

# 水射流理论与技术

沈忠厚 著



石油大学出版社

# 水射流理论与技术

沈忠厚 著

石油大学出版社

## 内 容 提 要

本书对水射流的基础理论与技术做了较全面的论述。全书共十二章,主要包括:水射流流体力学基础知识、射流基本理论、水射流切割理论与方程式、射流数值模拟基础、脉冲射流、空化射流、自激振荡射流、磨料射流、旋转射流、水射流与机械刀具联合破岩技术和水射流技术在石油工业及其他领域中的应用。

本书可作为从事水射流技术研究人员、开发人员以及培养射流领域的硕士生和博士生用书,亦可作为高等院校本科生开设选修课的教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

### 水射流理论与技术

沈忠厚 著

\*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

山东省东营新华印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 28.125 印张 720 千字

1998年3月第1版 1998年3月第1次印刷

印数 1—500 册

ISBN 7-5636-1087-5/TE·208

70.00元(精装)  
定价: 55.00元(平装)

# 前 言

水射流技术是近 20 年来发展起来的一门高新技术,在采矿、冶金、石油、航空、建筑、化工、市政建设及轻工业等领域得到广泛应用,并取得了可喜成果。为适应科研、开发和教学需要,特撰写了这本专著,供有关部门从事水射流技术科研、开发和培养射流领域硕士生及博士生使用,亦可作为高等院校为本科生开设选修课的教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

石油大学高压水射流研究室自 1980 年起进行水射流应用基础理论与技术的研究,结合研究课题共培养了博士后、博士生及硕士生 30 多名。根据培养研究生的需要,研究室开设了《射流动力学及水射流破岩基础》和《射流理论与技术》课程。这部专著主要是在总结 17 年来研究室科研成果和讲授研究生课程讲稿基础上撰写而成。同时,对水射流的基础理论及国内外学者的最新研究成果也做了相应介绍。

在本书撰写过程中,石油大学高压水射流研究室的王汝元教授参与了第二章和第三章、王瑞和教授参与了第八章、李根生教授参与了第六章、汪志明教授参与了第七章、李兆敏副教授参与了第四章、徐依吉副教授参与了第十二章的撰写工作,同时还得到了该研究室其他有关同志的大力协助,在此表示衷心感谢。

在撰写过程中还得到全国许多院校、有关单位的学者和专家的大力帮助与支持,谨在此表示衷心的感谢。特别是中国石油天然气总公司赵国珍教授、李克向教授级高工、王关清高工、孙振纯教授级高工,石油大学刘希圣教授、陈庭根教授,中国矿业大学程大中教授、孙家骏教授和焦作矿业学院崔谨慎教授对本书给予了更大的帮助和支持,并提出了许多宝贵意见和建议,在此致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中不当之处,恳切欢迎同仁及读者批评指正。

作 者

1997 年 8 月于石油大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
第一节 水射流技术的发展概况 .....	(1)
第二节 水射流的分类 .....	(2)
第三节 水射流的特点 .....	(4)
第四节 水射流技术的应用 .....	(4)
<b>第二章 射流基础知识</b> .....	(8)
第一节 流体的基本性质 .....	(8)
第二节 声速、马赫数及滞止参数 .....	(9)
第三节 膨胀波、微弱压缩波及激波 .....	(13)
第四节 流体力学方程 .....	(25)
第五节 紊流参数的平均方法及雷诺平均法则 .....	(33)
第六节 雷诺方程和雷诺应力 .....	(36)
第七节 紊流的半经验理论 .....	(39)
第八节 紊流的能量方程 .....	(45)
参考文献 .....	(48)
<b>第三章 淹没射流与非淹没射流</b> .....	(50)
第一节 紊流射流的一般特性 .....	(50)
第二节 淹没射流的基本理论 .....	(66)
第三节 伴随射流 .....	(84)
第四节 组合射流 .....	(95)
第五节 超声速射流 .....	(99)
第六节 非淹没射流 .....	(109)
参考文献 .....	(116)
<b>第四章 紊流模型和射流数值模拟</b> .....	(119)
第一节 紊流模型 .....	(119)
第二节 数值计算方法 .....	(124)
第三节 射流流场数值模拟进展 .....	(125)
第四节 射流流场数值模拟的控制方程和差分方程 .....	(127)
第五节 轴对称二维紊流射流撞击流场的数值研究 .....	(136)
第六节 三维紊流射流撞击流场的数值研究 .....	(147)
参考文献 .....	(159)
<b>第五章 脉冲射流</b> .....	(162)
第一节 管道中的水击现象 .....	(162)
第二节 一元不稳定流基本方程 .....	(163)

第三节	水击压力计算	(165)
第四节	水击基本方程	(167)
第五节	脉冲射流	(173)
第六节	脉冲射流产生的方法及其设备	(174)
参考文献		(177)
<b>第六章</b>	<b>空化射流</b>	(179)
第一节	概述	(179)
第二节	空泡动力学基础	(183)
第三节	空化初生及其影响因素	(194)
第四节	空蚀机理及其影响因素	(196)
第五节	空化射流	(200)
参考文献		(210)
<b>第七章</b>	<b>自激振荡气蚀结构射流</b>	(212)
第一节	概述	(212)
第二节	自激振荡气蚀结构射流喷管内外水声学特性	(214)
第三节	自激振荡气蚀结构射流流场大尺度结构化特性	(221)
第四节	自激振荡气蚀结构射流喷管优化设计模式	(231)
参考文献		(248)
<b>第八章</b>	<b>旋转水射流</b>	(250)
第一节	概述	(250)
第二节	旋转射流的运动特性	(251)
第三节	旋转射流喷嘴设计	(264)
第四节	旋转射流井底流场的数值模拟	(272)
第五节	旋转射流破岩钻孔	(281)
参考文献		(290)
<b>第九章</b>	<b>磨料射流</b>	(293)
第一节	磨料水射流工作原理	(293)
第二节	液固两相流动原理	(296)
第三节	磨料射流喷头及供料方式	(302)
第四节	前混合式磨料射流	(307)
第五节	磨料射流切割机理及切割规律	(313)
第六节	磨料射流除锈和除涂层的清洗规律	(320)
第七节	磨料浆体射流	(324)
参考文献		(325)
<b>第十章</b>	<b>水射流切割物料及其影响因素</b>	(328)
第一节	物体表面上所受射流压力及其分布	(328)
第二节	水射流切割物体破坏机理	(331)
第三节	水射流切割模型	(333)
第四节	影响水射流切割性能的因素	(338)
第五节	水射流切割物料时的比能耗	(352)

参考文献.....	(353)
<b>第十一章 水射流与机械刀具联合破碎岩石.....</b>	<b>(355)</b>
第一节 概述.....	(355)
第二节 机械刀具切割岩石机理.....	(357)
第三节 水射流结合切削刀具切割破碎岩石.....	(362)
第四节 钻井条件下水射流结合齿形刀具切割破碎岩石.....	(367)
第五节 影响联合破岩效果的主要因素.....	(371)
参考文献.....	(388)
<b>第十二章 高压水射流技术在石油工程及其他领域中的应用.....</b>	<b>(390)</b>
第一节 水射流技术在石油钻井中的应用.....	(390)
第二节 水射流在完井及采油工程中的应用.....	(414)
第三节 水射流清洗.....	(423)
第四节 水射流在其他领域中的应用.....	(435)
参考文献.....	(441)

# 第一章 绪 论

水射流技术是近 20 年发展起来的一门新技术,其应用日益广泛。目前已在煤炭、石油、冶金、航空、建筑、交通、化工、机械、建材、市政工程、水利及轻工业等部门应用,主要用来对物料进行切割、破碎和清洗。尤其近年来随着高科技的迅速发展,激光束、电子束、等离子体和水射流,业已成为新型的切割工具。其中激光束、电子束和等离子体属于热切割加工。而水射流是唯一一种冷切割加工手段。在对许多材料的切割、破碎及表面预加工中,水射流有其独特的优越性。

## 第一节 水射流技术的发展概况

自古以来,人们总是把水比作柔软,把岩石比作坚硬。然而,“滴水穿石”却正是柔软的水穿透了坚硬的岩石。在大雨中飞行的飞机被雨滴侵蚀的“雨蚀”现象也是柔能克刚的实例。然而,过去人们都是研究如何防止高速水流的侵蚀,没有或很少研究利用高速水流为人类作功和服务。

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。本世纪 50 年代初前苏联和中国利用水射流进行采煤(称为水力采煤)。随着水力采煤技术的推广,人们认识到提高水的压力和适当减小喷嘴直径可以显著地提高水射流落煤效果。于是人们开始研究较高压力的压力源(高压泵和增压器)及高压脉冲射流(俗称水炮)。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,部分学者片面认为水射流的压力越高越好。日本研究出 1 700MPa 的增压器,前苏联和美国研究出 5 600MPa 的脉冲射流发生器。到 70 年代末,水射流技术出现了一个新的动向,即从单一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,这些射流的水压并不算太高,但它们的威力却大大高于同样压力下的普通连续水射流。进入 80 年代,磨料射流、空化射流、气水射流和自振射流的发展,把水射流技术推向一个新的阶段。同时,各国学者也开始对各种射流的基础理论和切割机理等方面进行研究。水射流技术的应用范围也由采矿工业扩大到航空、建筑、建材、交通运输、市政建设、化工、机械、轻工业及医学等领域。水射流作为一种良好的切割、破碎和清洗垢的工具,已被人们所公认,一大批水射流切割机、采煤机、掘进机、打桩机和不同用途、不同形式的清洗机已投入市场。

自 1972 年英国流体力学研究协会(BHRA)组织了第一次国际水射流切割技术会议后,以后每两年举行一次,至今已召开 12 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 1 次会议,至今已召开 8 次会议;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(International Society of Water Jet Technology)于 1987 年成立,协会有自己的正式刊物——《国际水射流杂志》(International Journal of Water Jet Technology)定期出版,并组织召开了 4 次环太平洋国际



水射流会议。这些国际会议大大推动了世界各国水射流技术的发展。

中国水射流技术的研究是从本世纪 70 年代开始的,最初主要是在煤炭部门研究和应用,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 20 多年的研究和实践,取得很大进展,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讨论会,至今已举行 8 次,并出版了《高压水射流》杂志。1987 年在北京还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。

回顾水射流技术的发展概况,大体上可分为四个阶段:

(1) 第一阶段(探索试验阶段):60 年代初,主要研究低压水射流采矿。

(2) 第二阶段(设备研制阶段):60 年代初至 70 年代初,主要研制高压泵、增压器和高压管件,同时推广水射流清洗技术。

(3) 第三阶段(工业应用阶段):70 年代初至 80 年代初,主要特点是大量的水射流采煤机、切割机、清洗机相继问世,并进行了工业试验和推广应用。其应用领域也由采矿发展到其他领域。

(4) 第四阶段(迅速发展阶段):80 年代初至 90 年代中,主要特点是水射流技术研究进一步深化,磨料射流、空化射流和自激振动射流等新型射流发展很快,许多产品已达到商品化。

## 第二节 水射流的分类

水射流的种类很多,分类的方法也不一样,现介绍几种常用的分类方法。

### 一、按驱动压力分类

驱动压力等级是设计射流工艺系统的主要参数,它不但确定工艺系统的经济技术合理性,而且对工艺设备技术复杂性的影响也很大。根据水射流界一般采用的压力等级进行分类,如表 1-1 所示。

表 1-1 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	140~420	增压器

### 二、按工作和环境介质分类

按射流工作介质和环境介质来分类,射流可分为淹没射流和非淹没射流两种。射流的工作介质与环境介质相同时,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。如果环境介质与工作介质不同,则称为非淹没射流。大气中的水射流就是最常见的非淹没射流。这种划分类型的原因主要是从射流的流体动力学结构和动力特性考虑的。因为淹没射流的运动属于单一介质的流动问题;而非淹没射流是两相(或多相)介质

的流动问题。

### 三、按固壁条件分类

流体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。在有固壁约束下的射流称为非自由射流;反之,则为自由射流。在有些文献里,自由射流指的是没有固壁限制,而且环境介质的流速很小(或静止)的射流。

淹没射流不受固壁的限制,这种射流称为淹没自由射流;反之,称淹没非自由射流。同样,非淹没射流不受固壁条件约束,称为非淹没自由射流;反之,称为非淹没非自由射流。

### 四、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。定常射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。而非定常射流则与此相反,射流各断面上的流体力学特性不仅随位置而变化,而且随时间而变化。定常射流一定是连续射流,而非定常射流可以是连续射流,也可以是非连续射流。

### 五、按射流对物料的施载特性分类

按射流对物料的施载特性,水射流可分为连续射流、冲击射流和混合射流三种,其对物料的施载特性如图 1-1 所示。

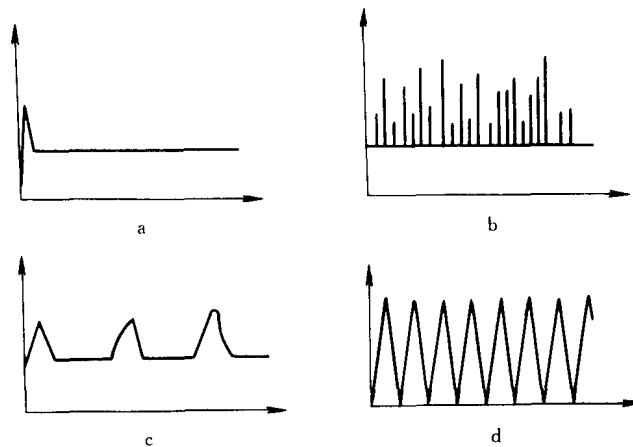


图 1-1 水射流施载特性示意图

a—连续射流;b、c—混合射流;d—冲击射流

#### 1. 连续射流

连续射流对物料施载开始时有一个短时的冲击峰值压力,以后是稳定的较低压力,如图 1-1a 所示。这种射流只有冲击峰值压力后的稳定压力才具有代表性。这种射流常用于切割和清洗物料。

#### 2. 冲击射流

这种射流对物料的施载特点是产生一个只持续极短时间的压力峰值,这时只有压力峰值才具有代表性,如图 1-1d 所示。高速水滴冲击和脉冲水射流可以看作是冲击射流。

#### 3. 混合射流

介于上面两种施载方式之间的射流为混合射流。其施载特点是冲击压力和稳定压力相结合。空化射流可以看作是混合射流,如图 1-1b 所示。具有一定长度的液柱间断射流,其施载过程为一冲击压力加上一段稳定压力。稳定压力维持时间与柱状液滴速度和大小有关,如图 1-1c 所示。

在实际工程中,要实现前两种施载方式是困难的。对于通常的连续水射流来说,高压柱塞泵的柱塞及阀门的作用将产生一定的压力波动,必然影响其稳定施载,只是这种压力的波动不太大,可近似地看作稳定施载而已。另外要实现单颗液珠施载也是困难的,因为液球不能太小,而体积较大的液珠又与有一定长度的液柱的施载相似,属于混合施载。因此,连续施载和冲击施载只是近似的。

### 第三节 水射流的特点

水射流技术之所以能得到这样高速的发展,主要是这种技术与其他加工方法相比具有一系列优点。充分发挥和利用这些优点,是我们研究水射流技术的主要目的。水射流技术主要有以下优点:

#### 1. 工作介质低廉

水射流工作介质是水,不仅易取而且成本低廉。如果进行切割加工,由于喷嘴小(一般 0.5 mm 以下),用量很少,而且水一般无污染。

#### 2. 切口窄而整齐

用水射流切割物料时,水射流对切割物的作用力集中在射流喷射方向,其横向分力很小。因此,切口窄而整齐,可以对物料进行精密切割和成形加工。

#### 3. 工作机件易于实现自动控制

由于水射流机构具有喷头体积小、后坐力小、移动方便,便于实现光控、数控或机械手控制。利用机械手可以在人不能靠近的危险环境下工作,如拆除废核反应堆的混凝土掩体和清洗有毒、易爆的容器等。

#### 4. 能降温、除尘和延长截齿寿命

水射流用在煤矿采掘机上,它除参与切割提高采掘能力外,还可以冷却和润滑截齿,减少磨损,提高截齿寿命。同时,还能降低采掘工作面的粉尘,实现无火花切割,从而为煤矿采掘工作提供一个安全卫生的环境。

#### 5. 体积小

水射流整套装置体积小,可以装在汽车上进行远距离野外作业。

水射流技术虽然有以上优点,但也存在着一些需要进一步解决的问题。主要有:

(1) 与机械切割相比,消耗比能高。

(2) 一些水射流部件还不太过关,如超高压泵、旋转密封、耐磨喷嘴和高压管件等。

这些问题,是目前各国学者正在研究解决的问题。

### 第四节 水射流技术的应用

水射流技术的应用范围和领域十分广泛。应用范围主要有以下五个方面:(1) 工业切割;(2) 挖掘、开采和钻探;(3) 岩石切割和掘进;(4) 表面清洗;(5) 材料破碎。现简要阐述如下:

## 一、工业切割

工业切割和加工,是水射流技术应用的主要方面。它包括纯水射流切割和精密切割(含磨料),切割物料范围和涉及工业领域如表 1-2 所示。

表 1-2 水射流工业切割和应用领域

A. 纯水型需要领域	水射流切割的应用领域
(1) 塑料切割	工程塑料成形加工、家电、膜工业
(2) 纸切割	瓦楞纸制造、废品回收、纸尿布
(3) 纤维、纺织品	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、合成材的切割	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. 精密切割用磨料型的需要领域	水射流切割的应用领域
(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、汽车工业、造船业、各种机械工业、钢筋制品、桥梁业、钢铁业、有色金属工业、金属制品制造业、原动机制造业、厨房用品制造等
(2) 切割镶网玻璃、彩色玻璃、叠层玻璃	玻璃业、住宅业、室内装潢业(彩色玻璃等)、广告业、医疗器械制造业等
(3) 新材料切割 复合材料(玻璃纤维增强塑料、纤维增强金属、纤维增强复合材料) 陶瓷 其他(磁性材料等)	新材料相关产业 飞机工业、车辆工业、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	建筑业、住宅业、砖瓦业
(5) 其他	核能工业(使用经济核燃料管的切割)、石墨制造加工业(各种石墨)

## 二、挖掘、开采和钻探

目前的挖掘、开采和钻探系统中应用水射流技术,在美国属于领先地位的是高级采矿建筑系统公司、弗勒第尔公司和弗尔莫尔公司。弗勒第尔公司为石油天然气工业研制水射流钻探系统;弗尔莫尔公司为城区地下公用设施的安装和更换提供水射流水平钻探系统。

高级采矿建筑系统公司的第一件产品是射流锚杆钻机(Jetbolter)。这是一种用于地下矿山安装顶板锚杆的水射流钻机,这种钻机可钻出直径为 19~25mm 的小口径锚杆孔,该系统在煤矿井下也可使用。

高级采矿建筑系统公司用安装在卡车和拖车上的设备为建筑业提供切割和拆除服务。

如只清除混凝土(无钢筋)时,可使用不加磨料的射流。如要切割有钢筋和钢板加强的混凝土,可使用磨料射流系统。

弗勒第尔公司试图为石油天然气工业提供钻探服务。弗勒第尔钻探系统由四个主要部分构成:(1)增压器;(2)双喷孔旋转接头;(3)双管钻具组;(4)有三个高压喷嘴的机械钻头。此系统将钻井液流分成两股,其中一股经过澄清,加压到 200MPa,输送到钻头前部的小喷嘴。在室内建立了一个模拟钻头试验台,能模拟实际钻井条件下对实物钻头进行测试。该系统由流钻公司(Flowdrill)进行现场试验,试验表明这套系统钻速比一般钻井提高 2~3 倍。

弗尔莫尔公司正在发展为民用公司服务的水射流系统,服务内容包括:水射流孔和小型地下涵洞,以安装或更换电源、电话和通信电缆,水、气干线,小型下水道或泄洪沟。由于这种服务可避免破坏地面,所需费用和给用户带来的不方便都大为减少。直径为 100mm 的涵洞可水平钻进 120m。一种电子导向系统已经应用,在 60m 内精度极高,该系统还有避开障碍物的能力。一种可以减少邻近设施损坏的“软钻孔”技术也被应用。

### 三、岩石切割和掘进

1976 年,在美国水射流辅助全断面掘进机上盘形滚刀破岩进行了首次试验。这项计划受到了美国政府的支持,并有科罗拉多矿业学院、罗宾斯公司和流体工业公司参加。试验证明:在花岗岩区使用 315MPa 高压水射流可提高掘进率。但由于有关高压泵组设备长期可靠性问题阻碍了该项技术被掘进机工业接受。所以,目前正在研究设计一种用较低压力的射流辅助掘进机切割坚硬岩石技术。现已发现,射向滚刀轨迹低于 140MPa 的较低射流压力可以改善掘进机的工作效率。

在煤系岩层,对水射流辅助截齿破岩已进行了研究。美国土力学研究所拥有一套良好的试验设施,可进行旋转滚筒截割头试验。

从 1983 年起,美国矿业局就在水射流辅助切割岩石方面进行了广泛的研究。研究重点放在 20~70MPa 中等压力的使用上。矿业局的研究工作在许多方面取得实用效果,如刀具由射流冷却和润滑,降低刀具承受力,从刀具路线上清除破碎材料,机械刀具造成的岩石裂缝由水力破碎,降低煤系岩层瓦斯摩擦起火的发生率。

美国矿业局还进行了水射流辅助长壁煤层采煤机的切割试验。这些试验得到了美国挖掘和掘进设备公司的帮助。使用 40 MPa 的水压能使切割效果得到改善,并能降低呼吸性粉尘的含量。

美国矿业局双城研究中心的乔治·A·萨凡尼克博士和其他一些研究人员最近进行了用磨料水射流在岩石上切割深槽的研究。

美国的科学协作者公司对用于岩石切割、钻探和清洗的高速冲击水射流进行了研究。采取这种方法的原理是通过一个回转阀使喷嘴上游的流阻产生循环变化。据报道这种系统已取得许多特殊效果,但还没有见到具体内容的有关报道。

特拉索流体工程公司用空化射流对混凝土和沥青路进行切割研究试验,目前正在研制一台样机。

### 四、表面清洗

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、下水道和锅炉等清洗作业,近年来发展很快。各种清洗机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,为用户提供服务,已进入商品化阶段。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。在清洗作业中一般采用 70MPa 的压力和 100L./min 的流量,在某些情况下,压力可达到 140MPa。在船坞码头对船体进行清洗,以清除水下海洋生物、油漆和铁锈,目前采用水射流和磨料射流清洗。用纯水射流清洗使用压力较高,需要压力高达 140MPa,用磨料射流清洗要解决清洗后磨粒的处理问题。目前正寻求一种不加磨料而清洗压力又不太高的水射流来清除船体上沉积的海洋生物。

美国马里兰劳瑞尔的特拉索流体工程公司多年来在空化射流方面做了大量的研究工作,而近年来对自激振动射流也做了不少研究工作。利用空化射流来清洗船体获得了较好的效果,目前已研制出成型的样机。

空化射流和自激振动射流用于清洗目的,将是不太远的事了。

## 五、材料破碎

密苏里-罗拉大学的最新研究表明,高压水射流在使用上还有很大潜力,它可将煤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。

## 第二章 射流基础知识

本章主要研究与射流有关的重要概念及基本理论,其中包括马赫数、滞止参数、膨胀波、微弱压缩波、激波、流体力学基本方程等。在工业中常用的射流均为紊(湍)流射流。因此重点介绍紊流方面的基础知识,包括紊流参数的平均方法、雷诺平均法则及紊流的各种半经验理论等。

### 第一节 流体的基本性质

#### 一、流体的三相状态

通常所说的流体包括液体和气体两大类。对于同一种流体,在压力和温度变化时可以由气相转变为液相,也可由液相转变为固相。其变化均可用压力、温度的  $pT$  图来表示,如图 2-1。图 2-1 中 1 点为三相点,1~2 线为气化曲线,是液气两相的分界线。1~3 线为固化曲线,是固相和液相的分界线。1~3 和 1~2 两线之间的区域为液相区,1~3 线以左为固相区,1~2 线以右为气相区。根据压力和温度的变化,固相、液相和气相三者可以相互转化。

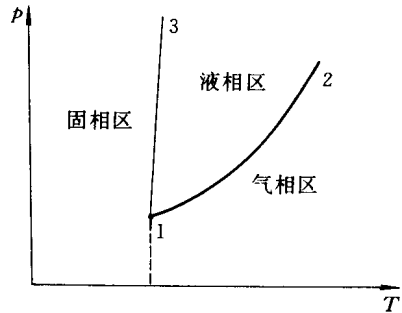


图 2-1 流体三相  $pT$  图

#### 二、流体的可压缩性

流体在温度不变的条件下,压力增加其体积变小,而压力减小其体积增加,流体的这种性质称为可压缩性。用体积压缩系数  $\beta_p$  表示:

$$\beta_p = -\frac{dV}{V dp} \quad (2-1)$$

式中  $\beta_p$  ——体积压缩系数,  $m^2/N$ ;

$\frac{dV}{V}$  ——体积的相对变化;

$dp$  ——压力的变化, Pa。

在通常的条件下液体的体积压缩系数很小,可略而不计,这种流体称为不可压缩流体。

对于气体,其压缩性较为明显,气体流动速度较大时,在流动过程中密度变化较大,可压缩性是气体重要特性之一。对于理想气体在流场中任一点的压力、密度和温度的关系用状态方程表示:

$$p = \rho RT \quad (2-2)$$

式中  $p$  ——压力, Pa;

$\rho$ ——密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$T$ ——绝对温度,  $\text{K}$ ;

$R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于不同的气体,其气体常数也不同,定压热容  $c_p$  和定容热容  $c_v$  也各不相同,其关系为  $c_p - c_v = R$ 。定压热容与定容热容之比称为热容比或绝热指数,用  $K$  表示:

$$K = \frac{c_p}{c_v}$$

### 三、流体的粘性

粘性是实际流体所具有的特性之一,但是只有在流动时层与层之间存在速度梯度才显露出来。通常用动力粘性系数  $\mu$  表示,或用运动粘性系数  $\nu$  表示,两者的关系为:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-3)$$

动力粘性系数与温度有关,液体的动力粘性系数随温度的增加而减小,而气体的粘性系数随温度的增加而增大。根据气体分子运动理论可知,气体的动力粘性系数与温度的关系为:

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{273} \right)^{1.5} \cdot \frac{273 + C}{T + C} \quad (2-4)$$

式中  $\mu_0$  ——  $T=273\text{K}$  时的粘度;

$C$  ——常数。

对空气而言  $\mu_0 = 1.711 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ,  $C = 122\text{K}$ 。

## 第二节 声速、马赫数及滞止参数

### 一、声速 $c$

声速是微弱扰动在具有弹性的流体介质中的传播速度。理论上,在不可压缩流体中微弱扰动的传播速度是无限大的。但是在实际流体中,由于具有弹性,因此其传播速度是有限值。现按等断面管中无限微弱平面压缩波的运动来研究声速。管中充满静止的气体,其压力、密度、温度分别为  $p, \rho, T$ ,管子的左端放一活塞且以速度  $v$  向右轻微推动  $dt$  时间,如图 2-2 所示。此时活塞先压缩与活塞面直接接触的那层流体,密度增加  $d\rho$ ,压力增加  $dp$ ,温度增加  $dT$ 。这一层流体又压缩邻层流体,邻层再下传,可见形成一分界面  $A-A$ ,面的左边是压缩的流体,面的右边是未被压缩的流体。 $A-A$  面就是微弱压缩波的波面且以声速  $c$  向右运动。

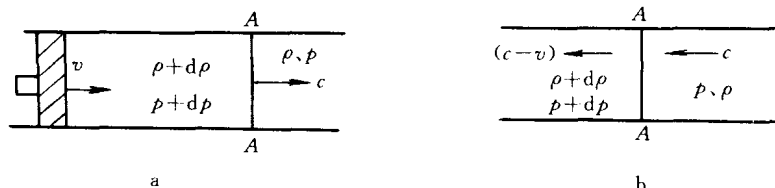


图 2-2 声速运动示意图

在  $dt$  时间内,被波面所扫过的未被扰动的流体质量为  $dm$ :



$$dm = c\rho A dt$$

式中  $c$  —— 声速；

$\rho$  —— 未被扰动的流体密度；

$A$  —— 直管的断面积。

扰动后的流体密度为  $\rho + d\rho$ ，压力为  $p + dp$ ，在  $dt$  时间中扰动区内增加的流体质量为  $dm$ ：

$$dm = (c - v)(\rho + d\rho)A dt$$

式中  $v$  —— 扰动区中流体的运动速度（即活塞运动速度）；

其余符号意义同前。

根据质量守恒定律知： $dm = dm$ ，故：

$$c\rho = (c - v)(\rho + d\rho) \quad (a)$$

现将坐标系取在波面  $A-A$  上，即观察者站在波面上且以声速  $c$  与波一起运动，此时观察到的现象是波面不动，而原来静止的流体现以声速  $c$  流向波面，流过波面后的流体速度为  $(c - v)$ ，见图 2-2b。不计流体的粘性时，由动量方程式有：

$$[p - (p + dp)]A dt = dm[(c - v) - c]$$

因

$$dm = \rho c A dt$$

则

$$dp = \rho c v \quad (b)$$

将式(a)代入式(b)消去  $v$  得：

$$dp = \rho c \frac{cd\rho}{\rho + d\rho} = c^2 \frac{d\rho}{1 + \frac{d\rho}{\rho}} \quad (c)$$

因  $\frac{d\rho}{\rho}$  与 1 相比可略去不计，则：

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (2-5)$$

式中，符号的意义同前。

此式是根据微弱扰动压缩波的传播推导出来的，如果用微弱扰动膨胀波的传播，也可以导出同样的结果，这说明在相同介质的条件下，其传播速度是相同的。声波实质上是由微弱扰动压缩波和微弱扰动膨胀波交替组成的微弱扰动波。因此微弱扰动波传播的速度统称为声速。

按公式(2-5)来计算流体中的声速，还必须知道在流体微弱扰动的传播过程中压力  $p$  和密度  $\rho$  之间的函数关系。因为在微弱扰动的传播过程中，气体的压力、密度和温度的变化均是无限小量，即  $dp \rightarrow 0$ ， $d\rho \rightarrow 0$ ， $dT \rightarrow 0$ ，若忽略粘性作用，整个传播过程接近可逆过程。同时，由于此过程进行得相当迅速，来不及与外界进行热量交换，故微弱扰动的传播过程可视为等熵过程。对于完全气体，在等熵过程中，压力  $p$  与密度  $\rho$  之间的关系为：

$$\frac{p}{\rho^k} = c$$

微分此式得：

$$\frac{dp}{p} = K \frac{d\rho}{\rho}$$

则

$$\frac{dp}{d\rho} = K \frac{p}{\rho} = KRT$$