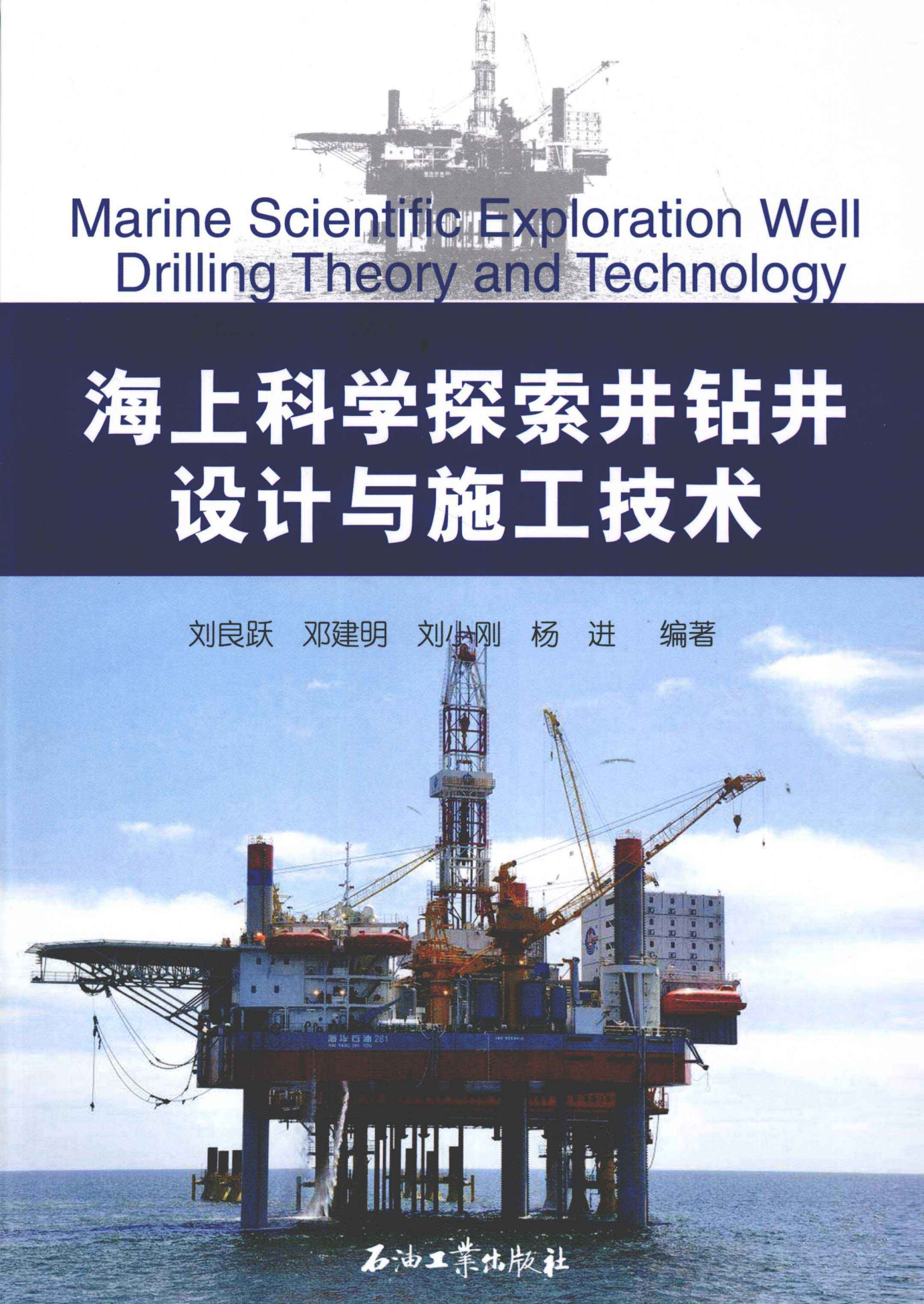




Marine Scientific Exploration Well
Drilling Theory and Technology

海上科学探索井钻井 设计与施工技术

刘良跃 邓建明 刘小刚 杨进 编著

石油工业出版社

海上科学探索井 钻井设计与施工技术

刘良跃 邓建明 刘小刚 杨 进 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了海上科学探索井的钻井工程设计方法及钻井施工关键技术。从钻井工程设计入手详细论述了海上钻前地层压力预测、三个地层压力剖面建立和井身结构优化设计方法,从钻井工程安全入手论述了海上井口设计、套管设计、科学探索井钻井作业风险评估及防范对策,从现场钻井施工作业入手介绍了科学探索井钻井施工关键技术和作业组织管理程序。

本书可作为钻完井技术人员、修井技术人员、地质设计人员进行海上钻完井设计、现场施工组织及管理的参考用书,也可作为石油院校相关专业教学的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

海上科学探索井钻井设计与施工技术 / 刘良跃等编著.

—北京:石油工业出版社,2013. 1

ISBN 978 - 7 - 5021 - 9414 - 7

I. 海…

II. 刘…

III. ①海上开采 - 钻井设计 - 研究 ②海上开采 - 工程施工 - 研究

IV. TE53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 316845 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)64523537 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 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:13. 5

字数:342 千字

定价:78. 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

为探知渤海深层油气的奥秘,中海石油(中国)有限公司在渤海深层部署一口科学探索井,以实现渤海湾深层勘探领域钻完井技术的突破。该探井部署在渤海中部海域,井号为渤中21-2-1,设计井深5355m,是渤海海域历史上最深的一口探井。

从渤海湾周边地区深部地层的钻探情况分析,渤海湾深部地层可能存在高温、高压及硫化氢气体等复杂的地质条件。前期因渤海油田作业能力与钻探技术无法应对“高温、高压、高含有毒有害气体”的挑战,渤海超过5000m的深层一直被视为勘探的“禁区”。从1965年渤海第一口探井钻探开始,五十多年来渤海勘探始终在深层止步不前,4500m以下地层还未有油气储量的发现。

针对这口科学探索井的钻井工作,中海油天津分公司成立了科学探索井联合攻关项目组,集科研、技术、作业与管理等各方力量于一体,针对深层高温、高压及深层地质特性,展开钻完井理论、技术与装备能力的科研攻关,通过新理论运用、新技术方法引进与现有技术组合应用,逐渐掌握并形成了一套渤海深层高温高压钻完井技术。

该科学探索井于2011年6月成功完钻,历时105天,创造了四项渤海之最:完钻井深最深达5141m,井底压力最高70MPa,井底温度最高178℃,有毒有害气体含量最高,硫化氢浓度大于250mg/L。

科学探索井钻探工作完成一年来,天津分公司钻完井部通过系统的技术总结分析,积累了许多渤海深层的钻探经验,掌握了一系列深层钻探技术,其中八项钻井新技术在渤海首次使用。作者基于科学探索井技术攻关形成的钻完井技术成果撰写了本书。

在本书撰写过程中,中国海洋石油总公司工程技术部姜伟、张春阳、周俊昌、谢梅波、孙东征、李立宏、张红生等同志提供了技术指导,天津分公司范白涛、马英文、王本奎、刘宝生、张晓晟、陶林、崔治军等同志提供了大量的技术资料和指导;中海油研究总院周建良、刘书杰、王平双、何保生、李玉光、耿亚楠、谢仁军、文敏、周长所、徐国贤、吴怡等同志提供了大量的技术资料和指导,湛江分公司张勇、李中、黄熠、黄凯文、段泽辉、郭永宾、方满宗、顾纯巍、李炎军等同志提供了大量的高温高压钻完井资料和现场应用指导,中海油监督监理公司杨立平、陈建兵、李刚、陈胜宏、吴占民等同志提供了大量的技术资料和帮助,在此表示衷心感谢。

中国石油大学(北京)的高宝奎、朱益、严德、田瑞瑞、周波、刘加伟、魏倩、李春、张磊、葛俊瑞、王啸、孟伟、焦金刚、施览玲、苏欣、江鹏等同志参加了本书资料整理工作。在本书编写和出版过程中得到了中国石油大学(北京)、中海油天津分公司、中海石油能源发展监督监理技术分公司等单位的大力支持,在此表示感谢。

由于本书涉及内容较多,加之编者的水平有限,本书定有不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 概述	1
第一节 海上科学探索井作用	1
第二节 地质要求	1
第三节 钻井工程要求	4
第二章 钻前地层压力预测	7
第一节 资料收集	7
第二节 地层压力预测	9
第三章 钻井液安全密度窗口确定	10
第一节 地应力分析	10
第二节 井壁稳定性分析	16
第三节 三个地层压力剖面建立	21
第四章 井身结构优化设计	25
第一节 井身结构设计原则	25
第二节 复杂情况预测	25
第三节 六个井身结构设计系数确定	27
第四节 探井套管层次和下入深度确定	37
第五章 探井井口稳定性分析	41
第一节 钻井隔水导管入泥深度确定	41
第二节 钻井隔水管强度和稳定性分析	48
第三节 套管组合结构整体力学性能和稳定性分析	55
第四节 探井井口承载能力分析	65
第六章 科学探索井套管优化设计与钻柱力学分析	69
第一节 套管优化设计方法	69
第二节 温度对套管安全性影响	78
第三节 井筒温度场计算	85
第四节 考虑温度影响套管强度校核	91
第五节 井口抬升与自由段套管受力分析	94
第七章 科学探索井钻井作业风险评估及防范对策	97
第一节 海上科学探索井钻井风险特点	97
第二节 科学探索井复杂情况预防及控制技术	98

第三节 科学探索井钻井作业流程..... 100
 第四节 科学探索井其他作业要求..... 107
 第八章 科学探索井钻井工程设计及施工技术..... 132
 第一节 BZ21 - 2 - 1 井钻井工程设计 132
 第二节 BZ21 - 2 - 1 井钻井施工技术 199
 参考文献..... 208

第一章 概述

第一节 海上科学探索井作用

科学探索井是适应我国油气勘探项目管理、地质科学理论研究、工艺技术发展需要而产生的一种新的钻井类型,是油气勘探中的一项系统工程,兼顾科学、实践二重性。科学探索井既要揭露全部地层,取得地层、岩性、生油条件、储盖组合和各种有关地球物理资料,也要着眼于有利构造带或有利含油气圈闭,发现工业油流,所以具有参数井、探井之二重性,是揭示地下复杂地质情况的重要手段,是发现油气田和增加地质储量的最有效环节。它可以部署在新区新领域,这就类似于参数井、预探井,也可以部署在已知油田上而为了验证某些认识或取得新资料。

中国海洋石油总公司 2010 年实现油气产量突破 $5000 \times 10^4 \text{t}$,这标志着我国成为世界海洋石油生产大国,在海洋石油勘探和开发、海洋工程技术和大型装备等领域进入世界海上石油工业先进行列。海上科学探索井是海洋油气勘探中的一项系统工程,兼有科学、实践二重性,对于海洋油气勘探的决策、管理体制、科研生产都具有战略性意义,同时,海上科学探索井也是开拓海洋油气勘探领域的重要途径。

科学探索井一般为当地设计井深较深、层位较全的一口井,该井的钻探不仅有利于揭示深部地层新生代各层系古生物组合、沉积体系类型、岩石学特征、储盖组合、岩电关系、烃源岩特征和温压系统,而且对研究深部地层的构造演化、环境变迁和沉积充填都有较好的理论意义。

对于渤海地区,这种类型井的钻探既可落实潜山的地层年代、深部储集体类型和储层物性,也有利于揭示潜山的含油气状况和储量规模,为围区其他构造块潜山的后续勘探奠定良好的基础。同时,潜山若有较大规模的油气发现,也必将拓展渤海海域潜山勘探的新领域。

渤海海域古近系前积三角洲的富砂富泥一直是困惑油气勘探的难点问题,这种类型井的钻探可为该问题的研究提供直接的参考。

海上科学探索井成功的重要因素在于运用油气勘探科学新进展、新观点和新方法,对所有信息进行分析研究,不漏取非常微弱的油气显示,从而达到合理、有效、及时地取准取全资料,发现、保护和评价油气层,认识地下地质规律之目的。

第二节 地质要求

在地质工程上要求海上科学探索井既要揭露全部地层,取得地层、岩性、生油条件、储盖组合和各种有关地球物理资料,也要着眼于有利构造带或有利含油气圈闭,发现工业油流,故具有参数井、探井之二重性,是揭示地下复杂地质情况的重要手段,是发现海洋油气田和增加地质储量的最有效环节。

一、钻前地质提示

(1)严格执行 HSE 管理体系,保障健康安全,保护海洋环境。

(2)钻井过程中,在保证井下安全的前提下,现场地质、钻井监督应尽量使用低密度钻井液保护好油气层。

(3)工程方面要为地质捞取岩屑创造良好条件,并尽量稳定钻压、钻速、泵压、排量等参数,确保录井资料质量。

(4)应尽量使用不含荧光的钻井液添加剂,减少对荧光和地化录井的影响。当使用有荧光的钻井液添加剂时,应及时将加入的时间、井段、添加剂名称及数量告诉地质监督和地质录井人员。

(5)紧急情况下,如出现井漏、井涌、井喷、井垮塌等重大事件时,现场需要进行钻井液性能的调整,地质、钻井监督可先处理再汇报。

(6)目的层段的井眼及井径扩大率应符合工程质量标准。

(7)穿过断层处,钻井过程中应注意防漏、防塌。

(8)高温可能会对钻井工具和测井仪器造成一定的影响。

二、地质综合录井

录井作业由勘探部派驻现场的地质监督全面负责,由服务商承包实施。录井人员要保证 Geonext 智能录井系统及 Reserval 气体分析仪等所有现场设备在录井过程中运转正常,录取资料准确、及时、齐全。开钻前或钻井过程中对设备进行调校,其调校记录应装订成册,联机队长和地质监督签字,完井后交勘探部。

1. 岩屑录井取样要求与说明

(1)按海洋石油《勘探监督手册》中的方法和要求捞取岩样。

(2)烘干样:首先用淡水洗净,然后放入烘箱烘干(温度 $\leq 110^{\circ}\text{C}$);样重 1000g,用布袋分两袋装。

(3)自然干样:取泥岩,样重 1000g,自然风干,布袋装。如果完钻时自然干样未干,湿样送回陆地,由岩心岩屑库房负责晾干。

(4)根据随钻需要,地质监督可决定加密取样。

(5)岩屑描述要求内容详细,语言简练,顺序不乱,记录成册。

(6)对不易识别的岩性和层位确定有困难时应选送分析化验样品。

(7)要保管好岩屑,以防损坏丢失,运回陆地时一定要标识明显。

2. 井场岩性薄片鉴定

严格执行操作规程,确保样品代表性;分析及时,成果准确;岩性薄片鉴定人员需每天定时向地质监督提供岩性鉴定结果。地质监督审核后用电子邮件或传真发回陆地。

3. 荧光录井

(1)井段、间距同岩屑录井,逐包进行荧光湿照、滴照,详细描述油气显示。

(2)QFT 分析井段、间距同岩屑录井,采用 QFT(定量荧光检测技术)荧光仪进行分析。对储层、气测异常段要重点分析,对非储层、无气测异常段地质监督可酌情放大分析间距。

4. 地化录井

严格执行地化录井操作规程,确保仪器的精度、样品的质量;分析及时,成果准确;按合同要求及时提交成果报告。

5. Flair 录井(实时地层流体录井)

录井井段:500.0m~井底。

Flair 录井工程师需每天早上定时向地质监督提供 Flair 解释日报、Flair 分析数据表、数据质量控制图、流体相分析图。地质监督审核后用电子邮件或传真发回陆地。按合同要求及时提交成果报告。

6. 荧光扫描采集技术

荧光扫描采集技术要求见表 1-1。

表 1-1 荧光扫描采集技术要求

井段(m)	样品	取样间距与要求
500~井底	岩屑	按照岩屑录井取样要求采集分析
	井壁取心	逐颗采集分析
严格执行操作规程,确保样品代表性;分析及时,成果准确;图像采集人员需每天早 6:30 向地质监督提供荧光采集数据。地质监督审核后用电子邮件或传真发回陆地		

7. PreVue 实时压力录井

录井井段:建立循环开始至井底。

钻进过程中录井人员需每天早上定时向地质监督、钻井监督提供 PreVue 压力监测早报;同时,在日常监测过程中应与监督保持良好沟通,对于地层的压力变化检测情况应及时进行书面汇报。

8. 钻井液综合录井

钻井液综合录井项目及表 1-2。

表 1-2 钻井液综合录井项目及表 1-2。

录井项目	井段(m)	间距	说明
钻时	开钻至井底	1 点/m	连续监测
气测	建立循环开始至井底	1 点/m	连续监测(包括循环观察、后效等)
H ₂ S 等非烃	建立循环开始至井底	1 点/m	连续监测
密度、温度	建立循环开始至井底	1 点/m	连续监测
工程参数	开钻至井底	1 点/m	连续监测(包括起下钻等)
压力监测	建立循环开始至井底	1 点/m	连续监测(dc 指数)
钻井液体积	建立循环开始至井底	—	连续监测
钻井液性能	建立循环开始至井底	1 次/h	每班测一次全套性能
其他项目	按规程		连续监测

三、汇报制度

(1) 录井人员每天早上定时向地质、钻井监督提供早报及 Masterlog 图。每天向陆地汇报的资料、数据,由地质监督审核后用电子邮件或传真发回陆地。

(2) 地质监督每天早上和下午定时用电话向勘探部地质主管报告钻井、地质录井情况,特殊情况地质监督应及时报告。

(3)对油气水浸、井漏等异常情况,录井人员要及时进行监测、记录,同时向地质、钻井监督报告,通报相关人员采取措施处理,并及时准备相关数据和作回放曲线交地质监督进行分析、汇报。

四、测井

测井作业由勘探部派驻现场测井监督全面负责。

1. 常规系列测井

常规系列测井项目见表 1-3。

表 1-3 常规系列测井项目

井眼尺寸(in)	测井项目	备注
17½	(1)侧向、阵列声波、自然伽马、自然电位、井径; (2)补偿中子、密度、自然伽马	根据油气显示情况可取消相应测井项目
12¼	(1)侧向、阵列声波、自然伽马、自然电位、井径; (2)补偿中子、密度、自然伽马; (3)测压、取样; (4)核磁共振测井; (5)常规井壁取心、旋转井壁取心	根据油气显示情况可取消相应测井项目
8½	(1)侧向、阵列声波、自然伽马、自然电位、井径; (2)补偿中子、密度、自然伽马; (3)测压、取样; (4)核磁共振测井; (5)常规井壁取心; (6)固井质量	根据油气显示情况可取消相应测井项目
6	(1)侧向、阵列声波、自然伽马、自然电位、井径; (2)补偿中子、密度、自然伽马; (3)成像测井; (4)常规井壁取心	根据油气显示情况可取消相应测井项目

2. 随钻系列测井

随钻系列测井项目见表 1-4。

表 1-4 随钻系列测井项目

井眼尺寸(in)	测井项目	备注
8½	随钻测压	测量井段及测压点数根据具体情况而定,以勘探部测井监督通知为准

3. VSP 测井

测井井段:150.0m ~ 井底。

第三节 钻井工程要求

钻井工程质量要求主要包括井身质量、钻井液质量、取心质量、套管与固井质量及测井质量要求。

(1)井身质量要求:直井井身质量要求包括井斜角、全角变化率、水平位移和井眼扩大率要求;定向井井身质量要求包括狗腿严重度、最大井斜角、中靶质量和井眼扩大率要求。

由于科学探索井一般为直井,这里对定向井的井身质量要求不再阐述。直井井身质量要求见表1-5。

表 1-5 直井井身质量要求

项目	名称	质量标准	
井身质量	井斜角	井深(m)	井斜角(°)
		0~100	≤0.5
		100~500	≤1
		500~2000	≤3
		2000~3000	≤5
		3000~4000	≤7
		4000~5000	≤9
		5000以上	≤11
	全角变化率	满足要求,参见《海洋钻井手册》	
	水平位移	井深(m)	水平位移(m)
		1000	≤30
		2000	≤50
		4000	≤120
		>4500	≤140
	井眼扩大率	井眼尺寸(in)	目的层井径
		12¼	≤120%(钻头直径)
		8½	≤130%(钻头直径)
		6	≤130%(钻头直径)

(2)钻井液质量要求:包括钻井液密度和钻井液滤失量要求见表1-6。

表 1-6 钻井液质量要求

项目	名称	质量标准	
钻井液	油层段密度	$\rho \leq$ 设计	水基
	API 失水量(mL)	≤ 5	水基
	HTHP 失水(mL)	≤ 12	水基

(3)取心质量要求:包括取心收获率,密闭取心时要求密闭率。见表1-7。

表 1-7 取心质量要求

项目	名称	质量标准	
取心质量	取心收获率(%)	松软地层	85
		其他地层	95

(4)套管与固井质量指标:水泥浆密度、水泥浆失水量、固井质量检测、水泥封固高度、井口及套管试压、油层套管内人工井底,见表 1-8。

表 1-8 套管与固井质量要求

项目	名称	质量标准
固井质量	水泥浆密度(g/cm^3)	$-0.02 \leq \Delta\rho \leq +0.02$
	水泥浆失水量(mL)	≤ 50
	固井质量检测(SBT)	按中国海洋石油有限公司颁布的标准检测
	水泥封固高度	油顶以上至少 150m;气层顶以上至少 200m
	井口及套管试压	满足设计要求
	油层套管内人工井底	满足试油要求

(5)测井质量评价指标:包括测井项目、资料要求、沉砂要求。测井质量要求见表 1-9。

表 1-9 测井质量要求

项目	名称	质量标准
测井质量	沉砂要求	不超过 1‰
	资料要求	中国海洋石油总公司标准
	测井项目	完成设计的全部测井项目

第二章 钻前地层压力预测

第一节 资料收集

对于科学探索井,由于存在测井资料未知的情况,所以只能根据周围区块已钻井的资料来对未钻井进行地层压力评价,本节以 BZ21-2-1 井为例,概述了科学探索井进行钻前地层压力预测应收集到的资料。

BZ21-2-1 井周边已钻井的区块有:渤中 21-1、渤中 22-1、渤中 22-2、渤中 19-4、渤中 25-1、渤中 26-2、渤中 26-1、渤中 13-1 和渤中 28-1 构造。

已钻井的测井、录井和钻完井报告收集:BZ21-1-1 井、BZ22-1-1A 井、BZ21-4-1 井、BZ13-1-1 井、BZ26-2-1 井、BZ28-2S-2 井、BZ13-1-2 井和 BZ27-2-1 井。

一、BZ21-2-1 井邻近井钻井液密度情况

BZ21-2-1 井邻近井钻井液密度曲线如图 2-1 所示。

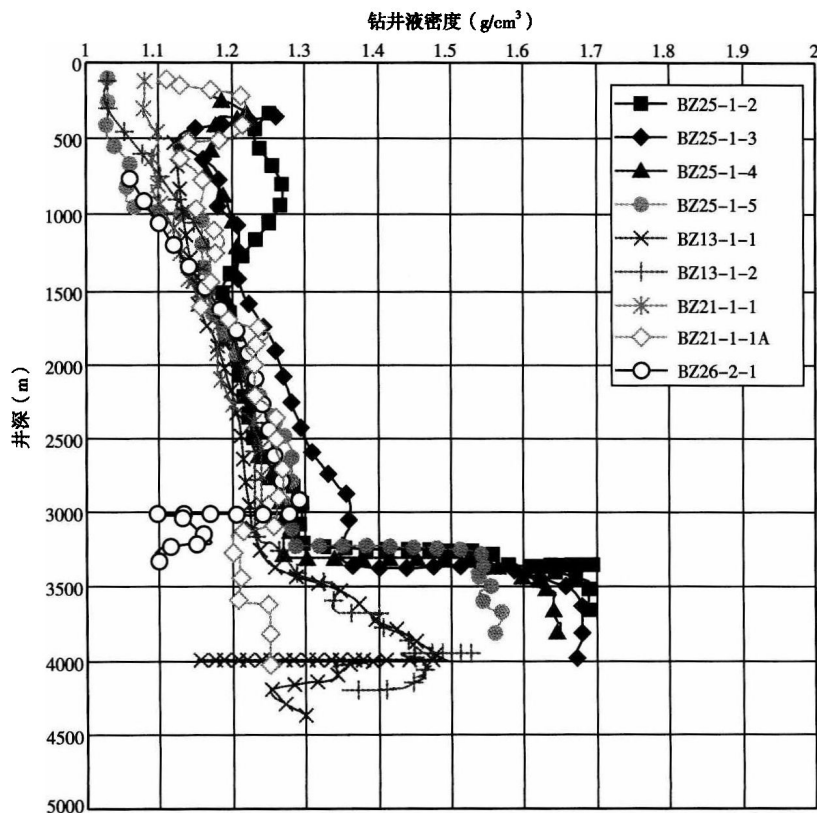


图 2-1 BZ21-2-1 井邻近井钻井液密度曲线图

二、渤中 21 - 2 构造围区钻井实测地层压力

渤中 21 - 2 构造围区钻井实测地层压力系数与深度关系如图 2 - 2 所示。

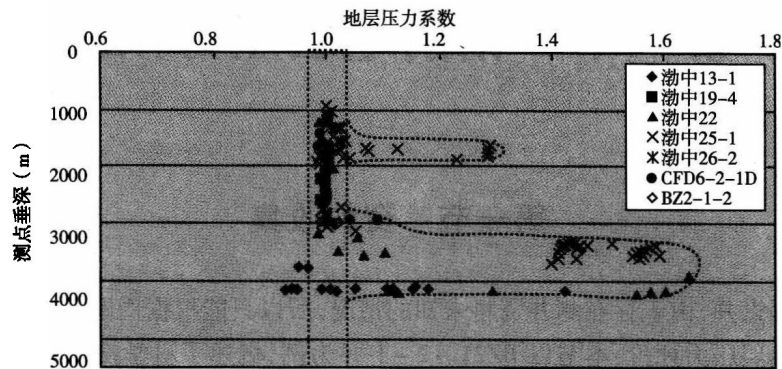


图 2 - 2 渤中 21 - 2 构造围区钻井实测地层压力系数与深度关系图

三、邻近井地漏试验总结

BZ21 - 2 - 1 井邻近井地漏试验统计见表 2 - 1。

表 2 - 1 BZ21 - 2 - 1 井邻近井地漏试验统计

井名	井深 (m)	层位	实测地层破裂压力系数 (g/cm ³)
BZ13 - 1 - 1	2010	馆陶组	1.82 (未漏)
	3989	中生界	1.42
BZ13 - 1 - 2	1315	明上段	1.82 (未漏)
	3210	东营组	1.45
BZ21 - 1 - 1	813	明上段	1.74
BZ21 - 1 - 1A	513.2	明上段	1.42
	3730	沙河街	1.39
BZ26 - 2 - 1	607.75	明上段	1.62
BZ27 - 2 - 1	932.5	明上段	1.81 (未漏)
	3158	东一段	1.88 (未漏)
BZ28 - 2S - 2	510	明化镇组	1.8
	2680	东上段	1.89
BZ25 - 1 - 2	1715	明上段	1.75
	3270	沙河街	2.04
BZ25 - 1 - 3	1770	明化镇组	1.7
	3360	沙河街	2.09
BZ25 - 1 - 4	1660.5	明化镇组	1.76
	3294.06	沙河街	1.85
BZ25 - 1 - 5	345	平原组	1.6 (未漏)
	1518	明化镇组	1.78
	3225	沙河街	2.01 (未漏)

第二节 地层压力预测

地层压力评价大体上可分为钻井前用地震资料预测地层压力、钻进过程中用随钻录井资料监测地层压力以及钻井完成后用测井资料检测地层压力的方法等。对科学探索井而言,地层压力评价的核心问题是钻井前的地层压力预测。对地层压力的准确预测,能够为后期井壁稳定性的分析、不同层位井段钻井液密度确定、井身结构优化以及套管层数和下入深度的确定提供科学依据;对于保障钻井作业的安全快速进行、减少井下复杂情况、保护油气层等意义也很重大。

在长期的实践中,总结了多种预测地层压力的计算模型。预测孔隙压力主要有地震法、声波时差法和页岩电阻率法等,其中利用地震资料计算孔隙压力可用 Fillipono 直接法或转化为时差用 Eaton 法等。预测破裂压力比较有效的计算模型有马修斯和凯利法、黄荣樽法等,每种模型都有其适用范围,并且针对不同构造地层做适当修正才有较高的精度。

科学探索井的压力预测和常规油气井有所不同,由于科学探索井存在测井资料未知的现象,科学探索井的地层孔隙压力只能采用地震资料,依据地震速度谱数据预测。而地层破裂压力,因钻前资料不足,往往依据邻近井的资料进行估计。此外,单纯地应用某一种方法有时无法准确地预测出地层压力,需要用多种方法进行综合分析和解释,将多种数据资料进行结合,通过一个综合的数据处理途径,应用数据库、数学物理方法等技术对待钻地层进行预测。

在长期的实践中,总结了多种评价地层压力的方法。但是,每种方法都有一定的局限性,所以单纯的应用一种方法很难准确地评价一个地区的地层压力,要用多种方法进行综合分析和解释。对于 BZ21-2-1 井,主要依据 BZ21-2-1 井的地震层速度资料及周边井的测井资料,建立地层压力剖面,根据已钻井资料进行综合分析处理,并作出科学推断。BZ21-2-1 井三压力预测曲线如图 2-3 所示。

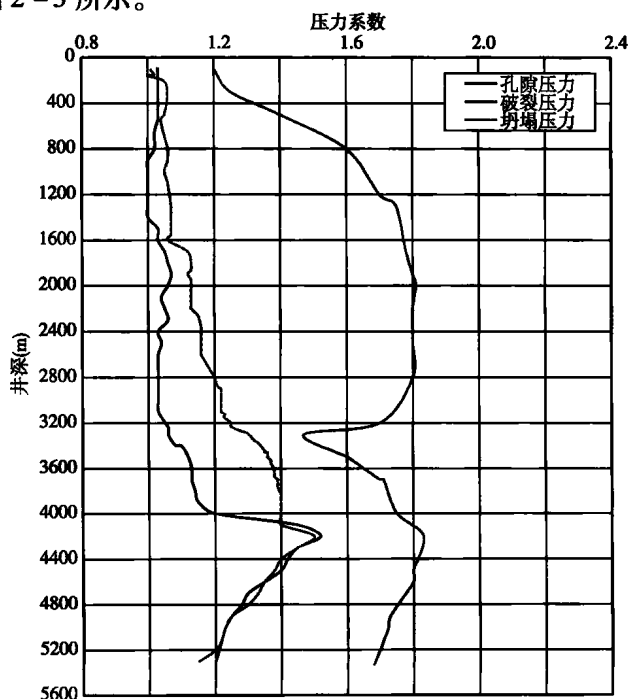


图 2-3 BZ21-2-1 井三压力预测曲线

第三章 钻井液安全密度窗口确定

第一节 地应力分析

岩石是地球表面的物质,在漫长的地质年代里,由于地质构造运动等原因使地壳物质产生了内应力效应,这种应力称为地应力,它是地壳应力的通称,其来源主要有:

- (1)地层本身的重量;
- (2)地层温度的不均匀;
- (3)地层中的水压梯度;
- (4)板块边界的挤压;
- (5)地幔热对流;
- (6)地质构造运动;
- (7)地球旋转;
- (8)岩浆浸入。

可见,形成地应力的因素极为复杂。地层岩石未经人工挖掘和扰动以前的天然应力,又称初始应力或固有应力。从方向上分为垂直应力和水平应力。应力一般用张量来表示,但为了简化,可以用三个主应力来表示,地应力简化为三个主应力来研究,包括上覆应力和水平方向上的两个主应力。上覆岩层压力由岩体自身引起,岩体的自重不仅产生重力应力,而且由于泊松效应还会产生水平应力。构造应力为地壳中长期存在着一种促使构造运动发生的内在力。

井眼钻开后地应力要重新分布,并可能导致某一方向上的井壁应力集中。如果井眼液柱压力过高,又可能造成水平最大地应力方向上的拉张破坏,这就是压裂。实际情况中,井眼的破坏原因和过程是很复杂的,与岩石节理、裂缝的分布、钻井液化学影响及温度等有很大关系。地应力的确定是研究井眼力学稳定性、分析井眼发生各种破坏的一个基础工作。

地应力研究包括确定三个主应力的大小,以及水平方向上两个主应力的方向确定。

一、地应力研究的地质力学观点和方法

目前研究和分析地应力的方法包括地质力学的方法、室内实验的方法、现场地漏试验等方法。综合这些分析结果,作为地应力研究的依据。

地应力和构造地质运动关系密切,不同地层的断裂类型可以判断三个主地应力之间的大小。对于拉张造成的断裂,是正断层,上覆应力是控制应力,水平方向上应力相对较小;对于挤压造成的断裂,是逆断裂,地应力比较大,通常两个水平方向上的应力要大于上覆应力;走滑断层情况下,由于应力可以得到更多的释放,与逆断层的情况相比,要小一些。

正断层典型地应力相对大小为:

上覆应力 σ_v > 水平最大地应力 σ_H > 水平最小地应力 σ_h
逆断层典型地应力状态为:

水平最大地应力 σ_H > 水平最小地应力 σ_h > 上覆应力 σ_v
走滑断层典型地应力状态为:

水平最大地应力 σ_H > 上覆应力 σ_v > 水平最小地应力 σ_h
图 3-1 就是三种典型断层的地应力大小规律。

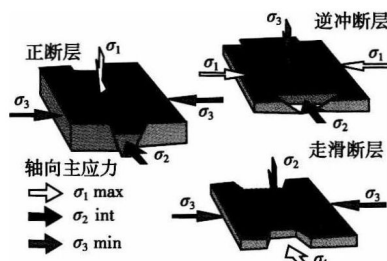


图 3-1 典型的断层与地应力状态关系

这是从地质力学的方法做的一个判断,对三个主应力的大小关系可以准确地确定下来。

二、地漏试验法确定地应力

两向不等应力模型的水平主应力计算采用石油大学(北京)黄荣樽教授的研究结果:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= \left(\frac{\mu}{1-\mu} + A \right) (\sigma_v - p_0) + p_0 \\ \sigma_h &= \left(\frac{\mu}{1-\mu} + B \right) (\sigma_v - p_0) + p_0 \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

考虑到 Biot 系数的影响,可以将上式改写为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= \left(\frac{\mu}{1-\mu} + A \right) (\sigma_v - \beta \cdot p_0) + \beta \cdot p_0 \\ \sigma_h &= \left(\frac{\mu}{1-\mu} + B \right) (\sigma_v - \beta \cdot p_0) + \beta \cdot p_0 \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

式中 A, B ——反应两个水平方向上构造应力大小的两个常数。对给定地区为一常数,但随地区而异。

参数 A 和 B 的求取办法:根据典型压裂曲线首先求出一个实际的 σ_h 和 σ_H ,然后代入上述方程可反求出 A 和 B 。

根据典型压裂曲线(图 3-2)求取最大最小水平主应力的方法:因为已经压开的裂缝闭合后重新启泵时裂缝重新张开,不必克服岩石的抗张强度,所以岩石的抗张强度可以根据曲线上的地层破裂压力 p_f 和裂缝重张压力 p_r 的差值得。

$$|\sigma_t| = p_f - p_r \quad (3-3)$$

瞬时停泵地面压力加上井筒中压裂液液柱压力等于井底压力,这个压力正好等于已经压开的垂直裂缝上保持裂缝张开状态所需的压力,它又恰好和最小水平主应力相等(因为垂直裂缝总是沿垂直于最小水平主应力的方向张开)。这样可确定最小水平主应力: