

高等学校教材

石油工程课程设计

张 文 杨二龙 赵万春 编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

石油工程课程设计

张 文 杨二龙 赵万春 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以设计方法、设计步骤为主线,将理论与方法系统化,详细阐述钻井工程设计、抽油井系统设计、油田开发指标计算设计的基本原理、设计方法和步骤,引导学生根据地质条件、工艺技术条件、生产情况等资料,综合运用所学的专业知识,进行钻井工程设计、抽油井系统设计及油田开发指标计算设计。

本书适合高等院校石油工程专业的师生,也适合从事相关科研工作的人员。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程课程设计/张文,杨二龙,赵万春编.

北京:石油工业出版社,2013.11

(高等学校教材)

ISBN 978-7-5021-9323-2

I. 石…

II. ①张… ②杨… ③赵…

III. 石油工程-课程设计-高等学校-教材

IV. TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 247851 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: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010) 64523574 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

2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.5

字数:295 千字

定价:24.00 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

为了加强实践教学环节,培养石油工程高素质人才,通过学习和训练,使学生掌握石油工程领域中常规工程设计的基本内容和方法;通过引导学生根据地质条件、工艺技术条件、生产情况等资料,综合运用所学的专业知识,进行钻井工程设计、抽油井系统设计及油田开发指标计算设计;通过分析和解决实际问题,培养学生理论联系实际、分析问题、解决问题的能力,以及利用计算机技术进行工程设计的能力。笔者在结合多年教学实践的基础上,结合现场经验编写了此书。

本书是石油高等学校石油工程专业主要的实践教学类教科书之一,主要可满足目前石油工程专业油藏工程、钻井工程、采油工程三个专业方向学生的课程设计教学需求。

全书共分为四部分。第一章系统介绍了钻井工程设计的目的及要求、基本原理及设计实例,重点给出了钻井方案制定、钻具选取、钻井液配置、机械参数与水力参数合理确定、钻井设备合理选择的方法和原理,并给出了钻井工程系统设计实例。第二章系统介绍了抽油井系统设计的目的及要求、基本原理及设计实例,重点给出了系统设计所需基础生产数据、原油黏温关系数据,通过对抽油井进行综合、系统的分析,确定出合理的设计参数,选择出合理抽油设备所涉及的方法和原理,并给出了抽油井系统设计实例。第三章系统介绍了油田开发指标计算设计的目的及要求、基本原理及设计实例,重点给出了油田开发指标计算中涉及的基本原理和方法,包括开发至结束这一整个过程的油田压力,含水、见水时间,关井时间,最终采收率等指标的动态变化规律和大小,并给出了油田开发指标计算方案设计实例。在书后列出附录,给出了石油工程设计中所涉及的曲线拟合与计算公式、参考程序及程序设计参考。

本书可作为石油高等院校石油工程专业的教材,也可作为矿场地质、油藏工程技术人员及科研人员的参考用书。

本教材由张文、杨二龙、赵万春编,其中第一章由赵万春编写,第二章由张文编写,第三章由杨二龙编写,附录由张文、杨二龙共同编写。在教材编写过程中,笔者得到了殷代印教授、李士斌教授等许多教师的指导与帮助,同时还得到了许多大庆油田工程技术人员的帮助与支持,在此一并表示感谢。

由于作者的水平和学识有限,书中难免存在不足和错误,敬请广大师生和读者批评指正。

编者

2013年6月

目 录

第一章 钻井工程设计	1
第一节 钻井工程设计的内容与原则	1
第二节 钻井工程设计的基础理论	5
第三节 钻井工程设计实例	68
第二章 抽油井系统设计	80
第一节 抽油井系统设计目的及要求	80
第二节 抽油井系统设计基础理论	82
第三节 抽油井系统设计实例	106
第三章 油田开发指标计算设计	116
第一节 油田开发设计的目的及要求	116
第二节 油田开发设计基础理论	117
第三节 油田开发设计实例	141
附录	151
附录一 曲线拟合与经验公式	151
附录二 多项式型曲线拟合参考程序	154
附录三 程序设计参考	157
参考文献	180

第一章 钻井工程设计

钻井是石油、天然气勘探与开发的主要手段。钻井工程质量的优劣和钻井速度的快慢，直接关系到钻井成本的高低、油田勘探开发的综合经济效益及石油行业的发展速度。钻井工程设计是石油工程的一个重要部分，是确保油气钻井工程顺利实施和质量控制的重要保证，是钻井施工作业必须遵循的原则，是组织钻井生产和技术协作的基础，是做好单井预算和决算的唯一依据。钻井设计的科学性、先进性关系到一口井作业的成败和效益。科学钻井水平的提高，在一定程度上依靠钻井设计水平的提高。搞好钻井设计也是提高技术管理和加强企业管理水平的一项重要措施，是钻井生产实现科学化管理的前提。

本章主要讲述如何以地质设计为依据，进行一口井的综合、合理的钻井工程设计。钻井工程设计是以现代钻井工艺理论为准则，结合新的研究成果，以现代计算技术，用最优化科学理论去设计和规划钻井工程中的工艺技术及实施措施。钻井工程设计的科学性、先进性关系到一口井钻井工程和完井工程的成败和效果。

第一节 钻井工程设计的内容与原则

一、钻井工程设计目的

钻井工程设计的主要目的是完成钻探目的层、开发油气层，保证钻井工程质量、保护油气资源、保护环境，实现安全、优质、高速和经济钻井。钻井工程设计是钻井工程施工的指南和技术依据。钻井工程设计必须在充分分析有关地质和工程资料的基础上，遵循国家及当地政府有关法律、法规和要求，按照安全、快速、优质和高效的原则进行，并且必须以保证实施地质任务为前提。

钻井公司将根据钻井工程设计和要求组织施工和技术协作，并按照设计进行单井预算和决算。钻井队必须遵循钻井工程设计施工，不能随意变动，如因井下情况变化，原设计确需变更时，必须提交公司主管单位重新讨论研究。

钻井工程课程设计目的是让学生选取一组基础数据与资料，按照课程设计的主要内容与设计原则等，利用所学过的专业理论知识，在指导教师的指导下独立地完成并提交钻井工程设计方案，从而使学生掌握钻井工程设计的基本方法、思路与各环节的设计内容，并能够使学生通过钻井工程设计手段形式，将理论知识应用于解决钻井工程的实际问题。通过钻井工程设计的训练，强化学生将理论知识与实际工程的有机结合的能力，实现学生理论知识掌握与解决工程实际问题紧密衔接。确保学生通过该环节的训练，能够提升其对相关学科知识的综合运用能力、计算机技术的应用能力以及解决实际问题的工程应用能力。

二、钻井工程设计要求

钻井工程设计的基本要求是利用提供的基础生产资料与数据，结合相关参数，依据

SY/T 5333—1996《钻井工程设计格式》及石油工程专业学生进行钻井设计的具体情况对一口井进行方案制定、钻具选取、钻井液配置及确定出合理的机械参数与水力参数，选择出合理的钻井设备，从而完成钻井工程系统设计方案。

（一）钻井设计的内容

现场钻井设计的内容包括地质设计和钻井工程设计两大部分，其中地质设计的基本内容包括：（1）区域地质概况；（2）地理及环境资料；（3）设计依据与钻井目的；（4）设计地层、油气水及岩性矿物、物性；（5）选取资料要求；（6）地层孔隙压力、破裂压力预测；（7）技术说明及要求；（8）地质附图。

钻井工程设计的基本内容包括：

- （1）确定合理的井身结构。
- （2）选择钻机类型。
- （3）钻柱组合和强度设计。
- （4）钻井参数设计，包括机械破岩参数（包括钻头的类型、尺寸、数量、钻压、转数，洗井液排量等）钻井液性能、水力参数设计。
- （5）固井工程，包括固井要求、套管柱强度设计、水泥浆性能参数设计、流变学注水泥浆设计。
- （6）油气井压力检测。
- （7）环境保护要求。
- （8）成本及材料预算。
- （9）技术经济指标及时效分析。

（二）钻井设计的基本原则

钻井设计应遵循以下基本原则：

- （1）钻井设计的两部分应按 SY/T 5333—1996 的规定进行。
- （2）地质设计应明确提出设计依据、钻探目的、设计井深、目的层、完井层位及原则、完井方法、选取资料要求、井身质量、油层套管尺寸及强度要求、阻流环位置及固井水泥上返高度等要求。水平位移要求严的直井，要考虑钻井的难度和钻井综合成本。
- （3）地质设计应为钻井工程设计提供全井地层孔隙压力梯度曲线、破裂压力梯度曲线、邻区邻井资料、试油压力资料、设计地层资料、油气水及岩性矿物资料、物性资料、设计地质剖面资料、地层倾角及故障提示资料。新区探井应按科学打探井技术规定，提供 5 种必需的地质图件（设计井所在区域的构造及地理位置图、主要目的层的局部构造井位图、过井“十字”地震时间剖面图、过井地质解释横剖面图、设计柱状剖面图），开发井应提供区块压力高线图及 500m 井距以内注水井位图和注水压力曲线图。
- （4）调整井地质设计的依据是上级批准的油田开发实施方案，钻井区块的地质构造，区块内已完成井的各种地质、钻井资料，区块井位设计等。甲方地质部门应为钻井工程区块设计提供调整井区块地质设计，为单井设计提供地层分层内容，地质要求，设计井与邻近油、水井地下压力动态数据资料，设计井位示意图，地下复杂情况，故障提示等。调整井地质设计分层误差应控制在 10m 以内。
- （5）调整井应采用集中打井，分片停注溢流的原则，调整井开钻前，区块内的注水井应根据井口压力，提前若干天（一般为 10~30d）采取注水井停注和放溢流、油井转抽降压等

具体措施,以降低区块内地层压力,为钻井安全施工,确保固井质量,保护油气层产能,提高综合经济效益创造条件。

(6) 钻井工程设计必须以地质为依据,并且要有利于取全取准各项地质、工程资料;要有利于开发油气层,保护油气层,充分发挥每个产层的生产能力;要保证油气井井眼轨迹符合勘探开发的要求;油水井的完井质量满足油田各种作业的要求,保证油气井长期开采的需要;要充分体现采用本地区 and 国内外钻井先进技术,保证安全、优质、快速钻井,实现最佳的技术经济效益。

(7) 钻井工程设计应根据地质设计的钻探深度和工程施工的最大负荷,合理地选择钻机装备,选用的钻机负荷不得超过钻机最大额定负荷能力的 80%。

(8) 钻井工程设计应根据地质设计提供的地层孔隙压力梯度曲线及地层破裂压力梯度曲线或邻井试油压力资料、设计钻井液密度、水泥浆密度和套管程序。对设计钻探多套压力层系的探井,应采用多层套管程序,以利保护油气层、钻杆中途测试和安全钻井。

(9) 调整井钻井液密度应根据钻井区块所在采油厂(站)提供的地层压力进行设计。

目的层地层压力高于地层原始压力时,钻井液密度设计应遵循以下 4 条原则:

①根据采油厂提供的注水地层压力,设计注水井附近或注水井之间新钻井的钻井液密度;

②根据采油厂提供的采油井的井下静压,设计采油井附近或采油井之间新钻调整井的钻井液密度;

③根据采油厂提供的采油井和注水井的静压,设计采油井和注水井之间新钻调整井的钻井液密度;

④根据采油厂提供的套管断裂注水井的静压,设计套管断裂地区新钻调整井的钻井液密度。当目的层地层压力低于原始地层压力时,应以裸眼井段最高地层压力梯度设计钻井液的密度。调整井钻井液的密度附加值,可根据各油田所钻区块统计资料实际值附加或经验公式附加。

(10) 调整井钻井设计应考虑新钻井的套管防断、防挤毁问题。

(11) 探井应开展随钻压力监测。如 d_c 指数压力监测等方法。若随钻压力监测值与地质设计提供的地层孔隙压力梯度不符,应以随钻压力监测值及时调整钻井液密度。但应报地质设计审批部门备案。

(12) 在探井钻井设计中,应根据工程需要设计一定数量的工程取心。

(13) 钻井要按设计的施工进度计划施工。对地貌条件困难或钻前工程耗资较大的地区,应尽量采用定向井、丛式井技术设计。对井斜严重的地区用一般的方法控制井斜困难时,应利用地层自然造斜规律,移动地面井位,采用“中靶上环”的方法,使井底位置达到地质设计要求。

(14) 费用预算和施工进度计划应建立在本地区切实可行的定额基础上,每隔 2~3 年要对定额指标进行修订与核算。

(三) 钻井工程设计基本方法

钻井工程设计必须以地质设计为依据,在此基础上,按钻井工程总体设计程序框图来进行,见图 1-1。

(四) 钻井工程设计的基础资料

钻井工程设计和钻井施工中最重要方面就是确定该井将遇到的问题和预期的特征。如

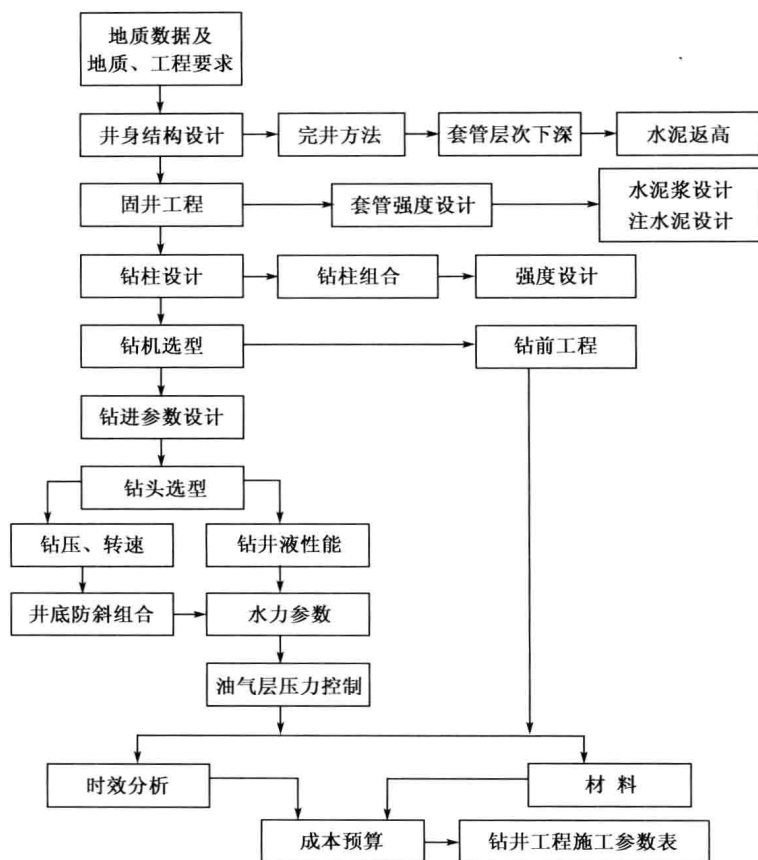


图 1-1 钻井工程总体设计程序框图

果这些情况事先不知道，那么就不可能恰当地作出一口井的设计。所以钻井工程设计必须在开始前就搜集各种不同的资料，从而获得详细情况，以适应设计的钻井条件。在进行钻井工程设计以前，必须了解和收集相关基础资料。

1. 地质资料

地质资料是钻井工程设计的第一手资料，在收集地质资料时主要收集设计井的地质分层、地层岩性、可钻性、研磨性、故障提示、地层倾角、地层压力、破裂压力方面的资料等。

2. 完井方法和井身结构

在完井方法和井身结构确定过程中，要了解设计井油田的各种完井方法和井身结构、施工和生产中的情况、各种完井方法和井身结构的优缺点。

3. 钻头资料

收集 3~5 口设计区块的全井实际钻头使用资料，包括钻头的类型，所钻地层井深、所钻层、所钻段，所钻地层主要岩性，钻头进尺，钻头工作时间，钻头主要技术参数（钻压、转速、排量、钻井液密度），钻头磨损特点，钻头成本。

4. 钻井液资料

收集 1~2 口井的钻井液的资料，总结分层钻井液性能要求，使用过程中遇到的问题，如何处理维护钻井液性能，全井钻井液材料及处理剂消耗情况，钻井液成本，钻井液净化系

统情况、数量、规格、使用效果和存在问题等方面的问题。

5. 技术参数

收集 3~5 口井的钻井技术参数资料（钻压、转速、排量、钻井液密度、泵压、钻头尺寸），同时收集喷射钻井资料，包括钻具及井眼尺寸、钻头水眼尺寸、泵排量与泵压、喷射钻井的效果。

6. 钻具结构资料

收集设计井油田的钻头尺寸与钻具尺寸的配合资料，包括常用钻具的尺寸、类型、钢级、壁厚、国别，合理使用钻具的措施，易斜井段所用的钻具结构的防斜效果，稳定器的使用情况。

7. 压力控制资料

这一部分资料包括设计区块各地层的地层压力值，所采用的附加压力数值，井口装置及防喷设备的规格、类型，除气设备、除气措施的选择。

8. 套管柱设计及注水泥资料

收集设计井所在油田所用的各种载荷的安全系数、设计方法，实际套管柱的区域、下部结构，所用注水泥措施（替钻井液速度，隔离液、水泥浆密度，速凝剂，缓凝剂，放压与环空憋压候凝，注水泥计算，水泥量附加数，井径扩大情况，注水泥泵压的计算方法，提高固井质量的措施与方法）等资料。

第二节 钻井工程设计的基础理论

一、井身结构设计基础理论

井身结构包括套管层次、下入深度以及井眼尺寸（钻头尺寸）与套管尺寸的配合。井身结构设计是钻井工程设计的基础。

（一）套管柱类型

套管柱可分为 4 种，包括表层套管、中间套管（技术套管）、生产套管（油层套管）、尾管。

（二）井眼中的压力体系

在裸眼井段中存在着地层孔隙压力、钻井液液柱压力、地层破裂压力。这 3 种压力体系必须同时满足于以下情况：

$$p_f \geq p_m \geq p_p \quad (1-1)$$

式中 p_f ——地层的破裂压力，MPa；

p_m ——钻井液液柱压力，MPa；

p_p ——地层孔隙压力，MPa。

式（1-1）所示即钻井液液柱压力应稍大于孔隙压力以防止井涌，但必须小于破裂压力以防止压裂地层发生井漏。由于在非密闭的洗井液压力体系中（即不关封井器憋回压时）压力是随井深呈线性变化的，所以使用压力梯度的概念是较方便的。式（1-1）可写成：

$$G_t \geq G_m \geq G_p \quad (1-2)$$

式中 G_t ——破裂压力梯度, MPa/m;
 G_m ——液柱压力梯度, MPa/m;
 G_p ——孔隙压力梯度, MPa/m。

(三) 井身结构设计所需基础资料

1. 地质资料

地质资料包括岩性剖面及事故提示、地层压力数据、地层破裂压力数据。

2. 工程资料

(1) 抽吸压力与激动压允许值 (S_b 与 S_g)。各油田应根据各自的情况来确定此两项系数。

(2) 地层压裂安全增值 (S_f)。该值是为了避免将上层套管鞋处地层压裂的安全增值, 它与预测破裂压力值的精度有关, 可以根据该地区的统计数据来确定。用等效密度表示, 单位为 g/cm^3 。美国现场将 S_f 取值为 0.024, 中原油田取值为 0.03。

(3) 井涌条件允许值 (S_k)。此值是衡量井涌的大小, 用钻井液等效密度差表示 (用于压井计算, 另一种计量方法是以进入井眼的流体的总体积来表示, 多用于报警)。美国现场取值为 0.06。该值可由各油田根据出现井涌的数据统计和分析后得出。中原油田将 S_k 值定为 0.06~0.14。

(4) 压差允值 (Δp_N 与 Δp_a)。裸眼中, 钻井液液柱压力与地层孔隙压力的差值过大, 除使机械钻速降低外, 也是造成压差钻的直接原因, 这会使下套管过程中, 发生卡套管事故, 使已钻成的井眼无法进行固井和完井工作。压差允值和工艺技术有很大关系。如使用优质的具有良好润滑性能的钻井液体系, 则压差允值可以提高, 压差允值也与裸眼井段的孔隙压力大小有关。若在正常压力井段, 为钻开下部高压层需要使用加重钻井液, 则压差卡钻易发生在正常压力井段的较深部位 (即易发生在靠近压力过渡带的正常孔隙压力地层)。若在异常高压井段, 刚易卡部位发生在最小孔隙压力点, 故压差允值有正常压力井段 (Δp_N) 与异常压力井段 (Δp_a) 之分, 一般 Δp_a 值大于 Δp_N 值。如美国现场对 Δp_N 取值为 16.66MPa, 对 Δp_a 取值为 21.66MPa。压差允值的确定, 各油田可以从卡钻资料中 (卡点深度、当时钻井液密度、卡点地层孔隙压力等) 反算出当时的压差值, 再由大量的压差值进行统计分析得出该地区适合的压差允值。

(四) 井身结构设计方法和步骤

1. 钻井液压力体系

(1) 最大钻井液密度 $\rho_{\max}$

某一套管的钻井井段中所用的最大钻井液密度和该井段中的最大地层压力有关。

即:

$$\rho_{\max} = \rho_{p\max} + S_b \quad (1-3)$$

式中 $\rho_{\max}$ ——某层套管钻井井段中所用最大钻井液密度, kg/m^3 ;
 $\rho_{p\max}$ ——该井段中的最大地层孔隙压力梯度等效密度, kg/m^3 ;
 S_b ——抽吸压力允许值的当量密度, kg/m^3 。

(2) 最大井内压力梯度的等效密度 ρ_{Br} 。

为了避免将井段内的地层压裂，应求得最大井内压力梯度。在正常作业时和井涌压井时，井内压力梯度有所不同。

最大井内压力梯度发生在下放钻柱时，由于产生激动压力而使井内压力升高。如增高值以等效密度表示为 S_g ，则最大井内压力梯度的等效密度 ρ_{Br} 为：

$$\rho_{Br} = \rho_{\max} + S_g \quad (1-4)$$

(3) 发生井涌情况。

为了平衡地层孔隙压力制止井涌而压井时，也将产生最大井内压力梯度。压井时井内压力增高值以等效密度表示为 S_k ，则最大井内压力梯度等效密度 ρ_{Bk} 为：

$$\rho_{Bk} = \rho_{\max} + S_k \quad (1-5)$$

式 (1-5) 只适用于发生井涌时最大地层孔隙压力所在井深 $H_{p\max}$ 的井底处。而对于深为 H_n 处，则有：

$$\rho_{Bk} = \rho_{\max} + \frac{H_{p\max}}{H_n} S_k \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可见，当 H_n 值小时 ρ_{Bk} 值大，即压力梯度大，反之当 H_n 值大时 ρ_{Bk} 值小。

为了确保上一层套管鞋处裸露地层不被压裂，则应有：

$$\rho_{Br} = \rho_f - S_f \quad (1-7)$$

或

$$\rho_{Bk} = \rho_f - S_f$$

式中 ρ_f ——上一层套管鞋处薄弱地层破裂压力等效密度值， kg/m^3 ；

S_f ——地层压裂安全增值， kg/m^3 。

2. 套管层次与深度的确定

套管层次和下入深度设计的实质是确定两相邻套管下入深度之差。它取决于裸眼井段的长度。在这一裸眼井段中，应使钻进过程中及井涌压井不会压裂地层而发生井潜心漏，并在钻进和下套管时不发生压差卡钻事故。设计时由下而上逐层确定下入深度。油层套管的下入深度主要决定于完井方法和油气层的位置。因此设计的步骤是由中间套管开始。

(1) 各层套管下入深度初选点 H_n 的确定。

套管下入深度的依据是，其下部井段钻进过程中预计的最大井内压力梯度不致使套管鞋处裸露地层被压裂。

根据最大井内压力梯度可求得上部地层不致被压裂所应有的地层破裂压力梯度 ρ_{fnr} 。

正常作业下钻时，由式 (1-3)、式 (1-4)、式 (1-7)，有：

$$\rho_{fnr} = \rho_{p\max} + S_b + S_g + S_f \quad (1-8)$$

式中 ρ_{fnr} ——第 n 层套管以下井段下钻时，在大井内压力梯度作用下，上部裸露地层不被压裂所应有的地层破裂压力梯度， kg/m^3 ；

$\rho_{p\max}$ ——第 n 层管以下井段预计最大地层孔隙压力等效密度， kg/m^3 。

发生井涌情况时，由式 (1-3)、式 (1-6)、式 (1-7)，有：

$$\rho_{fnk} = \rho_{p\max} + S_b + S_f + \frac{H_{p\max}}{H_{ni}} S_k \quad (1-9)$$

式中 ρ_{fnk} ——第 n 层套管以下井段发生井涌时，在井内最大压力梯度作用下，上部地层不被压裂所应有的地层破裂压力梯度， kg/m^3 ；

H_{ni} ——第 n 层套管下入深度初选点， m 。

对比式 (1-8)、式 (1-9)，显然， $\rho_{fnk} > \rho_{fnr}$ ，所以，一般用 ρ_{fnk} 计算，在肯定不会发

生井涌时,用 ρ_{fnr} 计算。

对中间套管,可用试算法试取 H_{nf} 值代入式(1-9)中求 ρ_{fnk} ,然后由设计井的地层破裂压力梯度曲线上求得 H_n 即为下入初选点。否则另取一 H_n 值计算,直到满足要求为止。

(2) 校核各层套管下列初选点深度 H_n 时是否会发生压差卡钻。

先求出该井段中最大钻井液密度与最小地层孔隙压力之间的最大静止压差 Δp_m ,有:

$$\Delta p_m = 9.81 H_{nm} (\rho_{pmax} + S_b - \rho_{pmin}) \times 10^{-3} \quad (1-10)$$

式中 Δp_m ——第 n 层套管钻进井段内实际的井内最大静止压差,MPa;

$\Delta \rho_{min}$ ——该井段内最小地层孔隙压力梯度等效密度,kg/m³;

H_{nm} ——该井段内最小地层孔隙压力梯度的最大深度,m。

比较 Δp_m 和 Δp (压差允值,正常压力地层用 Δp_N ,异常压力地层用 Δp_a);当 $\Delta p_m < \Delta p$,则不易发生压差卡钻, H_n 即为该层套管下入深度;当 $\Delta p_m > \Delta p$ 时,则可能发生压差卡钻,这时,该层套管下深 H_n 应浅于初选点 H_{ni} 。

令 $\Delta p_m = \Delta p$,则有允许的最大地层孔隙压力 ρ_{pper} 为:

$$\rho_{pper} = \frac{\Delta p}{9.8 \times 10^{-3} \times H_{nm}} + \rho_{pmin} + S_b \quad (1-11)$$

由地层孔隙压力梯度曲面上查 ρ_{pper} 所在井深即该层套管下深度 H_n 。

3. 尾管设计

当中间套管下入深度浅于初选点($H_n < H_{ni}$)时,则需要下尾管,并要确定尾管下入深度 H_{n+1} 。

(1) 确定尾管下入深度初选点($H_{(n+1)i}$)。

由中间套管鞋处的地层破裂压力梯度 ρ_{fn} 可求得允许的最大地层孔隙压力梯度 ρ_{pper} ,由式(1-9),有:

$$\rho_{pper} = \rho_{fn} - S_f - S_b - \frac{H_{(n+1)i}}{H_n} S_k \quad (1-12)$$

式中 ρ_{fn} ——中间套管鞋处地层破裂压力梯度等效密度,g/cm³;

ρ_{pper} ——中间套管鞋处地层破裂压力梯度 ρ_{fn} 时,其下井段所允许的最大地层孔隙压力梯度等效密度,kg/m³;

H_n ——中层套管下深,m;

$H_{(n+1)i}$ ——尾管下入深度初选点,m。

(2) 校核尾管下入到深度初选点 $H_{(n+1)i}$ 时,是否会发生压差卡钻。

校核方法同前所述。

4. 必封点的确定

以上套管层次,下入深度的确定是以井内压力系统平衡为基础,以压力剖面为依据的。但某些影响钻进的复杂情况因素目前还不能反映到压力剖面上,如吸水膨胀易塌泥页岩、含蒙皂石的泥页岩、岩膏层、盐岩层蠕变、胶结不良的砂岩等。某些复杂情况的产生又与时间因素有关,如钻进速度快、浸泡水时间短、复杂情况并不显示出来;反之若钻速慢,上部某些地层裸露时间长或在长时间浸泡下,则易发生坍塌、膨胀、缩径等情况。这需要根据已钻过井的经验来确定某些应及时封隔的地层,即必封点。某些地区没有复杂情况则不必确定必封点。另外,求得控制复杂情况所需的坍塌压力梯度值是非常必要的,这样可以在确定必封点上不必凭经验来进行。

5. 套管尺寸与井眼尺寸的选择与配合

(1) 设计中考虑的因素。

①生产套管尺寸应满足采油方面要求。根据生产层的产能、油管大小、增产措施及井下作业等要求来确定。

②对于探井，要考虑原设计井深是否要加深，地质上的变化是否会使原来的预靠难以准确，是否要本井眼尺寸上留有余量以便增下中间套管，以及对岩心尺寸的要求等。

③要考虑到工艺水平的限制，如井眼情况、曲率大小、井斜角以及地质情况对选择的影响。并应考虑管材、钻头库存规格的限制。

(2) 套管和井眼尺寸的选择和确定方法。

①确定井身结构尺寸一般由内向外依次进行，首先确定生产套管尺寸，再确定下入生产套管的井眼尺寸，然后确定中层套管尺寸等，依此类推，直到表层套管的井眼尺寸，最后确定导管尺寸。

②生产套管根据采油方面要求来定。勘探井则按照勘探方面要求来定。

③套管与井眼之间有一定间隙，间隙过大则不经济，过小会导致下套管困难及注水泥后水泥过早脱水形成水泥桥。间隙值一般为 9.5~12.7mm，最好为 19mm。

(3) 套管及井眼尺寸标准组合。

目前国内外所生产的套管尺寸及钻间尺寸已标准系列化。套管与其相应井眼尺寸配合基本确定或在较小范围内变化。图 1-2 给出了套管和井眼尺寸选择表。使用该表时，先确定

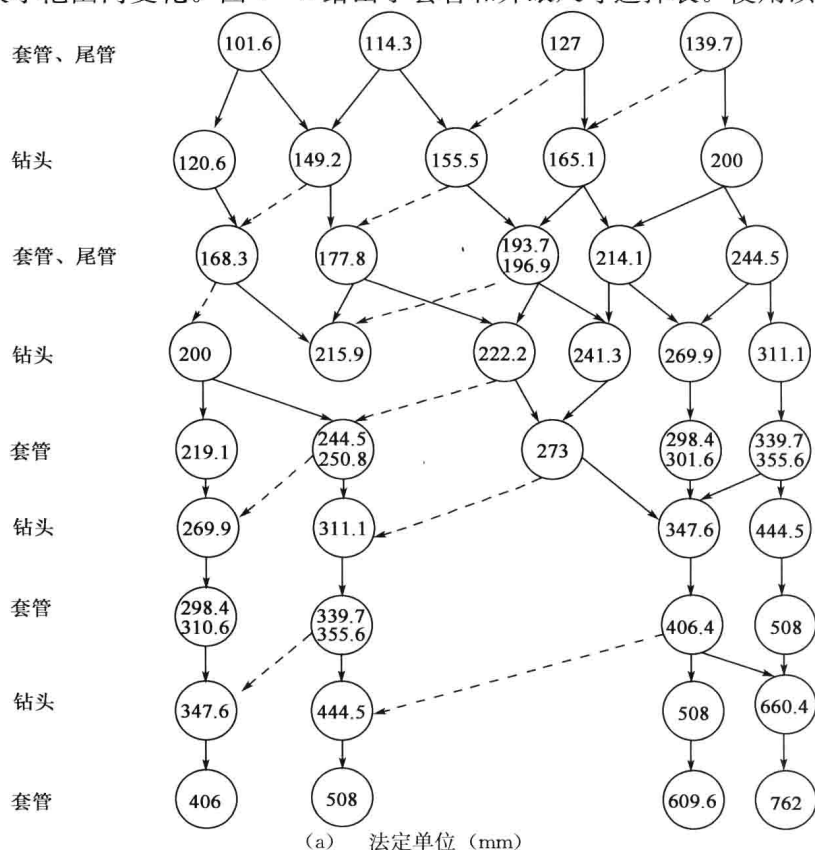
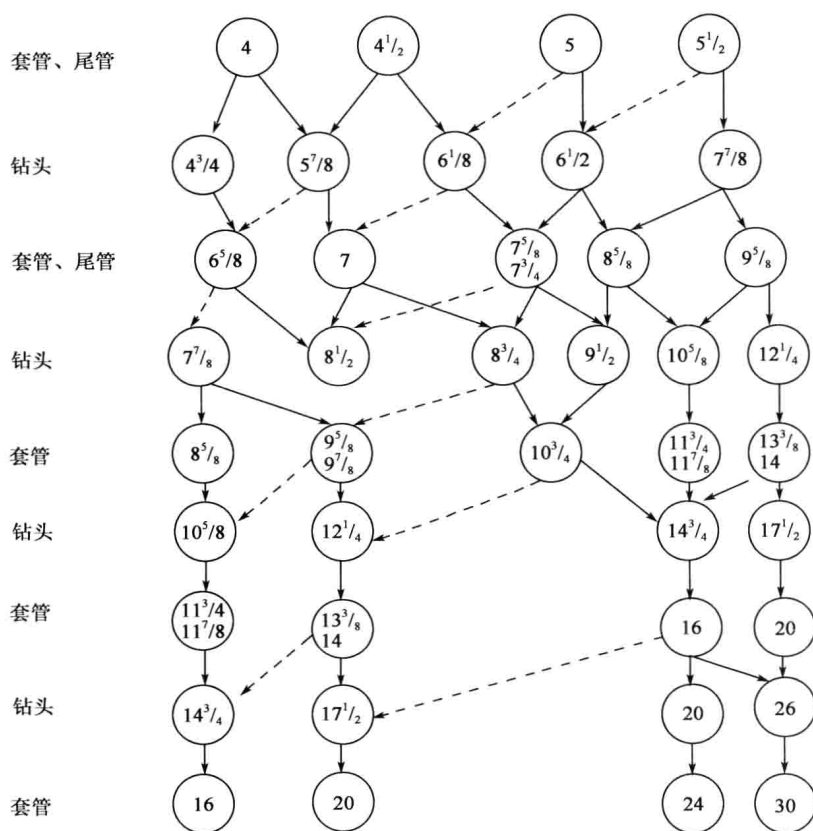


图 1-2 套管和井眼（钻头）尺寸选择



(b) 英制单位 (in)

图 1-2 套管和井眼 (钻头) 尺寸选择

最后一层套管 (或尾管) 尺寸。表的流程表明要下该层套管可能需要的井眼尺寸。实践表示套管与井眼尺寸的常用配合, 它有足够的间隙以下入该套管及注水泥。虚线表示不常用的尺寸配合 (间隙较小)。如选用虚线所示的组合时, 则应注意套管接箍、钻井液密度、注水泥及井眼曲率大小等。

例 1-1 某井设计井深为 4878m, 其以地层压力梯度和地层破裂压力梯度剖面图如图 1-3 所示。该井无地质复杂层。设计系数取以下值: $S_b = 36\text{kg/m}^3$, $S_g = 36\text{kg/m}^3$, $S_f = 24\text{kg/m}^3$, $S_k = 60\text{kg/m}^3$, $\Delta p_N = 16.66\text{MPa}$, $\Delta p_a = 21.33\text{MPa}$ 。

- (1) 求中间套管下入深度假定点。
- (2) 验证中间套管下入 4100m 深度是否有卡套管的危险。
- (3) 计算中间尾管最大下入深度 H_3 。
- (4) 校核尾管下入到初选点 4400 过程是否有发生压差卡套管。

解: (1) 由图查得钻遇最大地层压力梯度等效密度 $\rho_{p\max} = 2070\text{kg/m}^3$, 位于 4650m 处。

$$\rho_{f2k} = \rho_{p\max} + S_b + S_f + \frac{H_{p\max}}{H_{21}} S_k = 2070 + 36 + 24 + \frac{4650}{H_{21}} \times 60$$

试取 $H_{21} = 4100\text{m}$, 则 $\rho_{f2k} = 2198\text{kg/m}^3$ 。

由图查得 4100m 处地层破裂压力梯度 $\rho_{f4100} = 2205\text{kg/m}^3$, 因为 $\rho_{f2k} < \rho_{f4100}$, 确定中间套管下入深度初选点为 $H_{21} = 4100\text{m}$ 。

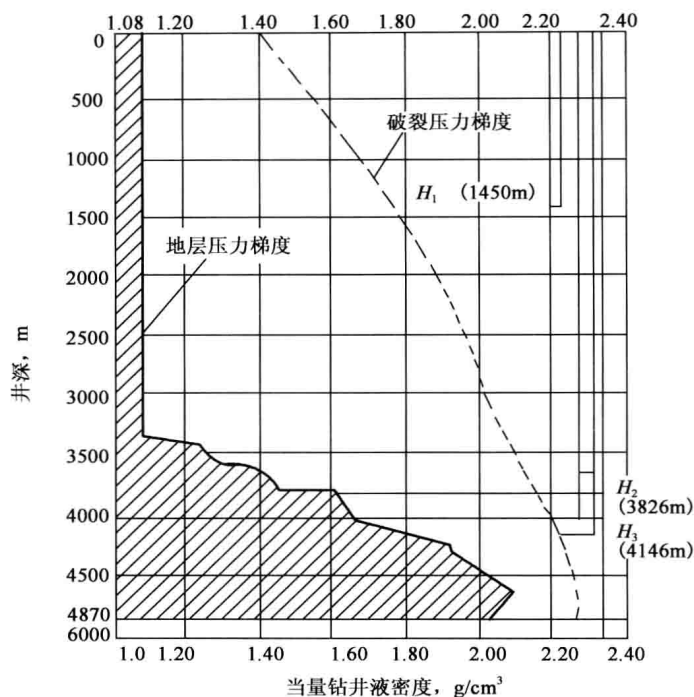


图 1-3 压力梯度剖面图

(2) 由图查得 4100m 处 $\rho_{p4100} = 1670 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{pmin} = 1080 \text{ kg/m}^3$, $H_{mn} = 3380 \text{ m}$ 。

$$\Delta p = 9.81 \times H_{mn} (\rho_{pmax} + S_b - \rho_{pmin}) \times 10^{-6} = 9.81 \times 3380 \times (1670 + 36 - 1080) \times 10^{-6} = 20.76 \text{ (MPa)}$$

因为 $20.76 \text{ MPa} > 16.66 \text{ MPa}$, 所以中间套管下入井深当 4100m 处有卡套管的危险, 中间套管下入深度应减小。

求在允许压差 16.66 MPa 的条件下, 中间套管下入深度 H_2 。

$$\begin{aligned} \rho_{pper} &= \frac{\Delta p}{9.8 \times 10^{-3} \times H_{mn}} + \rho_{pmin} - S_b \\ &= \frac{16.66}{9.8 \times 10^{-6} \times 3380} + 1080 - 36 = 1619 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

由图可知相应井深为 3900m。

(3) 确定尾管下入深度初选点为 H_3 , 由剖面图查得中间套管下入深度 3900m 处地层破裂压力梯度 $\rho_{f3900} = 2160 \text{ kg/m}^3$, 则有:

$$\begin{aligned} \rho_{pper} &= \rho_{f2} - S_f - S_b - \frac{H_{31}}{H_2} S_k \\ &= 2160 - 24 - 36 - \frac{H_{31}}{3900} \times 60 \end{aligned}$$

试取 $H_{31} = 4400$, $\rho_{pper} = 2032 \text{ kg/m}^3$, 由剖面图查得 4400 处地层压力梯度 $\rho_{p4400} = 1950 \text{ kg/m}^3$, 因为 $\rho_{p4400} < \rho_{pper}$, 且相差不大, 所以确定尾管下入深度初选点为 4400m。

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= 9.81 H_{mn} \cdot (\rho_{pmax} + S_b - \rho_{pmin}) \times 10^{-3} \\ &= 9.81 \times 4400 \times (1950 + 36 - 1619) \times 10^{-6} \\ &= 15.84 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

$\Delta p_m < \Delta p_a$ ，所以尾管下入深度为 4400m，满足设计要求。

(5) 确定表层套管下深。

$$\begin{aligned}\rho_{f1k} &= \rho_p + S_b + S_f + \frac{H_p}{H_{ni}} S_k \\ &= 1619 + 36 + 24 + \frac{3900}{H_{1i}} \times 60\end{aligned}$$

试取 $H_{11}=1700\text{m}$ ， $\rho_{f1k}=1817\text{kg/m}^3$ 。由剖面图查井深 1700m 处 $\rho_{f1700}=1820\text{kg/m}^3$ 。因 $\rho_{f1k} < \rho_{f1700}$ ，且相近，所以满足设计要求。可知表层套管下入深度为 1700m，中间套管下入深度为 3900m，钻井尾管下入深度为 4400m，生产套管下入深度为 4878m。

二、钻井液设计

(一) 钻井液体系的选择与性能设计

1. 选择钻井液体系的原则

(1) 根据不同油气层性质选择。油气层的特性不同，对钻井液体系的要求也不同。钻井液体系必须与其相适应才能起到保护作用，并减轻损害，获取应得的产量。例如，水敏性很强的蒙皂土含量很高的油气层，就该选用对膨润土具有很强抑制能力的钻井液类型。

(2) 根据不同井别选择，主要指的是那些对钻井液体系有特殊要求的井别，而不是完全按习惯分类的井别。

①超深井。这里一般指深度在 5000m 以上的井，其特点是高温、高压，因而对钻井液提出稳定性好（即恒高温一定时间后性能变化较小）、高温对性能影响较轻（即在高温下的性能与常温下对比不能差别过大）及在高压差下泥饼压缩性好的要求。

②定向斜井（含水平井）。该类井的主要特点是井眼倾斜，甚至与地面平行，在钻进过程中钻具与井壁的接触面积较大，摩阻高。故对钻井液提出低泥饼摩阻系数的要求，而且必须严格控制滤失量及泥饼质量。

③调整井（含高压力井）。该类型的主要特点是地层压力异常高，由于密度要求特别高，故一般选用分散型钻井液体系。

④区域探井和预探井。该类井的主要要求是能够随时发现产层，为此要求选用不影响地质录井（即钻井液荧光低）及易发现油气层位（即钻井液密度低）的钻井液体系。

⑤开发井。该类井的主要要求是在保护油层及提高钻速方面，故在油气层上部采用聚合物不分散钻井液，到油气层即换用相适应的钻井液。

(3) 根据不同的地层特点选择。实践证明，不同地层对钻井液常常提出不同的要求，必须针对其特点采用相应的特殊措施，才能安全顺利地钻穿这些地层。

(4) 根据工程要求确定钻井液性能。钻井工程对钻井液性能要求体现在两个方面：一是确保安全钻进，就是要求性能能够适合井下的具体情况，能够应对井下出现的复杂情况；二是提高机械钻速。

提高机械钻速的要求如下：

①尽可能保持近平衡的压差。

所谓近平衡压差，是指无论在钻井中或起下钻时，由钻井液所产生的对地层的压力要尽