

深井高速涡轮钻配套同径取心技术研究

闫家^{1,2,3}, 梁健^{1,2}, 王文^{1,2}, 王瑜^{3*}, 张凯³,
张恒春^{1,2}, 曹龙龙^{1,2}, 吴纪修^{1,2}, 王志刚^{1,2}

- (1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;
2. 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;
3. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 分析了涡轮钻具结构特征及性能特点, 在深井、特深井的高温高压、强研磨性地层中, 涡轮钻具基本上成为唯一可选的用于复合钻进提速降本井下动力钻具。针对深部资源的勘探开发需求, 阐述了现有涡轮钻具同径取心技术的优势及存在的问题, 利用数值模拟仿真技术分析和研究了涡轮钻具同径取心过程中钻井液的流动状态对取心效果的影响, 认识到涡轮钻具可耐高温, 适于深井、特深井全面钻进及取心钻进, 但其高转速在取心钻进过程也容易造成岩心磨损、岩柱螺旋, 而改善同径取心钻具高速单动性能、加长涡轮钻具螺旋稳定器、利用反螺旋扰流板等技术措施, 有利于减小取心钻具井底的涡动、降低岩心内外管轴向速度差, 从而提高涡轮钻同径取心钻进的岩心质量。

关键词: 特深井; 高温硬岩; 涡轮钻具; 同径取心; 提速降本; 数值模拟; 玛页1井

中图分类号: P634.4; TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0023-08

Research on the same diameter coring drilling technology used by high-speed turbodrill for deep well

YAN Jia^{1,2,3}, LIANG Jian^{1,2}, WANG Wen^{1,2}, WANG Yu^{3*}, ZHANG Kai³,
ZHANG Hengchun^{1,2}, CAO Longlong^{1,2}, WU Jixiu^{1,2}, WANG Zhigang^{1,2}

- (1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
2. Technology Innovation Center for Deep Exploration Drilling Equipment, CGS, Langfang Hebei 065000, China;
3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The structural and performance characteristics of turbodrill are analyzed. In the high-temperature and high-pressure and highly abrasive strata of deep and extra-deep wells, turbodrill has basically become the only alternative downhole dynamic drilling tool to increase speed and reduce costs in composite drilling. In view of the exploration and development requirements of deep resources, the advantages and existing problems of the existing turbodrill core-extraction technology are described. In addition, numerical simulation technology is used to analyze and study the influence of drilling fluid flow state on the coring effect in the process of simultaneous coring with turbodrill. It is recognized that turbodrill can withstand high temperature and is suitable for full drilling and coring in deep and extra-deep wells, but its high rotational speed is also easy to cause core wear and rock column spiral in the process of coring drilling. Improving the high-speed single motion performance of the core-drilling tool, lengthening the spiral stabilizer of the turbodrill and using the reverse spiral spoiler are beneficial to reduce the vortex motion at the bottom of

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-07-05 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.004

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, 河北省廊坊市金光道77号, yj18531665717@163.com。

通信作者: 王瑜, 男, 汉族, 1979年生, 教授, 博士生导师, 主要从事钻探工程领域教学与科研工作, 北京市海淀区学院路29号, wangyu203@cugb.edu.cn。

引用格式: 闫家, 梁健, 王文, 等. 深井高速涡轮钻配套同径取心技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 23-30.

YAN Jia, LIANG Jian, WANG Wen, et al. Research on the same diameter coring drilling technology used by high-speed turbodrill for deep well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 23-30.

the hole and the axial velocity difference between the inner and outer tubes of the core, so as to improve the core quality of the core-drilling tool.

Key words: extra-deep well; high temperature hard rock; turbodrill; simultaneous coring; increase speed and reduce costs; numerical simulation; Maye 1 oil well

0 引言

随着世界各国对能源需求量的日益增加,地表、浅层的各种资源逐渐被开采利用殆尽,全球能源勘探开发、地下探测活动也逐步向地球深部突破。“向地球深部进军”成为保障国家资源安全与供给能力、拓展与优化国土空间、应对自然灾害与国防等国家安全、实现可持续发展的战略选择,是国家战略科技重点发展方向,也是全球科技竞争的热点。在深部勘探领域,所实施的钻井工程依据国家标准将垂深在4500~6000 m的钻井称之为深井,6000~9000 m为超深井,9000 m以上为特超深井^[1]。

钻井越深,面临井温越高、岩石可钻性越差,通常采用转盘驱动的旋转钻进致使井内数千米钻杆柱跟随高速转动极易引发钻杆折断的事故^[2-5],同时钻杆柱与孔壁接触产生的摩阻减小了井口向井底的钻压传递从而降低钻头的碎岩效率。因此,随着钻井深度的增加,钻进系统的耐温性、钻头碎岩效率均需与地层相适应,而“地面转盘+耐高温井下动力钻具”的复合钻进技术可有效实现深井的安全、高效钻进^[6-7]。涡轮钻具作为钻井关键的井下动力钻具之一,具有转速高、横向震动小、耐高温性能好、对油基钻井液不敏感等特点,使其在深井特深井、地热开采等高温环境和坚硬难钻地层中,尤其是在高温硬岩工况条件下,具有独特的优势^[8]。在科学钻探工程中,对深部取心而言耐高温全金属涡轮钻具也逐步成为克服井内高温问题、驱动大口径同径取心钻具实现快速获取岩心的关键技术手段^[9]。

1 深井涡轮钻具钻进技术特点

涡轮钻具是一种轴流式水力机械,其利用一定数量串联在一起的叶轮将钻井液的液压能转化为带动钻头旋转的机械能,此类叶轮也被称为涡轮定、转子,其中定子固定不动、转子可周向旋转,且所有产生能量转换的定转子全部由金属材料铸造而成,提升了其高温应用环境。定、转子均包含有许多叶片,其几何形状及结构特征如图1所示。

由叶栅理论^[10]可知,流体在流过涡轮叶栅对叶

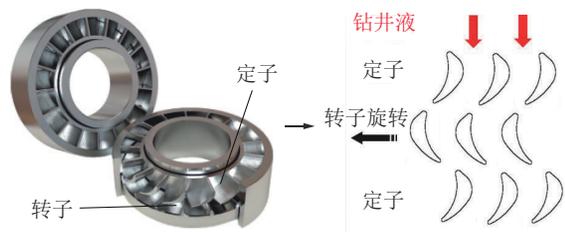


图1 涡轮定、转子

Fig.1 Turbine stator and rotor

片的作用力 F 可表示为:

$$F = Q\rho(C_{1u} - C_{2u}) \quad (1)$$

单级涡轮转子产生的扭矩 M 可表示为:

$$M = Q\rho(C_{1u} - C_{2u})R \quad (2)$$

对于不同叶栅结构的涡轮钻具,涡轮马达的输出转速 n 可表示为:

$$n = \frac{60}{\pi D} C_z (\cot \alpha_1 + \cot \beta_1) \quad (3)$$

式中: Q ——工作排量; ρ ——流体密度; C_{1u} ——转子进口速度的周向分量; C_{2u} ——转子出口速度的周向分量; C_z ——流体轴向的绝对速度; R 、 D ——定、转子计算半径和直径; α_1 ——定子出口液流角,通常 $20^\circ \leq \alpha_1 \leq 90^\circ$; β_1 ——转子进口液流角,通常 $90^\circ \leq \beta_1 \leq 160^\circ$ 。

通过式(1)~(3)可认识到:(1)对于同一涡轮钻具,其实际使用过程中钻井液排量、密度直接影响产生的工作扭矩。(2)在中浅井段,满足相对应井眼尺寸的涡轮钻具的外径尺寸大,工作扭矩大且可实现中低转速;深井、特深井段相对应井眼尺寸小,致使可选用涡轮钻具的转速高、扭矩小等^[11]。

在深井钻进过程中,相比螺杆钻具,全金属结构涡轮钻具在高温地层钻进中不存在橡胶脱落而影响工作性能、使用寿命等问题,且使用成本、寿命及技术成熟度比当前全金属螺杆钻具更具性价比^[12-13]。因此,“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头或高强PDC钻头”(如图2所示)组合在井底高速回转,转盘或顶驱在地面驱动钻杆柱整体低速转动是深井、特深井和高温高压井高效的复合钻进方法。涡轮钻



图2 全金属涡轮钻具+孕镶金刚石钻头或高强PDC钻头

Fig.2 All metal turbodrill + diamond-impregnated bit or high strength PDC bit

具的工作转速通常在200~2000 r/min,此时上部钻杆柱的转速仅需15~60 r/min,起到减少钻具对井壁粘附并使钻压准确传递到井底钻头等作用。近些年,国内深井涡轮钻具钻进技术应用主要区域及所钻层位见表1。工程应用效果突出,例如:塔里木盆地山前井地层是典型的研磨性强、可钻性级值大且井深、井温高,常规钻进方法无法解决机械钻速低、钻头消耗大等问题,对此在该区块的博孜102井康村组4591.00~5294.00 m井段、克深2-1-14井巴什基奇克组6784.00~6947.54 m井段、克深902井巴什基奇克组7824.50~7926.00 m井段分别引用涡轮钻具全面钻进提速技术,提速在1.5~3.0倍以上(见图2b,图3),为国内深井钻进提速提供了借鉴^[14-15],川西须家河组深井应用也非常成功^[16-17]。

2 高速涡轮钻同径取心技术

对地层层序、岩性及储层物化特性等最直接的判定是通过采用钻井取心技术直接获取地下岩心来实现的,尤其是科学钻探对岩心的采取特别重视^[18]。传统小径取心、大径扩孔至目标井眼尺寸的工艺流程复杂且扩孔极易诱发井内事故,因此“同径取心、一径到底”(见图4a)的技术方法应运而生,不仅省掉扩孔钻进而且还增大了单趟岩心采集量,与此同时井底动力复合驱动硬岩取心钻进技术在科钻1井中出现更是开创了一种提高深井硬岩机械钻速、提高井身质量和岩心质量的高效同径取心方法,而全金属涡轮钻具可以在超高温、超高压工况

表1 国内涡轮钻具应用区域与地层

Table 1 Application areas and formations of turbodrill in China

区域	井眼尺寸/mm	主要层位
四川	165.1~406.4	千佛崖组、须家河组、珍珠冲组、马鞍塘组、自流井组、马鞍山组、东岳庙组
新疆 (南、北疆)	149.2~333.4	风城组、百口泉组、哈尔加乌组、鹰山组、二叠系、石炭系、沙湾组、库车组、康村组、沙井子组
青海	149.2~308.0	路乐河组、基岩、大煤沟组、下干柴沟组、侏罗系
东北	165.1~311.2	营城组、登娄库组、沙河子组、火石岭组、雾迷山组、蓝旗组
湖南	215.9	神皇山组、跳马涧组、板溪组

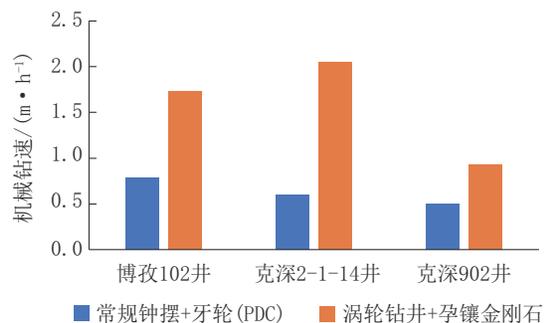


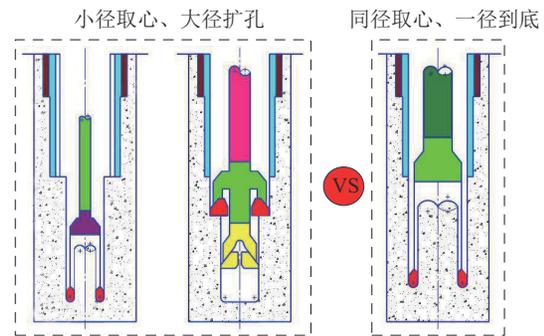
图3 典型难钻地层涡轮钻井提速应用效果

Fig.3 Application effect of turbodrilling in typical difficult-to-drill formations

条件下取代螺杆钻具在井底输出取心钻进回转动力^[18]。与全面钻进不同,同径取心钻进时涡轮钻具驱动的是10~20 m以上的大口径同径取心钻具(如图4b所示)。

在国外,前苏联在科拉半岛超深科学钻探工程中,使用涡轮钻配中空式牙轮钻头进行取心钻进,岩心采取率仅40%左右,岩心外观粗糙,柱状性也不好,这是因为牙轮钻头主要靠振动碎岩且内切削刃粗大造成的。美国卡洪山口科学钻探项目使用涡轮钻进行了2个回次的取心钻进,其与螺杆钻取心钻进的对比数据如表2所列。数据显示,涡轮钻机械钻速提升幅度大,但岩心采取率效果不显著。

在国内,耐高温涡轮钻同径取心技术依托我国实施的最深大陆科学钻探井(松科2井)工程开展了自主研发与实践应用,实现了从无到有的突破。松科2井完钻井深7108.00 m、完钻井温高达241℃。针对该井地温梯度高、连续取心工作任务重的难点,在确定井底动力复合驱动硬岩取心钻进技术为主要提速增效手段后,采用了耐高温涡轮同径取心技术用于深井高温坚硬地层的取心新技术应用,随后全金属涡轮钻取心技术相继在油气勘探井、地热井工程中得到推广应用(如表3所示)。涡轮钻同径取心技术,与邻井段的转盘驱动钻进相比可提高机



(a) 同径取心与传统工艺对比示意



(b) 大口径同径取心钻具及钻头

图4 同径取心工艺及器具

Fig.4 Coring process and apparatus

械钻速2~3倍,同螺杆驱动的同径取心钻进相比提速在1.5倍左右^[19-21]。

表2 国外涡轮钻取心效果数据

Table 2 Coring effect data of turbine drilling in foreign country

钻具	进尺/m	回次数	纯钻时间/h	岩心总长/m	回次进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)	采取率/%	岩性
螺杆钻	56.78	16	52.80	43.43	3.54	1.00	82.65	花岗岩,片麻岩
涡轮钻	3.36	1	0.90	2.68	3.36	3.73	79.76	片麻岩
涡轮钻	0.92	1	0.20	0	0.92	4.60	0	片麻岩

表3 高速涡轮钻取心技术指标

Table 3 Technical specifications of high-speed turbine drilling

井号	地层	井径/mm	井段/mm	进尺/m	回次进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
松科2井	沉积岩	311.2	2860.01~4542.24	22.63	5.66	0.45
		215.9	5028.12~5890.40	93.46	6.68	0.90
		152.4	6117.39~7102.32	17.24	5.76	0.80
漳热1井	花岗岩	152.4	2812.01~2968.88	4.60	2.30	0.72
共和1井	花岗岩	152.4	2156.93~2276.00	5.78	2.89	1.51
玛页1井	花岗岩	215.9	5012.34~5031.11	18.77	9.39	1.39

涡轮钻同径取心技术在深井特深井取心钻进的提速效果、耐温性得到有效验证的同时,也反映出常规结构的同径取心钻具(图5)与涡轮钻具配合

时容易造成岩心局部对磨损耗、岩心柱呈螺旋状、岩心内管内壁结泥垢而泥包岩心等问题(参见图6)。分析主要原因:(1)涡轮钻具输出转速高,相比

直接驱动短尺寸钻头,对长尺寸的取心钻具管柱造成的扰动大,难以确保同轴度;(2)钻井液流经涡轮

钻具进入取心钻具后,在岩心外管与内管之间也存在高速周向转动。

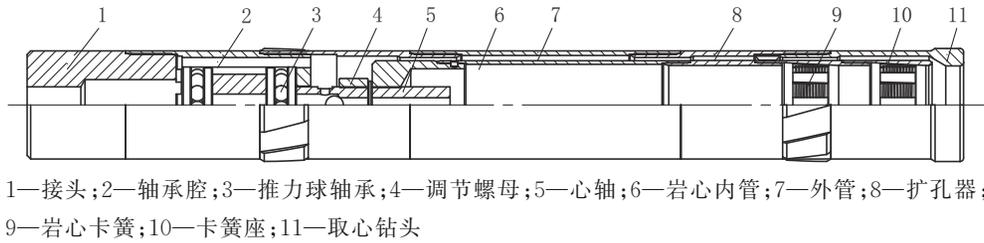


图5 同径取心钻具结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of core-drilling tool structure



(a) 岩心对磨



(b) 岩心螺旋状



(c) 取心内管内壁结泥垢

图6 涡轮钻同径取心的岩心

Fig.6 Turbo drilling with core extraction

3 取心钻具工作形态数值模拟分析

深部井段涡轮钻同径取心技术中大长度的取心钻具受力状态及钻井液形态都会影响所获岩心的质量,以松科2井超7100 m超深井段对应 $\varnothing 152.4$ mm井眼所用 $\varnothing 127$ mm全金属涡轮钻具驱动10 m长的 $\varnothing 140$ mm型同径取心为工程案例,利用数值模拟仿真技术对取心钻具钻进过程形态进行分析。

3.1 模型简化及边界条件设置

依据同径取心钻具结构特点,分析模型简化为两根同轴管,岩心外管(含钻头)部分为外总成,外径尺寸为140 mm,钻具岩心管内管及卡簧等为内总成,内总成外径尺寸为108 mm,简化模型长度为4700 mm。其他参数设置依据松科2井五开($\varnothing 152$

mm井眼)实际,其中 $\varnothing 127$ mm全金属涡轮钻具正常工作转速范围200~2000 r/min,钻井液排量范围为10~15 L/s,钻压范围20~50 kN;钻井液性能参数:密度1.44 g/cm³,粘度42 mPa·s,含砂量0.5%。分析过程暂不考虑多相状态。

3.2 取心钻具动力学仿真分析

分析整根取心钻具在高速驱动下动力学状态,取心钻具分析中取心工具外管跟随井底高速涡轮钻具转速转动,设置以涡轮钻空载状态时的转速2000 r/min,钻压为30 kN,管材实际所用材质为42CrMo,只释放旋转自由度、其余运动方向约束。图7所示为取心工具变形图,从图中可以看出取心工具在反扭矩的作用下应力集中区呈现明显的螺旋形状,并且在高转速条件下取心工具也发生了明显的螺旋变形,从而导致取出的岩心也呈现螺旋形态。同时取心工具外管变形也会增强内外管环空内钻井液的扰动性,导致内管发生摆动,使岩心承受偏载影响取心质量。

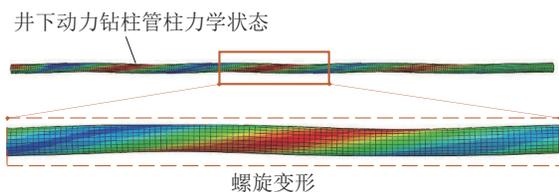


图7 高转速状体取心钻具形态

Fig.7 Shape of high speed core drilling tool

3.3 取心内外管环空流场分析

对高速状态下,取心钻具内外管间钻井液流场进行分析;以涡轮钻具额定工作钻井液排量12 L/min为分析值,根据 $\varnothing 127$ mm涡轮钻具设计性能,井底钻压在20~30 kN时,涡轮钻具带动取心钻具

外筒的转速约为 600~1200 r/min,故此分析中将取心外筒转速设置为 900 r/min,将取心内管释放旋转自由度。图 8 所示为横截面速度云图和钻井液流程图,在涡轮钻具高速旋转的驱动下,外管带动钻井液出现明显的旋流现象,在钻井液粘滞力的作用下,如果取心外管因装配产生偏心或单动性能不满足岩心内管防转动效果,很容易导致取心内管形成螺旋摆动影响岩心质量,甚至因载荷偏载较大导致岩心发生断裂。

综上,在取心工具外管变形和钻井液旋流的耦合作用下,取心外管会发生明显的摆动现象。为此,约束取心外管的横向摆动,并尽可能提高单动

机构单动性能以提升岩心内管静态不转动效果,可有效减小岩心所受的偏载以提高取心质量。

4 高速取心钻具的研制

从现有同径取心钻具配套涡轮钻实施取心作业的效果以及数值模拟仿真分析可以看出,当前同径取心钻具的结构型式与涡轮钻具高转速特性存在不相适应的问题。因此,有必要提升长筒取心钻具与涡轮钻具同轴旋转稳定性;提升取心钻具岩心管内总成与外管总成在取心钻进过程中的同轴度;提高单动双管同径取心钻具的单动性能以适配岩心外、内管的转速差,确保岩心内管不跟动或低速跟动,从而降低岩心磨损。

针对以上问题,研制了带圆弧滚道轴承的单动机构,该机构所用推力轴承与涡轮钻具支承节配套使用的圆弧滚道轴承结构相同、作用原理一致,具有高转速、高同轴度、耐冲击的特性;利用耐高速岩心内管扶正环,增强岩心管居中性;改进深井涡轮钻同径取心工艺,在取心涡轮钻具支承节壳体下端增设螺旋扶正机构,减小高速状态下取心钻具的甩动。解决了原取心钻具内外管不同心,存在偏心距 P_n 以及取心钻具外管与井眼同轴度差,同样有偏心距 P_w 等问题,两者偏心距累积在钻具高速状态下造成涡动现象明显。配套高速涡轮的高速同径取心钻具从结构角度提高了岩心管、取心钻具的同轴度,从而利于岩心保直(如图 9 所示)。

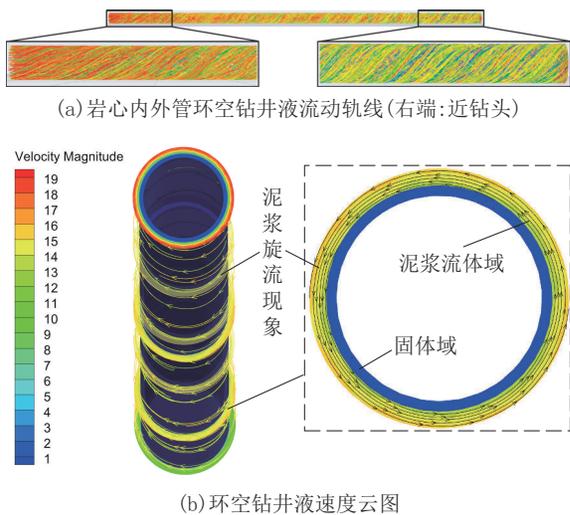


图 8 高速驱动取心钻具环空流场
Fig.8 Annulus flow field of high speed driving core drill

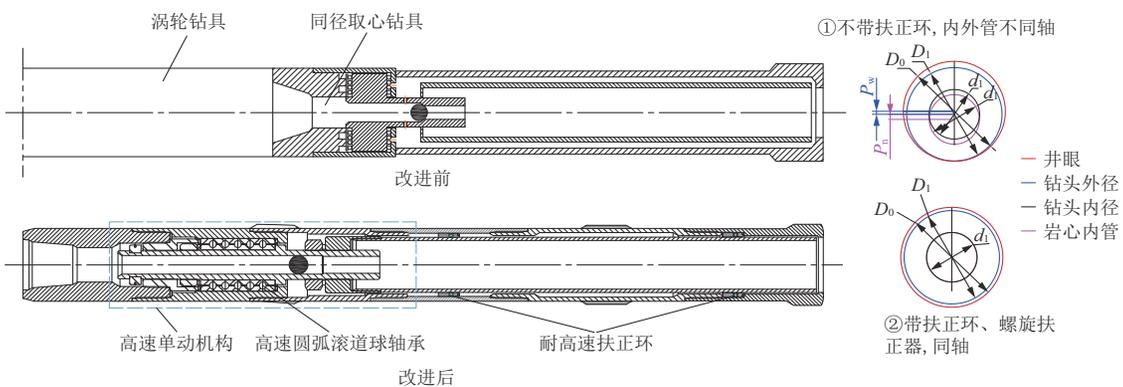


图 9 高速同径取心钻具结构
Fig.9 Structure of high-speed core drilling tools

5 工程应用

结合上述分析,对深井涡轮钻配套高速同径取

心钻具进行优化设计与试制,形成的样机(如图 10 所示)成功为新疆克拉玛依玛湖区块玛页 1 井提供

了高速的取心技术支撑^[20]。具体实施措施:井眼尺寸 $\varnothing 215.9$ mm,取心钻具组合“ $\varnothing 215.9$ mm孕镶金刚石钻头(电镀)+KT194型同径取心钻具(高速)+ $\varnothing 177$ mm单节涡轮钻具”,应用井段5012.34~5031.11 m,钻进参数:钻压30~50 kN,顶驱转速20 r/min,涡轮钻具工作转速600 r/min,工作排量20~25 L/s。在玛页1井中取心层位为风城组深灰色泥质云质岩,岩性硬度大、研磨性强,涡轮钻高速同径取心2个回次,进尺18.77 m、钻速1.39 m/h,岩心直径124 mm,采取率100%,改善了岩心成螺旋状、磨损等消耗,提升了取心速度及采取率,岩样如图11所示。

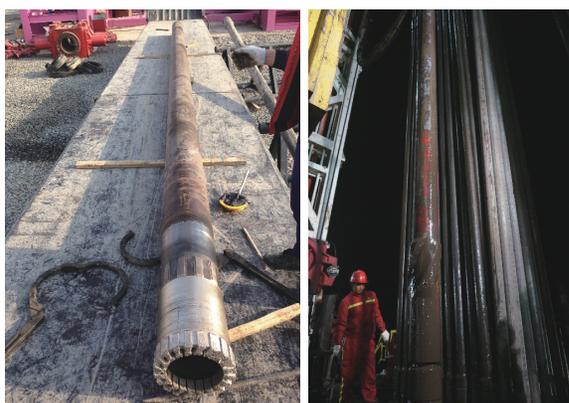


图10 玛页1井取心应用

Fig.10 Used in Maye 1 oil drilling well



图11 获取的岩心质量

Fig.11 The quality of the core obtained

6 结论及建议

(1)随着深部资源勘探的迫切需要,深井、特深井钻探工作量急剧增长,耐高温涡轮钻具成为高温高压、坚硬地层等的全面钻进和取心钻进提速降本

的关键技术手段。

(2)涡轮钻具的高转速特性有利于配合孕镶金刚石钻头进行高速磨削碎岩,但连接长筒同径取心钻具时过高的转速不仅容易造成取心筒涡动强烈,同时使得流经取心外管和内管间的钻井液也是高速螺旋旋转,在机械扰动及流体力学的交变影响下使得岩心块对磨、岩心柱呈螺旋状。

(3)用于取心钻进的涡轮钻具需在支承节处增加或加长螺旋稳定器,并在取心钻具内管外壁增设多处扶正环,以降低连接的长筒取心钻具涡动效应;同时利用高速推力轴承改善取心钻具内外管间的单动性能,有利于降低岩心管内破碎岩块的对磨。

参考文献(References):

- [1] 苏义脑,路保平,刘岩生,等.中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J].石油钻采工艺,2020,42(5):527-542.
SU Yi'nao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020,42(5):527-542.
- [2] 梁健.科学超深井铝合金钻杆优化设计与腐蚀防护工艺[D].北京:中国地质大学(北京),2021. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000051.
LIANG Jian. Optimization design and corrosion protection technology of aluminum alloy drill pipe in scientific ultra-deep wells [D]. Beijing: China university of geosciences (Beijing), 2021. DOI: 10.27493/, nkidc. Gzdzy. 2021.000051.
- [3] 张运东,方辉,刘帅奇,等.深地油气勘探开发技术发展现状与趋势[J].世界石油工业,2023,30(6):12-20.
ZHANG Yundong, FANG Hui, LIU Shuaiqi, et al. Process and development direction of deep oil and gas exploration and development[J]. World Petroleum Industry, 2023,30(6):12-20.
- [4] 罗鸣,冯永存,桂云,等.高温高压钻井关键技术发展现状及展望[J].石油科学通报,2021,6(2):228-244.
LUO Ming, FENG Yongcun, GUI Yun, et al. Development status and prospect of key technologies for high temperature and high pressure drilling[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(2):228-244.
- [5] 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.
- [6] 刘占魁.深井涡轮钻具复合钻进技术应用[J].西部钻探工程,2012,24(6):64-69.
LIU Zhankui. Application of deep well turbo-drill combined drilling technology[J]. West-China Exploration Engineering, 2012, 24(6):64-69.
- [7] 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.
- [8] 管峰, 万锋, 吴永胜, 等. 涡轮钻具研究现状[J]. *石油机械*, 2021, 49(10):1-6.
- GUAN Feng, WAN Feng, WU Yongsheng, et al. Research status of turbodrill [J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(10):1-6.
- [9] 朱永宜, 王稳石, 张恒春, 等. 我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J]. *地质学报*, 2018, 92(10):1971-1984.
- ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Implementation overview of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and technical system of core boring [J]. *Acta Geological Sinica*, 2018, 92(10):1971-1984.
- [10] 万邦烈, 李继志. *石油工程流体机械*[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- WAN Banglie, LI Jizhi. *Petroleum Engineering Fluid Machinery*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [11] 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. Songke 2 well was drilled with turbodrill core [J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(1):31-34.
- [12] 张伟, 王瑜, 张凯, 等. 井下全金属非圆齿轮动力钻具设计与可行性研究[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(1):154-161.
- ZHANG Wei, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Design and feasibility study of downhole all-metal non-circular gear power drilling tools [J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(1):154-161.
- [13] 王树超, 王维韬, 雨松. 塔里木山前井涡轮配合孕镶金刚石钻头钻井提速技术[J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(2):156-159.
- WANG Shuchao, WANG Weitao, YU Song. Combination of turbodrill and impregnated diamond bit to enhance ROP in drilling of wells in piedmont zone, Tarim Basin [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(2):156-159.
- [14] 王学龙, 何选蓬, 刘先锋, 等. 塔里木克深9气田复杂超深井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1):15-20.
- WANG Xuelong, HE Xuanpeng, LIU Xianfeng, et al. Key drilling technologies for complex ultra-deep wells in the Tarim Keshen 9 gas field [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1):15-20.
- [15] 代锋, 曾桂元, 李林, 等. 元坝高研磨性地层提速提效集成钻井技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(4):27-30.
- DAI Feng, ZENG Guiyuan, LI Lin, et al. Efficient drilling technology for high abrasive formation in Yuanba region [J]. *Exploration Engineering (Rock & Solid Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(4):27-30.
- [16] 朱传云, 颜果云, 王兴忠, 等. 川西涡轮钻井复杂情况分析 with 预防技术[J]. *西部探矿工程*, 2017, 29(1):35-37.
- ZHU Chuanyun, YAN Guoyun, WANG Xingzhong, et al. Complicated situation analysis and prevention technology of turbo-drilling in western Sichuan [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2017, 29(1):35-37.
- [17] 胡家森, 刘秋霞, 乔立伟, 等. 涡轮钻井技术在四川元坝区块的应用分析[J]. *石油矿场机械*, 2015, 44(5):86-92.
- HU Jiasen, LIU Qiuxia, QIAO Liwei, et al. Analysis of trubo drilling technology applied in Sichuan Guangyuan block [J]. *Oil Field Equipment*, 2015, 44(5):86-92.
- [18] 张金昌, 谢文卫. 科学钻探超深井国内外技术现状[J]. *地质学报*, 2010, 84(6):887-894.
- ZHANG Jinchang, XIE Wenwei. Status of scientific drilling technology for ultra-deep well [J]. *Acta Geological Sinica*, 2010, 84(6):887-894.
- [19] 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, 33(S1):217-220.
- YAN Jia, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Field test of turbine core drilling in Well Songke 2 [J]. *Exploration Engineering (Rock & Solid Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(S1):217-220.
- [20] 曹龙龙, 张恒春, 王稳石, 等. 准噶尔盆地玛页1井长筒取心技术[J]. *钻探工程*, 2022, 49(5):94-99.
- CAO Longlong, ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, et al. Long barrel coring technology for Well Maye-1 in Junggar Basin [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(5):94-99.
- [21] 谭现锋, 马哲民, 段隆臣, 等. 复合动力钻进工艺在干热岩钻井中的应用研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(7):1-8.
- TAN Xianfeng, MA Zhemin, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(7):1-8.

(编辑 荐华)