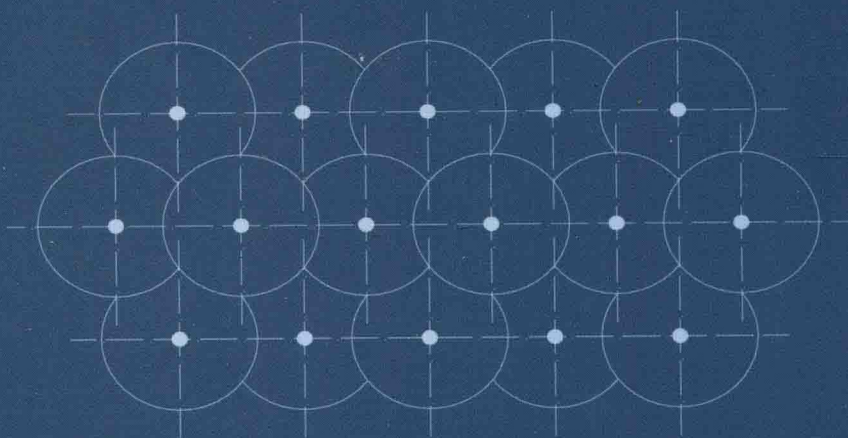


ZHENKONG GAOPEN FANGSHEN JIAGU JISHU

YANJIU YU SHIJIAN

振孔高喷防渗加固技术 研究与实践

中水东北勘测设计研究有限责任公司 组编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

振孔高喷防渗加固技术 研究与实践

中水东北勘测设计研究有限责任公司 组编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

结合水利部科技推广计划项目“摆动振孔高喷工艺与设备的推广应用”(项目编号: TG1416),本书在介绍射流一般知识和高压喷射灌浆技术的同时,对振孔高喷技术的原理特点、工艺方法、专用设备、工程设计、质量控制与检测、施工组织、规程规范、安全管理、典型工程等进行了比较系统的总结和阐述,是学习和利用振孔高喷技术的第一部专业著作。

本书可供水利、土木工程专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

振孔高喷防渗加固技术研究与实践 / 中水东北勘测设计研究有限责任公司组编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5170-3978-5

I. ①振… II. ①中… III. ①高压喷射灌浆—灌浆加固 IV. ①TU755.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321325号

书 名	振孔高喷防渗加固技术研究与实践
作 者	中水东北勘测设计研究有限责任公司 组编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.25印张 338千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	50.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

编 委 会

主 编：金正浩 孙灵会

副 主 编：杨春璞 张晓明 庄景春

编写人员：孙灵会 刘权富 姜笑阳 刘 靖 张宝军

杜金良 才运涛 杨海亮

前言

岩土工程领域利用高压水射流切割、搅拌地层，同时注入水泥浆液进行地基加固或建造地下防渗墙，在我国已有 40 余年历史，工程实例不胜枚举。“振孔高喷”是近 30 年发展起来的一项高效利用高压水（水泥浆）射流进行岩土工程治理的优秀新工艺，在近百项工程中（包括酒泉卫星发射中心、大亚湾岭澳核电站、长江三峡工程等一批国家重大项目）得到成功应用，获得多项国家专利，其中“摆动振孔高喷工艺与设备”获得发明专利并获得大禹水利科学技术二等奖，“摆动振孔高喷工艺与设备的推广应用”立项为 2014 年度水利部科技推广计划项目。

结合水利部科技推广计划项目“摆动振孔高喷工艺与设备的推广应用”（项目编号：TG1416），本书在介绍射流一般知识和高压喷射灌浆技术的同时，对振孔高喷技术的原理特点、工艺方法、专用设备、工程设计、质量控制与检测、施工组织、规程规范、安全管理、典型工程等进行了比较系统的总结和阐述，是学习和利用振孔高喷技术的第一部专业著作。

本书分基础理论、研究设计、施工技术、应用发展 4 个部分共 14 章。第 1、3、4、9、11、13 章由孙灵会编写，第 2 章由才运涛编写，第 5 章由姜笑阳编写，第 6 章由刘靖编写，第 7 章由杜金良编写，第 8、12 章由刘权富编写，第 10 章由张宝军编写，第 14 章由孙灵会、杨海亮编写。本书大部分内容由田野、孙灵会进行校审，全书由金正浩、孙灵会主持编著并统稿。

在本书付梓之际，由衷感谢本书所有参考、借鉴或引用成果的原著者和编译者。特别感谢李绍基对振孔高喷技术研发与推广应用所作出的杰出贡献。

本书编著过程中得到苏加林、王槟等很好的建议或指导，在此一并致谢。

限于作者的技术水平与施工经验，对射流理论和高喷灌浆技术的认知深度和广度都显不足，本书成文难免存在缺陷或谬误，敬请读者指教。

编者

2015 年 8 月 于长春

目 录

前言

第1章 概论	1
1.1 高速水射流理论基础	1
1.1.1 水射流基础知识	1
1.1.2 水射流的流体力学特性	1
1.1.3 水射流发生系统基本结构与设备	7
1.2 高压喷射灌浆技术简介	9
1.2.1 高喷灌浆分类	10
1.2.2 振孔高喷技术简介	10
1.2.3 振孔高喷技术优势	12
第2章 振孔高喷技术发展历程与现状	14
2.1 振孔高喷技术起源	14
2.1.1 高喷灌浆技术发展历程与现状	14
2.1.2 振孔高喷技术起源与发展	16
2.2 振孔高喷技术原理与特点	19
2.2.1 振孔高喷技术原理	19
2.2.2 振孔高喷技术特点	20
本章参考文献	21
第3章 振孔高喷工程基础工作	22
3.1 场地与地基勘察	22
3.1.1 场地地基勘察意义	22
3.1.2 场地岩土工程勘察成果分析与利用	22
3.2 防渗加固方案优化与选择	23
第4章 振孔高喷技术研究与设计	25
4.1 高喷灌浆特征与固结体性质	25
4.1.1 高喷灌浆主要特征	25
4.1.2 固结体基本性质	27
4.2 高喷灌浆适用条件与机理	28
4.2.1 双管高喷技术优势	28
4.2.2 高喷灌浆适用条件	29

4.2.3	高喷灌浆机理	29
4.2.4	高喷灌浆主要特点	30
4.3	大颗粒地层高喷灌浆技术与认识	31
4.3.1	射流强度和比能	31
4.3.2	大颗粒地层结构类型与成墙机理	32
4.3.3	大颗粒地层浆液可灌性与成墙机理探讨	33
4.3.4	GIN 灌浆法与高喷灌浆	34
4.4	高喷灌浆设计	36
4.4.1	设计前应取得的资料	36
4.4.2	高喷灌浆喷射孔距选择与探讨	37
4.4.3	加固工程旋喷桩设计	38
4.4.4	防渗止水帷幕设计	45
4.4.5	复杂地层振孔高喷防渗加固设计探讨	47
	本章参考文献	48
第5章	振孔高喷机械设备与器材	49
5.1	振孔高喷机械设备	49
5.1.1	振孔高喷机	49
5.1.2	高压浆泵	56
5.1.3	泥浆泵	60
5.1.4	高速搅拌机	62
5.1.5	低速搅拌机	65
5.1.6	空气压缩机	66
5.2	振孔高喷主要器材	68
5.2.1	振管系统	68
5.2.2	管路系统	69
5.2.3	电缆	69
	本章参考文献	70
第6章	振孔高喷灌浆材料与制备	71
6.1	制浆材料及性能	71
6.1.1	水泥	71
6.1.2	黏土、膨润土与外加剂	73
6.2	主要材料性能测定	74
6.2.1	样品标准	74
6.2.2	样品数量、包装与储运	74
6.3	浆液配制	74
6.3.1	常用浆液种类及特点	74
6.3.2	浆液配制	76

6.3.3 浆液配比	79
6.3.4 浆液主要性能调整与测试	80
6.3.5 结石体主要性能测试	82
6.3.6 浆液储存与弃置	87
本章参考文献	87
第7章 振孔高喷施工工艺	89
7.1 振孔高喷施工工艺类别	89
7.2 振孔高喷常用对接方式	89
7.3 振孔高喷施工工序	91
7.3.1 振孔高喷施工工序内容	91
7.3.2 施工工序分解	91
7.4 振孔高喷工艺流程	97
7.4.1 振孔高喷工艺流程图	97
7.4.2 工艺参数	97
7.5 振孔高喷施工特殊情况处理	100
7.5.1 施工中中断	100
7.5.2 孔内漏浆	101
7.5.3 孔口串浆	101
7.5.4 返浆比重减小或返浆量增大	102
本章参考文献	102
第8章 振孔高喷施工过程质量控制与管理	103
8.1 施工前期的策划	103
8.1.1 组建项目经理部	103
8.1.2 编制施工组织设计	106
8.2 振孔高喷的施工准备	109
8.2.1 现场查勘、施工条件检查	109
8.2.2 施工人员进场	109
8.2.3 场地规划、建立生产生活设施	109
8.2.4 设备、材料进场	109
8.2.5 施工图纸会审及设计交底	110
8.2.6 施工测量	110
8.2.7 人员培训	110
8.2.8 开工条件检查	110
8.2.9 开工申请	111
8.2.10 质量、环境、职业健康安全交底	111
8.3 施工过程质量控制	112
8.3.1 振孔高喷技术参数的确定	112

8.3.2 对施工过程的确认	112
8.3.3 材料、成品、半成品控制	112
8.3.4 设备管理	113
8.3.5 测量仪器、计量仪表的管理	113
8.3.6 施工关键过程控制	113
8.3.7 施工过程的质量检查	115
8.3.8 合理安排工程施工进度	115
8.3.9 施工过程的标识	116
8.3.10 项目部与相关方的沟通	116
8.3.11 施工过程质量管理记录	117
8.4 工程移交与服务	117
8.4.1 工程移交和移交期间的防护	117
8.4.2 保修期服务	118
8.4.3 持续改进	118
本章参考文献	118
第9章 振孔高喷工程工地现场组织与管理	119
9.1 现场项目管理的目标和任务	119
9.2 项目组织结构	119
9.3 项目经理主要职责与权限	120
9.4 施工组织设计编制	121
9.4.1 施工组织设计编制基本原则	121
9.4.2 施工组织设计编制主要内容	121
9.5 振孔高喷施工资源配置	121
9.5.1 人力资源配置	122
9.5.2 主要施工设备配置	122
9.6 振孔高喷工地施工管理	123
9.6.1 工地管理工作内容	123
9.6.2 工地生产保障措施	123
本章参考文献	124
第10章 振孔高喷质量检测与工程验收	125
10.1 振孔高喷质量检测	125
10.1.1 振孔高喷单孔质量检查	125
10.1.2 振孔高喷工程质量检测及评价	126
10.2 振孔高喷工程质量现场检查方法	127
10.2.1 检测方法的选择	127
10.2.2 开挖检查	127
10.2.3 围井检查	128

10.2.4	钻孔检查	130
10.2.5	物探检测	131
10.2.6	单桩载荷试验	133
10.3	工程质量评定与验收	134
10.3.1	有关规定和说明	134
10.3.2	单元工程划分	134
10.3.3	单孔施工质量验收评定	135
10.3.4	单元工程质量验收评定	137
10.3.5	分部工程验收	138
本章参考文献		139
第 11 章 振孔高喷灌浆施工技术规范		140
11.1	总则	140
11.2	施工准备工作	140
11.2.1	技术准备	140
11.2.2	施工组织	140
11.2.3	施工现场布置	141
11.3	制浆材料和浆液配制	141
11.3.1	制浆材料	141
11.3.2	浆液配制	142
11.4	施工设备和机具	142
11.4.1	振孔高喷灌浆设备	142
11.4.2	振孔高喷灌浆机具	143
11.5	固结体结构形式	143
11.6	主要技术参数	144
11.7	振孔高喷灌浆施工	146
11.8	工程质量检查	147
11.9	竣工资料	148
11.10	附录	148
第 12 章 振孔高喷施工安全生产与管理		154
12.1	安全管理组织机构及其职责	154
12.1.1	建立安全生产保障体系	154
12.1.2	安全管理组织机构	154
12.1.3	安全管理组织机构的职责	154
12.2	振孔高喷工艺施工各岗位安全职责	156
12.3	振孔高喷施工作业人员安全技术操作规定	159
12.3.1	一般规定	159
12.3.2	振孔高喷机操作人员安全技术操作规定	160

12.3.3	空压机操作人员安全技术操作规定	162
12.3.4	高压浆泵操作人员安全技术操作规定	163
12.3.5	水电焊操作人员安全技术操作规定	164
12.3.6	振孔高喷机登高作业安全规定	165
12.3.7	电工操作人员安全技术操作规定	166
12.3.8	修理工操作人员安全技术操作规定	167
12.3.9	浆液搅拌操作人员安全规定	168
12.4	振孔高喷施工重要环境因素识别、危险源辨识及控制措施	169
12.4.1	环境因素的识别与控制措施	169
12.4.2	危险源的辨识与控制措施	172
12.5	振孔高喷施工应急预案的编制	176
12.6	突发事件应急的现场救援措施	177
12.6.1	火灾事故的现场救援措施	177
12.6.2	物体打击与机械伤害事故的现场救援措施	178
12.6.3	触电事故的现场救援措施	180
12.6.4	高处坠落事故现场救援措施	182
12.6.5	机动车事故的现场救援措施	183
12.6.6	食物中毒事件的现场救援措施	183
12.7	振孔高喷施工现场的相关规定、制度	184
12.7.1	制定振孔高喷施工安全生产管理目标、方案	184
12.7.2	安全生产责任制度	184
12.7.3	安全生产责任追究制度	185
12.7.4	安全生产奖惩制度	185
12.7.5	安全教育培训及各级安全技术交底制度	186
12.7.6	安全检查制度	188
12.7.7	应急救援预案制度	189
12.7.8	环境保护管理制度	190
12.8	振孔高喷施工安全保障措施	190
12.9	安全文明施工措施	192
12.10	环境保护措施	193
12.10.1	施工中可能引起的环境保护方面的问题	193
12.10.2	环境保护技术措施	193
	本章参考文献	195
第13章 振孔高喷技术发展展望		196
13.1	振孔高喷衍生工艺	196
13.1.1	振动切喷成墙工艺与实践	196
13.1.2	振动切槽成墙工艺与实践	197

13.2	振孔高喷技术展望	198
13.2.1	旋、摆、定工艺一体化进程	198
13.2.2	设备系列化、标准化	198
13.2.3	振孔高喷工艺与设备深度研发	199
第 14 章	振孔高喷工程实践	200
14.1	广东岭澳核电站联合泵站振孔高喷防渗工程	200
14.2	黑龙江省松花江干流依兰 B2 标段振孔高喷工程	201
14.3	尼尔基水利枢纽主坝上游围堰振孔摆喷防渗墙工程	202
14.4	大顶子山航电枢纽工程围堰振孔高喷防渗墙工程	204
14.5	太平湾电站防护堤水毁修复基础处理工程	205
14.6	哈达山水利枢纽工程一期导流围堰高压摆喷防渗墙工程	206
14.7	首钢水厂铁矿尹庄-新水尾矿库联合加高扩容项目防渗工程	208
14.8	三峡电源电站下游围堰振孔高喷防渗工程	210
14.9	西藏直孔水电站右岸一期围堰振孔高喷灌浆防渗墙工程	211

第1章 概 论

1.1 高速水射流理论基础

1.1.1 水射流基础知识

1. 水射流概念

以水为介质,利用泵将其加压并改变流通管路截面,变成一束从小径(如直径 d 小于5mm)直孔的喷嘴中以近于射线方向高速喷出的水流,即“射流”。通常的射流多指水射流。

岩土工程中高压喷射灌浆所利用的射流主要为水射流和水泥浆射流。

2. 水射流分类

一般将水射流分为连续射流、脉冲射流、空化射流(在射流中制造或裹入气泡)。

连续射流应用最为普遍,根据其性质可细分为液体射流、液体-固体射流、液体-气体-固体射流;按其压力可分为低压射流(工作压力小于10MPa)、高压射流(工作压力为10~100MPa)、超高压射流(工作压力不小于100MPa),工程界习惯以工作压力不小于200MPa的为超高压射流;还可根据包裹射流的环境介质分为淹没射流(在水或其他液体中喷射的射流)和非淹没射流(如在空气中喷射的射流)。

3. 水射流的一般应用

水射流是能量转变的一种最简便形式。随着专业化装备的迅速发展,高压射流技术几乎已经在各个领域得到应用,成为一项通用新技术。

水枪灭火、刷车、金属除锈、机场跑道除胶、水刀手术、切割材料、高压喷射灌浆、人造喷泉等都是利用射流能量做功的最常见射流作业,而利用高压或超高压射流切割岩石或钢材,则是以柔克刚的典例。

1.1.2 水射流的流体力学特性

1. 水的主要物理性质

(1) 密度。单位体积水所具有的质量。标准状态下,纯水的密度为 998kg/m^3 。

(2) 黏性。它指流体内部抗拒变形、阻碍运动的特性。衡量流体黏性大小的物理量是动力黏度 $\eta(\text{N}\cdot\text{s/m}^2 \text{ 或 } \text{Pa}\cdot\text{s})$ 和运动黏度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$,二者关系为 $\nu=\eta/\rho$ 。标准状态下水的动力黏度为 $1.005\times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ 。

(3) 压缩性。它指在一定温度下,水的体积随压强升高而减小的特性。衡量压缩性大小的物理量是压缩率 κ ,即

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



式中 κ ——压缩率, m^2/N ;
 dV ——体积的缩小量, m^3 ;
 dp ——压强的增加量, Pa ;
 V ——水的原有体积, m^3 。

水在不同压力下的压缩率值见表 1-1。

表 1-1 水在常温 (20℃)、不同压力 p 下的压缩率 κ

p/MPa	1~50	100	200	300	400	500
$\kappa/(10^{-9}\text{m}^2/\text{N})$	0.485	0.393	0.356	0.313	0.280	0.264

水的压缩率很小, 通常可以不予考虑, 但在高压尤其是超高压水射流问题中必须高度重视。如当压力为 200~300MPa 时, 按式 (1-1) 计算水的压缩量为 7%~9.4%。

2. 水的射流特性

水是自然界中最常见的流体, 也是最理想的射流介质。

设某固体材料弹性波速为 V_b , 当速度为 v 的水射流冲击该固体时, 冲击所产生的变形为 v/V_b , 想要获得更大的变形就必须对其施以更大的冲击速度。工程中采用射流能量的大小取决于所选用泵的性能, 如果泵的压力高流量大即输出能量增大, 在输送管路和喷嘴直径不变的条件下, 射流速度增大并具有更高的能量。但是, 对于水射流的加压范围不是无限的。有研究表明, 给水加压到约 300MPa 时喷嘴能够喷出温水, 加压到约 700MPa 时水即变成较高密度的烫手热冰。

连续射流的最大压力 p 和喷射速度 v 的关系可通过式 (1-2) 计算, 即

$$p = \rho v^2 / 2 \tag{1-2}$$

式中 ρ ——射流液体密度。

按式 (1-2) 计算, 采用 40MPa 的泵压可使水射流的初始速度最高达到 280m/s。实践中限于系统总效率, 实际初始速度要小得多。有学者给出 40MPa 压力下射流的初始速度为 258m/s。

喷射压力与喷射距离 (射流长度) 成反比, 最大喷射压力 p_{max} 在喷嘴初始速度 v_0 处, 并随喷射距离的延长而衰减。

3. 射流结构

水在空气中射流, 随着流速增加其流态变化大致过程为: 水滴—层流—紊流—喷雾流。

通常使用的水射流本质上大都属于喷雾流或紊流-喷雾流。非淹没射流结构大致可分为 3 个区段, 即起始段、基本段、消散段, 射流结构见图 1-1。

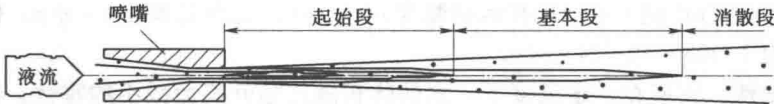


图 1-1 非淹没射流结构示意图

(1) 起始区段。射流离开喷嘴后随着流体与周围环境介质的质量和动量交换过程的持



续, 实现射流的传播与扩散, 射流扩散开始于射流表面并向轴心逐渐发展, 而在距离喷嘴端面的一段长度内保有的锥形等速射流核区, 即射流起始段。核区主要特征是水射流不含空气、透明且致密, 射流轴向动压力、流速、密度基本保持不变。核区的外部区域均为混合区。

(2) 基本区段(迁移区)。自起始段末端向外, 射流与环境介质交界处产生更大的速度坡降和与射流轴心垂直向外的扩散力, 射流导入环境介质开始分化, 动压力下降。该区主要特征是射流仍保持完整, 有较紧密的内部结构, 并具有较高的能量。

(3) 消散区段。基本段以后, 射流和环境介质迅速混合, 射流速度趋于平均化。在空气中环境中则完全雾状化成为水微粒射流。

研究射流各区段的不同性质, 对工程应用意义重大。起始区段用来材料切割, 基本区段用于打磨除锈、修整加工, 消散区段则用来除尘、降尘。

4. 引入气环流的射流结构

与在空气中喷射相比, 在水中喷射时(即呈淹没射流状态)射流动压会急剧减小。

工程应用中, 由于地下水的存在必将使射流能量迅速衰减, 极大降低射流作业效率。日本八寻晖夫等学者设想在水射流喷孔周围同时喷射高速同心圆状空气, 利用空气包裹水射流, 造成与在空气中喷射的同样环境条件(即将淹没射流强制变成非淹没射流), 以期达到防止或尽可能减小射流动压衰减的目的。气液射流结构见图 1-2。

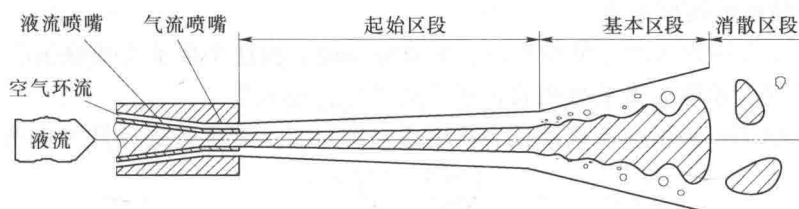


图 1-2 气液射流结构示意图

这样引入的空气环流被周围液体挟持着, 不到速度十分降低就不会急剧扩散, 可以认为空气喷流包裹着水射流, 以紧抱的状态运动着, 在此区域内射流轴能量维持在起始区段水平, 再向前进由于空气和射流的冲突以及供给系统内流体紊乱导致起始段紊流增大, 此紊流由于空气和射流液体表面张力关系而无法稳定, 当双方压力达到相等(平衡)时便形成气泡, 水射流呈紊流状态, 其结果是射流和空气开始混合而进入基本区段(迁移区)。射流继续前进, 空气和射流与周围液体相混合, 射流速度急剧下降进入消散区。整个过程可认为空气和水与周围液体逐步相混合, 作为一个非等向的流体而持续运动。

实践证明, 空气环流的引入不仅极大地提高了射流作业效率, 在高压喷射灌浆中空气所形成的大量气泡还起到了辅助切割、升扬搅拌等特殊作用。

5. 射流基本参数

工程应用中连续水射流的基本参数主要包括射流压力、流速、流量、功率、反冲力等动力学参数和射流起始区段长度、射流边界宽度等结构参数。

(1) 理论流速。基于伯努利方程可导出射流流速简化表达式, 即

$$v_t = 44.77 \sqrt{p} \quad (1-3)$$



式中 v_t ——射流流速, m/s;

p ——射流压力, MPa。

(2) 理论流量。已知射流速度, 可由 $q=vA$ 计算出射流流量, 即

$$q_t = 2.1d^2 \sqrt{p} \quad (1-4)$$

式中 q_t ——射流流量, L/min;

d ——喷嘴出口直径, mm。

采用式 (1-3) 与式 (1-4) 得出的是理论值, 通过喷嘴的实际流速 v 和流量 q 要比该计算值小。如果把实际流量 q 与理论流量 q_t 的比值定义为流量系数 μ , 则有

$$q = \mu q_t \quad (1-5)$$

式中 μ 为常数, 可写为

$$\begin{aligned} \mu &= q/q_t = (Av)/(A_t v_t) = \epsilon \phi \\ \epsilon &= A/A_t, \phi = v/v_t \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 A ——射流出口截面积;

A_t ——喷嘴出口截面积;

ϵ ——喷嘴截面收缩系数;

v ——射流出口速度;

v_t ——射流出口理论流速;

ϕ ——喷嘴的速度系数。

收缩系数 ϵ 表征流体经过喷嘴孔口后的收缩程度, 流速系数 ϕ 表征喷嘴孔口局部阻力及流速分布情况, 喷嘴流量系数则表征喷嘴的能量传递效率。

(3) 射流功率。当射流流量及压力确定后, 即可由下列关系式计算射流功率, 即

$$P = 16.67pq \quad (1-7)$$

式中 P ——射流功率, W;

p ——射流压力, MPa;

q ——射流流量, L/min。

该式表明, 喷嘴出口的射流功率是压力和流量的函数。如果将式 (1-4) 代入式 (1-7) 可得

$$P = 35.1d^2 p^{3/2} \quad (1-8)$$

式中 P ——射流功率, W;

d ——喷嘴出口直径, mm;

p ——射流压力, MPa。

可见, 喷嘴出口的射流功率就是产生射流的压力与喷嘴尺寸的函数。式 (1-8) 还表明, 射流功率对喷嘴直径的变化比对压力的变化更为敏感。喷嘴直径增加 1 倍, 射流功率则增加 3 倍; 而压力增加 1 倍, 射流功率则增加 1.8 倍。

(4) 射流反冲力。依据动量定理可以推得

$$F = 0.745q \sqrt{p} \quad (1-9)$$

式中 F ——射流反冲力, N;

q ——射流流量, L/min;



p ——射流压力，MPa。

由式（1-9）中可见，射流反冲力与射流流量及射流压力的平方根成正比。

将式（1-4）代入式（1-9）可得射流反冲力的另一种表达式，即

$$F=1.56d^2p \tag{1-10}$$

式中 F ——射流反冲力，N；

d ——喷嘴出口直径，mm；

p ——射流压力，MPa。

掌握射流动力学基本参数，可针对工程的不同应用选配相应喷嘴使射流参数匹配更趋合理，即可更加有效地进行射流作业。

（5）射流起始区段长度。苏联学者根据试验数据给出的经验公式，即

$$l_i=(A-BRe)d \tag{1-11}$$

$$Re=vd/\nu\times10^{-3}$$

式中 l_i ——射流起始段长度，mm；

d ——喷嘴出口直径，mm；

A ——经验系数，取决于喷嘴加工质量，见表1-2；

B ——经验系数，主要取决于雷诺数，见表1-2；

Re ——射流起始段雷诺数；

v ——射流流速，m/s；

ν ——运动黏度， m^2/s ，对于水为 $1.0\times10^{-6}\sim1.3\times10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

表 1-2 经验系数 A、B 值

喷 嘴 质 量	A	B
差	84	68×10^{-6}
中等	96	
优	112	

注 本表适用于射流压力 10~60MPa、喷嘴出口直径 1~4mm。

对于射流压力较高、雷诺数 $Re>0.4\times10^6$ 时，射流起始段长度直接取决于射流形成条件，不再和雷诺数有关。此时可按 $l_i=(53\sim106)d$ 范围内计算。有学者的试验数据仅为 $50d$ 。

表 1-3 所列射流压力从 10MPa 增加到 50MPa、喷嘴出口直径从 1mm 变化到 4mm 时，量纲为 1 的起始段长度 l_i/d 的试验数据。

表 1-3 射流起始段长度试验数据

喷嘴出口直径 与加工质量	射流喷射压力 p/MPa	起始段长度 l_i/mm	起始段量纲 为 1 的长度	雷诺数 Re
$d=0.97\text{mm}$ ， 加工质量中等	10	77.5	80	0.13×10^6
	20.3	74	76	0.19×10^6
	29.9	74	76	0.23×10^6
	38.7	75	77	0.26×10^6
	48.8	75	77	0.30×10^6