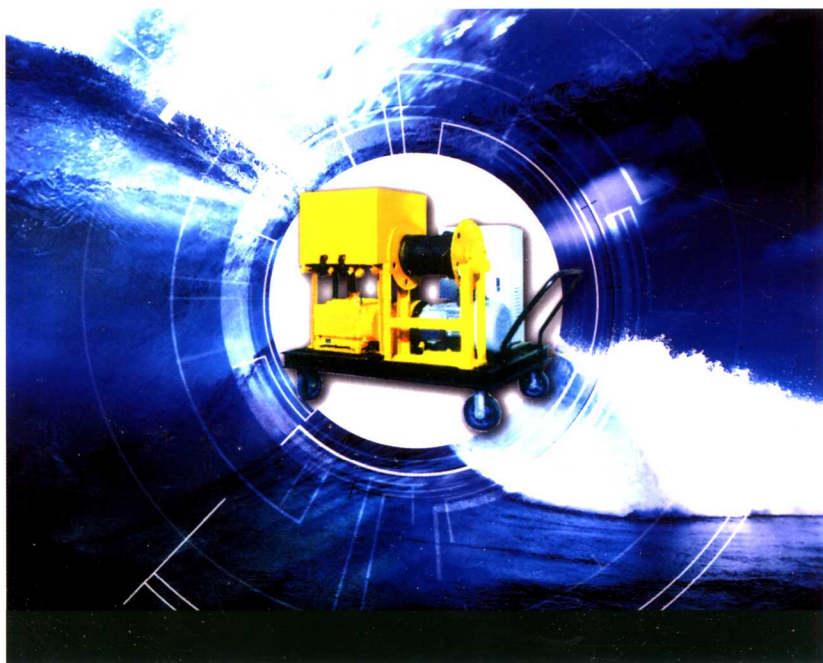


卢晓江 何迎春 赖维 编

高压水射流 清洗技术及应用



Chemical Industry Press



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

高压水射流清洗技术及应用

卢晓江 何迎春 赖维 编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高压水射流清洗技术及应用/卢晓江, 何迎春, 赖维编. —北京:
化学工业出版社, 2005. 10

ISBN 7-5025-7778-5

I. 高… II. ①卢…②何…③赖… III. 高压-液体射流-清洗-
技术 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 125160 号

高压水射流清洗技术及应用

卢晓江 何迎春 赖维 编

责任编辑: 张兴辉 刘丽宏

责任校对: 陶燕华

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 244 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7778-5

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

在工业生产过程中,各种工业设备在不同的介质和环境中运行时,会产生高温聚合物、结焦、水垢、油垢、沉积物和腐蚀物等。这些垢物的存在,轻则使装置效率下降,能耗、物耗增加,重则使工艺流程中断,设备装置失效,生产无法正常进行,甚至导致恶性事故发生。因此,采用正确的清洗方法对各类设备进行有效的清洗是工业生产中必不可少的环节。

高压水射流清洗技术是近年来在国际上兴起的一项新型清洗技术。由于其具有的高效、节能、无污染、无腐蚀,设备通用性强,清洗成本低等特点,一经问世,就得到重视和越来越广泛的应用。

近年来,高压水射流清洗技术有了很大的发展。新型高压水射流清洗技术不断出现,清洗设备向更大功率、更高压力、更完善成套功能方向发展,清洗服务向大规模、专业化发展。当前,高压水清洗技术在石油、化工、电力、冶金、船舶、民航、运输、建筑、轻工、食品、市政工程等工业领域已获得了广泛的应用。

本书全面论述了高压水射流清洗技术的原理与特点、清洗装置、工艺方法和影响因素及其在工业生产中的应用,介绍了近年来国内外高压水射流清洗技术与装置的发展。

本书从工程应用角度,重点对高压水射流清洗技术的应用进行了讨论,并结合笔者的多年相关研究,对合理、优化应用高压水射流清洗技术和高效节能、节水型清洗装置的开发等进行了探讨。

全书共5章,由卢晓江、何迎春、赖维共同编写,卢晓江任主编。具体编写分工如下:第1章、第5章由卢晓江编写;第2章由赖维编写;第3章由何迎春编写;第4章由何迎春和赖维共同编写。

本书在编写过程中得到了化学工业出版社的大力支持和帮助,在此表示真诚的谢意。在编写过程中,还得到了李建国、赵丽娟、赵欣、李东海、李栋、赖艳萍等同志的大力帮助,在此也一并表示衷心的感谢。

编者

2005年9月

目 录

第1章 高压水射流清洗技术概述	1
1.1 高压水射流清洗技术的应用	1
1.1.1 高压水射流清洗技术的特点	2
1.1.2 高压水射流清洗技术的工业应用	4
1.2 高压水射流的特点	6
1.2.1 高压水射流的定义	6
1.2.2 高压水射流的分类	6
1.2.3 高压水射流的流体力学特性及对物体的作用	7
1.3 高压水射流清洗机理及影响因素.....	18
1.3.1 高压水射流清洗作用简述.....	18
1.3.2 以渗透为主的破碎过程.....	19
1.3.3 直接压缩和剪切为主的过程.....	20
1.4 高压水射流清洗技术的发展简况.....	21
1.4.1 应用不断普及、深入,领域不断扩大.....	21
1.4.2 新技术、新工艺不断出现.....	22
1.4.3 装备水平不断提高.....	23
1.4.4 应用逐步专业化、规模化和社会化.....	25
参考文献	26
第2章 高压水射流清洗装置	28
2.1 高压水射流清洗装置的组成与分类.....	28
2.1.1 高压水射流清洗装置的组成.....	28
2.1.2 高压水射流清洗装置的分类.....	29
2.1.3 按装置特性的高压水射流清洗分类.....	29
2.2 高压水射流喷嘴、喷头及喷枪.....	30
2.2.1 喷嘴.....	30
2.2.2 喷头.....	32

2.3 高压水装置	36
2.3.1 离心泵	37
2.3.2 高压往复泵	39
2.3.3 增压器	43
2.4 组件调节装置	45
2.4.1 高压管路	45
2.4.2 蓄能器与高压回转接头	48
2.4.3 高压水射流清洗设备	49
2.5 行走结构	52
2.5.1 平移、旋转、复合运动	52
2.5.2 清洗机构	52
参考文献	56
第3章 高压水射流清洗的操作工艺	57
3.1 清洗工艺的原则	57
3.1.1 清洗过程的基本原理	57
3.1.2 清洗工艺的确定原则	57
3.2 清洗面污染物的特性分析	59
3.2.1 污垢的形成和危害	59
3.2.2 工业污染物的分类	61
3.2.3 各种污染物的特性分析	63
3.2.4 清洗表面清洁程度判别	71
3.3 影响清洗的因素分析与操作参数的选取	72
3.3.1 影响水射流清洗的因素	72
3.3.2 高压水射流清洗操作参数选择	77
3.3.3 高压水射流清洗压力损失	79
3.4 高压水射流操作的安全管理	80
3.4.1 我国高压水射流工业清洗的安全现状	80
3.4.2 高压水射流清洗的事故根源	80
3.4.3 高压水射流事故的伤害特点	82
3.4.4 清洗系统的安全要求	86
3.4.5 清洗机械设备的电气安全	90
3.4.6 现场管理	91
3.4.7 清洗作业环境的安全技术要求	92
3.4.8 清洗废水治理	93

参考文献	93
第4章 高压水射流清洗技术的应用	94
4.1 高压水射流清洗技术在石油化工中的应用	94
4.1.1 管道的清洗	94
4.1.2 化工设备的清洗	98
4.1.3 几种高压水射流清洗装置的介绍	103
4.2 造船工业中的清洗	110
4.3 机械加工中的清洗	115
4.3.1 钢材铸件清洗	115
4.3.2 铸件清砂	119
4.3.3 磨料射流除锈	121
4.4 造纸工业的高压射流清洗问题	123
4.4.1 造纸机网部聚酯成形网的高压水射流清洗	123
4.4.2 毛毯的清洗情况	144
4.4.3 造纸机械及设备的清洗	145
4.5 高压水射流清洗技术在车辆清洗中的应用	146
4.5.1 铁路化工罐车的清洗	146
4.5.2 大型油罐车罐体的清洗	149
4.5.3 车辆外表面的清洗	150
4.6 高压水射流清洗技术在城建工程中的应用	154
4.6.1 建筑物墙体的清洗	154
4.6.2 排水管路的清洗	156
4.6.3 道路的清洗	161
参考文献	161
第5章 新型高压水射流清洗技术与装置	164
5.1 高压水射流清洗技术的新进展	164
5.1.1 脉冲射流清洗	164
5.1.2 空化射流清洗	170
5.1.3 磨料射流清洗	175
5.1.4 超高压水射流清洗	181
5.1.5 高压水射流联合机械刀具清洗技术	186
5.1.6 带电气溶性射流清洗	187
5.2 新型清洗装置	189
5.2.1 管道清洗装置	189

5.2.2 磨料除锈机	195
5.2.3 新型喷嘴及喷头	197
5.2.4 HYDROCAT 超高压清洗机	205
5.3 高压水射流清洗的高效节能问题	207
5.3.1 清洗系统的合理设计与选型	207
5.3.2 减少能量损失, 提高能量利用	208
5.3.3 合理选择射流靶距, 提高打击能量	209
参考文献	210

高压水射流清洗技术概述

1.1 高压水射流清洗技术的应用

清洗作业一直是工业及民用领域不可缺少的一个重要行业。一般清洗方法可分为物理清洗和化学清洗两大类。利用力学、热学、声学、光学、电学原理,依靠外来能量的作用,如机械摩擦、超声波、高压、冲击、紫外线、蒸汽等除去物体表面污垢的方法称为物理清洗;依靠化学反应的作用,利用化学药品或其他溶剂清除物体表面污垢的方法称为化学清洗。物理清洗和化学清洗都有其各自的特点,实际应用时应根据被清洗物体的情况和清洗要求进行选择和使用。

多年来,由于传统的清洗操作简单,或只是作为一道工序依附于生产过程中,清洗作为一项工业技术没有得到应有的重视,我国清洗行业一直处于化学和手工清洗为主的落后状态。总体上处在只是借助于简单机械的手工清洗完成一些简单的任务,且工人劳动强度大,效率低,洗净率低,成本高,不能满足工业清洗要求的状态。

随着经济的发展,对于清洗技术及产品的需求越来越大、越来越高,同时科技进步也推动了清洗技术和装备的快速发展,清洗已成为了一个发展迅猛、潜力巨大的行业。

我国在相当长的时间里,化学清洗一直是工业生产中广为采用的主要清洗方法。据估计,我国工业清洗目前 80%是用化学方法。

随着社会的进步和工业对于设备运转效率及环境保护的要求,化学清洗方法的使用受到了很大的限制,在工程上主要表现为:

- ① 当结垢物很厚或管道堵死时,不能应用化学方法清洗;
- ② 对于具有多成分的复杂的机械混合物或结垢物,如高分子油脂、石蜡、

沥青、聚合沉淀物或焦炭等，化学药剂的选择十分困难，故难以用化学方法清洗；

③ 化学药剂对所清洗对象有一定的腐蚀作用，一些重要设备不能用化学方法清洗；

④ 化学清洗作业中的酸碱排放物对环境污染严重；

⑤ 化学清洗需要大量的酸与缓释剂，特别是对于大口径管道与大型容器需要化学药剂的数量巨大，清洗成本高；

⑥ 需要长时间浸泡及循环，清洗效率和洗净率低；

⑦ 对清洗对象的形状、材质等选择性过强。如轮船下部船体、甲板、钻井平台、市政工程大型管道及飞机跑道等，无法使用化学药剂浸泡及循环，很难清洗。

在科技进步的推动下，近年来世界清洗技术发展迅速，新的清洗方法、清洗技术不断出现，特别是各种物理清洗方法和技术得到了快速的发展和广泛应用。从目前清洗技术专利统计看，大部分清洗技术属物理清洗，化学清洗仅占约 1/4。物理清洗技术已成为世界清洗技术发展的主要方向，其中高压水射流清洗技术的发展与应用最为迅猛和广泛，已经成为清洗行业中一种主要的清洗技术。

1.1.1 高压水射流清洗技术的特点

高压水射流技术是近年来发展十分迅猛的一门新兴技术，它是利用高压水发生设备产生高压水，通过喷嘴将压力转变为高度聚集的水射流动，能完成清洗、切割、破碎等各种工艺的技术。

高压水射流清洗属于物理清洗。由于高压水射流清洗具有清洗成本低、速度快、洗净率高、不损坏被清洗物、应用范围广、不污染环境等诸多优点，一经问世，便得到了快速的发展和广泛使用，在各种物理清洗方法的实际应用中占很高比例。在工业发达国家高压水射流清洗已经成为主流清洗技术，在清洗业市场占到了较高的份额。目前，在一些发达国家已达市场份额的 80% 以上，如美国石油化工企业的换热设备清洗，采用化学清洗的只占 5%，而采用高压水射流清洗的则占 80% 以上。

高压水射流清洗技术自 20 世纪 80 年代中期传入我国后，在 90 年代中期得到迅速普及。特别是由于环境保护要求的不断提高，越来越多的企业已由化学清洗转为物理清洗，高压水射流清洗技术得到了日益广泛的重视。目前，在船舶、电站锅炉、换热器、轧钢带除磷、城市地下排水管道等清洗上都得到了广泛应用。高压水射流清洗在我国工业清洗中已超过 10%，并且正在迅速增长。相信随着现代社会对清洗行业提出的效率、洗净率及环保要求的不断提

高，高压水射流清洗技术在我国的应用是必然趋势。

研究和生产实践表明：高压水射流清洗技术是一项可靠、经济实用的清洗技术。与化学清洗相比，高压水射流清洗技术具有如下优点。

(1) 清洗质量好 高压水射流清洗管道及热交换器内孔时，能将管内的结垢物和堵塞物全部剔除干净，可见到金属本体。具有巨大的能量且以超音速运动的高压水射流完全能够破坏坚硬结垢物和堵塞物，但对金属没有任何破坏作用。同时又由于高压水的压力小于金属或钢筋混凝土的抗压强度，故对管路没有任何破坏作用，能实现高质量清洗。通常情况下，选择合适的压力等级，高压水射流清洗不会损伤被清洗机体。

(2) 清洗速度快 由于水射流的冲刷、楔劈、剪切、磨削等复合破碎作用，可迅速将结垢物打碎脱落，比传统的化学方法、喷砂抛丸方法、简单机械及手工方法清洗速度快几倍到几十倍。同时，采用高压水射流清洗后的部件无需进行二次洁净处理，而化学清洗后则需用清水将表面的化学药剂清洗掉。

(3) 无环境污染 由于高压水射流清洗是以清水为介质，因而水射流清洗不像喷砂抛丸及简单机械清洗那样产生大量粉尘，污染大气环境，损害人体健康；也不像有些化学清洗那样，产生大量的废液污染河道、土质和水质。以清水为介质水射流，无臭、无味、无毒，喷出的射流雾化后，还可降低作业区的空气粉尘浓度，可使大气粉尘由其他方法的 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到国家规定的安全标准 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，因此不会造成任何污染。此外，高压水射流清洗液的回收在技术上也相对容易实现。

(4) 适用范围广 高压水射流清洗能清洗形状和结构复杂的零部件，能在空间狭窄复杂和操作环境较差的条件下进行清洗，对设备材质、特性、形状及垢物种类均无特殊要求，只要求能够直射，故其应用十分广泛。

(5) 易于机械化、自动化。

(6) 节能、省水、清洗成本低 高压水射流使用的介质是自来水，它来源容易，普遍存在。在清洗过程中，由于能量强大，不需加任何填充物及洗涤剂，即可清洗干净，故清洗成本低，大约只有化学清洗的 $1/3$ 左右。其次，水射流清洗方法与消防用水不同，属细射流喷射，所用的喷嘴直径只有 $0.5\sim 2.5\text{mm}$ ，故耗水量只有 $3\sim 5\text{m}^3/\text{h}$ ，所用动力的功率为 $37\sim 90\text{kW}$ ，故属节水节能设备。

(7) 在设备维修中能较好恢复设备性能、延长设备寿命 与其他物理清洗技术相比，高压水射流清洗也有着独特的优势。表 1-1 为各种物理清洗技术特点的比较。

表 1-1 各种物理清洗技术特点的比较

序号	名称	优点	缺点
1	机械清洗	不含药剂,操作简单、灵活,耗水量低,无腐蚀,除垢除锈好,适合大型机械设备	结构复杂机械设备清洗困难,必须对设备解体到可看到清洗表面,可能造成清洗表面的损伤,清洗装置规模较大
2	超声波清洗	效率高、质量好,可清洗复杂结构的物体,易于实现自动控制,可用于对人体有损的清洗场合	对质地较软、声吸收较大的材料效果差,被清洗物体需位于声波振动中心,次微米级以下的污粒无法清除
3	激光清洗	对环境污染小,适应各种物体表面的清洗,不损伤基体,操作自动化程度高	成本较高,目前技术尚不完善
4	干冰清洗	无清洗剂残留,清洗剂无毒,不磨损表面,清洗后被清洗表面无需处理,对某些危险环境可进行清洗	需提供良好的通风条件,工作场所有严格的许用浓度要求
5	等离子体清洗	清洗过程中仅使用微量气体,无污染物排放,成本较低,容易使用	操作条件有一定限制
6	气动喷砂	适于金属材料,有增加表面硬度的效果	粉尘污染严重
7	静电磁场清洗	作业后使产生水垢的主要矿物质形成不淤积的结晶体与水一同排出;设备体积适中	需使用强直流电
8	磁铁电场清洗	可将结合于水分子中的粒子在短时间分离;设备适中	装置对水的流速、硬度变化无法相应变化,只能在确定的条件下才有效果,不能完全除去污垢;高强磁铁成本高,电场费用高

1.1.2 高压水射流清洗技术的工业应用

由于高压水射流具有上述的特点,高压水射流清洗技术越来越得到重视,其应用范围日趋广泛,几乎遍及国民经济的各个领域,尤其是近年来得到了十分快速的发展。在化工行业、建筑行业、市政施工、交通行业、制药行业、机械制造、电子行业、食品行业、造纸行业、冶金行业、纺织行业、涂装行业及核能军工等领域都得到广泛的应用。随着我国工业进步与社会文明程度的提高,对工业及民用清洗的效率、环保等方面将提出更加严格的要求。而目前我国的高压水射流清洗技术在整个清洗业的比重远未达到其应有的水平,因此,高压水射流清洗技术在我国尚有广阔的市场发展空间。

目前高压水射流清洗技术应用的具体对象包括如下几方面。

- ① 管道类,即上下水、排污、输油、煤气、排烟管道。
- ② 各类热交换器、冷却塔、冷凝器。
- ③ 盛装气、水、油、溶液、浆体等流体介质的各种箱、柜、釜、罐、槽、舱等工业容器。
- ④ 压力容器,包括储气缸、高压釜、合成塔等。

⑤ 公路、铁路运输用的槽罐车，水运船舶的油料仓等。

⑥ 船舶，在船舶维修工作中，采用高压水射流可剥除船体、船舱和螺旋桨上的生长物；可清除船体水面线上线下的油污，剥除压载箱、底板及船舱上的附着物及除锈等。

⑦ 钢材、铸件表面的除鳞、除锈、清砂。

⑧ 各种大型工业设备表面，如轧钢机表面除油去污等。

⑨ 各种大型建筑物、写字楼外表面。

⑩ 混凝土构筑物，包括路面翻松（深度 6~25mm），路面污迹清除，机场跑道除胶以及混凝土冲毛等。

适用于高压水射流清洗的结垢物的类型包括各种机械堵塞物、各类盐碱结垢物、氧化铁、金属锈蚀物、油脂及油污凝结物、油漆、焦炭、石蜡、沥青、石灰、石子、沉渣、淤泥、船体上的附着物及海洋生物等。对于不同清洗场合和不同特性的垢层，可选择不同的压力等级，以达到良好的清洗效果。一般来讲，大多数清洗作业都可使用 70MPa 以内的水射流完成，只有少数作业需 270MPa 以上的压力。表 1-2 为高压水射流清洗应用压力等级实例。

表 1-2 高压水射流清洗应用压力等级实例

序号	名称	压力/MPa	水流量/(L/min)	工艺(设备)特征
1	管道除垢	70		
2	下水道	22	125	旋转喷头
3	大型排污管道	30~50	150~200	可控制推拉喷头或旋转喷头
4	油井套管	70	70	
5	锅炉	70	70	
6	列管换热器	70	70	
7	油槽车	50	95	旋转喷头
8	钢材除锈	50	30	后磨料水射流
9	船体除锈	220	40	
10	机械零件除锈	10	30	前磨料水射流
11	铸件清砂	50	75	
12	造纸机聚酯网清洗	4	40	针形喷嘴,带往复运动机构
13	化工容器	10~70	80~160	三维旋转喷头
14	深水机井	35~50	50~80	专用旋转喷头

当然，作为一种清洗技术，高压水射流清洗技术也有一定的局限性，主要表现在对被清洗物体结构有一定的要求、对软质垢层的清洗效果不如硬质垢层

清洗效果好；在一些场合单一使用高压水射流进行清洗难以达到很好的清洗效果，尚需与其他清洗方法配合使用；清洗水耗及回收问题还需进一步完善。随着高压水射流清洗技术的不断发展，其中一些问题目前正在逐步得到解决。可以相信在对高压水射流清洗技术研究不断深入的过程中，更高效、更经济、更方便的新技术、新装备将源源不断地出现，并将在生产实际中得到广泛应用。在未来，高压水射流清洗技术必将成为生产和生活中最为重要的清洗技术之一。

1.2 高压水射流的特点

1.2.1 高压水射流的定义

高压水射流是指通过高压水发生装置将水加压至数十个到上千个大气压以上，再通过具有细小孔径的喷射装置转换为高速的微细“水射流”。这种“水射流”的速度一般都在1倍马赫数以上，具有巨大的打击能量。这种具有高能量、高速度的水流正向或切向冲击物体表面时将产生强烈的作用，从而完成切割、清洗、破碎等操作。将这种高度聚能的水射流用来完成各种清洗作业的技术称为“高压水射流清洗技术”。

水射流在工程应用中的水压通常在数兆帕到数百兆帕之间，通常的压力等级如表 1-3 所示。

表 1-3 水射流压力等级划分

压力等级	压力范围/MPa	压力发生装置类型
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	140~420	增压器

高压水射流应用于清洗操作时，工作压力等级按国际上普遍采用的等级划分，通常为：0.5~20MPa 为低压；20~70MPa 为中压；140~400MPa 为高压；400MPa 以上为超高压。

工业生产中高压水射流清洗的常用压力范围在 2~35MPa，水的流量一般为 20~100L/min。

1.2.2 高压水射流的分类

根据发生方法、环境介质、形态等条件的不同，水射流可分为多种。一般在清洗操作中使用的射流主要为以下几种。

① 连续射流。从射流的形态来看，射流可分为连续射流和非连续射流。

连续射流除在开始时存在一个冲击峰值外，基本保持着对被作用体稳定的压力。连续射流又可根据其周围介质分为淹没射流和非淹没射流。实际清洗工程中，高压水射流清洗以使用非淹没连续射流居多。

② 冲击射流。这种射流的特点是产生一个只持续时间极短的压力峰值，高速水滴和脉冲射流即属于此类。脉冲射流是一种射流参数随时间变化，对物体的作用也随时间周期性变化的不稳定射流。

③ 混合射流。其特点是冲击压力和稳定压力相结合，施加载荷的过程为：一个冲击压力加上一段稳定压力。稳定压力的持续时间与水滴的速度和大小有关。

1.2.3 高压水射流的流体力学特性及对物体的作用

1.2.3.1 射流的基本结构与特性

射流是一种孔口或狭缝出流流动现象。工程上所用的水射流绝大多数是湍流流动，其实际结构和运动机理极其复杂。这里以用于清洗的主要高压射流——非淹没连续射流为例，介绍射流的基本结构与特性。

如图 1-1 所示。在很宽的压力范围内，一般水射流的结构在沿射流长度上可分为四个阶段：紧密段、核心段、破裂段、水滴段。

紧密段紧靠喷嘴出口，处于紧密状态，透明清晰，因与空气产生摩擦，射流表面出现波纹，这种波纹的幅度随射流离开喷嘴的距离而增大。当喷嘴出口压力增大时，射流速度也增大，在脉动速度及旋涡的作用下，紧密段因表面波纹波幅加大而破裂，紧密段随压力的增加有逐渐缩短的趋势。

射流离开喷嘴一段距离后，在其与环境介质间所形成的边界层上存在着极大的速度差，由此而产生一个垂直于射流轴心方向的力，在这些力及射流内部湍流波动的联合作用下，产生了射流流体与环境介质间的质量与动量交换，使得射流

表面出现波状分离，其具体构成及波长变化依赖于射流排出工况。射流流体与环境介质的质量及动量交换过程也即是射流的传播与扩散过程。射流的扩散首

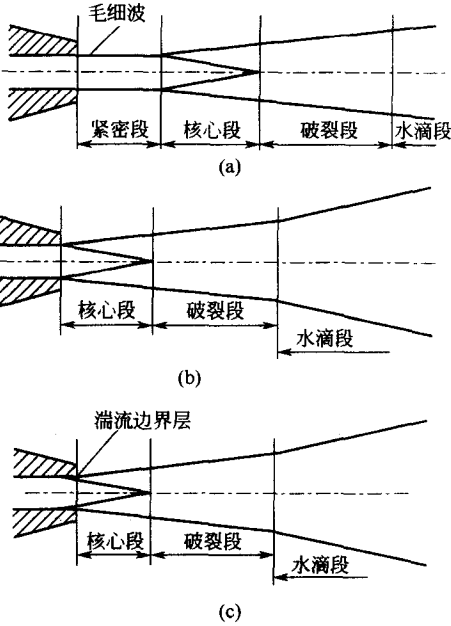


图 1-1 非淹没水射流结构随压力的变化

先开始于射流表面，逐渐向轴心发展，因而，在距喷嘴一定距离内就形成了一个锥形的等速流核区。等速流核区内射流的轴向动压力、流速及密度基本保持不变。

紧密段结束端面至等速流核心区消失的截面间的一段射流即为射流核心段。核心段射流的核心部分仍保持初始喷射速度，呈紧密状态。由出口端面至核心段结束也称起始段，在起始段内等速流核区外的区域均为射流混合区。

射流起始段后较长一段射流为射流破裂段，一般也称基本段。在经过起始段后，由于气体动力、惯性力、黏性力和表面张力等各种力相互作用的综合结果，连续的射流液柱最终分裂破碎成为形状各异的分散团块。该段内射流表面破碎为水滴，射流中心由紧密状态破碎为大块水团，并且射流轴向流速及动压力逐渐减少，随离开喷嘴距离的增大，水团渐渐变小，最终全部变成水滴。在垂直于轴心的截面上，轴向动压力与流速自最大值迅速减至边界上的最小值，如图 1-2 所示。同时，该段内射流仍保持完整，并且有紧密的内部结构。不同的射流状态可产生不同的分裂形式，其决定因素是喷射速度。

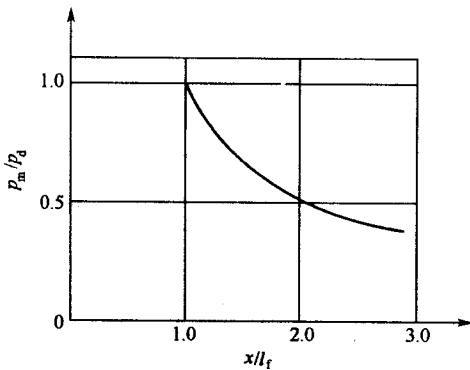


图 1-2 射流轴心动压沿程变化规律
 p_m —轴心动压； p_a —起始段轴心动压；
 x —射流距出口的距离； l_1 —射流起始段长度

射流基本段后即射流水滴段（消散段）。此时，射流与环境介质已完全混合，射流轴向速度与动压力相对较低。如在大气中，射流将吸入大量空气，射流的整个断面被空气隔离成水滴状，射流则已变成水滴与空气的混合物或雾化，整个流动呈现出气-液两相流的流动特征。

由于射流结构受喷嘴出口压力影响很大，所以当压力为低、中、高、超高压时，射流结构也不相同。在低压条件下（0.5~1MPa 以下），紧密段明显；而当压力大于 0.5~1MPa 时，紧密段则基本消失，呈现出典型的高压水射流特性。

高压水射流由于使用的压力较高，喷嘴出口前后边缘部分的附面层由层流变为湍流。从层流附面层转为湍流附面层的迟早，与喷嘴内表面加工的程度和光洁度有关。若喷嘴内表面加工较好，就可以在压力比较高的地方出现湍流附面层。在高压水射流中，随压力的增加，射流扩散程度有增加的趋势，核心段随之缩短。

连续高压水射流特性取决于核心段长度及其扩散规律。但由于核心段长度不易确定，研究者通过实验确定射流结构和扩散特性，并用定义初始段射流长度的方法，简化了不易确定核心段长度和过渡段射流特性变化复杂的问题。实验表明：当雷诺数大于 2×10^6 后，核心段长度与射流压力无关，仅仅取决于喷嘴。不同喷嘴形成的射流初始段形状也不相同，但基本段内射流扩散比较稳定。

当压力超过 50.0MPa 时，射流的速度将超过音速，湍流附着面将可以侵入喷嘴出口以内。试验表明，此时的射流扩散程度有所减小，射流趋于紧密。

由于射流基本段与消散段间的划分较为模糊，两段间无明显的特征变化界面，因而，许多学者只把射流分成起始段和基本段加以讨论。射流各段在工程应用中具有不同的功能。起始段用于材料切割最为有效，而基本段对清洗、除锈、修整加工、表面抛光及去毛刺等作业更为有利。消散段则主要应用于降尘、除尘等工艺中。

射流流场的变化和发展情况如图 1-3 所示，假定射流孔口速度 U_0 是均匀的，则紧靠射流孔后面，湍流混合区的宽度为零；此宽度随离开射流孔距离的增加而增加，一直到 a_1 处 (a_1 为核心区的长度，图中的 S_c)。此后混合区覆盖了整个射流。轴上的速度一直保持 U_0 到 a_1 处，此后轴向流速就随距离的增加而下降，再往下更远的距离上，射流才变为充分发展的，各后续截面上流型才变为相似的。通常核心区与充分发展的湍流区之间的过渡区相当短。Forstall 的经验公式给出 $S_c = 4D$ ，但是其他的实验发现 S_c 要大得多。

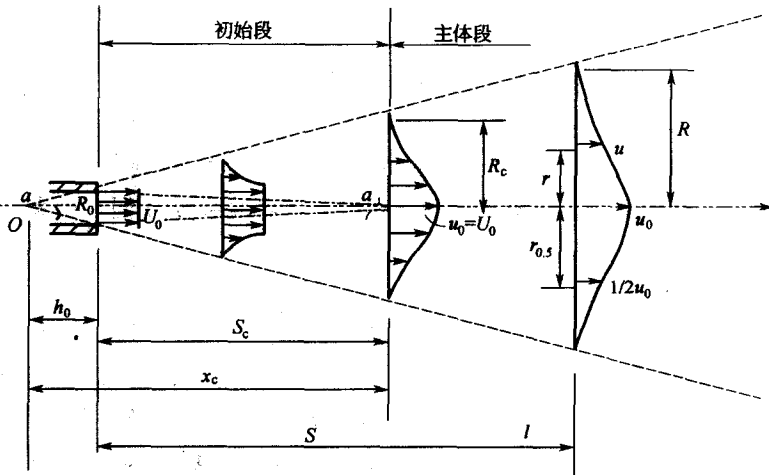


图 1-3 射流平均流场