射流粉碎是一个复杂过程，难以建立系统的理论模型，水射流粉碎机设计也缺少系统的理论与技术规范。另外，水射流粉碎的关键技术是自激振动射流。而在自激振动射流喷头中，亥姆霍兹谐振器的结构及自激振动频率与水射流粉碎效率及破碎粒度高度相关。对于亥姆霍兹谐振器的自激振动频率与模型，在解决其应用于自激振动磨料射流喷头时的定量计算方面尚缺少系统的理论专著。这些问题构成了水射流粉碎技术应用的障碍。

基于上述原因，作者感到有必要将多年从事水射流粉碎研究的成果总结出来，以供相关领域的科研人员与高校师生参考。

本书是作者多年来在有关高压水射流超细粉碎理论与技术研究方面所做的总结，全书共分7章。第1章介绍了水射流超细粉碎理论与技术的现状。水射流粉碎是在射流形成的多相湍流场中进行的，即水射流粉碎场。认识湍射流以及由射流带动周围环境流体形成的多相湍流场的结构，是了解水射流粉碎机机理必要的基础。第2章介绍了湍射流结构红外热成像实验的研究成果。第3章介绍了自激振动射流原理和自振式水射流超细粉碎机的研制过程，以及水射流粉碎机参数的实验研究。第4章介绍了水射流粉碎机结构参数优化的正交试验方法。第5章介绍了水射流粉碎技术在制备超细永磁铁氧体粉体和珠光云母粉体

中的应用。第6章介绍了水射流超细、纳米粉碎技术在制备精细水煤浆中的应用。第7章介绍了亥姆霍兹谐振器的自振频率与数学模型的理论研究,以期为自振式水射流粉碎机的定量与优化设计提供参考。

众所周知,一项有意义的科研成果,绝非仅靠个人力量所能完成。在本书成稿之际,作者要特别感谢安里千教授(本书第一作者的博士后合作导师,时任中国矿业大学(北京)副校长),感谢其支持创建了高压水射流实验室,以及在水射流制备精细水煤浆研究过程中给予的学术指导。同时,感谢北京科技大学的方涓教授(本书第一作者博士研究生期间的指导教师),在其学术指导下,作者完成了题为“自振射流理论与水射流超细粉碎技术研究”的博士学位论文;完成了与内蒙古察右前旗云母制品有限责任公司合作的横向课题“水射流超细粉碎云母”中靶式后混合磨料射流超细粉碎机的工业化设计,完成了水射流粉碎机的现场调试与指导生产的任务;取得了“自振对撞式水射流超细粉碎机”实用新型专利一项。最后,感谢工程力学系的同事们和作者历届毕业的研究生多年来给予的大力帮助,感谢彭岩岩博士为本书校订所做的工作,感谢为本书出版提供支持的专家和朋友。

由于作者水平所限,书中不足之处,衷心希望读者批评指正。

作 者

2014年5月于北京

目 录

1 绪论	1
1.1 水射流超细粉碎技术	1
1.1.1 水射流技术的发展概况	1
1.1.2 磨料射流	2
1.1.3 脉冲射流	4
1.1.4 空化射流	7
1.2 超细粉碎技术	9
1.3 高压水射流超细粉碎技术	11
参考文献	14
2 湍射流结构的红外热成像	18
2.1 射流的结构	18
2.2 射流的理论解	20
2.3 红外探测	25
2.4 力-热耦合原理	30
2.5 射流涡旋场的红外辐射规律	33
2.6 射流分段结构的红外辐射规律	37
参考文献	40
3 自振式水射流粉碎机	42
3.1 自激振动磨料射流	42
3.1.1 基本思想	42
3.1.2 自激振动磨料引射原理	43
3.2 粉碎用自激振动喷头	44
3.3 自振式水射流粉碎机	46
3.4 粉碎机理	48
3.4.1 冲击作用	48
3.4.2 空化作用	50
3.4.3 水楔作用	52

3.5 粉碎机参数的单因素试验	53
3.5.1 试验条件	53
3.5.2 产率与振荡腔直径的关系	54
3.5.3 产率与振荡腔长度的关系	54
3.5.4 放大器直径对产率的影响	55
3.5.5 产率与放大器长度的关系	56
3.5.6 产率与靶距的关系	57
3.6 给料粒度与产率的关系	57
3.7 粉碎机的性能对比试验	58
3.8 粉碎机的性能评价	60
参考文献	60
4 粉碎机参数优化	62
4.1 试验方案	62
4.2 方差分析	65
4.3 各因素水平与平均产率的关系	67
4.3.1 平均产率与放大器直径的关系	68
4.3.2 平均产率与振荡腔直径的关系	68
4.3.3 平均产率与振荡腔长度的关系	68
4.3.4 平均产率与放大器长度的关系	69
4.3.5 平均产率与靶距的关系	69
4.4 对交互作用的分析	70
4.5 粉碎机最优方案	72
参考文献	73
5 水射流粉碎铁鳞和云母	74
5.1 水射流粉碎铁鳞	74
5.1.1 永磁铁氧体的原料	74
5.1.2 永磁铁氧体粉碎工艺	75
5.1.3 水射流粉碎铁鳞试验	76
5.1.4 结果与讨论	78
5.2 水射流粉碎云母	80
5.2.1 云母粉制备现状	80
5.2.2 工艺及设备	81
5.2.3 水射流压力与产品粒度的关系	82

5.2.4 水射流制备珠光云母粉	84
参考文献	86
6 水射流粉碎制备超细水煤浆	87
6.1 引言	87
6.2 煤样与试验系统	88
6.2.1 煤样	88
6.2.2 试验系统与工艺流程	89
6.3 水射流粉碎机	91
6.4 水力旋流器	92
6.5 水射流粉碎后的粒度分布	95
6.6 水射流粉碎并水力分级结果分析	96
6.6.1 大同原煤	96
6.6.2 赵各庄原煤	98
6.6.3 范各庄原煤	99
6.7 粉碎能耗	100
6.8 浮选效果分析	102
6.9 扫描电镜分析	104
6.10 水射流纳米粉碎技术	106
6.10.1 研究现状	106
6.10.2 制备超微水煤浆实验	107
参考文献	110
7 自激振动频率的研究	111
7.1 自激振荡的原理	111
7.2 圆管内的非恒定流动	113
7.2.1 非恒定流动连续性方程	113
7.2.2 非恒定流动运动方程	114
7.2.3 非恒定流动方程的线性化	114
7.2.4 非恒流基本方程的频域形式	117
7.3 非恒定管流基本方程的解	118
7.3.1 流体阻抗	118
7.3.2 用阻抗表示的非恒定管流基本方程的解	119
7.4 亥姆霍兹谐振器的固有频率	121
7.4.1 谐振器的频率特性	121

7.4.2 谐振器固有频率的表达式	124
7.5 自振射流亥姆霍兹谐振器的数学模型	125
7.5.1 斯特劳哈尔数与谐振器固有频率	125
7.5.2 基于水声学的亥姆霍兹谐振器的数学模型	127
7.5.3 基于分离涡环假设的谐振器模型	131
7.6 理论模型应用的要点	132
参考文献	133

1 绪 论

1.1 水射流超细粉碎技术

1.1.1 水射流技术的发展概况

随着社会的发展和人类文明的进步，人们对科学技术的各个方面提出了各种新的要求，高压水射流就是进入 20 世纪后，为适应这种要求而诞生和发展起来的一门新兴技术。高压水射流技术最初主要是在采矿界开始研究的，20 世纪 60 年代以后，越来越多的工业部门对这一新技术产生了浓厚的兴趣，日益引起了国际上相关工程和学术界的重视。国外研究高压水射流的起因，一方面是和工程技术向高速、高压和高效发展的总趋势有关，另一方面又和采掘工业迫切需要一种能防爆、防尘的破碎、钻凿工具密切相关^[1]。

早在 19 世纪中叶，在美国的加利福尼亚州，人们就利用水射流来开采软基金矿。20 世纪 50 年代，苏联和中国的水力采煤就是利用水射流的冲击和运输作用。因此，高压水射流一开始就是从采掘工业开始研究的。随着水力采煤技术的推广，人们开始对高压水射流技术产生浓厚的兴趣，同时也认识到，提高水的压力，适当减小喷嘴直径可以显著地提高水射流的落煤效果。于是人们开始研制较高压力的压力源（高压泵和增压器）及高压脉冲射流（俗称水炮）。进入 60 年代大批高压柱塞泵和增压器的问世，大大推动了高压水射流技术的研究工作^[2]。在这一时期，国际上出现了一种倾向，即尽量提高射流的喷射压力。70 年代，高压水射流技术向更高的层次发展，即从单一提高水射流压力的观点开始转向研究如何提高和充分发挥水射流的威力，出现了高频冲击射流、共振射流和磨料射流，这些射流的压力并不高，但它们的威力大大高于同样压力的普通连续水射流。进入 80 年代，磨料射流、空化射流、脉冲射流、气水射流和自振射流的发展，把高压水射流技术推向了一个新的阶段^[3]。

20 世纪 80 年代以来是高压水射流技术迅速发展的阶段，其主要特点是高压水射流技术的研究进一步深化，各国学者开始对各种射流的基础理论、切割机理等方面进行研究，许多水射流产品已达到商品化，高压水射流技术的应用领域也在不断地拓宽。目前，高压水射流作为清洗、切割、钻孔、铲除、研磨、破碎的工具，已广泛地应用于矿业、化工、核能、军工、石油、建筑、建材、轻工、医疗、电力、冶金、航空航天、海洋、机械等各个领域^[4]。

1.1.2 磨料射流

高压水射流可以成功地切割岩石和非金属材料,但用它来切割钢材和钢筋混凝土等材料时,则需要极高的压力,约为 700 ~ 1000MPa,要获得和使用如此高的压力是困难的。然而在较低的压力下,在水射流中加入一定数量的磨料微粒,可以显著地提高水射流的冲击能力,有效地切割钢板与混凝土,称这种混有磨料的水射流为磨料射流^[5]。磨料射流是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的新型水射流,由于其有许多独特的优点,因而它一问世,便受到极大的重视。磨料射流有两种类型:磨料水射流 (abrasive water jet, 缩写为 AWJ) 和磨料浆体射流 (abrasive suspension jet or abrasive slurry jet, 即 ASJ)。

磨料浆体射流是预先将磨料、各种添加剂与水配制成为浆体 (属于非牛顿流体) 并利用高压泵增压,再通过喷嘴喷出而形成磨料浆体射流。采用磨料浆体射流的目的是取得能减阻减磨的高效能射流。于 1989 年首次公开发表的磨料浆体射流被称为 H-P-S 技术。磨料浆体是以高黏度的高聚物溶液为载体,加入适量的磨粒配制而成的一种非牛顿流体。由于它是一种单一液体,而不是两相液固混合介质,因此固相与液相之间不存在滑移问题。由于磨料浆体具有剪切稀释的性能,因此其流过高剪切率的喷嘴时,表现为流动阻力损失小;在形成高速非淹没射流时,表现出显著密集性;当磨料浆体射流打击在靶体表面时,则表现出类似固体的瞬时刚性,能把更多的流体能量转换为射流的打击力。所以,磨料浆体射流具有牛顿流体不可比拟的优异的动力特性。

磨料水射流是磨料与高速流动的水或者高压水互相混合而形成的液固两相介质射流,这种两相介质仍是牛顿流体。磨料射流中水为载体,磨料颗粒被高压水射流加速,由于磨料颗粒的质量比水大得多且具有锋利的棱角,所以磨料射流对靶物的冲击力和磨削力要比相同条件下的高压水射流大得多。另外磨料颗粒在水射流中是不连续的,因而由磨料组成的高速粒子流对靶物还产生高频冲击作用。因此,磨料射流具有更大的威力。根据混合方式不同,磨料水射流可分为后混合磨料射流 (abrasive-entrained water jet, 也常常缩写为 AWJ) 和前混合磨料射流 (direct-injection abrasive jet, DIAjet) 两种。

后混合磨料射流是早期开发的一种磨料射流,其系统组成如图 1-1 所示。在高压水泵的加压作用下,水介质通过水喷嘴形成高速射流,高速水射流在混合腔中形成低压区,产生一定的真空度。磨料箱中的磨料在其自重和压力差的共同作用下通过气力运输而进入混合腔,并与水射流发生剧烈的紊动扩散与掺混后,进入磨料喷嘴。磨料喷嘴也常称为“准直管”(collimating pipe),磨料粒子在准直管中加速后,最终形成磨料水射流。后混合磨料水射流的形成过程与射流泵输

送固体颗粒的工作原理相同，都是通过引射方式抽吸并输送固体颗粒或流体物质。研究表明，射流泵输送液体介质的总效率不超过 30%^[6]。

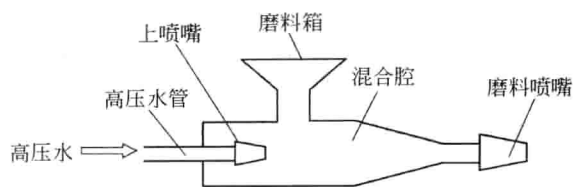


图 1-1 后混合磨料射流系统

后混合磨料射流的冲蚀能力较纯水射流有了很大的提高，但由于引射的水射流速度已经很高，混合室内围绕高速水束表面的微细液面运动速度很大，且表面张力很大，其周围分散的水滴群之间频繁碰撞形成了一个密实的表面。磨料不易进入水射流的中心部分，大多数聚集在射流的外表面，磨料与高速流动的水不能充分混合与加速，明显降低了水介质对于磨料的能量传输效率。自从磨料水射流问世以来，人们围绕着磨料与水射流混合效果的问题开展了大量的研究工作。除去传统的单股射流侧进式磨料射流喷头外，还引进了多股引射式磨料射流喷头^[7]、切向注入式磨料射流喷头^[8]、螺旋流磨料射流喷头^[9]以及准直管磨料射流喷头等^[10,11]。这些工作在改善磨料与水射流混合效果上都取得了一定的成果。但后混合磨料水射流的效率存在着与射流泵相当的限制。因此，为了改善液固两相介质的混合效果，又提出了前混合磨料水射流。

前混合磨料射流的系统组成如图 1-2 所示，磨料箱设置在高压泵与喷嘴的中间管段，由于其处于泵压作用下，因此它必须是一个能承受一定压力的容器（罐或细长管）。磨料只有在泵压力被切断后才能装入磨料箱内。此后接通高压水，使磨料与水混合，并通过输送管与喷嘴而形成磨料水射流。在这种系统

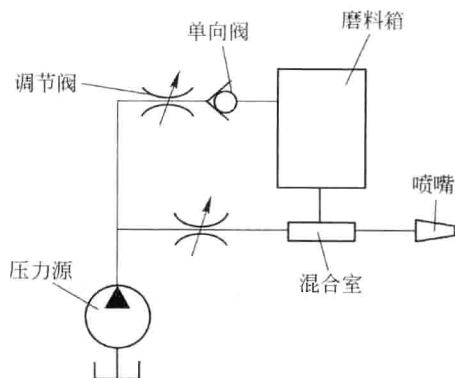


图 1-2 前混合磨料射流系统

内, 磨料与水在磨料箱内初步混合, 使磨料处于似流体 (fluid-like) 流化状态, 然后在高压输送管的混合室内流化磨料与水混合, 再通过喷嘴的加速过程使磨料获得更大的动能。由于磨料与低速的高压水能够均匀混合, 在通过喷嘴时, 高压水在加速自己的同时, 也带动磨料颗粒加速, 因此磨料颗粒可被充分加速, 并几乎达到水射流的速度。由此可见, 磨料水射流由后混合式发展为前混合式, 主要改善了磨料与水介质的混合机理, 使前混合磨料水射流的能量传输效率显著地增长^[12,13]。

1.1.3 脉冲射流

与普通的连续水射流不同, 脉冲水射流能通过水锤效应对材料的高穿透力及冲击从一开始就使材料破裂并使裂纹迅速扩散, 从而开辟了一条破碎硬脆材料的新思路。脉冲水射流在靶物表面产生的冲击压力大大超过了一般连续射流的滞止压力, 从而显著地减小了切割比能, 它的这些优越之处受到了越来越多的研究人员的重视。

从 20 世纪 60 年代起, 高压水射流技术领域普通连续水射流 (straight water jet, 即 STWJ) 独揽天下的局面被打破了, 人们开始对脉冲高压水射流进行积极的探索。在 1960 年前后, 苏联首先研究了间断发射的脉冲高压水射流的喷射原理及其破碎坚硬岩石的能力, 并连续研制了几种脉冲水射流发射装置。随后, 英、美等国家也开始了这方面的研究工作。于是, 挤压式、不同动力源的冲击式和冲击-聚能式等多种形式的脉冲射流发生装置相继出现了。从 70 年代初期开始, 美国、苏联和中国将脉冲水射流应用于破岩、切割钢板和破拆海底电缆, 并进行了井下巷道掘进的半工业和工业性试验, 取得了一定的进展。进入 80 年代以后, 各国学者都把注意力集中在如何形成一种特殊的脉冲射流发生器上, 许多研究人员为此进行了大量的研究与实验, 研制出各种类型的脉冲水射流发生装置^[14], 主要包括:

(1) 挤压冲击式脉冲射流。这种射流是利用电能、火药爆炸能、特殊化合物爆燃能和气体压缩能等作为动力源, 通过一定装置在极短时间内将能量传输给工作介质而获得的脉冲射流。Cooley 于 1972 年, Edney 于 1976 年分别制成了自由柱塞冲击水炮^[15,16]。在此基础上, 一些学者相继提出了结构更先进、压力更高的各种水炮, 如挤压式水炮^[17] (变截面增压器 DIA)、扰动水炮等^[18]。

(2) 阻断式脉冲射流。上面提到的脉冲射流的发射装置由于结构过于复杂, 实际应用范围受到限制, 因此有的学者又提出了阻断式脉冲射流。该脉冲射流是用一种射流间断器将连续射流隔断成一连串不连续的射流段。D. Summers 在 1975 年提出了一种机械间断脉冲射流。其后, Lichtarowicz、Nwachukwu 以及 Erdman - Jesniter、Kiyohasi 等人也做过这方面的研究与实验。机械间断射流是用一个周边

开孔、槽或链状导孔的旋转圆盘周期性地切断连续射流,从而产生断续的液柱冲击靶物。Lichtarowicz 的实验用铅样做靶物,结果显示,在相同条件下连续射流没有发现可测的冲蚀,而间断射流则得到了明显的效果^[19]。机械阻断方法的主要缺点是间断器的磨损和截断时产生的高频噪声。1983 年 Mazurkiewicz 提出设想,利用激光束将连续射流部分蒸发,从而将其切断成分离的液柱而形成脉冲射流^[20]。阻断式脉冲射流可以显著地提高射流的切割破碎效率,但它浪费了相当一部分的高压水,也就是浪费了能量。并且上述截断实际上也难以做到使射流液滴化。为了充分利用水射流的能量,人们又研制出调制式脉冲射流。

(3) 调制式脉冲射流。调制式脉冲射流(或激励式脉冲射流)是利用流体力学和瞬变流理论,通过调整连续射流的内部结构,使射流流量发生周期性变化的脉冲射流。调制式脉冲射流有两个基本设想:一是将高压水射流转化为一系列的高频冲击,从而比稳定施载更能提高射流的冲蚀能力;二是对连续射流的喷出量只进行少量的调制,即只需周期性地稍许增加和减少喷出量,就可以方便地产生间断射流。按激励方式的不同,调制式脉冲射流主要有以下几种:

1) 美国的 E. B. Wylie 于 1972 年在首届国际射流切割技术会议上提出了一个共振管系,泵站将高压水输进腔室,而后经三段串联的异径管导向喷嘴。在流体腔室上有一附加的振荡装置,周期性地改变流入管路的流体体积。如果振荡器的频率正好等于管系频率的 114.5Hz,管系将发生共振,从而使喷嘴出口处产生振荡射流^[21]。这种系统对射流破碎有潜力,但频率太低且控制困难。

2) Danel 和 Guilloud 提出了一种压电发射脉冲射流,试图用超声波减小水柱表面张力和 Rayleigh 不稳定性。在实验中,他们用陶瓷压电发生器在高压腔中产生高速的扰动场,如果扰动波长比未受扰动的射流波长长,不稳定的扰动将呈指数曲线增长,连续射流将被破碎成水柱或小水滴^[22]。该装置遇到的问题是喷嘴的振荡及射流周围空气的不利影响。

3) 1976 年, Nebeker 和 Rodriguez 设计了一种周期调制流量的脉冲射流装置,以特定的频率、振幅和波形周期性地调制喷嘴上游的流量而产生脉冲射流^[23]。这种装置的优点是冲击的峰值压力高、冲击面积与脉冲水量之比大,长靶距射流时可减小动量损失;不足之处在于能量损失大、装置庞大、机械磨损快。

4) Puchala 和 Vijay 于 1984 年在第 7 届国际射流切割技术会议上提出了一种超声波喷嘴装置,他们将超声波发生器安装在喷嘴上游,使之在射流中传播压力正弦波,压力波使连续射流破碎成水柱或水滴,同时还使水柱中产生空化^[24]。

5) Mazurkiewicz 提出用喷嘴振动法产生射流的方法^[25]。前面介绍的各种方法都是通过使高压水的压力或流量产生脉动来调制射流的出口速度。喷嘴振动法则不同,它是使喷嘴作高频振动。在压力、流量恒定时,射流喷出的速度相对于

喷嘴应当是不变的,根据速度迭加原理,喷嘴做高频振动时,射流的绝对速度也就以同样的规律脉动。

6) 用自激振动法产生脉冲射流。自激振动法是一种比较先进的调制方法,其基本原理是利用流体的瞬变流动特性,设计合适的流动系统,使得流体中产生某频率的稳态振动,从而产生脉冲射流。

Sami 和 Anderson 在 1984 年的国际水射流切割会议上,报告了利用亥姆霍兹谐振器使射流产生自激振动,即水流进入空腔,产生扰动剪切层,扰动剪切层不断冲击下游出口附近的平板,从而引起扰动向上游传播,伴随着扰动的传播产生旋涡,旋涡在剪切层中得到增强。若压力扰动的频率和空腔的固有频率接近,扰动将得到显著增强^[26]。

1983 年,Chahine 和 Conn 提出利用自振喷嘴来产生脉冲射流。自振喷嘴由亥姆霍兹谐振腔与风琴管组成。他们研究了几种自振脉冲喷嘴,即自振脉冲喷嘴、脉冲发送喷嘴、风琴管喷嘴和脉冲反馈喷嘴。Chahine 等人还研究了自振脉冲射流的最佳实验频率,得出三条准则^[27]:卸载效应准则、缓冲效应准则和气动效应准则,这几条准则结合起来就得到最佳工作区。S·萨米和 C·安德逊对调制射流的亥姆霍兹谐振腔进行了理论研究与实验^[28],探讨了射流束通过一圆形空腔的自激现象,研究了环包射流的轴对称剪切层与空腔出口锐缘碰撞所产生的振动,同时还研究了剪切层不稳定性的放大条件以及振动的反馈条件。

沈忠厚^[29,30]、廖振方^[31]等对水声学理论、自激振动脉冲射流喷嘴的自激振动频率、数学模型进行了理论计算,并进行了大量的实验研究,成功地将自激振动脉冲射流应用在石油钻井中的牙轮钻头及 PDC 上。廖荣庆等在自激振动脉冲射流及其在石油钻井中的应用方面也做出了卓有成效的研究工作^[32,33]。

李晓红等研制出了用于切割的自激振动磨料射流实验装置,并用它进行了切割和除锈试验。他将除锈试验的结果与刘本利教授的前混合式磨料射流除锈机相比所得到的结论是^[34]:两者的整体性能比较接近,而自振磨料射流系统结构简单、加磨料方便、能连续工作;自激振动磨料射流将连续射流变成了脉冲射流,磨料粒子的瞬时最大速度提高了 2.5 倍,卷吸量提高了 1 倍,切割速度提高了 2 倍,且磨料粒子能够进入射流中心;在磨料粒子可被充分加速的同时,减少了对磨料喷嘴的磨损和由于摩擦所造成的能量损失,大幅度地提高了射流的工作能力。

大量的研究与实验表明,脉冲水射流在切割和破碎材料等方面具有很大的应用潜力,振荡脉冲射流和脉冲水炮是脉冲水射流技术发展的主要方向,其中对脉冲水射流发生装置和调制方式的研究是脉冲水射流技术的研究重点。然而,由于射流的流场是多相流场,加之振荡调制后形成的脉动场机制复杂,有关的射流理论与应用技术仍有许多有待于进一步开展理论与实验研究的问题。

1.1.4 空化射流

在连续水射流的基础上发展起来的新型射流中,空化射流是其中比较典型的高效射流,它以其在清洗、切割方面的高效率,特别是在淹没条件下对石油钻井、水下清洗及切割的潜在优势,深受研究人员青睐。

空化是一种复杂的流体动力现象。水在高速流动中,沿物体某处的局部压力低于该处的饱和蒸汽压力时,不仅溶在水中的空气会逸出,而且自身也开始汽化,形成许多空泡。这些空泡到达高压区时崩溃,同时产生压缩波或微射流,对附近固体表面破坏性极大。然而空化射流却是在高速水射流技术中,人为地产生并发展这种充满蒸汽的空泡,控制其在靶物上破裂时所产生的局部高压,用来加强其清洗和破碎能力,从而提高其冲蚀性能^[35]。

目前在空化射流中比较普遍采用的产生空化的方式主要有以下三种:

(1) 绕流型(尾流中的空化现象)。水或其他流体绕过任何形状的固体壁面时,在流动的下游都会有尾流。二维尾流能发生空化,但并不是所有的尾流都是空化流。这主要取决于表征尾流的流态,即雷诺数和压力分布,以及表征尾流中旋涡的动力相似准则,即斯特劳哈尔数(Strouhal number)的数值。因此,液体绕流固体壁面形成的尾迹,它的流态适合于空化气泡的孕育与初生。早期研制的“中心体式”空化射流发生装置,其工作原理就是上述的绕流型空化初生。

(2) 旋涡型(淹没空化射流)。在空化与空蚀问题的专著里已经指出,旋涡中心的绝对压力如果降低到当地液体饱和蒸汽压力以下,则将产生旋涡型空化。理论研究和实际空蚀情况都表明,旋涡型空化的产生是由于液体质点的旋转运动而导致压力降低所致。与节流型空化相比较,旋涡型空化的强度高,生命周期较长。因此,发展成为空化射流的可能性更大。

当流体从缝隙、孔口或喷嘴出流到充满同一介质的空间时,这种射流称为淹没射流。当环境介质具有一定的速度时,称为“有伴随流的淹没射流”。从流动过程的物理本质分析,由于在射流边界,不论是有伴随流的或是无伴随流的,都存在很大的速度梯度。因此,水的黏性的反向压差的作用,使射流边界充满着旋涡。如果涡心压力降低到水的饱和蒸汽压力,空泡即将初生。研究结果证明,淹没射流,尤其是高速淹没射流大都是空化射流,旋涡是产生空化现象的主要原因^[36]。

(3) 振荡型(振荡空化与共振空化射流)。振荡型空化可能出现在一个流动的水介质系统内,如自激共振空化,也可能产生在没有流动的液体介质内部,如各种振荡型空蚀试验机。后一种情况称为“无主流的振荡空化”。空化射流在水下切割和船舶清洗的试验中取得了明显的效果,但在另一方面,许多研究人员在试图将空化射流引入钻井工程中却遇到一个问题,即如何在较高压力范围(一般

至少有数兆帕到数十兆帕气压)条件下产生空化现象。

在20世纪80年代初,美国Tracor流体公司V. E. Johnson和A. F. Conn等人利用水声学原理率先研制了声谐自振空化射流^[37],其中风琴管喷嘴和亥姆霍兹谐振腔喷嘴是最常见的两种自振空化喷嘴。法国C. Barden和H. Cholet在室内模拟钻井条件,他们的实验表明,用高空化数喷嘴在深井围压条件下有可能形成空化,而且有围压的环境对增加空化冲蚀效果有促进作用。

沈忠厚等从20世纪80年代后期开展了自激振动空化射流的研究,通过对风琴管喷嘴内外流场进行数值模拟、对自激空化射流的冲击压力特性及冲蚀岩石效果进行实验,得到了如下结论,即风琴管喷嘴和亥姆霍兹谐振腔具有很强的振荡效果,其中风琴管喷嘴的振荡效果最好,破岩能力最强,最优喷距为喷嘴出口直径的8~12倍。同时,在涡旋的扩散运动理论的基础上对自激振动射流进行了理论分析,提出由自振腔喷出的是一系列孤立的涡旋,并在实验与理论分析的基础上设计了新型自振射流喷嘴^[38,39]。

廖振方与唐川林开展的空化射流研究独树一帜,即所谓“自激脉冲空化水射流”,它兼具自振空化射流和自振脉冲射流的特点,是利用高速水射流喷嘴在其周围造成负压的特性,在自激振动脉冲射流装置上开一些斜孔,形成一类似射流泵的装置,用它来产生自激振动空化射流^[40,41]。廖振方将自激脉冲空化射流的研究成果应用到辅助牙轮钻井中,经现场试验取得了可喜的成果。

如前所述,空化射流的产生原理是根据流体动力学原理使水射流内部的局部压力低于该温度下的饱和蒸汽压力。常用的三种方式为:

1) 绕流式,即在喷嘴内采用中心体、旋转叶片或其他装置来造成低压区诱发空泡。

2) 剪流式,即在具有强烈切变特性的射流剪切层内形成大量旋涡,其中心压力降低而诱发空泡。

3) 紊流式,即用强烈的紊流脉动在低压区诱发空泡,如自激振动可将连续水射流调制成大结构的断续涡环流,从而产生空化。

自从Rayleigh对于液体中单个空泡水动力学性能完成了创造性的研究后,人们对空化现象有了更全面的认识,并开展了大量的研究工作,形成了比较系统的空化理论,如J. P. Franc和J. M. Michel所做的研究工作^[42]。同时,人们开始将空化与空泡动力学引入高压水射流领域,研发了新型的空化射流技术,如R. E. Kohl等的研究工作。

在最初的研究中,V. E. Johnson等采用中心体喷嘴或转叶型喷嘴做实验(绕流型空化),对空化产生的原因做了分析,他们得出的结论之一是空化射流在淹没状态下可以得到更佳的冲蚀效果^[44]。此后,许多研究工作者探索了淹没条件下不同类型喷嘴及不同工作条件对射流性能的影响。E. F. Jesnitzer等发表了各种