



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 钻井工程理论与技术

(第2版)

• 管志川 陈庭根 主编 •

 中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 钻井工程理论与技术

(第2版)

管志川 陈庭根 主编

常州大学图书馆  
藏书章

图书在版编目(CIP)数据

钻井工程理论与技术 / 管志川, 陈庭根主编. —2  
版. —东营: 中国石油大学出版社, 2017. 1  
ISBN 978-7-5636-3493-4

I. ①钻… II. ①管… ②陈… III. ①钻井工程  
IV. ①TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 007315 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 钻井工程理论与技术(第 2 版)  
作 者: 管志川 陈庭根

责任编辑: 穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社

(地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编: 266580)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

排 版 者: 青岛天舒常青文化传媒有限公司

印 刷 者: 青岛炜瑞印务有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm

印 张: 22.25

字 数: 542 千

版 印 次: 2000 年 8 月第 1 版 2017 年 1 月第 2 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-3493-4

印 数: 1—5 000 册

定 价: 46.00 元



## 内 容 提 要

本书主要讲述油气井钻井过程中的基本工艺理论及现代主要钻井技术。全书共八章,并配有便于读者自学和有利于基本知识掌握的思考题和练习题。主要内容包括:钻井的工程地质条件、石油钻机及钻井工具、钻井液、钻进参数优选、井眼轨道设计与轨迹控制、油气井压力控制、固井与完井、其他钻井技术及作业。

本书体系完整、层次清楚,深度、广度适宜,可作为普通高等院校石油工程专业的教学用书,也可供从事油气井钻探工作的工程和科技人员参考。



Preface

前言

《钻井工程理论与技术》一书是根据石油工程专业教学计划和人才培养要求编写的专业课教材。该书第1版作为普通高等教育“九五”国家级重点教材和面向21世纪课程教材于2000年8月正式印刷出版。当时由陈庭根、管志川、韩志勇、邹德永、夏俭英、李相方、王瑞和、翟应虎、周广陈、王德新等编写，全书由陈庭根、管志川主编并对最后稿件进行了统一修改，由刘希圣教授进行了全面审查。该教材于2007年被审定普通高等教育“十一五”国家级规划教材。该教材出版十几年来，经过12次印刷，有十几届石油工程专业本科生以及大量成人教育学员和网络教育学生使用了该教材。

中国石油大学(华东)石油工程学院钻井课程组在多年使用该教材授课和不断充实教学内容、征求现场工程技术人员和往届毕业生意见及建议的基础上，对教材的结构和内容进行了适当的调整和改编。全书仍本着在内容上理论与实际相结合、少而精、覆盖面广、尽量反映钻井科技新技术和新成果，在结构上符合循序渐进、有利于课堂讲解和学生自学的原则，从钻井的工程地质条件、石油钻机及钻井工具、钻井液、钻进参数优选、井眼轨道设计与轨迹控制、油气井压力控制、固井与完井、其他钻井技术及作业等多方面，系统地讲述钻井工程所涉及的基本理论、基本计算、基本设计和现代主要钻井技术的基本工艺过程与原理。该教材内容适合60学时左右的课堂讲授。

此次再版由中国石油大学(华东)石油工程学院的部分教师编写，其中绪论和第八章仍由陈庭根和王瑞和编写，第一章由程远方改编，第二章由邹德永、金业权编写，第三章由邱正松改编，第四章由管志川编写，第五章由韩志勇编写，第六章由刘刚改编，第七章由步玉环、管志川改编。全书由管志川、陈庭根主编并对最后稿件进行了统一修改。全书完稿后由廖华林教授进行了整体校核。

由于编者水平所限，其中难免有不当和错误之处，诚请使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编者

2016年10月



Contents

# 目录

绪 论 .....	1
第一章 钻井的工程地质条件 .....	6
第一节 地下压力特性 .....	6
第二节 岩石的工程力学性质 .....	23
思考题与习题 .....	39
第二章 石油钻机及钻井工具 .....	41
第一节 石油钻机 .....	41
第二节 钻 头 .....	58
第三节 钻 柱 .....	85
思考题与习题 .....	109
第三章 钻井液 .....	111
第一节 钻井液的组成与分类 .....	111
第二节 钻井液的基本性能 .....	118
思考题与习题 .....	130
第四章 钻进参数优选 .....	131
第一节 钻进过程中各参数间的基本关系 .....	131
第二节 机械破岩钻井参数优选 .....	141
第三节 水力参数优化设计 .....	146
思考题与习题 .....	166
第五章 井眼轨道设计与轨迹控制 .....	168
第一节 井眼轨迹的基本概念 .....	168
第二节 井眼轨迹测量及计算 .....	173
第三节 垂直井防斜技术 .....	183





第四节 定向井井眼轨道设计 .....	189
第五节 定向井造斜工具及井眼轨迹控制 .....	194
思考题与习题 .....	206
<b>第六章 油气井压力控制 .....</b>	<b>210</b>
第一节 油气井控基本概念 .....	210
第二节 地层流体的侵入与检测 .....	215
第三节 井控装备 .....	221
第四节 关井 .....	226
第五节 压井 .....	230
第六节 压力控制钻井 .....	235
思考题与习题 .....	241
<b>第七章 固井与完井 .....</b>	<b>243</b>
第一节 井身结构设计 .....	243
第二节 套管柱设计 .....	252
第三节 注水泥技术 .....	262
第四节 完井技术 .....	300
思考题与习题 .....	316
<b>第八章 其他钻井技术及作业 .....</b>	<b>318</b>
第一节 井下复杂情况及事故处理 .....	318
第二节 取心技术 .....	330
第三节 套管开窗技术 .....	342
思考题与习题 .....	344
<b>参考文献 .....</b>	<b>346</b>

# 绪 论

## (一)

在石油勘探和油气田开发的各项任务中,钻井起着十分重要的作用。诸如寻找和证实含油气构造,获得工业油流,探明已证实的含油(气)构造的含油气面积和储量,取得有关油气田的地质资料和开发数据,最后将原油从地下取到地面上来等,无一不是通过钻井来完成的。钻井是勘探与开采石油及天然气资源的一个重要环节,是勘探和开采石油的重要手段。

石油勘探和开发过程是由许多不同性质、不同任务的阶段组成的。在不同阶段,钻井的目的和任务不一样。一些是为了探明储油构造,另一些是为了开发油田、开采原油。因此,油气井一般定义为以勘探和开发石油、天然气等地下资源及获取地下信息为目的,在地层中钻出的具有一定深度的圆柱形孔眼。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) 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。基准井一般钻到基岩并要求全井取心。

(2) 剖面井:在覆盖区沿区域性大剖面所钻的井。目的是揭露区域地质剖面,研究地层岩性、岩相变化并寻找构造。剖面井主要用在区域普查阶段。

(3) 参数井:在含油气盆地内,为了了解区域构造,提供岩石物性参数所钻的井。参数井主要用在综合详查阶段。

(4) 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。

(5) 探井:在有利的集油气构造或油气田范围内,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及取得油气开发所需的地质资料而钻的井。各勘探阶段所钻的井又可分为预探井、初探井、详探井等。

(6) 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。

(7) 生产井:在进行油气田开发时,为开采石油和天然气而钻的井。生产井又可分为产油井和产气井。

(8) 注水(气)井:为了提高采收率及开发速度而对油田进行注水(气)以补充和合理利





用地层能量所钻的井。专为注水或注气而钻的井称为注水井或注气井,有时统称注入井。

(9) 检查井:油气田开发到某一含水阶段,为了搞清各油气层的压力和油、气、水分布状况,以及剩余油饱和度的分布和变化情况,了解各项调整挖潜措施的效果而钻的井。

(10) 观察井:油气田开发过程中,专门用于了解油气田地下动态,如观察各类油气层的压力、含水变化规律和单层水淹规律等而钻的井。观察井一般不担负生产任务。

(11) 调整井:油气田开发中、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)。这类井的生产层压力或因采油后期呈现低压,或因注入井保持能量而呈现高压。

整个油田的开发过程分为勘探、建设、生产几个阶段,各阶段互相联系,而且都需要进行大量的钻井工作。高质量、快速和高效率钻井是开发油气田的重要手段。

## (二)

钻井除在石油工业中应用以外,在国民经济建设中也得到了广泛应用。例如,在探矿、水文地质、铁路、水力及各类基本建设等部门也常利用钻井方法取得有关资料,并将钻井技术用在工程施工中。在远古时代,人类为生存和取得地下资源即开始掘井。钻井技术的发展一般可分为四个阶段:① 人工掘井;② 人力冲击钻;③ 机械顿钻(冲击钻);④ 旋转钻。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,并发明了冲击钻,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。1521年钻凿了油井和火井(天然气井),1835年在四川钻成了深达1 200 m的火井,这是当时世界上最深的井。一般认为机械顿钻(1859年)是现代石油钻井的开始。以后在1901年发展了旋转钻井方法,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。1923年苏联工程师研究出涡轮钻具,并从20世纪40年代开始得到广泛应用。以后又出现了电动钻具和螺杆钻具,统称为井下动力钻具,它们在钻定向井中具有特殊的优越性。

到目前为止,旋转钻井方法仍是石油钻井的主要方法。随着现代科学技术的发展,旋转钻井工艺技术也得到了迅速发展,其特点是:① 从经验钻井发展到科学化钻井;② 从浅井、中深井发展到深井、超深井;③ 从直井(垂直井)、定向井发展到大斜度定向井、丛式井、水平井;④ 从陆地钻井发展到近海和深海钻井。

国外钻井科技工作者将旋转钻井技术的发展分为以下四个时期:

(1) 概念时期(1901—1920年),在这个时期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),在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及固相控制;钻进参数优



选;地层压力检测、井控技术及平衡压力钻井技术等。

(4) 自动化钻井时期(1969年至今),在这个时期发展了钻井参数自动测量、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、井口机械化及自动化工具、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。

近些年来,发展了小直径井、大位移井、分支井、欠平衡压力钻井和连续管钻井。这些工艺技术的发展都有利于提高钻井效率,提高油田产量和采收率。

### (三)

在石油钻井中,尽管钻井目的不同,井的深浅各异,但无论是在陆地上还是在海上,目前都是用旋转方法钻井,包括转盘旋转钻井、井下动力旋转钻井及顶部驱动旋转钻井。

一口井的建井过程从确定井位到最后试油、投产,要完成许多作业,按其顺序可分为三个阶段,即钻前准备、钻进和固井与完井,而每个阶段又包括许多具体工艺作业。

#### 1. 钻前准备

在确定井位、完成井的设计后,钻前工程是钻井施工中的第一道工序,它主要包括以下四步。

(1) 修公路:修建通往井场的运输用公路,以便运送钻井设备及器材等。

(2) 井场及设备基础准备:根据井的深浅、设备的类型及设计要求来平整场地,进行设备基础施工(包括钻机、井架、钻井泵等的基础)。

(3) 钻井设备搬运及安装:包括设备就位、找正、调整、固定;钻井循环管线和油、气、水、保温管线及罐、保温锅炉的安装等。

(4) 井口设备准备:包括挖圆井(或不用)、下导管并封固、钻鼠洞及小鼠洞等。

#### 2. 钻进

钻进是将一定压力作用在钻头上,带动钻头旋转使之破碎井底岩石,井底岩石破碎后所产生的岩屑通过循环钻井液携带到地面上来的过程。在钻头上施加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及钻头旋转来实现的。在使用井下动力钻具时,钻柱不旋转。在钻进过程中,只要钻具在井内,就应不断循环钻井液以免造成井下事故。

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,因而需要不断接钻杆(接单根)。

由于钻头在井底破碎岩石,故钻头会逐渐磨损,机械钻速下降,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(起钻),更换新钻头后再将新钻头及全部钻柱下入井内(下钻),这一过程称为起下钻。有时为了处理事故、测井等也需要进行起下钻作业。

在钻井过程中,井眼不断加深,所形成井眼的井壁应当稳定,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





含有高压水、油、气等流体,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。改变钻头尺寸(井眼尺寸),开始钻新的井段的工艺称为开钻。一般情况下,在一口井的钻进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。其基本工艺过程有:

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一些的钻头继续钻进。若地层不复杂,则可直接钻到目的层后下油层套管完井;若地层复杂,很难用钻井液控制,则要下技术套管。

第三次开钻(三开):从技术套管内用再小一些的钻头往下钻进。根据情况,或可一直钻达预定井深,或再下第二层、第三层技术套管,再进行第四次、第五次开钻,直到最后钻达目的地层深度,下油层套管,进行固井、完井作业。

### 3. 固井与完井

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(在套管的下段部分或全部环空)注入水泥浆,将套管和地层固结在一起的工艺过程。固井可以防止发生复杂情况以保证安全钻进下一段井眼(对表层、技术套管)或保证顺利开采生产层的油、气(对油层套管)。套管柱的上部在地面用套管头予以固定。

完井工程包括钻开生产层,确定油气层和井眼的连通方式(即完井井底结构),确定完井的井口装置及有关技术措施。完井井底结构可分为四类,即封闭式井底、敞开式井底、混合式井底和防砂完井等,它们分别适应不同的油气层条件。完井作业还包括下油管、装油管头和采油树,然后进行替喷、诱导油流使油气进入井眼,以便进行采油生产。

另外,在整个油井的建井过程中还需进行岩屑录井及电测、气测等录井工作,必要时取心。探井在钻到油层时要进行钻杆测试工作。石油钻井建井过程如图 0-1 所示。

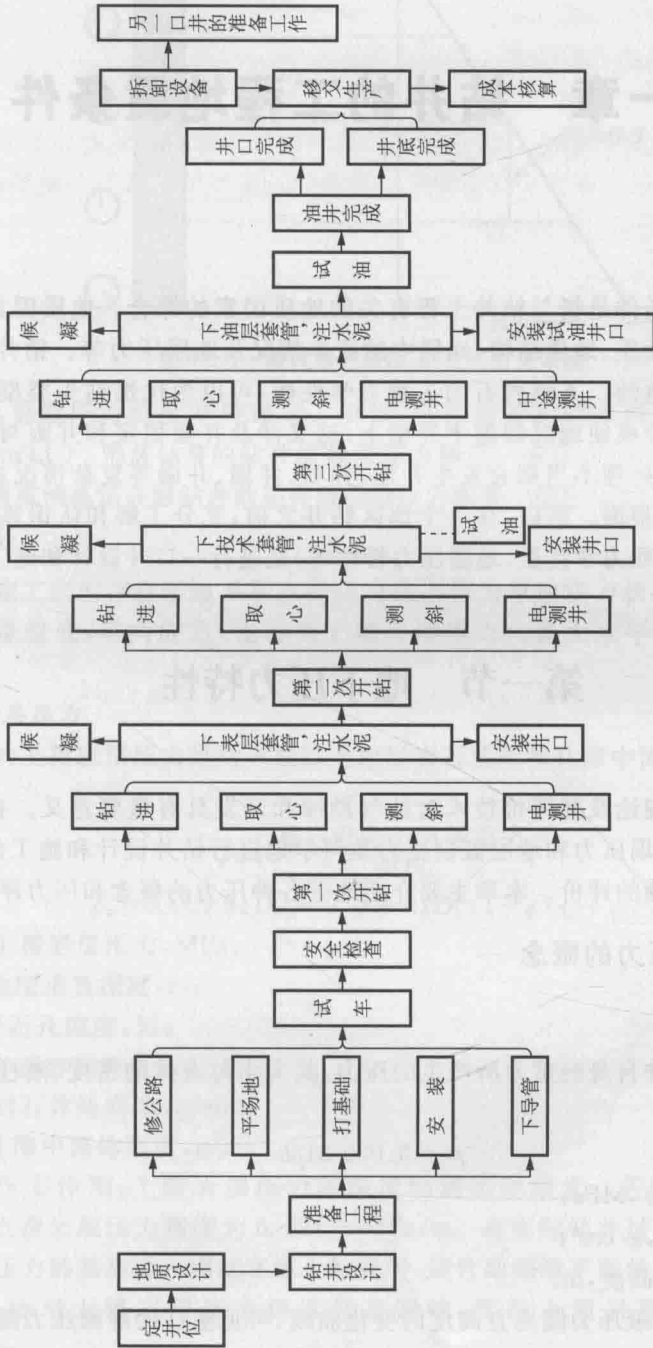


图 0-1 石油钻井建井过程



# 第一章 钻井的工程地质条件

钻井的工程地质条件是指与钻井工程有关的地质因素的综合。地质因素包括岩石、土壤类型及其工程力学性质、地质结构、地层中的流体情况及地层压力等。钻井是通过不断破碎井底岩石而逐渐钻进的。了解岩石的工程力学性质,可以为优选钻头类型和优化钻进参数提供依据。井眼的形成使地层裸露于井壁上,这又涉及井壁稳定和井眼与地层之间的压力平衡问题,对此问题处理不当则会发生井涌、井喷、井塌、井漏等复杂情况或事故,使钻进难以进行,甚至使井眼报废。所以,在一个地区钻井之前,充分了解和认识该地区的工程地质资料(包括岩石的工程力学性质、地层压力特性等)是进行一口井设计和施工的重要基础。

## 第一节 地下压力特性

地下各种压力的理论及其评价技术对油气勘探和开发具有重要意义。在钻井工程中,地层孔隙压力、地层坍塌压力和地层破裂压力是科学地进行钻井设计和施工的基本依据,因而必须对它们进行准确的评价。本章主要介绍地下各种压力的概念和压力评价方法。

### 一、地下各种压力的概念

#### 1. 静液压力

静液压力是由液柱自身的重力所产生的压力,其大小与液体的密度、液柱的垂直高度有关,即

$$p_h = 0.00981\rho h \quad (1-1-1)$$

式中  $p_h$ ——静液压力,MPa;  
 $\rho$ ——液体密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  
 $h$ ——液柱垂直高度,m。

图 1-1-1 给出了静液压力随垂直高度的变化曲线,可见液柱的静液压力随液柱垂直高度的增加而增大。常用单位高度的液柱压力(即压力梯度)来表示静液压力随高度的变化。若用  $G_h$  表示静液压力梯度,则:

$$G_h = p_h/h = 0.00981\rho \quad (1-1-2)$$

式中  $G_h$ ——静液压力梯度,MPa/m。

静液压力梯度的大小与液体中所溶解的矿物及气体的含量有关。在油气钻井中,钻

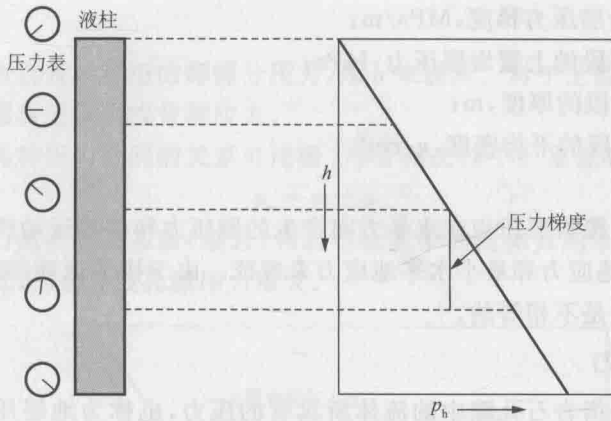


图 1-1-1 液柱垂直高度-静液压力关系图

并液类型不同,静液压力梯度差异很大。例如,气体钻井的钻井液静液压力梯度一般在 0.003 4 MPa/m 以下,泡沫钻井的钻井液静液压力梯度一般在 0.005~0.009 MPa/m 之间,常规水基钻井液或油基钻井液钻井的钻井液静液压力梯度一般在 0.01~0.025 MPa/m 之间。

## 2. 地应力

钻井工程施工之前存在于地下某点的应力状态称为原地应力状态,简称地应力。它由三个主应力分量组成:垂向应力(也称为上覆岩层压力)、最大水平地应力和最小水平地应力。

### 1) 上覆岩层压力

地层某处的上覆岩层压力是指该处以上地层岩石基质和孔隙中流体的总重力所产生的压力,即

$$p_o = \frac{\text{基岩重力} + \text{流体重力}}{\text{面积}}$$

$$p_o = 0.009\ 81D\rho_b = 0.009\ 81D[(1-\phi)\rho_m + \phi\rho_f] \quad (1-1-3)$$

式中  $p_o$ ——上覆岩层压力,MPa;

$D$ ——地层垂直深度,m;

$\phi$ ——岩石孔隙度,%;

$\rho_b$ ——岩石容积密度,g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_m$ ——岩石骨架密度,g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_f$ ——孔隙中流体密度,g/cm<sup>3</sup>。

由于沉积压实作用,上覆岩层压力随深度的增加而增大。若沉积岩的平均密度为 2.5 g/cm<sup>3</sup>,则上覆岩层压力梯度为 0.024 5 MPa/m。在实际钻井过程中,通常以钻台位置作为上覆岩层压力的基准面。因此在海上钻井时,钻台面到海平面的距离、海水的深度和海底未固结沉积物对上覆岩层压力梯度都有影响,实际上覆岩层压力梯度值要小于 0.024 5 MPa/m。

由于岩石的容积密度随埋深的增加而增大,因此上覆岩层压力梯度一般需要分层段计算,密度和岩性接近的层段作为一个分析层段,即

$$G_o = \frac{\sum p_{oi}}{\sum D_i} = \frac{\sum 0.009\ 81\rho_{bi}D_i}{\sum D_i} \quad (1-1-4)$$



式中  $G_o$ ——上覆岩层压力梯度, MPa/m;  
 $p_{oi}$ ——第  $i$  层段的上覆岩层压力, MPa;  
 $D_i$ ——第  $i$  层段的厚度, m;  
 $\rho_{bi}$ ——第  $i$  层段的平均密度, g/cm<sup>3</sup>。

2) 水平地应力

水平地应力是上覆岩层压力在水平方向产生的侧压力和构造运动产生的构造应力作用的结果,由最大水平地应力和最小水平地应力来表征。由于构造运动的结果,一般情况下这两个水平地应力分量是不相等的。

3. 地层孔隙压力

地层孔隙压力是指岩石孔隙中的流体所具有的压力,也称为地层压力,用  $p_p$  表示。在各种地质沉积中,地层压力分为正常压力和异常压力两种类型。

正常地层压力等于从地表到地下某处的连续地层水的静液压力(可用  $p_n$  表示),其值的大小与沉积环境有关,主要取决于孔隙内流体的密度和环境温度。若地层水为淡水(密度小于 1.02 g/cm<sup>3</sup>),则正常地层压力梯度(用  $G_p$  表示)为 1.0 MPa/m;若地层水为盐水,则正常地层压力梯度随地层水含盐量的大小而变化,典型的盐水质量分数为 8%,密度为 1.07 g/cm<sup>3</sup>,其压力梯度为 0.010 5 MPa/m。石油钻井中遇到的地层水多数为盐水。

异常地层压力是指地层压力大于或小于正常地层压力的现象,即压力异常现象。超过正常压力的地层压力( $p_p > p_n$ )称为异常高压,而低于正常压力的地层压力( $p_p < p_n$ )称为异常低压。图 1-1-2 给出了美国 100 口井异常高压地层的统计结果。

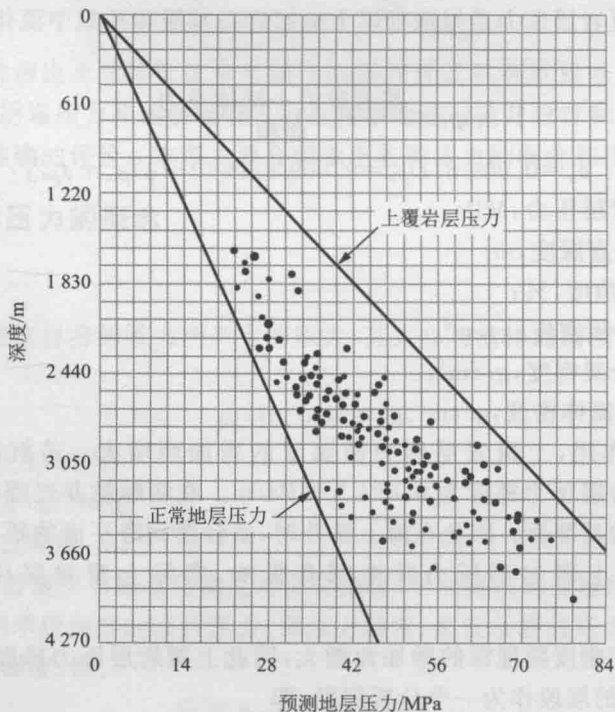


图 1-1-2 美国 100 口井异常高压地层统计结果



#### 4. 基岩应力

基岩应力是指岩石骨架承担的那部分压力,用 $\sigma$ 来表示。对于上覆岩层压力来说,其基岩应力亦称有效上覆岩层压力或骨架应力。

以上所述地下各种压力之间的关系可用图 1-1-3 和式(1-1-5)来说明。

$$p_o = p_p + \sigma \quad (1-1-5)$$

上覆岩层的重力是由岩石基质(基岩)和岩石孔隙中的流体共同承担的,所以不管什么原因使基岩应力降低,都会导致孔隙压力增大。

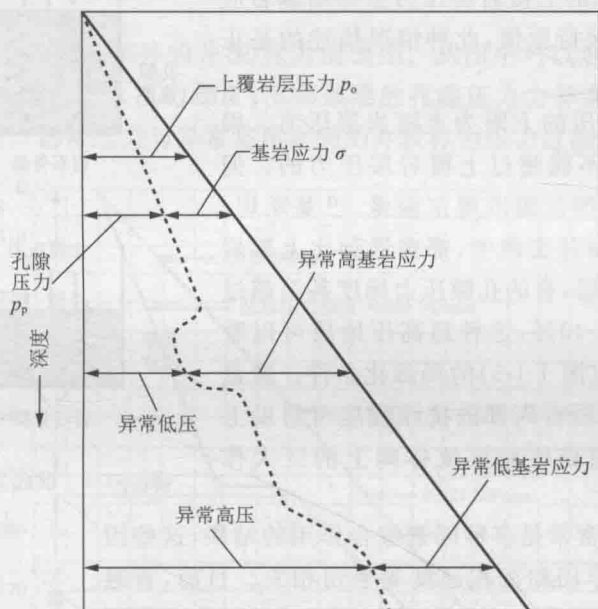


图 1-1-3  $p_o$ ,  $p_p$  和  $\sigma$  之间的关系

#### 5. 异常压力的成因

异常低压和异常高压统称为异常压力。异常低压的压力梯度小于 0.01 MPa/m(或 0.010 5 MPa/m),有的甚至只有静液压力梯度的一半。世界各地的钻井情况表明,异常低压地层比异常高压地层要少。一般认为,多年开采的油气藏而又没有足够的能量补充,便产生异常低压;地下水位很低的地区也会产生异常低压现象。在这样的地区,正常的流体静液压力梯度要从地下潜水面开始算起。异常高压地层在世界各地广泛存在,从新生代更新世到古生代寒武纪、元古代震旦纪都曾遇到。

异常压力形成的机制非常复杂,且不同区域形成机制可能有所不同。对于沉积地层,正常的流体压力体系可以看成是一个水力学的“开启”系统,即可渗透的、流体可以流通的地层,它允许建立或重新建立静液压力条件。与此相反,异常高压地层的压力系统基本上是封闭的。异常高压和正常压力之间有一个封隔层,它可以阻止或至少大大地限制流体的流通。这样上部基岩重力有一部分由岩石孔隙内的流体所支撑,形成了欠压实现象。一般认为欠压实机制是形成异常高压的最主要机制,通常用欠压实模型来描述。图 1-1-4 给出了模拟压实过程的简单模型,容器内有流体和弹簧,流体代表孔隙流体,弹簧代表岩石骨架,活塞的受力代表上覆岩层压力,则上覆岩层压力由弹簧力和流体压力共同承担。因此,上覆岩层压





力、基岩应力和地层压力的关系满足式(1-1-5)。

从模型中可以看出,随着上覆岩层压力的增加,基岩应力和地层压力都将增大。如果不允许流体排出孔隙空间(排水阀关闭,图1-1-4b),则地层压力会超过正常地层压力,产生异常高压。由于水的不可压缩性,增加的上覆岩层压力由地层压力承担,而基岩应力没有增加。如果地层流体可以自由流出(排水阀开启,图1-1-4c),增加的上覆岩层压力全部由基岩应力承担,而流体压力保持原值,此种情况描述的是正常压力地层的环境。

通常认为异常高压的上限为上覆岩层压力。根据稳定性理论,它是不能超过上覆岩层压力的。但是,在一些地区,如中国新疆准噶尔南缘、巴基斯坦、伊朗、巴比亚等地的钻井实践中,都曾遇到比上覆岩层压力高的超高压地层,有的孔隙压力梯度甚至超过上覆岩层压力梯度的40%,这种超高压地层可以看作存在一个“压力桥”(图1-1-5)的局部化条件。覆盖在超高压地层上面的岩石内部的抗压强度可帮助上覆岩层部分地平衡超高压地层流体向上的巨大作用力。

异常高压的形成常常是多种因素综合作用的结果,这些因素与地质作用、构造作用和沉积速度等密切相关。目前,普遍公认的异常高压成因主要有沉积欠压实、水热增压、渗透作用和构造作用等。由于沉积压实过程是目前各种地层压力评价方法的理论依据,因此下面对其做进一步的描述。

沉积物的压缩过程是由上覆沉积层的重力所引起的。随着地层的沉降,上覆沉积物不断增加,下伏岩层逐渐被压实。如果沉积速度较慢,孔隙中的流体就有足够的时间被挤出,沉积层内的岩石颗粒重新紧密排列,使孔隙度减小。如果是“开放”的地质环境,被挤出的流体就沿着阻力小的方向,或向着低压高渗透方向流动,于是便建立起正常的静液压力环境。这种正常沉积压实的地层,随着地层埋藏深度的增加,岩石越来越致密,密度越来越大,孔隙度越来越小。地层压实能否保持平衡,主要取决于四种因素:①上覆沉积物沉积速度的大小;②地层渗透率的大小;③孔隙度减小的速度;④排出孔隙流体的能力。如果沉积物的沉积速度与其他过程相比很慢,沉积层就能正常压实,保持正常的静液压力。

在稳定沉积过程中,若保持平衡的任意条件受到影响,正常的沉积平衡就被破坏。如果沉积速度很快,岩石颗粒没有足够的时间重新排列,孔隙内流体的排出受到限制,基岩应力无法增加,即无法增加基岩对上覆岩层的支撑能力。由于上覆岩层继续沉积,负荷增加,而下面基岩的支撑能力没有增加,孔隙中的流体必然开始部分地支撑本应由岩石骨架支撑的

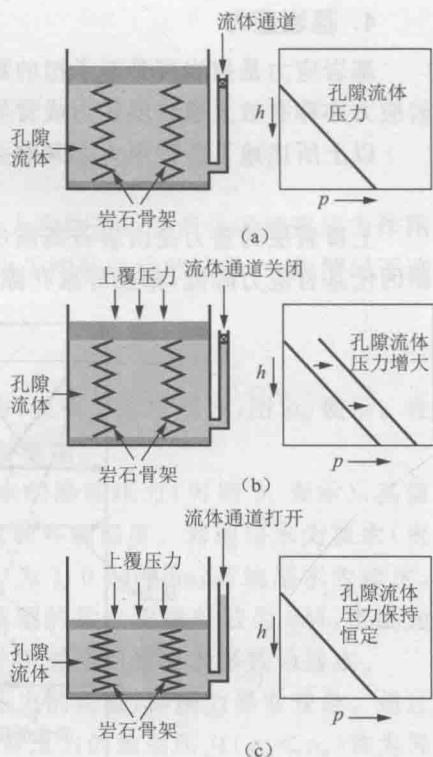


图 1-1-4 形成异常高压的欠压实模型

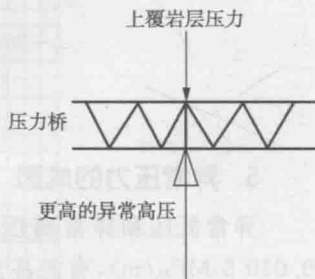


图 1-1-5 压力桥