◀专题论文▶

深层页岩气提速钻头定制设计与应用*

祝效华[1] 邓开创[1] 刘伟吉[1] 李 柯[1] 李元军[2] 陈 伟[2] 严俊涛[3]
（1. 西南石油大学机电工程学院 2. 贝肯能源控股集团股份有限公司 3. 重庆页岩气勘探开发有限责任公司）

祝效华，邓开创，刘伟吉，等. 深层页岩气提速钻头定制设计与应用[J]. 石油机械，2025，53（10）：1-7.
Zhu Xiaohua，Deng Kaichuang，Liu Weiji，et al. Customized design and application of high ROP bit for deep shale gas[J]. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：1-7.

摘要：随着页岩气开发规模的扩大，深层页岩气钻井提速成为提高开发效率的关键，其中针对地层特点设计更具有针对性的钻头是提高钻井效率的有效手段。根据渝西区块某页岩气井的钻井提速需求，分析目标层位特点，考虑钻头需穿越多个层位，应保证钻头的地层适应性和抗冲击性。基于全局力平衡模型优化布齿方法，设计了五刀翼双排齿的PDC钻头，采用混合布齿策略（平面齿与三平面齿结合）提升钻头钻进效率并增强抗冲击能力。现场应用结果表明，该PDC钻头在ø311.2 mm井眼三开中实现单趟进尺868 m，平均机械钻速12.67 m/h，机械钻速同比邻井至少提高了16.65%，在深层页岩气开发中具有良好的适应性。该PDC钻头融合混合布齿设计与力平衡优化模型，形成适用于深层页岩气复杂地层的PDC钻头定制化方案，可为降低钻井成本、提高开发效率提供技术支撑。

关键词：深层页岩气钻井；PDC钻头；个性化设计；钻井提速；混合布齿设计
中图分类号：TE921 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202503085

Customized Design and Application of High ROP Bit for Deep Shale Gas

Zhu Xiaohua[1] Deng Kaichuang[1] Liu Weiji[1] Li Ke[1] Li Yuanjun[2] Chen Wei[2] Yan Juntao[3]
（1. *School of Mechanical Engineering*, *Southwest Petroleum University*; 2. *Beiken Energy Group Co.*, *Ltd.*; 3. *Chongqing Shale Gas Exploration and Development Co.*, *Ltd.*）

Abstract: As the development scale of shale gas expands, improving the rate of penetration (ROP) of deep shale gas has become the key to improving development efficiency, and designing more targeted bit based on formation characteristics is an effective means to enhance drilling performance. In response to the ROP improvement demand of a shale gas well in Yuxi Block, the characteristics of target horizons were analyzed. Considering that the bit needs to penetrate multiple layers, the formation adaptability and impact resistance of the bit should be ensured. Based on the cutter layout optimization method from global force balanced model, a five-blade double-row-cutter PDC bit was designed, and a hybrid cutter layout strategy (combination of planar cutter and triple planar cutter) was used to enhance the drilling efficiency and impact resistance of the bit. Field application shows that the PDC bit achieves a single-run footage of 868 m in ø311.2 mm hole section, with an average ROP of 12.67 m/h, which is at least 16.65% higher than that of offset wells, showing excellent adaptability in deep shale gas development. This PDC bit integrates hybrid cutter layout design with a force-balanced optimization model, forming a customized PDC bit solution for complex formations in deep shale gas reservoirs, providing technical support for reducing drilling costs and enhancing development efficiency.

Keywords: deep shale gas drilling; PDC bit; customized design; ROP improvement; hybrid cutter layout design

* 基金项目：国家自然科学基金杰出青年项目“钻井提速理论与方法”（52225401）。

0　引　言

页岩气作为一种非常规天然气资源，近年来在全球能源结构中的地位日益重要。页岩气作为非常规天然气，自然资源部数据显示，我国页岩气可采资源量达21.80×10^{12} m^3，位居世界第二[1-2]。随着页岩气开发规模的不断扩大，钻井技术的进步成为提高开发效率和降低成本的关键因素之一。我国深层页岩气占页岩气总资源的65%以上[3]，在深层页岩气开发中，钻井提速技术的应用显得尤为重要。

页岩气井钻井过程中，钻头的性能直接影响钻井效率和成本。传统的钻头设计往往难以适应复杂的地层条件，导致钻井速度慢、钻头寿命短等问题。PDC钻头搭配合适的钻具、提速工具和钻井液等配套钻井工艺，可实现较好的提速提效，甚至实现开次“一趟钻”[4]。针对特定地层条件或其他钻进需求进行钻头的个性化设计，是实现钻井提速的有效手段。个性化钻头设计主要以目标地层的岩石力学特性和邻井钻头使用情况，对钻头进行刀翼轮廓设计、PDC齿的形状选择和材料优化、布齿密度设计以及力平衡优化等步骤，最终研制出更具有攻击性的钻头[5-8]。周剑等[9]通过对地层岩性和可钻性的分析，设计了适用于ø311.2 mm井眼段的不同钻头，确保了钻头在相应层位钻进时的良好适应性。马亚超等[10]依据目标层位的岩石力学特性分析和钻头力学分析，调整刀翼轮廓、钻头布齿和喷嘴几何位置等来优化钻头结构，实现了较好的提速效果。以上案例均展现了针对性设计个性化钻头的优势。

笔者针对渝西区块某页岩气井ø311.2 mm井眼三开钻井作业，系统分析了目标井的地质特征和岩石力学特性，并结合邻井实测数据分析结果，开展基于多层位复杂地质条件的PDC钻头个性化设计及力平衡优化设计。研制的钻头在连续多层位复杂地层的钻进试验，验证了其在提速提效方面的实际效果。

1　地质情况分析

1.1　整体情况

目标井所在平台位于渝西区块，处于川东薄皮挤压滑脱带，地层整体较平缓。该井设计采用“四开四完”井身结构，从地表至井底地层层序依次为侏罗系遂宁组、沙溪庙组、凉高山组、自流井组，三叠系须家河组、雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组，二叠系长兴组、龙潭组、茅口组、栖霞组、梁山组，志留系石牛栏组、龙马溪组。一开至三开为垂直井段，涉及地层为遂宁组至龙马溪组顶，四开为造斜井段＋水平井段，最终垂深至4 401 m。根据中华人民共和国自然资源部发布的《页岩气资源量和储量估算规范》，将页岩气深层的范围定义为3 500~4 500 m[11-13]。对标目标深度，该井属于页岩气深层开发范围。

1.2　目标层位情况

所设计的钻头准备在ø311.2 mm井眼三开实施钻井提速任务，该开次属于直井段。钻头为该开次应用的第1只钻头，涉及地层为嘉陵江组、飞仙关组和长兴组，层位主要信息如表1所示。此外，整体预测地层压力范围为56.6~59.4 MPa。根据室内试验，嘉陵江组和飞仙关组的可钻性级值为4，长兴组的可钻性级值为5。

表1　地层情况

Table 1　Formation characteristics

层　位	垂深范围/m	主要岩性	可钻性级值	预测孔隙压力/MPa	地层压力系数
嘉陵江组	2 600~2 705	灰岩、云岩、泥岩、灰岩	4	47.43	1.65
飞仙关组	2 930~3 395	泥岩、泥灰岩、灰岩	4	56.65	1.70
长兴组	3 395~3 490	灰岩夹页岩	5	59.23	1.73

图1为渝西区块邻井在嘉陵江组、飞仙关组和长兴组的机械钻速对比情况。由图1可以看出，地层差异对钻头的机械钻速影响较大：钻头在嘉陵江组机械钻速普遍较高，平均机械钻速为9.75 m/h，最高可达19.82 m/h；进入飞仙关组后机械钻速有所提升，平均机械钻速为10.45 m/h；当钻头钻进至长兴组后，平均机械钻速骤降至5.80 m/h，机械钻速最低仅有2.94 m/h。

2　钻头设计方法

2.1　钻头布齿设计

根据邻井地层岩性和机械钻速，地层岩性和强度变化容易导致钻头振动频繁，需要保证钻头有较

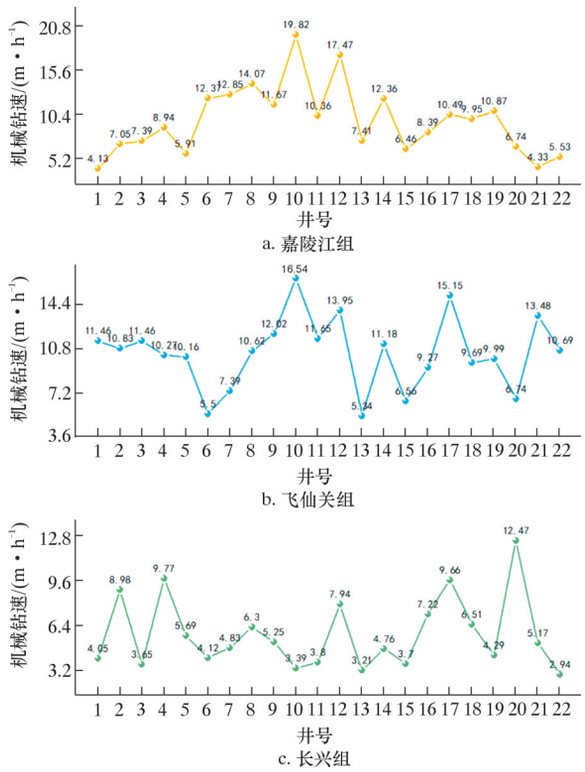


图 1　邻井 3 个地层的机械钻速情况

Fig. 1　ROP performance of three formations in offset well

强的抗冲击能力；同时钻头从嘉陵江组穿越飞仙关组后，在长兴组仍能保持较好的钻进效率，满足提速需求。基于此，钻头的刀翼轮廓线为“直线–圆弧–圆弧–倒角”，可增强钻头刀翼的整体稳定性和抗冲击性能[14]；并设置 5 个刀翼，即 3 个长刀翼和 2 个短刀翼，每个刀翼放置双排 PDC 齿。图 2 为前排齿整体径向布置情况。图 2 中红色表示主切削齿，蓝色表示保径齿，所有齿沿着刀翼轮廓线进行布齿。

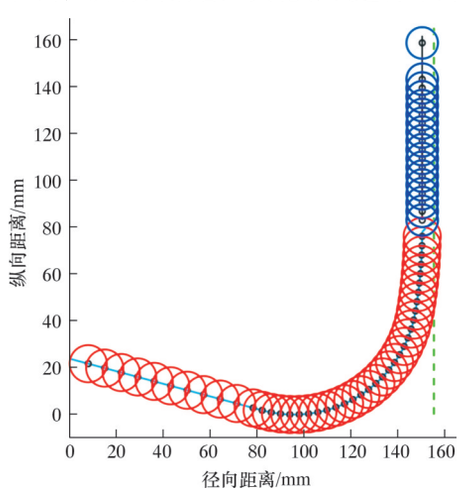


图 2　径向布齿结果

Fig. 2　Radial cutter layout performance

2.2　钻头三维布齿优化

钻头模型如图 3 所示。根据钻齿受力情况得到钻头的侧钻比和弯扭比，以侧钻比和弯扭比最小化为目标函数建立全局力平衡布齿模型[14-16]。

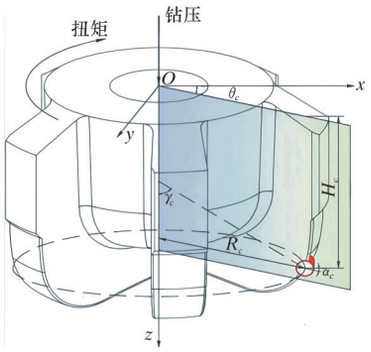


图 3　PDC 齿与钻头的空间位置关系

Fig. 3　Spatial relationship between PDC cutter and bit

钻头的侧向力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}$ 和弯曲力矩 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}$ 分别为：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}=\sqrt{\boldsymbol{F}_x^{\,2}+\boldsymbol{F}_y^{\,2}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}=\sqrt{\boldsymbol{M}_{Ox}^{\,2}+\boldsymbol{M}_{Oy}^{\,2}} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{F}_x$ 和 $\boldsymbol{F}_y$ 分别为钻头沿 x 轴和 y 轴的受力分量，N；$\boldsymbol{M}_{Ox}$ 和 $\boldsymbol{M}_{Oy}$ 分别为钻头受力对 x 轴和 y 轴的力矩，N·m。

侧钻比 R_{FLW} 和弯扭比 R_{MBT} 可表示为：

$$R_{\mathrm{FLW}}=\left|\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}/\boldsymbol{F}_{\mathrm{WOB}}\right| \tag{3}$$

$$R_{\mathrm{MBT}}=\left|\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}/\boldsymbol{M}_{\mathrm{TOB}}\right| \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{WOB}}$ 为钻头所受钻压，N；$\boldsymbol{M}_{\mathrm{TOB}}$ 为钻头所受扭矩，N·m。

由此，目标函数 f 为：

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

全局力平衡 PDC 钻头的设计变量主要是 6 个布齿参数，其中齿的纵向位置 $H_{c(i)}$、径向位置 $R_{c(i)}$ 和法向角 $\gamma_{c(i)}$ 这 3 个变量涉及冠部轮廓曲线形态、布齿密度和井底覆盖率，相互关联较大，因此暂不考虑作为设计变量。此外，该钻头布齿未设置侧转角 $\beta_{c(i)}$。因此，只需将周向角 $\theta_{c(i)}$ 和前倾角 $\alpha_{c(i)}$ 作为设计变量。其中前倾角设计约束范围为 5°~25°；周向角与刀翼参数有关，明确第 1 刀翼的刀翼角为 0°，第 2 刀翼到第 5 刀翼的刀翼角约束在 5 等分的 −20°~20° 内。侧钻比和弯扭比分别需要控制在 15% 和 5% 以内[16]，以减轻钻头跳动、涡动等。全局力平衡的布齿参数优化设计模型为：

$$\begin{cases}\min f=\sqrt{R_{\mathrm{MBT}}^{\,2}+R_{\mathrm{FLW}}^{\,2}}\\ R_{\mathrm{MBT}}=f_1\left(\alpha_{c(1)},\alpha_{c(2)},\cdots,\alpha_{c(N_c)},\theta_{c(1)},\theta_{c(2)},\cdots,\theta_{c(N_c)}\right)\\ R_{\mathrm{FLW}}=f_2\left(\alpha_{c(1)},\alpha_{c(2)},\cdots,\alpha_{c(N_c)},\theta_{c(1)},\theta_{c(2)},\cdots,\theta_{c(N_c)}\right)\end{cases} \tag{6}$$

约束条件为：

$$\begin{cases} 5^\circ \leqslant \alpha_{c(i)} \leqslant 25^\circ \\ 72^\circ(m-1)-20^\circ \leqslant \theta_{c(i)} \leqslant 72^\circ(m-1)+20^\circ, m \in [1,5] \\ R_{\mathrm{MBT}} \leqslant 0.05 \\ R_{\mathrm{FLW}} \leqslant 0.15 \end{cases} \tag{7}$$

式中：f_1、f_2 分别为设计变量（θ_c、α_c）到弯扭比 R_{MBT} 与侧钻比 R_{FLW} 的映射关系；m 为刀翼序号。

基于径向布齿情况和刀翼数量，通过钻头力平衡计算，周向布齿结果和三维空间布齿结果分别如图 4 和图 5 所示。为了保证钻头寿命、强度和钻进效率，同刀翼的前、后排齿采用同轨布齿的方式。考虑到钻头会穿越多个层位，钻头采用混合布齿，使用平面齿和三平面齿两种齿形。

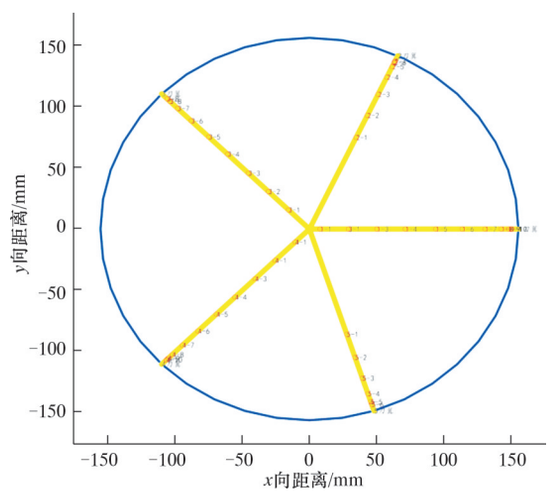


图 4　基于力平衡计算的周向布齿结果

Fig. 4　Circumferential cutter arrangement results based on force balance calculation

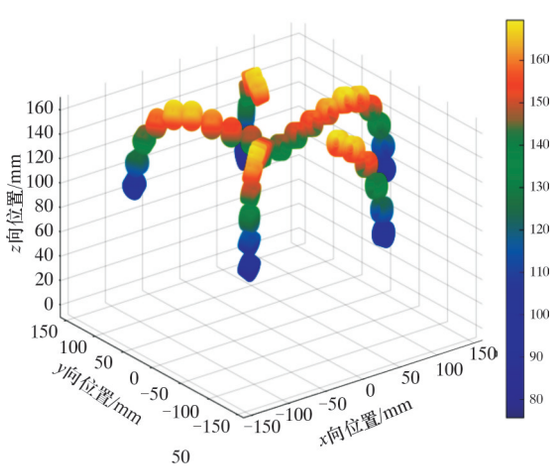


图 5　PDC 齿三维空间布齿结果

Fig. 5　3D spatial arrangement results of PDC cutters

钻头三维模型如图 6 所示，钻头实物如图 7 所示。钻头编号为“SWPU516PM”，IADC 代码为 S323，喷嘴数量/类型为 3*W16+5*W18，保径长度为 76. 2 mm（3 in），流道总面积为 1 180 mm^2。

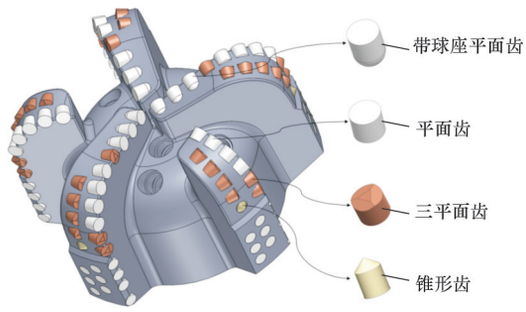


图 6　PDC 钻头三维模型

Fig. 6　3D model of PDC bit

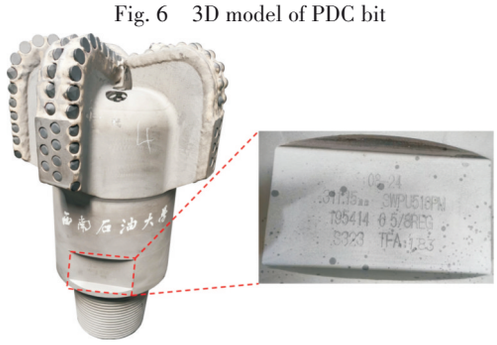


图 7　PDC 钻头实物

Fig. 7　Physical product of PDC bit

3　钻头现场应用数据分析

3. 1　钻头钻进分析

SWPU516PM 钻头下入井深为 2 603 m，起出井深为 3 471 m。该钻次的钻具组合为 ø311. 2 mm 钻头+ø244. 5 mm 弯螺杆钻具+ø228. 6 mm 止回阀+ø228. 6 mm 定向接头+ø228. 6 mm 无磁钻铤+ø305. 0 mm 稳定器+ø228. 6 mm 钻铤+ø228. 6 mm 旁通阀+ø203. 2 mm 钻铤+ø203. 2 mm 随钻震击器+ø139. 7 mm 斜坡加重钻杆+ø139. 7 mm 钻杆。钻头从嘉陵江组开钻，穿越飞仙关组，在长兴组钻进时因提速工具失效而起钻，总进尺为 868 m；纯钻时间为 68. 50 h，划眼时间为 10. 75 h，循环时间为 9 h，总时间为 88. 25 h；机械钻速为 12. 67 m/h。以下对该钻头在该井段的钻进数据进行分析。

图 8 为钻头在钻进过程中的钻时波动情况。由图 8 可知：该趟钻的平均钻时为 4. 70 min/m，在嘉陵江组的平均钻时为 3. 96 min/m；在飞仙关组的平均钻时为 3. 88 min/m，在长兴组的平均钻时为 13. 53 min/m。

图 9 为钻头在钻进过程中的钻压波动情况。该趟钻的平均钻压为 175. 57 kN。钻头在嘉陵江组的钻压波动，呈现整体上升趋势，起伏频繁，平均钻压为 166. 64 kN；飞仙关组钻头钻压相对嘉陵江

组的波动幅度较小，整体在 16~20 kN 之间波动，平均钻压为 178. 73 kN；钻头在长兴组钻压起伏较为频繁，且波动幅度有逐渐增大的趋势，最高达到了 231. 9 kN，平均钻压为 196. 06 kN。

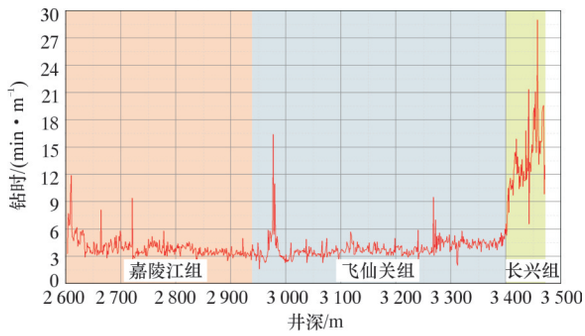


图 8　钻时波动图

Fig. 8　Drilling time fluctuation chart

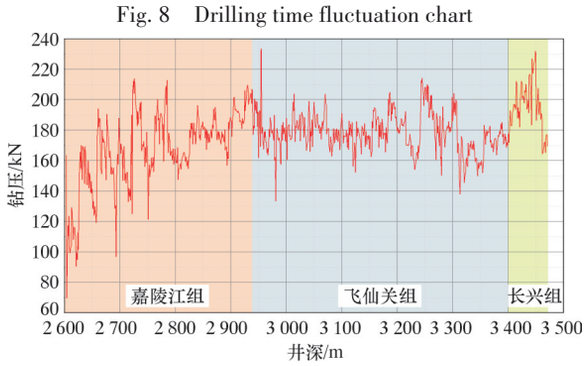


图 9　钻压波动图

Fig. 9　Weight on bit fluctuation chart

图 10 为钻头在钻进过程中的扭矩波动情况。由图 10 可知，该趟钻的平均扭矩为 20. 89 kN·m，在嘉陵江组的平均扭矩为 21. 8 kN·m，在飞仙关组的平均扭矩为 21. 11 kN·m，在长兴组的平均扭矩为 15. 26 kN·m，且有较为明显的下降趋势，井深 3 450 m 后在 15 kN·m 以下波动。

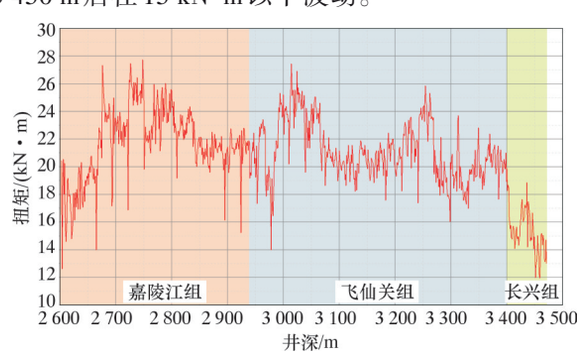


图 10　扭矩波动图

Fig. 10　Torque fluctuation chart

3. 2　邻井钻头钻进数据对比

为表征该钻头的钻进效果，使用同一平台 6 口井的钻井数据进行对比。图 11 为 ø311. 2 mm 井眼段的第 1 只钻头的单趟进尺量和机械钻速对比情况。图 11 中“本井”代指笔者研制的该钻头所钻井。从图 11 可以看出，该钻头的进尺数略低于**-2 井所用的钻头，仅少了 27 m；但是该钻头的机械钻速最高，机械钻速较**-2 井提高了 16. 65%。其次，对比在 2 603~3 471 m 井段中 6 口井的机械钻速情况，在这个深度中，本井、**-2 井、**-3 井、**-4 井、**-5 井和**-6 井使用的钻头数量分别为 1 个、1 个、2 个、3 个、2 个和 2 个。对比情况用小提琴图进行表示，结果如图 12 所示。由图 12 可以看出，该钻头的平均机械钻速略低于**-5 井，但是**-5 井多使用了 1 只钻头、多了一趟起下钻。综合以上对比结果，笔者设计并研制的钻头起到了较好的提速效果。

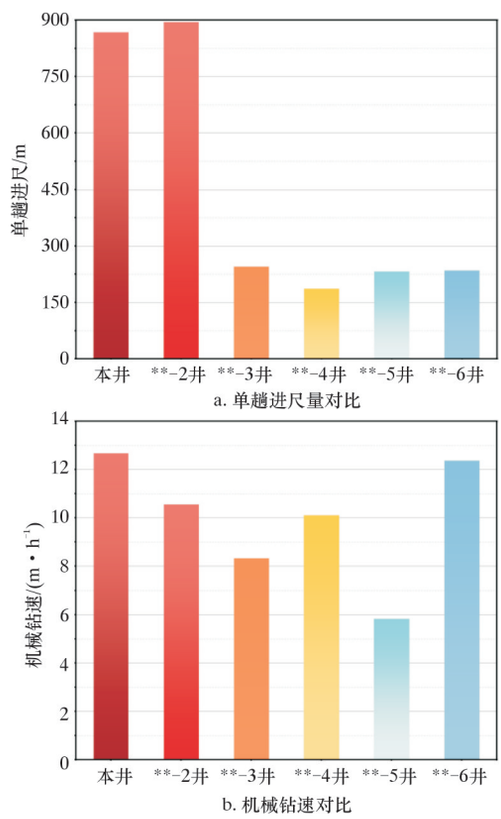


图 11　同平台同开次首只钻头钻进数据对比情况

Fig. 11　Comparison of drilling data of the first bit in the same spud operation on the same platform

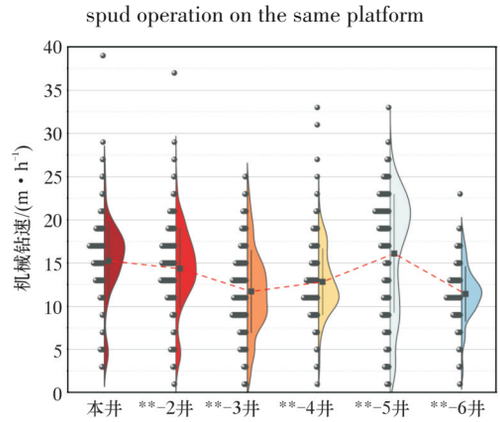


图 12　相同钻进深度区间内的机械钻速对比情况

Fig. 12　Comparison of ROP in the same drilling depth interval

因同入井螺杆失速起钻，图 13 为钻头起钻后的俯视图。由图 13 可知，刀翼存在较浅环切，大部分 PDC 齿的 PCD 层发生了不同程度的崩落，小部分齿在发生小范围崩齿后出现磨损情况。



图 13　钻头整体失效情况

Fig. 13　Overall failure condition of bit

4　结论及认识

（1）针对在渝西区块某页岩气井 ø311. 2 mm 井段需一次性穿越多个地层的需求，建立了设置五刀翼双排布齿的设计思路，钻头前排齿采用平面齿和三平面齿相结合的方式，有效满足钻头在不同岩性层位的钻进需求。

（2）基于全局力平衡优化算法，优化钻齿倾角和刀翼角度，以减小钻头侧钻比和弯扭比，增强钻头钻进稳定性。

（3）该只 PDC 钻头在目标层位实现了较好的提速效果，在保证高进尺的基础上机械钻速提高了 16. 65%，验证了钻头定制设计在提高钻井效率方面的有效性。

（4）后续仍需进一步增强主切削齿的抗冲击性能，也需要进一步加强抗环切能力。

参　考　文　献

[1] 何希鹏，蔡潇，高玉巧，等. 页岩气勘探开发实验技术研究进展与发展方向[J]. 天然气工业，2024，44（7）：12-26.
HE X P，CAI X，GAO Y Q，et al. Experimental technologies of shale gas exploration and development：Research progress and development direction[J]. Natural Gas Industry，2024，44（7）：12-26.

[2] 佘朝毅. 四川盆地深层页岩气钻井关键技术新进展及发展展望[J]. 天然气工业，2024，44（3）：1-9.
SHE C Y. New progress and development prospect of key technologies for drilling of deep shale gas wells in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry，2024，44（3）：1-9.

[3] 周成香，房大志，王旭，等. 南川页岩气田压裂工艺改进及应用[J]. 石油钻探技术，2025，53（2）：133-142.
ZHOU C X，FANG D Z，WANG X，et al. The improvement and application of fracturing technology in the Nanchuan Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques，2025，53（2）：133-142.

[4] 祝效华，李瑞，刘伟吉，等. 深层页岩气水平井高效破岩提速技术发展现状[J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2023，45（4）：1-18.
ZHU X H，LI R，LIU W J，et al. Development status of high-efficiency rock-breaking and speed-increasing technologies for deep shale gas horizontal wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University（Science & Technology Edition），2023，45（4）：1-18.

[5] 毕开原. 我国页岩气钻完井关键技术现状及发展趋势[J]. 石油机械，2024，52（11）：12-20，28.
BI K Y. Current status and trend of key technologies for shale gas well drilling and completion in China[J]. China Petroleum Machinery，2024，52（11）：12-20，28.

[6] 吴鹏程，汪瑶，付利，等. 深层页岩气水平井“一趟钻”技术探索与实践[J]. 石油机械，2023，51（8）：26-33.
WU P C，WANG Y，FU L，et al. Exploration and practice of“One. Trip”. technology for deep shale gas horizontal wells[J]. China Petroleum Machinery，2023，51（8）：26-33.

[7] 代锋，雷正义，陈鹏举，等. 川南深层页岩气井大尺寸井眼一趟钻 PDC 钻头优化设计研究与应用[J]. 钻采工艺，2023，46（5）：40-46.
DAI F，LEI Z Y，CHEN P J，et al. Research and application of PDC bit optimization design for Large-Size borehole One-Trip drilling in deep shale gas wells in southern Sichuan[J]. Drilling & Production Technology，2023，46（5）：40-46.

[8] 樊思成，黄继庆，张斌. 页岩气水平井高效破岩 PDC 钻头个性化设计[J]. 设备管理与维修，2022（10）：41-43.
FAN S C，HUANG J Q，ZHANG B. Customized design of efficient rock breaking PDC bit for shale gas horizontal well[J]. Plant Maintenance Engineering，2022（10）：41-43.

[9] 周剑，曹世平，阳星，等. 长宁页岩气区块 ø311. 2 mm 井眼 PDC 钻头个性化设计与应用[J]. 钻采工艺，2021，44（5）：30-33.
ZHOU J，CAO S P，YANG X，et al. Personalized design and application of ø311. 2 mm PDC bit in Changn-

ing shale gas block[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(5): 30-33.

[10] 马亚超,张鹏,黄志强,等. 全局力平衡PDC钻头布齿优化设计[J]. 中国机械工程,2020,31(20):2412-2419.
MA Y C,ZHANG P,HUANG Z Q,et al. Optimal design for cutter-layout of global force balanced PDC bits[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(20): 2412-2419.

[11] 车卫勤，许雅潇，岳小同，等. 渝西大足区块超深超长页岩气水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺，2022，44(4)：408-414.
CHE W Q, XU Y X, YUE X T, et al. Drilling technology of ultra-deep ultra-long shale gas horizontal wells in Dazu, West Chongqing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(4): 408-414.

[12] 杨迎新，杨燕，陈欣伟，等. PDC钻头复合钻进破岩机理及个性化设计探讨[J]. 地下空间与工程学报，2019，15(2)：565-575.
YANG Y X, YANG Y, CHEN X W, et al. Discussion on rock-breaking mechanism and individuation design of PDC drill bit in compound drilling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 565-575.

[13] 杨瑞帆. 四川深层页岩气井钻井技术创新与实践[J]. 钻采工艺,2023,46(4):13-19.
YANG R F. Innovation and practice of drilling technology for deep shale gas wells in Sichuan[J]. Drilling and Production Technology,2023,46(4):13-19.

[14] 刘志鹏，曾恒，周学军. 适用于特定地层的PDC钻头个性化设计[J]. 天然气工业，2013，33(3)：59-63.
LIU Z P, ZENG H, ZHOU X J. An individualized PDC bit design for specific formations[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(3): 59-63.

[15] 郭旭升，胡宗全，李双建，等. 深层-超深层天然气勘探研究进展与展望[J]. 石油科学通报，2023，8(4)：461-474.
GUO X S, HU Z Q, LI S J, et al. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra - deep strata[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 461-474.

[16] 邹德永，王瑞和. 刀翼式PDC钻头的侧向力平衡设计[J]. 石油大学学报（自然科学版），2005，29(2)：42-44.
ZOU D Y, WANG R H. Lateral force balancing design of blade PDC bits[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2005, 29(2): 42-44.

第一作者简介：祝效华，教授，生于1978年，2005年毕业于西南石油大学机械工程专业，获博士学位，现从事钻井提速相关的管柱力学、高效破岩、提速钻具方面的研究工作。地址：(610500) 四川省成都市。email：Zxhth113@163.com。

收稿日期：2025-03-23　　**修改稿收到日期：**2025-04-17

（本文编辑　刘　锋）

下期部分文章预告（以实际刊出为准）

基于BO-MGGP的机械钻速实时动态预测…… 马宝东，祝兆鹏，宋先知，等
基于物联网技术的自适应大平台丛式井无杆泵调控策略…… 舒晋，韩国庆，岳震铎，等
融合频域注意力与趋势分解线性网络的井漏预测方法…… 汪敏，刘德琦，肖斌，等
基于自适应分层旋转模板匹配的铁钻工旋转角度识别方法研究…… 方昕，闫少波，吕方兴，等
内凹型单牙轮-PDC复合钻头井底流场特征及冲蚀磨损规律研究…… 邹蚁麟，陈绪跃，高德利
闸板防喷器剪切能力分析优化及钻杆参数匹配研究…… 石昌帅，王涵灏，李飞，等
随钻测斜仪磁流变液式钻井液脉冲控制阀优化设计研究…… 廖涛，汤历平，张磊，等
连续管作业典型风险评估方法研究及模块开发…… 杜宇成，康凯，朱再思，等
随钻扩眼器管柱动力学振动分析及抑制研究…… 侯福祥，于富盛，张燕萍，等
水平井钻柱系统黏滑振动分析与钻进参数优化…… 李文哲，吴杰，夏连彬，等
钻杆疲劳寿命及失效机制研究进展与展望…… 彭先波，窦亮彬，李玮，等
基于黏聚力单元的PDC钻头冲击破碎硬岩数值模拟…… 高峰，史怀忠，黄中伟，等
盐穴储气库溶腔促溶工具结构设计及参数优化分析…… 郭庆丰，柳贡慧，赵金成，等
机理与数据双驱动柱塞气举瞬态仿真…… 邢志晟，韩国庆，贾友亮，等
内切割下接式锚定器的研制及试验…… 李勇，徐振东，王晨民，等
基于激光传感器的变形套管内部形态三维重构…… 陈晨，樊恒，李飞，等
高压弯头多裂纹脉冲电流修复规律研究…… 张思，周名将，梁玉恒，等
海洋水合物原位分离除砂器分离性能试验研究…… 邱顺佐，钟林，王国荣，等