

# 桥古 1 井快速钻进 PDC 钻头优化设计与效果分析

张建平

(武汉亿斯达工具有限公司, 湖北武汉 430205)

**摘要:**为了提高桥古 1 井山前构造地层中的钻进速度, 对拟用于该井的 PDC 钻头进行了优化设计。在详细分析该井的地层特点以及邻近区块相似层位井段钻头使用资料的基础上, 提出了针对性的优化方案, 采用了力平衡布齿设计、等切割轮廓、CFD 优化水力结构等现代 PDC 钻头设计技术, 对常规 PDC 钻头在山前构造中易磨损、易泥包、机械钻速慢等缺陷进行了设计改进。所设计的钻头在桥古 1 井共使用了 2 只, 使用井段为 2 075.12~4 959.00 m, 总进尺 2 883.88 m, 纯钻时间 519.2 h, 平均钻速 5.55 m/h, 比设计预期的 3.50 m/h 提高了 58.57%, 比预计的工期缩短了 30 d。桥古 1 井的钻井实践表明, 提出的钻头选型和优化设计方案可行, 同时为山前构造地层优快钻井积累了宝贵经验。

**关键词:**PDC 钻头 山前构造 钻头设计 水力参数设计 切削结构 桥古 1 井

中图分类号: TE921<sup>+</sup>.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2012)06-0119-05

## Design Optimization and Effect Analysis of Fast Drilling PDC Bit for Well QG-1

Zhang Jianping

(Wuhan Eastar Tool Company Limited, Wuhan, Hubei, 430205, China)

**Abstract:** In order to improve the drilling speed of Well QG-1 in the piedmont structural formation, the design of PDC bits was optimized. Based on careful analysis of the formation characteristics and bit data of similar layers in adjacent blocks, pertinent optimization scheme was put forward, which used modern PDC bit design methods such as force balance of cutters arrangement design, equal cutting profile, and CFD optimization of hydraulic structure. Defects of conventional PDC bit in piedmont structure such as easy abrasion, easy balling, slow drilling speed were modified. Two such designed bits altogether were used in Well QG-1, to drill from 2 075.12 m to 4 959.00 m. With a total footage of 2 883.88 m, the net drilling time of 519.2 h, the average drilling speed was 5.55 m/h, which is 58.57% faster than the expected design of 3.50 m/h, resulting in a reduction of drilling time of 30 d. Drilling in Well QG-1 showed the methods of bit selection and design optimization were feasible, at the same time precious experience for piedmont formation drilling was accumulated.

**Key words:** PDC bit; piedmont structure; bit design; hydraulics design; cutting structure; Well QG-1

桥古 1 井位于新疆维吾尔自治区库车县齐满乡大博孜村境内, 构造位置处于塔里木盆地沙雅隆起雅克拉断凸库纳斯 1 号构造 2 号高点, 设计井深 5 800 m。通过深入分析该区块的地层岩性, 已知桥古 1 井属于山前构造井, 而且泥岩含膏、泥岩含灰质成分, 地层倾角大; 从上部已钻地层可知, 钻进过程中还有较严重的跳钻情况发生, 下部钻进过程中还可能钻遇盐水层, 同时山前构造地层具有压实程度高、地层可钻性差、钻井液密度高等特点。以上因素

严重影响了该区块的钻井速度。为此, 笔者对该井选用的 PDC 钻头进行了优化设计, 以提高桥古 1 井山前构造地层的钻进速度。

收稿日期: 2012-07-10; 改回日期: 2012-10-08。

作者简介: 张建平(1974—), 男, 江苏如皋人, 1997 年毕业于武汉理工大学机械设计专业, 工程师, 主要从事金刚石钻头的研究开发工作。

联系方式: 15927664510, 179869915@qq.com。

## 1 PDC 钻头使用难点

通过对桥古 1 井所在地区地层资料和同处于山前构造带已完钻邻井钻头使用情况的分析认为,桥古 1 井要实现快速钻进,必须在 PDC 钻头的选型及设计方面取得突破。目前山前复杂地层 PDC 钻头使用的难点在于其地层本身的特殊性和钻头与地层之间的不适应性。山前复杂地层 PDC 钻头的使用难点主要表现在以下 5 个方面。

1) 岩性变化快,软硬交错频繁,基本不存在大段的均质岩层,需要钻头具有较强的抗冲击性能<sup>[1]</sup>。桥古 1 井一开钻进中,因为频繁钻遇夹层,已经出现了严重的跳钻现象。

2) 从与桥古 1 井相邻的齐满 1 井、沙 53 井和沙 84 井牙轮钻头的使用情况看,该区块大部分井段岩性抗压强度应属中到硬,需要提高 PDC 钻头切削齿吃入地层的能力。

3) 山前构造带普遍存在高压气层、复合盐膏层、大段蠕动地层,加之地应力高、钻井过程中使用的钻井液密度较高(如沙 84 井钻井液最高密度达 1.74 kg/L),钻井液的流动性、携屑能力较差,同时泥岩极易遇水膨化粘附在钻头上造成泥包<sup>[2]</sup>,从而降低了机械钻速。因此,必须对钻头的水力结构进行优化,以使岩屑能够及时排离井底,并且防止钻头泥包。

4) 在吉迪克组下部极有可能出现塑性蠕动地层<sup>[3]</sup>。如沙 84 井在井深 5 450~5 470 m 及 5 500~5 527 m 钻遇一套塑性蠕动地层,在该井段多次起下钻遇阻,划眼后停待 48 h 后  $\phi 215.9$  mm 钻头仍难以通过,后经测井证实该井段井径为 152.4~165.1 mm,为典型的塑性蠕动地层。对于 PDC 钻头而言,遇到该类地层对于钻头保径齿和保径段的损害较大,极有可能发生钻头保径齿损坏,造成整个钻头失效。

5) 为了提高机械钻速,往往需要使用中、高速的井下动力钻具,但在钻遇复杂地层(如软硬频繁交错地层),该类钻具不能降低钻头转速,造成钻头在高转速下穿越夹层使切削齿损坏。

## 2 PDC 钻头选型和设计

### 2.1 PDC 钻头初步选型

对周边地区钻井情况进行调研,发现桥古 1 井

所处区块的地层岩性情况与巴楚区块有一定相似性,2 个区块的相同井段均含较多的含膏泥岩,且主要岩性均为泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩等的互层。在巴楚区块的 BK10H 井,用 1 只  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头钻进 2 292.22 m,平均钻速 9.91 m/h,使用效果良好。使用后的钻头磨损情况如图 1 所示。

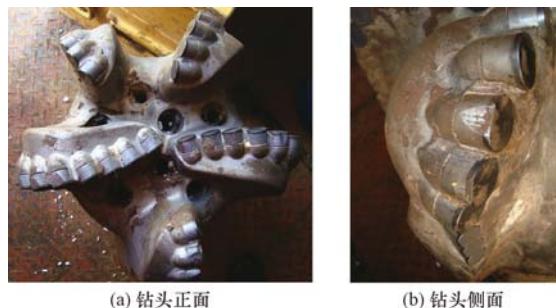


图 1 BK10H 井  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头磨损情况

Fig. 1 Wear situation of  $\phi 311.1$  mm EM1915S in Well BK10H

从图 1 可以看出,该钻头切削齿属于正常均匀磨损,没有出现明显的切削齿冲击破碎现象。这说明该钻头对于主要岩性为泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩等互层的地层具有较好的适应性。

另外,也考察了同属山前构造的都护府区块的钻头使用情况。在都护府区块的 DUH-2 井,  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型钻头进尺 3 275.24 m,平均钻速 4.79 m/h,使用后的钻头磨损情况如图 2 所示。

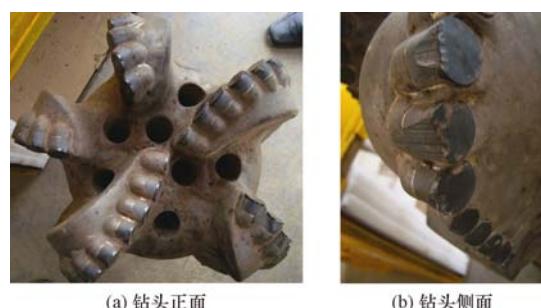


图 2 DUH-2 井  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头磨损情况

Fig. 2 Wear situation of  $\phi 311.1$  mm EM1915S in Well DUH-2

从图 2 可以看出,该钻头外侧切削齿磨损较为严重,同时也有冲击破碎现象。分析认为,这是由于该区块地层倾角大、断层多、井斜角大,用该钻头纠斜造成钻头外侧切削齿受到了较大冲击载荷,这也说明需要提高该钻头切削齿的耐冲击性。

综合以上调研分析,选定  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头作为桥古 1 井  $\phi 311.1$  mm 井段的初选钻头。同时,由于桥古 1 井所处区块兼有巴楚区块和都护府区块的地层特点,既处于山前构造又具有复杂的岩性,可钻性更差。因此,初定的  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头必须进行针对性的改进设计。

## 2.2 钻头优化设计

### 2.2.1 布齿设计

针对桥古 1 井所处区块地层软硬交错变化频繁的特点,采用力平衡布齿设计,对 PDC 钻头上的每一个切削齿进行受力矢量分析计算,把切削齿在井底承受的侧向不平衡力控制在一个极小的范围内(不平衡力为钻压值的 0.2%,径向分力和切向分力之比为 1:1,如图 3 所示),使钻头整体受力动态平衡,抑制回旋趋势,以提高钻头在井底的工作稳定性<sup>[4]</sup>。同时,使侧向不平衡力的径向分量略大于切向分量,降低钻头的反扭矩。另外,在力平衡设计的基础上采用渐开线前螺旋布齿,使同一刀翼上的切削齿依次接触地层,使切削齿以更加平稳的方式切削地层<sup>[5]</sup>。

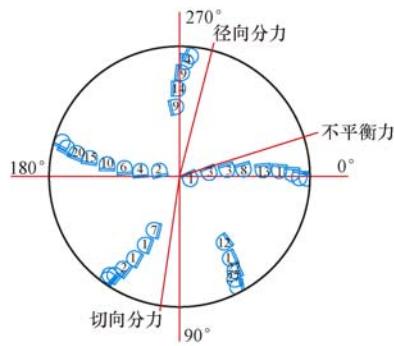


图 3 钻头整体受力分析

Fig. 3 Bit force evaluation and analysis

### 2.2.2 非对称刀翼设计

钻头采用非对称刀翼设计,通过计算每个切削齿的切削体积来确定刀翼圆周位置,使每个刀翼工作面具有足够的排屑空间。另外,对称刀翼设计的钻头极易与井底发生类齿轮啮合现象而产生周期性震动,导致钻头产生回旋<sup>[6]</sup>。非对称刀翼设计的钻头可以有效破坏在井底产生周期性震动的趋势,避免由此产生钻头回旋的可能性,从而降低钻头的冲击载荷。

### 2.2.3 优化切削齿工作角度

对于山前构造带中下部地层,为保证切削齿具有一定寿命,其切削角一般为 20°、25° 和 30°,钻头吃入地层的能力差、攻击性不强,影响机械钻速<sup>[7]</sup>。在优选更耐磨、耐冲击的 PDC 切削齿的基础上,采用渐变切削角度设计,将切削角减小为 13°、15°、18°、20° 和 30°,从钻头中心向外侧保径部分逐渐增加,这样既可加强肩部以内 PDC 齿吃入地层的能力,又能使肩部以外的切削齿具有较强的抗冲击性,使钻头能获得较高的机械钻速和较长的寿命<sup>[8]</sup>。

### 2.2.4 采用等切削轮廓设计

从巴楚区块和都护府区块的钻头使用情况看,PDC 钻头切削齿不同部位的磨损是不同的,往往内锥部分还是完好的,外侧肩部已经出现较大的磨损,即使在同一个部位也会出现不同的磨损量。为了保证相同部位的切削齿具有相同的磨损量,并尽可能延长切削齿寿命,在保持原有钻头轮廓对地层攻击性的基础上,采用了等切削轮廓设计。运用切削结构力学分析软件优化钻头轮廓设计,使钻头的内锥、鼻部至肩部、保径等区域切削齿后倾角的变化与更协调的钻压分配相适应,与钻头扭矩匹配,对于易磨损的钻头鼻部、肩部位置采用了等切削功设计,提高了钻头的稳定性<sup>[9]</sup>。图 4 为钻头切削齿在井底的轮廓覆盖示意图,其中不同颜色代表了不同轮廓部位的切削齿;图 5 为经过优化设计后的切削齿的切削功和切削力的变化趋势曲线(图中, A、B 范围内的切削齿,对应于图 4 中蓝色切削齿部分,为肩部主切削齿)。

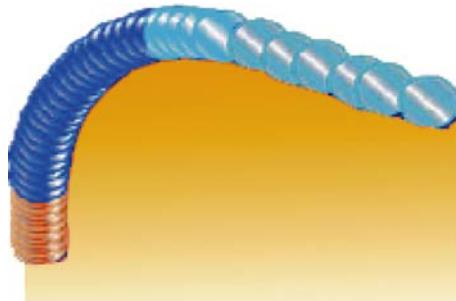


图 4 切削齿在井底的覆盖轮廓

Fig. 4 Bottomhole coverage pattern of cutters

从图 5 可以看出,该 PDC 钻头外侧肩部主切削齿的切削功和切削力波动较小,曲线变化平缓,基本处于同一值域范围内,做到了等切削功设计。

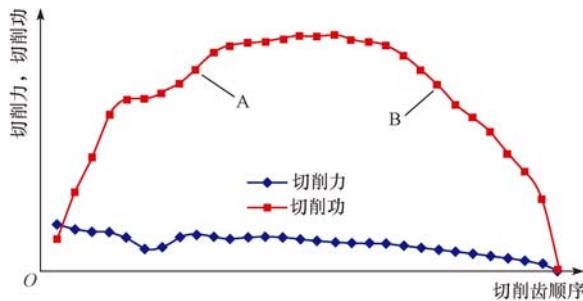


图 5 切削力和切削功曲线

Fig. 5 Cutting force and cutting power curves

### 2.2.5 水力结构优化设计

PDC 钻头在井底的工作流场属于复杂的三维湍流流场,为了提高该钻头的井底清洗能力和对切削齿的冷却能力,应用 CFD 软件在高性能计算机上模拟了 PDC 钻头的井底流场。

通过分析各个喷嘴射流流场的携岩质量、射流轴心速度、射流轴心湍动能以及射流轴心压力,确定相对最佳的喷嘴空间位置,尽可能消除钻头井底速度场中的低压低速区、回流区,因为这些区域容易导致钻头出现泥包现象。同时,避免多股射流的互相干扰,充分利用水力能量<sup>[10]</sup>。

采用 CFD 软件对井底流场进行模拟优化设计:一方面使井底流场具有流畅的流线形态,使钻井液可以及时将岩屑带离井底,防止重复破碎,有效提高钻速(见图 6)<sup>[11]</sup>;另一方面,采用该技术对流经切削齿的钻井液湍动能进行优化控制,保证每一颗切削齿都能得到充分的清洗和冷却,有效延长切削齿寿命(见图 7)。

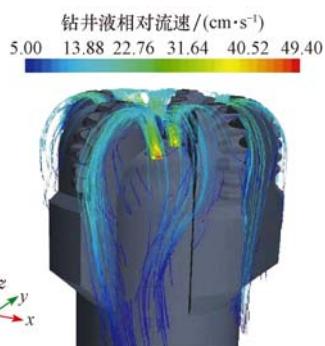


图 6 优化后较为流畅的流线

Fig. 6 Optimized smooth stream-line

## 3 现场应用及效果

在桥古 1 井实际钻进中,Φ311.1 mm 井段共应用

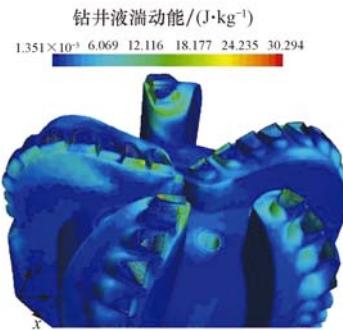


图 7 优化后湍动能的分布

Fig. 7 Optimized turbulent kinetic energy distribution

了 2 只优化后的 Φ311.1 mm EM1915S 型钻头,比钻井设计中该井段需要 3 只 PDC 钻头少用 1 只。

### 3.1 第 1 只钻头使用情况

第 1 只 Φ311.1 mm EM1915S 型钻头钻进井段为 2 075.12~4 040.83 m,纯钻时间 310.5 h,机械钻速 6.33 m/h。钻头起出后切削齿只有轻微磨损,如图 8 所示。



图 8 第 1 只 Φ311.1 mm EM1915S 型 PDC 钻头磨损情况

Fig. 8 Wear situation of the first Φ311.1 mm EM1915S

### 3.2 第 2 只钻头使用情况

钻进井段为 4 040.83~4 959.00 m,纯钻时间 208.7 h,机械钻速 4.4 m/h。钻头起出后切削齿只有轻微磨损,如图 9 所示。



图 9 第 2 只 Φ311.1 mm EM1915S 型 PDC 钻头磨损情况

Fig. 9 Wear situation of the second Φ311.1 mm EM1915S

桥古 1 井  $\phi 311.1$  mm 井段使用的 2 只  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头累计进尺 2 883.88 m, 总纯钻时间 519.2 h, 平均机械钻速 5.55 m/h, 比钻井设计的机械钻速 3.50 m/h 提高了 58.57%, 比预计工期缩短了 30 d, 大幅降低了该井二开钻井成本。

## 4 结论及建议

1)  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头, 在桥古 1 井所在区块地层具有较好的适应性, 具有进尺大、机械钻速快的优点, 通过改进和应用该型钻头, 使该井二开阶段的工期缩短了 30 d, 取得了较好的经济效益。

2) 采用力平衡布齿、等切削轮廓和不对称刀翼布置是一种针对山前构造地层复杂岩性 PDC 钻头的、有效的切削结构设计方案。

3) 采用渐变切削角度设计, 将切削角由内到外依次设计为  $13^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$ , 有效提高了钻头切削齿吃入地层的能力, 同时外侧采用较大的切削角度, 可以增强外侧切削齿的抗冲击性能。

4) 采用 CFD 技术对井底流场进行模拟优化设计, 对于提高 PDC 钻头在山前构造地层中深井复杂情况下的水力性能具有积极意义, 能够及时排出井底岩屑、避免重复切削、有效防止钻头泥包, 从而提高机械钻速。

5) 建议将  $\phi 311.1$  mm EM1915S 型 PDC 钻头优化设计与应用的成功经验借鉴到  $\phi 215.9$  和  $\phi 165.1$  mm 等尺寸 PDC 钻头中, 并进行进一步的现场试验、应用。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 熊继有, 蒲克勇, 周健. 库车坳陷山前构造超深井岩石可钻性研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 59-61.  
Xiong Jiyou, Pu Keyong, Zhou Jian. Rock drillability investigation for ultra-deep well drilling at thrust structure of Kuqa depression[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11): 59-61.
- [2] 刘佑云. 塔里木轮南地区 PDC 钻头泥包原因分析及对策[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(10): 59-61.  
Liu Youyun. Tarim Lunnan PDC bit balling cause analysis and countermeasures[J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23(10): 59-61.
- [3] 关绍曾, 关世桥. 新疆库车盆地吉迪克组的地层时代和沉积环境[J]. 化工矿产地质, 2002, 24(1): 1-6, 22.  
Guan Shaozeng, Guan Shiqiao. Stratigraphic age and depositional environment of Jidiike Formation in Kuche basin of Xinjiang[J]. Geology of Chemical Minerals, 2002, 24(1): 1-6, 22.
- [4] 詹姆斯·福德·布雷特, 汤米·梅尔文·沃伦. 不平衡力补偿钻头: CN, 90100960. 1[P]. 1990-09-05.  
Bret F J, Warren T M. Imbalance compensated drill bit: CN, 90100960. 1[P]. 1990-09-05.
- [5] 杨延征, 王镇全. 刮刀式 PDC 钻头布齿方法探讨[J]. 西部探矿工程, 2009, 21(5): 41-42.  
Yang Yanzheng, Wang Zhenquan. Blade type PDC bit cutters arrangement method[J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21(5): 41-42.
- [6] 李树盛, 马德坤, 侯季康. PDC 钻头运动学研究[J]. 石油矿场机械, 1996, 25(4): 26-29.  
Li Shusheng, Ma Dekun, Hou Jikang. Study on kinematics of PDC bit[J]. Oil Field Equipment, 1996, 25(4): 26-29.
- [7] 王镇全, 周悦辉. PDC 钻头切削齿切削角度对破岩效果影响规律的研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(8): 49-51.  
Wang Zhenquan, Zhou Yuehui. Study on rock breaking regulation in optimizing cutting angle of PDC bit[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(8): 49-51.
- [8] 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.
- [9] 刘向东, 屈钧利. PDC 钻头布齿参数对其强度影响的研究[J]. 石油机械, 2009, 37(12): 59-62.  
Liu Xiangdong, Qu Junli. Study on impact on the strength of PDC bit cutter parameters[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(12): 59-62.
- [10] 黄英勇, 李根生, 宋先知, 等. PDC 钻头定向喷嘴井底流场数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 99-103.  
Huang Yingyong, Li Gensheng, Song Xianzhi, et al. Numerical simulation of bottomhole flow field of PDC bit with orientation nozzle[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 99-103.
- [11] 胡军, 杨作峰. PDC 钻头井底流场数值模拟研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2011, 8(11): 41-43.  
Hu Jun, Yang Zuofeng. Study on numerical simulation of bottomhole flow field of PDC bit[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2011, 8(11): 41-43.