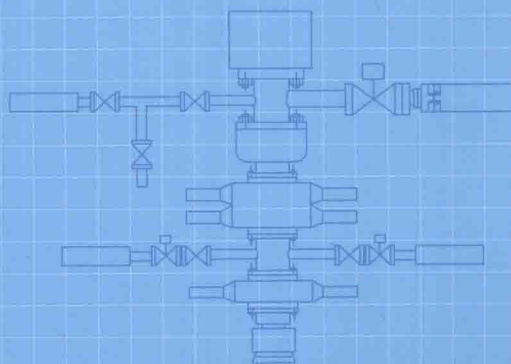
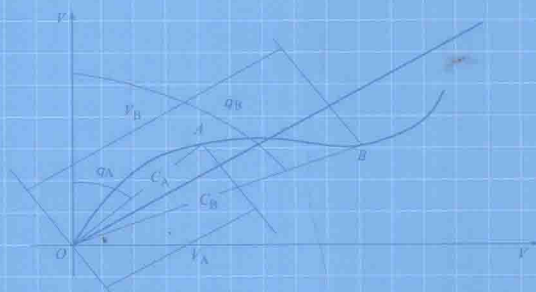
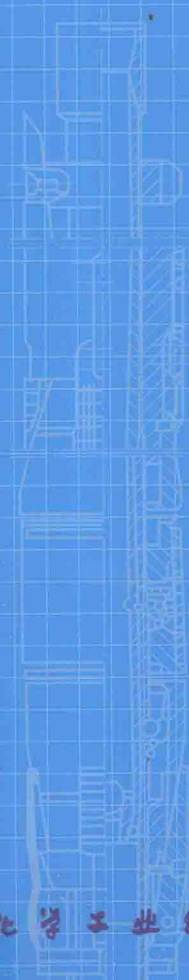




石油天然气类专业规划教材

钻井施工工艺技术

李发印 主编 张文生 副主编 王小兵 主审



化学工业出版社



石油天然气工程专业系列教材

钻井施工工艺技术

主编 王 强 副主编 王 强 王 强 王 强 王 强

石油工业出版社

石油天然气类专业规划教材

钻井施工工艺技术

李发印 主 编

张文生 副主编

王小兵 主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要介绍钻井的基本概念、施工工序、主要设备、发展现状、岩石的组成与类型、岩石的工程力学性质、可钻性与研磨性、钻头、钻柱、钻井仪表、直井防斜技术、钻进过程中各参数间的基本关系、欠平衡钻井技术、气体钻井技术、井控的概念、级别、关井操作程序、司钻压井法、工程师压井法、硫化氢及其防护、取芯工具组成及类型、选择、检查、取芯钻进参数配合、取芯操作、密闭取芯、保压密闭取芯、定向取芯、固井生产组织管理、固井技术、固井质量评价、智能完井、钻井事故的预防与处理、钻井风险管理等内容。本书还配套有相应的多媒体课件、教案和题库。

本书可供高职院校的钻井技术专业 and 石油工程技术专业及相关专业学生使用,也可作为石油钻井工人技术培训的教材、职工培训用书以及科研人员及有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钻井施工工艺技术/李发印主编. —北京:化学工业出版社,
2013.10

石油天然气类专业规划教材

ISBN 978-7-122-18436-8

I. ①钻… II. ①李… III. ①油气钻井-生产工艺-高等学校-教材
IV. ①TE24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 217061 号

责任编辑:高钰

文字编辑:项激

责任校对:宋夏

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张10¼ 字数240千字 2014年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:24.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是根据中央财政重点支持（钻井技术）专业建设方案的要求，根据当前高等职业教育以提高学生综合职业能力和素质为培养目标的教育教学改革的需要，根据钻井行业要求和高职教育规律及学生的认识规律，结合多年来的钻井工艺课程教学实践，以工作过程为导向，以工作任务为基础，以工作结构为逻辑，以学习任务为载体，以学生为中心，以学习任务的形式组织编写。

本教材以培养学生的职业能力为主线，着力提高学生的专业能力、方法能力和社会能力；将学习任务与理论知识结合在一起，以学习任务来驱动理论学习，以理论来指导实践，以实践来深化理论学习，体现了以学生为主体和以活动为过程的现代高等职业教育理念。

本教材以钻井作业过程为主线，内容共分十章，包括钻井工艺概论、岩石工程力学性质、钻进工具、钻井仪表、钻进技术、井控、取心、固井、完井、钻井事故与风险管理等，内容设置以钻井过程为主线，以真实的工作任务序化教学内容，采用由地下到地面的递进规律进行。增加了新工艺新技术，内容更加丰富、全面，针对性更强；图文并茂，结构清晰，难度相对适中，配套相应多媒体课件、教案及题库，易于学习，并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取，或登陆 www.cipedu.com.cn 免费下载。与钻井工技能鉴定试题库相关联，便于检查学习效果。

在学习任务的实施过程中，建议结合教学型石油钻井平台、钻井 HSE 现场管理系统和泥浆、固井、测井综合实训设施，采用“教、学、做”为一体的现场教学模式，教师边教边做，学生边做边学，并结合多媒体演示等现代化教学手段，提高教学效率。

本教材在内容方面力求新颖，注重实用性，可供高职院校的钻井技术专业 and 石油工程技术专业及相关专业学生使用，也可作为石油钻井工人技术培训的教材、职工培训用书以及科研人员及有关院校师生参考。

本教材由李发印教授主编，延长石油集团公司科技部张文生高级工程师担任副主编，由常州大学石油工程学院王小兵博士主审，参加编写的还有扬州工业职业技术学院叶莉、戴红霞、汪洋等，并对本教材提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，对高职教育的教学方法和培养模式正处于探索和改进过程中，书中难免存在不妥之处，期望同行专家和读者提出宝贵意见和建议。

编者
2013 年 10 月

目 录

第一章 钻井工艺概论	1
第一节 钻井的分类、工序及主要设备	1
一、石油钻井的分类	2
二、钻井施工工序	2
三、钻井主要设备	3
第二节 石油钻井技术的发展及现状	4
一、钻井技术的发展	4
二、钻井技术的现状	6
第二章 岩石工程力学性质	7
第一节 岩石的机械性质	7
一、岩石的强度	7
二、岩石的硬度	8
三、岩石的脆性和塑性	9
四、岩石的研磨性	10
第二节 钻井条件下影响岩石机械性质的因素	10
一、井底各种压力对岩石性能的影响	10
二、液体介质的影响	11
三、岩石性质对钻井的影响	11
四、其他因素	12
第三节 岩石的可钻性	12
一、钻速实验	13
二、岩石可钻性与声波时差的关系	13
三、岩石破碎的新技术	14
第三章 钻进工具	15
第一节 钻头	15
一、刮刀钻头	15
二、牙轮钻头	18
三、金刚石钻头	25
四、PDC 钻头	29
第二节 钻柱	31
一、钻柱的组成及规范	32

二、钻柱的工作状态及受力分析	36
三、钻柱的疲劳破坏与腐蚀	38
第四章 钻井仪表	42
一、钻井仪表的基本概念及测量参数	42
二、钻井仪表的分类及构成	42
三、测量过程和测量误差	43
四、测量仪表的品质指标	43
五、传感器	45
第五章 钻进技术	46
第一节 井眼轨迹的基本概念	46
一、井眼轨迹的基本参数	46
二、井眼轨迹的计算参数	48
三、井眼轨迹的图示表示方法	51
四、测斜计算结果输出	52
五、测斜计算结果的常规绘图	52
第二节 直井防斜技术	52
一、井斜的危害	52
二、井斜的原因及规律	53
三、井眼轨迹的控制方法	54
第三节 钻进参数优选	58
一、影响钻井速度的主要因素	58
二、钻头磨损	62
三、建立目标函数	63
四、钻进参数计算	64
第四节 欠平衡钻井技术	64
一、欠平衡钻井的类型	65
二、欠平衡钻井的必备条件	66
三、欠平衡钻井工艺技术	67
第五节 侧钻技术	70
一、侧钻的目的	70
二、侧钻位置的选择	71
三、裸眼侧钻技术	71
四、套管开窗侧钻技术	71
第六节 深井和超深井钻井技术	76
一、复杂深井井身结构及套管柱优化设计	76
二、深井高效破岩及钻井参数优选技术	78
三、深井钻井装备与工具简介	81
四、深井、超深井及其配套技术	83

第七节 气体钻井技术	84
第六章 井控	85
一、井控的概念	85
二、与井控有关的概念	86
三、井喷失控与着火的危害	87
四、压井方法	87
五、对井控工作的正确认识	89
六、做好井控工作的对策	90
第七章 取心	92
一、取心工具及其使用	92
二、特殊取心工具及其使用	97
三、提高岩心收获率	100
第八章 固井	102
一、井身结构	102
二、固井目的	102
三、固井工艺过程	102
四、套管柱的设计	104
五、油井水泥	105
六、影响注水泥质量的基本原因	107
第九章 完井	109
一、钻开生产层	109
二、井底完成法	110
三、完井井口装置	111
四、完井工艺	111
五、射孔完井作业中的油气层损害与保护	112
第十章 钻井事故与风险管理	114
第一节 钻井事故的预防与处理	114
一、发生井下复杂事故的因素、诊断及处理原则	114
二、事故的种类、发生的原因及预防与处理	116
三、处理钻井事故应注意的问题	118
四、典型钻井工程事故处理实例	119
第二节 钻井风险管理	124
一、钻井 HSE 风险管理概述	124
二、钻井作业 HSE 风险削减措施	124
三、钻井作业 HSE 应急反应计划	125

四、风险管理知识在钻井工程方面的应用	128
第三节 钻井 HSE 现场管理系统	128
一、系统登录	128
二、钻井安全图书馆	128
三、巡检系统	132
四、考试系统	136
五、考试流程	145
六、系统管理	145

参考文献	154
-------------------	------------

第一章

钻井工艺概论

石油钻井技术是一项很难的技术，在石油开采中的波折很多，但是相应地也取得了一些成就。我国采用科学钻井技术是在 20 世纪 50 年代初，从那时起，我国石油开采技术就取得了显著的成就，并成为世界上使用钻井技术第二大国，但是我国的钻井技术与发达国家相比，仍比较逊色。再加上受我国地形条件的限制，更加剧了石油钻井工程的难度。如何改进石油钻井技术，加快石油开采的进程，已经成为石油开采业关注的重点。

第一节 钻井的分类、工序及主要设备

石油钻井是指利用专用设备和技術，在预先选定的地表位置处，向下或一侧钻出一定直径的孔眼，一直达到地下油气层的工作，见图 1-1。

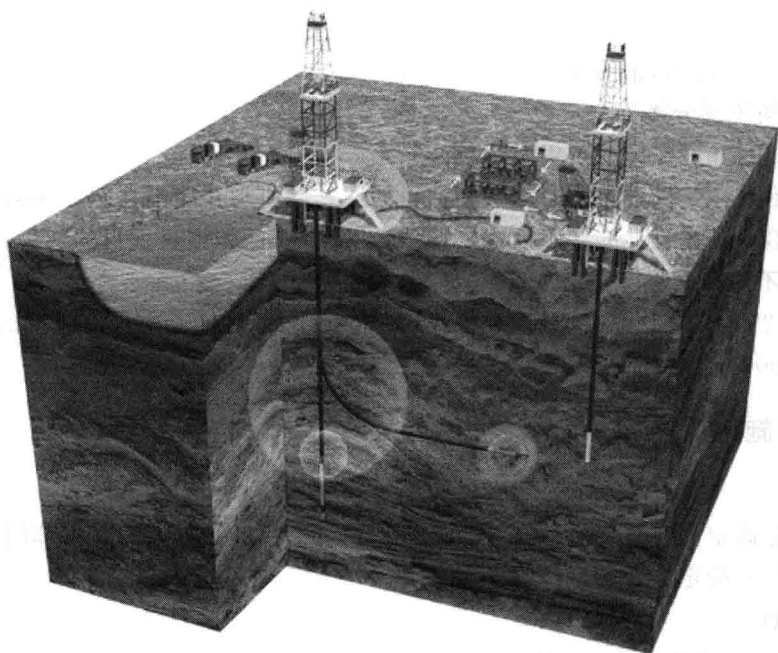


图 1-1 石油钻井三维模拟

一、石油钻井的分类

1. 按钻井目的进行分类

(1) 区域普查井

基准井：了解地层的沉积特征和含油气情况、验证物探成果而钻的井。

剖面井：研究地层岩性、岩相变化，为寻找含油气构造而钻的井。

参数井：了解区域构造，提供岩石物性参数而钻的井。

构造井：了解地质构造特征、验证物探成果，并编制地下某一标准层的构造图而钻的井。

(2) 探井

预探井：为确定油气藏是否存在及其埋藏位置而钻的井。

详探井：对油气藏进行工业评价及取得油气开发所需的地质资料而钻的井。

边探井：为圈定油气藏边界及其储量而钻的井。

(3) 开发井

生产井：在进行油田开发时，为开采石油和天然气而钻的井。

注入井：开发后期为了提高采收率及开发速度，而对油田进行注水注气以补充和合理利用地层能量所钻的井。

(4) 特殊用途井

检查井：油田开发到某一含水阶段，为了搞清各油层的压力和油、气、水分布状况，剩余油饱和度的分布和变化情况所钻的井。

观察井：油田开发过程中专门用来了解地下动态的井。

调整井：油田开发中后期，为进一步提高开发效果和最终采收率，而调整原有开发井网所钻的井。

救援井：为了救援而钻的井。

2. 按井斜角不同分类

直井：井口与井底在同一条铅垂线上。

定向井：沿着预先设计的井眼轨迹钻达目的层，井口与井底不在同一条铅垂线上。

水平井：沿着预先设计的井眼轨迹以井斜角大于 85° 的角度进入目的层。

3. 按井深不同分类

浅井 $H < 2500\text{m}$ ，中深井 $2500\text{m} \leq H < 4500\text{m}$ ，深井 $4500\text{m} \leq H < 6000\text{m}$ ，超深井 $6000\text{m} \leq H < 9000\text{m}$ ，特超深井 $H \geq 9000\text{m}$ 。

二、钻井施工工序

1. 定井位

定井位就是确定油、气井的位置，由勘探部门（勘探井）或油田开发部门（生产井、注水井、调整井等）确定。

井位内容如下。

① 构造位置：该井在什么地质构造上。

② 地理位置：该井在省、市、县、乡、村的位置。

③ 测线位置：该井所在地震测线剖面。

④ 坐标位置：该井在地球表面的经度和纬度。

2. 道路勘测

搬家前要勘察沿途的道路、桥梁和涵洞宽度及承载能力，掌握沿途的通信线、电力线的情况，凡不符合要求者及时整改处理。

3. 基础施工

目的是保证机器设备的稳固，保证设备在运转过程中不移动、不下沉，减少机器设备的振动。钻井现场基础包括混凝土及填石灌浆基础、混凝土预制基础和木方基础，特殊条件下可用木桩基础、爆扩桩基础。

4. 安装井架

5. 安装设备

主要工作是设备就位、校正设备、固定设备。校正设备要先找正，后找平。安装质量要达到“七字”标准和“五不漏”要求。

6. 钻进

包括开钻、钻进操作、钻井技术、钻进中的特殊情况。

7. 起钻、换钻头、下钻

8. 测试

包括中途测试和完井测试。完井测试的目的是为完井作业和油田开发提供可靠依据。测井分为电法测井、放射测井、工程测井等。

9. 固井

即向井内下入一定尺寸的套管，并在其周围注以水泥浆，把套管与井壁紧固起来的工作。目的是封隔疏松、易漏、易塌等复杂地层；封隔油、气、水层，防止相互窜漏；安装井口，形成油气通道，控制油气流，以便达到安全钻井和保证长期生产。

10. 搬家

包括搬家前的准备工作、拆卸设备、设备器材的吊装、运输、卸车及设备就位。

三、钻井主要设备

在石油钻井中，带动钻具破碎岩石，向地下钻进，钻出规定深度的井眼，供采油机或采气机获取石油或天然气。常用石油钻机主要由动力机、传动机、工作机及辅助设备组成，见图 1-2。

1. 钻机

(1) 对钻机的基本要求

起下钻能力、旋转钻进能力、循环洗井能力。

(2) 主要设备

井架、天车、绞车、游动滑车、大钩、转盘、水龙头（动力水龙头）及钻井泵（钻机八大件），动力机（柴油机、电动机、燃气轮机），联动机，固相控制设备，井控设备等。

2. 钻柱

钻柱是钻头以上、水龙头以下部分的钢管柱的总称，包括方钻杆、钻杆、钻铤、各种接头、稳定器、减振器、震击器等井下工具。习惯上又往往把方钻杆、钻杆及其接头、钻铤称

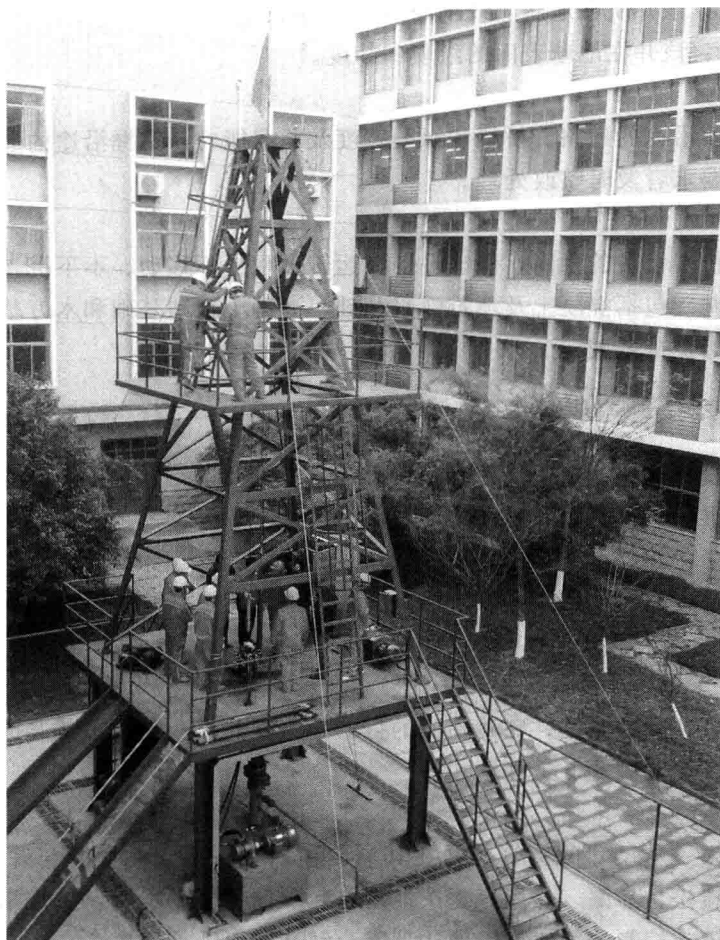


图 1-2 JX1-12 型石油钻井教学钻机

为钻具。

第二节 石油钻井技术的发展及现状

一、钻井技术的发展

1. 钻井的发展史

2100 多年前，中国就开始了钻井，应用的是顿钻钻井方法，这是在四川自贡，目的是为了获得地下的盐。

1521 年钻盐井偶得石油，这是我国的第一口油井。

1835 年在四川钻成了一口天然气井——兴海井，井深达 1200m，是当时世界上最深的井。到 1820 年，钻井深度突破 1000m。中国第一口油井在陕西延长油矿，目前日产量还有 200kg，见图 1-3。

美国 1859 年 8 月在宾夕法尼亚州泰特斯维尔小镇才打了一口 20m 深的油井，也就是世界上的第一口油井；俄国在 1863 年才打出 20m 深的井。

2. 钻井方法的发展

① 人工掘井：1521 年之前。

② 人力冲击钻：1521~1835 年。是靠人力、捞砂筒、特殊钻头、悬绳、游梁等来完成的。实际上是利用了杠杆原理及自由落体的下落冲击作用来钻井的。特点是：破岩与清岩相间进行；冲击力小，破碎效率低；设备简单，起下钻方便。



图 1-3 中国陆上第一口油井

③ 机械顿钻（冲钻）：1859~1901 年。优点是设备简单；起下钻方便。缺点是靠冲击作用破岩，钻头功率小，破岩效率低，钻井速度慢；破岩和清岩相间进行。

④ 旋转钻：1901 年发展起来的。旋转钻井是靠动力带动钻头旋转，在旋转的过程中对井底岩石进行破碎，同时循环钻井液以清洁井底的钻井方法。特点是破岩与清岩同时进行；旋转动量大，转速高，破碎效率高；设备复杂，起下钻繁琐。

旋转钻井法分为转盘旋转钻井法、顶部驱动钻井法、井下动力钻具钻井法。转盘钻井法是利用转盘旋转带动钻柱并带动钻头旋转破碎井底岩石的方法。顶部驱动钻井法的原理与转盘旋转钻井法相同。井下动力钻具钻井法是利用井下动力钻具驱动钻头旋转以破碎井底岩石。常用于打定向井时的井底定向。现代钻井是将两种旋转钻井方法结合起来使用，以充分发挥各自的优点。

3. 旋转钻井技术的发展

① 概念时期（1901~1920 年）：这个时期内开始将钻井和洗井结合在一起，并使用了牙轮钻头和注水泥固套管技术。

② 发展时期（1920~1948 年）：牙轮钻头、固井工艺、钻井液等得到进一步发展，同时出现了大功率钻井设备。

③ 科学化钻井时期（1948~1968 年）：喷射钻井，镶齿、滑动密封轴承钻头，低固相、无固相不分散体系钻井液及固相控制技术，最优化钻井，地层压力检测、井控技术及平衡压力钻井技术。

④ 自动化钻井时期 (1968~现在): 发展了钻井参数自动检测、综合录井、随钻测量技术等计算机技术在钻井工程中的应用; 发展了优化钻井、井口机械化自动化工具、自动化钻机、井眼轨迹遥控及自动闭环控制技术等新技术、新工艺及新设备。

二、钻井技术的现状

1. 钻井范围

井眼直径: 100~500mm。

井的垂直深度: 12262m。

井的水平位移: 10000m 以上 (正在准备 12000m、14000m 水平位移的井)。

2. 目前较新的钻井技术

定向井、水平井、大位移井技术; 综合技术即分支井技术、深井特超深井钻井、深海钻井; 专项技术即欠平衡钻井技术、小井眼钻井技术、地质导向钻井技术、挠性连续管钻井技术。

1978~1991 年, 我国石油钻井进入现代化钻井新阶段。现代化钻井技术是从推广喷射钻井开始的, 喷射钻井技术的发展, 使地层压力预测与监测、平衡压力钻井与井控技术、优选参数钻井技术、钻井液与油气层保护技术、计算机在钻井中的应用技术等相继发展起来。

从 20 世纪 90 年代开始, 定向丛式井和水平井技术得到长足发展。胜利油田钻成包括 42 口井的丛式井组。大港油田形成了平台优选、丛式井设计、防碰扫描、综合施工服务等成熟完备的丛式井工艺技术。一个平台最多 21 口井, 最深的丛式井组平均井深 5280.5m, 最浅的丛式井组平均井深 419m。

水平井钻井技术在整装油田开发、薄油藏、块状底水油藏、特低渗透油藏、老油田剩余油挖潜及相关领域获得广泛应用与大面积的推广, 其应用技术与欠平衡、分支井钻井技术的集约化与集成化, 使应用领域向深部地层拓展, 大大提高了油气井产量和油藏最终采收率。

新疆塔里木油田从 1994 年开始用水平井开发 4 个整装油田, 共钻水平井 134 口, 取得了良好的经济效益。2002 年 12 月大庆油田一口水平井, 钻井时成功穿越两个油层, 创造了我国水平钻井在 1m 左右的薄油层内穿行 613.7m 的纪录。

新疆定向井公司于 1998 年 9 月在小拐油田钻成了我国第一口双分支试验井。2004 年 5 月下旬, 胜利油田钻井工程技术公司巴州钻井技术分公司, 创出了我国分支水平井 5239.88m 的记录, 第一分支造斜点井深 4250m, 完钻斜深 5234.55m, 水平位移 754.49m; 第二分支造斜点井深 4090m, 完钻斜深 5239.88m, 水平位移 700m。

我国水平井钻井技术近年来发展较快, 水平井数量增多。水平井轨道控制技术比较成熟, 但水平井井控技术、水平井井壁稳定技术、水平井完井技术、水平井携带岩屑技术 (岩屑床问题)、水平井压裂技术等还有许多工作要做。另外, 我国目前所钻水平井基本为单一水平井和双台阶水平井, 而分支水平井和多分支水平井尚未广泛应用, 影响了水平井的经济效益。

第二章

岩石工程力学性质

钻头是破碎岩石、形成井眼的主要工具，钻头质量及其与地层的适应性，对提高钻进速度和降低钻井成本起着重要作用。在井眼形成过程中，一方面要提高破碎岩石的效率，另一方面要保证井壁岩层的稳定，这些都与岩石的机械性质有关。

第一节 岩石的机械性质

岩石是自然界中各种矿物的集合体，岩石的性质取决于造岩矿物的性质、岩石的结构和构造。在外力作用下，岩石从变形到破坏所表现出的性质叫做岩石的机械性质，与破岩效率有关的岩石的机械性质有强度、硬度、脆性和塑性等。

一、岩石的强度

在一定条件下，岩石在各种荷载作用下达到破坏时所能承受的最大应力称为岩石的强度。根据外力作用性质不同，有抗压、抗拉、抗剪和抗弯强度，其单位是 MPa。影响岩石强度的因素可以分为自然因素和工艺技术因素两类。

1. 自然因素

影响岩石强度的自然因素包括：岩石的矿物成分和比例、矿物颗粒的大小、岩石的密度和孔隙度。同类岩石，孔隙度增加，密度降低，岩石的强度也随之降低，反之亦然。一般情况下，岩石的孔隙度随着岩石埋藏深度的增加而减小，因此岩石强度通常随埋藏深度的增加而增加。由于沉积岩存在层理，岩石强度有明显的异向性，岩石的结构及缺陷也对岩石的强度有影响。

2. 工艺技术因素

影响岩石强度的工艺技术因素包括岩石的受载方式和岩石的应力状态。此外，外载作用的速度、液体介质性质等对岩石强度也有影响。

(1) 简单应力条件下的岩石强度 简单应力条件下的岩石强度是指岩石在单一外载作用下的强度，包括单轴抗拉强度、抗剪强度及抗弯强度。大量试验结果表明，在简单应力条件下，对同一岩石加载方式不同，岩石的强度也不同。一般说来，岩石的强度有以下顺序关系（从小到大）：抗拉→抗弯→抗剪→抗压。由于层理的影响，在不同方向上的岩石强度是不同的。

(2) 复杂应力条件下岩石的强度

① 三轴应力试验。在实际钻井条件下，岩石埋藏在地下，各向受压（围压）处于复杂

而不是单一的应力状态下，研究多向应力作用下的岩石强度更有实际意义。三轴应力试验是在三向荷载作用下定量测试岩石机械性质的有效方法。三轴应力试验可以进行三轴压缩试验，也可以进行三轴拉伸试验。

② 三轴应力条件下岩石强度变化的特点。岩石在三轴应力条件下强度明显增加。对于所有岩石，当围压增加时，强度均增大，但所增加的幅度对于不同类型的岩石是不一样的。一般说来，压力对砂岩、花岗岩强度的影响要比对石灰岩和大理岩大。

压力对强度的影响程度并不是在所有压力范围内都是一样的。开始增大围压时，岩石的强度增加比较明显；继续增加围压，相应的强度增量就变得越来越小；当围压很高时，有些岩石（例如石灰岩）的强度便趋于常量。

二、岩石的硬度

岩石的硬度是岩石抵抗其他物体表面压入的能力。硬度与抗压强度有关，但又有很大区别，是两个不同的概念。抗压强度是岩石整体破坏时的应力值，而硬度只是岩石表面局部对另一物体压入时抗压入强度，因而不能把岩石的抗压强度作为硬度指标。钻井过程中，破岩工具在井底岩层表面施加荷载，使岩层表面发生局部破碎，岩石的压入硬度在一定程度上能相对反映钻井时岩石抵抗破碎的能力。另外，岩石的硬度和组成岩石的矿物颗粒的硬度也是不同的概念，前者对钻进时岩石破碎速度有影响，而后者对钻进过程中工具磨损有影响。岩石的压入硬度是前苏联的史立涅尔提出的，也称史氏硬度。

对于脆性岩石，其硬度为

$$p_Y = \frac{P}{S} \tag{2-1}$$

式中 p_Y ——岩石的硬度，MPa；

P ——产生脆性破碎时压头上的荷载，N；

S ——压头的底面积，mm²。

造岩矿物的成分、颗粒度、孔隙度、胶结物的性质等都影响岩石的硬度。如砂岩的硬度随胶结物的强度增大而增大，硅质胶结物硬度大于铁质胶结物，铁质胶结物硬度大于钙质胶结物，钙质胶结物硬度大于泥质胶结物。

岩石的层理使岩石各方向的硬度不同。垂直于层理方向的硬度值最小，平行于层理方向的硬度值最大。这一点对掌握井斜规律和定向钻井中利用地层规律造斜有重要意义。

我国按岩石硬度的大小将岩石分为 6 类 12 级，见表 2-1，作为选择钻头的依据之一。

表 2-1 岩石按硬度分类及级别

级 别	软		中 软		中 硬	
	1	2	3	4	5	6
硬度值/10 ² MPa	≤1	≤2.5	≤5	≤10	≤15	≤20
级 别	硬		坚 硬		极 硬	
	7	8	9	10	11	12
硬度值/10 ² MPa	≤30	≤40	≤50	≤60	≤70	>70