

钻探技术新进展

张金昌

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘 要:以石油钻井和地质岩心钻探为例, 论述了进入 21 世纪后, 石油钻井和地质岩心中钻探技术研究与应用的新进展。

关键词:石油钻井; 岩心钻探; 定向钻井; 连续管钻井

中图分类号:P634 **文献标识码:**C **文章编号:**1672-7428(2007)S1-0011-08

Recent Advances of Drilling Technology/ZHANG Jin-chang (The Institute of Exploration Techniques, CGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Taking the oil well drilling and geological core drilling for examples, the recent advances of drilling technology at the beginning of the 21st century are briefly described. Geo-steering drilling, slim-hole drilling, continuous tube drilling, casing drilling techniques for oil and new geological core drilling techniques are concisely introduced. The development tendency of oil well drilling rigs and geological core drilling rigs are analyzed.

Key words: oil well drilling; core drilling; oriental drilling; continuous tube drilling

21 世纪, 随着液压传动技术、计算机技术、自动控制技术和测试技术在钻探上的广泛应用, 人类进入了智能化钻探时代。其主要标志是: 自动化、智能化钻机已成功用于钻探生产实践; 旋转导向和地质导向钻井技术已趋于成熟, 使得大位移井和多分支井施工成为石油勘探公司常用的施工方法, 从而使近海石油勘探开发由过去的海油“海探、海采”变为海油“陆探、陆采”, 大大节约了勘探开发成本; 定向对接井施工技术日臻完善, 成为可溶性矿产资源开采普遍采用的高效技术; 保真取样技术在天然气水合物钻探和环境科学钻探方面成功应用等。矿产资源勘探生产需求是促进钻探技术进步的原动力, 相关基础工业技术的发展是促进钻探技术进步的保证条件。在所有钻探技术服务门类当中, 石油钻井和地质岩心钻探工作量占绝大部分, 对钻探技术的发展贡献也最大。

1 石油钻井技术

《中国国土资源报》2007 年 1 月 29 日 3 版刊登了“新型地质导向钻井系统研制成功”的消息。这套系统由 3 个子系统组成: 新型正脉冲无线随钻测斜系统、测传马达及无线接收系统、地面信息处理与决策系统。它具有测量、传输和导向三大功能。在研制过程中连续进行了 4 次地质导向钻井实验和钻

水平井的工业化应用, 取得成功。这一成果的取得标志着我国在定向钻井技术上取得重大突破。

1.1 地质导向钻井技术

地质导向钻井技术是 20 世纪 90 年代发展起来的前沿钻井技术, 其核心是用随钻定向测量数据和随钻地层评价测井数据以人机对话方式来控制井眼轨迹。与普通的定向钻井技术不同之处是, 它以井下实际地质特征来确定和控制井眼轨迹, 而不是按预先设计的井眼轨迹进行钻井。地质导向钻井技术能使井眼轨迹避开地层界面和地层流体界面始终位于产层内, 从而可以精确地控制井下钻具命中最佳地质目标。实现地质导向钻井的几项关键技术是随钻测量、随钻测井技术, 旋转导向闭环控制系统等。

随钻测量(MWD)的两项基本任务是测量井斜和钻井方位, 其井下部分主要由探管、脉冲器、动力短节(或电池筒)和井底钻压短节组成, 探管内包含各种传感器, 如井斜、方位、温度、震动传感器等。探管内的微处理器对各种传感器传来的信号进行放大并处理, 将其转换成十进制, 再转换成二进制数码, 并按事先设定好的编码顺序把所有数据排列好。脉冲器用来传输脉冲信号, 并接受地面指令。它是实现地面与井下双向通讯并将井下资料实时传输到地面的唯一通道。井下动力部分有锂电池或涡轮发电机两种, 其作用是为井下各种传感器和电子元件供

收稿日期: 2007-05-30

作者简介: 张金昌(1959-), 男(汉族), 河北唐县人, 中国地质科学院勘探技术研究所副所长、教授级高级工程师, 中国地质学会探矿工程专业委员会常务副主任, 探矿工程专业, 硕士, 从事地质钻探设备设计、钻探工艺研究及科研管理工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, jinchang@cniect.com。

电。井底钻压短节用于测定井底钻压和井底扭矩。

随钻测井系统(LWD)是当代石油钻井最新技术之一。Schlumberger 公司生产的双补偿电阻率仪 CDR 和双补偿中子密度仪 CDN 两种测井系统代表了当今随钻测井系统的最高水平。CDR 和 CDN 可以单独使用也可以两项一起与 MWD 联合使用。LWD 的 CDR 系统用电磁波传送信息,整套系统安装在一特制的无磁钻铤或短节内。该系统主要包括电池筒、伽玛传感器、电导率测量总成和探管。它主要测量并实时传输地层的伽玛曲线和深、浅电阻率曲线。对这些曲线进行分析,可以马上判断出地层的岩性并在一定程度上判断地层流体的类型。LWD 的 CDN 系统用来测量地层密度曲线和中子孔隙度曲线。利用这两种曲线可以进一步鉴定地层岩性,判断地层的孔隙度、地层流体的性质和地层的渗透率。

旋转导向钻井系统(Steerable Rotary Drilling System)或旋转闭环系统(RCLS—Rotary Closed Loop System)。常规定向钻井技术使用导向弯外壳马达控制钻井方向施工定向井。钻进时,导向马达以“滑行”和“旋转”两种模式运转。滑行模式用来改变井的方位和井斜,旋转模式用来沿固定方向钻进。其缺点是用滑行模式钻进时,机械钻速只有旋转模式钻进时的 50%,不仅钻进效率低,而且钻头选择受到限制,井眼净化效果及井眼质量也差。旋转导向闭环钻井系统完全避免了上述缺点。旋转导向钻井系统的研制成功使定向井钻井轨迹的控制从借助起下钻时人工更换钻具弯接头和工具面向角来改变方位角和顶角的阶段,进入到利用电、液或泥浆脉冲信号从地面随时改变方位角和顶角的阶段。从而使

定向井钻井进入了真正的导向钻井方式。在定向井钻井技术发展过程中,如果说井下钻井马达的问世和应用使定向钻井成为现实的话,那么可转向井下钻井马达的问世和应用则大大提高了井眼的控制能力和自动化水平并减少了提下钻次数。旋转导向钻井系统钻井轨迹控制机理和闭环系统如图 1 所示。

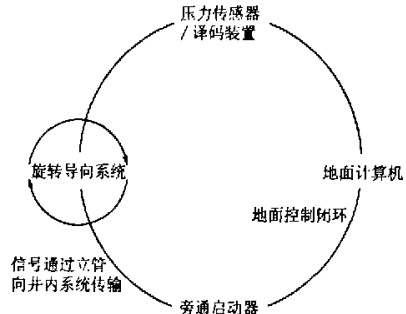


图1 旋转导向闭环系统

目前从事旋转导向钻井系统研制的公司有: Amoco、Camco、Baker Hughes Inteq、Cambridge Drilling Automation 以及 DDD Stabilizers 等。这些公司的旋转导向闭环钻井系统按定向方法又可分为自动动力定向和人工定向。自动动力定向一般由确定钻具前进方向的测量仪表、动力源和调节钻具方向的执行机构组成。人工定向系统定向类似于导向马达定向方法,需要在每次连接钻杆时进行定向。两种定向系统的定向控制原理都是通过给钻头施加直接或间接侧向力使钻头倾斜来实现的(图2)。按具体的导向方式又可划分为推靠式和指向式2种。地质导向钻井技术使水平钻井、大位移钻井、分支井钻井得到广泛应用。大位移井钻井技术和多分支井钻井技术代表了水平钻井技术的最新成果水平。

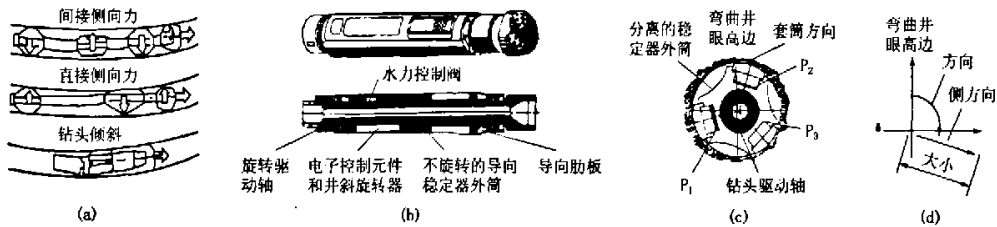


图2 旋转导向钻井系统定向轨迹控制原理

1.1.1 水平井钻井技术

目前,国外水平钻井技术已发展成为一项常规技术。美国的水平井技术成功率已达 90%~95%。用于水平井钻进的井下动力钻具近年来取得了长足进步,大功率串联马达及加长马达、转弯灵活的铰接式马达以及用于地质导向钻井的仪表化马达相继研

制成功并投入使用。为满足所有导向钻具和中曲率半径造斜钻具的要求,使用调角度的马达弯外壳取代了原来的固定弯外壳;为获得更好的定向测量,用非磁性马达取代了磁性马达。研制了耐磨损、抗冲击的新型水平井钻头。

1.1.2 大位移井钻井技术

大位移井通常是指水平位移与井的垂深之比 (HD/TVD) ≥ 2 的井。大位移井顶角 $\geq 86^\circ$ 时称为大位移水平井。 $HD/TVD \geq 3$ 的井称为高水垂比大位移井。大位移井钻井技术是定向井、水平井、深井、超深井钻井技术的综合集成应用。现代高新钻井技术,随钻测井技术(LWD)、旋转导向钻井系统(SRD)、随钻环空压力测量(PWD)等,在大位移井钻井过程中的集成应用,代表了当今世界钻井技术的一个高峰。目前世界上钻成水平位移最大的大位移井,水平位移达到 10728 m,斜深达 11287 m,该记录是 BP 阿莫科公司于 1999 年在英国 Wytch Farm 油田 M-16 井中创造的(如图 3 所示)。三维多目标大位移井也有成功的例子。如挪威 Gullfaks 油田 B29 大位移井,就是将原计划用 2 口井开发该油田西部和北部油藏的方案改为一口井开采方案后钻成的。为了钻成这口井,制定了一套能够钻达所有目标井最大限度地减少摩阻和扭矩的钻井设计方案。根据该方案,把 2630 m 长的水平井段钻到 7500 m 深度,穿过 6 个目标区,总的方位角变化量达 160° 。

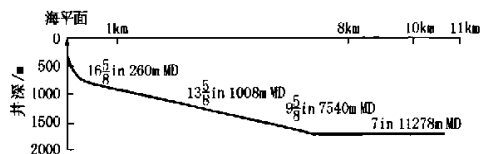


图 3 M-16 井井身轨迹

我国从 1996 年 12 月开始,先后在南海东部海域油田进行了大位移井开发试验,截止 2005 年底,已成功钻成 21 口大位移井,其中高水垂比大位移井 5 口。为开发西江 24-1 含油构造实施的 8 口大位移井,其井深均超过 8600 m,水平位移都超过了 7300 m,水垂比均大于 2.6,其中西江 24-3-A4 井水平位移达到了 8063 m,创造了当时(1997 年)的大位移井世界纪录。

大位移井钻井涉及的关键技术有很多,国内外目前研究的热点问题包括:钻井设备的适应性和综合运用能力、大斜度(大于 80°)长裸眼钻进过程中井眼稳定和水平段延伸极限的理论分析与计算、大位移井钻井钻具摩擦阻力/扭矩的计算和减阻、成井过程中套管下入难度大及套管磨损严重等。此外大位移井钻井过程中的测量和定向控制、最优的井身剖面(结构)设计、钻柱设计、钻井液性能选择及井眼净化、泥浆固控、定向钻井优化、测量、钻柱振动等问题也处在不断探索研究之中。

1.1.3 分支井钻井技术

多分支井钻井技术产生于 20 世纪 70 年代,并于 90 年代随着中、小曲率半径水平定向井钻进技术的发展逐渐成熟起来。多分支井钻井是水平井技术的集成发展。多分支井是指在一个主井眼(直井、定向井、水平井)中钻出若干进入油(气)藏的分支井眼。其主要优点是能够进一步扩大井眼同油气层的接触面积、减小各向异性的影响、降低水锥水串、降低钻井成本,而且可以分层开采。目前,全世界已钻成上千口分支井,最多的有 10 个分支。多分支井可以从一个井眼中获得最大的总水平位移,在相同或不同方向上钻穿不同深度的多层油气层。多分支井井眼较短,大部分是尾管和裸眼完井,而且一般为砂岩油藏。

多分支井最早是从简单的套管段铣开窗侧钻、裸眼完井开始的。因其存在无法重入各个分支井和无法解决井壁坍塌等问题,后经不断研究探索,1993 年以来预开窗侧钻分支井、固井回接至主井筒套管技术得到推广应用。该技术具有主井筒与分支井筒间的机械连接性、水力完整性和选择重入性,能够满足钻井、固井、测井、试油、注水、油层改造、修井和分层开采的要求。目前,国外常用的多分支系统主要有:非重入多分支系统(NAMLS),双管柱多分支系统(DSMLS),分支重入系统(LRS),分支回接系统(LTBS)。目前国外主要采用 4 种方式钻多分支井:(1)开窗侧钻;(2)预设窗口;(3)裸眼侧钻;(4)井下分支系统(Down Hole Splitter System)。

1.2 连续管钻井(CTD)技术

连续管钻井技术又叫柔性钻杆钻井技术。开始于 20 世纪 60 年代,最早研制和试用这一技术钻井的有法国、美国和匈牙利。早期法国连续管钻进技术最先进,1966 年投入工业性试验,70 年代就研制出各种连续管钻机,重点用于海洋钻进。当时法国制造的连续管单根长度达到 550 m。美国、匈牙利制造的连续管和法国的类型基本相同,单根长度只有 20~30 m。

早期研制的连续管有 2 种形式。一种是供孔底电钻使用,由 4 层组成,最内层为橡胶或橡胶金属软管的心管,孔底电机动力线就埋设在心管内;心管外是用 2 层钢丝和橡胶贴合而成的防爆层;再外层是钢丝骨架层,用于承受拉力和扭矩;最外层是防护胶层,其作用是防水并保护钢丝。另一种是供孔底涡轮钻具使用的,因不需要埋设动力电缆,其结构要比第一种简单得多。

第四届国际石油会议之后,美国等西方国家把

注意力集中在发展小井眼井上,限制了无杆电钻的发展。连续管钻井技术的研究也放慢了脚步。我国于 20 世纪 70 年代曾开展无杆电钻和连续管钻井技术的研究。勘探所与青岛橡胶六厂合作研制的多种规格的柔性钻杆,经过单项性能试验后,于 1975 年初步用于涡轮钻。1978 年 12 月成功用于海上柔性钻杆孔底电钻,并建造了我国第一台柔杆钻机钻探船。1979~1984 年勘探所联合清华大学电力工程系、青岛橡胶六厂研究所和北京地质局修配厂共同研制了 DRD-65 型柔管钻机和柔性钻杆。DRD-65 型柔管钻机主要有柔性钻杆、 $\varnothing 146$ mm 潜孔电钻、钻塔、柔杆绞车及波浪补偿器、泥浆泵、电控系统和液控系统部分组成。研制的柔性钻杆主要由橡胶、橡胶布层、钢丝绳及动力线组成。拉力由柔杆中的钢丝骨架层承担,钢丝绳为 $\varnothing 0.7$ mm $\times 7$ 股,直径 2.1 mm,每根拉力 ≤ 4350 N,总数为 134 根,计算拉力为 500 kN,试验拉力为 360 kN。钻进过程中,柔性钻杆起的作用为:起下钻具、承受反扭矩、引导冲洗液进入孔底、通过设于柔性钻杆壁内的电缆向孔底电钻输送电力驱动潜孔电钻运转、向地表传送井底钻井参数等。

柔性钻杆性能参数为:内径 32 mm;抗扭矩 ≤ 105 kg $\cdot$ m;外径 85~90 mm;单位质量 13 kg/m;抗内压(工作压力)40 kg/cm²,曲率半径 ≥ 0.75 m,抗外压 ≤ 10 kg/cm²;弯曲度:两弯曲形成的夹角 $\geq 120^\circ$;额定拉力 1000 kN;柔杆内埋设动力导线 3 组,每组 15 mm²,信号线二根;柔杆单根长度为 40、80 m 两种规格。

$\varnothing 146$ mm 型柔杆钻机由 $\varnothing 127$ mm 电动机、减压器、液压平衡器和减震器组成。动力是潜孔电钻,它直接带动钻头潜入孔底钻井。 $\varnothing 146$ mm 孔底电钻是外通水式,通水间隙宽 5 mm,通水横断面积为 2055 mm²。

与常规钻井技术相比,连续管钻井应用于石油钻探具有以下优点:欠平衡钻井时比常规钻井更安全;因省去了提下钻作业程序,可大大节省钻井辅助时间,缩短作业周期;连续管钻井技术为孔底动力电钻的发展及孔底钻进参数的测量提供了方便条件;在制作连续管时,电缆及测井信号线就事先埋设在连续管壁内,因此也可以说连续管本身就是以钢丝为骨架的电缆,通过它可以很方便地向孔底动力电钻输送电力,也可以很方便地实现地面与孔底的信息传递;因不需拧卸钻杆,因此在钻进及提下钻过程中可以始终保持冲洗液循环,对保持井壁稳定、减少

孔内事故意义重大;海上钻探时,可以补偿海浪对钻井船的漂移影响;避免了回转钻杆柱的功率损失,可以提高能量利用率,深孔钻进时效果更明显。正是由于连续管钻井技术有上述优点,加之油田勘探需要以及相关基础工业技术的发展为连续管技术提供了进一步发展的条件,在经过了一段时间的沉寂之后,20 世纪 80 年代末 90 年代初,连续管钻井技术又呈现出飞速发展之势。其油田勘探工作量年增长量达到 20%。连续管钻井技术研究应用进展情况简述如下。

(1)数据和动力传输热塑复合连续管研制成功。这种连续管是由壳牌国际勘探公司与航空开发公司于 1999 年在热塑复合连续管基础上开始研制的。它由热塑衬管和缠绕在外面的碳或玻璃热塑复合层组成。中层含有 3 根铜质导线、导线被玻璃复合层隔开。碳复合层的作用是提供强度、刚度和电屏蔽。玻璃复合层的作用是保证强度和电隔离。最外层是保护层。这种连续管可载荷 1.5 kV 电压,输出功率 20 kW,传输距离可达 7 km,耐温 150 $^\circ$ C。每根连续管之间用一种特制接头进行连接。接头由一个钢制的内金属部件和管子端部的金属环组成。这种连续管主要用于潜孔电钻钻井。新研制的数据和动力传输连续管改变了过去用潜孔电钻钻井时,电缆在连续管内孔输送电力影响冲洗液循环的缺点。

(2)井下钻具和钻具组合取得新进展。XL 技术公司研制成功一种连续管钻井的电动井下钻具组合。该钻具组合主要由电动马达、压力传感器、温度传感器和震动传感器组成。适用于 3.75 in 井眼的电动井下马达已交付使用。下一步设想是把这种新型电动马达用于一种新的闭环钻井系统。这种电动井下钻具组合具有许多优点:不用钻井液作为动力介质,对钻井液性能没有特殊要求,因而是欠平衡钻井和海上钻井的理想工具;可在高温下作业,振动小,马达寿命长;闭环钻井时借助连续管内设电缆可把测量数据实时传送到井口操纵台,便于对井底电动马达进行灵活控制,因而可使钻井效率达到最佳;Sperry-sun 钻井服务公司研制了一种连续管钻井用的新的导向钻具组合。这种钻具组合由专门设计的下部阳螺纹泥浆马达和长保径的 PDC 钻头组成。长保径钻头起一个近钻头稳定器的作用,可以大幅度降低振动,提高井眼质量和机械钻速。泥浆马达有一个特制的轴承组和轴,与长保径钻头匹配时能降低马达的弯曲角而不影响定向性能。在大尺寸井眼(>6 in)中进行的现场试验证明,导向钻具组合

具有机械钻速高、井眼质量好、井下振动小、钻头寿命长、设备可靠性较高等优点。另外还研制成功了一种连续软管欠平衡钻井用的绳索式井底钻具组合。该钻具组合外径为 2 $\frac{1}{2}$ in 上部与外径 2 in 或 2 $\frac{3}{4}$ in 的连续管配用,下部接钻铤和 3 $\frac{1}{2}$ ~ 4 $\frac{3}{4}$ in 钻头。该钻具组合由电缆式遥控器、稳定的 MWD 仪器、有效的电子定向器及其它参数测量和传输器件组成。电缆通过连续管内孔下入孔底,能实时监测并处理工具面向角、钻井顶角、方位角、自然伽玛、温度、径向振动频率、套管接箍定位、程序状态指令、管内与环空压差等参数。钻具的电子方位器能在钻井时在导向泥浆马达连续旋转的情况下测量并提供井斜和方位两种参数。

其它方面的新进展包括:连续管钻井技术成功用于超高压层侧钻;增加连续管钻井位移的新工具研制成功;连续管钻井与欠平衡钻井技术结合打水平井取得好效果;适于连续管钻井的混合钻机研制成功;连续管钻井理论取得新突破。

1.3 石油勘探小井眼钻井技术

石油部门通常把 70% 的井段直径小于 177.8 mm 的井称为小井眼井。由于小井眼比传统的石油钻井所需钻井设备小且少、钻探耗材少、井场占地面积小,从而可以节约大量勘探开发成本,实践证明可节约成本 30% 左右,一些边远地区探井可节约 50% ~ 75%。因此小井眼井应用领域和应用面越来越大。目前小井眼井主要用于:(1)以获取地质资料为主要目的的环境比较恶劣的新探区或边际探区探井;(2)600 ~ 1000 m 浅油气藏开发;(3)低压、低渗、低产油气藏开发;(4)老油气田挖潜改造等。

1.4 套管钻井技术

套管钻井就是以套管柱取代钻杆柱实施钻井作业的钻井技术。不言而喻套管钻井的实质是不提钻换钻头及钻具的钻进技术。套管钻井思想的由来是受早期(18 世纪中期钢丝绳冲击钻进方法用于石油勘探,19 世纪末期转盘回转钻井方法开始出现并用于石油钻井)钢丝绳冲击钻进(顿钻时代)提下钻速度快,转盘回转钻进井眼清洁且钻进速度快的启发而产生的。1950 年在这一思想的启发下,人们开始在陆上钻石油井时,用套管带钻头钻穿油层到设计孔深,然后将管子固定在井中成井,钻头也不回收。后来,Sperry - sun 钻井服务公司和 Tesco 公司根据这一钻井原理各自开发出套管钻井技术并制定了各自的套管钻井技术发展战略。2000 年, Tesco 公司将 4.5 ~ 13.375 in 的套管钻井技术推向市场,为世

界各地的油田勘探服务。真正意义的套管钻井技术从投放市场至今还不到 10 年时间。

套管钻井技术的特点和优势可归纳如下。

(1)钻进过程中不用起下钻,只利用绞车系统起下钻头和孔内钻具组合,因而可节省钻井时间和钻井费用。钻进完成后即等于下套管作业完成,可节省完井时间和完井费用。

(2)可减少常规钻井工艺存在的诸如井壁坍塌、井壁冲刷、井壁键槽和台阶等事故隐患。

(3)钻进全过程及起下井底钻具时都能保持泥浆连续循环,有利于防止钻屑聚集,减少井涌发生。套管与井壁之间环状间隙小,可改善水力参数,提高泥浆上返速度,改善井眼清洗效果。

套管钻井分为 3 种类型:普通套管钻井技术、阶段套管或尾管钻井技术和全程套管钻井技术。普通套管钻井是指在对钻机和钻具做少许改造的基础上,用套管作为钻柱接上方钻杆和钻头进行钻井。这种方式主要用于钻小井眼井。尾管钻井技术是指在钻井过程中,当钻入破碎带或涌水层段而无法正常钻进时,在钻柱下端连接一段套管和一种特制工具,打完这一段起出钻头把套管留在井内并固井的钻井技术。其目的是为了封隔破碎带和水层,保证孔内安全并维持正常钻进。通常所说的套管钻井技术是指全程套管钻井技术。全程套管钻井技术使用特制的套管钻机、钻具和钻头,利用套管作为水利通道,采用绳索式钻井马达作业的一种钻井工艺。目前,研究和开发这种钻井技术的主要是加拿大的 Tesco 公司,并在海上打过井,达到了降低成本的目的。但是这种钻井技术目前仍处于研究完善阶段,还存在许多问题有待研究解决。这些问题主要包括(1)不能进行常规的电缆测井;(2)钻头泥包问题严重,至今没有可靠的解决办法;(3)加压钻进时,底部套管会产生横向振动,致使套管和套管接头损坏,目前还没有找到解决消除或减轻套管横向振动的可靠方法;(4)由于套管钻进不使用钻铤,加压困难,所以机械钻速低于常规钻杆钻井;部分抵消了套管钻进提下钻节省的时间;(5)套管钻井主要用于钻进破碎带和涌水地层,其应用范围还不大。

我国中石油系统的研究机构也在探索研究套管钻井技术,但至今还没有见到公开报道的成果。目前,套管钻井技术的研究内容,除了研制专用套管钻机和钻具外,重点针对上述问题开展。一是进行钻头的研究以解决钻头泥包问题;二是研究防止套管横向振动的措施;三是研究提高套管钻井机械钻速

的有效办法;四是研究套管钻井固井办法。

套管钻井应用实例:2001 年,美国谢夫隆生产公司利用加拿大 Tesco 公司的套管钻井技术在墨西哥湾打了 2 口定向井(A-12 和 A-13 井)。两井成井深度分别为 $3222 \times 30.48 \text{ cm}$ 和 $3728 \times 30.48 \text{ cm}$ 。为了进行对比分析,又用常规方法打了一口 A-14 井,结果显示,同样深度 A-14 井用时 75.5 h, A-13 井用时 59.5 h。表层井段钻速比较, A-12 井的平均机械钻速为 141 ft/h, A-13 井为 187 ft/h, A-14 井为 159 ft/h。这说明套管钻井的机械钻速与常规方法机械钻速基本相同。但钻遇硬地层后套管钻井,钻压增加到 6.75 t,致使扩眼器切削齿损坏,钻速降低很多。BP 公司用套管钻井技术在怀俄明州钻了 5 口井。井深为 8200 ~ 9500 ft,且都是从井口钻到油层井段。钻进过程中遇到了钻头泥包和套管振动问题。

此外,膨胀套管技术也是近年来发展起来的一种新技术,主要用于钻井过程中隔离漏失、涌水、遇水膨胀缩径、破碎掉块易坍塌等地层以及石油开采时油管的修复。勘探所与中国地质大学合作已立项开展这方面的研究工作。

1.5 石油钻机的新发展

国外 20 世纪 60 年代末研制成功了 AC-SCR-DC 电驱动钻机,并首先应用于海洋钻井。由于电驱动钻机在传动、控制、安装、运移等方面明显优于机械传动钻机,因而获得很快的发展,目前已经普遍应用于各型钻机。90 年代以来,由于电子器件的迅速发展,直流电驱动钻机可控硅整流系统由模拟控制发展为全数字控制,进一步提高了工作可靠性。同时随着交流变频技术的发展,交流变频首先于 90 年代初成功应用于顶部驱动装置,90 年代中期开始应用于深井石油钻机。目前,交流变频电驱动已被公认为电驱动钻机的发展方向。

国内开展电驱动钻机的研究起步较晚。兰州石油化工机器厂于 20 世纪 80 年代先后研制并生产了 ZJ60D 型和 ZJ45D 型直流电驱动钻机,1995 年成功研制了 ZJ60DS 型沙漠钻机,经应用均获得较好的评价。90 年代末期以来,我国石油系统加大钻机的更新改造力度,电驱动钻机取得了较快发展,宝鸡石油机械厂和兰州石油化工机器厂等先后研制成功 ZJ20D、ZJ50D、ZJ70D 型直流电驱动钻机和 ZJ20DB、ZJ40DB 型交流变频电驱动钻机,四川油田也研制出了 ZJ40DB 交流变频电驱动钻机,明显提高了我国钻机的设计和制造水平。进入 21 世纪,辽河油田勘

探装备工程公司自主研制成功了钻深能力为 7000 m 的 ZJ70D 型直流电驱动钻机。该钻机具有自动送钻系统,代表了目前我国直流电驱动石油钻机的最高水平,整体配置是目前国内同类型钻机中最好的。2007 年 5 月已出口阿塞拜疆,另两部 4000 m 钻机则出口运往巴基斯坦和美国。由宝鸡石油机械有限责任公司于 2003 年研制成功并投放市场的 ZJ70/4500DB 型 7000 m 交流变频电驱动钻机,是集机、电、数字为一体的现代化钻机,采用了交流变频单齿轮绞车和主轴自动送钻技术和“一对一”控制的 AC-DC-AC 全数字变频技术。该型钻机代表了我国石油钻机的最新水平。凭借其优良的性能价格比,2003 年投放市场至今,订货已达 83 台套。其中美国、阿曼、委内瑞拉等国石油勘探公司订货达 42 台套。在国内则占领了近 2 ~ 3 年来同级别电驱动钻机 50% 的市场份额。ZJ70/4500DB 型钻机主要性能参数:名义钻井深度 7000 m,最大钩载 4500 kN,绞车额定功率 1470 kW,绞车和转盘挡数 I + IR 交流变频驱动、无级调速,泥浆泵型号及台数 F-1600 三台,井架型式及有效高度 K 型 45.5 m,底座型式及台面高度:双升式/旋升式 10.5 m,动力传动方式 AC-DC-AC 全数字变频。

2 地质岩心钻探技术

18 世纪中叶出现人力驱动的岩心钻机和天然金刚石钻头至今的 100 多年中,岩心钻机由早期的机械传动手把给进到机械传动液压给进立轴钻机发展到今天的全液压力头钻机以及自动化、智能化地质岩心钻机。与此同时,孔底动力钻具(潜孔锤、螺杆钻、涡轮钻、孔底电钻等)也从发明到发展,至今已具有一定水平。从 1862 年天然金刚石用于制造金刚石钻头岩心钻探方法问世;1899 年发明了铁砂(钢粒)钻进;1916 年硬质合金开始用于钻探;1954 年世界第一颗人造金刚石制造成功并用于制造金刚石钻头;人类经历了天然金刚石表镶钻头钻探时代,铁砂、钢粒和硬质合金钻探时代,人造金刚石孕镶钻头钻探时代至今到了人造复合超硬材料钻探时代。20 世纪末至 21 世纪初,地质岩心钻探技术又有了新的发展。

2.1 全液压力头钻机引领着地质岩心钻探设备发展方向,自动化钻机达到实用化程度

2.1.1 全液压力头式钻机

加拿大阿特拉斯·科普柯克里斯坦森(Christensen)公司的全液压岩心钻机已经形成完整系列。

CS 系列全液压钻机,钻进能力从 610 m 至 2000 m,具有长行程给进、无塔升降钻具、无级调速、机械化程度高、配套器具齐全、生产效率高等优点。其中浅孔钻机分解性强、分解后的部件比较轻,适合难进入地区使用。Boart Longyear 公司的 LF70 型钻机($\varnothing 59$ mm 孔径钻深 760 m)。CT-171 轻便型钻机可用直升机吊运,设计特点是拆开后的部件不超过 25 kg,若干部件用轻合金制作,总体 RFM 量轻。其设计为模块化、全液压、轻便、多功能,代表了最新的发展潮流。新型“飞运”钻机是真正的小模块拼装式,适用于难进入地区采用人力或飞运搬迁。例如加拿大的 HYDRACORE 4000 型钻机,将动力机和液压站也设计为拼装式,钻机动力为 200 HP,以绳索取心钻进工艺为主,NQ 钻进深度达到 1067 m。

2.1.2 多功能钻机

随着复合钻探技术(即金刚石岩心钻探、空气反循环连续取样钻探、空气潜孔锤取样钻探在一个钻孔中使用的钻进工艺)的普遍应用,适用于该复合钻进工艺的多功能钻机得到快速发展。加拿大国际钻探设备公司的 CSR 系列钻机,主要用于 300 ~ 1000 m 孔深进行反循环中心取样(CSR)作业,在美国、加拿大广泛用于金、铀和铁等地质矿产勘查。美国萨姆公司的 T 系列钻机,用于水井和煤层气井;英格索兰公司的 RD 系列钻机,用于水文水井钻探;美国长年公司的 HD-600 型钻机用于油气、地热和矿产勘探。钻深能力从 1000 m 至 3000 m 不等,如 HD-600 型钻机用 CHD-76 绳索取心钻进时钻深能力为 3000 m。澳大利亚 U. D. R. 公司的 Universal 5000 型深尺全液压动力头式钻机,当用 $\varnothing 89$ mm 钻杆无岩心钻进 $\varnothing 165$ mm 孔径时,钻深能力为 1900 m;用 CHD101 绳索取心钻进时为 3100 m。配备柴油机动力 410 HP,提升能力达 45000 kg。此类钻机整机体积大且笨重,为深孔重型钻机。

2.1.3 自动化、智能化钻机

加拿大 JKS Boyles 公司开发成功 B 系列坑道自动化钻机。该系列钻机采取全液压动力头结构,机、电、液一体化和计算机控制钻进方式。施工现场只需一名操作人员。钻进参数完全由计算机监测和控制;钻具升降等作业也全部自动完成。钻进过程也可在地面的通讯操作室(CCR)做连续监视和数据自动记录。B-10、B-15、B-20 型自动钻机最大钻进孔深分别为 340、600(AQ)、1550 m。瑞典海格比(HAGBY)公司开发成功 ONRAM 系列 1000/4 CCD 型和 2000 CCD 型全自动岩心钻机(Computer Con-

trolled Drill)。1000/4 CCD 型钻机钻进能力为 750 m BQ 钻杆。该钻机可采集和记录钻进过程中的 13 种参数,根据这些参数对钻进过程进行实时控制。

Atlas Copco 公司开发成功 Diamec 系列全自动钻机,为典型适合金刚石钻进的高速低扭矩钻机。Diamec 系列钻机适用于地表或巷道内施工,为全液压动力头式,配备机、电、液一体化的操作系统。经矿山实际应用,具有明显的钻进效率高、钻进成本低和操作简易等优点。Diamec264APC 型钻机配置有 3 种不同的给进长度(0.8、1.8、3.3 m),以适应不同需要。近几年,阿特拉斯·科普柯公司陆续研发了 DiamecU4APC 型、DiamecU6APC 型和 DiamecU8APC 型自动化钻机。其中 DiamecU4APC 型属第二代自动化钻机,真正实现了机台单人操作。DiamecU6APC 型钻机在 DiamecU4APC 的基础上进一步简化了结构,提高了电子系统在恶劣环境中的工作能力,其钻深能力为 1000 m。作为第三代自动化钻机代表的 DiamecU8APC 型钻机,在其设计中更多地考虑了人类工程学(Ergonomic),加强了人性关怀和安全,其钻深能力为 1500 m。

2.1.4 我国 XY 系列液压立轴岩心钻机

“九五”期间分别研制成功液压立轴式双卡盘不停车倒杆和交流变频双卡盘地质岩心钻机。“十五”期间研制成功了 YDX-3 型新一代全液压动力头式地质岩心钻机,钻机适用于金刚石绳索取心、冲击回转、定向钻进、反循环连续取心(样)等多种高效钻探工艺方法。

2.2 地质岩心钻探工艺技术新进展

随着地质工作的整体复苏,岩心钻探工作量在逐年增多。以绳索取心、液动冲击回转、定向钻进等先进钻探技术为主要特征的小口径金刚石地质岩心钻探技术又重新显示出活力。同时,地质大调查专项成功实施以来,钻探工艺技术有了新的发展。特别是国家重大科学工程——中国大陆科学钻探工程“科钻一井”的圆满完成对提高我国的岩心钻探工艺水平起到了极大的促进作用。

(1)液动潜孔锤结构有较大改进,性能有很大提高,“三合一”钻具初步研制成功。“十五”期间研制成功的 YZX127 液动潜孔锤,采用了全新结构,大幅度提高了液动锤的能量利用率和稳定性,其技术成果获得 2 项国家发明专利。在“科钻一井”施工中创造了单井连续使用液动锤进尺 3485.69 m 和使用井深 5118.2 m 两项世界纪录。自主研制的液动潜孔锤+螺杆马达+绳索取心“三合一”钻具在“科

钻一井”主孔 5000 多 m 孔深成功钻进一个回次并取出 3.5 m 长的完整岩心。证明该套钻具的研究获得初步成功。

(2)对 VDS 垂钻系统及保真取样钻具进行了有益探索。多用途微机自动定向钻进系统与工艺的研究以自动控制纠偏为主线,探索利用成熟的传感器、液压和机械等技术组成机、电一体化的闭环控制垂钻系统,基本解决了由于空间狭小和工作环境恶劣引发的各项技术难题,探索出了一套可用于闭环控制系统的主要硬件设计的工作思路,为今后开展高技术自动垂直钻井或自动定向钻进系统研究,积累了经验,为系列化研究打下了基础。

(3)定向钻探技术及对接井钻井技术有新发展。设计了适应于定向钻进的组合钻具,改进了中低转速螺杆钻具,使之可适应牙轮钻头、金刚石钻头及复合片钻头;编制了定向钻进与水平钻进设计与控制软件;改变了水溶性矿产的采矿方式,大大提高了采矿效率和矿产资源利用率。完成了 2 对近 3000 m 深井对接井,开创了我国对接井技术的新纪元,实现采卤对接井的重大技术突破。

(4)中国大陆科学钻探工程“科钻一井”的圆满完成。2005 年 12 月 17 日“中国大陆科学钻探工程新型钻井技术体系的研究与应用”科技成果通过了国土资源部的鉴定。该项目创造性地将“组合式钻探技术”、“灵活的双孔方案”和“超前孔小直径取心钻进方法”有机地结合起来,形成了独具中国特色的科学钻井技术体系。该新型钻井技术体系主要由井底动力驱动的冲击回转取心钻探技术、硬岩大直径长井段扩孔钻进技术、强致斜地层井斜控制技术、性能优良的 LBM-SD 泥浆体系、小间隙固井及活动套管应用技术、孔内事故预防处理技术、钻探数据采集处理技术等组成。“科钻一井”的成功实施及其所取得的科技成果对我国地质岩心钻探技术水平的提高起到了极大的推动作用。

(5)新型钻探碎岩方法还在不懈探索。中国地质大学(武汉)建成了“热熔钻进实验系统”,针对松散、卵砾石地层进行了初步实验。中国地质大学(北京)声频振动钻机及钻探技术研究正在进行,定向钻进钻孔轨迹实时监控和中靶系统研究也已启动。吉林大学生物非光滑理论与仿生金刚石钻头研究已取得试验数据。

3 结语

(1)石油钻井技术和地质岩心钻探技术属于 2

个不同的钻探技术体系。无论是钻探设备还是钻探工艺方法都有各自的特点,并沿着各自的发展轨迹发展。石油钻机从柴油动力驱动向直流变频驱动、交流变频驱动发展;回转器形式由转盘向顶部驱动发展;孔底动力钻具有涡轮钻、螺杆钻和潜孔电钻;为了提高回转钻进机械钻速,最近几年开始重视空气钻井技术和潜孔锤的开发应用。地质岩心钻机则由柴油动力驱动、电驱动机械传动向柴油动力驱动液压传动方向发展;回转器形式由立轴式向动力头式发展;孔底动力钻具,液动潜孔锤和螺杆钻应用较多,涡轮钻和孔底电钻应用较少。石油钻井多为不取心全面钻进,依靠测井了解地层情况;地质岩心钻探则要求取心钻进,通过岩矿心的化验分析了解岩层和矿层的结构和组成。

(2)石油钻机和地质岩心钻机都在向自动化、智能化方向发展。将最新的电子技术和液压技术紧密结合在和谐的设计中,使得钻探工作的许多选择达到真正的灵活和智能化。钻头压力、钻杆质量、回转速度和水泵压力都能自动调整,并能优化主要的岩石状态和钻孔深度。

(3)模块化设计(Component Design),钻探工艺的多样化,注重健康安全环保 HSE(Health Safety Environment)是石油钻井和地质岩心钻探共同追求的目标,现在越来越受到欧美等国家钻探界的重视。国外几乎每个厂商都把 HSE 放在第一位,都有他们的 HSE 要求,在他们的每台钻探设备上都有安全保护装置。在噪声的控制方面,瑞典的阿特拉斯·科普柯(Atlas Copco)公司已经研制出低噪声的钻机,钻机工作时的噪声从传统的 80 分贝降低到 52 分贝。

参考文献:

- [1] 王同良,孙清德,张丽东. 钻井技术新进展[M]. 北京:中国石化出版社,2001.9.
- [2] 王同良,赵忠举,张丽东,等. 国外高效钻井新理论新方法[Z]. 北京:中国石油集团经济和信息中心,2002.
- [3] 张武攀,等. 中国南海西江创世界纪录大位移井钻井技术[J]. 石油钻采工艺,1998,20(增刊):1-115.
- [4] 张永泽,王定亚. 出口美国 Nabors ZJ70/4500DB 钻机设计研制[J],石油机械,2006,34(7).
- [5] 王达,张伟,张晓西,等. 中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [6] 赵金海,唐代绪,等. 国外典型的旋转导向钻井系统[J]. 国外石油工程,2002,18(11).

注:本文还参考了中国地质科学院勘探技术研究所档案材料、《国外研究和用电钻简况》(1976 年)、《柔性钻杆》(1979 年)、《DRD65 型套管钻机电机研究与设计》(1979 年)等。