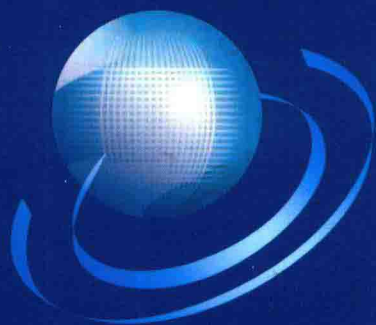


高压水射流技术 基础及应用

康灿 刘海霞 杨敏官 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高压水射流技术基础及应用

康 灿 刘海霞 杨敏官 龚 辰 王育立 著

机械工业出版社

本书运用简洁的语言阐述了高压水射流技术的理论基础、测试手段和数值模拟等多个方面的内容,同时对水射流技术应用实例、受水射流冲击的材料分析、超高压水射流等交叉学科内容和学科前沿内容进行了专门阐述。内容包括射流技术、射流的基本理论、水射流的研究方法、三种水射流类型和超高压水射流。

本书可作为动力工程及工程热物理学学科尤其是流体机械及工程专业方向的高年级本科生和研究生教材,对在机械、材料领域从事材料表面强化、工业清洗和材料切割等研究工作的人员也具有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高压水射流技术基础及应用/康灿等著. —北京:机械工业出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-111-51825-9

I. ①高… II. ①康… III. ①水射流破碎-研究 IV. ①TD231.62

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第245360号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 安桂芳 任正一

版式设计:赵颖喆 责任校对:纪敬

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京中兴印刷有限公司印刷

2016年3月第1版第1次印刷

148mm×210mm·5.25印张·144千字

标准书号:ISBN 978-7-111-51825-9

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

水射流技术是流体工程领域内具有代表性的应用技术之一。随着射流压力从不足 1MPa 增加到接近 800MPa, 水射流的表现形式从完全弥散的雾状、具有雾状边缘的流束、集聚的流束一直到可以切割金属的“水刀”, 其中的射流机制及能量特征存在着很大的差别。水射流技术的应用涉及农业、工业、能源、交通、航空航天等与国民经济发展密切相关的领域。目前, 国内外缺少针对高压水射流的专门教材及著作, 也缺少对近十年间该技术发展过程的总结性文献。高压水射流技术从 20 世纪中期开始应用到现在, 无论是研究水平还是研究方法与手段, 均取得了长足的发展。世界范围内的高压水射流技术应用及射流装备已经达到了相当高的水平。

本书运用简洁的语言阐述了高压水射流技术的理论基础、测试手段、数值模拟等多个方面的内容, 同时对水射流技术应用实例、受水射流冲击的材料分析、超高压水射流等交叉学科内容和学科前沿内容进行了专门阐述。本书注重对水射流的应用基础研究成果进行总结与归纳, 力求为读者提供清晰、明确的理论与技术依据。本书中重点讨论的数值模拟和试验研究对流体工程领域内的相关研究具有一定的借鉴价值。本书可作为动力工程及工程热物理学学科尤其是流体机械及工程专业方向的高年级本科生和研究生教材, 对在机械、材料领域从事材料表面强化、工业清洗和材料切割等研究工作的人员也具有很高的参考价值。

全书共分为 6 章, 其中第 1、2、4 章由康灿教授编写, 第 3 章由刘海霞博士后和龚辰博士共同编写, 第 5 章由杨敏官教授和王育立博

士共同编写，第6章由康灿教授和龚辰博士共同编写，全书由康灿教授统稿。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目：超高压淹没水射流剪切层空化机制与激励特性研究（编号：51376081）、高压淹没水射流强化材料表面机理及尺度效应研究（编号：51205171）、空化射流过程中空泡尺度对空蚀机理的影响（编号：50806031）、介观超高压射流的界面流动及失稳机理研究（编号：51176065），江苏省重大科技成果转化项目：柔性超高压水切割系统研发及产业化（编号：BA2009001），江苏省博士后基金项目：超高压淹没水射流冲刷材料表面的流动机制（编号：1201026B）和江苏省动力工程及工程热物理优势学科建设项目的支持，在此一并表示感谢。

由于本书涵盖的知识面宽，对于每一个专题的阐述难以达到详尽的程度，感兴趣的读者可以根据书中所列的参考文献对专门问题进行深入探究，也可以与本书作者联系和讨论，作者真诚地欢迎广大读者提出宝贵的意见和建议。

著 者

目 录

前言

第 1 章 射流技术	1
1.1 射流的分类	3
1.2 水射流技术的发展	6
1.3 水射流技术的工程应用	8
1.4 影响水射流技术发展的关键因素	10
第 2 章 射流的基本理论	13
2.1 射流的流体动力学特征	13
2.2 层流射流理论解析	17
2.3 湍流射流理论解析	21
第 3 章 水射流的研究方法	27
3.1 水射流系统	28
3.2 PDPA 技术	30
3.3 PIV 技术	35
3.4 高速数码摄像技术和 PLIF 技术	36
3.5 残余应力与表面轮廓检测技术	41
3.6 与水射流相关的无量纲数	46
3.7 数值模拟的应用	48
第 4 章 三种水射流类型	52
4.1 圆柱水射流	52
4.2 扇形水射流	58
4.3 中心体自由水射流	69
4.4 中心体自由水射流的启动过程	80
4.5 中心体淹没水射流	82

4.6	中心体喷嘴射流的数值模拟	89
4.7	空蚀的研究	97
第5章 超高压水射流		104
5.1	超高压水射流基本流动特征	104
5.2	超高压水射流的速度分布	110
5.3	喷嘴流道内的磨损	113
5.4	高压磨料射流	114
5.5	超高压射流的数值模拟	124
5.6	超高压磨料射流冲蚀固体壁面的数值模拟	132
第6章 高压水射流的工程应用		142
6.1	水射流的强化作用	143
6.2	高压水射流在清洗作业中的应用	148
6.3	高压水射流在切割方面的应用	152
参考文献		160

第1章 射流技术

射流是一种流动行为，在自然界和工程领域中广泛存在。一般来说，射流的形成需要具备四个要素：工作介质、驱动力（一般称为射流压力）、喷嘴或孔口、环境介质。尽管从表面上看，射流现象属于较为简单的流动现象，射流理论也相对直观，但结合目前射流的工程应用水平来审视人们对射流技术的掌握情况，远非完善。自 2000 年以来，在国际范围内开展的一些射流研究工作明确指出射流的复杂程度在不断提高。射流的工作介质涵盖了多相流体和非牛顿流体；射流的工作压力达到了超高压的水平，且该水平的上限不断被刷新；射流束的初始特征尺度达到了小于 1.0mm 的量级。这些技术内容和技术指标对传统的射流研究方法、甚至是现代的研究仪器和手段，都提出了有力的挑战。如果对 19 世纪初以来的射流研究文献进行检索，可以清晰地辨识出射流研究走过的路程。国际上有两个著名的流体力学学术期刊：《Journal of Fluid Mechanics》和《Annual Review of Fluid Mechanics》，其中刊登了很多经典的射流研究论文，包括一些综述性的射流研究论文，读者可以借此对全世界范围内的射流研究进展进行归纳。射流还在一些交叉学科领域（如化工、能源、环境、医学等）扮演着重要角色。理论研究和工程实践相结合为射流技术的发展提供了有力的支撑。

本书的内容侧重以水作为射流工作介质，即通常所说的水射流，也包括水和磨料混合的射流工作介质。值得一提的是，当水射流压力水平在 1MPa（约相当于 145psi）或更低时，相关的研究设备和测量仪器完备，且该范围内的水射流的应用较为成熟；在运用传统的射流

理论得到的解与试验结果之间已经建立了确定性的关联。相对而言，对高压水射流的认识较欠缺，试验条件不充分，研究方法的局限性明显，验证相关理论的难度较大。关于水射流的工作压力，不同的文献资料中对低压、高压、超高压的定义有所不同。一般来说，水射流压力在 35MPa（约相当于 5000psi）以下的射流为中低压水射流；水射流压力是 35 ~ 276MPa（约相当于 40000psi）的水射流为高压水射流，超高压水射流的压力范围是 276 ~ 689MPa（约相当于 100000psi）甚至更高。当水射流的压力不同时，射流束的形态存在着明显的差异。图 1-1 所示为当射流的压力从小于 1MPa 增加到 100MPa 时，自同一圆柱喷嘴喷射出的水射流流束图像。对于一般的水射流装置，当水射流工作压力增加时，喷嘴内的工作介质的流量相应增加，水射流流束从低工作压力时的清晰流束过渡成为高工作压力时的由雾状扩散区与中间集聚区共同组成的流束形态。在水射流现场，人们可以感觉到随着射流压力的增加，射流周围的环境噪声声压级明显提高。图 1-1 中的各个图像由普通数码照相机拍摄得到，故只能借之定性地比较水射流流束的形态。

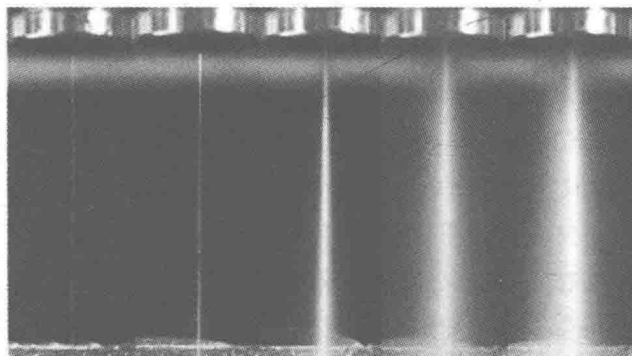


图 1-1 不同工作压力条件下的水射流流束形态

在英文中，指代水射流时一般用 water jet 这一单词，而单词 waterjet，即 water 与 jet 之间无空格，一般特指用于切割的水射流，即通常所说的“水刀”。另一种更为形象的英文表述中，用 water jet cutter

表示“水刀”。水射流工作压力水平是全世界水射流研究人员和工程人员关注的焦点之一,该指标实际上也代表着水射流技术的应用水平。目前,产生600MPa(约相当于87000psi)工作压力的水射流系统的制造技术已比较成熟。同时,国内外都在致力于800MPa(约相当于116000psi)超高压水射流系统的技术攻关。单从产生射流工作压力的核心设备——增压泵来看,其可实现输出压力已经达到1000MPa(约相当于145000psi)的水平。

1.1 射流的分类

射流的类型多种多样,对射流进行严格的分类并非易事。此处,在诸多射流文献资料的基础上,列举几种常见的射流分类方法。

1. 按最基本的工作介质分

按最基本的工作介质可分为液体射流和气体射流。

2. 同时考虑工作介质和环境介质

同时考虑工作介质和环境介质可分为淹没射流和非淹没射流。

射流的工作介质与环境介质相同时,该射流称为淹没射流,如纯水射流喷射到纯水环境中,空气射流喷射到具有与之相同的物理属性的空气中,均为淹没射流。反之,则为非淹没射流,如纯水射流喷射到空气中。

3. 按工作介质射入的空间分

按工作介质射入的空间可分为无界射流和有界射流。

射流工作介质进入的空间中,若存在固体壁面且固体壁面对射流的发展构成了影响,则该射流为有界射流;若固体壁面对射流的发展并无明显影响,则可认为是自由射流或无界射流。射流喷向无限大空间,而且射流工作介质与环境介质具有相同的物理属性,则称为自由淹没射流。

4. 按射流束的初始形状分

按射流束的初始形状可分为圆柱射流、平面射流、扇形射流和环

形射流等。

射流束的初始形状一般定义为射流束离开喷嘴出口断面时的流束断面形状。毋庸置疑,射流束的初始形状与喷嘴的出口断面形状有着直接的关系。最常见的圆柱射流是自出口断面为圆形的喷嘴喷出的。同时,该类喷嘴的典型内流道形状如图 1-2a 所示。而平面射流和扇形射流一般是自扁平喷嘴或能产生明显扁平流束的出口断面喷出的,如图 1-2b 所示。平面射流的应用范围广,近年来在工业清洗行业的应用尤为突出。平面射流这一术语为一定性描述,并无流束断面长宽比的明确界定。在本书中还重点提到了一种环形射流,其出口断面呈环状,相当于在圆形喷嘴内流道内设置了一个圆柱体,射流从圆柱体外表面与圆形喷嘴内流道之间的环形通道喷出,如图 1-2c 所示。随着圆柱体在喷嘴内流道内缩进的程度不同,喷射出的流束的初始形态也不同。还有一些应用场合中,将圆柱体内部也加工出空心的流道,此时,圆柱体的内外有两股工作介质同时经过,该两股介质的速度和物理属性可以不同,两股介质在环形喷嘴的出口将产生相互作用。除以上三种喷嘴外,还有多种出口断面形状不同的喷嘴,它们各具特点,以满足不同场合的应用要求。

5. 按射流流态分

按射流流态可分为层流射流与湍流射流。

众所周知,对流体流动状态的最基本分类方法是划分为层流与湍流,而对层流射流与湍流射流的定义仅仅是一种定性的区分。即使统一以喷嘴出口断面的当量直径作为特征长度来定义射流雷诺数,也没有统一的雷诺数标准来区分层流射流与湍流射流,部分文献认为射流雷诺数大于 2000 即为湍流射流。

6. 按射流工作介质的组分分

按射流工作介质的组分可分为单相射流与多相射流。

通常所说的水射流和气体射流均属于单相射流,多相射流也普遍存在。例如,考虑微米级的流动尺度,水中的空化核将不能被忽略,当这些空化核受到外界因素激发而长大后,将产生一种典型的多相射

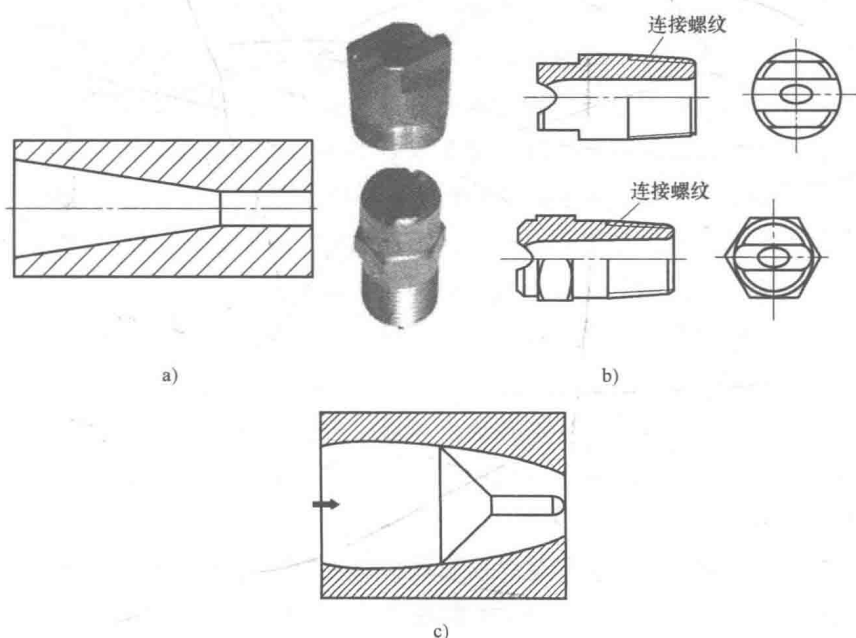


图 1-2 各种喷嘴内流道形状

a) 圆形喷嘴的内流道 b) 平面射流和扇形射流的内流道 c) 环形射流的内流道

流——空化水射流，空化水射流如果控制得当，能够对固体材料表面进行强化，能够冲蚀固体材料，还可以瞬间破坏坚硬的固体材料。又如液固两相射流，用于水射流切割作业的加砂水射流即属于这一射流类型。由于该种射流中的固体砂粒在使用前经过筛分，尺寸较为均匀，故可以认为此时的射流工作介质的组分只有两种。如果固相的尺寸跨度大，固相颗粒之间的运动属性相差大，则液体和固体颗粒组成的介质将属于明显的多相流体。本书中将磨料射流归入水射流的讨论范围。另外还有气固两相射流，如在与煤燃烧相关的燃烧器中，常将空气与煤粉混合形成的气固两相流体一起喷射至炉膛内。

7. 按射流喷出的方向分

按射流喷出的方向可分为直喷射流、切向射流和旋转射流。

一般的射流从喷嘴出口喷出时只有一个轴向速度分量，此类射流

称为直喷射流。有的喷嘴为了提高作用效果，在同一个喷嘴上布置了多个切向出口，喷出的射流为多股切向射流，如清洗化工容器用的多孔喷嘴产生的射流。另一种为旋转射流，采用驱动机构使射流喷嘴绕既定的轴线旋转，喷出的射流受喷嘴的影响而具有圆周速度分量。值得注意的是，对于切向射流和旋转射流，其射流的切向速度分量不为零，因此一般的二维射流研究方法不适用。另外，由于射流束与周围环境流体相互作用的空间性增强，切向射流和旋转射流流束边缘的非定常流动结构形态及演化过程更为复杂。

8. 其他的射流分类方法

按射流场有无外加场的作用也可进行分类，如在射流场中加设环状电极产生周向均匀的电场效应而产生荷电射流；在射流流入的空间中降低环境压力则会产生低围压射流；射流喷射到运动方向与射流方向垂直的流体中，则会产生横向射流。此外，按产生射流的驱动力还可将射流分为动量射流（最为常见的射流）、浮力羽流和浮力射流等，这些射流种类多与特定的应用要求密切关联，感兴趣的读者可以参考相关的资料。

以上列举的射流的分类方法并不是相互独立的，相互之间可以有交叉，如圆柱射流可以是圆柱自由射流，也可以是圆柱淹没射流；旋转射流可以是旋转单相射流，也可以是旋转气液两相射流。这些形形色色的分类方法从另一个角度证实了射流应用的广泛性。

1.2 水射流技术的发展

理论为技术进步提供着强有力的支撑，在射流领域也不例外。传统的射流理论在今天看来仍然具有很强的权威性，现在的射流研究仍然以寻找射流的自相似性、动量的沿程变化规律、剪切混合机理等为主体框架，其中也不乏探索射流稳定性、相干结构、湍流能谱、湍流尺度的研究成果出现。随着光学测量技术的迅速发展和数值模拟方法的长足进步，射流的研究向着更精确的层面发展，这种精确不但意味

着射流流束及环境流场中的小尺度信息被更多地挖掘,也预示着定量化的射流关系式被更多地构建起来。本书的侧重点在于中高压水射流,这一射流范畴中存在的科学问题和技术问题更为复杂,单纯从理论模型的建立或是从新型射流装备的出现来评价中高压水射流技术的发展水平不尽合理。目前已经发现中高压水射流存在着自身的特点,明显区别于低压水射流,有些特点用传统的射流理论并不能准确地描述。但是,与中高压水射流技术相关的产品的商业化进程却迅速推进,这其中更多的是经验公式起主导地位,而对于流动参数分布与产品性能之间的关联,尚有很大的探索空间。

从工程应用的角度来看,水射流技术最明显的优势是冷态作业,即不会在被作用固体材料表面产生热变形和再铸层等问题,这一优点是普通的机械加工、线切割和激光加工所无法比拟的。例如,在一些废弃炮弹的切割作业中,水射流是迄今为止最佳的切割工具。除这一优势外,根据工程流体力学中经典的伯努利方程估算水射流的初始流速,400MPa(约58000psi)的射流压力就能产生初始速度超过800m/s的水射流。可想而知,水射流与被作用固体材料表面接触时,由于滞止压强而产生极大的瞬时冲击力。工程实践证明,目前的超高压磨料射流,即水射流中夹带磨料颗粒的射流,几乎可以切割任何工程材料,这一应用完全避免了机械加工中的刀具损伤。水射流技术已在应用中产出了十分可观的经济效益。

利用高压水射流切割纸张的实践始于20世纪30年代左右,而在同一时段,磨料射流喷嘴的概念就被提出,但当时提出的磨料射流喷嘴轴向尺寸太小,不适于商业化。20世纪50年代,690MPa(约相当于100000psi)的纯水射流开始被应用于切割航空金属材料。20世纪80年代,混合管被引入超高压磨料射流喷嘴,磨料射流加工开始得到普遍应用。图1-3所示为目前常用的超高压磨料射流喷嘴组件结构示意图,其不单纯是单个部件,而是由多个部件组合而成的整体。高压纯水经由宝石喷嘴后得到加速,然后进入混合室,磨料由于重力和压差的作用而进入混合室,在混合室内纯水与磨料进行混合形成液固

两相工作介质，该工作介质经过一段较长的混合管后喷射到环境中。该喷嘴组件的结构看似简单，其内部的液固两相混合过程却极其复杂，与多种因素相关联。由于喷嘴组件的整体尺寸小，且射流压力导致的危险程度高，对混合室内的液固两相流动开展光学测量的难度极大。而且，即使开展磨料射流喷嘴模型试验，受到超高液体流速、介质压缩性等参数的影响，流体力学试验中常用的相似性换算准则并不能合理地解释模型试验结果与原型性能参数之间的物理关联。

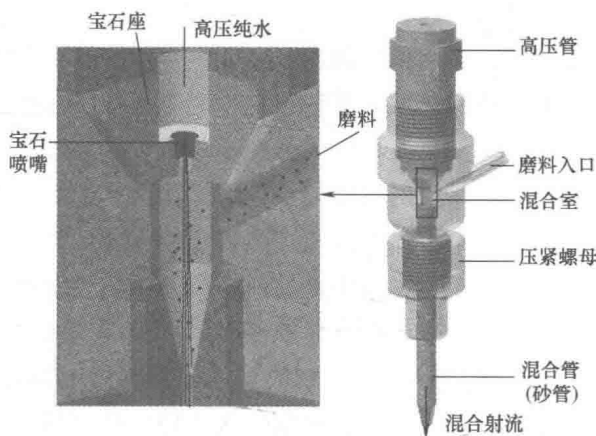


图 1-3 超高压磨料射流喷嘴组件结构示意图

在工程应用中，混合管内壁的磨损是一个非常突出的问题。目前混合管的材质多采用陶瓷或硬质合金材料，但由于磨料颗粒的形状不规则、速度高，构成了破坏混合管的强有力因素。

1.3 水射流技术的工程应用

在水射流装备向着智能、安全、高效、多功能、精细等方向发展的过程中，水射流技术渗透的领域也逐渐扩大，如农药喷洒、换热器内壁除垢、船体除锈、药剂注射、采矿、材料表面强化、冷冻食品切割、液晶面板切割、汽车装饰材料切割、石材加工、金属切割等。限

于篇幅，此处仅列举两类射流应用的例子。

1. 射流清洗（图 1-4）

在清洗方面的应用是水射流技术成功应用的一个重要方面。在换热器、机场跑道、船体的清洗作业中已广泛应用了水射流技术。除垢、除锈、除油漆是体现水射流清洗能力的三个重要内容。在水射流清洗作业中可采取的有效策略很多，通过提高射流工作压力来提高清洗能力是一个重要的手段。采用普通的喷嘴进行除锈作业通常需要 120MPa（约 17000psi）以上的工作压力；如果在水射流中加入磨料，也可以达到除锈的目的，但潜在的风险在于，这种射流可能会破坏本底材料。还有一种方法为空化水射流清洗，该项技术在淹没状态下具有很好的应用前景。当高速水流喷射到纯水环境中，空化泡可能会产生于工作介质和环境介质之间的速度剪切层内，借助空化泡瞬间溃灭产生的冲击力而达到清洗固体表面的目的。除此之外，采用多孔喷嘴来清洗罐内壁上的污垢也是一种很好的方法。采用多股水射流同时喷射增加了水射流与罐内壁的接触面积，提高了清洗效率；如果采用多孔旋转喷嘴，清洗效果和清洗效率将会进一步提高。2013 年 9 月，在美国休斯敦举行了美国水射流技术协会（WJTA）学术会议。期间，像 Hammelmann、StoneAge、WOMA 等世界知名公司均展出了自己在工业清洗方面的产品与技术，水射流清洗装备的技术水平已发展到了新的高度。



图 1-4 射流清洗作业（图片来源：<http://www.directindustry.com>）

2. 射流切割 (图 1-5)

在与汽车制造、航空航天、机械、新材料相关的领域内,水射流切割早已显露出其独特的优势。水射流切割的工作压力及工作介质需根据被切割材料进行相应的调整。若切割塑料、冷冻肉类食品、木材等软性材料,纯水射流一般即可满足要求。但若切割液晶面板、汽车内装饰材料、金属等,磨料射流将是最好的选择。同时,拟达到的切割表面粗糙度也是水射流切割的重要技术目标之一。为实现这一目标,水射流工作压力、靶距、喷嘴与工件之间的相对运动速度、射流方向与工作表面之间的角度等需要综合考虑。由于没有可借鉴的成熟关系式来指导这些参数的选取与组合,在多数场合,都要靠反复试验来满足相应的要求。另外,多家射流装备制造公司都将可切穿的工件厚度作为体现装备技术水平的参数指标。如 Huffman 和 Flow 公司生产的磨料射流切割系统均能切割厚度在 25cm 以上的金属板料。

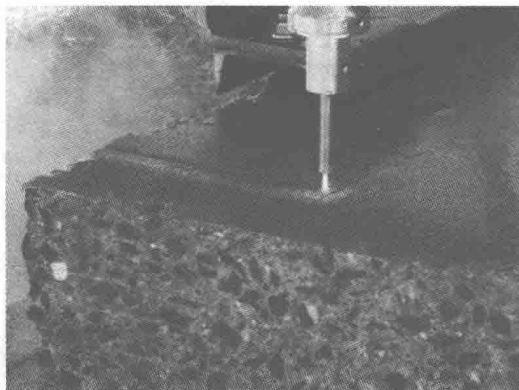


图 1-5 射流切割作业

(图片来源: <http://www.yankeefiber.com>)

1.4 影响水射流技术发展的关键因素

从近年来发表的关于水射流技术基础及应用的研究论文可以看出,绝大部分水射流的研究均针对特定的工程应用,普适性的结论以