

强攻击型镶齿牙轮钻头设计关键技术及应用

杨海东 汪俊锋

中海油能源发展股份有限公司工程技术湛江分公司, 广东 湛江 524057

摘 要:南海西部北部湾盆地钻井作业中,一开使用铣齿牙轮钻头和 PDC 钻头,需要 2 趟钻才能钻至涠洲组一段地层满足下表层套管需求。为解决钻井效率低、成本高问题,通过对镶齿牙轮钻头设计优化,研发出了适应北部湾盆地新近系地层区块的强攻击型镶齿牙轮钻头,实现了 1 只钻头、1 趟钻钻进至涠洲组一段地层,所形成的钻头设计关键技术北部湾盆地钻井作业中得到普遍应用,大幅提高了钻井效率。研究成果可为软硬交错地层、高含砂砾岩地层钻头设计及选型提供借鉴。

关键词:钻头选型;北部湾盆地;优快钻井;机械钻速;牙轮钻头

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.06.016

Key design technology and application of strong-attack inserted cone bit

YANG Haidong, WANG Junfeng

Engineering Technology Zhanjiang Branch of CNOOC Energy Development Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524057, China

Abstract: In the drilling operation in the Beibu Gulf Basin in the west of the South China Sea, the first spud uses milling cone bit and PDC bit, which requires two trips to drill to the first formation of Weizhou formation to meet the needs of lower surface casing. In order to solve the problems of low drilling efficiency and high capital cost, through the optimization of the design of the inserted cone bit, a strong-attack inserted cone bit suitable for this block is developed, which realizes one bit and one drill to the formation of Weizhou formation. The key technology of bit design is widely used in the drilling operation in Beibu Gulf Basin, which improves the drilling efficiency significantly. The research results can provide reference for the design and selection of drill bits for loose and hard interlocking formation and sandy conglomerate formation.

Keywords: Bit selection; Beibu Gulf Basin; Excellent fast drilling; Rate of penetration (ROP); Cone bit

0 前言

南海西部北部湾盆地地质层位自上而下分为新近系望楼港组、灯楼角组、角尾组、下洋组、古近系涠洲组

和流沙港组。常用的井身结构是:508.00 mm 隔水管 + 406.40 mm 井眼和 339.73 mm 套管 + 311.15 mm 井眼和 244.48 mm 套管 + 215.90 mm 井眼和 177.80 mm 尾管。北部湾盆地钻井事故率高,据统计,在涠西南的涠洲 10-3

收稿日期:2021-07-08

作者简介:杨海东(1985-),男,河北承德人,工程师,学士,主要从事海洋石油钻井工艺设计和研究工作。E-mail:491955451@qq.com

油田、涠洲 12-1 油田开发项目中钻井复杂事故率超过 60%，钻井成本超 2 万元 /m，是业内典型的钻井事故高发区域^[1-3]。经过多年来对井身结构的优化和探索，总结得出解决问题的关键措施之一是一开 406.40 mm 井段打穿新近系地层，将表层 339.73 mm 套管下至涠洲组一段顶部^[4-6]。

为提高效率降低钻井成本，期望实现 1 只钻头 1 趟钻完成 406.40 mm 井眼钻进。而实际作业中，铣齿牙轮钻头寿命短，无法穿越下洋组砂砾岩地层，PDC 钻头与马达配合时 MWD 工具面不稳无法实施定向钻井，常规镶齿牙轮钻头设计与地层不匹配、机械钻速低，3 种常用类型钻头均需要至少 2 趟钻完成，亟需钻头技术创新突破，在此背景下，研发了适用于该区块的强攻击型镶齿牙轮钻头，实现 1 只钻头 1 趟钻打穿新近系地层，创造中国海洋石油有限公司两项纪录，提质增效显著，钻头技术发展为井身结构调整应对涠洲组钻井难题奠定了基础。

1 地层可钻性分析

1.1 岩性特点

北部湾盆地新近系及其以上地层为一套盆地坳陷期的滨浅海相碎屑岩沉积，地层埋深较浅，下洋组底部平均垂深约 1 400 ~ 1 500 m，整个北部湾盆地内新近系地层沉积厚度相对稳定^[7-8]，典型的新近系地层特征见表 1，总结各地层序列岩性特点以及实钻情况，地层可钻性有以下特点和规律。

1) 灯楼角组及以上地层岩性以细砂岩、砂砾岩、软泥岩为主，胶结疏松，可钻性极好。

2) 角尾组以大套泥岩为主，底部少量砂岩夹层，泥岩极易水化，可钻性好。

3) 下洋组以砂岩为主，中下部地层含砾严重，砾径一般为 2 ~ 4 mm，最大砾径可达 6 mm，多为疏松的泥质胶结，整体可钻性良好，但偶有胶结致密的硬夹层，容易造成切削齿严重磨损、崩断。

表 1 地层特征统计表

Tab. 1 Statistics of stratum characteristics

地层	底部垂深 /m	岩性简要描述
望楼港组	400	上部为滨海相砂砾岩，下部为浅海相泥岩
灯楼角组	700 ~ 800	泥岩为主，夹杂黄褐色疏松砂岩
角尾组	1 100 ~ 1 200	大套泥岩为主，底部泥岩和细砂岩互层
下洋组	1 400 ~ 1 500	砂岩为主、局部含砾严重，夹灰色泥岩

1.2 抗压强度分析

抗压强度和内摩擦角是地层可钻性评价的重要参数，结合行业内对区块可钻性研究成果，通过声波测井资料，利用岩石力学软件可实现地层可钻性分析^[9-11]。

从软件分析结果可见该区块地层整体抗压强度约为 6 ~ 20 MPa，内摩擦角约 20° ~ 30°，下洋组中下部抗压强度逐渐增高，存在较多硬夹层，夹层最高抗压强度约 34 ~ 69 MPa，可钻性分析结果见图 1。

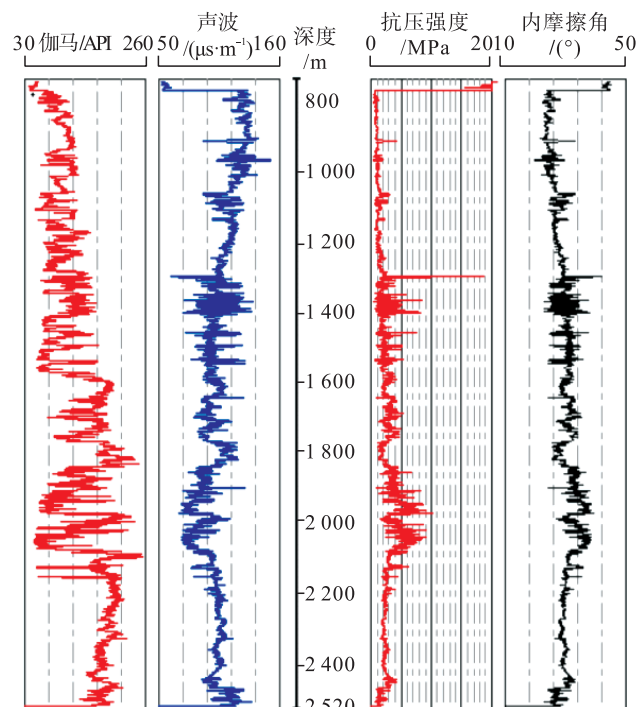


图 1 涠洲某油田地层可钻性分析图

Fig. 1 Formation drillability analysis of an oil field in Weizhou formation

1.3 钻头选型关键点

北部湾盆地新近系地层钻头选型伴随井身结构优化和油田降本增效需求开展，钻头选型上需要重点考虑几方面因素。

1) 需配合马达造斜。结合钻井作业降本需求，新近系地层定向钻井作业原则上使用马达钻具组合，要求钻头与马达配合可有效控制轨迹。

2) 进尺较长。为满足后续井段作业需求，一开井段需钻穿新近系地层，表层套管下至涠洲组顶部地层，井段最高进尺接近 2 000 m。

3) 穿越硬夹层。地层可钻性差异较大，下洋组硬夹层、砂砾岩对钻头磨损严重，钻井效率低。

2 钻头使用现状分析

北部湾盆地新近系地层钻头选型有三个阶段，使用情况存在问题如下。

2.1 铣齿牙轮阶段

铣齿牙轮钻头主要使用时期为 2014 年以前，具有成本低、可以配合马达使用的优点。表层井段使用海水拌土浆钻井液体系半开路钻进，钻井液含砂量较高，在 4 500 ~

5 000 L/min 的大排量下,流体冲刷对牙轮冲蚀十分严重,切削齿冲蚀及磨损后机械钻速急剧降低,钻进至涪洲组一段需要 2 趟钻,适用于完钻深度在下洋组顶部及以上地层的井。

2.2 PDC 钻头阶段

PDC 钻头主要使用时期为 2014 年—2016 年,具有攻击性强、穿越硬夹层能力强、机械钻速高的优点,但在定向井中,PDC 钻头与马达配合使用时 MWD 工具面极不稳定^[12],深层造斜时纯钻进效率低于 50%,定向钻进必须与昂贵的旋转导向工具配合使用,使用成本较高,主要用于直井和定向井的第 2 趟钻稳斜井段。近年国内外钻井中探索使用“牙轮—PDC”复合钻头,尝试解决 MWD 工具面不稳定、软硬交错地层钻头抗冲击等问题,取得了一定效果,也说明了牙轮钻头对解决这类问题的关键性^[13-16]。

2.3 镶齿牙轮阶段

镶齿牙轮钻头在 2016 年以后得到逐步应用,可以配合价格低廉的马达进行定向钻井,寿命长,具备单只钻头打穿新近系地层能力,但常规镶齿牙轮适用于中硬地层,抗研磨性强,攻击性弱,角尾组及以下地层机械钻速低至 10 m/h,钻井周期长,综合成本极高。

3 强攻击型镶齿牙轮钻头设计

鉴于铣齿牙轮和 PDC 钻头存在难以解决的适用性缺陷,优选出通过对镶齿牙轮钻头设计优化来解决当前钻头技术困难的方案。采用直观的思维导图原理,针对镶齿牙轮钻头应用中的痛点进行针对性的创新设计尝试,使用中开展持续的优化,研发出成熟的强攻击型镶齿牙轮钻头设计方案,形成三项镶齿牙轮钻头设计优化核心技术,强攻击型镶齿牙轮钻头设计思路见表 2。

表 2 强攻击型镶齿牙轮钻头设计思路表

Tab.2 Design ideas of strong-attack inserted cone bit

痛点	解决措施
机械钻速低	加强型镶齿设计技术
冲蚀及磨损严重	高抗研磨设计技术
高进尺达寿命极限	全掌背保护设计技术

3.1 加强型镶齿设计技术

镶齿牙轮钻头主要是针对具有研磨性的硬地层而设计,由于齿出刃低,攻击型相对较弱。在可钻性较好的新近系地层,使用镶齿牙轮会严重限制机械钻速,为解决镶齿牙轮钻头攻击性不足问题,对镶齿牙轮钻头的设计优化直接从齿入手,镶齿牙轮钻头切削齿优化示意图见图 2。

1) 优化选用硬质合金齿加长版楔齿,在不改变齿的强度和密度前提下,将齿的高度由 22.18 mm 增高至 23.83 mm,通过增加出刃高度来提升攻击性。

2) 将齿顶宽度加宽 1.2 mm,工作刃总长度大而宽,因而相对减少磨损。

3) 牙轮根据破岩工作原理分为超顶、移轴和复锥,各牙轮配合达到破岩效果,齿高和齿宽变化对三牙轮配合产生干涉。根据牙轮钻头井底击碎图等设计原理^[17-18],采用专业软件对齿圈布置进行优化,模拟钻头在井底的工作动态,对移轴定量分析计算,各圈齿运动轨迹形成包络线,优化布齿,解决齿间干涉,均衡单齿破岩量,提高寿命和破岩效率。

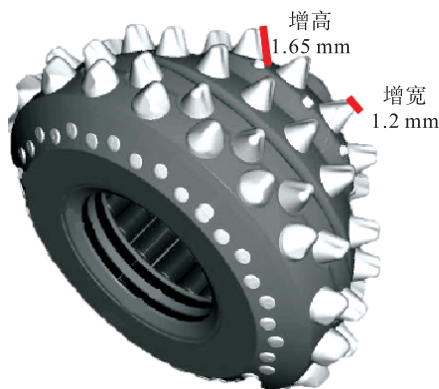


图 2 镶齿牙轮钻头切削齿优化示意图

Fig.2 Optimization of cutting teeth of the inserted cone bit

3.2 高抗研磨设计技术

海水般土浆大排量钻进对钻头流道和切削齿冲蚀问题十分严重,同时下洋组及以下地层以砂岩为主,具有一定的研磨性,针对流体冲蚀及地层研磨性造成钻头先期损坏影响寿命的问题,从以下方面进行设计优化。

1) 减少镶齿热处理后基体渗碳层车削,可以增加牙轮壳体表面硬度^[19]。

2) 三牙轮钻头水力系统的最佳设计必须满足井底岩屑的脱离—运移—举升三个基本动作的有效配合^[20-21],采用 ANSYS 软件进行井底流场数值模拟分析,增大喷嘴出口直径及优化角度,降低喷射速度,减少冲蚀。

3) 特制保径齿,在外排与背锥齿排之间增加设计特制保径齿,其目的是减少牙轮壳体磨损,修整井壁,改善钻井质量,特制保径齿设计示意图见图 3。



图 3 镶齿牙轮钻头特制保径齿设计示意图

Fig.3 Design of special diameter retaining teeth of the inserted cone bit

3.3 全掌背保护设计技术

由于镶齿加长,为保障齿的抗断力和紧固力,要求齿的直径要适当增大、齿孔深度加深、各排屑槽深度加深,从而对应的轴承壁厚会减少^[22-23]。为强化轴承保护,延长钻头寿命,特制了加强牙轮掌背设计。

1) 为提高钻头的抗研磨性,在掌背添加耐磨性较强的合金齿,掌背齿略突出背锥面,齿形采用半球形齿,具有良好的耐磨性且不容易发生破裂,可增强钻头抗缩径能力,避免过度磨损造成轴承密封泄露失效。

2) 采用全掌背保护,在掌尖位置加宽加厚敷焊硬质合金耐磨层,保护密封,镶齿牙轮钻头全掌背保护设计示意图见图 4。

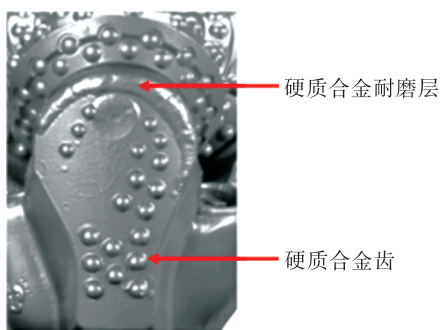


图 4 镶齿牙轮钻头全掌背保护设计示意图

Fig. 4 Palm back protection design of the inserted cone bit

4 应用效果

改进后的强攻击型镶齿牙轮钻头完全满足 1 趟钻打穿新近系地层的需求,并可根据需求钻进至涠洲组一段顶部超 200 m,在 2016 年以后的北部湾开发调整井中逐步得到普遍应用,目前基本取代铣齿牙轮和 PDC 钻头,成为区块主力钻头型号。在涠洲 6-13 油田开发项目中,改进后的强攻击型镶齿牙轮钻头 4 次打破中国海洋石油有限公司钻井纪录:A4 H 井单只镶齿牙轮钻头进尺 1 860.30 m,打破了此前的最高进尺纪录、镶齿牙轮钻头单次起下钻进尺 2 项纪录,A8 井单只镶齿牙轮钻头进尺 1 906.65 m,再次刷新该 2 项记录。

在机械钻速方面,对钻进至涠洲组一段顶部的历年典型井进行统计,铣齿牙轮钻头配合马达平均机械钻速为 64 m/h,改进后的强攻击型镶齿牙轮钻头配合马达平均机械钻速为 82 m/h,较铣齿牙轮钻头可提速 28%,不同类型钻头应用效果对比见图 5。在经济性方面,在完钻井深相似的井中,“强攻击型镶齿牙轮 + 马达”与“PDC 钻头 + 旋转导向”机械钻速基本持平。强攻击型镶齿牙轮钻头与马达配合使用可满足定向钻进中轨迹控制要求,相比使用旋转导向工具,单井费用可降低超 50 万元/井段。

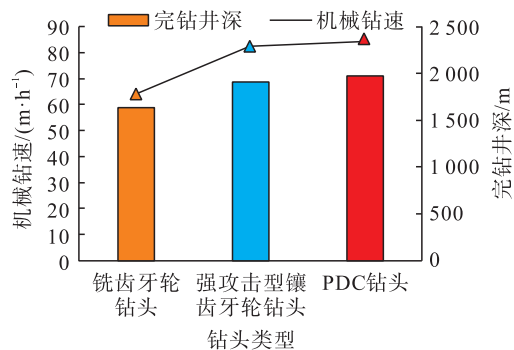


图 5 不同类型钻头应用效果图

Fig. 5 Application effect of different bits

5 结论及建议

1) 强攻击型镶齿牙轮钻头设计方案成熟,性能稳定,在北部湾盆地新近系地层钻井作业中应用占比超 90%,是北部湾盆地新近系地层的主力钻头,对类似油田钻头设计和选型具有推广借鉴意义。

2) 对于完钻层位在下洋组顶部及以上地层的井,由于地层可钻性较好,不属于强攻击型镶齿牙轮钻头的优势井段,推荐使用常规铣齿牙轮钻头,可以获得较高性价比。

3) 建议后续研究对镶齿牙轮钻头轴承及密封设计技术进行优化提升,可有效延长钻头使用寿命,有助于应对砂砾岩地层钻进安全性和稳定性,获得更高的进尺。

参考文献:

- [1] 刘贤玉,管 申,韩 成,等. 北部湾盆地开发井高效安全钻井技术[J]. 石油钻探技术,2020,48(1):21-25.
LIU Xianyu, GUAN Shen, HAN Cheng, et al. High-efficiency and safe drilling technologies for development wells in the Beibuwan Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48 (1): 21-25.
- [2] 黄凯文,刘书杰. 涠洲 12-1 北油田涠二段井壁稳定性技术[J]. 石油钻采工艺,2007(6):7-9.
HUANG Kaiwen, LIU Shujie. Technology research on sidewall stability of Weizhou 12-1 in Wei 2 area of north oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007 (6): 7-9.
- [3] 李炎军,萧 林,黄 熠. 井壁稳定技术在涠洲 11-1 油田的应用[J]. 石油钻采工艺,2007,29(6):19-21.
LI Yanjun, XIAO Lin, HUANG Yi. Application of sidewall stability technology in Weizhou 11-1 oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29 (6): 19-21.
- [4] 林四元,陈浩东,郑浩鹏,等. 北部湾盆地海上勘探井钻井提效关键技术[J]. 石油钻探技术,2018,46(4):36-41.
LIN Siyuan, CHEN Haodong, ZHENG Haopeng, et al. Key techniques for drilling and efficiency improvement of offshore exploration wells in the Beibu Gulf Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46 (4): 36-41.

- [5] 林四元, 李 中, 郭永宾, 等. 北部湾盆地探井井身结构优化设计及应用[J]. 中国海上油气, 2019, 31(4): 135-140.
LIN Siyuan, LI Zhong, GUO Yongbin, et al. Optimization design and application of casing program for exploratory wells in Beibuwan basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31 (4): 135-140.
- [6] 方长传. 海上深探井井身结构优化设计[J]. 石油天然气学报, 2013(8): 100-102.
FANG Changchuan. Optimized design of deep exploration wells in offshore oilfields [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013 (8): 100-102.
- [7] 王淑芬. 南海大陆架第三系统层方案已获统一认识[J]. 中国海上油气, 1991, 5(1): 69-70.
WANG Shufen. The third system layer scheme of the continental shelf of the South China Sea has been uniformly recognized [J]. China Offshore Oil and Gas, 1991, 5 (1): 69-70.
- [8] 罗碧华. 乌石 1-4 构造新近系层序地层与沉积相研究[J]. 内蒙古石油化工, 2012(12): 141-143.
LUO Bihua. The research of Wushi 1-4 structure of sequence stratigraphy and sedimentary facies in the neogene [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012 (12): 141-143.
- [9] 张 超, 黄凯文, 张 智, 等. 涪西南凹陷可钻性规律分析[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2013, 15(2): 56-59.
ZHANG Chao, HUANG Kaiwen, ZHANG Zhi, et al. Analysis of drillability in Southwestern Wei depression [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2013, 15 (2): 56-59.
- [10] 赵靖影, 邓金根, 谢玉洪, 等. 通用地层研磨性预测模型的建立及应用[J]. 中国海上油气, 2011, 23(5): 329-334.
ZHAO Jingying, DENG Jinggen, XIE Yuhong, et al. Establishment and application of a universal prediction model of formation abrasivity [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23 (5): 329-334.
- [11] 李忠慧, 方满宗, 杨 恺, 等. 岩石抗钻能力界定新方法——五参数法[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4): 412-416.
LI Zhonghui, FANG Manzong, YANG Kai, et al. A new method for defining rock drilling resistance: five-parameter method [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40 (4): 412-416.
- [12] 韩 成, 韦龙贵, 陈浩东, 等. 南海西部油田常规探井钻井提速配套技术[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(5): 567-571.
HAN Cheng, WEI Longgui, CHEN Haodong, et al. ROP enhancing technologies applied in conventional exploration wells in western South China Sea Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40 (5): 567-571.
- [13] 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.
- [14] MIAO S, BLACKMAN M, LUO J, et al. Hybrid bit produces breakthrough performance in heterogeneous formations in China [C] // Offshore Technology Conference Asia, 22-25 March, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: SPE; DOI: 10.4043/26357-MS.
- [15] LIU Y, CHEN M, SHENG S, ZENG J. Optimization leads to improved hybrid bit design and enhanced drilling efficiencies in challenging vertical application in Tarim Basin, China [C] // International Petroleum Technology Conference, 14-16 November, 2016, Bangkok, Thailand. New York: SPE; DOI: 10.2523/IPTC-18755-MS.
- [16] 王明华. 新型钻井提速工具在龙岗气田软硬交替地层中的成功应用[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 80-84.
WANG Minghua. Application of novel speedup drilling tools in alternate layers of soft and hard rocks in the Longgang Gas Field, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35 (7): 80-84.
- [17] 李树盛, 田代玉, 谭春飞, 等. 牙轮钻头齿圈布置设计分析[J]. 石油学报, 1998, 19(2): 122-125.
LI Shusheng, TIAN Daiyu, TAN Chunfei, et al. A design analysis of tooth-row arrangement on rock bit [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19 (2): 122-125.
- [18] 李树盛, 田代玉, 蔡镜仑. 牙轮钻头牙齿破岩过程仿真[J]. 石油机械, 1996(11): 13-16.
LI Shusheng, TIAN Daiyu, CAI Jinglun. Simulation of rock disintegrating process by roller cone bits [J]. China Petroleum Machinery, 1996 (11): 13-16.
- [19] 程巨强. 牙轮钻头材料及渗碳层组织分析[J]. 岩屑机械气动工具, 2016(4): 36-38.
CHENG Juqiang. Analysis of cone bit's material and microstructure of its carburized case [J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2016(4): 36-38.
- [20] 熊继有, 廖荣庆, 孙文涛, 等. 三牙轮钻头水力系统的研究与应用[J]. 天然气工业, 2000, 20(4): 40-43.
XIONG Jiyou, LIAO Rongqing, SUN Wentao, et al. Study and application of the hydraulic system of three roller bit [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20 (4): 40-43.
- [21] 熊继有, 袁其骥, 邓明川, 等. 三牙轮钻头井底漫流速度计算探讨[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(4): 44-47.
XIONG Jiyou, YUAN Qiji, DENG Mingchuan, et al. Study about the cross-flow speed calculation for tricone bit in bottom [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22 (4): 44-47.
- [22] 韩福彬, 杨明合, 翟应虎, 等. 牙轮钻头损坏分析及应对措施[J]. 天然气工业, 2008, 28(4): 76-77.
HAN Fubin, YANG Minghe, ZHAI Yinghu, et al. Analytic study on damage mechanism of rock bits and corresponding measures suggested [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28 (4): 76-77.
- [23] 江汉石油管理局钻头厂. 江汉钻头使用手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
Bit factory of Jianghan Petroleum Administration Bureau. Operation manual of Jianghan bit [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.