



主 编 陈建兵

副主编 刘正礼 黄小龙 杨 进

马认琦 叶吉华 罗俊丰

# 深水探井 钻井工程 设计方法

The Design Method of  
Deepwater Exploration Wells

石油工业出版社



# 深水探井钻井工程设计方法

主 编:陈建兵

副主编:刘正礼 黄小龙 杨 进 马认琦 叶吉华 罗俊丰



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了海洋深水探井钻井工程设计的主要内容,以及进行钻井设计时应用的主要理论和方法。从钻井装置选择、水下井口选型等方面论述了深水钻井装备的主要特点;从深水环境条件及浅层地质灾害分析入手论述了深水钻井面临的主要风险及防治措施;从井身结构及套管设计、井下工具设计、钻柱设计、定向井设计、钻井液设计、固井设计、井控设计等方面介绍了深水钻井工程设计的要点;本书还详细介绍了深水钻井作业程序,以及钻井质量和安全控制方面的内容。

本书可作为海上钻完井技术人员、海洋工程科技人员进行深水钻井工程设计和现场施工的参考用书,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

深水探井钻井工程设计方法/陈建兵主编.

北京:石油工业出版社,2014.4

ISBN 978-7-5021-9867-1

I. 深…

II. 陈…

III. ①海上平台-探井-研究 ②海上钻井-研究

IV. ①TE2 ②TE52

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第263627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

---

2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.25

字数:312千字

---

定价:58.00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

鉴于石油资源特别是陆上资源的日渐枯竭,深水无疑将是未来全球石油战略接替的重点之一。随着科学技术的进步,海洋石油勘探开发已从常规水深(小于 500m)向深水(500 ~ 1500m)和超深水(大于 1500m)发展,深水油气田的勘探开发正在成为世界石油工业的主要增长点和世界科技创新的前沿,并逐渐形成了投资高、风险大、高新技术密集的能源工业新领域。

钻井工程设计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,是搞好单井预算和决算的依据。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,很大程度上依靠钻井设计水平的提高。

深水钻井作业恶劣的海况、海底的低温环境、浅层破裂压力梯度和地层孔隙压力梯度之间的窄窗口、气体水合物的危害、疏松不稳定的浅地层等给深水钻井装置的选择、水下井口的选型、表层钻进、钻井液设计、固井设计等带来了一系列的挑战。编者基于以上问题,围绕深水探井钻井工程设计的内容,撰写了本书。书中对深水探井钻井工程设计的方法进行了介绍,为深水探井钻井工程设计提供了理论基础,对钻井工程设计人员具有很好的指导作用和意义。

在本书编写过程中,中国海洋石油总公司工程技术部姜伟、张春阳、周俊昌等同志提供了技术指导,中海油研究总院周建良、刘书杰、王平双、何保生、吴怡等同志提供了大量的技术资料和指导,中海石油(中国)有限公司深圳分公司提供了大量的现场资料,在此表示衷心感谢。在本书的编写过程中得到了中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司的吴占民、严德、田瑞瑞和中国石油大学(北京)的周波、许云锦、仝刚等同志的大力帮助,在此表示感谢。

由于当今钻完井技术发展较快,加之编者的水平有限,本书难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

第一章 概述 .....	(1)
第一节 深水钻井特点 .....	(1)
第二节 深水钻井关键技术 .....	(4)
第三节 钻井设计前期准备 .....	(7)
第二章 钻井装备选择及能力评估 .....	(9)
第一节 钻井装备介绍 .....	(9)
第二节 钻井装备的选择 .....	(13)
第三章 浅层地质灾害预防 .....	(23)
第一节 井场及其海洋环境调查 .....	(23)
第二节 浅层地质灾害形成机理分析 .....	(24)
第三节 浅层地质灾害危险区预测方法 .....	(31)
第四节 浅层地质灾害防治措施 .....	(37)
第四章 水下井口选型 .....	(44)
第一节 典型水下井口装置介绍 .....	(44)
第二节 导管载荷理论 .....	(47)
第三节 基于 HYSY981 平台的水下井口选型分析 .....	(50)
第五章 井身结构及套管设计 .....	(58)
第一节 井身结构设计 .....	(58)
第二节 套管规范 .....	(64)
第三节 套管强度设计 .....	(68)
第六章 钻头选型与钻柱设计 .....	(80)
第一节 钻头选型方法 .....	(80)
第二节 钻具组合设计 .....	(83)
第三节 钻柱摩阻扭矩分析 .....	(89)
第四节 水力参数设计 .....	(94)
第七章 定向井设计 .....	(103)
第一节 定向井参数和轨迹计算 .....	(103)
第二节 定向井轨迹设计 .....	(106)
第三节 轨迹控制技术 .....	(110)
第八章 钻井液设计 .....	(117)
第一节 深水钻井液体体系 .....	(117)

第二节	深水钻井液中的水合物抑制 .....	(120)
第三节	选择钻井液体系的原则和方法 .....	(121)
第四节	钻井液计算公式 .....	(124)
<b>第九章</b>	<b>固井设计 .....</b>	<b>(130)</b>
第一节	深水固井水泥浆体系 .....	(130)
第二节	注水泥工艺 .....	(134)
<b>第十章</b>	<b>地质资料录取设计 .....</b>	<b>(137)</b>
第一节	取心设计 .....	(137)
第二节	录井与测井 .....	(145)
第三节	测试设计 .....	(148)
<b>第十一章</b>	<b>井控设计 .....</b>	<b>(150)</b>
第一节	深水井控的特点和难点 .....	(150)
第二节	井涌余量设计 .....	(151)
第三节	试压要求 .....	(152)
第四节	压井方法和程序 .....	(153)
第五节	水合物预防与防治 .....	(156)
<b>第十二章</b>	<b>钻井作业程序 .....</b>	<b>(158)</b>
第一节	钻前准备 .....	(158)
第二节	无隔水管表层钻进 .....	(159)
第三节	下防喷器组和隔水管作业 .....	(163)
第四节	钻进作业程序 .....	(164)
第五节	测试前准备 .....	(168)
第六节	弃井作业程序 .....	(169)
<b>第十三章</b>	<b>其他设计内容 .....</b>	<b>(171)</b>
第一节	施工进度计划 .....	(171)
第二节	钻井作业费用估算 .....	(173)
第三节	钻井作业材料计划 .....	(173)
第四节	钻井工程质量标准及控制 .....	(176)
第五节	健康安全环保计划 .....	(178)
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(181)</b>
<b>附录</b>	<b>深水探井钻井设计提纲 .....</b>	<b>(183)</b>

# 第一章 概 述

随着海洋勘探和开发工程技术的不断进步,深水的概念和范围不断扩大。现在一般认为水深大于 500m 为深水,大于 1500m 则为超深水。近年来,深水被认为是世界石油作业的热点区域(墨西哥,巴西,北海以及西非等),国外深水钻井已经逐步成为一种成熟的技术。深水钻井作业风险高,成本高,技术难度大,对设备和人员的要求高,目前有能力进行深海钻井作业的主要是几家大的国际石油公司。当前,世界最大钻井作业水深超过了 3000m,钻井装备钻深能力达 11000m。世界范围内,在不断地研发新的深水钻井设备与工艺技术。中国海油已建造完成 3000m 水深钻井装置,并开展深水钻井技术研究,但与国外相比,我国深水钻井技术仍有差距,缺乏自主深水钻井关键技术,引进中存在技术壁垒。认识深水钻井作业的特点,学习他人深水钻井关键技术,对于深水探井钻井工程的设计尤为重要。

## 第一节 深水钻井特点

### 一、深水环境因素

深水环境因素包括水深、海底低温以及风、浪、流等。

#### 1. 水深

随着水深增加,要求隔水管更长、钻井液容积更大且设备的压力等级更高,隔水管、水下防喷器组和其他管材等的质量均有大幅度增加,为了满足钻井施工的要求,必须具有足够的甲板负荷和甲板空间以便存放所有的隔水管、钻杆、套管以及其他散料。另外,水深增加,加之深水恶劣的作业环境,导致起下隔水管、套管和钻杆等钻井非作业时间增加,对设备的可靠性要求苛刻。选择深水钻井装置、设备和技术时都要针对水深进行单独校核。

#### 2. 低温

随着水深的增加,海水温度会降低,海底低温,井底又可能高温,给钻井作业带来很多问题。如在低温环境下,钻井液的黏度和切力大幅度上升,会出现显著的胶凝现象,而且低温环境增加形成天然气水合物的可能性。在钻井液设计、固井水泥浆设计以及测试设计中都要考虑海水温度的影响,特别是海底的低温环境和沿程海水的冷却作用。

#### 3. 风、浪、流等

风、浪、流等海洋环境条件对钻井装置的选择以及钻井作业有重要影响,特别是对钻井装置定位系统和隔水管、井口等水下系统。需要根据作业区域的风、浪、流等条件对选择的钻井装置和设备进行校核,针对具体的风、浪、流条件进行隔水管设计和锚泊设计或动力定位设计,并进行系统整体分析评价。

飓风(台风)或热带风暴等因素的影响,应在设计阶段纳入应急计划考虑。对于我国南海而言,内波流和季风气候的影响也应在钻井设计中考虑,要选择合适的作业环境窗口或采取特殊的控制措施和应急程序。

## 二、深水地质特点

海洋深水区域的不稳定海床和浅层疏松地层、浅层水流、天然气水合物以及地层破裂压力梯度低等是影响钻井作业的主要因素。

### 1. 不稳定海床和浅层疏松地层

越过大陆架后,在大陆坡处水深陡然增加,海床的不稳定性和大的坡度都促使海底极易形成滑坡和泥石流,滑坡快速沉积形成厚而松软、高含水且未胶结的地层。疏松海床会给深水钻井作业造成困难,特别是对导管和 underwater 井口系统的设计与施工影响较大。

### 2. 浅层水流

浅层水流主要是由于地层快速沉积造成的,在河流相沉积的地区更为普遍。目前已经确认发生浅层水流的机理有以下 4 种:

- (1)人为储集。人为引起的地层能量聚集。
- (2)人为裂缝。人为引起的地层破裂。
- (3)高压砂体。异常压力砂体。
- (4)窜槽传递。由固井或其他高压施工作业窜槽引起的异常压力。

在表层钻井中,浅层水流是最具破坏力的浅层地质灾害之一。由于表层钻进使用的钻井液密度有限,当钻遇高压含水砂层时,如果不能平衡高压含水砂层的压力,就会引发一系列的钻井质量问题,如防喷器下沉、表层套管下沉、固井质量差、地下井漏等,甚至造成井的报废。

浅层水流的识别与评价主要是利用产生浅层水流的砂体的物性和形成特征,钻前应对高压水砂体存在的可能性进行调查和评估。评估方法包括:地震反演研究、海底调查项目分析与实施反演研究和邻井测井信息反演研究等。

### 3. 天然气水合物

天然气水合物是由天然气中小分子气体(如甲烷、乙烷等)在一定的温度、压力条件下和水作用生成的笼形结构的冰状晶体。通常在低温( $0 \sim 10^{\circ}\text{C}$ )、高压( $> 10\text{MPa}$ )、存在自由水和

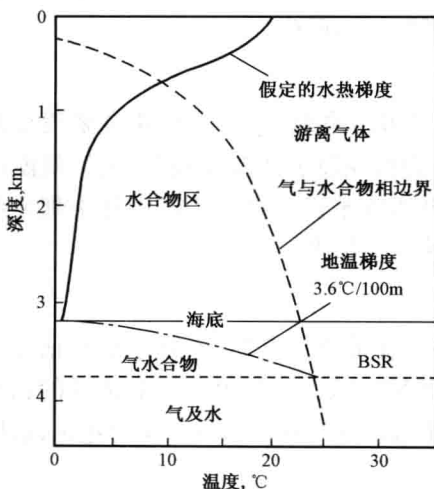


图 1-1-1 典型天然气水合物稳定区域示意图

天然气的条件下,就很容易形成天然气水合物。图 1-1-1 给出了与温度梯度有关的天然气水合物稳定区域图示例,该稳定区由海区水热梯度(即海水温度梯度)、气与水合物相边界以及地温梯度共同确定,在不同的海域天然气水合物稳定区域会有所不同,为确保作业安全,对超过 1000m 水深的区域初探井进行专题研究,以保障知晓较清晰的气水合物相边界状况,有利于编制正确的工程设计。

在深水钻井中,天然气水合物是最主要的浅层灾害之一,主要来源于两方面:一方面是在地层中已经形成的天然气水合物;另一方面是钻井过程中,装备或井筒内新形成的天然气水合物。

在钻遇天然气水合物地层时,由于外界环境的变化,势必会造成水合物的分解。天然气水合物的分解会对钻井作业安全、井身质量和钻井设备造成严重危



害。天然气水合物分解后产生的气体进入钻井液,与钻井液一起循环,使得钻井液密度和井底静水压力降低,从而加速了天然气水合物的分解和井内压力状况的恶化,导致井径扩大、井喷、井塌和海床沉降等事故。

在深水钻井中,井筒中的温度和压力符合形成天然气水合物的条件,天然气水合物的形成会导致钻井液失水,影响其性能,也会堵塞钻井液循环通道或钻井系统的其他管路,如堵塞防喷器管汇,导致隔水管下部总成与防喷器脱离困难等。

深水浅地层中的天然气在不满足天然气水合物形成条件时,就会以气体形式存在,则会存在浅层气风险,工程设计时应予以重视。

天然气水合物的识别可以通过海床沉积物取样、钻探取样和深潜调查等直接方式,也可以通过拟海底反射层(BSR)、速度和振幅异常结构、地球化学异常、多波速测深及海底电视摄像等间接方式。天然气水合物存在的主要地震标识有拟海底反射层(BSR)、振幅变形(空白反射)、速度倒置、速度—振幅异常结构(VAMP)。大规模的天然气水合物聚集可以通过高电阻率( $>100\Omega\cdot m$ )、低体积密度等参数进行直接判别。

钻井作业过程中为了防止水合物形成,通常使用含盐度较高的钻井液体系(盐度保持高于20%)或油基钻井液,在钻井液中添加一定的水合物抑制剂,在节流、压井管线和井口连接器中要间歇地注入水合物抑制剂,如甲醇、乙二醇等。

#### 4. 地层破裂压力梯度低

海底的沉积岩层形成时间较短,缺乏足够的上覆岩层,所以海底地层结构通常是松软的、未胶结的。对于相同沉积厚度的地层来说,随着水深的增加,地层的破裂压力梯度降低,致使破裂压力梯度和地层孔隙压力梯度之间的窗口变窄,容易发生井漏、井喷等复杂情况。

### 三、深水钻井特点

深水钻井特点主要体现在深水钻井装置和深水钻井作业方式上。

#### 1. 钻井装置

(1)大型化:平台主尺度、载重量、甲板可变载荷、物资储存能力等各项指标都趋向于大型化,以增大作业的安全可靠性、全天候的工作能力和长时间的自持能力。

(2)配套设备更先进:深水关键钻井设备向着自动化、信息化、智能化、大功率、高压、高效率、更加安全环保方向发展。

(3)隔水管更长:随着水深增加,深水钻井所用隔水管越来越长,越来越重,导致需要的甲板空间与可变载荷增大,隔水管作业的时间长、风险大,钻井液用量大,隔水管内流速低,岩屑携带困难。

(4)定位成本高:动力定位钻井装置需要消耗大量的燃油,锚链定位钻井装置需要采用大马力的三用工作船进行起抛锚作业,作业成本均会大幅增加。

#### 2. 作业方式

(1)水下设备的作业时间相对于常规浅水较长,因此对应急响应时间的要求更为苛刻。

(2)深水钻井装备的自动化、信息化、智能化引起深水钻井作业方式的变化,深水钻井效率更高。

(3)深水钻井一般采用喷射下导管的方法。

(4)深水表层固井的水泥浆体系一般应满足低温早强和低密度要求。

(5)钻井液体系应适应海底低温和井底温度之间较大的温差环境,应考虑对天然气水合物的抑制问题。

## 第二节 深水钻井关键技术

深水钻井是一项具有高科技含量、高投入和高风险的工作,其中双梯度钻井技术、喷射法下导管技术、动态压井钻井技术、随钻环空压力监测、随钻测井技术、当量循环密度(ECD)控制等技术是深水钻井作业成功的关键。钻井平台(船)、隔水管和水下防喷器等设备的合理选择也是深水钻井作业成功的重要因素。

### 一、双梯度钻井技术

深水钻井环境相对于陆地和浅水更为复杂,易出现常规钻井装备和方法难以克服的技术难题:锚泊钻井装置本身必须承受锚泊系统的重量,给钻机稳定性增加了难度;隔水管除了承受自身重量,还承受复杂严重的机械载荷,防止隔水管脱扣是一个关键问题;地层孔隙压力和破裂压力之间窄的安全钻井液密度窗口,使得控制钻井液密度安全钻过地层变得异常困难;海底泥线处高压、低温环境影响钻井液性能而产生特殊的难题;海底的不稳定性、浅层水流动、天然气水合物可能引起的钻井风险等。国外 20 世纪 60 年代提出并在 90 年代得到大力发展的双梯度钻井技术很好地解决了这些问题。双梯度钻井技术的基本思路是:隔水管内充满海水(或不使用隔水管),采用海底泵和小直径回流管线旁路回输钻井液;或在隔水管中注入低密度介质(空心微球、低密度流体、气体),降低隔水管环空内返回流体的密度,使之与海水相当,在整个钻井液返回路中保持阶梯密度钻井液体系,有效控制井眼环空压力、井底压力,以克服深水钻井中遇到的诸多问题。

双梯度钻井技术的优点为:

(1)有效地解决了窄密度窗口问题,实现安全钻井。

(2)可以优化井身结构。采用常规钻井技术时,由于海水产生的静压梯度的影响,设计套管柱程序比常规油井复杂,当一开套管直径确定后,生产套管的直径比常规油井小,或根本无法达到目的层。采用双梯度钻井技术可以减少套管下入层数,从而优化井身结构。

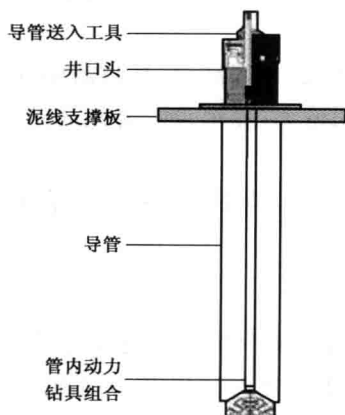


图 1-2-1 喷射导管串示意图

### 二、喷射法下导管技术

海洋浅水区域的导管通常采用打桩(锤入法)或钻孔后下入并固井(钻入法)的方式作业。在深水区域,由于可能存在海床不稳定、破裂压力低、天然气水合物堵塞、浅层水流的危害以及海底低温变化等问题,常规的锤入法或钻入法施工常常比较困难,作业风险高,对于日费高昂的深水钻井显然不适用。为此,深水钻井用喷射法下导管技术应运而生。

喷射法下导管技术采用喷射方式将导管下到位,利用水射流和管串的重力,边喷射开孔边下导管,同时在喷射管柱中下入动力钻具组合以提高安全性和作业效率(图 1-2-1)。钻至预定井深后,静止管串,利用地层的黏附力和摩擦力稳固

住导管,然后脱手送入工具并起出管内钻具,从而完成导管的安装。

喷射法下导管施工的主要控制参数为钻压。保持适当的钻压,才能保持导管在施工过程中处于垂直状态,使钻具外环空畅通,下入过程顺利进行。钻压控制的原则是保持泥线以上导管和钻杆处于垂直拉伸状态,即控制钻压大于入泥导管的浮重,且小于入泥喷射管串总浮重,保持中和点在泥线以下。

喷射法下导管技术的优点为:

- (1)可在钻进的同时下导管,解决了深水表层钻孔后下导管不容易下入的难题。
- (2)可节约钻井时间,对于日花费上百万美元的深水钻井来说,效益可观。
- (3)喷射下导管作业结束后无需固井,可避免因水泥浆密度过大而压破地层,同时亦可避免低温等因素影响固井质量而带来的井口下沉隐患。

### 三、动态压井钻井技术

喷射法下导管过程中必须监测浅层水流,以降低由浅层水流带来的风险。为了控制浅层水流的危害,需要利用动态压井系统来实现钻井液密度的快速转变,使压井钻井液的密度保持在地层压力和破裂压力窗口之间。

动态压井技术是深水表层建井工艺中的关键技术。该技术是一种在未建立正常循环的深水浅层井段,以压井方式控制深水钻井作业中的浅层气井涌及浅层水涌动等复杂情况的钻井技术。其工作原理与固井作业中的自动混浆原理相似,它是根据作业需要,通过一台可自动控制密度的混浆装置,随时将预先配好的高密度压井液与正常钻进钻井液,自动调和到所需密度的钻井液,直接供给钻井泵向井内连续不断地泵送。在钻进作业期间,只要随钻井底压力监测系统(PWD)和遥控潜水器(ROV)监测到井下有地层异常高压,就可通过人为输入工作指令,使装置立即启动泵送出所需要的高密度钻井液,不需要循环和等待配制高密度钻井液,真正意义上实现边作业边加重的动态压井钻井作业。

动态压井系统主要由混合装置和实时监测控制系统组成。混合装置类似于固井泵的混浆装置,其作用是实现钻井液密度的快速转变。该装置配有两根进液管线和一根出液管线,其中一根进液管线连接海水管线,另一根连接高密度压井液池,出口管线连接到循环池,从循环池直接将混配好的高密度钻井液泵入井内。

动态压井钻井技术的优点为:

- (1)可以有效解决浅层水流诱发的严重井漏问题,也是对付浅层气的有效办法。
- (2)可有效实施对当量循环密度(ECD)的控制,延长表层套管下深,从而增加后续层段套管下入深度,有利于井身结构的优化。
- (3)可减少三用工作船钻井液的运输量和储存量,降低总体成本。
- (4)有利于提高表层井身质量,减少作业过程中的地层压漏等问题,保证固井质量。

### 四、随钻环空压力监测(APWD)

由于深水海域的特殊性,与浅水和陆地钻井相比,部分上覆岩层被水代替,相同井深的上覆岩层压力降低,使得地层孔隙压力和破裂压力之间的压力窗口变得很窄,随着水深的增加,钻井越来越困难。据统计,在墨西哥湾深水钻井中,出现的一系列问题,如井控事故、大量漏失、卡钻等都与环空压力监测不足有关。随钻环空压力测量主要是靠钻具上的压力传感器进行环空压力测量,可实时监测井下压力参数的变化。它可以向工程师发出环空压力变化的危险报警,在不破坏地层的情况下,及早采取预防措施以使井眼保持安全。主要应用于实时井涌

监测和 ECD 监控、井眼净化状况监控、钻井液性能调整等,是深水钻井作业过程中不可缺少的数据采集工具。

## 五、随钻测井技术

深水测井技术主要是指钻井作业过程中对井筒及地层参数的测量技术,包括 LWD、MWD 和 SWD 测井技术。

由于深水钻井作业受到高作业风险及昂贵的钻机日租费的影响,迫使作业者对钻井测量技术提出了多参数、高采集频率和精度并至少同时采用两套不同数据采集方式的现场实时数据采集和测量系统,还要具有专家智能分析判断功能的高标准要求。

目前最常用的定向井测量方式是 MWD 数据测量方式,这种方式通常只能测量井眼轨迹的有关参数,如井斜角、方位角、工具面。LWD 是在 MWD 基础上发展起来的具有地层数据采集功能的随钻测量系统,与常规的 MWD 相比增加了用于地层评价的电阻率、自然伽马、中子密度等地层参数。具有地质导向功能的 LWD 系统可通过近钻头伽马射线确定井眼上下两侧的地层岩性变化情况,以判断井眼轨迹在储层中的相对位置;利用近钻头电阻率确定钻头处地层的岩性及地层流体特性;利用近钻头井斜参数预测井眼轨迹的发展趋势,以便及时做出调整,避免钻入底水、顶部盖层或断裂带地层。

随钻地震(SWD)技术是在传统的地面地震勘探方法和现有的垂直地震剖面(VSP)的基础上结合钻井工程发展起来的一项交叉学科的新技术。其原理是利用钻进过程中旋转钻头的振动作为井下震源,在钻杆的顶部、井眼附近的海床埋置检波器,分别接收经钻杆和地层传输的钻头振动信号。利用互相关技术将钻杆信号和海床检波器信号进行互相关处理,得到逆 VSP 的井眼地震波信息。也就是说,在牙轮钻头连续钻进过程中,能够连续采集得到直达波和反射波信息。

## 六、深水钻井液和固井工艺

随着海水深度的加大,钻井环境温度也将越来越低,温度降低会给钻井及采油作业带来很多问题。比如在低温情况下,钻井液的流变性会发生较大变化,具体表现为黏度、切力大幅度上升,而且还可能出现显著的胶凝现象,再有就是增加形成天然气水合物的可能性。目前主要是在管汇外加保温隔热层,这样可以在停止生产期间保持生产设备的热度。

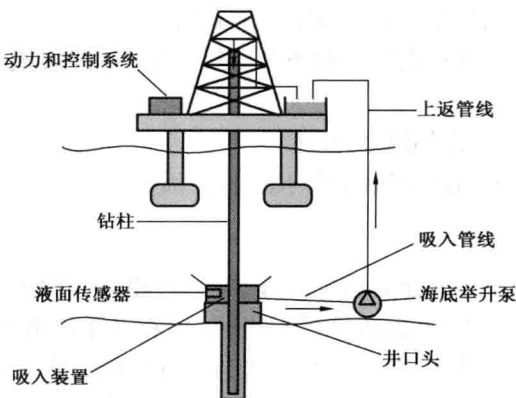


图 1-2-2 井液可回收式无隔水管钻井系统示意图

表层套管固井是深水固井的难点和关键点,海底的低温影响是最主要的因素,另外由于低的破裂压力梯度,常常要求使用低密度水泥浆。深水钻井的高昂日费又要求水泥浆能在较短的时间内具有较高的强度。

## 七、井液可回收式无隔水管钻井

井液可回收式无隔水管钻井技术(RMR)系统工作示意图如图 1-2-2 所示,包括传感器、吸入管线、海底泵、上返管线和控制系统等,是简化的双梯度钻井技术,主要用于无高温高压、无天然气藏或丰度不高等灾害性地层,且存在地层破裂压力低、安全作业窗口窄、

易井漏等地质条件下的作业。应用该技术能减少套管层数、缩短建井周期。因不需要使用隔水管,可大大减少钻井液的消耗。在环保要求高和钻井液成本高等情况下,经安全评估及技术和经济评价,如具备作业条件时可考虑使用。

## 八、深水钻井隔水管和防喷器系统

深水钻井的隔水管主要指从海底防喷器到月池一段的管柱,主要功能是隔离海水,引导钻具,循环钻井液,起下海底防喷器组,系附压井、放喷、增压管线等。比较有代表性的是 $\phi 533.4\text{mm}$  钻井隔水管,平均每根长度为 $15.2\sim 27.4\text{m}$ 。在深水钻井作业中,隔水管柱上通常配有伸缩、柔性连接接头和悬挂张力器。为减小隔水管重量对钻井装置和隔水管串自身所造成的负荷,在钻井隔水管外部还装有浮力块。浮力块用塑料或类似塑料的材料制成,内部充以空气。此外,在隔水管外部还有直径 $50\sim 100\text{mm}$ 的多根附属管线。在深水钻井作业过程中,位于泥线以上的主要工作构件从下向上分别是:井口装置、防喷器组、隔水管底部组件、隔水管柱、伸缩短节、转盘分流器及钻井装置。

## 第三节 钻井设计前期准备

由于探井尤其是深水探井存在一系列不确定的因素,因此,在进行深水探井的钻井工程设计前,要充分分析邻井的资料,开展目标井的浅层地质灾害、地层压力体系、井壁稳定性、可钻性等前期研究工作,以此来保证钻井设计的合理性和经济性。

### 一、邻井资料研究

收集邻井施工设计、钻井日报、井史以及测井、录井、测试、取心等资料并加以分析研究,其中应特别关注海洋水深、环境温度、海床、浅层地质灾害等要素,做好风险对比和评估,其他的钻井风险评估与正常的钻前设计准备类同。

### 二、地质设计分析

根据地质部门提供的设计和相关资料,明确地质要求和地质上的风险,与邻井资料相结合,整理出待钻井在地质方面的风险和难点。

### 三、井场海底调查和海洋环境调查

确定井位后,应尽快取得海底勘察资料并进行评价。对于深水井而言,要重点关注浅层地质灾害,资料当中必须包括高分辨地震、地貌调查和海底取样(供定位方案设计和导管设计使用)。海洋环境调查可根据作业和钻井装置的具体需求进行,包括海流调查和环保评估等。

水深对海底调查的影响主要有两个方面:一方面根据不同水深选用的钻井装置类型的不同决定井场调查的内容;另一方面水深决定了井场调查的方式和勘测工具的分辨率。

一般水深小于 $1000\text{m}$ 的,大多采用拖带或船载方式,大于 $1000\text{m}$ 水深的,则多用自主无人潜航器(Autonomous Underwater Vehicle,简称AUV)。

锚泊定位浮式钻井装置的井场调查主要考虑目标井位钻井导管鞋位置的选择、抛锚位置的取样、海底生物群和浅层钻井危害。危害评价覆盖的海底区域要保证作业和布锚需要。应该特别关注锚和悬链的触底部位,在这些位置,锚链或钢丝绳会受到海底状况的影响,需要描述抛锚点浅层土壤的自然状况。

动力定位钻井装置的井场调查主要考虑浅层钻井危害、海底稳定性、目标井位钻井导管鞋位置的选择以及对生物群的影响。动力定位钻井装置的地质危害评价集中在上部井段。井场调查的关注点应放在浅层水流、水合物和浅层气,其次是目标井位钻井导管鞋位置的选择。在井场周围 1000m 范围的海域内,应关注作业对生物群的敏感性影响和海床的不稳定迹象。

#### **四、浅层地质灾害分析**

浅层地质灾害研究和评估是进行深水钻井设计的主要基础,进行深水钻井设计之前必须进行这项工作。浅层地质灾害的评估工作应考虑邻井资料的分析、浅层地震资料的特殊处理和海底调查的结果等,提出对浅层气、浅层水流、水合物、海底河道、海堤滑坡、断层、泥火山等地质灾害的风险预测和控制分析。

#### **五、地层压力体系的研究与预测**

深水井破裂压力和孔隙压力之间的窗口比较窄,要求对当量循环钻井液密度(ECD)的管理非常严格。为了在设计阶段和作业过程中进行有效的压力控制,对地层孔隙压力、地层破裂压力和坍塌压力进行认真研究之外,还必须增加对地层漏失压力的研究和浅层作业窗口的分析,以获得尽可能准确翔实的压力系统预测资料,用于井身结构、钻井液和固井设计。循环压耗数据应进行模拟计算,有邻井可查的还应比对邻井资料并考虑钻井液体系的影响。

#### **六、井壁稳定性研究**

深水井中如发生井壁失稳方面的问题,由于处理的钻井液密度窗口有限,处理的难度大,容易导致更复杂的情况发生,所以必须针对每口井进行井壁稳定性研究。井壁稳定性研究是进行井身结构和钻井液设计的基础,要对所钻的地层进行研究和分析,识别地层的特性以及是否存在浅层水流、易垮塌层、异常温度与压力层、水合物层、盐岩层、易水化层和易产生呼吸效应层等,通过套管设计和钻井液性能设计解决潜在的井壁失稳问题。

#### **七、地层可钻性研究**

深水井的地层可钻性分析研究包括导管喷射深度的研究分析、浅层地质灾害的穿越分析和深部地层的可钻性分析。在进行钻井设计之前,要根据邻井的资料和其他相关信息进行地层可钻性分析,用于井身结构设计、作业程序优化、钻头选型和水力参数设计,这对提高机械钻速、减少起下钻的次数、提高深水钻井效率、降低作业风险至关重要。

## 第二章 钻井装备选择及能力评估

### 第一节 钻井装备介绍

深水钻井中,钻井装备应能满足深水钻井的钻井载荷要求,能够承受风、浪、流的反复冲击,特殊海区海冰的作用,强热带风暴的作用及海洋环境对设备的腐蚀破坏。深水钻井的主要装置及其配套设备包括深水钻井平台和钻井船、深水定位系统、隔水管、防喷器系统和水下井口系统等。

#### 一、半潜式钻井平台

半潜式钻井平台上部为工作甲板,下部为两个下船体,用支撑立柱连接,如图 2-1-1 所示。工作时下船体潜入水中,甲板处于水上安全高度,水线面积小,受波浪影响小,稳定性好、支持力强、工作水深大。新发展的动力定位技术用于半潜式平台后,到 21 世纪初,工作水深可达 3000m,同时钻探深度也相应提高到 9000 ~ 12000m。

与固定式和自升式钻井装置不同,半潜式平台在工作时漂浮于海面,因而可以不受作业水深的限制,适用于各种水深的海域。在半潜作业时,平台一直处于运动状态。与钻井船相比,半潜式平台由于大部分排水量都集中在水下较深处,这使得平台整体受波浪的影响较弱,在波浪中的运动响应较小,能够适应大多数海洋环境,与钻井船相比有更好的运动特性。在作业海况下,半潜式平台的升沉小于 1.5m,水平位移不大于水深的 6%,平台的纵倾角不大于  $\pm 3^\circ$ 。平台的这种运动是在钻井作业所允许的最大运动幅度之内,因而能很好地满足海上作业要求。

目前最先进的半潜式钻井平台为第六代半潜式钻井平台,作业水深已达 2550 ~ 3600m,钻深大于 9144m(30000ft),采用动力定位,船体结构更为优化,可变载荷更大,配备自动排管等高效作业设备,能适应极其恶劣的海洋环境。第六代平台比以前钻井平台更先进的设计在于采用了双井口作业方式,即平台上钻机具有双井架、双井口、双提升系统等,主井口用于正常的钻进工作,辅助井口主要完成组装与拆卸钻杆及下放、回收水下器具等离线作业,虽然平台的投资有所增加,但是对于深海钻井作业效率的提高非常显著。

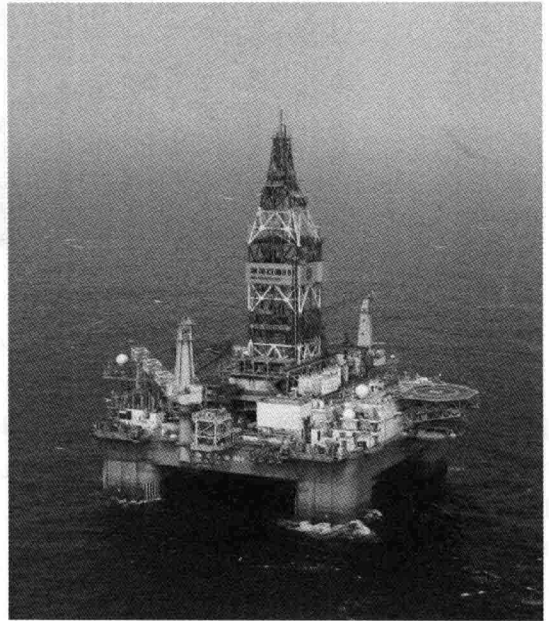


图 2-1-1 半潜式钻井平台

中国海洋石油总公司投资建造的我国首座 3000m 超深水第六代半潜式钻井平台

HYSY981 于 2009 年 4 月在上海外高桥船厂进坞铺底建造,2012 年 5 月 9 日在南海海域正式开钻。该平台是世界上首次按照南海恶劣海况设计的,能抵御 200 年一遇的台风。平台主体尺寸 114m×89m×137m,工作最大水深 3000m,最大钻井深度 10000m,作业排水 51264t,可变载荷 9000t,拥有 8 台 5530kW 主发电机和 8 台 4600kW 推进器,最大航速为 8 节,定位方式既有动力定位又有锚泊定位,平台定员 160 人。

## 二、钻井船

钻井船是移动式钻井装置中机动性最好的一种,如图 2-1-2 所示。其移动灵活,停泊简单,适用水深范围大,特别适于深海水域的钻井作业。船体安装有钻井和航行动力设备,并为工作人员提供工作和生活场所。在钻井船上设有升沉补偿装置、减摇设备、自动动力定位系统等,可通过多种综合措施来保持船体稳定定位。自动动力定位是目前较先进的一种保持船位的方法,可直接采用推进器及时调整船位。



图 2-1-2 深水钻井船

当前世界上大型、先进的石油钻井船中具有代表性的有:

(1) 由西班牙 Astano 船厂于 2000 年建成的 DiscovererSpirit 号钻井船。该船配备钻井双作业系统,钻井工作水深为 3048m(10000ft),钻井深度为 10668m(35000ft)。另外,Transocean 公司的 DiscovererEnterprise 和 DiscovererDeep Seas 均配备钻井双作业系统,配有双套 EmscoE-HV5000hp 钻机,钻深可达 10668m(35000ft),其工作水深分别为 2590m(8500ft)和 2438m(8000ft),后均升级至 3048m(10000ft)。

(2) 由韩国三星船厂于 2003 年建成的 BelfordDolphin 号,船长 201m(660ft),宽 40m(131ft),型深 19.5m(64ft);工作水深 3048m(10000ft),钻深 11278m;可变载荷 226800kN;钻机主绞车为 Hitec4851kW(6600hp)。

(3) GLOMAR CR. LUIGS 号钻井船。其工作水深为 3658m(12000ft),钻深为 10668m(35000ft)。

## 三、深水定位系统

半潜式钻井平台、钻井船等浮式钻井装置作业时处于漂浮状态,受风、浪、流的影响会发生纵摇、横摇和水平移位,必须采用可靠的方法对其进行定位。



动力定位是当今深水钻井船的主流定位方式,半潜式深水钻井平台也已广泛采用动力定位技术。在现有的深水钻井船中,只有 6 艘采用常规锚链定位(额定作业水深不足 1000m),其余 27 艘都采用动力定位(额定作业水深超过 1000m)。1000m 以上水深的钻井船采用的都是动力定位,在建的钻井船全部采用动力定位。

动力定位一般采用 DGPS 定位和声呐定位两种系统。声呐定位系统的优点是:(1)精确度高(1%~2%)、水深大(最大适用水深为 2500m);(2)信号无线传输(不需要电缆);(3)基本不受天气条件的影响(GPS 系统受天气条件的影响);(4)独立(不需要依靠其他系统提供的信号)。声呐定位系统的缺点是:(1)易受噪声的影响,如环境噪声、推进器噪声、测试 MWD 等;(2)存在折射和阴影区;(3)信号传输时间延时;(4)易受其他声呐系统的干扰,如多条船在同一地方工作的情况。

#### 四、隔水管及水下防喷器系统

隔水管及水下防喷器系统是深水浮式钻井必不可少的装备,主要由防喷器组、液压连接器、隔水管底部总成(LMRP)、柔性接头、隔水管柱、伸缩短节、张紧器等组成。从海底井口一直延伸到钻井装置月池的隔水管,其主要功能是隔离海水,引导钻具,循环钻井液,起下水下防喷器组,系附高压节流/压井管线、钻井液补充管线、液压传输管线等。

##### 1. 张紧器

张紧器是为克服钻井装置升沉运动带来的影响而配置的设备,如图 2-1-3 所示。目前使用的主要有张紧导向绳用的导向绳张紧器和张紧隔水管用的隔水管张紧器。张紧器由活塞缸、钢丝绳和控制装置组成,其工作原理是利用气液储能器的压力推动活塞,随着平台的升沉而伸缩,以保持导向绳、隔水管的张力恒定。使用张紧器后,隔水管所受的张力变化可控制在 5% 以内。



图 2-1-3 隔水管张紧器

##### 2. 伸缩节

伸缩节的作用是补偿钻井装置的升沉运动,使隔水管柱不至于因平台的剧烈上下运动而断裂。一般安装在隔水管柱的上部,由内管和外套管组成,两层管可以上下相对运动。外套管由张紧器张紧,以防隔水管柱在轴向压力作用下被压弯,使其处于稳定的受拉状态。

##### 3. 柔性接头

柔性接头(图 2-1-4)安装在隔水管柱的下部,当隔水管和防喷器组之间产生角位移时以减小隔水管的弯矩,它可使隔水管柱在任意方向转动约  $7^{\circ} \sim 12^{\circ}$ ,以使隔水管柱适应浮式钻井装置的摇摆、平移等运动。柔性接头还可用在隔水管柱的顶部或伸缩管以下隔水管的中部,用以减小隔水管的应力。

柔性接头主要有压力平衡式、多球式和万能式三种。在选择、确定或设计柔性接头时,应