

◀ 低渗油气田高效开发钻井技术专题 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.03.006

川西须家河组地层 PDC 钻头结构参数优化及选型

肖国益, 胡大梁, 廖忠会, 王希勇, 李群生

(中国石化西南油气分公司工程技术研究院, 四川德阳 618000)

摘 要: 川西深层须家河组气藏主力储层埋藏深、地质条件复杂, 尤其是其地层硬度高、可钻性差, 致使钻头选型困难, 机械钻速低。为提高须家河组地层机械钻速, 针对地层岩性特征, 利用 ABAQUS 软件建立了切削齿破岩有限元模型, 结合钻头设计理论优化了 PDC 钻头结构参数, 确定出了适合须家河组地层的钻头冠部轮廓、切削齿、刀翼数和保径特征等主要结构参数, 提出了 PDC 钻头选型的关键特征。在此基础上, 优选出了 9 个型号 PDC 钻头, 形成了须家河组地层钻头系列化选型方案: 须 5 段—须 3 段地层宜选用攻击性强同时具有较强抗研磨性和抗冲击性的 PDC 钻头, 须 2 段地层宜选用高抗研磨性兼顾吃入能力和抗冲击性的混合布齿钻头。现场应用表明, 42 只优选钻头平均进尺增加 27.57%, 钻速提高 40.19%, 实现了须家河组地层钻井提速新突破。

关键词: PDC 钻头 钻头选型 机械钻速 须家河组

中图分类号: TE921⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)03-0028-05

Parameter Optimization and Selection of PDC Bits for Xujiahe Formation in Western Sichuan

Xiao Guoyi, Hu Daliang, Liao Zhonghui, Wang Xiyong, Li Qunsheng

(Engineering Technology Institute of Southwest Petroleum Branch, Sinopec, Deyang, Sichuan, 618000, China)

Abstract: Xujiahe formation(T_3x^5) in Western Sichuan, is a deep formation and rich in natural gas. Usual cone bits and PDC bits wear quickly, so they are unsuitable for this formation due to tight rock, high content of quartz and high abrasiveness. So it is difficult to select the suitable bits with high penetration rate. In order to increase ROP and shorten drilling cycle, the finite element model of cutter and rock were created by ABAQUS based on the rock properties and bit design theory. The key bit structure characteristics for Xujiahe formation such as crown profile, cutter structure, wing numbers, hydraulic structure and stability are determined in line with the bit design theory. PDC bits with high aggressiveness as well as anti-abrasiveness and impact-resistance should be employed for formation T_3x^5 — T_3x^3 , hybrid cutter bits with high anti-abrasiveness used for formation T_3x^2 . The application results indicate that selected bits increased footage by 27.57% and improve ROP by 40.19% on average.

Key words: PDC bit; bit selection; penetration rate; Xujiahe formation

川西新场须 2 气藏属于致密碎屑岩气藏, 主要目的层须家河组 2 段埋深超过 4 500 m, 地层复杂, 井底温度和压力高, 勘探开发难度较大。须家河组地层埋藏深、砂泥岩互换频繁、深层页岩胶结强度高、石英含量高、岩性致密、硬度高、研磨性极强^[1-2], 是制约川西深井提速的瓶颈。该地区前期所用钻头以国产牙轮钻头为主, PDC 钻头为辅, 存在钻头磨损快、使用寿命短的问题, 单只钻头平均进尺 99.83

收稿日期: 2012-01-15; **改回日期:** 2012-05-05。

作者简介: 肖国益(1964—), 男, 四川南充人, 1989 年毕业于西南石油学院钻井工程专业, 高级工程师, 西南石油局技术专家, 主要从事深井、超深井钻井工程设计和气体钻井方面的研究。

联系方式: (0838)2551576, zjyxgy@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“低渗油气田高效开发钻井技术”课题 5“低渗气藏复杂地层高效钻井关键技术”(编号: 2008ZX05022-005)部分研究成果。

m, 平均机械钻速 1.07 m/h, 其中须 2 段钻头平均进尺仅 45.36 m, 导致起下钻频繁, 纯钻效率低。现场施工时主要依据以往的经验选择钻头, 缺乏充分的科学依据。笔者在对须家河组地层岩性特征充分研究的基础上, 结合钻头设计理论, 利用 ABAQUS 软件建立 PDC 钻头切削齿和岩石相互作用的有限元模型, 模拟切削齿破岩过程, 对 PDC 钻头的切削齿数、尺寸、刀翼数等关键结构参数进行优化, 优选出了适合须家河组地层的钻头, 取得了良好的提速效果。

1 PDC 钻头结构参数优化

1.1 冠部轮廓形状

PDC 钻头的冠部形状直接影响钻头的攻击性和各部位切削齿的受力状态, 在进行冠部轮廓设计^[3-5]时应满足易于布齿、便于加工、保证质量、提高效率的要求。目前钻进硬地层的 PDC 钻头有短圆形和短抛物线形 2 种典型剖面。短抛物线形剖面冠顶受力较大的部位更靠近钻头中心, 旋转半径相对较小, 而旋转半径大的外缘齿, 受力相对较小, 这样不同部位切削齿的磨损相对比较均匀。此外, 抛物线形剖面外翼相对较长, 可以布置更多的切削齿, 提高耐磨性。短圆形剖面的冠顶靠近钻头外侧, 且曲率较大, 冠顶部位切削齿受力较大, 旋转半径较大, 容易先期磨损。因此, 在川西须家河组地层钻头设计或选型时, 应以冠部轮廓为中、短抛物线形的 PDC 钻头为主。

1.2 切削齿参数

1.2.1 齿数

切削齿的齿数是决定 PDC 钻头机械钻速和使用寿命的重要因素^[6-9], 若齿数过少, 会造成切削齿过早磨损, 导致钻头使用寿命缩短; 若齿数过多, 会造成钻头攻击性下降, 导致机械钻速降低。因此, 需要根据地层特点合理确定钻头齿数。齿数计算公式为:

$$C_n = a \ln \delta + b \quad (1)$$

式中: C_n 为切削齿数; δ 为岩石三轴抗压强度, MPa; a, b 为系数, 不同地区取值不同。

对于 2 个或 2 个以上层段, 平均切削齿数为:

$$\overline{C_n} = \sum \left[\frac{H_i}{H_T} C_n(i) \right] \quad (2)$$

式中: $\overline{C_n}$, $C_n(i)$ 分别为平均切削齿数和第 i 井段的

切削齿数; i 为井段数; H_T , H_i 分别为井深和第 i 井段深度, m。

对钻进须家河组地层时使用的 PDC 钻头进行统计分析, 得到齿数与地层抗压强度的关系, 对其进行拟合, 可得计算齿数的基本公式:

$$C_n = 113.18 \ln \delta - 560.45 \quad (3)$$

根据式(3), 计算得出须 5 段—须 2 段 PDC 钻头的合理切削齿数(见表 1)。

表 1 须家河组各地层段与切削齿数的对应关系

Table 1 Relationship between different Xujiahe formations and number of cutters

地 层	钻头尺寸/mm	切削齿数
须 5 段	$\phi 241.3$	41~49
须 4 段	$\phi 241.3$	47~54
须 3 段	$\phi 241.3$	55~72
须 2 段	$\phi 165.1$	35~45

1.2.2 切削齿尺寸

PDC 钻头的切削齿尺寸由岩石抗压强度或可钻性确定^[10-11](见表 2), 对于软—中硬地层, 选用尺寸较大的 PDC 复合片; 对于中硬—硬地层, 则选用尺寸较小的 PDC 复合片。

表 2 切削齿尺寸与岩石抗压强度关系

Table 2 Relationship between cutter size and rock compressive strength

抗压强度/ MPa	切削齿 尺寸/mm	抗压强度/ MPa	切削齿 尺寸/mm
<35	22.0	204~238	14.5
35~68	19.0	238~272	13.0
68~102	19.0	272~306	13.0
102~136	17.5	306~340	13.0
136~170	16.0	≥ 340	10.5
170~204	16.0		

川西须家河组地层须 5 段—须 2 段抗压强度范围为 183~332 MPa, 对应的切削齿尺寸为 16~13 mm, 随着地层抗压强度的增加, 适用的切削齿尺寸逐渐变小。须 5 段—须 2 段对应的切削齿尺寸见表 3。

表 3 须家河组各地层段切削齿尺寸计算结果

Table 3 Calculated cutter sizes for different members of Xujiahe formation

地 层	切削齿尺寸/mm	地 层	切削齿尺寸/mm
须 5 段	16	须 3 段	16, 13
须 4 段	16, 13	须 2 段	13

切削齿尺寸不同,在切削岩石时的受力情况也不同。取齿前角为 15° ,切削深度为 2 mm,切削齿尺寸分别为 $\phi 8$, $\phi 13$ 和 $\phi 19$ mm,均按 45° 倒角、0.5 mm 倒角半径对其切削岩石的过程进行仿真模拟^[12],得其 von Mises 等效应力场如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着切削齿尺寸的增大, von Mises 应力先增大后减小。

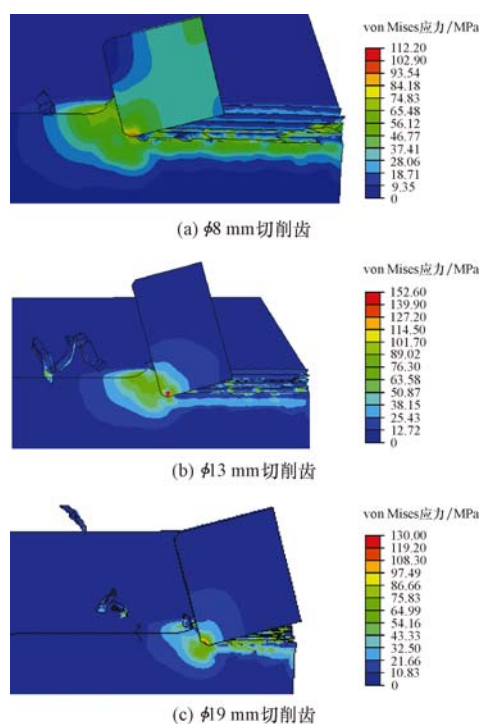


图 1 不同尺寸切削齿切削时的 von Mises 应力

Fig. 1 von Mises stress of cutters in different sizes

切削过程中切削力的变化如图 2 所示。切削齿尺寸越大,所需的切削力和系统总能量也越大,所需的钻压和扭矩越大。也就是说,在钻压和扭矩相同的条件下,小尺寸齿比大尺寸齿更容易切入岩石。因为小尺寸齿比大尺寸齿具有更高的切削刃曲率,能够在岩石的接触区域形成更大的接触应力,所以小尺寸齿的压入作用更容易使岩石发生变形破坏。

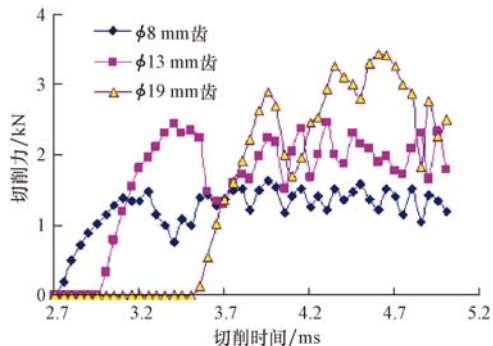


图 2 不同尺寸切削齿的切削力变化曲线

Fig. 2 Cutting strength of cutters in different sizes

在切削过程中,不同尺寸切削齿上的接触压力分布如图 3 所示。从图 3 可以看出,切削齿尺寸变大时,齿上的接触压力减小,但接触边缘处压力较大。这是因为,随着切削齿尺寸的增大,齿与岩石的接触面积随之增大,改善了切削齿的受力状态。

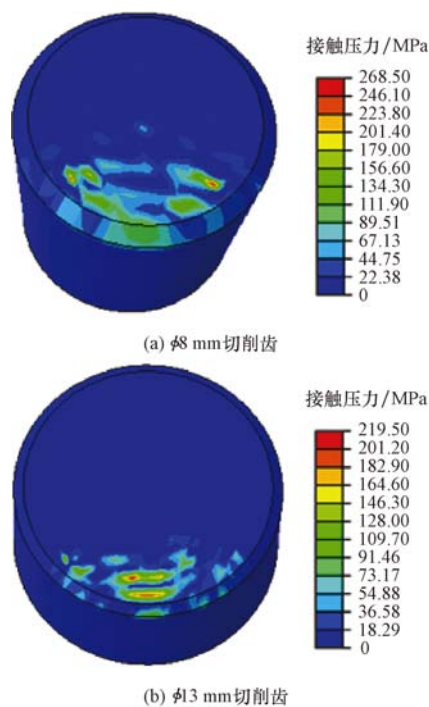


图 3 不同尺寸切削齿的接触压力分布

Fig. 3 Contact pressure of different sizes cutters

1.2.3 齿前角

齿前角是指切削齿工作面与齿柱轴线或过齿定位点处的钻头冠面外法线的夹角,是 PDC 钻头的一个重要的设计参数,对钻头性能有着很大的影响^[3,10]。为了确定适合于须家河组地层组钻进的齿前角,选取 $\phi 13$ mm 齿进行模拟分析,取切削深度为 2 mm,齿前角分别为 15° 、 20° ,PDC 齿按 45° 倒角、0.5 mm 倒角半径进行仿真模拟,得到 von Mises 等效应力场(见图 4)。

从图 4 可以看出,随着齿前角的增大, von Mises 等效应力先增大后减小,但切削齿的受力变形区域逐渐增大。齿前角变大时,开始破坏岩石时所需要的切削力(接触压力和摩擦力的合力)出现先减小后增大的现象(见图 5)。随着切削角的增大,纵向力、切削力和扭矩都呈增大的趋势。模拟结果分析表明:1)齿前角越小,切削齿越容易吃入地层,钻进速度越快;2)在相同的钻速水平下,齿前角越小,切削齿受力越小,钻压和扭矩越小。

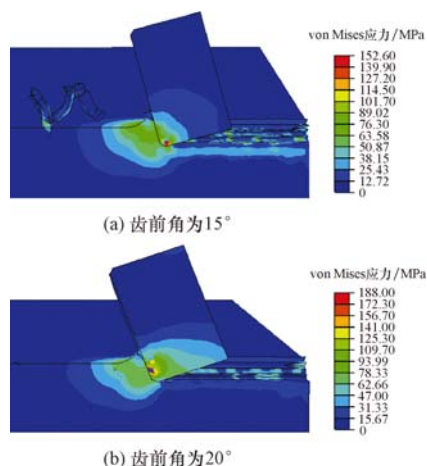


图 4 不同齿前角时的 von Mises 应力场

Fig. 4 von Mises stress of cutters in different tooth fore-angles

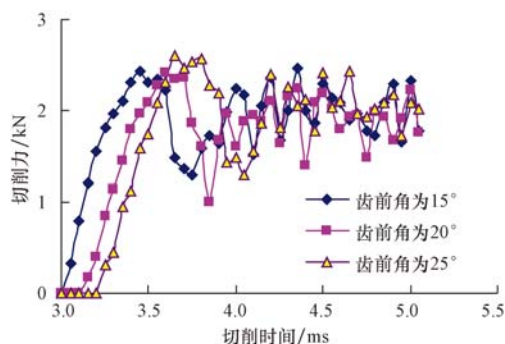


图 5 不同齿前角时的切削力变化曲线

Fig. 5 Cutting strength of cutters in different fore-angles

现场使用经验表明: 钻压和扭矩越大, PDC 钻头切削齿越容易磨损和碎裂。在切削深度相同的情况下, 齿前角过大或过小都有可能引起钻头扭矩和钻压变大, 导致切削齿磨损或损坏。因此, 综合考虑钻头的耐久性、稳定性和钻进速度, 钻进硬地层时, 选用齿前角 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、切削齿较小的 PDC 钻头。

1.3 刀翼数量

PDC 钻头的刀翼数决定钻头攻击性, 刀翼数增多, 作用在切削齿上的冲击载荷减小, 钻头的可控性提高, 钻头寿命延长; 刀翼数减少, 钻头的钻进性能提高, 具有较高的钻速。一般来说, 地层强度越高, 切削齿数越多, 刀翼数就越多。刀翼数量一般不少于 3 个, 但很少多于 10 个。对川西须家河组地层应用的 PDC 钻头进行统计分析, 得到了齿数与刀翼数的关系, 对其进行拟合, 得到确定刀翼数量的公式为:

$$B_n = -0.0001C_n^2 + 0.0640C_n + 2.8894 \quad (4)$$

式中: B_n 为刀翼数量。

根据式(4), 计算得出适合须家河组地层的

PDC 钻头刀翼数为 4.7~6.8, 取整为 5~7。其中, 须 5 段 5~6 刀翼、须 4 段 6 刀翼、须 3 段和须 2 段 7 刀翼。

1.4 钻头稳定性

1.4.1 螺旋式刀翼

螺旋式刀翼结构能分散切削齿切削地层时产生的指向井壁的切削力, 可减小钻头刀翼与井壁间的接触应力, 因而能减少钻头发生回旋运动的次数, 降低钻头回旋作用。螺旋式刀翼能使切削齿自然呈现一定的侧转角, 有助于钻井液携带岩屑, 清洗井底^[13]。此外, 螺旋式保径块可以增大与井壁的接触面, 提高钻头的稳定性。

1.4.2 保径长度

保径长度主要根据钻头稳定性和可控性能进行选择。保径长度增加, 钻头稳定性增加, 可控性能降低。保径长度计算公式为:

$$L_G = L_{G_{\max}} - \frac{H_{si}}{H_T}(L_{G_{\max}} - L_{G_{\min}}) \quad (5)$$

式中: L_G , $L_{G_{\max}}$, $L_{G_{\min}}$ 分别为保径长度及最大、最小保径长度, mm; H_{si} 为定向进尺, m。

对于 PDC 钻头, $L_{G_{\max}} = 110$ mm, $L_{G_{\min}} = 25$ mm。

由于川西须家河组地层研磨性强, 因此在进行保径设计时要适当考虑延长保径长度(一般取 50~100 mm), 以提高钻头的抗磨性能。

保径材料也是钻头选型的一个因素, 小斜度井钻进时的钻头一般用碳化钨保径材料, 大斜度井和井下动力钻进中的钻头一般使用金刚石保径材料。

2 PDC 钻头选型及应用

根据 PDC 钻头结构特征参数优化结果, 确定出川西须家河组地层 PDC 钻头选型的关键技术特征和技术参数, 并据此优选合适的 PDC 钻头型号(见表 4)。

根据钻头选型结果, 优选出的 9 种型号钻头累计应用 5 口井, 共计 42 只, 平均进尺 127.25 m, 增加 27.57%; 平均机械钻速 1.5 m/h, 提高 40.19%。其中, 新 501 井选用 $\phi 241.3$ mm MDSi616 型 PDC 钻头, 在须 4 段地层(3 628.39~4 065.00 m)进尺 436.61 m, 使用时间 161.34 h, 平均钻速达 2.70 m/h, 创造了川西地区 $\phi 241.3$ mm 井眼须 4 井段单只钻头进尺最长纪录。K507 型钻头在新场 8 井及新

表 4 须家河地层 PDC 钻头选型结果

Table 4 PDC bit selection results for Xujiahe formation

地 层	地层特点	钻头技术参数和要求	钻头型号
须 5 段	砂岩和泥岩层, 摩擦角平均 41°左右, 最高达 56°	5 或 6 刀翼, 41~49 齿, $\phi 16$ mm 抗冲击性切削齿; 抛物线形冠部轮廓	HCD505ZX、G506
须 4 段	泥岩和砂岩, 平均摩擦角 45°左右, 最高可达 56°	6 刀翼, 47~54 齿, $\phi 16$ mm 切削齿; 要求钻头抗研磨性强, 避免砾岩层钻进	MDSi616、HCD506ZX、HCD507ZX
须 3 段	泥岩和砂岩层, 平均摩擦角约为 44°, 最高达 55°, 抗压强度高	7 刀翼, 55~72 齿, $\phi 16$ 或 $\phi 13$ mm 切削齿; 抗研磨性强, 具有一定的吃入能力	HCD507ZX、G407XN
须 2 段	泥岩和砂岩层, 内摩擦角约为 46°, 最高达 57°	混合布齿, 抗研磨性强, 兼顾吃入和抗冲击能力, 钻头清洗能力强	K507、EH1317SEU

501 井 2 次入井, 总纯钻时间达到 207.5 h, 总进尺达到 383.09 m, 是川西地区须 2 段地层进尺和纯钻时间最长的钻头。

3 结 论

1) 根据须家河地层岩性特征, 建立了 PDC 钻头破岩的 ABAQUS 有限元模型, 通过优化结构参数, 形成了须家河组地层钻头选型方案。

2) 须 5 段—须 3 段宜选用攻击性强, 同时具有较强抗研磨性和抗冲击性的 PDC 钻头; 须 2 段地层研磨性极强、内摩擦角大, 不能完全发挥 PDC 钻头的优势, 建议选用具有自锐性能的孕镶金刚石钻头。

3) 软到中硬地层, 选用尺寸较大的 PDC 复合片; 中硬到硬地层, 选用尺寸小的 PDC 复合片, 齿前角控制在 10°~15°较为合理。

参 考 文 献

References

[1] 朱澄清, 杨迎新, 廖忠会, 等. 川西须家河深層岩石力学性质及可钻性研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(5): 29-31, 38.
Zhu Chengqing, Yang Yingxin, Liao Zhonghui, et al. Study on mechanical property and drillability of rock in Sichuan Xujiahe deep reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(5): 29-31, 38.

[2] 黄建林, 马飞, 刘伟, 等. 川西深層须家河组气藏提高钻速对策及实践[J]. 钻采工艺, 2006, 29(6): 16-18.
Huang Jianlin, Ma Fei, Liu Wei, et al. Strategy and practice for improving drilling speed in the deep gas reservoir of Xujiahe Group in west Sichuan Basin[J]. Drilling & Production Techn-

olgy, 2006, 29(6): 16-18.

[3] 邹德永, 梁尔国. 硬地层 PDC 钻头设计的探讨[J]. 石油机械, 2004, 32(9): 28-31.
Zou Deyong, Liang Erguo. Design of PDC bit for hard formation[J]. China Petroleum Machinery, 2004, 32(9): 28-31.

[4] 孙明光, 张云连, 马德坤. 适合多夹层地层 PDC 钻头设计及应用[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 95-98.
Sun Mingguang, Zhang Yunlian, Ma Dekun. Design and application of the PDC bit suited for multi-interbedded formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 95-98.

[5] 侯庆勇, 彭烨, 左维国, 等. 适用于长庆油田陇东地区的 PDC 钻头研发与应用[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(3): 68-70.
Hou Qingyong, Peng Ye, Zuo Weiguo, et al. Study and application of PDC bits suitable for Longdong Area of Changqing Oil-field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(3): 68-70.

[6] 罗恒荣, 唐玉响, 徐玉超, 等. 新型定向井 PDC 钻头的研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 86-89.
Luo Hengrong, Tang Yuxiang, Xu Yuchao, et al. Research and application of a new PDC bit in directional drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 86-89.

[7] 王荣, 翟应虎, 王克雄. PDC 钻头等体积布齿设计的数值计算方法[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(1): 42-45.
Wang Rong, Zhai Yinghu, Wang Kexiong. A numerical computational method for designing PDC bits with the equalvolume law[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 42-45.

[8] 许爱. PDC 钻头切削齿破岩载荷规律的分析[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2006, 33(7): 59-61.
Xu Ai. Analysis on load pattern of rock breaking of PDC bit cutter[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2006, 33(7): 59-61.

[9] 张召平, 苏新亮, 葛洪魁. 利用岩石三轴抗压强度优选 PDC 钻头[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 38-40.
Zhang Zhaoping, Su Xinliang, Ge Hongkui. Selection of polycrystalline diamond compact bits based on triaxial compressive strength of rock[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2005, 29(6): 38-40.

[10] 邹德永, 曹继飞, 袁军, 等. 硬地层 PDC 钻头切削齿尺寸及后倾角优化设计[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 91-94.
Zou Deyong, Cao Jifei, Yuan Jun, et al. Optimization design of the cutter size and back rake for PDC bit in hard formation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 91-94.

[11] 邹德永. 新型 PDC 钻头切削齿的发展[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(3): 4-6.
Zou Deyong. The development of new PDC cutting elements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(3): 4-6.

[12] 马清明, 王瑞和. PDC 切削齿破岩受力的数值模拟研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(4): 78-80.
Ma Qingming, Wang Ruihe. Numerical simulation study on force of PDC cutters cutting rock[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(4): 78-80.

[13] 安本清, 赵向阳, 王成亮, 等. 沙特 B 区块高效破岩钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 66-71.
An Benqing, Zhao Xiangyang, Wang Chengliang, et al. High efficient drilling technology in Saudi Arabia Block B[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 66-71.