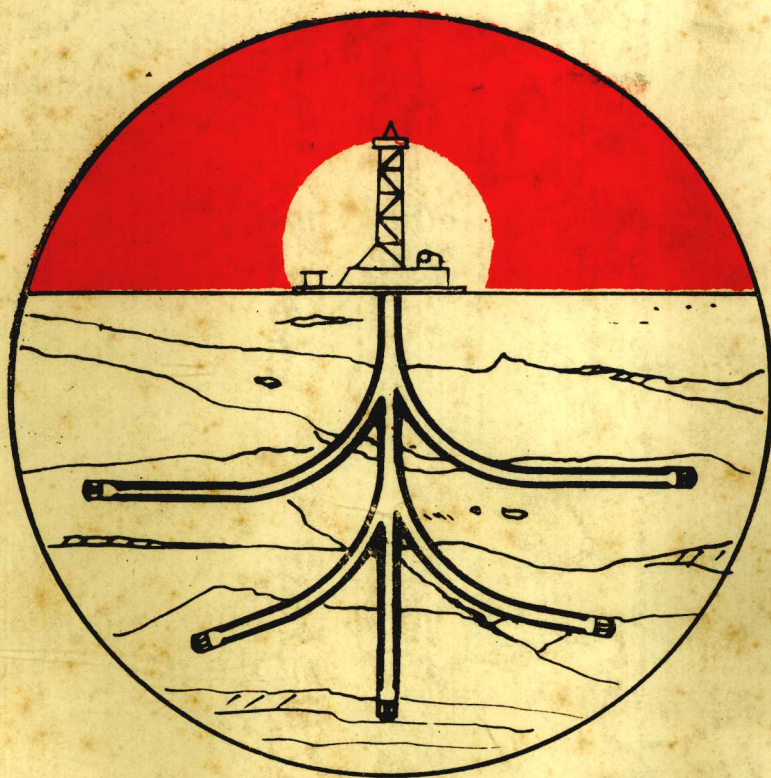


国外井下动力钻具 钻井技术

(译文集)



石油工业部科学技术情报研究所

江 汉 石 油 学 院

前 言

受石油部钻井司、科技司以及制造司的委托，为发展我国打定向井和丛式井的实用技术，开发我国海上油气田、西部沙漠地区、东部复合式断块油藏以及大面积的低渗透和裂缝性油气藏，我们收集并翻译了国外有关用井下动力钻具钻井的文章和专利资料，供大家参考。

井下动力钻具，特别是涡轮钻具，在国外的石油勘探开发中起着很重要的作用，被评价为本世纪最有发展前途的钻井技术之一。井下动力钻具钻井的最大优点是能显著提高机械钻速，降低钻井成本，提高油田开发的综合技术经济指标。

限于我们的水平，本译文集中缺点和错误在所难免，我们诚恳地希望读者批评指正。

石油部科学技术情报研究所
江 汉 石 油 学 院

一九八六年四月

国外井下动力钻具钻井技术

(译文集)

石油工业部科学技术情报研究所
江 汉 石 油 学 院

编辑出版

目 录

前 言

预测技术与应用

国外钻井工艺和钻井机械的新发展……………符达良 编写(1)

钻井工艺的当前发展趋势和未来展望……………黄鹰 译 孙以泽 符达良 校(9)

现场使用及试验成果

涡轮钻具的工作状况与钻头的力矩特征……………徐书华 译 郑铝铤 校(16)

最佳金刚石钻头和涡轮钻具钻井性能……………李学军 译 宋建平 符达良 校(20)

一种连续控制的定向钻井技术……………李学军 译 马俊毅 符达良 校(30)

用涡轮钻具打直井在美国受欢迎……………孙志金 译 钟守炎 校(38)

带有浮动定子的涡轮钻具的工业试验……………徐书华 译 符达良 校(41)

螺杆马达钻井与涡轮钻具钻井的比较……………符彦惟 译 符达良 校(46)

用于转盘、泥浆马达和涡轮钻井的PDC钻头运转性能
……………符彦惟 译 符达良 校(55)

泥浆马达在表层井段中的应用……………钟守炎 译 冯 进 校(68)

法国石油总公司的金刚石钻头—涡轮钻具钻井试验已获经济效益
……………李学军 译 冯 进 校(77)

确定长井段泥浆马达的最佳使用条件……………许福东 译 冯 进 校(83)

- 苏联现代涡轮钻具在加拿大的油井试验……孙志金 译 钟守炎 宋建平 校(87)
具有密封轴承的涡轮钻具能实现高效率钻井……符彦惟 译 冯进 校(95)

海洋钻井方面的应用

- 涡轮钻具在北海油田钻井中的通用性……孙志金 译 戴静君 宋建平 校(100)
涡轮钻具和PDC钻头在Statfjord油田取得成功……孙志金 译 戴静君 校(113)
涡轮钻具在卡塔尔海洋钻井情况……冯定 译 马俊毅 校(121)

专

利

- 涡轮钻具(西德)……华北庄 译(135)
一种新型涡轮钻具(西德)……谢建文 江先雄 译 江先雄 校(139)
井底马达控制系统(法国)……李文胜 郑铝铤 译 符达良 宋建平 校(144)
涡轮钻具支承节(美国)……符达良 译(148)

本文集主编：郑基英 贾映萱

责任编辑：符达良 郑铝铤 宋建平 虞永和

国外钻井工艺和钻井机械的新发展

符达良 编写

国外目前对油气资源的钻井主要集中在浅层和陆地钻井，随着海洋及更深更偏远的油气田的开发，由于资源目标的改变，必将引起我们对现有工程技术的革新，最终将会对钻井和钻井设备提出新的要求。

我们可以说，目前在钻井工艺研究和发展中的主要科研项目和技术装备，可以代表未来钻井系统的变化和先进水平：

- 1 钻头和井下马达的改进；
- 2 随钻测量系统（MWD）的发展；
- 3 钻机自动化的应用以及高移运性轻便钻井设备的发展；
- 4 改进为提高钻井效率的井身轨迹的方位控制。

本文将分三个部分来概述国外钻井工艺及钻井机械的新发展。

一、目前的（八十年代）钻井技术特点

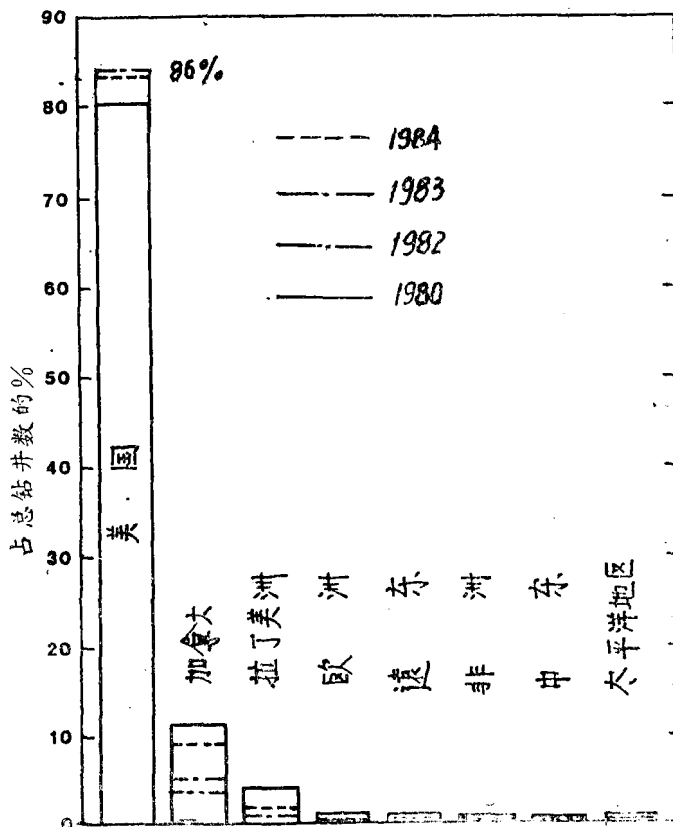


图1 西方国家完井数

1、西方国家钻井作业明显集中在油气储量少的地区，90%以上的油气井集中在北美，特别是美国占80%以上。1984年，全世界(西方)共钻井96750口，美国有82032口，占84.8%；而资源最丰富的地区——中东，它的储量在1985年占世界总储量的56.9%，但1984年只钻井252口，仅占世界总钻井数的0.26%。其主要原因是中东地区一口油井的产量平均为美国的300倍。此外，我们从1985年生产井(不包括停产井、注入井和作业井)的统计中，也可以看出这种不平衡的布局：美国1985年有生产井642000口，苏联有121000口，中东地区只有3797口。详见图1、2所示。

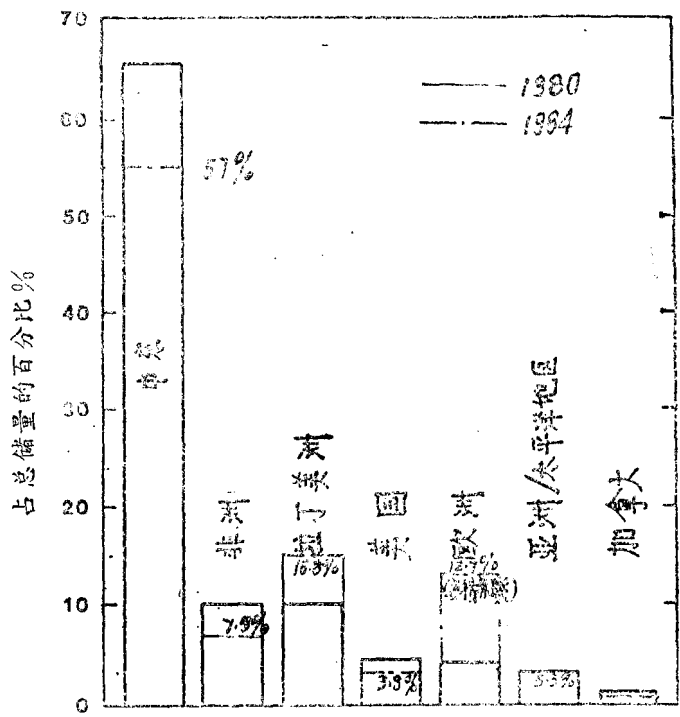


图2 西方世界石油储量

2、平均钻井深度几乎保持不变

美国海洋钻井大约占20%，阿拉斯加地区仅占0.2%，因此绝大部分是陆地钻井，而且很明显地看出集中在浅层，半数以上的油井小于1066米，平均井深大约为1220米（见图3）。1980年美国4570米以上的深井钻了643口，只占0.78%，其中6400米以上的深井只有27口，尽管深井比例逐年有所增加，但从图4可以看出平均井深近20年来基本没有变，只是在六十年代因天然气井开始占有较大比例，因此那时的平均井深有所增加。

从图5可以看出，虽然井深大致不变，但油井数量自1973年石油危机后，几乎增加了3倍。1983年美国钻井78542口，1984年又上升到82032口，而深井、海洋钻井及偏远地区的钻井数量在逐渐增加，特别是天然气井。

3、对深部、海洋及偏远地区油气田的开发将会逐渐改变所钻井的性质

浅层油气资源是有限的，而且容易开采的储量正在减少，储量增加的地区都在海洋及偏远地区。目前有25%的天然气来自海洋，海洋原油的生产亦在不断增加，1984年海洋采油7.24亿吨，占世界总产量的28%。当然，海洋油井开采成本比较高，平均为陆地钻井成本的10.6倍。

如上所述，现有陆地资源的开采和利用，地热能的利用，海洋油田及偏远地区油气田

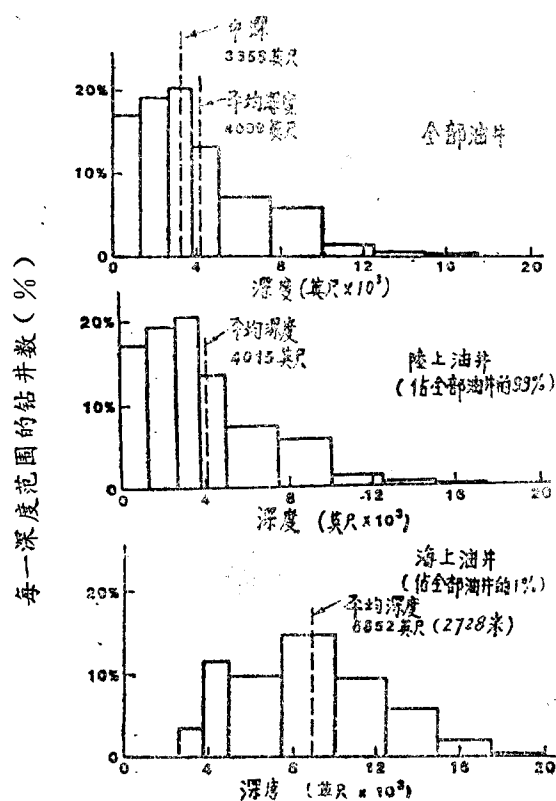


图3 美国油井的深度分类

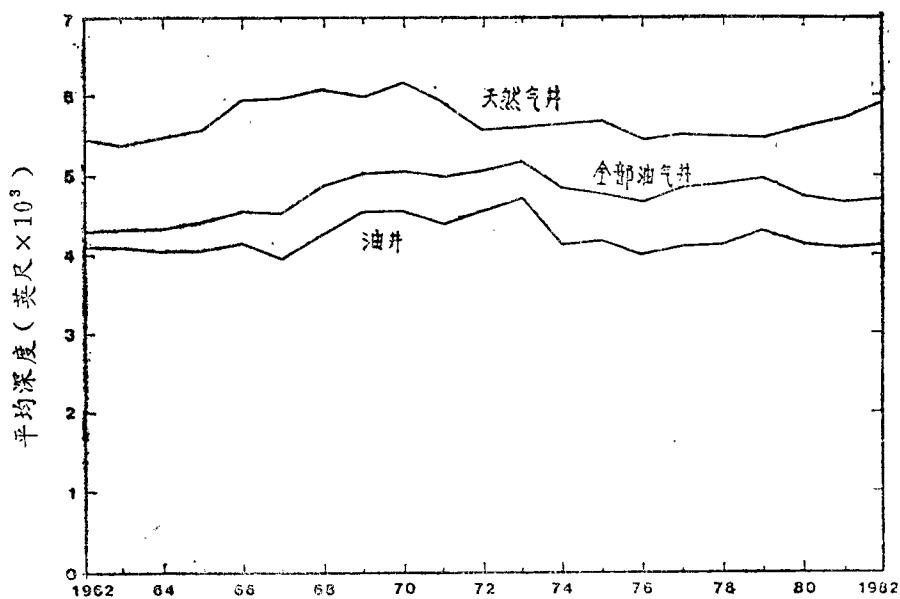


图4 近几年来美国油井的平均深度

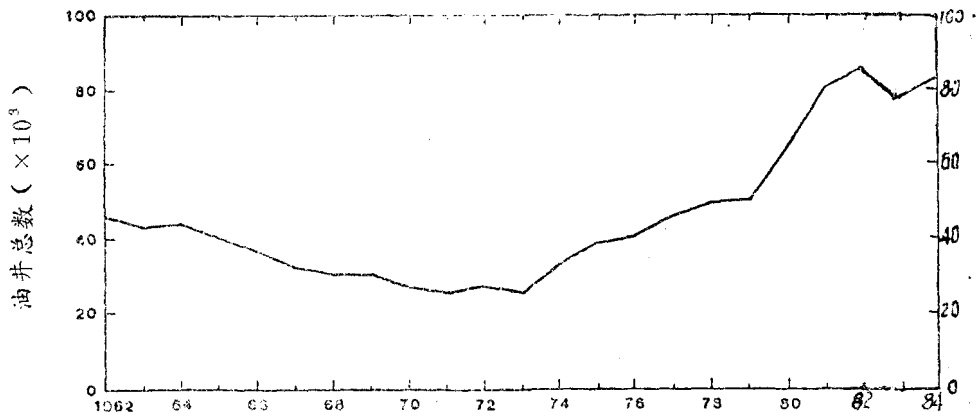


图5 在近几年中美国油井数量

的开发,以及致密地层天然气和重油的开发等,都会给钻井带来更加困难的条件。它们将对目前的钻井工艺进行一次冲击,而随之对钻井装备以及改进井身轨迹的控制和增加地层到井孔的各种渗流工艺提出新的要求。

二、目前国外钻井工艺技术及技术装备的研究与发展

1、随钻测量(MWD)系统

MWD系统获得广泛的使用,仅仅是这两年的事,它可以在钻井的同时对各种参数进行井下监测,例如:钻压、扭矩、温度、压力、泥浆特性、地层特性、井孔几何结构和方向(井斜角和方位角)、液体流速、钻头的瞬时振动和加速度,以及在停钻时测量工具面等等。在目前的应用中,其电子元件和传感器的工作温度可达 350°F (194°C)。

MWD不仅用于对深井、定向井及井身偏斜实行监控,特别是在海洋钻井上已经证明是相当有用的,而且在提高钻井的安全可靠性和经济性方面也取得了相当的经济效益。例如,用一种普通方位仪每次下井的费用达5~6万美元,而测量能力较大的MWD系统每天只花费3000到6000美元。如果把提高钻井效率和提高评价能力综合起来,可以节省25%的钻井时间和20%的钻井成本。

MWD系统由一套井下传感器和分辨装置,一套从井下到地面的信息传输系统,以及一套地面接收、编译、记录、信号调整和处理显示设备等三个子系统组成。

但是上述所有的测试项目,由于传输系统数据处理的局限性会限制传感器的数量,因此,目前还不能包括在一套装置中。目前正在研制为信号处理和信号调节用的井下计算机,它可以储存、处理、列阵和选择数据,以克服传输环节的局限性。通过井下处理而产生的信息编码就能增加传感器的数量。

信息传输方法一般有三种:一是采用钻柱中的连续电缆传输,一种是穿越地层的电磁波传输,另一种是泥浆压力脉冲系统的声信号传输。目前主要采用泥浆脉冲和泥浆连续波的传输方式。

用泥浆脉冲遥测技术来传输信息有三种不同的方式:一种是正向脉冲(由一个阀孔的突然节流而产生),即由于泥浆的射流而引起一压力增量,此增量以泥浆声速传输到地面;第二种是负向脉冲,即打开一个阀而引起的负向脉冲,造成泥浆系统中产生一定的压力降;第

三种是由一种类似“警报器”的装置，它可以产生恒定而又连续的频率信号，并可以通过改变相位来传递信息。

2、近代钻头的发展和岩石切削技术

1) 聚晶金刚石复合片钻头(PDC) 它是七十年代后期发展起来的，开始主要用于一些深部塑性页岩较多的地层。近几年来又研制成适合中到中硬地层的具有三棱形聚晶切削齿的Ballaoset钻头，配合井下动力钻具在深井、定向井的均质灰岩和白云岩中使用，效果很好，机械钻速大大超过了牙轮钻头（一般为2~4倍）。1983年PDC钻头的进尺占总进尺的11%，1984年大约占33%，估计到1990年大约有50%的钻井进尺是采用PDC钻头。

PDC钻头又称剪切式钻头，它对岩石的破碎是切削或剪切，而不是采用常规牙轮钻头的压碎和研磨的工作方式。因此它切削速度快，钻速高。此外，它还具有转速适应范围广，切削齿可以自锐，使用钻压低，可以减少钻铤的数量及减少上部套管的磨损，钻头无活动元件，事故少，耐高温和寿命长等优点。

PDC钻头目前进一步研究的方向是：①研制类似天然金刚石化学键连接的新型聚晶金刚石，以制造出更合适的几何形状。②重视新材料的开发，例如充填式碳化钨。③重视水力学研究，研究钻头与井底之间的液体流场和清洗变化情况。④综合研究与井下动力钻具配合使用的有关工艺措施。⑤在深井高液柱压力下PDC钻头破岩机理的研究。

2) 具有综合功能的复合式钻头 许多公司正在研制把天然金刚石、PDC复合片或碳化钨块复合起来，以充分发挥它们各自功能的新型钻头。

3) 具有气蚀喷射系统的钻头 即通过附加的气蚀作用，改善井底的清洗条件。实验证明，一个相当于标准喷嘴系统的清洁效果，只需要通常25%的压降就可以达到。

4) 机械枪式钻头 美国Trecund公司研制的装有5000发陶瓷子弹的机械枪式钻头，子弹对岩石产生高速连续的冲击会在配用的常规牙轮钻头下对岩石产生粉碎性的冲击波，这样就能提高钻速。据现场测试表明，在空气钻井条件下，可以提高钻速2~5倍。该公司还在试验用于泥浆条件下的枪式钻头。

5) 其它岩石切削技术的发展 如火焰钻井、电火花钻井、弹丸钻井、激光钻井等也在继续研制。此外，一种井下可换式钻头亦正处于实验阶段。

3、井下动力钻具

国外把井下动力的钻具、PDC钻头以及MWD誉为八十年代钻井三大新技术。

苏联一直把井下动力钻具作为它们的主要钻井方法，他们的油田近80%是使用井下马达钻井的。美国在这方面也逐渐引起重视，钻井进尺由1981年的1%增加到1985年的15%。

井下马达之所以获得发展，它与转盘钻井相比，其根本的优点在于能把破碎岩石的能量集中于井底，因此钻速快。此外，钻杆基本不需要转动，这样可减轻钻杆的磨损和应力破坏，还可以减轻套管的磨损。尤其适合于定向井和丛式井的开发，它与MWD配合能更好地控制钻压及井身轨迹的漂移。

目前井下动力钻具中获得发展的是涡轮钻具与螺杆钻具。两者比较，螺杆钻具具有转速偏低，可适应不同型式的钻头工作，司钻易控制钻压（因为泥浆立管的压力就可代表钻压），转速对钻压的敏感性小等优点；缺点是橡胶定子材料寿命短，不宜于深井和较高井温的环境，平均的工作寿命比涡轮短。

涡轮马达转速高，适宜于与PDC钻头配合使用，机械钻速高。近代涡轮钻具由于改进了

支承节结构,取消了橡胶元件,因此,适宜于深井、超深井和地热井的应用,例如苏联打的世界最深的SG-3号井,目前井深已达12059米,就使用了设计先进的涡轮钻具,使下井连续工作时间由过去的4天增加到10天。人们一般认为涡轮钻具比螺杆钻具有更大的发展余地。涡轮钻具的缺点是,地面的速度控制难,对载荷的敏感性大,即超载易失速,轻载又易超速。

实验室与现场的试验表明,PDC钻头的钻速与转速的关系是符合一条三阶多项式的曲线关系。即:

$$ROP = A + Bn + Cn^2 + Dn^3$$

因此,采用井下动力钻具与PDC钻头钻井,能够得到高的机械钻速和较好的经济效益。

4、定向工具及定向钻井技术的发展

定向工具用于造斜、侧钻、扭方位等钻井作业,一般可分为两大类:

1)用于转盘钻井的定向工具有:扶正器、造斜器、变向器及水力喷射造斜工具,这一类工具往往不能很好地控制方位角和井斜角,故定向精度较低。

2)用于井下动力钻具的定向工具有:扶正器弯接头、带弯形外壳的螺杆钻具、带有弯形外壳的涡轮钻具支承节以及可变弯接头等,主要使钻头轴线与钻柱轴线形成一夹角,靠钻头对井壁产生的侧向力按要求的方向钻进。

从发展的趋势来看,主要用井下动力钻具配弯接头或弯壳体以达到定向的目的,特别是使用弯形外壳的井下马达是一种简单而有效的方法,从而避免了采用复杂的组合钻具而带来的降低钻速,增加起下钻次数的缺点。

在北海油田使用带弯形外壳的涡轮钻具支承节,只需要很小的弯曲角就具有很高的造斜率,而且当马达外壳旋转时,可以以很高的钻速钻直井,当钻至斜井段需要改变方向时,可按工具面的方向钻弯曲井段,从垂直井段到定向造斜井段的变化不需要起下钻。也可以使用带偏心扶正器的涡轮钻具,使钻头产生一种侧向切削力,也可以达到同样的定向目的。

目前的定向钻井及丛式钻井技术已经发展到一个新阶段,全世界年产原油30亿吨,其中12~13亿吨是从丛式井中采出的。

打丛式井可以少占农业区的面积,在沼泽、湖泊以及偏远地区更是主要的钻井技术措施。苏联西西伯利亚油田就是采用丛式井开发的,该地区1981年建成538个井丛(每个井丛平均有3口油井),共计4465口井,1966年以来共打1.5万口油井,1985年石油年产量达3.95亿吨。

在西西伯利亚条件下,油层深度为2200~2500米,可以钻成井底偏离垂直位置2000~2200米。在技术措施上,他们采用大功率涡轮钻具及CTT-164遥测系统。

加拿大冷湖地区的重油油田及天然气的开采也采用了丛式钻井技术。埃索公司计划从1983年起钻9000口丛式井,达到2万吨/天的开采能力。1984年12月,在该地区打成一口世界上最大位移水平井,斜深与垂深之比达3.85倍,产油量为直井的20倍。

美国长滩地区,Thums公司在四个人工岛上打成了909口油井,每个人工岛打200多口,最大井斜角85°,水平位移3000米。

美国在大型吉尔达平台上钻了96口丛式井,最大外伸距1676米。在丛式钻井计划程序中,很重要的一环是建立井位的软件数据库,作好井眼轨迹的圆柱体设计,以防套管相碰。

澳大利亚在Mackerel A平台钻了两口大斜度定向井A-14与A-16,从平台西南角的一个断层封隔的油层中采油。其中A-16井的水平位移达4597米,井斜角 $69^{\circ}20'$ 。

5、钻井设备的改革

目前世界上有一百多个国家从事石油钻井,美国至今已钻200余万口井(其它国家总共才钻65万口井),但从事钻机生产的只有十几个国家,而能成套设计和供应的主要是美国、苏联、罗马尼亚和我国等四国。就目前的钻井机械发展水平来讲,1960年来几乎没有多大改进,落后于动力系统、井下工具及井控设备的发展。

目前钻井机械总的发展趋向是,完善钻井设备的适应性,发展AC/SCR/DC驱动型式,提高设备的自动化程度以及高效可靠性。

1) 提高钻机操作设备自动化的水平

①彻底改变钻机结构的有全液压钻机和软管钻机,例如美国NSCO公司的第三代全液压钻机A10-30,提升能力达454吨。

②局部改变钻机结构,例如加装自动排放立根机构,各种型式的钻杆旋扣钳和动力卸扣钳(最大扭矩达16560公斤力一米),接单根机械化设备,下套管机械化设备,用微机控制的套管扭矩/圈数机,各种动力卡瓦,以及海洋钻井用的智能机械手等。

2) 顶部驱动钻井装置

有人把顶部驱动、自动双吊卡和动力钳的推广使用作为当代钻井设备三大重要改革。采用这套装置可以节省钻井时间25~30%。它具有接单根省时,降低钻杆接头和钻机刹车副的磨损,取消方钻杆、转盘和鼠洞设备,便于定向钻井和处理卡钻事故(如遇卡钻,可以边转边循环泥浆),相当于装一台钻杆防喷器等优点。

3) AC/SCR/DC驱动型式的发展

SCR驱动,除了传动性能优越外,还有适应性强、使用经济,可以节省燃料18~20%,延长大修期80%,减少维修成本2/3,提高钻井时效5%,以及传动效率高11%等优点。近十年来不仅大型钻机,就是中小型钻机也获得相当的发展。这从下表可以看出这种发展趋向。

钻 深(米)	SCR驱动占钻机总数的百分比%	
	1973年	1983年
6000以上	75	100
4800	20	80
3600	5	60
2500	0	40
1500	0	20

4) 高移运性车装钻机的发展

车装钻机即是一种大型整体载运的自走式钻机,美国自1982年以来有1/3的中深井(4000米以内)都采用这种钻机工作。正如本文在第一部分中分析指出的,这种钻机是随着油田钻井、修井作业的大量增加,以及特殊地区钻井的需要(例如沙漠)而发展起来的。它主

要具有移运性能好，搬家安装方便，建井周期短等优点。其结构特点是采用高性能的高速柴油机加Allison传动箱以及伸缩式井架，因此，使整机具有结构紧凑、体积小、重量轻等优点。

5) 其它方面的发展：例如有用于浅层定向井的斜井钻机，Skytop公司生产的30°斜井钻机，钻井过程中可增大至70°，估计可节省2/3的钻井成本。在新型材料的应用方面，例如陶瓷缸套的寿命可达1800~2400小时。此外，还有注入热塑料的新型PFV钢丝绳，它可以减轻钢丝之间的接触与划伤，提高了钢丝绳的破坏载荷，据说可提高寿命1.46倍。

6、钻井信息与计算机的应用

1) 计算机辅助钻井控制：“信息革命”正慢慢地冲击着整个钻井工业，为此几家主要石油公司已经建立了钻井程序的数据库，这种数据库拥有大范围内的数据资料，以及各种条件下的优化程序（例如：水力程序、钻头最优化程序、方向测量计算和绘图程序以及日常的操作程序），其目的就是实现对钻井过程的最优化控制，以达到降低每一英尺钻井成本的目的。钻井技师只需要懂得使用终端键盘的简单指令，就可以操作任何程序，以解决需要解决的问题。

2) 由计算机控制的“诊断装置”（Expert Systems）可以帮助对钻井作业的实时监督，进行故障分析和发出消除问题的指令，就像有经验的专家一样在现场提供技术指导。

3) 钻井作业的远距离操纵和遥控。

4) 计算机模拟技术的发展：有四种基本类型的模拟器，即局部功能模拟器（PTS），高逼真度模拟器，程序性模拟器，工程模拟器等。所有这类模拟器在训练钻井工作人员，编制工程计划和辅助决策方面都是有效的工具。

三、未来的展望

新的钻井工艺对开发深层、海洋以及偏远地区的油气藏带来希望，虽然成本昂贵，但从整个经济受益上是合算的。此外，那些不需要复杂技术的普通廉价油井的开采，也会从中得到好处。

1、钻井用硬件：即上述四大部分的发展：剪切式钻头，井下马达，MWD的推广使用（改善传感器性能，降低MWD的成本），以及钻井设备的改革。

2、系统控制：即理想的钻井参数（钻压、扭矩、转速）的闭合控制，这将得出最高的钻速，最小的磨损，以及最低的钻井成本，并能控制井位的漂移。

3、软件发展：在地面钻机自动化发展的同时，为适应闭合控制的软件必将继续得到发展。例如，1) BHA程序，即井底钻具组合分析程序，该程序用三维有限元法，可以计算井眼内钻头的方位，作用在钻头上合力的大小、方向和位移。

2) 钻柱分析程序：提供在三维井眼内钻柱的轴向力和扭矩预测，计算井眼中心线，施加在钻柱上的力、浮力以及随井深变化的摩擦系数。

3) 被卡钻杆程序：提供钻柱的非线性分析，可计算被卡深度，最大钩载和扭矩以及由于超载所引起的破坏点。

4) 井眼测量程序：用输入的测量井深、井斜角、方位角计算三维井眼座标、造斜速度等。

5) 井眼轨迹程序：提供任何定向井轨迹设计。

6) 套管程序：规定套管设计。

7) 压井程序: 为井控和压井提供帮助。

8) 水力程序: 包括喷嘴设计、系统压力差、液体增加或减少以及压力的波动和抽吸。

今后若干年将是钻井工艺和钻井机械迅速发展的年代, 由于计算机技术的应用, 改进信息传输的能力等, 上述许多研究工作的发展是有可能实现的, 所有这些也是大家在今后工作中所将会遇到的问题。

钻井工艺的当前发展趋势和未来发展展望

J. B. Cheatham

黄 鹰 译

孙以泽、符达良 校

提要: 此文阐述了这样一个主题: 新的工艺对未来的钻井技术装备和钻井作业将产生怎样的影响。

根据计算机辅助钻井, 优化钻井和定向钻井将来的发展情况, 对随钻测井的效果、聚晶金刚石钻头 (PDC)、井下马达和计算机应用诸问题进行了讨论。应用不同的随钻测井近代成果, 钻井模拟装置, 以及为特定目标的优化钻井已经得到推广, 以适应未来钻井工艺的发展。

引 言

有关钻井工艺的参数是从安全因素和经济效益来考虑的, 井眼必须是安全的 (对人、对环境 and 投资而言), 并希望有最低的钻井成本 (指总成本, 而不是某个阶段的效果)。对于各种类型参数的描述可以采用多种形式确定其所属的范围, 但最重要的是便于考虑地层特性, 井孔的几何结构和设备的条件 (包括泥浆)。

地层特性包括地层类型、层面资料、渗透性、孔隙率、可钻性、结构关系、非均质性 etc. 井孔几何结构牵涉到不圆度、替泥浆出油、狗腿、倾角因素以及类似的课题。设备状况与泥浆特性、钻头齿形磨损、钻井工具、地面装置、轴承磨损等有关, 难以一一列举, 专门的技术渗透到以上各个领域。实际上有些问题是相互关联的, 包含了复杂的因素, 如井漏, 井喷, 卡钻, 海上钻井。

然而, 在通常情况下, 主要考虑的是维持井径, 对准目标, 防止井喷、卡钻、井漏, 尽可能多地收集现场或实地的资料, 以用于未来在这一区域钻井, 并使成本最低。无论是在现场还是在实验室, 目前的工作是利用最先进的检测技术和计算机技术。来自正在进行的研究和发展工作中的新信息, 将一如既往, 为今后的工作指明方向。

以下将简要讨论: 现在所关心的, 有可能发展并将成为重要的数据库和有可能推广应用

的几个领域。

一、目前正在研究中的几个领域及其发展方向

在钻井工艺的探索、发展和进步的过程中,其成果常常是由于各专业领域技术的进步和各学科之间尖端成果技术应用的结果,如材料的改进、传感器、制造工艺、遥测技术、微处理机和直接应用于管理的计算机系统。

目前,在钻井方面一些具有重要发展的主要趋向是:随钻测量、钻头改进、井下泥浆马达、优化理论、钻井模拟装置、地热应用、泥浆以及测井等领域。所有这些都被概括在它们与井下情况(钻头左右)有关的范围内。

1、随钻测量(MWD)

在实时的基础上希望监测在钻头附近的各种重要参数,这不仅是为了试图使钻井成本和井控达到最优化,而且也是为了万一在常规测井前井眼报废时可作未来的参考依据。

MWD包括一组传感器,一个遥测系统以及地面记录和显示设备。在钻井的同时对各种参数进行井下监测,例如钻压、扭矩、温度、压力、泥浆特性、地层特性(根据测井记录)、井孔几何结构和方向、液体流速、钻头的瞬时振动和加速度及其它变量。例如,工具面的方位可以在钻杆停转时测量。目前的应用中,传感器和电子器件的工作温度极限高达300°F。

首次井下钻杆受力和运动情况的测量结果由 Deilly 等五人在1968年发表。他们的系统采用泵压的变化量以选择某个时间采集数据并把井下情况记录在磁带上,并将磁带机收回地面作分析。目前,数据是由装在钻柱中的连续电缆(电缆吊挂在每个钻杆接头上)来传输,或者用穿越地层的电磁波来传输的,还有通过钻柱泥浆压力脉冲系统的声信号传输。到目前为止,泥浆传输系统已受到最大的注意。井下遥测电传导系统已经进行了广泛的试验,它提供的高数据率优于泥浆脉冲(双通道)系统。但是,由于悬挂的困难而妨碍了它们的应用。穿越地层的电磁波传输还没有显示出工业上的吸引力,通过钻杆的声频信号传输虽然会造成严重衰减,但它仍然是主要的实验领域。

在井场的地面部件包括:记录装置、译码器、信号调整和处理部件、显示和打印输出设备,还有为由主计算机集中分析用的各种变送器。应该指出的是,MWD系统的发展仍处于早期阶段。在应用方面值得更进一步注意的是:优化钻井、方向控制、安全因素和改进了的随钻测井。

2、当代钻头的发展和岩石切削技术

值得注意的是,旋转钻井技术的原理仍然保持其本质上不变,但是其基本的改进就是不断地改进其工艺技术。新近的研究成果提供了一种具有重要意义的新材料,就是聚晶金刚石复合片(PDC),使用PDC作为切削构件的钻头,有助于高速涡轮钻具在软到中硬地层钻井。切削方式的改变,使得用PDC钻头钻井所产生的岩屑比普通金钢石钻头多得多。现场和实验室的研究都表明:喷嘴的结构和位置是保持PDC钻头特有钻井特性的重要参数,在这一领域中可以期待有更大的发展(另外的研究用来确定PDC钻头的耐温效果,以用于地热应用)。可以预料,改进的材料和结构将从这些研究课题中得到。

对于其它方面材料的研究,包括牙轮密封、轴承和润滑,也同样很有意义。由于在润滑区

域施行压力补偿技术,因此它的压力比已有的井孔压力还要大。可以看到,对于牙轮钻头来说,滑动轴承在承受耐冲击的能力方面更优于滚动轴承。然而,滑动轴承必须保持好的密封才能维持这种功能。因此,牙轮钻头的密封技术必须改进。

许多新颖的钻井技术诸如火焰钻井、电火花钻井、弹丸钻井、高压喷射钻井以及过去已经研究过的井下可换式钻头钻井技术。高压水力喷射钻井一直得到研究并已证明了这种技术可用于岩石钻井。这种最引人注目的新系统的出现将使机械钻速得以增加(在5000到15000磅/平方英寸范围的高压喷射条件下)。

为了利用附加的气蚀作用改善井底的清洗条件以达到液流形成的喷射和清洗作用,正在研究一种气蚀喷射系统。此项研究计划是专门用来产生自激喷射,从而形成周期性的环形涡流。经实验室初步试验表明,一个相当于标准喷嘴系统的清洗效果只要通常所需25%的压降就可得到。下一部的研究就是弄清在井底高压下,钻井泥浆系统中此种现象的功能度。

3、井下马达和涡轮钻具

钻井方法的新概念常常是在以往年代里曾经探索过的一种设想的再现。例如,一种井下马达在1891年曾取得了专利。1976年,一个使用最新工艺技术的程序中曾采用了一个包括井下电动马达,井下传感器和遥测装置的组合系统,这些部件已在两个现场推广应用并获得成功。虽然没有达到预期的效果,但却得到了关于现场工艺规程和成套设备互换性的宝贵资料。

井下泥浆马达是容积式或者涡轮式。涡轮转速较快,它与金刚石钻头可以得到较满意的匹配,当马达转速较低时使用牙轮钻头较为有效。据统计,苏联人一直长期有效地使用井下液力驱动装置,他们的油井80%是使用井下马达(涡轮式和正容积式两种),而美国使用井下马达的钻井进尺由1981年的1%增长到1985年的15%。内福(法国)涡轮钻具已经使用了近三十年,涡轮钻具和Stratapax或聚晶金刚石复合片(PDC)钻头钻井已得到最大效益,并改善了北海地区的钻井作业。

轴承难题长期阻碍了涡轮钻具的发展,最近美国米勒工程公司研制出一种带密封式轴承的涡轮钻具。米勒曾预言涡轮钻具终将占据大多数直井马达的市场。因为它具有最适合于Stratapax钻头的高速特性、耐高温性能(325°C)以及输出功率高的特点。

美国生产的第一批螺杆型容积式马达是迪那钻具,多年来它们一直在定向钻井中使用,最近由于迪纳钻具专利的满期,导致一些企业发展了泥浆马达。Beswich和Forrest报道了一种苏联设计的,多头低速高扭矩正容积式马达的使用,这种马达1981年已经在欧洲使用。马达的转速—扭矩特性允许承受高钻压并得到高的机械钻速。这说明容积式马达的钻头进尺特性与涡轮是相反的。这对井的定向控制是有利的。在北海用这些马达进行取芯作业时,使用90到120英尺的取芯桶,收获率超过95%。

MWD系统与井下马达联合使用,就能同时进行测量和控制井身轨迹。

4、计算机辅助钻井

1960年,Galle和Woods公布了他们关于最少钻井成本的研究成果。他们研究了关于机械钻速、齿钝度和轴承磨损与钻压、旋转速度、岩层研磨性和可钻性之间相互关系的经验公式。这些参数值是由先前的钻头运转情况决定的。这些公式能预计钻井进尺、转动时间和钻头在不同的负荷和旋转速度组合情况下的每英尺钻井成本。使用变分法、数值法和一台数字计算机,便可绘制图表,得出工业上的各种有用的结果。今天,随着计算机和终端的广泛使用,这种计算出的结果可以直接从主机送到用户。Galle等人的成果是早期的

研究成果之一，这就是所谓“计算机辅助钻井”。

1969年，Young曾阐述了关于采用一台现场计算机系统控制 钻压和旋转速度，以达到最小的钻井成本。他描述了用计算机控制钻井到18,000 英尺深度时的现场测试结果，并推断出此系统的现实性。然而，需要对某些层段地层的实验方法进行改进，还希望对钻头的分级和磨损预测技术进行改进，以及对测量钻速、流体特性和水力参数的钻机仪表进行改进。这项工作的目标就是：“实现钻井操作自动化，以尽可能获得最大限度的经济效益”。此项工作已证明了计算机控制钻井的可能性。

在Wilson和Bentsen的指导下，各种数学优化处理的研究成果已应用于选择最少钻井成本。他们提供了三套具有提高复杂性和增加数据需要的方法。第一种方法是寻求在一只钻头行程中每一英尺的最低钻井成本；第二种方法是使某一选定层段的成本最低；第三种方法是使在全部一系列层段中的成本最低。他们推断：未来的优化钻井的发展取决于描述钻井过程更加复杂的数学模型。

1977年Randall和Estes发表一张一个钻井技师带着钢帽站在计算机终端旁的照片，以说明分时计算机网络辅助钻井程序的用法。作者想要说明的是：钻井技师和钻井工程师只需要懂得使用键盘终端输入简单指令，用普通的油田术语，就能恰当地操作任何程序以解决所需要解决的钻井问题。这些程序包括水力程序、钻头最优化程序、方向的测量计算和绘图程序、海上压裂梯度计算程序和其它一些用于计划及每天的钻井操作程序。

Zoeller (1978年)指出：钻井数据的传输和记录技术已提高到一个可靠的水平，并将继续得到改善。计算机正广泛地应用于钻井现场的连续监测，并把实时数据传输到钻台上，或较远的钻井工程师办公室。一组数据由计算机存贮起来，以便于调用查看以前的钻井深度或显示目前钻井情况。这些数据组包括时间、深度、泥浆和水力参数、地层测井记录、转速、由MWD在地面和井下测得的扭矩和钻压、井身轨迹以及用计算机模拟计算出的每英尺钻井成本。

1981年，Miska和Skalle撰写的论文，可以解决水力参数最优化的问题，他们采用一种非线性程序方法，该方法通过平均修理时间、泵压和泵的水马力的关系式来考虑泵的可靠性。1982年，Millheim和Tulga提出一种用计算机模拟完整的井下水力循环系统的方法，包括液体流入量和漏失影响、管道冲刷影响等。他们模拟多变量井下情况的算法是以流体网络分析为依据的。目前他们只考虑到地层液态流体，而对天然气生产和空气钻井仅仅是从逻辑上扩展他们的技术而已。

人们普遍认为，具备较有经验和训练有素的钻井人员并采用先进的技术便能降低钻井总成本。1982年，Millheim讲述了为达到这些目标而使用的模拟装置以及四种基本类型的模拟器。局部功能模拟器(PTS)可以模拟一台机械装置或某一操作系统的部件，一台具有指导人员控制的井控模拟器问题模拟(如一次井涌)，以及问题的输出处理和控制就是这种模拟器的一个典型。程序性模拟器，例如一台钻台模拟器模拟整个系统，供训练基本作业过程用。为了提高受训人员的操作技能，应使其足够逼真，必须具备高逼真度模拟器(HFS)。这种模拟器要求有较好的工程模型、一台较高逼真度的设备和直观显示字幕。工程模拟器(ES)可用于设计，对一种操作系统进行评价并作出实时决策。计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)用于航空和航天工业以及其它制造工业就是高效工程模拟器的实例。Millheim推断模拟器在训练钻井工作人员，编制工程计划和辅助决策方面都是有效的工

具,但是,模拟技术的潜力还有待钻井工业进一步开发。

在最近的一些报刊上发表了许多钻柱模拟器的文章。Fischer (1974年)发表了一篇关于在弯曲井眼中钻柱分析的文章,并叙述一个SCHADS(弯曲井眼钻杆柱的静态分析)计算机程序,这个程序可作为钻井工程师估算井底钻具组合和钻压的工具,也是研究井位漂移和套管磨损的工具。1975年,Bradley根据钻头—岩石相互作用的综合效应,使用钻井计算机程序进行井斜角的控制分析。他推断:要进一步探索并了解在非均质岩石中钻井时的漂移过程(钻头—岩石互相作用下)。

1981年,由Millheim和Aposfal发表了根据有限元法建立起来的一个三维井底组合钻具(3DBHA),动态计算机模型。他们的计算机算法包括在旋转中的摩擦影响,下部边缘钻柱组合,并能预测钻头的三维轨迹线,包括由于钻柱旋转速度而引起的动态影响。1982年,Millheim的计算机模型所建立的算法用于计算机模拟定向钻井过程,这项工作根据一定性分析,试奏技术到更为定量的预测工程学科,为推进定向钻井奠定了基础。它包括钻头和扶正器的侧向切削模拟,以及超规格和非圆井眼的模拟。目前的计算模拟技术有希望扩大到包括考虑各种层面的影响,正在不断变化的井眼形状以及预测钻头进尺的钻头-扭矩模型等。

从以上关于计算机辅助钻井的讨论中可以看出,目前在钻井工程和钻井操作中,计算机扮演着越来越重要的角色。在未来的发展中,这种趋势将继续增长。

二、未来的远景及目标

完全新颖的构思是极少的。可以估计到,未来的发展可能是伴随对存在的问题需要进行证实和评价的领域,仅仅是偶尔的进展或突破才形成一个新的概念。可以预料,综合各种正在研究的技术,将会加强钻井工艺的进展。

1、泥浆马达与随钻测量系统的结合

用新材料和新工艺技术使之产生了实际可用的井底泥浆马达,并具有稳定工作的优点,目前据称其效率已超过其标准技术规范。螺杆马达被认为适用于牙轮钻头和高钻压,MWD系统终究是要程序化的,为了确定一目标和优化各种钻井参数以达到最小的钻井成本,采用一台计算机分析运行过程中的数据,并把它与正在遇到的地层和在用设备所希望的数据进行比较,除钻压、扭矩和方向等参数外,可以确定和控制的参数有:泥浆特性、井眼的大小和形状、岩屑大小、齿磨损和轴承状态等。

惯性定向为钻一口油井预先制定程序提供了基础,采用钻头定向微量控制,就能建立地面与目标之间正确的井身轨迹,这将是具有意义的。此外,还要和控制定向井方向一样控制直井钻井。为达到这些目的,惯性定向、MWD和泥浆马达最终将形成一个实际的组合体。

2、钻头的发展

通常,总是要求具有新改进的材料和耐高温能力。随着地热领域和深井开发显得越来越重要,进行经济性开发也变得更具有吸引力。PDC无疑地会得到发展。先进的轴承密封结构也会得到发展。用于井下泥浆调合的润滑剂和高温润滑剂、钻头牙齿的材料和结构也将得到进一步的改进。为提高机械钻速,钻头喷嘴的设计必须考虑较好的水力和综合清洗以及冷却效果,和用于这一方面看来似乎有可能的,例如采用前面所述的气穴喷嘴。所有这些领域的发展表明,延长钻头寿命和增进钻井效率都是可能和极有意义的。

3、地层特性测定