

地热定向井高效PDC钻头研制与应用

张朋, 马少明, 居培

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:为解决天津东丽区块地热定向井施工效率偏低的技术问题,针对该区块的地层特性开展了高效PDC钻头定制化研发。通过优化设计钻头剖面结构和布齿密度,结合仿真分析与室内试验,对比三棱齿和平面齿的破岩受力特征及应力分布规律,优选三棱齿作为主切削齿;采用UG-CAM五轴加工与等离子自动焊接复合加工工艺,保障钻头加工精度与耐磨性能。现场应用数据表明,新研发的PDC钻头在DL-93地热定向井中累计进尺460.58 m,平均机械钻速达3.68 m/h,较邻井常规PDC钻头提升41%,可满足该地区地热定向井高效钻进需求。

关键词:地热定向井;PDC钻头;结构优化;切削齿优选;三棱齿;高效钻进;机械钻速

中图分类号:TE921;P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)05-0161-08

Development and application of high-efficiency PDC bit for geothermal directional wells

ZHANG Peng, MA Shaoming, JU Pei

(CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shanxi 710077, China)

Abstract: To address the technical problem of low construction efficiency of geothermal directional wells in the Dongli Block of Tianjin, customized research and development of high-efficiency PDC drill bits was carried out targeting the formation characteristics of this block. By optimizing the drill bit profile structure and tooth arrangement density, combined with simulation analysis and laboratory tests, the rock-breaking force characteristics and stress distribution laws of triangular prism cutter and plane cutter were compared, as a result, the triangular prism cutter were selected as the main cutters. A composite processing technology integrating UG-CAM five-axis machining and plasma automatic welding was adopted to ensure the machining accuracy and wear resistance of the drill bit. Field application data show that the newly developed PDC bit achieved a total footage of 460.58m in the DL-93 geothermal directional well, with an average rate of penetration (ROP) of 3.68m/h, which is 41% higher than that of the conventional PDC drill bits in adjacent wells, meeting the requirements for efficient drilling of geothermal directional wells in this area.

Key words: geothermal directional wells; PDC drill bit; structural optimization; cutting tooth selection; triangular prism cutter; high-efficiency drilling; rate of penetration (ROP)

0 引言

天津地区属于典型的沉积盆地型地热区,地热资源丰富且开发潜力巨大^[1-4]。近年来,随着地热清洁能源规模化开发的力度逐年增大,工程建设对地热井施工周期要求更加严格,地热井钻进效率低是制约施工进度的突出问题之一。目前地热井施工

用钻头已经由最初的硬质合金钻头逐步迭代为牙轮钻头,初步解决了硬质合金钻头在中硬及以上地层碎岩能力不足的难题,但牙轮钻头在中硬及以上地层钻进效率低的问题没有得到明显改善。所以,研发适配区域地层特性的高效钻头,是提升地热井施工效率、缩短施工周期的关键技术路径。

收稿日期:2026-01-30;修回日期:2026-03-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.05.018

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目“复杂曲面螺旋激光相变控制机理研究”(编号:2025JC-YBQN-368)

第一作者:张朋,男,汉族,1987年生,高级工程师,地质工程专业,从事矿用钻探机具研发推广工作,陕西省西安市高新区锦业一路82号, zhangpeng1@cctegxian.com。

引用格式:张朋,马少明,居培.地热定向井高效PDC钻头研制与应用[J].钻探工程,2026,53(5):161-168.

ZHANG Peng, MA Shaoming, JU Pei. Development and application of high-efficiency PDC bit for geothermal directional wells[J]. Drilling Engineering, 2026,53(5):161-168.

为解决这一技术问题,研究人员开展了系列探索及大量研究工作,比如开发加强型镶齿设计技术以提升钻齿抗冲击性、开发牙轮-PDC复合钻头技术以兼顾碎岩效率与稳定性等^[5-7],钻头性能得到提升,但受限于地层适应性等因素并未进行大范围推广应用。本文针对天津东丽区块以灰色泥页岩、深灰色含砾砂岩及白云岩为主的复杂地层条件,结合地热定向井对钻头导向性、耐磨性与碎岩效率的协同需求,开展了高效PDC钻头定制化研发,以提升地热井的钻进效率,缩短地热井施工周期。

1 地热定向井高效钻进施工难点

东丽区块地热定向井施工兼具地层复杂性与定向钻进工艺特殊性,高效钻进面临一些技术难点。该区块钻遇地层多变,从新生界泥岩、砂岩互层到古生界白云质灰岩再到中、新元古界白云岩、含砾砂岩、硅质胶结石英砂岩,硬岩地层占比高且存在软硬夹层交互的情况,岩石研磨性强、可钻性差,常规钻头在该区块钻进施工时机械钻速普遍偏低。同时区块内泥页岩地层遇水后易发生水化膨胀,导致钻头泥包、岩屑不易排出等问题,降低钻进效率的同时还易发生憋泵、卡钻等钻进事故,这对钻头的设计提出更高要求。此外,定向井对钻进导向性要求高,要求钻头具备优异碎岩能力的同时,也要保证钻进过程的稳定性,普通硬质合金钻头和牙轮钻头因结构、材质的适配性不足,很难满足该区块地热井稳定高效钻进施工需求,制约施工效率。

2 PDC钻头研制

2.1 PDC钻头结构设计

2.1.1 冠部剖面设计

通常PDC钻头的冠部形状有平底型、浅锥型、中锥型以及长锥型^[8],如图1所示。不同的冠部形状工作特性存在着明显差异,其适用的地层也不同。其中平底型与浅锥型钻头稳定性和耐磨性相对较差,但单个切削齿受力大,机械钻速相对较快;中锥型钻头内锥设计提高了钻头的稳定性,外锥剖面可布置较多切削齿,保证了钻头的均匀磨损,比较适用于钻进具有硬夹层的地层;长锥型钻头具有较长的外锥,可布置更多的切削齿,提高外锥区域的耐磨性。

东丽区块三开井段地层主要以灰色泥页岩、深

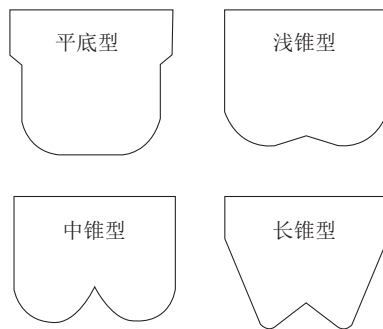


图1 PDC钻头冠部形状分类

Fig.1 Classification of the PDC bit crown shape

灰色含砾砂岩及白云岩为主,为兼顾钻进效率与定向稳定性,PDC钻头选取了浅锥型剖面形状。内锥角的变化可以改变钻头中心部位未破碎岩石的凸体形状,进而控制钻头的稳定性和导向性。内锥深度越大,内锥面与岩石的接触面积越大,钻头的稳定性越高,但相应的造斜能力就会下降,同时过大内锥角还影响着钻头中心部位切削齿的安放,所以为了适应地热定向钻井的施工,该钻头内锥角度控制在 $130^{\circ}\sim 140^{\circ}$,冠部形状如图2所示。

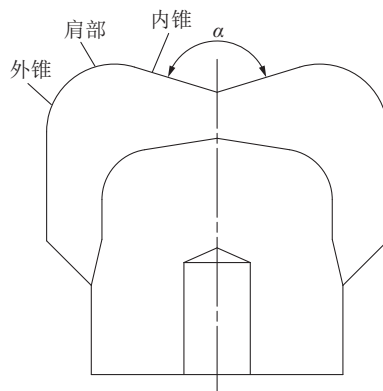


图2 PDC钻头冠部形状示意

Fig.2 Schematic diagram of the PDC bit crown shape

2.1.2 切削齿布齿设计

2.1.2.1 切削齿位置排布

PDC钻头切削齿的位置排布主要包括径向布置和周向布置,径向布置是在钻头半径平面内沿轮廓外形布置切削齿,得到的结果是径向布齿图,反映了切削齿在钻头径向上的布置或者在井底半径方向的覆盖情况;周向布置是在垂直于钻头轴线的平面内按一定方式布置切削齿,得到的结果是周向布置图,反映了切削齿在钻头平面上布置方位情况。

从钻头设计角度出发,钻头设计时始终遵循“易于布齿、便于加工、保证质量、提高效率”的基本原则。理论上钻头的布齿设计原理包括等切削、等磨损、等功率等几种原理^[9-12]。本文基于等切削原理进行钻头布齿,具体设计参数为:钻头冠部半径107 mm,冠部轮廓弧长153 mm,布齿密度系数2.6,主切削齿规格1910,副切削齿规格1308,切削齿总数量31。根据等切削原理总结的钻头径向布齿公式为:

$$R_{c_{i+1}} = \frac{R_{c_i}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{R_{c_i}^2 + \frac{8r_0 r_c}{f_d}} \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (1)$$

$$f_d \approx \frac{2(N-1)r_c}{L_c} \quad (2)$$

式中: R_{c_i} 、 $R_{c_{i+1}}$ ——第*i*、*i*+1个切削齿中心在钻头上的半径,mm; r_0 ——冠部半径,mm; r_c ——切削齿半径,mm; f_d ——布齿密度系数; N ——切削齿数量; L_c ——冠部轮廓弧长,mm。

最终确定的钻头切削齿布齿情况如图3所示。

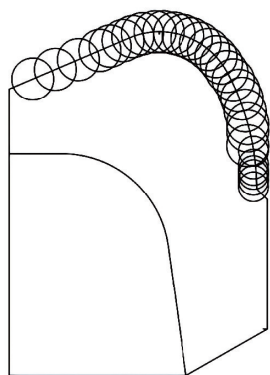


图3 钻头布齿

Fig.3 Tooth arrangement

2.1.2.2 切削角设计

PDC钻头的切削角由齿前切削角和周向侧转角共同决定。钻头在正常钻进碎岩过程中,齿前切削角的主要作用是保护切削齿,延长钻头寿命。切削角的大小根据所钻地层的软硬程度进行适当调整,一般情况下岩石硬度越硬,选取的切削角越大,相应的钻头攻击性越弱。根据东丽区块的地层条件,此次钻头的齿前切削角取 $16^\circ \sim 20^\circ$ 。周向侧转角的主要作用是提升岩屑的转运速度,能有效解决泥岩、页岩等黏滑地层钻头泥包的问题,参照钻头

设计经验,钻头的周向侧转角取 $5^\circ \sim 8^\circ$ 。

2.2 切削齿优选

为了确保钻头的应用效果,对钻头的核心材料PDC切削齿进行优选。目前切削齿材料组分、加工工艺、优化金刚石层与硬质合金基体的界面结构等方面的研究成果已经在PDC切削齿成熟应用。近年来,研究人员开始致力于通过创新PDC切削齿的结构形状^[13-18],来改善切削齿的受力状态,提高其力学性能、使用寿命以及碎岩效率。本文对比了三棱齿与常规平面结构切削齿的碎岩受力情况,进行了离散元仿真分析和微钻试验验证。

2.2.1 破岩仿真分析

设定岩石实体模型尺寸为 $100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,对岩石采用四面体网格进行离散,网格尺寸设定为0.5 mm,对岩石中间破碎区域进行网格细化,中间破碎区网格尺寸为0.1 mm,PDC切削齿尺寸为 $\varnothing 16 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$,设置PDC齿吃入岩石深度为3 mm,切削齿的切削角度为 -15° ,设定岩石为全固定,切削齿碎岩移动速度为50 m/h。仿真结果显示,常规平面PDC切削齿上应力主要分布于切削齿与岩石接触切削刃边缘附近,最大应力集中于切削刃最下端以及切削刃与岩石接触两侧顶端部位;三棱齿PDC切削齿应力主要集中分布于最下端棱脊上,且由棱脊向两侧偏楔面扩散分布,如图4、图5所示,最大受力如表1所示。

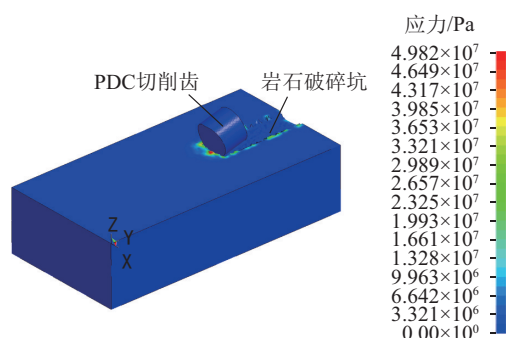


图4 PDC切削齿作用下岩石表面应力云图

Fig.4 Stress cloud diagram of the rock surface under the force of PDC cutters

受力参数显示:三棱齿切削岩层时所受切削力、轴向力和侧向力均较小,均显著低于平面齿,从而破岩更省力、切削更稳定,为了验证仿真结果,进行室内试验验证。

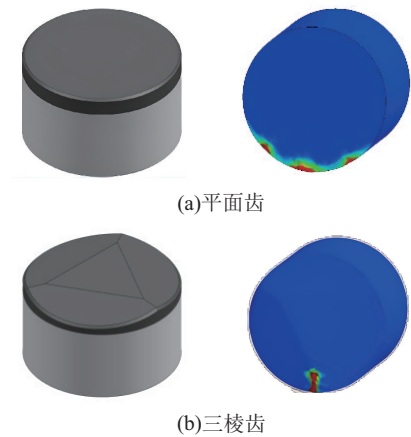


图5 PDC切削齿应力云图

Fig.5 Stress cloud of PDC cutters

表1 切削齿受力参数

Table 1 Force parameters of PDC cutters

类型	切削力 F_1/N	轴向力 F_2/N	侧向力 F_3/N
平面齿	914.85	953.68	65.96
三棱齿	695.34	797.33	5.93

2.2.2 室内微钻实验

试验平台主要由主机、液压控制和参数控制等系统组成^[19]。其中主机系统包括钻机的回转与给进装置、岩样装载装置、泥浆池等,液压控制系统包括电机、液压泵、油箱等,参数控制系统包括传感器、控制阀、仪表等,其中传感器安装在主机位置,控制阀和仪表安装在控制柜。试验平台总体布局如图6所示。

为配合试验钻进平台开展模拟钻进试验,设计采用 $\varnothing 32\text{ mm}$ 两翼型小尺寸PDC钻头作为试验钻头,

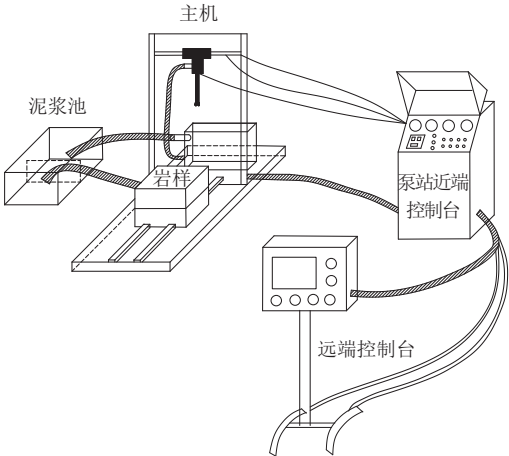


图6 试验平台总体布局示意

Fig.6 Schematic diagram of the overall layout of the test platform

钻头为两翼对称结构,中心设计有贯通式水眼,尾部设计连接螺纹与钻杆连接,钻头结构如图7所示。



图7 试验钻头实物

Fig.7 Physical object of the test drill bit

试验岩样选用尺寸为 $350\text{ mm} \times 350\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 的天然花岗岩,其物理性能稳定,结构致密,抗压强度高,吸水率低,表面硬度大,岩样如图8所示,其物理性能如表2所示。



图8 试验用岩石样品

Fig.8 Rock samples for testing

表2 花岗岩物理性能参数

Table 2 Physical performance parameters of granite

参 数	数 值
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2.89×10^3
抗压强度/ $(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$	2×10^3
弹性模量/ $(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.33×10^6
吸水率/%	0.13
肖氏硬度/HS	>70
相对密度	2.65

结合微钻试验平台钻进能力,为充分对比2种切削齿的碎岩效果,试验设定钻进转速 120 r/min ,

泵量 20 L/min, 钻压 2 kN 和 2.5 kN, 对比不同钻压下试验效果。试验平台见图 9、试验数据见图 10。



图 9 电液微钻试验平台

Fig.9 Electro-hydraulic microdrilling test platform

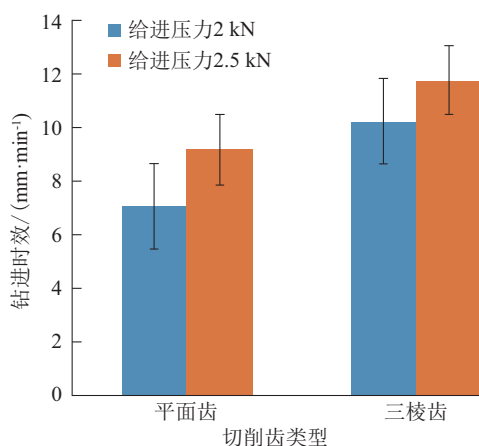


图 10 转速为 120 r/min 时钻进时效对比

Fig.10 Comparison of drilling aging at 120 r/min

微钻试验数据进一步验证了在同样转速条件下三棱齿的钻进时效较平面齿快, 试验结果与模拟仿真情况一致。因此为提高 PDC 钻头切削效率, 选用三棱齿作为钻头主切削齿。

2.3 钻头加工工艺研究

随着三维设计软件的快速发展及广泛应用, 钻头的加工工艺也在变化, 带有复杂曲面的钻头在采用传统加工方法时很难达到预期精度, 有时甚至无法加工。本文采用 UG-CAM 技术^[20-21]与五轴加工中心平台相结合的钻头加工工艺, 工艺流程如图 11 所示, 该工艺提高了钻头体的加工精度, 齿窝精度可以控制在 0.02 mm 范围以内, 大大提升了加工效率。

为了提升钢体式 PDC 钻头的表面耐磨性和硬度, 增强钻头抗冲击和抗冲蚀能力, 往往在钻头钢体刀翼外表面焊接一层耐磨层^[22-23], 如图 12 所示。

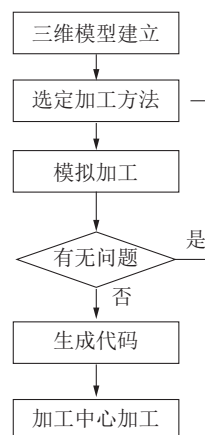


图 11 钻头钢体加工流程

Fig.11 Flow chart of bit steel processing

目前钻头耐磨层的焊接多由人工完成, 受复杂曲面和空间位置影响, 人工焊接时难以保证耐磨层厚度的一致性, 同时焊接点温度也很难得到精准控制, 此次钻头的加工引入了机器人自动焊接技术, 通过智能控制系统实现焊接粉末、焊枪、加热系统等的协同精准配合, 并且根据焊接钻头的不同类型, 编制对应的数控程序, 确保焊枪运动轨迹与钻头曲面保持一致。焊接工艺参数如表 3 所示。

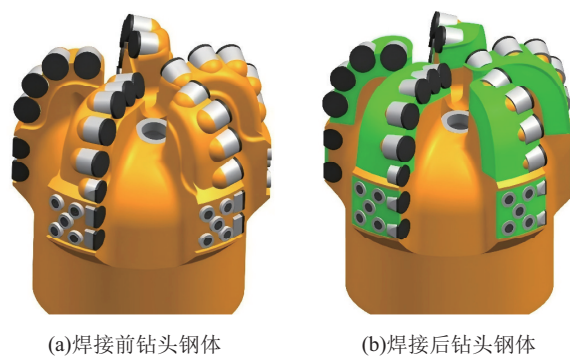


图 12 耐磨层焊接示意

Fig.12 Welding diagram of wear-resistant layer

表 3 机器人自动焊接工艺参数

Table 3 Process parameters of robot automatic welding

类 别	参数值
焊接电流 I/A	140~170
焊接速度 $V_1/(cm \cdot min^{-1})$	25~30
步进量 S/mm	4
离子气流 $V_2/(L \cdot min^{-1})$	1.5~2.5
保护气流 $V_3/(L \cdot min^{-1})$	15

3 现场应用

3.1 地质条件

此次施工共设计2口蓟县系雾迷山组地热勘探井,分别为开采井和回灌井。其中开采井为定向井(DL-93井),回灌井为直井,2口井井口距离约5 m,

井底水平投影距离约550 m。定向井井深2470 m,钻遇地层情况如表4所示。其中雾迷山组穿插有石英岩脉的白云岩,研磨性强、可钻性差,常规钻头在该地层钻进施工时机械钻速普遍偏低,影响钻井施工进度。

表 4 DL-93井钻遇地层预测
Table 4 Drilling formations prediction of DL-93 well

地 层	预测层深 H/m	岩 性 描 述
新生界	第四系	330 主要为土黄、浅灰色黏土
	新近系明化镇组	1350 灰白色砂岩与棕红色泥岩呈不等厚互层
	新近系馆陶组	灰黄、浅灰色中粗含砾砂岩夹灰色泥岩
古生界	石炭一二叠系	1400 深灰色泥岩与深灰色含砾、砂岩互层,砾石成分以燧石为主
	奥陶系	以灰褐色白云质灰岩、灰岩、白云岩为主
	寒武系	1800 灰黑色泥岩,褐色页岩、鲕状灰岩为主
元古界	青白口系	2100 灰色石英砂岩为主,硅质胶结
	蓟县系雾迷山组	2600 灰色白云岩为主,穿插有石英岩脉

3.2 井身结构设计

定向钻井设计垂深2600 m,井深2740 m,方位角345°,最大井斜角26°,四开钻进,裸眼完井,结构设计方案如表5所示,井身结构设计见图13。

表 5 DL-93井井身结构设计方案
Table 5 Well structure design of DL-93

钻头直径/ mm	垂深 $H_1/$ m	斜深 $H_2/$ m	套管直径/ mm	套管下深 H_3/m
444.5	450	450	339.7	450
311.2	1350	1425	244.5	1425
215.9	2100	2230	177.8	2230
152.4	2600	2740	裸眼完井	

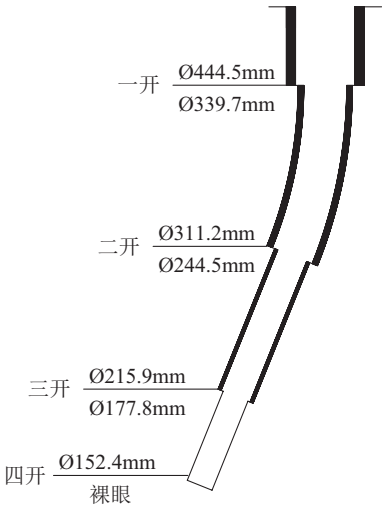


图 13 井身结构示意图

Fig.13 Schematic diagram of well structure

3.3 试验设备及钻具组合

试验现场选用的钻机为兰石 ZJ40J 型钻机,钻机最大钩载2250 kN,绞车功率735 kW,配套泥浆泵功率969 kW,施工钻具组合如表6所示。

3.4 试验效果分析

此次试验用的Ø215.9 mm钢体式PDC钻头在DL-93井施工,施工钻压50 kN,转盘转速40 r/min,泵压7.8 MPa,排量30 L/s,泥浆密度1.09 g/cm³,黏度34 s,试验钻进过程中,钻头施工造斜段造斜率为0.84°/30 m,符合造斜率0.8°~0.9°/30 m的设计要求,钻井轨迹偏差能控制在0.5°以内,定向造斜响应准确及时,钻头导向性良好,能够很好地满足地热

井定向钻进施工。钻头在DL-93井1324.73 m时入井试验,井深1785.31 m时提钻。累计进尺460.58 m,纯钻时间为125.17 h,机械钻速为3.68 m/h,最快机械钻速8.33 m/h。试验数据如表7所示。

试验井与邻井同属于东丽区块,相隔距离近,钻遇地层岩性、钻井工况基本一致。由表7可见新设计的钻头平均机械钻速达3.68 m/h,最快钻速8.33 m/h,较邻井同工况下常规PDC钻头提高41%,较区内同井段牙轮钻头机械钻速提高3倍以上,钻进460.58 m后,钻头新度保持在85%以上,仅钻头切削

表 6 DL-93 井施工钻具组合
Table 6 Bottom hole assembly of DL-93 well

井 段	钻 具 组 合
一开	Ø444.5 mm 钻头+Ø203 mm 钻铤+Ø159 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆
二开	Ø311.2 mm 钻头+Ø197 mm 1.5°单弯螺杆钻具+球型扶正器+Ø203 mm 无磁钻铤+Ø203 mm 钻铤+Ø159 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆
三开	造斜段 Ø215.9 mm 钻头+Ø172 mm 1.25°单弯螺杆钻具+Ø159 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆
	稳斜段 Ø215.9 mm 钻头+Ø159 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆
四开	Ø152.4 mm 钻头+Ø121 mm 钻铤+Ø89 mm 钻杆+Ø127 mm 钻杆

表 7 DL-93 井钻头试验数据
Table 7 Drill bit test data of DL-93 well

井号	钻头类型	试验初始深度 H_1/m	试验终止深度 H_2/m	总进尺深 H_3/m	平均机械钻速 $V_1/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	最快钻速 $V_2/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$
DL-93	试验 PDC 钻头	1324.73	1785.31	460.58	3.68	8.33
DL-93	牙轮钻头	/	/	/	0.85	/
邻井	PDC 钻头	1135.4	1542.3	406.9	2.60	4

齿轻微磨损,无崩齿、掉齿及刀翼损坏情况,可以继续入井使用,用后的钻头如图 14 所示。



图 14 进尺 460.58 m 后的 PDC 钻头
Fig.14 PDC bit after footage of 460.58m

4 结论

(1)针对东丽区块地热定向井复杂地层特征及高效钻进需求,优化浅内锥型冠部结构及布齿参数,解决了该区块钻头导向稳定性与破岩效率兼顾问题;优选三棱齿为主切削齿,实现了破岩效率的协同提升;采用 UG-CAM 五轴加工与等离子自动焊接复合工艺,显著提升了钻头加工质量及耐磨抗冲击性能。

(2)现场应用效果表明新研发的钻头在 DL-93 井累计进尺 460.58 m,平均机械钻速 3.68 m/h,较区块同工况常规 PDC 钻头提升 41%,较同区块牙轮钻头提升 3 倍以上,提钻后钻头新度保持 85% 以上,完全满足该区块地热定向井高效精准钻进需求,具备工程推广价值,也为同类地热钻井钻头研发提供了技术参考。

参考文献(References):

[1] 刘杰,宋美钰,秦莉红,等.天津地区雾迷山组地热资源潜力区划[J].地质找矿论丛,2019,34(2):321-325.
LIU Jie, SONG Meiyu, QIN Lihong, et al. Division of potential geothermal resources zones in the Wumishan Formation in Tianjin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019,34(2):321-325.

[2] 胡燕,林黎,孙宝成,等.天津市地热资源可持续开发潜力评价报告[R].天津:天津地热勘查开发设计院,2015.
HU Yan, LIN Li, SUN Baocheng, et al. Potential evaluation of sustainable development of geothermal resources in Tianjin Price Report[R]. Tianjin: Tianjin Geothermal Exploration and Development Design Institute,2015.

[3] 李俊峰,贾志,张芬娜,等.天津市蓟县系雾迷山组热储层水位动态变化及趋势预测研究[J].地质调查与研究,2013,36(3):221-225.
LI Junfeng, JIA Zhi, ZHANG Fenna, et al. Research on the change and trend prediction of the water level of wumishan geothermal reservoir in Jixian System, Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 2013,36(3):221-225.

[4] 李学元,何满潮.天津市热储规划分区和地热井审批系统研发[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(2):546-551.
LI Xueyuan, HE Manchao. Planning on region-division of Tianjin geothermal reservoirs and approval system for geothermalwell[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(2):546-551.

[5] 杨海东,汪俊锋.强攻击型镶齿牙轮钻头设计关键技术及应用[J].天然气与石油,2021,39(6):102-106.
YANG Haidong, WANG Junfeng. Key design technology and application of strong-attack inserted cone bit[J]. Natural Gas and Oil, 2021,39(6):102-106.

[6] 邓宝,张青锋,王德贵,等.复合钻头技术及应用[J].机械工程师,2016(1):76-78.

- DENG Bao, ZHANG Qingfeng, WANG Degui, et al. Analysis and application of hybrid bit technology [J]. Mechanical Engineer, 2016(1):76-78.
- [7] Miao S, Blackman M, Luo J, et al. Hybrid bit produces breakthrough performance in heterogeneous formations in China[C]//Offshore Technology Conference Asia. Kuala Lumpur: Offshore Technology Conference, 2016:OTC-26357-MS.
- [8] 居培,孙荣军,石智军,等.煤矿井下用新型弧角PDC钻头的设计与应用[J].煤炭工程,2018,50(1):145-148,152.
- JU Pei, SUN Rongjun, SHI Zhijun, et al. Design and application of new arc angle PDC bit used in underground coal mine[J]. Coal Engineering, 2018, 50(1):145-148, 152.
- [9] 杨丽,陈康民.PDC钻头布齿方法研究[J].石油机械,2005,33(4):1-3.
- YANG Li, CHEN Kangmin. Research on the distribution of the teeth of PDC bits [J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(4):1-3.
- [10] 刘建风,胥建华.PDC钻头布齿的计算机辅助设计[J].煤田地质与勘探,2003,31(3):62-64.
- LIU Jianfeng, XU Jianhua. Computer-aided design of PDC bit placing cutting[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 62-64.
- [11] 李树盛,蔡镜仑,马德坤.PDC钻头冠部设计的原理与方法[J].石油机械,1998(3):1-3,55.
- LI Shusheng, CAI Jinglun, MA Dekun. Principle and method of PDC bit profile design [J]. China Petroleum Machinery, 1998(3):1-3, 55.
- [12] 高晓亮,王传留,田宏杰.钟山区块煤层气开发定向井用PDC钻头个性化设计与试验[J].中国煤炭,2018,44(3):101-104,126.
- GAO Xiaoliang, WANG Chuanliu, TIAN Hongjie. Individualized design and test of PDC drill bit used for directional well of coal-bed methane development in Zhongshan Block [J]. China Coal, 2018, 44(3):101-104, 126.
- [13] 王虎,胡永,赵洪波.PDC异形齿破岩研究与应用进展[J].钻探工程,2025,52(5):10-17.
- WANG Hu, HU Yong, ZHAO Hongbo. Research and application progress of special-shaped PDC cutters in rock breaking [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5):10-17.
- [14] 吴霞.新场-合兴场区块须家河组难钻地层PDC钻头研制及应用[J].钻探工程,2025,52(6):128-135.
- WU Xia. Development and application of PDC bits for Xujiahe difficult drilling formations in Xinchang-Hexingchang Area [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6):128-135.
- [15] 荣准,杨学军,张航,等.五宝场硬塑性地层斧形曲面PDC齿破岩性能研究[J].钻探工程,2024,51(2):85-93.
- RONG Zhun, YANG Xuejun, ZHANG Hang, et al. Study on the rock breaking performance of axe-shape cambered PDC cutters in the hard plastic formation in Wubaochang [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2):85-93.
- [16] 冯云春.龙凤山气田火山岩地层个性化PDC钻头设计与应用[J].钻探工程,2024,51(2):94-101.
- FENG Yunchun. Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2):94-101.
- [17] 王勇军,梁伟,张涛,等.深部地热钻探中硬塑性泥岩地层钻头应用研究[J].钻探工程,2023,50(3):92-98.
- WANG Yongjun, LIANG Wei, ZHANG Tao, et al. Research on bit application of hard plastic mudstone formation in deep geothermal drilling [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):92-98.
- [18] 赵洪波,张龙,沈立娜,等.三门峡盆地油气调查优快钻井技术[J].钻探工程,2024,51(6):111-118.
- ZHAO Hongbo, ZHANG Long, SHEN Lina, et al. Efficient drilling technology for oil and gas survey in Sanmenxia Basin [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6):111-118.
- [19] 张献振,王传留,居培,等.基于电液微钻试验台的聚晶金刚石复合片性能分析[J].煤矿机械,2017,38(8):55-57.
- ZHANG Xianzhen, WANG Chuanliu, JU Pei, et al. Performance evaluation of polycrystalline diamond compacts based on electric-hydraulic micro drilling test [J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(8):55-57.
- [20] 张永星,张治邦,国学臣.基于Pro/E的PDC钻头模具加工CAD/CAM技术[J].石油矿场机械,2005,34(5):23-27.
- ZHANG Yongxing, ZHANG Zhibang, GUO Xuechen. CAD/CAM technique in PDC drilling bits female mould processing base on Pro/E [J]. Oil Field Equipment, 2005, 34(5):23-27.
- [21] 田宏杰,刘刚,戴勇波,等.UG-CAM在钢体式煤层气钻头制造中的应用[J].煤矿机械,2015,36(8):272-274.
- TIAN Hongjie, LIU Gang, DAI Yongbo, et al. UG-CAM technology application on steel body coal-bed methane (CBM) bit [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(8):272-274.
- [22] 王传留,金新,高晓亮,等.硬岩PDC定向钻头优化设计及其表面增材技术研究[J].煤田地质与勘探,2022,50(8):157-164.
- WANG Chuanliu, JIN Xin, GAO Xiaoliang, et al. Optimized design and surface additive technology of PDC bit for hard rock directional drilling [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8):157-164.
- [23] 张朋,王传留,高晓亮,等.表面熔敷焊PDC定向钻头在定向长钻孔施工中的应用[J].煤矿机械,2022,43(7):130-133.
- ZHANG Peng, WANG Chuanliu, GAO Xiaoliang, et al. Application of PDC directional bit with surface cladding welding in long directional drilling construction [J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(7):130-133.

(编辑 王文)