

超短高能涡轮钻具研制及应用

王金龙¹, 边培明¹, 陶兴华², 路保平², 李萌博¹

(1. 深圳市百勤石油技术有限公司, 广东 深圳 518054; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:针对超深层强研磨、高硬度地层机械钻速慢的问题,研制了一种超短高能涡轮钻具,并对其进行了参数校核和现场应用。该涡轮钻具创新设计了多曲面 3D 转子叶片,基于流体力学 CFX 软件,优化了转子叶片空间形态布局,使叶片的水力能量转化效率提高 45%,扭矩增加了 43.55%;通过将装有叶片的动力端和装有止推轴承的轴承端合二为一,使分体式的涡轮芯轴改进为一体式结构,长度由进口涡轮钻具的 15 m 缩短至 8.3 m,大幅提高了涡轮钻具的可下入性和安全性,缩短了划眼和通井作业时间;最后采用有限元仿真对涡轮钻具产生的扭矩和丝扣连接强度进行了校核测试。该涡轮钻具先后在博孜、元坝等区块石英砂岩、火成岩、砾石层地层的 48 口井中成功应用,应用混合钻头后机械钻速平均提高 100%,为我国深层超深层钻井提供了有力保障。

关键词:超深层钻井;研磨性地层;涡轮钻具;叶片设计;一体式结构

中图分类号:P634.4;TE921+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)12-0016-07

Development and application of an ultra short high energy turbodrill

WANG Jinlong¹, BIAN Peiming¹, TAO Xinghua², LU Baoping², LI Mengbo¹

(1. Petro-king Oilfield Technology Ltd., Shenzhen Guangdong 518054, China;

2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to solve the problems of strong abrasiveness and slow ROP in drilling ultra deep formation, an ultra short high energy turbodrill was developed and field-tested. A multi curved 3D rotor blade was innovatively designed for the turbodrill. Based on the fluid dynamics software CFX, the spatial configuration layout of the rotor blade was optimized to increase the hydraulic energy conversion efficiency of the blade by 45%, and the torque by 43.55%. With integration of the power end with the thrust bearing, the split turbine mandrel was modified into a one-piece structure with the length of the rotor blade cut short to 8.3m from 15m of the imported one; thus greatly improving passage and safety of the turbodrill, and reducing reaming and gauging time. The torque and thread connection strength of the turbodrill were calibrated by the linear element simulation. The turbodrill has been successfully applied in 48 wells in quartz sandstone, igneous rock and gravel formation in Bozi and Yuanba blocks with an average increase of 100% in ROP, which provides a strong support for deep and ultra deep drilling in China.

Key words: ultra deep drilling; abrasive formation; turbodrill; blade design; integrated structure

深层和超深层油气资源是国内未来重要的接替能源,具有极大的勘探开发潜力,随着深井和超深井数量和难度的加大,钻井速度低的技术瓶颈日益凸显^[1-3]。中石油博孜构造和中石化元坝地区具有强研磨、高硬度、高抗压强度、大内摩擦角的特点,可钻性极差,依靠常规牙轮钻头方法钻进,单只钻头纯钻时间平均仅为 80~100 h,频繁的起下钻导致机械钻速极低,无法满足作业需求^[4-6]。而涡轮钻具通过将流体能量转换为井底的高转速,为钻头提供足

够的破岩能量,配合孕镶金刚石钻头,是目前高研磨难钻地层提高机械钻速的主要手段^[7]。俄罗斯是最早研究和应用涡轮钻具的国家,但由于支撑轴承结构、材料等原因,俄罗斯及仿俄罗斯式的涡轮钻具寿命有限,且无法在高密度地层环境下应用^[8]。欧美涡轮钻具的主要生产商 Neyrfor 公司在引进俄罗斯的涡轮钻具技术后,着力发展了高速涡轮钻具,并在新技术新材料的基础上,逐渐推出 PDC 轴承、平衡鼓及弯外壳轴承等技术,拓宽了涡轮钻具的使用范

收稿日期:2020-12-05 DOI:10.12143/j.tkge.2020.12.003

作者简介:王金龙,男,汉族,1964 年生,高级工程师,钻井工程专业,主要从事石油天然气、天然气水合物等油气井工程及工具方面的研究工作,广东省深圳市南山区海德三道天利中央商务广场 A 座 7 楼 705-710 室,jlwan@petro-king.cn。

引用格式:王金龙,边培明,陶兴华,等.超短高能涡轮钻具研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):16-22.

WANG Jinlong, BIAN Peiming, TAO Xinghua, et al. Development and application of an ultra short high energy turbodrill[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(12):16-22.

围,采用 PDC 钻头和孕镶金刚石钻头与高速涡轮配合,在 1000 r/min 左右的高转速下,钻头稳定性、流道分布、抗冲击能力都得到了保证,能够提高机械钻速 40%~50%,节约钻井成本 1/3,然其涡轮钻具仍存在长度较长,某些地层下入困难,没有弯接头结构,无法进行定向造斜的缺陷^[9-10]。为满足我国特深层油气勘探开发的需求,自主研发了新型超短高能涡轮钻具,创新了一体式芯轴结构和多曲面叶片设计,在钻具长度缩短近一倍的情况下,还提高了能量转换效率和扭矩,降低了下入难度和作业风险,并在国内外 48 口井中成功应用,应用混合钻头后机械钻速平均提高了 100%,实现了对国外同类工具的替代,为超深井安全高效钻井作业提供了有力保障。

1 超短高能涡轮钻具叶片优化设计

为实现更高的能量转化效率和更大的扭矩,同时减少轴向推力,增加涡轮钻具的安全性,对涡轮的叶片结构进行了优化设计。首先基于流体力学 CFD 软件,利用定子和转子的几何形状,创建了涡轮叶片截面曲线,然后分别生成单级单流道和三级单流道的叶片网格,共包含 60 万个节点,如图 1 所示。

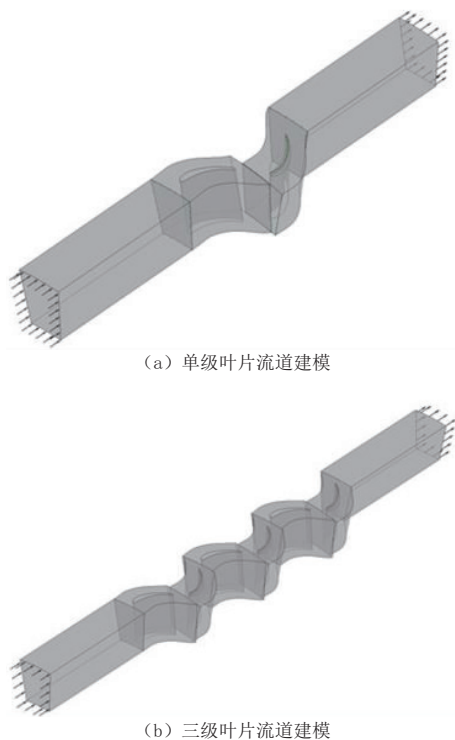


图 1 涡轮钻具叶片流道网格划分

Fig.1 Mesh generation of the turbine blade runner

采用 $K-\omega$ 紊流模型,分别计算了高排量(2200 L/min)、中排量(1700 L/min)和低排量(1325 L/min)的水及钻井液通过叶片产生的扭矩和转速,计算结果如图 2、图 3 所示。

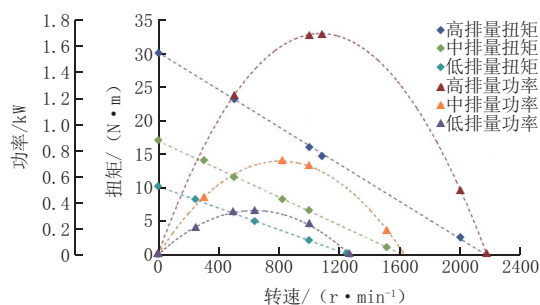


图 2 不同排量单级叶片输出曲线

Fig.2 Output curves of the single-stage blades with different displacement

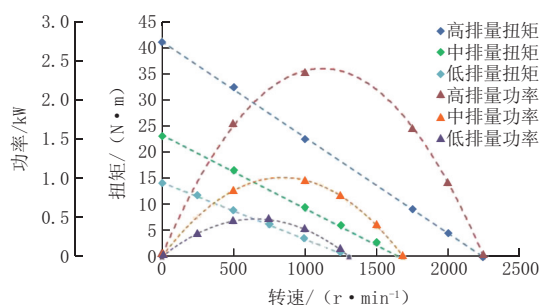


图 3 不同排量三级叶片输出曲线

Fig.3 Output curve of the three-stage blades with different displacement

从图 2、图 3 中可以看出,3 级叶片产生的功率和扭矩更大,基于计算结果进一步对三级叶片结构进行了 4 次优化,主要包括以下内容:

- (1)修改展向和流向载荷分布,增加扭矩和能量转化效率(ALPHA 型);
- (2)将静叶数减少到 27,动叶数减少到 24,以进一步降低轴向推力(ADT05 型);
- (3)为改进定子转子匹配和重复级之间的匹配,对展向流道分布进行了修改,提高了涡轮的总效率(ADT06 型);
- (4)降低了涡轮反作用力,在产生相同扭矩的情况下获得较低的推力(ADT07 型)。

再次计算了中排量下钻井液通过 4 次优化后的 3 级叶片结构产生的扭矩、效率、轴向推力,计算结果如图 4~6 所示。

从图 4~6 中的计算结果可以看出,4 次优化后的 ADT07 型对比初始的 ALPHA 型涡轮产生的扭

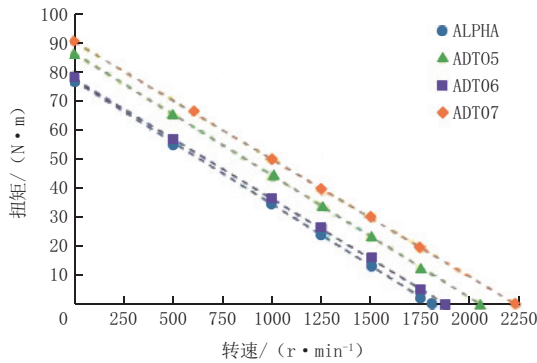


图4 中排量下改进叶片扭矩对比

Fig.4 Torque comparison for the improved blades at medium displacement

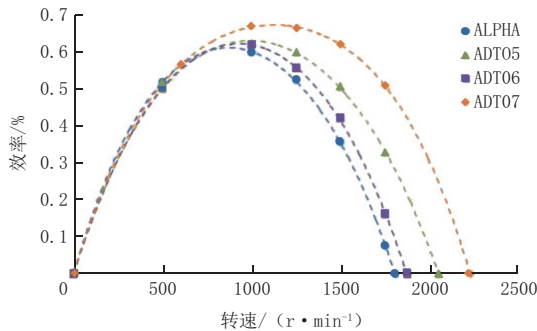


图5 中排量下改进叶片效率对比

Fig.5 Efficiency comparison for the improved blades at medium displacement

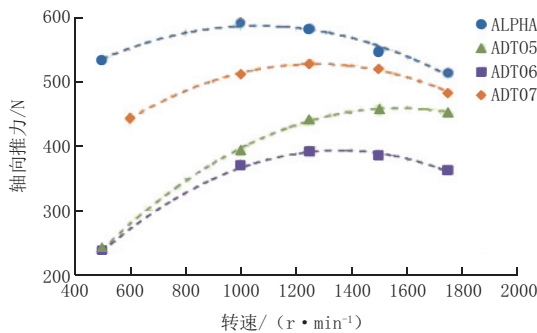


图6 中排量下改进叶片轴向推力对比

Fig.6 Axial force comparison for the improved blades at medium displacement

矩增加了 43.55%，总效率比静态效率高了 7.26%，轴向推力降低了 13.4%。

2 超短涡轮钻具结构优化设计

2.1 一体化芯轴设计

常规涡轮钻具由动力端及轴承端两部分组成，其动力端主要由定子和转子组成，通过一体式芯轴设计，如图 7 所示，将传统的涡轮钻具动力端与轴承

端合二为一，提升了功率转换效率，涡轮钻具长度减少 45%，缩短了划眼和通井作业时间；同时减少了接头数量，井下安全性大幅提高。

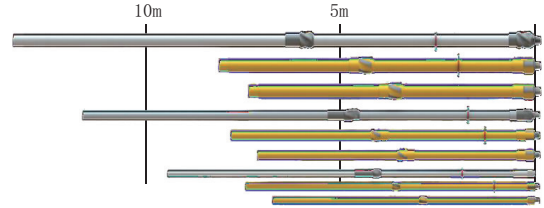


图7 超短高能涡轮工具(黄色)同常规涡轮钻具(灰色)对比

Fig.7 Ultra-short turbo-drills (yellow) vs conventional ones (grey)

2.2 优化 BHA 设计

优化掉中部扶正器，本体上只保留一个下扶正器，下扶正器为套筒式偏心设计，能够降低卡钻风险、减小左漂趋势；减小了下扶正器与钻头之间的距离，从而减小泥浆侵蚀，降低井眼螺旋度，提高定向效果；同时，涡轮钻具钻头至弯外壳距离的更短，实现相同造斜率需要的工具角度更小，可实现直井斜、 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 造斜、水平井及斜井稳斜等定向作业；设计了更快捷的钻头装卸设计，仅需拆卸一道扣即可完成心轴的锁定，从而大大减少了空井时间。优化后的涡轮钻具更方便下入，降低了下钻划眼的情况和卡钻的风险，保障了作业安全，涡轮钻具的结构如图 8 所示。

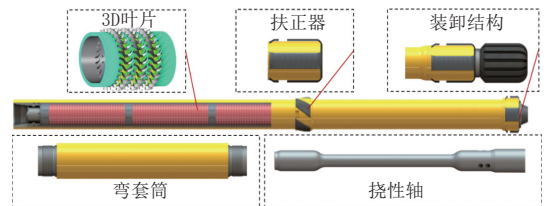


图8 超短高能涡轮钻具结构

Fig.8 Structure of the ultra-short high energy turbodrill

2.3 钻头搭配设计

对于压实性相对较低，研磨性相对较弱的地层，可搭配 PDC 钻头或混合钻头使用，以达到更快的机械钻速和更多单趟进尺^[11-12]。涡轮轴的同心旋转产生非常小的轴向振动，从而减少 PDC 切削齿的损坏；高转速和低钻压降低了钻头的冲击损伤，并允许运行耐磨损齿钻头，从而延长钻头寿命，在玉北 4 井成功试用涡轮 + PDC 钻头单趟进尺 482.17 m，纯钻进时间 221.95 h，钻头出井新度 70%。而在高研磨性地层，PDC 钻头在高转速下易受到热损伤，而

且增加切削齿的密度不能解决热稳定性问题。所以对高研磨性地层进行了钻头优选,选择加强型保径或使用混和型钻头。混合型钻头是通过 PDC 齿配合 TSP 齿加速前期的切削速度,这些齿逐渐磨损后,仅消耗掉钻头约四分之一的使用寿命,此时位于齿后方的金刚石孕镶胎体开始接触并研磨地层,直至孕镶金刚石刀翼全部磨掉。涡轮配合混合钻头的技术,扩大了 PDC 钻头的应用窗口,减小了起下钻次数,改善了 PDC 钻头在软地层的清洁,提高了在硬地层、高研磨性地层的机械钻速。

3 涡轮丝扣连接强度校核

通过 ANSYS Mechanical 有限元分析软件对涡轮钻具的丝扣连接强度进行了校核。忽略螺纹局部几何不连续性和螺旋线轮廓,建立了 2D 轴对称结构并进行网格划分,使用最小材料条件对母扣和公扣进行建模并分析每个螺纹连接,以预测最恶劣条件下的应力。

螺纹连接承受上扣扭矩载荷,在扭矩载荷下,一般的 ACME 螺纹设计考虑了 3 种设计原理,即母扣应力等级、公扣应力等级和螺纹剪切等级,母扣应力和公扣应力主要取决于应力槽截面,而螺纹抗剪等级取决于啮合长度。初始扭矩是根据以上 3 个额定值中的最小值估算的,由于基本设计所提供的啮合长度足够,因此可以预期不会由于螺纹的剪切而导致螺纹连接失效,主要考虑母扣应力和公扣应力等级标准来估计上扣扭矩值。

在结果的后处理过程中,基于接触压力、接触面积和摩擦系数来计算扭矩值。并在公扣和母扣应力槽部分提取 Von - Mises 应力结果。根据计算出的扭矩值绘制应力和应变云图,图 9 和图 10 分别为螺纹丝扣的 Von - Mises 应力和塑性应变云图。考虑多种设计标准以估算最佳上扣扭矩,如 0.9 倍屈服应力、全厚度屈服应力或 2% 等效塑性应变。根据极限标准为每个螺纹连接选择最佳的上扣扭矩值,表 1 中列出了每个连接基于标准的上扣扭矩。

总结:Ø172 mm 超短高能涡轮的长度由原来的 12 m 缩短为 8 m,长度减少 33%。同时在 12.4 MPa 压力降、流体密度 1.2 g/cm³ 的条件下输出功率,较常规涡轮提高了 85%;在流量 31.5 L/s、流体密度 1.2 g/cm³ 的条件下压降从 13.77 MPa 减少到 9.33 MPa,降幅达 32%。相比于常规涡轮,超短

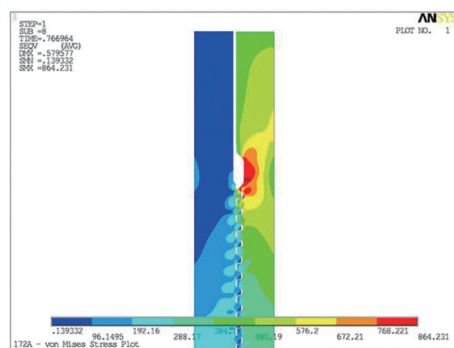


图 9 Von - Mises 应力图(上扣扭矩 87.85 kN · m)

Fig.9 Von - Mises stress diagram (make-up torque 87.85kN · m)

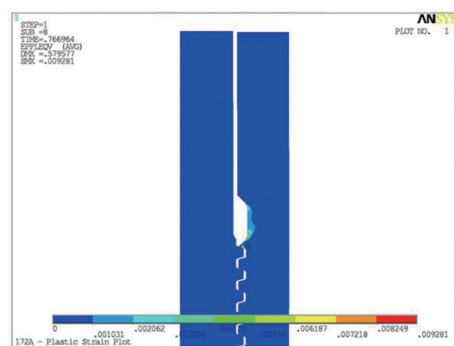


图 10 等效塑性应变图(上扣扭矩 87.85 kN · m)

Fig.10 Equivalent plastic strain diagram (make-up torque 87.85kN · m)

表 1 不同标准下的上扣扭矩值

Table 1 Make up torque values under different standards

螺纹连接编号	描述	分析位置	扭矩值/(kN · m)		
			标准 1	标准 2	标准 3
172A	近钻头偏心扶正器与芯轴连接	母扣应力槽	38.75	105.17	105.17
172B	上外壳与中扶连接	母扣应力槽	20.66	54.95	56.31 ⁴
172C	下轴与短轴连接	公扣应力槽	4.70	18.10 ⁵	15.21
172D	短轴与轴变扣连接	公扣内台肩	4.86	17.88	10.14
172E	轴变扣与上轴连接	公扣应力槽	3.00	12.60	9.83

注:(1)标准 1:在任何位置达到 90% 的屈服应力;(2)标准 2:在临界应力段达到全厚度屈服应力;(3)标准 3:在任何位置都达到 2% 等效塑性应变;(4)在给定的载荷下,塑性应变不会超过 2% 的塑性应变;(5)对于给定的载荷,没有达到全厚度屈服应力。

高能涡轮的螺纹连接数量减少了 60%,同时采用新的更加牢固的扣型,增加了工具稳定性。

4 现场应用

该涡轮钻井在高抗压强度石英砂岩、火成岩、砾石层等复杂地层钻进中,速度提高优势十分显著,机械钻速提高 1 倍。地层研磨性越强,如砾岩层、火成岩井段,机械钻速提高越明显。平均单只钻头寿命

可达到 500 h,均可多次入井,大幅度节约了钻头成本。

超短高能涡轮钻具在国内外应用 68 井次,国内市场占有率 86%,在巴西、哈萨克斯坦、阿尔及利亚等国家,由贝克休斯、NOV 等国际知名油田服务企业提供涡轮工具产品服务,国外市场占有率达 25%,机械钻速提高 200%~490%。该工具在哈萨

克斯坦 Kenkiyak 区块的 8011A 井,顺利钻穿 $\text{O}215.9\text{ mm}$ 井段中 Sakmar 层位上部的砂岩与页岩交错井段。该井配合 Smith 的 K705 孕镶金刚石钻头,完成单趟进尺 536 m,平均机械钻速 2.8 m/h,钻井周期 13.05 d,相比常规钻井 2 趟钻 31 d 的设计周期,节省 17.95 d。图 11 为该井的施工进度对比。

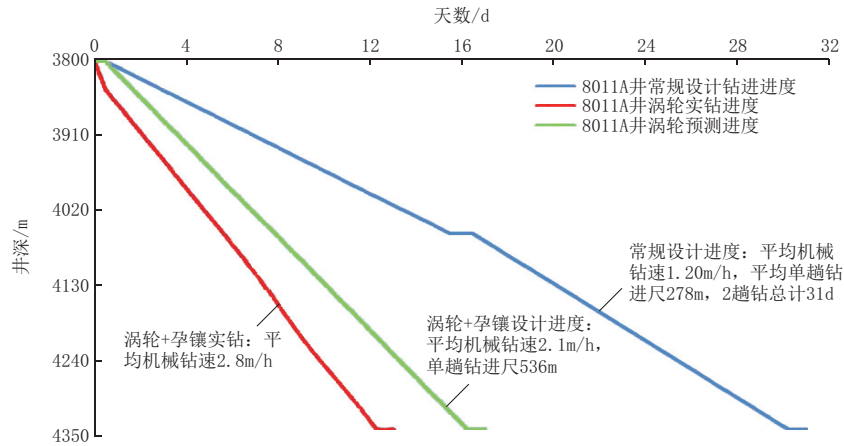


图 11 8011A 井施工进度

Fig.11 Well - 8011A drilling progress chart

中石油塔里木油田库车坳陷克拉苏构造带博孜区带博孜 1 号构造博孜 102 井区高点的博孜 102-4 井是该涡轮钻具在该区带的第 6 次成功使用,顺利钻穿了 333.3 mm 井段中自库车组下部至康村组上部的巨厚砂砾岩井段。该井使用 4 只钻头 7 趟钻,完成进尺 1266 m,钻井周期 42 d,邻井在相同井段共需使用钻头约 26 只,钻井周期约 121 d。图 12 为该涡轮钻具在博孜 102-4 井同地层(岩性)下机械钻速及行程钻速与常规钻井方式的对比。可见,在砂砾岩井段,涡轮钻井机械钻速及行程钻速提高 100%。地层越硬、可钻性越差,涡轮钻井提速优势越明显。

中石化川东北元坝低缓褶皱带茅口组宝成岩性圈闭东北部的元坝 7 井三开 $\text{O}245\text{ mm}$ 超短高能涡轮钻具配合 $12\frac{1}{4}\text{ in}$ 孕镶金刚石钻头完成了 2 趟钻,该井于须家河组三段、二段、一段总进尺 276 m,纯钻进时间 218.25 h,平均机械钻速为 1.26 m/h^[13-14]。与本井相应层段 Smith 涡轮+K705 孕镶钻头的机械钻速 0.5 m/h 相比,本井超短高能涡轮+孕镶机械钻速是其 2.52 倍。与本井相应层段复合冲击器+PDC 钻头的机械钻速 0.6 m/h 相比,本井超短高能涡轮+孕镶机械钻速是其 2.1 倍^[15]。与本井相应层段钟摆钻具+牙轮钻头的平均机械钻速 0.71 m/h 相比,本井超短高能涡轮+孕镶机械钻速是其 1.77 倍。与本井相应层段钟摆钻具+狮虎兽钻头的平均机械钻速 0.42 m/h 相比,本井新型涡轮+孕镶机械钻速是其 3 倍(见图 13)。超短高能涡轮+DD3540M 孕镶钻头提高了机械钻速与纯钻时效,增加了单只钻头进尺,缩短了钻井周期,有效地控制好了井斜,优质地完成了该口井的提速作业。

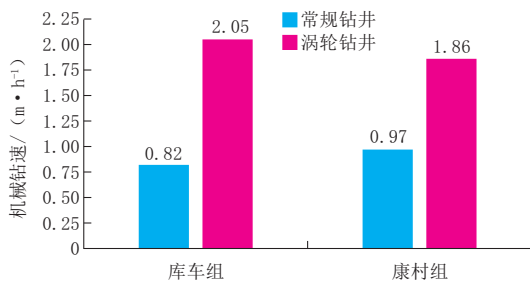


图 12 机械钻速对比(博孜 102-4 井)

Fig.12 Comparison of ROP (Bozi - 102-4 Well)

根据实钻资料统计,在不同岩性,与常规钻井方式相比较,高速涡轮钻井的提速提效优势体现在不同的方面,如表 2 所示。据统计,国内每年钻遇深层

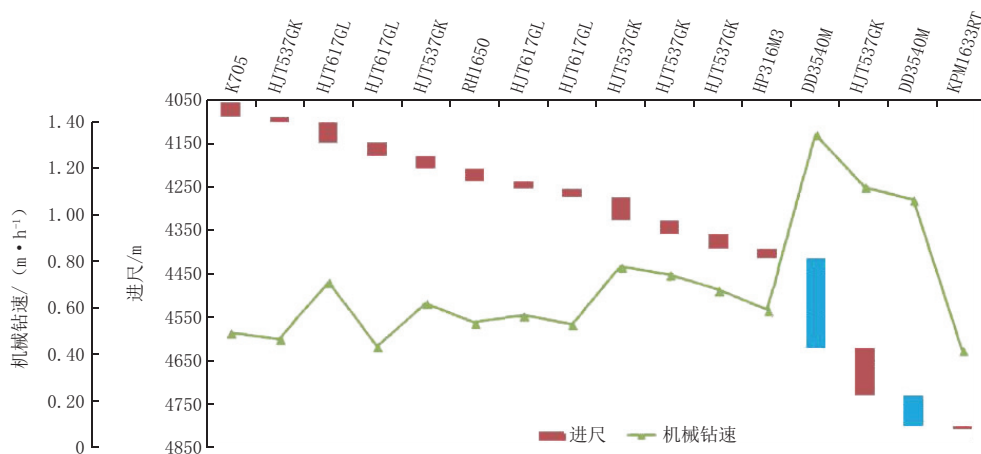


图 13 元坝 7 井超短高能涡轮与 Smith 涡轮、常规牙轮、PDC 钻头机械钻速对比

Fig.13 Comparison of ROP (Yuanba - 7 Well)

表 2 超短高能涡轮钻具在不同地层(岩性)优势分析

Table 2 Advantages of the ultra-short high energy turbodrill in different formation (lithology)

岩性	机械钻速	钻头寿命	钻头磨损特征	优势
砂泥(页)岩	约提高 1 倍	约 20 倍	磨损均匀,较轻	机械钻速提高明显,钻头寿命长,节约周期 50%
石英砂岩	约提高 80%	8~10 倍	均匀磨损,与石英含量相关	机械钻速及行程钻速提高约 1 倍,节约周期 50%
火成岩	约提高 3 倍	约 20 倍	磨损较轻,寿命长	机械钻速提高明显,钻头寿命优势明显,节约周期 60%
砾石层	约提高 30%	20~30 倍	磨损较轻,寿命长	机械钻速略有提高,行程钻速提高明显,节约周期 65%

难钻地层的进尺约为 18.3×10^4 m,其平均机械钻速低于 2.00 m/h,分布于四川、塔里木盆地、松辽平原、东部深层等不同油田和区域,在常规钻井技术受到限制的情况下,该超短高能涡轮钻具的应用前景极为广阔。

5 结论及认识

(1)超短高能涡轮钻具创新设计了多曲面 3D 转子叶片,基于流体力学 CFX 软件,优化了转子叶片空间形态布局,使叶片的水力能量转化效率提高 45%,产生的扭矩增加了 43.55%。

(2)超短高能涡轮钻具创新地将传统涡轮钻具的动力端与轴承端合二为一,显著缩短了工具长度,由进口涡轮的 15 m 缩短至 8.3 m,可下入性增强,减小了长涡轮普遍存在的划眼、通井时间;同时减少了接头数量,降低扭断风险,利于井下安全。

(3)超短高能涡轮钻具,优化了 BHA 设计和扶正器位置,设计了更快捷的钻头装卸结构,仅需拆卸一道扣即可完成心轴的锁定,更加方便下入;钻头至弯外壳的距离更短,减小了下扶正器与钻头之间的距离,实现相同造斜率需要的工具角度更小,可实现直井纠斜、 $0^\circ \sim 90^\circ$ 造斜、水平井及斜井稳斜等作业

需求,降低井眼螺旋度,提高了定向效果。

(4)该涡轮钻具在元坝、新疆及吉林油田的 48 口井中成功应用,平均提高机械钻速 100%,达到了缩短钻井周期 40%~50%的世界水平,实现了对国外涡轮钻具的替代。该涡轮钻具在高抗压强度、高研磨性石英砂岩、火成岩、砾石层井段提速优势明显,具有广阔的应用前景。

参考文献 (References):

[1] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等.中国深层油气形成,分布与潜力分析[J].石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.
SUN Longde, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40 (6): 641-649.

[2] 郑瑞强,赵毅,王伟,等.液动旋冲工具及涡轮钻具的优化设计[J].西部探矿工程,2020,32(10):31-34.
ZHENG Ruiqiang, ZHAO Yi, WANG Wei, et al. Optimization design of hydraulic rotary punching tool and turbodrill[J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(10): 31-34.

[3] 贾承造,庞雄奇,姜福杰.中国油气资源研究现状与发展方向[J].石油科学通报,2016,1(1):2-23.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 2-23.

[4] 曾义金,刘建立.深井超深井钻井技术现状和发展趋势[J].石

- 油钻探技术, 2005, 33(5): 1-5.
ZENG Yijin, LIU Jianli. Technical status and developmental trend of drilling techniques in deep and ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 1-5.
- [5] 王光磊, 侯健, 于承朋, 等. 元坝 1 井钻井设计与施工[J]. 石油钻探技术, 2008(3): 41-45.
WANG Guanglei, HUO Jian, YU Chengpeng, et al. Drilling design and operation of Well Yuanba-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008(3): 41-45.
- [6] 沙俊杰. 钻井液特性对涡轮钻具输出性能影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
SHA Junjie. Research on the influence of drilling fluid characteristics on the output performance of turbodrills[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [7] 胡东风. 普光气田与元坝气田礁滩储层特征的差异性及其成因[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 17-21, 114-115.
HU Dongfeng. Differences in reef-bank reservoir features between Puguang and Yuanba Gas Fields and their reasons[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 17-21, 114-115.
- [8] 魏国齐, 王俊鹏, 曾联波, 等. 克拉苏构造带盐下超深层储层的构造改造作用与油气勘探新发现[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 20-30.
WEI Guoqi, WANG Junpeng, ZENG Lianbo, et al. Structural reworking effects and new exploration discoveries of subsalt ultra-deep reservoirs in the Kelasu tectonic zone[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 20-30.
- [9] 冯定. 涡轮钻具防斜打快钻井理论与技术研究[J]. 石油钻探技术, 2007(3): 9-11.
FENG Ding. Theoretical and technical study of deviation control and fast drilling in turbodrill[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007(3): 9-11.
- [10] 王九龙, 曹聪, 王雅蓉, 等. 涡轮配合孕镶金刚石钻头技术在克深 243 井的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(4): 246-247.
WANG Jiulong, CAO Cong, WANG Yarong, et al. Application of the technology of turbine with impregnated diamond bit in Well Keshen 243[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(4): 246-247.
- [11] 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.
TAN Chunfei. The ROP technical research on turbo-drill composite drilling in deep & ultra-deep well[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [12] 赵宁. 新型涡轮钻具在深井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(3): 40-41.
ZHAO Ning. Application of new turbodrills in deep wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(3): 40-41.
- [13] 董明健, 肖新磊, 边培明. 复合钻井技术在元坝地区陆相地层中的应用[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 38-40.
DONG Mingjian, XIAO Xinlei, BIAN Peiming. Application of compound drilling technology in terrestrial formation in Yuanba Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 38-40.
- [14] 高航献, 瞿佳, 曾鹏羿. 元坝地区钻井提速探索与实践[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 26-29.
GAO Hangxian, QU Jia, ZENG Penghui. Research and practice to improve drilling speed in Yuanba Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 26-29.
- [15] 刘新义, 张东清. 川东北地区探井快速钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(3): 37-40.
LIU Xinyi, ZHANG Dongqing. Rapid drilling technology used in exploratory wells in northeast Sichuan Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(3): 37-40.

(编辑 韩丽丽)