

石油机械技术水平 调研报告集

(1988年)

石油工业机械科技情报协作组 编

机械工业出版社

石油
9

为促进石油机械装备技术的发展,满足专业工作者的需要,加强新技术、新材料、新工艺科研成果的交流,编辑出版了本报告集。报告集收选的报告文章共36篇,内容包括:钻机、升降设备、钻井液循环设备、钻头钻具与工具、抽油设备、修井设备、油气井提高采收率设备、动力机械与传动机械、物探设备、石油机械用钢等几部分。报告集荟集了当代石油机械的最新科研成果,不少报告对发展我国石油装备提出了有益的见解及建议。

石油机械技术水平
调 研 报 告 集
石油工业机械科技情报协作组编

•
责任编辑:王明贤
封面设计:方 芬

•
机械工业出版社出版(北京市阜成门外百万庄南里一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)
江汉物探印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•
开本787×1092 1/16·印张18 1/2·插页1·字数452千字
1989年12月湖北第一版·1989年12月湖北第一次印刷
印数00,001—2,000·定价:12.60元

•
ISBN 7-111-01935-0/TE·2

参加石油机械技术水平调研报告集的
选题、组织、评审工作的领导和专家有：
陈泽轩、张德禄、张文学、赵光理、邓尼亚、
郭友春、华北庄、朱企贤、林尤柱、严元昌、
赵守申

前 言

石油工业机械科技情报协作组成立于1985年1月，是中国石油天然气总公司装备部和科技情报研究所领导下的一个行业组织，四年来组织了大量的石油机械情报调研，并于1987年5月出版了《石油机械技术水平调研报告集》，同年12月由科技情报研究所出版了《国外石油科技水平调查》，这次出版的是第3集。这些调研促进了石油机械的科研设计、产品开发、技术引进和教学培训工作，为石油装备的发展规划和决策提供了依据。

本报告集的内容来源于1988年10月举行的石油装备科技水平调研报告会。会上发布和交流的报告与资料共有44篇。选编在本报告集中的有36篇，荟集了当代石油机械的新技术、新工艺、新材料及其科研成果、发展趋势，不少报告对发展我国石油机械装备提出了有益的见解和建议。

江汉机械研究所朱企贤、林尤柱、蒋新源、和锡山、魏兰佑、田秀云、李学富、王志权、江先雄参加了本报告集的编辑工作，在出版工作方面还得到机械工业出版社的大力支持，在这里一并向他们表示衷心的感谢。

赵光理

1989年10月

目 录

• 钻头钻具与工具 •

取心钻头的现状与发展·····	张坤华	(1)
国外井下动力钻具的新发展·····	符达良 易先忠	(8)
国内外扩孔钻具概述·····	程 永	(30)
国外定向控制井眼轨迹新技术——导向钻井系统·····	李长保	(34)
斜井工具的现状与发展·····	潘玉兰	(42)
打捞工具的发展现状与展望·····	胡辛禾	(47)
液压防喷器系统的发展水平及可靠性试验研究·····	崔 岚 汪 骏 张 鹏	(53)
防喷器的现状与发展·····	张永泽	(59)

• 钻 机 •

国外石油钻机的技术水平与展望·····	许志萱	(63)
国内外车装钻机的现状与展望·····	刘兴炎	(75)
发挥进口车装钻机经济效益的研究·····	杨敏嘉 彭高华 刘玉泉	(84)

• 钻机升降设备 •

国内外钻机游动系统的现状与发展·····	杨恩峰	(89)
国内外钻机绞车水平与发展·····	许志萱	(97)
国内外钢丝绳技术综述·····	赵 众 于博生 张质斌	(103)

• 钻井液循环设备 •

国内外钻井泵泵阀的结构及其使用现状·····	夏元白 杨斌祥 张理德	(112)
钻井泵活塞综述·····	周锡容 杨启明	(123)
钻井液固相控制设备的现状与未来·····	胡辛禾	(131)

• 抽油机械设备 •

液压抽油机·····	常国介	(139)
斜井抽油机的研究现状与展望·····	刘玉泉 邹龙庆 彭高华	(148)
美苏有杆抽油泵现状及发展我国抽油泵的建议·····	赵从楷	(154)
国内外常规抽油泵概述·····	杨燕怡	(171)
国外井下单螺杆泵概述及其在我国的应用前景·····	郁文正 张殿祥	(177)
国外水力喷射泵水平调查·····	曲良泉	(183)

• 油气井提高采收率设备 •

国内外油田离心注水泵技术水平概述·····	杨君恺 刘军成	(194)
-----------------------	---------	---------

国内外隔热油管的技术水平·····	朱月珍	(201)
-------------------	-----	---------

· 修 井 设 备 ·

概述斜直井修井和抽油装备的功能要求与方案设计·····	张本权	(205)
国外修井机传动方案的评价·····	陈秉衡	(213)

· 试 井 仪 表 ·

国内外试井仪器的现状与发展·····	王嘉祥 陈 瑛	(218)
--------------------	---------	---------

· 动力机械与传动机械 ·

国内外双燃料发动机的应用与发展·····	曾庆义	(228)
中小功率天然气发动机在我国油田上的应用·····	刘善德 侯华业	(235)
气动技术的发展趋势及在石油机械上扩大应用的前景·····	沈树国	(242)

· 石油机械用钢 ·

石油矿场用低合金钢和合金钢的现状与发展·····	李鹤林	(249)
--------------------------	-----	---------

· 物 探 装 备 ·

国外横波声波测井技术的现状与发展·····	胡良忱	(259)
地层倾角测井仪的现状与发展·····	王耀东	(272)
国内外地震检波器的发展及评价·····	吴绍基 王裕庆 王兴安	(280)
国内外测井绞车的现状与发展·····	蒋祖禹	(285)

取心钻头的现状与发展

江汉石油管理局钻头厂 张坤华

提 要

80年代以前,我国石油钻井取心主要使用硬质合金取心钻头。这种钻头进尺少、钻速低,不能适应各种地层取心的需要。国外已普遍使用金刚石钻头取心,特别是近年来又发展了复合片及热稳定聚晶金刚石取心钻头,使取心技术进入了一个崭新的阶段。本文收集了国内外近年来取心钻头研制与生产方面的资料,较详细地介绍了国外各系列金刚石取心钻头的结构特点、制造工艺、适用范围及使用情况;并指出,要加快石油勘探开发的速度,当前我国在加快发展全面钻进钻头的同时,还应从加强科研攻关等六个方面入手来加快发展取心钻头。

取心钻头是钻井取心必不可少的重要工具。人们要直观地认识地层,必须取得关于地层的第一性地质资料,因此须用取心钻头取地下岩心。随着金刚石钻头取心技术的不断发展,取心钻头的种类不断增加,其结构型式、所用材料、制造工艺不断创新,适用范围不断扩大,使用指标不断提高。

了解当今国内外取心钻头的现状与发展动向,对加速我国取心钻头技术的发展,以加快我国石油勘探开发的速度是有重要意义的。

一、取心钻头的分类

目前,取心钻头一般分为两大类。

(一) 常规取心钻头

1. 硬质合金镶齿取心钻头

80年代前,我国主要使用这种取心钻头。这种钻头用硬质合金作切削齿来破碎地层,钻取岩心。硬质合金齿主要采用镶焊的方式固定在钻头体上。按结构形状主要有刮刀式取心钻头(如六翼三阶梯刮刀取心钻头),这种钻头结构较简单,制造方便,适用于硬地层取心。合金齿的形状有圆柱状、长方柱状、八角柱状和针状。70年代我国研制针状合金取心钻头曾取得较好效果,但没有推广使用。

2. 牙轮取心钻头

(1) 钢齿牙轮取心钻头。这种取心钻头按结构有四牙轮和六牙轮的。在铣齿牙轮的表面上加焊硬质材料,提高钻头的耐磨性。这种钻头,如美国REED公司的CR241型六牙轮取心钻头,一般适用于软至中硬地层取心。

(2) 镶齿牙轮取心钻头。这种取心钻头按结构也有四牙轮、六牙轮的。牙轮的镶齿工艺与镶齿三牙轮钻头的大体相同。按地层软硬,采用不同齿形,如硬至极硬地层采用球形齿,以压碎和冲击的方式破碎高研磨性的地层。

美国休斯公司1908年已生产出滚轮式取心钻头。这种钻头装有可转动的截锥形滚轮,轮

上有锯齿形牙齿以对地层进行环形破碎。牙轮和轴是用淬火钢制造的。

上海第一石油机械厂生产的XQ6型六牙轮取心钻头，在辽河油田古潜山震旦系硬地层取心，每只平均进尺2.5m，平均机械钻速1.1m/h，比硬质合金齿取心钻头进尺提高6.5倍，钻速提高3.3倍。上海第一石油机械厂还生产XQ4型四牙轮取心钻头。

（二）金刚石取心钻头

70年代，国外已普遍使用天然金刚石钻头及聚晶金刚石钻头取心。80年代初，由于发展并推广使用复合片取心钻头及热稳定聚晶金刚石取心钻头，取心钻头技术跨进一个新的时期。

金刚石取心钻头一般可分为4大类。

1. 天然金刚石取心钻头

这种钻头的切削刃是用优质天然金刚石制成的。金刚石颗粒直接烧结在抗冲蚀、抗磨性好的碳化钨胎体冠部上。金刚石颗粒的质量为0.01~0.20g。这种钻头适用于中硬至坚硬的地层取心，是当前在高研磨性硬地层中取心最有效的工具。

2. 热稳定聚晶金刚石取心钻头

热稳定聚晶金刚石取心钻头是近年开发的金刚石取心钻头新产品，国外称之为“巴拉赛特”取心钻头，又称TSP或BDC取心钻头。这种钻头采用具有自锐作用的人造热稳定聚晶金刚石颗粒，直接烧结于碳化钨钻头胎体冠上作为切削刃。这种聚晶金刚石可耐1200℃的高温，热稳定性好，比天然金刚石的抗破碎性高。它适用的地层范围较广，在中软至硬地层中取心都可获得很好的效果。

3. 聚晶金刚石复合片（PDC）取心钻头

复合片是由人造金刚石薄层和碳化钨基片，在高温高压下钎焊成牢固整体的切削元件。人造金刚石薄层是由许多微小晶粒组成的，晶粒以不规则方式排列，以提高强度和耐磨性。

4. 人造单晶金刚石取心钻头

这种钻头用人造单晶金刚石作为切削刃，由于人造单晶金刚石的耐磨性及抗冲击性很好，适于在坚硬而破碎的地层中取心。

二、金刚石取心钻头的新进展

随着金刚石钻头技术的发展，80年代成为取心钻头以金刚石钻头为主的新时期。

（一）金刚石取心钻头的优越性

国内各油田的钻井取心实践证明，金刚石取心钻头与常规硬质合金镶齿取心钻头相比，具有很大的优越性。

四川石油管理局，1980年以前取心收获率低于80%，平均单筒进尺不到4.5m。1981年，逐步用天然金刚石取心钻头取代硬质合金镶齿取心钻头（同时配备新型取心工具）。1984年取心收获率提高到94%，平均单筒进尺提高到9.68m。

华北石油管理局使用金刚石取心钻头在沙河街地层取心，与使用硬质合金镶齿取心钻头相比，收获率提高3%，机械钻速提高2.4~2.7倍，平均单筒进尺提高1.7~2.5倍。每米取心成本降低20%以上。

大庆石油管理局使用引进聚晶金刚石取心钻头，机械钻速提高2.7倍，平均单筒进尺提

高1.8倍，每米取心成本降低60%。

辽河石油勘探局使用金刚石取心钻头，取心收获率提高54%，机械钻速提高5倍，每米取心成本降低64%。

江汉石油管理局1987年在16口井上使用FQ3型PDC取心钻头18只，比普通取心钻头的机械钻速提高4倍。

大庆石油管理局的RQ3型聚晶金刚石取心钻头已在几个油田推广使用，平均进尺比硬质合金镶齿取心钻头提高7.1倍，机械钻速提高1.96倍，每米成本降低30~80%。

聚晶金刚石复合片取心钻头具有以下特点：切削齿能自锐，机械钻速高；对地层适应性强，使用范围广；适用于低钻压、高转速，有利于保证井身质量；可减少对岩心的冲刷，取心收获率高；使用寿命长，进尺多，适用于中、长筒取心；每米取心成本低，经济效益好。

（二）金刚石取心钻头的结构特点

1. 冠部形状

冠部形状影响钻头的稳定性及清洗作用，不同冠部形状的钻头，适用于不同硬度的地层。冠部形状有以下几种：

（1）外阶梯形。具有这种冠部形状的取心钻头，如CD512型（图1-1）。

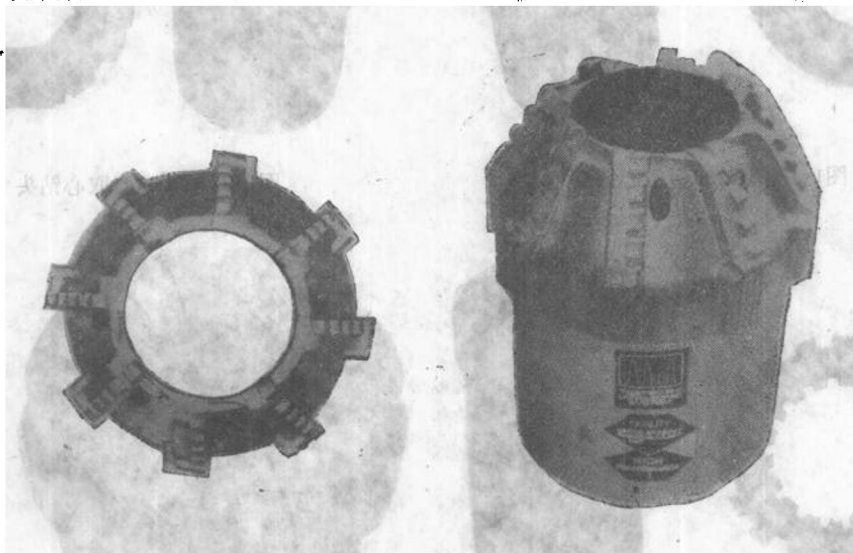


图1-1 CD512型取心钻头

（2）抛物线形。具有这种冠部形状的取心钻头，如RC473型（图1-2）、C18型（图1-3），适用于软至中软地层取心。

（3）双锥形。具有这种冠部形状的取心钻头，如SC226型（图1-4）、CT63型（图1-5），适用于中软至中硬地层取心。

（4）半圆形。具有这种冠部形状的取心钻头，如SC249型（图1-6）、CH型（图1-7），适用于硬至极硬地层取心。



图1-2 RC473型取心钻头



图1-3 C18型取心钻头

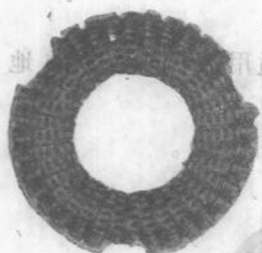


图1-4 SC226型取心钻头



图1-5 CT63型取心钻头

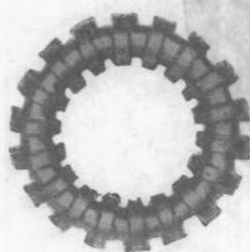
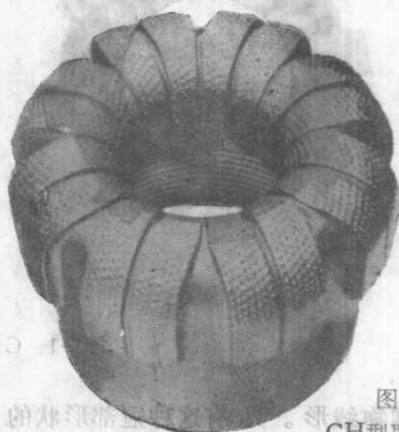


图1-6 SC249型取心钻头



图1-7

CH型取心钻头



2. 水力结构

(1) 水孔流道的形状。流道的形状主要有辐射式、分流式及螺旋式3种；具有辐射式流道的钻头，所用金刚石颗粒较大，齿的布置较稀，钻进时可以快速清洗钻头冠部表面，因而适用于较软地层。具有分流式流道的钻头，齿的布置较密，流道可以迫使液流改变方向，横跨布齿台，加强清洗效果，因而适用于较硬地层。具有螺旋式流道的钻头适用于中硬地层。

(2) 排屑槽的设计。排屑槽的数量一般是随着钻头直径的增大而增多的，形状主要

有楔形、扇形及半圆形。排屑槽的宽度及深度须充分考虑清洗钻头的排屑效果及钻头保径面的有效面积来进行综合设计。

3. 切削结构

切削齿是直接破碎地层的工具，是钻头上最重要、成本最高的零件。切削齿从下述各方面直接影响钻头的破碎效率。

(1) 切削齿的形状和类型

1) PDC片主要形状有圆形、楔形及半圆形，也可交错排列组合使用。

2) 聚晶金刚石(TSP)片由多晶体人造金刚石制成，主要形状有圆片形、立方体形(三角形、八面体等)及圆柱形。圆柱形切削齿耐磨，多用于台肩及保径部位。

3) 用于切削齿的天然金刚石多为黑色金刚石或经处理的西非金刚石，其耐磨性及抗冲击性好。价格较低廉的刚果金刚石用于钻头的内、外保径处。

(2) 切削齿的大小。对于PDC取心钻头，国外多用标准直径12.7mm(0.5in)的复合片，也有7.62mm(0.3in)、17.78mm(0.7in)、25.4mm(1in)，甚至50.8mm(2in)大直径的复合片。

对天然金刚石取心钻头，一般软地层采用大颗粒(5~15粒/g)金刚石，中软至硬地层采用中颗粒(20~35粒/g)金刚石，硬地层采用小颗粒(40~75粒/g)金刚石。

(3) 布齿方式。一般为辐射式、螺旋式，PDC钻头的布齿还有直刮刀式。

布齿的密度、齿的出露高度及露齿形状都与地层硬度及岩性密切相关。

(三) 金刚石取心钻头的制造工艺

PDC取心钻头的钻头体有钢体及胎体两种。胎体的制造工艺较复杂，成本较高，但一只钻头用一套胎体模具，可灵活改变设计，随意加工出复杂的外形，同时规径部位可以用天然金刚石保径，胎体比钢体更耐冲蚀。

1. 钢体PDC取心钻头的制造工艺

(1) 用经处理的优质合金钢作钻头体材料，先加工出钻头冠部形状(并车出与上接头联接的螺纹)。

(2) 在钻头面上，用专用工艺装备钻、铰齿孔、水孔，并加工出水道及排屑槽。

(3) 采用冷压过盈配合、焊接等方法将切削齿固定在钻头体上。

(4) 对钻头钢体表面作“硬化”处理。

(5) 加工上接头，组装焊接，磨钻头规径。

2. 胎体PDC取心钻头的制造工艺

(1) 先加工一套与钻头形状一致的石墨(或其它耐高温材料)凹模，在模具内腔铣齿穴及齿槽。

(2) 用石墨、型砂、粘土等材料预制成切削齿、排屑槽、水道、喷嘴等的替代件，按设计要求组装于模具内。

(3) 在钻头体心部预制环状钢心。

(4) 模具组装好后，装入WC、WO、Ni等金属粉末及铜合金浸渍剂，然后置于炉中高温烧结。

(5) 卸去模具，清除替代件，将PDC片用低熔点合金钎焊于钻头体上。

(6) 加工上接头，总装焊接，磨保径面即告完工。

3. 天然金刚石取心钻头及聚晶金刚石取心钻头的制造工艺

天然金刚石取心钻头及聚晶金刚石取心钻头都是胎体式钻头,因而与胎体PDC取心钻头的制造工艺大体相同,也都是是一只钻头用一套模具加工,所不同的是,先把金刚石(或聚晶齿)放在模具内,然后置于炉中直接烧结在钻头体上。

目前国内外大体上都采用上述先进的制造工艺,并同时使用先进的设备及优质材料来生产金刚石钻头,因而能保证钻头的质量。

(四) 金刚石取心钻头的适用范围

传统的天然金刚石取心钻头,由于耐磨性高,适用于中硬至极硬地层。PDC取心钻头切削齿由于刃面、刃尖两部位的自锐作用,能在较低钻压下切入岩石,并在扭矩作用下剪切岩石。这说明PDC钻头适用于软至中硬地层。热稳定聚晶金刚石是在高温、高压下烧结成的能耐1200°C高温的人造多晶体金刚石,不会产生内部晶体断裂面,因而可用大颗粒聚晶制成切削齿,这就克服了PDC切削齿不耐高温的局限性,而使热稳定聚晶金刚石钻头适用于中软至硬地层。

(五) 金刚石取心钻头的使用情况

1. 天然金刚石取心钻头

由于缺少原材料,国内过去生产较少。进口的一些钻头曾在国内一些油田深部地层取心,取得了较好效果。

2. 热稳定聚晶金刚石取心钻头

近年发展迅速,国内有关部门及厂家都在积极研究开发新产品。如大港油田机修厂,已成功地研制了RQ3型聚晶金刚石取心钻头,并先后在8个油田使用,效果很好;华北二勘太行修造厂1982年开始研制,1988年已小批量生产B2152Z-1型钻头,在华北、中原等地使用,效果也很好;地矿部钻井研究所研制成功的SJJQ861型三角聚晶金刚石取心钻头,适用于中硬至硬地层。

据国外资料介绍,在美国威林斯顿盆地的研磨性灰岩中,用热稳定聚晶金刚石取心钻头取心,机械钻速为1.83m/h,比用其它钻头取心每米可节约成本105美元;美国克里斯坦森公司生产的SC-279型热稳定聚晶金刚石取心钻头,1985年7月在LOCT SOLIER油田取心时,一只钻头取心27筒,总进尺为157.7m,机械钻速为0.86m/h。

3. 聚晶金刚石复合片取心钻头

随着聚晶金刚石复合片全面钻进钻头的迅速发展,复合片取心钻头近年在国外也得到迅速发展。如,美国克里斯坦森公司生产的RC476型复合片取心钻头,使用压力密闭取心工具,在软至中硬地层取心,曾获得36m/h的高机械钻速。

近年国内一些单位,如江汉钻头厂、胜利石油管理局钻井研究院、武汉地质大学等,也都相继研制这种钻头,并已取得初步成果,有的已小批量生产使用。

4. 人造单晶金刚石取心钻头

国内在70年代已开始研制,大港总机厂、地矿部无锡钻探工具厂以及胜利、长庆、新疆等油田都做了大量工作。这种钻头在硬地层取心可取得较好的效果。

上述各类金刚石取心钻头的使用情况见表。

三、结 论 与 建 议

过去,我国多由油田的机修厂生产取心钻头。这种仅仅为解决本油田勘探开发需要而进

行小批量、作坊式、非正规化生产的状况,使钻头的规格、型号、联接螺纹及与钻头配套的取心工具等都无法统一,因此是不利于取心技术发展的。

各类金刚石取心钻头的使用情况

钻头类别	生产部门或国家	钻头规格、型号	使用地区	平均指标		收获率(%)	最高进尺(m)	备 注
				进尺(m)	钻速(m/h)			
天然金刚石	日本	120.65mm (4 3/4 in) 152.4mm (6 in)	四川油田	22.6	0.23	—	64.2	1976年使用11只
	法国	—	四川油田	12.8	0.37	—	46.9	1976年使用13只
	四川威远机修厂	152.4mm (6 in)	—	13.8	0.12	—	—	1976年使用
	美国克利斯坦森公司	215.9mm (8 1/2 in) C-20, C-22	东北鄂尔多斯 中日合参井	19.33	1.38	100	29.24	1987年使用, 在3510m深度取心
	川石-美国克利斯坦森公司	C-201	川南矿区	81	0.62	100	—	1988年4月使用
热稳定聚晶金刚石	大港油田机修厂	R Q 3	华北、辽河、中原等	65	1.0	95.8	193.28	已批量生产
	江汉钻头厂	190 R 3	华北、中原、江汉、胜利等	34.3	0.8	93.8	—	已批量生产
	华北二勘太行修造厂	B2152z-1	华北、中原	51.92	1.23	99.2	—	已小批量生产
聚晶金刚石复合片	江汉钻头厂	215.9mm (8 1/2 in) F Q3 (钢体)	江汉、江苏、新疆等	57.2	1.9	91.3	123.73	已小批量生产
	胜利油田钻井研究院	钢体式	胜利	62.2	1.84	99.5	—	—
	武汉地质大学	电镀复合片	河南	94.4	2.83	93.5	—	试验1只
人造单晶金刚石	大港总机厂	D Q 5	辽河、华北	16.4	0.59	68	—	在破碎地层使用
	地矿部无锡钻探工具厂	Q50-YYA	华北	41.5	0.44	—	22.03	—
	地矿部无锡钻探工具厂	Q50-YYB	华北	13.47	0.45	—	—	—

80年代以前,我国主要使用常规硬质合金齿取心钻头。新型的聚晶金刚石复合片取心钻头及热稳定聚晶金刚石取心钻头近年虽发展较快,但多处于研制及小批量生产的阶段,还没有全面推广应用。

据近几年的统计,石油工业部的取心进尺占总钻井进尺的0.5%左右;到1990年,全国将要取心10万m左右。要加快石油勘探开发的速度,当前我国在加快发展全面钻进钻头的同时,应从以下6个方面入手来加快发展取心钻头。

(1) 加强科研攻关,提高取心钻头的机械钻速和单筒进尺。目前全国取心平均机械钻速为0.5m/h左右,平均单筒进尺低于5m。应在3~5年内,把平均机械钻速提高到1m/h,而把平均单筒进尺提高到8m。

(2) 尽快发展金刚石取心钻头的系列产品,以充分满足全国各油田钻井取心的需要。

(3) 大力发展并推广使用金刚石取心钻头,特别对聚晶金刚石复合片取心钻头及热稳定聚晶金刚石取心钻头的研制与批量生产,须尽快采用新工艺、新技术,并把提高切削齿(复合片及聚晶齿)的质量作为最关键的问题来解决。

(4) 加快改变目前各油田小批量、作坊式、非正规化生产的状况,必须加快完善工艺装备,加强标准化与协调工作,切实贯彻最近颁布的金刚石取心钻头的部标准。

(5) 有关专业生产企业须加快吸收消化国外的先进生产经验和企业管理经验,努力降低钻头生产成本,尽快实现原材料国产化,争取以大批量优质金刚石取心钻头供应全国。

(6) 加强对取心工作的统一领导,发展与取心钻头配套的新型取心工具。

国外井下动力钻具的新发展

江汉石油学院 符达良 易先忠

提 要

井下动力钻具是定向井、丛式井和水平井技术中高效快速钻进的理想钻井工具。作者综合分析了80年代,特别是自1984年以后国外涡轮钻具与螺杆钻具的技术成就和最新进展。指出:提高井下动力钻具的工作可靠性,增强这种钻具对井下恶劣环境的适应能力,以及推广小排量钻井工艺,是井下动力钻具的重要发展方向。井下动力钻具导向钻井系统是缩短钻井周期、降低成本和提高井身质量最有效的技术手段。随着80年代初导向钻井技术在北海油田的成功突破,涡轮钻具和螺杆钻具导向钻井系统在定向井、丛式井、水平井以及直井防斜中的应用日益普及。聚晶人造金刚石钻头(PDC钻头)、井下动力钻具、随钻测量系统(MWD系统)三位一体的技术组合将是本世纪末最有发展前途的新兴钻井技术。

一、前 言

井下动力钻具具有钻井动力集中于井底和钻柱基本不需转动两大特点,给钻井作业带来了井身质量好、能量利用充分、行程钻速快、井下事故少以及经济效益高等许多好处。近几年,随着人造聚晶金刚石复合片(PDC)钻头的商业性推广使用,随钻测量系统(MWD系统)的日益普及,定向井、丛式井和水平井数量的增加,以及技术水平和操作技能的普遍提高,井下动力钻具钻井技术有了很大的发展,在提高钻井速度、增加单只钻头进尺,减少起下钻次数、降低每米钻井成本等方面,显示出较好的优越性和强大的技术潜力。

涡轮钻具和螺杆钻具是目前井下动力钻具的主体。过去的井下动力钻具功率小,多数是用于定向造斜、修井侧钻、打水泥塞和钻套管鞋等,现在新一代井下动力钻具无论在工作能力,还是在使用寿命和可靠性方面均有较大改进,已有足够大的功率进行快速直井钻进、斜井钻进和水平钻进。此外,还应用于大口径表层井段、深井、海洋井、地热井和取心钻井,平均机械钻速比转盘钻井高2~3倍,平均节约钻井成本15%以上。苏联30年来一直把井下动力钻具作为主要钻井工具,其钻井工作量占全苏钻井总量的75%左右(其中涡轮钻具占70%多)^[1]。早在70年代末,美国一些重要工程技术咨询公司预测,在美国推广井下动力钻具技术可使每年150亿美元的石油钻井费用节省10~20亿美元。美国在钻井新技术的开发研究中,已把井下动力钻具列为首位,现在至少有10几家大公司研制井下动力马达。美国井下动力钻具的钻井进尺由1981年的1%上升到1985年的15%。据统计,1985年以来,在西方国家的年钻井量中,涡轮钻具的总进尺已超过百万英尺,在北海地区的定向钻井中,涡轮钻具的总进尺占50%^[2]。

可控井下动力钻具的成功突破与使用,即导向钻井系统的问世,开创了现代定向钻井技术的新局面^[1,3]。涡轮钻具导向钻井系统由带偏心扶正器的涡轮钻具和随钻测量系统组成。Tenneco Oil公司应用这种导向系统与优选的PDC钻头配合,在墨西哥湾钻井取得了成

功,每英尺钻井费用减少34%,在7口不同井中总计比原计划节约110万美元和18天钻井时间。螺杆钻具导向钻井系统由螺杆钻具、双斜式导向接头及随钻测量系统组成,与PDC钻头或牙轮钻头配套钻井。这套导向钻井系统在许多地区的使用都获得了成功,其中包括在地层复杂的阿拉斯加北部斜坡的Kuparuk油田,ARCO公司使用这套系统在定向钻井中取消了许多不必要的起下作业,机械钻速提高70%,节约总钻井时间30%。导向钻井系统广泛应用于北海、阿拉斯加、加拿大、加利福尼亚近海、落基山脉、法国和印度尼西亚等地。自1982年第一次使用井下动力钻具导向系统以来,已钻成定向井700余口,总进尺超过500万英尺,与邻近井转盘钻井的指标相比,平均每口井节省时间35~40%,获得了巨大的经济效益^{[7][15]}。井下动力钻具导向钻井系统的技术突破,是钻井史上的一个里程碑,为未来计算机辅助优化钻井和自动化钻井的实现,提供了强有力的支持。

二、国外井下动力钻具的发展水平

(一) 苏联

在井下动力钻具的发展与应用方面,苏联名列世界榜首。苏联的涡轮钻具无论在数量上,还是在品种和性能上均占明显优势。60年代至70年代中期,涡轮钻具的钻井工作量曾一度占全苏钻井总量的80%以上。目前它的钻井量仍超过总钻井量的70%。苏联螺杆钻具的性能指标达到了世界同类产品的先进水平,能全面满足现代钻井的要求。在结构和制造工艺方面,有94项获得了发明者证书,其中15项获国内或其它工业发达国家的专利权。

苏联自40年代起就在石油钻井中大量使用涡轮钻具,50年代至70年代推广复式涡轮钻具和带支承节的涡轮钻具,加速了乌拉尔-伏尔加流域和西西伯利亚地区油气田的勘探开发。进入80年代,苏联涡轮钻具的产量年逾万台,规格品种齐全。老式产品逐一淘汰,现用的涡轮钻具正以惊人的速度更新和完善。苏联近期成批生产的涡轮钻具,主要有3TCIII1型标准系列涡轮钻具、AIII型高环流大扭矩涡轮钻具和ATIII型带水力制动级涡轮钻具,以及KTD4型取心涡轮钻具。3TCIIIA型高速大扭矩涡轮钻具、先进的TP2III型多行星摩擦滚子减速器涡轮钻具一直在小批量生产^{[1][6]}。此外,还大量生产与标准系列涡轮钻具配用的III1型支承节和III01型造斜支承节,小批量生产TP2-195TO型摩擦滚子减速造斜器^[4]。一些涡轮钻具的新品种新结构正不断涌现。

浮动定子涡轮钻具是全苏钻井技术研究所(ВНИИБТ)80年代初期研制成功的新产品,具有转速低、扭矩大、轴向间隙小、装配简单和支承节寿命长等优点,在工业性试验中获得良好的效果,目前已定型生产。在同样钻具长度和外径尺寸的情况下,浮动定子涡轮钻具的级数多,平均直径大,能量特性高;采用低排量单泵驱动可获得与普通大排量上一级尺寸涡轮钻具相似的机械输出指标。例如ТПС-172型浮动定子涡轮钻具的计算直径123.5mm,叶轮级数432级。它与3TCIII-195TII型涡轮钻具的计算直径完全相同,同样钻具长度时涡轮级数可增加114级;在钻井液流量24L/s时,输出旋转力矩1911N·m,与3TCIII-195TII在40L/s时的输出扭矩1960N·m相近。西西伯利亚的地层大都松软,浮动定子涡轮钻具小排量大扭矩的特点,改进了该地区的钻井工艺,延长了地面设备的检查期,因此备受当地石油管理局的欢迎。在工业性试验阶段,浮动定子涡轮钻具仅在苏尔古特油气管理局的УБР型1号钻机上,就钻进10万m。其后,在苏联第十一个五年计划中,用单泵驱动在深部地层

钻井,大幅度降低了钻杆消耗,避免了多起恶性事故,延长了发动机和泵的使用寿命,取得了很大的经济效益。苏联地质部在第十二个五年计划期间,在提高地质勘探工作质量和效率的措施计划中提出:增加浮动定子ТПС-172型节能涡轮钻具打油气深探井的工作量,比前一个五年计划的总工作量增加5%^[6]。

此外,苏联还设计试验了分流式涡轮钻具和外壳旋转式涡轮钻具。TPM型充油密封齿轮减速器涡轮钻具在СГ-3超深井的工业性试验中取得了可喜的成绩^[2]。在研制各种过载系数高、稳定性好的低速涡轮叶型方面,苏联做了不懈努力。科拉超深井现已达到12000m的世界记录,是用特殊研制的微型叶片涡轮钻具完成的。

苏联从1960年开始研制螺杆钻具,以多头单螺杆钻具为目标。现已完成第二代Д型螺杆钻具的配套产品系列,有6种规格,直径从54mm至240mm,适应用直径141mm至444.5mm钻头的钻井要求;在修井中,能够满足直径从59mm至118mm的钻头在油管和套管中完成各种工艺程序。6种规格的螺杆钻具中,Д1-195、Д3-172、Д-85和Д1-54已由明斯克化工机器厂批量生产,Д1-240和Д1-127已通过工业性试验,开始转入批量生产^{[1][5]}。以前的Д2-172M型螺杆钻具已被淘汰。

苏联的Д型螺杆钻具配用ГНУ型密封轴承牙轮钻头和硬质合金镶齿牙轮钻头,在深井和硬地层中使用效果良好。螺杆钻具在使用的油区内均能在增加行程钻速的同时,成倍提高钻头进尺。从1977年到1985年间,用直径195mm和172mm螺杆钻具钻井的总进尺超过500万m。Д1-195型螺杆钻具是苏联Д系列产品的基本型,所占比重极大,它取代了70年代广泛使用的Д2-172M型螺杆钻具。在乌拉尔-后伏尔加地区,仅1984年1年,螺杆钻具(主要是Д1-195型)配用 $\phi 215.9\text{mm}$ 钻头,进尺就达100万m。该地区80%以上的进尺用清水钻进。钻井液含砂量低于2%时,螺杆钻具的大修周期为150~300h。苏联在各主要油田曾进行螺杆钻具的有效工作深度的探索和实践。鞅靶石油公司用螺杆钻具与3ТСИИ1-195型涡轮钻具对比,前者钻800~900m以上深度的井段最经济。目前螺杆钻具的钻井量占该公司总钻井量的25%,在上述井段几乎全用螺杆钻具钻进。西西伯利亚地区的工业试验结果表明,螺杆钻具在1700~1800m井段以深工作效果最好。巴什基里亚石油公司除使用Д1-195型螺杆钻具外,还用Д3-172型螺杆钻具配 $\phi 190.5\text{mm}$ 钻头钻井,在其所属的Нефтекамский钻井处,与3ТСИИ-172型涡轮钻具相比,在稍稍降低机械钻速(约3%)的情况下,钻头进尺提高4倍。Д-85型和Д1-54型小尺寸螺杆钻具广泛用于修井作业。特别是Д-85型的用量最大,用它在直径114~168mm套管柱中钻水泥塞,在包括工业性试验在内的11年里,即在井深5500m的油气井中钻了40万m的水泥塞和岩层^{[1][2]}。

为了进一步完善螺杆钻具的结构和改进它的能量特性,苏联在1984年又设计了新型螺杆钻具——ДС型分节组合式和ДМ型小排量式螺杆钻具。ДС型螺杆钻具的定子、转子是由几段单节的定子、转子副依次连接而成,可降低定子、转子副中的比载荷,改善制造工艺,提高工作可靠性;在钻井液流量明显下降时仍能维持螺杆钻具的工作能力。ДС型螺杆钻具已通过了地区试验。ДМ型螺杆钻具($i=7/8$)是通过改变工作机构的运动关系来实现小工作容积,以改进其动力特性,提高容积效率,适应上部地层的钻井条件。ДМ型螺杆钻具的台架试验和现场考验均已取得满意效果,即将定型生产。

苏联的螺杆钻具技术还打入英、法市场,在埃及、意大利、北海、澳大利亚、美国和匈牙利也有使用这种钻具的,国际反应良好。Д1-195型和Д3-172型螺杆钻具在法国首次试验

就显示出很高的使用价值和效益。法国Drilex公司总裁曾为《优惠贸易公报》杂志撰文指出：苏联螺杆钻具的出现是石油钻井技术中的一次真正革命。

(二) 美国

早在1920年前后，美国和苏联曾相继着手涡轮钻具的研究，但未引起美国钻井界的重视。50年代中期，美国转入对螺杆钻具的研制，同时也引进苏联的涡轮钻具技术。由于当时涡轮钻具转速高，牙轮钻头不能适应而进展不大。70年代后期，天然金刚石钻头的推广和人造聚晶金刚石钻头的问世，涡轮钻具在美国才重新受到重视，并得到迅速发展。美国的螺杆钻具研究以单头单螺杆为主，60年代中期开始小批量生产使用，主要用于定向井造斜、小井眼井和修井。70年代末开始应用在长井段直井、定向井和大口径表层井段的钻进。在美国市场上，目前，螺杆钻具比涡轮钻具占有较大的优势^{[1][19]}。

美国Norton Christensen子公司（该公司现改由Eastman Christensen公司经营）的螺杆钻具(Navi-Drill)有Mach I ($i = \frac{5}{8}$)、Mach II ($i = \frac{1}{2}$) 和Mach III ($i = \frac{1}{2}$) 3个系列，共22个品种。钻具直径从44.45mm ($1\frac{3}{4}$ in) 到285.75mm (11 $\frac{1}{4}$ in)，可适用于47.63mm ($1\frac{7}{8}$ in) 的小井眼与660.4mm (26in) 大井径范围内全部井眼尺寸的油气钻探。Navi-Drill的支承节使用多级推力球轴承和金属径向轴承，小直径钻具还采用金刚石止推轴承，因此马达寿命大大提高。其主要部件的寿命指标是：推力轴承为200h；驱动轴200h；径向轴承250h；万向节500h；转子与定子为500~750h。Navi-Drill的最高效率可达90%。一般钻井工作井温为130°C^[19]。美国Smith Tools公司的螺杆钻具(Dyna-Drill, $i = \frac{1}{2}$) 有4种类型：DELTA500™型有98.43 ($3\frac{7}{8}$ in)、127mm (5in)、165mm ($6\frac{1}{2}$ in)、196.85mm ($7\frac{3}{4}$ in)、244.48mm ($9\frac{5}{8}$ in) 和304.8mm (12in) 6种规格；DELTA500Plus 4™型有165mm ($6\frac{1}{2}$ in) 和196.85mm ($7\frac{3}{4}$ in) 2种规格；DELTA1000™型有98.43mm ($3\frac{7}{8}$ in)、127mm (5in)、165mm ($6\frac{1}{2}$ in) 和196.85mm ($7\frac{3}{4}$ in) 4种规格；DELTA1000Slo-speed™型有165mm ($6\frac{1}{2}$ in) 和196.85mm ($7\frac{3}{4}$ in) 两种规格。此外，Smith Tools公司还有适用于天然金刚石钻头和人造聚晶金刚石复合片钻头的244.48mm ($9\frac{5}{8}$ in) HS2000型高速螺杆钻具，以及用于小井眼的44.45mm ($1\frac{3}{4}$ in) 和60.33mm ($2\frac{3}{8}$ in) 的小直径(Micro-Slim)螺杆钻具。小直径Dyna-Drill用于钻进砂桥、水泥塞、清蜡以及矿产勘探、水平井或导向孔等^[19]。Dyna-Drill可用压缩空气驱动，例如在美国内华达州成功地钻进15.24~1828.8m (50~6000ft) 的井段。美国Baker Service Tools公司的低速大扭矩螺杆钻具($i = \frac{3}{4}$) 有127mm (5in)、155.58mm ($6\frac{1}{8}$ in)、171.45mm ($6\frac{3}{4}$ in) 和196.85mm ($7\frac{3}{4}$ in) 4种规格，支承节采用充油密封润滑，寿命长，主要与牙轮钻头配合钻定向井和直井。Magna Tools公司的螺杆钻具(Magna-Drill, $i = \frac{1}{2}$) 有95.25mm ($3\frac{3}{4}$ in)、120.65mm ($4\frac{3}{4}$ in)、133.35mm ($5\frac{1}{4}$ in)、171.45mm ($6\frac{3}{4}$ in)、203.2mm (8in)、244.48mm ($9\frac{5}{8}$ in) 和195 $\frac{5}{8}$ in S) 7个品种，用于直径123.83mm ($4\frac{7}{8}$ in) 至660.4mm (26in) 范围内的井眼钻进。Hughes-Oncor公司的螺杆钻具(PDM-1000™ Drill Motor, $i = \frac{1}{2}$) 有127mm (5in)、165mm ($6\frac{1}{2}$ in)、196.85mm ($7\frac{3}{4}$ in) 和244.48mm ($9\frac{5}{8}$ in) 4种规格。Eastman-Whipstock公司的螺杆钻具(Posi-Drill, $i = \frac{1}{2}$) 有127mm (5in)、165mm ($6\frac{1}{2}$ in)、196.85mm ($7\frac{3}{4}$ in) 和228.6mm (9in) 4种尺寸，采用了独特的设计方法，能为钻井作业提供大的功率和较长的工作寿命。该种钻具的定子采用特殊的模压成型工艺并分3段组装而成；转子是大直径大偏心距；旁通阀取消弹簧和滑动活塞