



全国高协组织教材研究与编写委员会审定

空化磨料水射流粉碎技术

*Comminution Technology With
Cavitation Abrasive Water Jet*

郭楚文 徐晓东 著

中国科学文化出版社

全国高协组织教材研究与编写委员会
学术专著与高校教材审定委员会成员名单

主任:顾明远

副主任:李恒光 田玉敏

委员:曲廷清 金志伟 于建福 刘复兴
孙维杰 赵世平 周大明 崔东云

空化磨料水射流粉碎技术

郭楚文 徐晓东 著

出版发行	中国科学文化出版社
排 版	新天地文印中心
印 刷	新颖印务有限公司
开 本	850mm × 1168mm 1/32
印 张	5.25
字 数	170 千字
版 次	2002 年 1 月第 1 版
书 号	ISBN 962 - 8467 - 23 - 9/G·112
定 价	12.00 元

版权所有 翻印必究

内容简介

本书主要论述了空化磨料水射流理论及其在粉体粉碎方面的应用,对其粉碎机理进行了较深入的理论探讨与实验研究。全书共分5章,第1章介绍了水射流技术和粉碎技术的发展概况;第2章主要叙述了水射流用于物料粉碎的理论基础;第3章分析水射流粉碎的几种效应;第4章介绍剪切型空化磨料水射流粉碎技术;第5章介绍振荡型空化磨料水射流粉碎技术。

本书可供从事水射流技术、粉碎技术研究的科技人员参考,也可作为大专院校有关专业研究生的教学用书与参考书。

前 言

流体机械工程师们因为空化作用对水力机械、液压元部件等的空蚀破坏而大伤脑筋。从十八世纪末到第一次世界大战前后，空化现象开始引起人们的重视，那时所有研究工作的目的都是为了预防空化的产生和降低空化噪音与空蚀破坏。但是，任何事物都具有双面性。既然空化现象具有这么大的破坏力，如果能善加引导利用，则完全可以变害为利。事实上，在高压水射流清洗和切割技术兴起不久，一些研究者很快就把空蚀原理与水射流发生原理结合起来，提出了形形色色的空化水射流发生装置。目前，空化水射流已经得到了深入的研究和广泛的应用。磨料水射流原理应用于粉体的粉碎，也是变害为利的例子。在切割过程中，有很大一部分磨料会破碎，这对磨料的循环利用很不利。但正是在这种现象的启发下，人们开发了各种水射流粉碎装置。

本书的作者多年从事水射流技术的理论与应用研究，书中内容以近几年来研究工作的基础，参考借鉴了国内外研究者的研究成果，对空化磨料水射流理论及其粉碎机理进行了较深入的理论探讨与实验研究。

全书共分5章，第5章由徐晓东编写，其余内容由郭楚文编写。

本书的出版，受到了“学术专著及高校教材出版基金”的资助，

同时还受到留学回国人员科研基金和中国博士后科学基金的支持。

由于作者才疏学浅,书中疏漏和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者
2002年9月

序

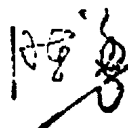
随着自然科学与技术的不断发展，一方面传统学科的划分越来越细，另一方面也促使各学科之间的相互渗透，空化磨料水射流粉碎技术就是多学科交叉渗透而产生的新技术。

水射流技术是近几十年来发展起来的一门新技术。水射流技术一经出现，立即引起了各国研究者的极大兴趣，并投入大量人力物力进行研究和开发，其中以美国、英国、日本、德国、加拿大、前苏联、中国等国所作的研究较多。目前，水射流技术的应用范围已经从传统的采矿工业扩大到航空、建筑、交通运输、市政工程、石油化工、机械、轻工业及医学等领域，越来越受到人们的重视。磨料射流技术则是八十年代发展起来的新型射流技术，它是在高压水射流中混合并加速磨料颗粒而形成的液固两相射流。在应用磨料射流进行清洗、切割等作业的过程中，人们发现磨料粒子的破碎十分严重。为了研究磨料的循环利用，各国研究者对作业后磨料粒子的破碎情况进行了深入研究，并从研究结果中发现了磨料水射流所具有的粉碎功能。

本书的两位作者均从事水射流研究多年，书中的内容是作者多年来水射流研究工作的总结，并综合了国内外研究者的一些相关研究成果。在此基础上，本书系统地阐述了空化磨料水射流物料粉碎技术。虽然我国目前从事水射流物料粉碎技术的队伍较小，而且水射流物料粉碎技术也尚未得到大规模的推广应用，但是我相信，空化磨料水射流物料粉碎技术将以其独特的优势，在物料粉碎行业占有一席之地。

本书的出版，对我国水射流技术的研究，尤其是水射流技术

在物料粉碎方面的应用，将起到较好的促进作用。本书的内容，
将为从事水射流技术和粉碎技术研究的人员提供有益的参考。



中国科学院广州分院院长陈勇

2002年10月

目 录

序	1
第一章 绪 论	1
第一节 水射流技术的发展与研究概况	1
一、水射流技术的发展概况	1
二、水射流技术研究状况	5
第二节 超细粉碎技术发展概况	8
第二章 水射流粉碎理论基础	12
第一节 水射流流体力学	12
一、水的物理力学性质	12
二、小孔出流基本理论	14
三、淹没水射流的基本结构与特性	18
第二节 空化水射流理论	21
一、空化现象	21
二、空化的动力相似准则	23
三、空化水射流	24
四、空化初生原理	26
五、空泡的发育、溃灭及空蚀破坏机理	34
六、孤立空泡的溃灭时间与压力	36
七、空化喷嘴的结构	39
第三节 磨料水射流理论	41
一、后混合磨料水射流	41
二、前混合磨料水射流	47

第四节	粉碎过程力学	58
一、	颗粒的物性	58
二、	粉碎的方式	61
三、	粉碎的能耗理论	62
第三章	空化磨料水射流粉碎理论	66
第一节	空化磨料水射流粉碎机理	66
第二节	空化磨料水射流粉碎的冲击效应	69
第三节	空化磨料水射流粉碎的压力释放效应	73
第四节	空化磨料水射流粉碎的空化效应	79
第四章	剪切型空化磨料水射流粉碎技术	81
第一节	几种常见非金属粉体	81
一、	云母	82
二、	高岭土	83
三、	重质碳酸钙	84
第二节	颗粒的尺度与粒度表示	85
第三节	剪切型空化磨料水射流粉碎系统	89
第四节	粉碎效果随粉碎次数的变化规律	92
第五节	粉碎效果随压力的变化规律	95
第六节	空化作用对粉碎效果的影响	97
第五章	振荡型空化磨料水射流粉碎技术	107
第一节	振荡型空化磨料水射流粉碎机	107
第二节	振荡型空化磨料水射流粉碎物料理论分析	110
一、	振荡腔内的流动分析	110
二、	脉冲射流理论	114
三、	水楔理论	117
四、	对撞区的流场分析	118

五、对撞式水射流粉碎机设计的三个原则	120
第三节 水射流粉碎系统数值仿真	122
一、PHOENICS 软件介绍	123
二、水射流粉碎系统的数值仿真模型	127
三、水射流粉碎系统的数值仿真结果	129
第四节 振荡型空化磨料水射流粉碎实践	138
一、四种不同性质材料的粉碎结果	139
二、物料粉碎前后微观形貌的扫描电镜分析	144
参考文献	147

Content

Preface	1
1 Introduction	1
1.1 Development and study trend of water jet technology	1
1.1.1 Development of water jet technology	1
1.1.2 Current situation of water jet study	5
1.2 Development of powder comminution	8
2 Theoretical basis of water jet comminution	12
2.1 Fluid mechanics of water jet	12
2.1.1 Physical property of water	12
2.1.2 Basic theory of orifice flow	14
2.1.3 Structure and characteristic of submerged water jet	18
2.2 Theory of cavitation water jet	21
2.2.1 Cavitation	21
2.2.2 Dynamical similarity of cavitation	23
2.2.3 Cavitation water jet	24
2.2.4 Initiation of cavitation	26

2.2.5	Growing and collapsing of cavitation bubble and erosion mechanism	34
2.2.6	Impact force and collapsing time of isolated bubble	36
2.2.7	Structure of cavitation nozzle	39
2.3	Theory of abrasive water jet	41
2.3.1	Abrasive water injection jet	41
2.3.2	Abrasive water suspension jet	48
2.4	Crushing mechanics	58
2.4.1	Physical property of particles	58
2.4.2	Methods of crushing	61
2.4.3	Theory of energy consumption in comminution	62
3	Theory of comminution by cavitation abrasive water jet	66
3.1	Mechanism of comminution by cavitation abrasive water jet	66
3.2	Impacting effect in comminution by cavitation abrasive water jet	69
3.3	Pressure releasing effect in comminution by cavitation abrasive water jet	73
3.4	Cavitating effect in comminution by cavitation abrasive water jet	79
4	Comminution technology with shearing – type cavitation	

abrasive water jet	81
4.1 Some common used nonmetallic powders	81
4.1.1 Mica	82
4.1.2 Kaolin	83
4.1.3 Calcium bicarbonate	84
4.2 Measure of particle and its denotation	85
4.3 Comminution system of shearing – type cavitation abrasive water jet	89
4.4 Variation of comminution results with comminution times	92
4.5 Variation of comminution results with pressure	95
4.6 Effect of cavitation on the comminution results	97
5 Comminution technology with oscillating pattern cavitation abra- sive water jet	107
5.1 Miller of oscillating pattern cavitation abrasive water jet	107
5.2 Theoretical analysis on comminution with oscillating pattern cavitation abrasive water jet	110
5.2.1 Analysis of flow in the oscillation chamber	114
5.2.2 Impulse water jet	117
5.2.3 Theory of hydro – wedge	118
5.2.4 Analysis of the flow field at the opposed impacting area	120
5.2.5 Three principles for designing opposed impacting water	

jet miller	122
5.3 Numerical simulation of water jet comminution	
system	122
5.3.1 Introduction of PHOENICS	123
5.3.2 Numerical simulation model	127
5.3.3 Numerical simulation result	129
5.4 Comminution experiments with colliding pattern	
cavitation abrasive water jet	138
5.4.1 Comminution results for four different kinds	
of materials	139
5.4.2 Microcosmic structure analysis for materials	
with scanning electrical microscope	144
References	147

第一章 绪 论

第一节 水射流技术的发展与研究概况

一、水射流技术的发展概况

自古以来,人们总是把水比做柔软,把岩石比做坚硬。然而,“滴水穿石”却是柔软的水穿透了坚硬的岩石。在大雨中飞行的飞机被雨滴侵蚀的所谓“雨蚀”现象也是柔能克刚的实例。人们正是受到这些现象的启发,才认识到柔软的水在高速运动时,它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适当引导利用,就可以完成清洗、切割、破碎等作业。表 1-1 概略地列出了水射流技术的发展过程。

射流是流体运动的一种重要类型,在许多工程技术部门中,都有大量的射流问题。水射流技术是近几十年来发展起来的一门新技术,其应用范围日趋广泛。从原理上讲,它与我国煤矿中使用已久的水力采煤技术基本相同,都是把具有一定压力的水通过直径较小的喷嘴形成射流,将这股水流作为工具进行切割、破碎和清洗等作业。所不同的只是高压水射流的水压更高、喷嘴直径更细而已。高压水射流可以在很小的区域内集中极大的能量,例如 1000MPa 的水射流的能量可以与激光束相匹敌。

水射流技术一经出现,立即引起了各国研究者的极大兴趣,并投入大量人力物力进行研究开发。其中以美国、英国、日本、德国、加拿大、前苏联、中国等国所作的研究较多。表 1-2 对第一届到第十一届国际水射流会议上各国发表的论文数进行统计,表中的

数据基本上反映了各国对水射流技术的研究程度。

表 1-1 水射流的发展简表

时 间	有代表性的事件
BC5000	筑成世界上最初的水坝(埃及)
BC2500	出现了自来水(埃及)
1000	成语“滴水穿石”(宋,张咏)
1653	发现了液体压力传递的帕斯卡定律(法国,帕斯卡)
1738	发现了流体运动的伯努利方程(瑞士,伯努利)
1916	研究用水力采煤(前苏联)
1939	水力采煤实用化(前苏联)
1945	发现飞机“雨蚀”现象
1960	研究固体材料的精密切削;日本研究水力采煤
1963	用 350MPa 的水射流切断木材(美国)
1965	开发了 1000MPa 连续喷射式超高压泵(日本)
1966	用 500MPa 的水射流切割岩石(英国)
1972	召开了第一届国际水射流技术会议(每两年一届)
1976	发明了高分子添加剂水射流(加拿大)
1980	磨料水射流的实用化(英国)
1981	召开了第一届美国水射流技术会议(每两年一届)
1983	美国水射流协会成立 日本水射流协会成立
1984	自激震荡空化水射流喷嘴的开发(美国)
1986	磨料水射流用于青函隧道混凝土切割(日本)
1987	前混合磨料水射流的开发(英国)
1988	召开了第一届环太平洋国际水射流技术会议(中国)
1988	水射流手术刀的实用化(日本)
1988	磨料水射流用于废弃核反应堆的解体
1990	成立国际水射流学会
1995	成立中国水射流技术专业委员会

表 1-2 历届国际水射流会议各国发表论文统计

	美国	日本	英国	德国	加拿大	前苏联	中国	其他
第 1 届	16	4	8	0	3	5	0	1
第 2 届	17	7	5	3	2	1	0	1
第 3 届	20	2	4	3	3		0	2
第 4 届	14	4	7	3	5		0	2
第 5 届	12	4	4	8	4	2	0	0
第 6 届	12	2	6	5	2	3	0	2
第 7 届	19	3	4	7	5	0	1	5
第 8 届	9	10	6	5	4	1	1	4
第 9 届	9	27	3	3	2	0	7	1
第 10 届	12	10	2	6	2	0	2	3
第 11 届	18	3	4	3	1	1	1	10
百分比%	37.1	17.8	12.4	10.8	7.8	4.0	2.8	7.3

水射流技术在发展初期,主要局限于纯水射流,其应用则以清洗为主。随着研究与应用的不断深入和扩大,人们发现纯水射流的作业能力很有限。于是开始寻求提高水射流性能的方法,从而出现了各种各样的特殊射流,如脉冲射流、空化射流、磨料射流等。尤其是磨料射流,以其强大的切割能力,引起了世界各国水射流工作者的广泛兴趣。

磨料射流技术是八十年代发展起来的新型射流技术,它是在高压水射流中混合并加速磨料而形成的液固两相射流。根据混合方式不同,磨料射流可分为后混合磨料射流和前混合磨料射流两种。

后混合磨料射流的工作原理是利用射流泵的原理,靠水射流的引射作用将磨料吸入混合室内,并卷入水射流中,再经过水射流加速形成磨料射流。虽然后混合磨料射流的冲蚀能力比纯水射流