

# 深水石油钻井技术现状及发展趋势<sup>\*</sup>

杨 进<sup>1</sup> 曹式敬<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国海洋油田服务股份有限公司钻井事业部, 北京 101149)

**摘要:** 随着世界深水油气资源不断发现, 近几年来深水钻探工作量越来越大。随着水深的增加和复杂的海况环境条件, 对钻井工程提出了更高的挑战, 钻井技术的难度越来越大。从目前国内外深水钻井实践出发, 对深水的钻井设备、定位系统、井身结构设计、双梯度钻井技术、喷射下导管技术、动态压井钻井技术、随钻环空压力监测、钻井液和固井工艺技术和钻井隔水管及防喷器系统等关键技术进行了阐述, 对深水的钻井设计和施工进一步向深水钻井领域发展具有重要导向作用。

**关键词:** 深水钻井; 钻井设备; 关键技术

**中图分类号:** TE21; TE24 **文献标识码:** A

## Current situation and developing trend of petroleum drilling technologies in deep water

YANG Jin<sup>1</sup>, CAO Shijing<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Drilling Department of China Offshore Oilfield Services Limited, CNOOC, Beijing 101149, China)

**Abstract** As more and more oil and gas resources are discovered in deepwater worldwide, the deep water drilling has become more and more in recent years. It requires more on drilling engineering and drilling technologies due to the increased water depth and complicated marine conditions. Based on the practice in deep water drilling both at home and abroad, some key technologies are discussed in this paper, including the drilling equipment, the positioning system, the casing program design, the dual-gradient drilling technology, the technology of jetting and lower circuit, the dynamic killing and drilling technology, the technology of annulus pressure detection while drilling, the technology of drilling fluid and cementing, the drilling raiser technology, and the blowout preventer system. All the technologies play an important role in enabling drilling design and construction to expand into deep water.

**Key words:** deep water drilling; drilling equipment; key technology

全世界未发现的海上油气储量有 90% 潜伏在水深超过 1000 m 以下的地层, 所以深水钻井技术水平关系着深海油气勘探开发的步伐。对于海洋深水钻井工程而言, 钻井环境条件随水深的增加变得更加复杂, 容易出现常规的钻井工程难以克服的技术难题, 因此深水钻井技术的发展是影响未来石油发展的重要因素。

### 1 国内外深水油气勘探形势

全球海洋油气资源丰富。据估计, 海洋石油资源量约占全球石油资源总量的 34%, 累计获探明储量约  $400 \times 10^8$  t, 探明率 30% 左右, 尚处于勘探早期

阶段。据美国地质调查局 (USGS) 评估, 世界 (不含美国) 海洋待发现石油资源量 (含凝析油)  $548 \times 10^8$  t, 待发现天然气资源量  $7815 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>, 分别占世界待发现资源量的 47% 和 46%。因此, 全球海洋油气资源潜力巨大, 勘探前景良好, 为今后世界油气勘探开发的重要领域。

随着海洋钻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。目前, 大于 500 m 为深水, 大于 1500 m 则为超深水。据估计, 世界海上 44% 的油气资源位于 300 m 以下的水域, 其中, 墨西哥湾深水油气资源量高达  $(400 \sim 500) \times 10^8$  桶油当量, 约占墨西哥湾大陆架油气资源量的 40% 以上,

**作者简介:** 杨进, 1966 年生。1989 年毕业于石油大学 (华东) 钻井工程专业, 现从事油气钻井工程研究工作, 教授, 本刊编委。电话: 010 - 89733204。

而巴西东部海域深水油气比例高达 90%左右。

20世纪 90年代以来,由于发现油气田储量大,产量高,深水油气倍受跨国石油公司青睐,发展迅速。据估计,近年来,深水油气勘探开发投资年均增长 30.4%,2004年增加到 220亿美元。1999年作业水深已达 2000 m,2002年达 3000 m。90年代以来,全球获近百个深水油气发现,其中亿吨级储量规模的超过 30%。2000年,深水油气储量占海洋油气储量的 12.3%,比 10年前增长约 8%。2004年,全球海洋油气勘探获 20个重大深水发现(储量大于  $110 \times 10^8$  桶)。1998 - 2002年有 68个深水项目,约  $15 \times 10^8$  t油当量投产;2003 - 2005年则增至 144个深水项目,约  $4216 \times 10^8$  t油当量投产,2004年深水石油产量  $210 \times 10^8$  t,约占世界石油产量的 5%。

## 2 目前深水油气开发模式

深水油气开发设施与浅水油气开发设施不同,其结构大多从固定式转换成浮式,因此开发方式和方法也发生了变化。国外深水油气开发中常用的工程设施有张力腿(TLP)平台、半潜式(SEMDFPS)平台、深吃水立柱式(SPAR)平台、浮式生产储油装置(FPSO)以及它们的组合。

## 3 深水钻井关键技术

### 3.1 深水钻井设备

适用于深水钻井的主要是半潜式钻井平台和钻井船 2种浮式钻井装置。

3.1.1 深水钻井船 钻井船是移动式钻井装置中机动性最好的一种。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。钻井船主要由船体和定位设备 2部分组成。船体用于安装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、自动动力定位等多种措施来保持船体定位。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。全球现有 38艘钻井船,其中额定作业水深超过 500 m的深水钻井船有 33艘,占总数的 87%。在这 33艘深水钻井船中,有 26艘正在钻井,有 5艘正在升级改造。在现有的深水钻井船中,20世纪 70年代建造的有 10艘,80年代和 90年代建造的各有 7艘,其余 9艘是 2000 - 2001年建造的。其中 2000年建成的钻井船最多,有 8艘;其次是 1999年,有 4艘。目前在建的

7艘钻井船中,均是为 3000多米水深建造的,2007年将建成 1艘,2008年和 2009年将各建成 3艘。

钻井船主要活跃在巴西海域、美国墨西哥湾和西非海域。2006年 7月初,正在钻井的 26艘深水钻井船分布在 8个国家。其中巴西 8艘,占 1/3;其次是美国,有 6艘;安哥拉、印度和尼日利亚分别有 4艘、3艘和 2艘;中国、马来西亚和挪威各 1艘。

3.1.2 半潜式钻井平台 半潜式钻井平台上部为工作甲板,下部为 2个下船体,用支撑立柱连接。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,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,到本世纪初,工作水深可达 3000 m,同时勘探深度也相应提高到 9000 ~ 12 000 m。据 Rignone网站截至 2006年 7月初的统计,全球现有 165座半潜式钻井平台,其中额定作业水深超过 500 m的深水半潜式钻井平台有 103座,占总数的 62%。在这 103座深水半潜式钻井平台中,有 89座正在钻井,有 11座正在升级改造。其中 31座是 20世纪 70年代建造的,最长的已经服役 30多年;40座是 20世纪 80年代建造的;13座是 90年代建造的;19座是 2000 - 2005年建造的。此外,还有 24座深水半潜式钻井平台正在建造。

深水半潜式钻井平台主要活跃在美国墨西哥湾、巴西、北海、西非、澳大利亚和墨西哥海域。2006年 7月初,处于钻井中的 89座深水半潜式钻井平台分布在 18个国家,其中美国最多,24座,占总数的 27%;巴西 17座,挪威 10座,英国 6座,澳大利亚、墨西哥和尼日利亚各 5座,其余国家各有 1 ~ 3座。

### 3.2 深水定位系统

半潜式钻井平台、钻井船等浮式钻井装置在海中处于飘浮状态,受风、浪、流的影响会发生纵摇、横摇运动,必须采用可靠的方法对其进行定位。

动力定位是深水钻井船的主流方式。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 1000 m),其余 27艘都采用动力定位(额定作业水深超过 1000 m)。1000 m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。

动力定位系统一般采用 DGPS定位和声纳定位 2种系统。声纳定位系统的优点:(1)精确度高(1% ~ 2%)、水深(最大适用水深为 2500 m);(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。声纳定位系统的缺点:(1)易受噪声的影响,如环境噪声、推进器噪声、测试 MWD等;(2)折射和阴影区;(3)信号传输时间;(4)易受其他声纳系统的干扰,如多条船在同一地方工作的情况。

### 3.3 大位移井和分支水平井钻井技术

海上钻井新技术发展较快,主要包括大位移井、长距离水平钻井及分支水平井钻井技术。这些先进技术在装备方面主要包括可控马达及与之配套的近钻头定向地层传感器。在钻头向地层钻进时,近钻头传感器可及时检测井斜与地层性质,从而使司钻能够在维持最佳井眼轨迹方面及时做出决定。

由于水平井产量高,所以在国外海上油气田的开发中已经得到了广泛的应用。目前,国外单井总水平位移最大已经达 11 000 m。分支水平井钻井技术是国际上海洋油气田开发广泛使用的技术,近年来发展很快。利用分支井主要是为了适应海上需要,减少开发油藏所需平台数量及平台尺寸(有时平台成本占开发成本一半还多)。具体做法是从一个平台(基础)钻一口主干井,然后从主干井上急剧拐弯钻一些分支井,以期控制较大的泄油面积,或者钻达多个油气层。

### 3.4 深水双梯度钻井技术

与陆地和浅海钻井相比,深海钻井环境更复杂,容易出现常规钻井装备和方法难以克服的技术难题:锚泊钻机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安全钻井液密度窗口窄,很难控制钻井液密度安全钻过地层;海底泥线处高压、低温环境影响钻井液性能产生特殊的难题;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(Dual Gradient Drilling,简称 DGD)技术很好地解决了这些问题。双梯度钻井技术的主要思想是: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,在整个钻井液返回回路中保持双密度钻井液体系,有效控制井眼环空压力、井底压力,克服深水钻井中遇到的问题,实

现安全、经济的钻井。

### 3.5 喷射下导管技术

海上浅水区的表层套管作业通常采用钻孔、下套管然后固井的作业方式。在深水区,由于海底浅部地层比较松软,常规的钻孔/下套管固井方式常常比较困难,作业时间较长,对于日费高昂的深水钻井作业显然不合适。目前国外深水导管钻井作业通常采用“Jetting in”的方式。常规做法是在导管柱( $\varnothing 14.4$  mm 或  $\varnothing 762$  mm)内下入钻具,利用导管柱和钻具(钻铤)的重量,边开泵冲洗边下入导管。

### 3.6 动态压井钻井技术(DKD)

DKD(Dynamic kill Drilling)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,可随时将预先配好的高密度压井液与正常钻进时的低密度钻井液,通过一台可自动控制密度的混浆装置,自动调解到所需密度的钻井液,可直接供泥浆泵向井内连续不断地泵送。在钻进作业期间,只要 PWD 和 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,该装置立即就可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,真正意义上地实现边作业边加重的动态压井钻井作业。

### 3.7 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,部分的上覆岩层被水代替,相同井深上覆岩层压力降低,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有关。随钻环空压力测量原理是主要靠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增加的危险报警,在不破坏地层的情况下,提供预防措施使井眼保持清洁。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。

### 3.8 随钻测井技术(LWD/MWD/SWD)

深水测井技术主要是指钻井作业过程中的有关井筒及地层参数测量技术,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、高采集频率和精度及至少同时采用 2 套不同数据采集方式的现场实时数据采集和测量系统,并且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的随钻测量系统,较常规的 MWD 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 2 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以及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—Vertical Seismic Profiling) 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、地层传输的钻头振动的信号。利用互相关技术将钻杆信号和地面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。

### 3.9 深水钻井液和固井工艺

随着水深度的加大,钻井环境的温度也将越来越低,温度降低将会给钻井以及采油作业带来很多问题。比如说在低温情况下,钻井液的流变性会发生较大变化,具体表现在黏、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绝绝缘层。这样可以在停止生产期间保持生产设备的热量,从而防止因温度降低而形成水合物。

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。深水钻井的昂贵日费又要求水泥浆能在较短的时间内具有较高的强度。

### 3.10 深水钻井隔水管及防喷器系统

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、增压管线等作用。在深水钻井当中,隔水管柱上通常配有伸缩、柔性连接接头和悬挂张力器。在深水中,比较有代表性的是  $\Phi 533.4$  mm 钻井隔水管,平均每根长度为  $15.2 \sim 27.4$  m。为减小由于钻井隔水管结构和自身重量对钻井船所造成的负荷,在钻井隔水管外部还装有浮力块。这种浮力块是用塑料和类似塑料材料制成的,内部充以空气。在钻井隔水管外部,还有直径处于  $50 \sim 100$  mm 范围的多根附属管线。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、转喷器及钻井装置,井口装置通常由作业者提供。

## 4 结论

深水石油钻井是一项具有高科技含量、高投入和高风险的工作,其中喷射下导管技术、动态压井钻井技术、随钻环空压力监测、随钻测井技术、ECD 控制等技术是深水钻井作业成功的关键。钻井船、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。另外,强有力的后勤支持和科学的作业组织管理是钻井高效和安全的重要保障。

参考文献:

- [1] 潘继平,张大伟,岳来群,等. 全球海洋油气勘探开发状况与发展趋势 [J]. 中国矿业, 2006, 15 (11): 1 - 4.
- [2] 刘杰鸣,王世圣,冯玮,等. 深水油气开发工程模式及其在我国南海的适应性探讨 [J]. 中国海上油气, 2006, 18 (6): 413 - 418.
- [3] 谢彬,张爱霞,段梦兰. 中国南海深水油气田开发工程模式及平台选型 [J]. 石油学报, 2007, 28 (1): 115 - 118.
- [4] 李芬,邹早建. 浮式海洋结构物研究现状及发展趋势 [J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2003, 27 (5): 682 - 686.
- [5] 杨金华. 全球深水钻井装置发展及市场现状 [J]. 国际石油经济, 2006, 14 (11): 42 - 45.
- [6] 赵政璋,赵贤正,李景明,等. 国外海洋深水油气勘探发展趋势及启示 [J]. 中国石油勘探, 2005, 10 (6): 71 - 76.
- [7] 陈国明,殷志明,许亮斌等. 深水双梯度钻井技术研究进展 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 18 (2): 246 - 250.

(收稿日期 2007 - 12 - 07)

编辑 张振清 ]