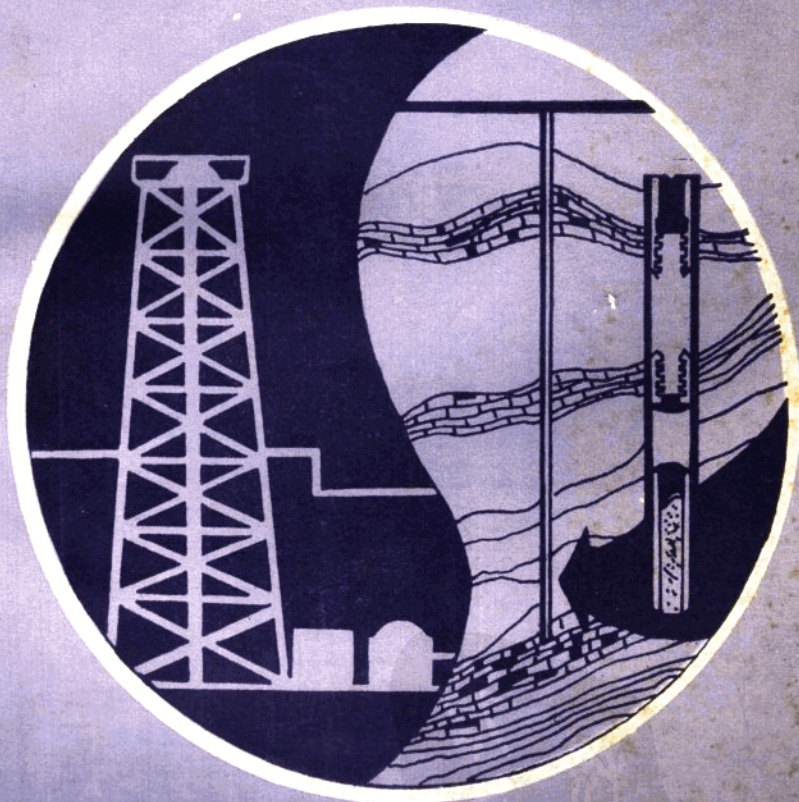


中等专业学校教材

钻探工程

(下册)

王世光 主编



地质出版社

中等专业学校教材

钻 探 工 程

下 册

王世光 曹日照 周声振 编
修宪民 焦恩远

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本书系按照地质矿产部教育司颁发的中等地质学校钻探专业四年制教学计划及《钻探工程》教学大纲编写。本教材包括：岩心钻探、冲孔护壁与堵漏、水文地质钻探与工程地质钻探、油、气井钻探概论等四篇。

下册内容包括：第二篇——冲孔与护壁堵漏（概述、冲孔钻孔的水力计算、泥浆、乳外液、水泥护壁堵漏、化学浆液护壁堵漏、复杂地层的处理）；第三篇——水文地质钻探与工程地质钻探（水文地质钻进工艺、水井成井工艺、水文地质钻孔抽水试验、工程地质钻探）；第四篇——油、气井钻探概论（钻井机械及设备、钻头及取心工具、钻具、钻井工艺、固井及油井完井、射孔钻井、孔底发动机钻进、钻探破碎岩石的新方法）。

本书除作为中等地质学校钻探专业的教材外，还可供野外地质勘探队钻探工程技术人员参考。

※ ※ ※

本书经地质矿产部中等专业学校采矿工程教材编审委员会于1985年2月主持召开的审稿会议审稿，同意作为中等专业学校教材出版。

※ ※ ※

中等专业学校教材

钻 探 工 程

下 册

王世光 主编

责任编辑：周声振

地 质 出 版 社 出版

（北京西四）

河北蔚县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：22¹/₄ 字数：537,000

1987年5月北京第一版·1987年5月第一次印刷

印数：1—6,000册 定价：3.00元

统一书号：13038·教280

前 言

《钻探工程》教材是为适应地质学校钻探专业教学需要,按照地质矿产部教育司1983年7月颁发的中等地质学校钻探专业四年制教学计划及《岩心钻探工艺》、《冲孔护壁与堵漏》、《水文地质钻探与工程地质钻探》等课程教学大纲(试行)的要求和时数而编写的。它是在原试用教材和各地地质学校钻探专业教材的基础上,由地质矿产部中专探矿工程教材编审委员会组织长春地质学校、昆明地质学校、长春冶金地质学校共同讨论,编写大纲,分工编写,并经统一编审而成的统编教材。

本教材主要包括:岩心钻探工艺、冲孔护壁与堵漏、水文地质钻探与工程地质钻探、石油钻井概论几部分内容。按教学计划规定其中岩心钻探工艺应控制在180学时左右(包括实习试验、下同),冲孔护壁与堵漏应讲授75学时左右,水文地质钻探与工程地质钻探应讲授55学时左右,石油钻井概论应控制在40学时左右(可在选修课内讲授)。本书分上下两册,上册为岩心钻探工艺,下册包括冲孔护壁与堵漏、水文地质钻探与工程地质钻探、石油钻井概论。

《钻探工程》是一门实践性较强的应用技术课程,是钻探专业的主要专业课之一。为此,教学过程中必须与实验课很好配合,做到理论联系实际,在紧扣教学目的和要求的前提下,处理好重点和难点的关系,注意培养学生分析问题和解决问题的能力,以及实际操作和独立工作的能力。教学过程中还应适当注意岩心钻探工艺、冲孔护壁与堵漏、水文地质钻探与工程地质钻探、石油钻井概论等内容间的联系和配合。此外,在《钻探工程》课讲授之前应进行一次钻探教学实习,并在实习过程中讲完《钻探概论》,以增强学生的感性知识。各地质学校在安排授课过程中,可根据具体情况进行调整。

本书编写分工是:长春地质学校王世光编写绪论、第一篇第一、二、四、五、六章和第四篇;昆明地质学校周声振编写第一篇七、八、九、十、十一、十二章和第三篇第四章;长春冶金地质学校刘济生编写第一篇第三章;长春地质学校曹日照编写第二篇第一、三、四、五章;修宪民编写第二篇二、六、七章;焦恩远编写第三篇第一、二、三章。全书由王世光主编。

本书在编写过程中除参阅原有试用教材及各地地质学校自用教材外,还参考并引用了五院校编写的《钻探工艺》学教材的有关内容和插图。地矿部探矿装备工业公司、勘探所、有关省地质局、仪器厂、核工业部三局等为本教材提供很多有益的资料和科研成果,在此编者一并向他们表示感谢。

由于编者水平有限,再加上时间紧迫,书中定会有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1985年7月

目 录

第二篇 冲孔与护壁堵漏

第一章 概述

第一节 冲孔与护壁堵漏的目的与意义	1
第二节 冲洗介质的种类和冲孔方法	2
第三节 常用的护壁堵漏材料和方法	3

第二章 冲洗钻孔的水力计算

第一节 冲洗液量的计算	5
第二节 冲孔中冲洗液循环时的水力损失计算	7

第三章 泥浆

第一节 概述	15
第二节 泥浆的基本原料	17
第三节 泥浆的稳定与聚结（絮凝）	32
第四节 泥浆性能及其测定方法	36
第五节 泥浆处理剂及泥浆性能调整	52
第六节 特种泥浆	71
第七节 泥浆的配制、净化及现场管理	77

第四章 乳状液

第一节 乳状液的一般概念	80
第二节 表面活性剂	80
第三节 乳状液的稳定和破乳	93
第四节 乳状液的配制	95
第五节 乳状液的性能测定	97
第六节 乳化泥浆简介	98

第五章 水泥护壁堵漏

第一节 概述	99
第二节 水泥	99
第三节 水泥附加剂	112
第四节 水泥浆液的灌注工艺	116

第六章 化学浆液护壁堵漏

第一节 脲醛树脂堵漏	123
第二节 氰凝浆液堵漏与护壁	130

第七章 复杂地层的处理

第一节 产生复杂地层的原因	141
---------------------	-----

第二节 复杂地层的处理	144
-------------------	-----

第三篇 水文地质钻探与工程地质钻探

第一章 水文地质钻进工艺	153
第一节 概述	153
第二节 水文地质、水井钻进方法	159
第二章 水井成井工艺	189
第一节 换浆、破壁、探孔	189
第二节 下管工艺	191
第三节 填砾	216
第四节 止水	219
第五节 洗井	224
第三章 水文地质钻孔抽水试验	229
第一节 抽水试验的目的	229
第二节 抽水试验的要求	229
第三节 抽水试验的类型	230
第四节 抽水试验设备的选择	231
第五节 抽水时水量水位的测量及取水器	236
第六节 增加出水量的措施	237
第四章 工程地质钻探	242
第一节 概述	242
第二节 钻进方法	243
第三节 采取样品	256
第四节 压水试验	271
第五节 触探	280
第六节 大口径基础工程施工钻探	287

第四篇 油、气井钻探概论

第一章 钻井机械及设备	294
第一节 钻井机械	294
第二节 钻井设备	298
第二章 钻头及取心工具	303
第一节 刮刀钻头	303
第二节 牙轮钻头	304
第三节 金刚石钻头	309
第四节 特种钻头	310
第五节 取心工具	311

第三章 钻具	313
第一节 方钻杆	313
第二节 钻杆	314
第三节 钻铤与套管	316
第四节 钻具的选配及连接	319
第五节 钻井辅助工具和指重表	320
第四章 钻井工艺	323
第一节 概述	323
第二节 钻进	324
第三节 起下钻	328
第五章 固井及油井完成	329
第一节 固井	329
第二节 油井完成	331
第六章 海上钻井	333
第一节 海上钻井的特点	333
第二节 海上钻井装置	334
第三节 水下器具	336
第七章 孔底发动机钻进	338
第一节 螺杆钻	338
第二节 电钻	339
第二节 涡轮钻	342
第八章 钻探破碎岩石的新方法	344
第一节 新型机械钻	344
第二节 热力剥削钻	346
第三节 熔融气化钻	348
第四节 化学钻	349

第二篇 冲孔与护壁堵漏

第一章 概 述

第一节 冲孔与护壁堵漏的目的与意义

一、冲洗钻孔的目的

冲洗钻孔是钻探过程中的一个重要环节,在钻进过程中,钻头不断地破碎孔底岩石,产生大量岩粉并堆积在孔底,同时又因钻头与岩石之间摩擦而积蓄了很大热量。孔底堆积过多的岩粉会遭到钻头的再次破碎,增加功的消耗,同时这些岩粉阻碍了钻头有效地破碎孔底岩石和增加了钻具回转的阻力及钻头的磨损,严重时堵塞冲洗液循环的通道,使冲洗液循环受阻或中断,此时因摩擦产生的大量的热,不能被冲洗液带走,则导致烧坏钻头,严重时会发生严重的烧钻事故,这点对金刚石钻进尤为突出。

综上所述,冲洗钻孔的目的可归纳为如下几点:

- (1) 清除孔底岩粉,保证钻头有效地破碎孔底岩石,防止埋钻事故的发生。
- (2) 冷却钻头,保证钻头切削具有良好的切削性能,防止烧坏钻头和烧钻事故。
- (3) 钢粒钻进时,正确的冲洗钻孔可保证孔底钢粒正常分布与分选更新,以保证正常钻进。
- (4) 利用冲洗钻孔的冲洗介质作为涡轮钻具和孔底冲击回转钻具的动力。
- (5) 利用冲洗介质的特殊性能来维护孔壁保证正常钻进。

二、护壁堵漏的目的与意义

护壁堵漏:保证孔壁的稳定和冲洗液的正常循环是维持正常钻进的必要条件。但是在钻进过程中,构成孔壁的岩石因失去原有的平衡,常常处于不稳定状态,若孔壁岩石本身松散、破碎,在冲洗液的浸泡、冲刷、钻具回转时的震动、敲打,特别是小口径金刚钻进时,升降钻具速度过快时产生的抽吸和压力激动等因素,使孔壁岩石常常会发生掉块或坍塌,使钻进工作不能正常进行,严重时还会发生挤夹、卡钻或埋钻事故,还应指出在坍塌严重的孔段处会出现严重的超径,钻具容易在此处折断,一旦发生钻杆折断后,处理也比较困难,常因处理不当造成钻具报废,由于上述原因,常常需要花费大量的人力物力和时间来处理孔壁坍塌问题,这不仅会影响钻探效率,增加成本,同时也延长了勘探周期。因此,维护孔壁的稳定是保证正常钻进的必不可少的条件。

在钻进过程中,还往往因岩石具有孔隙、裂隙、溶洞等,使冲洗液漏失,破坏冲洗液的正常循环。这样不仅造成冲洗液的大量消耗,增加了钻探的成本,在供水困难或干旱缺

水地区往往出现停钻待水，也会因孔内严重漏失而引起孔内其它事故。综上所述，可知保证冲洗液的正常循环，有效地冲洗钻孔，维持孔壁的稳定是保证正常钻进的必不可少的条件。因此，有人把冲洗液比做人体的血液，把冲洗液的循环比做人体的血液循环，可见冲孔护壁在钻进中的重要性。

第二节 冲洗介质的种类和冲孔方法

一、冲洗介质的种类

冲洗钻孔的介质总的来讲可分为：气体、液体、泡沫三大类。

1. 气体

利用高压空气吹洗钻孔达到清除孔底岩粉和冷却钻头的目的，此种方法不受水源的限制，因此多用于干旱缺水地区和永冻层。

2. 液体

利用水泵将液体压送入孔内进行冲洗，以达到清除岩粉和冷却钻头的目的。常用的液体有如下几种：

(1) 清水：即天然水，是一种良好的冷却液，在工业中被广泛地使用，水在地表分布很广，可就地取材，因此，是一种廉价的冷却液，利用清水来冲洗钻孔有很多优点，除能很好的完成冲孔的目的外，还可节省配制泥浆时用的粘土和处理剂、维持冲洗液循环的泵压低，减轻钻具回转阻力，减轻水泵零件的磨损，特别是钢粒钻进时，能改善钢粒的分选更新作用，使钢粒在孔底分布合理，提高机械钻速，同时孔口工作卫生条件好等。但是，利用清水冲洗钻孔也有其缺陷：如携带和悬浮岩粉能力差，维护孔壁性能差，因此，在使用中有一定的局限性。通常均在坚硬完整地层或水敏性弱的地层中使用清水冲洗钻进。

(2) 乳状液：是由两种互不相溶的液体及乳化剂等组成。在岩心钻探中应用的是油在水中分散所得的水包油型乳状液，它除能完成冲洗钻孔的目的外，还具有良好的润滑减阻作用，对提高钻具转速非常有利。目前主要应用于小口径金刚石钻进孔壁完整稳定没有漏失的地层时冲洗钻孔。

(3) 饱和盐水溶液：所谓饱和盐水溶液即盐在水中的溶解速度和自水中结晶析出的速度相平衡时的盐水溶液。因此种溶液不再对盐进行溶解，故在盐岩层中钻进，可保护矿心和矿层。此外饱和盐水溶液还具有冰点低的特点，故还可用在冰冻地层钻进中。

(4) 泥浆：是由粘土和水及必要的处理剂组成的分散体系，它具有携带岩粉能力强，悬浮岩粉能力强，能在孔壁上形成泥皮具有护壁堵漏的作用。因此，多用于松散、松软、裂隙发育、破碎、掉块坍塌、漏失涌水涌气等复杂地层，是目前通过复杂地层时的主要冲洗液。

3. 泡沫

由气体、液体及发泡剂等组成，它除能完成冲洗钻孔的目的外，因其比重轻（小于1），在漏失地层可减轻漏失量。

冲洗介质的种类及其性能等将在有关章节详细讨论。

二、冲洗钻孔的方法

目前冲洗钻孔的方法可分为下列三种：

1. 正循环冲洗钻孔

冲洗钻孔时，冲洗液的循环线路为：水源箱→水泵→高压送水管→水接头→钻杆→岩心管与岩心的环状间隙→钻头水口→岩心管与孔壁的环状间隙→钻杆与孔壁环状间隙→孔口→循环槽→沉淀池→水源箱，这种循环方式称为正循环冲孔，其特点是：设备简单，冲洗液上返速度小，对孔壁冲刷作用小，但携带岩粉能力小。此种方法是目前岩心钻探中应用最为普遍的一种方法。

2. 全孔反循环冲洗

冲孔时冲洗液循环的路线与正循环相反，即冲洗液由水源箱→水泵→高压送水管→孔口密封装置→钻杆与孔壁环状间隙→岩心管与孔壁间隙→钻头水口→岩心管与岩心的环状间隙→钻杆内孔→水接头→回水管→循环槽→沉淀箱→水源箱，此种冲洗方式的特点：冲洗液上返速度高，携带岩粉能力强，可防止岩心遭受钻头的再次破碎，对提高岩矿心采取率有益，但需要有密封严密的孔口密封装置，此外，冲洗液对孔壁冲刷比较严重，因此，目前很少使用。

3. 孔底局部反循环冲洗

冲洗时冲洗液循环路线是：水源箱→水泵→高压送水管→水接头→钻杆→特制钻具，然后冲洗液分为两路，一路沿粗径钻具与孔壁的环状间隙向下经钻头水口→岩心管与岩心的环状间隙→特制接头回水孔上返与另一路冲洗液汇合后沿钻杆与孔壁环状间隙上返到孔口，再经循环槽、沉淀池流回水源箱。此种冲洗方式目前主要用于硬脆碎地层提高岩矿心采取率。

第三节 常用的护壁堵漏材料和方法

常用的护壁堵漏材料和方法，有如下几种：

一、泥浆护壁堵漏

泥浆是由粘土和水以及必要的处理剂组成的分散体系。它除了能完成冲洗钻孔的任务外，还是护壁与堵漏的常规材料。在一般情况下，只要能根据不同地层和孔内情况来选择泥浆类型和调整性能以及正确的使用和维护，就能维护孔壁的稳定和堵塞漏失通道，以达到护壁和堵漏的目的。

二、水泥护壁堵漏

水泥是一种应用很广的水硬性胶结材料，水泥的品种很多，在钻孔护壁堵漏工作中常用的水泥有：硅酸盐水泥、硫铝酸盐地勘水泥等。

利用水泥和水按一定比例配制成水泥浆，用水泵或专门工具送到欲灌注的坍塌或漏失的孔段，将孔壁破碎的岩石胶结成一个整体或堵塞封闭漏失通道，以达到护壁或堵漏的目的。

三、化学浆液护壁堵漏

随着化学工业的不断发展，近年来出现了不少灌浆材料。应用于钻孔护壁堵漏的有：脲醛树脂、氰凝、丙凝、301聚脂等。

护壁堵漏时，将配制好的化学浆液用专门灌注工具送到坍塌漏失孔段，使其凝结以达

到加固孔壁堵塞封闭漏失通道的目的。

四、粘土护壁堵漏

粘土多是不同晶体结构的粘土矿物的混合物。它具有很强的粘性。护壁堵漏时，将粘土用适量的水调和成具有塑性的软泥并制成泥球，待泥球表面风干后，缓慢投入孔内，投入一定数量后，用钻具捣实后，再继续投入，待投入一定数量后，再用钻具捣实，如此直到泥球填满欲护孔（或堵漏）的孔段，再下入钻具开车缓慢扫孔，将粘泥挤入岩石裂隙和抹于孔壁上以达到护壁和堵漏的目的。

五、架桥填充材料与其它浆液结合堵漏

常用的架桥填充材料有：棉籽壳、核桃壳、碎云母和石棉等，将上述材料加工成不同粒度以备选用。

堵漏时根据孔内的情况来选择架桥材料和粒度。为了提高架桥的效果最好几种不同粒度的材料复合使用。将这些材料送入钻孔堵塞漏失通道，再用其它浆液灌注以封闭漏失通道达到堵漏的目的。

六、套管封隔护壁堵漏

利用向孔内下入套管来封隔坍塌或漏失的孔段，套管底端必须放置在稳定的岩石上，并用粘土或水泥进行封闭止水。这种方法多是在上述方法处理无效时使用。

第二章 冲洗钻孔的水力计算

第一节 冲洗液量的计算

钻孔冲洗主要应保证岩粉自孔底及时排除并沿钻孔环状间隙携带至地表,使钻头克取岩石产生大量的磨擦热及时的散发出而得到充分的冷却。

冲洗钻孔时冲洗液量的确定应满足上述条件。当冲洗液量不足时,将导致粗粒岩粉在孔底重复破碎,孔内岩粉增多,影响钻速,增加钻头磨损,甚至造成孔内烧钻事故。冲洗液量过大,将导致冲蚀岩心和钻头,破坏孔壁,易使泵压过高影响正常钻进。

为了使孔底清洁,钻头克取岩石时产生的高热及时冷却,冲洗液量的确定具有重要的实际意义。由于钻进时钻头类型不同,钻速和产生的岩粉粒度,数量不同,对冲洗液量的要求也不一样。这一节里冲洗液量的计算是依据冲洗液在钻孔中循环时的上返速度应超过岩粉在静止液体中,由重力作用下的沉降速度,再考虑到上返的冲洗液流经钻孔环状间隙断面面积来确定冲洗液量。

一、在静止液体中岩粉颗粒下沉速度的计算

岩粉颗粒在液体中下沉速度,按下式确定:

$$u = K \sqrt{\frac{d_1(\rho_1 - \rho)}{\rho}} \quad \text{m/s} \quad (2-1)$$

式中: u ——岩粉颗粒在液体中下沉速度, m/s;

K ——岩粉颗粒的形状系数; 岩粉由钻头克取下来时的形状各异,其形状系数值由试验经过计算确定的数值,球形岩粉取 $K = 5.11$; 不规则或片状的岩粉取 $K = 2.5$ —4;

d_1 ——岩粉颗粒直径, m;

ρ_1 ——岩粉密度, kg/m^3 ;

ρ ——液体密度, kg/m^3 ;

例题2-1: 已知岩粉颗粒(球形)直径为0.3mm, 密度为2500 kg/m^3 , 液体密度为1200 kg/m^3 , 求岩粉颗粒的下沉速度。

解:

$$u = K \cdot \sqrt{\frac{d_1(\rho_1 - \rho)}{\rho}} = 5.11 \sqrt{\frac{0.0003(2500 - 1200)}{1200}} = 0.092 \quad \text{m/s}$$

二、冲洗液上返速度的计算

冲洗液的上返速度由下式确定:

$$v = K_1 (u + v_1) \quad \text{m/s} \quad (2-2)$$

式中: v ——冲洗液的上返速度, m/s;

K_1 ——冲洗液上返时沿钻孔断面运动速度的不均匀系数, 取 $K_1 = 1.1$ —1.3;

v_1 ——岩粉颗粒的携带速度, m/s;

u ——克服岩粉颗粒自由下沉所需的上返速度,即相当于岩粉颗粒的下沉速度, m/s。

当岩粉颗粒的下沉速度 u 已经算得,则 v_1 值可按式计算:

$$v_1 = (0.1 - 0.3)u \quad \text{m/s} \quad (2-3)$$

在计算时,加深孔钻进,钻进速度快,岩粉多,所取的数值应大些。

由公式计算出来的冲洗液上返速度,主要是以携带岩粉的角度来考虑的。如果冲洗液上返速度,除考虑携带岩粉以外,再考虑钻进时钻头的冷却等其它因素时,根据不同钻头类型确定合理界限内的冲洗液上返速度值,参考用实验方法所得的上返速度值。见表2-1所示。

表 2-1

钻 头 类 型	冲 洗 液 上 返 速 度 (m/s)	
	清 水	泥 浆
合 金 钻 头	0.25—0.6	0.2—0.5
金 刚 石 钻 头	0.5—0.8	0.4—0.5
牙轮钻头 (钻进硬岩)	0.6—0.8	0.4—0.6
刮刀钻头 矛式钻头 (钻进软岩)	0.6—1.0	0.6—0.8

三、冲洗液量的计算

采用正循环冲孔时,冲洗液量按下式确定:

$$Q = F \cdot v = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_2^2) v \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (2-4)$$

式中: Q ——正循环冲孔时的冲洗液量, m^3/s ;

F ——钻孔环状间隙断面积, m^2 ;

D ——钻孔直径, m;

d_2 ——钻杆外径, m。

例题2-2: 已知岩石密度 $\rho_1 = 2700 \text{ kg/m}^3$, 泥浆密度 $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$, 岩粉直径 $d_1 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$, 钻孔直径 $D = 91 \text{ mm}$, 钻杆外径 $d_2 = 50 \text{ mm}$, 确定将不规则形状岩粉携带出来所需的泥浆量。

解: 取 $K = 4$, 则岩粉下沉速度为:

$$u = K \cdot \sqrt{\frac{d_1(\rho_1 - \rho)}{\rho}} = 4 \times \sqrt{\frac{4 \times 10^{-3}(2700 - 1100)}{1100}} = 0.305 \quad \text{m/s}$$

取 $v_1 = 0.2u$ 和 $K_1 = 1.2$, 确定 v_1 和 v :

$$v_1 = 0.2 \times 0.305 = 0.06 \quad \text{m/s}$$

$$v = 1.2 (0.305 + 0.06) = 0.44 \quad \text{m/s}$$

则所需冲洗液量 Q 为:

$$Q = \frac{\pi}{4} (0.091^2 - 0.05^2) \times 0.44 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 120 \text{ L/min}$$

第二节 冲孔中冲洗液循环时的水力损失计算

钻孔冲洗时, 冲洗液循环流经地表管路、钻杆柱、钻头及岩心钻具、钻具与孔壁的环状空间时, 都将造成一定的水力损失(又称压头损失或压力损失), 因此, 泥浆泵泵送冲洗液循环时产生的压力最低应等于各个压力损失的总和。当冲洗液在钻孔内循环时, 随着泵量的增加和钻孔的延深, 水力损失也将明显增加。为了保证钻进过程中供给定量的冲洗液循环, 泥浆泵应发挥出的泵压应足以克服循环系统各部分遇到的水力阻力。因此, 通过计算来分析冲洗液循环系统各部分产生的压力损失, 以确定泥浆泵向钻孔内输送冲洗液时应当产生的合理泵压。

一、水力损失的基本计算公式

钻进过程中冲洗钻孔的冲洗液在循环时产生的水力损失与水力学中计算液体在圆管内流动时的水力损失的计算条件基本一致。水力学中计算液体在圆管内流动时的水力损失是以达西公式作为基本计算公式。因此, 计算冲孔时冲洗液循过环程的水力损失也是以达西公式作为基本计算公式。达西公式的数学表达式如下:

$$P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \cdot \rho \quad \text{mH}_2\text{O} \quad (2-5)$$

式中: λ ——无因次阻力系数(也称达西系数);

L ——管路长度, m;

D_1 ——管路直径, m;

$\bar{v}$ ——通过管路内断面的平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

$$\bar{v} = 4Q / \pi \cdot D_1^2;$$

Q ——泵量, m^3/s ;

g ——重力加速度, $9.81\text{m}/\text{s}^2$;

ρ ——液体密度, kg/m^3 。

将 $\bar{v}$, g 值代入(2-5)式得:

$$P = \lambda \cdot L \cdot \rho \cdot \left(\frac{4Q}{\pi D_1^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \times 9.81 D_1} = 8.3 \times 10^{-5} \lambda \cdot L \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{D_1^5} \quad \text{mH}_2\text{O} \quad (2-6)$$

将水力损失单位改为大气压; 则(2-6)式需乘以 10^{-1} , 即得到

$$P = 8.3 \times 10^{-6} \times \lambda \cdot L \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{D_1^5} \quad \text{atm} \quad (2-7)$$

将水力损失单位改为国际单位制Pa, 则(2-7)式乘以101325Pa, 即得到:

$$P = 8.4 \times 10^{-1} \lambda \cdot L \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{D_1^5} \quad \text{Pa} \quad (2-8)$$

二、钻杆柱内的水力损失计算

钻杆柱内的水力损失计算中包括钻铤和地面管路的水力损失计算。其计算公式如下：

$$P_1 = 8.4 \times 10^{-1} \lambda \cdot \rho_2 \frac{Q^2 (L_1 + L_2)}{D_2^5} \quad \text{Pa} \quad (2-9)$$

式中： λ_1 ——钻杆内水力损失无因次阻力系数；

ρ_2 ——冲洗液密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；

Q ——冲洗液量（泵量）， $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

L_1 ——钻杆长度， m ；

L_2 ——钻铤和地面管路的水力损失换算成钻杆的等值长度， m ；

D_2 ——钻杆内径， m ；

P_1 ——钻杆、钻铤和地面管路中的水力损失， Pa ；

计算水力损失时必须计算出 λ_1 的值。在计算 λ_1 值时，应首先计算出雷诺数并确定冲洗液的流态。

冲洗液在管路及钻孔内流动时，分为层流和紊流两种流态。层流态是指冲洗液流速较慢时，冲洗液各质点是在互不干扰，各自成层地流动的流动状态。紊流态是指冲洗液流速较快时，冲洗液各质点相互掺混，作杂乱无章地流动状态。

划分冲洗液在流动时是层流态还是紊流态，可用无因次的雷诺系数值来表示。雷诺系数的数学表达式如下：

$$\text{Re} = \frac{u \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (2-10)$$

式中： u ——冲洗液流过管路的平均流速；

D ——冲洗液流过管路的直径；

ρ ——冲洗液密度；

η ——冲洗液的动力粘度。

1. 雷诺数的计算

(1) 牛顿流体的雷诺数计算：用水、盐水或乳状液做冲洗液时，这些液体基本上属于牛顿流体，雷诺数计算公式如下：

$$\text{Re}_1 = \frac{\bar{v}_2 \cdot D_2 \cdot \rho_2}{\eta} \quad (2-11)$$

式中： $\bar{v}_2$ ——钻杆内冲洗液的平均流速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；

$$\bar{v}_2 = Q / \left(\frac{\pi}{4} D_2^2 \right) = 4Q / \pi D_2^2$$

Q ——冲洗液量（泵量）， $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

D_2 ——钻杆内径， m ；

ρ_2 ——冲洗液密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；

η ——冲洗液的动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

20°C时水、盐水、乳状液的 η 值为：

水 = $1.01 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ （或者为1.01厘泊）

盐水 = $1.835 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ （或者为1.835厘泊）

小口径金刚石钻进乳状液常用水包油型乳状液，粘度一般都比 $1.01 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 稍大，可以近似定为 $1.01 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ，（或者定为 1.01 厘泊）。

(2) 非牛顿的塑性流体雷诺系数计算：泥浆及多组分触变性冲洗液均近似属于塑性流体。采用综合雷诺系数，其计算公式如下：

$$\text{Re}_1^* = \frac{\bar{v}_2 \cdot D_2 \cdot \rho_2}{\eta + \frac{\tau_0 D_2}{6v_2}} \quad (2-12)$$

式中： η ——冲洗液（泥浆）的塑性粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；塑性粘度用旋转粘度计可测定出其单位为厘泊的数值， $1\text{P} = 1 \times 10^{-1} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ， $1\text{cP} = 1 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ， $1\text{P} = 100\text{cP}$ 。

τ_0 ——冲洗液动切力， Pa ；

ρ_2 ——冲洗液密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

当水或其它粘性液体的 $\tau_0 = 0$ 时， $\text{Re}_1^* = \text{Re}_1$ ，即说明综合雷诺数计算公式对其它液体也适用。

2. 区别冲洗液的流态及阻力系数计算

(1) 牛顿型冲洗液的流态区别及阻力系数计算 由大量的实验证明，液体在圆管路中流动时，一般采用临界雷诺数作为判别液体流态的标准。临界雷诺数的值为：

$$\text{Re}_{\text{临}} \approx 2000$$

当 $\text{Re}_1 \leq 2000$ 时为层流，阻力系数的计算公式如下：

$$\lambda_1 = \frac{64}{\text{Re}_1} \quad (2-13)$$

当 $\text{Re}_1 > 2000$ 时为紊流， λ_1 与 Re_1 无关，只与管路内径有关，其计算公式如下：

$$\lambda_1 = \frac{0.0121}{D_2^{0.226}} \quad (2-14)$$

(2) 非牛顿型塑性流体冲洗液的流态区别及阻力系数计算 当 $\text{Re}_1^* \leq 2000$ 时为层流（结构流），阻力系数的计算公式如下：

$$\lambda_1 = \frac{64}{\text{Re}_1^*}$$

当 $\text{Re}_1^* > 2000$ 时为紊流，阻力系数的计算公式如下：

$$\lambda_1 = \frac{0.0121}{D_2^{0.226}}$$

3. 钻铤和地面管路水力损失换算成钻杆等值长度的计算
等值长度计算公式如下：

$$L_2 = L_a \frac{D_a^{2.5}}{D_b^{2.5}} + L_b \frac{D_b^{2.5}}{D_2^{2.5}} + \dots \quad (2-15)$$

式中： L_a 、 L_b ……—钻铤或地面管路的长度， m ；

D_a 、 D_b ……—钻铤或地面管路的内径， m ；

D_2 ——钻杆内径， m 。

三、钻杆接头内局部水力损失计算

计算公式如下：

$$P_2 = 8.4 \times 10^{-1} \xi \cdot \rho_2 \frac{Q^2}{D_2^4} \cdot n \quad \text{Pa} \quad (2-16)$$

式中: ξ ——局部阻力系数(无因次);

n ——钻杆接头或接箍的数目;

ρ_2 ——冲洗液密度, kg/m^3 ;

$$\xi = \alpha \left[\left(\frac{D_2}{D_3} \right)^2 - 1 \right]^2 \quad (2-17)$$

α ——考虑通孔形状特点的经验系数, 钻杆接头取 $\alpha = 1.5$, 锁接箍 $\alpha = 2$;

D_2 ——钻杆内径, m ;

D_3 ——钻杆接头或锁接箍的内径, m ;

Q ——冲洗液量(泵量), m^3/s ;

P_2 ——钻杆接头内部局部水力损失, Pa 。

四、环状空间的水力损失计算

计算公式如下:

$$P_3 = 8.4 \times 10^{-1} \lambda_2 \cdot \rho_2 \frac{Q_2 \cdot L_3}{(D_5 - D_4)^3 (D_5 + D_4)^2} \quad \text{Pa} \quad (2-18)$$

式中: λ_2 ——环状空间内水力损失无因次阻力系数;

ρ_2 ——冲洗液密度, kg/m^3 ;

L_3 ——钻孔深度, m ;

D_4 ——钻杆外径, m ;

D_5 ——钻孔直径, m ;

Q ——冲洗液量(泵量), m^3/s ;

P_3 ——环状空间的水力损失, Pa 。

计算水力损失应先算出 λ_2 的值, 在计算 λ_2 值时, 必须先算出雷诺数, 并确定冲洗液的流态。

1. 雷诺数的计算

(1) 牛顿液体的雷诺数计算 计算公式如下:

$$\text{Re} = \frac{\bar{v}_3 (D_5 - D_4) \cdot \rho}{\eta} \quad (2-19)$$

式中: $\bar{v}_3$ ——环状空间冲洗液上返流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$\bar{v}_3 = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} (D_5^2 - D_4^2)} = \frac{4Q}{(D_5^2 - D_4^2) \cdot \pi} \quad (2-20)$$

Q ——冲洗液量(泵量), m^3/s ;

D_5 ——钻孔直径, m ;

D_4 ——钻杆外径, m ;

ρ_2 ——冲洗液密度, kg/m^3 ;

η ——液体的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 非牛顿的塑性液体的雷诺数计算 计算公式如下: