



高压水射流 破岩机理研究

◎ 王瑞和 著

Study on Rock
Breaking Mechanism under
High Pressure Water Jet

中国石油大学出版社

高压水射流破岩 机理研究

王瑞和 著 ●

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高压水射流破岩机理研究/王瑞和著. —东营:
中国石油大学出版社, 2010. 7

ISBN 978-7-5636-2911-4

I. ①高… II. ①王… III. ①水射流破碎—研究
IV. ①TD231. 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 165837 号

书 名: 高压水射流破岩机理研究

作 者: 王瑞和

责任编辑: 高 颖 (电话 0532—86981531)

封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180×235 印张: 16.25 字数: 323 千字

版 次: 2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 46.00 元

Preface

序 言

高压水射流技术是近 30 年来发展起来的一门高新技术,它在采矿、冶金、石油、建筑等领域得到了广泛应用,并展示出了广阔的发展前景。中国石油大学高压水射流研究室自 20 世纪 80 年代开展水射流应用基础理论与相关技术的研究工作以来,取得了一系列学术技术成果,并培养了一大批水射流专业技术人才,为推动我国水射流理论和技术的发展做出了贡献。

但是当前我国在高压水射流理论和技术方面的研究还远不够深入,许多机理尚未被揭示,相关理论也不够完善,特别是水射流破岩理论的发展更是远远滞后于技术的发展。这主要是由于高速紊动受限射流流场的复杂性和岩石介质的非均质、各向异性等复杂因素交织在一起,使得准确揭示其破岩的内在机理和过程变得十分困难。本书作者结合国内外本领域最新的理论和技术进展,将自己多年来的研究成果予以系统地总结,以数值模拟与实验相结合的手段,对高压水射流破岩机理及过程进行了深入的分析研究,并建立了较为完整的理论体系。这些工作无疑对我国的水射流破岩技术研究,乃至整个水射流领域的研究都具有重要的理论和实践意义,必将有力地推动水射流破岩技术研究的深入开展,也将为广大水射流技术领域的学者和技术人员提供有益的借鉴。

在我初涉水射流破岩技术研究时,理论的相对匮乏严重地影响着当时研究工作的进展和深入,很多大大小小的棘手问题都模糊不清甚至毫无头绪。一直以来,我和中国石油大学高压水射流研究室的同仁、弟子们都对水射流破岩理论的研究和总结工作充满着期待,期望尽早形成较为系统的理论,为后来的研究者提供指导。现在,在王瑞和教授等同志的努力下,终于使这一成果问世了!我相信本书必将为水射流破岩研究工作的发展提供强有力的理论支撑,为我国水射流破岩技术的快速发展起到有力的推动作用。

沈忠厚

2010 年 3 月 1 日于北京

当今时代支撑经济社会快速发展的能源仍然是煤、石油和天然气。这些矿物资源大都埋藏在陆地、沙漠或深海之下,开采它们的必需途径就是钻井。而且随着对这些资源开采程度的提高,钻遇的地层深度和复杂程度也在不断增加,如何进一步提高破岩钻进效率已成为矿物资源勘探开发面临的主要挑战。前人分析研究了各种可能的岩石破碎方法,认为高压水射流破岩是最具潜力的技术方向。近年来的生产实践也充分证明了这个观点,尤其是在向深部地层的钻进中,由于水射流具有很高的能量传输效率和射流介质能顺便将破碎的岩屑携带出来的清岩功能,从而可大幅度提高破岩钻进效率,降低生产成本。

但是由于高压水射流本身的高速和强湍流特性,岩石的各向异性和非均质性等复杂因素交织在一起,使得高压水射流破岩机理的研究非常困难,相应地也制约了这一技术的快速发展。面对这一挑战,国内外许多学者都进行了开拓性的探索和研究,取得了一些成果。本书就是在环视国内外研究进展的基础上,将笔者从事水射流研究近 20 年以来所学习、研究的成果进行系统的总结和重点提炼,初步建立起水射流破岩的基本理论体系和研究方法,揭示水射流破岩的内在机理和过程,以期为广大水射流专业技术人员、大学生、研究生及对此领域感兴趣的同志们提供参考和借鉴。

本书以建立射流破岩的理论体系为出发点,采用基础理论与应用技术循序渐进的章节布局;以岩石破碎和高压水射流基本理论为基础,以高压水射流破岩载荷类型和流固耦合作用方式的分析为研究的基本切入点,形成数值模拟方法;结合室内实验,分析高压水射流破岩的内在机理和过程,并结合生产需要进行技术设计和现场应用试验。全书共分六章,第 1 章至第 3 章分析了现有水射流破岩理论发展的基本状况,阐述了岩石破碎理论和高压水射流理论的基本理论体系和研究方法;第 4 章主要介绍了高压水射流流场和破岩特性的研究成果;第 5 章系统地阐述了物理模拟和数值模拟相结合的研究方法,研究揭示了高压水射流破岩的机理和过程,以及形成的基本理论体系;最后的第 6 章简要介绍了在水射流破岩理论研究的基础上,结合石油工程生产需要形成的部分实用技术。

本书所涉及的主要内容是以国家自然科学基金项目“高压水射流破岩机理及过程研

究”(50574062)的研究内容为基础的,值本书问世之际,谨对国家自然科学基金委的大力支持和资助表示衷心的感谢!

在本书所涉及的研究过程中,始终是在导师沈忠厚院士的指导下进行的,也始终贯穿着沈院士的学术思想。在本书的撰写过程中,沈忠厚院士曾两审书稿,对书稿的进一步修改完善提出了许多宝贵意见,并亲自作序。也正是在沈院士的督促和指导下,本书才得以及时出版,在此谨向沈院士致以崇高的敬意和衷心的感谢!

中国石油大学高压水射流研究室的同仁们对本书的问世给予了大力支持,书中所涉及的许多研究成果都是集体智慧和劳动的结晶。同时,国内许多院校及科研单位的专家、学者也给予了有力的支持和指导,提出了许多宝贵的意见和建议,在此谨向所有为此书作出贡献的同志们致以诚挚的谢意。

本书的出版得到了中国石油大学(华东)“211工程”建设经费的资助,在此表示感谢。

由于作者研究的深度不足、水平有限,书中难免存在不当之处,恳请广大读者不吝赐教。

作者
2009年8月

Contents

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水射流技术的发展与应用	2
1.1.1 水射流技术的发展概况	2
1.1.2 水射流技术的分类	4
1.1.3 水射流技术的应用概况	5
1.2 高压水射流破岩机理研究概况	8
1.2.1 高压水射流切割岩石理论模型	8
1.2.2 高压水射流冲击岩石理论模型	9
1.2.3 高压水射流直接破岩机理研究	12
1.2.4 高压水射流辅助破岩机理研究	17
参考文献	19
第 2 章 岩石破碎理论研究	21
2.1 岩石破碎理论的研究方法和研究内容	21
2.1.1 岩石破碎理论的研究方法	21
2.1.2 岩石破碎理论的研究内容	22
2.2 岩石破碎方法	24
2.2.1 传统岩石破碎方法	24
2.2.2 新型岩石破碎方法	26
2.3 岩石破碎理论	28
2.3.1 剪切破坏强度理论	29
2.3.2 脆断破坏强度理论	34
2.3.3 统计强度理论	35
2.3.4 裂纹扩展理论	39
2.3.5 岩石损伤破坏理论	48
参考文献	61
第 3 章 高压水射流理论研究	63

3.1	流体的基本性质	63
3.1.1	流体的三相状态	63
3.1.2	流体的可压缩性	63
3.1.3	流体的粘性	64
3.1.4	水的表面张力	64
3.1.5	水的溶气性	65
3.2	流体力学基本方程	65
3.2.1	微分方程	65
3.2.2	初始条件和边界条件	67
3.3	流体的紊流过程分析	68
3.3.1	紊流参数的研究方法	69
3.3.2	紊流的基本方程	71
3.4	喷嘴出流及其特征参数	75
3.4.1	小孔出流	75
3.4.2	喷嘴出流	76
3.5	淹没射流的结构特性	76
3.5.1	淹没射流的结构	77
3.5.2	淹没射流的速度分布	78
3.6	非淹没射流的结构特性	80
3.6.1	非淹没射流的结构	80
3.6.2	非淹没射流的特性分析	81
3.6.3	非淹没射流的动压分布	83
3.7	旋转射流的结构特性	86
3.7.1	旋转射流的速度分布	87
3.7.2	旋转射流的压力分布	91
3.8	脉冲射流的结构特性	93
3.8.1	脉冲流体的水击特性	94
3.8.2	水击压力的计算	95
3.8.3	水击特性的利用	97
	参考文献	100
第4章	高压水射流流场与破岩特性研究	101
4.1	连续射流流场与破岩特性研究	101
4.1.1	连续射流对物体的作用特性	101
4.1.2	连续射流冲击物体引起的应力场	104
4.1.3	无围压淹没条件下连续射流流场分析	107

4.1.4	有围压淹没条件下连续射流流场分析	112
4.1.5	连续射流破岩特性研究	116
4.2	旋转射流流场与破岩特性研究	119
4.2.1	旋转射流的运动方程	119
4.2.2	旋转射流的基本特性分析	122
4.2.3	旋转射流的流场分析	133
4.2.4	旋转射流破岩特性研究	143
4.3	脉冲射流流场与破岩特性研究	151
4.3.1	自激振荡脉冲射流基本原理	151
4.3.2	脉冲射流流场分析	155
4.3.3	脉冲射流破岩特性研究	163
	参考文献	167
第5章	高压水射流破岩机理的数值模拟研究	169
5.1	高压水射流破岩基本过程分析	169
5.1.1	高压水射流与岩石的耦合作用分析	170
5.1.2	高压水射流破岩作用分析	173
5.2	数值模拟研究方法	175
5.2.1	高压水射流作用下岩石的损伤模型	175
5.2.2	高压水射流破岩的有限元分析	186
5.3	连续射流破岩机理数值模拟研究	194
5.3.1	物理模型及定解条件	194
5.3.2	连续射流破岩过程及机理分析	195
5.4	旋转射流破岩机理数值模拟研究	203
5.4.1	物理模型及定解条件	204
5.4.2	旋转射流破岩过程及机理分析	204
5.5	脉冲射流破岩机理数值模拟研究	214
5.5.1	物理模型及定解条件	214
5.5.2	脉冲射流破岩过程及机理分析	214
	参考文献	223
第6章	水射流技术在石油钻井工程中的应用	226
6.1	旋转射流钻超短半径水平井技术	226
6.2	脉冲射流提高钻速技术	236
6.2.1	井底水力脉动提高钻速机理分析	236
6.2.2	钻头腔内转子调制式脉冲钻井技术	242
	参考文献	247

第1章 绪 论

Chapter one

水射流是一种能量相对集中的流体运动现象,在人们日常生活中随处可见,如景观喷泉、玩具水枪等。水射流技术是近几十年来发展起来的一门新技术,它的应用日益广泛,目前已在石油、煤炭、化工、机械、水利及轻工业等众多部门应用。水射流技术主要用于对物料进行清洗、切割和破碎等。近年来,随着科学技术水平的迅速提高,激光束、电子束、等离子体和水射流等新型切割技术也在迅速发展,其中激光束、电子束和等离子体切割属于热切割加工方法,而水射流是唯一的冷切割加工方法。在许多材料的切割、破碎及表面预加工中,水射流充分显示了其独特的优越性^[1]。

高压水射流破岩技术是水射流技术应用的一个重要方面,在国民经济的诸多领域均有应用,石油工程中用于破岩钻井是其典型代表。研究表明,在众多新型破岩方式中,最有潜力、效率最高,且易于实现的破岩方式当属高压水射流破岩(各种破岩方式的能耗见表 1-1)^[2]。毛勒博士的试验也发现,在使用工作压力为 120 MPa 的高压水射流直接钻井时,钻进速度可比普通旋转钻头高 2~4 倍^[3]。与其他方式相比,高压水射流的机械钻速最高,因此高压水射流被认为是一种具有极大发展潜力的破岩方式。

表 1-1 各种破岩方式所耗能量

破岩方式	能耗/(J·cm ⁻³)
高压水射流	250~500
激 光	1 000~2 000
电子束	3 000~6 000
空化射流	20 000~40 000
离子束	50 000~100 000

但是,由于岩石的动态本构关系、水射流冲击动载荷以及流体与岩石的耦合作用等诸多复杂关系的叠加,使得相关的试验研究和理论探讨难度很大,导致高压水射流破岩的内在机理和真实物理过程一直未能得到准确揭示,这在一定程度上制约了水射流破岩理论与技术的发展。随着科学技术的发展,新的生产开发需要也为水射流

技术带来了更为广阔的发展空间,如在深井、超深井以及复杂结构井的钻进中,如何充分发挥高压、超高压水射流破岩或辅助破岩的优势,大幅度提高复杂条件下的钻井质量和速度,已成为一个潜力巨大的研究方向。因此,深入分析研究高压水射流破岩的过程和机理,不仅对水射流应用技术的发展具有重要的现实意义,同时也将促进水射流破岩理论的进一步发展和完善。

1.1 水射流技术的发展与应用

1.1.1 水射流技术的发展概况

自古以来,水总是被人们用来象征柔软,而岩石则被喻为坚硬。但是,“滴水穿石”却正是水穿透了岩石,飞机的“雨蚀”现象也是以柔克刚的典型事例,这些都说明了柔软的水是可以破碎坚硬的岩石的。然而,过去人们主要研究的是如何防止高速水流的冲刷破坏作用,很少有人去研究如何化“害”为利,让其为人类服务。

19世纪中叶,在北美洲第一次使用水射流开采非固结的矿床。20世纪50年代初,前苏联和中国开始利用水射流进行煤炭开采作业(称为水力采煤)。随着水力采煤技术的推广,人们逐渐认识到提高水的喷射压力和适当减小喷嘴直径可以显著地提高落煤效果,于是人们开始研究可以提供较高压力的压力源(高压泵和增压器)以及高压脉冲射流(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水射流技术的研究工作。当时部分学者片面地认为水射流的压力越高越好,日本研究出了700 MPa的增压器,前苏联和美国研究出了5 600 MPa的脉冲射流发生器。到了70年代末,水射流技术出现了新的动向,即从单纯的提高水射流压力转向研究如何提高水射流的威力,开始出现了高频冲击射流、共振射流和磨料射流等新型射流。在相同的压力条件下,这些射流的破岩效果大大高于普通连续射流。进入80年代,磨料射流、空化射流、气水射流和自激振荡射流的发展,把水射流技术又推向了一个新的阶段。同时,各国学者开始展开了对水射流的基础理论和作用机理的研究。水射流技术的应用范围也由采矿业扩大到航空、建筑、建材、交通运输、市政建设、化工、机械、轻工业及医学等工业领域。水射流作为一种良好的切割、破碎和清洗除垢的工具已为人们所广泛认可,一大批水射流切割机、采煤机、掘进机、打桩机和不同用途、不同形式的清洗机投入市场^[1]。

1972年英国流体力学研究协会(British Hydromechanics Research Association)组织了第一次国际水射流切割技术会议,以后每两年举行一次,至今已经召开了20余次。1981年美国水射流技术协会(American Water Jet Technology Association)成立,以后每两年召开一次会议,至今已经召开了10余次。美国水射流技术会议从第一届开始就是国际性的。日本水射流协会于1983年成立,以后定期召开水射流技术讨论会和展览会,并邀请国外水射流专家参加会议。国际水射流协会(Interna-

tional Society of Water Jet Technology)于1987年成立,协会定期出版其正式刊物——《国际水射流杂志》(*International Journal of Water Jet Technology*),并组织召开了数次环太平洋国际水射流会议。这些国际性会议大大推动了世界各国水射流技术的发展。

我国水射流技术的研究工作是从20世纪70年代开始展开的,最初主要是在煤炭部门应用和研究,以后逐渐发展到石油、冶金、航空、化工、建筑、机械、市政建设和交通等领域。经过30多年的实践和研究,水射流技术取得了很大的进步,开发出了一批新技术和新产品,有的在国际上还处于先进水平。我国从1979年开始每两年召开一次全国水射流技术研讨会,并出版过《高压水射流》杂志。1987年在北京组织召开了第一届环太平洋国际水射流会议。1995年成立了中国劳动保护科学技术学会水射流技术专业委员会,为发展我国水射流技术起到了巨大的推动作用。中国石油大学(华东)高压水射流研究中心是中国劳动保障学会全国高压水射流专业委员会秘书处的挂靠单位,于2006年在中国青岛成功举办了第八届环太平洋水射流技术国际会议暨十二届全国水射流技术研讨会,与会者包括中、日、美、韩、澳、俄、德、法、加、波和中国台湾等11个国家和地区的专家学者共140人,其中国外专家51人,与会专家对我国石油工程中应用水射流技术所取得的进展和成绩给予了高度评价^[5-7]。

回顾水射流技术的发展史,大体上可分为以下四个阶段^[1]:

(1) 20世纪60年代初期为探索试验阶段,主要研究低压水射流采矿。水力采煤技术的发展使人们认识到,提高射流压力和速度后射流可以冲蚀较坚硬的煤层,并显著提高落煤效果,于是人们开始了提高射流压力、增强性能、拓展应用范围的研究工作,但是这一时期内的水射流技术的应用仍以低压水射流采矿为主。

(2) 20世纪60年代中期至70年代初期为基础设备研制和技术攻关阶段,开始研究高压水射流设备。随着对提高射流压力的迫切需求,开始研发压力日趋增大的射流发生装置及耐压管路,研制了高压泵、增压器和高压管件。这一时期高压水射流技术的应用得到了较大发展,从仅仅局限于采矿作业发展到了清洗作业中。

(3) 20世纪70年代中期至80年代初期为工业试验和工业应用阶段,开始了较大规模的工业试验和应用推广。从70年代中期开始,各国开始大力研究高压水射流技术,使该技术进入了迅速发展的新阶段。这期间,研究的重点是水射流破岩机理、脉冲射流特性及水射流在切割、破岩、清洗上的应用,开始出现了水力辅助机械破岩、空化射流、磨料射流、间断射流等新型射流技术。大量的水射流采煤机、切割机、清洗机相继问世,其应用领域也由采矿业、清洗业发展到了其他领域。

(4) 20世纪80年代以来为高压水射流迅速发展阶段,主要特点是水射流技术研究进一步深化,磨料射流、空化射流和自激振荡射流等新型射流方式发展迅速,许多产品已达到商品化。随着激光测速、高速摄影、流体显形、数值模拟等先进测试和研究手段的提出,高压水射流技术研究水平也得到了更为迅速的发展。磨料射流、空化

射流、脉冲射流、水力辅助机械破岩技术基础理论、切割机理和影响因素等方面的研究进一步深入,并出现了气水射流、液态气(空气、氮气、二氧化碳气)射流、冰粒射流等特种射流,其应用范围也由当初的采矿、破岩、钻孔、清洗、除垢发展到金属和超硬材料切割、表面处理、研磨及雕刻等范围,应用领域涉及石油、煤炭、冶金、化工、船舶、航空、建筑、电力、纺织、交通、市政、医学等十几个工业部门及核废料、海洋等危险恶劣工作环境,自动化程度和切割精度有了显著提高。

1.1.2 水射流技术的分类

随着研究和应用的不断深入,水射流技术正处于空前繁荣的发展阶段,新型射流不断涌现。对射流的分类方法有以下几种^[1]:

1) 按压力等级分类

压力等级是设计射流工艺系统的主要参数。可以将水射流压力分为低压、高压、超高压三个等级,见表 1-2。

表 1-2 水射流的压力等级

压力等级	压力范围/MPa	压力泵类型
低 压	0.5~35	多级离心泵、柱塞泵
高 压	35~140	柱塞泵、增压器
超高压	>140	增压器

2) 按工作介质和环境介质分类

按射流的工作介质和环境介质,射流可分为淹没射流和非淹没射流两种。当射流的工作介质和环境介质相同时,这种射流称为淹没射流,如在水中喷射的水射流或在空气中喷射的气体射流都属于淹没射流。当工作介质和环境介质不同时,则称为非淹没射流,如大气中的水射流就是最常见的非淹没射流。

3) 按固壁条件分类

射流的作业环境内有或没有固体壁面的限制,对射流的形成和动力特性有明显的影响。在没有固壁约束下的射流称为自由射流,反之则称为非自由射流。

淹没射流如果不受固壁的限制,则称为淹没自由射流;反之,称为淹没非自由射流。同样,非淹没射流如果不受固壁条件的约束,则称为非淹没自由射流;反之,称为非淹没非自由射流。

4) 按射流流体力学特性分类

按射流流体力学特性,水射流又可分为定常射流和非定常射流两种。定常流的特点是射流的各个断面上的流体力学特性不随时间而变化,仅为位置的函数;非定常流则与此不同,射流的各个断面上的流体力学特性不仅随其位置而变化,而且随时间而变化。

5) 按射流对物料的施载特性分类

按射流对物料的施载特性,水射流又可分为连续射流、冲击射流和混合射流三种。

连续射流对物料施载时,开始有一个短时的冲击峰值压力,随之而来的是长期、稳定、较低压力(如图 1-1a)。这种射流只有在冲击峰值压力以后的稳定压力时才具有代表性。这种射流常用于切割和清洗物料。

冲击射流对物料的施载特点是产生一个个只持续极短时间的压力峰值(如图 1-1b)。这种射流瞬时压力不固定,因而只有峰值压力才具有代表性。高速水滴冲击和脉冲水射流可以看做是冲击施载方式。

介于上述两种极端的施载方法之间的射流类型称为混合射流,其施载特点是冲击压力和稳定压力相结合。如含有空化气泡的连续射流(空化射流),在其连续稳定施载的同时伴随着空化作用的冲击施载(如图 1-1c);具有一定长度的液柱间断射流,其施载过程为冲击压力加上一段稳定压力,稳定压力维持的时间与柱状液滴的速度和大小有关。

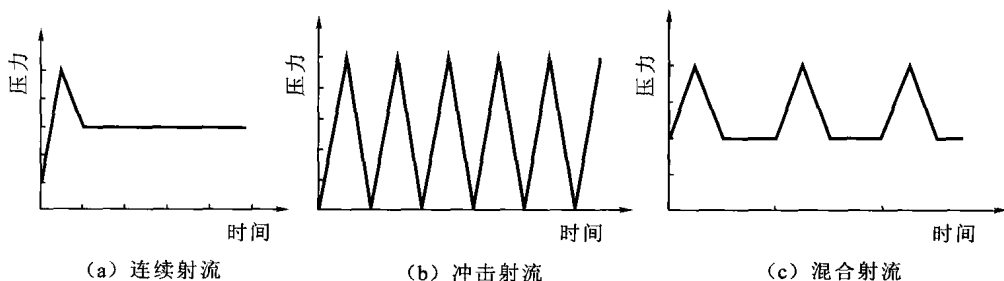


图 1-1 水射流施载特性示意图

1.1.3 水射流技术的应用概况

水射流技术的应用范围和领域十分广泛,工程应用范围主要有表面清洗、工业切割、材料破碎及挖掘、开采和钻探等几个方面^[8]。

1) 表面清洗

高压水射流清洗是物理清洗中的一项重要的高新技术,它根据不同的清洗对象和要求,采用适合的射流形式和执行机构,利用射流很高的冲击动能,连续不断地对被清洗基体进行打击、冲蚀,以剥离、清除污垢,达到清洗基体的目的。

利用水射流清洗汽车、高层建筑物、飞机场跑道、化工厂换热器、管汇、下水道和锅炉等的清洗作业近年来发展很快。世界各国在清洗作业中大都开始倾向采用该技术。据不完全统计,该技术的清洗份额已占总清洗份额的 80% 左右。时至今日,各种清洗机械和清洗设施相继问世,并大量投放市场;各种清洗公司和服务公司也相继成立,已进入蓬勃发展阶段。另外,水射流除锈,清洗油漆、涂料、铸件毛刺等也在各部门得到工业应用。水射流可除去用化学方法不能或难以清洗的特殊垢层,如水垢、

尘垢、锈层、油垢、烃类残渣、各种涂层、混凝土、结焦、树脂层、颜料、橡胶、石膏、塑料、微生物污泥、高分子聚合垢等。在船坞码头对船体进行清洗时,为清除水下海洋生物、油漆和铁锈,现今都采用纯水射流和磨料射流清洗。用纯水射流清洗时使用压力较高(需要达到 140 MPa),而用磨料射流清洗需要解决清洗后磨粒的处理问题,因此,目前正在寻求一种不加磨料而清洗压力又不太高的射流方式来清洗船体上沉积的海洋生物。

与传统的清洗方式相比,水射流应用于表面清洗具有以下优点:

(1) 通过压力等级的恰当选择,在充分满足清洗要求的条件下不会损伤被清洗的基体。

(2) 由于所使用的介质为不添加任何化学物质的常温水,不腐蚀零部件,清洗过后的零部件不像化学清洗那样还需进行洗后处理。

(3) 能清洗形状和结构复杂的零件,易于实现机械化、自动化和智能控制。

(4) 清洗速度比传统的机械方法和化学方法高出 5~10 倍。

(5) 能在空间狭窄、环境复杂、恶劣有害的场合完成常规清洗难以完成的清洗作业,如较长管道的内壁清洗除垢、小口径大容器的内部清洗以及可能发生爆炸的危险物的清洗等^[8]。

2) 工业切割

工业切割用的高压水射流如同一支“水箭”,速度可达音速的 2~3 倍。这种“水箭”的锋利程度远远超过精良的刀具,可以替代常规的金属切割加工、电火花加工及线切割加工,能与激光加工相媲美。

工业切割是水射流技术应用的重要方面,包括纯水射流切割和精密切割(含磨料),其切割和应用领域见表 1-3。

表 1-3 水射流工业切割和应用领域

A. 纯水射流切割需要领域	水射流切割应用领域
(1) 塑料切割	工程塑料成形加工、家电、膜工业
(2) 纸切割	瓦楞纸制品、废品回收、纸尿布
(3) 纤维、纺织品切割	纤维、体育用品、服装业
(4) 橡胶、皮革切割	橡胶、皮革、合成皮革加工工业、鞋业
(5) 食品切割(含冷冻食品)	食品工业、冷冻食品工业、糕点业
(6) 木材、合成材料切割	林业、住宅、室内装潢业
(7) 其他	火药(固体燃料切割)、破冰船(冰切割)
B. 精密切割(含磨料)需要领域	水射流切割应用领域
(1) 金属板切割钛、铝、不锈钢、高强度钢、超合金等	飞机工业、车辆工业、造船业、各种机械工业、钢铁业、有色金属工业
(2) 切割镶网玻璃、彩色玻璃、叠层玻璃	玻璃业、室内装潢业(彩色玻璃等)、广告业、医疗器械制造业等

续表

B. 精密切割(含磨料)需要领域	水射流切割应用领域
(3) 新材料切割 复合材料 陶瓷 其他	新材料相关产业 飞机工业、汽车工业、体育用品业 精陶瓷工业、烧窑业 电子部件、光纤
(4) 建材切割 轻体船、轻质混凝土等	造船业、建筑业
(5) 其他	核能工业、石墨制造工业

与传统的火焰切割、等离子体切割等相比,水射流切割具有以下优点:

(1) 以水为介质,不会产生灰尘及有毒气体,可提供一个清洁及安全的操作环境,而且成本低。

(2) 由于水流极细,使用高压水切割可提供良好的切边品质,所加工物料无裂缝、无毛边、无浮渣,切口小且平整,不产生热效应,切缝可以达到较高的精度。

(3) 适应性强,切割范围广,既可以切割花岗岩、玻璃、钢材及合金等硬质材料,又可以切割布料、纸板、皮革等软材料及易变形材料。

(4) 不会发热,切割产生的碎屑和热量被水携带走,切口表面光洁,无飞粒伤人的危险。

(5) 可以同机器人配合,利用计算机控制,进行三维曲面的复杂形状加工。

3) 材料破碎

密苏里罗拉大学的研究表明,高压水射流在使用上还有很大潜力,它可将煤块粉碎成细小颗粒以便进行清洗和生产清洁的燃料,还可用水力制浆法分离木纤维^[1]。

但是由于在高压水射流冲击下物料颗粒所受的作用力非常复杂,目前对于引起粉碎的主要作用机理尚未形成统一看法,但这些都不能掩盖水射流对物料的破碎能力。目前,水射流破碎作用已经应用到多项工程领域。

水射流破碎在大幅度降低粉碎能耗的同时,还可以制备高质量、高纯度、保持颗粒的原始结晶形状与表面光泽的超细粉体。该粉碎技术以其简单的设备结构、良好的节理与分离特性,以及清洁、节能、高效等优点而成为一项新型粉碎技术,近20年来不断发展并在工业中得到了初步应用。

水射流与传统的材料破碎方法相比,其应用于材料破碎的优点有:

(1) 高压水射流的工作介质是水,丰富易取、价格低廉。

(2) 高压水射流破碎物料后的废水同时具有携带废屑的能力,可简化排屑装置。

(3) 通过调节高压水射流的压力及流量,可以方便地改变水射流的工作条件,以适应不同的作业要求。

(4) 高压水射流的工作机构具有喷头体积很小、后坐力小、移动方便的特点,便于实现光控、数控或机械手控制。

4) 挖掘、开采和钻探

世界上第一口水力采煤矿并于 1939 年在前苏联投入开采,日本、美国和英国等国家也很重视水射流在破岩掘进等方面的应用。发展至今,水射流技术已被广泛应用于挖掘、开采和钻探系统中。

水射流技术应用于煤炭工业中大大提高了岩石的掘进速度(见表 1-4)^[9]。

表 1-4 大理石掘进试验

掘进方式	普通掘进	水射流辅助掘进
掘进速度/(mm·min ⁻¹)	438.7	572.9

与其他纯机械挖掘、开采技术相比,水射流技术应用于挖掘、开采和钻探作业中
有以下优点^[9]:

(1) 射流在钻头前面切割,因此钻头自身机械磨损较小,即使在高磨损的砂岩中,其寿命也比常规刀具钻头长 5 倍以上。

(2) 以水为介质,不会产生灰尘及有毒气体,并减少了瓦斯爆炸的可能,可提供
一个清洁及安全的操作环境,而且成本低。

(3) 由于所使用的介质为不添加任何化学物质的常温水,不会腐蚀污染矿藏。

(4) 可以根据不同的产层,调节得到不同的压力等级,在满足压力要求的同时最
大效率地实施挖掘、开采作业,不损害产层,有利于持续高效开采。

(5) 水射流钻孔时施加的压力很小,这就意味着与常规钻机相比,只需更轻、更
小的设备,大大降低了系统和操作成本。

现代高压水射流技术从最初的探索性试验到目前较为广泛的工业化应用,其发
展历史不过 30 多年的时间,充分体现了这项技术的强大生命力和显著的优越性,相
信随着人们对水射流工作机理认识的不断深入,水射流技术必将迎来更大的发展。

1.2 高压水射流破岩机理研究概况

1.2.1 高压水射流切割岩石理论模型

高压水射流切割岩石模型是水射流破岩理论研究的一个重要方面,目前这方面
的工作仅限于半经验、半理论的研究,影响较大的有 Crow 和 Rehbinder 水射流切割
岩石理论模型。

1) Crow 水射流切割岩石理论模型

Crow 水射流切割岩石理论模型对岩石特性的考虑较为全面,包括岩石晶粒的
大小、岩石的渗透率、岩石的孔隙度、剪切应力、内摩擦系数和库仑摩擦系数等。理论
推导以高速水流和岩石颗粒之间存在气蚀现象的假定为前提。Crow 运用经验系数
法令作用在颗粒上的剪切应力等于颗粒两端的压力差,但确定这些系数需要理论和