

龙凤山气田火山岩地层个性化PDC 钻头设计与应用

冯云春

(中石化东北油气分公司, 吉林 长春 130062)

摘要:长岭断陷龙凤山气田主力储层主要分布在火山岩发育的营城组和火石岭组。储层岩石石英含量高、研磨性强,导致机械钻速低、单只钻头进尺短,大幅增加了起下钻换钻头等非生产时间,严重制约钻井提速。本文通过开展岩石力学实验研究,利用测井资料建立并修正岩石力学剖面,开展了异形PDC齿研发和钻头切削结构设计优化,研发出一种适合该区块火山岩地层的6刀翼异形齿PDC钻头,现场应用3井次,较其他普通PDC钻头平均进尺提高42.2%,平均机械钻速提高36%,提速降本效果显著。

关键词:火山岩地层;岩石力学参数;钻井提速;PDC钻头;异形齿;切削结构设计

中图分类号:TE921+.1;P634.4+1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)02-0094-08

Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field

FENG Yunchun

(The Northeast Oil and Gas Branch, SINOPEC, Changchun Jilin 130062, China)

Abstract: The main reservoir of Longfengshan Gas field in Changling Fault Depression is distributed in Yingcheng and Huoshiling Formation where the igneous rock is abundant. The high quartz content and abrasive nature of the reservoir rock results in low ROP and short footage per bit, which greatly increases the non-productive time such as tripping and bit changing and thereby seriously restricts the drilling speed. In this paper, the rock mechanics section is established and corrected by the well logging data and the rock mechanics experimental study. A 6-blade shaped PDC bit was designed for the volcanic rock formation in the block by PDC bit composite design and optimization. It has been applied in 3 wells, compared with other common PDC bits, the average footage is increased by 42.2% and the average machine drilling speed is increased by 36%, which shows a remarkable effect for drilling speed up and cost reduction.

Key words: volcanic rock formation; rock mechanics parameters; drilling speed up; PDC bit; special-shaped teeth; cutting structure design

0 引言

龙凤山气田位于松辽盆地中央拗陷区南部,是中国石化东北油气分公司近年来在松南新区的重大发现,目前是分公司增储上产最重要的前沿阵地。但是目的层营城组、火石岭组地层火山岩发育,主要是凝灰岩、玄武岩、安山岩、流纹岩、火山角

砾岩等,石英含量高,可钻性级值6~8级,中一高抗压强度、中一高等研磨性岩石,统计近二年该区块营城组以下地层86只钻头使用情况,钻头失效的原因主要以崩齿、掏心、环磨为主,单只钻头平均进尺297.6 m,平均机速4.13 m/h,导致钻井周期长,钻井成本高。因此,提高机械钻速、提高单只钻头进尺,

收稿时间:2023-07-11; 修回时间:2023-11-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.02.013

作者简介:冯云春,男,汉族,1979生,高级工程师,油气井工程专业,硕士,主要从事钻完井工程工艺研究工作,吉林省长春市绿园区和平大街660号,48953050@qq.com。

引用格式:冯云春. 龙凤山气田火山岩地层个性化PDC钻头设计与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(2):94-101.

FENG Yunchun. Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2):94-101.

降低单井综合成本具有非常重要意义。

本文通过深入开展地层岩性特征分析,借鉴目前主流的硬地层异型齿设计理念,优化异形齿几何结构设计、粉料配方及加工工艺、优化击碎线、钻头切削结构等关键技术研究^[1-4],采用室内实验、有限元分析、现场实验相结合的方法,研制出高效个性化PDC钻头,通过以提高机械钻速与进尺、缩短钻井周期、降低综合钻井成本。

1 地层岩石力学实验及剖面建立

1.1 岩石矿物组分分析

该区块目的层营城组上部为深灰色玄武岩、安山岩及深灰色凝灰岩,下部为灰色细砂岩、含砾细砂岩;火石岭组主要发育安山岩、凝灰岩、火山角砾岩;经过全岩矿物分析得知,营城组石英含量25%~52%,少量变质砾,砾径3~5 mm,巨砾可达10~50 mm;火石岭组石英含量20%~32%,见表1。

表1 龙凤山区块营城组、火石岭组全岩矿物统计

Table 1 Statistical table of whole rock minerals of Yingcheng Formation and Huoshiling Formation in Longfengshan Block

井号	样品编号	深度/ m	层位	石英/ %	钾长石/ %	斜长石/ %	方解 石/%	粘土矿 物/%	黄铁矿/ %	白云石/ %
北2*3	4-47/54	3778.29	营城组	52.30	4.00	18.00	4.50	17.20	3.70	
	5-28/42	3871.40	火石岭组	32.70	4.80	27.60	10.60	20.80	1.80	1.30
北2**-1	2-22/39	3544.81	营城组	25.10	10.50	29.70	14.50	19.00	1	
	2-38/39	3547.37	营城组	26.60	14.60	32.60	9.20	16.20	0.8	
	3-8/32	3743.37	火石岭组	24.70	11.90	45.90	4.80	11.50	0.9	
	3-15/32	3745.08	火石岭组	23.60	9.20	45.60	8.90	10.50	1	
	3-20/32	3745.97	火石岭组	25.30	10.50	42.10	7.30	12.00	0.8	1.7
	3-26/32	3747.21	火石岭组	20.40	11.50	51.20	3.40	12.20	1	
	3-32/32	3748.58	火石岭组	23.90	11.70	48.10	1.40	13.70	1	
北2**-2HF	YX5	3521.39	火石岭组	21.60	8.20	48.10	1.50	18.90	0.2	1.4
	YX7	3523.64	火石岭组	21.40	5.60	42.40	12.00	16.40	0.1	2.1
北2*7	5-4/47	3093	营城组	25.40	6.40	47.20	9.10	8.50	1.5	1.8
	6-34/57	3309	营城组	51.50	5.20	9.60	1.80	30.30		1.1
	7-41/48	3521	火石岭组	28.60	11.30	33.30	5.60	14.30	3.3	3.2

1.2 岩石可钻性与研磨性实验研究

1.2.1 岩石可钻性实验研究

岩石可钻性是衡量钻头破碎岩石难易程度的标准,表征破碎岩石的工具与岩石之间关系的一个力学参数。通过室内微型钻头,在一定的钻压和钻速条件

下模拟钻井过程以测定可钻性。按照《SY/T 5426—2016石油天然气钻井工程岩石可钻性测定与分级》行业标准执行,测得可钻性级值5.5~7.5级(表2)。

1.2.2 岩石研磨性实验研究

本文实验采用的实验方法是标准材料磨蚀法,

表2 龙凤山区块营城组、火石岭组可钻性实验

Table 2 Drillability test of Yingcheng Formation and Huoshiling Formation in Longfengshan Block

序号	岩心编号	深度/m	层位	钻压/N	实验所用时间/s			平均时间/s	可钻性级值
					第1次	第2次	第3次		
1	6-5/20	3468	营城组	1000	47.4	/	/	47.4	6.6
2	4-30/35	3512	营城组	1000	64.9	61.9	/	63.4	7.0
3	1-18/32	3560	营城组	500	134.4	23.5	67.9	75.3	6.2
4	4-24/35	3596	火石岭组	1000	94.4	/	118.9	106.7	7.5
5	1-20/32	3610	火石岭组	500	64.5	35.0	40.8	46.8	5.5
6	7-5/48	3646	火石岭组	1000	34.6	33.8	/	34.2	6.1

其基本原理是:用圆柱形钢杆在岩石表面上相互摩擦时的质量磨损作为岩石相对研磨性指标。采用国内外通用的空心圆管研磨法进行,其实验原理是使用圆柱形钢杆在研磨的岩样表面上相对摩擦的钻磨法(又称钢杆磨损法)。在轴压300 N、转速500 r/min及室温自来水冷却实验条件下,每次用空心圆管试件两端各研磨岩石试样5 min,然后用高精度电子天平称空心圆管试件在研磨性实验前后的钢管质量。通过对单根研磨棒平均单边损失的重量来评价岩石的耐磨性。检测标准及判定依据,参考实验设备提供的分级标准见表3,测试结果岩石研磨性见表4。

1.2.3 岩石硬度与单轴抗压强度实验

岩石的硬度是指岩石抵抗其它物体压入的破碎强度,实验原理采用圆柱压入法,用圆柱体压入岩石表面,均匀加载,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,实验结果见表5,岩石硬度主要分布在5~7级,属于中硬—硬级别。

岩石的压缩变形抗压强度是指岩石在单轴压力作用下达到破坏的极限强度。本文实验依据《工程

表3 岩石研磨性分级参考标准

Table 3 Reference standard for classification of rock abrasiveness

研磨类别	研磨级别	磨损量/mg
极低研磨性	1	0~1
低研磨性	2	1~5
	3	5~0
中等研磨性	4	10~20
	5	20~40
	6	40~90
高研磨性	7	90~120
	8	120~160
	9	160~200
极高研磨性	10	200~1000

岩体实验方法标准》中单轴压缩变形实验标准执行,将岩石样品置于压力机承压板上,其上加一件承压板,试样长度中间4个方向均布4个千分表测量径向形变,一个轴向千分表测量轴向形变。再匀速加载直至岩石发生破裂,力的加载衰减到最大力的30%作为停机条件,结果见表6,属于中—高抗压强度。

表4 岩石研磨性测试结果

Table 4 Test results of rock abrasiveness

序号	岩心编号	深度/m	研磨棒两端磨损量/mg			平均磨损量/mg	平均单端磨损量/mg	研磨性级别
			第1次	第2次	第3次			
1	6-5/20	3468	36.9	39.2	45.3	40.47	20.23	5
2	4-24/35	3596	78.6	130.7	86.4	98.57	49.28	6
3	4-30/35	3512	65.3	55.8	60.2	60.43	30.22	5
4	1-18/32	3560	45.3	82.9	54.3	60.83	30.42	5
5	1-20/32	3610	65.4	96.4	89.7	83.83	41.92	6
6	7-5/48	3646	186.0	256.0	236.0	226.00	113.00	7

注:本文研磨性实验使用的是西南石油大学研磨性试验机及配套标准。

表5 岩石硬度测试结果

Table 5 Rock hardness test results

序号	岩心编号	深度/m	岩石硬度P/MPa			平均硬度/MPa	硬度级别
			第1次	第2次	第3次		
1	6-5/20	3468	1067	1186.05	1141.38	1131.48	5
2	4-24/35	3596	1565.52	1672.41	1657.46	1631.80	6
3	4-30/35	3512	1077.56	926.78	1099.56	1034.63	5
4	1-18/32	3560	683.2	671.46	622.47	659.04	5
5	7-46/48	3594	2232.1	1973.22	2107.31	2104.21	7
6	7-5/48	3646	1555.82	1616.76	1514.71	1562.43	6

表 6 岩石单轴抗压强度实验

Table 6 Uniaxial compressive strength test

岩心编号	深度/m	试样直径/mm	破坏荷载/kN	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
4-24/35	3596	24.5	55.94	118.0	14.6	0.64
4-30/35	3512	24.6	51.09	107.5	14.3	0.4
1-18/32	3560	24.5	21.4	45.23	7.22	0.14
1-20/32	3610	24.6	46.86	98.6	9.54	0.02

1.3 岩石力学剖面建立

收集了龙凤山气田 9 口井的测井数据,利用测井声波时差(AC)、岩性密度(DEN)和自然伽玛(GR)等数据,并结合岩心测试结果,按拟合修正原则,建立并修正龙凤山区块地层岩石力学参数剖面^[5-8],如图 1 所示。

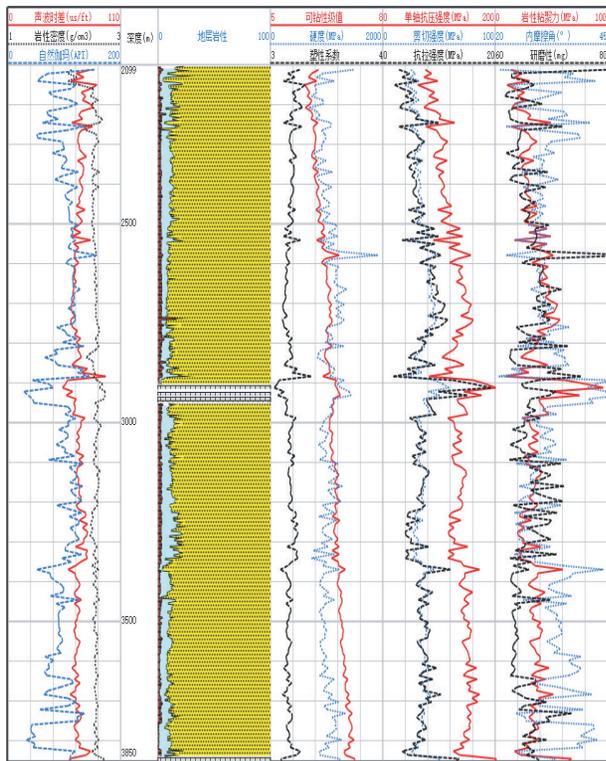


图 1 龙凤山区块营城组-火石岭组地层岩石力学参数剖面(垂深 2000~3850 m)

Fig.1 Stratigraphic rock mechanical parameter profile of Yingcheng Formation-Huoshiling Formation in Longfengshan Block (vertical depth 2000~3850m)

综上岩石力学试验以及剖面建立,得出龙凤山区块营城组、火石岭组地层火山岩发育,地层可钻性极值平均 6~8 级,平均抗压强度为 110~180 MPa,属于可钻性较差、中—高抗压强度、中—高等研磨性

岩石。

2 钻头设计

2.1 钻头选型

根据龙凤山气田近几年现场使用钻头调研情况,营城组及以下层段主要使用 16 mm 复合片、5/6 刀翼 PDC 钻头,钻头的失效形式主要以崩齿失效为主,需要进一步提高复合片的抗冲击能力,兼顾耐磨性,提高钻头进尺;部分层段机械钻速较低,钻头吃入性较差,需要进一步提高钻头的攻击性,提高机械钻速;长水平段部分钻头调整井斜困难,需要频繁摆工具面,定向效率低,需要进一步提高钻头的定向性能,提高定向效率^[9-10]。

依据岩石力学实验,结合目前业界常用钻头选型原则(参考中石化某厂钻头选型原则,见表 7),PDC 钻头选型主要以岩石可钻级值、抗压强度、研磨性和内摩擦角等作为钻头选型的关键参数。龙凤山区块营城组以下地层平均可钻性级值 6~8 级,抗压强度 170~220 MPa、研磨性 80~110 mg、内摩擦角 38°~42°,本区火山岩地层适合选取 6 刀翼 16 mm 齿钢体 PDC 钻头,以满足提速提效降本要求。

2.2 异形切削齿设计

目前国内外异形 PDC 切削齿种类繁多,有斧型齿(脊形齿)、奔驰齿等等,异形齿具有独特的几何结构,结合了常规平面复合片的剪切作用和硬质合金齿的压碎作用,提高抗冲击性、韧性,克服钻头锥面中切削力学的约束、减少岩屑摩擦和金刚石层磨损与热降解,可获得更有效率的剪切和热散发^[11-13]。本文创新的设计制造出三棱平顶齿复合片,通过优化金刚石颗粒配方以及特殊烧结工艺,结合特殊的几何结构,减少了切削元件和岩石的接触面从而增加了切削元件的破岩能力,以及减少摩擦阻力而降低摩擦热,从而延长其寿命,而且由于有更厚的金刚石层、专有的金刚石颗粒分布混合技术,也获得了更

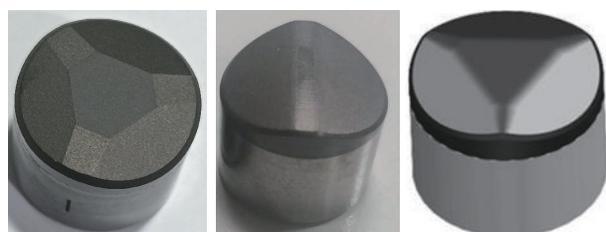
表7 钻头选型对照

Table 7 Comparison table of bit selection

序号	可钻性级值	抗压强度/MPa	研磨性/mg	内摩擦角/(°)	PDC钻头选型
1	<4	<55	<20	<30°	四刀翼 19 mm 复合片钢体PDC
2	4~6	55~110	20~50	30°~37°	五刀翼 19 mm 复合片钢体PDC
3	5~7	110~170	50~80	37°~40°	六刀翼 19 或 16 mm 复合片钢体PDC
4	7~9	170~220	80~110	40°~42°	六、七刀翼 16 或 13 mm 复合片钢体/胎体PDC

好的正面抗冲击能力,相较普通平面PDC齿,各项性能优异。

本文对研发三棱平顶齿与国内外高端平面齿和异形齿进行耐磨和抗冲击性能对比,重载湿磨磨损面积最小、抗冲击次数最高,各异形齿齿形见图2,实验结果见表8,可知本文设计的三棱平顶齿性能优异。



(a)三棱平顶齿 (b)平顶斧形齿 (c)常规三棱齿

图2 各异形齿齿形

Fig.2 Tooth profile of each shaped teeth

表8 异形齿性能测试结果

Table 8 Performance test results of shaped teeth

样品种类	表面处理	金刚石层 厚/mm	重载湿磨 160圈磨口 面积/mm ²	累积冲 击次数/ 次
	深度/ μm			
三棱平顶齿	700~800	2.8	7.95	39.0
斧形平顶齿	700~800	2.5	10.35	26.0
常规三棱齿	700~800	2.0	12.00	31.0
XM57(进口 平面齿)	700~800	2.8	9.18	27.6
XM53(进口 平面齿)	700~800	3.0	8.21	20.2

2.3 钻头设计

2.3.1 击碎线设计

冠部形状就是将钻头工作面简化至通过钻头轴线平面的投影,也称之为击碎线。击碎线通常采用“直线-圆弧-圆弧”和“直线-圆弧”两种形式,虽

然击碎线的表现形式差别不大,但击碎线的参数不同,会导致击碎线呈现出不同的特性。应用硬地层击碎线设计技术,采用较钝攻击线型、鼻部大圆弧设计的击碎线,内锥角75°能够兼顾定向钻进和钻头稳定性的击碎线型。击碎线攻击性比值0.54、光顺性比值0.84,具备较高的抗冲击能力。根据理论计算,每颗PDC复合片等量切削原则,结合钻头设计经验,本区钻头需提高鼻部布齿密度25%,提高肩部布齿密度40%,钻头整体布齿密度提高30%,抗冲击和抗研磨性能提升显著,钻头击碎线设计如图3所示。

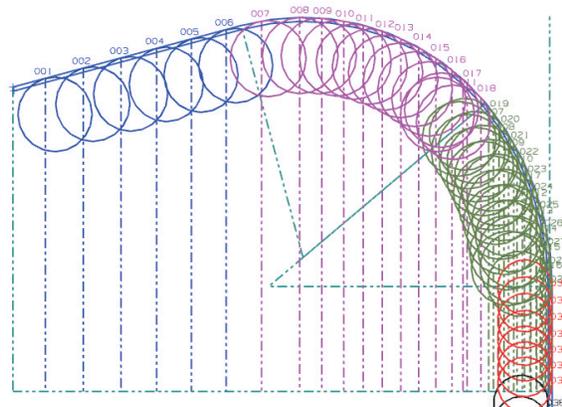


图3 钻头击碎线设计

Fig.3 Design of bit breaking line

2.3.2 布齿设计

采用16 mm复合片6个刀翼布齿,3个主刀翼布齿,具备良好的抗冲击能力,同时兼顾钻头攻击性。针对龙凤山区块火山岩地层钻头鼻肩部容易失效的问题,需强化鼻肩部布齿,故采用内锥部位齿间距大,鼻肩部齿间距小的整体设计方案。内锥齿间距6~7.5 mm,鼻部齿间距4~4.7 mm,肩部齿间距3.2~4 mm;内锥后倾角20°,鼻部后倾角16~20°,肩部后倾角25°。在鼻肩部易失效部位增加2排齿,进一步提高鼻肩部的布齿密度,增强钻头对地层的适

应能力^[14-18]。布齿设计如图4所示。

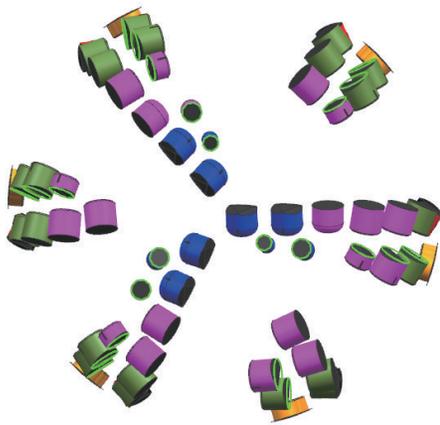


图4 钻头布齿设计
Fig.4 Bit gear design

2.3.3 水力设计

根据钻头布齿和刀翼设计情况,为保证切削齿清洗冷却效果和岩屑上返顺畅,采用主刀翼2个喷嘴、副刀翼1个喷嘴的水力布置,并应用CFD 流场分析技术模拟井底岩屑运移情况。为了使井底岩屑快速脱离井底,对于PDC 钻头,井底湍流强度 $\geq 10\%$ (高湍流强度)的区域面积占井底总面积的比值应 $>40\%$ 。该钻头高湍流强度的区域面积占井底总面积的比值为91.1%,表明岩屑运移效率较高,如图5所示。针对龙凤山火山岩地层开发的高效PDC 钻头模型如图6所示。

3 使用效果评价

3.1 钻头现场应用情况

本文设计个性化钻头在龙凤山区块火山岩地层累计施工3口井三趟钻,钻遇地层:营城组、火石岭组;钻具组合: $\text{O}215.9\text{ mm}$ PDC 钻头+ $\text{O}172\text{ mm}$ 1.25°螺杆(带 $\text{O}210\text{ mm}$ 螺旋扶正器)+浮阀+ $\text{O}212$

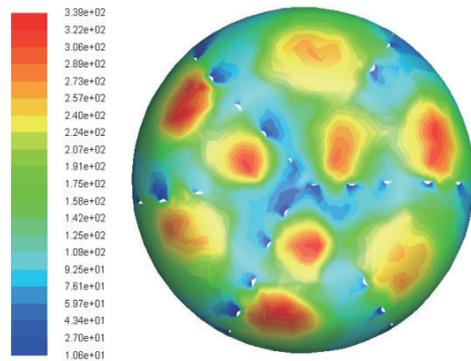
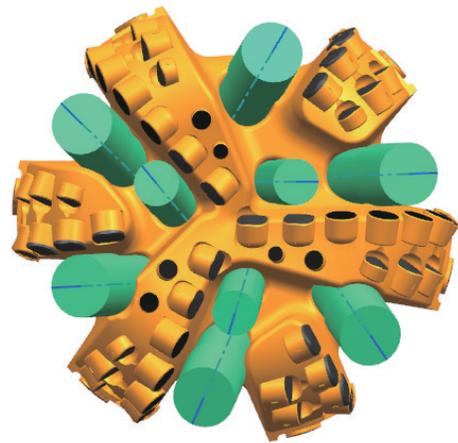


图5 喷嘴布置及井底流场

Fig.5 Diagram of nozzle arrangement and bottom hole flow field

mm 螺旋扶正器+定向接头+ $\text{O}127\text{ mm}$ 无磁钻杆 $\times 1$ 根(LWD 仪器)+ $\text{O}127\text{ mm}$ 加重钻杆 $\times 3$ 根+ $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆+ $\text{O}127\text{ mm}$ 加重钻杆+ $\text{O}139.7\text{ mm}$ 钻杆,钻头使用情况详见表9、图7。

3.2 钻头使用指标对比

从钻头使用数据来看,平均钻头进尺423.3 m,平均机械钻速5.62 m/h。2019—2020年该区火石岭组地层单只钻头平均进尺297.6 m,平均机速4.13 m/h,与近两年同层段单只钻头平均数据对比,

表9 $\text{O}215.9\text{ mm}$ 个性化PDC 钻头使用情况统计
Table 9 $\text{O}215.9\text{ mm}$ personalized PDC bit usage statistics

井号	入深/ m	出深/ m	进尺/ m	纯钻/ h	机速/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	起钻原因	钻压/ kN	顶驱转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	排量/ ($\text{L}\cdot\text{S}^{-1}$)	泵压/ MPa
北5-*	5155	5575	420	78	5.38	钻时慢	80~140	45~55	28~32	19~21
北201-*	3498	4048	550	75	7.33	钻时慢	80~160	45~50	32~34	23~24
北2-*	3486	3786	300	73	4.11	换定向仪器	80~120	45~50	28~30	20~21
平均			423.3	75.3	5.62					

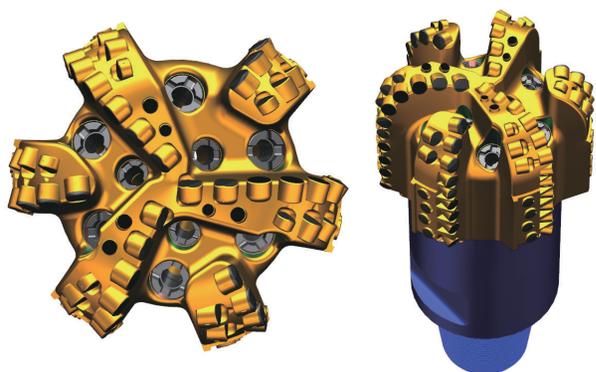


图6 钻头模型

Fig.6 Drill bit model



(a)新钻头



(b)使用后钻头

图7 钻头使用前后对比

Fig.7 Comparison before and after usage of the bit

单只进尺提高了42.2%，机械钻速提高了36%，提速提效成果显著。

4 结论与建议

本文针对龙凤山气田火山岩地层特点开发的个

性化PDC钻头取得了较好效果,并得到以下结论:

(1)本文设计的三棱平顶齿抗冲击、研磨性能优于平顶斧形齿、常规三棱齿和平面齿;

(2)击碎线攻击性比值0.54、光顺性比值0.84,提高鼻部布齿密度25%,提高肩部布齿密度40%,整体布齿密度提高30%,能够显著提高钻头抗冲击、抗研磨性能;

(3)本文设计的6刀翼16 mm三棱平顶齿钢体PDC钻头在可钻性级值6~8级、抗压强度170~220 MPa、研磨性80~110 mg、内摩擦角 38° ~ 42° 、石英含量20%~50%的火山岩地层中使用效果显著,其单只钻头进尺(寿命)和机械钻速均得到大幅提升。

(4)建议该钻头下步与超大扭矩螺杆、扭力冲击器等提速新工具适配,试验成功后可在类似火山岩地层推广使用。

参考文献(References):

- [1] 王光明,李达,倪晓骅.PDC钻头异型切削齿研究进展[J].石油矿场机械,2022,51(4):78-83.
WANG Guangming, LI Da, NI Xiaohua. Overseas research progress of special-shaped cutters for PDC bit [J]. Oil Field Equipment, 2022,51(4):78-83.
- [2] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J].钻探工程,2023,50(1):39-48.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):39-48.
- [3] 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.
- [4] 金永男,陈宗涛,由昌英,等.PDC钻头切削齿布齿设计的新思路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):72-76.
KIM Yongnam, CHEN Zongtao, YU Changyong, et al. New idea of cutting teeth arrangement design for PDC rock bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(5):72-76.
- [5] 杨进,高德利,郑全方.岩石声波时差与岩石可钻性的关系及应用[J].钻采工艺,1998,21(2):1-3.
YANG Jin, GAO Deli, ZHENG Quanfang, et al. Research on relation between rock sonic in-interval transit time and rock drillability and its application[J]. Drilling & Production Technology, 1998,21(2):1-3.
- [6] 楼一珊,陈恩强,张厚美.利用测井资料计算岩石可钻性的研究

- 及应用[J]. 钻采工艺, 1997, 20(3): 14-16.
- LOU Yishan, CHEN Enqiang, ZHANG Houmei. Research and application of calculating rock drillability using logging data [J]. *Drilling & Production Technology*, 1997, 20(3): 14-16.
- [7] 刘向军, 宴建军, 罗平亚, 等. 利用测井资料评价岩石可钻性研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 69-71.
- LIU Xiangjun, YAN Jianjun, LUO Pingya. Evaluation on rock drill-ability by well logging data [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(7): 69-71.
- [8] 陈宇. 川东北地区岩石可钻性分析及钻头选型的测井研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- CHEN Yu. Drillability analysis of rocks and logging research on bit selection in Northeast Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [9] 张富晓, 黄志强, 周巳. PDC钻头切削齿失效分析[J]. 石油矿场机械, 2015, 44(9): 44-49.
- ZHANG Fuxiao, HUANG Zhiqiang, ZHOU Yi. Failure analysis of PDC bit cutter [J]. *Oil Field Equipment*, 2015, 44(9): 44-49.
- [10] 杨庆理. 复杂地层PDC钻头个性化设计及应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
- YANG Qingli. Application study and personalized design of PDC bits under complex geological condition [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.
- [11] Michael Azar, Allen White, Suman Velvaluri. Middle East hard abrasive formation challenge: Reducing PDC cutter volume at bit center increases ROP drilling efficiency [R]. SPE IADC 166755, 2013.
- [12] Michael Azar, Allen White, Steven Segal. Pointing towards improved PDC bit performance: Innovative conical shaped polycrystalline diamond element achieves higher ROP and total footage [R]. 2013 Technical Conference of American Association of Drilling Engineers, 2013: 163521.
- [13] Schlumberger. Axebledged diamond element bit [EB/OL]. 2021-08-20.
- [14] 邹德永, 徐城凯, 易杨, 等. PDC钻头布齿参数与地层适应性的试验研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 85-90.
- ZOU Deyong, XU Chengkai, YI Yang, et al. An experimental study on PDC bits' cutter parameters and formation adaptability [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(9): 85-90.
- [15] 田志欣, 刘俊. PDC钻头优化及其在南海番禺油田的应用[J]. 石油机械, 2016, 44(11): 33-37.
- TIAN Zhixin, LIU Jun. PDC bit optimization and application in Panyu Oilfield of the South China Sea [J]. *China Petroleum Machinery*, 2016, 44(11): 33-37.
- [16] 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.
- [17] 牛世伟, 杨迎新, 牛永超. PDC钻头布齿计算方法的研究现状及发展[J]. 石油机械, 2015, 43(9): 6-9.
- NIU Shiwei, YANG Yingxin, NIU Yongchao. Research status and development of calculation method for PDC bit tooth arrangement [J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(9): 6-9.
- [18] 刘志鹏, 曾恒, 周学军. 适应于特定地层的PDC钻头个性化设计[J]. 天然气工业, 2013, 33(3): 59-63.
- LIU Zhipeng, ZENG Heng, ZHOU Xuejun. An individualized PDC bit design for specific formations [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(3): 59-63.

(编辑 王文)