

元坝地区珍珠冲地层新型三牙轮钻头的研制与应用

王兴忠¹, 陆青², 刘强², 王旭东¹

(1.中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院,四川 德阳 618000; 2.中石化江钻石油机械有限公司,湖北 潜江 430223)

摘要:砂砾岩地层是钻井工程中的难钻地层,如何提高砂砾岩地层的钻进效率和钻头寿命一直是工程实践中的重要问题。针对在元坝地区珍珠冲石英砂砾岩地层钻进过程中,使用普通型牙轮钻头外排齿易早期断齿、综合使用指标低的问题,开展了地层岩性、钻头使用与失效分析。针对性地开展了钻头的切削结构、齿材优化以及加强保径等方面的研究,优化设计、研制出 HJT547GKL 型新型三牙轮钻头。现场试用结果表明,这种新型牙轮钻头在元坝地区珍珠冲组石英砂砾岩地层钻进中有较高的行程进尺。该钻头是一种结构简单、扶正保径好、可靠实用,适用于较硬、有硬夹地层的新型实用三牙轮钻头。

关键词:牙轮钻头;切削齿;扶正稳定器;珍珠冲地层

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)02-0061-07

Development and Application of New Type Tri-cone Drill Bit in Zhenzhuchong Formation of Yuanba Area/WANG Xing-zhong¹, LU Qing², LIU Qiang², WANG Xu-dong¹ (1.Drilling Engineering Research Institute of Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd., Deyang Sichuan 618000, China; 2.Sinopec Jiangnan Bit Oil Machinery Co., Ltd., Qianjiang Hubei 430223, China)

Abstract: Sand conglomerate formation is a difficult drilling stratum in drilling engineering, how to improve the drilling efficiency and bit service life in sand conglomerate stratum have been the important problem in engineering practice. In view of the problems of early breaking of common cone bit outer teeth and low comprehensive use index in the drilling process of Zhenzhuchong quartz sand conglomerate strata in Yuanba area, the stratigraphic lithology, drill bit usage and failure are analyzed, and especially aiming at the bit cutting structure, tooth material optimization and bit gauge retaining strengthening, new HJT547GKL tri-cone drill bit is optimally designed and developed. Field test result shows that this new type of cone bit has high stroke footage in Zhenzhuchong formation of Yuanba area, which is reliable, practical and suitable for hard formations and formations with hard interlayer drilling with simple structure and good gauge retaining.

Key words: cone bit; cutting teeth; centralized stabilizer; Zhenzhuchong formation

0 引言

在油气、地质等勘探开发钻井中,三牙轮钻头是破碎岩石的主要工具。由于有的井所钻地层的倾斜和非均质性使钻头受力不平衡,以及下部钻具受压发生弯曲也会使钻头偏斜,导致牙轮发生偏转受力,进而不仅容易损坏牙轮上的轴承,而且还会影响钻井质量^[1-2]。

在四川元坝地区的侏罗系自流井组珍珠冲段地层,其可钻性高达 8 级以上。通过调研元坝区块 7 口井的钻头使用情况,发现在自流井组下段石英质砾岩中使用的牙轮钻头普遍存在早期断齿、缩径失效情况、纯钻时间短、机械钻速慢、进尺低、划眼时间长、钻头事故频繁,严重影响了该地区钻井速度的提

高和钻井效益。如:YB29 井钻头纯钻时间 14~20 h,进尺 10~13 m,井队频繁起下钻,钻井成本高。

为了解决牙轮钻头在钻进中所存在的问题,行业内所采取的措施是在钻头体上设置扶正保径的稳定结构,常见的扶正保径稳定结构是在牙掌的背面镶嵌多颗径向凸起的保径齿^[3]。在实际应用中,此种扶正保径稳定结构只能起到防止钻头体直径早期磨损的作用,扶正稳定的效果非常有限,其不能有效解决现有牙轮钻头在钻进中所存在的问题。

1 钻头研制思路

开展地层岩性、钻头使用和失效原因分析,从解决钻头早期断齿失效入手,通过仿真软件和实验分

收稿日期:2017-08-11; 修回日期:2017-12-18

基金项目:中石化石油工程技术服务有限公司科研课题“元坝陆相高研磨性地层的优选及研制”(编号:SG1301-01K)

作者简介:王兴忠,男,汉族,1964 年生,高级工程师,油气井工程专业,硕士,主要从事油气井钻井技术应用、研究与管理工,四川省德阳市旌阳区金沙江西路 699 号,xingzhong198@163.com。

析,进行齿形、齿材、轴承结构、切削结构和保径结构的优化设计,研制的高效牙轮钻头,能达到提高牙轮钻头的平均钻速、进尺,及减少起下钻次数的目的。

2 地层岩性及岩心力学特性分析

元坝地区自流井组地层分为大安寨段、马鞍山段、东岳庙、珍珠冲段;主要岩性:泥岩夹岩屑砂岩及黑色页岩、顶有介壳灰岩、下部珍珠冲段为灰白色砾状石英砂岩;厚度:约 400 m;底界深度:在 4240 m 左右。

珍珠冲段下部常为含砾石的石英砂岩和砂质细砾岩,局部为灰绿与紫红掺杂的杂色泥页岩,中上部由数个浅灰或黄灰色细粒石英砂岩与紫红色、黄绿色砂质泥岩组成,底部发育有一层厚度仅为数米,品质很纯的灰白色石英砂岩,岩心形貌如图 1 所示。

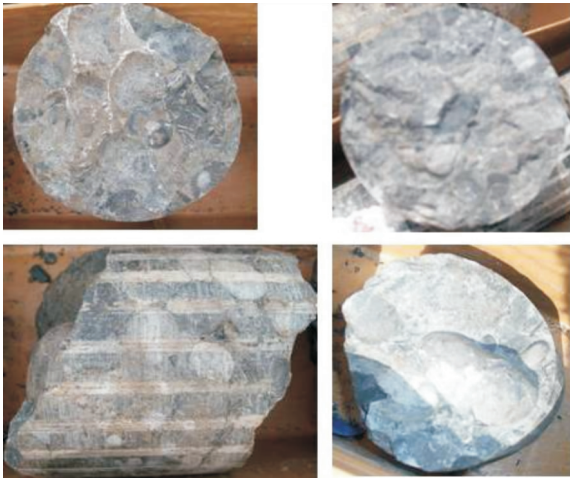


图 1 YB6 井自流井珍珠冲段岩心形貌

对 YB6 井珍珠冲段岩心进行工程力学特性测试,如图 2、图 3 所示。实验室进行了岩石硬度、塑性系数及研磨性试验测试,测试结果如表 1 所示。



图 2 岩石硬度、塑性系数试验装置



图 3 岩石研磨性试验装置

表 1 硬度及塑性系数试验结果

编号	硬度/MPa	均值/MPa	级值	类别	塑性系数	均值	类别
LJY-1	1692.22				1.25		低
LJY-2	3260.34	2625.2	8	硬	1.36	2	塑
LJY-3	2923.01				1.37		性

强度,即是在压头压入岩石后,岩石产生第一次体积破碎时接触面上单位面积的载荷。塑性系数是指岩石在压头压入后,岩石产生第一次体积破碎时破碎消耗的总功与弹性变形功的比值,如图 2 所示。两种参数的试验原理均采用圆柱压入法,即用直径 3 mm 的圆柱体压头压入岩石表面,匀速加载,随着载荷的增加,压头吃入岩石的深度也逐渐增加,直到岩石产生第一次体积破碎为止。力的加载衰减到最大力的 40% 作为停机条件。

如图 3 所示,试验采用国内外通用的空心圆管研磨法进行,通过空心圆管磨损量,测得岩石的研磨性为 8 级(146.6 mg),属于高研磨性岩石。

结合现场钻井资料统计分析,应用钻头选型软件,优选出适用于该层段的钻头类型(见表 2)。

表 2 钻头选型推荐

地层层位	地 层			推荐钻头类型
	可钻性级别	岩性	占比/%	IADC 编码
自流井组	8.21	砂岩	44	547、617、637
珍珠冲段		泥岩	49	

3 钻头使用与失效分析

如图 4 所示:钻头使用后多以外排断齿、钻头缩径为主要失效特点。如表 3 所示:YB29 井钻头纯钻时间最长 66 h、进尺 60.13 m;最短的钻头 14 h、进尺 10.28 m^[4]。

通过以上分析,结合钻头使用与失效特征分析,得出如下失效原因。

岩石的硬度是指岩石抵抗其它物体压入的破碎

图 4 $\text{O}311.2 \text{ mm}$ HJTS547GK 型钻头磨损情况

图 5 钻头掌背上形成上小下大的台肩形貌

表 3 YB29 井钻头($\text{O}311.2 \text{ mm}$)使用情况

类型	钻进井段/m	所钻地层	进尺/ m	机械钻速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	纯钻进 时间/h
HJT537GK	3924.95~4056.35	自流井组	131.40	1.03	128
HJ517G	4056.35~4078.40	自流井组	22.05	0.61	36
HJT537GK	4078.40~4122.18	自流井组	43.78	1.01	43
HJT537GK	4122.18~4182.31	自流井组	60.13	0.91	66
HJTS547GK	4182.31~4192.59	自流井组	10.28	0.80	14
HJT617G	4192.59~4206.07	自流井组	13.48	0.68	20

(1) 钻头的外排齿碎断的主要原因有两方面^[5]: 一是由于有的井所钻地层倾斜和非均质性, 以及下部钻具受压发生弯曲而使钻头偏斜受力, 甚至产生横向振动进而发生外排齿撞击井壁的现象, 造成外排齿所受横向力和冲击载荷较大。二是钻头在钻进砾岩的过程中, 砾石难以破碎脱离井底, 由于钻井液的作用, 砾石和上只钻头的断碎齿都集中在井底与井壁的交界处, 造成对应的外排齿所受轴向冲击力和弯曲载荷较大。因此相对于内排齿, 处于井底与井壁的交界处的外排齿, 因综合受力大而先期折断; 在定向井段和大斜度井段的斜井壁上聚集的砾石和断碎齿更多, 所以外排断齿尤为明显。

(2) 在外排齿碎断以后, 小的牙齿碎片脱落在井底, 造成内排齿的碎断。

(3) 在外排全部折断后, 钻头直径缩小, 此时所钻井眼变小, 造成进入小眼内的钻头背锥、掌尖磨小, 轴承密封部分裸露, 在掌背上形成上小下大的台肩, 如图 5 所示。

(4) 因上只钻头缩径严重, 后期所钻井径缩径, 新钻头入井时需对该段划眼, 划眼时仅外排齿受力, 易造成部分外排齿的早期折断和磨损。

4 钻头选型与研制方案

根据地层、钻头使用及失效分析, 制订钻头选型与改进方案: 针对该硬地层钻头, 优选及研制钻头

IADC 编码为 547 或 637 系列三牙轮钻头; 根据尺寸不同分别定型为 $\text{O}311.2 \text{ mm}$ ($\text{O}314.1 \text{ mm}$) HJTGKL 钻头。主齿优选宽顶勺形齿, 外排优选圆楔形齿。

HJTGKL 型新型三牙轮钻头设计方案^[6]:

(1) 主切削齿为加大直径的宽顶勺形齿, 内排采用不等距布齿, 选用高强度新型梯度合金齿材。

(2) 为减少外排齿断齿, 适当降低齿的出露高度, 增加外排齿数量。

(3) 为提高外排齿寿命, 选用圆偏楔齿。

(4) 修边在外排和次外排等距交错布齿条件下, 选用锥球齿修边齿。

(5) 选用适应高钻压、长寿命的 HF 系列金属密封滑动轴承。

(6) 为提高钻头稳定性和加强保径, 加长钻头体, 增加扶正保径稳定器设置。

5 钻头研制

5.1 主切削齿的齿形、齿材优选

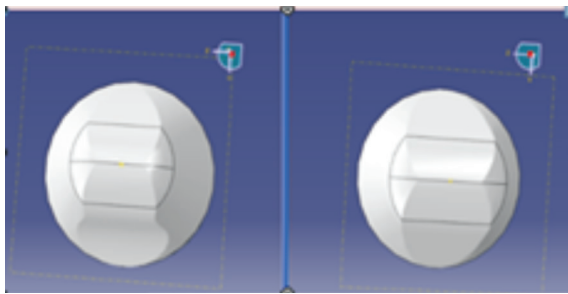
通过结构设计、有限元分析和室内单元试验, 如表 4、图 6 所示。主切削齿(即除外排齿以外的各排齿)为加大齿径的宽顶勺形齿, 破岩效率比普通齿提高了 12%~16%。

表 4 不同齿形的测试结果

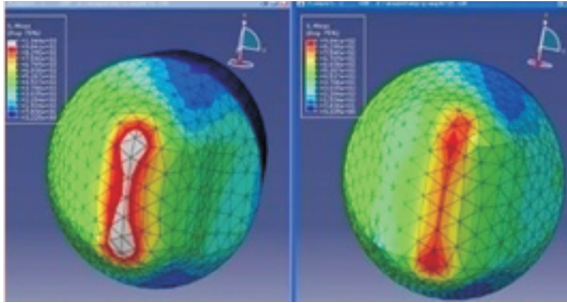
齿牌号	灰 岩		泥 岩	
	齿坑体积/ cm^3	提高/%	齿坑体积/ cm^3	提高/%
ED994	0.276		0.303	
E1276	0.311	12.7	0.354	16.8
EA669	0.257		0.275	
E1275	0.291	13.2	0.315	14.5

注: ED994、E1276、EA669、E1275 分别为勺形齿、加大齿径的宽顶勺形齿、锥球齿、宽顶勺形齿的齿牌号的主切削齿。

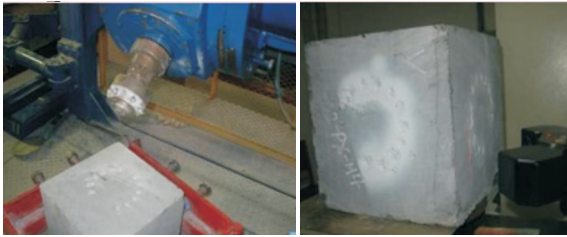
针对石英砂岩和砾岩地层(层位: 自流井组珍珠



(a) 结构设计



(b) 有限元分析



(c) 室内单齿圈破碎单元试验

图6 室内单元试验

冲段与须家河组井段),普通硬质合金齿易磨损和易断裂,外排和主切削齿均优选梯度硬质合金齿。梯度硬质合金齿(WC-Co)是一种Co梯度分布的新型硬质合金齿,主要技术特点是硬质合金齿的表面硬度高、耐磨损性好、心部的韧性好,既耐磨又不易断裂。

综合以上测试,齿材选择推荐:外排齿选用韧性和耐磨性都较好的齿材,主切削齿全部选用高强度新型齿材。

5.2 外排齿齿形优选

5.2.1 圆偏楔齿(专利齿形)特点

(1)攻击性强;(2)结构强度高;(3)冲击疲劳强度高;(4)新的齿形设计理念:当吃深 $< H$ (H 表示某一定量值的吃入深度,不同齿型的 H 值不同)时,圆楔齿的横截面积小于常规齿形,因此圆楔齿的攻击性强;当吃深 $> H$ 时,圆楔齿的横截面积大于常规齿形,如图7所示。因此其结构抗弯强度高。

5.2.2 普通偏楔齿与圆偏楔齿强度计算分析

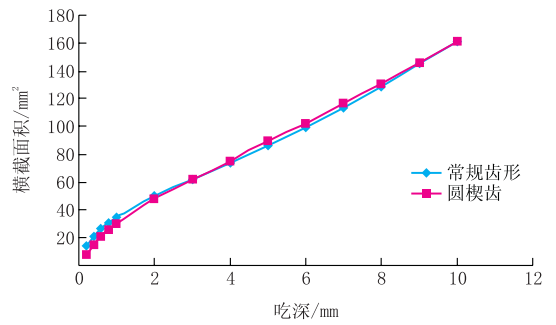


图7 吃深与横截面积的关系曲线

合金齿的最大 Mises 应力(Mises 是一个叫米赛史的人名,表示等效应力,又叫米赛史应力)均在牙齿冠部与齿柱的交界处,其中 E1329 最大 Mises 应力为 445.6 MPa,而 E2047 最大 Mises 应力为 55.6 MPa,显然 E2047 的强度要高于 E1329 (E2047、E1329 分别表示普通偏楔齿和圆偏楔齿的牌号)。E2047 强度高于 E1329 的原因主要在于前者的承载面增大。通过以上分析,外排优选圆偏楔齿,能一定程度地提高外排齿的强度。切削齿选用圆偏楔,如图8所示。

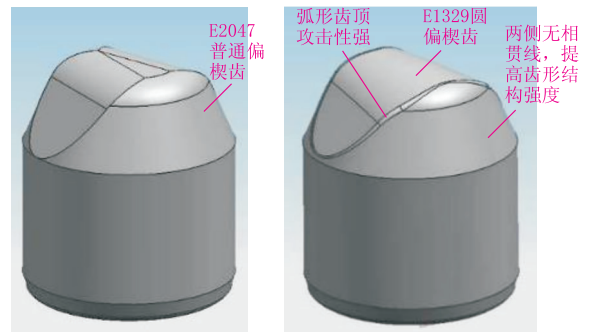


图8 2种偏楔齿结构图

5.3 不同尺寸切削齿齿径测试与分析

选取 JZ10、JZ10C 和 JZ16 三种牌号的硬质合金材料试样进行测试(见表5),横截面为 $6.5 \text{ mm} \times 5.25 \text{ mm}$ 试样的横向抗压载荷高于 $6 \text{ mm} \times 4.75 \text{ mm}$ 试样,由于横截面积增加不大以及采取正面抗压,因此试样抗压载荷增幅较小。

表5 横向抗压载荷检测值

牌号	横截面/(mm×mm)	横向抗压载荷/N
JZ10	6.5×5.25	21220
	6×4.75	21058
JZ10C	6.5×5.25	21300
	6×4.75	21272
JZ16	6.5×5.25	21242
	6×4.75	21155

如表 6 所示:横截面为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 试样的横向抗压载荷高于 $4.5\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$ 试样。横截面为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ JZ10 试样的冲击功比 $4.5\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$ 的冲击功提高了 81.2%;横截面为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ JZ10C 试样的冲击功比 $4.5\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$ 的冲击功提高了 47.6%,横截面为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ JZ16 试样的冲击功比 $4.5\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$ 的冲击功提高了 73.2%。

表 6 冲击强度检测值

牌号	横截面/(mm×mm)	冲击功/J
JZ10	5×5	2.392
	4.5×4.5	1.320
JZ10C	5×5	2.421
	4.5×4.5	1.640
JZ16	5×5	3.057
	4.5×4.5	1.765

从测试与分析可以得到,当硬质合金试样正面受载荷力和冲击力时,增大试样的横截面积,可以小幅度的提高试样的抗载荷力,大大提高试样的抗冲击力。

因此,外排、主齿优选大一档齿径的齿。

5.4 各排齿所受垂向载荷仿真计算

各排齿圈切削齿的覆盖率计算详见表 7。

表 7 一牙轮齿圈覆盖面积 mm^2

钻头直径/mm	钻头型号	外排	次外排	内排	顶齿
311.2	HJT537GKL(SZ1)	3393.3	4349.1	3393.3	1294.8
311.2	HJT537GK(Y02)	3075.2	3592.9	3393.3	1294.8
311.2	HJT547GKL(SZ1)	3075.2	3792.5	3393.3	1294.8

如表 7 所示,加大牙齿直径:牙轮外排、次外排齿圈覆盖面积分别增加了 10.34% 和 21.05%,因此,在不降低齿露高条件下,外排、次外排合金齿的强度有了很大的提高。

按钻头切削结构和使用参数进行了仿真计算,钻头各排齿所受垂向载荷分布均匀,相比普通 GK 钻头载荷有提高。

5.5 切削结构优选

参考已有设计 HJT537GKL(SZ1)的设计,外排和次外排加大一档,在该设计基础上增加轮尖附近的副齿,提高钻头齿槽的抗磨损性能,降低因齿槽磨损严重所导致的断轮尖事故的发生。由于牙轮上断齿以外排齿和次外排为主,因此加大外排与次外排的切削齿直径一档,齿露高不变。

钻头牙轮背锥增加 $1/3$ 金刚石复合齿,可增强钻头的保径能力,延长其寿命,使其适合于有硬夹层或研磨性地层的钻井作业。

调整牙轮合金齿受力情况,优化布齿结构;钻头偏移值降低;调整钻头井底击碎线;增加背锥空间,采用双排背锥、掌尖加厚、增设扶正稳定器结构。

5.6 高寿命轴承优选

根据轴承副结构,目前牙轮钻头轴承有如下 6 类^[7]:HJ 系列金属密封滑动轴承、GJ 系列金属密封滚动轴承、MD 系列金属密封高速浮动轴承、大尺寸金属密封镶套轴承、小尺寸金属密封滚滑复合轴承、HF 系列金属密封滑动轴承。

中深井及深井硬地层采用牙轮钻头钻进,需要使用高钻压。为了提高钻头使用寿命,对比分析了以上 6 种轴承结构的性能特点,最后优选 HF 系列金属密封滑动轴承(如图 9 所示)作为研制的新型 HJT547GKL 牙轮钻头的轴承,以便能在高钻压钻进工况下,钻头具有更长的使用寿命。

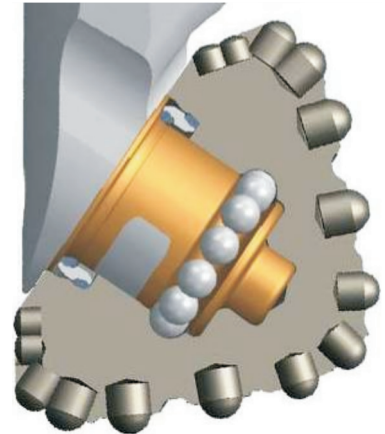


图 9 HF 系列滑动轴承结构图

5.7 牙掌结构设计

牙掌掌尖敷焊采用 G 形焊,加宽加厚焊。调整掌背外圆和包容值,增加掌尖厚度和适当的环间隙。加长钻头体,设置成扶正稳定器保径结构^[6]。

设置近钻头扶正保径稳定器钻头的侧向力计算如下。

已知:螺杆弯点到钻头的距离为 h ,近钻头扶正器到钻头的距离为 h_1 ,钻头直径为 D_1 ,近钻头扶正器为 D_2 。

假设未设置近钻头扶正器时,钻头上的侧向力为 F ,设置近钻头扶正器后,钻头上的侧向力为 F_1 ,近钻头扶正器的侧向力为 F_2 ,如图 10 所示。

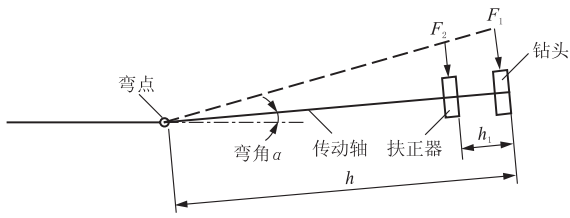


图10 设置近钻头扶正器后,钻头侧向力与扶正器侧向力示意图

设置近钻头扶正器后,钻头上的侧向力为 F_1 , 近钻头扶正器的侧向力为 F_2 呈线性分布,可得到:

$$F_2/F_1 = (h - h_1)/h \quad (1)$$

式中: F_1 ——钻头上的侧向力,N; F_2 ——近钻头扶正器的侧向力,N; h ——螺杆弯点到钻头的距离,mm; h_1 ——近钻头扶正器到钻头的距离,mm。

未设置近钻头扶正器时和设置近钻头扶正器时,侧向力对螺杆弯点形成的力矩相等,可得到:

$$Fh = F_1h + F_2(h - h_1) \quad (2)$$

式中: F ——钻头无扶正器时的侧向力,N。

根据式(1)和式(2)可得到:

$$Fh^2 = F_1h^2 + F_1(h - h_1)^2$$

即:

$$F_1 = \frac{Fh^2}{h^2 + (h - h_1)^2} \quad (3)$$

设 $h = 2300 \text{ mm}$, $h_1 = 300 \text{ mm}$, 则 $F_1 = 0.569F$ 。

从(3)式可以看出,近钻头扶正器到钻头的距离 h_1 越小,则钻头上的侧向力 F_1 越小。

如图11所示,通过在牙轮钻头上增加扶正保径稳定器(专利技术)设置,能有效消除、减小牙轮的偏转受力,增强钻头稳定性,使定向井打出的井眼更光滑;帮助消除由于定向井轨迹的弯曲而导致的井眼不光滑等优点,在不影响定向轨迹的同时,提高机械钻速、钻头综合使用指标和防止牙轮落井事故的发生。同时,应用在直井中,也能起到防斜打直的效果,减少钻头早期断碎齿及提高机械钻速、钻头综合使用指标和防止牙轮落井事故的发生。

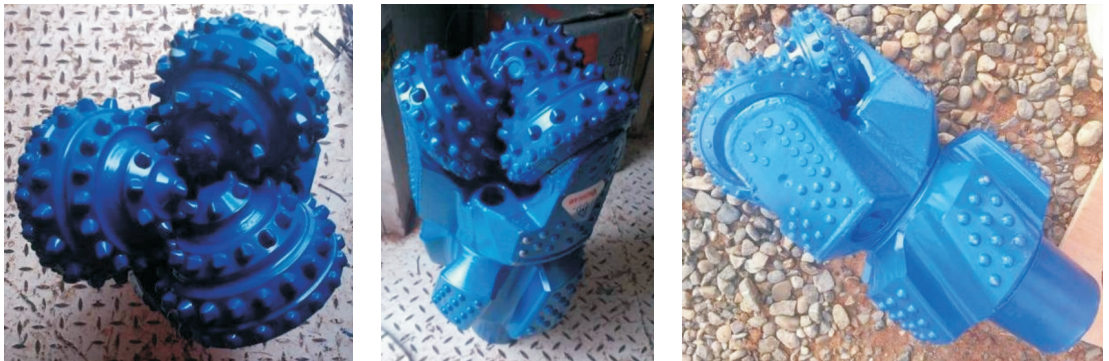


图11 新型三牙轮钻头结构

6 钻头特性

新型三牙轮钻头具有如下特征。

(1)扶正保径稳定器的外径等于或小于牙掌处钻头体的最大外径,扶正保径稳定器的外径与牙掌处钻头体的最大外径之间的差值为0~10 mm。

(2)扶正保径稳定器上的圆周上布置有多道内凹的排屑槽。

(3)扶正保径稳定器的外壁上镶嵌有多颗外凸的保径齿。

(4)牙轮上镶嵌有多颗切削齿,每颗切削齿的直径是16~18 mm。

(5)钻头体的有效长度为550~630 mm。

(6)钻头体为整体成型结构或分段组合结构。

(7)牙掌的背面镶嵌有多颗保径齿。

7 HJT547GKL 型钻头现场试验与评价

在YB205-2井珍珠冲砾石层段,进行了现场试验^[8]。

研制的2只 $\text{O}314.1 \text{ mm}$ HJT547GKL型钻头,使用情况如表8所示,平均进尺20.38 m、纯钻42.41 h、机械钻速0.48 m/h。与该井同井段使用的4只HJT537GK型三牙轮钻头相比(见表9),进尺提高177.28%、机械钻速相当。在单只钻头进尺上有明显优势,是普通HJT537GK型三牙轮钻头进尺的2.77倍,提高行程进尺和钻井效率,减少起下钻次数。

表 8 $\text{O}314.1 \text{ mm}$ HJT547GKL 型钻头在 YB205-2 井试验情况

序号	型号	下深/m	起深/m	地层	进尺/m	纯钻时间/h	钻速/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	钻压/kN	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	HJT547GKL	4032.84	4056.5	$\text{J}_1 z^1$	23.66	51.17	0.46	180~260	42
2	HJT547GKL	4056.50	4073.6	$\text{J}_1 z^1$	17.10	33.65	0.51	180~260	42
平均					20.38	42.41	0.48		

表 9 YB205-2 井同井段普通牙轮钻头使用情况

入井编号	型号	下深/m	起深/m	地层	岩性	进尺/m	纯钻时间/h	钻速/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
16	HJT537GK	4003.37	4008.8	$\text{J}_1 z^1$	砾岩	5.43	9.00	0.60
17	HJT537GK	4008.80	4011.6	$\text{J}_1 z^1$	砾岩	2.70	5.50	0.49
18	HJT537GK	4011.58	4019.7	$\text{J}_1 z^1$	砾岩、含砾中粒岩屑砂岩	8.08	23.00	0.35
19	HJT537GK	4019.66	4032.8	$\text{J}_1 z^1$	中粒岩屑砂岩、泥质粉砂岩	13.18	25.00	0.53
平均						7.35	15.63	0.47

在取得较好的综合使用指标后,分别在 YB205-3 井、YB10-3 井相同地层推广应用 9 只该型号钻头,相比以往使用的普通型号的牙轮钻头,纯钻时和进尺均得到了大幅度提高。随后,应用该技术改形设计的 $\text{O}311.2 \text{ mm}$ HJT547GKL 和 MD537K 型钻头,在邻区重庆涪陵焦石坝页岩气井得到了全面推广应用。

8 结论与建议

(1)扶正保径和加大齿径等技术是三牙轮钻头解决砂砾岩等硬地层、硬夹层地层早期断齿的创新技术。

(2)HJT547GKL 新型三牙轮钻头在自流井组珍珠冲段的砂砾岩地层使用结果表明钻头研制是成功的。

(3)HJT547GKL 型钻头是一种在钻头体上增加扶正保径稳定器的新型三牙轮钻头,主要应用于较硬、研磨性强,及有超硬硬夹层的地层中。

(4)建议在较厚的高研磨、可钻性级值高的砂砾石层段推广应用,可提高钻井效率。

(5)建议在川西、川东北的须四段、须二段、须一段等易造成牙轮钻头早期断齿的地层推广应用。

参考文献:

- [1] 刘希圣. 钻井工艺原理(中册)[M]. 北京:石油工业出版社, 1994.
- [2] 赵国珍. 牙轮钻头的运动和受力分析[J]. 石油矿场机械, 1986, 15(1): 1-8.
- [3] 马德坤. 牙轮钻头工作力学[M]. 北京:石油工业出版社, 2009.
- [4] 林川, 乔立伟, 杨明庆, 等. 元坝 29 井钻井工程总结报告[R]. 中石化西南石油工程有限公司广西钻井分公司, 2011.
- [5] 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.
- [6] 王兴忠, 刘强, 陆忠华, 等. 元坝陆相高研磨性地层高效钻头优选及研制[R]. 中石化西南石油工程有限公司, 2015.
- [7] 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.
- [8] 李和焱, 张祖熙, 唐勇. 元坝 205-2 井钻井工程完井报告[R]. 中石化西南石油工程有限公司四川钻井分公司, 2015.