



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



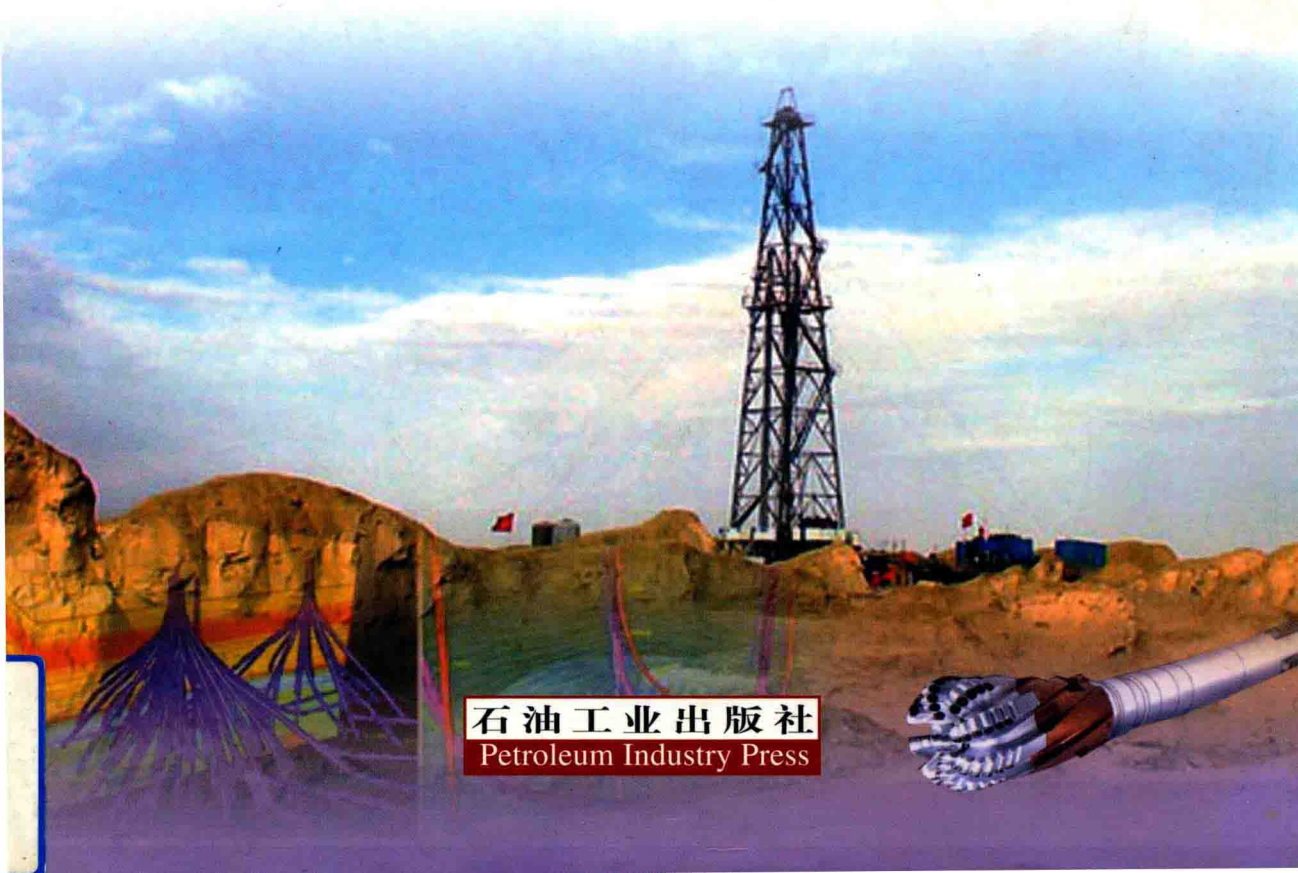
面向 21 世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

钻井与完井工程

(第二版)

陈 平 等编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向 21 世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

钻井与完井工程

(第二版)

陈 平 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对石油工程专业学生的专业知识结构要求,系统介绍了石油钻井与完井工程的基本原理及工艺技术。本书不仅注意了钻完井理论的系统性和成熟性,又兼顾了相关理论和技术的最新发展,还注重了工程的实践性,理论联系实际,增强读者的工程实践意识。全书共十章,包括绪论、井身结构设计、钻井液、钻进工艺、钻井过程压力控制、井眼轨道设计与轨迹控制、固井、完井、储层保护和环境保护。

本书既可作为高等院校石油工程专业学生的教学用书,又可供相关专业学生和从事石油勘探与开发工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钻井与完井工程/陈平等编著. —2版.

北京:石油工业出版社,2011.6

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

(高等院校石油天然气类规划教材)

ISBN 978-7-5021-8508-4

I. 钻…

II. 陈…

III. ①油气钻井—高等学校—教材

②完井—高等学校—教材

IV. TE2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第119574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:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523580 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

2011年6月第2版 2012年12月第8次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:24.25

字数:619千字

定价:40.00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

第二版前言

作为石油工程专业的主要专业课教材,《钻井与完井工程》第一版自2005年出版以来,在石油高等院校得到了广泛使用。在使用过程中,不少专家、老师和学生对本书提出了宝贵的修订建议和意见。在此基础上,我们结合近年来钻井与完井工艺的新发展,以及课堂教学的反馈,对本书进行了如下修订:

(1) 补充了反映最新技术的内容,如增加了“注水泥液体的性能匹配设计”。

(2) 突出了经典理论和基础,去掉了一些过于复杂且不便于读者理解的内容,如:水力参数计算中,目标函数的表征方式回归到单一指标的目标函数;机械参数计算中,用二元钻速方程替换了多元钻速方程。

(3) 加强了与钻井完井工程实际的联系,同时采用了目前最新的相关标准和法规。

(4) 由于地层压力的概念贯穿全书,故对在第一版中未阐明的内容进行了修改和加强。

(5) 将一些较深入的系统理论调整到附录中,既便于一般同学更流畅地学习,也给学有余力的学生预留了学习空间。

(6) 对原书中的有误部分进行了修改,文字内容进行了修饰。

参加本次编写和修订的有:西南石油大学陈平(第一、六章)、周开吉和袁骥骥(第二章第一~四节、第五章)、蒲晓林(第三章)、刘绘新(第四章)、邓建民(第七章)、熊友明(第八章、第二章第五节)、崔茂荣(第九章)、邓建民和余婷婷(第十章)。陈平完成了全书的统稿。施太和教授负责了本书的主审工作。

本次再版,瑕疵得到修正,内容更加严谨,内容涵盖了现代钻井与完井工程基本知识。希望本书的再版,能给读者的学习带来方便。

由于编者业务水平的限制,本书的不足和错漏仍将难免,希望广大读者随时批评指正。借本书再版的时机,向关心和使用本书的读者表示感谢。

编者

2011年5月

第一版前言

《钻井与完井工程》是石油工程专业学生的主要专业课教材。本教材是在编者多年教学讲稿的基础上，参考国内外相关教材、专著和文献编写完成的。

本教材的编写遵循了以下原则：

(1) 教材主要讲述钻井和完井工程的基本工艺原理及工艺技术。针对学科和工程技术的发展，除了讲述传统的钻井技术外，强化了完井工程部分的内容。

(2) 注意引入国内外最新工艺技术与系统理论，学科交叉，如储层保护技术、环境保护等。

(3) 教材的编写既突出成熟的理论，又介绍了相关理论和技术的发展，有利于读者对此有一个全面的了解。

(4) 注意了工程实践环节的阐述，使理论联系实际，增强读者的工程意识。

(5) 本书内容应在 60 学时左右讲完。

本书除了用作高等院校石油工程专业学生的教学用书外，亦可供相关专业学生和从事石油勘探与开发工作的工程技术人员参考。

参加编写本教材的有西南石油学院的陈平（第一、六章）、周开吉（第二章第一、二、三、四节及第五章）、蒲晓林（第三章）、刘绘新（第四章）、邓建民（第七、十章）、熊友明（第八章、第二章第五节）、崔茂荣（第九章）。陈平教授完成了本教材的统稿。四川石油管理局教授级高级工程师曾时田、西南石油学院教授施太和主审了本书。

本书已经过五届石油工程专业的学生使用，在使用过程中得到了广大师生的鼓励和支持，特别是使用该教材的付建红、何世明、王林、石晓兵、袁骥骥、林元华等老师提出了许多宝贵意见，在此基础上编者对教材内容做了修改。

由于编者业务水平的限制，本书定有许多不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2005 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 钻井与完井工程在石油工业中的地位	1
第二节 钻井与完井工程的主要内容	2
第三节 钻井与完井工程技术的发展	5
第二章 井身结构设计	12
第一节 地层压力理论及预测方法	12
第二节 地层破裂压力预测方法	21
第三节 井眼坍塌压力预测方法	25
第四节 井身结构设计	27
第五节 生产套管尺寸设计	41
习 题	45
参考文献	46
第三章 钻井液	47
第一节 钻井液的功用	47
第二节 钻井液的组成和类型	47
第三节 钻井液的工艺性能	50
第四节 钻井液常用原材料和处理剂	74
第五节 钻井液体系	82
习 题	101
参考文献	102
第四章 钻进工艺	103
第一节 钻进过程的系统分析	103
第二节 地层岩性	107
第三节 钻头	113
第四节 水力参数	124
第五节 机械参数	136
第六节 钻具	145
习 题	158
参考文献	159
第五章 钻井过程压力控制	160
第一节 井控的基本知识	160
第二节 井内波动压力预测方法	163
第三节 溢流及井喷控制	168
第四节 欠平衡钻井	185
习 题	194
参考文献	195

第六章 井眼轨道设计与轨迹控制	196
第一节 概述.....	196
第二节 定向井井眼轨道设计.....	198
第三节 井眼轨迹测量计算.....	208
第四节 井眼轨迹控制.....	222
习 题.....	235
参考文献.....	236
附录 A 求解多稳定器钻具组合力学性能的纵横弯曲连续梁法简介	237
第七章 固井	241
第一节 <u>套管柱强度设计</u>	242
第二节 油井水泥.....	261
第三节 <u>注水泥</u>	266
第四节 固井质量检测 and 评价.....	275
习 题.....	277
参考文献.....	279
附录 B 同时考虑抗挤、抗内压、抗拉的套管柱强度设计步骤及设计示例	280
第八章 完井	289
第一节 完井工程的基本概念.....	289
第二节 基本完井方法.....	290
第三节 完井方法的选择.....	305
第四节 完井井口装置及完井管柱.....	313
第五节 投产措施.....	320
习 题.....	324
参考文献.....	325
第九章 储层保护	326
第一节 储层损害的室内评价技术.....	326
第二节 钻井过程中的储层保护技术.....	333
第三节 完井过程中的储层保护技术.....	344
习 题.....	351
参考文献.....	352
第十章 环境保护	353
第一节 环境管理措施及要求.....	353
第二节 前期工程环境管理.....	356
第三节 钻井、完井施工中的环境保护.....	362
习 题.....	380
参考文献.....	381

第一章 绪 论

第一节 钻井与完井工程在石油工业中的地位

石油和天然气作为世界上的主要能源和优质化工原料，是当今社会经济发展中重要的生产力要素之一。目前，世界能源消费的结构比例为：石油 40%、天然气 22.9%、煤炭 27.4%、核能 7.1%、水电 2.5%，石油和天然气占到世界能源消费的 62.9%。一个国家对石油和天然气的拥有量和占有量已成为综合国力的重要标志。石油在一个国家的国民经济中的地位和作用是非常重要的，它对于经济、政治、军事和人民生活都有极大的影响。

石油工业是从事石油勘探、石油开发和石油加工的能源和化工原材料生产部门。钻井是石油勘探、石油开发的一个非常重要的环节和手段。在世界范围内，油田在石油勘探阶段的总投资中钻井的费用达到 55%~80%，在石油开发阶段的总投资中钻井的费用超过 50%，从中可见钻井工作所占的比重。一个国家在钻井技术上的进步程度，往往反映了这个国家石油工业的发展状况，因此，许多国家竞相宣布本国钻了世界上第一口油井，以显示他们在世界石油工业发展史曾经做出的贡献和所处的地位。

石油勘探有多种方法，但钻井是最重要也是最终判断地下是否有油的手段。当一个地质圈闭经钻探并获得了有工业开采价值的油气流后，就算找到了一个油田，下一步的工作就是进一步搞清楚这个油田的具体范围和出油能力。因此，在钻探过程中发现油气后，就应立即查清油层的层数、深度、厚度，并要搞清油层的岩性和其他物理性质，还要对油层进行油气生产能力的测试和原油性质的分析，然后再扩大钻探，进一步探明圈闭含油气情况，算出地下的油气储藏量有多少，这样，对一个油田来说，它的初步勘探工作才算结束。通过地质勘探，发现有工业价值的油田以后，就可以着手准备开发油田的工作了。

油田开发是指在认识和掌握油田地质及其变化规律的基础上，在油藏上合理地分布油井并确定投产顺序，以及通过调整采油井的工作制度和其他技术措施，把地下石油资源采到地面的全过程。油田从详探到全面投入开发的工作顺序一般为：

- (1) 在见油的构造带上布置探井，迅速控制含油面积；
- (2) 在已控制的含油面积内打资料井，了解油层的特征，分区分层试油，求得油层产能参数；
- (3) 开辟生产试验区，进一步掌握油层特性及其变化规律；
- (4) 根据岩心、测井和试油、试采等各项资料进行综合研究，作出油层分层对比图、构造图和断层分布图，确定油藏类型；
- (5) 进行油田开发设计；
- (6) 根据最可靠、最稳定的油层钻一套基础井网，钻完后不投产，根据井的全部资料，对全部油层的油砂体进行对比研究，然后修改和调整原方案；
- (7) 在生产井和注水井投产后，收集实际的产量和压力资料进行研究，修改原来的设计

指标，定出具体的各开发时期的配产、配注方案。

由以上油田的开发工作顺序可知，油田开发可以说是用钻井的办法证实油气的分布范围，并且只有通过钻井才可以投入生产而形成一定生产规模。

在石油勘探、开发各个阶段的共同特点是都要钻井。如在地质普查阶段，为了研究地层剖面，寻找储油构造，要钻地质井、基准井、制图井、构造井等；在区域详探阶段，为了寻找油气藏，并详细研究其储量、性质，要钻预探井、详探井、边探井等；在油田开发阶段，为了把石油、天然气开采出来，更需要钻井，如生产井、注水井、观察井等。石油钻井类型按性质和用途一般分为：

(1) 地质探井（基准参数井），是指在了解很少的盆地和凹陷中，为了了解地层的沉积年代、岩性、厚度、生储盖层组合，并为地球物理解释提供各种参数所钻的井。

(2) 预探井，在地震详查和地质综合研究基础上所确定的有利圈闭范围内为了发现油气藏所钻的井，或在已知油气田范围内以发现未知新油气藏为目的所钻的井。

(3) 详探井（评价井），在已发现的油气圈闭上，以探明含油气边界和储量、了解油气层结构变化和产能为目的所钻的井。

(4) 地质浅井，为配合地面地质和地球物理工作，以了解区域地质构造、地层剖面和局部构造为目的，一般使用轻便钻机所钻的井，例如剖面探井、制图井、构造井等。

(5) 检查资料井，在已开发油气田内，为了研究开发过程中地下情况变化所钻的井。

(6) 生产井，开发油气田所钻的采油、采气井。

(7) 注水井，为合理开发油气田，保持油气田压力所钻的用于注水的井。

地质探井、预探井、详探井和地质浅井统称探井。检查资料井、生产井、注水井统称开发井。

第二节 钻井与完井工程的主要内容

当今的钻井技术已相当成熟，旋转钻井（图 1-1）方式也已被普遍采用。在旋转钻井方式中，钻井与完井工程的主要内容如下。

一、钻进

钻进就是用足够的压力把钻头压到井底岩石上，使钻头牙齿吃入岩石中，用钻杆带动钻头旋转破碎井底岩石，从而达到增加井深的目的。加到钻头上的压力叫钻压。钻压是靠钻柱的重力产生的。钻进的快慢用钻速（一般称为机械钻速）表示，它是单位时间里的进尺数，单位为 m/h ；另一种表示法是钻时，它是单位进尺所需要的时间，单位为 min/m 。

钻进是钻井工程的主要内容，它是指用钻头破碎岩石，使井眼不断加深的过程。由于钻进，井眼不断加深，钻柱也要及时加长。钻柱主要由钻杆组成，钻进过程中，每当井眼加深了一根钻杆的长度后，就向钻柱中接入一根钻杆，这个过程叫接单根。

钻头在钻进过程中会逐渐磨损，磨损后就应予以更换，为此需要将全部钻柱从井中起出来，更换新钻头。换上新钻头后再重新将钻柱全部下入井内，这个过程叫起下钻。除更换钻头外，也可能因为其他原因而进行起下钻。

钻进时，钻头破碎井底岩石，形成岩屑。随着井的加深，岩屑逐渐增加。它们积存于井

底，阻碍了钻头接触新的井底，使钻头形成重复切削，降低钻进效率。为此必须在岩屑形成后，及时把岩屑从井底清洗出来，这就是所说的洗井。洗井（图 1-2）是用钻井泵把钻井液打入中空的钻柱内，经钻头水眼流入井底。流入井底的钻井液将岩屑冲离井底，然后携带岩屑从钻柱与井眼之间的环形空间中返到地面，在地面上把岩屑从钻井液中分离出来，再把净化了的钻井液用钻井泵注入井内。这样重复使用，往复循环，从而达到随钻洗井的目的。

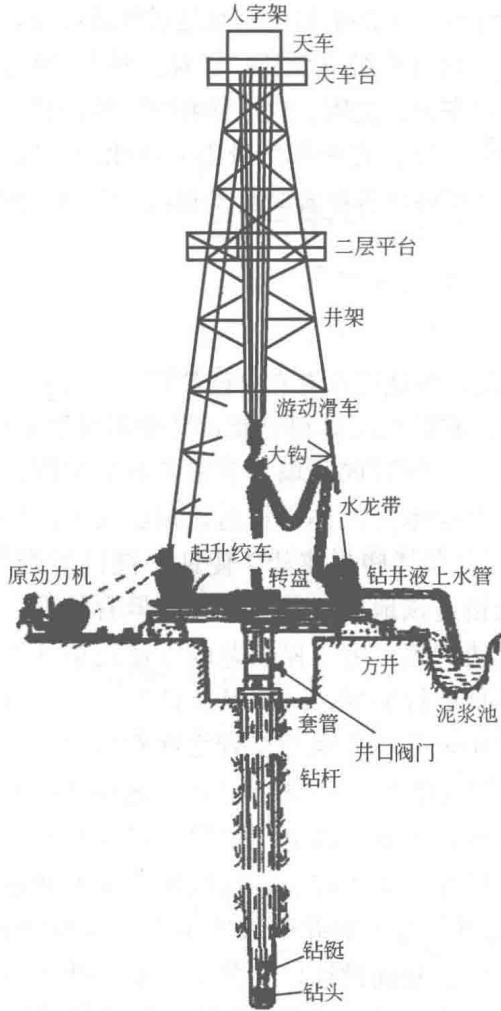


图 1-1 旋转钻井

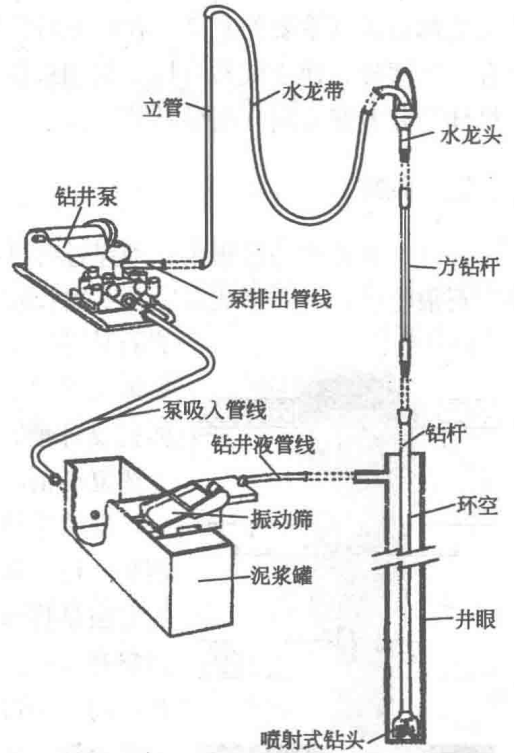


图 1-2 洗井

钻井液还具有保护井壁、控制井内压力等功用，钻井液的性能好坏直接关系到一口井钻井的成败，如何配制出符合钻井工程要求的钻井液是保证快速、优质、安全钻井的关键，所以钻井液又有“钻井工程的血液”之称。钻井液属于复杂的多相多级胶体——悬浮体分散体系。它既可以是固体分散在液体中或者是一种液体分散在另一种液体中，也可以是气体分散在液体中或者是液体分散在气体中所形成的分散体系。钻井液的性能与各种胶体性质都有密切的关系。如钻井液胶体的稳定性与破坏，处理剂的吸附、润湿、流变性，电解质的污染及其处理等等，都遵循着胶体化学的基本规律。因此，凡是从事钻井工程特别是从事钻井液研究与应用的工作者，都需要掌握胶体化学的理论基础，从满足钻井完井工程的目标出发，设计、调配和维护钻井液体系，使之达到并保持所需的性能、指标，最终实现快速、优质、安全钻井。

地层岩石的孔隙、裂缝中存有石油、天然气和水等流体，它们具有一定的压力。该压力因所处地层的深度、地区等条件的不同而有很大差异，这就要求在钻井过程中采用恰当的措施以适应之，如果处置不当，将可能引起对产层的损害，或将发生溢流、井喷，给钻井施工带来困难。因此，必须加强在钻井过程中对高压井的压力控制及发展压力预测技术。

影响钻速的因素主要有岩石的可钻性、钻头的类型、钻井液性质、钻压、转速、钻井液排量、钻头水力功率的大小等。因此，研究地层的基本物理机械性质和基本的破碎规律以及影响这些规律的因素，研究钻头破岩的机理、结构特点、制造工艺及其对地层的适应性，研究钻井液的性质与井眼安全和钻井速度的关系，研究钻井参数（钻压、转速、钻井液排量、钻头水功率）对钻井速度和井身质量影响的规律，对安全、优质、快速钻井方案的制订和组织实施都有极其重要的意义。在研究各种因素对钻井速度、安全和质量影响规律的基础上，结合经济评价，建立效益目标，应用最优化理论，分析处理各种实验数据和钻井资料，制订出最佳钻井方案并用于指导钻井实践。

二、固井

一口井在形成的过程中，须穿过各种各样的地层，各地层都有它自己的特点。如有的地层岩石很坚硬，井眼形成以后井壁很长时间不坍塌；有的地层则很松软，井壁不易维持住，

岩石从井壁上塌落到井内，易形成井塌、卡钻等复杂情况；有的地层则含有高压油、气、水等流体，钻遇该地层时，这些流体就要外涌；有的地层含有某些易溶盐，使钻井液性能变坏。上述复杂情况有的可能钻过该地层后就消失了，但有的没有消失，继续给钻井工作制造麻烦。为了保护井眼以便使钻井工作进行，就必须对井眼进行加固，这就是所谓的固井。固井的方法是将套管下入井中，并在井眼与套管之间充填水泥，以固定套管，封固某些地层（图 1-3）。根据不同的地层情况和钻井目的，一口井可能要多次下套管固井。钻完一口井总共下多少层套管、每层套管的尺寸和下入深度、每次固井水泥浆返深和水泥环厚度以及每次固井对应的井眼尺寸统称为井身结构。井身结构设计是钻井工程的基础设计，它关系到油气井能否安全、优质、快速和经济地钻达目的层以及能否保护储层防止损害。

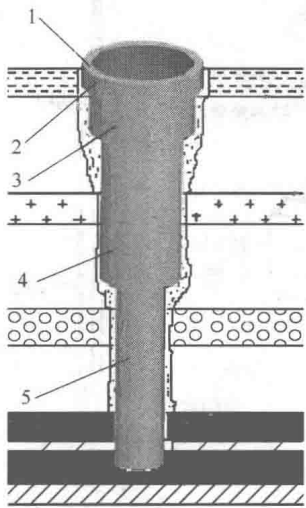


图 1-3 固井

- 1—顶部；2—导管；3—表层套管；
4—技术套管；5—油层套管

三、完井

完井是钻井工程最后一个重要环节，其主要内容包括钻开生产层、确定井底完成方法、安装井底及井口装置等。

含有油气流体的孔隙性砂岩或裂缝性碳酸盐岩等储层称为油气层，一般均有一定的压力，而且有较好的渗透性，因此钻开油气层时总会产生钻井液对油气层的损害或是油气层中的油气侵入钻井液。当井内钻井液柱压力大于地层压力时，钻井液中的滤液或固相颗粒就会进入油气层中，使油气层渗透率降低，造成油气层的损害。压力越大，时间越长，对油气层的损害就会越大，就会降低油气层的产量。反之，如果钻井液液柱压力小于地层压力时，油

气水就会侵入钻井液中，如果处理不当，就会造成井喷失控事故。因此，钻开油气层既要防止和减少对油气层的损害，又要防止井喷失控事故的发生。

井底装置在井底建立油气层与油气井井筒之间的连通渠道，建立的连通渠道不同，也就构成了不同的完井方法。只有根据油气藏类型和油气层的特性并考虑开发开采的技术要求去选择最合适的完井方法，才能有效地开发油气田、延长油气井寿命、提高采收率、提高油气田开发的总体经济效益。

井口装置包括套管头、油管头和采油树。井口装置的作用是悬挂井下油管柱、套管柱，密封油管、套管和多层套管之间的环形空间，控制油气井生产、回注（注蒸汽、注气、注水、酸化、压裂和注化学剂等）和安全生产。

第三节 钻井与完井工程技术的发展

早期的钻井技术是靠人们积累下来的经验指导钻井。由于科学技术的发展，钻井技术也步入了科学化发展阶段。1948年出现了喷射钻井技术，1958年前后出现了平衡钻井与井控技术，1962年又出现了优化钻井技术。20世纪80年代后期，水平井钻井技术、保护油气层钻井完井技术有了大的发展和提高，特别是最近又出现了欠平衡钻井、控压钻井和地质导向钻井技术。由于这些钻井技术的出现，钻井技术不仅只有定性概念，而且有了定量概念，这就意味着钻井技术从经验钻井阶段进入到科学钻井的新的发展阶段。下面介绍近年来逐渐发展起来的钻井技术。

一、定向钻井技术

定向钻井指靠使用定向仪器、工具、钻具和技术，使井眼沿着预定的井眼轨迹钻达目的层的钻井技术。定向钻井与钻简单直井的主要差别在于要进行井眼轨迹的设计和控制。它包括选择适当的测量技术、确定最好的控制工具、运用适当的管理体系和收集相关的地质资料。

很多情况下须采用定向井钻井技术（图1-4）。正对目的层的地表位置常常因有房屋建筑、河流、高山、港口和道路，不能作为实际的井场位置，在这种情况下，就需要钻定向井达到目的层。定向井最常见的应用是在海上平台钻井（图1-5）。在大多数情况下，从一个独立的平台上打很多定向井比每打一口直井都建立一个平台经济得多。在海上油田，一些平台可以钻超过60口定向井。在陆上作业中，从单一井场钻丛式井不太常见。丛式井主要是从经济上考虑，如管线、采油设备等。前苏联西部西伯利亚所钻的井大部分是丛式井。钻定向井另一最常遇到的情况是侧钻，主要目的是使井眼偏移，绕过或离开障碍物，如卡住的钻柱等。然而，通常侧钻不能被称为是有控制的定向钻井，因为它没有预定的靶心。定向井最引人注意的应用是钻救援井，使其与邻近的井喷井的井底相交，以便把压井液注入井喷井内。这类钻井问题中的定向控制是十分严格的，因为与井喷井相交需要极其精确。地质学家为了勘探需要，可能确定丛式靶层，即必须钻穿一个靶层后，改变井眼方向达到下一目的层靶心（称为多目标井），目的层可能在二维平面内，这种情况只需改变井斜角；另一种情况，需进行三维设计，必须改变井斜角和方位角。

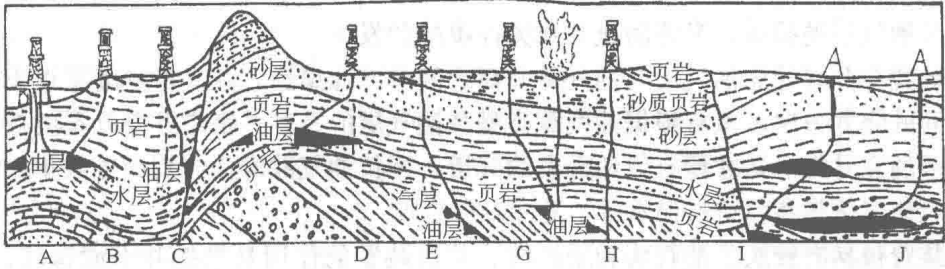


图 1-4 定向钻井应用范围

A—在人工岛上钻丛式井；B—从岸上向水域钻定向井；C—控制断层；D—地面条件限制（高山、建筑物等）不能靠近的钻探；E—地层圈闭；G—定向救援井；H—纠斜或侧钻；I—多目标；J—水平井

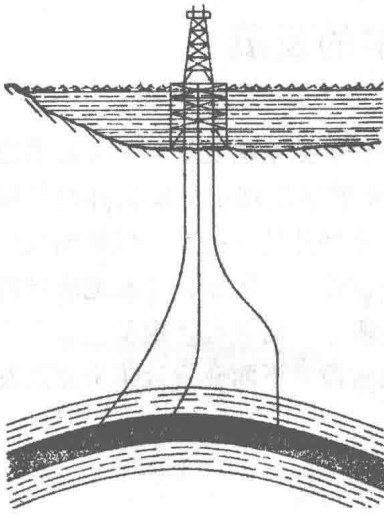


图 1-5 在海上平台钻定向井

二、喷射钻井与优化钻井技术

喷射钻井 1948 年出现在美国，20 世纪 60 年代被大量推广应用，该技术的应用使钻井速度有了大幅度的提高，喷射钻井曾被誉为钻井技术的重大革命。喷射钻井与普通钻井不同，普通钻井要求重压、快转、大排量，而喷射钻井要求高泵压、小喷嘴、喷射速度高、适当排量、使用喷射式钻头。钻井液从钻头喷嘴喷出的速度高、功率大，冲刷井底好、清岩快、携屑好，减少了井底岩屑的重复破碎，喷嘴射流与机械因素起联合破岩作用，从而提高了钻井速度。

喷射钻井要求有大功率的钻井泵，以产生高压高功率射流；喷射钻井要有寿命高的喷射式钻头；喷射钻井还要求有好的钻井液，具有抑制泥岩膨胀、有利于井壁稳定、剪切稀释性能好、粘度低、摩阻小、携屑好等特点。随着喷射钻井技术的发展，喷射钻井理论也在发展。钻井水力学研究了射流的特性与喷嘴结构及水力参数对破岩、清岩的作用，到 20 世纪 60 年代已形成了完整的环空水力学理论，在这同时也研究了固控理论。

60 年代后期，美国钻井技术进入自动化钻井阶段，在喷射钻井基础上发展优化钻井技术，应用计算机技术进行钻井设计、施工、井斜控制、井眼压力控制，特别是应用在定向井、丛式井的设计中，通过使用计算机扫描技术扫描井眼轨迹防止井眼相碰等。计算机技术在钻井中发挥了前所未有的作用。

我国使用喷射钻井技术始于 20 世纪 60 年代，从研究喷嘴结构与钻井水力学入手，1973 年通过消化应用喷射钻井理论，研制了喷射式聚晶金刚石钻头，1975 年首先在胜利油田组织喷射钻井试验。1978 年开始在全国推广喷射钻井、低固相钻井液和喷射钻头。该项技术的推广使用，给国家节省了大量资金。

优选参数钻井（即优化钻井技术），是我国研究喷射钻井技术的继续和发展。喷射钻井能优选泵压、排量、喷嘴、喷速、钻压等。优化钻井技术不但能优选上述参数，还扩大到钻头选型、钻井液选择、环空流变参数控制等。因此，优化钻井技术推广后，对钻井规律有了更全面、更深刻的认识，提高了钻井速度，降低了成本，取得了很好的效果。

三、平衡压力钻井与井控技术

平衡压力钻井技术是钻井技术的一大进步。它是美国 1948—1968 年间科学化钻井时期发展起来的。平衡压力钻井也称近平衡压力钻井，是指钻井时井筒内液柱压力与地层压力接近平衡，这样钻井速度快，对油气层损害少。钻进时，井筒内液柱压力与油气层压力差值的大小代表了钻井水平的高低。这是因为差值越小，对油气层损害越小，但差值越小，钻井越易发生事故。因此要实行平衡压力钻井，又要不发生事故，就要有高水平的钻井技术。我国现在每年找到的储量中大部分为低渗透油层，因此实行平衡压力钻井能减少对油气层损害，特别是对探井有利于发现油气层、不丢掉油气层，对生产井也有利于提高单井产量。在“六五”以前，由于我国尚未开展这项技术，对地层压力掌握不够，加上缺少套管，一般裸眼井段长；为了防止井塌，钻进时使用的钻井液密度偏高，对发现油气层造成不良影响。1980 年我国开始采用平衡压力钻井技术，已取得很大成果。推广平衡压力钻井与井控技术，不但大大减少了井喷失控事故，而且也有利于发现油气层，减少对油气层造成的损害。目前，平衡压力钻井技术又发展成为控压钻井技术，该技术提供了实时监测和调整井底压力的手段，可以实现在复杂压力系统井眼的安全、高效钻进。

四、水平井钻井

水平井由于能穿过更多的油层，从而提高油井的单井产量和注入井的注入量（注水、注汽等），获得更高的采收率（图 1-6）。水平井还适合开发一些用直井方法无法开发或开发效益很低的特殊油气藏，如裂缝性油气藏、稠油油藏、低渗透油气藏和底水油气藏等。因此，20 世纪 80 年代水平井技术在国际石油工程领域内得到迅速发展，不少人称水平井技术是石油工业技术的一大革命。

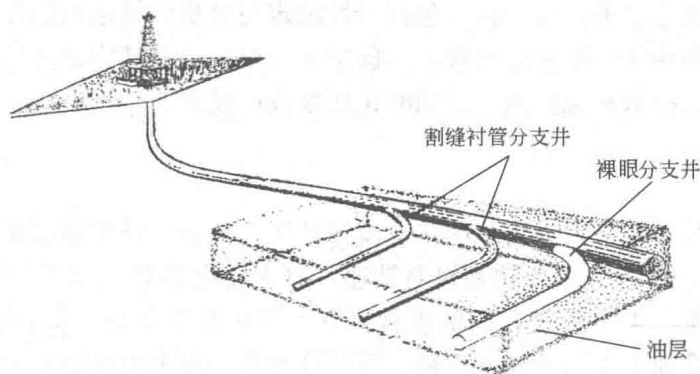


图 1-6 水平分支井

水平井具有很高的经济效益。水平井产量一般为直井的 4~6 倍。一般来说，水平井水平段越长，产量越高。不仅新钻水平井产量高，就是在老油田、枯竭的或废弃的井中钻水平井也可取得明显的增产效果。20 世纪 80 年代后期，水平井每米成本约为邻近直井的 1.5 倍，但水平井产量却是直井的 4~6 倍，虽然钻井成本高一些，但水平井总的经济效益还是非常好的。钻水平井开发许多类型的油气藏比钻直井开发可大幅度提高产量。适合用水平井开发的油气藏类型有：裂缝性油气藏、低渗透油气藏、薄的或层状油气藏、稠油油藏等。目前煤层气、页岩气的开发也普遍采用了水平井技术。水平井还有利于减

缓水、气锥进。

水平井的钻井完井技术主要包括：水平井的优化设计、连续的随钻测量技术、先进的导向钻井系统、满足水平井钻井需要的优质的钻井液和完井液以及水平井完井技术。20世纪80年代前，钻水平井技术还不够成熟、配套；进入80年代后，新的工具、工艺技术不断出现，如配套的钻具组合、适合水平井使用的（包括弯外壳、铰接、单弯、双弯）螺杆钻具、随钻测量仪器、高效钻头、优质钻井液、新的固井工具和固井技术、多级完井技术、电测射孔技术、欠平衡钻水平井技术等。有了上述条件，水平井技术今后一定会有更大发展。

五、保护油气层的钻井完井技术

油气层保护技术最早是20世纪50年代提出的，至20世纪80年代末形成了系列配套的储层评价、工程评价试验技术，发展和应用了一些对地层损害小的钻井液、完井液并在现场应用，20世纪90年代更加完善配套。保护油气层技术发展快主要是认识上的提高。开始时，人们认为钻井液密度越高油气层损害越严重，也有的人认为损害油气层主要是钻井施工造成的。这些不全面的认识随着科学技术的进步在逐步改变。目前的研究成果认为，对油气层造成损害主要是由于井内液柱压力大于地层压力造成的，这个压力差越大，对油气层造成的损害越大，而不单纯是钻井液密度大对油气层造成损害大。对油气层造成的损害还贯穿在整个施工过程中，包括油气层的钻进、测井、固井、射孔、酸化、压裂、洗井、注水、修井等作业施工过程均能对油气层造成损害。认识上另一个提高就是应该针对不同类型油气藏的岩层特点使用不同的钻井液、完井液、射孔液、酸化液。这些工作液要与油气层岩性配伍，才能减少对油气层造成的损害，而不是无目的地降低失水、减少固相含量等。为保护油气层，还要使用平衡压力钻井技术、合理的钻井液密度，这是前提。我国在保护油气层总体技术上已达到了国际先进水平，这些技术包括岩性测定与分析评价技术、油气层损害机理研究、矿场油气层损害评价技术、保护油气层的钻井液完井液技术、保护油气层的固井技术、负压射孔技术和保护油气层的酸化压裂投产技术。

六、欠平衡钻井

所谓欠平衡钻井，就是人为将井中钻井流体柱压力控制在低于地层压力下的钻井。早在20世纪五六十年代，为了防止井漏和提高钻速，有人就提出并应用了欠平衡钻井技术，但由于安全方面的考虑，未能引起人们的重视，其发展也相应滞后。但在20世纪90年代以来，欠平衡钻井却受到了人们的高度重视，国外许多公司在大力研究和应用这项技术。美国能源部近年来还资助了一项旨在研究和开发欠平衡钻井及完井新技术的综合研究计划。欠平衡钻井技术受到人们高度重视的主要直接原因是应用这项技术钻井可以有效地减轻地层损害而提高油气产量，其间接原因则是水平井应用的增加。因为在钻水平井过程中，生产井段暴露在钻井液中的时间很长，只有在欠平衡压力条件下进行钻井作业，才有利于保护产层。据报道，在加拿大，一些公司应用欠平衡钻井技术钻的水平井产量比用常规钻井方法钻的井的产量高10倍；在巴西，一些公司应用欠平衡钻井技术钻的直井产量也比用常规方法钻的直井的产量高3倍。

欠平衡钻井在20世纪90年代以来受到人们高度重视的其他原因是：有利于提高钻速而节省钻井时间，有利于增加钻头寿命，有利于避免压差卡钻，有利于成功地钻穿漏失

地层和低压地层。据报道，美国近年来在衰竭油气藏中使用充气钻井液进行欠平衡钻井的结果表明，仅因少损失钻井液和节省时间，就可平均每口井节约钻井费用达 1.25×10^6 美元；英国 BP 公司在哥伦比亚进行欠平衡钻井，仅因节省时间就使每口井节约钻井费用 10%~20%。

由于上述原因，迄今为止，欠平衡钻井技术已遍及世界各地的 20 多个国家，如中国、美国、英国、加拿大、墨西哥、阿曼、阿根廷、巴西、哥伦比亚等。欠平衡钻井井数也正在以前所未有的速度增加。由于欠平衡钻井具有极大优越性以及水平井应用的迅速增加，为提高油气田开发的总体经济效益，欠平衡钻井已经并且必将继续成为油气开发的一种重要手段。

欠平衡钻井作业的关键技术是产生和维持井下的欠平衡条件。1992 年以来，在世界范围内所采用的欠平衡钻井技术主要包括：空气和天然气钻井、边喷边钻井、雾化钻井、泡沫钻井、氮气钻井、钻井液帽钻井、强行下入钻井、海上欠平衡钻井和全过程欠平衡钻井。

七、自动化钻井

自动化钻井是 20 世纪 90 年代和 21 世纪世界钻井的重大发展方向，而自动化钻井的发展方向又是闭环钻井。所谓闭环钻井，就是依靠传感器测量钻井过程中的各种参数，依靠计算机及人工智能技术获取数据，并进行解释和发出指令，最终由自动设备去执行，变成一种无人操作的闭环自动控制系统进行钻井。它的主要优点是：可以大大提高钻井安全和效率，节省时间，优化钻井过程，从而获得更好的经济效益。

自动化钻井包括井下自动化和地面钻机自动化两大方面。井下自动化将依靠井下闭环自动控制系统来实现，地面钻机自动化将依靠地面闭环自动控制系统来实现。近年来，国外一些公司一直在围绕这两大方面进行大力研究，并取得了重大突破和实质性成果。在井下定向控制自动化钻井系统方面，为了优化钻井和克服目前使用可转向钻井液马达钻定向井存在的问题（例如钻速低、定向费时、井眼净化效果差等），一些公司研究出了井下定向控制自动化钻井系统。

1. 自动导向钻井系统

英国 Cambridge Drilling Automation (CDA) 公司在 1995 年研制出了它的第一代自动导向钻井系统 (Automation Guidance System, AGS)。这是一种由计算机控制井斜和方位的智能式自动导向的旋转钻井系统。它可以在钻柱旋转的同时自动按设计井眼轨迹控制井斜和方位。由于是由计算机连续进行定向控制，使用这种工具可以钻出高质量的井眼。目前，CDA 公司正在研制可做井下程序调整的第二代 AGS 钻井系统，以实现不起下钻就能改变井眼轨迹。

2. 旋转闭环钻井系统

Baker Hughes INTEQ 公司与意大利的 AGIP 公司合作，从 1993 年中期开始，用三年时间研制出了被称之为旋转闭环钻井系统 (RCLS, 即 Rotary Closed Loop System) 的自动导向钻井系统。这是一种同时具备旋转钻具和可转向钻井液马达最佳优点的智能式全新钻井系统，如图 1-7 所示。由于它是一种能对井斜和方位控制做闭环决策的旋转钻井系统，故称之为旋转闭环钻井系统。它与前面介绍的英国 CDA 公司研制的第一代 AGS 自动导向钻

井系统相比，不同之处在于：它既能在钻柱旋转的同时自动按设计井眼轨迹控制井斜和方位，也能按地面的指令改变井眼轨迹。

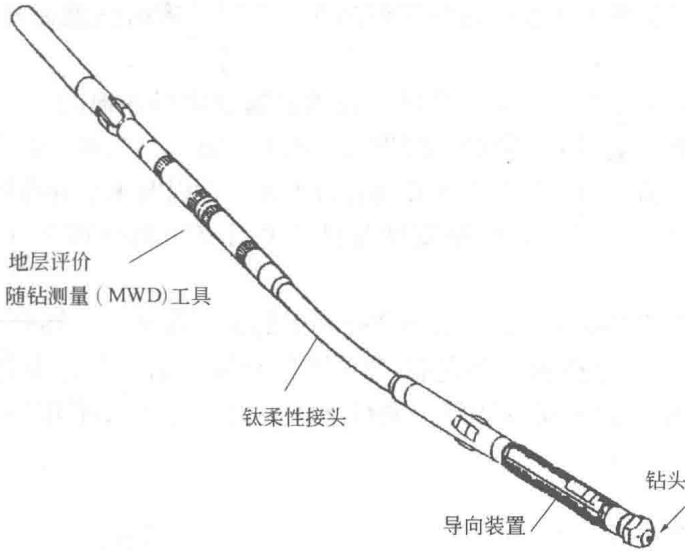


图 1-7 旋转闭环钻井系统 (RCLS)

RCLS 系统的重要组成部分有：地面到井下工具和井下工具到地面的通信系统、自动导向工具以及地层评价随钻测量工具。自动导向工具是 RCLS 系统自动控制井斜和方位的核心组件，它依靠一个脱离旋转驱动轴的非旋转套上的三个翼片的不同伸出量来控制钻头转向。该转向套内装有测斜仪、转向控制电子仪以及用于调节翼片伸出量的控制阀。

RCLS 系统的最大特点是：地面与井下的通信以及井下自动导向采用的都是闭环控制。

RCLS 系统于 1996 年通过现场试验，目前已进入工业应用阶段。

目前，斯伦贝谢、哈利伯顿等公司都研发了自己的自动旋转导向钻井系统。

八、地质导向钻井

地质导向钻井是以井下实时实际的地质和油气藏特征来确定和控制井眼轨迹的钻井技术。使用这一技术，可以精确控制井下钻具，命中最佳地质油气藏目标，使井眼避开地层界面和地层流体界面并始终位于产层内。目前国际上先进的地质导向钻井技术使用具有随钻定向测量、随钻地层评价测井和导向钻井能力的地质导向工具（图 1-8）来实时评价和控制井眼轨迹，即以井下实时实际的地质油气藏特征来确定和控制井眼轨迹，而不是按预先设计的井眼轨迹进行钻井。

地质导向钻井技术特别适合在薄产层和高倾斜产层中钻水平井。对于这样的产层，使用常规方法控制井眼轨迹很难命中最佳地质目标，而使用随钻定向测量和随钻地层评价测井数据进行地质导向钻井，可以随时知道钻头周围几米范围内的地质油气藏特征、钻头与地层界面或地层流体的相对位置，因此可以控制钻具始终在产层中间钻进。

地质导向钻井的基本方法是在井的设计阶段使用试验井或邻井的测井数据进行计算机模拟，得出新设计井的模拟测井数据以及对将钻各个地层的各种响应。在钻井过程中，将井下随钻测量工具发送到地面的实时测井数据与各个模拟数据相对比，看它们是否一致。如果模