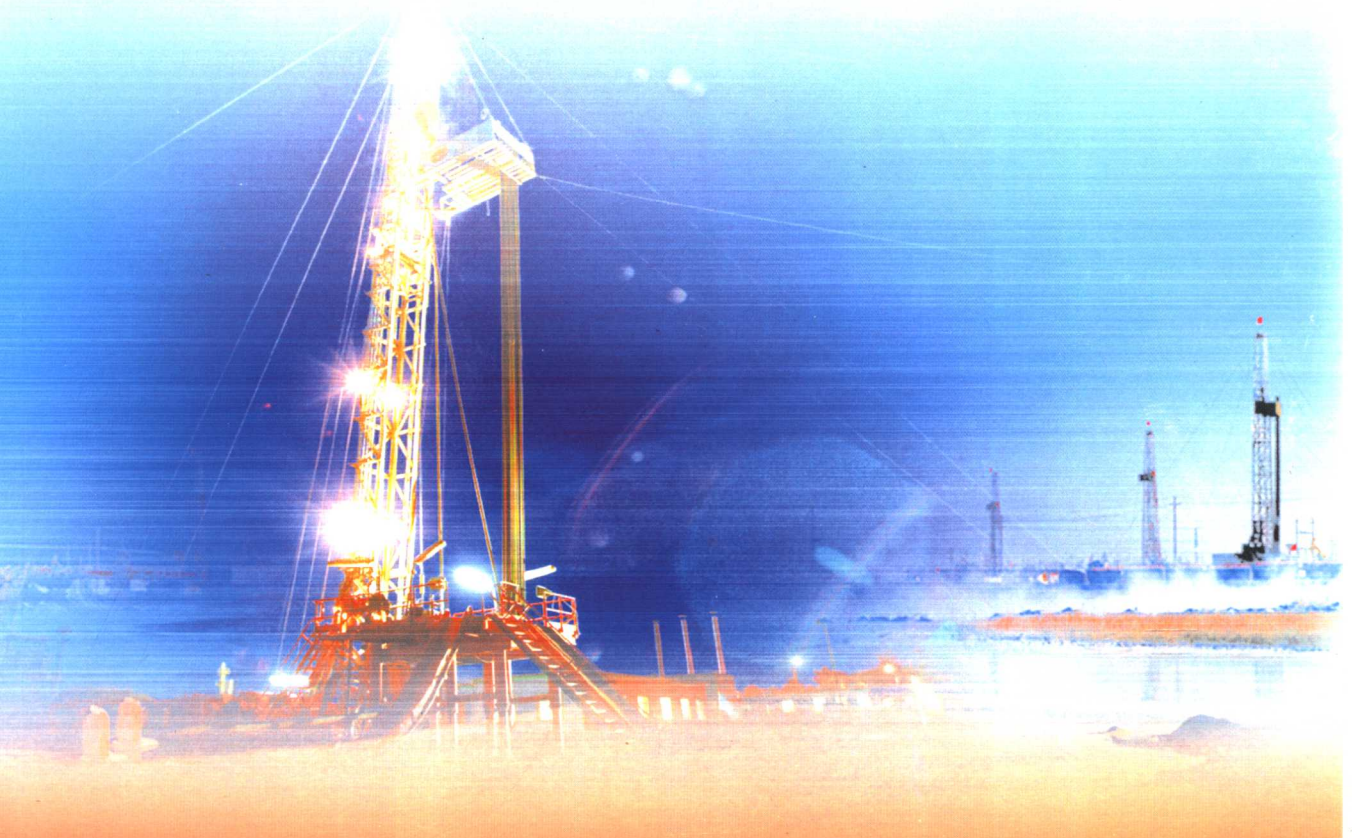




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

钻井工程

王建学 万建仓 沈慧 主编



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

钻 井 工 程

王建学 万建仓 沈 慧 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要讲述油气水钻井工艺理论与技术措施, 钻井工具的结构原理与维护使用, 钻井事故与井下复杂情况的预防与处理。全书共十章, 主要内容包括: 钻头、钻柱、钻进技术、定向井井眼轨道设计与轨迹控制、取心、固井、完井技术、钻井事故与复杂情况、打捞工具与工艺、钻井新工艺与其他钻井技术。

本书体系完整, 层次清楚, 深度、广度适宜, 是石油职业技术学院石油工程专业的教学用书, 是钻井技术员、钻井队基层干部、钻井司钻、钻井技师的培训参考教材, 也可供钻井监督、钻井工程和科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

钻井工程 / 王建学等主编 .
北京: 石油工业出版社, 2008.4
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5021-6266-5

I . 钻…
II . 王…
III . 油气钻井 - 高等学校 - 教材
IV . TE241

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 147725 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) 64523574 发行部: (010) 64523620
经 销: 全国新华书店
印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 26
字数: 663 千字 印数: 1—3000 册

定价: 38.00 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

本书参考了国内大量的有关钻井的文献，吸收了国内外最先进的钻井工艺技术知识，注重理论紧密联系实际，语言简明，层次清楚。本书主要内容包括：钻头、钻具、定向造斜工具、取心工具、固井工具、完井工具、打捞工具的结构、原理、技术规范与检查、维护使用；防斜打直井、定向钻井、取心、固井、完井、打捞的基本理论、计算、设计与技术措施、施工步骤；钻井事故与复杂情况发生的原因、现象、判断、处理与预防；水平井钻井、小井眼钻井、欠平衡钻井、套管钻井等新工艺、新技术。目前，石油院校的钻井书籍注重钻井理论，而涉及钻井技术措施、施工步骤与钻井工具的检查、维护使用等知识较少；石油企业的钻井书籍注重钻井实际，而钻井理论较少，本书将二者紧密、简明地联系在一起，并着重实际知识的阐述，其目的是为了满足不同石油院校学生、石油钻井工作者实际应用的需要。本书既是石油职业学院石油钻井专业学生用的专业课教材，又是钻井技术人员的必备书籍。

本书已经过渤海石油职业学院石油工程专业三届学生试用，现又进行了详细的修改与完善。本书在内容安排上，基本符合循序渐进的原则，有利于课堂讲解与学生自学和钻井技术人员、技术工人自学。

全书共分十章，编写分工为：绪论由韩贵金编写，第一章由万建仓、张亚生、彭金堂、谢培勇编写，第二章由沈慧、于久远、周玉海编写，第三章由彭丽、王蕊丽、陈信明编写，第四章由肖虎、刘永春、杜春生、袁增文编写，第五章由宋竞松、杨景中、王志编写，第六章由王建学、王丽、刘超编写，第七章由王志国、刘萍、仁鸿喜编写，第八章由张宏胜、赵立仁、李英斌、何海涛编写，第九章由田月辉编写，第十章由庞宝森、沈慧、张念编写。

本书由王建学、万建仓、沈慧任主编，全书完成后由任瑞军、胡贯平进行了全文审定。在编写过程中，王蕊丽、彭丽、肖虎承担了本书的计算机文字录入、扫描与插图的计算机编辑等工作，崔树清负责了本书文字、段落、图表等的格式化工作，王清江提供了许多宝贵资料，许多钻井老领导、老专家提出了很多宝贵意见和建议，在此表示诚挚的谢意。

由于编写经验不足和掌握各种技术的局限性以及编写水平有限，书中难免存在一些不足，恳请广大读者多提宝贵意见。

编 者

二〇〇六年十二月

目 录

绪论	1
第一节 钻井的种类	1
第二节 钻井的发展	2
第三节 钻井过程	3
第一章 钻头	5
第一节 岩石的机械性质	5
第二节 牙轮钻头	13
第三节 金刚石钻头与刮刀钻头	22
第二章 钻柱	38
第一节 钻柱的组成	38
第二节 钻柱的工作状态及受力分析	52
第三节 钻柱的损坏	63
第四节 钻具的检查、使用与管理	69
第三章 钻进技术	74
第一节 直井防斜技术概述	74
第二节 井斜的控制方法	84
第三节 钻进参数	94
第四节 水力参数的优化设计	102
第五节 钻进技术措施	117
第四章 定向井井眼轨道设计与轨迹控制	125
第一节 定向井井眼轨道设计	127
第二节 动力钻具造斜工具	133
第三节 井眼轨迹测量	145
第四节 井眼轨迹计算与绘图	160
第五节 井眼轨迹控制	167
第五章 取心	185
第一节 常规取心	186
第二节 密闭取心	195
第三节 定向取心	203
第六章 固井	206
第一节 井身结构设计	206
第二节 套管柱及其设计	211
第三节 下套管工艺	221
第四节 注水泥技术	231
第五节 预防固井中的复杂情况	251

第七章 完井	263
第一节 保护油气层	263
第二节 中途测试	269
第三节 完井方法	274
第四节 完井井口装置	281
第五节 完井测试	283
第八章 钻井事故与井下复杂情况	286
第一节 井漏	286
第二节 粘吸卡钻	306
第三节 井壁坍塌卡钻	316
第四节 砂桥卡钻	326
第五节 缩径卡钻	329
第六节 键槽卡钻	335
第七节 泥包卡钻	338
第八节 落物卡钻	340
第九节 干钻卡钻	342
第十节 水泥卡钻	344
第九章 打捞工具与工艺	346
第一节 震击解卡工具	346
第二节 爆炸松扣、套铣倒扣、填井侧钻	359
第三节 钻具断落与打捞	363
第四节 井下落物与打捞	374
第十章 钻井新工艺与其他钻井技术	384
第一节 水平井钻井技术	384
第二节 小井眼钻井技术	388
第三节 欠平衡钻井技术	391
第四节 套管钻井技术	392
第五节 自动化钻井与地质导向钻井	395
第六节 套管开窗技术	396
第七节 钻井设计	399
第八节 钻井技术经济指标	403
第九节 钻井环境保护	405

绪 论

钻井是勘探和开发油气田的主要手段。要把地下的石油和天然气开采出来，要直接了解地下的地质情况，要证实已探明的构造是否含有油气以及含油气的面积和储量，都需要通过钻井来完成。钻井质量的优劣、速度的高低，直接影响着勘探与开发油气田的速度和水平。只有不断提高钻井工艺技术水平，优质、高效地钻井，才能适应石油工业飞速发展的需要，满足国民经济日益增长的要求。

第一节 钻井的种类

石油勘探和开发过程是由许多具有不同性质、不同任务的阶段组成的。在不同的阶段中，钻井的目的和任务也不一样，有的是为了探明储油构造，有的是为了开采原油、天然气。为了适应不同阶段、不同任务的需要，钻井的种类可分为以下几种。

(1) 探井。

在油气田范围内，为确定油气藏是否存在，圈定油气藏的边界，并对油气藏进行工业评价，取得油气开发所需的地质资料而钻的井称为探井。各勘探阶段所钻的井又可分为预探井、初探井、详探井等。

(2) 生产井。

为开采石油和天然气而钻的井称为生产井。生产井又可分为产油井和产气井。

(3) 注水（气）井。

为了提高采收率与开发速度，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称为注水（气）井。专为注水、注气而钻的井叫做注水井或注气井，有时统称注入井。

(4) 基准井。

在区域普查阶段，为了了解地层的沉积特征和含油气情况，验证物探成果，提供地球物理参数而钻的井称为基准井。

(5) 剖面井。

在覆盖区沿区域性大剖面所钻的井称为剖面井。目的是为了揭露区域地质剖面，研究地层岩性、岩相变化并寻找构造。主要用于区域普查阶段。

(6) 参数井。

在含油盆地内，为了解区域构造，提供岩石物性参数所钻的井称为参数井。参数井主要用于综合详查阶段。

(7) 构造井。

为了编制地下某一标准层的构造图，了解其地质构造特征，验证物探成果所钻的井称为构造井。

(8) 资料井。

为了编制油气田开发方案，或在开发过程中为某些专题研究取得资料数据而钻的井称

为资料井。

(9) 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（包括生产井、注入井、观察井等）称为调整井。这类井的生产层压力呈现低压，或因注入井保持能量而呈现高压。

(10) 检查井。

油田开发到某一含水阶段，为了搞清各油层的压力，油、气、水分布状况，剩余油饱和度的分布和变化情况，以及各项调整挖潜措施的效果而钻的井称为检查井。

(11) 观察井。

油田开发过程中，专门用来了解油田地下动态的井称为观察井，如观察各类油层的压力、含水变化规律和单层水淹规律等，它一般不负担生产任务。

钻井除在石油工业中应用以外，在国民经济建设中也得到广泛应用，如在探矿、水文地质、铁路、水力等部门，也经常应用钻井施工。

第二节 钻井的发展

在远古时代，人类为生存和取得地下资源就已经开始了掘井工作。古代钻井技术的发展一般可分为三个阶段：人工掘井；人力冲击钻；机械顿钻（冲击钻）。我国在利用钻井开发地下资源方面有着悠久的历史。据记载，早在两千多年前在四川就已经钻凿了盐井，并创造了冲击钻，其基本原理至今仍为人们所利用。在北宋时代，人力绳索式顿钻方法得到了发展。在1521年就钻凿了油井和火井（天然气井），1835年在四川钻成深达1200m的火井，这是当时世界上最深的井。

1901年，开始了以转盘带动钻柱、钻头破碎井底岩石并循环钻井液以清洁井底的旋转钻井方法。目前，在石油钻井中，尽管钻井目的不同，井的深浅各异，不论在陆地还是在海上，都是用旋转方法钻井，包括转盘旋转钻、井下动力旋转钻及顶部驱动旋转钻。随着现代科学技术的发展，旋转钻井工艺技术也得到迅速发展，其特点是：从经验钻井发展到科学化钻井；从浅井、中深井发展到深井、超深井；从钻直井（垂直井）、定向井发展到大斜度定向井、水平井、分支井；从陆地钻井发展到近海和深海钻井。国际现代旋转钻井技术的发展分为四个时期：

(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封固套管工艺技术。

(2) 发展时期（1920—1948年），在这个时期内，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—1969年），这个时期开展了大量的研究工作，研究钻井工艺中的内在规律，使钻井技术有了迅速发展。其主要技术成就有：水功率的充分利用（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与固相控制；钻进参数优选；平衡压力钻井技术与井控技术等。

(4) 自动化钻井时期（1969年至现在），在这个时期发展了钻进参数自动测量、综合录井、随钻测量技术；计算机在钻井中得到广泛应用；优化钻井、自动化钻机、井口机械化自动化工具、井眼轨迹遥控及自动闭环控制等新技术、新工艺、新设备也

应运而生。

第三节 钻井过程

钻井过程主要包括：利用钻头、钻具等工具，按照钻进技术高效率地破碎岩石，取心、固井与完井，预防与处理钻井事故等。一口井的钻井过程从确定井位到最后试油、投产，要完成许多作业，现分述如下。

一、钻前准备

在确定井位、完成钻井设计与地质设计后，钻前工程是钻井施工中的第一道工序，它主要包括：

- (1) 修公路：修建通往井场的运输公路，以便运送钻井设备及器材等。
- (2) 井场与设备基础准备：根据井的深浅、设备的类型及设计要求来平整井场，进行设备基础施工（包括钻机、井架、钻井泵动力机等的基础）。
- (3) 钻井设备搬运与安装：包括设备搬运、就位、找正、调整、固定，钻井循环管线和油、气、水、保温管线的安装，设备试运转，安装验收以及安全检查等。
- (4) 井口准备：包括挖圆井（有的井不挖）、下导管并封固、钻大鼠洞与小鼠洞等。

二、钻进

钻进是指以一定压力作用在钻头上，并使钻头旋转使之破碎井底地层岩石，井底岩石被破碎后所产生的岩屑通过循环钻井液被携带到地面上来。加在钻头上的压力是利用部分钻柱（钻铤）的重力来完成的，钻头的旋转是由转盘或顶驱动力水龙头带动钻柱与钻头旋转来实现的。在使用井下动力钻具时，钻柱不旋转，井下动力钻具带动钻头旋转。在钻进过程中，只要钻具在井内，就应不断循环钻井液，避免造成井下事故。

在钻进中，钻头不断破碎岩石，井眼逐渐加深，则钻柱也需要接长，因而需要不断加接钻杆（亦称接单根）。

由于钻头在井底破碎岩石，钻头会逐渐磨损，机械钻速会下降，当钻头磨损到一定程度时，则需要更换新钻头。为此，需将全部钻柱从井内起出（亦称起钻），更换新钻头后再将新钻头与全部钻柱下入井内（亦称下钻），这一过程称为起下钻。有时为了处理事故、测井等也需进行起下钻作业。

在钻井过程中，井眼不断加深，所形成井眼的井壁应当稳定并不发生复杂情况以保证继续钻进。在钻进中要钻穿各种地层，而各地层的特点不同，其岩石强度有高有低，有的地层含高压油、气、水等流体，有的含有盐、石膏、芒硝等成分，这些对钻井液都有不良影响。强度低的地层会发生坍塌，或被密度大的钻井液压裂而发生井漏等复杂情况，妨碍继续钻进，这就需要下入套管并注入水泥予以封固，然后用较小的钻头继续钻出新的井段。每改变一次钻头尺寸（井眼尺寸），开始钻新的井段的工艺都叫做开钻。一般情况下，一口井的钻井过程中应有几次开钻，井深和地层情况不同，则开钻次数也不同。

第一次开钻（一开）：从地面钻出较大井眼，到一定设计深度后下表层套管。

第二次开钻（二开）：从表层套管内用较小尺寸的钻头继续钻进，若地层不复杂，则可直接钻到目的层后下油层套管完井。如果遇到很难用钻井液控制的漏喷同层等复杂地层时，则要下技术套管。

第三次开钻（三开）：从技术套管内再用小一点尺寸的钻头往下钻进。若地层不妨碍继

续钻进，可一直钻达目的层；若地层妨碍继续钻进，可再下第二层、第三层技术套管，再进行第四次、第五次开钻，（二开或三开、四开、五开进尺钻完时间称为中期完钻，中期完钻后的电测、下套管、注水泥等施工称为中期完井施工，简称中完）直到最后钻到目的层深度（完钻）。

三、固井和完井

固井是在已钻成的井眼内下入套管，然后在套管与井壁之间的环形空间内注入水泥浆（在套管的下段部分或全部环空）将套管和地层固结在一起的工艺过程，它可以防止井眼复杂情况以保证安全继续钻进下一段井眼（对于表层、技术套管而言）或保证顺利开采油气（对于油层套管而言）。套管柱的上部在地面用套管头予以固定。

完井工程包括：钻开油气层，进行油气层和井眼的连通，安装完井的井口装置。完井作业还包括下油管、装油管头和采油树，然后进行替喷、诱导油流使油气流进入井眼，流出地面进行计量，进而便可进行采油生产。

另外，在整个油井的建井过程中还需进行岩屑录井、测斜、电测、气测等施工，必要时要进行取心施工。探井在钻到油层时要进行中途测试施工。

上述作业全部完成并合格后，便可进行移交工作（交井），最后对该井进行成本核算，同时进行拆卸设备与下口井的准备工作。

第一章 钻 头

钻头是破碎岩石的主要工具。钻头质量的优劣、钻头与岩性及其他钻井工艺条件是否适应,将直接影响钻井速度、钻井质量和钻井成本。为适应钻井工艺的要求并随着钻井技术的发展以及材料和机械制造业的发展,钻头的设计、制造和使用也有了很大的改进,而且仍在改进之中。这种改进体现在新技术在钻头上的充分、及时的应用,钻头品种和使用范围的不断扩大,钻头技术指标与经济指的不不断提高等方面。

本章介绍金刚石钻头、牙轮钻头的结构、工作原理以及选择和使用方面的基础知识,为钻井工作者正确选择及使用钻头打好基础。

石油钻井中使用的钻头分为牙轮钻头、金刚石钻头与刮刀钻头三大类,其中牙轮钻头使用正在逐年减少,而金刚石钻头用量正在逐年增加,刮刀钻头趋于淘汰。

钻头尺寸以其钻出的井眼内径为公称尺寸,国际上已形成基本统一的系列,常见钻头尺寸为 26in, 20in, 17 $\frac{1}{2}$ in, 14 $\frac{3}{4}$ in, 12 $\frac{1}{2}$ in, 10 $\frac{5}{8}$ in, 9 $\frac{1}{2}$ in, 8 $\frac{1}{2}$ in, 7 $\frac{7}{8}$ in, 6 $\frac{1}{2}$ in, 5 $\frac{7}{8}$ in, 4 $\frac{3}{4}$ in (1in=25.4mm)。

第一节 岩石的机械性质

地下岩石是钻头的工作对象,在讲述钻头之前应首先对岩石的机械性质进行简单介绍。

一、岩石的机械性质

(一) 岩石的弹性

物体在外力作用下产生变形,外力撤除以后,变形随之消失,物体又恢复到原来的形状和体积的性质称为弹性变形;当外力撤除后,变形不能消失的性质称为塑性变形。产生弹性变形的物体在变形阶段,应力与应变的关系服从虎克定律:

$$\delta = E \varepsilon \quad (1-1)$$

式中 δ ——应力;

ε ——应变;

E ——弹性模量。

对于岩石,特别是对于沉积岩而言,由于矿物组成、结构等方面的特点,岩石与理想的弹性材料相比有很大的差别,但仍可以测出岩石的有关弹性常数以满足工程和施工的需要。组成岩石的矿物在单独存在时的受力变形特性一般都服从虎克定律。表 1-1 列出了部分矿物与岩石的弹性模量。

(二) 岩石的脆性和塑性

在如图 1-1 的装置上对岩石进行压入破碎试验。试验是用平底圆柱压头,如图 1-2 所示,加载并压入岩石,压入过程中记录载荷与吃入深度的相关曲线,如图 1-3 所示。所有岩石的压入试验曲线都可以分为如图 1-3 所示的三种典型形态。根据这三种典型形态可以把岩石分为脆性岩石、塑性岩石和塑脆性岩石三大类。

表 1-1 矿物的弹性模量

矿物	弹性模量 E , 10GPa
刚玉	52
黄玉	30
石英	7.85 ~ 10
长石	≤ 8.0
方解石	5.8 ~ 9.0
石膏	1.2 ~ 1.5
岩盐	≤ 4.0

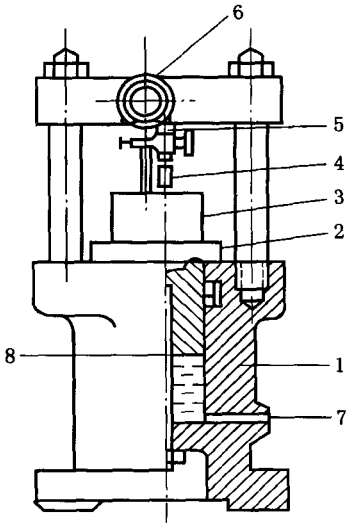


图 1-1 试验岩石硬度的装置

1—液缸缸体；2—液缸柱塞；3—岩样；4—压头；
5—压力机上压板；6—千分表；7—压力油入口；
8—柱塞导向杆

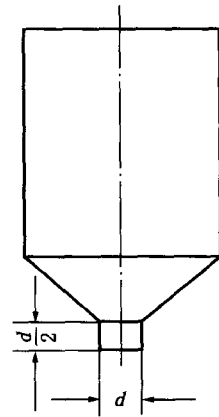


图 1-2 平底圆柱压头

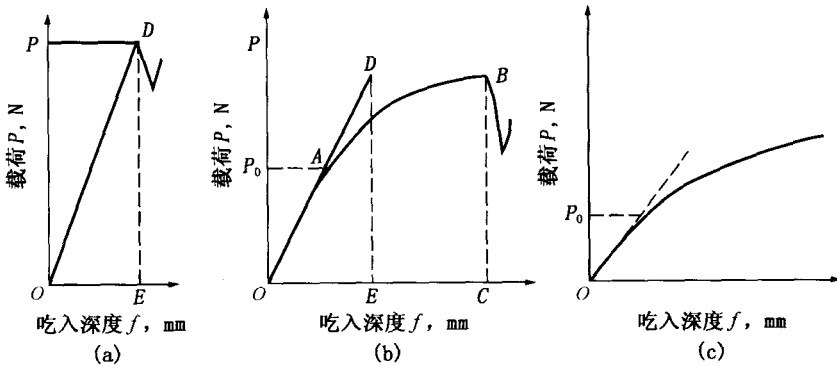


图 1-3 平底圆柱压头压入岩石时的变形曲线

岩石在外力作用下产生变形直至破坏的过程是不同的。一种情况是在外力作用下，岩石只改变其形状和大小而不破坏自身的连续性，这种情况称为塑性变形；另一种情况是岩

石在外力作用下，直至破碎而无明显的形状改变，这种情况称为脆性变形。

在图 1-3 中，(a) 为脆性岩石，其特点是 OD 段为弹性变形阶段，达到 D 点后即发生脆性破碎；(b) 为塑脆性岩石， OA 段为弹性变形阶段， AB 为塑性变形阶段，到达 B 点时产生脆性破碎；(c) 为塑性岩石，施加不大的载荷即产生塑性变形，其后变形随变形时间的延长而增大，无明显的脆性破坏现象。

用岩石的塑性系数作为定量表征岩石塑性及脆性大小的参数。塑性系数为岩石破碎前耗费的总功 A_F 与岩石破碎前弹性变形功 A_E 的比值。计算依据如图 1-3 所示的岩石压入破碎过程中的载荷—吃深曲线。因而，对于脆性岩石，破碎前的总功 A_F 与弹性变形功 A_E 相等，塑性系数 $K_P=1$ ；对于塑脆性岩石：

$$K_P = \frac{A_F}{A_E} = \frac{OABC \text{ 的面积}}{ODE \text{ 的面积}} \quad (1-2)$$

对于塑性岩石， $K_P = \infty$ 。

根据岩石的塑性系数的大小，将岩石分为 3 类 6 级，见表 1-2。

表 1-2 岩石按塑性系数的分类

类别	脆性	塑 脆 性				塑 性
		低塑性——→高塑性				
级别	1	2	3	4	5	6
塑性系数 K_P	1	>1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 6	>6 ~ ∞

一般认为，当岩石的总应变量达到 3% ~ 5% 时，就可以说该岩石已开始具有塑性性质或已实现了脆性向塑性的转变。

在钻井过程中，井眼中的岩石处于周围岩石的围压之中，岩石机械性质的一个显著变化就是随着围压的增大，岩石表现出从脆性向塑性的转变，并且围压越大，岩石破坏前所呈现的塑性也越大。表 1-3 中列出了几种岩石在围压下破坏前所达到的应变量。可以看出，除了石英砂岩在 200MPa 围压范围内始终保持着脆性破坏以外，其余几种岩石在 100MPa 以上均具有明显的塑性性质，只不过塑性的程度有所差别而已。

表 1-3 岩石在围压下的塑性变形

岩 石	在下列围压下破坏前的应变，%	
	$p=100\text{MPa}$	$p=200\text{MPa}$
石英砂岩	2.9	3.8
白云岩	7.3	13.0
硬石膏	7.0	22.3
大理岩	22.0	28.8
砂岩	25.8	25.9
石灰岩	29.1	27.2
页岩	15.0	25.0
盐岩	28.8	27.5

勃拉克 (A.D.Black) 和格林 (S.J.Green) 在 1978 年发表了美国盐湖城全尺寸深井模拟钻井装置的钻进试验结果, 确定了白云岩、砂岩和页岩由脆性向塑性转化时的围压分别为 100 ~ 150MPa、40 ~ 70MPa 和 20 ~ 40MPa。

对于深井钻井而言, 认识并了解岩石从脆性向塑性的转变压力 (或称临界压力) 具有重要的实际意义。因为脆性破坏和塑性破坏是两种本质上完全不同的破坏方式, 破坏塑性岩石和脆性岩石要应用不同的破碎工具 (不同结构类型的钻头)、不同的破碎方式 (冲击、压碎、挤压、剪切或切削、磨削等) 以及不同的破碎参数, 才能取得较好的破岩效果。

由此可见, 了解各类岩石的塑性及脆性性质以及临界压力, 是设计、选择和使用钻头的重要依据。

(三) 岩石的强度

岩石的强度是岩石在一定条件下抵抗外力破坏的能力。强度的单位是 MPa。具体地说, 岩石在一定条件下受外力的作用而达到破坏时的应力, 被称为岩石在这种条件下的强度。

岩石强度的大小取决于岩石的内聚力和岩石颗粒间的内摩擦力。岩石的内聚力表现为矿物晶体或碎屑间的相互作用力, 或是矿物颗粒与胶结物之间的连接力。岩石的内摩擦力是颗粒之间的原始接触状态即将被破坏而要产生位移时的摩擦阻力, 岩石内摩擦力产生岩石破碎时的附加阻力, 且随应力状态而变化。脆性岩石和塑性岩石的强度主要取决于岩石的内聚力和内摩擦力; 松散岩石的强度主要取决于内摩擦力。

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。

自然因素方面包括: 岩石的矿物成分 (对沉积岩而言还包括胶结物的成分和比例)、矿物颗粒的大小、岩石的密度和孔隙度 (岩石的孔隙度 ϕ 为岩石中孔隙的体积与岩石体积的比值)。同种岩石的孔隙度增加, 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的埋藏深度的增加而减小, 因此, 岩石的强度一般情况下随着埋藏深度的增加而增加。由于沉积岩存在层理, 岩石的强度有明显的异向性。岩石的结构与缺陷也对岩石的强度有影响。

工艺技术因素方面包括: 岩石的受载方式不同, 相同岩石的强度不同; 岩石的应力状态不同, 相同岩石的强度差别也很大; 此外还有外载作用的速度、液体介质性质等。

(四) 岩石的硬度

岩石的硬度是岩石表面抵抗其他物体压入或侵入的能力。

硬度与抗压强度有联系, 但又有很大区别。硬度只是固体表面的局部对另一物体压入或侵入时的阻力, 而抗压强度则是固体抵抗整体破坏时的阻力。因而不能把岩石的抗压强度作为硬度的指标。岩石的硬度分为岩石的矿物颗粒的硬度 (矿物硬度) 和岩石的组合硬度 (岩石硬度)。

岩石硬度就是胶结物的连接强度, 常见胶结物的连接强度次序为: 硅质大于铁质, 铁质大于石灰质 (钙质), 钙质大于粘土质 (泥质)。矿物硬度对钻进过程中钻头的磨损起重大影响, 岩石硬度对钻进时岩石破碎速度起重大影响。

岩石硬度与矿物硬度的测量与表示方法有很多种, 这里仅介绍石油钻井中常用的两种。

(1) 摩氏硬度: 它表示了岩石或其他材料的相对硬度。测量方法是用两种材料互相刻划, 在表面留下擦痕者则硬度较低。用 10 种矿物为代表, 作为摩氏硬度的标准, 依次是: 滑石 (1 度)、石膏 (2 度)、方解石 (3 度)、萤石 (4 度)、磷灰石 (5 度)、长石 (6 度)、

石英 (7 度)、黄玉 (8 度)、刚玉 (9 度)、金刚石 (10 度)。

在现场,常采用更简便的方法:用指甲 (2.5 度)、铁刀 (3.5 度)、普通钢刀 (5 度)、玻璃 (5.5 度)、锯条 (6 度)、锉刀 (7 度)、硬合金 (9 度) 等刻划矿物或岩石鉴别其硬度。

岩石中矿物的摩氏硬度是选择破岩工具的重要参考依据。若在岩石中占一定比例的矿物的摩氏硬度达到或接近破岩工具工作部位材料的硬度,则工具磨损很快。

(2) 岩石的压入硬度: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。史氏硬度的测试装置如图 1-1 所示。图 1-3 所示的 3 类岩石压入硬度的计算方法如下。

对于脆性岩石和塑脆性岩石,它们最终都产生了脆性破碎,岩石的硬度为:

$$P_y = P/S \quad (1-3)$$

式中 P_y ——岩石的硬度, MPa;
 P ——产生脆性破碎时压头上的载荷, N;
 S ——压头的底面积, mm^2 。

对塑性岩石,取产生屈服(即从弹性变形开始向塑性变形转化)时的载荷 P_{0y} 代替 P ,即

$$P_y = P_{0y}/S \quad (1-4)$$

钻井过程中,破岩工具在井底岩层表面施加载荷,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抗破碎的能力。我国按岩石硬度的大小将岩石分为 6 类 12 级,作为选择钻头的主要依据之一(表 1-4)。

表 1-4 岩石按硬度的分类

类别	软		中软		中硬		硬		坚硬		极硬	
级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
硬度, MPa	≤ 100	100 ~ 250	250 ~ 500	500 ~ 1000	1000 ~ 1500	1500 ~ 2000	2000 ~ 3000	3000 ~ 4000	4000 ~ 5000	5000 ~ 6000	6000 ~ 7000	>7000

(五) 岩石的研磨性

在用机械方法破碎岩石的过程中,钻头和岩石产生连续的或间断的接触和摩擦,在破碎岩石的同时,工具本身也受到岩石的磨损而逐渐变钝,直至损坏。钻头接触岩石部分的材料一般为钢、硬质合金或金刚石,岩石磨损这些材料的能力称为岩石的研磨性。研究岩石的研磨性对于正确地设计和选择使用钻头,延长钻头寿命,提高钻头进尺与钻井速度都有重要的意义。

对钻井而言,岩石的研磨性表现在对钻头刃部表面的磨损,即研磨性磨损。它是由钻头工作刃与岩石接触过程中产生的微切削、刻划、擦痕等所造成的。这种研磨性磨损除了与摩擦副材料的性质有关外,还取决于摩擦的类型和特点、摩擦表面的形状和尺寸(例如表面的粗糙度)、摩擦面的温度、摩擦体的相对运动速度、摩擦体间的接触应力、磨损产物的性质及其清除情况、参与摩擦的介质等因素。

史立涅尔等根据研磨系数 ω 值大小对岩石的研磨性进行了分类,把各种岩石(包括晶质岩石和碎屑岩)按研磨性的大小分为 12 级。

从表 1-5 的数据可以看出：盐岩、泥岩和一些硫酸盐岩、碳酸盐岩（当不含有石英颗粒时）属于研磨性最小的岩石；其次应为石灰岩和白云岩等，属于低研磨性岩石；火成岩的研磨性一般属于中等或较高，这要由这些岩石中所含长石和石英成分的多少以及颗粒度和多晶矿物间的硬度差而定。含长石及石英成分少、粒度细、矿物间的硬度差小的研磨性也小些，反之则研磨性较高；含有刚玉矿物成分的岩石应属于高研磨性的岩石；沉积碎屑岩的研磨性主要视其石英颗粒的含量及其胶结硬度而定，石英颗粒含量越多、粒度越粗、胶结强度越小的岩石，其研磨性越高，反之，如石英颗粒的含量少、颗粒细、胶结强度大的岩石，则其研磨性应较低。

表 1-5 各种岩石的研磨性分类表

级别	岩 石	淬 火 钢		硬 质 合 金	
		研磨系数 ω 10^{-9}	相对 研磨性	研磨系数 ω 10^{-9}	相对研 磨性
1	泥岩和碳酸盐岩	3.5 ~ 12	1 ~ 3	0.1 ~ 0.3	1 ~ 3
2	石灰岩	22	6.5	0.6	6
3	白云岩	20	6.0	1.2	12
4	硅质结晶岩石	31	9	2.0	20
5	含铁—镁岩石及含 5% 石英的低研磨性岩石	35	10	2.5	25
6	长石岩	40	12	3.0	30
7	含石英多于 15% 的长石岩及含石英颗粒 10% 的较低研磨性岩石	45	13	4.0	40
8	石英晶岩石	57	16	4.5	45
9	石英碎屑岩，硬度 $P_y \geq 3500\text{N/mm}^2$	57 ~ 90	16 ~ 25	—	—
10	石英碎屑岩，硬度 $P_y=2000 \sim 3500\text{N/mm}^2$ 及含石英颗粒 10% ~ 20% 的岩石	90 ~ 120	25 ~ 35	—	—
11	石英碎屑岩，硬度 $P_y=1000 \sim 2000\text{N/mm}^2$ 及含石英颗粒 30% 的岩石	120 ~ 200	35 ~ 60	5.0	50
12	石英碎屑岩，硬度 $P_y < 1000\text{N/mm}^2$	200 ~ 300	60 ~ 95	—	—

(六) 岩石可钻性

岩石可钻性是指岩石抗破碎的能力，可以理解为在一定钻头规格、类型及钻井工艺条件下岩石抵抗钻头破碎的能力。可钻性的概念把岩石性质由强度、硬度等比较一般性的概念，引向了与钻孔有联系的概念，在实际应用方面占有重要的地位。通常钻头选型、制订生产定额、确定钻头工作参数、预测钻头工作指标等都以岩石可钻性为基础。

岩石可钻性是岩石在钻进过程中显示出的综合指标，它取决于许多因素，包括岩石破岩的力学性质以及破碎岩石的工艺技术措施。岩石的力学性质主要包括岩石的硬度（或强度）、弹性、脆性、塑性、颗粒度及颗粒的胶结性质；破岩的工艺技术措施包括破岩工具的结构特点、破岩工具对岩石的作用方式、载荷或力的性质、破岩能量的大小、孔底岩屑的排除情况等。因此，岩石可钻性与许多因素有关。要找出岩石可钻性与影响因素间的精确关系是比较复杂和困难的，岩石可钻性只能在这种或那种具体破碎方法和工艺规程下，通过试验来确定。

目前，岩石可钻性的测定和分级方法并不统一。不同部门所用钻井方法不同，测定岩石可钻性的实验方法也就不相同；不同国家及地区的测定方法、测定条件及分类方法都不一致。在石油大学（北京）尹宏锦教授等研究人员多年研究结果的基础上，原石油工业部于1987年确定了我国石油系统岩石可钻性测定及分类方法。此分类方法是用微型钻头在岩样上钻孔，通过实钻钻时（即钻速）确定岩样的可钻性。具体方法是在岩石可钻性测定仪（微型钻头钻进实验架）上使用31.75mm（1¼in）直径钻头，钻压889.66N，转速55r/min的钻进参数，在岩样上钻3个孔，孔深2.4mm，取3个孔钻进时间的平均值为岩样的钻时（ t_d ），对 t_d 取以2为底的对数值作为该岩样的可钻性等级值 K_d ，一般 K_d 取整数。

$$K_d = \log_2 t_d \quad (1-5)$$

我国将地层可钻性按 K_d 的整数分为10级，见表1-6。

表1-6 地层可钻性分类表

测定值	< 4	4 ~ 8	8 ~ 16	16 ~ 32	32 ~ 64	64 ~ 128	128 ~ 256	256 ~ 512	512 ~ 1024	>1024
级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
类型	软				中			硬		

二、岩石机械性质的影响因素

（一）井内各向压力作用下温度的影响

根据深部油气藏勘探与开发的需要，目前世界上超深井的钻探日益增加，世界最深的井已达10000m以上，在地壳上部15km以内的平均地温梯度约为30℃/km，有的地区还会出现地温梯度异常的情况。在超深井钻井过程中，井下温度升高的同时，岩石所受压力随着井深的增加必然增大。因此，我们不应孤立地讨论温度对岩性的影响，应对随着井深的增加温度与压力同时增大的实际情况进行分析。

试验表明：多数沉积岩在各向压力作用下，随着温度的升高塑性增大。温度与压力对岩石强度影响差别很大，如硅质砂岩，在高温高压下强度最大，其次是白云岩；盐岩则正好相反，如在井深10000m的盐岩，其强度比地面强度下降7倍，因而在深井、超深井钻遇盐岩层时，会因其强度下降发生塑性流动而造成井下复杂情况，甚至造成固井后盐岩挤坏套管的严重恶果。根据试验，在井深10000m以内，沉积岩强度从小到大的次序是：盐岩、石灰岩、白云岩。沉积岩的塑性大小也可以从大到小排成以下序列：盐岩、泥页岩、石膏、白云岩、石英岩。

（二）液体介质的影响

在地壳上部沉积岩层中，普遍存在裂缝、微裂缝、各种孔隙空间。在这些孔隙裂缝中通常充满不同性质的液体介质。在接近地表松散沉积层的多孔岩石中所聚积的液体近于饱和程度，这是由于地面水在重力作用下的渗透作用而造成。岩石孔隙裂缝的大小、多少以及在地壳上部的空间位置及其连通状况，是液体介质在岩石中集存与运移的决定条件，例如，较疏松的砂岩、裂缝发育的石灰岩、页岩、粘土岩更易于被各种液体所充满。

地层里的液体在重力作用下产生不停地、缓慢地流动，从而使这些液体中富含各种化学物质。同时，地层液体具有比地表高的温度和压力，故而在流动过程中增大了对地层所