



华夏英才基金学术文库

段 雄 著

射流变频冲击破岩的 混沌调制技术



科学出版社

www.sciencep.com

周 强 著

射流变频冲击破岩的 混沌调制技术



华夏英才基金学术文库

射流变频冲击破岩的 混沌调制技术

段 雄 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

全书主要针对变频冲击射流破岩的混沌调制技术和发生装置设计理论进行系统论述。主要内容包括:高压水射流技术概论、射流冲击动力学、岩石破碎的非线性机理、岩石冲击破碎模式、射流发生装置的液电模拟、恒频自激振荡射流分析、变频冲击的混沌调制动力学、变频自激振荡射流分析及射流变频冲击破岩的混沌机理等。

本书可供从事射流工程、岩石破碎工程、非线性科学及有关领域的研究生、教师和科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

射流变频冲击破岩的混沌调制技术/段雄著. —北京:科学出版社,2007

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-018824-3

I. 射… II. 段… III. 混沌学-应用-水射流破碎-研究 IV. TD231.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 048644 号

责任编辑:张 敏 孙 芳 / 责任校对:包志虹

责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 5 月第一次印刷 印张: 11

印数: 1—2 000 字数: 193 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

高压水射流是一种先进的冷切割新技术,已在采矿、航空、机械、医疗、交通及建筑等行业得到广泛应用,尤其是在煤矿行业中对安全性要求很高的井下作业场合,高压水射流具有独特的应用优势。

破碎岩石是人类获取自然赋藏的必经途径,但由于地质条件的复杂性,人们对岩石本身的认识远未像其他学科那么成熟。

有人说 20 世纪科学载入史册的将只有三件事:相对论、量子力学和混沌学。在这三大革命之中,仅有混沌学引起的这场革命适用于人们身边这个亲眼目睹的、朝夕相处的世界,适用于人类的活动范围。我感到混沌学确实是一门过程的科学,而不是状态的科学;是一门演化的科学,而不是存在的科学。现在,越来越多的人认同自然界的本质是非线性的,而混沌是解决非线性复杂问题的重要工具。工程技术中的混沌现象普遍存在,只不过过去人们由于问题的复杂性而将其在一定条件下进行了线性化处理。随着混沌理论的不完善,越来越多的工程混沌将会被揭示或制造出来。

《射流变频冲击破岩的混沌调制技术》一书应用混沌理论,介绍了在不增加发生装置额外动力的条件下,将连续的高压水射流调制为液珠化的变频冲击射流,不仅充分利用了射流的动态水锤冲击力,而且充分利用了岩石存在各种尺度天然弱面等非线性本质所呈现的混沌响应特性。

应当说,段雄同志的这些开创性工作代表了该领域的前沿,也可以说是很有意义的开拓性尝试,希望引起同行们的广泛关注,尽快在工程实践中得到应用。

中国工程院院士

钱鸣高

2006 年 10 月 10 日

前 言

岩石破碎有爆破、机械等多种方法,而应用高压水射流来切割、破碎岩石则是一项正在兴起的新技术,尤其适用于安全性要求很高的煤矿井下作业。

岩石是一种既非理想连续、又非完全离散的地质材料,存在各种尺度的裂纹裂隙等天然弱面,破碎要求与之相应的各种大小的施载强度。采用调制方法使高压水射流液珠化后,其具有远大于连续喷射的动态冲击力。混沌理论被称为“20 世纪科学史上继相对论和量子力学后的第三大发现”。混沌现象的发现和混沌理论的进一步完善,改变了人们对客观世界的看法。混沌工程学的提出使人们能够应用混沌理论去解决工程实际中的混沌问题。混沌理论既是一种系统研究方法,又是一种动力学研究方法,同时更是一种数值计算方法。正是基于上述考虑,本书应用混沌调制技术来实现射流变频冲击破岩,并系统阐述了这种新型射流的产生机理及装置设计理论。

本书共分 9 章。第 1 章介绍了高压水射流的发展历史及众多射流类型的广泛应用,引出混沌射流的新概念。第 2 章介绍了高压水射流液珠化后增大冲击力的流体动力学基础,并导出了射流冲蚀方程。第 3 章分析了岩石破碎的非线性机理,应力应变本构方程的软化特征是岩石失稳产生跃进破碎的本质原因,而破碎过程的记忆特征则为液珠化重复加载冲击提供了实验依据。第 4 章分析了射流破岩的几种模式,尤其是其所特有的冲击卸载和水楔等效应。第 5 章介绍了液电模拟基本方法及应用于液珠化常用的共振射流和聚能喷嘴的参数分析。第 6~9 章则系统阐述了从频率不变的自激振荡到广谱频率的混沌振荡来产生液珠化的建模方法及设计理论。考虑到泵源压力脉动时的动力学行为,这里对单振荡腔射流模型系统平衡点的动力学形态进行了详细研究。利用数值实验及动力学分析,展现了所研究的动力系统既可产生周期输出,又能产生混沌输出的演化过程。应用非线性动力学理论,对所研究的双振荡腔构成的三阶自治射流系统,给出了产生混沌射流的参数值。接下来,应用混沌动力学理论,从理论上阐述了混沌调制冲击射流发生的数学机理,分析和计算了射流系统的混沌特征量,利用数值实验方法验证了理论分析结果的正确性。继而,研究了岩石在混沌冲击射流作用下产生破坏的机理,结合混沌冲击射流与岩石冲击碰撞特点,利用断裂动力学理论中裂纹动态起始判据的最小作用量判据,分析了混沌冲击射流作用下岩石材料的损伤与破坏。最后,利用岩石材料的疲劳损伤理论和岩石在受冲击和水楔作用过程中的破坏特点,采用触发—生长—触发的链式生长模型来描述微裂纹的演化过程,从而刻画了混沌射

流作用下岩石疲劳破坏过程的混沌特征。

本书的出版得到了华夏英才基金和“2000 年教育部普通高校优秀师资资助计划项目——高瓦斯煤巷掘进的混沌变频冲击射流理论”的联合资助,谨此表示衷心的感谢。

本书的写作和出版过程得到了许多朋友和亲人的热情鼓励和悉心帮助,我的博士生张新民、付胜、胡俊伟、张曦等也完成了大量相关的理论研究和实验分析工作,在此一并表示衷心的感谢。

限于作者水平,虽力求审慎,也难免缺点和错误,恳请读者批评指正。

段 雄

2007 年 1 月

目 录

序

前言

第 1 章 高压水射流技术概论	1
1.1 射流类型	1
1.2 射流技术发展	2
1.3 混沌调制变频冲击射流的概念	8
第 2 章 射流冲击动力学	9
2.1 喷嘴压力流量关系	9
2.2 水中压力扰动的传播速度	14
2.3 冲击方程	17
2.4 射流瞬态冲击压力	19
2.5 脉冲射流产生方法	20
2.6 射流冲蚀方程	24
第 3 章 岩石破碎的非线性机理	29
3.1 非线性系统特征	29
3.2 非线性方程基本算法	31
3.3 加载曲线的软化特征	34
3.4 破碎过程的跃进特征	36
3.5 碎块分布的分形特征	38
3.6 破碎历史的记忆特征	39
第 4 章 岩石冲击破碎模式	44
4.1 压力突然释放效应	44
4.2 冲击效应	47
4.3 水楔效应	51
4.4 热冲击效应	52
4.5 空穴冲击效应	58
第 5 章 射流发生装置的液电模拟	61
5.1 射流发生装置的基本参数	61
5.2 射流发生装置的基本方程	67
5.3 强迫共振射流模型	70

5.4	聚能喷嘴模型·····	74
5.5	混沌特性的电路模拟·····	77
第6章	恒频自激振荡射流分析 ·····	81
6.1	容感性振荡回路·····	81
6.2	自激振荡射流模拟·····	83
6.3	自激振荡射流的泵源脉动·····	86
6.4	自激振荡系统的参数识别·····	87
6.5	自激振荡射流的振荡机理·····	89
6.6	自激振荡射流的产生条件·····	90
第7章	变频冲击的混沌调制动力学 ·····	95
7.1	混沌系统的定义·····	95
7.2	混沌系统的特性·····	97
7.3	混沌系统的典型相点·····	101
7.4	混沌系统的数字特征·····	104
7.5	变频射流的混沌调制机理·····	112
第8章	变频自激振荡射流分析 ·····	129
8.1	混沌射流发生装置模型·····	129
8.2	混沌射流动力学形态分析·····	130
8.3	混沌射流的定量分析·····	139
8.4	混沌射流发生装置设计·····	145
第9章	射流变频冲击破岩的混沌机理 ·····	152
9.1	变频施载特点·····	152
9.2	变频施载波动力学分析·····	153
9.3	混沌变频射流冲击下岩石裂纹扩展·····	157
9.4	变频射流作用下岩石响应的混沌性·····	160
参考文献	·····	163

第 1 章 高压水射流技术概论

自古以来,人们总是认为水是柔软的,岩石是坚硬的。然而,大自然中客观存在的“水滴石穿”的自然景观却是柔软的水穿透了坚硬岩石的例证。田间的水沟,山间的泥石流,河道出口的三角洲,这些由水奉献给大自然的杰作也使人们认识到了水的巨大冲蚀与破坏能力。古人用“绳锯木断,水滴石穿”来形容持之以恒,可见,人们早已发现山涧滴水凭借自由落体运动赋予的打击力击穿岩石这一漫长的现象,并认识到速度高则威力大的规律。在近代科学技术中,大雨中飞行的飞机被雨滴侵蚀的“雨蚀”和大量流体机械中流通部件的“气蚀”现象也都是以柔克刚的实例。

人们正是受到这些自然现象的启发,才认识到柔软的水在高速运动时所具有的能量可以产生极大的破坏力,如果对这种力量加以引导与利用,就可以完成清洗、切割和破碎等作业。近几十年来,随着科学技术的不断发展,人们给液滴赋予了比自由落体运动大得多的打击能量,使漫长的滴水穿石现象在瞬间便可完成,这就是水射流。为了提高效率,人们将水加以高压,并使之从直径较小的喷嘴中喷出,形成一束高速、连续或间断的水流束,这便是高压水射流。高压水射流可以在很小的区域内集中巨大的能量,例如,1000MPa 水射流的能量就可以与激光束相匹敌。

1.1 射流类型

高压水射流的种类很多,按不同的分类方法可分为如下几种。

1) 定常水射流和非定常水射流

按照水射流的水力学特性,高压水射流可分为定常水射流和非定常水射流。定常水射流的特点是射流的各个断面上流体力学特性不随时间变化,仅为位置的函数。而非定常水射流则与此相反,射流各个断面上的流体力学特性不仅随其位置变化而变化,而且随着时间变化而变化。定常水射流一定是连续水射流,而非定常水射流可以是连续水射流,也可以是非连续水射流。

2) 淹没水射流和非淹没水射流

按照水射流介质与水射流周围介质的特性,高压水射流可分为淹没水射流和非淹没水射流。水射流在水中或其他液体中喷射称为淹没水射流,在空气中喷射称为非淹没水射流。

3) 连续射流、冲击射流和混合射流

按水射流对物料的施载特性,高压水射流又可分为连续射流、冲击射流和混合射流三种。

(1) 连续射流 该种射流在对物料施载时有一个短时的冲击峰值压力,随后则是长期稳定的较低压力,对于这种射流来说,只有冲击峰值以后的稳定压力才具有代表性。

(2) 冲击射流 其对物料的施载特点是产生一个只持续极短时间的压力峰值,这时,只有峰值压力才具有代表性。

(3) 混合射流 介于连续射流和冲击射流施载方式之间的射流称混合射流,其施载特点是冲击压力和稳定压力联合作用。

4) 特种水射流

利用特殊装置产生的水射流称为特种水射流,如自激振荡射流、冰粒射流、磨料射流、空化射流、脉冲射流、磨料浆体射流以及本书提出的混沌调制变频冲击射流等。新的特种水射流的不断出现,标志着水射流技术正在向高切割性能和低能耗方向发展。

1.2 射流技术发展

国内外研究高压水射流技术的起因,一方面和工程技术向高速、高压和高效发展的趋势密切相关,另一方面又和采掘工业迫切需要一种能防爆、防尘的破碎、钻凿矿体的工具密切相关。

19 世纪中叶,在北美洲第一次使用了高压水射流开采非固结的矿床。20 世纪 50 年代初,苏联和中国的水力采煤就是利用了水射流的冲击和输送作用。随着水力采煤技术的推广,水射流的威力逐步为人们所认识,并日益引起采掘工业,特别是煤炭工业对水射流技术的浓厚兴趣,日本(日本电子技术综合研究所)就是受到飞机“雨蚀”现象的启发才开始研究连续高速水射流切割各种金属板材的。与此同时,人们也认识到提高水的压力和适当减小喷嘴直径可以显著地提高水射流的落煤效果。但是,单一靠提高水射流压力和减小喷嘴直径将受到高压设备的研制和喷嘴加工工艺的影响。为提高高压水射流的作业能力,拓宽使用范围,提高工作压力是首先想到的有效途径,于是人们便开始研制较高的压力源(高压泵和增压器)及高压脉冲射流(俗称水炮)。进入 20 世纪 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的研究工作。当时,部分学者片面地认为高压水射流的压力越高越好。随后,相继在日本研制出了 1700MPa 的增压器,在苏联和美国研制出了压力高达 5600MPa 的脉冲射流发生器。20 世纪 70 年代,高压水清洗和超高压水切割同步发展。当时已出现用 20~30MPa 的水射流慢速切割煤体,用超

过 20MPa 的水射流辅助采煤机和掘进机进行破煤、落煤和碎石。但是,如此高的压力依然不能有效地切割钢材等坚硬材料,且能耗较大,同时还必须解决相应辅助设备的耐压和密封等问题,而且压力的提高也不是无限的。经过一段追求更高压力的研究之后,在 20 世纪 70 年代末期出现了一个引人注目的新动向,即从单一提高水射流压力的观点转向研究如何提高和充分发挥水射流本身威力这个方面,也即是改善水射流本身的品质。期间出现了高频冲击射流、共振射流和磨料射流,这些射流的水压并不是太高,但它们的威力却大大超越了同样压力的普通水射流。进入 20 世纪 80 年代,磨料射流、空化射流、气水射流的发展,把高压水射流技术的研究推向了一个全新的阶段。同时,各国学者对各种射流基础理论、切割与破碎机理等方面进行了大量的研究,高压水射流技术的应用范围也由单纯的采矿工业扩大到机械制造、航空、建筑、化工、食品、冶金、市政工程、纺织与服装加工以及医学和艺术等众多的领域。高压水射流作为一种良好的切割、破碎及清洗除垢的工具,已被人们所公认,一大批高压水射流切割机、采煤机、掘进机、打桩机和多种形式的多用途清洗除垢机已投入市场。

自高压水射流技术产生以来,人们一直围绕水射流基础理论与应用研究两大方面进行着长期的研究与探索。在对高压水射流理论与技术的长期研究过程中,人们利用各种方法对水射流的结构、几何特征和动力特性有了较为全面的认识与了解,得出了射流断面上速度分布规律、射流边界扩散宽度与核心段长度、射流的轴向速度衰减规律以及射流在喷嘴出口处动压和射流基本段内动压分布规律与打击力等。这些研究成果使人们较全面地掌握了连续高压水射流的技术特性,为其利用打下了基础。

从理论上讲,提高水的压力和适当减小喷嘴直径可以显著地提高水射流对靶物的打击力,但是单一靠提高水射流的压力和减小喷嘴直径将受到高压设备的研制和喷嘴加工工艺的影响。人们发现在较低的压力下,在水射流中掺入一定数量的磨料粒子(砂类),使高速水的大部分动能传递给磨料,从水射流对靶体的作用改变为磨料粒子对靶体的高频冲蚀和磨削,从而改变了射流对靶体的作用方式,极大地提高了射流的品质和工作效率,可以有效地切割钢材和钢筋混凝土,这种混入研磨材料的液固两相高压水射流称为磨料射流。由此可见,磨料射流不仅利用了水射流的冲蚀作用,而且充分地利用了磨料粒子的冲蚀与研磨作用,因此具有较强的切割能力。磨料射流技术是 20 世纪 70 年代末 80 年代初发展起来的一种新型射流技术,一经问世便异军突起,一度成为水射流界的研究热点。

磨料射流分为前混合和后混合两种,最先开展的是后混合磨料射流,而后,前混合磨料射流的出现使磨料射流技术发生了突破性的进展。由于前混合磨料射流属于高速固液两相流动,运动机理比较复杂,从理论上研究难度很大。因此,大多数国家都是利用各自的实验装置进行大量试验研究。在对影响切割性能的水力参数、

磨料参数和切割参数的研究过程中,得到了不同被切割材料各自相应的影响规律。

另一方面,从 20 世纪 60 年代起,高压水射流技术领域普通连续水射流独揽天下的局面被打破了,人们对脉冲高压水射流进行了积极的探索。在 1960 年前后,苏联学者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生装置,这种脉冲水射流俗称水炮。随后,美、英等国家也开始了这方面的研究工作。Colley 和 Edney 分别于 1972 年和 1976 年制成了自由柱塞冲击水炮,Edney 的水炮在试验中使用 Voitsekhovsky 重叠型喷嘴,出口速度最高可达 1450m/s,水柱的冲击能量达 6.5kJ,比能约为 $500\text{J}/\text{cm}^2$,结果发现这种低比能的射流可以破碎花岗岩、石灰石和石英砂。于是,挤压式、不同动力源的冲击式和冲击-聚能式等多种型式的脉冲射流发生装置相继出现。从 20 世纪 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、切割钢板和破坏海底电缆,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。1980 年,Labus 提出了一种典型的变截面增压器(DAI)式挤压式水炮。变截面增压器与冲击增压器相比,脉冲周期长(长约 100~300ms),脉冲水量大,且射流最大速度是喷嘴尺寸和沿程阻力的函数。随后,L. L. Patter 设计出了扰动水炮。进入 20 世纪 80 年代以后,各国学者都把注意力集中在一种特殊脉冲射流发生器的研制上,许多研究人员进行了大量的研究与试验,提出了各种类型的脉冲水射流发生装置。与普通连续水射流不同,脉冲水射流能通过水锤效应产生高穿透力及冲击,从一开始就使材料碎裂并使裂纹迅速扩散,从而为人们开辟了一条破碎硬脆材料的新思路。

由于高压脉冲水炮结构过于复杂,连续发射和发射频率的提高受到一定限制,其应用范围较小。因此,人们提出了另一种将普通连续水射流进行间断的方法,以形成非定常水射流,这种将连续射流间断化而形成的脉冲射流可分为外截断式脉冲射流和内调制式脉冲射流。

外截断式脉冲射流的概念由 Summer 在 1975 年首次提出,他设计了一种机械间断脉冲射流。其后,Mazurkiewicz 和 Nwachukwu 以及 F. E. Jesnitzer、Kiyohasi 等做过这方面的研究与试验。经过研究发现,即使在较低的压力下,机械间断射流也可冲蚀铅、铁和锌。1983 年,美国密苏里-罗拉大学的 Mazurkiewicz 在第二届美国水射流会议上又提出设想,利用激光束的高度集聚能量对准连续水射流,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。

自激振荡射流的研究是近二十年来的另一个研究热点。1983 年,Chahine 和 Conn 提出利用自振喷嘴装置来产生脉冲射流。随后,Sami 和 Anderson 于 1984 年在第七届国际射流切割技术会议上,报告了利用受激亥姆霍兹(Helmholtz)振荡器使射流产生自激振荡。对于液体的自激振荡,Rockwell 和 Naudascher 根据流体诱发自激振动的原因将流体的自激振动分为流体动力学激励、流体共振激励

和流体弹性激励,并对具有扰动放大模式的不同剪切层碰撞结构的振荡频率建立了数学模型。Chahine 等还研究了自振脉冲射流的最佳试验频率。

廖振方教授等通过对射流穿过圆柱形空腔产生的自激振动研究表明:扰动的产生、放大和反馈这一过程的不断重复和剪切层分离迹线与腔室内壁所围空气团的脉动,是引起自激振荡的必要条件,腔室几何参数和下游壁形状在自激振荡中起了重要作用。他们研究了截锥面形、外球面形、内球面形和平面形等四种不同的碰撞壁,得出了截锥面形碰撞壁的自激振荡幅值最大,对于内球面形碰撞壁几乎没有自激振荡;并研究了自激振荡脉冲射流装置各结构参数的关系对自激振荡效果的影响。石油大学沈忠厚教授等提出了一个数学模型分析亥姆霍兹振荡器,并根据该模型进行了一系列的分析和试验研究,得出了一些重要的结论。蒋世全用有关行波和涡旋波的理论阐述了脉冲喷嘴形成自振脉冲的机理,建立了自激振荡射流喷嘴腔室内流动压力和速度的数学模型。王嘉松避开建立流体运动方程客观存在的复杂性,利用水电比拟的流体网络理论得出了自激振荡脉冲射流喷嘴的固有频率计算式。杨秀夫认为,剪切层的不稳定性对扰动具有选择性放大的作用。蒋海军、廖荣庆等认为,由于射流在振荡腔内的运动非常复杂,仅靠线性理论则过于简单,他们应用流体网络理论中含负阻元件的电子线路,简化自激振荡脉冲射流的物理模型,在比拟的基础上建立了数学模型,并采用现代自组织的有关理论分析了脉冲射流的形成机理。汝大军、廖荣庆探讨了固有频率与相关参数之间的关系,并用实验对所得到的理论公式进行了验证。杨林、李晓红等从理论上分析了自激振荡射流中碰撞剪切流动压力扰动波的传播速度及其对射流振荡频率的影响规律,他们认为碰撞剪切流动中的波速是非恒定值,波速随着气体含量的增加而急剧减小,随压力的增大而增大,振荡腔内碰撞剪切流动中的波速对自激振荡脉冲射流的频率有影响,波速减小使得频率减小。李晓红、卢义玉等分析了自激振荡射流的偏转特性,研究了偏转特性对射流振荡脉冲压力、射流切割性能等方面的影响。李晓红、杨林等分别运用流体网络理论建立了自激振荡脉冲射流装置的相似网络模型,并用数值计算分析了系统的频率特性。计算表明,该喷嘴装置具有压力谐振特性和低通滤波特性,在系统固有频率附近,压力响应幅值最大,其固有频率主要由喷嘴的形状、结构参数和波速决定,流体压力、振荡腔长、下喷嘴大小和空隙度对系统的频率特性影响很大,存在产生最大谐振峰值的参数范围,喷嘴装置的固有频率应接近来流脉动主频。

空化现象在水力机械中的危害作用是人所共知的,但自 20 世纪 60 年代以来,人们开始认识到高压水射流中的空化现象有助于加强水射流的清洗和破碎作用,由此发展起来的空化射流已成为一种新型射流。最早用来产生空化射流的美国流体公司(Hydronautics Inc)的 R. E. Kohl 提出了旋转叶片式空化喷嘴和中心体空化喷嘴, A. F. Conn 等研究了各种动力参数对淹没射流的影响,还实验研究了不

同喷嘴锥角、直线段长度的影响。F. E. Jesnitzer 等还证明了在一般锥形喷嘴的射流中也存在空化,这是由射流边界与周围液体之间的剪切漩涡所产生的,这种空化被称为“自由”空化。R. Kobayashi 等进一步用实验研究了水射流喷嘴结构及冲蚀材料的影响,M. M. Vijay 等则研究了一系列喷嘴的冲击性能。胡寿根进行了几何相似锥形喷嘴高压水淹没射流性能实验研究,比较了不同喷嘴直径、流量以及能耗对射流性能的影响,研究了靶距、工作压力和冲击时间等参数的相互关系,并用质量守恒概念分析了几何相似锥形喷嘴在淹没状态下的射流性能,得到了许多有价值的结论。20 世纪 80 年代初,美国流体公司的 A. F. Conn 和 V. E. Johnson 等在 S. C. Crow 和 E. H. Champagne 以及 Eillis 和 T. Morel 等的研究基础上得出了自激共振空化射流的概念。Johnson 等用自激共振空化喷嘴和 SMITH 喷嘴在相同的条件下进行对比试验,结果表明,自激共振空化射流的切割深度一般比 SMITH 喷嘴深 2~4 倍,清洗岩屑的效率至少提高 3~4 倍。在对空化水射流的研究中,国内外学者对影响空化效果的空化系数和 Strouhal 数进行了大量的研究工作,Lichtarowicz、Conn 和清水诚二等研究了不同的空化数、质量损失随靶距的变化规律。Crow 和 Champagne 对无撞击射流结构的研究表明,在射流中,轴对称扰动获得最大增幅的频率,对应的 Strouhal 数(以喷嘴直径为特征长度)在 0.3 左右,Morel、Chan 和 Hussian 发表的关于无撞击射流的研究结果支持了 Crow 和 Champagne 的论点,认为射流中获得最大扰动增幅的激振 Strouhal 数介于 0.3 到 0.5 之间。沈忠厚、唐川林和廖振方等也对自振空化喷嘴的 Strouhal 数和自然频率的关系进行了研究,并各自设计了自振空化脉冲射流喷嘴装置,在淹没和非淹没射流条件下进行了相关实验,取得了较为满意的结果。

近几年来,国内外学者在继续磨料射流、脉冲射流和空化射流的基础研究和应用开发的同时,开展了一些新型射流的研究,并取得了一系列的研究成果。这些研究成果的取得大大提高了高压水射流技术的研究水平,拓展了水射流技术的应用范围。李晓红等在 1995 年进行了自激振荡脉冲射流与后混合磨料射流相结合的基础研究,分析了自激振荡磨料射流中水射流磨料的吸卷机理以及自激振荡对磨料射流的影响,提出了通过自激振荡发展大涡,把磨料颗粒卷入射流束内,增大磨料的吸卷量和磨料粒子的运动速度,变连续磨料射流为脉冲磨料射流。随后,又综合前混合式磨料射流与自激振荡水射流的优点,提出了新的自激振荡磨料射流,并从理论上研究了自激振荡磨料射流喷嘴的结构及工作机理,认为自激振荡与前混合磨料射流的结合使磨料射流发生了质的变化。杨林等认为自激振荡脉冲磨料射流的振荡频率直接决定着磨料的加速效果和射流的空化效应,分析了自激振荡脉冲磨料射流中压力扰动波的传播速度及其对射流振荡频率的影响规律。

冰粒射流是近几年来提出的一种基于绿色制造概念的新型射流技术。冰粒射流,顾名思义就是将制备好的冰粒加入到流体射流中形成的一种水射流。冰粒射

流的原理是基于磨料射流的。

近几年来,由于陆地能源的过度消耗和日益匮乏,迫使人们越来越重视海洋的开发,并对海洋在水下工程技术的发展提出了越来越高的要求。水下压力的变化、水下高压的影响以及水下工作环境的不同使得传统的加工方法在水下工况应用时变得越来越困难,甚至不能适应。胡寿根等在淹没射流和水下高围压射流方面进行了一系列的研究,高围压水射流是一种在特殊环境下开发的水射流技术,随着对其理论和应用研究的不断深入,其在石油钻井、海上平台、舰船的水下作业和海洋工程中将具有广泛的应用前景。

高压水射流在加工过程中形成加工表面形貌的研究工作是近十几年来国外的一个研究热点。这项研究工作可以明显地分为表面形貌的形成机理和加工表面质量预测与控制两个研究方向。关于表面形貌的形成机理,M. Hashish的工作奠定了这一研究的基础。他利用高速摄像机记录了三种透明材料(聚碳酸酯、透明合成树脂和玻璃)的磨料水射流切割过程,发现存在切割与磨损两种基本的切割模式,并指出条纹的出现是由于两种切割模式转换引起的,且它是磨料水射流作为流束加工方法的本质特征。J. Chao 等以 Fourier 变换为工具对磨料水射流切割形成表面进行了频谱分析,并研究了加工过程中传动系统的动态特性,试图找出二者之间的相关关系,且提出一个观点:通过合适的减振手段可以抑制条纹,改善表面加工质量。N. S. Guo 等认为磨料水射流切割表面是磨料射流与材料在三维空间内相互作用的结果,因此要考虑射流在垂直于喷嘴横移方向上的倾斜和不稳定的摆动,并且认为这种观点有助于全面理解切割表面的形成机理。基于这些观点,他提出了切割表面的构成模型,认为表面轮廓由表面粗糙度(surface roughness)、条纹(striations)和沟槽(grooves)三种成分组成。N. S. Guo 同时认为,切割工艺参数对表面形貌存在影响,表面加工质量是可以通过选择合适的工艺参数得以提高的。对于切割表面的形成过程,他给出了一幅非常清晰的图景。L. Ohlsson 等以高速摄像机为手段验证了切割过程中存在多个阶梯形成和快速冲蚀的现象,指出这正是条纹或波纹出现的原因。

表面质量控制的研究体现了精确性与实用性两种不同的方法。前者力图在对切割机理透彻理解的基础上建立数学模型,精确地描述粗糙度与影响因素之间的关系,这些因素不仅包括诸如射流喷射压力、喷嘴出口直径、切割横移速度、磨料供给量、磨料粒度等工艺参数,还涉及体积切割率、比能耗、磨料粒子速度等有关切割过程的参数,这样建立起的方程相对较为精确,但由于计算复杂并不实用。D. K. M. Tan、M. Hashish 及 R. J. Wilkins 进行了这方面的工作。另一种研究方法是试图将磨料水射流切割过程看作一黑箱事件,它并不需要从切割机理出发建立精确的数学模型,而是从实验出发,确定工艺参数与描述表面质量指标之间的定性和定量关系。由于只涉及到工艺参数,而不涉及到切割机理和复杂的数学模型,故建立

起的关系简单实用。但同时由于建立在实验的基础上,所以应用范围有限。在这方面,D. C. Hunt 试图建立起切割力与轮廓算术平均偏差 R_a 之间的关系,认为切割力是切割深度和切割进给速度的函数,可表示为 $f=f(d,v)$, R_a 也可以表示为切割深度和进给速度的函数 $R_a=R(d,v)$ 。H. Blickwedel 等也提出了一个经验公式来预测表面质量。A. Fekaier 等通过实验与理论分析,研究了切割力与表面粗糙度之间的关系,并指出这种关系可用来实时控制加工表面的粗糙度,以获得一组最佳的加工工艺参数。

1.3 混沌调制变频冲击射流的概念

在对高压水射流技术长期大量理论与实验研究和开发应用的过程中,对于煤炭破碎、船舶清洗等不要求精密切割的应用场合,为了充分利用水的动力学特性,解决高压水射流的能耗问题,提高水射流的能量利用率,研究人员研制出了基于各种原理与方法的特殊射流发生装置。其中,通过调节流量、压力或其他方法改变水体的喷射方式,常常可以采用一些特殊装置使连续水射流呈现出非定常状态,利用液珠的高频冲击特性所具有的水锤效应,使水射流以液珠状周期或非周期性冲击靶物,增强水射流的切割破碎和冲蚀能力,且经济上比单纯提高连续射流的压力和流量的投入要小得多,因而非定常水射流在冲蚀破碎和清洗领域比普通的连续(定常)水射流具有更高的作业效率。

在高压水射流系统中,其工作介质是高速流动的流体,系统中的环节存在多种非线性因素。我们所提出的混沌调制冲击射流是指射流在通过特定的发生装置(混沌喷嘴)过程中,利用流体的瞬变流动特性,在系统非线性因素的作用下,通过剪切层不稳定性所产生的扰动经过放大、反馈,使能量不断得到充分地聚集,然后通过喷嘴间断性地释放出来,从而形成瞬时能量比连续水射流高几倍、压力(或流量)脉动呈现混沌性态的冲击射流。

混沌调制变频冲击射流属非定常水射流,是一种内调制冲击射流,其主要特点有:

(1) 混沌调制变频冲击射流可以在某些给定的控制参数范围内,使射流出口的压力脉动具有混沌性态,产生具有连续功率谱的混沌频率输出,这样可以在固定参数条件下得到具有多种频率(理论上无穷多)的压力脉冲。

(2) 混沌调制变频冲击射流在调制过程中有利于连续水射流的离散化、液珠化,并强化射流的空化效果。利用液珠的高频冲击特性所具有的水锤效应,对煤岩等脆性材料实施混沌频率加载,会大大加快其内部微裂纹和解理的扩展,从而大幅度地提高高压水射流对煤岩类脆性材料的切割破碎和冲蚀效果。

(3) 混沌调制变频冲击射流发生装置结构简单、体积小、无附加外驱动机构和无动密封,具有较高的可靠性。