



高等院校“十一五”规划教材

钻井工程

龙芝辉 张锦宏 主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等院校“十一五”规划教材

钻 井 工 程

龙芝辉 张锦宏 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书主要讲述油气井钻井过程中的基本工艺及理论基础,注重理论与工程应用相结合。全书共九章,并配有必要的练习题,主要内容包括:地下各种压力及井身结构、岩石工程力学性质及钻头、钻柱、井眼轨道设计及轨迹控制、钻井液流变特性及环空净化、钻进参数确定、油气井固井及完井、油气井压力控制、钻井事故处理及其他作业。

本书体系完整,层次清楚,深度、广度适宜,适合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技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钻井工程 / 龙芝辉, 张锦宏主编. —北京: 中国石化出版社, 2010. 1

高等院校“十一五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 5114 - 0198 - 4

I. ①钻… II. ①龙… ②张… III. ①油气钻井 - 高等学校 - 教材 IV. ①TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 224895 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 16.75 印张 419 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

定价: 35.00 元

编者的话

《钻井工程》一书是根据油气井钻井工程学科知识体系和石油工程专业人才培养要求编写，供石油工程专业学生作为专业课程教材使用。全书遵循理论与工程实际相结合、便于工程应用、尽量反映钻井工程科技新技术和新成果的原则，从地下各种压力及井身结构、岩石工程力学性质及钻头、钻柱、井眼轨道设计及轨迹控制、钻井液流变特性及环空净化、钻进参数确定、油气井固井及完井、油气井压力控制、钻井事故处理及其他作业等多方面，系统讲述了钻井工程所涉及的基本理论、基本计算、基本设计和基本工艺过程。本教材的编写是由长期从事钻井工程课程教学的教师在讲稿基础上，经过整理、修改和完善而成，配有便于学生学习掌握基本知识和方法必要的练习题。本教材在内容编排上注重油气井钻井工程学科知识体系和工艺过程，考虑到人们对问题的认知规律，基本符合循序渐进的原则，有利于课堂讲解和学生自学。

本教材由重庆科技学院石油工程系的部分教师、并请油田专家参与集体编写而成，其中第一章、第三章、第六章由龙芝辉(教授)编写，第四章由曾志军编写，第五章由龙政军编写，第二章、第九章由刘继林编写，第七章由高龙柱编写，第八章由张锦宏(中国石化华东石油局，教授级高工)编写，全书由龙芝辉、张锦宏主编并就最后定稿进行了统一修改，全书完稿后由郝瑞先生进行了全面审查，苏堪华、郭晓乐参加了本教材的编排整理工作。由于主编的水平所限，加之时间仓促，其中不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。

目 录

绪 论	(1)
第一章 地下各种压力及井身结构	(5)
第一节 地下各种压力概述	(5)
第二节 地层压力预测方法	(7)
第三节 地层破裂压力预测方法	(11)
第四节 井身结构设计	(14)
第二章 岩石的工程力学性质及钻头	(20)
第一节 岩石的工程力学性质	(20)
第二节 钻头	(32)
第三章 钻柱	(64)
第一节 钻柱的各部分结构、规范	(65)
第二节 钻柱的工作及受力	(72)
第三节 钻柱强度设计	(77)
第四章 井眼轨道设计及轨迹控制	(81)
第一节 井眼轨迹的基本概念	(82)
第二节 井眼轨迹测量及计算	(88)
第三节 直井井眼轨迹控制	(94)
第四节 定向井井眼轨道设计	(101)
第五节 定向井井眼轨迹控制	(108)
第六节 水平井钻井技术简介	(125)
第五章 钻井液流变特性及环空净化	(130)
第一节 钻井液流动特点	(130)
第二节 钻井液流变模式	(132)
第三节 钻井液环空流动携岩	(136)
第六章 钻进参数确定	(143)
第一节 钻进过程基本关系	(143)
第二节 钻压、转速确定	(148)
第三节 钻进循环流动压耗计算	(152)
第四节 钻进水力参数确定	(158)
第七章 油气井固井及完井	(173)
第一节 利用压力剖面设计井身结构	(173)
第二节 套管柱强度设计	(176)
第三节 固井注水泥工艺	(185)
第四节 油井水泥的水化及水泥浆性能	(192)

第五节	提高注水泥质量的措施	(195)
第六节	完井技术	(198)
第八章	油气井压力控制	(204)
第一节	井底压力及钻井液密度确定	(204)
第二节	溢流的发生、发现及关井	(208)
第三节	发生溢流关井后的处理	(215)
第四节	天然气溢流对井内压力的影响	(217)
第九章	钻井事故处理及其他作业	(223)
第一节	钻井事故及其预防和处理	(223)
第二节	特殊钻井作业	(246)

绪 论

(一)

“钻井工程”全称是“油气井钻探工程”。钻探属“地矿工程学”的分支，油气井钻探习惯上称为“钻井”。这儿的“井”是指从地面往下凿成的深洞。“钻探”则是指使用专门的设备和工具，小面积地破碎岩石，钻入地下，以勘探和开发地下资源为主要目的的作业过程。钻井工程是勘探与开采石油及天然气资源的一个重要环节，钻井则是勘探和开发石油及天然气资源的重要手段。

钻探工程在国民经济中占有相当重要的地位，其主要应用方面有：①为了解和查明地下地层及地质构造、矿产资源等，需要进行“地质普查钻探”及“矿产勘探钻探”。②为了查明及开发地下水资源，需要进行“水文地质钻探”及“水井钻探”。③为查明大型建筑及设施的地质基础，需要进行“工程地质钻探”。④为了勘探和开发地下的石油及天然气资源，需要进行“油气井钻探”。⑤为了勘探和开发地热资源，需要进行“地热钻探”。

钻探工程具有悠久的历史，据记载早在两千多年前，我国四川地区就开始了钻凿“盐井”，采用绳索式顿钻法，到1835年，钻成井深达1200m，这是当时世界上最深的井。而现代钻探技术，美国一直居于世界领先水平。1859年出现机械顿钻法钻井，是现代石油钻井的开始。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，前苏联工程师研究出了涡轮钻具，并在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“井下动力钻具”，出现了“井下动力钻井方法”，属旋转钻井方法的一种。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、丛式井、水平井；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四个时期，即：

(1) 1901~1920年，现代钻探工艺开始形成，开始将钻井与洗井结合在一起，使用了牙轮钻头和下套管注水泥封固工艺技术。

(2) 1920~1948年，现代钻探工艺得到进一步发展和完善，发展了牙轮钻头、固井工艺、钻井液，出现了大功率钻井设备。

(3) 1948~1969年，科学研究促进了钻探工程的迅速发展，形成了一整套的钻探技术，研究钻井工艺的内在规律，基本形成喷射钻井技术、镶齿滑动密封轴承钻头技术，低固相、无固相不分散体系钻井液及固相控制技术，钻井参数优选技术，地层压力检测技术，平衡压力钻井和井控技术。

(4) 1969到现在，钻探作业逐步向自动化过渡，发展了钻井参数自动测量、综合录井、随钻测量技术，计算机广泛应用、机械化或自动化工具推广应用，新工艺新技术也应运而生。

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有利于提高钻井效率,提高油田产量和采收率。

(二)

钻井工程要用到专门的设备和工具。通过长期的钻井实践,并经过不断的发展和完善,逐步形成了今天的一整套钻井设备系统。通常根据各部分的功能不同,把钻井设备系统分为五个小的系统:①起升设备系统;②旋转系统;③循环系统;④动力及传动系统;⑤辅助设备系统。运用钻井设备进行钻井的基本过程,按其顺序分为三个阶段,即钻前准备、钻进过程、完井作业。

(1) 钻前准备

首先依据钻探需要确定井位,然后完成井的设计。在石油勘探和开发过程中,由于每口井的钻井目的和任务不同,一些井是为了探明储油构造,另一些井是为了开发油气田需要,钻井设计也有所不同,常把井分为不同的类型。

钻前工程是钻井施工的第一道工序,它主要包括:①修公路,以保证通往井场的物资运输;②建井场及设备基础,为钻机、井架、钻井泵等设备准备基础和钻井场地;③设备搬运、安装并调试;④井口准备,包括挖圆井、下导管并封固、钻大鼠洞及小鼠洞等。

(2) 钻进过程

入井钻具中起破碎井底岩石作用的破岩工具叫“钻头”,连接井底钻头与地面设备的管串叫“钻柱”。钻进时,利用部分钻铤的重力作用,以一定压力作用在钻头上形成“钻压”,由转盘或顶驱动力水龙头带动钻柱及钻头旋转(在使用井下动力钻具时,钻柱不旋转),使钻头旋转破碎井底地层岩石,加深井眼。井底岩石被破碎后所产生的岩屑则通过循环钻井液被携带到地面上来,这一过程称为“洗井”。

在钻进中,钻头不断破碎岩石,井眼逐渐加深,则钻柱也需要加长,因而需要不断加接钻杆(接单根)。由于钻头在工作中会有磨损,机械钻速会下降,当钻头磨损到一定程度则需要更换新钻头,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,有的地层含高压水、油、气等流体,有的含有盐、石膏等。这些会给钻井带来复杂情况,妨碍继续钻进进行,这需要下入套管并注入水泥进行封固,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叫“开钻”,一般情况下,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。

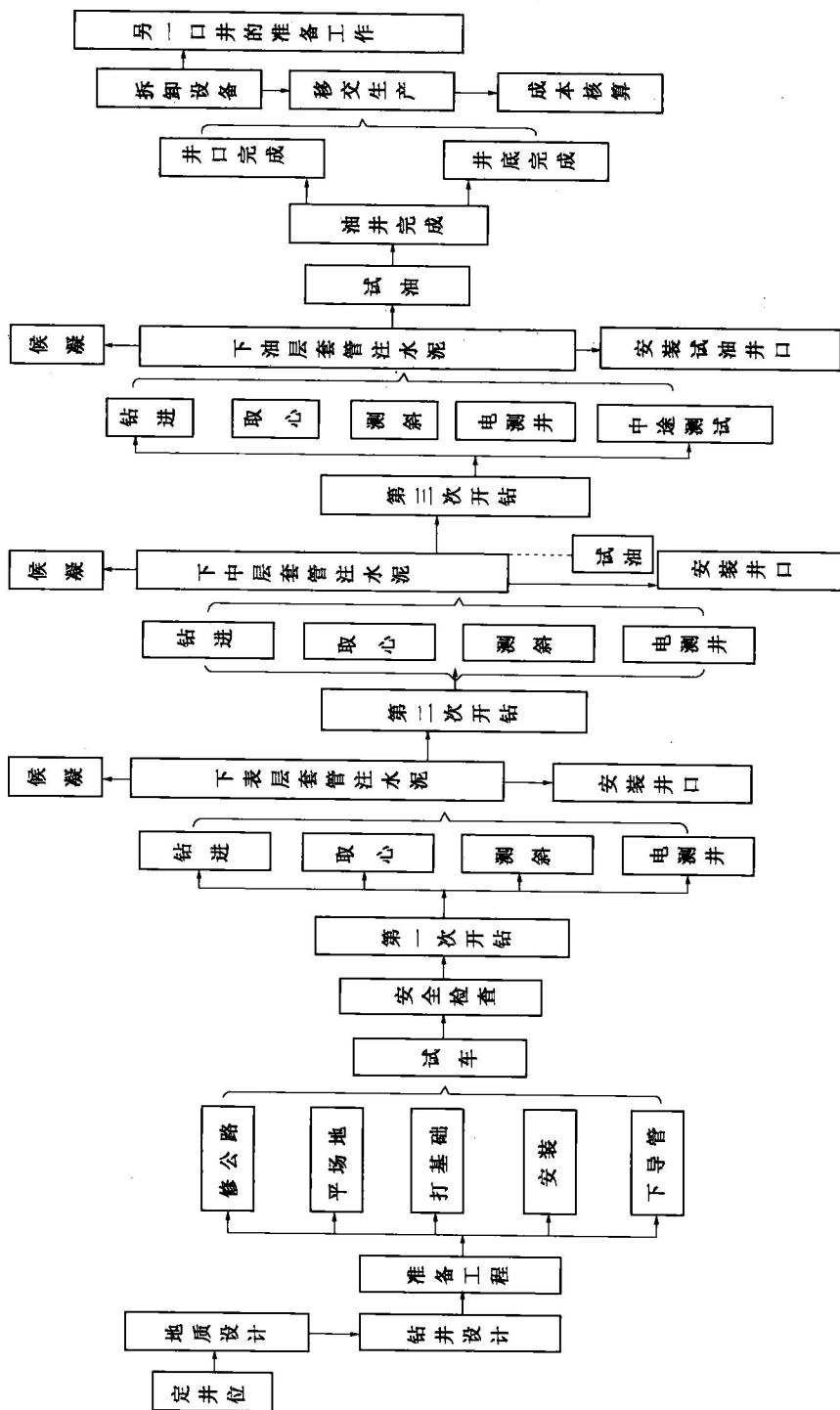
(3) 固井和完井

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,它可以防止复杂情况以保证安全继续钻进下一段井眼。钻进过程主要进行三方面的工作:①破碎岩石;②清除岩屑;③保护井壁。

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。完井作业则包括下油管、装油管头和采油树，然后进行替喷、诱导油气流，使油气进入井眼。

石油钻井建井过程如下框图所示。



(三)

钻井的对象是地层，地层的主体是岩石，岩石是由矿物颗粒胶结而成，存在孔隙空间。通常把岩石中的固体部分称为“基岩”，用“孔隙度”的概念描述地层孔隙空间多少。在岩石孔隙空间内会储存有某些流体，流体具有一定的液压力，称“地层孔隙压力”或“地层压力”；在岩石的颗粒间存在相互的作用力称“基岩压力”；某一深度以上地层的重力构成“上覆岩层压力”。在地层中，地层孔隙压力、基岩压力和上覆岩层压力之间存在一定的力平衡关系。通常情况下，随地层埋藏深度增加，上覆岩层压力越大，地层被压得越实，地层孔隙压力和基岩压力也越大。

此外，进入地下越深则地温会越高，通常把深度每增加 100m 地层温度增高的度数称为“地温梯度”，不同地区的地温梯度有所不同，地壳的平均地温梯度约为 $2.5^{\circ}/100\text{m}$ 。

这些地层的共同特征，对钻井工程有一定影响，在学习过程中应予以重视。

第一章 地下各种压力及井身结构

钻井工程要大量地破碎地层岩石, 钻过各种地层。在钻进前, 地层中各种压力保持着自身的平衡。在钻进地层的过程中, 井眼不断地形成, 使地层裸露于井壁, 破坏了地层中各种压力的平衡关系, 形成地层压力、地层破裂压力、地层坍塌压力与井筒液压力等新的压力关系。对此问题处理不当则会发生井侵、溢流、井涌、井喷或压裂地层发生井漏等复杂情况或事故, 使钻进难以进行, 甚至使井眼报废。地层压力和地层破裂压力还是钻井工程设计和施工的重要依据之一, 只有准确的掌握地层压力, 才能做到合理的钻井工程设计, 有效地进行油气井压力控制, 实现安全快速钻进, 降低钻井成本。

经过多年的探索, 已形成利用地震资料、测井资料或钻进参数等预测或检测地层压力的方法, 通过理论分析或液压试验预测或检测地层破裂压力的方法, 对钻井技术的发展起到了重要的作用。

第一节 地下各种压力概述

地下各种压力主要指地层压力、地层破裂压力、上覆地层压力、基岩应力和静液柱压力。

一、地层压力

地层压力是指地层孔隙内流体所具有的压力, 也称“地层孔隙压力”, 常用 p_p 表示。

(1) 若从埋藏垂深为 H 的地层到地面各地层孔隙是连通的, 那么, H 垂深处的地层孔隙压力, 就是由 H 以上地层中流体的静液柱重力产生。

据“水力学”原理, 在此情况下可计算出 H 处地层孔隙压力为

$$p_p = \sum_{i=1}^n \rho_{hi} g H_i \quad (1-1)$$

式中, ρ_{hi} 为计算深度以上 H_i 地层孔隙中流体的平均密度, g/cm^3 ; H_i 为计算地层厚度, m ; n 为计算深度以上的地层数; $g = 9.8 m/s^2$ 为重力加速度; 此时 $p_p = p_h$, 也称“静液压力”, 常用 p_h 表示, 本式单位为 kPa , 地层压力由地层孔隙中流体的静液柱压力引起。

当计算深度以上各地层孔隙中流体的平均密度为 ρ_h 时, 上式可写成

$$p_p = p_h = \rho_h g H \quad (1-2)$$

影响地层孔隙中流体密度大小的所有因素(如溶解在液体中的盐类, 气体的浓度、温度等)都会影响到静液压力大小。

人们常把单位垂深压力的增加值称为“压力梯度”, 习惯记为 G , 常用单位 kPa/m 或 MPa/m 表示。静液压力梯度为

$$G_h = \frac{p_h}{H} = \rho_h g \quad (1-3)$$

通常, 钻井工程中所遇到的有代表性的地层静液压力梯度主要有两类, 一类是淡水地质盆地, 平均 $G_h = 9.8 kPa/m$; 另一类是盐水地质盆地, 平均 $G_h = 10.5 kPa/m$ 。

(2) 钻探实践表明,各地层的地层孔隙压力并不总是等于静液柱压力,经常会遇到地层孔隙压力异常现象,实际地层孔隙压力可能大于或小于正常地层静液柱压力。在钻井工程中,把地层压力等于正常地层静液压力的地层称为“正常压力地层”,把地层压力大于正常地层静液压力的地层称为“异常高压地层”,把地层压力小于正常地层静液压力的地层称为“异常低压地层”,由此把钻进地层分为三类。

地层压力的一般表达采用静液压力表达式, $p_p = \rho_p g H$, 式中 ρ_p 称为“地层孔隙压力当量钻井液密度”, 简称“地层压力当量密度”。

何谓“压力当量密度”? 若已知 H 深度处的地层压力为 p_p , 则设想地层压力 p_p 相当于密度为 ρ_p 、高为 H 的液柱产生的压力, 这个密度 ρ_p 就叫压力 p_p 的当量密度。即

$$\rho_p = \frac{p_p}{gH} \quad (1-4)$$

同理, 也常用地层压力梯度来表达地层压力, 即

$$G_p = \frac{p_p}{H} = \rho_p g \quad (1-5)$$

正常压力地层具有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闭层, 它阻止了或至少大大地限制了流体的流通。从地质环境来看, 在正常压力地层与异常压力地层之间, 必然有不传递液压力的“封闭圈”, 将异常压力地层中的流体封闭起来, 所以异常压力地层(区域)是一个“封闭”的系统, 也称“压力圈闭”系统。异常压力地层形成原因属地质学科研究的范畴, 可查阅相关书籍。

二、上覆地层压力

上覆地层压力指计算深度以上的地层岩石基质和孔隙内流体的总重力产生的压力, 常用 p_0 表示。即

$$p_0 = \frac{\text{地层基质重力} + \text{地层孔隙内流体重力}}{\text{计算面积}} \\ = \frac{\rho_r g (1 - \phi) H A + \rho_h g \phi H A}{A}$$

式中, H 为所求地层位置的垂深(或上覆地层厚度), m; A 为计算面积, m^2 ; ϕ 为地层中的平均孔隙度, %; ρ_r 为地层基质平均密度, g/cm^3 ; p_0 单位, kPa。

上式也写成

$$p_0 = [(1 - \phi)\rho_r + \phi\rho_h] g H = \rho_0 g H \quad (1-6)$$

式中, ρ_0 为上覆地层压力当量密度, g/cm^3 。

当多个上覆地层具有各自不同的孔隙度、地层基质密度和地层水密度时, 用压力叠加的办法计算上覆地层压力, 即

$$p_0 = \sum_{i=1}^n p_{0i} \quad (1-7)$$

上覆地层压力梯度为

$$G_0 = \frac{p_0}{H} = \rho_0 g \quad (1-8)$$

由于沉积压实作用, 随地层埋藏深度增加, 上覆地层压力增大, 地层孔隙度下降, 地层

基质密度增加。一般沉积岩的平均密度大约为 2.5g/cm^3 ，沉积地层的上覆岩层压力梯度一般为 22.7kPa/m 。在实际钻井过程中，海上钻井时，海水深度和海底未固结沉积物对上覆岩层压力梯度都有影响。上覆地层压力梯度的通常范围是 $17 \sim 29\text{kPa/m}$ 。

三、基岩应力

基岩应力是指由岩石颗粒之间相互接触来支撑的那部分上覆地层压力，亦称颗粒间压力，基岩应力常用 σ 表示。上覆地层的重力是由岩石基质(基岩)和地层孔隙中的流体共同支承，所以，不管什么原因使孔隙压力增大时，会导致基岩应力降低；反之，孔隙压力降低时，会导致基岩应力增大。

基岩应力与地层压力、上覆地层压力有如下关系(如图 1-1 所示)，即

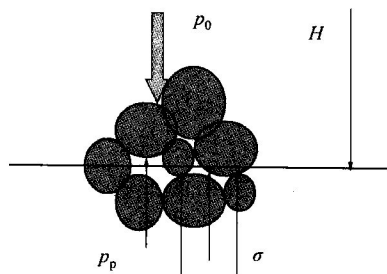


图 1-1 地下各压力间关系

$$p_0 = p_p + \sigma \quad (1-9)$$

对同一埋藏深度处的地层，存在如下关系：

若是正常压力地层，有 $p_p = p_h$ ， $\sigma_h = p_0 - p_h$

若是异常高压地层，有 $p_p > p_h$ ， $\sigma_p = p_0 - p_p < \sigma_h$

若是异常低压地层，有 $p_p < p_h$ ， $\sigma_p = p_0 - p_p > \sigma_h$

四、地层破裂压力

在井下一定深度裸露的地层，承受流体压力的能力是有限的，当液体压力达到一定数值时会使地层破裂，井筒流体会流入地层，此时的液体压力称为地层破裂压力，常用 p_f 表示。地层破裂压力是地层抵抗液压力的能力，属地层的强度指标之一，当井内压力大于地层破裂压力时，会引起井漏，造成一系列的井下复杂问题，所以了解地层的破裂压力，对合理的进行钻井工程设计与钻井施工有重要意义。

常将一定深度处的地层破裂压力用压力梯度 G_f 或当量密度 ρ_f 表达。即

$$G_f = \frac{p_f}{H} = \rho_f g \quad (1-10)$$

$$\rho_f = \frac{p_f}{gH} \quad (1-11)$$

五、井底压力

在钻井工程中，井底压力是很重要的参数，主要由井内钻井液液柱重力产生，根据钻井液密度可基本确定其大小，通常所说的井底压力可由下式计算。

$$p_m = \rho_m g H \quad (1-12)$$

式中， ρ_m 为井内钻井液密度， g/cm^3 ； H 为计算井深， m ； $g = 9.8\text{m/s}^2$ 为重力加速度； p_m 为井底静液压力， kPa 。

井底压力的大小还与钻井作业状态有关(后述)。

第二节 地层压力预测方法

在长期的钻井实践中，石油工作者总结出了多种评价或预测地层压力的方法。由于异常压力地层的成因多种多样，每种方法都有其一定的局限性，单纯应用一种方法很难准确地评

价一个地区的地层压力。地层压力评价或预测方法主要有以下三类。

(1) 钻前地层压力预测方法。有利用邻近井资料进行压力预测, 建立地层压力剖面的方法; 利用地震资料分析, 通过测量声波在不同地层中的传播速度, 可识别地层岩性, 判断储集层, 确定地层孔隙度和计算地层孔隙压力。钻井前地层压力的预测值可能存在一定误差。

利用地震资料预测地层压力原理: 是根据地震波在地层中的传播速度或传播时间的变化来进行预测。地震波(声波)在地层中传播的速度与岩石的埋藏深度和密度成正比, 而与岩石的孔隙度成反比。在正常压实条件下, 地震波的传播速度随岩石的埋藏深度和密度的增加、孔隙度的减小而加快。当进入异常高压层中, 由于欠压实的存在, 岩石密度下降, 孔隙度增加, 地震波的传播速度则下降。因此, 可以利用地震波的传播速度和传播时间差来检测地层压力。

(2) 钻进过程的随钻地层压力预测方法。利用钻进过程资料进行预测, 有 d_c 指数法、标准化钻速法、页岩密度法、 c 指数法、录井资料分析法等。预测结果比钻前地层压力预测的结果更准确, 可对钻前的地层压力预测值进行校正。

(3) 钻过地层后的测井分析方法。有电阻测井分析法、电导率测井分析法、声波时差分析法、井涌测定方法、中途测试方法、完井试油方法等。预测地层压力结果最为准确可靠。

随钻预测地层压力的 d_c 指数法在钻井工程中被广泛应用, 在此仅以 d_c 指数法预测地层压力为例, 介绍地层压力预测方法的应用。

d_c 指数法实质上是机械钻速法, 它是以泥、页岩压实规律和井底压差(即井底的钻井液柱压力与地层压力之差)对机械钻速的影响为基础, 来实时预测地层压力值。

一、 d_c 指数预测地层压力原理

钻井实践表明, 实际钻进过程中, 机械钻速与钻压、转速、钻头尺寸和类型、钻进水力因素、钻井液性能、地层性质等因素有关, 即: $v_m = f(W, n, D_b, C_H, \rho_m, k_s)$ 。其中前五项参数是可以人为控制的, 在一定钻进井段保持可人为控制的参数不变条件下进行钻进, 则有 $v_m = f(k_s)$ 。

在正常压力地层中钻进, 随钻深增加, 地层压实程度增加, 地层孔隙度下降, 钻进破岩难度增加, 机械钻速下降。

在钻入异常高压地层过程, 先要钻过压力过渡带。一方面, 在钻入压力过渡带过程中, 地层的压实程度降低, 岩石孔隙度逐渐增大, 钻进破岩难度降低, 机械钻速增加。另一方面, 在钻入压力过渡带过程中, 也是在钻入压力圈闭, 地层孔隙压力逐渐增加, 井底压差在减小, 有助于井底岩层的破碎和岩屑脱离井底, 机械钻速逐渐加快。由此可知, 在钻入异常高压地层过程中, 随钻进的进行, 机械钻速会加快。

为了能对上述现象作定量的分析计算, 人们通过试验, 欲建立反映钻进过程规律的钻速方程。1965年, M. G. Bingham(宾汉)在室内试验的基础上, 建立的钻速方程如下。

$$v_m = k_s n^e \left(\frac{W}{D_b} \right)^d \quad (1-13)$$

式中, W 、 n 分别为钻压和转速; D_b 为钻头直径; k_s 地层可钻性系数; e 、 d 分别为转速指数和钻压指数, 无因次。

宾汉根据海湾地区的经验, 发现在软岩石(页岩层)中钻进, 机械钻速与钻头转速呈线性关系, 此时可取 $e = 1$ 。在钻进条件和地层岩性不变情况下, 可取 $k_s = 1$ 。

则上述方程简化为

$$v_m = n \left(\frac{W}{D_b} \right)^d \quad (1-14)$$

宾汉钻速方程反映了钻速与各影响因素之间的函数关系。如果钻进过程保持钻压、转速、水力因素、钻头类型及尺寸等因素不变，机械钻速与钻压成指数关系。岩性不同，钻压对机械钻速的影响程度不同。可以说指数 d 反映了地层对钻压的敏感程度，可视为地层的一种属性，取决于地层本身。据此，在钻头直径、钻压、转速均一定的条件下，随钻深增加，钻速的变化可由指数 d 的变化间接地反映出来。

因此，在钻进过程中，随钻深增加，可以不断地计算出 d 值，通过 d 值的变化来反映钻速的变化，只要找出 d 值的变化与地层压力的关系，通过 d 值的变化就可预测出地层压力大小。

对上式两边取对数，并整理得

$$d = \frac{\lg\left(\frac{v_m}{n}\right)}{\lg\left(\frac{W}{D_b}\right)} \quad (1-15)$$

当采用工程常用单位时， v_m 单位为 m/h， n 单位为 r/min， W 单位为 kN， D_b 单位为 mm。上式变成

$$d = \frac{\lg\left(\frac{0.0547v_m}{n}\right)}{\lg\left(\frac{0.0684W}{D_b}\right)} \quad (1-16)$$

结合工程上所用的钻进参数范围： $0 < v_m < 100$ ， $10 < n < 1000$ ， $0 < W < 980$ ， $100 < D_b < 1000$ ，对上式的值进行分析可知，在钻压、转速和钻头直径一定时，随钻速增加则 d 指数值减小， d 指数值下降则表明钻速在增加。

M. G. Bingham 钻速方程是在室内试验的基础上建立的，其中包含了一个条件，即钻井液密度保持不变。而在实际钻进过程中，往往在钻进进入高压地层，进入压力圈闭过程中，为了保证钻进安全，要求提高钻井液密度，从而使井底压差发生了变化，机械钻速变化，影响到预测地层压力的准确性。1971年，Rehm 和 Meclendon 提出对 d 指数进行修正的方法，以减弱钻井液密度改变对机械钻速的影响，提高预测地层压力的准确性。给出修正 d 指数计算式如下。

$$d_c = \frac{\rho_h}{\rho_m} d \quad (1-17)$$

式中， ρ_h 为计算井深处正常地层压力的当量钻井液密度，即引起静液压力的地层流体密度，通常 $\rho_h = 1.0 \sim 1.07 \text{ g/cm}^3$ ，因地区而有所不同； ρ_m 为实际钻进使用的钻井液密度， g/cm^3 ； d_c 称 d_c 指数(修正 d 指数)。

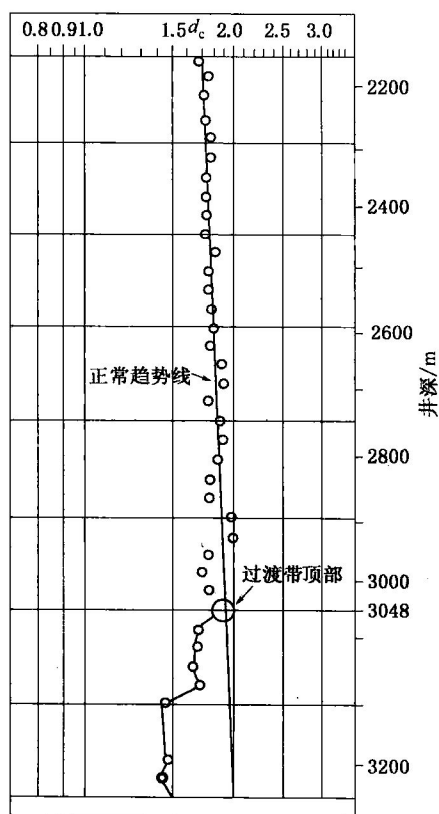
据此，在钻进进入异常高压地层过程中，我们可以随井深增加 ΔH ，计算出 d_c 指数值，通过许多的计算点，可以看出 d_c 的变化规律，在 d_c 值有异常变化时，预测出地层压力大小。在正常地层压力井段钻进，随井深增加，机械钻速减小， d_c 指数值随井深增加而增大。钻进进入异常高压压力过渡带或异常高压地层过程，随井深增加，机械钻速增加， d_c 指数值随井深增加而降低，即 d_c 指数的变化规律偏离正常地层压力井段钻进的变化规律。

二、 d_c 指数预测地层压力方法

(1) 在钻进进入异常高压压力过渡带之前的正常地层段钻进过程中，开始随钻收集所需资料，有钻头直径 D_b 、正常地层压力的当量钻井液密度 ρ_h ，其他参数如表 1-1 所示。

表 1-1 d_c 指数法应用随钻收集参数(例)

收集点	井深/m	钻压/kN	转速/(r/min)	钻速/(m/h)	泥浆密度/(g/cm ³)	计算 d_c 指数值
1	1650	160	110	22.25	1.08	
2	1680	160	110	22.25	1.08	
3	1710	140	110	14.02	1.13	
4	1740	140	110	14.02	1.13	
5	1770	140	110	12.01	1.13	
6	

图 1-2 典型 d_c - H 曲线

记录其他钻进条件,以供分析时参考,主要有地层、岩性、钻头类型、水力因素、换钻头位置等。收集资料时应按一定钻深间隔取点,钻速慢时,每钻进 1.5~3m 取一计算点;钻速快时,每钻进 5m、7.5m 或 10m 取一计算点。

(2) 据随钻收集点参数计算出点的 d_c 指数值,列于表中。

(3) 在半对数坐标纸上,作出 d_c - H 曲线图及 d_c 正常趋势线。图 1-2 是典型 d_c - H 曲线图。 d_c 坐标轴(横坐标)选用对数坐标, H 坐标轴(纵坐标)选用线性坐标。

如图 1-2 所示,从井深 2200m 到 3048m 地层段, d_c 指数值随井深增加而增大,反映了正常压实地层的变化规律;从井深 3048m 到 3100m 地层段, d_c 指数值随井深增加而下降,反映了异常高压压力过渡带地层的变化规律,钻进正在进入异常高的压力圈闭;从井深 3100m 往下地层段, d_c 指数值随井深增加保持着较低的数值,反映了异常高压地层的变化规律。

为了便于对比异常 d_c 指数值偏离正常 d_c 指数值的程度,在图中做出正常压实情况下的 d_c 指数变化趋势线,常用的有两种方法。

① 作图法:在正常压力地层段,通过尽可能多的高度可信的 d_c 值点,作一条直线,该直线的变化趋势反映了正常压实地层的 d_c - H 变化趋势,称正常 d_c 趋势线。

② 解析法:在正常压力地层段,取出高度可信点的 (d_c , H) 坐标点,运用一定的数学分析方法,找出最能代表 d_c - H 变化趋势的 $\lg d_c = aH + b$ 直线方程,然后在图中做出正常 d_c 趋势线 $d_c = 10^{aH+b}$,该方法比较准确。

(4) 运用一定的方法求出地层压力大小。从图 1-2 中读取井深 H 处的实测计算 d_c 值 d_{ca} 和正常趋势线上的 d_c 值 d_{cn} 。可选择以下方法求出地层压力值。

① 反算法:在 1972 年由 IMCO 公司 A. M. 诺玛纳提出的关系式进行计算,求出地层压力当量密度(g/cm³)。本方法计算简便,适用地层较广,在各油气田被广泛应用。

$$\rho_p = \frac{d_{cn}}{d_{ca}} \rho_h \quad (1-18)$$

则地层压力为 $p_p = 9.8\rho_p H$

② 伊顿法：1976年 B. A. 伊顿经过实践提出的计算关系式，通过计算地层压力梯度，从而求得地层压力。

$$G_p = G_0 - \left[(G_0 - G_h) \left(\frac{d_{ca}}{d_{cn}} \right)^{1.2} \right] \quad (1-19)$$

则地层压力为 $p_p = G_p H$

③ 康布法：1976年，康布根据泥页岩地层中 d_c 指数偏离正常趋势线的偏离值，与地层压力之间的关系，经过对大量实钻资料的处理和分析，提出了计算地层压力当量密度的表达式，在美国沿海和内陆地区均可使用。

$$\rho_p = 0.91 \times \lg(d_{cn} - d_{ca}) + 1.98 \quad (1-20)$$

④ 等效深度法。 d_c 指数值和基岩应力值均可反映泥页岩的压实程度，当 d_c 指数值相等时，基岩应力值也相等。因此，可以运用这一原理计算地层压力，如图 1-3 所示。

在异常地层压力井深 H 处基岩应力为

$$\sigma_H = p_0 - p_p = G_0 H - p_p$$

在 d_c 正常趋势线上找到 $d_c = d_{ca}$ 时对应的井深 H_e 。

那么井深 H_e 处的基岩应力为

$$\sigma_e = G_0 H_e - G_h H_e$$

令：井深 H 与井深 H_e 处的基岩应力相等， $\sigma_H = \sigma_e$

推得， $p_p = G_h H_e + G_0 (H - H_e)$

上述各关系式，是美国各公司根据不同地区资料总结归纳提出的经验公式，使用时应根据我国各地具体情况，合理选用。

根据 d_c 指数法的应用条件，必须把不符合条件的那些点舍去，不符合条件的点在图中表现为离散点。实践经验证实，下述情况的点是不符合要求的。

岩性不纯（即非页岩点）地层， d_c 指数取决于基岩强度，岩性不同，骨架强度也不同，在岩性发生变化的地层， d_c 指数的规律也将发生变化。例如砂、页岩交错的地层，钻遇裂缝、断层等不整合面。

水力参数发生较大变化时，射流对井底的作用有变化， d_c 指数的规律也将发生变化。

钻头类型不同，其破岩机理不同，所以钻头类型的变化会引起正常趋势线的移动。钻头跑合和磨损后期破岩效率下降。

另外，在用刮刀钻头和取心钻头钻进、磨鞋工作、纠斜吊打等情况下， d_c 指数的规律也将发生变化。

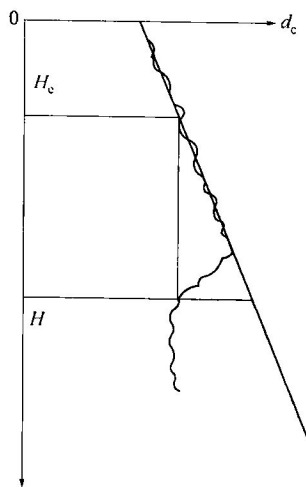


图 1-3 d_c 指数的等效深度

第三节 地层破裂压力预测方法

在油田开发中，作为油井的增产措施，通常利用水力压裂地层来提高油井采油量。但对钻井工程而言，地层压裂会引起井漏，造成一系列的井下复杂问题，所以了解地层的破裂压