四川盆地凉高山组聚晶金刚石复合片钻头优化设计与应用

刘伟吉[1,2,3] 刘郅航[1] 祝效华[1,2,3*] 郭建华[4] 袁和义[5] 何 灵[1,4] 邓开创[1]

1.西南石油大学机电工程学院,成都,610500
2.石油天然气装备教育部重点实验室,成都,610500
3.西南石油大学地热能研究中心,成都,610500
4.西南油气田工程技术研究院,成都,610017
5.西南油气田开发事业部,成都,610051

摘要:以南充某井ϕ215.9 mm井眼凉高山水平井段为研究对象,针对高研磨性地层特点,采用粒子群-黏菌优化算法进行力平衡设计,最终制定了6刀翼双排齿异轨高差混合布齿的设计方案。设计的聚晶金刚石复合片(PDC)钻头在凉高山地层钻井作业中共使用2只,与其他钻头对比,进尺和机械钻速表现出色。第一只钻头的总进尺约为前序3只钻头的总和,创造了该地层中最长单趟进尺记录;第二只钻头下井钻进96.29 m后,由于井下仪器失去信号被迫起钻,与相近进尺量的钻头比较,该只钻头的机械钻速至少提高25.9%,且钻时更短、钻压更小,破岩效率更高,钻头起钻后新度大于90%。现场实验表明,制定的凉高山组PDC钻头设计方案在破岩效率和使用寿命上都得到显著提高。

关键词:凉高山组;PDC钻头;高研磨性;布齿优化;钻井提速

中图分类号: TE921.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.002 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Optimal Design and Applications of PDC Bits for Lianggaoshan Formation in Sichuan Basin

LIU Weiji[1,2,3] LIU Zhihang[1] ZHU Xiaohua[1,2,3*] GUO Jianhua[4] YUAN Heyi[5]
HE Ling[1,4] DENG Kaichuang[1]

1.School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500
2.MOE Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, Chengdu ,610500
3.Geothermal Energy Research Center, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500
4.Engineering Technology Research Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, 610017
5.Development Division, Southwest Oil&Gas Field Company, Chengdu,610051

Abstract: Taking the Φ215.9 mm wellbore of a horizontal section at Lianggaoshan in Nanchong as the research subject, a particle swarm-slime mold optimization algorithm for force balance design was employed , specifically addressing the characteristics of highly abrasive formations. The final design solution adopted a configuration featuring with six blades, double-row staggered track cutters and hybrid cutter layouts. Two PDC bits designed in accordance with the scheme were subsequently applied in the Lianggaoshan Formation. Compared with other bits, they exhibite excellent performance in footage and rate of penetration(ROP). The total footage achieved by the first bit is approximately equivalent to the cumulative footage of the previous three bits, setting a new record for the longest single-trip footage in this formation. The second bit was pulled out prematurely after drilling 96.29 meters due to the loss of signals from downhole tools. Compared with bits that achieved a similar footage, the ROP of this bit is increased by at least 25.9%. Additionally, the drilling time is shortened, the weight on bit(WOB) is lower, rock-breaking efficiency is enhanced, and the bit's conditions remain over 90% new after tripping out. Field tests confirm that the personalized PDC bit design for the Lianggaoshan Formation significantly improves rock-breaking efficiency and service life.

Key words: Lianggaoshan formation; polycrystalline diamond compact (PDC) bit; high abrasiveness; cutter layout optimization; drilling speed-up

0 引言

高研磨性地层广泛分布于世界各地的油气产

收稿日期:2025-06-12
基金项目:国家自然科学基金(52225401)

区，这些地层具有岩石硬度高、研磨性强、非均质性等特点，给钻井作业带来了诸多难题。高研磨性地层钻井技术的核心在于聚晶金刚石复合片（polycrystalline diamond compact，PDC）钻头关键参数（布齿、齿型、力平衡）与地层特性的匹配，国内外相关研究已形成一定基础，但仍存在显著不足。在布齿方面，川东北沙溪庙地层（石英含量60%）采用7刀翼双排布齿，搭配斧形与平面混合齿及肩部切削齿深度脱钻技术，单只钻头进尺提高了69%[1]；冀中断层区块石英岩地层采用五刀翼双排同轨高差布齿（前排PDC齿＋后排金刚石孕镶块），该方法虽缓解了磨损，但单趟进尺不足50 m，提速效果有限[2]。在齿型方面，哈萨克斯坦的阿克纠宾地区二叠系以下的石炭系地层，研磨性强，平均机械钻速为2 m/h，针对石炭系高研磨地层，采用5刀翼16 mm复合片锥形齿高抗压PDC钻头，利用锥形齿的锥形结构，能够使岩石产生局部应力集中，将机械钻速从2 m/h提高至7.12 m/h，但锥形齿增大了轨迹控制难度，定向作业脱靶风险高[3]；中国塔里木盆地志留系地层岩性主要为细砂岩，石英含量高，可钻性差，钻头磨损快、使用寿命短，满深1井采用局部加厚的复合片，该复合片以点切入，具有磨削热低、岩屑堆积少的优点，提高了复合片的热稳定性和抗研磨性，延长了使用寿命，成功实现一趟钻穿过志留系[4]。在力平衡算法方面，传统PDC钻头力平衡设计多采用单一粒子群算法（particle swarm optimization，PSO）或遗传算法，如通过遗传算法优化周向角降低侧向力，但算法易陷入局部最优，且未与布齿参数协同优化[5]。

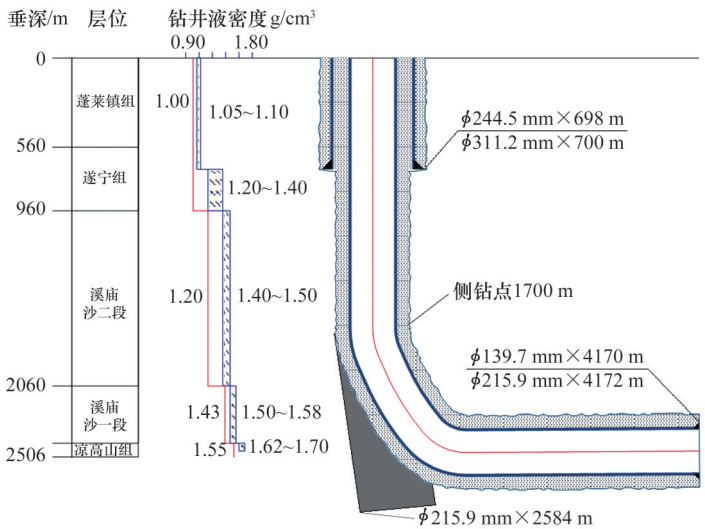
本文针对凉高山组高研磨性特点，从布齿结构、齿型适配、优化算法三方面开展创新设计。对南充某井ϕ215.9 mm井眼凉高山水平井段开展了地层分析，针对地层中的高研磨性，结合以往使用钻头，创新性地提出“6刀翼异轨高差布齿＋三平面齿混合布齿＋粒子群优化算法（PSO）和黏菌算法（slime mould algorithm，SMA）混合优化方法（PSO-SMA）的力平衡优化”定制PDC钻头设计方案。现场应用表明，设计的定制钻头在钻速和进尺方面有明显优势。

1　凉高山组地层分析

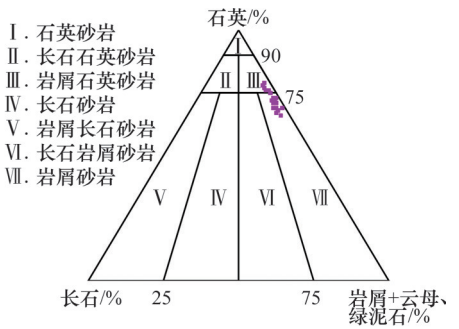
1.1　区域地质概况

本文研究的油井位于四川盆地川中区块，井场区域属丘陵地貌。油井包括导眼井和水平井，井身结构及地层物理特性如图1所示。设计井深4400.86 m（垂深2453.10 m），从地面到井底主要穿过蓬莱镇组、遂宁组、沙溪庙组、凉高山组地层。一开导眼井为垂直井段，主要穿过蓬莱镇组和遂宁组，二开导眼井为过渡层，主要穿过沙溪庙组和凉高山组，二开水平段主要穿过凉高山组，井深结构如图1a所示。

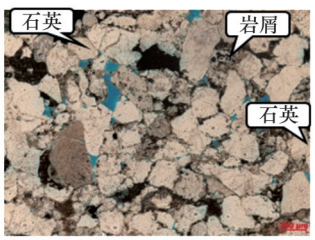
凉高山组岩性主要以细砂岩、粉砂岩为主，还有一些紫色泥岩，地层石英含量（体积分数）在85%～90%之间（硅质含量高，体积分数在28%～35%之间），地层硬、研磨性极强。如图1b



(a)南充某页岩油井井身结构图



(b)凉高山组凉二砂岩成分三角图



(c)凉高山组岩性及含硅特点

图1　南充某页岩油井井身结构及地层物理特性

Fig.1　Wellbore structure diagram and formation physical characteristics of a shale oil well in Nanchong

所示，凉高山组砂岩以岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主，石英含量在70%以上，长石含量低于10%，岩屑＋云母＋绿泥石含量约10%～20%，属典型高硅砂岩。

通过测井资料计算出凉高山地层的岩石力学参数与可钻性级值[6]如表1所示，地层硬度2500～2600 MPa（均值2538.406 MPa），研磨性70～80（均值73.814），可钻性级值5～7（均值5.753），如图1c所示，硅质呈均匀胶结状，进一步增强了地层研磨性。

表1　凉高山地层参数

Tab.1　Stratigraphic parameters of Lianggaoshan formation

井深/m	层位	可钻性级值		硬度/MPa		研磨性	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
2756～3300	凉二段	5～7	5.753	2500～2600	2538.406	70～80	73.814

1.2　钻井提速难点

南充某页岩油井705～2866 m所使用的9只钻头数据统计结果如图2a所示，钻头依次穿过遂宁组、沙溪庙组、凉高山组。从图中可以清晰地看出，遂宁组钻头都有较好的进尺与机械钻速，进入沙溪庙组后钻头的进尺和机械钻速急速下降，在凉高山组钻头的进尺和机械钻速达到最低值。

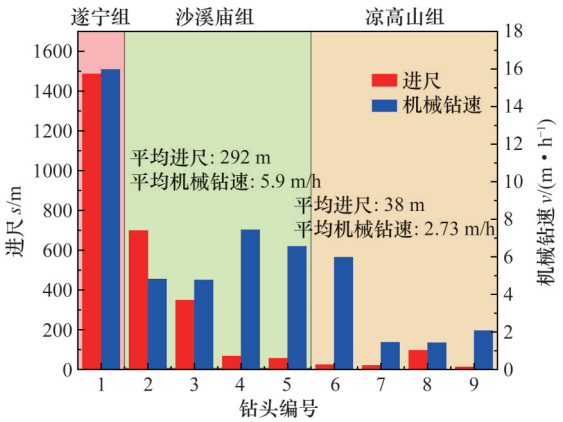
在2737～2866 m井段共计152 m进尺使用PDC钻头4只（对应图2a中的6～9号钻头），如图2b所示，分别为6刀双排（2长4短）、6刀双排（3长3短）、5刀双排（3长2短）、6刀单排（3长3短）布局。起钻之后钻头的失效方式主要以掏心（8号钻头）和环切（9号钻头）两种方式为主，单只钻头平均进尺为38 m，凉高山组水平段钻井提速面临巨大挑战。现有钻头存在布齿密度不均、未考虑力平衡设计、齿型抗磨性不足三大缺陷，无法适配凉高山组高研磨性特点。

2　定制PDC钻头设计方法

定制钻头设计主要包括四个方面：二维布齿、力平衡计算、齿型优选及三维建模，整体技术路线如图3所示。

2.1　冠部形状及布齿优化设计

针对凉高山组地层中石英含量高、研磨性强、地层硬的特点，为提高钻头的攻击性和抗研磨性，采用150°浅内锥设计以提高攻击性，同时防止钻头肩部出现环切失效，并且在二维布齿时强化内锥直线-鼻部圆弧过渡段的布齿密度，防止钻头出现掏心失效。



(a)705~2866 m井段钻头使用情况



(b)2714~2866 m井段钻头失效模式

图2　南充某页岩油井705~2866 m井段钻头使用情况

Fig.2　The usage of bits in the 705~2866 m well section of a shale oil well in Nanchong

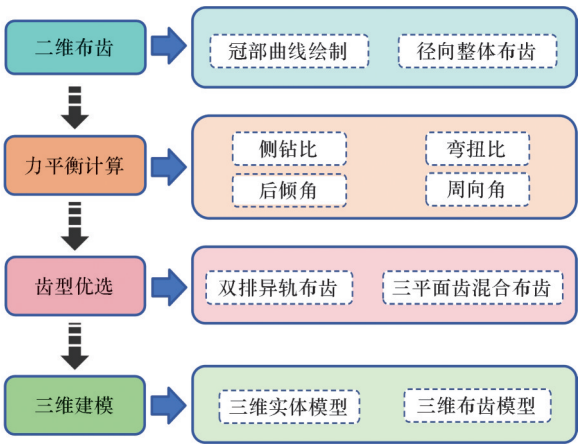


图3　定制钻头设计路线

Fig.3　Design route of customized bits

在确定冠部曲线后，进行径向布齿，在布齿之前还需确定刀翼数量、切削齿直径和布齿密度。面对凉高山地层强研磨性，增大刀翼数量和布齿密度，分散切削力，降低每个切削齿的负荷，提高钻头的耐磨性和破岩效果，因此选择6个直刀翼，采用3长3短组合，搭配6个喷嘴，能够有较好的清岩效果和提速效果。

2.2　基于粒子群-黏菌优化算法(PSO-SMA)的力平衡计算

在完成径向布齿后，对钻头进行全局力平衡优化，主要包括两个部分：侧钻比R_{FLW}和弯扭比R_{MBT}。对于一个正在破岩的PDC钻头，主要受到钻压F_W、扭矩M_T、侧向力F_L和弯曲力矩M_B作用。其中钻压F_W和扭矩M_T是主动施加的力，侧向力F_L和弯曲力矩M_B是岩石反作用于钻头的力。过大的侧向力F_L和弯曲力矩M_B会使钻头在钻进过程中产生振动，使其偏离钻进中心，因此需要将这两个力控制在较小范围内。

2.2.1　优化目标与参数

以“降低钻头振动、避免局部失效”为目标，设定力平衡控制指标：侧向力与钻压之比控制在5%以内，弯曲力矩与扭矩之比控制在15%以内。通过敏感性分析，确定对钻头受力影响最大的2个核心参数(后倾角α_c和周向角θ_c)作为优化变量。

侧向力F_L和弯曲力矩M_B分别为

$$F_L=\sqrt{F_X^2+F_Y^2} \tag{1}$$

$$M_B=\sqrt{M_{OX}^2+M_{OY}^2} \tag{2}$$

式中：F_X、F_Y分别为钻头受力沿OX和OY方向上的分量；M_{OX}、M_{OY}分别为钻头受力对OX和OY方向上的力矩，N·m。

侧钻比R_{FLW}和弯扭比R_{MBT}可表示为

$$R_{FLW}=\left|F_L/F_W\right| \tag{3}$$

$$R_{MBT}=\left|M_B/M_T\right| \tag{4}$$

但两者很难同时兼顾，因此全局力平衡优化目标函数可以表示为

$$f=\sqrt{R_{FLW}^2+R_{MBT}^2} \tag{5}$$

后倾角α_c的变化范围为15°～25°。同时可对周向角θ_c进一步简化，设第一个刀翼的刀翼角$\varphi_1=0°$，将第2～6刀翼的刀翼角约束在周角六等分的−15°～15°之间。

全局力平衡的布齿参数设计优化模型为

$$\min f=R_{FLW}^2+R_{MBT}^2 \tag{6}$$

$$\left.\begin{aligned}R_{FLW}&=f_1(\alpha_{c(1)},\alpha_{c(2)},\cdots,\alpha_{c(N_c)},\varphi_2,\varphi_3,\cdots,\varphi_M)\\R_{MBT}&=f_2(\alpha_{c(1)},\alpha_{c(2)},\cdots,\alpha_{c(N_c)},\varphi_2,\varphi_3,\cdots,\varphi_M)\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

约束条件：

$$\left.\begin{aligned}&15°\leqslant\alpha_{(i)}\leqslant25° && i\in[1,N_c]\\&60°(m-1)-15°\leqslant\varphi_m\leqslant60°(m-1)+15° && m\in[1,6]\\&R_{FLW}\leqslant5\%\\&R_{MBT}\leqslant15\%\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中：$\alpha_{(i)}$为第i个切削齿的后倾角；φ_m为第m个刀翼的刀翼角。

2.2.2　PSO-SMA算法设计

采用粒子群-黏菌优化算法对全局力平衡的布齿参数设计优化模型进行优化，粒子群-黏菌优化算法结合粒子群的快速收敛性快速定位最优解邻域，同时引入黏菌的扩散-收缩机制，增强局部搜索精度，避免陷入局部最优。

粒子群数学模型包括位置迭代公式和速度迭代公式，粒子位置的迭代公式为[7]

$$x_{id}^{(k+1)}=x_{id}^{(k)}+v_{id}^{(k+1)} \tag{9}$$

式中：$x_{id}^{(k)}$为第d个变量第k次进化时粒子i的位置；$v_{id}^{(k+1)}$为第d个变量第$k+1$次进化时粒子i的速度。

粒子速度迭代公式为[7]

$$v_{id}^{(k+1)}=wv_{id}^{(k)}+c_1r_1(p_{id}^{(k)}-x_{id}^{(k)})+c_2r_2(p_{gd}^{(k)}-x_{gd}^{(k)}) \tag{10}$$

式中：w为权重；$v_{id}^{(k)}$为第d个变量第k次进化时粒子i的速度；c_1、c_2为系数，一般取值为1.494 45；r_1、r_2为随机数；$p_{id}^{(k)}$为第d个变量第k次进化粒子i的最优极值；$p_{gd}^{(k)}$为第d个变量第k次进化群体最优极值；$x_{gd}^{(k)}$为第d个变量第k次群体全局最优位置。

黏菌数学模型为[8]

$$x^{(k+1)}=\begin{cases}r(u_b-u_l)+u_L & r<z\\x_b^{(k)}+v_b(Wx_A^{(k)}-x_B^{(k)}) & r<p\\v_cx^{(k)} & r\geqslant p\end{cases} \tag{11}$$

式中：$x^{(k+1)}$、$x^{(k)}$分别为第$k+1$次和k次进化代数是黏菌的位置；r为(0,1)之间的随机数；u_b、u_l为搜索空间的上界和下界；z为变异概率，一般取值为0.03；$x_b^{(k)}$为第k次进化代数食物浓度最高的位置；W为权重系数；v_b、v_c为振荡系数；$x_A^{(k)}$、$x_B^{(k)}$分别为第k次进化代数时随机的两个个体；p为条件参数。

算法流程如图4所示，核心步骤如下：①初始化，粒子群随机生成α_c、θ_c组合，计算适应度函数；②PSO迭代，更新粒子位置与速度，快速定位最优解邻域；③SMA优化，引入黏菌扩散-收缩机制，对邻域内粒子精细搜索，避免局部最优；④终止判断，当适应度函数值小于等于0.01或迭代次数达200次，输出最优参数。

2.2.3　优化结果

根据以上算法得到侧钻比为3.96%，弯扭比为10.48%，符合优化条件，达到力平衡效果，最终的周向布齿和三维布齿如图5所示。图5a展示了优化后的周向布齿，图中清晰地展示了刀翼与切削齿的分布，图5b则清晰地展示了切削齿的三维分布，可以直观地观察切削齿之间的位置，为后续的三维建模与加工提供相应的参考。

2.3　齿型适配优化设计及三维建模

通过优选抗研磨性齿，使用双排异轨布齿、主副刀翼前后排高差不等的方法提高钻头的抗研磨性，同时为了提高破岩效率，采用平面齿与异形齿混合布齿，异形齿使用抗研磨性较好的平面齿通过激光加工形成抗冲击性和研磨性都较好的三平

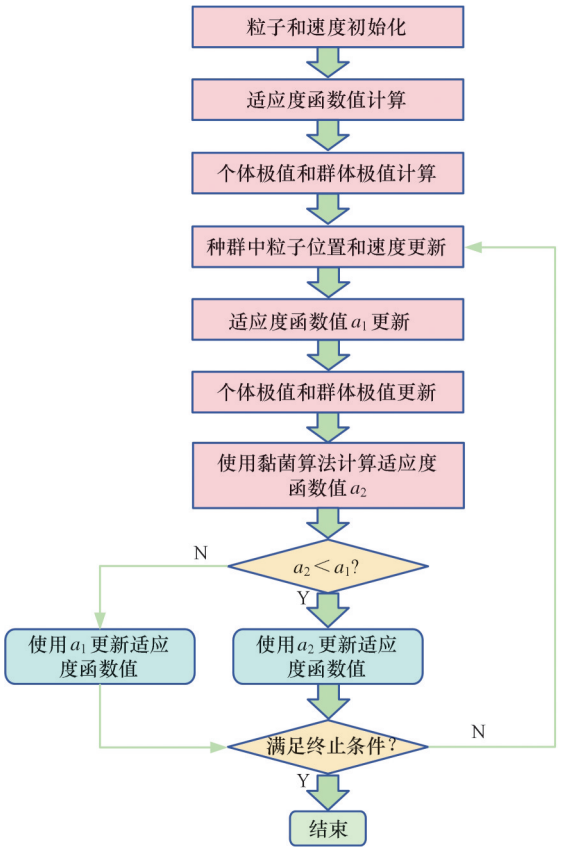
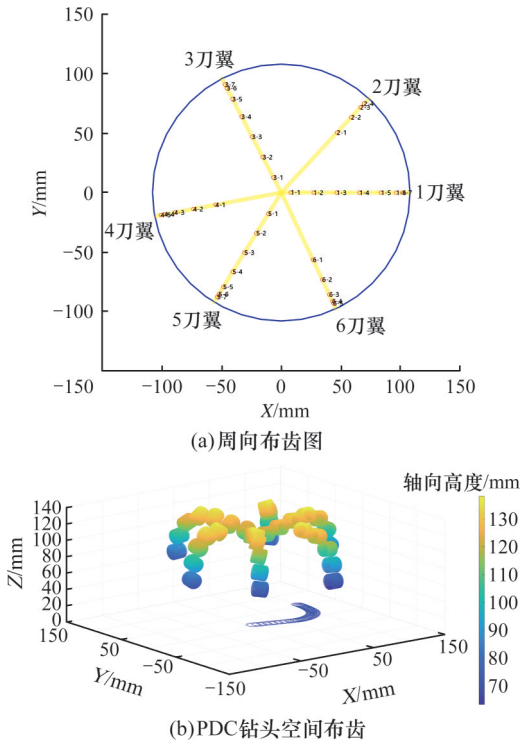


图4 粒子群-黏菌算法流程图

Fig.4 Flowchart of the particle swarm-slime mould optimization algorithm



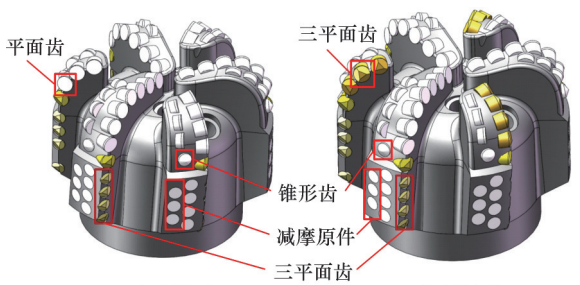
(a)周向布齿图

(b)PDC钻头空间布齿

图5 PDC钻头力平衡计算及空间布齿分析

Fig.5 Force balance calculation and spatial cutter distribution analysis of PDC drill bit

面齿[9-11]，平面齿和三平面齿都采用超深脱钴处理，脱钴深度为1400 μm，前排主切削齿大小采用15.88 mm，保径齿大小采用13.44 mm。同时在每个刀翼上装一颗锥形齿，如图6所示，以此减少横向与周向振动，提高钻头的稳定性以及减小外锥部分切削齿的破岩载荷。此外在水平段钻进时保径容易磨损从而导致缩径，保径齿采用三平面齿，同时在保径上装上双排减摩原件。定制钻头1在每个主刀翼的最后一颗切削齿装三平面齿，定制钻头2在定制钻头1的基础上将短刀翼上的主切削齿全部换成三平面齿。



(a)定制钻头1 (b)定制钻头2

图6 钻头三维图

Fig.6 3D models of bits

3 现场应用及数据分析

3.1 现场应用

本文设计的定制钻头在凉高山地层共使用两只，第一只钻头入井深度2866.33 m，出井深度3006 m，入井地层凉二段，出井地层凉二段，单趟进尺139.67 m，纯钻时间90.00 h，机械钻速1.55 m/h，起钻原因为机速低。第二只钻头入井深度3119.71 m，出井深度3216 m，入井地层凉二段，出井地层凉二段，单趟进尺96.29 m，纯钻时间50 h，机械钻速1.93 m/h，起钻原因为旋导故障。

两只钻头的钻具组合采用：ϕ215.9 mmPDC钻头+ϕ178 mm旋转导向ATC(auto track curve)+208 mm扶正器+ϕ127 mm无磁承压钻杆+ϕ172 mm旋导马达+止回阀+ϕ139.70 mm加重钻杆×5根+震击器+ϕ139.70 mm加重钻杆×4根+ϕ139.70 mm钻杆。

3.2 性能对比分析

3.2.1 进尺与钻速对比

2737.93～4400.86 m凉高山水平井段的16只钻头使用情况如图7所示。从图中可以看出本文设计的定制钻头(钻头序号为4和6)在进尺和机械钻速两方面领先大部分钻头，同时在使用其他非定制同一型号的钻头(钻头序号为7、8、10、11、12、13)在进尺与钻速都有着较大的差异。为了排除岩性差异对钻头性能的干扰，明确定制钻头优势源于设计优化而非地层条件，将16只钻头的钻时

岩性关系制作成图8。从图8中可以清晰地看到凉高山组岩性主要由细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩组成(图9展示了不同井段的细砂岩岩屑图片)，当钻头在钻遇细砂岩时，钻时较长，进尺较小，比如1号钻头和3号钻头；在钻遇粉砂岩和泥质粉砂岩时，钻时较短，进尺较高，比如7号钻头和14号钻头。通过统计，在细砂岩中平均钻时为31.35 min/m，在粉砂岩中平均钻时为25.27 min/m，由此可以看出钻速与进尺跟岩性有着密切关系。

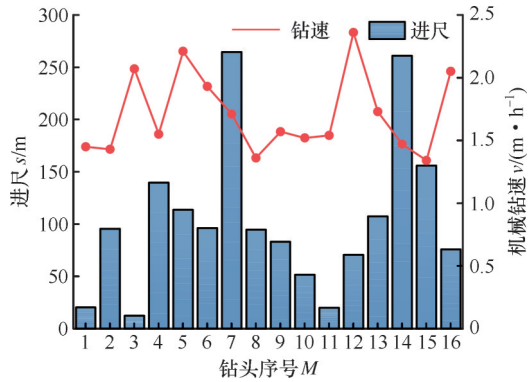


图7　凉高山水平井段的钻头使用情况

Fig.7　Usage of bits in the horizontal well section of Lianggaoshan

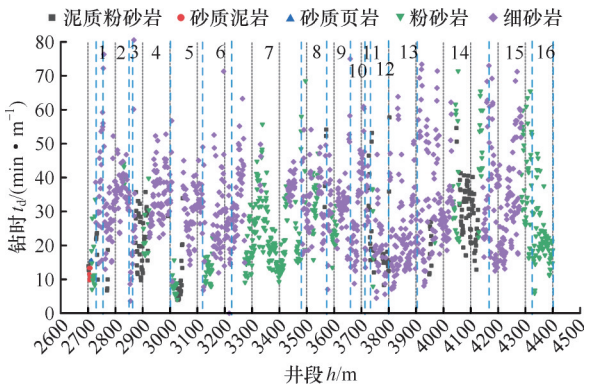
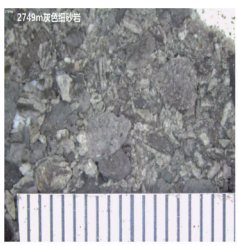
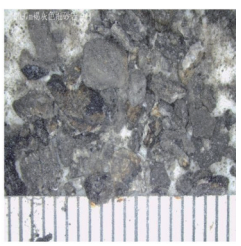


图8　钻时岩性关系图

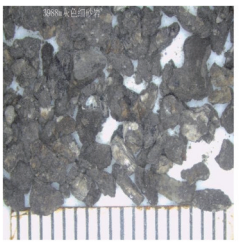
Fig.8　Lithology relationship diagram at drilling time



(a)2749 m灰色细砂岩



(b)3097 m褐灰色细砂岩



(c)3988 m灰色细砂岩

图9　细砂岩岩屑

Fig.9　Fine sandstone cuttings

本次设计的定制钻头在细砂岩井段展现出优异的综合性能。4号钻头(定制钻头一)在与5号钻头的对比中，二者钻遇岩性前期均以泥质粉砂岩为主，后期主要为细砂岩。尽管定制钻头机械钻速低于5号钻头，但进尺提高幅度达18.5%以上，比前三只钻头进尺大幅提高(3号钻头进尺仅12 m，前面3只钻头平均进尺为42.8 m，本只钻头进尺139.67 m)，实现了使用寿命的显著延长。6号钻头(定制钻头二)在与2号钻头、8号钻头的对比中，钻遇岩性均为细砂岩，定制钻头在进尺数相当的情况下，机械钻速分别提高25.9%和29.5%。以上数据表明，本文研制的定制钻头在提高钻进效率与延长使用寿命方面取得了良好的技术突破。

3.2.2　关键钻井参数对比

将所钻岩性和进尺相似的2号钻头、6号钻头(定制钻头二)和8号钻头的钻时、钻压、扭矩和破岩比功进行对比分析，如图10所示。

从图10a中可以看出6号钻头(定制钻头二)的钻时基本低于2号钻头和8号钻头的钻时，钻时基本维持在10～40 min/m之间，在3199 m时，钻时达到了71.32 min/m，平均钻时为23.43 min/m。2号钻头钻时基本维持在10～50 min/m之间，平均钻时为32.7 min/m，8号钻头钻时基本维持在20～60 min/m之间，平均钻时为35.21 min/m，这说明本文研制的钻头有更高效的破岩效率。

由图10b可看出，3只钻头在开始破碎岩石时钻压力较大，在稳定钻进后钻压力基本稳定，6号钻头(定制钻头二)的钻压力基本维持在80～110 kN之间，波动幅度不大，平均钻压力为94.53 kN。而2号钻头的钻压力基本维持在120～180 kN之间，平均钻压力为153.95 kN，8号钻头钻压力维持在90～180 kN之间，平均钻压为140.04 kN，波动幅度较大。这说明本文定制的钻头在较低的钻压力下就可以破碎岩石

由图10c可看出，整个钻进过程中，2号钻头和6号钻头(定制钻头二)的扭矩浮动不大，基本在10～15 kN·m之间，6号钻头(定制钻头二)的平均扭矩为12.98 kN·m，2号钻头的平均扭矩为11.94 kN·m。8号钻头的扭矩在15～21 kN·m之间，相对于前两个钻头扭矩波动幅度较大，平均扭矩为17.63 kN·m。通过钻压力与扭矩对比可以看出，本文设计的定制钻头有较好的力平衡效果。

由图10d可看出，2号钻头的破岩比功基本维持在4～12 MPa之间，平均值为8.35 MPa。6号钻头（定制钻头二）的破岩比功基本维持在3～8 MPa之间，平均值为5.56 MPa。8号钻头的破岩比功波动幅度较大，在4～16 MPa之间反复波动，平均值为10.58 MPa。3只钻头中，6号钻头（定制钻头二）的破岩比功最小，仅为8号钻头的一半，这也能够说明本文定制的钻头有较高的破岩效率。

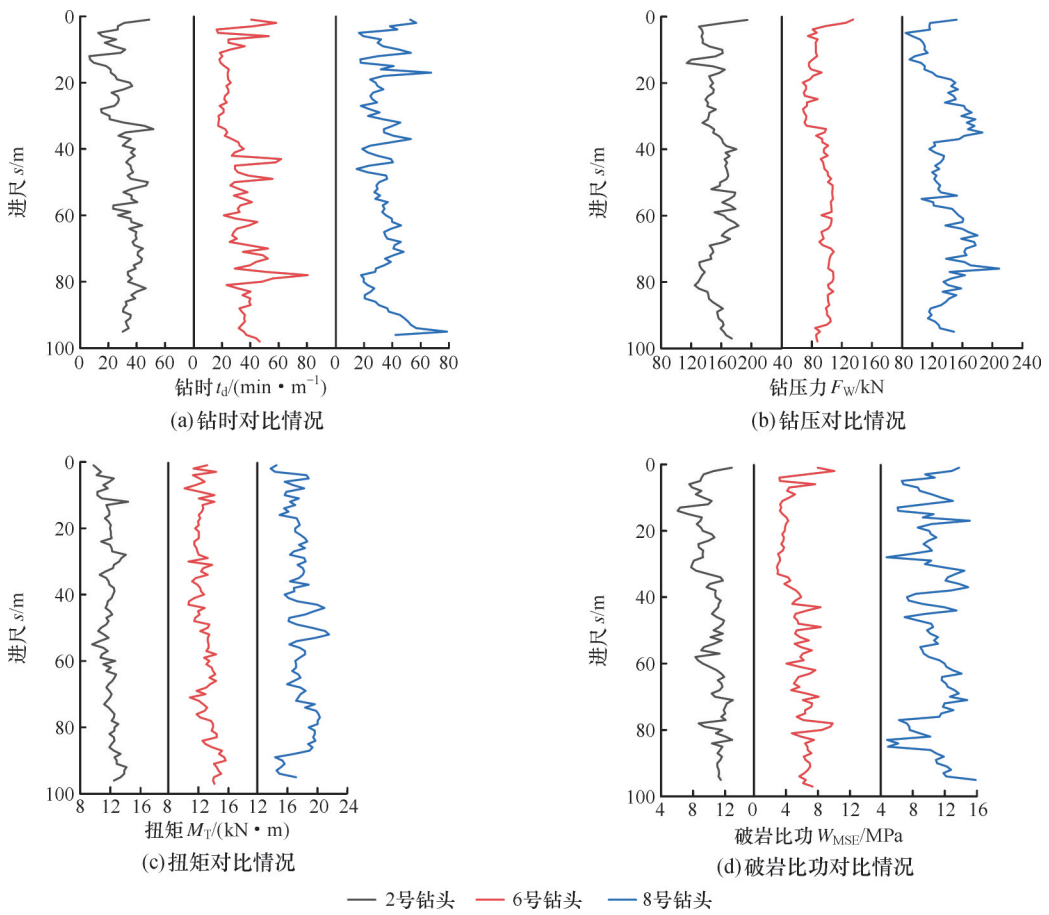


图10 三只钻头对比情况

Fig.10 Comparison of three bits

3.3 钻头失效分析

图11展示了本文设计的第一只定制钻头的出井情况。从出井照片可以看出，冠顶处的主切削齿出现严重的崩齿和磨损，后排齿均出现不同程度的崩齿和磨损，由此可以看出平面PDC齿在钻进过程中受到的冲击较大，导致PDC齿出现崩齿现象，缩短了其使用寿命。

图12展示了本文设计的第二只定制钻头的出井情况。第二只钻头是在第一只基础上对PDC齿形进行了优选，在副刀翼上使用了抗冲击性更好的三平面齿。从图中可以看出，第二只钻头磨损较轻微，仅有肩部几颗切削齿出现崩齿现象，可继续使用。观察第二只钻头发现，出现崩齿现象的都是平面齿（图中红色圈所圈选部分），所有三平面齿都只是出现正常磨损现象，这也说明异形齿面对高研磨性地层有较好的破岩效率和使用寿命。



图11 定制钻头一出井各个刀翼失效情况

Fig.11 The failure conditions of each blade of the customized bit 1 after tripping out of the well



图 12　定制钻头二出井各刀翼失效情况

Fig.12　The failure conditions of each blade of the customized bit 2 after tripping out of the well

4　结论

1)针对南充某油气井凉高山组高研磨性地层特点，对PDC钻头布齿方式和齿型选择等方面进行了优化设计。采用6刀翼双排齿异轨高差布齿及混合齿型设计并通过粒子群-黏菌优化算法进行了全局力平衡优化，使得定制PDC钻头综合性能显著提升，突破了“机械钻速低、单趟进尺少”的行业痛点。现场应用表明，该优化设计有效，研制的钻头在进尺和机械钻速方面优势明显，提高了钻头的使用寿命和破岩效率。

2)定制钻头在凉高山地层使用了两只，与其他钻头对比，进尺和机械钻速表现出色。定制钻头一进尺139.67 m，为前序三只钻头的总和，创地层纪录；定制钻头二机械钻速较2号钻头、8号钻头分别提高25.9%、29.5%；定制钻头二平均钻压较2号钻头和8号钻头降32.5%～38.6%，破岩比功降至8号钻头的52.6%，破岩效率与力平衡同步得到改善。

3)两只定制钻头出井情况显示，第一只冠顶位置切削齿磨损较严重但总体均匀，第二只磨损轻微，仅有肩部几颗平面PDC齿崩齿，仍可继续使用，说明在凉高山地层选用的三平面齿(超深脱钴+激光成形)抗研磨性与抗冲击性优于平面齿，定制钻头2起钻后新度超90%，证明“平面齿+三平面齿”混合设计适配高研磨性地层。6刀翼异轨高差布齿解决了传统钻头掏心、环切失效问题，钻头稳定性显著得到提升。

参考文献：

[1]　荣准，邓旭，张琦，等. 川东北高磨砂岩地层高效PDC钻头个性化设计——以五宝场沙溪庙地层为例[J]. 钻采工艺，2022，45(4)：32-37.
RONG Zhun，DENG Xu，ZHANG Qi，et al. Personalized Design of Efficient PDC Bit for Highly Abrasive Sandstone Formation in Northeast Sichuan Basin：a Case Study of Shaximiao Formation in Wubaochang Block[J]. Drilling & Production Technology，2022，45(4)：32-37.

[2]　于金平，邹德永，刘笑傲. 适合强研磨性硬地层的新型混合钻头设计及现场应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2020，40(3)：67-71.
YU Jinping，ZOU Deyong，LIU Xiaoao. Design and Application of Novel Hybrid Drill Bit for Hard Formation with Strong Abrasivity[J]. Diamond & Abrasives Engineering，2020，40(3)：67-71.

[3]　王刚，李万军，刘鑫，等. 阿克纠宾高研磨性地层钻井提速关键技术[J]. 石油机械，2018，46(9)：37-40.
WANG Gang，LI Wanjun，LIU Xin，et al. Key Technology for Drilling Speed Improvement of High Abrasive Formation in Aktobe[J]. China Petroleum Machinery，2018，46(9)：37-40.

[4]　袁国栋，王鸿远，陈宗琦，等. 塔里木盆地满深1井超深井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术，2020，48(4)：21-27.
YUAN Guodong，WANG Hongyuan，CHEN Zongqi，et al. Key Drilling Technologies for the Ultra-deep Well Manshen 1 in the Tarim Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques，2020，48(4)：21-27.

[5]　宋洵成，邹德永. 采用遗传算法的PDC钻头侧向力平衡优化设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2006，30(4)：50-52.
SONG Xuncheng，ZOU Deyong. Optimization Design of Lateral Force Balance of PDC Bits by Genetic Algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)，2006，30(4)：50-52.

[6]　滕学清，文志明，王克雄，等. 塔中岩石可钻性剖面建立和钻头选型研究[J]. 西部探矿工程，2010，22(11)：43-45.
TENG Xueqing，WEN Zhiming，WANG Kexiong，et al. Research on Drillability Sections of Rocks and Bit Selection in TaZhong Area[J]. West-China Exploration Engineering，2010，22(11)：43-45.

[7]　李二超，高振磊. 改进粒子速度和位置更新公式的粒子群优化算法[J]. 南京师大学报(自然科学版)，2022，45(1)：118-126.
LI Erchao，GAO Zhenlei. Particle Swarm Optimization Algorithm with Improved Particle Velocity and Position Update Formula[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)，2022，45(1)：118-126.

[8]　LI Shimin，CHEN Huiling，WANG Mingjing，et al. Slime Mould Algorithm：a New Method for Stochastic Optimization [J]. Future Generation Computer Systems，2020，111：300-323.

[9]　祝效华，刘伟吉. 钻井岩石破碎学[M]. 北京：科学出版社，2022.
ZHU Xiaohua，LIU Weiji. Rock Fragmentation Behavior in Drilling[M]. Beijing：Science Press，2022.

[10]　刘伟吉，阳飞龙，董洪铎，等. 异形PDC齿混合切削破碎花岗岩特性研究[J]. 工程力学，2023，40(3)：245-256.
LIU Weiji，YANG Feilong，DONG Hongduo，et al. Investigate on the Mixed-cutting of Specially-shaped PDC Cutters in Granite[J]. Engineering Mechanics，2023，40(3)：245-256.

[11]　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.