

钻井利器之“井下动力钻具”

闫家^{1,2,3,4}, 王文^{1,2,3,4}, 张恒春^{1,2,3,4}, 曹龙龙^{1,2,3,4}, 薛倩冰^{1,2,3,4*},
梁楠^{1,2,3,4}, 施山山^{1,2,3,4}, 王志刚^{1,2,3,4}, 汪凯丽^{1,2,3,4}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 自然资源部定向钻井技术创新中心, 河北廊坊 065000;
3. 中国地质学会自动化智能化钻探装备技术创新基地, 河北廊坊 065000;
4. 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 河北廊坊 065000)

摘要: 钻井是能源矿产勘探开发最直接的工程技术手段, 井下动力钻具作为破碎地层岩土的有力器具, 或直接驱动钻头形成滑动钻进, 或与顶驱(或转盘)的回转共同组合驱动钻头形成复合钻进, 具有降耗增速、减小井下事故风险等优点。为促进井下动力钻具被更多技术人员了解和认识, 物尽其用充分发挥其钻井优势并利用技术特点开发新功能、新器具, 本文从科普的角度介绍了井下动力钻具的用途、主要种类、工作原理及发展历程, 并综合对比不同井下动力钻具的优劣势。最后, 结合深井、超深井等钻井新形势对钻探器具、工艺等的新要求, 以及材料、测控、智能化等新技术的在钻井工程中的应用趋势, 指出了当前主流井下动力钻具的更新换代、技术革新的发展方向。

关键词: 钻井利器; 井下动力; 电动钻具; 螺杆钻具; 涡轮钻具

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0160-08

The story of a drilling weapon: Downhole power drilling tool

YAN Jia^{1,2,3,4}, WANG Wen^{1,2,3,4}, ZHANG Hengchun^{1,2,3,4}, CAO Longlong^{1,2,3,4}, XUE Qianbing^{1,2,3,4*},
LIANG Nan^{1,2,3,4}, SHI Shanshan^{1,2,3,4}, WANG Zhigang^{1,2,3,4}, WANG Kaili^{1,2,3,4}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources,
Langfang Hebei 065000, China;
3. Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China,
Langfang Hebei 065000, China;
4. Technology Innovation Center for Deep Exploration Drilling Equipment, China Geological Survey,
Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Drilling is the most direct engineering technology means for the exploration and development of energy and mineral resources. As a powerful tool for breaking rock and soil, downhole power drilling tool have the advantages of reducing consumption and increasing drilling speed, as well as reducing the risk of downhole accidents, it either directly drives the bit to form sliding drilling, or combines the top drive (or rotary) to form composite drilling. In order to prompt more technical personnels to understand the downhole power drilling tool, and develop new functions and new instruments based on its drilling advantages and technical characteristics, this paper introduces the use, main type, working principle and development history of the downhole power drilling tool from the perspective of popular science,

收稿日期: 2024-03-14; 修回日期: 2024-07-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.020

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20211421、DD20243010)

第一作者: 闫家, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质机械仪器专业, 硕士, 从事涡轮钻具、取心钻具及深部钻探工艺方法研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, yj18531665717@163.com。

通信作者: 薛倩冰, 女, 汉族, 1987年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探工艺技术与地质调查项目管理工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 913311690@qq.com。

引用格式: 闫家, 王文, 张恒春, 等. 钻井利器之“井下动力钻具”[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 160-167.

YAN Jia, WANG Wen, ZHANG Hengchun, et al. The story of a drilling weapon: Downhole power drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 160-167.

and compares the advantages and disadvantages of different downhole power drilling tool. Finally, combined with the new requirements posed by the new drilling situation of deep wells, ultra-deep wells on the drilling tool, techniques and so on, as well as the application trend of other new technologies in drilling engineering such as materials, measurement and control, intelligence, etc., it pointed out the upgrading and technological innovation development direction for the current mainstream downhole power motor.

Key words: drilling weapon; downhole power; electromotive drill; screw drill tool, turbodrill

0 引言

我们的地球蕴藏着丰富的地下资源,是人类赖以生存的重要宝藏,其主要包括各种金属和非金属矿产、地下水、地热等,人们通过开发利用这些地下资源来获取绝大部分人类生产和生活所需的工业原料、建筑材料、水源和能源等(图1),以保障和维持生存并促进社会文明及科技的发展。然而,要查明与获取地下资源最终手段主要是通过钻井方式形成最直接的地下通道^[1-2]。钻井工程的出现为寻获地下埋藏的丰富能源、资源提高了效率,并丰富了生产和生活的物资基础。随着科技进步,钻井方式也从人工掘井逐步发展到旋转钻井。依据钻井过程中破碎岩土所用钻头的驱动方式不同,现代旋转钻井技术可分为地面驱动钻进方式和井下动力驱动钻进方式,其根本区别在于是井口水平面以上驱动钻柱旋转还是地面以下通过井下动力器具在井筒底部直接驱动钻头旋转。本文将带领读者了解“井下动力钻具”这一钻井利器。



图1 地下资源的利用

Fig.1 Utilization of underground resources

1 “破碎”地下岩层所用的力

首先,要向地下形成“井眼”需要将地层中岩土粉碎并排出,而这项碎岩排土的工作由钻井完成。在早期钻井中,是通过柔性绳索上下活动所用钻具,用重力产生锤击作用力碎岩,称之为“顿钻”,其破碎岩层的力如图2(a)所示;随着技术的发展,利

用一根管柱保持井内液体循环流动并带走破碎岩屑的转盘旋转钻井方法大幅提升了碎岩效率,逐步发展成由刚性杆或管柱周向旋转同时传递下压力,最终产生挤压贯入与回转剪切作用力的“旋转”碎岩^[2],称之为“旋转钻进”,如图2(b)所示。上述机械式破碎岩层的力是后期发展更高效碎岩技术的动力来源基础,“顿钻”碎岩作用力效率低基本不再被单一应用,而旋转式碎岩方式可实现复合力高效碎岩,因此旋转钻进技术已然成为当前国内主流钻井方法。

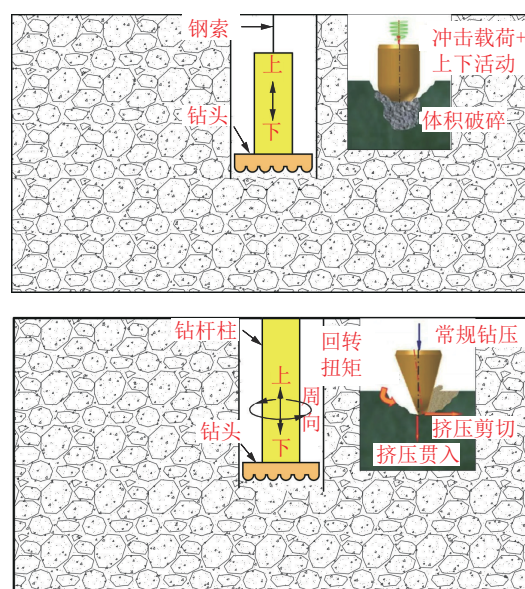


图2 岩土机械式破碎

Fig.2 Mechanical crushing of rock and soil

2 井下动力钻具及其作业方式

1920年代初,苏联首先开发了涡轮钻具,也是最早用于钻井工程的井下动力钻具,井下动力钻具旋转钻井技术的产生是继地表钻机转盘驱动旋转钻井技术之后的又一次巨大的钻井技术革命^[3-4]。所谓的井下动力钻具即指“旋转钻进”过程中刚性钻杆柱不旋转而在井底靠近钻头附近独立产生回转驱动力直接驱使钻头工作的器具。与转盘旋转

钻井的区别在于转动钻头的动力由地面移到了井下,直接作用在钻头上。井下动力钻具是一种能量转换机构,以一段圆柱短接的结构形式连接在钻井管柱下端,将钻井循环介质的压力能或地面输送的电能转化为钻头破碎岩层的机械能。

目前,井下动力钻具在地质钻探、油气钻探和煤田钻探领域得到广泛应用,与地面转盘驱动钻井相比,在地面设备、清除岩屑和机械碎岩方法等不变的情况下,井下动力钻具的出现,减少了成百上千米的井下管柱旋转时与井壁摩擦产生的过多能量消耗,降低了井下钻杆柱折断事故的风险,见图3所示^[5]。因此,在油气需求量急剧增加,钻井新技术不断完善和发展,定向井、水平井、分支井等成规模应用的背景下,井下动力钻具迭代更新有助于节约钻井成本、提高钻井效率。

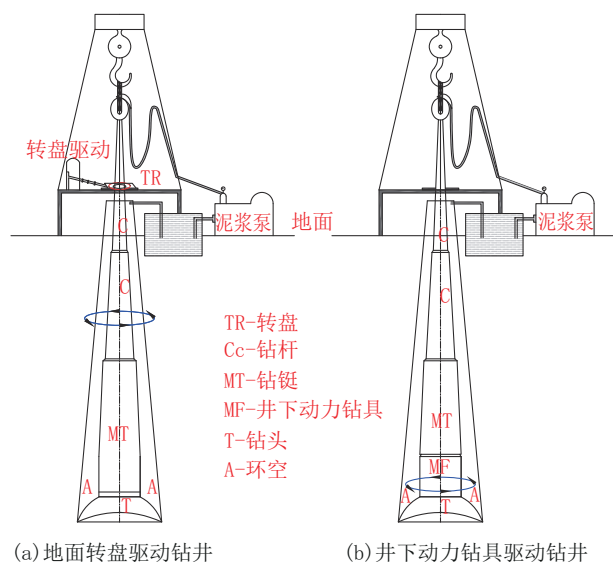


图3 转盘与井下动力驱动钻井方式
Fig.3 Drilling method of rotary table and downhole power drive

3 常用井下动力钻具种类及工作特点

根据驱动力的来源不同,井下动力钻具基本上可分为电力驱动和液力驱动两种类型,电力驱动就是依靠电能带动,液力驱动即是靠钻井液流通来产生动力。而常用的电力型井下动力钻具就是井下电动钻具,液力型井下动力钻具包括螺杆钻具和涡轮钻具^[6]。近些年,随着科技进步和材料的革新,这些钻具有了不同程度的改进,但在动力原理方面没有发生革命性的改变。

3.1 电动钻具

井下电动钻具是电动钻井方法的关键器具,其组成机构包括充油式潜水电机、减速器和主轴三大主要部分,另有附属压力平衡补油机构、密封结构和减振机构及井下遥测系统等^[7]。钻井过程中通过地面供电系统提供电能,经钻杆柱内线缆传导至井底电动机,并由电动机做动力驱动工具驱使转轴带动减速器及主轴输出扭矩,最后将扭矩传递到钻头实现旋转钻井,如图4所示^[8-9]。

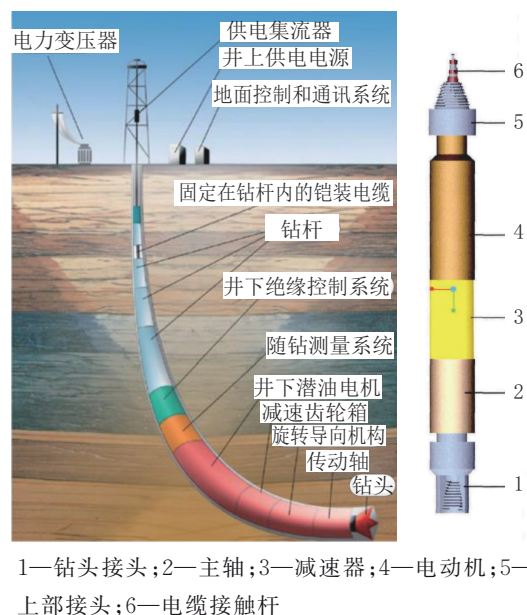


图4 电动钻具井底组合结构
Fig.4 Structure diagram of bottom hole assembly of electric tool

自19世纪末20世纪初国外开始井下电动钻具的研制,主要有苏联、美国、法国、罗马尼亚、联邦德国和日本等国家。1937年苏联工程师研制的电动钻具首次成功应用于工程钻井,大力推动了电动钻具的发展及规模化应用,也促使苏联成为使用电动钻具最早和最好的国家。苏联制造的电动钻具,结构简单、可以不用带齿轮减速装置,工作转速可达530 r/min或680 r/min,故障率低,目前俄罗斯使用电动钻具最大钻井深度已达7000 m,总进尺超过 1200×10^4 m^[7];美国研制的电动钻具附有一套行星齿轮减速装置,可通过变频将工作转速控制在40~400 r/min,主要为了更好地与连续油管技术相结合;法国研制成功的小功率电动钻具与柔杆钻机紧密配合进行钻井工程与海底取心^[8-9]。我国电动钻

具的发展尚属初级阶段,油气钻井的应用更是空白状态,主要原因是核心技术不够成熟、电机结构不完善,供电安全问题未实质性解决等,虽在1970年代由上海跃进电机厂和北京地质勘探研究所合作研制出两台功率50 kW、外径150 mm的电动钻具,但试验钻孔深度较浅,仅有427 m和602 m,后期研究样机均投入矿场试验。

3.2 螺杆钻具

当前钻井工程中使用最广、应用最成熟的井下动力钻具应属螺杆钻具。螺杆钻具是液力驱动的一种容积式马达,其关键部件主要由传动总成、万向轴总成、马达总成、防掉总成和旁通阀总成5大部分组成,如图5所示。

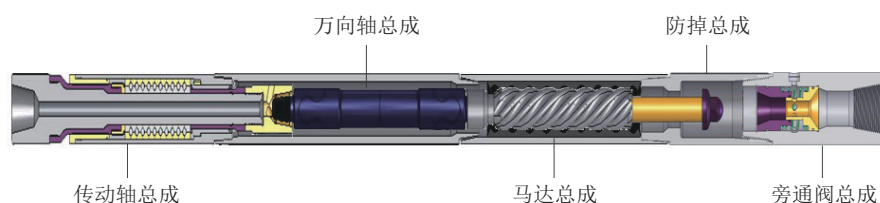


图5 螺杆钻具结构

Fig.5 Screw drilling tool structure

作为关键的井下动力钻具,螺杆钻具是通过定、转子组成的马达总成将流经钻具的高压钻井液液压能转化为传动轴旋转的机械能,从而带动钻头破岩。其中,螺杆钻具定子和转子分别为具有一定几何参数的螺旋曲面特征的壳体和金属轴,定子和转子的螺旋曲面相互啮合,但两者存在导程差从而形成螺旋密封线并形成密封腔。当钻井液在单位时间内以一定速度不断填充密封腔形成足够压力值后就会促使改变密封腔形状和大小从而推动转子在定子中旋转,表现出钻井过程中压降值的变化。随着转子的转动,密封腔沿着轴向移动并不断生成和消失,从而实现能量转化。

螺杆钻具的定、转子对应螺旋线数量称之为“螺旋线头数”,转子头数与定子头数比一般为1:2、3:4、5:6、7:8、9:10这几种,定子头数比转子的头数大1。在螺杆钻具选型时,转子螺旋线头数越少,转速越高、扭矩越小;反之,转子螺旋线的头数越多,转速越低、扭矩越大。不同头数比,定、转子形成的密封腔形式如图6所示。

螺杆钻具技术最具代表性的国家是美国,其自1950年代开始研究单螺杆钻具,1960年代投入使用,1980年代得到快速发展。随着科技的发展进步,新材料、新工艺的广泛应用大幅度提高了螺杆钻具零部件的质量和使用寿命,Navi Drill小直径螺杆钻具通过利用人造聚晶金刚石(PDC)轴承,使钻具的使用寿命提高至250~300 h^[10-11]。我国从1980

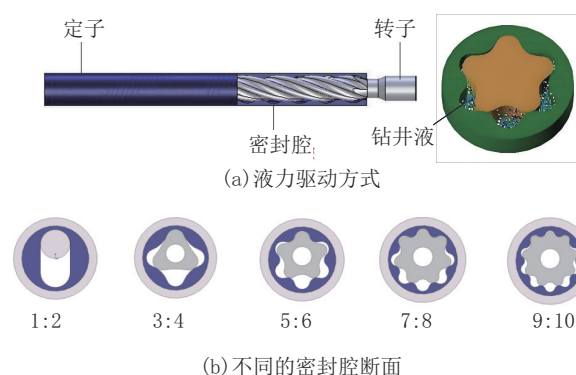


图6 螺杆钻具密封腔

Fig.6 Sealing cavity of the screw drill

年代初期开始不断消化和吸收国外螺杆钻具先进技术,历经30余年发展得已非常完善,品种规格齐全并已系列化,能为垂直井、定向井、分支井及开窗侧钻等工程提供井下动力钻进技术支持。目前,国内螺杆钻具产业相对成熟,最小外径能做到43 mm,最大直径可做到286 mm,且形成了分流螺杆钻具、空心转子螺杆钻具、多头低速大扭矩螺杆钻具、抗高温螺杆钻具等,与国外产品相比在寿命、性能方面的差距也越来越小。但在材料选用、结构优化方面有待进一步提升。

3.3 涡轮钻具

涡轮钻具作为当前应用最广的两种井下动力钻具之一,其在全球钻井应用市场中的占比虽不及螺杆钻具,但二者既对立又统一,涡轮钻具因其独

有特点而被应用于超深井、地热井等高温环境和坚硬难钻地层中的井底驱动钻进,满足垂直井、定向井等不同工况需求。与容积式马达的螺杆钻具不同,涡轮钻具是一种特殊的叶轮式井下动力钻具

具^[4,12],其组成部件主要包括涡轮节、支承节及减速器,使用过程可采用1个或多个涡轮节与单个支承节组装成常规涡轮钻具,或再增加1个减速器就可组成减速涡轮钻具^[13],其结构特征如图7所示。

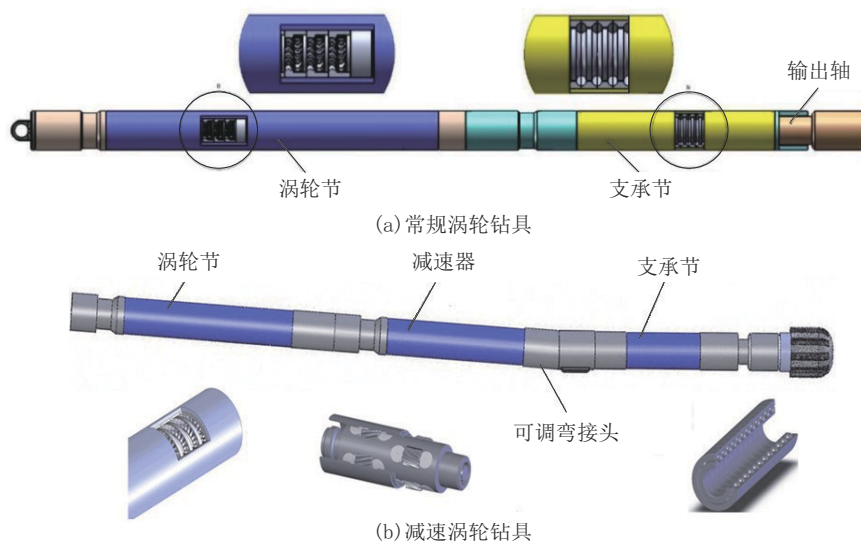


图7 涡轮钻具

Fig.7 Turbodrill

涡轮钻具的能量转换机构是涡轮节中串联的许许多多涡轮定、转子,并且每副涡轮定、转子均含有一定数量周向排列的叶片,其中定子串固定、转子串可转动。当钻井液通过这些涡轮节中的涡轮副并流经叶片时便产生冲击力和压差,从而产生驱动转子旋转的作用力并带动输出轴旋转,以实现驱

动钻头的目的。涡轮钻具工作机理类似于飞机在空中飞行过程机翼上下形成气体压差从而产生托举力一样,每一个转子中的叶片相当于飞机机翼的作用,只是多了许多固定的定子,利用定子叶片对液流流动方向进行引导,高效地作用于转子叶片使其转动,如图8所示。

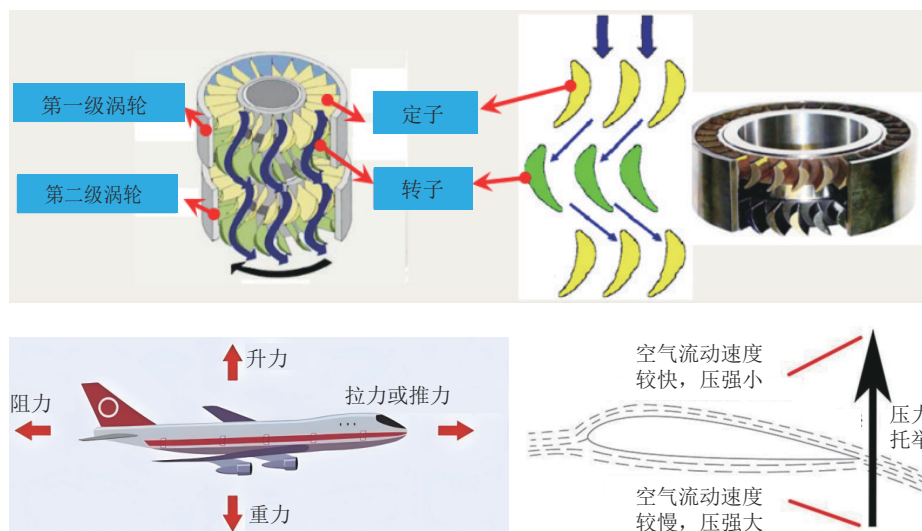


图8 涡轮钻具驱动原理

Fig.8 Principle for turbodrill drive

涡轮钻具是发展为工业应用最早的井下动力钻具,1949年其在苏联已发展趋于成熟并在后续很长一段时间内成为当时主流的钻井方法,1956年法国 Neyrpic 公司(Sii-Neyrfor 公司前身)最先取得苏联涡轮钻具生产许可并不断发展且逐渐占据了西方涡轮钻井市场的主导地位^[14]。近年,俄罗斯和美国在涡轮钻具产品研发和推广应用方面取得了显著效果,俄罗斯的产品类别包括高速涡轮钻具和减速涡轮钻具,最具代表性公司是 VNIIBT 公司;美国的斯伦贝谢公司在 2010 年收购了 Neyrfor 后,技术优势得到大幅提升并主要发展中高速涡轮钻具,凭借原有的钻头技术优势,斯伦贝谢采用涡轮钻具配合 PDC 钻头和孕镶金刚石钻头等开展复合钻井技术服务,在国际钻井市场占据了重要地位。我国自 1980 年代开始自主研发涡轮钻具并开展钻井试验,依托“七五”攻关项目相继完成 $\varnothing 195\text{ mm}$ 、 $\varnothing 175\text{ mm}$ 规格涡轮钻具研制并在四川地区 2500~4000 m 井

段投入生产试验,取得较好应用效果;虽然受到国外技术封锁以及螺杆钻具对井下动力钻具的市场挤占,但国内仍有少数科研机构和企业坚持在涡轮钻具结构改进、水力效率提升和支承节工作寿命延长等方面进行自主研发,例如中国石油大学(北京)、长江大学(原江汉石油学院)及西南石油大学等依托石油钻井需求在减速涡轮钻具、连续油管配套涡轮钻具、三维空间扭曲叶片涡轮钻具等方面研究成果较为突出;而在大陆科学钻探、地质取心的涡轮钻具应用方面,中国地质调查局勘探技术研究所、北京探矿工程研究所近些年也做了大量研究,勘探技术研究所相继研发了中空取心涡轮钻具、配套“涡轮钻具+液动锤+绳索取心”三合一型投入式取心涡轮钻具及全金属常规涡轮钻具并在大陆科学钻探、干热岩及油气勘探取心工程中进行应用^[15],样机如图 9 所示。



图 9 不同结构形式涡轮钻具样机

Fig.9 Different structures of turbodrill prototypes

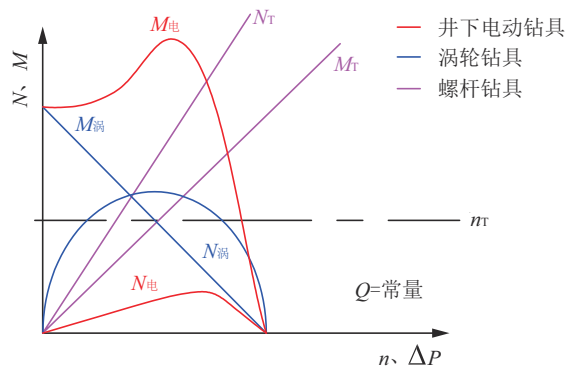
目前,国产涡轮钻具规格型号相对完善,从 $\varnothing 54\text{ mm}$ ~ $\varnothing 311\text{ mm}$ 不同级别可满足钻井工程中 $\varnothing 63.5\text{ mm}$ ~ $\varnothing 444.5\text{ mm}$ 不同井眼尺寸的需求,但综合性能和工作稳定性与国外同规格产品存在明显差距,并且减速涡轮钻具一直未取得质的突破^[16-17]。

3.4 工作特性及性能特点

电动钻具、螺杆钻具、涡轮钻具均作为钻井利器在不同国家和地区被当做主流钻井工具用于钻井提速,有效节约了钻井工时、降低了作业成本。但因工作原理、驱动介质存在本质差别,上述井下动力钻具在结构特点及工作特性等方面也存在较大区别^[8,13,18],三者主要工作特性见图 10。表现出的差别在于:(1)钻具结构不变时,电动钻具、涡轮钻具工作转速与工作载荷有关,载荷越大转速随之降低,但涡轮钻具转降幅比电动钻具的大;螺杆钻具工作转速只有钻井液排量。(2)钻井液排量不变时,螺杆钻具压降越大扭矩越高、功率越高,而涡轮钻具

具功率、扭矩随着转速而变化;(3)电动钻具、螺杆钻具的过载能力均比涡轮钻具要强。

结合对比上述井下动力钻具的结构特点、材质



M —钻具输出扭矩; N —钻具输出功率; Q —钻井液排量; ΔP —压降

图 10 井下动力钻具工作特性对比

Fig.10 Comparison of working characteristics of downhole power drilling tool

物化特性及工作介质等因素,分析电动钻具、螺杆钻具及涡轮钻具的性能优缺点如表1所示。

表1 井下动力钻具性能特点对比
Table 1 Comparison of performance characteristics of downhole power drilling tool

名称	优点	缺点
电动钻具	(1)对钻井循环介质无特殊要求;(2)高转速、过载能力强;(3)操作响应快、精度高,井下交互信息容量大、迅速	(1)单机长度长,结构复杂,对绝缘性、密闭性的要求高;(2)维修工作繁重且复杂,使用成本高
螺杆钻具	(1)长度短,零部件少,装配简便,利于检修;(2)低转速,大扭矩,工作可靠性高	(1)不耐高温、高压,对油基泥浆敏感;(2)存在横向振动
涡轮钻具	(1)温度承载范围宽,可耐高温,耐高压;(2)工作转速高,横向振动小	(1)扭矩小,压升高,无法过载;(2)检修工作繁重,使用成本高

4 井下动力钻具的发展方向

随着浅层资源的充分开发与开采,人们将能源资源的勘探目标向地下深部转移,但深井、超深井的钻井工程面临难钻地层多,长裸眼井段井壁稳定性差,井下高温、高压、高腐蚀工况影响恶劣等突出问题^[19]。因此,井下动力钻具的发展方向必须适应当前新储层勘探开发的地质特点、开发特点、工作环境特点。

对于螺杆钻具,研制高性能材料用于提高钻具耐高温、耐油基和抗H₂S等性能,全金属螺杆是研究热点;优化马达线型提高输出扭矩、优化机械结构提高工作安全性、优化钻进参数形成地层适应性复合钻进技术体系提高井下寿命等措施,将确保螺杆钻具继续成为最经济的井下动力驱动钻井的利器。

涡轮钻具方面,提升钻具设计与优化算法从而提高效率、增大输出扭矩,创新材料的应用以提高叶轮抗冲蚀性及轴承副的耐磨性,提高井下工作寿命;完善产品系列,加快开发配套连续管作业技术的小尺寸涡轮钻具,提升高温高压井的定向井、欠平衡钻井、加深侧钻等钻井能力,使之成为深层资源勘探开发和井下复杂情况处理的利器;推动高效涡轮的创新应用,提升涡轮叶片设计核心技术水平,推动涡轮在井下发电、水力振荡器、举升泵、清管器等其他钻井装备与工具中创新应用,促进行业发展。

电动钻具要实现同螺杆钻具、涡轮钻具那样成熟应用的程度还有诸多问题需解决,但作为钻井技术智能化发展的不可或缺的井下动力钻具,其在电能利用方面优势突出,鉴于电的传输途径,电动钻具正朝着无级调速、大容量双向通讯、随钻测控等

方向发展,或成为特殊井钻进的有利器具。

综上,井下动力钻具的发展一方面是通过新结构、新工艺、新材料等的创新应用提高钻具性能,以满足深部钻井高功率、大扭矩的要求并配合钻头技术实现快速钻进,同时提高井下工作寿命;另一方面,从尺寸、结构形式、数据采集与传输等角度完善产品种类和系列,以配合MWD、LWD、连续油管技术、PDC钻头等新成果应用,促进“一趟钻”、智能化导向钻井技术等向成熟化发展,让井下动力钻具也随着钻井技术的更新不断突破,保持此类钻井利器之刃的锋利。

参考文献(References):

[1] 王建党,万建仓,沈慧. 钻井工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2008.
WANG Jianxue, WAN Jiancang, SHEN Hui. Drilling Engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.

[2] 王瑞和,倪红坚,周卫东. 破岩钻井方法及高压水射流破岩机理研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 7-10.
WANG Ruihe, NI Hongjian, ZHOU Weidong. The study on drilling method and rock breaking mechanism by high pressure water jet[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 7-10.

[3] 易先忠,符达良,钟守炎. 井下动力钻具的现状与我国的发展方向[J]. 国外油气科技, 1993(2): 47-55.
YI Xianzhong, FU Daliang, ZHONG Shouyan. The present situation of downhole power drilling tools and the development direction of our country [J]. Foreign Oil and Gas Technology, 1993(2): 47-55.

[4] 孙志和. 井下动力钻具旋转钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(5): 528.
SUN Zhihe. Downhole power tool rotary drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(5): 528.

[5] W. 泰拉斯波尔斯基,李克向. 井下液动钻具[M]. 北京:石油工业出版社, 1991.
Tyrasposlky W, LI Kexiang. Downhole Hydraulic Drilling Tool [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.

- [6] 王冠. 常用井下动力钻具简析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(9): 128-129.
WANG Guan. Analysis of commonly used downhole power drilling tools[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(9): 128-129.
- [7] 刘春全, 徐茂林, 汤平汉. 井下电动钻具的现状与发展[J]. 钻采工艺, 2008, 31(5): 115-117, 124.
LIU Chunquan, XU Maolin, TANG Pinghan. Present situation and development trend of downhole electromotive drill[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(5): 115-117, 124.
- [8] 王素玲. 井下电动钻具的力学性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
WANG Suling. Research on mechanical properties of downhole dynamic drilling tools[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [9] 申屠磊璇. 井下电动钻具直驱永磁电机设计与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
SHENTU Leixuan. Design and optimization of direct-drive permanent magnet motor for downhole electric drilling system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [10] 曹林云, 毕磊. 井下动力钻具的现状与发展[J]. 中国石油石化, 2016(23): 89-90.
CAO Linyun, BI Lei. Current situation and development of downhole power drilling tools [J]. China Petrochem, 2016 (23): 89-90.
- [11] 邱自学, 王璐璐, 徐永和, 等. 页岩气钻井螺杆钻具的研究现状及发展趋势[J]. 钻采工艺, 2019, 42(2): 36-37, 48.
QIU Zixue, WANG Lulu, XU Yonghe, et al. Status quo and development trend of positive displacement motor used in Shale Gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42 (2): 36-37, 48.
- [12] 管锋, 万锋, 吴永胜, 等. 涡轮钻具研究现状[J]. 石油机械, 2021, 49(10): 1-7.
GUAN Feng, WAN Feng, WU Yongsheng, et al. Research status of turbodrill[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (10): 1-7.
- [13] 闫家, 朱永宜, 王稳石, 等. 松科2井涡轮钻具取心钻进现场试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(S1): 217-220.
YAN Jia, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Field test of turbine core drilling in Songke 2 well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44 (S1): 217-220.
- [14] 卢芬芳, 徐昉, 申守庆. 史密斯Neyrfor公司的新型涡轮钻具技术[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 65.
LU Fenfang, XU Fang, SHEN Shouqing. Smith neyrfor's new turbodrill technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(1): 65.
- [15] 闫家, 王稳石, 张恒春, 等. 松科2井带涡轮钻具取心钻进探索[J]. 钻采工艺, 2019, 42(1): 31-34.
YAN Jia, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Practice of turbo-drill core drilling in Well SK-2[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(1): 31-34.
- [16] 冯定, 刘统亮, 王健刚, 等. 国外涡轮钻具技术新进展[J]. 石油机械, 2020, 48(11): 1-9.
FENG Ding, LIU Tongliang, WANG Jiangang, et al. Advances in foreign turbodrill technology [J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(11): 1-9.
- [17] Dvoynikov M V, Sidorkin D I, Kunshin A A, et al. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7517.
- [18] 苏义脑. 螺杆钻具的工作特性[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20 (6): 11-15, 67.
SU Yinao. Performance of screw drill tools[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(6): 11-15, 67.
- [19] 尹浩, 梁健, 李宽, 等. 万米科学钻探关键机具优化措施研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 16-24.
YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 16-24.

(编辑 王文)