



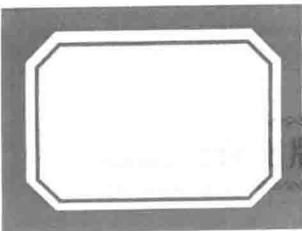
石油高等院校特色教材

实用钻井流体力学

樊洪海 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press



版基金资助项目

石油高等院校特色教材

实用钻井流体力学

樊洪海 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共十一章,系统论述了钻井液的流变性、钻井液在钻柱内和环空中的流动原理、钻井液环空携屑两相流、钻井过程中的温度场等基础内容,并以井下波动压力计算、井底压力与当量密度计算、钻井水力优化设计为重点介绍了钻井流体力学的工程应用。

本书体系完整、层次清楚,可作为石油工程相关学科的研究生教材,也可供从事油气钻探工作的科研与技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用钻井流体力学/樊洪海编著.
北京:石油工业出版社,2014.2
(石油高等院校特色教材)
ISBN 978-7-5021-9918-0

I. 实…

II. 樊…

III. 油气钻井—流体力学—高等学校—教材

IV. TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 298432 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:25.5

字数:648 千字

定价:50.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

钻井流体力学是流体力学在钻井工程中的应用,旨在利用流体力学基本原理和分析方法阐述钻井液在钻井循环系统中的流动原理,研究钻井液静止与循环过程的流体性质、流动状态及流体各物理参量与流动状态之间的关系,并用于指导钻井工程实践。“钻井流体力学”是石油工程学科及相关专业的一门专业基础课程,而目前国内现有钻井流体力学教材或专著多成书于十多年前,部分理论方法较陈旧。为此,笔者基于长期教学实践和较丰富的技术经验,同时吸收了钻井流体力学相关的国内外新理论、新技术和现场应用较好的典型方法,对钻井流体力学基础理论进行了梳理和优化,编著成这本《实用钻井流体力学》。

本书强调理论知识与实践应用相结合。内容上注重知识点的系统性和全面性,力求为读者深入浅出地介绍每个重要概念,同时详略得当地推导每个关键公式。本书以实用性为主要目标,简化了实用价值较小的纯理论性公式推导,重点关注有助于钻井工程设计和现场计算的公式和结论,并以现场数据和工况为背景编排了一些实例。同时,为方便读者查找,本书将各章中常用的结论、公式、参数及参考文献在每章末尾罗列出来。本书在内容上还具有以下特色:

(1)将通用环空流量方程用于求解不同流变模式下的非牛顿流体在环空中的层流压耗,将广义流性指数法推广至所有流变模式,通过引入最新的“有效管径”概念将非牛顿流体管流、环空流与牛顿流体的研究方法统一了起来。

(2)将钻井液的四参数流变模式用于钻井水力学计算和分析,并设计了一些水力学计算实例。

钻井工程技术和工艺在不断完善和更新,钻井流体力学也需要满足新的研究和应用需求。例如定向井中的水力学分析、不规则流道中的钻井液流动原理、井控过程中的水力学计算等都值得深入探讨。编者期待本书能够有效指导现场工程设计和施工,并为钻井流体力学的发展提供参考。

在本书的成稿过程中,笔者的研究生周号博、李朝玮、彭齐、汤化沙、王云龙、刘德智、刘刚、王鄂川等参与了资料的收集整理和部分编写工作。编写过程中参考了一些前人的文献成果,在此表示感谢。

本书完稿后,得到了西南石油大学陈小榆教授、东北石油大学杨树人教授的肯定,二位教授提出了不少有价值意见和建议。同时,本书的出版得到了石油教材出版基金的资助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,向读者表示歉意。编者真诚希望读者对本书进行评论,并将错误之处和进一步完善的建议反馈给我们(fanhh@cup.edu.cn),以便进一步修订。

樊洪海

2013年10月于北京

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 钻井流体力学的研究对象	(1)
1.2 钻井流体力学的内容和意义	(3)
1.3 钻井流体力学的研究方法	(4)
复习思考题	(5)
参考文献	(5)
第 2 章 钻井液流变性与流变参数的确定	(6)
2.1 非牛顿流体及其分类	(6)
2.2 钻井液流变模式	(8)
2.3 钻井液流变性能的测定	(14)
2.4 钻井液流变参数计算及流变模式优选	(44)
2.5 影响钻井液流变性的因素	(50)
复习思考题	(54)
参考文献	(54)
附表 2.1 钻井液流变参数常用计算公式	(56)
第 3 章 钻井液在圆管内的层流流动	(57)
3.1 圆管层流基本理论	(57)
3.2 不同流变模式钻井液的圆管层流分析	(61)
3.3 非牛顿流体管流的广义流性指数法研究	(89)
复习思考题	(106)
参考文献	(106)
附表 3.1 圆管流量公式对比	(108)
附表 3.2 不同流变模式流体圆管层流压耗与雷诺数计算式	(109)
第 4 章 钻井液在环空内的层流流动	(110)
4.1 同心环空轴向层流基本理论	(110)
4.2 不同流变模式钻井液的同心环空轴向层流分析	(118)
4.3 非牛顿流体同心环空流的广义流性指数法研究	(143)
4.4 钻井液在偏心环空内的层流流动	(150)
复习思考题	(161)
参考文献	(162)
附表 4.1 常用流变模式流量方程的传统方法和精确方法	(163)
附表 4.2 不同流变模式流体环空层流压耗与雷诺数计算式	(164)

第 5 章 钻井液流动状态判别准则	(165)
5.1 临界雷诺数方法	(165)
5.2 非牛顿流体流动稳定性研究	(170)
5.3 局部稳定性参数 Z 值法	(173)
5.4 整体稳定性参数法	(183)
5.5 钻井液流体流态判别的实验验证与实例分析	(187)
复习思考题.....	(194)
参考文献.....	(195)
第 6 章 钻井液的紊流压耗计算	(196)
6.1 牛顿流体在圆管和环空内的紊流压耗计算	(196)
6.2 钻井液在钻柱内和环空内的压耗计算	(201)
6.3 钻杆接头和动力钻具的压耗计算	(211)
复习思考题.....	(229)
参考文献.....	(229)
第 7 章 钻井液环空携岩固液两相流	(231)
7.1 岩屑的基本性质	(231)
7.2 岩屑在钻井液中的阻力与滑落速度计算	(235)
7.3 直井环空内岩屑浓度的计算	(249)
7.4 井眼净化与岩屑运移	(252)
复习思考题.....	(271)
参考文献.....	(271)
第 8 章 钻井过程中的井筒温度场	(272)
8.1 温度场基本理论	(272)
8.2 钻井过程中的井筒温度场模型	(278)
复习思考题.....	(290)
参考文献.....	(290)
第 9 章 管柱轴向运动引起的波动压力	(291)
9.1 井下波动压力概述	(291)
9.2 稳态波动压力理论	(294)
9.3 瞬态波动压力理论	(302)
9.4 钻井参数对井下波动压力的影响	(318)
9.5 波动压力预测及安全起下速度设计软件	(320)
复习思考题.....	(325)
参考文献.....	(326)
第 10 章 当量密度计算与环空返速的确定	(327)
10.1 当量静密度 ESD 计算	(327)
10.2 当量循环密度 ECD 计算	(341)

10.3 钻井液最优环空返速的确定	(352)
复习思考题	(357)
参考文献	(357)
附表 10.1 不同温度、压力下液相水的密度	(358)
附表 10.2 一定压力范围内不同温度下钻井液液相水的密度计算公式	(359)
第 11 章 喷射钻井水力参数设计	(360)
11.1 喷射钻井工作原理	(360)
11.2 喷射钻井水力参数优选准则	(371)
11.3 最优排量的解析计算方法	(376)
11.4 最优排量的迭代计算方法	(386)
11.5 钻井水力参数优化设计与应用	(394)
复习思考题	(398)
参考文献	(399)

第 1 章 绪 论

1.1 钻井流体力学的研究对象

钻井流体力学的研究对象是钻井液的流变性质及在钻井循环系统中的流动规律。

1.1.1 钻井液

钻井液是钻井时用来清洗井底并携带岩屑至地面以维持钻井正常进行的流体,又称洗井液。钻井液一般包含以下组分:

(1)连续相:可以是液相的水、油等或其他流体如空气、天然气、泡沫等。

(2)固相:包括活性固相和惰性固相。活性固相包括人为加入的商业膨润土、由地层进入的造浆黏土和用于油基钻井液的有机土,惰性固相主要是钻屑及加重材料。

(3)钻井液添加剂:调整钻井液性能的各种外加剂,如降滤失剂、增黏剂、降黏剂、页岩抑制剂、润滑剂等。

钻井液俗称钻井的血液,是关系到钻井成败的重要因素之一,主要有以下功用:

(1)从井底清除岩屑并经环空携带至地面。

(2)平衡地层压力和地应力,阻止地层流体流入井内和维持井眼稳定。

(3)停止循环时悬浮钻屑和加重材料。

(4)清洗、冷却和润滑钻头及钻柱;形成泥饼,保护井壁和储层。

(5)向钻头传递水力功率,辅助破岩。

(6)与地层黏土和流体配伍,保护油气层。

(7)反映井下信息,有助于录井监测和地层评价。

2006年,API将钻井液体系分为水基钻井液、油基钻井液和气基钻井流体。水基钻井液包括细分散钻井液、粗分散钻井液、聚合物钻井液、盐类钻井液等;油基钻井液包括全油基钻井液、油包水乳化钻井液、合成基钻井液;气基钻井流体包括空气或天然气、雾状钻井液、泡沫钻井液和充气钻井液。本书在叙述过程中将各种钻井流体统称为钻井液。钻井液体系不同,其在钻井循环系统中的流动状态也有差异。钻井液的性能包括密度、流变性、滤失与造壁性、润滑性、抗温性、固相含量等,是影响钻井液流动的重要因素。

1.1.2 钻井循环系统

钻井循环系统分为开泵后的循环和停泵后的静止两种状态。在循环过程中,钻井液按流动状态有层流和紊流之差别;在环空中按钻柱是否旋转又可分为螺旋流和轴向流。

钻井循环系统组成如图 1.1.1 所示。钻井液在钻井液罐中配置好后,经活塞泵泵入地面节流控制管汇,再通过立管、水龙带、水龙头后进入方钻杆,然后经钻杆、钻铤、井下钻具组合以管内流动方式至钻头,从钻头水眼或喷嘴高速喷出清洗井底,并携带岩屑沿环空上返至井口;通过井口防溢管线后进入振动筛,岩屑等无用组分被清除,钻井液重新进入钻井液罐。钻井液

流经的各种管件、工具和设备构成了钻井循环系统。在钻井流体力学中,主要分析钻井液从钻井泵送出(循环系统入口)至排出井口(循环系统出口)这段流道内的流动性质和状态,并将其分为以下四部分:

(1)地面管汇:包括地面调节控制管汇、立管、水龙带、水龙头等钻井泵出口至钻柱顶端的流动通道。

(2)钻柱:包括方钻杆、钻杆和井下钻具组合中的圆管形流动通道及各段管柱之间的接头,还包括井下动力钻具、各种测量及控制工具等。

(3)钻头:主要是钻头流道、水眼及喷嘴。

(4)环空:分为钻柱与套管或尾管柱之间的环空、钻柱与裸眼之间的环空。套管或尾管内径规则,裸眼井壁可能存在缩径、井壁坍塌等井壁失稳状况而使井径不规则。管柱接头、扶正器、各种井下工具等也会改变环空流道的几何形状。另外,依据钻柱是否居中可将环空分为同心环空和偏心环空。

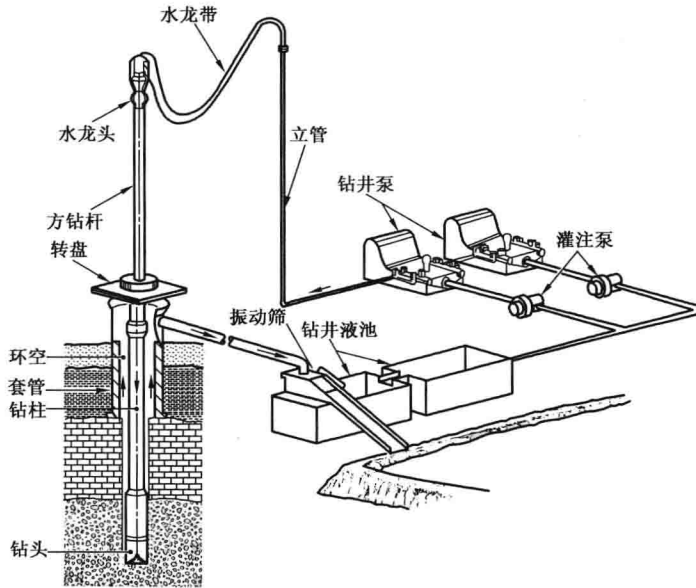


图 1.1.1 钻井循环系统组成

1.1.3 钻井液在循环系统中的物质与能量变化

钻井液在循环系统中存在物质和能量的变化。钻井流体中的物质变化包括:

(1)固相物质混入。例如,钻井液清洗井底后携带岩屑上返,将环空内的钻井流体变为固—液两相;钻井液冲刷裸眼井壁使黏土质溶入钻井液,井壁失稳垮塌后使各种尺寸和形状的井壁岩石掉块进入钻井液;钻遇严重漏失地层时,在钻井液中加入堵漏剂,如纤维状堵漏剂锯末、薄片状堵漏剂云母片、颗粒状堵漏剂坚果壳等。

(2)地层流体侵入。地层流体包括油、气、水。其中,气可为天然气、二氧化碳或硫化氢等;水可为淡水或盐水等。由于钻井液密度低、环空钻井液液柱降低、起钻抽汲或停止循环等原因,造成井内有效压力小于地层压力(负压差)时,在渗透性或裂缝性地层中,地层流体会侵入井眼,与钻井液发生混合。

(3) 钻井液滤失和漏失。钻井液的滤失是指钻穿渗透性地层时,钻井液在正压差作用下向地层渗滤并在井壁表面形成滤饼的过程。钻井液的漏失是指钻遇高渗透性地层、裂缝和洞穴型地层时,钻井液大量漏入地层的现象。

(4) 采用钻井新工艺时的物质变化。例如,实施加压钻井液帽钻井时,在上部环空注入高密度钻井液,采用双梯度控压钻井技术时,在预定井深向环空注入惰性气体或其他轻质流体等,使钻井液体系发生变化。

钻井流体中任何明显的物质变化都会影响钻井流体的性能,进而影响其在流道中的流动特征。多数情况下钻井液在钻柱内为单一的液相,在环空内为携岩固—液两相流。当钻井液中存在较多气体时,则会出现气—液两相流或气—液—固三相流。多相流的存在增加了钻井流体力学的计算分析难度。

除了物质变化外,钻井液在整个循环系统中一直存在着能量变化。这些能量变化对钻井液体系本身以及钻井液的流动过程施加影响,是分析钻井流体力学的重要因素。

(1) 势能变化。由钻井液液柱自身重力产生静液压力,使钻井液在不同深度或不同工况下的位置势能产生差异。钻井液静压力大小与液体的密度、液柱的垂直高度有关。

(2) 压力变化。例如,钻井泵给钻井液施加初始压力,节流阀等调节装置对钻井液的压力进行控制,钻井液在流道内产生压力损耗,起下钻或下套管过程中产生波动压力,地层孔隙压力对钻井液产生影响。这些钻井液流道断面上的压力差异使整个体系的能量不断变化。

(3) 动能变化。钻井液在开停泵的过程中产生动能突变,在管内和环空内的流速大小和分布差异使动能不一样。钻柱旋转产生螺旋流动,也会影响钻井液的动能,流道中的接头、钻头水眼等特殊流道则会改变钻井液的流速。

(4) 热能变化。地层温度的存在与分布差异使钻井液与地层接触处始终进行着热量交换。循环过程中钻井液内部以及钻井液与井壁或管壁接触面不断摩擦而产生热量。

钻井液在井下的能量变化不限于此,它非常复杂,存在能量的产生、转移和转化,并改变着钻井液的性能和流动状态。但就整个钻井循环系统及其存在的环境而言,它们仍然严格遵守能量守恒准则。

1.2 钻井流体力学的内容和意义

流体力学是力学的分支,研究的对象是流体及其物理性质、流体的机械运动以及机械运动过程中所伴随的各种物理参量与运动状态之间的相应关系,这便是流体静力学、流体运动学和流体动力学。而钻井流体力学,就是把流体力学的基本原理运用于钻井工程实践,指导设计和施工。钻井流体力学的主要内容包括:

(1) 钻井液的流体力学性质。在钻井流体力学中主要分析钻井液的密度分布、压缩性、流变性及其描述方法以及温度、压力、流动状态、钻井液组分变化对钻井液密度、压缩性和流变性的影响。

(2) 钻井液的流动原理:主要分析钻井液在不同的流动通道中流动的基本原理与流动参数计算方法,包括钻井液在圆管内、同心或偏心环空内的轴向层流和紊流流动,钻柱和环空内的钻井液螺旋流动,钻井液流态判别方法,钻井液的井底流场分析和钻头水力学,钻井液的多相流计算分析(环空内携岩时的固—液两相流、气侵后的气—液两相流或气—液—固三相流等)。考虑到本书的特点和适用范围,未包括螺旋流和气液多相流的内容。

(3) 钻井水力学应用分析:包括井下波动压力计算、井控过程中的钻井液水力学计算、喷射钻井水力计算、合理钻井液密度设计、钻井水力参数计算与优化设计等。

钻井液的流体力学性质和流动原理是钻井水力学计算的基础,对应的钻井工程应用可概括为以下几方面:钻井液高效清岩与携岩上返问题、钻井水力能量合理分配与高效利用问题、与钻井液相关的安全高效钻井问题。这三方面与钻井液的功用紧密联系,并反映了钻井流体力学在钻井工程中的重要意义,具体如下:

(1) 优化钻井液性能。通过对钻井液密度分布、流变性能参数、钻井水力参数、井下温度场进行计算,以助于设计、调整和维护钻井液性能,优化钻井液的流动性和携岩能力。

(2) 高效利用水力能量。通过计算钻井液在各段流道中的压耗,优化设计钻井泵的排量、泵压、喷嘴直径等水力参数,使水力能量得以合理分配和高效利用。

(3) 实施安全钻井的基础。对钻井液液柱压力进行计算,以合理设计和调节钻井液密度,有效平衡地层压力;实施波动压力和井控过程中的水力学计算,合理设计环空上返速度,预防地层流体侵入、井壁失稳、沉砂卡钻等钻井复杂问题,由此来提高钻井效率,降低钻井成本。

(4) 实施钻井新技术的需要。井下压力分为地层压力和井筒内压力两部分。实施控压钻井和欠平衡钻井等钻井新技术都需对这两种压力分布进行计算确定,而井筒内的压力分布及变化是钻井流体力学的主要研究内容。

近年来,随着计算流体力学和高仿真计算机技术的发展以及新的流体力学原理和方法的引入,钻井流体力学也在深度和广度上取得了较大的进步。其总趋势是技术理论更加充实,计算结果更为精确,与实际更加吻合,理论和方法的适用面更为广阔。但也应看到,如何将不断发展的流体力学新理论、新方法用于解决钻井新技术新工艺中的新问题,仍是钻井流体力学研究的重要方向。

1.3 钻井流体力学的研究方法

流体力学按其研究方法通常可分为理论流体力学、实验流体力学和计算流体力学。作为流体力学在钻井工程中的应用,钻井流体力学的研究方法也可分为理论分析法、实验研究法和数值算法。

1.3.1 理论分析法

理论流体力学是基于流体介质的物理性质及其微团在运动过程中所表现出的力学特征,建立起描述流质微团运动的微分方程式,并以一定的初边问题理论求解出流体的运动参数、状态参数和这些参数间的定量关系。在钻井流体力学中,就是依据钻井工程实际状态对流体力学理论模型和基本方程进行简化,并根据工程实际确定初始条件和边界条件,最终求出具有钻井工程应用价值的解析解。

1.3.2 实验研究法

实验研究法是理论分析法的重要补充,可以最直接、最真实地认识丰富的流体流动现象,揭示其流动规律,为进一步的理论分析和建立物理模型提供充分的素材和依据。在钻井流体力学中,实验研究法是其重要组成部分,可分为室内实验和现场实验。此外,与流动过程有关

的运动、动力及状态参数的准确测定是实验流体力学的主要任务之一。在钻井工程中,需测定钻井液的密度、流速、黏度、井口压力、入口温度和出口温度等参数。这些测定的参数不仅是直观评价钻井液性能的主要手段,也为准确全面的理论分析和数值计算提供了初边值条件。

1.3.3 数值计算法

由于实际问题的复杂性,理论流体力学在寻求解析解时可能遇到极大的困难。随着现代计算机技术和数值计算方法的高速发展,计算流体力学在内容和方法上不断丰富和充实,诸如有限差分法、有限元素法、边界元法等方法在流体力学中得以广泛应用。例如,在钻井流体中,应用计算机技术和软件定量描述井底流场,对钻头水眼、钻柱接头等特殊流道处的钻井液流动进行精细分析。

以上三种方法紧密联系、互为补充。在实际钻井流体计算中,常常将上述三种方法结合起来,以更精确、更快捷地求解实际问题。

复习思考题

1. 试阐述钻井液在钻井过程中的主要作用。
2. 简述钻井循环系统的组成和各部分的特点。
3. 试阐述钻井液在钻井循环系统中的物质变化和能量变化。
4. 简述钻井流体力学的主要内容和研究意义。
5. 试阐述钻井流体力学的主要研究方法。

参考文献

- [1] 陈家琅,刘永建,岳湘安. 钻井液流动原理[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [2] 张景富. 钻井流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [3] 陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,2000.
- [4] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,1986.
- [5] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营:石油大学出版社,2000.

第 2 章 钻井液流变性与流变参数的确定

流变性是指物体在外力作用下发生形变和流动的特性。对于流体主要是流动性,反映了流体受外力作用时应力、形变、形变速率和黏度等之间的关系,研究物流体变性的科学称为流变学。流体的流变性通常用流变曲线(流变模式)和流变参数等描述,流变参数是表征流体流变特性的特征量。钻井液是非牛顿流体,流变性是其一项基本性能,良好的流变性能有助于清洗井底、提高钻速、携带岩屑、清洁井眼、悬浮岩屑与加重剂、保持井眼规则和保证井下安全等。另外,钻井液流变模式优选和流变参数的合理确定是判别井内流动状态、钻井水力参数优化、喷射钻井、欠平衡钻井、控压钻井等的重要基础。因此,研究钻井液流变性,选择合理的流变模式并确定流变参数是钻井流体力学的一项基本任务。本章重点介绍钻井工程常用流变模式、流变参数测量计算及流变模式优选方法。另外,还讨论影响钻井液流变性的因素、流变性能与钻井作业的关系等。

2.1 非牛顿流体及其分类

流体力学中一般都假定组成流体的最小物理单元是流体质点而不是流体分子,所谓流体质点,就是流体中宏观尺寸非常小而微观尺寸又足够大的任意一个物理实体,这样也就等于假定流体是由无穷多个质点组成的一种没有空隙的连续介质,这就是连续介质假设。

流体内部因分子力等的作用具有阻碍流体质点间产生相对位移(流动)的阻力,当流体流动时,这种阻力使流速不同的流层间发生内摩擦作用,产生内摩擦力(剪切应力)。流体流动时内部产生剪切应力的性质称为流体的黏性(Viscosity),最早对流体黏性进行描述的理论是牛顿内摩擦定律。

2.1.1 非牛顿流体概述

1. 牛顿内摩擦定律

牛顿经过实验研究,于 1686 年提出了确定流体流动时内摩擦力的“牛顿内摩擦定律”。如图 2.1.1 所示,流体以一定速度沿 x 轴方向流动,由于内摩擦力的作用,各流层间存在速度差。实验表明,流体内摩擦力的大小与流层间的接触面积和流速梯度成正比,而与接触面上的压力

无关,可用下式表示:

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = \mu A \gamma \quad (2.1.1)$$

其中 $\gamma = du/dy$

式中 T ——流体层间内摩擦力;
 A ——流体层间接触面积;

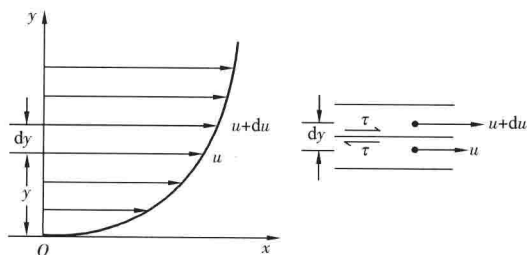


图 2.1.1 牛顿内摩擦定律

γ ——沿 y 方向的流速梯度或称剪切速率 (shear rate);

μ ——与流体有关的常数。

内摩擦力 T 与流体层间接触面积 A 的比值为剪切应力, 以 τ 表示。将由实验得到的式 (2.1.1) 推广到更普遍的流动中, 可得剪切应力与剪切速率的关系, 即牛顿内摩擦定律的表达式:

$$\tau = \mu \left| \frac{du}{dy} \right| = \pm \mu \frac{du}{dy} = \pm \mu \gamma \quad (2.1.2)$$

$\gamma > 0$ 时, 取“+”号; $\gamma < 0$ 时, 取“-”号, 以保持剪切应力永为正值。

由式 (2.1.2) 可看出, μ 等于单位剪切速率下的剪切应力, 反映的是流体黏性的大小, 称为流体的动力黏度, 简称黏度。国际单位制 (SI) 中, 动力黏度的单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 、 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒) 或 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ (毫帕·秒); 物理单位制 (CGS) 中, 动力黏度的单位是 $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 、 P (Poise, 泊) 或 cP (厘泊), $1\text{cP} = 0.01\text{P} = 1\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

2. 非牛顿流体的定义

通常将剪切应力与剪切速率之间的关系符合牛顿内摩擦定律式 (2.1.2) 的流体称为牛顿流体, 如水、酒精、轻质油、低分子化合物溶液等; 不符合牛顿内摩擦定律的流体统称为非牛顿流体, 如大多数钻井液、水泥浆、沥青、各种高分子溶液等。

不同类型的非牛顿流体, 其剪切应力与剪切速率之间具有不同的函数关系, 可用下面的通式表示:

$$\tau = \mu(\gamma) \gamma \quad (2.1.3)$$

式中 $\mu(\gamma)$ ——黏度函数, 与剪切速率、剪切变形持续时间、温度等有关。

这种描述流体剪切应力与剪切速率之间关系的函数式称为流变方程或本构方程, 又称流变模式。若用函数曲线表示流体剪切应力与剪切速率之间的关系, 则称为流变曲线, 如图 2.1.2 所示。对于非牛顿流体, 通常将其黏度函数 (即剪切应力与剪切速率的比值) 称为表观黏度 (Apparent Viscosity, AV) 或称视黏度, 常用 μ_a 表示:

$$\mu_a = \mu(\gamma) = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.1.4)$$

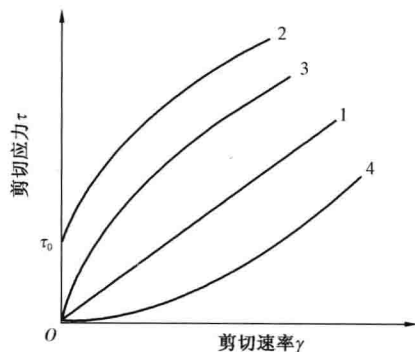


图 2.1.2 非牛顿流体的流变曲线

- 1—牛顿流体; 2—塑性流体;
- 3—假塑性流体; 4—膨胀性流体

2.1.2 非牛顿流体的分类

石油工程领域涉及的流体大多数属于非牛顿流体, 如原油、沥青、钻井液、固井水泥浆、完井液和压裂液等。非牛顿流体比较复杂, 通常分为以下几类。

1. 与时间无关的非牛顿流体

与时间无关的非牛顿流体又称为非时变性流体。这类流体的剪切应力仅与剪切速率有关, 与剪切持续时间无明显关系, 其流变方程通常写为:

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \text{ 或 } \dot{\gamma} = f(\tau) \quad (2.1.5)$$

一般又可分为以下两种类型。

1) 纯黏性流体

纯黏性流体与牛顿流体类似,只要施加很小的力即可流动。依据其表观黏度随剪切速率的变化情况,通常将这种流体分为假塑性流体和膨胀性流体两大类。假塑性流体的表观黏度随剪切速率的增加而减小,剪切速率越大,其表观黏度就越小,流动性也越好,这种特性称为剪切稀释性,这种流体的流变曲线如图 2.1.2 中曲线 3 所示。膨胀性流体的表观黏度随剪切速率的增加而增大,与假塑性流体相反,这种特性称为剪切增稠性,膨胀性流体的流变曲线见图 2.1.2 中曲线 4。大多数原油、细黏土悬浮液和部分钻井液呈现出假塑性流体的特性。膨胀性流体在工程中比较少见,一般为高浓度的含有不规则形状固体颗粒的悬浮液,如淀粉糊等。

2) 黏塑性流体

黏塑性流体简称塑性流体,是指在剪切应力超过一定数值后才开始流动的流体,即具有一定的屈服应力,流变曲线见图 2.1.2 中曲线 2。在石油工业中,大部分钻井液、沥青和油漆等都属于黏塑性流体。

2. 与时间有关的非牛顿流体

与时间有关的非牛顿流体又称为时变性流体。这类非牛顿流体的黏度函数不仅与剪切速率有关,而且与剪切持续时间有关,大致可分为触变性流体和震凝性流体两类。在一定的剪切速率下,触变性流体的表观黏度随剪切时间的增加而减小,表现出“越搅越稀”的特点,而震凝性流体则相反,在一定的剪切速率下表观黏度随剪切时间的增加而增大,即“越搅越稠”。三类流体表观黏度随时间的变化情况如图 2.1.3 所示。某些黏土钻井液、低温原油和某些高聚物熔体、溶液属于触变性流体。震凝性流体在工程中不常见,造型石膏糊状物是震凝性流体的典型例子,摇动石膏糊大大地缩短了固化时间,使石膏很快成型。

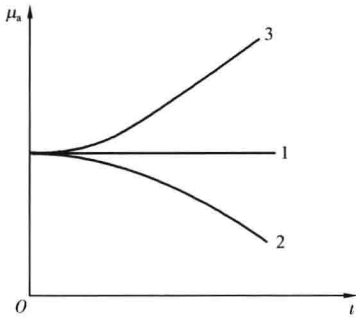


图 2.1.3 三类流体表观黏度随时间的变化
1—牛顿流体;2—触变性流体;3—震凝性流体

3. 黏弹性非牛顿流体

黏弹性非牛顿流体就是具有黏性同时又具有弹性的流体。在定常剪切流场中,这种流体在外力作用下发生形变或流动,当外力消除后,它的形变会随着时间的顺延而恢复或部分恢复。黏弹性流体的流变性往往比较复杂,许多问题至今仍未得到很好的认识。

2.2 钻井液流变模式

实际钻井液种类繁多,即便是相同体系的钻井液,因添加的处理剂不同,其流变性也会产生较大的差异。实际中很难用统一的流变模式描述所有类型钻井液的流变性,因此先后提出了众多的钻井液流变模式。钻井工程中应用时间最长的是宾汉模式和幂律模式,此外赫谢尔—巴尔克莱模式(简称赫—巴模式)、卡森模式、罗伯逊—斯蒂夫模式(简称罗—斯模式)应用也较普遍。近几年提出的 Sisko 模式、四参数模式、多项式模式等也开始在钻井工程中得到应用。

2.2.1 实际钻井液的流变曲线

图 2.2.1 给出了实际钻井液两种不同类型的流变曲线。第 1 种流变曲线通过原点,这种类型的钻井液流动特点与牛顿流体类似,即施加很小的剪切应力就会流动,因此属于假塑性流体,其表观黏度(流变曲线切线的斜率)随剪切速率的增加而减小,具有剪切稀释性。第 2 种流变曲线在剪切应力轴上有一定的截距,即这种类型的钻井液具有一定的屈服应力,施加的剪切应力超过屈服应力才会流动,因此属于黏塑性流体,同样具有剪切稀释性。实际钻井液的流变曲线大都属于这两种曲线类型中的某一种。

屈服应力定义为使黏塑性流体开始流动的最低剪切应力,钻井工程中通常用静切应力 τ_0 (又称静切力)来表示钻井液屈服应力的大小。钻井液主要由黏土等固相颗粒、液相及处理剂组成,由于固相颗粒形状不规则和表面性质不均匀等,静止时,固相颗粒间易相互连接形成连续的空间网架结构(即凝胶结构),这一过程称为絮凝。这种空间网架结构具有一定的强度,称为凝胶强度(Gel Strength,GS),要使钻井液开始流动,就必须施加一定的剪切应力克服其凝胶强度,即破坏絮凝时形成的空间网架结构,因此又把静切应力称为凝胶强度。

钻井液内部形成的凝胶强度大小与钻井液的静止时间有关,静止时间越长,凝胶强度就越大,因此静切力也随静止时间而发生变化。通常采用初切力和终切力来表示静切力随时间的变化情况。初切力是指钻井液经过充分搅拌后,静置 10s(或 1min)测得的静切力,也称为初切;终切力是钻井液经过充分搅拌后,静置 10min 测得的静切力,也称为终切。静切力的大小关系到停止循环时钻井液悬浮岩屑和加重材料的能力,但是静切力不能太大,否则容易造成开泵困难或者憋漏地层。

由于钻井液静切力的大小与静止时间有关,不同静止时间后测量的低剪切速率下的实际流变曲线会有差异,为了真实地反映循环过程中钻井液的实际流变性,要求在进行流变性测量前要对钻井液进行充分搅拌。

不同钻井液的流变曲线可以采用不同的流变模式来描述,下面介绍钻井工程中常用的钻井液流变模式。

2.2.2 宾汉模式

宾汉模式由宾汉(Bingham)于 1922 年提出,是最早用于描述非牛顿流体流变曲线的流变模式之一,其流变方程为:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2.2.1)$$

式中 τ_0 ——屈服值(Yield Point, YP),也称动切力;

μ_p ——塑性黏度(Plastic Viscosity, PV)。

流变方程符合宾汉模式的流体称作宾汉塑性流体(简称宾汉流体),流变曲线是一条有一定截距的直线,如图 2.2.2 所示,其斜率为塑性黏度,截距为屈服值。

对于钻井液,塑性黏度反映了在层流情况下钻井液中网架结构的破坏与恢复处于动平衡时,固相颗粒之间、固相颗粒与液相之间以及连续液相内部内摩擦作用的强弱。它的大小与钻井液中固相含量、固相颗粒的形状和分散程度、表面润滑性以及液相本身的黏度有关。

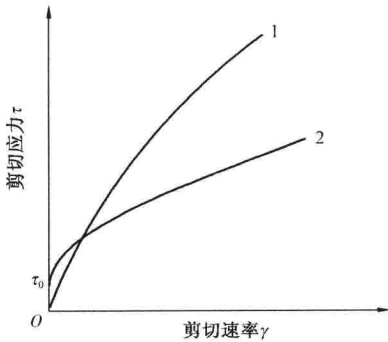


图 2.2.1 实际钻井液两种不同类型的流变曲线

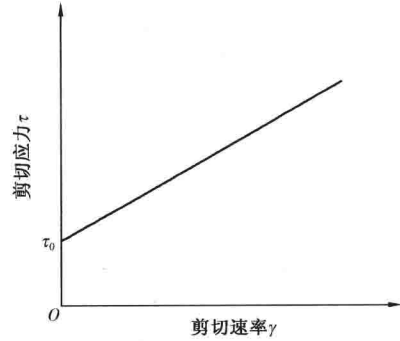


图 2.2.2 宾汉流体流变曲线

屈服值指的是流动时需要克服的与塑性黏度和剪切速率无关的那一部分定值剪切应力，反映了处于层流状态时钻井液中网状结构的强度。

宾汉流体表观黏度的表达式为：

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_0}{\gamma} \quad (2.2.2)$$

表观黏度反映了流体在流动过程中所表现出的总黏度。对于钻井液来说，它既包括塑性黏度所反映的那部分黏度，又包括在一定剪切速率下颗粒之间或高分子聚合物之间形成空间网架结构所引起的黏度。由式(2.2.2)可以看出，宾汉流体的表观黏度随剪切速率的增大而降低，即具有剪切稀释性。

钻井工程中常用动切力与塑性黏度的比值(简称动塑比)来表示钻井液剪切稀释性的强弱，动塑比越大，钻井液的剪切稀释性越强。为了有效地携带岩屑，要求钻井液具有一定的动塑比。

宾汉模式是一个直线方程，在低剪切速率下与钻井液的实际流变曲线偏差较大，用其计算的剪切应力往往大于实际的剪切应力，在较高剪切速率下宾汉模式能够比较好地描述部分类型钻井液的流变曲线。宾汉模式因其简单得到了广泛应用。

2.2.3 幂律模式

幂律模式由 Ostwald 于 1925 年提出，也是最早用于描述非牛顿流体流变曲线的流变模式之一，其流变方程为：

$$\tau = K\gamma^n \quad (2.2.3)$$

式中 K ——稠度系数；

n ——流性指数，当 $n < 1$ 时为假塑性流体， $n > 1$ 时为膨胀性流体。

流变方程符合幂律模式的流体称作幂律流体，流变曲线为一条过原点的曲线，类似于图 2.1.2 中的曲线 3 和 4，也是应用很广的流变模式之一，通常用来描述没有屈服值或屈服值非常小的钻井液的流变曲线。

流性指数 n 反映的是流体在一定剪切速率范围内非牛顿性的强弱，对于 $n < 1$ 的假塑性流体， n 值越低，流体的非牛顿性越强。钻井液的 n 值一般均小于 1，降低 n 值有利于岩屑的携