

高等学校规划教材

高压水射流技术

崔谟慎 孙家骏 主编

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

高压水射流技术

崔谟慎 孙家骏 主编

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

内 容 提 要

本书对高压水射流这一新技术做了较全面系统地论述。全书共十章, 主要内容包括: 高压水射流特点及其发展简史、高压水射流基础理论及破碎物料机理、高压水射流发生装置、磨料射流、空化射流、脉冲射流等特种射流, 以及高压水射流技术在煤炭、冶金、石油、建筑、化工、市政建设、医学等领域的应用实例。本书还适当介绍了国内外学者的部分研究新成果。

本书立足于工程实际, 是我国第一部高等工科院校本科生选修课教材, 也可供硕士研究生、及有关院校师生和工程技术人员参考。

高 等 学 校 规 划 教 材 高 压 水 射 流 技 术

崔 谟 慎 孙 家 骏 主 编

责任编辑: 刘永青

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 787×1092mm^{1/16}, 印张12^{1/2},

字数 295千字 印数 1—1,265

1993年10月第1版 1993年10月第1次印刷

ISBN 7-5020-0807-1/TD·746

书号 3575 A0243 定价 5.80元

前 言

高压水射流技术是近二十年来发展起来的一项新技术，在采矿、冶金、石油、建筑、化工、市政建设及医学领域得到广泛应用并取得可喜的成果。为适应教学和科研的需要，我们编写了高压水射流选修课教材，供矿业机械、矿山机电及采矿工程专业本科生使用。

本书是我国第一部正式出版的高压水射流方面的教材，对高压水射流这项新技术作了全面系统的论述。本教材的特点是根据专业培养目标，立足工程实际。同时，对高压水射流的基本理论及国内外学者的最新研究成果也做了相应介绍。

本书由焦作矿业学院崔谨慎教授及中国矿业大学孙家骏副教授主编，淮南矿业学院刘本立副教授，西安矿业学院黄俊副教授，焦作矿业学院尤明庆讲师参加编写。具体分工是：崔谨慎、尤明庆编写绪论、第一章、第六章（间断射流部分）、第八章、第十章；孙家骏编写第五章、第六章（脉冲射流部分）、第七章；刘本立编写第三章、第四章；黄俊编写第二章、第九章。

在本书编写过程中得到全国许多院校及科研设计单位的专家、学者的大力支持和热情帮助，提出了许多宝贵意见和建议，谨在此表示深深的感谢。同时对为本书倾注大量心血的程大中教授致以衷心的感谢。

由于我们的水平有限，书中不当之处在所难免，恳请使用本书的广大读者批评指正。

编 者

1992年9月

目 录

绪 论	1
第一章 高压水射流基础知识	6
第一节 水的物理力学性质	6
第二节 小孔口出流基本理论	8
第三节 淹没水射流的结构和特性	10
第四节 非淹没水射流的结构及几何特征	13
第五节 非淹没水射流的动力特性	16
第六节 流体的瞬变流动	18
第七节 固液两相流动简介	24
第二章 高压水射流对物料的作用	29
第一节 固体表面上所受的射流压力及其分布	29
第二节 高压水射流冲击引起的应力场	33
第三节 高压水射流冲击下引起物体的破坏	36
第四节 影响高压水射流切割性能的因素	40
第五节 水射流切割破碎物料时的比能耗	48
第三章 连续高压水射流发生装置	50
第一节 概述	50
第二节 卧式柱塞泵	50
第三节 增压泵	56
第四节 连续水射流喷嘴	62
第五节 超高压管路及其附件	66
第四章 磨料射流	73
第一节 概述	73
第二节 磨料射流喷头	74
第三节 磨料及其供给方式	78
第四节 前混合式磨料射流	82
第五节 磨料参数对射流切割能力的影响	87
第五章 空化射流	91
第一节 概述	91
第二节 空化初生原理	95
第三节 空化气泡的收缩溃灭	104
第四节 空化喷嘴结构与性能	107
第六章 脉冲射流和间断射流	112
第一节 脉冲射流的发生原理和装置	112
第二节 爆炸式脉冲射流发生装置	117
第三节 脉冲射流的几何结构与动力特性	119

第四节	截断式间断射流	121
第五节	调制式间断射流	124
第七章	密集射流	128
第一节	减阻液射流	128
第二节	气水射流	136
第三节	浆体磨料射流	138
第八章	水射流清洗	142
第一节	概述	142
第二节	基体与附着层及其粘附特性	142
第三节	水射流清洗物体外表面的方法及其工作特性	144
第四节	水射流清洗物体内表面的方法	149
第五节	提高水射流清洗能力的措施	153
第六节	确保水射流清洗作业的安全	156
第九章	高压水射流在矿山机械中的应用	158
第一节	水射流与刀具联合切割新技术	158
第二节	高压水射流采煤机	164
第三节	高压水射流掘进机	167
第四节	高压水射流钻孔机	172
第五节	水射流除尘风机	180
第十章	水射流在其他领域中的应用	182
第一节	射流喷浆技术在地基加固中的应用	182
第二节	水射流在石油钻井中的应用	184
第三节	水射流在制浆工艺中的应用	186
第四节	水射流在物料表面处理中的应用	188
第五节	水射流在医学领域中的应用	190
第六节	最新水射流技术应用研究简介	192
参考文献	194

绪 论

高压水射流技术是近二十年来发展起来的一门新技术，其应用日趋广泛。从原理上讲，它与我国煤矿中使用已久的水力采煤技术基本相同，都是把具有一定压力的水通过直径较小的喷嘴形成射流，将这股水射流作为工具进行切割、破碎和清洗物料。所不同的只是高压水射流的水压更高、喷嘴直径更细而已。水力采煤中使用的水压通常为5~15MPa，水枪出口直径为15~30mm；而高水射的水压一般在30MPa以上，有的高达数百兆帕，喷嘴直径则在2mm以下，最小的可达0.1mm。因此，高压水射流可以在很小的区域内集中极大的能量，例如1000MPa的高压水射流的能量束密度可以与激光束相匹敌。

图0-1为高压水射流切割系统示意图。由低压泵站2产生的低压水在增压器3增压后，经高压胶管传送到喷嘴4形成高压水射流。数控箱6操作喷嘴移动，从而完成各种切割作业。切割后的废液经回收处理后排放。

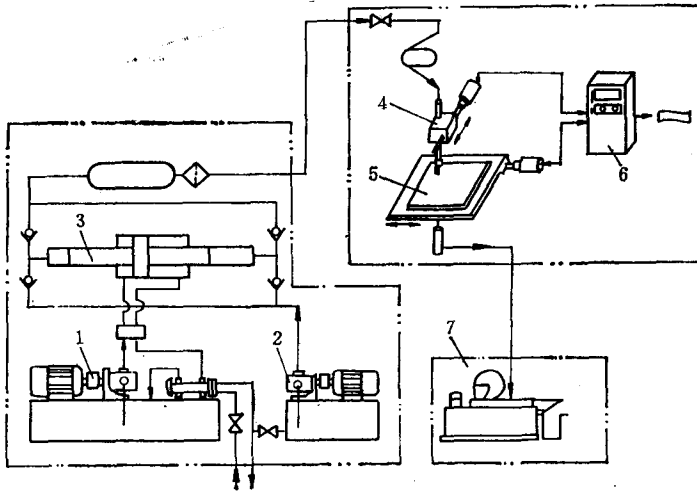


图 0-1 高压水射流切割系统示意图

1—油泵机组；2—水泵机组；3—增压器；4—喷嘴组件；5—工作台；6—数控箱；
7—废液回收处理设备

由此可见，高压水射流系统一般由压力源，喷嘴及其控制装置以及连接它们的高压管路和其它附属装置所组成。

一、高压水射流技术的发展概况

自古以来，人们总是把水比做柔软，把岩石比做坚硬。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所谓“雨蚀”现象也是柔能克刚的实例。然而，过去人们都是以消极的态度来研究如何防止高速水流的侵蚀，没有或很少采取积极的态度来研究如何利用高速水流为人类作功而已。

19世纪中叶,在北美洲第一次使用了高压水射流开采非固结的矿床。本世纪50年代初苏联和中国的水力采煤就是利用水射流的冲击和输送作用。随着水力采煤技术的推广,人们开始对高压水射流技术产生了浓厚的兴趣,同时也认识到,提高水的压力适当减小喷嘴直径可以显著地提高水射流的落煤效果。于是人们便开始研制较高压力的压力源(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,大大推动了高压水射流的研究工作。当时,部分学者片面认为好像高压水射流的压力越高越好。日本研制出了1700MPa的增压器、苏联和美国研制出了压力高达5600MPa的脉冲射流发生器。到了70年代末,高压水射流技术领域又出现了一个值得分析的新动向,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充分发挥水射流的威力这方面来了。开始出现高频冲击射流、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、气水射流的发展,使高压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、切割机理等方面进行了研究。高压水射流技术的应用范围也由单纯的采矿工业扩大到航空、建筑、化工、冶金、市政工程、纺织、金属切割及医学等领域。高压水射流作为一种良好的切割、破碎及清洗除垢的工具,已被人们所公认,一大批高压水射流切割机、采煤机、掘进机、打桩机和多种形式的多用途的清洗除垢机已投入市场。

1972年英国流体动力学研究协会(BHRA)组织了第一次国际水射流切割技术会议,以后每两年举行一次,至今已召开了八次。另外美国和日本等国也成立了自己的水射流学会,并邀请国外学者定期召开国际会议,这些国际会议大大推动了世界各国水射流技术的发展。

我国高压水射流技术的研究是继水力采煤技术之后,从本世纪70年代开始的,经过20年来的研究和实践,取得了很大进展,开发出了一批新技术和新产品。研究领域也由开始的煤炭工业领域发展到石油、冶金、化工、建筑、航空及医学领域,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,至今已举行了六次,出版了《高压水射流》杂志。1987年在北京召开了第一届环太平洋国际水射流会议,此后第二届、第三届会议分别在新加坡和中国台湾召开。为发展我国水射流技术起到巨大地推动作用。

回顾高压水射流技术的发展概况,大体上可分为四个阶段。即60年代初期的探索试验阶段,主要为低压水射流采矿;60年代初至70年代初为基础设备研制和攻关阶段,主要研制高压泵、增压器和高压管件及推广高压水射流清洗技术;70年代初至80年代初为工业试验及工业应用阶段,主要特点是大量的高压水射流采煤机、切割机、清洗机相继问世并进行了工业试验,其应用领域也由采矿发展到其他领域;80年代以来是高压水射流技术迅速发展阶段,主要特点是高压水射流技术的研究进一步深化,磨料射流、空化射流等新型水射流发展更快,许多产品已达到商品化。一个能够根据实际需要自如地控制高压水射流技术特性,为人类服务的新时代即将到来。

二、高压水射流分类

高压水射流的种类很多,分类的方法也不一样,下面介绍几种常用的分类方法。

1. 淹没射流和非淹没射流

按射流介质与射流周围介质来分,射流可以分为淹没射流和非淹没射流两种。对于水

射流而言，水射流在水中或其他液体中喷射时称做淹没水射流；在空气中喷射时为非淹没水射流。

2. 定常射流和非定常射流

按射流水力学特性，高压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；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其位置变化而变化，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。

3. 连续射流、冲击射流和混合射流

按射流对物料的施载特性，高压水射流又可分为连续射流、冲击射流和混合射流三种。其对物料的施载特性如图0-2所示。

1) 连续射流 该种射流对物料施载开始时有一个短时的冲击峰值压力，随之而来的是长期的稳定的较低的压力。这种射流只有冲击峰值压以后的稳定压力才具有代表性。该种射流常用切割和清洗物料。

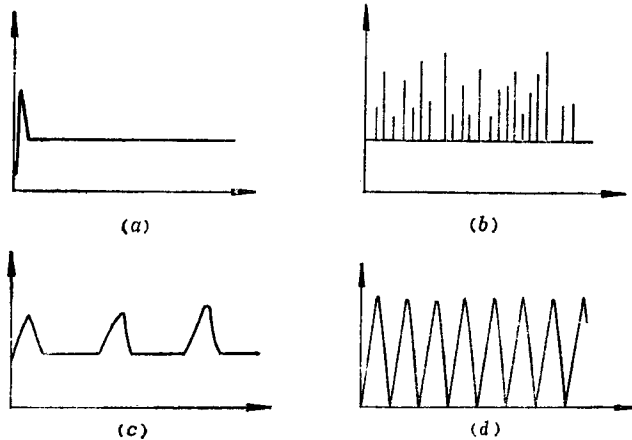


图 0-2 水射流施载特性示意图

a—连续射流；b、c—混合射流；d—冲击射流

2) 冲击射流 其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，这时只有峰值压力才具有代表性。高速水滴冲击和脉冲水射流可以看作是冲击施载方式。

3) 混合射流 介于上述两种极端的施载方法之间的称做混合射流。其施载特点是冲击压力和稳定压力相结合。含有空化气泡的连续水射流（空化射流）在其连续稳定施载的同时伴随着空化作用的冲击施载（b）。具有一定长度的液柱间断射流，其施载过程为一冲击力加上一段稳定压力。稳定压力维持的时间与柱状液滴的速度和大小有关（c）。

在实际工程中，要实现前两种极端的施载方式是很困难的。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，只是这种压力波动不太大，频率不太高，可近似地看作稳定施载而已。另外实现单颗液珠施载更为困难，因为液珠不能太小，而体积较大的液珠又与具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能是近似的。

4. 单相射流与多相射流

按射流本身介质来分, 高压水射流又可分为单相和多相射流。常见的纯水射流包括具有高分子聚合物的水射流都属单相水射流。混有固体磨料微粒的磨料射流及混有微小冰块的冰水射流属固液两相射流, 混有空化气泡的空化射流属气液两相射流。

有关高压水射流分类的方法还有一些, 这里就不一一列举了。

三、高压水射流的特点及应用

高压水射流技术之所以能得到突飞猛进的发展, 是由于它与其它加工方法相比具有一系列的优点, 充分发挥高压水射流的优势, 是我国研究高压水射流技术的宗旨。高压水射流技术的主要优点有:

(1) 高压水射流的工作介质是水, 不但丰富易取而且便宜。这就为高压水射流技术提供了与其他加工方式的竞争力。

(2) 高压水射流工作时有降温、灭尘、润滑等作用。对于煤矿采掘机械来说, 水射流除参与切割、提高采掘能力之外, 还可以冷却和润滑截齿, 减少磨损、提高寿命, 并能降低采掘工作面粉尘, 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。同时还消除在一些精密加工中产生的温度应力及变形现象。

(3) 高压水射流对被切割物的作用力集中在射流喷射方向, 其横向分力非常小。因而, 可以对质地较软的物料或多层复合材料进行精密切割, 不仅消除了机械刀具切割时产生的切口变形或分层现象, 而且可以得到非常平整的切口。

(4) 高压水射流工作过的水还具有冲运切屑的功能, 不必专设排屑装置。这对于钻孔和采矿等作业来说非常有利。

(5) 通过调节高压水射流的压力及流量, 可以方便地改变水射流的工作条件, 以适应不同的作业要求。

(6) 高压水射流的工作机构具有喷头体积很小、后座力小、移动方便, 便于实现光控、数控或机械手控制, 并且可以从被切割物料的任何部位开始切割出各种复杂的形状。利用机械手可以在人不能靠近的危险环境下工作, 如拆除废旧核反应堆的混凝土掩体和清洗有毒、易爆的容器等。

(7) 高压水射流整套装置体积不大, 可以装在汽车上进行远距离操作和野外作业。

高压水射流技术虽然有以上的优点, 但还存在着以下一些问题, 限制了它的推广应用, 有待于进一步研究解决。

(1) 高压水射流的喷嘴虽然很小, 但压力很高, 所需功率很大, 如2mm的喷嘴在压力为50MPa时射流功率近50kW。目前, 在很多工程作业中, 由于种种原因, 水射流的能量没有得到充分利用, 导致其切割破碎物料的比能较高, 严重影响着水射流的经济效益。

(2) 高压水射流切割时, 水滴的飞溅不仅影响工作环境的可视度而且浪费掉一些能量, 甚至被加工物表面残留大量的水, 增加工作面湿度。

(3) 一些高压水射流部件还不太过关, 如超高压泵、旋转密封、耐磨喷嘴、高压管等, 这些问题不同程度地限制了高压水射流技术的进一步推广, 也是各国学者今后研究的方向。

目前, 高压水射流主要用于切割、破碎和清洗除垢工作。如能充分了解高压水射流的力学特性及水本身固有物理化学性质, 并使二者有机地结合起来, 高压水射流技术的应用

前景是非常广阔的。下表为日本今中治综合汇集了高压水射流技术可能应用的各个领域和实例。

水射流的作用及应用可能性

水、水射流的作用	应用实例
高速水流具有的力学作用	—力学作用——水射流推进
	—破坏作用—— —切割作业 —钻孔作业 —破碎作业 —粉碎 —材料试验
	—运输作用——水力采煤
	—分离清除作用—— —剥离 —清洗 —去垢
	—变形作用——去毛刺
	—变形作用——表面处理
水的固有性质	—化学作用—— —化学研磨的组合 —化学加工的组合 —溶解作用—— — 在加工的同时注入防腐药剂 — 在水中添加着味剂、着色剂、消毒药剂的加工
	—冷却作用——在臭味、有毒瓦斯、粉尘产生的地方作业
	—淋湿作用——爆炸性的物质加工

第一章 高压水射流基础知识

第一节 水的物理力学性质

有关水的物理化学性质及密度、粘度等，在水的力学中已作了详细论述，这里仅就与高压水射流技术有关的一些内容作一简要叙述。

一、水的物理状态

随着温度、压力等外部条件的变化，水有气体、液体、固体三种物理状态。图 1-1 表示了水的凝固点与环境压力的关系。横坐标为压力，纵坐标为温度。从图中可以看出，当压力升高时，会出现非常奇特的现象。例如，把一个大气压下 20℃ 的水绝热加压至 9000 个大气压时，就会出现结冰现象。因此，在设计超高压器时，需要采取必要的“防冻”措施。常用的措施有二：一是适当提高增压器的吸水温度；二是在水中加入少量的甘油溶剂，试验表明，加入少量的甘油，可使水的固相线沿纵坐标下移（见图 1-1）。

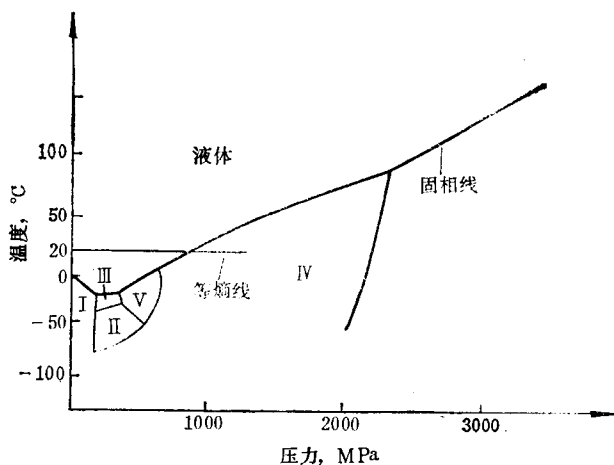


图 1-1 水的物理状态图

I—自然通常的冰；II~V—冰的结构符号

众所周知，当压力减小时，液体水也能蒸发变成气体（水蒸汽），通常把水由液体转化为气体的临界压力称做水的饱和蒸汽压。其值受温度的影响很大。下面给出了不同温度下的饱和蒸汽压力。

温度, °C	0	10	20	40
饱和蒸汽压, kPa	0.62	1.5	2.38	7.52

当水的压力低于饱和蒸汽压力时，水将沸腾产生蒸汽泡而使液体间断，从而水不再是一个连续的均匀介质。

二、水的压缩性

当压力增大时，水的体积将减小，密度增大。这种性质称之水的可压缩性。水的压缩性的大小一般用体积压缩系数 β 来表示。它是水的体积相对压缩值 dV/V 与压力增值 dp 的比值。即

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

水的压缩性也可用水的密度 ρ 来表示

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-2)$$

β 的倒数称之水的体积弹性模量，用 K 表示

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-3)$$

β 与 K 都是水的压缩性的量度，显然 K 值越大， β 值越小，说明越不容易压缩。 β 值与 K 值虽然也随水的压力及温度变化而变化，但这种变化不太大，故一般工程中都把它们看作常数。水的 K 值一般可取为 $(2.0 \sim 2.1) \times 10^9 \text{N/m}^2$ ，即当水的压力增大一个大气压时，水的体积将减少万分之五，可见水的压缩性是相当小的。因此，当压力变化不太大时，可以不考虑水的体积和密度的变化，认为水是不可缩的。但对于水动力学中的某些特殊问题，如水击现象，由于水的体积的微小变化将会产生巨大的压力，这时就不能再忽略水的压缩性了，否则将导致很大误差，甚至产生重大的破坏事故。

三、水的表面张力

在水与固体、气体或其他液体（如水银）的接触周界面上，由于分子之间的吸引力，水能承受极其微小的张力，即所谓水的表面张力。当接触面为曲面时，表面张力的合力将产生一个附加的压力来维持平衡。不过这个压力在一般情况下影响不大，可以忽略不计，但在毛细管现象、水中的气泡或空气中的肥皂泡等特殊情况下，则应考虑其表面张力的作用。

表面张力的大小常用表面张力系数 σ 来表示， σ 为单位长度上的表面张力（N/m）。由于表面张力的作用，通过液体学计算，在水中半径为 r 的空气泡中的气体压力要比其周围水的压力高 $2\sigma/r$ ，空气中的肥皂泡，其内部压力要比周围空气压力高 $4\sigma/r$ 。

四、水的溶气性

根据亨利定律，溶解于水中的空气体积 V_g 与水的压力 p 成正比关系。

$$V_g = Kp \quad (1-4)$$

式中 K ——比例系数，随温度的升高而减小。

通常在一个大气压下，水能溶解其体积2%的空气，如果压力降低到0.5个大气压时，经过足够长的时间后，将有1%的体积空气（折合至一个大气压下）以气泡的形式逸出。当打开啤酒瓶盖后，泡沫翻腾迅速逸出就是这个道理。

五、添加剂对水的力学性能的影响

在水中加入微量的高分子长键型聚合物（添加剂）可以改变水的力学特性。用这种低

浓度添加剂作介质产生的水射流称做添加剂射流。

常用的添加剂有聚丙烯酰胺，聚氧化乙烯加树脂等，其分子量在 10^6 量级。这些高聚物的稀溶液属于粘弹性流体，添加剂溶液的浓度一般在 $1\% \sim 5\%$ 之间。

添加剂加入水中后，其聚合物大分子被水化，水介质将重新聚集排列，形成一种粘弹性流体，这种粘弹性流体尽管其粘度增大，但能抑制湍流运动强度，从而总的阻力损失反而会大幅度降低，即所谓流动减阻作用。因此，添加剂射流可以降低喷嘴内部压力损失，提高喷嘴出口压力和射流的密集性、增大射流射程。如图1-2所示。

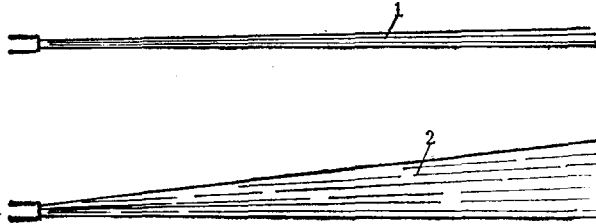


图 1-2 同样条件下的纯水射流与添加剂射流

1—添加剂射流；2—普通纯水射流

添加剂射流目前主要应用在精密切割和消防水枪中，并取得了显著效果。关于添加剂射流将在第七章中详细论述。

第二节 小孔口出流基本理论

本节在概述总结分析的基础上，对喷嘴出流作以介绍。

一、薄壁孔口出流

图1-3为一薄壁孔出流示意图。水箱中的水从四面八方向孔中汇集流出，由于流体质点运动时的惯性，当绕过孔口边缘时流线不能折角改变方向，只能渐渐弯曲，于是水流经过孔口断面后仍继续弯曲向中心收缩。实验表明，在距孔口 $\frac{1}{2}d$ 处 (d 为孔口直径)，流束断面收缩至最小。利用伯努利方程可以求出断面 C 处的流速 V_c 和流量 Q_c 。

$$V_c = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (1-5)$$

$$Q_c = \mu Q_0 \quad (1-6)$$

式中 φ ——速度系数，孔口出流时可取 $0.97 \sim 0.98$ ，

μ ——流量系数，孔口出流时可取 $0.60 \sim 0.62$ ，

$$\mu = \varepsilon \varphi$$

ε ——流速断面收缩系数，一般为 $0.62 \sim 0.64$ ，

$$Q_0 \text{——理想流出量， } Q_0 = \frac{1}{4} \pi d^2 \sqrt{\frac{2p}{\rho}}。$$

由上可知，薄壁小孔出流的速度系数较高，但由于出流断面收缩，其流量系数过小。

二、短管出流

如图1-4所示，在孔口处接一个长 $l = (3 \sim 4)d$ 的圆柱形短管。这样，流入短管的水流

首先产生断面收缩，而后流束将逐渐扩大，至短管出口时将充满短管而流出。

通过水力学计算可以得出，这时的速度系数为0.82左右。又因短管出口为满流无断面收缩，故流量系数 $\mu = \varphi = 0.82$ 。由此可见，短管出流量系数要比薄壁孔口出流高。

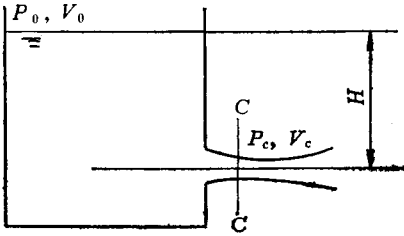


图 1-3 薄壁小孔出流

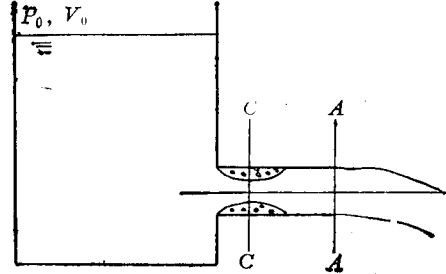


图 1-4 短管出流

三、喷嘴出流

在高压水射流系统中，喷嘴直径都很小，而高压管路直径比较大，如果把喷嘴与高压管路直接连起来，会使喷嘴出口前阻力损失加大，从而降低了喷嘴出口处的压力，同时还可能会出现短管出流中在短管内部的旋涡低压区（图1-4）。这个旋涡区的压力低于大气压，形成一定的真空度，由流体力学可知，旋涡区的真空度随水压加大而增大。当真空度过大时，会从短管出口吸入空气，破坏了短管管口的满流状态，不仅使旋涡区产生流束与管嘴分离，而且还降低其流量系数。为此，可用一定形状的喷嘴，使高压管路截面连续均匀地过渡到所需要的出口面积。显然，最佳的喷嘴形状应尽量与喷嘴出口处的流线保持一致，使流速连续均匀收缩而不在喷嘴内部产生旋涡分离区，达到最大的速度系数和流量系数。

由于流线形喷嘴难以加工，特别是小直径喷嘴。因此，目前工程中使用的水射流喷嘴多是出口带圆柱段的锥形收敛型喷嘴（如图1-5）。这种类型的喷嘴，其速度系数可高达0.98，完全可以满足工程需要。有关喷嘴性能将在第三章中叙述。

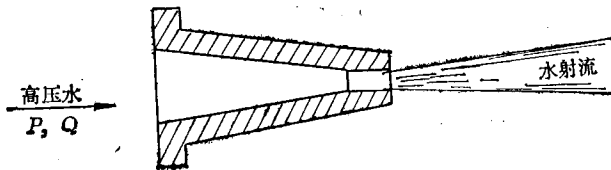


图 1-5 喷嘴出流

四、喷嘴出口速度、流量及喷嘴直径的确定

喷嘴出口速度

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (1-7)$$

流量

$$Q = \frac{1}{4} \pi d^2 v \quad (1-8)$$

当压力源的压力和流量一定时，喷嘴直径可由下式确定

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\varphi\sqrt{\frac{2p}{\rho}}}} \quad (1-9)$$

第三节 淹没水射流的结构和特性

水射流射入静止的水中后，由于水的粘性作用，水微团之间必然要发生动量交换。引起周围水的流动，使得射流直径不断扩大，射流本身速度不断衰减，最后完全消失在周围的水中，犹如被淹没一般。当水射流的速度很小时，周围的水会形成一个稳定的层流边介层，当射流速度增大，雷诺数达到某一临界值之后，层流边界层将失稳发展成湍流，工程中常见的水射流大多数为湍流射流，下面仅讨论湍流射流的流动特性。

一、淹没水射流的结构

淹没水射流的结构如图1-6所示。在喷嘴出口处，射流的速度是均匀的，而一离开喷

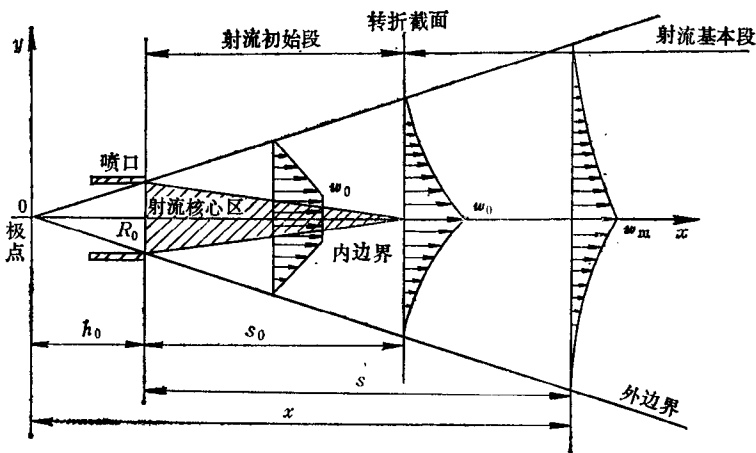


图 1-6 淹没水射流结构图

嘴就要卷吸周围的水，使射流边界变宽，速度降低，速度保持初始速度 v_0 不变的区域也不断减少。速度等于零的边界称为射流外边界；射流速度保持初始速度的界限为内边界。内外边界都是曲线。内外边界之间的区域为边界层。显然，边界层的宽度随离开出口的距离加大而不断扩张，导致射流中保持初始速度不变的区域减少，使更多的水卷入射流流动。当内边界线与射流轴线相交时，即射流截面上只有轴线上的速度为 v_0 时，称这个射流截面为转折面或过渡面。在转折面之前，射流轴线上的速度保持 v_0 不变，在转折面之后，射流轴线上的速度开始衰减。

喷嘴出口至转折面的距离为射流初始段，在初始段内部有一个速度保持不变的核心区，它是以前喷嘴出口断面为底，初始段长度为高的圆锥体。转折面以后的部分为射流基本段。

射流外边界的交点称为射流极点，它是位于喷嘴内部的一个几何点。

二、射流断面上的速度分布

由于射流边界层处于湍流状态，射流的真实速度是非定常的、脉动的，为简化讨论，我们研究的射流速度是在统计意义下的平均速度，即速度不随时间变化，仅是位置的函数。

实验和理论分析表明，在淹没水射流的任一截面上，横向速度要比轴向速度小得多，可以忽略不计，而认为射流的速度就是轴向速度，射流内部的静压就是射流周围水的静压。

图1-7是Trüpel测定的轴对称射流基本段内不同截面上的速度分布。实验时的射流初始速度为87m/s，喷嘴半径为0.045m， S 为不同测量面距喷嘴出口的距离（靶距）。从图中可以看出，速度分布是随 S 渐近变化的， S 越大，速度分布越平坦，射流宽度也越大。

将五个截面上的速度分布用无量纲坐标绘出，如图1-8所示。图中 v_m 为射流轴心速度， $Y_{0.5}$ 是截面上速度为轴心速度一半处的径向距离*。由图1-8可以看出，五个截面上的各测点几乎全落在同一曲线上，这表明它们的速度分布是相似的。这种特性又称做自模性。

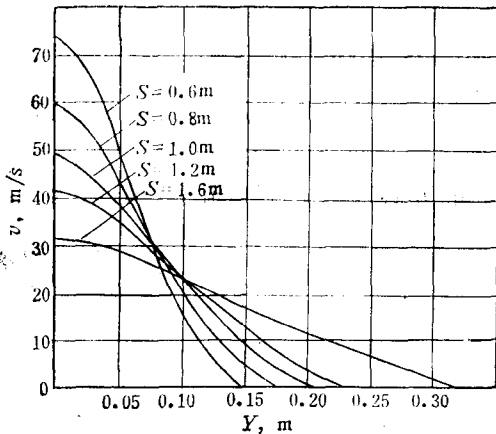


图 1-7 淹没射流不同截面上的速度分布

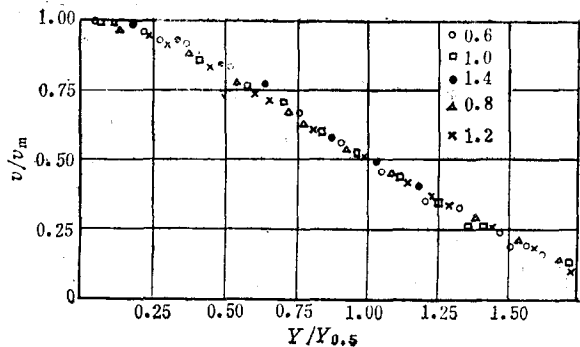


图 1-8 无量纲的速度分布图

通过对试验结果的归纳，得到如下经验公式：

$$v/v_m = (1 - \eta^{1.5})^2 \quad (1-10)$$

$$\eta = Y/R$$

式中 v, v_m ——射流速度及射流轴心速度；

Y ——径向距离；

R ——射流半径。

在射流初始段内，式(1-10)也同样成立，只是将 Y 和 R 从内边界算起即可。因此式(1-10)是射流边界层内部的速度分布公式。

式(1-10)中， v_m 和 R 都是未知的，使用它计算射流速度有实际困难。

* 由于射流速度的脉动，射流半径不易准确测定，用射流半径作为无量纲尺度是不准确的， $Y_{0.5}$ 只是进行绘图的一种技巧。这里要指出的是，无论采用什么方法作 Y 值使之无量纲化，得到的五个截面上的速度分布总是相同的。