



中国地质调查成果
CGS 2015-052

地质钻探冲洗液技术

DIZHI ZUANTAN CHONGXIYE JISHU

陶士先 付 帆 主编

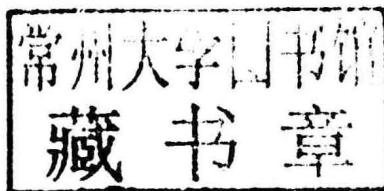
地质出版社



中国地质调查“重点成矿带钻探冲洗液关键技术与示范(项目编号:12120113097400)”项目资助

地质钻探冲洗液技术

陶士先 付 帆 主编



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书着重介绍了地质钻探冲洗液性能与测试、常用冲洗液体系及处理剂、冲洗液的现场配制与维护、复杂地层冲洗液对策、钻孔堵漏及绳索取心钻探冲洗液技术等内容。全书由 12 章组成。本书面向生产一线和广大技术人员编写,内容简洁、实用、易懂,贴近现场,有较强的时效性和实用性。

本书可供地质钻探一线的技术人员阅读和参考,也可作为冲洗液技术培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

地质钻探冲洗液技术 / 陶士先等主编. —北京:
地质出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 116 - 09470 - 3

I. ①地… II. ①陶… III. ①地质勘探—钻井液
IV. ①TE254

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 260100 号

责任编辑: 吴宁魁

责任校对: 张 冬

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 66554528; (010) 66554627 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554686

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张: 10.5

字 数: 250 千字

印 数: 1—1000

版 次: 2015 年 10 月北京第 1 版

印 次: 2015 年 10 月北京第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 09470 - 3

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

几经寒暑，这本《地质钻探冲洗液技术》终于完稿了。编著本书的最早动因是在2012年，有感于当时地质钻探单位普遍存在冲洗液方面专业技术人才比较缺乏，想在近年来冲洗液培训讲义的基础上编著一本有关地质钻探冲洗液基础知识方面的实用读本，因此在中国地质调查局地调项目资金支持下，启动了本书的编写工作。

本书在编著中力求结合地质钻探特点，本着面向生产一线和广大技术人员为原则，贴近现场，增强时效性和实用性。书中舍弃了大量艰深的理论知识和繁琐的计算，着重介绍了冲洗液性能与测试、常用冲洗液体系及处理剂、冲洗液的现场配制与维护、复杂地层冲洗液对策、钻孔堵漏及绳索取心钻探冲洗液技术等，力求内容简洁、实用、易懂。既可以为现场工作提供指导和参考，也可以用作冲洗液培训学习教材。

本书由北京探矿工程研究所钻井化学技术研发中心组织编写，陶士先、付帆主编，陶士先、付帆、熊正强负责统稿。全书共包括十二章和四个附表，第一章由单文军、王鲁朝编写，第二章由陶士先、付帆、李艳宁编写，第三章由陶士先、李晓东编写，第四章由陶士先编写，第五章由陶士先、纪卫军、柯玉军编写，第六章由朱迪斯编写，第七章由陶士先、柯玉军编写，第八章由陶士先、刘四海编写，第九章由陶士先编写，第十章由彭步涛、陶士先编写，第十一章由熊正强编写，第十二章由陶士先、柯玉军编写，附表由纪卫军编写。同时，要特别说明的是本书中有些成果和知识得益于钻井化学技术研发中心（原钻井液技术研究室）前辈的传承，尤其是在涉及冲洗液流变学及绳索取心钻探冲洗液技术章节，较多地引用和参考了汪仲英和汤松然两位老主任的学术成果，在此特向两位前辈表示敬意。本书在编写过程中还得到了王达、左汝强、贾军、朱恒银、谢文卫、李艺、高翔等专家指导，杨甘生教授对本书进行了仔细的审阅和修改，胡继良完成了书中部分公式推导与核对及书稿校对工作，在此一并致谢。

还应承认编著者理论认知水平和生产实践能力有待提高，书中难免有不少纰漏之处，恳请读者批评指正。

本书得到地质调查项目经费支持。另外，《地质钻探复杂地层冲洗液对策及应用案例》一书作为本书的姊妹书也已完稿，有望同本书一并奉献给大家。

编者

2015年7月20日

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 冲洗液的功能	(1)
第二节 冲洗液类型及组成	(2)
第三节 冲洗液技术的发展	(6)
第二章 冲洗液的性能及其测试方法	(8)
第一节 冲洗液密度	(8)
第二节 冲洗液的流变性	(9)
第三节 冲洗液的滤失与造壁性	(18)
第四节 冲洗液 pH 值	(23)
第五节 冲洗液固相含量与含砂量	(24)
第六节 冲洗液的抑制性	(26)
第七节 冲洗液的润滑性	(29)
第三章 冲洗液基础材料与处理剂	(32)
第一节 造浆材料	(32)
第二节 加重材料	(34)
第三节 无机处理剂	(35)
第四节 降滤失剂	(37)
第五节 降黏剂	(40)
第六节 增黏剂	(41)
第七节 抑制剂	(42)
第八节 絮凝剂	(44)
第九节 润滑剂	(44)
第十节 发泡剂与消泡剂	(45)
第四章 常用冲洗液及其适用范围	(46)
第一节 无固相冲洗液	(46)
第二节 分散冲洗液	(47)
第三节 不分散低固相聚合物冲洗液	(48)
第四节 盐水冲洗液	(49)
第五节 可循环微泡沫冲洗液	(51)
第六节 油基冲洗液	(52)
第五章 冲洗液现场配制与维护	(55)
第一节 循环系统	(55)

第二节	现场配浆、维护的基本计算	(56)
第三节	现场冲洗液配制	(58)
第四节	冲洗液性能参数调整	(60)
第五节	冲洗液污染物及其处理方法	(62)
第六节	特殊地层冲洗液处理	(64)
第七节	现场冲洗液体系转换	(65)
第六章	冲洗液的固相控制	(67)
第一节	概述	(67)
第二节	固相控制方法	(70)
第三节	地质钻探常用固控设备及其使用	(72)
第七章	孔壁不稳定地层冲洗液对策	(82)
第一节	孔壁不稳定现象	(82)
第二节	孔壁失稳的原因	(83)
第三节	压力异常地层冲洗液对策	(87)
第四节	松散地层冲洗液对策	(88)
第五节	破碎地层冲洗液对策	(89)
第六节	水敏性地层冲洗液对策	(91)
第七节	溶蚀性(水溶性)地层冲洗液对策	(93)
第八章	钻孔堵漏	(96)
第一节	漏失机理及漏失特性	(96)
第二节	常用堵漏材料	(99)
第三节	平衡地层压力止漏	(101)
第四节	静止堵漏	(101)
第五节	随钻堵漏	(102)
第六节	高失水堵漏	(103)
第七节	桥塞堵漏	(103)
第八节	化学堵漏	(104)
第九节	水泥堵漏	(104)
第十节	复合堵漏	(106)
第九章	绳索取心钻探冲洗液技术	(107)
第一节	绳索取心钻进面临的技术难题	(107)
第二节	绳索取心钻杆内壁结泥皮机理与防治	(108)
第三节	绳索取心钻进的环空压力	(114)
第四节	绳索取心钻进孔壁稳定	(119)
第十章	冲洗液对卡钻事故的预防	(124)
第一节	冲洗液对黏附卡钻的预防	(124)
第二节	冲洗液对坍塌、掉块卡钻的预防	(126)
第三节	冲洗液对缩径卡钻的预防	(128)
第四节	冲洗液对泥包卡钻的预防	(129)

第五节	冲洗液对沉砂卡钻和砂桥卡钻的预防	(130)
第十一章	冲洗液技术现状	(132)
第一节	新型泥浆材料与泥浆处理剂研究	(132)
第二节	油气钻探冲洗液体系及其应用	(136)
第三节	地质钻探冲洗液体系及其应用	(139)
第四节	废弃冲洗液处理	(141)
第十二章	冲洗液体系设计	(143)
第一节	冲洗液设计的意义	(143)
第二节	冲洗液设计需要考虑的因素	(144)
第三节	冲洗液设计步骤	(145)
第四节	冲洗液设计书编写参考提纲	(148)
参考文献及资料		(150)
附表 1	不同直径圆柱体每千米体积列表	(152)
附表 2	将 1 m^3 冲洗液稀释到一定密度所需的加水量	(154)
附表 3	加重 1 m^3 冲洗液所需重晶石用量	(155)
附表 4	不同排量、不同钻具级配下冲洗液环空返速对照表	(156)

第一章 概述

冲洗液被喻为钻探工程的血液，与钻孔安全、工艺方法等密切相关，直接影响钻孔成孔、钻探效率、钻探成本和取心质量。本章主要介绍冲洗液的功能、冲洗液类型及组成、冲洗液技术的发展及其在其他领域的应用。

第一节 冲洗液的功能

一、冲洗液的定义

冲洗液是钻探过程中以其多种功能满足钻探工作需要的各种循环流体的总称。冲洗液又称钻井液或洗井液，由于基础材料是膨润土，故俗称泥浆。

二、冲洗液的循环

冲洗液功能通过冲洗液循环来实现，冲洗液循环靠泥浆泵来维持。冲洗液循环分正循环和反循环，目前主要以正循环为主，其循环过程见图 1-1。

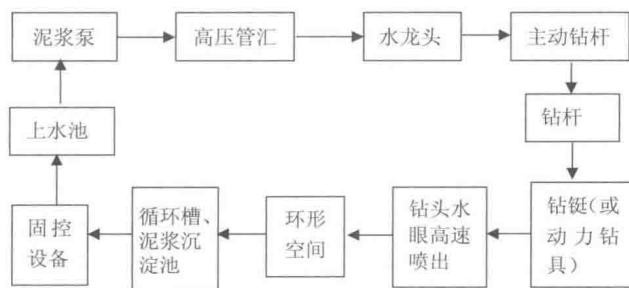


图 1-1 冲洗液正循环示意图

三、冲洗液的功能

1) 携带并悬浮岩屑。冲洗液通过其自身的循环，将孔底岩屑携至地面，保持孔内清洁；在接单根、起下钻或因设备故障及事故等原因停止循环时，孔内冲洗液能悬浮岩屑，避免岩屑下沉，导致下钻不到底或沉砂卡钻等现象发生。

2) 冷却钻头、钻具。钻头高速旋转破碎岩石过程中，会产生大量热量，若没有冲洗液冷却，会导致烧钻现象发生；钻具不断与孔壁摩擦也会产生热量。通过冲洗液不断循环，不断吸收这些热量，然后带到地面释放到大气中，从而冷却了钻头和钻具，延长其使用寿命。

3) 稳定孔壁。孔壁稳定、井眼规则是实现安全、优质、快速钻进的基本条件，冲洗液对孔壁的稳定作用体现在：①保护孔壁。性能良好的冲洗液具有良好的造壁能力，能在

孔壁形成薄而韧的泥皮，封堵孔隙或裂缝，胶结松散破碎地层；阻止液相侵入地层，减弱泥页岩水化膨胀和分散的程度。②平衡地层压力。钻进过程中，通过调节冲洗液的密度，使孔内液柱压力能够平衡地层压力，防止孔壁坍塌、涌水（气）、压裂（或压漏）地层等孔内复杂情况的发生。

4) 冲洗孔底。冲洗液在钻头水口（或喷嘴）处以极高的速度冲洗孔底，使钻头在孔底始终接触和破碎新地层，避免重复破碎，保证安全、快速钻进。

5) 润滑钻具。由于冲洗液的存在，钻头、钻具均在液体内旋转，特别是润滑性能优良的冲洗液，将大大降低钻具的摩擦阻力。

6) 传递水动力。冲洗液在钻头喷嘴处以较高的速度冲刷孔底，对于一些较软地层，可以提高碎岩效率；使用螺杆马达、潜孔锤和涡轮钻具钻进时，冲洗液将泵的液动力传递给孔底马达，带动钻具、钻头旋转。

7) 保护储层和岩矿心。性能良好的冲洗液可以有效防止和减少对储层的损害；保护岩心，提高岩心采取率。

另外，冲洗液还有传递测井信息、判断地层、输送深部地下流体至地表等功能。

第二节 冲洗液类型及组成

一、冲洗液类型

冲洗液的分类方法通常有如下几种：

1) 按密度可分为：非加重冲洗液和加重冲洗液，或低密度冲洗液、中密度冲洗液和高密度冲洗液。

2) 按固相含量可分为：无固相冲洗液、低固相冲洗液、高固相冲洗液。

3) 按耐温可分为：超低温冲洗液、低温冲洗液、高温冲洗液。

4) 按膨润土的分散程度可分为：细分散冲洗液、粗分散冲洗液及非分散冲洗液等。

5) 按相态与体系组成可分为：水基冲洗液、油基冲洗液、合成基冲洗液、含气循环介质及气体。其分类见图 1-2。

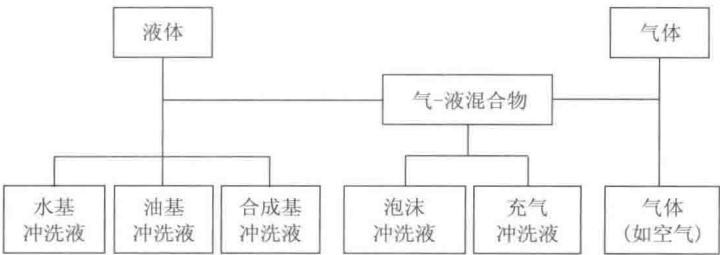


图 1-2 冲洗液分类

不同类型的冲洗液按其特点和组成的不同，可进一步可划分为若干种类，详见图 1-3。各种冲洗液简要介绍如下：

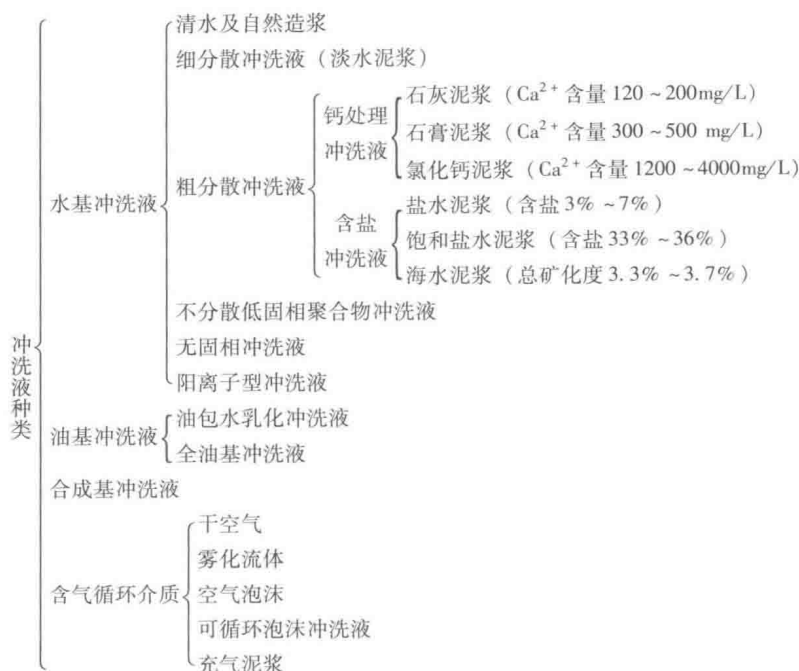


图 1-3 冲洗液类型

（一）清水及自然造浆

指采用清水作为冲洗液，用于完整、稳定、非水敏性地层钻进；当钻进第三系（古、新近系）、第四系以黏土为主的地层时，破碎后的岩屑与清水冲洗液混合并分散成的浆液称为自然造浆，其特点是成本低。

（二）细分散冲洗液

在淡水中加入黏土粉及纯碱（或烧碱），视情况再加入丹宁、栲胶、CMC 等分散剂和降滤失剂，力求使造浆黏土高度分散，使体系成为胶体状态，并保持其稳定性。

1. 细分散冲洗液优点

- 1) 黏性强，胶结性好，并在孔壁形成致密泥皮，有利于松散及破碎地层孔壁稳定。
- 2) 悬浮性好，可容纳较多固相，适于配制高密度冲洗液。
- 3) 适合配制高温冲洗液。
- 4) 配制简单，成本低。

2. 细分散冲洗液缺点

- 1) 抑制性差，不能有效控制泥页岩地层吸水膨胀和岩屑分散造浆。
- 2) 抗污染能力差。
- 3) 固相含量高，且固相不易控制，影响机械钻速。

（三）粗分散冲洗液

泥浆中加入钙、钠、钾等无机盐类絮凝剂，使泥浆中分散的颗粒变粗，同时加入有机

处理剂护胶和包被岩屑，形成适度絮凝的粗分散冲洗液。

1. 粗分散冲洗液优点

1) 粗分散冲洗液因其矿化度高和过量的 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 等离子，可有效抑制泥页岩水化膨胀与分散，有利于水敏性地层孔壁稳定和流变性控制。

2) 当无机盐含量达到饱和时，可有效抑制水溶性地层溶解，保持水溶性地层孔壁稳定和盐矿心采取率。

3) 随着盐含量的增加，冲洗液密度不断提高，使冲洗液在较低固相含量条件下具有较高的冲洗液密度，有利于复杂地层条件下的绳索取心钻进。

4) 适用于大段泥页岩地层、厚盐岩层、石膏层及其他可溶性盐类地层钻进。

2. 常用粗分散冲洗液

1) 钾石灰冲洗液。处理剂有氢氧化钾、石灰、聚合物和沥青类防塌剂等。

2) 石膏冲洗液。处理剂有石膏、磺化褐煤、磺化酚醛树脂、磺化栲胶和铁铬盐等。

3) KCl 冲洗液。处理剂有氯化钾、降黏剂、降滤失剂和沥青类防塌剂等。

4) 盐水冲洗液。处理剂有 NaCl、降黏剂、降滤失剂和抑制剂等。

5) 饱和盐水冲洗液。处理剂基本与盐水冲洗液相同。

6) 海水冲洗液。主要是在海洋和近海钻进时采用海水配浆。先用少量淡水与膨润土配成基浆后，再加入海水和相应的泥浆处理剂。

(四) 聚合物冲洗液

以聚合物为主处理剂的冲洗液称为聚合物冲洗液。聚合物冲洗液中使用较多的是不分散低固相聚合物冲洗液，该冲洗液以具有选择性絮凝和包被作用的高分子聚合物（如部分水解聚丙烯酰胺 PHP）等为主要处理剂。具有选择性絮凝作用的高分子聚合物能够保留泥浆中优质造浆黏土，只絮凝劣质黏土和钻屑，使钻屑和劣质土不分散，以便在地表将其沉降清除，保持冲洗液的低固相和优良的剪切稀释特性。

1. 不分散低固相聚合物冲洗液优点

1) 抑制性强，能有效抑制水敏性地层的膨胀与分散，有利于水敏性地层孔壁的稳定。

2) 具有良好的絮凝作用，有利于地表固相清除。

3) 剪切稀释作用强、固相含量低，有利于提高机械钻速。

2. 常用不分散低固相聚合物冲洗液

目前，低固相聚合物冲洗液中的高分子聚合物主要以阴离子型聚合物为主，因此使用的体系也多为阴离子体系。常见的阴离子体系如下：

1) 一般聚合物冲洗液。由水、优质膨润土、高分子聚合物、降滤失剂及防塌剂等组成，用于一般水敏性地层钻进。

2) 钾基聚合物冲洗液。以高分子聚合物和氯化钾（KCl）为主要泥浆处理剂的聚合物冲洗液，用于强水敏性地层钻进，特别是含有蒙脱石的水敏性地层钻进。

(五) 无固相冲洗液

或称无黏土冲洗液，是指在清水中不加黏土仅加处理剂的冲洗液。要求把钻屑带到地面并全部清除，始终保持入孔冲洗液无固相，以利于提高钻速，防塌减阻，保护储层。根

据所使用的材料不同，目前常用的无固相冲洗液有如下三种：

1) 润滑冲洗液。在清水中加入表面活性剂或润滑剂，降低表面张力，并在孔壁与钻具之间形成一层油膜，降低摩擦阻力，实现快速钻进。

2) 聚合物无固相冲洗液。以水解聚丙烯酰胺（如 PHP）或其他高分子聚合物（如 80A51、聚丙烯酸钾等）为主要处理剂配制的无固相冲洗液。此种冲洗液剪切稀释作用强，摩阻系数低，配制与维护方便，成本低。

3) 植物胶无固相冲洗液。以植物胶为主要处理剂配制的无固相冲洗液。所采用的植物胶有魔芋胶、田菁胶、瓜尔胶及其改性产品等。此种冲洗液携带与悬浮能力强；对孔壁冲刷作用小；无毒，能自然降解，有利于环境保护。

（六）油基冲洗液

以油（如原油、柴油或白油等）为主要循环介质，辅以有机土、氧化沥青、乳化剂等材料配制的冲洗液。此种冲洗液润滑性、抑制性及热稳定性好，特别适合钻大斜度钻孔、水平孔、超高温地层、水化严重的泥页岩地层及高溶蚀性地层。但成本高，也不利于环境保护。

油基冲洗液的一般组成：油（原油、柴油或白油等）70% ~ 100%、盐水（含 NaCl 或 CaCl_2 等）0 ~ 30%、乳化剂（一种或多种）3% ~ 6% 及增黏剂（如有机土、天然沥青）、降滤失剂（如氧化沥青）等。

（七）合成基冲洗液

合成基冲洗液的基液是人工合成的有机化合物，完全不与水相混溶，故也称之为“假油基”、惰性及非水质冲洗液。合成物不含芳香族化合物，对大多数生物相对无毒，可被生物降解，有望成为油基冲洗液的替代品。它既具有油基冲洗液的优良性能，又具有水基冲洗液污染小的优点。与油基冲洗液相比，其钻屑可就地排放，环境污染程度低，且气体溶解度小，气测灵敏，利于井控；与水基冲洗液相比，其钻速高，孔壁稳定，润滑性强，井眼净化效果好，且钻屑完整。尽管合成基冲洗液有明显的性能优势，但其价格远高于水基和油基两种冲洗液，目前仅用于少数海上钻探。

（八）含气循环介质

主要用于低压易漏地层、强水敏地层、严重缺水地区和水井的钻进施工中。常见类型如下：

1) 干空气。单一的空气作冲洗介质，岩屑呈粉尘状随上升气流排至地表。

2) 雾化流体。由气体和液体按一定比例组成，具有雾化形态。其水雾的气水比为 2000 ~ 3000 : 1；泥浆雾的气液比为 2000 : 1。

3) 空气泡沫。由气体、液体和少量发泡剂组成，具有连续稳定泡沫形态，其气液比一般为 100 ~ 300 : 1。

4) 充气泥浆。为了降低冲洗液密度，将气体（一般为空气）均匀地分散在冲洗液中便形成充气泥浆。混入的气体越多，冲洗液密度越低。

5) 可循环泡沫冲洗液。是近年来国内外推出的一种新型低密度冲洗液，由水、膨润土、发泡剂、稳泡剂等组成。此冲洗液克服了普通泡沫冲洗液因含气量大而导致普通泥浆泵无法泵送的难题，并具有良好的携岩能力和护壁性能。

二、冲洗液组成

冲洗液由循环介质（连续相）、造浆材料及各种泥浆处理剂等组成。循环介质不同，冲洗液组成不同。如：

水基冲洗液由水（或盐水）、膨润土、各种泥浆处理剂及加重材料组成。

油基冲洗液由油（如柴油、白油等）、水（或盐水）、乳化剂、润湿剂、亲油处理剂及加重材料等组成。

泡沫冲洗液由气体、水、泡沫剂及稳泡剂等组成。

第三节 冲洗液技术的发展

一、冲洗液技术发展

我国冲洗液技术自 20 世纪 70 年代以后，取得了显著的进步，表现在：

1) 冲洗液类型从水基到气态、油基均取得显著进步。水基冲洗液经历了从自然造浆—劣质土高固相泥浆发展到低固相、无固相以及细分散、粗分散、不分散等多种冲洗液体系。

2) 造浆黏土，从就地取材—低品级膨润土—优质钙膨润土发展到人工钠膨润土、抗盐土、有机土和增效土。

3) 冲洗液材料，从无机材料、就近代用品，发展到专门研发有机、无机、高分子聚合物、复配与复合处理剂；工业化流程生产；品种齐全，厂家众多，实现了剂量化、系列化、标准化，全国已形成庞大的产业体系。

4) 发展多种堵漏材料和堵漏方法，使堵漏工艺更加科学合理，堵漏效果显著提高。堵漏材料从一般惰性材料（如锯末、核桃壳、棉籽壳、贝壳、石棉粉等），发展到针对不同漏失层而开发的随钻堵漏材料、高失水堵漏材料、膨胀堵漏材料、凝胶堵漏材料及化学固结材料等；堵漏方法也从简单的架桥堵漏，发展到高失水堵漏、延迟膨胀堵漏、凝胶堵漏、水泥堵漏、化学触变堵漏等，使堵漏技术在理论、材料研究、工艺方法上都取得了较大的进步。

5) 泥浆仪器及设备更新换代，全面采用国际通行的 API 标准。研发了大量新型泥浆性能测试仪器并全面推广应用，如泥浆仪器从手动—自动—智能化、从低温到高温、从简单参数测定到大量参数模拟等；研制了系列冲洗液固相控制设备，从振动筛—除砂器—除泥器—离心机。

6) 冲洗液理论研究进展迅速，丰富和发展了冲洗液流变学、孔壁稳定理论、压力平衡钻进技术以及储层保护等理论，依此指导生产实践，并在生产实践中发挥了重要的作用。

二、冲洗液技术进步对钻探工作的贡献

1) 有效地保持钻孔稳定，保障钻探施工正常进行。提高效率，降低成本，减少事故，保证质量。

2) 推广润滑剂和低固相不分散泥浆，是金刚石小口径钻探和绳索取心钻探成功推广

的重要保证。冲洗液技术的进步，对绳索取心技术在深孔及复杂地层中的应用发挥了重要的作用。

3) 优质冲洗液保证了孔底动力钻具（如潜孔锤、螺杆钻等）作用的发挥，有利于动力钻具使用寿命和钻进效率的提高。

4) 提高了一些特殊矿种的钻探质量和勘探效果。

三、冲洗液在其他领域的应用

冲洗液不但用于钻探领域，目前也广泛应用于基础施工领域。非开挖管道施工，如天然气管道、电缆、下水管道等的铺设（特别是穿越建筑物、河流、公路及铁路等），这种施工类似于水平井施工，冲洗液同样起到护壁、润滑、携带岩屑的作用。地下连续墙、基础桩施工，所使用的浆液称为稳定液，其主要作用是护壁和悬浮渣土。

第二章 冲洗液的性能及其测试方法

第一节 冲洗液密度

冲洗液密度是确保安全、快速钻进和保护储层的一个十分重要的参数。

一、密度的定义及意义

冲洗液密度是指单位体积冲洗液的质量，单位为克/厘米³（g/cm³）、千克/升（kg/L）或吨/米³（t/m³）。

冲洗液密度的意义：通过冲洗液密度调整，可调节钻孔内冲洗液液柱的质量，从而调节冲洗液对孔壁的支撑力（或侧压力）。如1 m³密度为1.03 g/cm³的冲洗液质量为1.03 t（1030 kg），而1 m³密度为1.5 g/cm³的冲洗液质量为1.5 t（即1500 kg），冲洗液密度提高，孔内冲洗液液柱质量也提高，冲洗液对孔壁的支撑力（或对孔壁的压力）也随之增大。钻探施工中，为平衡地层压力，防止地层涌水与漏失，通常要求冲洗液密度值与地层压力值接近。

二、冲洗液密度的作用

施工过程中，通过调节冲洗液密度大小，可达到以下目的：

1) 平衡地层孔隙压力，防止地层涌、漏。钻探施工中，如地层孔隙压力大于孔内冲洗液的液柱压力，将会出现涌水、涌气等现象；如地层孔隙压力小于孔内冲洗液的液柱压力，将会出现漏失现象。为防止地层涌、漏，需将冲洗液密度调节到与地层孔隙压力大致相等。

2) 平衡地层构造应力，实现稳定孔壁。

由于地壳构造运动，地层中往往有地应力存在。地层被钻开后，若地应力（或坍塌压力）大于孔内冲洗液的液柱压力，孔壁会发生缩径、坍塌及掉块等不稳定现象。在此情况下，只有提高冲洗液密度，即提高孔内冲洗液液柱对孔壁的支撑力，才能实现孔壁稳定。

另外，可通过冲洗液密度大小，快速估算出非加重冲洗液的固相含量（质量体积比），其经验公式见式（2-1）：

$$\text{固相含量}(\%) = (\rho_m - 1) \times 2 \times 100\% \quad (2-1)$$

式中： ρ_m 为冲洗液密度，g/cm³。

三、密度对钻探施工的影响

1) 冲洗液密度高，冲洗液固相含量及冲洗液黏度也随之升高，过高的冲洗液密度会

导致：①环空压力大，钻杆内壁结泥皮，不利于绳索取心钻进；②压裂或压漏地层，导致冲洗液漏失；③机械钻速低；④泥皮厚，摩擦阻力大；⑤不利于油、气、水等储层保护；⑥泥浆成本高。

2) 冲洗液密度过低：①易发生涌水、涌气，甚至发生井喷；②孔壁易失稳，如钻孔缩径、孔壁坍塌和掉块等。

四、密度的测定

1. 仪器

1) 冲洗液密度计：可以使用任何保证测试精度小于 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ (10kg/m^3) 的仪器。

2) 温度计：量程 $0 \sim 105^\circ\text{C}$ ，分度值 1°C 。

2. 操作步骤

1) 将密度计底座放置在水平面上。

2) 校正仪器时，将清水注入洁净的样杯中并注满。

3) 盖好杯盖，使多余的清水从杯盖溢流孔中溢出，并擦干样杯外部的水分。

4) 把密度计的刀口放在底座的刀架上，移动游码，当游码内侧对准密度 1.00 的刻度线时，秤杆应呈水平状态即水平泡居中，否则应旋开秤杆末端校正筒上盖，按需加减铅块使其平衡。

5) 用量杯量取冲洗液，测量并记录待测冲洗液温度，将其充分搅拌后，注满干燥、洁净的样杯中。

6) 盖上杯盖，慢慢旋转杯盖，使其多余的冲洗液从杯盖上的溢流孔溢出。

7) 用手指压住溢流孔，用清水冲洗并擦干样杯外部。

8) 把密度计的刀口慢慢放在底座的刀架上，移动游码，直到平衡（水平泡位于中央）。

9) 在游动砝码的左端边缘，读取冲洗液的密度值，精确到 0.01 。

10) 记录读数及相应单位。

第二节 冲洗液的流变性

由于冲洗液的流变性与携带岩粉、孔壁稳定、机械钻速和环空水力参数计算等一系列钻探工作密切相关，因此它是冲洗液最重要的性能之一。

一、基本概念

1. 冲洗液流变学定义

同其他流体一样，要对冲洗液的水力学行为进行研究，也必须搞清楚其基础力学性质，即在一定的外力作用下，流体是怎样发生变形和运动的。流体的这一应力与应变的关系，称为流变行为，而研究流变行为的科学，称为流变学。不同流体，可能具有不同的流变行为，因而通过理论分析和实验，可以得出不同的数学表达式，即所谓流变模式或本构方程；实验仪器为黏度计或流变仪，如六速旋转黏度计、毛细管黏度计、高温高压流变仪等。

2. 剪切速率和剪切应力

(1) 剪切速率

剪切速率是流体中两部分之间的速度差除以它们之间的距离（以水在河床中流动速度变化为例，见图 2-1），又称速度梯度，简称剪率 γ ，用 $\gamma = dv/dx$ 表示，单位为 s^{-1} 。

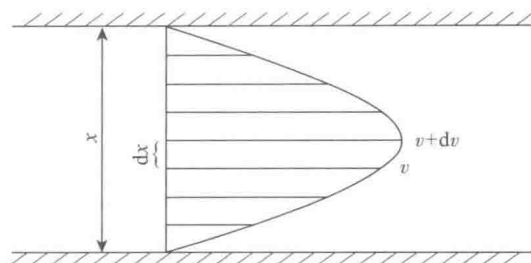


图 2-1 水在河流的流速分布

应用到旋转黏度计，转速 ω 相当于剪切速率 γ ，它们之间的关系见式 (2-2)：

$$\gamma = 1.703\omega \quad (s^{-1}) \quad (2-2)$$

式中 ω 为旋转黏度计转速， r/min 。

应用到钻探现场，冲洗液循环过程中，不同部位流速不同，所表现出来的剪切速率也不同。流速越大，剪切速率越高，反之则越低。

1) 钻杆内管壁处的剪切速率可表达为平均流速与钻杆直径的关系式，见式 (2-3)：

$$\gamma_w = \frac{8v}{D} \quad (2-3)$$

式中： $v = \frac{4Q}{\pi D^2}$ ； Q 为泵排量； D 为钻杆内径。

2) 环空间隙中孔壁处的剪切速率为：

$$\gamma_w = \frac{12v}{D_H - D_P} \quad (2-4)$$

式中： $v = \frac{4Q}{\pi (D_H^2 - D_P^2)}$ ； Q 为泵排量； D_H 为钻孔直径； D_P 为钻杆外径。

3) 冲洗液在沉淀池中的流动速度最低，剪切速率也最低；在钻头水口处流速最高，此处的剪切速率也最高。

(2) 剪切应力

剪切应力是维持一定的液体流动所需单位面积上的力。剪切应力的公式为：

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2-5)$$

式中： F 为作用在流体上的力； A 为作用面积。

对于旋转黏度计，表盘读数 θ 相当于剪切应力 τ 。考虑仪器系数，其关系为：

$$\tau = 0.511\theta \quad (Pa) \quad (2-6)$$

在直径（内径）为 D 的钻杆内，推动液柱在钻杆内流动所需要的力 F ，可以表示为