

# 深水钻井技术进展与展望

张晓东 王海娟

西南石油大学

张晓东等.深水钻井技术进展与展望.天然气工业,2010,30(9):46-48.

**摘要** 深水钻井指作业水深大于400 m而小于1 500 m的海洋钻井作业。为减少甚至避免深水钻井中由于地层破裂压力低、浅层流体入侵井筒、页岩不稳定性、天然气水合物问题、海底低温等引发的诸多严重钻井事故,总结了能够缓解部分钻井危险的深水钻井技术,例如:喷射下导管技术、动态压井技术、深水钻井液技术、随钻测井与随钻环空压力测量技术等。针对深水钻井新技术,包括无隔水管套管钻井技术、无隔水管钻井液回收技术、控制压力钻井技术等,分析并总结了各项新技术的应用优势和基本原理,以期对深水油气田勘探开发提供理论依据和现场应用指导。同时,还可为实现智能钻井提供相关的技术支撑。

**关键词** 钻井技术 深水油气 套管钻井 破裂压力 孔隙压力 展望 智能钻井 技术支撑

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.09.012

与大陆架和陆上勘探钻井作业相比,深水作业的施工风险高、技术要求高,成本非常昂贵,资金风险也极高;作为回报,深水勘探钻井作业所发现的石油地质储量也相对比较高。因此,单位储量发现成本并不算高。深水钻井是指作业水深大于400 m而小于1 500 m的海洋钻井作业,常规浅水钻井工艺和钻井装备表现出明显的局限性,已经不再适应深水钻井;面对深水油气勘探开发的困难和危险性,深水钻井新技术不断涌现。

## 1 深水钻井面临诸多挑战

### 1.1 较小的破裂梯度

一般来讲,特定深度岩石的破裂压力随着上覆岩石压力的增加而增大。随着水深的增加,上覆岩层压力被海水水柱静水压力代替,岩石破碎压力随着水深的增加而减少,特别是海底表层,破裂梯度几乎为0。随着水深的增加,海底沉积物越厚,海底表层沉积物胶结性越差。

### 1.2 浅层水、气流

海底浅部地层地质年龄轻,压实时间短,地层渗透

率一般较高。通常欠压实层的高渗透率使得高压层内地层水以很高的流速流向低压区,即浅部水层井涌。浅层水井涌是许多钻井问题的起因,表现为钻井、下套管以及固井出现困难,严重时会导致井眼坍塌,甚至引起海底沉降,最坏的情况则是造成油气井报废。

浅层气位于浅层、体积小、压力高、危险系数大,由浅层气引发的井喷易发生、速度快、处理困难、危险性大并且可预见性差。浅层气井喷属于严重的钻井事故,危害极大,常会造成严重后果,例如天然气井喷着火,烧毁设备;又如表层套管下入深度较浅或封固质量不好,气体会从套管外喷出,造成套管外井喷,在地面形成大坑,使设备陷入地下等。

### 1.3 不稳定的页岩层

除了上部地层中浅层水或气的影响,继续钻进会钻遇不稳定的页岩地层,页岩对水的敏感性很强,利用水基钻井液钻进页岩地层时,将有可能引发一系列钻井事故。钻遇页岩地层失控引发的问题:井眼堵塞、下套管作业困难、钻井液漏失、地层膨胀,井筒压力降低等。利用钻井液平衡页岩地层压力和阻止井筒压力降低很困难,钻遇页岩地层的必然后果是钻井液的漏失。

**基金项目** 石油天然气装备教育部重点实验室(西南石油大学)资助项目(编号:2006STS02)。

**作者简介** 张晓东,1959年生,教授,博士生导师;1982年毕业于原西南石油学院石油矿场机械专业,1995年毕业于北京科技大学矿山机械专业,获工学硕士学位;现从事石油钻采设备新技术、现代设计理论与方法的教学及石油钻采工具,特别是井下动力钻具和井下工具的研发工作。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油大学机电学院。电话:(028)83032740。E-mail:zxd12342@126.com

## 1.4 天然气水合物问题

深水钻井中,天然气水合物是一种潜在的危险,它生成时会结冰阻塞管汇。天然气水合物对井控的影响最大,它可能造成阻流管线和防喷器的阻塞,也可能阻塞钻柱环空而限制钻具活动,甚至造成卡钻。

## 1.5 温度梯度

深水钻井中,随着水深的增加,温度逐渐降低,泥线附近位置水温为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随着井筒深度的增加,温度以 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的梯度逐渐上升。海底低温将引发一些钻井问题,比如天然气水合物阻塞防喷器,甚至阻碍钻具活动,钻井液性能降低和固井液流动性下降等问题。这些问题都将有可能造成钻井失败。

## 1.6 套管设计

随着水深的增加,表层破裂压力极低,要下入导管为钻具提供通道;浅部地层可能存在浅层气和浅层水等地质风险,要下入表层套管以封堵浅层水气流;地层孔隙压力与破裂压力之间的窗口很窄,中间套管和技术套管用于封隔上部地层,以维持钻进而压不漏地层。典型深水钻井的井身结构为 $\varnothing 914\text{ mm}$ 导管、 $\varnothing 508\text{ mm}$ 表层套管、数层中间套管和技术套管<sup>[1]</sup>,还要保证钻达目的层井眼最小直径不小于 $\varnothing 222.2\text{ mm}$ 。表层套管固井也是深水固井的难点,海底的低温影响是最主要的因素,由于低的破裂压力梯度,常常要求只用低密度水泥浆,而深水钻井的昂贵日费用又要求水泥浆能在较短时间内具有较高的强度。

# 2 深水钻井技术

## 2.1 喷射下导管技术

深水海底为较厚、松软、高含水且未胶结的沉积地层,地层孔隙压力与破裂压力之间的窗口几乎为0,通常采用打桩或钻孔后下入导管固井的作业方式已不能适用深水钻浅层的钻井条件<sup>[1]</sup>。

喷射导管钻井技术,是将钻具下入导管内,利用导管及钻具的重力和钻井液的喷射来进行岩石破碎的钻井技术。利用喷射导管钻井技术,实现钻进和下导管同时进行,钻井液返回液不通过套管与井眼的环空而是通过钻杆与套管的环空返回海底<sup>[2]</sup>,钻至预定深度后,静止管柱,利用地层的粘附力和摩擦力稳固导管,不需进行固井作业,而后,起出管内钻具或继续钻进。喷射导管钻井技术,避免了按照常规的打桩、钻井、起钻、下套管、固井的方式引发的钻井问题,实现了节约钻井时间、减少钻井问题,降低钻井成本的目的。

## 2.2 动态压井技术

动态压井方法:通过增加压井循环排量增加流动

阻力,从而增加井底压力,达到压井的目的。在钻井过程,动态压井的环空流动压降均匀地分布在整个井身长度上,常规压井的回压作用在整个井身的每一点上,也就是说动力压井法将产生较小的井壁压力。其基本原理:以一定的流量泵入初始钻井液,使井底的流动压力等于或大于底层的孔隙压力,从而阻止地层流体进一步侵入井内,达到“动压稳”状态,然后逐步替入加重钻井液,以实现完全压井的目的,达到“静压稳”状态,从而减缓因浅层水、气流容易引发下套管困难、井壁坍塌甚至井喷等严重钻井事故。

## 2.3 深水钻井液技术

深水钻井存在井壁稳定性差、钻井液用量大、地层破裂压力窗口窄、井眼清洁困难、低温下钻井液流变性及其浅层天然气与形成气体水合物等问题。针对深水钻井的特点及深水钻井对钻井液的性能特性要求,深水钻井钻井液要具有防塌性能好、润滑性优良、低温流变性稳定及能有效抑制气体水合物形式的特点。

另外,深水双梯度钻井技术在一定程度上缓解了地层破裂压力窗口窄的问题,利用双梯度钻井技术为避免井底压力严重超过地层压力而造成的钻井严重不平衡,使得井底压力不超过地层破裂压力。双梯度有两种方式:一种是在隔水管环空内注入海水;另一种是在隔水管内特定位置注入低密度介质,以降低其上部环空钻井液的密度,而调整井底压力,例如惰性气体、轻质塑料小球<sup>[3]</sup>。

## 2.4 随钻测井(LWD)与随钻压力测量(PWD)

LWD目前主要用于提高大位移井、高难度水平井的工程控制能力和地层评价能力,提高油气层的钻遇率。PWD通常是指APWD(随钻环空压力测量),主要是用来测量钻进过程中环空中的压力<sup>[4]</sup>。目前,斯伦贝谢Anadrill的StethoScope多功能地层压力随钻测量服务既能在钻井过程中准确有效地测量环空压力,又可以测量地层压力,可以直接提供孔隙压力和流体流量数据用于确定流体类型及界面。这为深水钻井早期井涌监测,避免地层水气侵入井筒引发井壁坍塌、井喷等严重钻井事故提供了可能。

# 3 深水钻井技术展望

## 3.1 无隔水管套管钻井技术应用

随着海洋钻井的不断发展,套管钻井技术已经应用于海上表层钻进,代替隔水导管和表层套管,避免了海底表层沉积物松软、胶结性差、浅层流体等问题造成井壁坍塌、下套管困难、井控事故等钻井问题<sup>[5]</sup>。

深水钻井井身设计(套管下入深度和套管的层数)

是由浅层水、气流和地层的破裂压力/孔隙压力梯度来决定的,而套管钻井技术是可以缓解由浅层流体引发的钻井问题。套管钻进,第一次开钻可钻达深度为泥线以下 300~450 m,即第一根套管可下入到常规钻井中表层套管的深度。因此,第一根套管可起到隔水导管和表层套管的作用。从而套管下入深度由地层破裂压力/孔隙压力梯度决定而不是由浅层流体引发的钻井危险所决定,减少了下井套管的数量,降低不能用  $\varnothing 215.9$  mm 的套管完井(井眼过小)的危险<sup>[6]</sup>,简化了井身结构、减少作业程序、提高钻井效率、节约钻井成本。

套管钻井有两个主要的特点:①涂抹效应;②动态当量钻井液控制,它降低了钻井过程中钻井危险的发生。

涂抹效应就像一个泥铲,套管单方向旋转形成旋转离心力场,粉碎的岩屑在较小的环空内沿着井壁表层向上运输,岩屑颗粒镶嵌在井壁的表面形成天然的封闭层。这个封闭层的不透水性较专用钻井液造壁效果更好,涂抹效应有利于钻井液流失的控制和井筒的稳定性。

改善当量钻井液密度控制,或者叫做动态钻井液重量控制,套管与井壁之间的环空较小,这样更有利于井眼净化,有利于通过调整钻井液的速度,控制当量钻井液密度。例如,典型的深水表层井筒为  $\varnothing 812.8$  mm、钻柱为  $\varnothing 165$  mm,而套管钻井中钻开  $\varnothing 812.8$  mm 的井眼,一般采用  $\varnothing 711.2$  mm 的套管柱,这样环空面积就减少了 75%,这对减少井筒的沟道效应有很明显的效果。沟道效应会引发浅层流体流进井筒而引发一系列的钻井问题。

### 3.2 无隔水管钻井液回收技术的应用

无隔水管钻井液回收钻井技术就是在钻井过程中不采用常规隔水管,钻杆直接暴露在海水中,依靠安装在海底井口的吸入模块实现井眼和海水之间的密封,岩屑和钻井液经一条小直径回流管线返回钻井平台。通过控制海底泵系统保证环空顶部压力等于海水压力,从而可以有效地控制海底泥面以下井眼的环空压力、井底压力,更好地匹配地层压力和破裂压力之间狭小的间隙,实现安全钻井作业,可以解决目前深水钻井遇到的诸多问题。

该技术属于双梯度钻井技术范畴,该技术的应用使得地层孔隙压力与地层压力相对变宽,钻井液应用范围变大,简化井身结构(减少套管数量),避免由隔水管破坏而引发的钻井事故,为控制压力钻井提供了技术支撑。

### 3.3 控制压力钻井技术的应用

该技术是通过控制回压、流体密度、流体流变性,环空液位、水力摩阻和井眼几何形态的综合控制,使整个井筒的压力维持在地层孔隙压力和破裂压力之间,进行平衡和近平衡钻井,有效控制地层流体侵入井眼,减少井涌、井漏、卡钻等多种钻井复杂情况,非常适合孔隙压力和破裂压力窗口窄的地层作业。据相关报道,控制压力钻井对井眼的精确控制可以克服 80% 的常规钻井问题,缩短 NPT(非钻井时间)20%~40%,单位进尺平均成本井底 19.5~39 美元。

控制压力钻井技术(MPD)控制的变量:①控制井口压力,通过控制井口回压或者在井筒的某一位置安装泵,来调整井底压力;②改变环空压耗,正常钻进时,井底压力是钻井液液柱压力和环空压耗之和,通过改变钻井液流态、流速和环空间隙(通常是改变钻杆组合的外径)就可以控制环空压耗;③改变钻井液参数,通过改变钻井液密度、黏度、排量等调整环空压耗。

### 3.4 深水智能钻井技术

陆地油气田开发已进入中后期,油气勘探开发逐渐转向海洋方向,而海上油气储量的 90% 都赋存于水深超过 1 000 m 的地层中,随着水深增加,钻井环境更复杂,作业条件更恶劣。然而,随着新钻井技术、新材料技术、检测控制、微电子技术、通信和计算机、机器人和超微加工等技术的进一步发展,智能钻井新技术必将应运而生<sup>[7]</sup>,为复杂的深水油气勘探开发提供条件。随着智能钻井技术的不断成熟,未来钻井技术将向更加精确、高效、低成本、环保和安全方向发展。

## 4 结论

随着油气勘探开发不断向深海进军,浅水钻井技术已不能满足深水钻井的要求,远海恶劣的环境条件以及复杂的深水地质条件,都使得深水钻井面临更大的难题和挑战,有可能导致深水钻井失败和引发严重的钻井事故。随着对深水钻井技术不断地探索研究,喷射下导管技术、动态压井技术、深水钻井液技术、随钻测井技术等逐渐完善成熟,深水油气勘探开发进程已经加速。无隔水管套管钻井、无隔水管钻井液回收、控制压力等钻井技术已初步尝试应用于深水钻井,缓解甚至解决了一些深水钻井难题。随着深水钻井新技术、监测控制、通信、机器人等技术不断成熟完善,智能钻井技术必将主宰未来的石油产业。

参 考 文 献

[1] 徐荣强,陈建兵,刘正礼,等.喷射导管技术在深水钻井作业中的应用[J].石油钻探技术,2007,35(3):19-22.  
[2] 胡海良,唐海雄,汪顺文,等.白云6-1-1井深水钻井技术[J].石油钻采工艺,2008,30(6):25-28.  
[3] 杨进,曹式敬.深水石油钻井技术现状及发展趋势[J].石油采油工艺,2008,30(2):10-13.  
[4] 殷志明,陈国明,许亮斌,等.采用双梯度钻井优化深水井

井身结构[J].天然气工业,2006,26(12):112-114.  
[5] 石晓兵,郭昭学,聂荣国,等.海洋深水钻井隔水管变形及载荷分布规律研究[J].天然气工业,2004,24(3):88-90.  
[6] 高本金,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管钻井液回收技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.  
[7] 刘清友.未来智能钻井系统[J].智能系统学报,2009,4(1):16-20.

(收稿日期 2010-04-27 编辑 钟水清)