

巴彦河套新区异形齿PDC钻头研究与应用

陈新海

(渤海钻探工程技术研究院,河北任丘062550)

摘要:为了巴彦河套新区油气资源高效开发,(1)通过测井数据、岩心实验以及实钻数据,开展了该区地层岩性可钻性分析,表明白垩系埋深较深地层以及太古界片麻岩地层可钻性差;(2)调研了该区以及外部区块难钻地层异形齿钻头实钻情况,白垩系5000 m以深地层以及太古界地层单只钻头进尺少,机械钻速低,调研的外部区块塔里木塔河南难钻地层通过使用异形齿钻头,提速效果显著;(3)对比分析了平面齿、斧形齿、多棱齿以及锥形齿破岩机理,为后续钻头优化设计提供了理论支撑;(4)开展了异形齿PDC钻头现场实验,较常规PDC钻头单只进尺以及机械钻速均取得了显著的提升,其中有21口井实现二开“一趟钻”,总进尺30000余米。总之根据地层可钻性变化,优配平面齿、斧形齿、多棱齿以及锥形齿,提高钻头与地层的配伍性,可显著提高钻井效率。

关键词:PDC钻头;多棱齿;锥形齿;斧形齿;钻井提速;巴彦河套

中图分类号:TE921;P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)05-0127-09

Research and application of special-shaped tooth PDC bits in Bayanhetao New Area

CHEN Xinhai

(Research Institute of Engineering Technology of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Renqiu Hebei 062550, China)

Abstract: For the efficient development of oil and gas resources in Bayanhetao New Area, research has been conducted on special shaped PDC bits. Based on well logging data, core assay and actual drilling data, the lithology analysis of the strata in this area is carried out, and finds that the drillability of the strata in the deep Cretaceous and the Archean gneiss strata is poor. The drilling results of special tooth bits in poor drillable formation in this area and the outer blocks are investigated, and show that the footage per bit in Cretaceous strata below 5000m and the Archean strata is small with low mechanical drilling rate, while drilling speed is remarkably increased in the Tarim Tahenan difficult area. The rock breaking mechanism of plane teeth, axe teeth, polygonal teeth and conical teeth is compared and analyzed, which provides theoretical support for subsequent optimization design of drill bits. Field tests were carried out on special-tooth bits, which significantly improved the penetration and ROP compared to conventional PDC bits. Twenty-one of the wells achieved “one-trip” drilling for the second well section with a total footage of more than 30000m. In short, according to the formation drillability, to improve the drill bit and formation compatibility through the optimal matching of plane teeth, axe teeth, polygonal teeth and cone teeth can significantly improve drilling efficiency.

Key words: PDC bit; polygonal tooth; conical tooth; axe tooth; drilling speed-up; Bayanhetao

0 引言

巴彦河套区块属华北油田新获矿权区块,有望成为储量建产接替远景区,资源量丰富,勘探面积

大。该区地质情况复杂,发育有片麻岩、黄铁矿、含膏泥岩等复杂岩性,岩石可钻性差、机械钻速低,在钻井提速方面急需开展相关研究。为进一步摸清

收稿日期:2021-02-23;修回日期:2022-07-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.05.018

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“华北油田持续有效稳产钻完井关键技术研究与应用”(编号:2017E-1511);渤海钻探工程技术研究院“深井、超深井钻完井提速增效与储层改造研究与推广”(编号:2021T-01)

作者简介:陈新海,男,汉族,1987年生,工程师,钻井设计专业,硕士,从事钻井提速工作,河北省任丘市钻研所小区,cxhzys@126.com。

引用格式:陈新海.巴彦河套新区异形齿PDC钻头研究与应用[J].钻探工程,2022,49(5):127-135.

CHEN Xinhai. Research and application of special-shaped tooth PDC bits in Bayanhetao New Area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5):127-135.

资源潜力,开发油气资源,华北油田已部署了多口探井、开发井。但该区作为新区,钻头选型不成熟,需根据地层岩性分析和已钻井调研情况等开展研究分析,明确该区的钻头优选方向。

1 地层岩性分析

巴彦河套区块自上而下钻遇的地层为第四系、新近系、古近系、白垩系以及太古界地层。以吉华1-1井和吉华1-2井为例进行分析,图1、图2为其钻时曲线,由图中可以看出,太古界顶面以上白垩系及以上地层钻时少,可钻性好;太古界顶面以下除顶部风化段,可选性相对好外,其余可钻性较差。

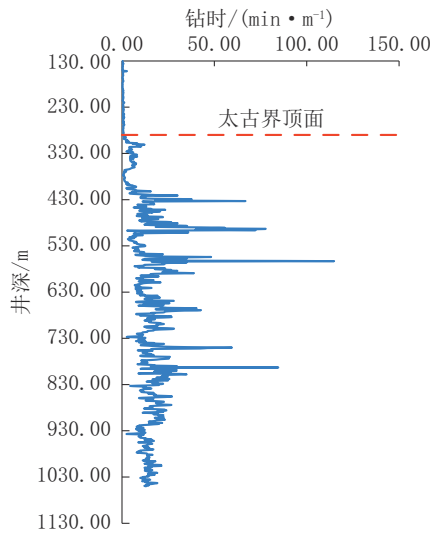


图1 吉华1-1井钻时

Fig.1 Drilling time of Well Jihua 1-1

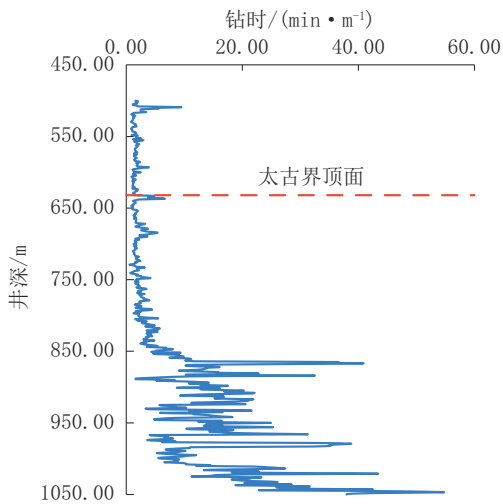


图2 吉华1-2井钻时

Fig.2 Drilling time of Well Jihua 1-2

图3、图4为吉华1-1井和吉华1-2井测井曲线,不同井的岩石单轴抗压强度波动较大,硬度不同;内摩擦角变化不大,具体数值见表1。

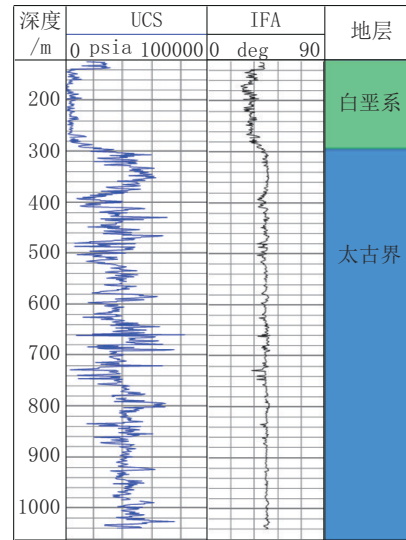


图3 吉华1-1井测井数据

Fig.3 Logging data of Well Jihua 1-1

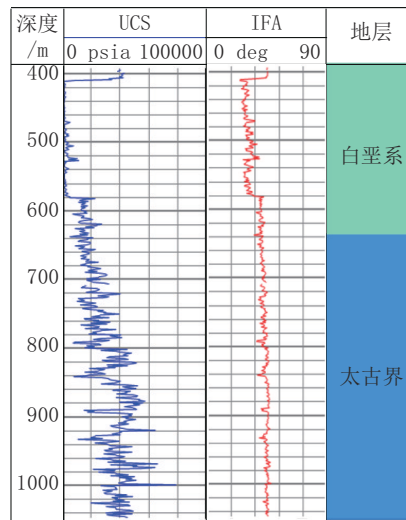


图4 吉华1-2井测井数据

Fig.4 Logging data of Well Jihua 1-2

表1 抗压强度及内摩擦角数据
Table 1 Compressive strength and internal friction angle data

井号	单轴抗压强度/MPa	内摩擦角/(°)
吉华1-1井	主体 275.8, 波动范围 137.9~413.7	40~45
吉华1-2井	主体 124.1 升高至 275.8, 波动范围 68.9~413.7	39~45

综合图1~4分析可知,白垩系以上地层以砂泥岩为主,可钻性较好。太古界地层以片麻岩为主,上部风化段可钻性相对好,下部地层研磨性强,可钻性差。图1~4可相互佐证。根据地层岩性变化,在摸清地层的情况下,太古界上部风化段及以上地层针对性优选钻头首先保障机械钻速兼顾单只进尺,太古界上部风化段以下地层针对性优选钻头首先保障钻头单只进尺,提高钻头抗研磨性,兼顾机械钻速。

为进一步认识太古界地层岩性,开展了吉华1井和吉华钻孔2井的岩石力学实验。选取4组岩心进行单轴及三轴岩石力学试验(见图5)。计算其内摩擦角、粘聚力、泊松比等参数(见表2)。为后续的钻头优选提供数据支持。由数据可知单轴抗压强度100~150 MPa,内摩擦角35°~45°,岩石硬度大,抗研磨性强。



(a) 吉华1井 (b) 吉华钻孔2井

图5 岩心及测试情况

Fig.5 Core and testing results

2 实钻情况调研

2.1 本区块实钻情况调研

2.1.1 白垩系及以上地层

以砂泥岩为主,埋深较浅的地层可钻性较好,随着埋深的增加,可钻性变差。该区块早期(20世纪80年代)深井钻探数量较少,且钻井周期在1年以

上。2014年(隆1井)钻井周期85 d,近期完钻井的临华参1井钻井周期60 d,下部井段实钻数据见表3,虽然钻井提速取得了显著成效,但在深层白垩系底部5000 m以下机械钻速较低(1.50 m/h左右)。

表2 岩石力学实验数据

Table 2 Experimental data of rock mechanics

井号	岩心编号	长度/mm	直径/mm	围压/MPa	单轴抗压强度/MPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
吉华1	1-6/16-2	48.20	25.04	0	69.7660	0.210	11.88	42.36
	1-6/16-1	51.84	25.10	10	155.9713	0.204		
吉华钻孔2	3-1/6	52.30	25.00	0	73.8845	0.225	12.92	41.42
	9-5/10	52.66	25.02	10	155.6401	0.228		

表3 临华参1井深层钻头统计表

Table 3 Data of deep drill bits in Linhuacan-1 well

钻头尺寸/mm	钻头类型	钻进井段/m	所钻地层	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
216	PDC钻头	4728.65~4868.76	白垩系	140.11	5.84
216	取心钻头	4868.76~4877.36	白垩系	8.60	5.73
216	PDC钻头	4877.36~4992.60	白垩系	115.24	4.12
216	取心钻头	4992.60~4993.61	白垩系	1.01	0.20
216	牙轮钻头	4993.61~5005.00	白垩系	11.39	1.63
216	PDC钻头	5005.00~5158.00	白垩系	153.00	1.46

2.1.2 太古界地层

片麻岩发育、硬度高、非均质性强、可钻性差,常

规PDC钻头使用受限。以吉华1区块为例,该区块开展了常规PDC钻头现场试验,试验结果表明,

PDC钻头对该地层适应性差,切削齿崩损快,单只进尺少,米进尺成本高,后期该区块片麻岩地层均采用牙轮钻头,二开井段消耗钻头至少为1只PDC钻头和2只牙轮钻头,且平均机械钻速不到4 m/h。

根据前期已钻井统计,平均机械钻速3.57 m/h,

平均进尺160 m,其中PDC钻头平均进尺82.9 m,平均机械钻速3.59 m/h。牙轮钻头平均进尺171 m,平均机械钻速3.54 m/h。由实钻情况(表4)可以看出PDC钻头和牙轮钻头机械钻速均较低,PDC钻头的单只进尺不足牙轮钻头的50%。

表4 部分井实钻数据

Table 4 Actual drilling data of some wells

井号	钻头尺寸/mm	钻头类型	钻进井段/m	所钻地层	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
JHZK5	216	PDC钻头	484.66~587.16	太古界	102.5	3.62
	216	牙轮钻头	587.16~759	太古界	171.84	1.96
	216	牙轮钻头	760.5~800	太古界	39.5	2.08
吉华1	216	PDC钻头	345~529	太古界	184	5.41
	216	牙轮钻头	627~728	太古界	101	4.04
	216	PDC钻头	728~942	太古界	99	3.96
	216	牙轮钻头	827~942	太古界	115	3.65
	216	牙轮钻头	942~1050	太古界	108	3.48
吉华1-2	216	PDC钻头	966~1050	太古界	84	3.36
吉华1-1	216	PDC钻头	433~496	太古界	63	3
	216	PDC钻头	496~562	太古界	66	4.71
	216	牙轮钻头	562~681	太古界	119	3.31
吉华1-3X	216	牙轮钻头	450~600	太古界	150	3.33
	216	牙轮钻头	600~808	太古界	208	6.93

2.2 外部区块难钻地层异形齿钻头实钻情况调研

以塔里木油田的塔河南难钻地层异形齿钻头实钻情况为例,该区实验了斧形齿、三棱齿、尖圆齿、锥形齿等异形齿钻头,较邻井单只进尺与机械钻速均有大幅度增加,平均单只进尺以及平均机械钻速均提高约40%,其中最大机械钻速以及单只钻头进尺是邻井的2倍以上(见图6)。

3 钻头优选

3.1 异形复合片对比分析

结合该区地层岩性变化,进行异形复合片优选分析。

3.1.1 异形主切削齿优化对比分析

图7为常规复合片在切削岩石时的岩石应力云图,由图7可以看出复合片前端岩石应力最为集中。复合片在与岩石接触时,在钻压的作用下吃入地层,在扭矩的作用下转动。复合片前部挤压岩石,破坏岩石原有应力状态,降低岩石强度;复合片底部通过剪切作用剪断复合片前部岩石与地层的胶结。整个过

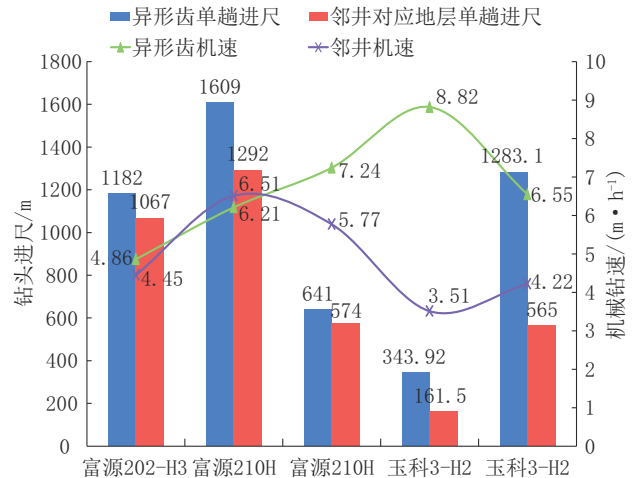


图6 部分井异形齿钻头实钻数据对比

Fig.6 Comparison of actual drilling data of special tooth bits in some wells

程在压入、扭转的作用下完成了钻头对地层钻进^[1-5]。

图8为犁式复合片在切削岩石时的岩石应力云图,由图8可以看出复合片前端岩石应力同样最为集中,但较常规复合片,由于犁式的尖端作用,复合

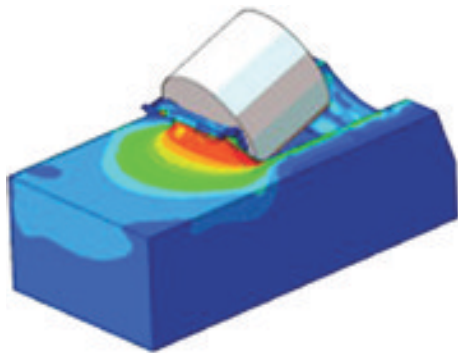


图7 常规切削破岩应力云图

Fig.7 Stress nephogram of rock breaking with conventional cutting

片前端岩石应力集中程度增加最先破坏,同时将切削到的岩石碎片推向复合片两侧,降低了复合片的前行阻力。在钻压的作用下复合片压入岩石,较常规复合片,因犁式的尖端作用,同样的钻压下,底部岩石受挤压的程度增加,即复合片吃入地层的深度增加。总之犁式复合片破岩相对常规复合片破岩,将更多的破岩功率用于对岩石的剪切作用,破岩效率更高^[6-12]。

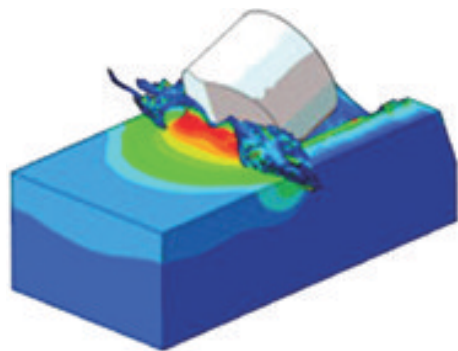


图8 犁式破岩应力云图

Fig.8 Plow-type rock breaking stress nephogram

经上述分析可知多棱齿在边缘切削刃上形成一凸脊棱,在钻进时,切削力以点接触或线接触方式加载,加载较小的力即可破碎砾石。多棱齿将剪切与压碎破岩作用综合在一起,两者相得益彰,能够更有效地切削岩石。多棱齿脊状上的金刚石层更厚,具有更好的抗冲击性和耐磨性,从而使采用该切削齿的钻头更加耐用,平均机械钻速更高。多棱齿可以预破碎岩石,降低剪切岩石时所需切削力,使总扭矩更小^[13-15]。在定向钻进中提高工具面角的控制能力,井眼的轨迹控制好。

3.1.2 异形辅切削齿优化对比分析

图9为锥形切削齿在切削岩石时的岩石应力云图,锥形切削齿的载荷集中于一点,对坚硬岩石具有预破碎功能,便于钻头上其他切削齿切削,同时能够钻出更大岩屑,便于进行矿物学、渗透率等的分析。锥形切削齿上较厚的金刚石层提高了钻头耐磨性和抗冲击性。相对普通切削齿因其与地层接触面积小,且接触点接触应力高,提高钻头转动等平稳性,有利于工具面控制和延长井下钻具组合寿命。



图9 锥压破岩应力云图

Fig.9 Stress nephogram of rock breaking with cone-pressing

3.2 异形齿钻头优选

根据异形齿优势对比分析,结合钻遇地层岩性变化,为提高钻井效率,应针对性对钻头的主副切削齿进行优化,使其相互配合,提高钻头与地层之间的配伍性。可钻性较好的地层,优选常规PDC钻头;可钻性相对差的地层,根据岩性变化,优选具有斧形齿、多棱齿以及锥形齿的钻头,主切削齿优选斧形齿和多棱齿,辅切削齿优选斧形齿和锥形齿。普通切削齿、斧形齿、多棱齿以及锥形齿分别见图10。斧形齿具有相对强的攻击性,适用于可钻性相对好的地层,保障机械钻速。多棱齿在使用至后期时,由于地层研磨作用下,使凸脊棱研磨殆尽,此时齿中心的三角平面开始与地层接触,形成一新切削刃,起到继续切削的作用,与平面齿相比增加一次切削机会,适用于在软硬交错地层,兼具攻击性,抗冲击性及抗研磨性,在保障单只进尺的同时保障机械钻速。辅切削齿斧形齿和锥形齿,通过提高复合片与地层接触强度来破碎岩石,可钻性相对差的选用斧形齿,可钻性较差的地层选用锥形齿^[4-16]。

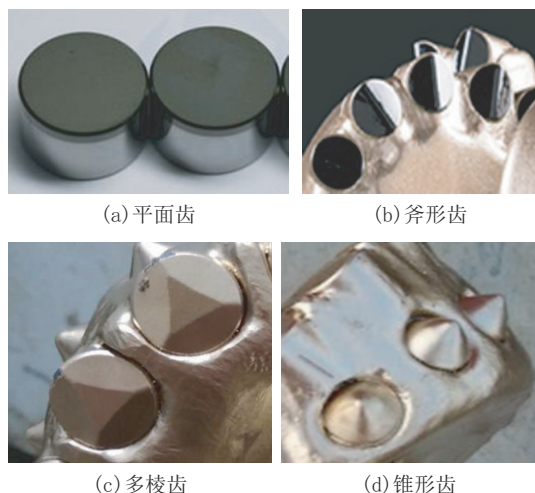


图10 切削齿齿形

Fig.10 Cutting tooth shape

4 现场应用

4.1 斧形齿+锥形齿钻头应用情况

临华1X井3763~3876 m井段为砂泥岩地层,埋藏深,压实程度高,可钻性相对好。为提高机械钻速,主切削齿选用斧形齿,提高钻头吃入地层能力,降低复合片切削阻力,辅助切削齿选用锥形齿,将载荷集中于一点,对坚硬岩石进行预破碎,降低岩石强度,便于斧形齿切削片进行切削(见图11)。试验钻头进尺110 m,平均机械钻速5.79 m/h,较同井段上部地层提高80%左右(见表5)。因二开钻至设计井深中完起钻,钻头可再次入井使用。

4.2 多棱齿+平面齿钻头应用情况

(1)临华1X井5367.56~5612 m井段砂泥岩互层,砂岩成分以石英为主,地层软硬互层,可钻性相

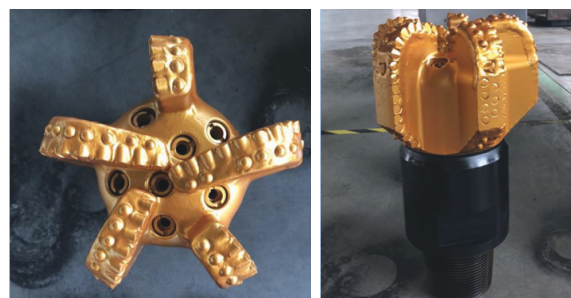


图11 斧形齿+锥形齿钻头

Fig.11 Axe tooth + conical tooth bit

对差。为保障单只进尺,同时兼顾机械钻速,主切削齿选用多棱齿,多棱齿在边缘切削刃上形成一凸脊棱,切削力以点接触或线接触方式加载,加载相当较小的力即可破碎砾石,用于攻克地层中硬夹层,辅助切削齿选用常规齿,提高钻头对岩石体积破岩速率,用于攻克地层中软夹层,助力提高钻头钻进速度,见图12。试验钻头进尺244.44 m,平均机械钻速6.98 m/h,较同井段地层提高40%左右(见表6)。



图12 多棱齿+平面齿钻头

Fig.12 Polygonal tooth + plane tooth bit

表5 临华1X井斧形齿+锥形齿钻头应用情况

Table 5 Application of axe tooth+ conical tooth bit in Well Linhua 1X

钻头尺寸/mm	钻头类型	钻进井段/m	所钻地层	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
311.2	常规PDC钻头	3191~3362.88	古近系	171.88	3.37
311.2	常规PDC钻头	3371.38~3763	古近系	391.62	3.16
311.2	斧形齿+锥形齿PDC钻头	3763~3873	白垩系	110.00	5.79

表6 临华1X井多棱齿+平面齿钻头应用情况

Table 6 Application of polygonal tooth + plane tooth bit in Well Linhua 1X

钻头尺寸/mm	钻头类型	钻进井段/m	所钻地层	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
215.9	常规PDC钻头	4897~5359.46	白垩系	462.46	4.53
215.9	多棱齿+平面齿PDC钻头	5367.56~5612	白垩系	244.44	6.98
215.9	常规PDC钻头	5612~5709	太古界	97.00	5.39

(2)吉华30X井401~3200 m井段含有砾岩、砂泥岩,地层可钻性变化大。为提高机械钻速,主切削齿选用多棱齿,多棱齿在边缘切削刃上形成一凸脊棱,切削力以点接触或线接触方式加载,加载较小的力即可破碎砾石,用于攻克地层中砾岩等硬夹层,辅助切削齿选用常规齿,提高钻头对岩石体积破岩速率,用于攻克地层中软夹层,助力提高钻头钻进速度。试验钻头进尺2799 m,平均机械钻速30.42 m/h,较同井段地层提高82.5%(见表7)。

表7 吉华30X井钻头应用情况
Table 7 Bit usage in Well Jihua 30X

钻头尺寸/mm	钻头类型	钻进井段/m	所钻地层	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
215.9	多棱齿+平面齿PDC钻头	401~3200	白垩系	2799	30.42
215.9	常规PDC钻头	3200~3350	白垩系	150	16.67

(3)吉华36X井400~2728 m井段地层含有砾岩、砂泥岩,地层可钻性变化大,选用了吉华30X井401~3200 m井段所用的钻头。试验钻头进尺2328 m,平均机械钻速21.96 m/h(见表8),实现了二开一趟钻。

表8 吉华36X井钻头应用情况
Table 8 Bit usage in Well Jihua 36X

钻头尺寸/mm	钻头类型	钻进井段/m	所钻地层	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
215.9	多棱齿+平面齿PDC钻头	400~2728	白垩系	2328	21.96

4.3 多棱齿+锥形齿钻头应用情况

吉华19X井4441~4591 m井段地层岩性为太古界麻粒岩(见图13),可钻性极差,且井深较深,地层压实程度高。为保障单只钻头的进尺,同时兼顾机械钻速,主切削齿选用多棱齿,多棱齿在边缘切削刃上形成一凸脊棱,切削力以点接触或线接触方式加载,提高局部载荷强度,提高破岩效率。辅助切削齿选用锥形切削齿,在钻压的作用下将载荷集中于一点,对坚硬岩石进行预破碎,同时较厚的金刚石面

提高钻头耐磨性和抗冲击性(见图14)。试验钻头进尺150 m,平均机械钻速3.0 m/h。纵向对比:该趟钻比上趟钻牙轮钻头多进尺95 m(井段4386~4441 m),约是上趟牙轮钻头单只进尺的3倍,节省4趟起下钻时间,平均机械钻速提高0.38 m/h。横向对比:该趟钻比临华1X井5709~5782 m片麻岩段,单只钻头多进尺77 m,约是其单趟进尺的2倍,节省2趟起下钻时间,平均机械钻速提高0.57 m/h(见表9)。因井上施工原因,提前起钻,起出的钻头还可再次入井使用。



图13 太古界麻粒岩岩屑
Fig.13 Archean granulite cuttings



图14 多棱齿+锥形齿钻头
Fig.14 Polygonal tooth + conical tooth bit

表9 吉华19X钻头应用情况
Table 9 Bit usage in Well Jihua 19X

井号	钻头尺寸/mm	钻进井段/m	所钻地层	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
吉华19X	215.9	4386~4441	太古界	55	2.62
吉华19X	215.9	4441~4591	太古界	150	3.0
临华1X	215.9	5709~5782	太古界	73	2.43

该区通过异形齿钻头针对性优选,其中21口井大幅缩短了钻井周期,在助力勘探成本降低方面发挥了重要的作用。实现了二开“一趟钻”(见表10),总进尺30000余米,

表10 “一趟钻”钻头应用情况
Table 10 Bit usage in one trip drilling

井号	钻头尺寸/mm	切削齿形状	井段/m	进尺/m	纯钻时/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)
吉华2-217X	215.9	多棱齿+平面齿	391~2719	2328	97	24.00
吉华2-222X	215.9	多棱齿+平面齿	406~2449	2043	78	26.19
吉华2-283X	215.9	多棱齿+平面齿	401~2495	2094	61	34.33
吉华2-335X	215.9	多棱齿+平面齿	403~2667	2264	86	26.33
吉华36X	215.9	斧形齿+锥形齿	400~2728	2328	106	21.96
吉华32	215.9	斧形齿+锥形齿	403~2746	2343	51	45.94
吉华2-332X	215.9	斧形齿+锥形齿	276~2729	2453	74	33.15
吉华2-317X	215.9	斧形齿+锥形齿	276~2947	2671	80	33.39
吉华2-324X	215.9	斧形齿+锥形齿	275~2751	2476	69	35.88
吉华2-318X	215.9	斧形齿+锥形齿	269~2874	2605	68	38.31
吉华2-331X	215.9	斧形齿+锥形齿	268~3057	2789	91	30.65
吉华26-1X	215.9	斧形齿+锥形齿	401~2465	2064	56	36.86
吉华2-224X	215.9	多棱齿+平面齿	300~2615	2315	81	28.58
吉华2-225X	215.9	多棱齿+平面齿	311~2725	2414	88	27.43
吉华2-228X	215.9	多棱齿+平面齿	394~2571	2177	74	29.42
吉华2-230X	215.9	多棱齿+平面齿	401~2667	2266	71	31.92
吉华2-284X	215.9	多棱齿+平面齿	403~2460	2057	56	36.73
吉华2-328X	215.9	多棱齿+平面齿	400.5~2561	2160.5	64.5	33.50
吉华2-329X	215.9	多棱齿+平面齿	306~2699	2393	98	24.42
敖地1	215.9	斧形齿+平面齿	300~910	610	33	18.48
吉华1-29X	215.9	斧形齿+平面齿	102~716	614	68	9.03

5 结论

(1)根据地层岩性变化,从结构力学角度针对性地开展切削齿形状、受力分析等研究,通过不同齿形的变化及配合,强化钻头在易钻地层攻击性,强化钻砂在难钻地层抗冲击性同时兼顾攻击性。

(2)主切削齿根据地层可钻性由好到差,依次优选平面齿、斧形齿、多棱齿;辅切削齿根据地层可钻性由好到差,依次优选平面齿、斧形齿、锥形齿。

参考文献(References):

- [1] 侯学军,孔祥吉,钱锋,等. Agadem油田新型个性化PDC钻头提速应用研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2019, 21(2):1.
HOU Xuejun, KONG Xiangji, QIAN Feng, et al. Research on speed increase of new personalized PDC bit in Agadem Oilfield [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology

(Natural Sciences Edition), 2019, 21(2):1.

- [2] 左宏刚,何福耀,严维锋,等. PDC钻头定制设计及在东海超深井的应用[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(7):17-22.
ZUO Honggang, HE Fuyao, YAN Weifeng, et al. Customized design of PDC bit and its application in ultra deep wells in the East China Sea [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2020, 36(7):17-22.
- [3] 赵研,张丛珊,高科,等. 超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(4):11-20.
ZHAO Yan, ZHANG Congshan, GAO Ke, et al. Rock breaking simulation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4):11-20.
- [4] 高明洋,张凯,周琴,等. 高温硬地层钻进中PDC钻头切削齿磨损研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10):185-189.
GAO Mingyang, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Wear of PDC cutters in high temperature hard formation drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):185-189.
- [5] 胡书锴,田锋,李汉月,等. 超高温地热钻井高效耐磨PDC钻头

- 研制及应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(3):1-3.
- HU Shukai, TIAN Feng, LI Hanyue, et al. Development and test application of high efficiency PDC bit for ultra-high temperature geothermal well [J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(3):1-3.
- [6] 晏加刚. 大港油田个性化PDC钻头破岩技术试验[J]. 科学技术创新, 2019, 25(1):153-155.
- YAN Jiagang. Experiment of personalized PDC bit rock breaking technology in Dagang Oilfield[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019, 25(1):153-155.
- [7] 居培, 王传留. 弧角型PDC钻头切削齿布齿模式仿真分析[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 45(5):240-246.
- JU Pei, WANG Chuanliu. Simulation of the cutter arrangement pattern of the arc PDC drill bit[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 45(5):240-246.
- [8] 彭齐, 周英操, 周波, 等. 凸脊型非平面齿PDC钻头的研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2):49-56.
- PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2):49-56.
- [9] 祝小林, 杨灿, 张鸥, 等. 新型PDC钻头砾岩破岩技术及应用[J]. 石油机械, 2019, 47(6):28-32.
- ZHU Xiaolin, YANG Can, ZHANG Ou, et al. Conglomerate rock breaking technology with new PDC cutter and its application [J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(6):28-32.
- [10] 吴泽兵, 张帅, 王勇勇, 等. 基于ABAQUS的PDC钻头参数化布齿与破岩仿真[J]. 石油机械, 2020, 48(3):30-36.
- WU Zebing, ZHANG Shuai, WANG Yongyong, et al. ABAQUS-based parameterized cutter layout and rock breaking simulation of PDC bits[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(3):30-36.
- [11] 李思琪, 田胜雷, 闫铁, 等. PDC钻头单齿切削天然裂缝地层断裂机理[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(4):22-30.
- LI Siqi, TIAN Shenglei, YAN Tie, et al. Fracture mechanism of formation with natural flaws under a single tooth cutting of PDC drill bit[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(4):22-30.
- [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):565-576.
- YANG Yingxin, YANG Yan, CHEN Xinwei, 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):565-576.
- [13] 杨迎新, 胡浩然, 黄奎林, 等. 环脊式PDC钻头破岩机理实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5):1451-1461.
- YANG Yingxin, HU Haoran, HUANG Kuilin, et al. Experimental research on the rock-breaking mechanism of annular-ridge PDC bit [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5):1451-1461.
- [14] 况雨春, 曾昭安, 张毅, 等. 基于离散元方法的PDC钻头破岩仿真研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3):835-842.
- KUANG Yuchun, ZENG Zhaoan, ZHANG Yi, et al. Simulation of PDC bit cutting rock based on discrete element method [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(3):835-842.
- [15] 祝效华, 易勤健. PDC钻头切削断面对破岩效率的影响[J]. 中国机械工程, 2018, 29(7):817-823.
- ZHU Xiaohua, YI Qinjian. Influences of cutting shapes of PDC bits on rock breaking efficiency[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(7):817-823.
- [16] 居培, 孙荣军, 石智军, 等. 煤矿井下用新型弧角PDC钻头的设计与应用[J]. 煤炭工程, 2018, 50(1):145-150.
- JU Pei, SUN Rongjun, SHI Zhijun, et al. Design and application of new arc angle PDC bit used in underground coal mine [J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(1):145-150.
- [17] 李琴, 刘永升, 黄志强, 等. PDC钻头切削破岩机理及数值模拟研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(2):203-210.
- LI Qin, LIU Yongsheng, HUANG Zhiqiang, et al. Exploring mechanism and numerical simulation of rock breaking process using PDC bit [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2016, 35(2):203-210.
- [18] 田家林, 刘刚, 杨琳, 等. 增强造斜易控性的新型PDC钻头工作特性[J]. 石油学报, 2015, 36(7):882-889.
- TIAN Jialin, LIU Gang, YANG Lin, et al. Characteristic of new-style PDC bit with whipstocking controllability [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(7):882-889.

(编辑 荐华)