涡轮钻具的研究进展

赵柳东,李立鑫,王 瑜,薛启龙,刘宝林
(中国地质大学〈北京〉国土资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083)

摘要:涡轮钻具由于其耐高温、高转速的特点,使其在高温和硬岩地层的钻进过程中发挥着重要的作用,并成为干热岩钻井和高温油气井钻井等领域的研究热点之一。本文从涡轮钻具的发展历程出发,对涡轮钻具的特点进行了系统地总结,从涡轮钻具的结构优化、涡轮叶片的设计与加工、轴承节的性能提升、减速涡轮钻具的研发、钻进新工艺的探索等5个方面对国内外涡轮钻具的研究进展进行了综述,发现总结了涡轮钻具研究过程中存在的一些问题,并结合我国在相关领域的实际需求,对未来我国涡轮钻具的重点研究方向提出了建议。

关键词:高温;硬地层;涡轮钻具;减速器;金刚石轴承
中图分类号:P634.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-7428(2016)10-0269-06

Summary of Research Progress in Turbodrill/*ZHAO Liu-dong*, *LI Li-xin*, *WANG Yu*, *XUE Qi-long*, *LIU Bao-lin* (Key Laboratory on Deep Geo-Drilling Technology of the Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: With the characters of high temperature resistance and high rotation speed, turbodrill plays an important role in the process of high temperature and hardpan layers drilling and has become one of the research hotspots in the areas of hot dry rock (HDR) and high temperature oil and gas well drilling. Starting from the development history of turbodrill, the article systematically summarizes the specialties of turbodrill. The researches progress of turbodrill both in China and abroad are overviewed in stucture improvement, design and processing of blades, performance improvement for the bearing supporting, research and development of the deceleration turbodrill and exploration of advanced drilling techniques. According to some problems found in the research on trurbodrill and combining with the actual demands in related fields in China, main researching focuses of turbodrill in the future are proposed.

Key words: high temperature; hardpan layer; turbodrill; reducer; diamond bearing

0 引言

井下动力钻具主要包括螺杆钻和涡轮钻2大类,其中,螺杆钻在我国应用更为广泛。近年来,我国涡轮钻使用也逐渐增加,其推广应用越发广泛。作为新兴的地热资源——干热岩具有储量大、开发成本低、对环境影响小等特点,而干热岩的开发和高温油气钻井等高温作业环境势必对井下钻具耐高温性能有更高的要求。相对于螺杆钻,涡轮钻具有轴向平衡好、横向振动小、耐高温性能优异、对油基钻井液不敏感、所钻井眼质量高、且工作效率不随时间变化、不易发生憋停、稳定性和可靠性较高等特点,能较好地满足干热岩钻井和高温油气钻井的要求,有效提升钻井效率,被广大学者认为是最具发展潜力的钻井技术之一。而且涡轮钻具更适于配合PDC钻头、孕镶金刚石钻头及高速牙轮钻头使用,可满足不同地质条件下的钻井作业,顺应了提速增效的发展需求,经济效益越发明显,竞争优势不断增加[1-2]。

近年来,广大科研人员对涡轮钻具进行了大量的研究工作,使得涡轮钻具的使用性能不断提升。本文综述了近年来国内外涡轮钻具研究所取得的一些重要成果,从涡轮钻具的结构改进、涡轮叶型的设计加工、轴承节的性能提升、减速涡轮钻具的研发、钻进工艺的探索等方面进行了介绍。

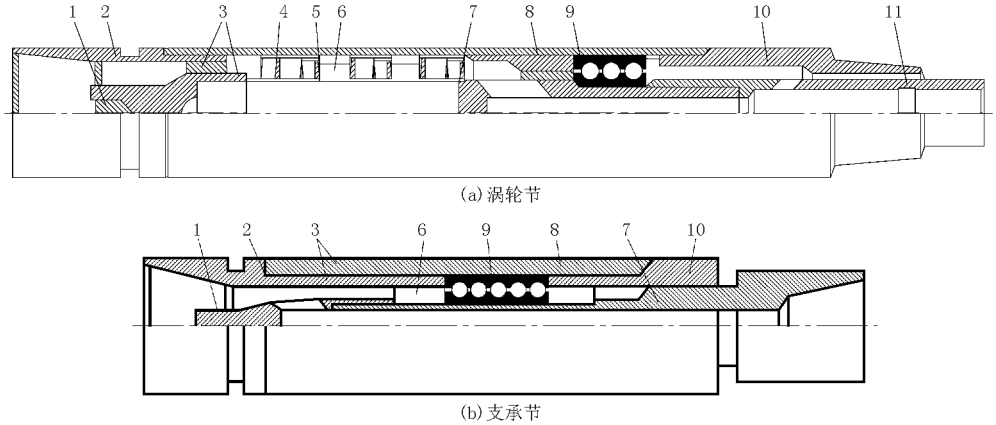
1 涡轮钻具的结构优化

涡轮钻具主要由多级涡轮和多级止推轴承串联组成,二者相互独立。轴承组承受轴向力较为集中,

收稿日期:2016-07-19; **修回日期**:2016-09-12
基金项目:本文得到了国家自然科学基金项目"深孔高温硬岩中涡轮钻进粘滑振动及其抑制机理研究"(编号:41572360)、国土资源部公益性行业科研专项"小直径高精度垂直钻进技术研究"(编号:201411054)、中央高校基本业务费项目"孔底高温高压动力钻具关键技术研究"(编号:292015061)的资助
作者简介:赵柳东,男,汉族,1992年生,硕士研究生,主要从事钻探、钻井工具研究,北京市海淀区学院路29号,306761296@qq.com。

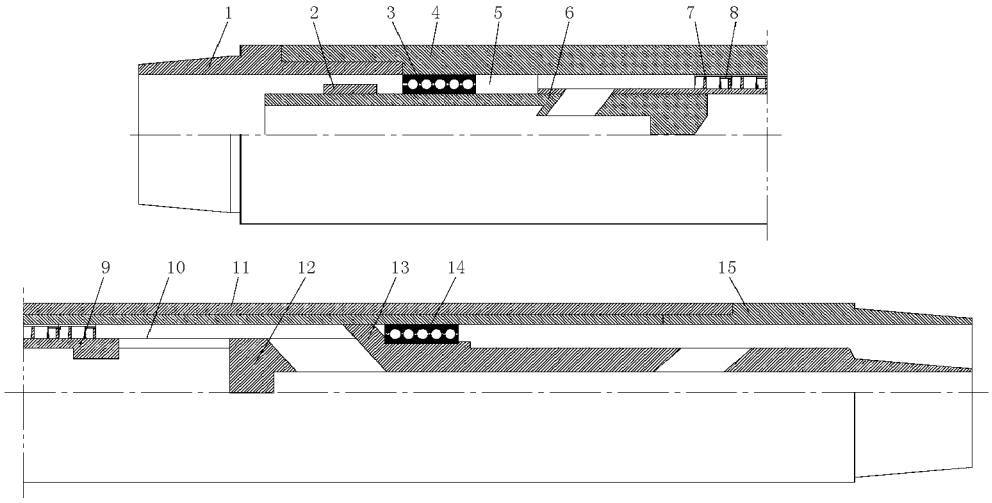
尤其是止推轴承磨损较为严重,进而造成涡轮节转子和定子相互碰撞导致失效。传统的涡轮钻为防止轴承过度磨损,装配时必须严格按要求对涡轮节与支承节的联接尺寸进行调整,过程十分复杂。为此,优化设计出了具有独立悬挂结构及浮动转(定)子结构的涡轮钻具,很好的解决了上述问题。

独立悬挂涡轮钻具(如图 1 所示)的涡轮节内安装有单独的止推轴承,用来承受该节涡轮的重力负荷和产生的水力负荷,各涡轮节可以互换,解决了传统涡轮钻具安装不便的问题。因涡轮节单独止推轴承的介入,改善了支承节止推轴承的磨损状况,磨损易于预测,且支承节中的止推轴承组磨损后,不影响定子和转子之间的轴向间隙;浮动转子涡轮钻具(如图 2 所示)的涡轮节中的转子在轴向力的作用下可以发生轴向浮动,补偿了因轴承磨损带来的定转子轴向下间隙的减小,增大了轴承组的可磨损量,且通过内部弹簧对轴承组的载荷进行重新分配,轴承组的允许磨损量能明显的提高,因此提升了钻具的整体寿命,而且浮动转子涡轮钻具上轴承组的磨损量小,转子与定子初始间隙的调整要求低,降低了涡轮钻具的装配难度[3-5]。



1—花键轴;2—上接头;3—调节套;4—定子;5—转子;6—扶正轴承;7—主轴;8—壳体;9—推力轴承;10—下接头

图 1 涡轮节独立悬挂的涡轮钻具结构示意图



1—上接头;2—防脱螺母;3—上四支点球轴承组;4—壳体;5—径向 TC 轴承;6—上分流套;7—定子;8—转子;9—涡轮轴;10—弹簧;11—套筒;12—下分流套;13—挡流头;14—下四支点球轴承组;15—下接头

图 2 浮动转子涡轮钻具示意图

涡轮钻具正常工作 100 ~ 200 h 需进行一次检修,以确保止推轴承等易损件满足工作要求。传统涡轮钻具检修时不仅需将扶正轴承和止推轴承全部拆下,还需将 60 ~ 100 级以上涡轮定子和转子同时拆下,检修工作量大,效率低下。为解决装配及检修工作繁杂的问题,谭春飞等设计了积木式涡轮钻具,

将止推轴承组从每节涡轮钻具中分离,设计成独立的不含易损件的长寿命积木式组合涡轮节,可像搭积木一样装配涡轮钻具,使涡轮钻具的安装、维修更加方便快捷。积木式涡轮钻具的涡轮节由 2 种或 2 种以上不同叶型的涡轮定、转子组成,组合涡轮钻具的输出转速介于低速定转子和高速定转子转速之间,可实现连续调节,并与钻井现场各类型钻头相匹配,具有较强的适应性[6]。

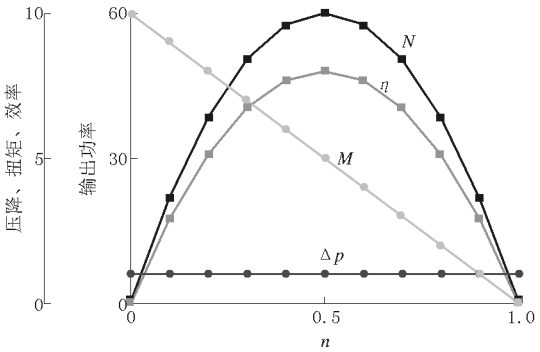
2　涡轮叶片的设计与加工

涡轮定转子作为涡轮钻具动力节最为核心的组件,其叶型设计直接影响涡轮钻具的动力输出和转化效率,一直以来都是广大学者研究的重点环节。涡轮定转子的生产多采用传统铸造方法,需按照叶型先行制作模具,开模费用高昂。若叶型设计不合适,调整后再行开模会造成严重的资源浪费。因此,如何利用计算机辅助设计及模拟仿真进行定转子叶型的准确设计,并对其性能进行预测具有重要的实用意义。

现阶段涡轮叶片造型方法多借助航空涡轮及水轮的分析方法,在已有圆弧线和双曲螺线组合、抛物线和圆弧线组合、圆弧线或抛物线单一组合造型等传统方法的基础上发展为四阶样条、三次多项式、五次多项式、Bezier 曲线等新方法。这些新方法设计的叶型曲线具有连续的三阶导数,满足了叶片进、出口角以及叶片流道连续收缩的要求,避免了无连续导数叶型曲线造成的液流速度和压力的突变,提升了涡轮钻具的水力特性。使用 Fluent 软件对常用的五圆弧叶型和三次多项式叶型涡轮叶片进行叶栅流场压力、速度变化进行模拟分析,结果表明三次多项式叶型涡轮的液流压降变化和速度变化,比五圆弧叶型涡轮更平稳,水力损失更小,效率更高,见表 1[7]。Wang Yu 等利用五次多项式法对针对超深孔高温高压和取心工艺要求的 Ø127 mm 涡轮钻具的涡轮叶型进行了优化设计,其中单级涡轮径向高度 12.5 mm,主轴轴径 56 mm,涡轮外径 107 mm,计算机流体动力学(CFD)仿真表明,该叶型涡轮钻较传统叶型涡轮钻水力效率提升明显,使用清水作为钻井液时,其 50 级涡轮叶片组成的动力节输出曲线有如图 3 所示的规律,据此可计算出 100 级涡轮叶片的输出扭矩可达 985 ~1025 N· m(设定钻井液密度为清水的 1.25 ~1.3 倍),能够有效满足结晶岩层取心钻探的作业要求[8]。SMITH 公司利用计算机辅助设计方法对涡轮叶片的叶型进行了优化升级,通过 CFD 证实了具有轴向对称叶型的定转子组合具有最高的水力效率,并提出采用 2 种或多种不同叶型的涡轮定转子复配的方式提高涡轮钻具的水力特性,成功申请了美国发明专利[9]。

表 1　不同叶型涡轮转子流场模拟结果[7]

叶型	入口压力 p_1/Pa	出口压力 p_2/Pa	扭矩 M/(N· m)	压降 Δp/Pa	$M^{3/2}/\Delta p$
三次多项式	-10324.2	-15246.5	0.472	4922.6	6.579E-05
五圆弧	-9387.3	-14615.7	0.475	5228.4	6.258E-05



n—转速;Δp—压降;M—扭矩;N—输出功率;η—效率

图 3　涡轮叶片组成动力节水力特性曲线(钻井液为清水)[8]

(坐标数字仅代表大小,不具有实际意义)

目前这些新的造型方法,多用三元流动理论结合计算机软件及编程、数值模拟仿真实验等,简便快捷的对涡轮叶型参数进行设计和调整,使得分析手段更加全面。并借鉴航空涡轮发动机的制造工艺,引入 UG、PRO-E、SolidWorks 等三维设计软件辅助数控加工中心进行加工,已基本形成体系化的涡轮叶片造型系统,带动了涡轮叶片制造加工的快速进步和钻具性能的整体提升,未来高性能涡轮钻具的研发将不再受限于复杂的涡轮叶片造型[10]。

3　涡轮钻具轴承节的性能提升

涡轮钻具轴承节的使用寿命往往是涡轮钻具失效的决定性因素,制约着回次进尺的长度[11-12]。轴承节止推轴承始终处于高速度、高温度、大载荷、大冲击的恶劣工况,承受钻井液和岩粉的冲蚀、磨蚀作用,工作面易出现变形、压溃、破裂、点蚀、涂抹、剥落等破坏。轴承磨损总量超限,将造成涡轮定、转子的失效。涡轮钻用止推轴承多采用开式润滑。不少学者曾希望通过闭式润滑解决上述问题,但闭式结构复杂,对加工精度、密封等要求远超开式结构。因

此,通过使用新型耐磨材料以提高轴承寿命,依旧是广泛有效的途径。止推轴承的材质逐渐由铸钢、轴承钢等钢铁材料向硬质合金、聚晶金刚石(PCD)等耐磨材料发展。

TM52 硬质合金目前已经在滚动止推轴承上有着较为成熟的应用。TM52 属碳化钛高锰钢结硬质合金,经淬火处理后硬度可达 HRC62 ~ 64,其表面承受载荷后还可发生加工硬化,获得更高的表面硬度和耐磨性,耐磨性分别是 ZGM13、45SiMn2VB 钢、高铬白口耐磨铸铁的 15、12、11 倍,适用于涡轮钻具止推轴承的制备,性能介于合金钢和 WC - Co 基硬质合金之间[13]。WC - Co 基硬质合金因具有较 TM52 更优异的耐磨性和综合力学性能,所制备的硬质合金耐磨块镶焊于扶正轴承上已大幅提升轴承的使用寿命,因此大量学者试图将硬质合金制成止推轴承,并视其为止推轴承极具潜力的候选材料之一。但 WC - Co 基硬质合金密度大、摩擦系数大,造成钻具动载加剧、动力输出损失等问题,现阶段仍处于研发阶段。

相对于硬质合金而言,PCD 具有硬度高、耐磨性强、导热系数大、摩擦系数小等特点,多用于制备滑动止推轴承,但其价格高昂,且韧性较差,易发生断裂、破碎等导致失效。随着 PCD 制备技术的进步,材料成本大幅下降,冲击韧性明显提升,可很大程度上减少井下振动冲击导致的碎裂,其制备滑动止推轴承的优势逐步显现。C. W. Knuteson 等模拟了 PCD 止推轴承在涡轮钻具中的实际工况,并研究了其摩擦学行为,在 640 r/min 的转速和 69.9 MPa 的轴向载荷下,PCD 止推轴承在油基或水基钻井液润滑条件下的摩擦系数仅为 0.01 ~ 0.04,随着工作时间的增加,摩擦副表面粗糙度逐渐降低,其摩擦机理由边界润滑逐渐转变为混合润滑,摩擦系数逐渐减小,使用寿命理论上可超过 3000 h[14]。T. N. Sexton 等的研究表明,钻具在井下重载、高速、磨粒磨损会导致密封滚动轴承和泥浆润滑球轴承的快速失效,而 PCD 止推轴承可以成功替代传统轴承满足井下钻具的使用要求,其失效的主要原因为 PDC(聚晶金刚石复合片,工作面为 PCD)在高速重载工况下的热损伤,导致金刚石晶型发生石墨化转变成为软点,在犁削作用下从基体剥离。该研究拟合出了使用 6⅝ in 涡轮钻具、钻井液流量为 18.9 L/s、接触面积为 542 mm^2 参数条件下的 PDC 止推轴承表面载荷和钻速最优配合曲线,并给出了不同 *PV* 值条件下 PCD 材料的磨损率,为钻井规程参数的设定和轴承寿命的预测提供了参考资料,如图 4 及图 5 所示[15]。

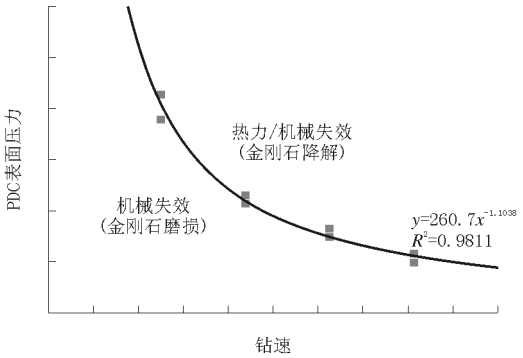


图 4 PDC 表面载荷和钻速的配合曲线

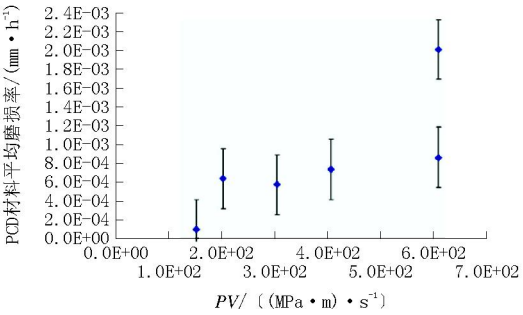


图 5 不同 *PV* 值条件下 PCD 材料的磨损率

尽管 PCD 材料的性能不断提升,但 PCD 止推轴承的使用寿命还取决于轴承的制备加工水平,如何保证各 PDC 工作面均在一个平面上,避免服役过程仅有少数几片工作,导致载荷增加而迅速失效仍旧是 PDC 止推轴承的研究重点。此外,通过整体涡轮钻具的结构设计,改善止推轴承的服役条件也可有效提升涡轮钻具的使用寿命,如引入平衡鼓降低轴承节的轴向受力等,也是轴承节性能提升的方向之一。

4 减速涡轮钻具的发展

涡轮钻具虽具有很高的转速,但扭矩较低的缺点使其在钻井的应用上受到限制。而增加定转子的数量、加长涡轮钻具或者采用多个涡轮节组合虽然可以增加扭矩,但是整机长度也随之增加,这对钻进过程会产生负面影响。而搭配减速器进行降速增扭可起到明显的效果,即可配合牙轮钻头钻进,大大提升涡轮钻的适应性。因而减速涡轮钻的研发始终是涡轮钻具发展的方向之一[16]。目前,俄罗斯在减速

涡轮钻具领域具有较高的水平,以普通涡轮钻具搭配充油齿轮减速器,可实现大扭矩、低转速的动力输出。随着俄罗斯 TPM－195、TPO3－195 等主要减速涡轮钻具驱动 PDC 钻头在西西伯利亚油田取得成功,俄罗斯减速涡轮钻具的适用性大大提升,综合竞争力进一步增强[17]。

我国也在积极开展减速涡轮钻具的研究工作,确定了很多突破性的研究成果,正逐步缩小与国外减速涡轮钻具的差距。谭春飞等研制了一种具有储油补偿系统和金属端面密封结构的耐高温、长寿命 TRO－127 两级行星齿轮减速涡轮钻具,该减速涡轮钻具由短涡轮节和行星齿轮减速器 2 部分组成,两级减速机构串联后可获得减速比 11.41,并配有独立的储油密封补偿系统和金属端面密封,适用于高温高压超深井钻探,在塔河油田的平均钻速提高 92% ~115%[18]。在此之后,该课题组又成功试制出 172 组合减速涡轮钻具,仅由一个积木式组合涡轮节搭配支承节、齿轮减速器组成,整机长度较短,转速适中、扭矩大、压降低、寿命长。现场应用表明,该钻具采用转盘或顶驱复合回转钻井方式可以较大幅度提高钻速[19]。

涡轮钻具为适应牙轮钻头 150 ~200 r/min 的转速要求,关键点在于研制具有大承载能力的减速器。但因钻具径向尺寸的限制,使得减速器的研制比较困难。许福东等依据机械原理的相关知识,对比了少齿差行星减速器和活齿传动减速器方案,得出闭式润滑正弦活齿传动减速器和螺旋钢球活齿传动减速器,具有体积小、传动比范围大、传动效率高、承载能力强、润滑性能好等优点,比少齿差行星齿轮传动更具有吸引力。但正弦活齿传动减速器的钢球滚道为封闭正弦曲线,设计受到传动比的限制,设计难度大,工艺复杂,而螺旋钢球活齿则具有更好的发展潜力[20]。

尽管近些年我国学者在减速涡轮钻具的研究上取得了很多的成果,但受制于原材料质量、机加工水平、装配工艺等达不到要求,很多具有较高设计水平的减速器无法加工,或加工出的成品存在密封不可靠等问题,在实际使用过程中易于发生泄漏失效,导致国产涡轮钻具的使用寿命长短不一、参差不齐,钻具的稳定性较发达国家相差较大,具有很大的提升空间,高性能减速涡轮钻具的研发制造仍旧任重道远。

5　涡轮钻具钻井新工艺的探索

近些年连续管技术作为一种高效率、低成本的钻井技术已日趋成熟,在欠平衡钻井、小井眼钻井、老井加深、侧钻、修井等领域应用前景广泛。Radtke R. 等学者均考虑到涡轮钻具高转速、低扭矩等输出特性,能够很好地同连续油管钻进过程中小钻压、低反扭矩的要求相匹配,提出具有高灵活性特征的连续管涡轮钻钻进工艺,是解决深井钻探最为有效的途径之一[21－22]。A. Mokaramian 等为满足深层位、硬岩层地质勘探钻井小尺寸、高钻速和高效率的要求,针对连续管钻进工艺的特点对涡轮钻的设计参数进行了一系列优化,经计算机流体动力学仿真分析证实,叶轮采用非对称叶型后表现出优异的水力效率,可满足小尺寸连续管钻进深层坚硬岩石[23－25]。

我国现已开发出从高速小扭矩到低速大扭矩的一系列涡轮钻具,可配合牙轮、孕镶金刚石、PDC 等各种钻头进行复合回转钻井作业。冯定等认为一体式的 PDC、BDC 和天然金刚石钻头均是以小钻压、高转速及低能量的切削方式破岩,与涡轮钻具的输出特性十分匹配。涡轮钻复合钻井的最佳工况,是涡轮转速为 0.8 ~1.2 倍涡轮定、转子的无冲击转速,转盘转速为 30 ~70 r/min 之间。原则上井越深、井斜越大、井眼越小、转盘转速应越低。钻井液排量在满足钻井要求的同时,则应越大越好。目前该技术已在玉门青西、四川川东、塔河油田等大倾角地层的钻进中获得了规则的井眼质量,并提高了钻井速度,在西部山前高陡易斜地层实现防斜快打具有良好的应用前景[26－27]。

6　涡轮钻具的发展展望

现阶段我国涡轮钻具的发展水平与国外先进水平仍存在着 5 ~10 年的差距,对涡轮钻具的研发依旧处于跟随状态。在向国际先进水平不断学习的同时,结合我国具体的石油钻井需要,尤其是面对未来超深井、难开采井、老井侧钻、深层勘探等不断增加的发展趋势,我国涡轮钻具行业应在以下几点加大研发力度:

(1)加大小尺寸涡轮钻具及相关钻井技术的研发,解决我国小尺寸涡轮钻具效率低的问题,尤其是开发能够与连续管钻进技术相适应的涡轮钻具,填补我国在该领域的空白;

(2)注重涡轮钻具动力节水力效率的提升,并通过钻具结构的优化设计,缩短整机长度,以满足大斜度井和定向井的工艺要求,增加我国涡轮钻具的适应性;

(3)不断使用先进的设计理论和加工工艺提升我国涡轮钻具的精度,尤其注重涡轮钻具止推轴承等易损件性能的提升,向高精度、高稳定、高效率、长寿命的先进涡轮钻具迈进;

(4)减速涡轮钻具是涡轮钻具发展的重要方向之一,但减速器的设计、加工及维护依旧是研究重点,应加大力度研制结构先进、密封可靠、寿命长的减速器,以更好地满足涡轮钻具的使用要求。

(5)推进涡轮钻具钻井工艺理论及实践的系统化研究,针对不同地质条件、钻井介质、配套钻头下工作的涡轮钻具建立理论模型,为实际钻井工作提供参考依据。

7 结语

通过近几十年的不懈努力,我国涡轮钻具的整体技术水平与国际先进水平的差距在不断缩小,但长期以来的跟随状态尚未有根本性的改变。国产涡轮钻尚存在很多不足之处,如工作寿命不稳定、钻进状态无法检测及对钻机的管理相对落后等问题,仍需继续向世界先进技术看齐,不断完善进步。相信通过我国广大学者的不断努力,我国涡轮钻的技术水平将会跻身世界先进行列,为我国钻井工程做出更大的贡献。

参考文献:

[1] Ricardo Vasquez. Use of Impregnated Bits with Turbine to Increase ROP in Hard/Abrasive Carboniferous Formation-Bolivia South HPHT Wells[Z]. SPE 114700.

[2] 成海,郑卫建,夏彬,等.国内外涡轮钻具钻井技术及其发展趋势[J].石油矿场机械,2008,37(4):28-31.

[3] 张强,张鹏.独立悬挂复式涡轮钻具结构特点及强度分析[J].机械制造与自动化,2010,39(6):72-75,113.

[4] 冯定.国产涡轮钻具结构及性能分析[J].石油机械,2007,35(1):59-61.

[5] 张晓东,李俊华,龚彦,等.一种带浮动转子的涡轮节新结构[J].机电产品开发与创新,2009,22(6):45-46.

[6] 谭春飞.深井超深井涡轮钻具复合钻井提高钻速技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.

[7] 谭春飞,张升峰,张仁龙,等.涡轮叶片型线结构对叶栅流场的影响研究[J].石油机械,2012,40(12):6-9.

[8] Wang Yu, Yao Jianyi, Li Zhijun. Design and Development of Turbodrill Blade Used in Crystallized Section[J]. The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 682963, 12.

[9] Weixiong Wang, James Layne Larsen, Lijun Song, et al. Turbine Blade For Turbodrills: USA, US 2015/0060144 Al[P]. 2015.

[10] 张晓东,杨韬.基于 UG 的涡轮钻具叶轮整体加工研究[J].制造业自动化,2015,37(7):44-46.

[11] Yong Liu, Haibing Wang, Zhengyi Long, et al. Microstructural evolutionand mechanical behaviors of graded cemented carbides[J]. Material Science and Engineering A,2006,426(1-2):346-354.

[12] M. Yahiaoui, J.-Y. Paris, K. Delbé, et al. Quality and wear behavior of graded polycrystalline diamond compact cutters[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 56(4):87-95.

[13] 谢金稳,周德军,贾文杰.涡轮钻具滚动止推轴承材料及其工艺的建议[J].石油矿场机械,1999,28(5):43-46.

[14] C. W. Knuteson, T. N. Sexton, C. H. Cooley. Wear-in ehavior of polycrystalline diamond thrust bearings[J]. Wear,2011,271:2106 - 2110.

[15] T. N. Sexton, C. H. Cooley. Polycrystalline diamond thrust bearings for down-hole oil and gas drilling tools[J]. Wear,2009,267:1041 - 1045.

[16] 王伟.国内外减速涡轮钻具的发展现状[J].科技资讯,2006,(27):44.

[17] 陈洪兵,周龙昌,张雷.俄罗斯减速器涡轮钻具驱动 PDC 钻头在西西伯利亚油田的成功应用[J].石油钻探技术,2005,33(2):48-50.

[18] 谭春飞,阿克别克,夏柏如,等.超深井 TRO-127 两级减速涡轮钻具的研究[J].石油机械,2009, 37(12):16-19.

[19] 谭春飞,夏彬,夏柏如,等.172 组合减速涡轮钻具的研究与应用[J].钻采工艺,2010,33(5):77-80.

[20] 许福东,胡成峰,符达良,等.调节型涡轮钻具减速器的发展现状与趋势[J].荆楚理工学院学报,2015,30(6):59-64.

[21] Radtke R., Glowka D., Rai M. M., et al. High-Power Turbodrill and Drill Bit for Drilling With Coiled TubingTechnology[Z]. International, Inc. US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory (NETL),2011.

[22] A. Mokaramian, V. Rasouli, G. Cavanough. Turbodrills design and performance analysis for efficient drilling in hard rocks[J]. Petroleum and Mineral Resources,2012,81:121-132.

[23] A. Mokaramian, V. Rasouli, G. Cavanough. Turbodrill Design and Performance Analysis[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2015,8(3):377-390.

[24] A. Mokaramian, V. Rasouli, G. Cavanough. Fluid Flow Investigation through Small Turbodrill for Optimal Performance[J]. Mechanical Engineering Research,2013,3(1):1-24.

[25] Mokaramian A, Rasouli V, Cavanough G. Adapting oil and gas downhole motors for deep mineral exploration drilling, Deep Mining 2012[C]:Proceedings of the sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining, 2012:475-486.

[26] 冯定.涡轮钻具复合钻进技术[J].石油钻采工艺,2007,29(3):19-21 31.

[27] 李文飞,周延军,陈明,等.涡轮钻具复合钻井技术及其在塔河油田的应用[J].西部探矿工程,2010,(5):41-44.