



高压水 射流技术 与应用

薛胜雄 等 著

机械工业出版社

高压水射流技术与应用

薛胜雄 黄汪平 陈正文 著
樊毅斌 彭浩军 章小浒



机械工业出版社

高压水射流技术以水射流为中心,集泵、阀、密封、液压、自动化控制等多学科为一体,广泛应用于各工业部门的清洗、除锈、切割等作业。

本书分为基础理论、设计研究、应用发展三个部分,着重总结了高压水射流技术的设计新思路、试验新成果、成套新装备、应用新经验,以大量篇幅介绍了高压水射流成套设备及其各个部件的设计原理和结构特点、水射流技术的各种应用实例,还介绍了提高水射流性能的新方法、运行与安全以及水射流设备的标准等。

本书可供从事水射流技术的研究、设计、生产、应用和经营者使用,也可作为大专院校机械工程专业和流体工程专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压水射流技术与应用/薛胜雄等著. —北京:机械工业出版社,1998. 8

ISBN 7-111-06276-0

I. 高… II. 薛… III. 高压注水-射流技术 IV. TP6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 07577 号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李正民 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟

封面设计:姚毅 责任印制:王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·19 印张·3 插页·501 千字

0 001—2000 册

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

当今，应用高压水射流技术进行清洗、除锈、切割已遍布世界发达国家，成为一项通用的新技术、新工艺。

高压水射流技术以水射流为中心，集泵、阀、密封、液压、材料、自动化控制等多学科为一体。近年来，随着大型化智能化、专用化装备的发展，高压水射流技术渗透到各个应用领域：从一般机械零件、建筑物的清洗到以管道、管束、容器为主的工业清洗，从机场跑道除胶到船舶除锈，从金属、非金属板材切割到曲面仿形切割，从水力采煤到开采岩石，从喷射注浆到破碎路面，从无刀手术到水幕电影……，林林总总，蓬蓬勃勃。自1972年第一次国际水射流技术会议召开到90年代中后期水射流技术在各个应用领域以柔克刚、游刃有余，真可谓荡浊还新射流急，金石可镂水刀奇。

然而，高压水射流技术毕竟是一门年轻的、综合的学科，尽管每年国际、国内都有学术、信息交流活动，但系统地论述高压水射流技术的专著并不多见。笔者试图在总结前人经验的基础上，结合自己的研究工作，将焦点集中在各类水射流产品的设计与应用方面，直面被人们讳莫如深的系统结构设计，充分展示高压水射流技术的设计新思路、试验新成果、成套新装备、应用新经验。本书的著成，得益于笔者多年从事的这项新技术、新工艺，得益于国内外同行的关心和支持，得益于培养作者的机械工业部合肥通用机械研究所。

本书分为基础理论、设计研究、应用发展三个部分。由薛胜雄主持编著。薛胜雄著第1、3、4、5、6、7、8、18章和11.6、14.1、14.2、14.3节；黄汪平著第9、10、16章和11.1、11.2、11.3、11.5、14.4节；陈正文著第2、17章和14.2节；樊毅斌著第12、

13章和14.6、14.7节；彭浩军著第15章和11.4、14.5、14.8节；章小浒著第4.5、4.6节。薛胜雄、黄汪平审核。余乔生承担全书文字打印工作。

高压水射流技术正在以前所未有的速度向前发展，国际会议年年出新，国内行业稳步直追。限于作者的技术水平和经验，于广度、于深度都显不足，而且成文也难免缺陷，敬请读者斧正。

谨以此书献给关心水射流技术的人们！

薛胜雄

1998年2月24日于合肥

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 水射流概念	1
1.2 水射流的历史回顾	3
1.3 水射流分类	5
1.4 水射流的应用	9
参考文献	13
第 2 章 水射流理论基础	14
2.1 射流流体力学基础知识	14
2.2 射流结构与基本参数	22
2.3 射流打击力	32
2.4 射流液滴与材料的相互作用过程	36
2.5 材料的失效机理	39
2.6 射流切割理论浅析	42
参考文献	47
第 3 章 水射流成套设备	48
3.1 高压清洗机	48
3.2 超高压水切割机	54
3.3 微型清洗机	57
3.4 小型清洗机	59
3.5 高温清洗机	61
3.6 通过式清洗机	63
3.7 下水道清洗车	65
3.8 机场跑道除胶车	68
3.9 浆料射流设备	71
3.10 水炮	75
参考文献	83

第 4 章 高压水发生设备	84
4.1 总体设计	84
4.1.1 型式与结构	84
4.1.2 确定主要参数	89
4.1.3 泵的整体布置	92
4.1.4 系列化设计	94
4.2 高压泵	95
4.2.1 泵的传动端	95
4.2.2 泵的液力端	99
4.3 超高压泵	104
4.4 增压器	106
4.5 高压系统零件材料	110
4.5.1 高强度金属材料的选用	110
4.5.2 高强钢的生产工艺	112
4.5.3 材料的质量检验	114
4.6 自增强处理工艺	114
4.6.1 最佳自增强压力	115
4.6.2 自增强处理方法	117
4.7 液压试验	118
参考文献	120
第 5 章 阀	121
5.1 安全阀	121
5.2 调压溢流阀	126
5.3 控制阀	131
5.3.1 脚踏控制阀	131
5.3.2 气动控制阀	133
5.3.3 双联阀	135
5.4 喷枪	138
5.4.1 截流型喷枪	138
5.4.2 溢流型喷枪	141
5.4.3 平衡型喷枪	145
5.4.4 旋转型喷枪	145
5.5 超高压阀	147

5.6 其它阀	149
5.6.1 单向阀	149
5.6.2 手动截止阀	151
参考文献	151
第 6 章 密封	152
6.1 静密封	152
6.1.1 O形圈密封	152
6.1.2 垫圈	156
6.2 旋转密封	160
6.3 往复密封	162
6.3.1 填料密封	163
6.3.2 间隙密封	167
6.3.3 组合密封	171
6.4 密封的失效	174
参考文献	176
第 7 章 喷嘴	177
7.1 射流功率	177
7.2 喷嘴型式	180
7.2.1 低压喷嘴	181
7.2.2 高压喷嘴	186
7.2.3 超高压喷嘴	194
7.3 喷嘴的计算	195
7.4 喷嘴性能及其失效判据	204
7.5 空化喷嘴	209
7.6 喷嘴的材料与工艺	214
7.7 射流性能的检测	218
参考文献	221
第 8 章 喷头	223
8.1 固定喷头	223
8.2 强制旋转喷头	229
8.3 二维自转喷头	234
8.4 平面清洗器	241
8.5 三维旋转喷头	244

8.6	旋转接头	247
8.7	真空喷头	250
8.8	水切割喷头	257
	参考文献	262
第 9 章	配管与联接	264
9.1	高压软管及其总成	264
9.1.1	对高压软管的要求	265
9.1.2	高压软管总成接头型式	267
9.2	超高压软管及其总成	270
9.3	高压软管的使用	271
9.4	超高压硬管	275
9.4.1	对超高压硬管的要求	275
9.4.2	超高压硬管的端部螺纹	277
9.4.3	超高压硬管的弯曲	279
9.4.4	超高压硬管的应用	280
9.5	联接	284
9.5.1	管件的联接	285
9.5.2	高压零件的联接	288
	参考文献	290
第 10 章	磨料射流装置	291
10.1	磨料射流原理	291
10.2	磨料射流系统	294
10.2.1	磨料水悬浮液射流系统	294
10.2.2	磨料水射流系统	295
10.2.3	磨料浆液射流系统	298
10.3	磨料喷头	299
10.4	磨料喷嘴	303
10.4.1	磨料喷嘴材料	303
10.4.2	磨料喷嘴的磨损	306
10.5	磨料	310
10.5.1	磨料的种类和性质	310
10.5.2	磨料的形状和粒度	311
10.5.3	磨料特性对射流切割的影响	313

10.5.4 磨料的选择原则	314
参考文献	314
第 11 章 其它附件	316
11.1 水质及其处理装置	316
11.2 切割平台	319
11.3 水切割的自动化控制	324
11.4 接收器	329
11.5 稳压容器	331
11.6 缘壁切割机	338
参考文献	342
第 12 章 工业清洗应用	343
12.1 工业清洗方法	343
12.2 有效清洗的参数控制	346
12.3 管束的清洗	351
12.3.1 换热器管程的清洗	351
12.3.2 换热器壳程的清洗	355
12.4 跟踪管道自进清洗	357
12.5 管道内外表面同步清洗	363
12.6 容器的清洗	367
12.7 平面清洗	373
12.8 水下清洗应用	375
12.9 轮毂清洗装置	379
12.10 危险场合的清洗	380
参考文献	385
第 13 章 工业除锈应用	386
13.1 除锈应用标准	386
13.2 磨料水射流除锈(鳞)	390
13.3 纯水射流除锈(漆)	395
13.4 除锈工艺的比较	403
13.5 铸件清砂	405
参考文献	406
第 14 章 工业切割应用	408

14.1	射流切割的技术参数	408
14.2	影响射流切割的因素	415
14.3	水射流与磨料射流切割	424
14.4	射流加工技术	435
14.4.1	磨料射流车削加工	435
14.4.2	磨料射流铣削加工	439
14.4.3	磨料射流钻孔技术	445
14.4.4	磨料射流抛光技术	450
14.5	岩石爆破与切割	452
14.6	切割工艺的比较	455
14.7	水切割实例	461
14.8	水切割技术的发展趋势	467
	参考文献	471
第 15 章	其它应用	474
15.1	土方工程	474
15.2	冻土与冰的破碎	478
15.3	水射流注浆	480
15.4	混凝土切割与道面破坏	490
15.5	水力采煤技术应用	498
15.6	水射流钻孔	503
15.7	水射流除尘	509
15.8	水射流辅助采油	513
15.9	水射流用于医疗	518
	参考文献	521
第 16 章	提高水射流的性能	523
16.1	改变工作介质的特性	523
16.2	气包水射流	527
16.3	间断射流	528
16.4	空化射流试验研究	532
16.5	电液脉冲射流	537
16.6	低温射流	540
16.7	690MPa 超高压水射流	546
	参考文献	549

第 17 章 运行与安全	551
17.1 设备的运行	551
17.2 故障排除及维修	551
17.3 安全与防护	559
17.4 作业安全规范	571
附录 A 高压水射流清洗作业准备工作操作清单	576
参考文献	577
第 18 章 水射流设备标准	578
18.1 标准体系	578
18.2 基本参数	579
18.3 技术条件	581
18.4 试验方法	587
18.5 超高压泵	590
参考文献	593
后记	594
作者简介	595

第 1 章 概 论

1.1 水射流概念

人们虽用滴水穿石形容持之以恒必有所得，但滴水的确可以穿石。中国古代已发现了液滴凭借自由落体运动赋予的质量打击力来击穿岩石这一漫长的现象。随着科技的发展，人们给液滴赋予了比自由落体运动大得多的打击能量，使持之以恒才能观察到的滴水穿石现象在瞬间便可完成。这就是水射流。

一束从小口径孔中射出的高速水射流作用在材料上，可以其具有的足够能量进行材料清洗、剥层、切割，液体的这种性能激励着各国研究人员去开拓“用水作业”的新方式，将水射流的动能变成去除材料的机械能。

水射流是由喷嘴流出形成的不同形状的高速水流束，射流的流速取决于喷嘴出口截面前后的压力降。

水射流是能量转变与应用的最简单的一种形式。通常，动力驱动泵通过对水完成一个吸、排过程，将一定量的水泵送到高压管路，使其以一定能量到达喷嘴。而喷嘴的孔径要求比高压管路直径小得多，因此到达喷嘴的这一一定量的水要想流出喷嘴孔，必须加速。这样，经过喷嘴孔加速凝聚的水就形成了射流。喷出的射流打击在靶件（工件）表面上就称为射流作业。

射流一旦离开喷嘴，它的凝聚段不会太长。对此，射流的速度尤为重要。水经过泵送获得了压力，压力首先驱动水自泵至喷嘴，又使其以给定的速度通过喷嘴。在此其间，水流与管壁的摩擦形成了主要的压力损失，同时水流也因经过不同形状的流程以其湍流形成压力损失。

当射流到达靶件时，射流以其速度形成的能量转变成冲击压

力作用在欲工作的表面上。业已发现，打击在靶件上的射流流量和流速对这种转变效应非常重要，它们决定了到达靶件的射流功率和射流的作业效率，而泵控制着射流的流量，喷嘴出口截面积控制着射流流速。当然，自喷嘴至靶件的距离，也就是靶距，以及喷嘴与靶件的相对位移速度，也是影响射流作业的重要参数。

射流离开喷嘴后最常见的形式是圆柱射流。这种形式的射流携带射流能量最为有效，但它在靶件表面上的有效打击面积也最小。为了进行大面积清洗，通过改变喷嘴形状就有了扇形射流，其特点是射流以一条线的形式冲击在靶件上，随着喷嘴的位移，便出现了一条宽幅的清洗面。近来还出现了一些不同形状的喷嘴，如圆锥形、三角形、矩形等，统称为异形喷嘴。

射流因其介质不再局限于水，严格定义应为液体射流。如切割含有糖分的食品，水则容易溶化糖而破坏了这些食品。为了避免此缺陷，对切割蛋糕和巧克力之类的食品则采用植物油或其它可食用油作介质。某些射流应用场合还要求用乳化液作介质。但是，我们泛称水射流并不影响其它液体射流的存在。

在射流中混合其它物质是提高射流性能的有效手段之一。最常见的是在射流中混合固体颗粒，即磨料。当射流打击靶件的时候，这些颗粒得到了与水同样的速度，因而有效地提高了射流作业能力。这种射流对硬质材料（如玻璃、金属等）的切割尤为必需，人们称之为磨料射流。磨料已由初期的核桃壳碎末发展到各种金刚砂和氧化铝。磨料介入射流通常有两种形式：最常见的方法是当水经过喷嘴加速至极限后直接引射磨料进入混合腔，瞬间混合后经准直喷嘴（又叫磨料喷嘴）形成磨料射流；与此不同的是，磨料在流体经喷嘴加速之前就与之混合，这种直接注入磨料的方式又叫做浆液磨料射流或前混合磨料射流。

在射流中加入化学添加剂有可能调整水的性能，减少系统损失。为了减少因流体与管壁摩擦造成的损失，可兑入少量的聚合物添加剂。这种添加剂常用长链分子聚合物。它们对水还有一种“胶合”作用，使脱离喷嘴的射流在较长的区段保持凝聚和排出速

度，从而提高了射流效率。

上述内容均为连续射流，以后还要讨论脉冲射流和空化射流。连续射流中还有相当大的部分是低压连续射流，如喷雾、喷泉、消防水柱等等，由于这些技术的成熟性，限于篇幅，本书不作专题讨论。

水射流参数（压力、流量、功率等）与喷射形式的不同组合引发了许许多多的应用，从拂尘洗车到板材切割，从无刀手术到水炮破岩，从真空抽吸到水幕电影，林林总总，无所不在。尤其是国际上自 70 年代兴起、80 年代末期应用日趋成熟的高压水射流技术，主要以清洗、除锈、切割为目的，已经渗透到国民经济各工业部门。

水射流是一项迅速崛起的新技术、新工艺，同时又是以射流为核心，集泵、阀、密封、液压、自动化控制为一体的综合学科，其产品品质突出反映在可靠性、成套性和安全性。从剖析产品入手研讨高压水射流技术，这是本书的特点。

1.2 水射流的历史回顾

人们认识水射流应该说还是从水的冲刷作用开始的^[1]。大雨能把田地冲出一道水沟，能剥落山岩，甚至能造成泥石流。河道出口久而久之便冲积成了三角洲。水对大自然的鬼斧神功表现在三个方面：使材料破裂、流动、去除。

水射流的应用起源于采矿业。早期利用水射流冲洗矿石中的泥土，蓄水运送并筛选矿石和直接用水射流冲刷煤层。由冲刷到破碎实际上是水射流的一个质变，前者是低压大流量，后者则是高压小流量。本世纪 30 年代已开始用水射流采煤。开始是用 10MPa 以下的水射流冲采中硬以下煤层，至 70 年代已发展到用 20~30MPa 水射流慢速切割煤体，再后来就是高压至 100MPa、超高压大于 200MPa 的水射流辅助采煤机、掘进机用于破碎落煤和破岩。

只有提高水射流工作压力才能使其广泛应用于大工业部门，

这已成为人们的共识。70年代，高压水清洗和超高压水切割在同步发展。80年代，高压清洗已日趋完善，普及应用。自1972年在美国 Ingersoll-Rand 公司的 Mc Cartney Manufacturing 公司诞生了第一台 400MPa 的水切割机，继之美国 Flow Industries 公司的水切割机（350MPa、3.5L/min）问世，超高压水射流切割工艺一直是水射流行业研究、追踪的热点。尤其在80年代末、90年代初期这类所谓“水刀”设备已经批量化、商品化，而且以机械手控制切割头为代表的产品已迅速达到了全自动、智能化的高水平。

水射流技术在向高压方向发展的同时，70年代末期国际水射流领域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开始转向研究如何提高和发挥水射流的潜力这方面来了。这就有了脉冲射流（水炮）、高温射流、磨料射流和摆振射流。这些射流与同等压力下的普通连续射流相比，显然大大提高了作业效率。80年代以来，磨料射流、空化射流、气水射流和旋转射流的进一步发展，将高压水射流技术推向一个新的阶段。水射流领域已经形成了一个以压力、功率为纵坐标、以射流形式为横坐标的技术与产品的平面型谱。高压水射流技术的应用范围也由单纯的采矿业扩大到石油、化工、轻工、航空、建筑、冶金、市政工程 and 医学等领域。

高压水射流技术的发展大致可分为四个阶段：60年代处于以低压水射流采矿为主的初期阶段，同时以静压试验和化工流程为主要目的的高压泵、增压器和高压管件（统称高压设备）的研制取得了许多商品化成果（它们的介质主要不是水），这为高压水射流技术的到来奠定了基础；70年代主要针对采煤机、清洗机开展了水射流工业试验，这时期的主攻方向是提高以水为介质的高压设备的压力和可靠性，同时开发多种形式的射流，尤其自1972年开始两年一届的英国流体机械研究集团（BHRG）主办的国际水射流技术会议（International Conference on Jetting Technology）、自1981年开始两年一届的美国水射流技术协会（WJTA）主办的美国水射流技术会议（American Water Jet Conference）和自1990

年开始两年一届的国际水射流协会 (ISWJT) 和日本水射流协会 (JSWJT) 主办的亚太国际水射流技术会议 (Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology) 等, 极大地推动了国际水射流界的交流与发展。80 年代是高压水射流技术迅速发展阶段, 突出体现在高压、超高压、大型化、成套化、专用化和新型水射流形式都以产品化、规模化、商品化, 尤其是清洗、除锈、切割应用的可靠性、安全性, 迅速拓展至各工业部门。90 年代一些高难度研究, 诸如机器人多维水切割、水下切割、井喷管口切割、干冰切割等问世, 国际会议的主题基本上围绕着水切割展开, 丰富、完善水切割研究与应用已经成为国际水射流界的焦点与热点, 同时这一领域的标准与技术专著也时有出现。近年来许多标新立异的成果表明: 一个能根据实际需要自如地控制各种类型高压水射流技术特性、造福人类的新时代已经到来, 喷射技术已经成为一门独立的综合性的新学科。

1.3 水射流分类

实际应用的射流大致可以分为三种类型^[2]: 连续射流、脉冲射流、空化射流。

1. 连续射流 连续射流是最普通的射流形式, 又是一个庞大的家族, 可以细分如下。

(1) 根据射流性质分为:

- 1) 液体射流 (包括水射流和其它液体射流);
- 2) 液体-固体射流 (即磨料射流);
- 3) 液体-气体-固体射流 (气压输送磨料)。

(2) 根据射流压力分为:

1) 低压力射流——工作压力不大于 10MPa 的水射流, 其系统主机多为离心泵或低压往复泵;

2) 高压力射流——工作压力在 10~100MPa 的水射流, 其系统主机多为高压往复泵;

3) 超高压力射流——工作压力不小于 100MPa 的水射流, 其