

连续油管钻井技术研究与应用进展^{*}

苏新亮¹ 李根生¹ 沈忠厚¹(中国工程院院士) 岳春宏²

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室 2. 西南石油大学机电工程学院)

苏新亮等. 连续油管钻井技术研究与应用进展. 天然气工业, 2008, 28(8): 55-57.

摘要 连续油管钻井技术是20世纪90年代初迅速发展起来的一项低成本高效率的钻井技术, 在井深1 000 m以内的井, 过油管重入钻井和欠平衡钻井等方面具有独特优势, 被认为将是替代常规钻井方法的钻井新技术。在回顾连续油管钻井技术背景和发展现状的基础上, 分析了连续油管的可靠性、连续油管钻井流体摩擦压力损失和连续油管钻井携岩技术、连续油管钻井关键技术理论研究进展。介绍了连续油管钻井装备和工具的最新发展和应用, 阐述了连续油管钻井技术的主要应用领域和微小井眼连续油管钻井技术发展现状, 对连续油管钻井技术应用前景和发展方向进行了展望。

关键词 连续油管 钻井 设备 工具 应用

连续油管技术最早可以追溯到1944年6月盟军于“诺曼底登陆”之前进行的跨越英吉利海峡的管线工程(Pipe Lines Under The Ocean, PLUTO)。自20世纪90年代初在美国、加拿大、法国相继试验成功以来, 连续油管钻井技术获得了迅猛发展和越来越广泛的应用, 成为国外近年来大力研究和发展的热门钻井新技术之一。经过十几年的发展, 连续油管作业机不断改进, 连续油管的使用寿命和抗腐蚀性明显提高和改善, 高强度大直径连续油管逐步投入应用, 连续油管井下钻具组合、小直径井下电动机和定向钻井工具取得重大进展, 进一步拓展了连续油管钻井能力, 提高了连续油管钻井技术水平。

一、连续油管钻井技术发展概况

早在1976年, 加拿大的Flex Tube公司就使用 $\varnothing 60$ mm连续油管作为钻柱在加拿大Alberta东南部地区钻浅气井。20世纪80年代中后期, 随着连续油管制造工艺和可靠性的提高, 连续油管钻井技术迎来了新的发展机遇。1991年, 斯伦贝谢等公司分别在法国和德克萨斯西部取得成功。此后, 连续油管钻井技术迅速从技术经济可行性评价阶段进入到商业化应用阶段, 被认为将是替代常规钻井方法的钻井新技术^[1]。

据ICoTA(International Coiled Tubing Associ-

ation)统计, 2001年世界在用连续油管作业机为850台, 2004年增至1 050台, 截至2005年1月, 世界在用连续油管作业机数量已经达到1 182台, 其中大部分集中在北美地区。连续油管钻井数量迅速增长, 1991年钻了3口井, 1992年11口, 1993年约25口, 而到1997年猛增至600余口。目前, 全世界使用连续油管钻井有7 000余口, 且每年增加750~850口。连续油管钻井技术具有许多独特的优点^[2-3]: 能够不关井作业, 实现真正欠平衡钻井; 提高钻井自动化程度, 降低人力需求和作业成本; 连续油管可内置电缆, 改善信号的随钻传输, 实现完全的随钻测井, 有利于实现闭环钻井。但连续油管钻井技术也存在一些局限性, 主要表现在: 施加钻压困难, 钻水平井时水平延伸能力有限; 所钻井眼直径较小, 井眼清洗困难; 连续油管疲劳寿命较低等。

二、连续油管钻井技术基础理论研究进展

在连续油管钻井技术理论研究方面, 连续油管可靠性研究、连续油管钻井流体摩擦压力损失研究以及井眼清洁参数敏感性分析和钻屑有效携带研究等方面取得了一系列成果, 为连续油管钻井技术的应用提供了理论指导。

1. 连续油管可靠性研究

连续油管可靠与否决定了连续油管钻井作业的

^{*} 本文受到国家高技术研究发展计划(863计划)项目和CNPC应用基础研究计划项目(编号: 06A20201)的资助。

作者简介: 苏新亮, 1978年生, 博士研究生。地址: (102249)北京市东城区安德路16号洲际大厦中国石油天然气股份有限公司总裁办秘书处。电话: 13911504918。E-mail: suxinliang@petrochina.com.cn

成败。国内外学者通过理论计算和实验模拟,对连续油管卷绕弯曲寿命、摩阻力、连续油管在水平井中的稳定性等问题进行了研究,建立了连续油管疲劳寿命预测模型、井中弯曲度的力学模型、连续油管在水平井中的稳定性分析方法等^[4-6]。

2. 连续油管钻井流体摩擦压力损失研究

连续油管钻井流体摩擦压力损失研究是连续油管钻井水力学研究的一个重要方面,是连续油管钻井设计的基础。钻井液流经卷绕在卷筒上的连续油管时将会产生 Dean Vortices 二次涡流,其压降远大于流经直管中的压降,常规流体压降计算方法已经不能适用于连续油管钻井中。T. R. Wright 等^[7]对牛顿流体在连续油管中的摩擦压力损失进行了研究,并给出了考虑连续油管表面粗糙度的流体压力损失预测方法。Y. Zhou、S. Jain 等^[8-9]开展了非牛顿流体在连续油管中的摩擦压力损失的理论分析、室内实验和数值模拟研究。S. Shah 等^[10]通过全尺寸室内实验研究了非牛顿流体在连续油管中的摩擦压力损失问题,并针对连续油管流体摩擦压力损失大的问题,开展了连续油管流体流动降阻特性的研究。

3. 连续油管钻井携岩技术研究

近几年来,连续油管钻井技术迅速发展,尤其是在水平井中,连续油管钻井作业面临着一个严峻的挑战,即钻屑的有效携带问题。因此,连续油管钻井清岩携岩研究成为国外一个热点研究问题。通过建立定量、半定量模型,对连续油管钻井岩屑携带影响因素进行了分析和研究。20 世纪 90 年代,两层水力模型和三层水力模型的提出,加深了对大斜度井和水平井岩屑运移物理本质和机理的认识,为连续油管钻井水力参数设计奠定了理论基础。岩屑运移的室内实验研究为连续油管钻井现场应用提供了必要的实验依据。目前,国内在以小井眼小环空为主要特点的连续油管钻井携岩理论研究方面未见文献报道,国外虽在连续油管钻井技术理论研究方面处于领先地位,但在连续油管钻井携岩理论研究方面也还很不完善。

三、连续油管钻井装备及工具

1. 连续油管作业机

连续油管作业机是连续油管钻井的核心装备,包括动力系统、控制系统、井控系统、注入头和连续油管卷筒等 5 大部分。按照作业能力可以分为 1 000 m 作业机、2 000 m 作业机和 4 500 m 以上作业机三类。目前,连续油管作业机已经发展到第三

代。2003 年,Technicoil 第三代连续油管作业机率先在加拿大 Alberta 地区投入使用。该作业机使用 $\varnothing 73.0$ mm 连续油管钻井,钻深可达 3 000 m,日钻 2.5 口井。Ensign 公司正在制造的 ADR-1000 型第三代连续油管作业机,作业连续油管管径为 88.9 mm,预计不久将投入使用。

2. 连续油管

连续油管是实现连续油管钻井的载体,连续油管管径及其强度是决定连续油管钻井技术应用范围的主要因素之一。目前投入商业应用的连续油管外径从 60.3~168.3 mm 不等,钻井用连续油管外径主要为 60.3 mm 和 73.0 mm。随着钛合金钢等复合材料的开发和应用,大大改善了连续油管的强度和可靠性。抗腐蚀性连续油管的应用,为含有 H_2S 和 CO_2 等酸性气体环境油气藏开发提供了一种安全手段。高强度、大直径连续油管的使用拓展了连续油管钻井技术应用领域,推动了连续油管钻井技术的发展。

3. 井下工具

近年来,随着连续油管钻井技术受到越来越多的关注,各种连续油管井下工具得到了长足的进步和发展。绳索式导向井底钻具组合为连续油管欠平衡钻井、短半径水平井和过油管侧钻提供了一种安全、经济的技术手段。XL 技术公司正在研究的连续油管电动井下钻具组合为连续油管欠平衡钻井、实现连续油管闭环电动钻井进行了有益的尝试。美国 AnTech 公司研制的 COLT 连续油管井底钻具组合采用可间断或连续转动电驱式定向装置控制钻头方位,并能将井底情况、钻具工作状态和地质资料实时反馈给钻井工作人员。Weatherford 研制了一套新型 TrendSET 电磁随钻测量系统,该系统不仅可以提供随钻井下参数,还可以处理空气钻井中出现的高冲击和高振动问题。目前,该系统已在加拿大 Alberta 南部的一口连续油管浅定向井钻井中进行了第一次商业应用。

四、连续油管钻井技术主要应用

经过十几年的发展,已经证明具有经济技术可行性的连续油管钻井应用主要包括 4 个方面:深度在 1 000 m 以内的新井、对安全很敏感的作业、过油管重入钻井和欠平衡钻井。

1. 连续油管新钻直井

连续油管新钻直井一般应用于井深小于 1 000 m 的浅层油气藏开发,目前主要用于加拿大 Alberta

地区。大部分井均使用 $\varnothing 73.0$ mm 连续油管 and $\varnothing 165.1$ mm 钻头钻井,采用 $\varnothing 114.3$ mm 或 $\varnothing 139.7$ mm 套管固井完井。由于连续油管钻井速度快,连续油管作业机灵活轻便、动迁性能好,该地区连续油管新钻直井成本比常规钻井降低 $1/3$ 左右。

2. 连续油管重入钻井

连续油管重入钻井是连续油管钻井应用的一个重要方面,包括直井加深作业和侧钻水平井及多分支井作业。连续油管直径小可进行过油管侧钻,不需起下油管,从而显著地节约钻井成本,适应老井重入钻井这一潜在的大市场。1995年第一口连续油管侧钻水平井在 House Mountain 油田取得成功,该井使用 $\varnothing 60.3$ mm 连续油管钻井,井眼直径为 98.4 mm,水平位移为 300 m^[11]。从1995~2004年,阿拉斯加地区连续油管侧钻井数量多达500余口,水平长度为 $300\sim 900$ m,井眼直径为 $69.9\sim 104.8$ mm,平均成本比常规钻井降低 $1/2$,取得了良好的经济效益和社会效益,获得了巨大的成功^[12]。随着连续油管钻井工艺水平的提高和配套工具的完善,连续油管侧钻技术不断创造新的纪录,如第一口连续油管超短半径侧钻水平井,造斜率达 $100^\circ/30$ m,完钻后产量提高 800% ^[13],最深的连续油管侧钻井已达 $5\,593$ m(测深)^[14]。

3. 欠平衡连续油管钻井

连续油管不需要接单根,且井口压力控制可达 70 MPa,能够实现真正的欠平衡作业。欠平衡连续油管钻井对于压力递减储层、衰竭产层和酸性气体井最为理想、有效,有着巨大的潜在市场。2003年,BP公司在阿联酋 Sajaa 气田取得了巨大的成功,通过欠平衡连续油管侧钻水平分支井,大大提高了产量和采收率,在一些井中,产量提高了约4倍。同样在该气田,斯伦贝谢公司欠平衡连续油管钻井单次进尺超过 $2\,743$ m。斯伦贝谢公司通过在阿拉斯加、中东、委内瑞拉等地区成功连续油管钻井经验正在向全世界推广连续油管钻井技术。

4. 微小井眼连续油管钻井技术

1994年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos Laboratory, LANL)提出微小井眼连续油管钻井($34.9\sim 60.3$ mm)的概念,2003年美国能源部启动微小井眼(Micro Hole)连续油管钻井技术可行性研究计划,在此基础上,2005年又资助第二批微小井眼钻井技术研究计划,用3a的时间资助10个新的研究项目,总投资1450万美元,预期使新型微小井眼钻井技术(井眼直径小于 88.9 mm)能达到商

业化应用水平。在美国能源部的资助与推动下,微小井眼连续油管钻井技术已进入现场先导性试验阶段。微小井眼连续油管钻井技术的巨大优势也得到了国内众多专家的关注,李根生教授等已经开始对微小井眼连续油管钻井技术的应用基础理论及其技术经济可行性进行了探索和研究。

五、前景展望

当今世界石油钻井技术主要向着有利于发现新油气藏、提高油气田采收率和自动化钻井的趋势发展^[15]。连续油管钻井技术自动化程度高,能够有效降低钻井成本和对作业环境的损害,被认为是21世纪油气钻井方法的一项革命性新技术,是一条利用钻井手段和方法提高油气采收率的新途径,在小井眼、老井重入和欠平衡钻井中应用前景广阔。可以预见,连续油管钻井技术必将成为未来钻井行业的主导技术之一。目前,我国各油气田已进入开发中后期,降低作业成本,规避作业风险已成为油气田开发的首要考虑因素,并且老井挖潜增效、难动用储量开采急需解决,浅层石油天然气、煤层气资源丰富,这些都为连续油管钻井技术提供了广阔的发展空间和潜在市场。因此,我国开展和推广连续油管钻井这一低成本高效的钻井技术的时机已经成熟,必将产生良好的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- [1] CROUSE P C, LUNAN W B. Coiled tubing drilling-expanding application key to future[C]. Houston, Texas: SPE 60706, 2000.
- [2] 陈立人, 张永泽, 龚惠娟, 等. 连续油管钻井技术与装备的应用及其新进展[J]. 石油机械, 2006, 34(2): 59-63.
- [3] EIDE E, BRINKHORST J, VOKER H, et al. Further advances in coiled-tubing drilling[J]. Journal of Petroleum Technology, 1995, 47(14): 403-408.
- [4] 朱小平. 连续油管在弯曲和内压共同作用下的疲劳寿命分析[J]. 钻采工艺, 2004, 27(4): 73-75.
- [5] YUNFENG YI, ALAN XIAOJUN, HE L D SALEM, et al. An advanced coiled tubing simulator for calculations of mechanical and flow effects; Model advancements, and full-scale verification experiments[C]. Houston, Texas: SPE 89455, 2004.
- [6] 刘亚明, 于永南, 仇伟德, 等. 连续油管在水平井中的稳定性分析[J]. 石油大学学报, 1999, 23(3): 57-59.
- [7] WRIGHT T R, Alexander Sas-Jaworsky II. Coiled tubing handbook [M]. 4th ed. Houston: Gulf Publishing Company, 2005.

- [8] ZHOU Y, SHAH S N. Non-newtonian fluid flow in coiled tubing: theoretical analysis and experimental verification [C]. San Antonio, Texas: SPE 77708, 2002.
- [9] JAIN S, SINGHAL N, SHAH S N. Effect of coiled tubing curvature on friction pressure loss of newtonian and non-newtonian fluids-experimental and simulation study [C]. Houston, Texas: SPE 90558, 2004.
- [10] SHAH S N, KAMEL A, YUNXU ZHOU. Drag reduction characteristics in straight and coiled Tubing-An experimental study [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 53(3/4): 179-188.
- [11] STILE E K, DEROEUN M W, TERRY I J, et al. Coiled tubing ultrashort-radius horizontal drilling in a gas storage reservoir: a case study [C]. Charleston, West Virginia: SPE 57459, 1999.
- [12] VENHAUS D E, BLOUNT C G, DOWELL K E, et al. Overview of the kuparuk CTD program and recent record-setting operations [C]. Texas, USA: SPE 100210, 2006.
- [13] PRUITT R C, LESLIE SMITH B. Sajaa underbalance coiled tubing drilling "Putting it all together" [C]. Houston, Texas: SPE 89644, 2004.
- [14] WRIGHT H J, ARISTIANTO B, GAN R G, et al. Coiled-tubing drilling reentry: case history from East Kalimantan [C]. SPE 89632, 2004.
- [15] 沈忠厚, 王瑞和. 现代石油钻井技术 50 年进展和发展趋势 [J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 1-6.

(收稿日期 2008-03-16 编辑 钟水清)