



国外油气勘探开发新进展丛书

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU



APPLIED DRILLING CIRCULATION SYSTEMS HYDRAULICS, CALCULATIONS, AND MODELS

实用钻井循环系统 ——水力学模型和计算

[美] 郭柏云 刘格非 著
何保生 曹砚锋 范志利 等译

石油工业出版社

TE24

8

国外油气勘探开发新进展丛书(十一)

实用钻井循环系统

——水力学模型和计算

(美)郭柏云 刘格非 著

何保生 曹砚锋 范志利 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书凝聚了作者多年的教学和工作经验,分3大部分10章对液体钻井系统、气体钻井系统和欠平衡钻井系统进行介绍,重点阐述了工程基本原理在钻井循环系统设计和优化方面的应用,并通过大量实例来说明解决问题的原理与应用。本书为钻井工程师提供了一个可以设计、分析和操作钻井循环系统的指导手册。

本书主要适合现场钻井工程师和高等院校相关专业高年级大学生及研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

实用钻井循环系统:水力学模型和计算/(美)郭柏云,(美)刘格非著;何保生等译.
北京:石油工业出版社,2015.8

(国外油气勘探开发新进展丛书.第11辑)

书名原文:Applied drilling circulation systems;hydraulics,calculations,and models

ISBN 978-7-5183-0732-6

I. 实…

II. ①郭…②刘…③何…

III. ①钻井液循环系统-水力模型 ②钻井液循环系统-水力计算

IV. TE24

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第128943号

Applied Drilling Circulation Systems;Hydraulics,Calculations and Models,1st edition

Boyun Guo, Ph. D., Gefei Liu

ISBN:978-0-12-381957-4

Copyright © 2011 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2014 by Elsevier(Singapore) Pte Ltd.

All rights reserved.

Published in China by Petroleum Industry Press under special arrangement with Elsevier

(Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding

Hong Kong SAR, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation

of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier(Singapore) Pte Ltd. 授予石油工业出版社有限公司

在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。

未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

著作权合同登记号 图字:01-2013-9046

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:www.petropub.com

编辑部:(010)64523535 图书营销中心:(010)64523633

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

2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.5

字数:316千字

定价:75.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《国外油气勘探开发新进展丛书(十一)》

编 委 会

主 任：赵政璋

副 主 任：赵文智 张卫国

编 委：(按姓氏笔画排序)

马 纪 冯 定 吕 鹏 刘玲莉

刘德来 李 勇 李洪波 何保生

周家尧 章卫兵

本书翻译组

组 长：何保生

副 组 长：曹砚锋 范志利

成 员：（按姓氏笔画排序）

马 良 王 彬 计 勇 冯 明

闫新江 何 松 岳家平 郑清华

郝 良 段玉超 贾宗文 徐国贤

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺,推动中国石油上游业务技术进步,本着先进、实用、有效的原则,中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量,对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进,并翻译和出版。

从2001年起,在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上,从生产需求出发,通过优中选优已经翻译出版了10辑50多本专著。在这套系列丛书中,有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平,有些非常具有实用性,也是生产中所亟需。这些译著发行后,得到了企业和科研院校广大科研管理人员和师生的欢迎,并在实用中发挥了重要作用,达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。部分石油单位统一购买并配发到了相关的技术人员手中。同时中国石油天然气集团公司也筛选了部分适合基层员工学习参考的图书,列入“千万图书下基层,百万员工品书香”书目,配发到中国石油所属的4万余个基层队站。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可,三次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”,形成了规模品牌,产生了很好的社会效益。

2014年,在前10辑出版的基础上,经过多次调研、筛选,又推选出了国外最新出版的6本专著,即《油气勘探与生产——储量、成本及合约》、《产量递减曲线分析》、《实用钻井循环系统——水力学模型和计算》、《管道风险管理指南——理念、技术及资源》、《管线规划及现场施工手册》、《泵和泵站实用手册》,以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中,中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校人员,使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版,并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气集团公司副总经理

译者前言

在钻井工程中,钻井循环系统是至关重要的一环,不仅影响着钻井作业的进度,更影响着井眼的施工质量和作业安全。因此,根据不同钻井循环系统的特点,安全高效地完成油气井钻井作业是每个钻井工程师的追求目标。

本书从钻井循环系统方面的基础知识出发,系统地介绍了液体、气体和欠平衡钻井循环系统保证安全、高效钻进时的优化设计要求,并详细介绍了以上三种循环系统中水力学模型及关键参数的计算方法及应用。本书包含了丰富的计算实例,给设计人员和现场工程人员提供了参考和指导。

本书的翻译、校审工作由中海油研究总院多年从事海上钻完井工作的专家和技术人员承担。参加本书翻译的人员有:第1章1.1—1.3,郝良;第1章1.4—1.5、第2章2.1—2.2,何松;第2章2.3—2.4,岳家平;第3章3.1—3.3,徐国贤;第3章3.4—3.6、第4章4.1—4.2,冯明;第4章4.3—4.4,计勇;第5章、第6章6.1—6.2,贾宗文;第6章6.3—6.6,郑清华;第7章,马良;第8章、第9章9.1,王彬;第9章9.2,闫新江;第9章9.3—9.4,段玉超;第10章,范志利。本书的校审人员有何保生、曹砚锋、范志利。

由于译者水平有限,书中难免会存在不足及疏漏之处,恳请读者指正。

译者

2015年7月

前 言

过去十年,钻井循环系统在油气工业中的应用有了显著的发展。最明显的变化是气体钻井、欠平衡钻井以及传统的液体钻井系统都并入了钻井循环系统。过去几年中,笔者在高等院校和油气行业中讲授钻井工程课程的过程中,意识到很有必要写一本关于现代钻井经验的书。目前已有的书中都没有如何运用工程原理来解决钻井循环系统中频繁遇到的难题,这激发了笔者编写这本书的热情。

本书主要适合现场钻井工程师和高年级在校大学生以及研究生使用。笔者没有简单地照抄其他书上的内容,该书凝聚了笔者多年来在油气行业 and 高校中教授钻井水力学、气体钻井、欠平衡钻井课程所获得的经验。该书的主要目的是给钻井工程师提供一本用于设计、分析和操作钻井循环系统的指导手册。

本书涵盖了钻井循环系统的全部范围,根据技术的发展,包含 3 部分共 10 个章节。

第 1 部分包括 4 章,包含钻井液基础,作为对初级钻井工程师和在校学生的第一课。第 1 章介绍了钻井液循环系统中使用的设备,第 2 章介绍了钻井液水力学基础,它是钻井泵和钻井液水力工程选择和优化的基础,第 3 章介绍了钻井泵选型的详细过程,第 4 章介绍了钻井液水力工程优化技术。

第 2 部分包括 3 章,主要介绍气体钻井系统的概念、设计和操作的原则。第 5 章介绍了气体钻井系统使用的设备,第 6 章介绍了气体压缩机选型的详细过程,第 7 章为气体钻井作业提供指导。

第 3 部分包括 3 章,主要介绍欠平衡钻井系统。第 8 章介绍了欠平衡钻井系统中的设备,第 9 章介绍了气体流量和液体流量优化程序,第 10 章为欠平衡钻井作业提供指导。

本书的内容在深度上需要省略什么是最大的挑战。笔者相信很多书已经介绍了钻井循环系统方面的基础知识。针对本书可能出现的一些不足,在每章的最后,本书列出了所参考的书目,以便读者能够查阅其他有关信息来进行讨论。

本书重点介绍了工程原理在钻井循环系统设计和优化方面的应用,没有对原理进行深入的讨论。本书没有数学模型的推导,而是通过实例来说明解决问题的原理与应用。一些简单问题不涉及计算迭代过程,而一些复杂问题需要运用计算机程序计算解决,计算机程序可以从出版商的网站上进行下载。本书与计算机程序的结合创建了一个完美的工具箱,它们极大地提高了钻井工程师的日常工作效率。所有的计算机程序编写在微软 Excel 的电子表格中,可在大多数计算机平台上运行。这些表格方便实用,计算精确。本书使用美制

单位和 SI 单位,在电子表格程序中可以选择美制单位或 SI 单位。

本书是在大量文献的基础上完成的,包括这些年在路易斯安那大学拉斐特分校和 Pegasus Vertex 公司工作积累的报告和论文,笔者非常感谢学校和公司允许使用这些材料。特别感谢雪佛龙美国公司石油工程领域的教授对编辑该书提供的帮助。同时我们也感谢壳牌美国公司的 Yin Guoqiang 先生对该书审稿。本书凝结了笔者和审稿人的经验,希望对石油天然气行业的钻井工程师有参考价值。

郭柏云博士

雪佛龙特聘教授(石油工程)

路易斯安那大学拉斐特分校

目 录

第 1 部分 液体钻井系统

第 1 章 钻井液循环系统设备	(3)
1.1 钻井液循环系统简介	(3)
1.2 钻井泵	(3)
1.3 钻柱	(5)
1.4 固控系统	(7)
1.5 小结	(12)
参考文献	(12)
思考题	(12)
第 2 章 钻井液水力学基础	(13)
2.1 简介	(13)
2.2 钻井液性能	(13)
2.3 水力学模型	(18)
2.4 小结	(41)
参考文献	(41)
思考题	(41)
第 3 章 钻井泵	(43)
3.1 简介	(43)
3.2 钻井液排量要求	(43)
3.3 泵压要求	(46)
3.4 功率要求	(50)
3.5 钻井泵的排量	(52)
3.6 小结	(55)
参考文献	(55)
思考题	(55)
第 4 章 钻井液水力优化	(56)
4.1 简介	(56)
4.2 水力优化准则	(56)

4.3 水力程序优化设计 (59)

4.4 小结 (72)

参考文献 (73)

思考题 (73)

第2部分 气体钻井系统

第5章 气体钻井设备 (77)

5.1 简介 (77)

5.2 地面设备 (77)

5.3 井下设备 (80)

5.4 小结 (81)

参考文献 (82)

思考题 (82)

第6章 气体压缩机 (83)

6.1 简介 (83)

6.2 气体动力学 (83)

6.3 注气速度要求 (89)

6.4 气体注入压力要求 (95)

6.5 设备功率要求 (99)

6.6 小结 (100)

参考文献 (100)

思考题 (101)

第7章 气体钻井 (103)

7.1 简介 (103)

7.2 气体钻井程序 (103)

7.3 问题和解决方法 (104)

7.4 小结 (112)

参考文献 (113)

思考题 (113)

第3部分 欠平衡钻井系统

第8章 欠平衡钻井设备 (117)

8.1 简介 (117)

8.2 地面设备 (117)

8.3 井下设备 (119)

8.4 小结 (120)

参考文献 (120)

思考题 (120)

第9章 气液流量 (121)

9.1 简介 (121)

9.2 欠平衡钻井中的多相流 (121)

9.3 气—液流量组合窗口 (135)

9.4 小结 (145)

参考文献 (145)

思考题 (147)

第10章 欠平衡钻井作业 (148)

10.1 简介 (148)

10.2 充气钻井 (148)

10.3 泡沫钻井 (154)

10.4 小结 (159)

参考文献 (159)

思考题 (159)

附 录

附录 A 单位转换系数表 (163)

附录 B 空气钻井携带固体和液体的最小气体注入流量 (164)

附录 C API 钻铤质量 (lb/ft) (169)

附录 D API 钻杆尺寸数据 (170)

附录 E API 套管尺寸数据 (171)

第 1 部分 液体钻井系统

在钻油气井、水井以及地质钻孔和采矿钻孔时,通常使用液体作为循环流体。该类型的钻井液通常是黏土及其他材料在水中的悬浮液,因此在现场也被称为泥浆。它的密度范围通常为 $8.33 \sim 18.33 \text{ lb/gal}$ (相对密度 $1.0 \sim 2.2$),用于钻进正常或异常地层压力梯度(大于 0.433 psi/ft 或 0.01 MPa/m)的地层。因为井底压力大于地层孔隙压力,因此,钻井液钻井是一个过平衡钻井过程。与气体钻井和欠平衡钻井(见第 2 部分和第 3 部分)相比,钻井液钻井可以钻进各种地层,并能更好地控制地层流体,保持井眼稳定。

第 1 部分介绍钻井液循环系统的基本知识和优化钻井液水力参数,获得最大的机械钻速的方法。前 4 章的主要内容如下:

第 1 章 钻井液循环系统设备;

第 2 章 钻井液水力学基础;

第 3 章 钻井泵;

第 4 章 钻井液水力优化。

第 1 章 钻井液循环系统设备

1.1 钻井液循环系统简介

图 1.1 是一个典型的钻井液循环系统 (Lyons 等, 2009)。钻井液循环过程如下: (1) 从钻井液罐流入钻井泵; (2) 经钻井泵流经立管、方钻杆到钻柱, 钻柱由钻杆及井下钻具组合 (BHA) 组成; (3) 通过钻柱到达钻头; (4) 经钻头喷嘴后沿钻柱与井眼的环空 (包括裸眼段和套管段) 到达地面; (5) 通过固控设备流入钻井液池。固控设备包括振动筛、除气器、旋流器 (除砂器和除泥器) 和离心机。除砂器和除泥器集成一个整体单元, 被称为钻井液净化器。本章简要介绍了钻井液循环系统的设备。

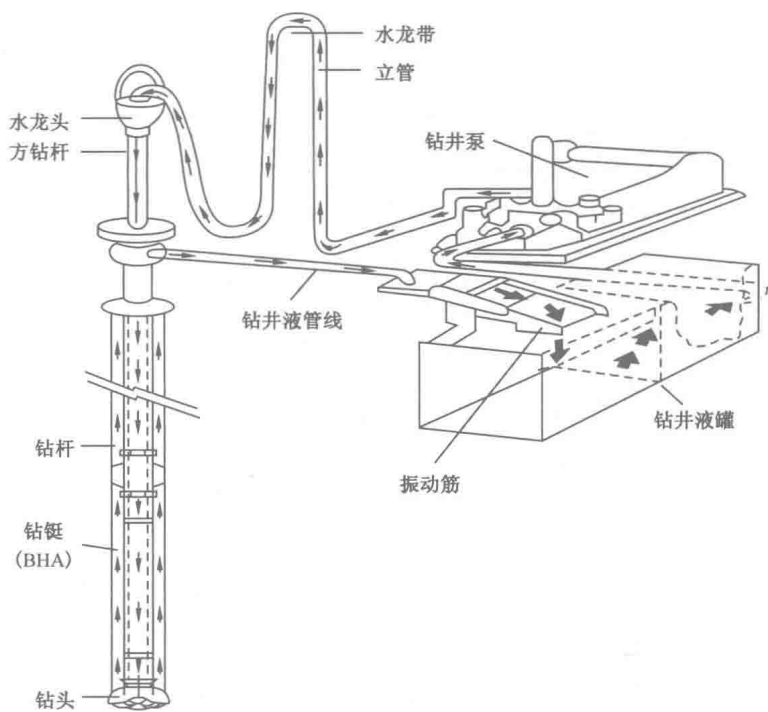


图 1.1 典型的钻井液循环系统

1.2 钻井泵

钻井泵是钻井液循环系统的核心。钻井泵是往复式活塞泵, 广泛用于油气井钻井。往复式容积泵的优点是可泵送具有研磨性的高固相含量液体, 易于操作和维护, 通过改变缸套和活塞直径可实现压力和排量大范围的调整。

活塞冲程可分为单冲程和双冲程两种类型。双缸双冲程的泵被称为双缸泵(图 1.2),三缸单冲程的泵被称为三缸泵(图 1.3)。三缸泵比双缸泵更轻、更紧凑,输出的压力波动不大,操作简单,价格便宜。由于这些特点,现场大多使用三缸泵。通常情况下,双缸泵可以提供更高的排量,而三缸泵可以提供更高的工作压力。然而,对于功率固定的泵,可以通过改变泵的缸套尺寸来调节排量和工作压力,图 1.4 所示为不同类型的缸套。改变电机的转速,在一定范围内也可以影响钻井泵排量。



图 1.2 双缸泵(来自美国)

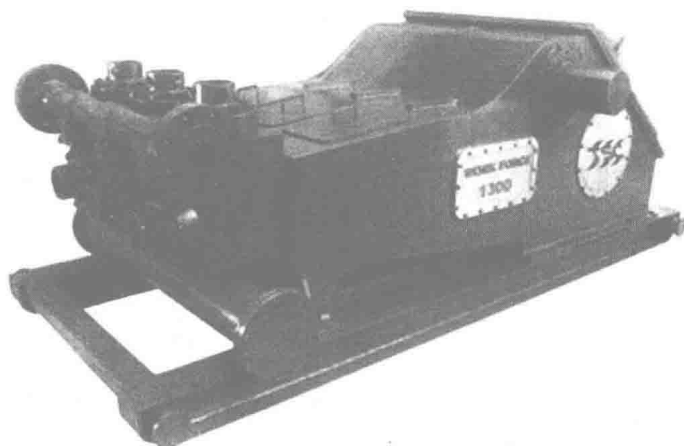


图 1.3 三缸泵

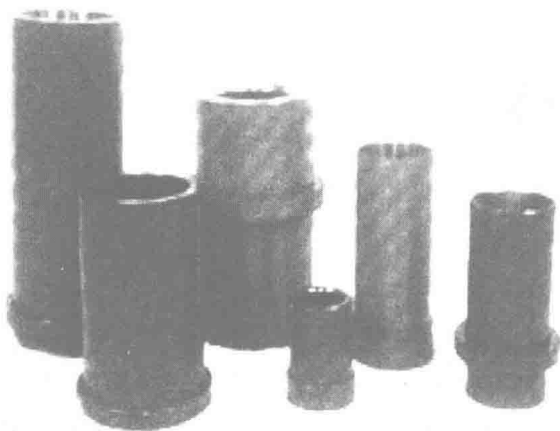


图 1.4 泵缸套

1.3 钻柱

图 1.5 是石油和天然气行业使用的钻柱,本节根据入井顺序对钻柱组成进行描述。钻头安装在钻柱的底部,石油和天然气工业中使用的钻头有三种类型:刮刀钻头、牙轮钻头(滚动切削钻头)和 PDC 钻头。图 1.6 是两个三牙轮钻头,一个是铣齿钻头,一个是镶齿钻头。图 1.7 是三牙轮钻头的截面图。大多数钻头设计安装有不同尺寸的喷嘴。钻井液高速通过钻头喷嘴,清洁钻头切削齿,清除井底岩屑。图 1.8 是不同类型的钻头喷嘴,这些喷嘴由硬质金属组成,可抗冲蚀。钻头喷嘴直径使用 $\frac{1}{32}$ in 表示。例如,如果钻头喷嘴为“12 - 13 - 13”,这表示该钻头包含一个直径为 $\frac{12}{32}$ in 和两个直径为 $\frac{13}{32}$ in 的喷嘴。奇数号喷嘴尺寸编号不大于 20。

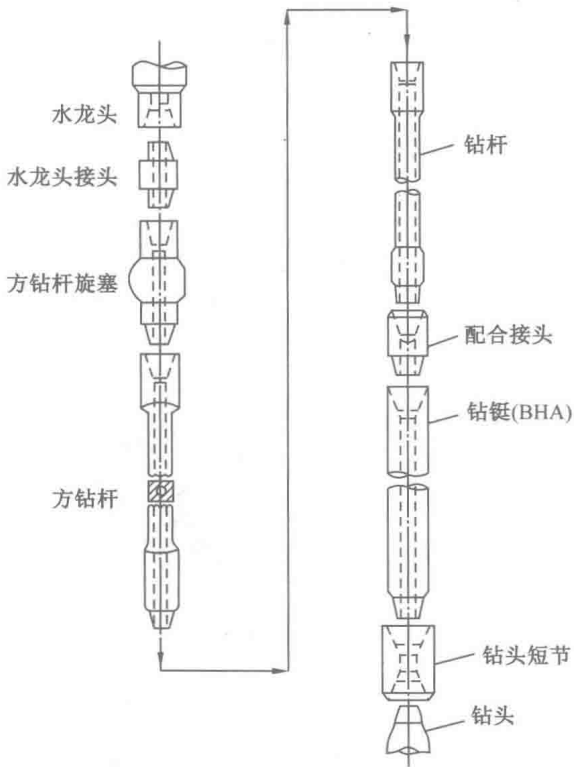


图 1.5 石油工业中使用的钻柱

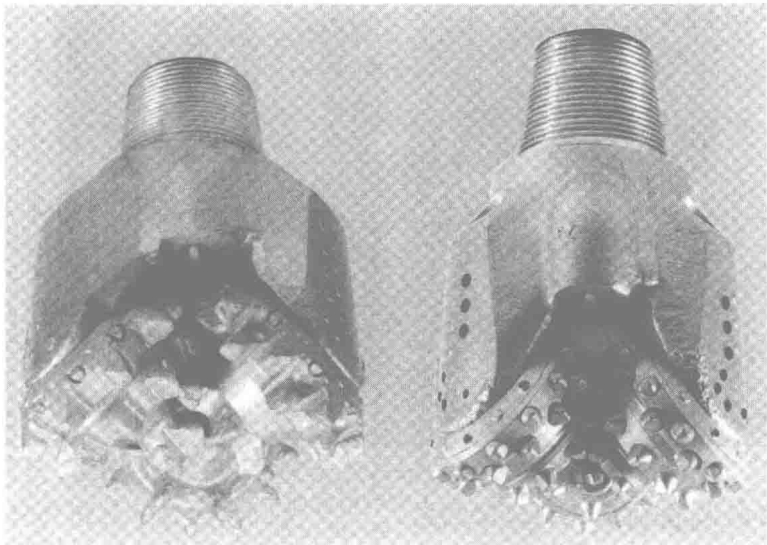


图 1.6 石油工业中典型的三牙轮钻头

钻头通过接头与钻铤相连,该接头较短,壁较厚,两端带有内螺纹,用于保护钻铤底部螺纹,由于它与钻头频繁连接会造成磨损。钻铤壁较厚,给钻头施加钻压,使钻头切削齿能够切