

新场-合兴场区块须家河组难钻地层PDC钻头 研制及应用

吴霞

(中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院, 四川 德阳 618000)

摘要: 针对新场-合兴场区块须家河组地层硬度大、可钻性差、研磨性高、非均质性强等破岩难题, 建立了须家河组地层抗钻特性参数剖面, 开展了目标层段工程需求及典型钻头失效形式分析, 结合不同类型切削齿破岩特性研究, 开展了布齿方式优化, 提出“圆形+楔形”双排平面混合布齿结构。通过开展钻头受力分析, 优化设计冠部轮廓、刀翼结构、保径结构, 形成“高导向性+力平衡稳定性”切削结构, 最终研制出须家河组难钻地层定制化PDC钻头。现场应用平均机械钻速4.88 m/h, 提升41%; 平均行程进尺347.16 m, 提升104%, 为新场-合兴场区块须家河组二段致密砂岩气藏钻井提速突破提供了新的技术手段。

关键词: PDC钻头; 抗钻参数; 破岩机理; 楔形齿; 混合破岩; 力平衡设计; 防卡设计; 高效破岩; 须家河组

中图分类号: TE921; P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)06-0128-08

Development and application of PDC bits for Xujahe difficult drilling formations in Xinchang-Hexingchang Area

WU Xia

(Drilling Engineering Research Institute, Sinopec Xinan Oilfield Service Corporation, Deyang Sichuan 618000, China)

Abstract: Aiming at the rock-breaking challenges of the Xujahe Formation in the Xinchang-Hexingchang Block, such as high formation hardness, poor drillability, strong abrasiveness, and significant heterogeneity, this study established a drilling resistance characteristic parameter profile of the Xujahe Formation. It conducted an analysis of the engineering requirements for the target interval and typical bit failure modes. Combined with research on the rock-breaking characteristics of different types of cutter, the study optimized the cutter arrangement pattern and proposed a “circular + wedge-shaped” double-row planar mixed cutter arrangement structure. Through bit force analysis, the crown profile, blade structure, and gauge protection structure were optimally designed to form a cutting structure with “high guidance + force balance stability”. Finally, a customized PDC bit for the difficult-to-drill formations of the Xujahe Formation was developed. Field application results show that the average rate of penetration (ROP) reaches 4.88 m/h, increased 41%; the average run length reaches 347.16 m, increased 104%. This provides a new technical means for breaking through the drilling speed bottleneck of the tight sandstone gas reservoir in the second member of the Xujahe Formation in the Xinchang-Hexingchang Block.

Key words: PDC bits; drilling resistance parameter; rock breaking mechanism; wedge-shaped cutter; mixed rock breaking; force balance design; anti-sticking design; efficient rock breaking; Xujahe Formation

收稿日期: 2025-05-10; 修回日期: 2025-07-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.017

基金项目: 中石化西南石油工程公司科技攻关项目“新场-合兴场构造须家河组难钻地层高效破岩技术研究”(编号: XN-2023-018)、“川西致密气及超深层页岩气难钻地层提速提效技术研究与应用”(编号: XN-2025-003)

作者简介: 吴霞, 女, 汉族, 1995年生, 工程师, 油气井工程专业, 硕士, 从事钻井工艺技术、工具研发等工作, 四川省德阳市旌阳区金沙江西路699号, wux7.osxn@sinopec.com。

引用格式: 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 Xujahe difficult drilling formations in Xinchang-Hexingchang Area[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 128-135.

0 引言

新场-合兴场地区三叠统须家河组二段陆相碎屑砂岩气藏处于川西坳陷中段近东西向展布新场构造带中部,落实资源潜力大,是四川盆地增储上产的重要战略基地^[1-2],属深层特低孔特低渗致密砂岩气藏,区域地质条件复杂,具有埋藏深、岩性致密、非均质性强特点^[3]。自20世纪80年代开始,历经多轮滚动评价开发,面临“打得慢、压不开、加不进、产量低”等难题^[4-5]。其中须家河组地层层厚2000~3000 m,研磨性强、可钻性差^[6-7],从前期钻井作业实践来看,须家河组难钻地层钻井周期占总周期的60%~70%,表现出机械钻速低,行程进尺短,切削齿损坏严重等突出问题,反映出难钻地层破岩效率低是影响钻井效率的重要因素。

针对难钻地层,钻头厂家从切削刀翼数量、切削结构改变等方向深化研究,开展了钻头的个性化研制,尤其针对非平面齿破岩特性和效率开展了大量室内试验以及数值模拟研究^[8-11]。但对平面非圆形齿的研究较少。此外,通常钻头结构设计以突出攻击性、稳定性等单一特性为主,对纵向多层位地质力学参数非均质性、局部特殊岩性、井眼轨迹变化、钻井工程参数等地质工程复杂因素下钻头的综合适应性考虑不足,不同钻头输出特性下的冠部轮廓、刀翼数量、布齿方式等结构参数的矛盾难以平衡,往往表现出强攻击性钻头稳定性差,强稳定性钻头攻击性不足,难以同时满足高硬度、高研磨、强非均质地层中的高效破岩及长进尺稳定钻进。施工单位通过主因子分析法^[12]、黄金分割法^[13]等开展钻头优选,高度依赖于区域应用钻头样本量,局限性较强,且只能实现相对较优选择,破岩效率提升空间有限。

因此本文通过建立须家河组地层抗钻特性参数剖面,开展目标层段工程需求及典型钻头失效形式分析,结合钻头破岩动力学行为,综合考虑适配目标层位及工程需求的钻头结构设计及局部强化设计要素。从平面非圆形齿、力平衡切削结构等方面开展适配新场-合兴场区块须家河组难钻地层的定制化PDC钻头结构设计,增强钻头与目标地层及工程环境的适配性,释放提速潜能。

1 须家河组地层抗钻特性

岩石抗钻特性反映矿物组分及结构变化特征,

主要以抗压强度、可钻性极值、硬度、内摩擦角等力学参数进行表征,是PDC钻头结构特征设计的基础依据^[14]。新场-合兴场区块须家河组埋深约2700~5500 m,以岩屑砂岩、石英砂岩、页岩不等厚互层为主,须四段底部发育砾石层,纵向岩性非均质性强,不同岩性地层对钻头结构参数特征需求不同^[15-16]。地层压实程度高,胶结致密,通过点载荷实验、微可钻性实验,测得岩石密度2.55~2.75 g/cm³,压入硬度600~1000 MPa,可钻性5~8级,研磨性20~35 mg,为典型中硬—硬地层。基于岩石力学参数测试及测井参数反演,构建须家河组地层抗钻特性参数剖面,如图1所示。地层抗压强度35~177 MPa,均值130 MPa,高抗压强度会导致PDC钻头吃入、压碎地层效率低;地层冲击性指数及研磨性指数均属于中高值,会加剧对切削齿的冲击损坏以及硬脆性矿物颗粒对钻头的磨粒磨损作用。此外,须五—须三段地层属于异常高压井段,安全钻井条件下高密度钻井液会加剧岩屑压持效应,增强岩石抗钻性。

2 钻头失效形式分析

统计分析,前期10余井次完钻井钻头使用指标整体不佳,如图2所示。平均机械钻速3.46 m/h,平均单趟行程进尺170 m。突出表现为高攻击性钻头先期失效严重,频繁起钻影响钻井效率;强稳定性钻头能提高单趟行程进尺,但机械钻速普遍较低。

对钻头失效形式进行分析,主要表现为切削齿磨损及冲击损坏,并伴随少量掉齿现象,如图3所示。其中切削齿磨损多发生在冠顶部位。如图3(a),由于切削齿表面受到石英等硬质颗粒不同方向的磨蚀作用,石英颗粒在复合片表面滑动发生犁沟效应,产生槽状磨痕,导致磨钝快且不能自锐易“打滑”进而导致钻头吃入硬地层困难,降低破岩效率^[17]。切削齿冲击损坏通常发生在钻头体的鼻肩部位,当钻遇硬质点及非均质性强地层,受横向、纵向、扭转冲击混合破坏,切削齿出现大面积的片状或块状剥离,表面高低不平,如图3(b)。当持续发生机械疲劳与冷热交变共同作用,因累积损伤产生疲劳裂纹以及内应力产生热龟裂,继而扩展导致冲击疲劳断裂^[18],如图3(c)。此外,当钻遇硬质岩层高速切削瞬时冲击,切削齿失去硬质合金刚体有效支撑,易发生切削齿从钻头刀翼上掉落,严重时切出环形槽,如图3(d)所示。综合上述损坏形式,需

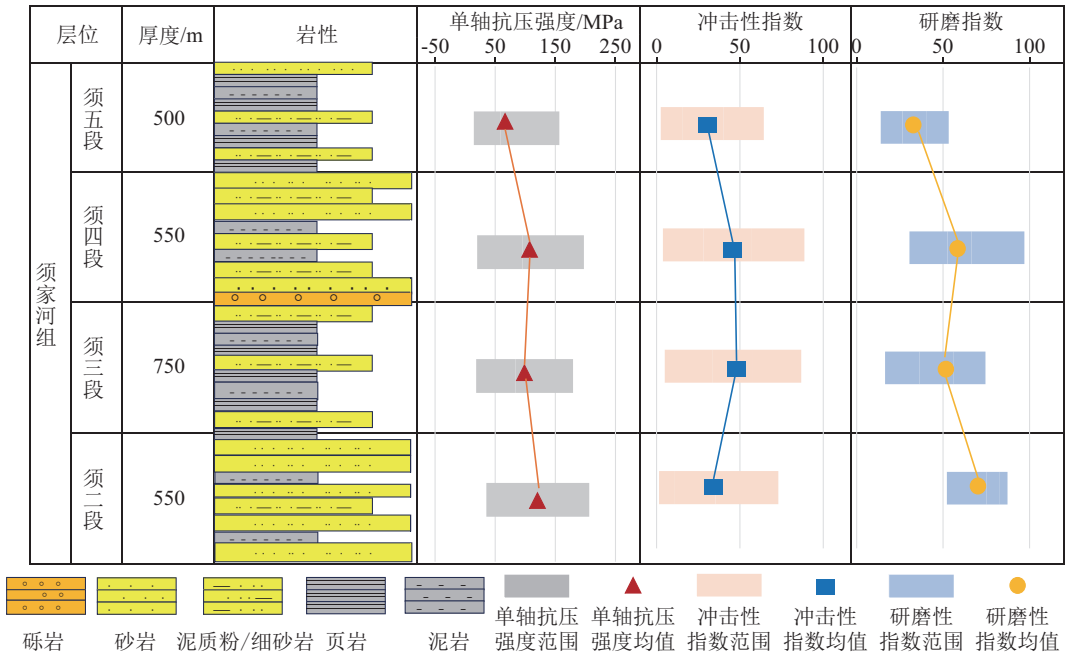


Fig.1 Drilling resistance characteristics of rocks in Xujiahe Formation

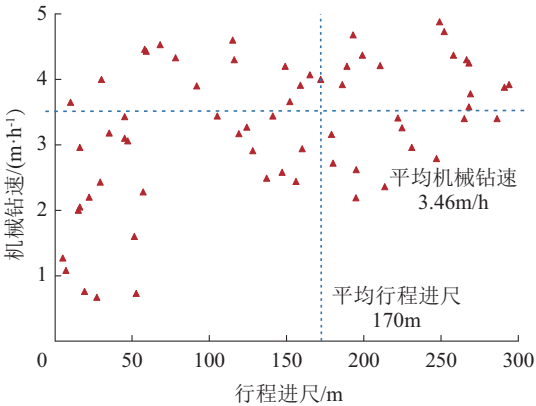


图 2 须家河组钻头使用指标统计
Fig.2 Statistics of bit usage indicators of Xujiahe Formation

要从结构、材质等方面综合开展钻头设计优化,提高PDC钻头的抗冲击性和耐磨性。

3 定制化钻头结构设计

综合统筹机械钻速、切削力、切削深度、破岩体积、破岩比能等协调机制,以待钻地层抗钻特性参数为核心,以目标井段工程特征为融合设计因素,综合开展刀翼结构、切削齿类型、布齿密度等设计,同步提升钻头攻击性及稳定性。同时基于前期应用钻头失效形式分析,以增强鼻肩部抗动态冲击能

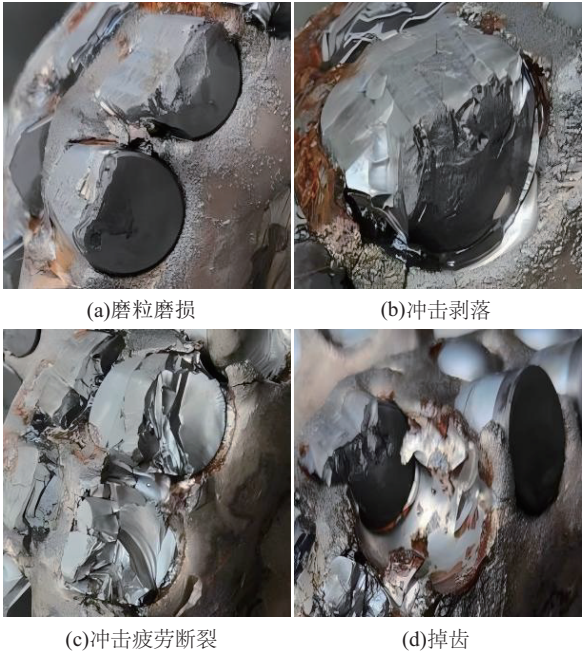


图 3 切削齿损坏示意
Fig.3 Schematic diagram of cutters damage

力为核心开展待研制钻头局部强化设计。

3.1 局部减振增强异形混合布齿设计

3.1.1 切削齿齿形选择

切削齿是高效破碎岩石的基本切削单元,其结构及布置方式直接影响PDC钻头的破岩效能及使

使用寿命,国内外相继研发了锥形齿、斧形齿、三棱齿、楔形齿等新型PDC钻头异形切削齿,在高硬度、强研磨性及非均质地层中具备较强适应性^[18-21]。须家河组岩石单轴抗压强度均值约130 MPa,施加围压条件下三轴抗压强度达200~350 MPa,综合选择 $\varnothing 16$ mm切削齿。开展不同齿形切削齿在硬地层中破岩效能分析,结果如图4所示。其中,锥形齿、斧形齿、三棱齿均为非平面齿。锥形齿通过将面接触转换为点接触,依赖点载荷轴向预破碎岩石,以犁削方式破岩,应力释放显著,破岩比能低,但断口窄而深,破岩体积受限;斧形齿依赖凸起的棱脊实现应力集中,以劈裂-压实方式破碎岩石,齿表面应力分布均匀,切削力强,易产生大块岩屑,但齿形具有前向倾角,侵入深度受限,切削深度及切削体积均较弱;三棱齿通过棱尖实现点载荷集中压碎地层产生初始裂纹,凸起棱面实现劈裂拉伸,切削齿侧面实现剪切破岩,但切削齿吃入性较差,破岩比能高。从前期非平面异形齿应用情况来看,与平面圆齿混合双排布齿,能降低破岩所需垂向压力和水平切削力,具备良好的抗冲击性,能提高须家河组砂页岩频繁互层中破岩稳定性,但切削效率无法满足提速需求。

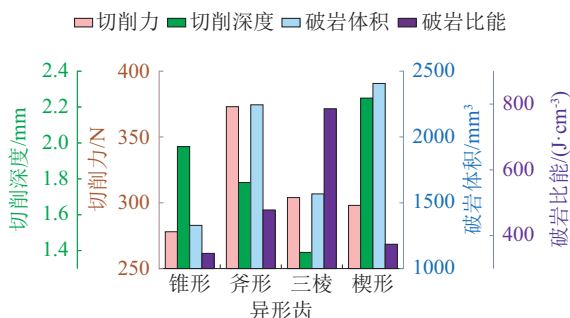


图4 异形齿单齿破岩效能对比
Fig.4 Comparison of rock breaking efficiency of single irregular cutter

楔形齿为平面非圆形齿,其破岩机理如图5所示。破岩过程中以齿尖接触岩石,减少与岩石的接触面积,应力集中激发裂纹,破岩比能低,具有类似尖锥齿的强地层吃入能力,相较于斧形齿、多棱齿侵入能力更强。形成初始裂纹后,楔形齿尖向前犁削形成环状“卸荷槽”,同时齿侧沿切削方向横推剪切破岩,能满足难钻地层中的高破岩体积,同时非均质地层抗冲击破坏能力优于平面圆形齿。

选择采用楔形齿并优化扇面角度,兼顾高破岩体积与低破岩比能。

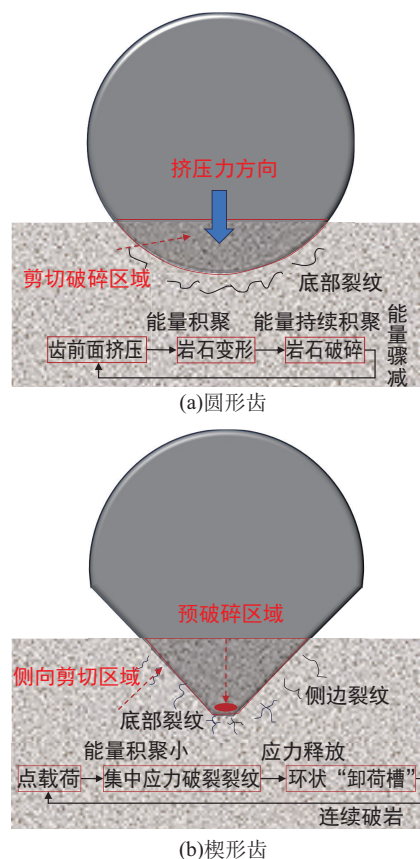


图5 不同齿形破岩机理

Fig.5 Rock breaking mechanism of different cutter shapes

3.1.2 减振强攻击性布齿

针对须家河组地层单轴抗压强度高,所需破岩能量高,同时砂页岩互层冲击载荷复杂的问题,综合考虑不同齿形破岩效率,基于硬地层“剪切+犁削”混合破岩机理,优化调整布齿间隙、齿顶距等关键参数,提出具“强侵入+高抗冲”能力的“多级切削+减振副齿”双排平面齿混合布齿方法。如图6所示,主切削齿采用平面圆齿,鼻部及肩部易冲击损坏部位布置副排楔形齿。通过增强肩部布齿密度,形成硬地层破岩能量分配和破碎环带覆盖,强化鼻肩部切削能力。同时基于须家河地层特性,设计主副齿高差1~1.5 mm,增强抗冲击能力。

相较于传统“平面+非平面”混合布齿方式无法兼顾长行程进尺与高破岩效率的问题^[18-19],提出的“圆形+楔形”双排平面齿混合布齿方式,可以实现非均质地层高效稳定破岩。如图7所示,在硬脆性砂岩地

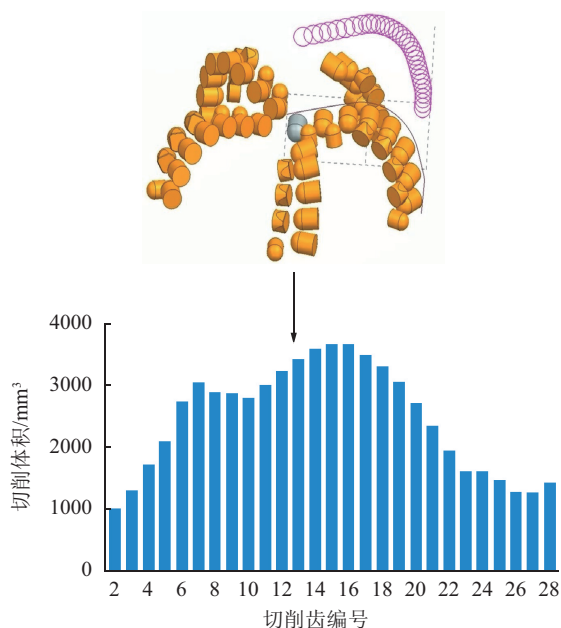


图6 混合布齿方式

Fig.6 Arrangement for irregular cutters

层钻进时,圆形齿与楔形齿混合扩槽破岩,增大破岩体积,确保钻头具备强攻击能力。在硬塑性页岩地层钻进时,在钻压作用下,以楔形齿尖激发裂纹,平面横推裂纹扩展,主副齿同步切削方式,高效切刮剥离页岩。同时主副齿的高差设计,限制切削出刃,副齿辅助主齿承担非均质地层中的冲击载荷,降低主齿冲击破坏风险;当钻进后期主齿发生磨损,切削能力变弱,副排楔形齿还可以继续以“犁削+剪切”方式参与破碎岩石,增强破岩效能,维持钻时稳定。

3.2 力平衡强稳定性设计

目标区块主体井型设计为三开制定向井,造斜点设计在二开 $\varnothing 241.3$ mm井眼须五段地层,造斜率 $10^\circ/100$ m,区域定向井井斜 $30^\circ\sim 60^\circ$,定向段长度约2000 m,常规PDC钻头在须家河组地层定向钻进时,存在定向性能不稳定、工具面变化大、钻头高效破岩及稳定钻进难度大等问题,因此需要通过钻头结构参数设计增强导向性能及定向稳定性,提出“多夹层定向强稳定+力平衡抗涡动”设计理念。满足在须家河组高强度、强研磨性砂页岩互层中的高效稳定造斜及稳斜中靶需求。

3.2.1 高导向性冠部轮廓设计

PDC钻头的导向性能通常以钻头造斜能力及方位漂移能力来表征。钻头的造斜能力与内锥高度呈负相关关系,但浅内锥会降低钻头定向钻进稳定性。

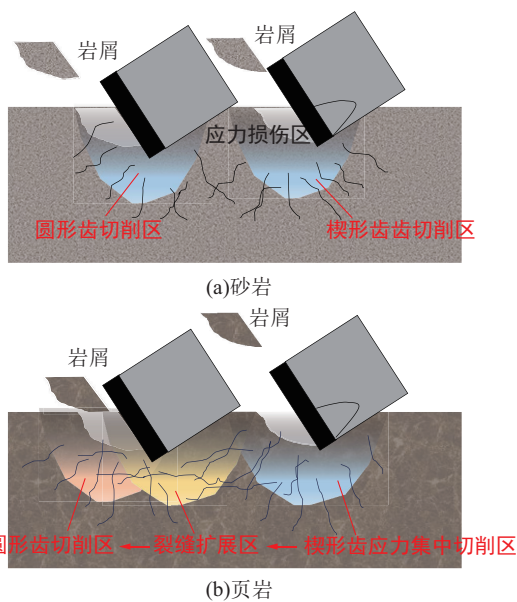


图7 不同岩性下的破岩方式

Fig.7 Rock breaking method under different rock types

钻头方位漂移能力主要由内锥高度和冠顶高度共同决定,通常由方位漂移角 α 决定^[22]。如图8所示,当冠顶高度高于内锥高度时, $\alpha < 0$,此时钻头呈左飘趋势(如虚线趋势),反之呈右飘趋势。综合考虑须家河组地层自然倾角,设计中剖面,优化冠部内锥角,控制定向钻进中的漂移趋势,提高定向稳定性。

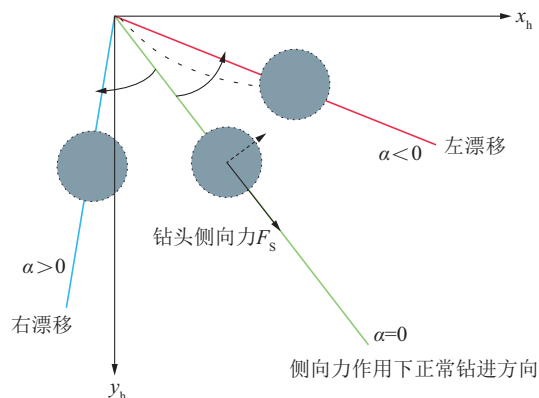


图8 PDC钻头方位漂移规律

Fig.8 Azimuth drift of PDC bit

$$\alpha = \arctan \frac{2(C - G)}{(C + G) \tan(\beta + \theta)} \quad (1)$$

式中: α ——钻头方位漂移角。 $(^\circ)$; C ——内锥高度, mm; G ——冠顶高度, mm; β ——切削齿后倾角, $(^\circ)$; θ ——钻头与地层之间的摩擦角, $(^\circ)$ 。

3.2.2 力平衡刀翼结构设计

井下复杂工况下,钻头局部受力不平衡,易导致异常振动,从而导致钻头工具面失稳,导向性能降低。研究表明,螺旋刀翼结构设计能够降低切削地层时指向侧壁的切削力,增加与井壁接触面,控制受力平衡,提高钻头工作稳定性,控制钻头方位漂移^[23-24]。匹配地层抗钻特性参数,设计5刀翼,兼顾攻击性与稳定性。同时开展钻头受力分析,调整刀翼角、跨度角、翼间角等关键参数。优化形成10°螺旋刀翼+螺旋保径结构设计,降低钻头回旋作用,实现钻头结构受力不平衡度为1.8°。此外,采用同轨式逆时针布齿方式,确保切削时形成沟槽,同时设计球形切深限位齿,限制钻头涡动。综合上述设计,切削齿扭矩分布如图9所示,能均匀分布切削齿载荷,降低相邻齿扭矩波动,解决砂页岩互层及须四下部局部含砾高研磨地层受力不平衡导致钻头易先期破坏的难题。

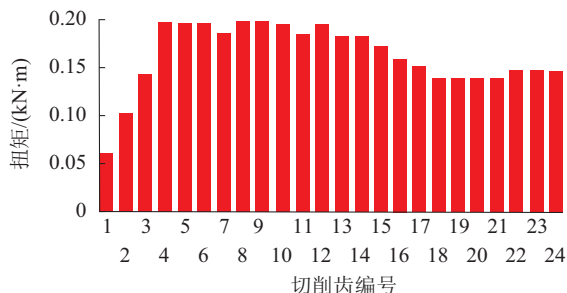


图9 切削齿受扭矩示意

Fig.9 Diagram of cutters subjected to torque

3.2.3 倒划稳定性设计

从前期钻井情况来看,二开下部井段钻进时上部沙溪庙-自流井掉块严重,为满足长裸眼定向段安全钻进,冠部末端采用35°小坡度设计,坡面上增加尖锥齿,形成倒划眼结构对井壁收缩部分进行破碎,降低卡钻风险。同时采用主动保径齿强化对掉块的切削,实现稳定划眼。

3.3 结构设计方案

形成须家河组 $\varnothing 241.3$ mm PDC 钻头设计方案,如图10所示。为强化研制的钻头在须家河高研磨性地层的应用效果,采用钻头本体表面强化、聚晶金刚石复合片深脱钻、复合片加厚等方式,增强钻头本体硬度,改善钻头耐磨性、热稳定性。

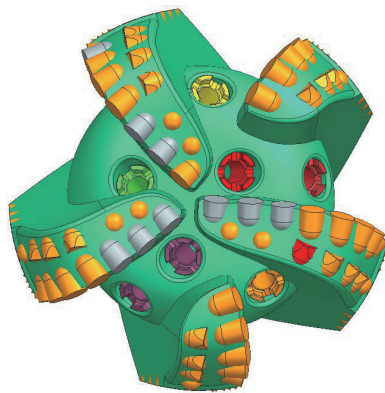


图10 定制化钻头结构示意

Fig.10 Schematic diagram of customized drill bit structure

4 现场试验及应用

现场试验3口井,累计应用12只PDC钻头,平均机械钻速4.88 m/h,较应用前3.46 m/h提升41%;平均单趟行程进尺347.16 m,较应用前170 m提升104%,实现新场-合兴场地区须家河组难钻地层全面提速。其中,XS202-1井一趟钻实现须四—须三砂页岩互层、含砾等岩性变化频繁地层的快速稳斜钻进,因螺杆使用时间限制起钻,行程进尺756 m,同比提升345%,机械钻速6.02 m/h,同比提升73.9%,创工区须家河组须四段地层 $\varnothing 241.3$ mm 井眼斜井段单趟行程最多、机械钻速最高双记录。钻进过程中,基于“强侵入+高抗冲”能力的“多级切削+减振副齿”双排平面齿混合布齿优势,研制的钻头既能持续高效吃入地层,又能快速剪切剥离岩石,实现长进尺钻时稳定,如图11所示。此外,结合高导向性及力平衡设计,实现须四段自然增斜地层中的轨迹高效控制。

钻头出井情况如图12所示,表现为主切削圆形齿正常磨损,副排楔形齿无明显磨损,肩部主切削齿有轻微崩刃现象,分析须四段底含砾岩硬质点导致的冲击损伤。综合评估定制化钻头应用情况,出井应用钻头出井均正常磨损,有效改善了须家河组钻头严重崩刃、切削齿柱断裂、掉齿等问题。

5 结论

(1)针对新场-合兴场区块须家河组地层硬度大、可钻性差、研磨性高、非均质性强等破岩难题,建立了须家河组地层抗钻特性参数剖面,开展了目

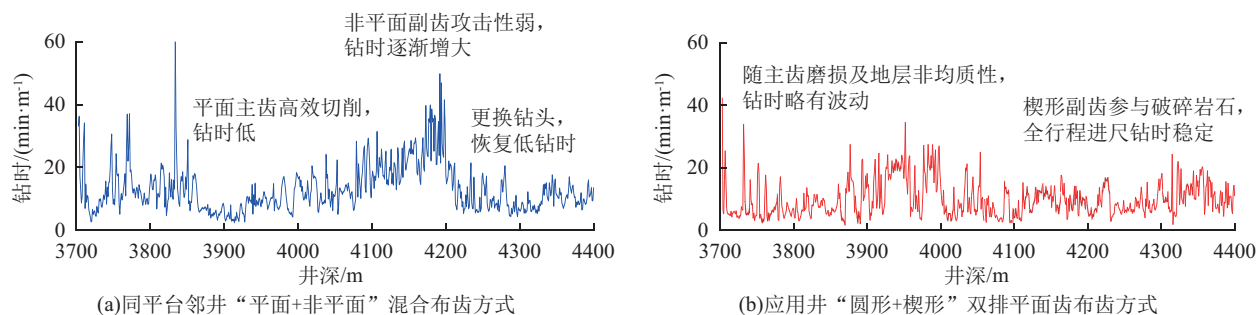


图 11 钻头应用指标对比

Fig.11 Comparison of drill application indicators



图 12 钻头损坏特征

Fig.12 Bit damage characteristics

标层段工程需求及典型钻头失效形式分析,明确了须家河组难钻地层的钻头结构设计核心在于增强鼻肩部抗动态冲击能力及定向钻井稳定性。

(2) 以待钻地层抗钻特性为核心,以工程钻进特征为融合设计因素,基于不同齿型破岩机制分析,提出了“圆形+楔形”双排平面混合布齿结构,能有效提升硬脆性砂岩和硬塑性页岩互层中的破岩效率;基于钻头受力分析,形成了“高导向性+力平衡稳定性”切削结构,能显著提高钻头在定向钻进中工具面稳定性和抗涡动能力,满足长裸眼定向段安全高效钻进需求。

(3) 研制的钻头现场应用效果显著,平均机械钻速 4.88 m/h,提升 41%;平均行程进尺 347.16 m,提升 104%,钻头出井崩齿现象显著改善,为川西新场-合兴场区块须家河组致密砂岩气藏钻井提速突破提供了新的技术手段。

参考文献 (References):

- [1] 熊亮,隆轲,曹勤明,等.四川盆地川西气田多层系成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2024,45(3):595-614.
XIONG Liang, LONG Ke, CAO Qinming, et al. Multilayer accumulation conditions and key technologies for exploration and development of the West Sichuan Gas Field in Sichuan Basin

[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(3):595-614.

- [2] 李亚晶,陈天胜,邓美洲.超致密碎屑岩气藏“甜点”预测——以新场-合兴场地区须二气藏为例[J].科学技术与工程,2021,21(28):12031-12039.

LI Yajing, CHEN Tiansheng, DENG Meizhou. “sweet spots” prediction for super tight clastic sandstone gas reservoirs: An example from the 2nd Member of Xujiahe Formation gas reservoir in Xinchang-Hexingchang area[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28):12031-12039.

- [3] 李阳兵.川西坳陷新场构造带须二段致密砂岩储层特征及综合评价[J].断块油气田,2024,31(4):629-636.

LI Yangbing. Characteristics and comprehensive evaluation of tight sandstone reservoirs in Xu 2 Member of Xinchang structural belt in western Sichuan Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2024, 31(4):629-636.

- [4] 朱化蜀,刘林,黄志文,等.四川盆地川西坳陷新场气田须家河组储层工程地质特征及增产实践[J].石油与天然气地质,2021,42(4):1002-1010.

ZHU Huashu, LIU Lin, HUANG Zhiwen, et al. Reservoir engineering geological characteristics and stimulation in Xujiahe Formation, Xinchang Gas Field, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4):1002-1010.

- [5] 郑和荣,刘忠群,徐士林,等.四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J].石油与天然气地质,2021,42(4):765-783.

ZHENG Herong, LIU Zhongqun, XU Shilin, et al. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4):765-783.

- [6] 杨志彬,张国东,黄建林,等.川西新场地区须家河组工程地质特征及优快钻井对策研究[J].石油天然气学报,2008,30(6):278-281, 393.

YANG Zhibin, ZHANG Guodong, HUANG Jianlin, et al. Study on engineering geological characters and fast drilling methods of Xinchang Xujiahe Formation in West Sichuan[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(6):278-281, 393.

- [7] 杨志彬,胡永章,钟敬敏,等.工程地质因素对钻井提速的影响[J].断块油气田,2010,17(3):363-365.

YANG Zhibin, HU Yongzhang, ZHONG Jingmin, et al. Influence of engineering geological factors on drilling speedup[J].

- Fault-Block Oil and Gas Field, 2010, 17(3):363-365.
- [8] 祁任泽,任雷,卜长根.PDC钻头V形齿的磨损对岩石接触面积的影响[J].钻探工程,2025,52(3):103-109.
- QI Renze, REN Lei, BU Changgen. Influence of wear on rock contact area of V-shaped cutter PDC bit[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3):103-109.
- [9] 赵洪晨,孟德忠,徐良,等.潜孔锤钻头PDC球形切削齿失效分析[J].钻探工程,2025,52(3):117-125.
- ZHAO Hongchen, MENG Dezhong, XU Liang, et al. Failure analysis of PDC spherical cutter for DTH hammer bits[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3):117-125.
- [10] 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.
- [11] 陈新海.巴彦河套新区异形齿PDC钻头研究与应用[J].钻探工程,2022,49(5):127-135.
- CHEN Xinhai. Research and application of special-shaped tooth PDC bits in Bayanhetao New Area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5):127-135.
- [12] 程昊禹,张艳,楼一珊,等.基于因子分析法的玉北区块钻头优选及应用[J].石油机械,2021,49(3):45-50.
- CHENG Haoyu, ZHANG Yan, LOU Yishan, et al. Drill bit selection in Yubei Block based on factor analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(3):45-50.
- [13] 钱浩东,张治发,王鹏.基于工程地质一体化数据库的钻头优选应用实践[J].钻采工艺,2021,44(4):15-18.
- QIAN Haodong, ZHANG Zhifa, WANG Peng. Practice of bit optimization based on integrated database of engineering geology[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(4):15-18.
- [14] 张武昌,李忠慧,寿翔,等.玛湖凹陷砂砾岩地层抗钻特性预测及钻头优选[J].石油机械,2023,51(3):9-15.
- ZHANG Wuchang, LI Zhonghui, SHOU Xiang, et al. Prediction of anti-drilling properties and bit selection for glutenite formations in Mahu Sag[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(3):9-15.
- [15] 王志康.川西新场地区须家河组二段物源特征及其与储层的关系[D].成都:成都理工大学,2021.
- WANG Zhikang. Provenance characteristics and its relationship with the reservoir of the 2nd Member of Xujiahe Formation in Xinchang, western Sichuan Depression[D]: Chengdu University of Technology, 2021.
- [16] 刘彬,姚建林,杨斌.川西双鱼石构造须家河组岩石抗钻特性研究[J].科学技术与工程,2022,22(18):7846-7852.
- LIU Bin, YAO Jianlin, YANG Bin. Anti-drilling characteristics of Xujiahe Formation of Shuangyushi structure in western Sichuan[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(18):7846-7852.
- [17] 王滨,李军,邹德永,等.强研磨性硬岩PDC钻头磨损机理及磨损分布规律研究[J].特种油气藏,2018,25(4):149-153.
- WANG Bin, LI Jun, ZOU Deyong, et al. Mechanisms and distribution pattern of abrasions on PDC bits for highly-abrasive hard-rock[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(4):149-153.
- [18] 高明洋,张凯,周琴,等.高温硬地层钻进中PDC钻头切削齿磨损研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):185-189.
- GAO Mingyang, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Wear of PDC cutters in high temperature hard formation drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):185-189.
- [19] 王光明,李达,倪骁骅.PDC钻头异形切削齿研究进展[J].石油矿场机械,2022,51(4):76-83.
- WANG Guangming, LI Da, NI Xiaohua. Overseas research progress of special-shaped cutters for PDC bit[J]. Oil Field Equipment, 2022, 51(4):76-83.
- [20] 刘伟吉,阳飞龙,祝效华,等.异形PDC齿切削破岩提速机理研究[J].中国机械工程,2022,33(17):2133-2141.
- LIU Weiji, YANG Feilong, ZHU Xiaohua, et al. Research on mechanism of rock breaking and speed increase in cutting with abnormal PDC cutter [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(17):2133-2141.
- [21] 刘维,高德利.PDC钻头研究现状与发展趋势[J].前瞻科技,2023,2(2):168-178.
- LIU Wei, GAO Deli. Research status and development trends of polycrystalline diamond compact bits[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2):168-178.
- [22] 罗恒荣,邹德永,曹继飞,等.导向PDC钻头设计及其在临盘地区的应用[J].石油钻探技术,2011,39(5):101-105.
- LUO Hengrong, ZOU Deyong, CAO Jifei, et al. Steerable PDC bit design and its application in Linpan area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5):101-105.
- [23] 马亚超,陶垒,荣准.PDC钻头布齿技术研究综述[J].工程设计学报,2023,30(1):1-12.
- MA Yachao, TAO Lei, RONG Zhun. Review of PDC bit cutter arrangement technology[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(1):1-12.
- [24] 付建民,韩雪银,孙晓飞,等.PDC钻头防涡技术在砾岩地层中的应用[J].石油钻采工艺,2012,34(S1):5-8.
- FU Jianmin, HAN Xueyin, SUN Xiaofei, et al. Application of anti-whirl technique for PDC bit to drill through conglomerate layer [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(S1):5-8.

(编辑 王文)