

高等学校教学用书

水射流切割技术

孙家骏 编著

中国矿业大学出版社

(苏)新登字第 010 号

内 容 提 要

本书系统论述高压水射流及非牛顿流体射流切割的原理、计算及工艺系统。全书共分九章,内容包括:淹没、非淹没连续水射流、脉冲水射流、空化水射流、磨料水射流以及其它密集射流与聚能射流等。

本书可做为普通机械专业及机电专业本科生、研究生的教学参考书,也可供从事高压水射流专业的研究工作者及工程技术人员参考。

责任编辑 何其华 安乃勇

技术设计 冀锦蓉

高等学校教学用书
水 射 流 切 割 技 术
孙家骏 编著

中国矿业大学出版社出版
新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷
开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11.25 字数 269 千字
1992 年 8 月第一版 1992 年 8 月第一次印刷
印数 1—2500 册

ISBN 7-81021-622-8

TH·16

定价: 3.35 元

前 言

随着高科技的迅速发展,激光束、电子束、等离子体以及水射流,都已成为新型的切割工具。其中,前三者属于热切割加工,唯有水射流独树一帜,是一种冷切割加工手段。在许多材料切割,破碎及表面预加工工艺中,水射流有其独特而优越的工艺性。

近 20 年来,射流介质已由普通工业用水发展为磨粒水两相介质、钻井液及减阻液等非牛顿流体。相应地,在原有的连续水射流基础上,又增添了脉冲水射流、空化水射流、以及磨料水射流等流体射流的新技术。与普通水射流相比,这些后起的射流在降低切割能耗及提高切割能力等方面都取得了长足的进展,备受使用部门的欢迎。

高压流体射流技术的发展方兴未艾,国内外的学术交流也十分活跃。从 1972 年以来,几乎每年都要举行一至两次国际性的流体射流论文报告会兼举办新产品展销。在国内已举办过七次论文报告会,其中有一次国际性的,即 1987 年 9 月在北京举办的亚太地区第一届水射流论文报告会。这些学术活动对国内外水射流技术的发展起了很好地促进作用。同时,历届会议论文集辑录的论文业已超过 800 篇,反映了流体射流切割技术在“软件”和“硬件”方面的发展水平。

所谓“软件”,指的是射流理论、设计和计算方面的研究成果。主要有气液两相介质射流及液固两相介质射流的原理与计算、冲击压缩与液体状态方程、高聚物减阻原理在射流技术中的应用,以及各种聚能效应的工程应用,等等。这些成果的取得,是与近代力学的一些分支,即计算流体力学、两相流及多相流、爆炸动力学、流变学及粘弹性力学等的发展分不开的。

高压流体射流作为一门应用技术,它涉及的“硬件”,即高压及超高压泵、增压器、管阀及密封件等等的发展尤其重要。现阶段超硬材料(陶瓷、玛瑙等)的切割主要用 400MPa 磨料水射流,已使传统的切割工具望尘莫及。仅此一例,已能体现出高压流体射流的“硬件”已发展到何等高的科学技术水平。

在上述的背景下,作者选择流体射流的发生原理、设计及计算作为本书的主要内容,力图反映射流切割技术的最新研究成果和水平。全书共分九章。第一章绪论,第二、三章为淹没和非淹没的连续式水射流(后者实质上是气液两相介质射流);第四、五章为脉冲水射流的原理及装置;第六章是射流性能与喷嘴结构的关系。第七章为空化水射流;第八章是磨料水(液固两相介质)射流及磨料浆体(非牛顿流体)射流;第九章概括了密集性好的减阻液(非牛顿流体)射流、冲击性强的间断水射流、气、水与混凝土组成的多相介质射流以及液态金属射流(聚能破甲射流)。

关于压力源设备(泵、增压器及附件),由于论述泵、阀及密封装置的教科书和专著已较多,为了避免重复,本书内没有编写这方面的内容。出于同样的原因,与高等材料力学有关的靶体切割和破坏机理问题在本书内也没有编入。关于力学方面的术语,尽量以钱令希教授等主编的“中国大百科全书(力学)”(1985 年中国大百科全书出版社)为依据。至于流体射流方面的专业词汇,由于国内外都没有统一,作者采用国外文献中比较常用的

词汇,并给出中英文对照,以供读者参阅。

本书内容曾经由作者为水射流专业的硕士生讲授过多次。但由于编著者的水平所限,不当和谬误之处,恳切地欢迎水射流界同仁及读者不吝赐教和指正。

编 者

1992年3月于中国矿业大学

目 录

第一章 结论	(1)
第一节 射流类型与工艺系统.....	(1)
第二节 射流技术在采掘工业中的应用.....	(4)
第三节 射流工艺参数.....	(6)
第二章 淹没射流	(8)
第一节 淹没射流的一般特性.....	(8)
第二节 轴对称淹没射流计算.....	(10)
第三节 平面淹没射流计算.....	(13)
第四节 有伴随流的淹没射流.....	(15)
第五节 高围压下的淹没射流.....	(18)
第三章 非淹没射流	(24)
第一节 水动力学结构及流动特性.....	(24)
第二节 主要参数实验研究和测定.....	(27)
第三节 主要参数计算.....	(34)
第四节 气水混合介质打击力计算.....	(41)
第五节 波的基本理论.....	(44)
第四章 脉冲射流的原理与计算	(52)
第一节 脉冲射流发生原理.....	(52)
第二节 一维非定常流及水锤问题.....	(58)
第三节 二维液滴冲击.....	(64)
第五章 脉冲射流发生装置	(70)
第一节 脉冲水压源的类型.....	(70)
第二节 气炮与实验装置.....	(71)
第三节 冲击式水炮结构原理.....	(77)
第四节 冲击聚能式水炮.....	(79)
第五节 挤压式脉冲射流发生装置.....	(82)
第六章 喷嘴结构与射流性能	(86)
第一节 喷嘴的流量系数.....	(86)
第二节 喷嘴内部流动分析.....	(90)
第三节 喷嘴结构及几何参数分析.....	(93)
第四节 流动减阻原理.....	(98)
第七章 空化射流	(108)
第一节 空化与空蚀基本原理.....	(108)
第二节 空化初生原理.....	(112)

第三节	空化气泡的发育与溃灭.....	(122)
第四节	空化喷嘴的结构、性能及测试.....	(131)
第八章	磨料射流	(138)
第一节	磨料水射流工作原理与系统.....	(138)
第二节	液固两相流动原理.....	(142)
第三节	磨料水喷嘴及混合装置.....	(148)
第四节	磨料浆体射流.....	(151)
第九章	密集及聚能射流	(156)
第一节	减阻液射流.....	(156)
第二节	气水射流.....	(161)
第三节	间断水射流.....	(164)
第四节	液态金属射流(概述).....	(166)
参考文献	(170)

第一章 绪 论

第一节 射流类型与工艺系统

通常流体在泵压驱动下,经过孔口或喷嘴便形成射流。近 20 年来出现一些新的流体射流,现按流动特性分类说明如下。

一、流体射流类型

(一) 按驱动压力分类

驱动压力等级是设计任何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。根据国际水射流技术界的普遍认可,表 1-1 给出了现阶段水射流或其它流体射流的驱动压力等级。

表 1-1 水射流的压力等级

压力等级	压力范围(MPa)	压 力 源 类 型
低 压	0.5~20	多级离心泵、柱塞泵等
中 压	20~70	柱塞泵、增压器
中 高 压	70~140	增压器(气动或液动)
高 压	140~400	增压器(气动或液动)
超 高 压	大于 400	增压器、水炮(动压式)

(二) 按介质性质(或种类)分类

在射流工艺系统中的流体介质应包括射流工作介质与环境介质。由于切割能力增长,射流工作介质涉及水、水与磨料组成的液固两相流体、高聚物稀溶液、水与磨料及高聚物配制而成的浆体,等等,在一些个别场合,工作介质采用空气。在上述的工作介质中,水与空气属于牛顿流体(Newtonian fluid),高聚物稀溶液、浆体等属于非牛顿流体(non-Newtonian fluid)。现阶段,流体射流的工作介质主要是工业用水,它在不同温度下的物理机械性质见表 1-2。

环境介质取决于射流的工作条件。环境介质通常是大气。在个别场合,例如射流的水下切割或清洗,环境介质则是水。

按环境介质的性质,射流可划分为淹没射流与非淹没射流两大类。工作介质与环境介质相同时,这种射流称为淹没射流。例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。这种划分类别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;而非淹没射流则是两相(或多相)介质的流动问题。

此外,在石油钻井或水下切割等场合,环境介质处于高压状态,这种射流称为高围压淹没射流。

(三) 按固壁条件分类

表1-2 水在不同温度下的物理机械性质

温度 (°C)	重度 (kN/m ³)	密度 (kg/m ³)	动力粘度 (Pa·s·10 ⁻³)	运动粘度 (m ² ·s ⁻¹ ·10 ⁻⁶)	体积弹性系数 (GPa)	表面张力 (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589

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性能有显著的影响。在固壁约束下的射流称为非自由射流；反之，则是自由射流。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。

(四) 按发射方式分类

任何流体射流都可按两种不同的方式形成：一种是以泵或增压器的柱塞对介质的挤压作用而产生的连续射流，见图1-1，在射流切割与清洗作业方面应用较多。另一种是以高速活塞（或弹丸）对流体介质进行冲击压缩而产生的脉冲射流，见图1-2，这种射流有“液体激光”（liquid laser）之称，对煤岩脆性材料的剥离与破碎尤为适用。

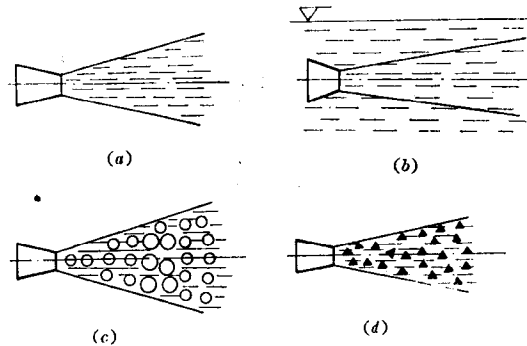


图1-1 连续式射流的主要类型

a—非淹没自由射流；b—淹没自由射流；c—空化射流；d—磨料水（或浆体）射流

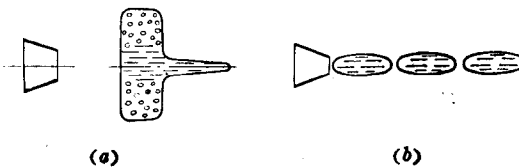


图1-2 脉冲式射流的主要类型

a—单发脉冲射流；b—连发脉冲射流

随着射流工艺的推广应用,新的射流类型仍在开发之中。例如近年出现的显微切割用的磨料浆体射流(ASJ)及准直管磨料水射流(Collimated abrasive waterjet),等等。标志着射流技术正在向高切割能力及低能耗方向不断地发展。

二、射流工艺系统

以连续式水射流为例,说明射流工艺系统的主要组成部分。图 1-3 给出水射流切割的工艺系统,它由三个部分组成。

系统的第一部分是压力源。对于连续射流,压力源有三柱塞式往复泵、气动或液动的增压器。个别场合也有采用多级离心式水泵的。由压力源输出的压力水经过各种控制阀和压力管路后,再馈送到喷嘴。

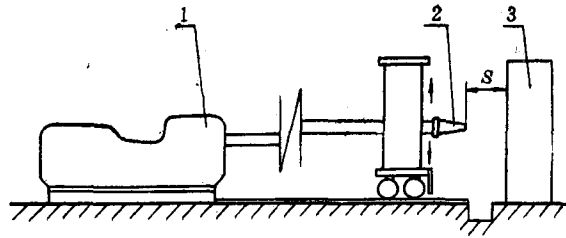


图 1-3 水射流工艺系统

1—压力源; 2—喷嘴及传动机构; 3—靶体

第二部分是喷嘴及其传动机构。喷嘴是水射流切割的执行元件,在它靶体进行加工时,必须使喷嘴与靶体之间存在相对运动,才能达到加工的要求。因此,喷嘴通常要配备直线运动、旋转或摆动的传动机构。

第三部分是工件(即靶体)。如果工件的尺寸不大,而且是可移动的物料,则工件也可以配备必要的运动机构,并与喷嘴的运动相匹配,以取得最佳的加工效果。

上述的三个主要部分在结构上是互相独立的,通过水介质把它们互相连接起来。而且不同部分,水介质具有不同的能量形式。在第一部分,水介质储存的能量主要是静压(在水泵里,压力定义为单位重量水所具有的能量)。在第二部分,经过喷嘴的转换,把静压转变为动压,形成高速水射流。在第三部分,即当水射流与工件表面碰撞时,水射流的动压又由于靶面的阻挡而转换为滞止压力。对于连续射流,静载荷是稳态的。脉冲射流对工件施加的动载荷则是瞬态的。

在结构方面,三个部分的设备和元部件可以根据加工对象而组装成固定式的或移动式的整机。与采掘机械配套的水射流装置大都是移动式的,并与采掘机械的截割部总装配成一个整体。水射流装置在野外作业(例如采石场开采荒料、清除飞机跑道的橡胶轮迹)时,由于没有水源和电源,全部动力装置都采用柴油机驱动,并自备供水车(或大型水箱)。这是越野的移动式泵站的一个特点。

在水射流切割和清洗设备中,大部分是固定式的。图 1-4 为一种典型的射流切割机床,射流的压力源是超高压增压器,其最高驱动压力可达 400MPa,装机容量一般是 35 至 55kW。工作介质如果用清水,射流可以切割岩石、胶木板、硬塑料板等。如果用磨料与水组成的悬浮液作为介质,则射流可以切割金属板材、玛瑙及陶瓷等超硬材料,尤其适用于板材的异型切割及仿形加工^[1]。

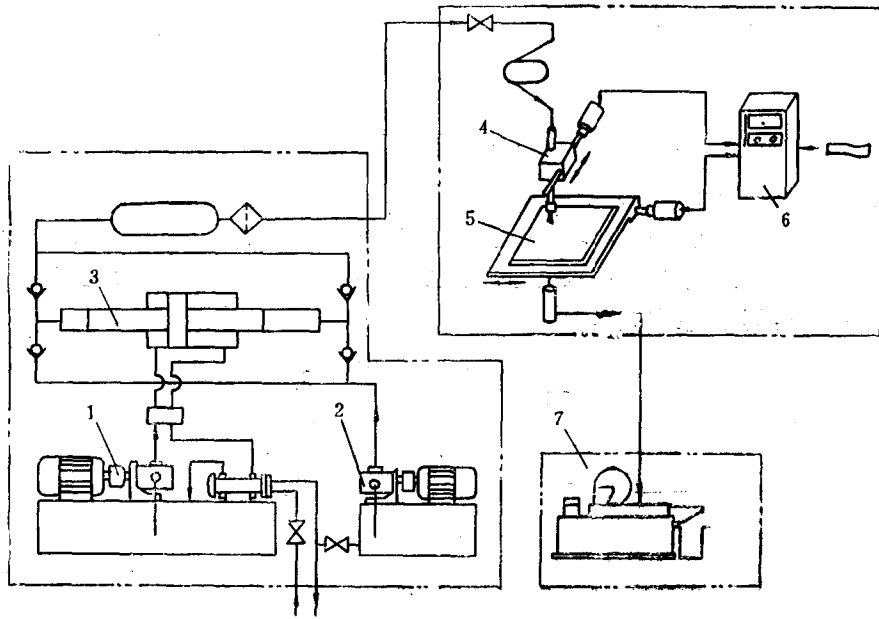


图 1-4 水射流切割机原理系统图

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

第二节 射流技术在采掘工业中的应用

水射流与采煤、掘进及钻孔机械的结合有两种基本形式：一是水射流直接切割或破碎煤岩的采掘机械，例如水射流锚杆钻机、脉冲射流的半煤岩巷道（或煤巷）掘进机、等等。另一是以刀具（指截齿、刨刀及钻头等）破碎煤岩为主，以水射流冲蚀为辅的采掘机械。例如水射流气动凿岩机、巷道掘进机及连续采煤机，还有石油开采部门应用的高压喷射钻井机具。

一、脉冲射流巷道掘进机（图 1-5）

整机的核心部分是产生脉冲射流的水炮 3。它的执行元件安装在摇臂上，动力源及其它辅助机构（例如装岩机 2）组成一台整机。

通常，水炮的驱动压力达 800 至 1200MPa，一发水弹的水量为 0.5 至 5l。按脉冲射流施加于岩石的瞬时峰值压力而言，它可以直接破碎普氏硬度系数为 12 以上的硬岩。此外，开采含硬夹矸、硫化铁结核的煤层或共生矿体（例如煤与油母页岩的共生矿体），脉冲射流的优点尤其突出，它可对矿床进行选择性开采（Selective mining）。

本世纪 50 年代后期，苏联已研究脉冲射流破岩技术，并研制和实验过水炮掘进机。我国及一些西方国家的采煤机械部门也投入这种掘进机的研制工作^{[2],[3],[4]}。只要一些部件（例如快速排液阀、密封件）及与水炮配套的辅助机构（例如扒装机）得到解决，一代轻便、安全而且高效的巷道掘进机的问世和生产应用将是指日可待的。

二、水射流锚杆钻孔机

高压水射流凿岩的一个成功的例子是水射流锚杆钻孔机，它的原理系统见图 1-6。动

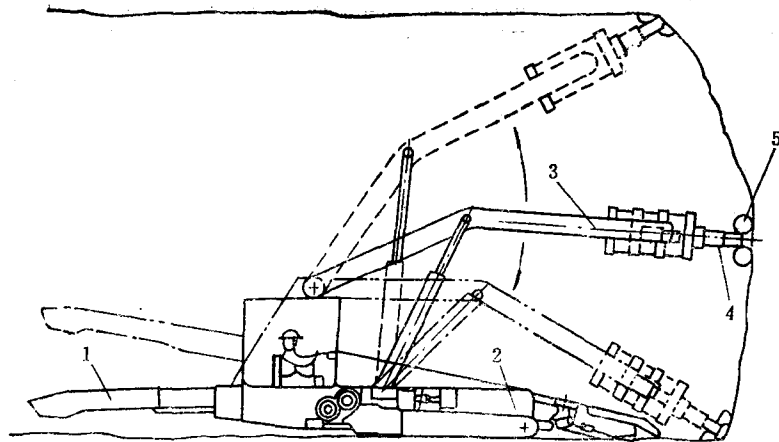


图 1-5 水炮掘进机(样机)在工作面的布置

1—运输机；2—装岩机；3—水炮；4—喷嘴组件；5—消音器

力源是驱动压力为 300MPa 的增压器。由 2 至 3 个喷嘴组成的钻头可以在硬岩中钻出直径为 25mm 的小孔，钻孔速度可达 2 m/min。

应该指出，钻杆和钻头在凿孔过程中只起导向和排屑作用，它们传递的扭矩甚小。

如上所述，水炮和水射流钻机的高压都是超高压的。相应地，水炮的装机容量在 65 至 150kW 左右，水射流锚杆钻机的容量约为 50 至 70kW。因此，压力等级和装机容量已成为水射流技术在采掘机械中开发应用的制约因素。在现阶段，国内外都在致力于开发压力为 200MPa 左右的水射流辅助破岩的采、掘及钻机械。

三、刀具与射流相结合的采掘钻机械

图 1-4 及 1-5 所示的水射流采掘钻机械，要求驱动压力高，能耗大。经过几年的探索，国内外都趋向于开发刀具与射流相结合的采掘机械，对于采煤机，配置水射流的主要目的在于：①消除粉尘、②减少刀具(即截齿)磨损、③防止瓦斯引燃事故。通常，水射流的驱动压力为 15 至 20MPa 已能达到上述预期的效果。

纵轴式(或横轴式)巷道掘进机配置水射流的要求除了上述的三条以外，还要求提高切割机构的破岩能力。为此，水压要达到 200MPa 左右，甚至要用磨料射流取代水射流才能奏效。

图 1-7 给出水射流在纵轴式掘进机切割部的配置情况。压力源为 70 至 100MPa 的液动增压器，

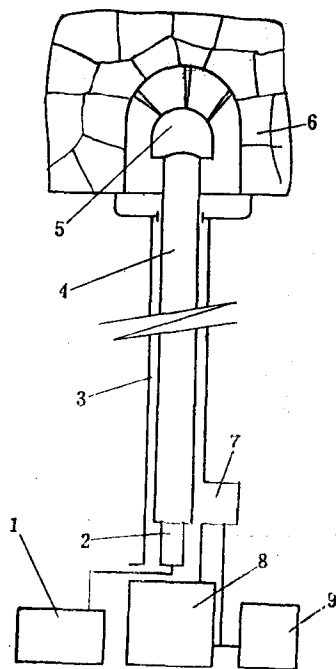


图 1-6 水射流锚杆钻机原理系统

1—泵站；2—旋转密封；3—导轨；4—钻杆；5—射流钻头；6—顶板；7—油马达；8—油缸座；9—油泵

高压水经过旋转密封装置输入切割头，一个截齿配一个喷嘴。增压器安装在掘进机的回转平台上，与掘进机的行走机构一齐移动。

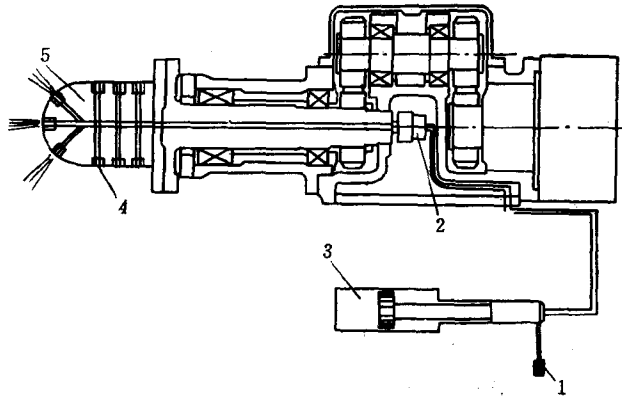


图 1-7 水射流辅助截齿破岩的掘进机

1—水过滤装置；2—回转接头；3—增压器；4—喷嘴及配水管路；5—掘进机切割滚筒

掘进机都是以它的自重来平衡在运转中产生巨大的切割和推进反作用力的，因此掘进机的总重达 450 至 650kN (千牛)，甚至更大些。配置一套水射流装置，重量只要增加 15 至 20 kN。国内外的掘进机按切割岩石能力划分为轻型、中型、重型及超重型。如果一台轻型掘进机配置水射流，它的破岩能力可以使机型上升一至二个档次(视驱动压力而定)，即原来的轻型掘进机能作为中型或重型掘进机使用。这就扩大了现有掘进机的适用范围，有利于提高国内煤矿掘进的机械化水平。

第三节 射流工艺参数

工艺参数主要包括水力参数及切割参数，简要地说明如下。

一、水力参数计算

水力参数主要有射流驱动压力、流量(或喷嘴直径)及功率等。其中，对于任何水射流工艺系统来说，合理地选择一个驱动压力等级是个关键性问题。根据统计，推荐一些常用的压力等级，见表 1-3。

表 1-3 射流压力的选择

使用场合	工作压力(MPa)
水射流清洗矿车	35~70
磨料射流除锈	35~50
水射流助切的掘进机	70~100
磨料射流切割钢材	70~100
水射流在砂岩或花岗岩内切槽	70~100
水射流在大理岩或玄武岩内切槽	100~150
水射流在硬岩内钻孔	250~300
磨料射流在硬岩内钻孔	70~100
脉冲射流破岩	800~1000

压力确定以后,可以按水力学公式估算速度与其它水力参数的关系

$$u = 44 \sqrt{P} \quad \text{m/s} \quad (1-1)$$

$$Q = 4.7ud^2 \quad \text{l/min} \quad (1-2)$$

$$d = 0.46 \sqrt{Q/u} \quad \text{cm} \quad (1-3)$$

$$W = PQ/60 \quad \text{kW} \quad (1-4)$$

式中 P ——驱动压力, MPa;
 d ——喷嘴出口直径, cm;
 Q ——喷嘴流量, l/min;
 W ——射流功率, kW;
 u ——射流的初始速度, m/s。

射流的反喷力可按下式估算

$$F = 2PA \times 10^2 \quad \text{N} \quad (1-5)$$

式中 A ——喷嘴出口截面积, 即

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{cm}^2$$

二、切割参数计算

根据具体的射流工艺系统,主要切割参数估算如下:

靶距或射程 指的是喷嘴出口截面与工件表面之间的垂直距离,通常用实验方法确定射流的合理靶距。

进给速度 指喷嘴与工件之间的相对速度。两者之间的相对运动有可能是平动、转动、摆动或振动、或是复合运动。例如钻孔,相对运动则是轴向推进与旋转的复合运动。进给速度一般都是直接测出的。

切深(或切宽) 指射流一次切割工件得出的侵深或切割宽度,可以按经验公式计算或直接测出。

射流打击力 射流对工件打击力与靶距有关,可用半经验公式估算或直接测出。

破碎体积 即切割宽度、侵深与进给速度之积。

$$V = bHv \quad (1-6)$$

式中 V ——工件破碎体积或切割量, cm^3/s ;

b ——切割宽度, cm;

H ——侵深, cm;

v ——进给速度, cm/s 。

比能 切割或破碎单位体积工件材料所消耗的能量,即:

$$E = N/V \quad (1-7)$$

式中比能 E 的度量单位可用 J/cm^3 或 kWh/m^3 等表示,其中, $1\text{J} = 0.278 \times 10^{-6} \text{kWh}$ 。

比能是水射流工艺的综合质量指标,它反映系统的合理性及技术水平。

第二章 淹没射流

本章叙述不可压缩流体淹没射流的原理与计算。射流工作介质除了水、钻井液等以外,还有马赫数(Mach number)小于 0.3 的低速气体。运用流体动力相似原理,可用气体射流来模拟液体淹没射流的性能,或者反之。两者的实验结果都是等效的。由于气体射流的实验费用低,见效快,在淹没射流的实验研究方面应用较多。

第一节 淹没射流的一般特性

一、射流的水动力学结构(图 2-1)

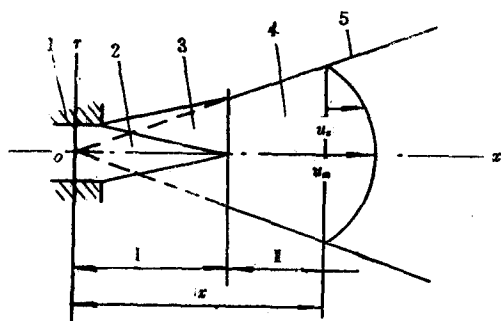


图 2-1 淹没射流水动力学结构

I—初始段; II—主体段

1—喷嘴; 2—等速核; 3、4—混合区;

5—射流边界; 0—轴对称射流源(极点)

射流以速度 u_0 离开喷嘴边界后,与静止的环境介质之间形成一个速度不连续的间断面。这种间断面是不稳定的,面上的波动发展形成涡旋,产生强烈的紊动。把毗邻的静止介质卷吸到射流中,两者掺混在一起并共同向前运动。因此使射流的流量不断地增加,射流边界也不断地向外扩展。

从水动力学粗略地分析,淹没射流由初始段 I 及主体段 II 组成。如上所述,射流一离开喷嘴就与环境介质发生剧烈的动量交换和紊动扩散,但仍有一部分处于中心线附近的射流介质保持喷嘴出口速度,这部分介质组成了等速核心 2,是射流的精华。在等速核心的内部不存在横向或纵向的速度梯度,因此它属于一种有势的流动,等速核心也称为势流核(potential core)。在初始段边界与势流核之间,则是由射流介质与环境介质互相掺混而形成的混合区 3。显然,这里讲的混合,是具有不同速度的同种介质微团之间的混合,因此上述的混合区是一种剧烈的紊流流动区。

射流主体段内也是紊流混合区 4,与初始段混合区没有本质的差别,只是在主体段内被卷吸的环境介质增多,混合区内的平均速度逐渐地减小。对于考察的高速射流而言,这两个混合区的雷诺数都在紊流自模区内,因此,二个混合区内的速度分布规律应该是相同的。

二、射流边界扩展的线性性(图 2-1)

射流边界 5 是由速度等于(或接近于)零的流体微团组成。通过测定和统计,可知边界呈直线型扩展。而且,主体段边界线汇交于一点 0,该点称为射流源,或称极点。

三、射流混合区内速度分布的相似性

射流初始段与主体段的混合区内各个纵向截面上的速度分布的相似性已被大量的实验研究所证实,运动相似可用下列关系式表达:

$$\frac{u_{x1}}{u_{m1}} = \frac{u_{x2}}{u_{m2}} = \dots = \frac{u_x}{u_m} = f\left(\frac{r}{x}\right) \quad (2-1)$$

式中

u_x ——射流轴向速度, $u_x = f(r, x)$;

u_m ——射流轴心速度, $u_m = f(x)$ 。

式中的脚注 1、2、3……代表不同靶距 x 处的任意截面。这种相似性对于射流主体段和初始段内的混合区都是适用的。这里是援用 T·Trüpel 等做过的空气射流的精确测试数据来论证轴向速度分布自模性^[6]的。实验是用圆形喷嘴(出口直径为 90mm)产生轴对称的淹没自由空气射流,其初始速度为 $u_0 = 87\text{m/s}$ 。取五个测定截面,它们的 x 坐标分别为 600、800、1000、1200 及 1600mm。在各个截面的不同半径上测出轴向速度 $u_x(x, r)$ 值后,再绘制成图 2-2 所示的速度剖面。

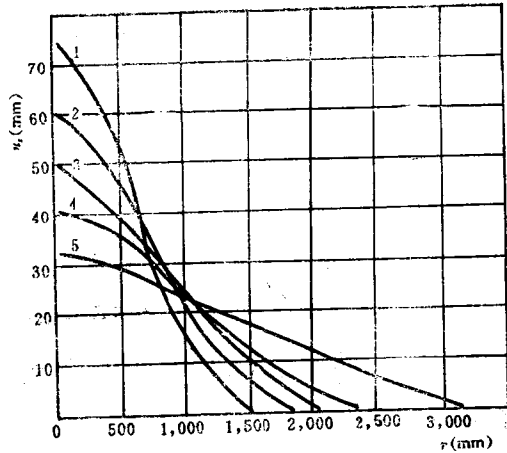


图 2-2 轴对称淹没自由射流速度剖面
1—600mm; 2—800mm; 3—1,000mm;
4—1,200mm; 5—1,600mm

取无量次量 $\frac{u_x}{u_m}$ 及 $\frac{r}{r_0}$ 其中 r_0 表示同一截面上 u_x 等于 $\frac{u_m}{2}$ 的半径坐标。通过换算

后得出一条无量次轴向速度分布曲线,见图 2-3。无量次曲线概括了图 2-2 内的五条曲线(实际上还可取更多的速度剖面),这就证明了各个截面上轴向速度分布的相似性。

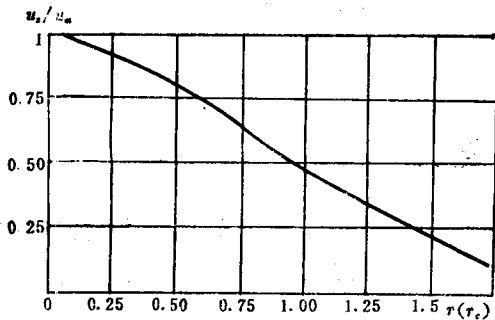


图 2-3 无量次轴对称淹没射流轴向速度分布

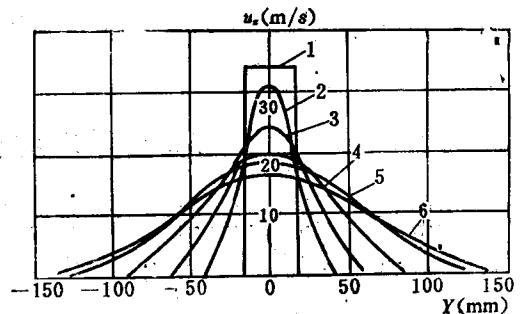


图 2-4 平面淹没射流的速度剖面
1—0; 2—200mm; 3—350mm; 4—500mm;
5—625mm; 6—750mm

对于矩形喷嘴产生的平面淹没射流; E·Förthmann 等做过类似的实验研究工作。矩形喷嘴高度为 300mm,宽度为 650mm,空气出口速度为 35m/s。取 x 为主轴, y 为纵轴。在不同靶距上取六个剖面,并测出每个剖面上的速度分布。实验测定结果归纳成为图 2-4 及图 2-5。

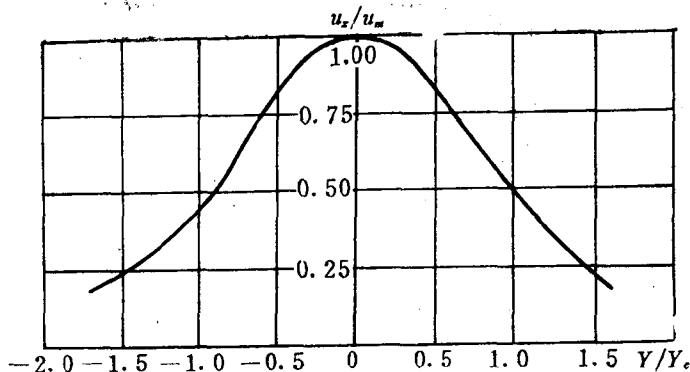


图 2-5 无因次平面淹没射流速度分布

四、射流的动量通量(momentum flux)守恒

因为在流场内不存在压力梯度、即 $\frac{dp}{dx} = 0$ 。因此,在自由射流的所有断面上,射流的动量通量是常数。即

$$\int_m u_x dm = \int_A \rho u_x^2 dA = \text{const} \quad (2-2)$$

或

$$\rho u_0^2 \pi r_0^2 = I_0 \quad (2-3)$$

式中 I_0 ——动量通量的初始值;

r_0 ——喷嘴出口半径;

ρ ——流体介质密度;

u_0 ——喷嘴出口处的射流速度。

应该指出,上述的射流结构与主要特性,是根据能量守恒及流体动力相似普遍原理推导得出,并经过大量的实验验证的。因此,这些特性是任何紊动射流的基本属性,即对于气体或液体,淹没或非淹没射流都是适用的。

第二节 轴对称淹没射流计算

以图 2-1 作为轴对称淹没自由射流的计算简图。其中,圆柱坐标的原点为射流源,轴向坐标为 x 、径向坐标为 r 。运用解析与实验相结合方法计算射流的轴心速度及轴向速度等主要参数。

一、轴心速度及等速核长度计算

关于轴心速度的衰减规律。根据动量通量守恒原理,式(2-2)及(2-3)可合并为

$$\int_A \rho u_x^2 dA = \pi \rho u_0^2 r_0^2 = I_0$$

再根据射流断面上速度分布的相似性,即

$$\frac{u_x}{u_m} = \frac{u_{x1}}{u_{m1}} = \frac{u_{x2}}{u_{m2}} = \dots = f\left(\frac{r}{x}\right) = f(\eta)$$

式中 $\eta = \frac{r}{x}$ 。

由上述二式可建立 u_x, u_m 与 u_0 之间的关系如下:

$$\pi \rho u_0^2 r_0^2 = 2\pi \rho u_m^2 x^2 \int_0^{\infty} \eta f^2(\eta) d\eta = 2\pi \rho u_m^2 x^2 \Pi_1$$

据此得出轴心速度在 x 轴向的分布为

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{r_0}{x} \sqrt{\frac{1}{2\Pi_1}} \quad (2-4)$$

式中 Π_1 ——积分项, $\Pi_1 = \int_0^{\infty} \eta f^2(\eta) d\eta$

轴对称淹没自由射流的轴心速度随射程 x 增加而衰减。当 $u_m = u_0$ 时, 该射程就是等速核的长度 L ,

$$L_p = r_0 \sqrt{\frac{1}{2\Pi_1}} \quad (2-5)$$

二、轴向速度计算

为了计算式(2-4)及(2-5)内的积分项, 必须运用动量交换基本原理, 推导出轴向速度分布的计算公式。

如上所述, 轴心速度衰减是动量交换而引起的。同样地, 任意断面上的轴向速度由轴线上的 u_m 衰减为零(即在射流的边界线上 $u_x = 0$), 也是动量交换的内在机制而形成的。因此, 推导轴向速度分布计算式, 实质上是揭示自由射流内部的动量交换的机理和规律, 并运用 1942 年德国 L. Prandtl(普朗特 1875—1953 年, 近代流体力学及边界层理论创始人)提出的关于自由紊流的新理论。首先, 在射流内部压力梯度接近于零的条件下, 列出轴对称恒定紊流边界层方程。

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \tau}{\partial r} \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} = 0 \quad (2-7)$$

式中 τ ——紊流切应力。

根据 Prandtl 关于自由紊流的新理论, 紊流切应力可写为

$$\tau = \rho \epsilon r \frac{\partial u_x}{\partial r} \quad (2-8)$$

式(2-8)代入式(2-6)可得

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} = \epsilon \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) \quad (2-9)$$

上式中 ϵ 为涡粘性系数, 它随射流厚度及断面上的速度差而变, 可写为

$$\epsilon = kb(u_{\max} - u_{\min}) = kb u_m \quad (2-10)$$

式中 k ——经验系数;