

“十二五”国家重点出版物出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目

钻井液与 岩土工程浆材

Drilling Fluid and Geotechnical Slurry Material

乌效鸣 蔡记华 胡郁乐 编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

“十二五”国家重点出版物出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目

钻井液与岩土工程浆材

Drilling Fluid and Geotechnical Slurry Material

乌效鸣 蔡记华 胡郁乐 编著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

国家出版基金项目
国家自然科学基金资助项目

图书在版编目(CIP)数据

钻井液与岩土工程浆材/乌效鸣,蔡记华,胡郁乐编著. —武汉:中国地质大学出版社,2014.7
ISBN 978-7-5625-2459-5

- I. ①钻…
II. ①乌…②蔡…③胡…
III. ①钻井液②建筑工程-灌浆加固
IV. ①TE254②TU753.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 206729 号

著者 乌效鸣 蔡记华 胡郁乐

钻井液与岩土工程浆材

乌效鸣 蔡记华 胡郁乐 编著

责任编辑:徐润英

责任校对:戴莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:530千字 印张:20.75

版次:2014年7月第1版

印次:2014年7月第1次印刷

印刷:荆州鸿盛印务有限公司

印数:1—3 000册

ISBN 978-7-5625-2459-5

定价:52.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

本世纪以来,深部取心科学钻探、复杂地层钻孔安全、油气井储层有效保护、煤层气/可燃冰/页岩气钻采、水平及多分支井高精度控制、非开挖定向钻铺管规避风险、地基处理与基础工程新工法应用等对钻井液和工程浆材的技术提出了更高的要求,需要更加重视理论与实践相结合。近年来,在工程浆液的分析选型、材料配方、设计计算、机具配套等方面均取得了较多的新成果和好经验。吸纳新技术,不断完善钻井液与岩土工程浆材学科体系,是本书编著的初衷之一。

在内容组成和章节安排上,我们力图在读书效果上形成既便于掌握理论又能密切联系实际的特点。乌效鸣对全书拟定构架,并编写第一章、第三章和第四章;蔡记华编写第二章、第五章和第八章;胡郁乐编写第六章、第七章和第九章。另外,约有20余名研究生参与了本书的支撑实验、野外调研、信息查询、推导计算和绘图校对等工作。

由于编著者的水平有限,书中难免会有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

编著者

2013年8月

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 钻井液的使用范畴与功用	(1)
第二节 钻井液的分类与循环方式	(4)
第三节 地下固结浆材的应用领域	(6)
第四节 钻井液及岩土工程浆材简史	(7)
第二章 钻井液性能与处理剂	(13)
第一节 粘土矿物晶体构造、电性与造浆粘土选用	(13)
第二节 粘土水化分散与钻井液体系稳定原理	(23)
第三节 钻井液的密度、固相含量和含砂量	(29)
第四节 钻井液的流变性	(32)
第五节 钻井液的滤失性能	(50)
第六节 钻井液的润滑性能	(56)
第七节 钻井液处理剂	(59)
第三章 钻井液配方设计	(75)
第一节 钻井液配方设计概要	(75)
第二节 钻井泥浆的分类及定名	(76)
第三节 松散与水敏地层泥浆	(80)
第四节 高压与涌水层加重钻井液	(89)
第五节 无粘土钻井液	(93)
第六节 漏失地层随钻堵漏泥浆	(102)
第七节 抗高(低)温钻井液	(106)
第四章 钻井液应用分析与计算	(116)
第一节 钻井液现场设施和配制及监控	(116)
第二节 钻井液循环泵量设计与调控	(120)
第三节 循环压力分析与减阻措施	(126)
第四节 悬排钻渣能力分析	(133)
第五节 钻井液的除砂固控	(141)

第六节	润滑、冷却、冲蚀与泥包结垢问题	(147)
第七节	井底液力作用	(153)
第五章	气体型钻井循环介质	(158)
第一节	气体型钻井循环介质的基本特征	(158)
第二节	空气和雾钻井	(159)
第三节	钻井泡沫	(161)
第四节	充气钻井液	(170)
第五节	可循环微泡沫钻井液	(174)
第六章	护壁堵漏与固井	(178)
第一节	井眼-地层压力与井壁稳定	(178)
第二节	复杂地层与机理分析	(184)
第三节	钻井水泥和水泥外加剂	(190)
第四节	护壁与堵漏	(204)
第五节	钻孔灌浆和固井水泥浆	(217)
第七章	化学灌注浆材	(230)
第一节	水玻璃浆液	(232)
第二节	聚氨酯类材料	(235)
第三节	环氧树脂注浆材料	(241)
第四节	脲醛树脂类注浆材料	(244)
第五节	丙烯酸盐类注浆材料	(246)
第六节	其他化学注浆材料	(249)
第七节	双液注浆工艺及材料	(251)
第八章	完井液与压裂液	(256)
第一节	保护油气层技术概论	(256)
第二节	保护油气层的钻井液类型及其应用	(262)
第三节	压裂液	(277)
第九章	基础工程浆液	(280)
第一节	成桩和成槽稳定液	(280)
第二节	地下浇筑混凝土	(288)
第三节	岩土加固静压注浆液	(301)
第四节	高压喷射作业浆液	(318)
参考文献		(324)

第一章 概述

第一节 钻井液的使用范畴与功用

钻井液是钻进过程中所必需的工作流体。钻井液技术是钻探工程的主要技术之一,有时甚至是保障钻探工程最为关键的技术环节。可以说,各种地下钻进工作都离不开钻井液,所以钻井液的使用范畴非常广泛,包括地矿勘查钻探、石油天然气钻井、地下水和地热探采、工程地质勘察、基础工程施工以及非开挖铺管等,涉及国民经济建设中的冶金、有色、煤炭、非金属、化工、核工业、建材、石油、气藏能源、地下水、地热、建筑基础、道路桥梁、管道建设、地质灾害防治、地球科学等众多领域。钻井液在某些场合也有其他称呼,如在岩心钻探中常被称做“冲洗液”,在基础工程施工中又称为“稳定液”,而在油气井钻开储层时则称为“完井液”。

作为钻井液的紧密同属,压裂液在石油、天然气、煤层气、地下水、地热等流体资源以及盐、石膏、天然碱、芒硝等可溶性矿种的钻采中经常用到。在钻井完成后,向井底注入专门的高压液体,压开地下产层,并形成较大尺寸的裂缝,是增加地下流体资源和可溶性矿种产量的重要手段。

钻井液在钻进过程中所体现的基本功用是悬排钻渣、保护井壁、冷却钻头和润滑钻具。这四个方面的功用是绝大多数钻井工作所不可缺少的基本需求。

1. 悬排钻渣

悬排钻渣(图 1-1)是将钻头破碎下来的钻渣及时排出井眼,是维系持续钻进的基本要求。在井内流动的钻井液可以将钻屑有效地冲离井底并悬携至地面。这样才能保持井底洁净,钻头才能够不断地接触刻磨底部新露岩石,实现连续进尺;同时也避免了钻屑在井眼中的聚塞和阻卡。如果没有钻井液悬排钻渣,大概连续钻进 1m 都困难。

2. 保护井壁

钻井液保护井壁主要由两种不同的作用机理体现。一是压力平衡稳定井眼,二是粘性粘结联牢井壁。钻孔成眼后,其裸露井壁上所受的作用力可能打破原有的力学平衡。而钻井液的压强对井壁产生的作用力可以维系到或接近于原有地层压力,从而避免或减轻井壁的受力失衡,防止井壁失稳破坏(图 1-2)。对于高压地层,加大钻井液密度,使之与地层较高压力相抵,抑制井眼缩径和井涌;反之对于低压地层,则配制低密度钻井液,减轻对地层的压力,防止胀裂井壁和漏失钻井液。这就是钻井液压力平衡稳定井眼的原理。

对于松散破碎地层,钻井液的粘性可以有效地粘结井壁散粒和散块,从而预防井壁的散落和坍塌。虽然钻井液作为衡流体,达不到固化凝结井壁散体的程度,但其可观的粘性对散粒体之间的粘附联接却能起到明显的稳定井壁的作用。

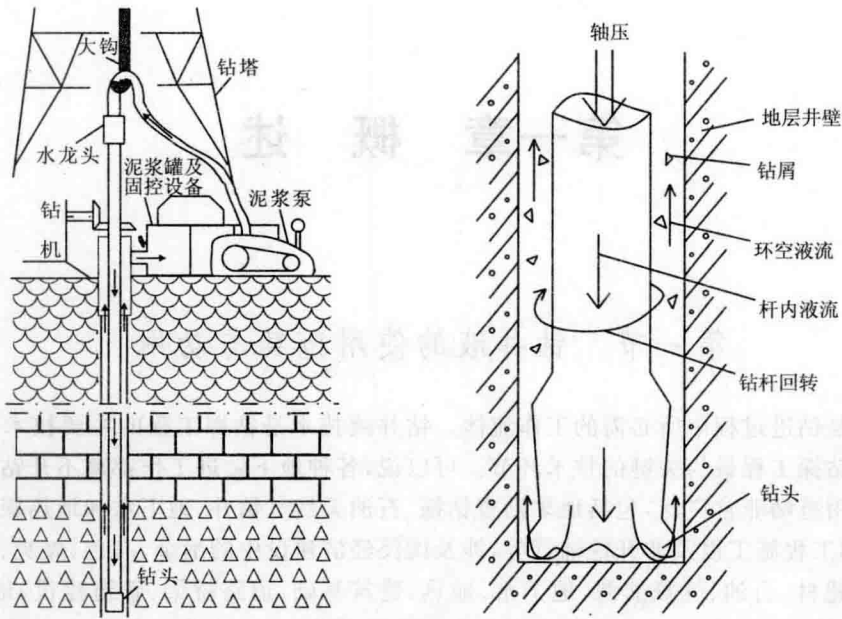


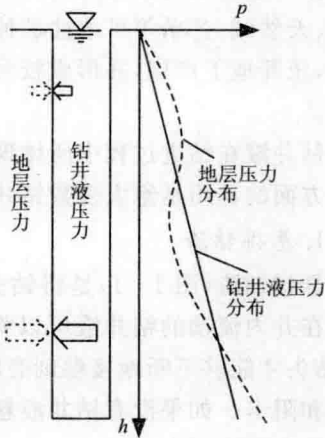
图 1-1 钻井液悬排钻渣示意图

3. 冷却钻头

我们审视井底钻头部位:几百千克以上的轴压施加在钻头上,以每分钟上百转的转速回转碎岩。这所产生的摩擦力是相当大的,摩擦生热的程度必然很高。如果没有钻井液的冷却作用,一分钟不到就会发生烧钻。所以,必须通过钻井液不断地流经钻头部位,将这些热量及时带走。

4. 润滑钻具

钻井液通过润滑作用减小钻具与井壁之间的摩擦。这种润滑作用的好处突出表现在减小了钻杆回转时的摩擦和损伤,由此可以延长钻杆的使用寿命,减少断钻杆的事故率。其次是润滑直接降低回转扭矩,节约动力消耗,图 1-2 钻井液平衡地层压力稳定井壁降低设备负荷。尤其在深井、弯曲井条件下,润滑性不好会使有害的长程摩擦扭矩比井底钻头碎岩所需的有功扭矩大几十倍甚至更多。另外,钻井液润滑性好还能降低岩块楔卡在钻杆和井壁之间的摩擦力,有助于减少卡钻事故;在下套管和非开挖铺管时能显著减小阻力。进一步的研究还表明,润滑性好有助于降低钻井液流动的摩擦阻。



在一些特定场合下,钻井液还有多种不同的特殊功用,如驱动井底动力机、喷射碎岩、输送岩心岩样、传递井底信号等。

(1)现代钻井技术越来越多地用到井底动力机(图 1-3),如螺杆马达、液动(或气动)潜孔锤、涡轮钻具。这些井底动力机均是依靠流动的钻井液作为动力驱动介质。

(2)在软岩和中等硬度岩层钻进中,利用钻井液在井底的喷射力来辅助破碎岩石,是一些

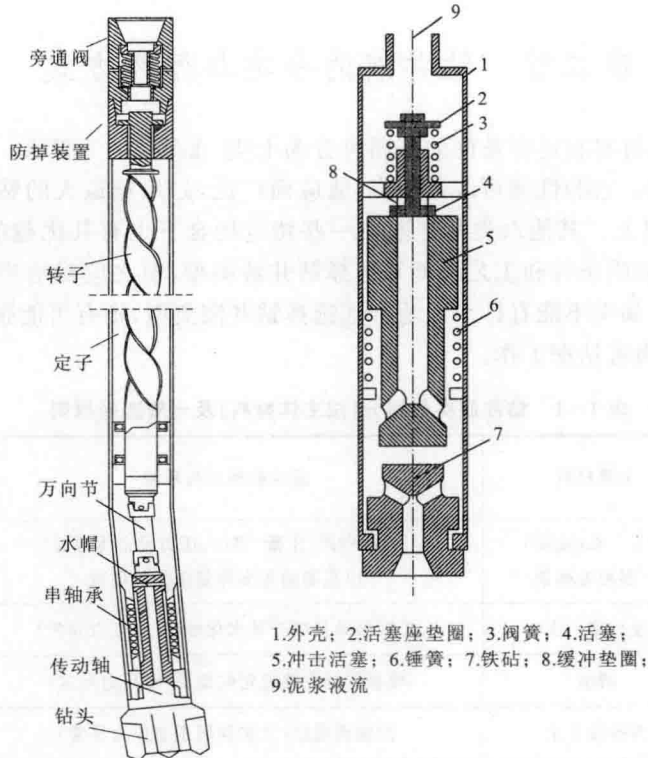


图 1-3 用钻井液驱动的螺杆钻具(左)和潜孔锤(右)示意图

钻井工程中常采用的加快钻进速度的技术措施。

(3) 钻井液携带至地面的岩屑、油、气、水等信息,可以显示井下地层含储情况,称之为“钻井液录井”或“岩屑录井”。反循环连续取岩心、取岩样则靠钻井液的液压力或液动力把岩心或岩样从孔底经钻杆内输送到地表(图 1-4)。这是全新的钻探取心方法,与传统方法相比,大大减少了岩心在井底长久磨蚀的程度,省却了提、捞岩心的作业时间,在钻探质量和效益上有着更强的生命力,受到世界许多国家的重视。

(4) 通过钻井液的液力波动,能将井底的工程信息和地质信息传递到地面。泥浆脉冲随钻检测 MWD 就是现代化钻井技术之一。它不仅能将井底的温度、压强、转速、震动甚至轴压和扭矩等信息传递上来,还能传递地下岩石和地层性质的信息。

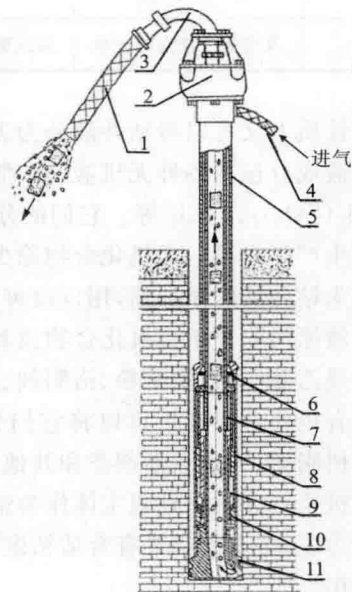


图 1-4 反循环连续取心原理示意图

1. 排出胶管; 2. 水龙头; 3. 弯管; 4. 进气管; 5. 井外杆(管); 6. 钻具接头; 7. 内杆(管); 8. 调节仓; 9. 分流节; 10. 截心器; 11. 钻头

第二节 钻井液的分类与循环方式

钻井液按其主要材料和适应条件的不同可分为七类,如表 1-1 所示。其中,泥浆是一个细分类型众多的大类。它的性能可调范围宽,适应面广,是用量最大的钻井液类型,约占钻井液总用量的 70% 以上。其他六类钻井液在一些特定场合下也有其优越的适应特点。在钻探工程中,应该根据地质条件和工艺环境来选择钻井液类型,使之应对恰当,最大程度地提高钻进效率和安全性。如果不能有针对性地合理选择钻井液类型,则有可能张冠李戴,使钻井液功能发挥不当,甚至损害钻探工作。

表 1-1 钻井液类型划分(按主体材料)及一般选择原则

类型名称	主要材料	适应的地层与环境	在钻井液中 约占比例(%)
泥浆 (细分多类)	粘土+水(或油) 十多种处理剂	松散破碎、水敏、溶蚀、压力异常等地层 以及高温等多种复杂条件环境	70
聚合物溶液	聚合物+水	松散破碎及部分易水化地层(非压力异常)	5
清水	清水	较坚硬且完整稳定的地层(非压力异常)	5
盐溶液	多类盐+水	溶蚀性地层(大多仅限于非压力异常)	5
油与乳化液	多种油、乳化液	坚硬、强研磨性地层(非压力异常)	5
气体	空气、氮气等	低压地层、缺水环境;配方简易	5
泡沫	发泡剂+稳泡剂+水	低压地层、缺水环境;悬渣好、排量省、粉尘低、兼堵漏	5

从化学性质上又可以将钻井液分为无机浆液和有机浆液两大类。

无机浆液成分包括各种无机盐、碱、酸等化合物,如 Na_2CO_3 、 NaOH 、 NaCl 、 CaSO_4 、 CaCl_2 、 Na_2SiO_3 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 FeCl_3 等。它们的分子量一般较小,分子结构也比较简单,靠无机化学反应在钻井液中产生作用。无机化合物除少数(如 Na_2SiO_3 等)单独或主体作为工程浆液外,大部分均是作为钻井液的添加剂,用以改善钻井液的使用性能。

有机浆液原料取自于有机化合物及其衍生物,如钠羧甲基纤维素、水解聚丙烯酰胺、煤碱液、瓜尔胶、羟乙基淀粉、魔芋粉、铬制剂、磺化沥青、脲醛树脂、十二烷基硫酸钠、OP-10 等,品种繁多。从有机化学组成上可以将它们分为单宁类、木质素类、腐植酸类、纤维素类、丙烯酸类、聚酯类、树脂类、表面活性剂类和其他共聚物类等。有机浆材的分子量较大,分子结构也比较复杂。有机浆材既可单独或主体作为钻井液,也可作为其他钻井液的添加剂。例如以 PAM 有机大分子为主,可以配制具有合适粘度等性能的无粘土钻井液,而它又可以作为泥浆的处理剂来附加使用。

钻井液也可按物理性状分类。世间物质的基本状态有三种,即液态、气态和固态。少数情况下,钻井液以单一的物质成分和物质状态出现:纯液态的如清水、化学溶液、油类等;纯气态的如空气、氮气、二氧化碳气体等。但是,大部分情况下钻井液都是以两种或两种以上的混合物质或混合状态出现,即表现为分散体系。泥浆、泡沫、乳状液等均是典型的分散体系。如果

按两种或两种以上物态混合,钻井液可有液/固、液/液、液/气、气/液、气/液/固等类型。

若从压缩性考虑,钻井液又可分为不可压缩和可压缩两大类型。一般含气体量较多的浆液在外界压力下体积会缩小,因此属于可压缩类型的工程浆液。可压缩浆液的比重较小,在一些低压地层等岩土工程场合需要用到。同时,可压缩钻井液在流动中表现出来的性能参数较为复杂。

钻井液循环有三种方式,即全孔正循环、全孔反循环和孔底局部反循环。

全孔正循环时,钻井介质由地面的泥浆泵或压风机泵入地面高压胶管,经钻杆柱内孔到底,由钻头水口返出,经由钻杆与孔壁的环状空间上返至孔口,流入地表循环槽、净化系统或注入除尘器中,再由泥浆泵或压风机泵入井中,不断循环,如图 1-5(a)所示。全孔正循环系统简单,孔口不需要密封装置,这种循环方式在各种钻探中得到广泛应用。

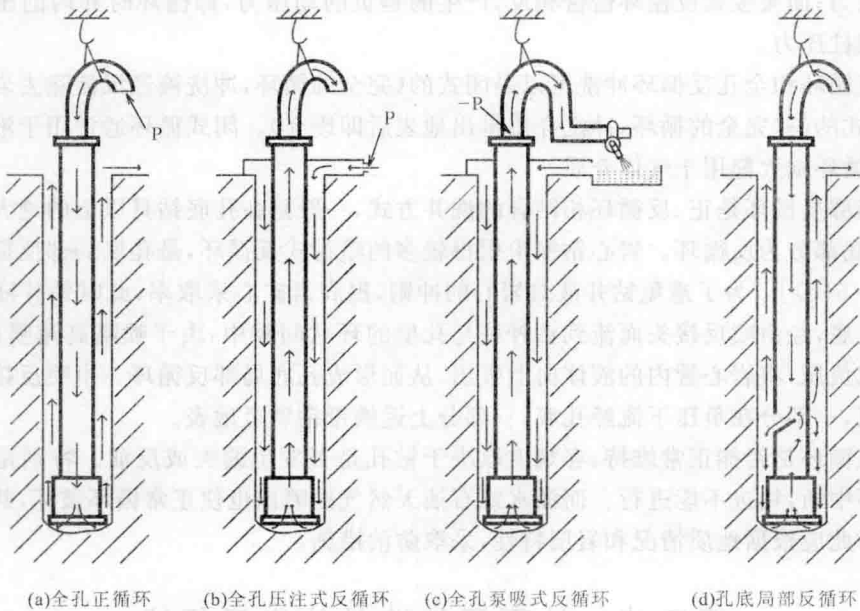


图 1-5 钻井循环方式示意图

全孔反循环时,钻井介质的流经方向正好与正循环相反。钻井介质经孔口进入钻杆与孔壁的环状空间,沿此通道流经孔底,然后沿钻杆内孔返至地表,经地面管路流入地表循环槽和净化系统中,再行循环。

全孔反循环又具体分为压注式和泵吸式两种方式。压注式[图 1-5(b)]所用的泵类型与全孔正循环相同,但孔口必须密封,才能使钻井介质压入孔内,这就需要专门的孔口密封装置。这种装置还同时必须允许钻杆柱能自由回转和上下移动;泵吸式[图 1-5(c)]采用抽吸泵,将钻井液从钻杆内孔中抽出进行循环,不需要特殊的孔口密封装置。

全孔反循环与全孔正循环比较,有以下特点和区别:

(1)由于反循环钻井液从钻杆柱内孔上返至地表,流经的断面较小,因而上返速度较大,且过流断面规则,有利于在不大的泵量下将大颗粒岩屑携带出孔外,在大口径水井钻进、灌注桩钻进和空气钻进中,为了能较好地携带出岩屑,常采用全孔反循环洗井方式。

(2)在固体矿床钻探中采用反循环方式,可将岩心从钻杆中带至地表,用以实现反循环连续取心钻进。

(3)反循环的流向与岩心进入岩心管的方向是一致的,可使岩心管内的破碎岩矿心处于悬浮状态,避免了岩矿心自卡和冲跑,从而有利于岩矿心采取率的提高。

(4)在相同情况下,反循环所需的泵量比正循环小,因此对井壁的冲刷程度较小;同时,流动阻力损失也较小。

(5)钻头旋转使破碎下来的钻渣离心向外,这与正循环在钻头部位的液流方向一致,而与反循环的流向相反。从这一点来看,正循环有利于孔底清渣。

(6)压注式反循环所需的孔口装置复杂。

(7)正循环和压注式反循环在井内产生的是正的动压力,即循环时井内的压力大于停泵时的静液柱压力;而泵吸式反循环恰恰相反,产生的是负的动压力,即循环时井内的压力小于停泵时的静液柱压力。

全孔正循环和全孔反循环冲洗可以是闭式的(完全的循环,冲洗液经沉淀除去岩屑后重复使用)和开式的(非完全的循环,冲洗介质排出地表后即废弃)。闭式循环通常用于液体冲洗介质,而开式循环则大都用于气体介质。

孔底局部反循环是正、反循环相结合的洗井方式,一般是在孔底钻具以上的绝大部分为正循环,而孔底部分为反循环。岩心钻探中用得较多的喷射式反循环,是孔底局部反循环的典型例子[图1-5(d)]。为了避免钻井液对岩心的冲刷,提高岩矿心采取率,此时钻井液由钻杆柱内孔送到孔底,经由喷反接头而流到钻杆柱与孔壁的环状间隙中,由于喷嘴高速喷出液流,在其附近形成负压,将岩心管内的液体向上吸出,从而形成孔底局部反循环。由喷反接头流入环空中的液流,一部分在负压下流经孔底,一部分上返携带钻屑至地表。

钻井液循环是否能正常维持,客观上取决于钻孔是否发生漏失或反涌。特别是严重漏失会造成循环中断,钻进不能进行。而涌水或石油天然气的喷出也使正常循环破坏,甚至出现重大事故。对此应根据地质情况和岩层特性,采取防治措施。

第三节 地下固结浆材的应用领域

地下固结浆材,又称为岩土工程固结浆材,在钻探钻井工程、基础施工、地基处理、地质灾害防治、矿山开采止水等不同领域中有广泛的用途。

在各种地质条件下钻井,经常会遇到诸如砂、砾、卵石、破碎带、裂隙、溶洞等复杂状况,仅用钻井液往往达不到安全施工的效果,需采取专门的护壁堵漏材料来固结稳定井壁,防止钻井液漏失和地下水涌入。否则,将会因为井壁失稳破坏以及井内漏涌严重而使钻进工作无法进行。例如,在地质勘查钻探和矿山钻掘工程时经常会遇到厚大的构造破碎带及强风化地层;在地下水钻采、地质灾害治理和基础工程施工时经常会钻经流砂层或卵砾石层;在油气井开发或工程地质勘察过程中会遇到极不稳定的软土或泥页岩等。对此,采用固结封堵型的护壁堵漏材料来对付这些复杂地层成为关键技术措施。

油气钻井中的固井作业要用水泥将井壁与套管之间的环状间隙固封,以维护油气井的稳固并隔离含水层。

在基础工程施工、地质灾害治理等领域,钻进的最终目的是要强化地层加固岩土、稳定坡

体,如钻孔灌注桩、压力注浆、高压旋喷、粉体喷射、灌浆锚杆和土钉墙等。在这些工程中,不仅需要钻井或钻进,而且要在钻井完成后或在钻进的同时向井内或孔内注入可以固化的浆液,用以固结、强化地层和岩土。另外,在基础工程的地下墙施工中,还经常采用挖槽灌注筑法来形成坚实的基础,即先挖槽再下入钢筋笼,然后向槽内浇注混凝土。

在矿山钻掘工程中,快速止水堵漏是不可缺少的安全技术措施,其中关键问题之一就是如何选配和使用合适的快速堵漏浆材。另外,在软弱地面安放钻机设备和钻塔时,井场地基需要加固。出于安全考虑,在许多情况下,钻孔后需要封孔。这些都需要用到能够固结的浆材。类似的钻井和岩土工程中的许多辅助性工作(如工程基建等)也需要用到各种固结型浆材。

显然,地下固结浆材在地质、矿产、油气、冶金、煤炭、资源、环境、交通、建筑等部门的相关工程中具有重要的作用。地下固结浆材应用分类如表 1-2 所示。

表 1-2 地下固结浆材应用分类表

分类	用途	品名举例	主要作用
钻井护壁堵漏与固井浆材	钻孔护壁堵漏浆材 固井浆液 封孔浆液 快速止水浆液	水泥、化学凝固剂、 多种类惰性粒料	稳固孔壁、防止漏失和涌水 使套管与井眼地层固结稳定 灌封钻孔孔眼 快速封堵矿井与坑道内的漏水
注浆液	静压注浆液 高压旋喷、深层搅拌浆液 粉体喷射材料 灌浆锚杆 土钉墙浆液	水泥、石灰、化学材料等	浆液以渗透、挤密等方式固结强化地层 浆液与地下岩土混合成桩 干粉料与地下土、水混合固结地层 使锚杆和岩土固结,稳固地层 使土钉和岩土固结,稳固地层
浇注混凝土	地下连续墙浆材 灌注桩成桩浆材 井场地基加固浆材 基建等工程辅助浆材	水泥、混凝土材料	混凝土与钢筋在槽内固化成地下墙 混凝土与钢筋在孔内固化成地下桩 加固井场地基 加固井场道路等辅助工作

第四节 钻井液及岩土工程浆材简史

钻井最初是用清水作为洗井介质,1914—1916 年正式使用“泥浆”。这一阶段实际就是清水过渡到自然“泥浆”阶段。通过实践证明,自然“泥浆”确有携带岩屑、净化井底、控制地层压力等作用,人们认识到它的有益作用,逐渐有意识地应用它。但这种“泥浆”仅适用于浅地层及简单的地层。其缺点是滤失量高,易使粘土水化膨胀,引起井塌及井眼扩大等问题,对油层有损害作用,静置后性能不稳定,易形成水土分层。人们从实践中一方面认识到“泥浆”的有益作用,同时也发现存在的问题,从而进一步改善和发展了钻井“泥浆”体系。

首先,从钻井液系列的发展情况来看,水基钻井液经历了从分散钻井液到不分散钻井液等发展阶段。分散钻井液包括细分散钻井液、粗分散钻井液。下面分别加以介绍。

细分散钻井液主要用于浅井阶段。它由粘土、水和处理剂组成。通常加入纯碱、烧碱、单宁酸钠或煤碱剂控制其粘度和滤失量。这些无机和有机处理剂的主要作用是,将钻井液中的

粘土颗粒和地层中泥、页岩分散,使它们成为胶体状态,保持胶体的稳定性。细分散钻井液存在以下一些严重的缺点:

(1)不能有效地控制造浆。遇到大段泥、页岩层,钻井液变稠,为了稀释和降低钻井液密度又需加水,加水后往往又需加土和处理剂调整其性能,这样多次反复处理钻井液,大大地增加了材料消耗,使钻井液成本增加。

(2)抗盐、抗钙性能差。遇到石膏层、岩盐层、高压盐水层,粘度会急剧增加,滤失量也迅速上升,极易引起井下产生复杂问题。

(3)钻井液滤液中存在的钠离子及分散剂,对储层粘土矿物具有水化膨胀、分散及运移作用,会降低储层渗透率,严重地损害油气层。

(4)抗温性能差,不宜在深井及超深井中使用。

为了克服上述缺点,产生并发展了粗分散钻井液。粗分散钻井液(钙处理钻井液及盐水钻井液均属此类)具有抗钙、抗温性能,能抑制粘土水化膨胀,而且比细分散钻井液对油层的损害小,这类钻井液是以 Ca^{2+} 或较大浓度的 Na^{+} 作为絮凝剂,以铁铬木质素磺酸盐作为稀释剂,以煤碱剂或羧甲基纤维素作为有机降滤失剂。由于这几种处理剂综合处理的结果,形成适度絮凝而又相对稳定的粗分散体系。

这类钻井液的缺点是,不能有效地控制钻井液中的固相含量和密度,不能完善地解决大段泥、页岩层的井壁稳定问题,不能满足保护油气层的要求。

上述钻井液的状况大体处于 20 世纪 20 年代末到 40 年代钻井液工艺的发展阶段,不少的钻井液研究成果已应用于现场。1921—1922 年研究并采用了加重剂氧化铁和重晶石。1926 年提出膨润土作为悬浮剂的专利。1931—1937 年试制了钻井液测量仪器。1930 年试制成功了稀释剂单宁酸钠。1944—1945 年把 Na-CMC(钠羧甲基纤维素)用于钻井液,同时研制成功 Ca-木质素磺酸盐。1955 年研制成功铁铬木质素磺酸盐。

随着井深的增加,钻遇高温高压地层,钻井新工艺新技术有了进一步发展。例如深井钻井、喷射钻井、近平衡钻井、定向钻井和聚晶金刚石钻头钻井等技术的运用和发展,促使钻井液体系和固控装备不断向前发展。首先表现在完善与增多了钻井液类型,其中最突出的是不分散低固相钻井液,它在 20 世纪 60 年代到 70 年代最有效地促进了钻井液技术的发展。深井钻井液、石膏钻井液、氯化钾钻井液以及 PDC 钻头用的乳化钻井液都是由于钻井生产的需要,在此阶段发展起来的。

不分散低固相钻井液是为了提高钻井速度,改善井身质量及保护油气层发展起来的新型钻井液。从钻井的实践中认识到,将个别井中钻井液的固相含量限制在较低范围内,甚至于发展无粘土相钻井液对于提高钻速、发现油气层是极为有利的。因此,人们将有机高分子化合物聚丙烯酰胺(英文缩写为 PAM)引入钻井液中,用它及其衍生物作为化学絮凝剂,使钻屑与劣质粘土不分散,使它们易于在地面产生沉淀而清除,使钻井液中保持少量水化性能好的膨润土(4%以下)。不分散低固相钻井液是聚合物钻井液的一种。

聚合物钻井液是水基钻井液发展最迅速的一类。不少学者对其进行了研究,概括起来主要有以下四个方面:①如何提高钻速问题;②低固相的实现和机理;③处理剂及体系的发展与应用;④稳定井壁,抑制钻屑水化膨胀,防止储层损害的问题。

研究发展的结果,聚合物钻井液的主要类型为水解聚丙烯酰胺体系、氯化钾(KCl)聚合物钻井液体系、醋酸钾(KAc)水解聚丙烯酰胺体系、磷酸氢铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4]$ 水解聚丙烯酰胺体

系、磷酸钾盐非离子型聚合物体系、聚丙烯及聚乙二醇共聚物(COP/PPG)体系,以及聚阳离子体系。

国外较完善的阳离子聚合物钻井液主要是 M-I 公司的 MCAT 阳离子聚合物钻井液体系,该体系包括高分子阳离子聚合物(MCAT)和低分子阳离子聚合物(ACAT-A),另外还有几种非离子型聚合物所组成的钻井液体系。这是防塌方面新型水基钻井液类型的发展趋势。

油基钻井液是另外一大类钻井液体系,它一般用于大段泥、页岩,易塌易卡的复杂地层,高温深井,海洋钻井及保护油气层等方面。最早约在 20 世纪 20 年代就用原油作为洗井介质,但其流变性、滤失量不易控制。40 年代到 50 年代,发展形成了以柴油为连续介质的油基钻井液及油包水乳化钻井液。为了克服其影响钻速及成本高的缺点,在 70 年代又发展了低胶性油包水钻井液。油基钻井液大部分用于海洋定向井、丛式井及油气层取心。由于各国对环境保护的重视,对海洋排毒的严格限制,近十年来,在海洋形成了以低毒矿物油为连续介质的低毒油包水钻井液。近期在定向井和水平井中又大量使用全油钻井液。

1994 年 8 月美国《石油工艺》杂志报道:90 年代,由于聚合物钻井液的迅速发展,曾经出现过聚合物钻井液将代替油基钻井液的说法。将聚合物体系与油基钻井液在十余个方面进行对比,即热稳定性、地层稳定性、保护油层、润滑性、可钻性、环境保护、防卡、防污染、防腐蚀、流变性、防漏,最后结论是在抗污染、防腐蚀、保持井眼稳定又能省时地起下钻具、扩眼及冲洗等方面聚合物体系不如油基钻井液,特别是不如酯基钻井液,而且成本比油基钻井液及酯基钻井液高。因此,在近十年内聚合物水基钻井液似乎还不能完全代替油基钻井液。有学者在对比中提出了值得重视的聚合物体系。例如在热稳定性方面有改性的聚丙烯酸酯三元聚合物及乙烯基酰胺/乙烯基磺酸盐共聚物;在地层稳定性及保护油层方面提出混合金属层状氢氧化物(MMH)、混合金属硅酸盐(MMS)。也有的公司研制了甘油的钻井液、完井液,它具有良好的抑制性、润滑性和絮凝等作用。

含气体的可压缩钻井流体也是一大类钻井液体系。它包括空气或天然气、雾、泡沫和充气钻井流体。这类流体主要应用于低压易漏地层、严重缺水地区、强水敏性地层及永冻地区($-80^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$)。20 世纪 30 年代气体型钻井流体就开始应用于石油钻井,泡沫流体从 50 年代开始研究并较为广泛地应用于钻井,以后连续地应用于洗井和修井。在 70 年代开始以氮气配制泡沫,在酸化及压裂中应用,最近以 CO_2 配制的泡沫流体或单独使用 CO_2 液体,在压裂方面发挥了巨大作用。

其次是固控设备的发展。目前固控设备已有振动筛、除泥器、除砂器、离心机、清洁器等,形成了系列。最近又在研发三到四台振动筛和多台离心机组成的整体装置,并正在向不用除砂器和除泥器的方向过渡。现在正在研制另一种更有前途的固控技术,它是动态细颗粒清除系统。原先是为清除钻井液池中固相而设计的,这种系统可用以处理由振动筛、除砂器、除泥器和离心机排出的细砂,并将钻井用水回送到钻井液体系中。密闭回路钻井液系统(常用于油基钻井液体系)常常在成本高和环境很敏感地区的井上使用。

原材料和化学剂的发展是搞好钻井液工作的基础。20 世纪 80 年代,国外已发展到 18 类处理剂。从 1981 年到 1989 年,处理剂品种由 1 864 种增加到 2 606 种,而实际产品不过 200 种。从这些年的统计数据来看,除加重剂外,以增粘剂、降滤失剂、降粘剂和页岩抑制剂四类产品增加最多。

微机在钻井液技术中的应用在美国也有相当快的发展。一般钻井液公司都有计算中心及

可储存上万口井的数据库,随时可调出钻井液实际数据,且设有许多终端,可进行人机对话。只要输入基本要求及具体条件,就可及时得到各种设计方案及处理措施。

岩土固结浆液是应注浆、锚杆等地基处理和边坡加固工程而产生的。近二百年以来,这些浆液的材料配方在法国、日本等国发展非常迅速。

两千年前的古罗马人已用石灰、火山灰作混凝土建造了万神殿圆屋顶。现代的水泥混凝土起源于英国。以后,法国人制成钢筋混凝土和预应力锚具,奠定了预应力混凝土的基础。经过近二百年在建筑材料中的实践应用,混凝土的科学技术在理论上已成为一个独立的体系,在工艺上有许多创新和变革,地位也越来越重要,其应用范围从地上建筑到地下建筑,从海港码头发展到海上漂浮物,成为人类时代的一种不可缺少的工程材料。

史料记载,公元前 250 年左右,秦蜀郡太守李冰开凿盐井时,已经采用向井内注水的方法来排除岩屑,这就是钻井液的最初使用。一直延续到 20 世纪初,清水作为钻井液伴随着钻井作业经历了漫长的岁月。

我国用泥浆作为钻井液始于 1937 年。在四川油矿勘探钻进巴 1 井时,使用井场附近田间的粘土,喷射水流使之分散成浆。当时对钻井液原材料的使用、配制及性能控制均很简单、粗糙。1941—1942 年,为了制止井喷,玉门油矿从用铁矿粉到用重晶石粉等,成功地配制了密度为 1.80g/cm^3 的钻井液。与此同时,台湾油矿勘探处为了提高钻井液质量,寻找了当地出产的相思树皮和石榴树叶等作为原料,经蒸煮浓缩后作为钻井液的稀释剂;利用海草煮液加入苛性钠生成藻酸钠,用来调整钻井液粘度。

20 世纪 40 年代,甘肃油矿在矿场工程室内设立了“泥浆”试验室,这是我国第一个“泥浆”研究机构,由工程师黄先驹负责。黄先驹自行配制了一套“泥浆”研究设备,如天平、漏斗粘度计、“泥浆”检验仪器等,有关钻井液原料、性能都能试验。在 1947 年采用单宁酸钠处理钻井液成功以后,又在 1948 年试验成功糊化淀粉钻井液,经钻 123 号井时试用性能良好。

总体上看,我国解放前的钻井事业比较落后,在钻井液方面,只是从“黄泥加水”的自然泥浆发展为使用单宁碱液等少量添加剂处理泥浆,泥浆性能测试仪器也十分简陋。

自新中国成立后至 60 年代中期,是社会主义建设的开始时期,随着经济建设的大规模进行,钻井事业有了很大的发展,与之相应的钻井液技术也有了较大发展,发展的规律与世界发展规律相似。最初是钠基(淡水)为基础的细分散钻井液,在井浅、地层较简单的情况下,有它的优越性,可就地取材、成本低,密度可在较大幅度范围内调整,通过化学处理,其性能也能保持稳定。但钻遇复杂地层,如大段泥、页岩层,厚岩盐层,石膏层及其他可溶性盐类地层,这类钻井液抗污染能力差,粘度和切力急剧增加,滤失量增大,维持稳定性比较困难。于是发展了石灰、石膏及氯化钙为絮凝剂的钙处理钻井液及盐水钻井液。由于它们具有抗钙侵盐侵及粘土侵、流动性好和性能较稳定的优点,在我国得到了广泛的应用。这样,泥浆类型就由细分散泥浆发展到粗分散抑制泥浆。与此同时,我国开始研究深井泥浆,泥浆处理剂特别是有机处理剂出现了多种产品,如煤碱剂、野生植物制剂等。1962 年前后,制成羧甲基纤维素(CMC),1965 年后研制成铁铬木质素磺酸盐(FCLS)等。泥浆性能测试已经有成套的仿苏式仪器供应。

20 世纪 60 年代末 70 年代初,我国钻井液工作又上了一个新台阶。高分子有机处理剂和表面活性剂的品种越来越多,经验也越来越丰富,在几个地区相继钻成了若干口超深井,成功地发展和推广了低固相铁铬盐混油钻井液、低固相铁铬盐盐水钻井液及低固相弱酸性饱和盐

水钻井液。有的地区还根据地层特点,就地取材,创造了符合本地区特点的钻井液,如使用野生植物作为钻井液处理剂来配制钻井粉,以及使用褐煤氯化钾钻井液、褐煤石膏钻井液等。

20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期,钻井技术和钻井液工艺在对外开放吸收世界先进技术的政策鼓舞下有了较快的发展。此期间推广了聚丙烯酰胺不分散低固相泥浆;研制了包括抗高温处理剂、生物聚合物处理剂、油包水乳化加重钻井液以及抑制性强、流变性好、性能稳定的防塌体系在内的多种新型处理剂。这样,钻井液在减阻润滑、护壁堵漏、提高钻速、排渣净化和增强自身稳定性方面发挥出更强的功能。至 1985 年,钻井液处理剂已达到 16 类 114 种。同时,在钻井液技术管理方面逐步实现标准化、规范化,更新了全部泥浆性能测试仪器,推广了固相控制设备。

20 世纪 80 年代末至 90 年代以来,我国钻井液技术又有了较大的发展。泡沫、充气泥浆等低密度钻井液研究成功并得到推广,克服了低压地层、缺水地区钻进的困难;两性离子型聚合物钻井液、阳离子聚合物钻井液、钾盐钻井液、钾石灰钻井液的应用,有效地解决了一些地区井壁失稳的老大难问题;聚合物磺化钻井液等的应用,改善了高温高压条件下钻井液的性能,减少了井下复杂情况的发生,深井和超深井钻速明显提高,降低了钻井液的费用;钻井液的流变模式如钻井液在大、小口径钻孔中的循环行为的研究在不断深入;泥浆在循环过程中的各种性能参数的自动检测系统和电子计算机智能专家系统已开始试用于钻井液的控制;水平井钻井液技术围绕水平井五大难题——携屑机理、防止岩屑床的形成和重晶石的沉淀、井壁稳定力学与化学因素耦合的研究、保护油层技术、钻井液润滑性及防卡均取得了系统的研究成果,理论日趋成熟;泥浆净化、固相控制工作受到重视,许多钻机配备了振动筛、除砂器、除泥器及罐式循环系统;深井及超深井还配备了离心机,钻井液含砂量明显降低;为解决泥浆护壁堵漏与提高油、气、水产层渗透率这一突出矛盾,在暂堵剂研究的基础上,运用生物技术研制出的具有暂堵特性的钻井液在我国最新问世。

我国在水泥与化学浆液护井方面,近 20 年取得了明显的技术进步。为了克服水泥浆凝固时间长、早期强度低、可灌性差、成功率低等缺点,人们从各方面进行了探索。其一是研制改变水泥性能的各种添加剂,如速凝早强剂、分散剂(减水剂)、降失水剂、抗污染剂、比重降低剂等,目前已研制出既保证有足够流动度而凝固时间又相当短的复合速凝剂。它们已成功地用于生产实际,其中有显著降低水灰比又不延长凝固时间的高效分散剂,如萘磺酸甲醛高缩合物类、水溶性古马隆树脂磺酸钠等,无论在硅酸盐型或硫铝酸盐型水泥方面都取得了较好的效果。目前,正在试用的 FA 水泥减重剂,可使水泥浆比重降低到 1.25~1.40,它的推广使用既提高了堵漏效果,又降低了水泥浆的消耗量。这些新型添加剂的使用,再配合水泥灌注工艺的改进,已使常用的硅酸盐型水泥浆堵漏的成功率显著提高,候凝期明显缩短。不少地质勘探部门已把泥浆和水泥浆并列对付复杂地层的两种常规“武器”。

在对普通水泥浆进行改性工作的同时,一些院校和生产单位与工厂协作,研制能更好地满足钻孔注浆要求的新型水泥,经过两三年的努力,终于研制成功了硫铝酸盐型地勘水泥。它具有速凝、早强、微膨胀和抗腐蚀性能好等一系列优点,几年来经过国内几百个单位的使用证实,这种水泥是很有发展前途的。今后如能在稳定产品性能、降低生产成本和延长使用期限等方面加以提高,将会发挥更大的作用。

在改进注浆材料的同时,通过多年的实践,也成功地总结出一整套水泥灌注方法。除常规的平衡注浆法以外,根据不同的地层条件,还分别采用分段注浆法、加压注浆法、充填注浆法、