

文章编号:1000-5870(2003)01-0029-04

油气钻井技术展望

高德利

(石油大学石油天然气工程学院,北京 102249)

摘要:对油气钻井的关键技术、理论基础及多学科的交叉特点进行了阐述,指明了旋转钻井的发展趋势与内在动力,并对21世纪油气钻井技术进行了展望。分析表明,高压高温钻井、深井超深井钻井、特殊工艺钻井及三维可控与可视化钻井技术将是21世纪最重要的和最具发展前景的钻井技术系列。

关键词:石油工程;钻井技术;旋转钻井;发展前景

中图分类号:TE 21 **文献标识码:**A

引言

面向21世纪,全球油气资源的可持续利用问题将更加突出,使得钻井科技工作者在技术、成本及环保等方面面临许多新的挑战和技术难题,需要认真规划、研究并解决。旋转钻井在20世纪初就已经问世,迄今,它仍作为油气工业一种最主要的钻井方法而被广泛采用。纵观旋转钻井的发展历程,在技术和装备上的明显进步,还是最近20多年的事情。20世纪70年代末期出现了PDC钻头,这是钻井领域一个明显的进步标志;进入80年代,相继出现了随钻测量(Measurement While Drilling,简称MWD)仪器、可控井下马达以及水平井钻井技术等;90年代,随钻测井(Logging While Drilling,简称LWD)和随钻地震(Seismic While Drilling,简称SWD)等先进的测量技术不断投入商用,大位移井和复杂结构井钻井技术,以及连续柔管技术等得到迅速发展和应用。展望未来,由于石油工业上游成本差的驱动(亦即效益目标的驱动)以及人类对“健康、安全、环境”更高目标的追求,进入21世纪后,旋转钻井在技术上的积极发展势头仍将有增无减。

1 油气钻井的关键技术与理论基础

在钻井过程中,如何使钻头沿预置轨道钻进并保持井眼的稳定,如何优选钻头和钻井参数以提高机械钻速,如何实现钻井自动化与智能化以减少钻

进间断、提高钻井质量和效率,如何有效地保护储层以提高勘探开发效益,等等,这些都是钻井的关键技术或学术难题^[1]。

1.1 关键技术

(1) 井眼轨迹控制技术。它是采用合理措施(包括井下工具及测控系统等),强制钻头沿预置轨道破碎地层而定向钻进的技术。从实际需要出发,研究与开发先进的井下可控工具及测量和控制系统,是发展井眼轨迹控制技术的关键所在。

(2) 井眼稳定技术。该技术以地层的理化特性和力学不稳定性评价为基础,通过钻井液体系的匹配、合理钻井液密度的确定及井身结构和钻井工艺的优化设计等综合技术措施,使井眼保持稳定,以避免或减少漏、涌、塌、卡等井下复杂和事故。

(3) 高效破岩与洗井技术。它是提高机械钻速的关键技术,主要包括地层抗钻特性评价,钻头的研制或合理选型技术,高压射流破岩技术,水力与机械联合破岩技术,钻井参数优选技术,以及高效清洗与携带钻屑技术等。

(4) 油气储层保护技术。它是提高油气资源勘探与开发效益的关键技术之一,未来发展的重点是储层损害快速诊断技术,裂缝性储层的钻井液暂堵技术,探井储层保护技术以及欠平衡钻井技术等。

1.2 理论基础

(1) 钻井工程力学。用来研究和解决与钻井有关的流体力学和固体力学(钻柱力学、岩石力学)等

收稿日期:2002-01-02

基金项目:“十五”国家重大攻关课题资助(2001BA605A01)

作者简介:高德利(1958-),男(汉族),山东禹城人,教授,博士,博士生导师,从事油气钻井与完井工程研究。

问题。

(2) 钻井化学。用来研究和解决与钻井液和完井液有关的化学问题。

(3) 钻井工程地质。用来研究和解决由复杂地质环境所决定的地层钻井特性(如岩性、可钻性、各向异性、理化特性、地应力、压力特性及不稳定性等)的评估问题等。

1.3 交叉研究

上述关键技术的最终实现,还必须借助于材料、动力、机械、测量、控制及通讯(信息传输)等多学科的支撑作用,须组织不同领域的科技人员协同攻关,进行广泛的多学科交叉研究。

2 油气钻井技术发展趋势

一方面,随着油气勘探与开发事业的发展,必然对钻井的类型和技术内容提出新的要求并有更高的期望,从而促进钻井技术内容的不断创新;另一方面,由于钻井费用在石油工业勘探开发费用中占有50%~80%的份额,所以不断提高钻井技术水平和工程效率就成为石油公司降低勘探开发成本的主要着力点。概括起来讲,油气钻井技术发展的主要目标一是满足油气勘探开发的目标需求及提高勘探开发整体效益;二是提高钻井工程效率,降低钻井工程直接成本。

高压高温井、深井超深井、特殊工艺井(包括定向井、水平井、大位移井、复杂结构井、丛式井、欠平衡钻井及套管钻井等)、小井眼及随钻测量(包括几何、地质及力学的测量)等,都是适应不同的油气勘探开发需求而提出来的,这既是对传统钻井工艺的挑战,也是促使钻井技术不断发展的机遇和动力。

从现状和发展趋势来看,在进入21世纪后,旋转钻井仍将是油气工业最主要的钻井方法。旋转钻井又分为转盘旋转钻井、井下动力钻井及二者兼备的复合旋转钻井等不同的方式。转盘旋转钻井是整个钻柱处于旋转运动状态,同时带动钻头旋转钻进;井下动力钻井是井下动力钻具的转子带动钻头旋转钻进,转盘及整个钻柱可以不旋转;复合旋转钻井则是在使用井下动力钻具的同时又开动转盘旋转钻进。研究和实践证明,每一种旋转钻井方式都具有各自不同的钻井特性和优缺点。其中,复合旋转钻井方式在一定程度上兼备转盘钻和井下动力钻的优点,既可连续控制井眼轨迹和减少起下钻次数,同时还能提高机械钻速,是一种比较高效的可控钻井方式,今后应对这种钻井方式的系统动力学特性进行

深入研究与试验。

在20世纪80年代,随着定向井和水平井钻井技术的发展,导向钻井系统应运而生,具有弯外壳或偏心稳定器的井下动力马达(称之为“导向马达”)替代了直杆动力马达和弯接头。将导向马达与无线随钻测斜系统相结合,成功地实现了定向井和水平井钻井的几何导向。在此基础上,1989年开发成功第一代无线随钻测井系统,使定向钻井技术由几何导向发展到地质导向。为了有效地控制水平井的“切线段”和“水平段”或实现井眼轨迹的连续定向控制,在应用导向钻井系统实施井下动力滑动钻进的基础上,提出了复合旋转钻井方式。具有反向双弯(DTU)或单弯双稳定器的螺杆钻具组合,以及带偏心稳定器的涡轮钻具组合等,均在复合旋转钻井中获得成功应用^[2]。

无论是钻何种类型的油气井,还是采用何种旋转钻井方式,都存在着钻井效率问题,这也是钻井技术研究与发展的本质所在。影响钻井效率的主要问题可归结为钻进时的“间断”。目前造成“间断”的主要原因包括:接单根,更换钻头和底部钻具组合等,钻具失效,井眼失稳(漏、塌、喷、卡、阻),纠斜作业,非随钻测量,达不到最优决策,以及多层次井身结构等。为了减少钻进“间断”,必须不断研究和提高钻井整体技术和装备水平,尤其是信息化、智能化及自动化钻井技术的研究与开发需要不断加强。

在旋转钻井领域一直处于领先地位的美国为了保持其技术优势,1995年启动了一项重大的长期研究和开发计划^[3],称为“国家先进的钻井与掘进技术”(The National Advanced Drilling & Excavation Technologies,简称NADET)。前期的基础研究主要由政府率先资助,后期大规模的技术和产品研究与开发(R&D)则主要靠工矿企业投入巨额资金。通过该项研究与开发,预期在岩石破碎(高效破岩)、井眼净化(洗井)及井眼稳定等方面将有所革新(evolutionary),在钻头、岩石和井眼的测量与评价以及定向控制等方面有所革命(revolutionary)。该项计划的核心任务是要长期致力于一种智能钻井系统(The Smart Drilling Systems)的研究与开发。

智能钻井系统包括地面和井下两个组成部分。井下智能钻井系统一般由井下执行机构、测量系统及控制系统组成。在钻进过程中,井下执行机构的动作应根据控制系统的指令来完成,而控制系统所发出的指令则应根据设计井的要求及实钻测量反馈信号来确定。井下智能钻井系统的未来发展必将以

井下执行机构(底部钻具组合)的不断更新、测量系统的不断完善及自动化控制程度的不断提高为基本特征。井下智能钻井系统的最终发展目标是“地下钻掘机器人”,井下执行机构好比是机器人的手,控制系统好比是机器人的大脑,而测量系统则好比是机器人的眼睛和其他的感觉器官。这种地下钻掘机器人不同于一般的工业机器人,它必须能够在地下极其复杂的地质环境及非常恶劣的工况下进行有效的工作,必须能够精确探测前方和周围的地质环境及本身的状态,进而作出正确的分析和决策,并且能够自动适应所处的工作环境,沿着预定的路线或要求到达地下终极目标,胜利完成人类赋予它实地探察地下资源并加以开采的神圣任务。这种地下钻掘机器人,是自动化钻井的核心,将是多种高新技术和产品的进一步研发及其微型化集成的结果,代表着未来钻井与掘进技术的发展趋势,可望在 21 世纪前半叶实现。

3 面向 21 世纪的重要钻井技术

面向 21 世纪,老油田提高采收率及低压低渗和稠油储层的高效开发,特别需要研究和开发先进适用的特殊工艺钻井技术;高压高温油气藏,特别是高压高温天然气藏的钻探与开发,急需突破高压高温钻井的技术障碍;深部油气资源的钻探与开发,需要进一步研究和开发深井、超深井钻井技术,特别是在深探井的钻井效率上应加大科研与开发力度。

3.1 高压高温钻井技术

按国际通用概念,地温超过 150 °C 称高温,地层压力当量密度超过 1.8 g/cm³ 或须用超过 70 MPa 的井口装置时称高压,两者同时具备的井称作高压高温(HPHT)井。井底温度超过 220 °C,井底压力超过 105 MPa,称作超高压高温井。天然气层的温度较油层的高,地温梯度一般在 (3~5) °C/(100 m),5000 m 的井地温就可能达到 150~250 °C,故天然气井,特别是深层天然气井大都是高压高温井。高压高温井,特别是高压高温深探井,是钻井工程中难度最大、风险最高、工程费用也最高的一种苛刻井。例如,北海中央地堑的一口 5000 m 探井,钻井费用近 2000 万美元,开发井也不低于 1200 万美元;南海崖城 21-1 构造的 3 口探井,前两口并未钻达设计目的层,经济损失较大。

高压高温钻井技术是勘探开发高压高温油气藏的关键技术,也是代表 21 世纪钻井技术发展水平的重要标志之一。

3.2 深井、超深井钻井技术

深井是指完钻井深为 4500~6000 m 的井;超深井是指完钻井深为 6000 m 以上的井。深井、超深井钻井技术是勘探和开发深部油气等资源必不可少的关键技术。进入 21 世纪,我国西部及东部深层钻探工作将进一步加强,需要完成的深井、超深井数将进一步增加。我国深井、超深井比较集中的地区有塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地及柴达木盆地等。实践证明,由于深井、超深井地质情况复杂(诸如山前构造、高陡构造、难钻地层、多压力系统及不稳定岩层等,有些地层也存在高压高温效应),我国在这些地区(或其他类似地区)的深井、超深井钻井技术尚未过关,表现为井下复杂与事故频繁,建井周期长,工程费用高,从而极大地阻碍了勘探开发的步伐,增加了勘探开发的直接成本。我国在深井、超深井(主要是深探井)钻井方面的装备和技术水平现状与美国相比还存在较大的差距,平均建井周期与钻头使用量约为美国的两倍^[4]。

3.3 特殊工艺钻井技术

特殊工艺钻井主要包括定向井、水平井、丛式井、大位移井、复杂结构井及欠平衡钻井等,在世界范围内这些特殊工艺钻井技术的研究与应用已经比较成熟,并且仍在深入研究与试验,以刷新技术指标。目前,我国已基本掌握了定向井、水平井及丛式井钻井技术,但是,对复杂结构井、大位移井及欠平衡钻井的研究仍比较薄弱。

大位移井是指水平位移与垂深之比等于或大于 2 的定向井。钻大位移井的主要目的,就是通过大位移延伸实现对油气资源的高效勘探与开发。因此,大位移井钻井的关键技术指标是水平位移的长度。在海洋、滩海及特殊区域的油气勘探与开发工程中,应用大位移井钻井技术,可获得明显的经济和社会效益^[5,6]。

复杂结构井,主要是指多分枝井,可从一个主井筒内侧钻出若干个分枝井筒,并且各分枝井都能重入和投产。如果各分枝井都是水平井,则称为多分枝水平井。多分枝井既可钻新井,也可用于老井侧钻,但只适用于油气开发目的。由于多分枝水平井克服了常规水平井“一井一层”的不足,可实现“一井多层”,并共用一个主井筒及地面采油设施,钻井费用少,故单井产量高,提高采收率效果好。多分枝井与我国陆相沉积油层薄及油层多的特点相适应,对老油田稳产及低压低渗和稠油油藏的高效开发具有重要意义。

所谓欠平衡钻井就是人为地使井内流体的有效流动压力低于地层孔隙压力的钻井方式。在钻进过程中允许地层流体进入井内,循环出井,并在地面得到控制。欠平衡钻井有利于发现低压储层,避免对储层的损害,并且能够提高机械钻速,降低钻井费用,还可减少储层增产作业等。美国的调查结果表明,石油公司对欠平衡钻井能够有效地减轻或避免储层伤害最感兴趣,而技术服务公司则更关注欠平衡钻井的高效率。欠平衡钻井是一种高风险的钻井作业,容易引发井壁失稳和井喷事故,必须具有相应的套管程序和增加一整套地面控制装置,故所需费用一般较近平衡钻井要高。在“九五”期间,我国已经钻探了一批欠平衡井,但所用的主要装备是进口的,并且对欠平衡钻井的机理认识还不够深入。

3.4 三维可控与可视化钻井技术

实钻井眼轨迹通常是在复杂的三维地层空间中变化,看不见、摸不着,尤其是在丛式定向井、水平井、大位移井及复杂结构井等特殊工艺钻井中,如何有效地测量和控制实钻井眼的轨迹变化与稳定,甚至达到“看着打、随意打”的理想目标,是油气钻井向自动化和智能化方向发展的重要研究课题之一。经过不断地研究,在20世纪90年代国内外就已经掌握了井下动力导向钻井系统及可变径稳定器等技术。同时,国外又进一步研制成功了旋转导向钻井系统,例如:贝克休斯(Baker Hughes)的Auto Track RCLS系统,斯仑贝谢(Schlumberger)的Power Drive SRD系统,以及哈里伯顿(Halliburton)的Geo-Pilot系统,等等。这些旋转导向钻井系统,目前主要是为了满足大位移井等特殊工艺钻井的高技术需求而研制开发的。

为了使油藏沿井眼更好地裸露,须用复杂的“地质靶子”(如地层中不同岩层或流体的界面)代替简单的“几何靶子”,而这些“地质靶子”的精确位置往往是难以预测的。于是,国外发明了随钻地质导向技术,如随钻测井技术和随钻地震技术等,以便帮助识别“地质靶子”的位置,从而可将实钻井眼轨迹保持在适当轨道内,更快更好地到达地质勘探和油藏开发的目标。

利用计算机可视化技术,可以更好地理解大量井下测量数据(包括井眼轨迹参数、地层特性参数及近钻头力学参数等)及丛式井设计数据等,实现三维钻井的几何形态、地质状况及力学行为的“可视化”,为三维钻井的优化控制提供信息可视化帮助。

4 结束语

(1) 发展钻井科技,降低钻井成本,培养高素质钻井科技与管理人才,不断提高钻井整体水平,对于油气资源的高效勘探与开发具有十分重要的战略意义。

(2) 油气钻井的关键技术包括:高效破岩与洗井技术、井眼轨迹控制技术、井眼稳定技术及储层保护技术等,钻井的理论基础是力学、化学及工程地质等,而钻井关键技术的最终实现还必须借助于材料、动力、机械、测量、控制及信息传输等多学科的支撑作用。

(3) 复合旋转钻井方式兼备转盘钻和井下动力钻的优点,既可连续控制井眼轨迹和减少起下钻次数,又能提高机械钻速,是一种比较高效的可控旋转钻井方式,应对其加强研究。

(4) 进入21世纪后,高压高温钻井、深井和超深井钻井、特殊工艺钻井及三维可控与可视化钻井等技术系列仍是油气资源勘探与开发所需要的关键技术系列,并将得到进一步发展与提高。与国外先进水平相比,我国在这些技术方面整体上仍存在较大的差距,特别是在复杂结构井钻井、大位移钻井及旋转导向钻井等方面,几乎还是空白。

(5) 以减少作业间断、降低作业成本及增强技术竞争能力为目标,美国等西方发达国家正在致力于研究和开发一种“智能钻井系统”,它是未来自动化钻井与掘进技术的核心,最终的发展目标将是“地下钻掘机器人”。对此,应从我国经济社会发展需要及国际技术市场竞争的高度予以充分理解和重视。

参考文献:

- [1] 高德利. 浅谈油气钻井学术问题、技术现状与发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(3): 10 - 17.
- [2] 高德利, 等. 油气钻探新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [3] WASHINGTON, D. C. National Research Council: Drilling and Excavation Technologies for the Future[M]. National Academy Press, 1994.
- [4] 王关清, 陈元顿, 周煜辉. 深探井和超深探井钻井的难点分析和对策探讨[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(1): 1 - 7.
- [5] 李克向. 我国滩海地区应加快发展大位移钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(3): 1 - 9.
- [6] 张武攀. 我国第一口创世界记录大位移井—西江24-3-A14井总结[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(增刊): 1 - 30.

(责任编辑 陈淑娟)

Key words: dipole acoustic logging; azimuthally anisotropy; multi-scale analysis; simulated annealing algorithm
PROSPECTS FOR DRILLING TECHNOLOGIES/ GA O De-li. *College of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China, Beijing 102249/ Shiyou Daxue Xuebao, 2003, 27(1): 29 ~ 32*

The key technologies and theoretical basis for drilling oil and gas are discussed. The multi-discipline fields for drilling technology such as mechanics, chemistry, geology, materials, mechanical and control engineering are involved. The developing trend and inherent drive force for rotary drilling are pointed out. The merits of down-hole motor drilling in both rotary and sliding modes are described. Some important drilling technologies in the 21st century, including high pressure and high temperature (HPHT) drilling, deep or ultra-deep drilling, special drilling, steering and visualizing drilling in three-dimension space are elaborated.

Key words: petroleum engineering; drilling technology; rotary drilling; development trend
NUMERICAL ANALYSIS ON ROCK-BREAKING MECHANISM USING SWIRLING WATER JET/ WANG Rui-he and NI Hong-jian. *College of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2003, 27(1): 33 ~ 35*

The evolvement of rock damage impacted by swirling water jet was simulated with nonlinear finite element method and dynamic rock damage model. The decoupled method was used to solve the rock damage field. The numerical simulation results agree well with the test result, which indicates that the swirling water jet has relatively strong ability for breaking rock. The rock-breaking mechanism with swirl water jet is that the particle of jet has three-dimensional speed and sloping impact during rock breaking, and the interference of returning fluid on the damage of rock is small. So it is easy to produce and shear fractures on the surface of rock. In the process of rock breaking, an annular broken band is generated on the surface of rock at first, and then the annular band is developed along the radial and axial directions. At last, a hole with a protruding awl is formed at the bottom of broken rock. The swirling water jet technique for breaking rock has good efficiency and larger breaking area.

Key words: swirling water jet; rock damage rock breaking; mechanism; finite element method; numerical simulation

EXPERIMENT ON CUTTING OF SUPER-HIGH PRESSURE WATER JET/ YANG Yong-yin and LI Gen-sheng. *College of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying, 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2003, 27(1): 36 ~ 37*

Water jet cutting experiment on different kinds of target materials was conducted at super-high pressure using a domestic super-high pressure water jet cutting system. The influences of the pressure of jet pump, transverse speed of nozzle, standoff distance and mass concentration of additive polyacrylamide on the cutting efficiency of water jet were investigated. The results show that the cutting depth increases proportionally with the pressure of jet pump and decreases as increasing the standoff distance of jet nozzle or the transversely moving speed of jet. Polyacrylamide injected to water jet has dual effects on the jet cutting system. So there is an optimum mass concentration of polyacrylamide to get the highest cutting depth. The cutting experiment on marble, granite and standard aluminum plate under the same experimental condition shows that the cutting depth of non-porous material is much lower than that of porous material.

Key words: super-high pressure water jet; polyacrylamide; cutting; rock breaking; experiment

STUDY ON A NOVEL HEAVY OIL PUMP MIXING LIQUID DOWN-HOLE/ BO Qi-wei, ZHANG Qi, QU Zhan-qing, et al. *College of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2003, 27(1): 38 ~ 40*

A novel down-hole mixing heavy oil pump was developed in terms of connecting two conventional pumps in series. The feasibility of structures of heavy oil pump was discussed. The working principles and parameters of the pump were elaborated. Firstly the ground liquid is injected into oil well through the tubing, whereas the mixed liquid is lifted up to ground through the tubing-casing annulus. In the operation of pump, the produced liquid is sucked into the pump in the upstroke process, while the mixed liquid is lifted to ground in the down-stroke process. The ground liquid and the produced liquid can be mixed below the plunger. Therefore, the plunger resis-