

薛胜雄 等著

# 高压水射流技术工程

HIGH PRESSURE WATERJET TECHNOLOGY & ENGINEERING

合肥工业大学出版社

# 高压水射流技术工程

薛胜雄 等著

合肥工业大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

高压水射流技术工程/薛胜雄等著. —合肥:合肥工业大学出版社,2006.11

ISBN 7-81093-503-8

I. 高... II. 薛... III. 高压—液体射流 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 138332 号

## 高压水射流技术工程

薛胜雄 等著

责任编辑 权 怡

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2006 年 11 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2006 年 11 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	880×1230 1/32
电 话	总编室:0551-2903038 发行部:0551-2903198	印 张	26.5 插页 1 字数 757 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	发 行	全国新华书店
E-mail	press@hfutpress.com.cn	印 刷	安徽新华印刷股份有限公司 图书印装分公司

ISBN 7-81093-503-8/TB·13

定价:120.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

## 内 容 简 介

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、破碎等作业。

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,注重成套技术与应用、近年来超高压水射流技术成果和工业清洗工程,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和流体机械专业的教学参考书。

# 序

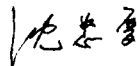
高压水射流技术是上世纪70年代初在国外迅速发展起来的一门高新技术，它广泛应用于冶金、航空、机械、石油、化工、船舶、建筑、电力、市政建设等国民经济各个领域，并取得了可喜的经济效益。我国从上世纪70年代末开始从事这一领域的研究和应用，20多年来，这一新技术已扩展到我国工业清洗工程、除锈工程、水力切割、破碎工程、采煤和石油钻采工程等领域和部门。随着应用的需要，我国的高压水射流发生装置（高压泵、增压器）及配套部件（阀、高压软管、喷嘴和喷头等）的研制有了长足发展，缩短了与国外的差距，基本满足了国内需求。同时，在高压水射流理论、应用研究及产品研制中，结合我国国情，逐步发展了具有中国特色的高压水射流设备和具有自主知识产权的核心技术。

薛胜雄教授及其专业团队1998年出版了《高压水射流技术与应用》，该书以技术应用为主线，以其领导的专业团队10余年所获得的科技成果为基础，汇集国内外成熟的高压水射流技术成果，并研究其发展方向。近年来，国内外高压水射流技术又有了很大发展，为适应科技发展和技术应用的需要，密切跟踪近年来水射流技术在国内外发展的新成果和新应用，作者对原著进行了重新编写。新著不仅增加了六章新内容，即水射流基础理论、数控超高压水切割机、工业清洗设备与装置、工业除锈应用、石油工程应用和工业清洗工程，而且也增

加和补充修改了许多章节内容，并冠以较为准确的书名——《高压水射流技术工程》。可以相信：这部技术专著的出版，将受到国内外水射流科技人员、设备制造商和设备运行维护技术人员的欢迎和好评，因为《高压水射流技术工程》的确是一部知识面广、实用性强的好书。

我衷心祝贺《高压水射流技术工程》的出版，愿作者在高压水射流技术领域作出更大的贡献。

中 国 工 程 院 院 士  
中国石油钻井和水射流技术专家



2006年10月30日

# 前 言

一年一度秋风劲，战地黄花分外香。

1998年我带领专业团队出版了《高压水射流技术与应用》，从基础理论、设计研究和应用发展三个方面总结了当时的国内外高压水射流技术的发展状况。在这之后的八年多时间里，一方面，每年国际上相关的会议内容总在推陈出新，国内喷射技术行业的技术在不断进步，我们团队的技术新成果也在不断涌现，这一切都使得这一技术主题需要注入新的内容，需要展示新的成果，需要引领新的方向；另一方面，近年来高压水射流技术的应用在我国各个工业部门市场大开，广结硕果。因此，无论是研究、设计、生产，还是应用与经营，都迫切需要这门应用技术的新的专著。作为原著作者，有责任推广、普及高压水射流这项新工艺、新技术，也有责任向读者提供最新且富有价值的信息源。为了保证质量、保证水平、保证进度，我组织了技术团队和我国喷射设备行业知名的专家学者对原著进行了重新编写。这部新著保持原著知识面广、实用性强的特点，注重成套技术与应用、超高压水射流技术新成果和工业清洗工程等内容，反映了这一领域技术发展的新潮流和新成就，以《高压水射流技术工程》作为书名，凸显水射流技术向应用工程转变的时代特色。

本书由薛胜雄主持编著并提出编写大纲。薛胜雄著第1章，第2章，第3章，第4章，第5章，第6章，第7章，第8章，第14章，第21章和第11章的第11.12节，第15章的第15.1节、15.2节、15.3节，补充第12章；武子全著第11章的第11.1节、11.2节、11.4节、11.5节、11.6节、11.7节；陈正文著第20章和第2章的第2.1节、2.5节，第12章的第12.3节、12.5节、12.6节；李根

生著第16章；焦阳、张齐庄著第18章；樊毅斌著第13章，第12章的第12.2节，第14章的第14.7节，第15章的第15.6节、15.7节；黄汪平著第9章，第10章，第19章，第11章的第11.11节、11.3.1节，第15章的第15.4节；王永强著第8章的第8.3节，第12章的第12.4节；陈波著第11章的第11.8节、11.9节、11.3.2节，补充第4章的第4.4节，第6章的第6.3节；彭浩军著第17章和第11章的第11.10节，第15章的第15.5节、15.8节；李文著第5章的第5.4节、5.3.4节；王庆国著第12章的第12.1节；张东晖著第14章的第14.6节；李岳峰著第11章的第11.8.2节；齐永健著第12章的第12.7.2节；章小泮著第4章的第4.5节。全书由朱华清、巴胜富、舒平玲、韩彩红担任文字编排、整理工作，由薛胜雄统稿并审核。

本书的内容比较集中地反映了我国在该行业的技术实力，可以相信，它将对我国喷射设备行业技术进步产生积极的促进作用。

长卷收笔查小虫，四十九年叹寸功。

学以求进无根底，研为所用有晴空。

不厌射流谈锋胜，总激高压佐业雄。

搏击沉浮何怨水，一柱热血任其冲。

衷心感谢我国石油钻井和水射流技术专家、中国工程院沈忠厚院士，我的导师——浙江大学王乐勤教授和师兄陈学东教授对本书的支持！

衷心感谢中国机械工业集团合肥通用机械研究院对我二十五年专业工作的培养和支持！

衷心感谢沈阳奥拓福科技有限公司和武子全董事长对本书出版的支持！

谨以此书献给关心高压水射流技术的人们！

薛胜雄

2006年10月10日



## 目 录

## 序

## 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	(8)
1.5 高压水射流技术信息源	(12)
1.6 高压水射流技术的现状与发展	(14)
1.6.1 超高压水切割机	(15)
1.6.2 高压清洗机	(16)
1.6.3 超高压大功率成套设备	(17)
1.6.4 微小型清洗机	(19)
参考文献	(20)
第 2 章 水射流理论基础	(21)
2.1 射流流体力学基础知识	(21)
2.2 射流结构与基本参数	(29)
2.2.1 射流结构	(30)
2.2.2 射流基本参数	(32)
2.2.3 射流轴心线上速度的变化规律	(40)
2.2.4 射流的稳定性	(42)

2.3	射流速度衰减的理论解析	(43)
2.4	射流的微观破坏机理	(46)
2.4.1	射流破坏的基本物理模型	(47)
2.4.2	液滴与材料的相互作用	(50)
2.4.3	射流打击力	(54)
2.4.4	自由剪切湍流	(59)
2.4.5	材料的失效形式	(60)
2.5	射流切割理论浅析	(62)
	参考文献	(67)
<b>第3章 水射流成套设备</b>		<b>(68)</b>
3.1	高压清洗机	(68)
3.2	超高压水切割机	(74)
3.3	微型清洗机	(77)
3.4	小型清洗机	(77)
3.5	高温清洗机	(80)
3.6	通过式清洗机	(83)
3.7	下水道清洗车	(83)
3.8	浆料射流设备	(87)
3.9	水炮	(91)
	参考文献	(98)
<b>第4章 高压水发生设备</b>		<b>(100)</b>
4.1	总体设计	(100)
4.1.1	型式与结构	(100)
4.1.2	确定主要参数	(106)
4.1.3	泵的整体布置	(109)
4.1.4	系列化设计	(110)
4.2	高压泵	(111)
4.2.1	泵的传动端	(111)

4.2.2 泵的液力端 .....	(115)
4.3 超高压泵 .....	(120)
4.4 增压器 .....	(122)
4.5 高压系统零件材料 .....	(126)
4.5.1 高强度金属材料的选用 .....	(126)
4.5.2 高强钢的生产工艺 .....	(131)
4.5.3 材料的质量检验 .....	(132)
4.6 自增强处理工艺 .....	(133)
4.6.1 最佳自增强压力 .....	(133)
4.6.2 自增强处理方法 .....	(135)
4.7 液压试验 .....	(137)
参考文献 .....	(139)
<b>第5章 阀</b> .....	<b>(140)</b>
5.1 安全阀 .....	(140)
5.2 调压溢流阀 .....	(145)
5.3 控制阀 .....	(150)
5.3.1 脚踏控制阀 .....	(150)
5.3.2 气动控制阀 .....	(153)
5.3.3 双联阀 .....	(153)
5.3.4 换向式脚踏控制阀 .....	(156)
5.4 间隙节流调压阀 .....	(158)
5.5 喷枪 .....	(161)
5.5.1 截流型喷枪 .....	(161)
5.5.2 溢流型喷枪 .....	(163)
5.5.3 平衡型喷枪 .....	(165)
5.5.4 旋转型喷枪 .....	(167)
5.6 超高压阀 .....	(168)
5.7 其他阀 .....	(170)
5.7.1 单向阀 .....	(170)

5.7.2 手动截止阀 .....	(172)
参考文献 .....	(172)
<b>第6章 密封</b> .....	<b>(173)</b>
6.1 静密封 .....	(173)
6.1.1 O形圈密封 .....	(173)
6.1.2 垫圈 .....	(176)
6.2 旋转密封 .....	(180)
6.3 往复密封 .....	(182)
6.3.1 填料密封 .....	(183)
6.3.2 间隙密封 .....	(187)
6.3.3 组合密封 .....	(191)
6.4 密封的失效 .....	(195)
参考文献 .....	(196)
<b>第7章 喷嘴</b> .....	<b>(198)</b>
7.1 射流功率 .....	(198)
7.2 喷嘴型式 .....	(201)
7.2.1 低压喷嘴 .....	(202)
7.2.2 高压喷嘴 .....	(208)
7.2.3 超高压喷嘴 .....	(214)
7.3 喷嘴的计算 .....	(215)
7.4 喷嘴性能及其失效判据 .....	(224)
7.5 空化喷嘴 .....	(229)
7.6 喷嘴的材料与工艺 .....	(233)
7.7 射流性能的检测 .....	(237)
参考文献 .....	(240)
<b>第8章 喷头</b> .....	<b>(241)</b>
8.1 固定喷头 .....	(241)

8.2 强制旋转喷头 .....	(247)
8.3 二维自转喷头 .....	(252)
8.3.1 自旋转喷头的密封 .....	(253)
8.3.2 自旋转喷头的限速 .....	(254)
8.3.3 自旋转喷头的使用 .....	(255)
8.3.4 自旋转喷头的分类 .....	(257)
8.4 平面清洗器 .....	(259)
8.5 三维旋转喷头 .....	(261)
8.6 旋转接头 .....	(264)
8.7 真空喷头 .....	(267)
8.8 水切割喷头 .....	(272)
参考文献 .....	(280)
<b>第9章 配管与连接</b> .....	<b>(281)</b>
9.1 高压软管及其总成 .....	(281)
9.1.1 对高压软管的要求 .....	(282)
9.1.2 高压软管总成接头型式 .....	(284)
9.2 超高压软管及其总成 .....	(287)
9.3 高压软管的使用 .....	(288)
9.4 超高压硬管 .....	(291)
9.4.1 对超高压硬管的要求 .....	(291)
9.4.2 超高压硬管的端部螺纹 .....	(293)
9.4.3 超高压硬管的弯曲 .....	(295)
9.4.4 超高压硬管的应用 .....	(297)
9.5 连接 .....	(301)
9.5.1 管件的连接 .....	(302)
9.5.2 高压零件的连接 .....	(305)
参考文献 .....	(307)

<b>第 10 章 磨料射流装置</b> .....	(308)
10.1 磨料射流原理 .....	(308)
10.2 磨料射流系统 .....	(310)
10.2.1 磨料水悬浮液射流系统 .....	(310)
10.2.2 磨料水射流系统 .....	(312)
10.2.3 磨料浆液射流系统 .....	(314)
10.3 磨料喷头 .....	(316)
10.4 磨料喷嘴 .....	(319)
10.4.1 磨料喷嘴材料 .....	(320)
10.4.2 磨料喷嘴的磨损 .....	(322)
10.5 磨料 .....	(326)
10.5.1 磨料的种类和性质 .....	(326)
10.5.2 磨料的形状和粒度 .....	(327)
10.5.3 磨料特性对射流切割的影响 .....	(329)
参考文献 .....	(330)
<b>第 11 章 数控超高压水切割机</b> .....	(331)
11.1 概述 .....	(331)
11.1.1 水切割机的应用价值 .....	(331)
11.1.2 数控超高压水切割机的功能与用途 .....	(333)
11.1.3 水切割机的技术发展 .....	(333)
11.2 超高压发生器 .....	(335)
11.2.1 300MPa 超高压发生器 .....	(335)
11.2.2 380MPa 超高压发生器 .....	(337)
11.3 水质及其处理装置 .....	(338)
11.3.1 基本要求 .....	(338)
11.3.2 水切割机水质处理实例 .....	(341)
11.4 切割平台 .....	(343)
11.4.1 龙门式平台 .....	(343)

11.4.2	悬臂式平台	(344)
11.4.3	立式传动平台	(344)
11.4.4	无水槽平台	(345)
11.4.5	机器人手臂式水切割机	(346)
11.4.6	多切割刀头平台	(347)
11.4.7	复合型切割平台	(348)
11.5	控制系统	(350)
11.6	驱动系统	(353)
11.6.1	步进电机驱动	(353)
11.6.2	伺服电机驱动	(355)
11.7	传动系统	(356)
11.7.1	滚珠丝杠副	(356)
11.7.2	滚动直线导轨副	(358)
11.8	水切割机的自动化控制	(361)
11.8.1	信息处理	(362)
11.8.2	机床控制	(363)
11.8.3	信息处理举例	(366)
11.9	高压水开关	(371)
11.10	接收器	(373)
11.11	稳压容器	(375)
11.11.1	流量脉动	(375)
11.11.2	稳压容器的设计	(377)
11.12	缘壁切割机	(382)
	参考文献	(385)
<b>第 12 章</b>	<b>工业清洗设备与装置</b>	<b>(386)</b>
12.1	大功率超高压泵	(386)
12.1.1	大功率超高压泵应用范围	(386)
12.1.2	动力端的结构	(387)
12.1.3	柱塞密封的结构	(391)

12.1.4	高压泵头的结构·····	(393)
12.1.5	成套设备的压力控制形式·····	(396)
12.2	机场跑道除胶设备·····	(400)
12.2.1	共性技术·····	(400)
12.2.2	单纯的除胶车·····	(403)
12.2.3	多功能除胶车·····	(406)
12.2.4	带横移式清洗器的除胶车·····	(409)
12.3	地面油污清洗车·····	(412)
12.3.1	水射流清洗工艺的优越性·····	(412)
12.3.2	油污清洗车的功能与构成·····	(412)
12.3.3	平面清洗器·····	(413)
12.3.4	试验与使用效果·····	(416)
12.4	氧化铝业结疤的清除·····	(417)
12.4.1	超高压大流量泵机组·····	(418)
12.4.2	管道化内壁结疤的清除·····	(420)
12.4.3	压煮器结疤的清除·····	(422)
12.5	管道内外壁同步清洗装置·····	(424)
12.5.1	油管内外壁同步清洗·····	(424)
12.5.2	清洗装置设计·····	(425)
12.5.3	清洗装置使用·····	(429)
12.6	乏燃料元件运输容器清洗装置·····	(430)
12.6.1	清洗装置设计·····	(430)
12.6.2	清洗装置使用·····	(433)
12.7	高压水除鳞技术与装置·····	(436)
12.7.1	高压水除鳞技术·····	(436)
12.7.2	高压水除鳞装置·····	(439)
	参考文献·····	(442)
<b>第 13 章</b>	<b>工业清洗应用</b> ·····	<b>(443)</b>
13.1	工业清洗方法·····	(443)



13.2 有效清洗的参数控制	(445)
13.2.1 工业清洗压力的选择	(445)
13.2.2 高压水射流的参数影响	(447)
13.3 管束的清洗	(450)
13.3.1 换热器管程的清洗	(450)
13.3.2 换热器壳程的清洗	(454)
13.4 跟踪管道自进清洗	(456)
13.4.1 复杂管路系统的清洗	(456)
13.4.2 城市排水系统的清洗	(458)
13.4.3 水井进水管的清洗	(459)
13.4.4 高层建筑垃圾竖井的清洗	(461)
13.5 容器的清洗	(461)
13.5.1 大型容器内壁清洗装置	(462)
13.5.2 小直径容器的清洗	(464)
13.6 平面清洗	(466)
13.6.1 地面清洗	(466)
13.6.2 建筑物外壁清洗	(467)
13.7 水下清洗应用	(468)
13.8 轮毂清洗装置	(472)
13.9 危险场合的清洗	(473)
13.9.1 爆炸性材料的清洗	(473)
13.9.2 放射性污染的清洗	(476)
参考文献	(477)
<b>第14章 工业除锈应用</b>	<b>(479)</b>
14.1 除锈应用标准	(479)
14.2 除锈之“锈”	(483)
14.3 除锈工艺及其发展	(485)
14.3.1 传统的除锈工艺	(485)
14.3.2 磨料射流技术	(487)