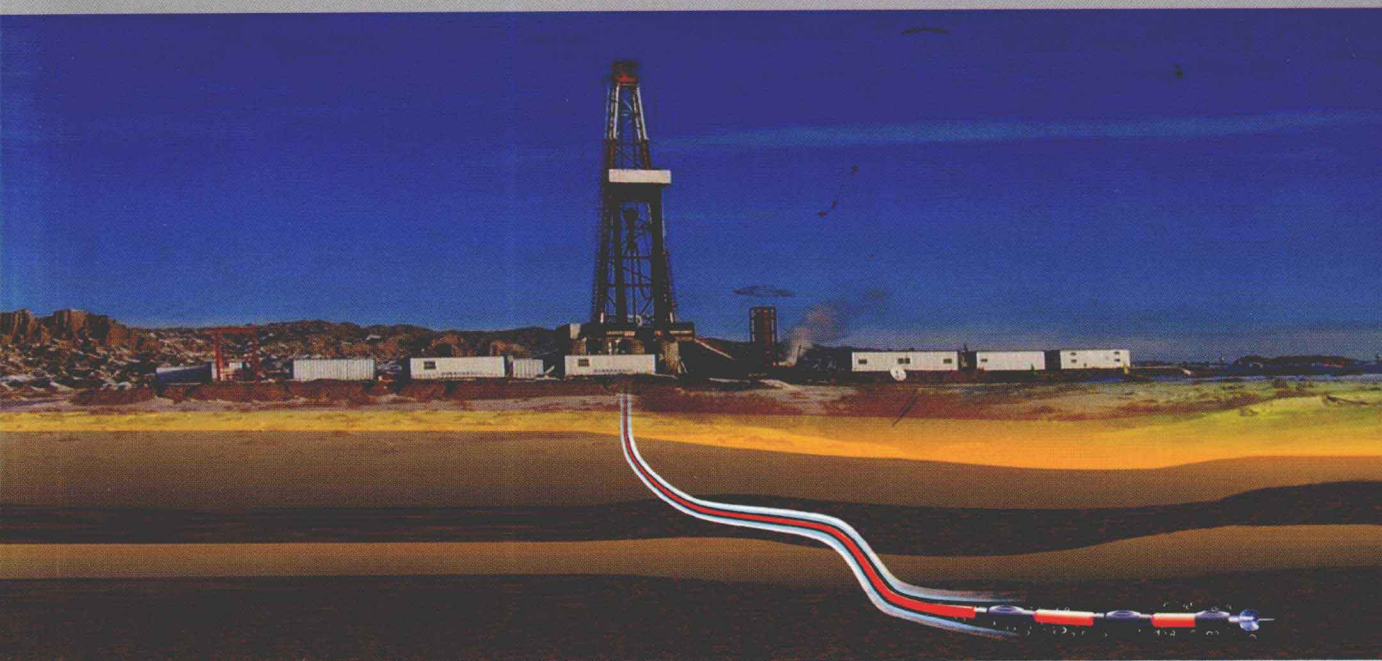


HORIZONTAL WELL

盐下水平井钻井 理论与配套技术

滕学清 李 宁 陈 勉 著



石油工业出版社

PETROLEUM INDUSTRY PRESS

盐下水平井钻井理论与配套技术

滕学清 李宁 陈勉 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了盐下水平井钻井设计的基础理论,包括变曲率方位井壁稳定理论、盐膏层造斜段套管抗外挤强度校核理论和基于虚拟接触点的摩阻预测理论。介绍了变曲率变方位井壁稳定控制技术、盐下水平井优化钻井技术、高刚度套管下入技术和高密度重晶石加重钻井液技术,并结合相关理论及技术对现场工程实例进行了分析。

本书可为盐下水平井钻井设计及施工提供理论和技术支撑,也可供石油相关企业油气井工程等专业师生、科技人员参考应用。

图书在版编目(CIP)数据

盐下水平井钻井理论与配套技术/滕学清,李宁,
陈勉著. —北京:石油工业出版社,2013. 2

ISBN 978 - 7 - 5021 - 9396 - 6

I. 盐… II. ①滕… ②李… ③陈… III. ①水敏性
地层 - 水平井 - 油气钻井 IV. ①TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 301292 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 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:16 开 印张:8.25

字数:197 千字 印数:1—1000 册

定价:68.00 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

序

盐下水平井是指盐底至靶点垂距较短,为满足后期开采所需的井眼条件,而必须在盐层段造斜的水平井。在盐膏层中造斜时引起的井下复杂情况或各种井下恶性事故,对钻井、完井工程危害甚大,这一直是为国内外石油工程界关注的问题。

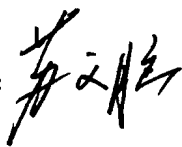
近年来,在塔里木油田原有超深复合盐层钻井技术和常规超深水平井钻井技术的基础上,作者及其团队对盐下水平井钻井技术开展了大量富有成效的研究工作和现场实践,取得了较大的进展。作者系统地阐述了弯曲井段井壁失稳特征、变曲率变方位井壁变形机理以及盐膏层钻井安全钻井液密度方法,建立了盐膏层弯曲段套管强度校核理论和基于虚拟接触点的管柱下入摩阻预测方法,开发了高密度重晶石加重的钻井液体系,形成了相应的盐下水平井钻井配套技术。

此书详细阐述了盐下水平井钻井技术,从理论到实践进行了系统总结,突出了成功的经验和先进的技术,并尽力使之系统化、理论化。书中也详尽地介绍了盐下水平井钻井技术的现状与发展趋势,系统地介绍了塔里木油田的成功经验,对指导国内外类似油气藏勘探开发具有重要的意义。

论述盐下水平井钻井技术的著作在我国可能尚属首次出版。我认为滕学清等同志编著的《盐下水平井钻井理论与配套技术》在理论和应用上都有其独到和创新之处,具有一定的学术和实用价值,该书对于从事研究或希望了解盐下水平井钻井理论和应用的读者们来说无疑是一本很好的参考书。我期望本书的出版能对盐下水平井钻井理论和技术的发展起到促进作用。

是为序。

中国工程院院士：



2012年9月10日

前 言

盐膏层是指含有以氯化钠为主或其他水溶性无机盐类如氯化钾、氯化镁、氯化钙、石膏及芒硝等成分的地层。世界上大部分油气藏分布于盐下构造,如墨西哥湾、巴西湾、西非海岸、北海、中东及中国塔里木、中原、四川、江汉等油田。盐下水平井是指盐底至靶点垂距较短(塔里木油田已钻井为2~36m),为满足后期开采所需井眼条件,必须在盐层段造斜的水平井。盐膏层造斜给钻井设计及施工带来了一系列技术难题,如轨迹设计、高刚度套管强度校核及下入、井壁稳定、钻井液设计,极易产生井下事故复杂情况,其危害性极大。近年来在塔里木油田原有超深复合盐层钻井技术和常规超深水平井钻井技术的基础上,钻井研究人员对盐下水平井钻井技术开展了大量富有成效的研究工作和现场实践,取得了较大的进展。针对目前国内外尚无系统的盐下水平井钻井技术方面的参考书与教材,作者结合多年的理论研究与现场实践经验,系统地总结出一套适用于盐下水平井钻井的理论与配套技术,旨在为盐下水平井钻井设计及施工提供指导,推动盐下水平井钻井技术的发展。

全书共分六章,第一章系统介绍了国内外盐膏层的构造、特征、危害性及钻井技术相关概况;第二章从盐下水平井造斜率选择的影响因素出发,分析了工具造斜能力、管柱的下入与密封等因素对造斜率的影响,结合地层实际情况阐明了盐下水平井轨道设计方法;第三章从盐膏层蠕变规律出发,建立了盐膏层造斜段套管坑外挤强度校核模型,形成盐膏层弯曲井段套管设计方法;第四章提出了基于虚拟接触点的管柱下入摩阻预测理论,从选择弯曲井段高刚度出发,分析了不同尺寸井眼套管下入能力,实现造斜段高刚度套管的安全下入;第五章系统研究了盐膏层造斜段井周应力分布特征,从瞬时弹性和蠕变角度研究井壁失稳规律,揭示了变曲率变方法盐膏层井眼变形机理,确定了盐膏层钻井安全钻井液密度方法;第六章重点介绍了高密度重晶石加重的钻井液技术。

本书在编写与出版过程中,得到了中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司、中国石油大学(北京)、中国石油大学(华东)和西南石油大学等单位的大力支持。金衍、卢运虎、王春生、周志世、艾正清、文志明、黄根炉、梁大川、张峰、杨沛和杜金龙等人为本书提供了大量的素材。本书由刘希圣教授审阅,并提出不少宝贵意见,在此深表感谢。

盐下水平井钻井技术近年来发展十分迅速,超深层高温、高压盐下水平井钻井技术仍需进一步开展理论研究和现场实践的工作,还需工程界同行继续发掘深层次的理论与更完善的配套技术。由于笔者水平有限,需要商榷和探讨的地方在所难免,希望读者多提宝贵意见,共同促进盐下水平井钻井理论和技术水平的提高。

作者

2012年4月7日于库尔勒

目 录

第1章 绪论	1
1.1 国外盐膏层钻井技术现状	1
1.2 塔里木盐膏层钻井技术现状	11
1.3 盐下水平井钻井难点	16
第2章 盐下水平井井眼轨道设计技术	18
2.1 盐下水平井轨道设计造斜率的确定	18
2.2 盐下水平井轨道设计及施工指导方案	21
第3章 盐层造斜段套管抗外挤强度校核技术	27
3.1 复合盐膏层段套管外挤力研究	27
3.2 套管抗挤强度影响因素分析	38
3.3 盐下水平井套管强度设计方法	47
第4章 高刚度套管下入技术	49
4.1 盐下水平井的特点分析及管柱下入分析模型的选择	49
4.2 盐下水平井管柱下入模拟分析模型	49
4.3 计算模型的求解方法	50
4.4 摩阻系数的反算	57
4.5 弯曲井段管柱下入摩阻的主要影响因素分析	59
4.6 山前和台盆区某区块套管下入模拟分析	62
4.7 大刚度通井钻柱与厚壁套管下入阻力对比分析	74
第5章 变曲率、变方位井壁稳定控制技术	77
5.1 钻井过程中井壁应力场变化特征	77
5.2 变曲率、变方位井眼井壁瞬时弹性失稳分析	79
5.3 变曲率、变方位井眼井壁蠕变失稳分析	88
第6章 水平井高密度重晶石加重钻井液技术	95
6.1 国内外高密度钻井液体系及现场使用情况	95
6.2 水平井高密度重晶石加重钻井液设计	98
6.3 水平井高密度重晶石加重钻井液体系优化及评价	109
6.4 现场应用情况	116
参考文献	120

第1章 绪 论

盐膏岩是指主要由盐岩、石膏岩、泥膏岩、膏泥岩组成,中间夹杂泥岩、粉砂岩、砂岩、泥质砂岩等的复合盐岩。根据矿物成分的不同,可将盐膏岩分成两种:第一种是纯盐,氯化钠含量占 90% 以上,岩性相对稳定,蠕变程度也相对较小;第二种是杂盐,即通常意义的复合盐岩,矿物成分较复杂,氯化钠含量相对较低,夹杂石膏、钙芒硝、光卤石、溢晶石以及各种硫酸盐、碳酸盐,矿物成分较复杂,岩性稳定性相对较差。富油气带的大中型油气田多发育于区域封闭盖层下面,巨厚泥岩、膏盐岩下部及高压层附近是富油气区带发育的有利分布层位。世界上盐构造分布范围广,广泛分布于北美、非洲、欧洲、东南亚、中东等地区,国内含盐盆地或盐系地层主要分布在塔里木、中原、江汉等地区,是当前国内外油气勘探的重点之一。全球经济的发展使得人们对能源的需求迅速增长,有效开发和利用盐下油气藏成为全球关注的热点。

1.1 国外盐膏层钻井技术现状

盐下油气藏分布于世界各大含油气盆地之中,墨西哥湾、威利斯顿盆地(美洲大陆中部)、北海、巴西、伊朗和西非的盐下油藏都是油气勘探和开发的重点区域,如图 1.1 所示。目前公开的数据显示,墨西哥湾盐层厚度大、埋藏深,常常需要钻穿厚度为 1500 ~ 2500m 的含盐层段才能到达 5000 ~ 10000m 深的含油气层,钻井面临挑战大;北海油田自 1965 年开始开发盐下油气藏,现已进入开发后期,相应钻井技术较为成熟;巴西近海盆地自 20 世纪 90 年代进入大规模开发阶段,油气藏埋深较浅(小于 6000m),钻井难点表现为水深较大(大于 1000m)和遭遇盐膏层。盐膏层易发生塑性流动,在构造应力作用下会侵入或覆盖其他沉积层,形成盐底辟或盐刺穿,给钻井带来巨大挑战;同时,钻井过程中易井眼缩径和挤毁套管,导致钻井过程中遇到各种复杂难题。

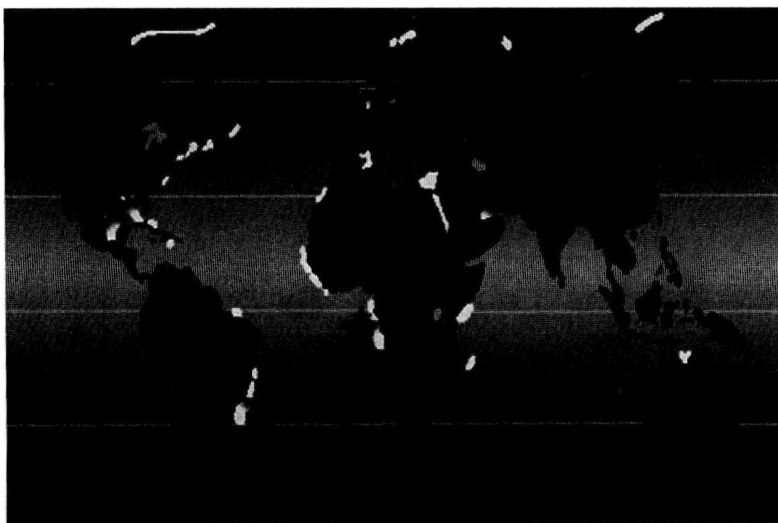


图 1.1 世界盐下油藏(白色区域)主要分布图

1.1.1 墨西哥湾

墨西哥湾 90% 以上的油气发现都位于盐下,见图 1.2 和表 1.1。墨西哥湾形成是由于晚三叠世—早侏罗世北美洲与南美洲—非洲联合大陆解体,地壳拉张产生裂谷,墨西哥湾盆地开始发育。中侏罗世墨西哥湾为半封闭海,从而沉积了厚逾千米的卢安盐层。自晚侏罗世开始海底扩张,进入了裂后沉积阶段。墨西哥湾盆地演化有两个周期:(1)裂陷期,从晚三叠世一直到中侏罗世;(2)裂后期,自晚侏罗世以后为长期热沉降期(图 1.3)。

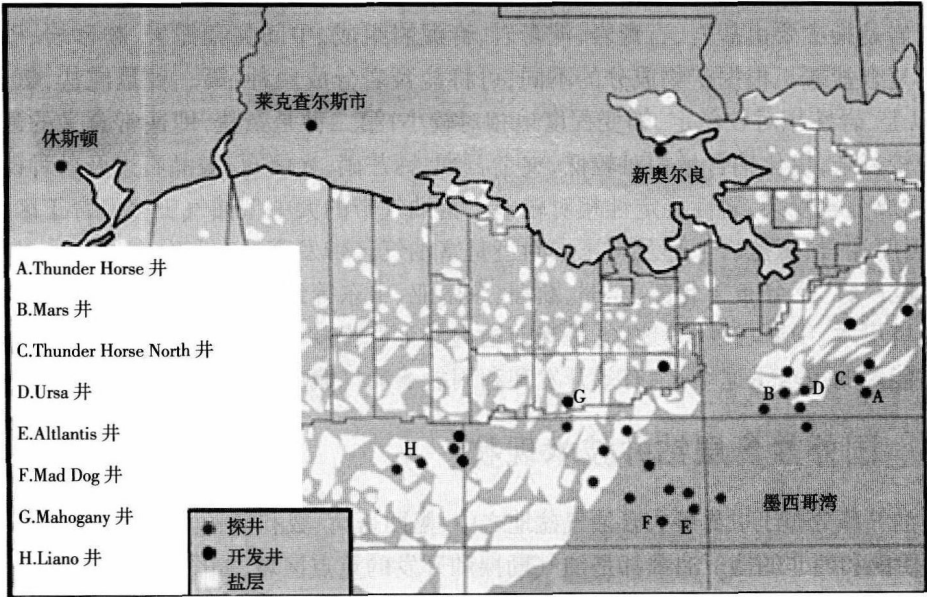


图 1.2 墨西哥湾盐层分布

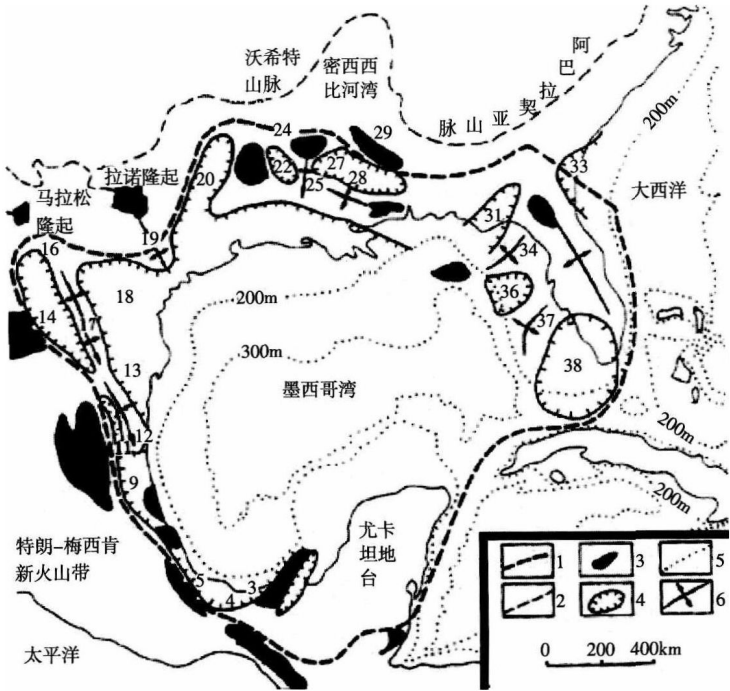


图 1.3 墨西哥湾和盐盆地构造略图

表 1.1 墨西哥湾盐下油气藏发展状况

地区	区块号	总深(m)	完钻时间	油田名称	备注
Ship Shoal	366	2500	1983 年	—	干井,目标层是直接油气显示(DHI)层。该井钻穿了盐层
South Marsh Island	200	4115	1986 年	—	干井,DHI 目标层证实为盐层,但在盐层下面钻遇了 1000ft(305m)的储层级含水砂岩层
密西西比峡谷	211	3890	1990 年	Mica	在盐下 5 个薄层中首次发现明显油气显示
Ship Shoal	349	5048	1993 年	Mahogany	先于 Mica 油田投入开发,成为墨西哥湾盐下远景区第一口进行商业开发的井
Garden Banks	128	5625	1994 年	Enchilada	发现盐接全体
Garden Banks	127	4490	1995 年	Chimichanga	第二商业盐下发现,钻穿盐层 1300ft (396m)。测试产量: 2100bbl/d (334m ³ /d) 油和 2000 × 10 ⁴ ft ³ /d (566337m ³ /d) 天然气
密西西比峡谷	292	5479	1995 年	Gemini	上新世—中新世时期的第三个商业发现
Green 峡谷	699	5951	1998 年	Atlantis	世界上最深的系泊浮式油气生产设施,也是最大的生产设施之一
Grand Isle	116	6584	1998 年	Hickory	穿过 8000ft(2438m)的盐层
Eugene Island	346	3607	1998 年	Tanzanite	墨西哥湾浅水区第一口测试井,日产油 1917bbl(305m ³),日产天然气 2970×10 ⁴ ft ³ (841100m ³),是该地区商产井之一
密西西比峡谷	778	7172	1999 年	Thunder Horse	墨西哥湾最大的油田
Garden Banks	783	5141	1999 年	Magnolia	安装的张力腿平台(TLP)创造了张力腿平台安装水深纪录
Green 峡谷	562	7810	1999 年	K2	钻穿了 10000ft(3048m)的中新世褶皱趋势盐篷
Green 峡谷	782	6957	2001 年	Mad Dog	在密西西比扇形褶皱带发现了净厚为 300ft(91m)的产层
Garden Banks	877	7163	2001 年	Redhawk	世界上第一个采用桁架式 SPAR 平台生产的油田
Green 峡谷	640	8170	2002 年	Tahiti	在 11000ft(3353m)深的盐篷下面发现了中中新世圈闭
Walker 海脊	678	8859	2003 年	St. Malo	威尔科克斯趋势上钻的第一口盐下井,钻穿 Sigsbee 盐篷 10000ft(3048m),发现产层净厚达 450ft(137m)
Walker 海脊	759	8588	2004 年	Jack	威尔科克斯试井是墨西哥湾深水区最深的长时间钻杆测试井
Keathley 峡谷	292	9906	2006 年	Kaskida	第一口特别定位在 Sigsbee 陡坡上的威尔科克斯盐下探井,位于威尔科克斯远景区北边界地区,发现了净厚达 800ft(244m)的产层
Green 峡谷	726	7827	2007 年	West Tonga	在三个中新世砂岩层发现了净厚为 350ft(107m)的油层
Keathley 峡谷	102	10685	2009 年	Tiber	目前世界最深的油井

从理论上讲,墨西哥湾目前所钻遇盐层发源于 Louann 盐体,沉积于侏罗纪。随着时间的推移,形成了现在典型的岩盐构造,其中包括推覆体、盐丘、盐席以及冠层等。目前认为,墨西哥湾地区所钻遇的盐体是从其他地方运移而来的。有充分的证据显示,岩盐侵入任一个区域,实际上都是由许多不同的小盐体汇集起来而形成的,如图 1.4 所示。

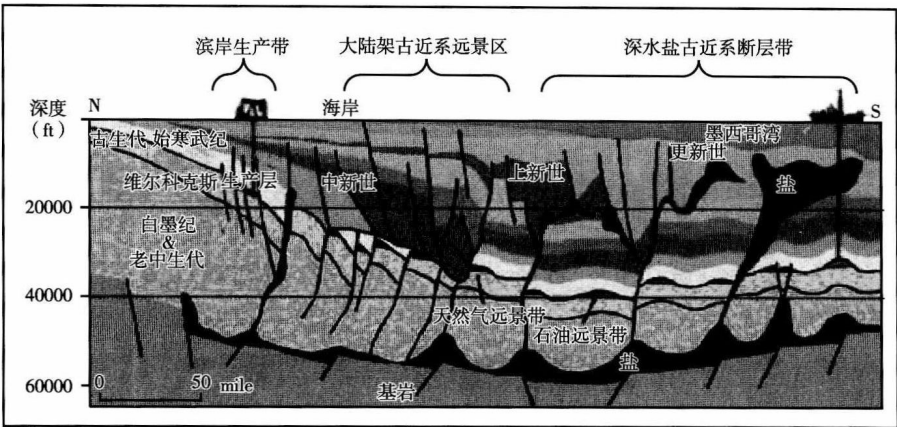


图 1.4 墨西哥湾近海到深海的地层构造剖面

墨西哥湾盐层地质构造复杂,盐层厚度为 1000 ~ 4500m,深度分布不等,其范围为 2000 ~ 8000m,地层压力高达 180MPa,温度 200℃。墨西哥湾盐层具有低蠕变、高纯度的特点,有些 NaCl 的纯度高达 97% (表 1.2)。作为一种被钻物质,泊松比为 0.25 ~ 0.5,密度 2.0 ~ 2.1g/cm³,岩盐单轴抗压强度相对较低,为 20 ~ 24MPa (Wilson 和 Fredrich,2005)。

表 1.2 墨西哥湾盐岩地层矿物组分分析

试样位置	Redman 盐层		Green 峡谷盐层		密西西比峡谷盐层	
试样深度(m)	3054.13	4078.27	2889.23	4437.94	3419.90	4306.88
盐(%)	96	99.9	95.6	98.4	97.1	99.4
无水石膏(%)	1.7	0	4.4	1.6	2.8	0.5
钾盐(%)	0	0	0	0	0	0
白云岩(%)	0.2	0	0	0	0	0
石英(%)	1.1	0.1	0	0	0.1	0.1
含水石膏(%)	0.1	0	0	0	0	0
伊利石(%)	0.4	0	0	0	0	0
赤铁矿(%)	0.1	0	0	0	0	0
方解石(%)	0.2	0	0	0	0	0
斜长石(%)	0.2	0	0	0	0	0
合计(%)	100	100	100	100	100	100

随着墨西哥湾地区开发程度的不断加大,所钻遇的地层越来越复杂,在盐下地层所遇到的钻井难题(图 1.5)如下:

- (1) 由于盐岩的蠕变,钻井过程中常发生卡钻,钻柱、套管遇阻等问题;
- (2) 在泥页岩沉积层附近,若有盐岩诱导,会产生剪切应力,导致泥页岩发生变形、脆性破坏,甚

至产生裂缝,造成在此层段钻井液密度窗口减小,因而常出现漏失、井涌和井壁失稳等问题;

(3) 采用油基或合成基和超饱和抑制盐水钻井液,从而增加了卡钻的频率;

(4) 在复合盐膏层钻进时,石膏层硬度过大,扩孔器的切削齿崩落,有时造成 PDC 钻头的牙齿崩落。

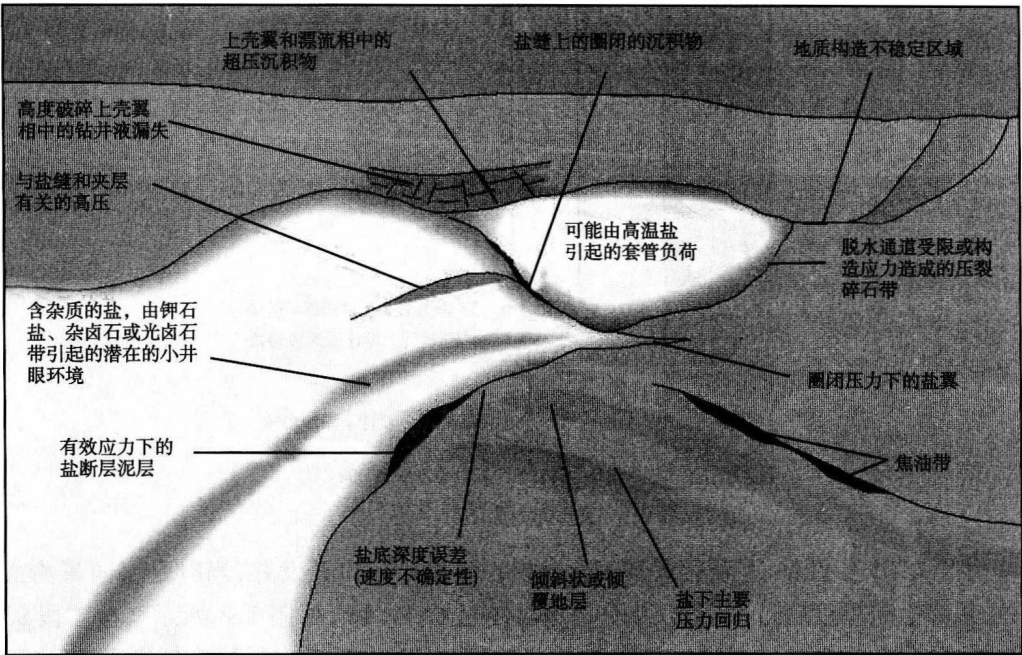


图 1.5 钻进盐层时遇到的问题总结

1999 年早期,德士古石油公司(Texaco)在墨西哥湾 Walker Ridge 地区钻了 Loyal 井和 Cat-houla 井。Loyal 井位于水深 2042.2m 处,垂深 8229.6m,盐层厚度 3657.6m,在盐层顶部下入 21in 导向套管,然后在盐层中上部下入 16in 表层尾管,最后将 11 $\frac{7}{8}$ in 技术套管下至盐下封隔盐岩和沉积层之间的界面。由于钻井液密度较大,在即将钻出盐层时出现过一次严重的井漏,调整钻井液密度后顺利钻完盐层(图 1.6)。

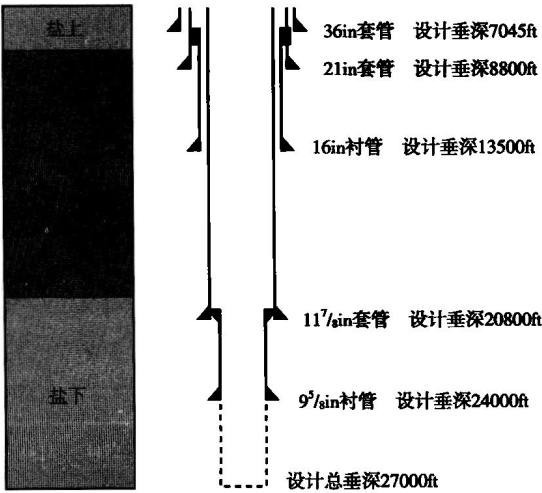


图 1.6 Loyal 井井身结构图

Catahoula 井位于水深 1676.4m 处,垂深 7924.8m,盐层厚度 3352.8m,在盐层顶部下入 20in 导向套管,然后将 13 $\frac{5}{8}$ in 技术套管下入盐层,最后接 11 $\frac{7}{8}$ in 技术套管。用 1.32g/cm³ 的钻井液钻至井深 4998.7m 处时,井眼开始缩径。提高钻井液密度至 1.37g/cm³,缩径现象消除,下入 1.15lb/mm × 13 $\frac{5}{8}$ in 技术套管并在盐层固井,无任何事故发生(图 1.7)。

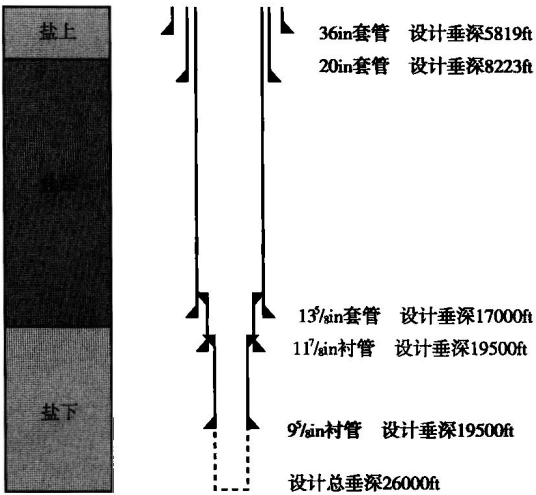


图 1.7 Catahoula 井井身结构图

#1 井于 2005 年开钻,是墨西哥湾 Green 峡谷区块第一口开发井,当时是墨西哥湾最深的一口井,钻穿盐层厚度超过 4572m,总垂直深度超过 8534.4m,如图 1.8 所示。盐层段 93% 的矿物是盐岩,只有极少量的钾盐。盐层在下入套管 3 个月之后就在盐层底部发生套管挤毁,最后开窗侧钻至 10421m。该井盐层用的是 107.1kg/m 的钢级 HCQ125 的 13 $\frac{5}{8}$ in 套管,在较深的盐层段有好几个黏卡点。采用 1.56g/cm³ 的钻井液密度进行模拟分析,结果表明,在非均匀地应力条件下,钢级 HCQ125 的 13 $\frac{5}{8}$ in 套管濒临屈服,采用 131.25kg/m 的钢级 HCQ125 的 13 $\frac{5}{8}$ in 套管可满足要求。

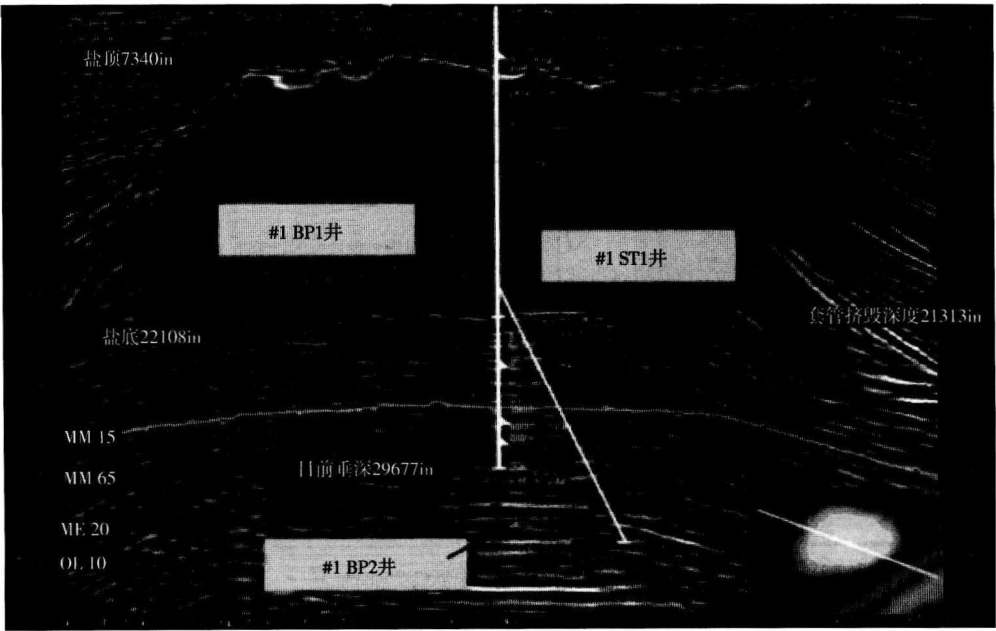


图 1.8 #1 油井勘探地质剖面图

1.1.2 北海

北海盆地为加里东—海西期基底的新地台上发育的台向斜盆地(中欧克拉通内的一个大陆型裂谷盆地)。北海地区盐构造异常发育(图 1.9),是与油气关系密切并且研究程度较高的地区,该区沉积晚二叠系岩层达 2000 ~ 3000m 厚,在盆地边缘变薄尖灭,受后期盐构造作用造成盐体厚度变化大。烃源岩为侏罗系、下白垩系及二叠系煤系地层,主要储层为上白垩系白垩层与古近系的砂岩,发育有断块圈闭、盐上背斜、断背斜等圈闭与油气藏。

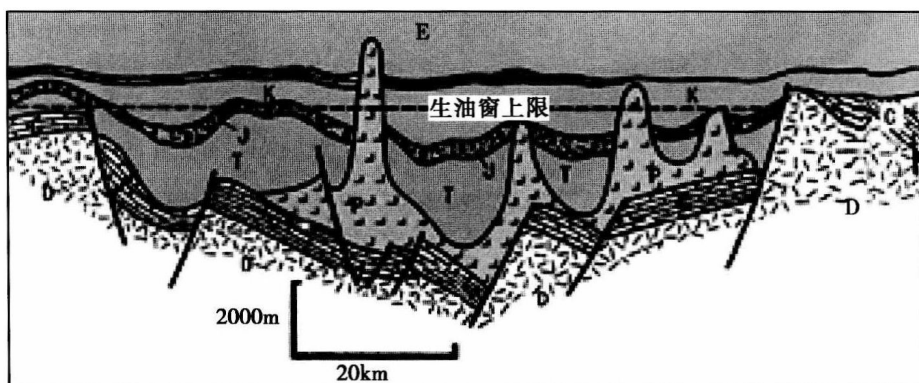


图 1.9 过北海中央地堑的结构剖面(高岗,2010)

北海地区 1965 年开始开发盐下油藏,目前已进入开发晚期,泽希斯坦统(Zechstein)是北海南部油气藏的主要盐层盖层,同时是北海中部 Auk 油田的储层。泽希斯坦统盐层从英国延伸至波兰北部,为 500 万 ~ 700 万年前二叠纪泽希斯坦统海岸盆地沉积,包含 5 个主要蒸发盐层层序(Z1—Z5),对于整个北海油气田形成与开发有很大的影响。在北海北部,泽希斯坦统盐层以底劈盐丘形式存在(图 1.10 和图 1.11),形成了包括 Machar 在内的许多油田的构造。

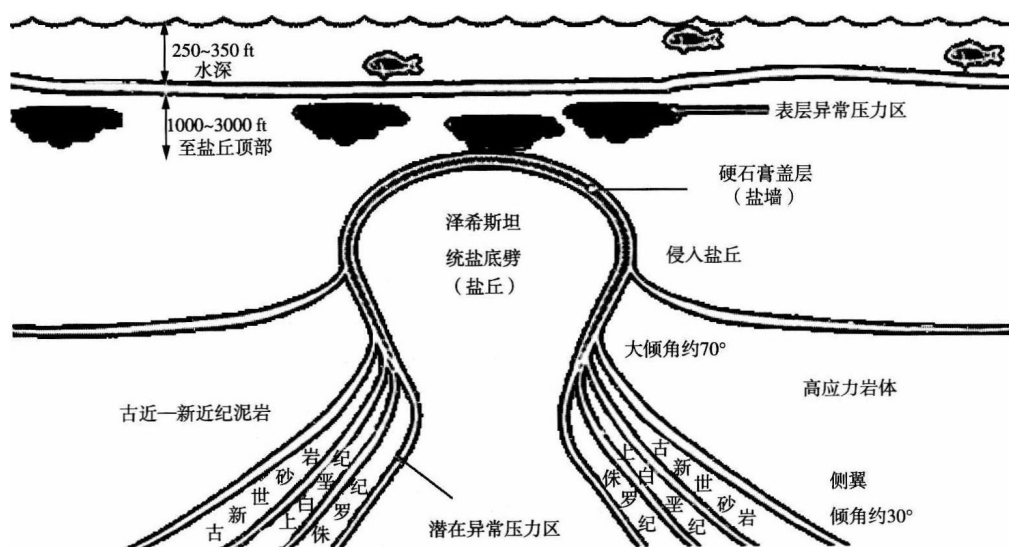


图 1.10 北海典型盐丘剖面图

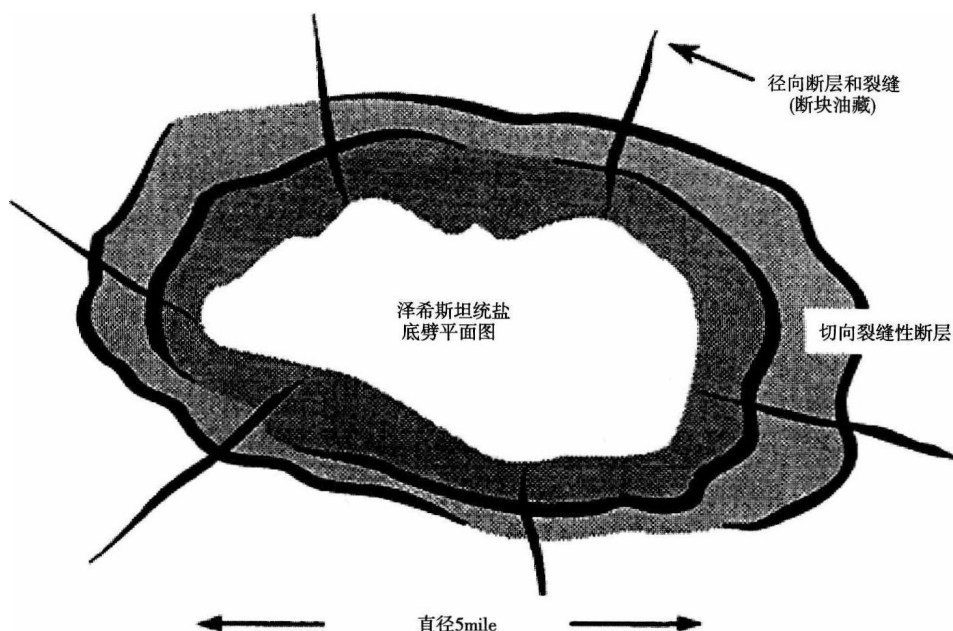


图 1.11 北海典型盐丘平面图

泽希斯坦盐层各分层的盐岩成分不同,同时盐层中夹有光卤石夹层,易污染入井工作流体;同时,盐层中发育有裂缝性白云岩,盐间经常有高压盐水层发育,易发生溢流和井漏;盐层溶解于钻井液,产生井眼扩大问题,给完井作业提出挑战。

自 1970 年以来,Ranger 石油公司以尽量远离盐层为设计基础在北海 23/27 区块完成了一系列井的钻进。但是,北海地区非盐下油藏无法保证所采油气的商业储量和产量。图 1.12 为 1991 年 5 月到 1992 年 4 月 Ranger 石油公司在北海 Central Graben 区 5 口盐丘附近钻井数据统计图。有两口井为针对盐侵构造的评价井:一口位于 23/27 区块,另一口介于 29/2a 区块和 22/27a 区块之间。这些干井的钻进时间无一例外地超过预计时间。由于井眼的不稳定,导致了两次由地质情况引起的侧钻以及三次钻井事故造成的侧钻。钻遇盐丘时井壁失稳、漏失以及套管损坏是遇到最多的问题。另外,现场取心和测井作业也有较大的困难。

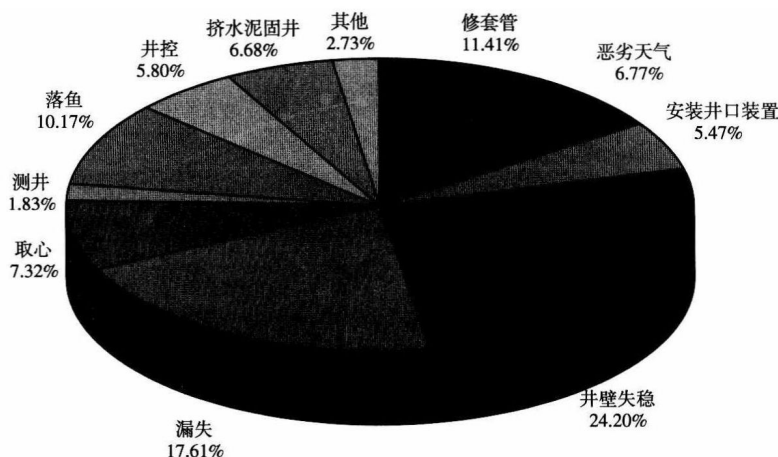


图 1.12 1991 年 5 月到 1992 年 4 月 5 口井钻盐层时遇到的问题(数据来自 SPE26693)

Mittelplate 油田位于北海地区南部,钻井只在人工海岛上进行,是德国最大的油气生产地。该油田中心距离 Dieksand 井场 8km,坐落在 Schleswig - Holstein 海岸。由于环境保护的需要,该油田需要在陆地上进行超长水平井作业。Dieksand 1 井(图 1.13)是 Mittelplate 油田第一口超长水平井,钻 Dieksand 1 井是为了勘探盐丘(盐底辟)东翼的地质储量以及评估盐岩钻井。Dieksand 1 井于 1996 年开钻,总共用了 159d,井身长度达到 7727m,水平段 6938m,垂深 2019m,在盐层中钻过 3000 ~ 4000m 的距离,使用油基钻井液钻井,井斜角达到 82°。该井盐层位于二叠系,为盐岩和粉砂质泥岩的混合物。在 1997 年,采用同样的方案钻了 Dieksand 2 井,如图 1.14 所示。在整个钻井过程中,无任何套管损坏事故发生。

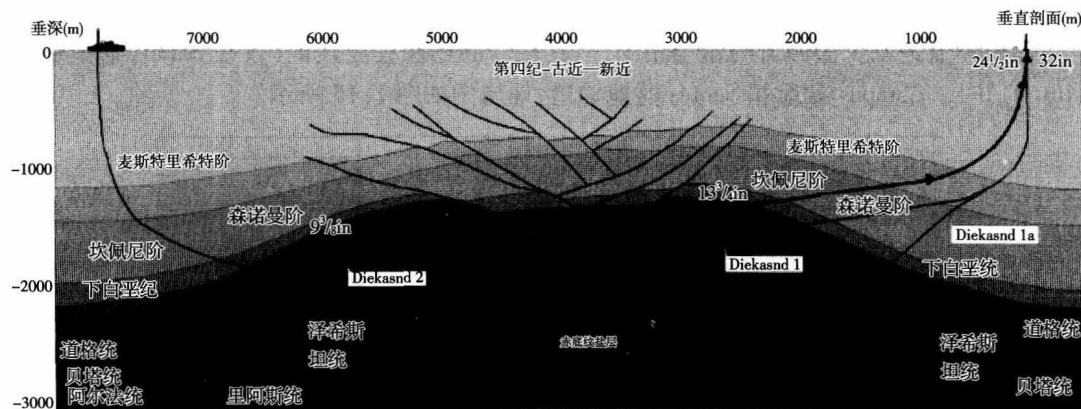


图 1.13 Dieksand 地区地质剖面图以及 Dieksand 1 井和 Dieksand 2 井

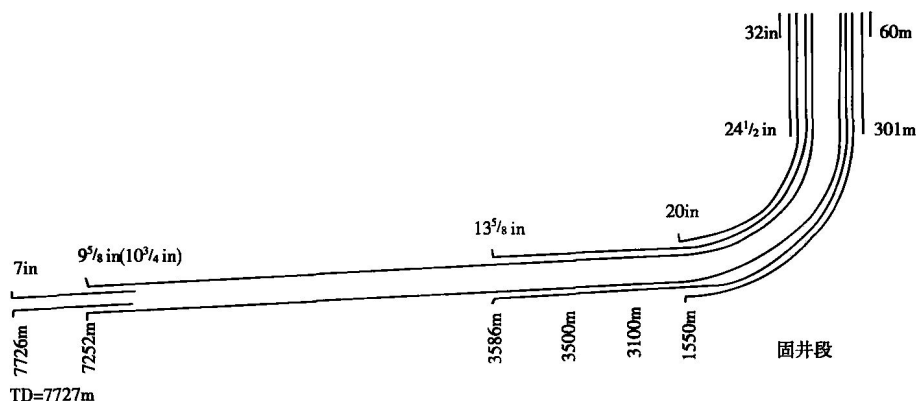


图 1.14 Dieksand 2#套管设计简图

1.1.3 巴西近海

巴西海上石油开发始于 Reconcavo 盆地,深海区域油气储量巨大,约为 310×10^8 bbl 原油当量,沿 Santa Catarina 州到 Espirito Santo 州的海岸线,在长 800km、宽 200km 的狭长地带分布着 Santos 盆地和 Campos 盆地等油气盆地,占了巴西所发现的油藏数量的 85%。

Campos 盆地和 Santos 盆地为典型的衰亡型被动大陆边缘深水盆地,在大地构造背景上位于南大西洋裂谷系东支的北端(称为东巴西裂谷系)。和其他被动大陆边缘深水盆地一样,在构造演化过程中,经历了以下几个阶段:在晚三叠世—早侏罗世(220 ~ 200Ma),裂谷系在南非南部大陆末端开始发育,而后在中侏罗世(约 170Ma)期间沿着阿根廷北部边缘推进。在晚侏

罗世一早白垩世(约 140Ma),裂谷系延伸到巴西东南部边缘,直达弗洛里亚诺波利斯断裂带。

Campos 盆地位于巴西里约热内卢州海域,盆地总面积 $17.52 \times 10^4 \text{ km}^2$,只有 3% 位于陆地,为巴西主要的油气聚集区和主要生产区。近 10 年来,陆续发现了 Marlim 油田、Albacora 油田和 Roneador 油田等特大型油田。截至 2003 年,探明原油储量约 $135.59 \times 10^8 \text{ bbl}$,天然气 $266 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。巴西石油日产量的 80% ($200 \times 10^4 \text{ gal}$) 产于此盆地,盆地中的 Marlim 油田是迄今为止发现的最大的海上油田。

Santos 盆地位于巴西东南部海域,具有很高的油气资源前景。该区域水深约 2140m,储层深度约为 6000m。盐层厚度约 2000m,含有盐岩、光卤石等易蠕变的成分。近年来陆续在 Santos 盆地发现了 1-RJS-582 和 1-SPS-35 等特大型油气田,虽然其发现的油气田的规模无法与 Campos 盆地以及墨西哥湾盆地相比,但其现今的勘探程度较低(仅在 Santos 盆地钻探了约 100 口井)。Campos 盆地和 Santos 盆地构造、地层图如图 1.15 所示。

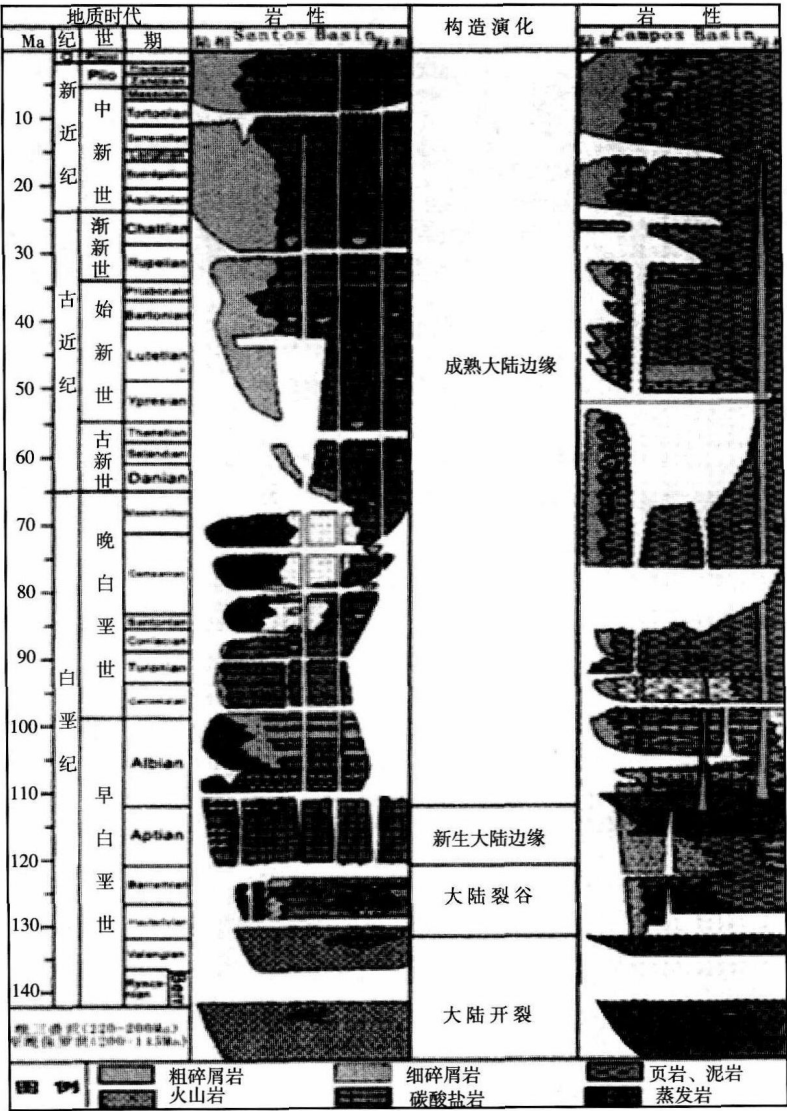


图 1.15 Campos 盆地和 Santos 盆地构造、地层图

巴西海域盐下储层是由碳酸盐岩构成的,目前盐下储层的勘探开发还处于初级阶段。油藏埋深达到盐下 2000m 后,盐下区块呈现为多储层情况,为复杂的非均质性多层碳酸盐岩。这也为盐下油藏的勘探开发提出了挑战。该地区钻速极低,盐岩中的井眼偏斜也给井斜控制造成了很大困难。与流体运动相关的石蜡沉积、水合物结晶以及结垢也是一个挑战。另外盐下沉积中含有大量的 CO_2 和 H_2S ,有很强的腐蚀性,这给钻完井过程中的固井水泥及钻具提出了特殊的要求。巴西近海为高温高压井,井底温度高达 150°C ,井底压力超过 68.9MPa (压力梯度 $1.79\text{MPa}/100\text{m}$)。

在 1985 年,巴西钻进了 22 口盐层厚度超过 10m 的井,其中有 11 口井发生坍塌,1 口井套管挤毁,3 口井侧钻,3 口井严重漏失。在 1989 年,钻进了一段硬石膏/石盐层段的井,在钻前进行了精密的设计,包括使用油包水乳化液钻井液、双心钻头,依然出现了 8 次卡钻,导致多次落鱼事故,并且进行了 1 次侧钻。在 1998 年,钻进了 120m 厚的盐岩地层,发生了多次扩眼和卡钻事故,井径测量显示,缩径率为 $0.05\text{in}/\text{h}$ 。这些钻井实例都说明此区块在盐层钻进的困难是很大的。

1.2 塔里木盐膏层钻井技术现状

1.2.1 盐膏层分布特征

塔里木盆地盐膏层分布范围广泛,主要分布在古近—新近系,石炭系和寒武系地层,分属潟湖陆相沉积和滨海相沉积。石炭系盐膏层主要分布在塔北隆起和塔东北的满加尔凹陷的北部,具有分布范围广、埋藏深的特点,埋藏深度在 5000m 以上,厚度 80 ~ 190m,以纯盐岩为主,夹有不等厚的泥岩及膏岩夹层。各区块盐膏层厚度差别较大,其中沙 10 井区最厚,为蒸发台地相沉积中心带,其次是塔河 1 井区。寒武系盐层分布于巴楚隆起、台盆区某和塔中等地区,它们都是碳酸盐盆地内彼此分割的潟湖相沉积,埋深 3800 ~ 7010m,厚度 130 ~ 700m。寒武系盐层在和 4 井、方 1 井和康 2 井钻遇,岩性为灰白色盐岩与棕红色泥岩、褐灰色泥岩、灰白色膏岩不等厚分布,属中寒武系统,复合盐层中石膏的含量丰富。古近—新近系盐膏层分布在库车坳陷及塔北隆起西北部,埋深 1230 ~ 7948m,复合盐层厚度一般为 1200m,最厚达 4137m,属盐层、膏岩和软泥岩等组成的复合盐层。例如,西秋 2 井 4364 ~ 6403m(未穿)膏盐层厚度达 2039m;克拉 4 井 2447m 进入膏盐岩层,钻厚 3910m,比设计增厚 1630m;克深 5 井 2667m 出现大段纯盐层后,盐膏层至 6703m,厚度 4036m;克深 1 井盐膏层段 3990 ~ 6759m,盐膏层厚度 2769m;克深 7 井盐膏层埋深达 7843m。

虽然塔里木盆地的盐膏层主要分布在古近—新近系、石炭系和寒武系地层,但是古近—新近系复合盐层最复杂,在区域构造挤压作用下,盐层作为滑脱层,盐上地层变形,形成滑脱褶皱或断层滑脱褶皱;盐下地层以侏罗系煤系地层为滑脱面,发生逆冲推覆,形成叠瓦式冲断片或双重构造,导致坳陷内断裂复杂,岩性、压力、层位和深度变化大。它具有如下特征:

(1) 广泛分布、厚度分布不均。

图 1.16 为库车坳陷膏盐岩层平面分布图,可以看到,库车坳陷古近—新近系膏盐岩层的特点是广泛分布、厚度分布不均,1 区域盐层厚度小于 300m,3 区域的盐层厚度则超过 1000m。