

# 无风险钻井关键技术及其应用

张卫东 何德磊<sup>1</sup> 袁文奎<sup>1</sup> 黄杰<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油华北油田分公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062552)

**摘要:** 各种先进设备和工具的广泛应用为提高钻井效率、降低钻井成本起到了积极作用,但是各种复杂钻井故障仍然是影响钻井周期和钻井成本的主要因素。无风险(NDS)钻井技术通过钻前详细计划、钻进过程中收集各种可用的实时信息,预测可能出现的风险,并给出减小或消除风险的措施,从而减少甚至消除钻井过程中故障的发生,实现无风险钻井的目标。介绍了NDS钻前风险预测、随钻风险发现、随钻风险决策及钻后风险评价技术,并对NDS技术在北海Mungo油田的实际应用进行了详细介绍。

**关键词:** 钻井; 风险分析; 随钻测井; 专家系统; 应用实例

**中图分类号:** TE249    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-0890(2010)04-0053-06

## The Key Drilling Technology with No Risk and Its Application

Zhang Weidong<sup>1</sup> He Delei<sup>1</sup> Yuan Wenkui<sup>1</sup> Huang Jie<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Huabei Oilfield, CNPC, Rengiu, 062552, China)

**Abstract:** Although various advanced equipments and tools have been used to improve drilling efficiency and reduce drilling cost, drilling recycle and cost are still affected by some complex drilling accidents. The no risk drilling (NDS) technique through detailed pre-drilling plan, collection of real-time information during drilling can predict potential risks and provide the measures to solve the problems. Therefore, accidents were reduced or eliminated during drilling. According to the procedure of NDS, the pre-drilling risk prediction, risk finding during drilling, risk shooting while drilling and after-drill risk evaluation were introduced. The application of NDS in Mungo Oilfield in North Sea was provided.

**Key words:** drilling; risk analysis; logging while drilling; expert system; application example

石油勘探开发中,主要从两方面来降低钻井综合成本:一是通过研究各种钻具在井下的力学与几何变形特性,了解各种操作参数和钻具组合参数等对钻井作业的影响规律,进而提高钻井效率;二是从硬件设备入手,研制和开发工具或设备,来加快钻井速度,从而达到提高钻井综合效益的目的<sup>[1]</sup>。这两方面的努力在过去几十年的世界油气资源开发过程中发挥了巨大作用,但是井下复杂情况或故障依然是钻井成本的主要影响因素,尤其是在复杂地层、海洋深水、极地和沙漠等高投入、高风险钻井环境下。预先了解潜在的风险,并提出减小或消除不同潜在风险的措施,可以从根本上实现无风险钻井的目标,

无风险(no drilling surprise, NDS)钻井系统的出现和日益完善为实现这一目标创造了条件。为此,笔者介绍了NDS的相关关键技术和现场应用实例,以对我国在该技术方面的发展有所启示。

**收稿日期:** 2010-03-01; **改回日期:** 2010-05-28

**基金项目:** 中国石油华北油田分公司 2007 年院所合作科技项目“勘探开发前缘技术研究”(编号:HBYT-YJY-2008-JS-6)部分研究内容

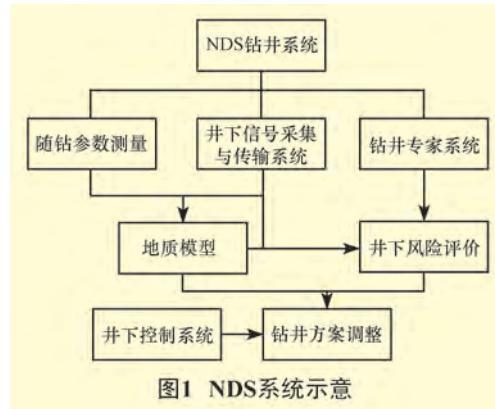
**作者简介:** 张卫东(1968—),男,山东平阴人,1990年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,2002年获油气井工程专业工学硕士学位,副教授,硕士研究生导师,主要从事石油天然气工程方面的教学与研究工作。

**联系方式:** (0546)8394665, zhangweidong10@sohu.com

## 1 NDS 技术概述

NDS 技术首先由 BP 公司和斯伦贝谢公司合作发起研究,是国外 21 世纪初新兴起的一项钻井技术<sup>[2]</sup>。该技术融合了这两家公司开发的最新技术,将大量的钻井作业经验与斯伦贝谢公司先进的工具和技术广泛结合起来。由于应用的目的性很强,故得以快速发展,并通过了现场检验。

NDS 技术的核心思想是及时将准确的信息传递给需要的人,即提供一套完整的工作框架和工艺方法,将多领域的专家、先进的预测软件、钻井数据库软件和最新的硬件集成在一起,按照以交流和协作为重点的结构化方法进行工作,对各种井下风险进行识别、分析、预防和控制。NDS 技术的目标是针对各种不同的特定条件量身定制钻井方案,重点解决井筒压力和井壁稳定性的控制问题,消除井下意外事故,降低钻井成本。NDS 系统的主要环节如图 1 所示<sup>[3]</sup>。



## 2 NDS 的关键技术

信息交流是 NDS 技术的关键所在,它使有关专业人员及时获得相关信息以做出计划与决定。这一过程需要将人、软件工具及数据同步化与可视化技术结合起来,将可以获得的数据转化为有用的资料,来优化钻井作业过程。该过程首先是收集资料准备钻前计划,并找出做钻井决定所需要的信息;然后考虑如何及时获得会对决定有影响的基本测试数据;此后,在钻井过程中应用特殊的软件解释实时获得的测试数据,这些软件还可以帮助工作人员更快速、更有效地分析数据;最后,利用最新获得的信息不断修改钻井计划。概括起来,NDS 系统的工作流程主要包括钻前设计、随钻校正、随钻决策和钻后研究等

4 个阶段<sup>[3]</sup>。其主要的关键技术也可以按照这 4 个过程分为 4 个大的方面:钻前风险预测技术、随钻风险发现技术、随钻风险决策技术和钻后风险评价技术。此外信息交流技术也非常重要。图 2 所示为 NDS 过程的主要步骤<sup>[4]</sup>。



### 2.1 钻前风险预测技术

钻前风险预测是指在钻井前对钻井过程中可能出现的各种风险进行提前预测,以便及早找出解决方案。NDS 技术中的钻前风险预测主要是通过 WellTRAK 知识系统、RiskTRAK 数据库、地质力学模型以及与邻井进行资料对比等进行的。

**WellTRAK 知识系统** 该系统是斯伦贝谢软件服务公司 GeoQuest 推出的一套系统,可以用来追踪和报告钻井信息。应用 WellTRAK 程序可以捕获钻井数据和信息,技术人员还可以利用该系统对实际钻井行为与原先计划进行对比,从而能够很快地确定意外的风险和避免不必要的损失<sup>[5]</sup>。此外,利用 WellTRAK 知识系统,钻井团队成员还可以在网络上收发和阅读钻井报告,能够更好地管理钻井数据,极大地提高工作效率。

**RiskTRAK 数据库** NDS 程序使用 RiskTRAK 钻井风险数据库系统收集钻井历史上的危险信息。钻井故障在 RiskTRAK 系统中是指造成时间浪费的钻井问题,它为下一步的钻井作业提供了宝贵信息。有时,可以在“无意外”的情况下完成钻井作业,这是因为钻井过程中所遇到的一些小问题在发展成浪费时间的故障前就得到了纠正。当钻井作业中有问题发生,或问题被发现并避免后,现场技术人员就按照其类型(如钻具阻卡、井眼失稳、钻井液循环漏失、井眼不清洁或地层孔隙压力失衡等)将问题归入数据库中。这些问题可能与特定的深度、地质年代、BHA 以及某一钻井作业有关,因此也要收集这些信息以便与邻井进行比较。一次故障发生后,钻井作

业人员要对其原因、任何被注意到的先兆以及如何避免这一故障进行讨论。将那些建议的预防措施输入RiskTRAK系统。为了将来便于参考,还要对问题的严重性以及这类问题再次发生的概率做出估计。事故发生的后果、采取的补救措施以及补救中使用的装置都要分类记录。

**地质力学模型** 该模型是利用计算机描述油藏或盆地特定地层剖面应力和岩石力学特性的数值模型<sup>[6]</sup>,该模型由地层顶部、断层、岩石强度信息、孔隙压力、应力大小和方向等各种参数的地层剖面组成,并同区域地层和地震图像相连接。地质力学模型可以用来预测地层孔隙压力与地层岩石强度。大量事实已经证明,在制定钻井方案之前构建地质力学模型并在钻井过程中实时修正,可减少计划外钻井费用,加快了解、认识储层的进程,特别在费用高、复杂井的安全钻进方面是非常有价值的。

**与邻井资料对比** 邻井的钻井记录能指示可能的危险时段,并提供井下故障过程及其原因,还可以提供钻井力学方面的信息。邻井的井底测量数据提供了地层压力和丰富的地层物性方面的资料,其中包括岩石物性资料(如渗透率、孔隙度、应力的大小和方向以及岩石强度等),这些测量数据可以补充岩心分析得到的资料,提供更多的有关岩石强度及物性方面的信息。

## 2.2 随钻风险发现技术

NDS技术的关键是实时获取钻井工程信息及地质信息。钻进过程中可能会遇到各种各样难以预料的风险,如何在钻进过程中有效发现这些未知风险,对成功、快速、高质量的完成钻井至关重要。

钻进过程中风险的发现主要是通过随钻测量工具和实时监控软件。通过连续监测和记录井下和地面温度、压力与流量等工程参数的变化,及时发现各种参数的异常变化趋势,揭示井眼中发生的情况,预测可能遇到的风险,并在有关参数超出界限时提醒相关人员采取措施,避免井下事故的发生。

利用随钻参数测量技术获得的资料主要用于优化钻井作业和地层评价。在钻井过程中,随钻测量数据可以用于早期探测高压层,将井眼精确地导向目标地层,确定压力梯度及流体界面,并通过实时调整钻井液密度,有效提高机械钻速,优化下套管位置,更加安全地钻入高压层段。随钻测量技术包括随钻测量(MWD)、随钻测井(LWD)、随钻地震(SWD)以及随钻压力监测等。

### 2.2.1 随钻测井技术

随钻测井资料是在钻井液滤液侵入地层之前或侵入很浅时测得的,更真实地反映了原状地层的地质特征,可提高地层评价的准确性。随钻测井在钻井的同时完成测井作业,减少了井场钻机占用时间,从钻井—测井一体化服务的整体上降低成本。在钻大斜度井或在特殊地质环境(如膨胀黏土或高压地层)下钻井时,电缆测井困难或风险增大以至于不能进行作业时,随钻测井是唯一可用的测井技术<sup>[7]</sup>。

随钻测井资料用于优化钻井作业和地层评价,其测量资料更接近原始地层。用这些资料进行油水层划分和地层评价准确率高、效果好。在深井、大斜度井和钻机日费用高、钻速高(松软地层)的情况下,使用LWD的地层评价总成本低于使用电缆测井的地层评价总成本。

### 2.2.2 随钻地震技术

随钻地震(SWD)技术是一种利用钻井过程中钻头破岩时的振动作为震源,用地面检波器排列接收信号进行地震测量的井中地震技术。SWD已经有很长的应用历史,在我国,1996年在江汉油田就进行了一次随钻地震试验<sup>[8]</sup>。

斯伦贝谢公司的SWD技术主要有Drill-Bit Seismic和SeismicVISION两种测量方法(如图3所示)。Drill-Bit Seismic方法是20世纪90年代中期提出的。钻进过程中牙轮钻头破碎地层产生冲击波,经过地层反射到达地面,Drill-Bit Seismic方法就是利用地面接收系统采集反射到地面的波,以获取地层信息<sup>[9]</sup>。该方法适用于多种环境,但是,在软地层中、大斜度的井眼中或使用PDC钻头时,该方法是不可靠的。

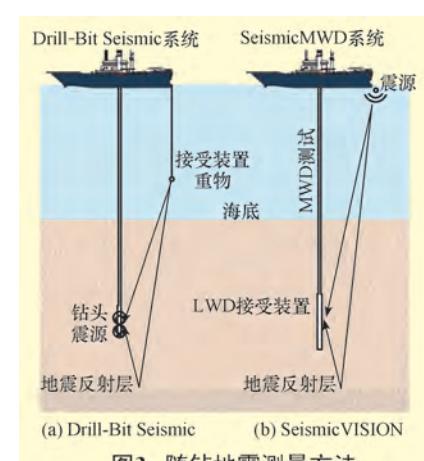


图3 随钻地震测量方法

SeismicVISION 是一种新的测量方法,在钻井过程中,将 SeismicVISION 的接收装置与 LWD 装置放在一起,使用地表震源,以获得随钻垂直地震剖面。MWD 钻井液脉冲遥测系统将实时数据传送至地面。在无法使用 Drill-Bit Seismic 方法的环境下,可以使用 SeismicVISION 测量方法,但是,如果进行实时测量,该方法要求 BHA 上的装置以及 MWD 记录发送装置必须就位。

SWD 技术能够实时提供钻头下部几百米内的地层信息,利用这些地层信息可以准确地计算地层孔隙压力,并能准确地预测异常高压地层的深度,为钻井过程中合理选择钻井液密度和确定套管合理下入深度提供科学依据;可进行地质导向,减小或消除钻进中的风险;能够为油田开发或储层描述提供更加翔实和有效的补充信息,对利用水平井开发薄产层能更好地发挥精确导向作用<sup>[10]</sup>。

### 2.2.3 随钻环空压力监测技术

应用随钻环空压力(annular pressure while drilling, APWD)监测技术,就不再需要根据地面压力建模软件对有关条件进行估计。APWD 用于监测井底钻井液密度,并将其保持在特定的范围内。该方法测量钻井泵静止时的钻井液等效静态密度(ESD)以及钻井泵工作时的钻井液等效循环密度(equivalent circulating density, ECD)。井内钻井液柱压力必须始终高于地层孔隙压力,而且要尽可能地高于控制井喷的最小压力,同时需要低于地层破裂压力。该技术可以通过 ECD 测量及时检测井底钻井液柱压力,提供较为准确的“压力窗口”,从而为改善钻井工艺提供强有力的支持。

APWD 还可以检测出井眼清洗问题,井眼的清洗问题可能导致管堵或其他问题,例如当 ECD 增大或减小时会造成漏失或井控方面的问题等。

## 2.3 随钻风险决策技术

在钻进过程中实时发现风险是 NDS 技术的一个重要方面,之后的关键是如何能够避免或解决这些随钻过程中发现的风险,其中的三维技术与斯伦贝谢协作与决策中心(iCenter)技术起到了关键作用。

### 2.3.1 三维技术

由于 NDS 过程高度依赖实时数据,这就要求必须把实时测量到的信息以合适的形式提供给团队中

需要的人,以便帮助他们更好、更快地做出决策。3D 可视化技术无疑是一个关键步骤,尤其在解释一些非常大而复杂的数据时,可视化几乎成了必不可少的技术。在钻井设计和施工的整个阶段,可视化技术是促进跨领域之间相互了解和交流的基础,有利于相关人员针对主要风险达成全面一致的解决方案。

三维地质建模技术集地震解释、构造建模、岩相建模、油藏属性建模和油藏数值模拟显示及虚拟现实于一体,为地质学家、地球物理学家、岩石物理学家和油藏工程人员提供了一个共享的信息平台。利用三维地质建模技术建立地质模型过程中,有关钻井和地质等方面的专家共同考虑其目标要求和将降低钻井成本措施等作为最佳钻井方案设计的起点,然后根据钻井的要求和相关资料来确定其简易程度并建立地层模型。

### 2.3.2 iCenter 技术

iCenter 技术是用于石油生产领域的前沿综合技术。它是一个能够显示地震数据、地质数据和测井记录等综合数据,进行实时钻井、生产监控以及复杂油藏目标优化的协同工作环境。该工作环境改善了数据间的交互处理功能,使用户之间的交流更直观,有效推进决策进度,为决策者、管理人员、技术专家、合作伙伴提供了一个能够直观地讨论问题、进行决策的协同工作平台。

iCenter 不仅仅是一个地震数据处理解释的系统,更是一个决策支持系统。这一协同工作环境的优点就是最大程度地利用企业在各地的专家资源,充分共享信息,以及更加直观、迅速地做出决策。

iCenter 各组成部分的配置是在分析用户需求并了解约束条件的基础上得出的。这些信息由用户提供,斯伦贝谢通过与公司内部/外部图形计算机和投影系统专家的讨论,制订出具体可行的方案,并保证能够实现无缝不失真大屏幕立体显示效果和支持大量应用软件。要实现上述目标,该系统应该至少包括计算机系统、投影系统、屏幕、房间和软件系统等 5 项基本组成部分。

**1) 计算机系统** 软件整合的基本平台,并且能够在图像尺寸、分辨率和流畅度方面满足应用的要求。

**2) 投影系统** 用来显示高清晰度图像。通过绑定几个并行投影显示通道,获得预定的大幅画面尺寸。显示的图像必须连贯和不失真。无缝图象融

合技术和平滑边缘与几何修正技术将保证观看者获得良好的视觉效果。

**3) 屏幕** 屏幕的品质、外观与细致程度对于系统成功安装同样具有重要的影响。

**4) 房间** 提供符合人体工程学轻松的工作环境,并支持多人使用和多工作模式。

**5) 软件系统** 能够充分发挥系统功能和优势,功能强大、操作简便的协作与决策应用软件。

iCenter 给钻井过程中不同领域的专家交流提供了一个非常好的平台,不管他们的专业领域是什么,不管他们身在何处,借助于 iCenter 技术,能够使他们的意见迅速汇拢,并最终达成一致,这对于实时解决钻井过程中遇到的各种问题意义非常重大。

## 2.4 钻后风险评价技术

钻后风险评价技术指在钻井工作完成后,根据钻井过程中出现的各种风险,利用一些数学模型对其进行评价。完钻后,需要对项目设计和执行阶段采取的一系列决策和相应的措施进行分析总结。对收集到数据库中的事件进行回顾学习,总结经验教训,评估项目效率和效益,并更新模型、数据库和专家知识库,以便将来应用到类似项目中。

## 3 NDS 技术应用举例

北海 Mungo 油田应用 NDS 技术分析和优选了井眼轨道。在确定井眼轨道设计的论证会上,NDS 团队在 1 d 内就形成了一致的最终方案,节省了过去需耗费数周的重复工作量;制订了详细的钻井计划方案并严格执行,使该井的钻井作业较为成功,没有发生井眼不稳定等井下复杂情况和故障。

Mungo 油田由 BP 公司开发,位于北海英国海域的东中央裂谷边缘,阿伯丁以东 230 km 处。产层是 Forties、Lista 以及 Maureen 地层,均为古新统的砂岩,围绕一个盐刺穿构造分布(如图 4 所示)。钻井作业中的风险包括可能发生的钻井液漏失、井眼扩大、钻井岩屑积聚以及某些井斜处的井眼崩塌。

计划钻的第一口井是 22/20-A11 井,位于 Mungo 油田东北部,它的目的层为由一口评价井发现的一套高质量的砂岩储集层。为了制订该井的钻进计划,工作人员使用了一个包含 Mungo 油田所有前期所钻井资料的数据库。另外,BP 公司与斯伦贝谢公司建立了 Mungo 油田的三维地质力学模型,可以用

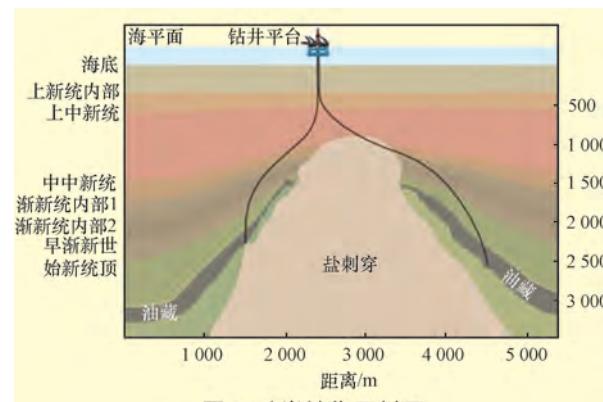


图4 砂岩储集层剖面

来解释岩石强度、盐刺穿构造附近的复杂应力转换,以及已知的地质稳定性风险,如断层、裂缝等。

技术人员通过实时钻井计划工具,使用了 RiskTRAK 系统及 Mungo 油田的三维地质模型。通过这种方法,他们讨论了 22/20-A11 井的多种井眼轨道,对井眼轨道进行了两次修改,并在 1 d 内形成了一致的最终方案。

技术人员通过 iCenter 合作会议设备进行交流。Mungo 油田钻井计划会议将来自不同专业的人集中在一起,其中包括钻井工程师、地质学家、地质力学专家以及油藏工程师。虽然每一个专业在描述钻井作业以及钻井目标时都有各自的规定和术语。但是,iCenter 环境能够使信息以可视化的方式进行展示,这样可以促进不同专业人员间的相互了解。参加 Mungo 油田钻井计划会议的工作人员使用 DrillViz 三维可视化应用软件来观察这个油田的地质模型,地质模型中包括了所有已经钻井及将要钻的井。该地质模型可以在三维空间中旋转展示,这样技术人员就可以对油田的每一部分进行观察。

DrillViz 展示了将要钻的井中可能存在的风险,这些风险由 RiskTRAK 数据库中的邻井信息获得,并被突出显示出来,如图 5 所示。从图 5 可以看

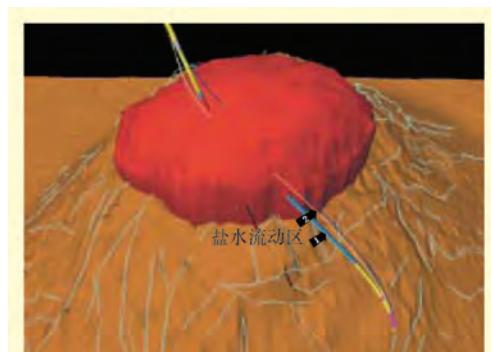


图5 Mungo油田22/20-A11井的轨道设计

出,第一条建议的井眼轨道(标 1)距离盐水流动区太近,可能引起早期钻井中的问题;第二条井眼轨道(标 2)已经避开了盐水流动区,并且由于该井眼轨道向上移动离开了刺穿构造,避开了破裂的始新统泥岩地层;但该井眼轨道太平,可能导致井眼清洗问题。

该井井眼轨道的设计采用了 Drilling Office 的定向钻井计划系统,该系统能够自动考虑钻井过程中的有关问题(如钻井的角度以及如何避免矛盾等)。NDS 工作组将新设计的井眼轨道放入了 Mungo 油田的地质力学模型中,并计算出了该井的钻井液密度范围。制订计划、进行有关的分析以及输入 DrillViz 总共需要约 1 h 的时间。技术人员对这一新的井眼轨道及其涉及的潜在风险进行了检验、讨论。井眼轨道中会出现一个长稳斜段,而这一情况在以前曾经引起过井眼清洗的问题,可能降低井眼稳定性。这一问题在以前的讨论中没有被注意到,但现在立即引起了工作组的注意。用 Drilling Office 第二次对井眼轨道进行了修正,将离开刺穿构造的点向下放,但仍然使其保持在中新统的泥岩中,这样,虽增大了井眼的角度,但最大程度地降低了发生井眼清洗问题的可能性。

DrillMAP 列出了需要监测的参数,评价了用于避免上述风险的措施。现场工程师将钻井过程中的观测值及其解释情况记录下来,并建议改进地质力学模型,以备将来钻井作业之需。制订详细的钻井计划并执行使该井的钻井作业非常成功,没有出现井眼不稳定的情况,该井顺利钻达目的层。

## 4 结束语

NDS 技术的发展仍处于起步阶段,远未成熟。NDS 技术的发展方向就是形成集风险分析、数据采集、传输与实时解释、井下监测和控制为一体的高度

集成化、信息化、智能化和自动化的钻井技术平台,有效避免井下风险,提高钻井效率,降低钻井成本。NDS 技术的市场应用前景非常广阔。

对于石油工业,恶劣的钻井环境仍然是一个挑战。在更深的水域、更深的井、更高的温度和压力、更窄的安全钻井液密度窗口内钻井作业的技术与有关的解释方法正在不断的进步中。NDS 技术虽然解决了今天的问题,但是,作业公司还会进一步提高要求;只有动态的、实时的过程才能继续发展并取得成功。

## 参 考 文 献

- [1] 夏焱,申瑞臣,袁光杰. NDS(无风险)钻井技术及展望[G]//第七届石油钻井院院长会议论文集编委会. 第七届石油钻井院院长会议论文集. 北京:石油工业出版社,2008:43-46.
- [2] 连志龙,周英操,申瑞臣,等. 无意外风险钻井(NDS)技术探讨[J]. 石油钻采工艺,2009,31(1):90-94.
- [3] 张恒,王广新,李瑞营. NDS(无风险)钻井技术在大庆油田应用可行性探讨[J]. 西部探矿工程,2009, 21(9):62-65.
- [4] Bratton T, Edwards S, Fuller J, et al. Avoiding drilling problems[J]. Oilfield Review, 2001,13(2):32-51
- [5] Clouzeau F, Michel G, Neff D, et al. Planning and drilling wells in the next millennium[J]. Oilfield Review, 1998,10(4):1-13.
- [6] Anwar Husen Akbar Ali, Brown T, Delgado R, et al. Watching rocks change—mechanical earth modeling[J]. Oilfield Review, 2003,15(2):22-39.
- [7] 张辛耘,郭彦军,王敬农. 随钻测井的昨天、今天和明天[J]. 测井技术,2006,30(6):487-492.
- [8] 张绍槐,韩继勇,朱根法. 随钻地震技术的理论及工程应用[J]. 石油学报,1999,20(2):67-72.
- [9] 杨进,谢玉洪,黄凯文. 随钻地震技术在异常高压地层预测中的应用[J]. 石油勘探与开发,2007,34(6):755-759.
- [10] Greenberg J. Seismic while drilling keeps bit turning to right while acquiring key real-time data[J]. Drilling Contractor, 2008,64(2):44-45.

〔审稿 王宝新〕

## 胜利油田应用不留塞封堵作业技术获得成功

水泥挤注不留塞封堵作业与常规封堵技术相比,具有封堵强度高、作业成本低、有效期长、施工周期短、封堵后不需钻水泥塞、不会对套管造成损伤等特点,特别是可以解决以往小眼井、大斜度井、侧钻井和水平井等因钻塞不均匀易造成工程事故的难题。

莱 14-6 井位于济阳坳陷东营凹陷中央隆起带莱 15 断块,是一口试油井,属于老井试油。为了便于后期采取措施进行储层改造,采用了高强度调和水泥浆不留塞工艺技术。施工过程中,制定了周密的保障措施,优化了施工设计,并严格控制水泥浆密度、各种添加剂的加量、泵压等,及时调整参数,采用等时间间歇挤压法,使不留塞封堵工艺施工一次成功。不留塞封堵工艺的成功实施,为该技术的应用提供了宝贵的经验,也为试油作业井规避钻塞风险提供了途径。