

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2019083

刀翼式孕镶金刚石钻头设计及在哈山 101 井的应用

张进双¹, 张增宝², 王学才³

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东东营 257000; 3. 中石化胜利石油工程有限公司塔里木分公司, 山东东营 257000)

摘 要: 为提高准噶尔盆地哈山区块火山岩地层机械钻速、增大单只钻头进尺、降低井眼失稳掉块卡钻风险, 设计了刀翼式孕镶金刚石钻头。在分析地层岩石的力学特性的基础上, 研发了新型胎体合金材料, 以提高钻头研磨性; 镶嵌孕镶切削块, 以增强钻头破岩能力; 优化设计了刀翼式孕镶金刚石钻头的结构和防卡流道, 防止钻头卡死。研究发现, 超细合金材料相互联结成键、牢固烧结, 钻头胎体力学性能提高 30% 以上。刀翼式孕镶金刚石钻头配合高速大扭矩螺杆钻具在哈山 101 井火山岩地层进行了应用, 单只钻头进尺增大 4 倍, 机械钻速提高 54.3%。研究结果表明, 刀翼式孕镶金刚石钻头可以降低掉块卡钻风险, 可实现火山岩地层安全高效钻进。

关键词: 火山岩; 安全钻井; 机械钻速; 刀翼式孕镶金刚石钻头; 哈山 101 井; 哈山区块

中图分类号: TE921⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2019)05-0057-05

The Design of Blade Type Diamond-Impregnated Bit and It's Application in Well Hashan 101

ZHANG Jinshuang¹, ZHANG Zengbao², WANG Xuecai³

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Oil & Gas Exploration and Management Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257000, China; 3. Tarim Drilling Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: In order to improve the ROP in the volcanic rock formation of the Hashan Area in Junggar Basin, increase the footage of single drill bit, and reduce the risks of wellbore instability and caving, the bit design for rapid drilling was carried out. The mechanical performance of the formation rock was analyzed by a full-scale coring indoor test. On this basis, a new matrix alloy material was developed to improve the grinding performance of the bit. Then, the impregnated cutting block was used to enhance the rock breaking ability, and the blade-type impregnated bit structure and the anti-sticking flow path were optimized. The caving falling into the oblique chip flute could be pushed upward to prevent the bit from being stuck. It was found that the ultra-fine alloy materials could be bonded to each other to form a firm adhesion, and the mechanical performance of bit matrix improved by more than 30%. The blade-type impregnated drill bit was used in the volcanic rock formation of Well Hashan 101 associated with a high-speed and high-torque screw power drill, the single bit footage was increased by 4 times and the ROP was increased by 54.3%. This technology also effectively reduced the risk of caving and sticking, and became an effective technical measure for safe and efficient drilling in such formations.

Key words: volcanic rock; safe drilling; penetration rate; blade type diamond-impregnated bit; Well Hashan 101; Hashan Block

准噶尔盆地哈山区块二叠系—石炭系火成岩发育^[1], 分布广、厚度大, 岩石剪强度高、研磨性强、可钻性差, 钻井过程中井眼失稳、地层漏失、蹩跳钻、断钻具和卡钻等井下故障频发, 难以实现安全高效钻进^[2]。国外 Smith 公司针对强研磨性硬地层钻井提速技术难题, 研发了孕镶金刚石钻头 and 高速涡轮钻具, 但孕镶金刚石钻头采用长保径设计, 仅

收稿日期: 2018-10-23; 改回日期: 2019-06-21。

作者简介: 张进双 (1973—), 男, 河北唐山人, 1996 年毕业于西北工业大学机械电子专业, 2003 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事超深井钻井技术研究、风险探井工程设计和现场技术服务工作。E-mail: zhangjs.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”之课题“海相碳酸盐岩超深油气井关键工程技术” (编号: 2017ZX05005-005) 资助。

适用于井壁稳定地层;高速涡轮钻具掉块卡钻风险高,处理困难。国内前期进行了多种钻井提速技术探索,哈山3井上部地层采用“PDC钻头+扭冲钻具”和VTK垂直钻井技术,取得了良好的提速效果,但进入火山岩地层后钻头进尺变短、机械钻速变慢;空气钻井技术提速效果良好,但地层出水使其应用受限(哈山201井地层出水量达到了 $33\text{ m}^3/\text{h}$);哈深2井在应用自激振荡式旋冲工具钻进火山岩地层时蹩跳钻严重,钻速不足 0.25 m/h ^[3-5]。为此,笔者针对哈山区块火山岩地层特征和钻井技术难点,对孕镶金刚石钻头的刀翼结构和水力流道进行了优化设计,采用了新型预合金胎体合金材料,优选高品质抗磨天然金刚石晶体,通过大量试验获得了钻头最佳烧结温度,设计了刀翼式孕镶金刚石钻头,并与大扭矩高速螺杆钻具配合在哈山101井进行了应用,机械钻速和钻头进尺大幅提高,实现了火山岩地层提速技术的突破。

1 地质特征和钻井难点

1.1 地质特征

哈山区块位于准噶尔盆地西部隆起哈山山前构造带前缘冲断带,南邻玛湖凹陷,北部以达尔布特断裂为界与和什托洛盖盆地相接,有利勘探面积约 $1\,000\text{ km}^2$,邻区发现了百口泉、乌尔禾、风城和夏子街等4个油田,具有较好的油气地质条件。该地区地表出露石炭系、二叠系和白垩系地层,其余被第四纪地层覆盖。石炭系地层火山岩发育,厚度达 $2\,000.00\text{ m}$ 以上,上部风城组主要为灰色、深灰色泥岩,夹凝灰质砂岩、白云质泥岩,下部佳木河组主要为深灰色、灰色火山角砾岩和深灰色火山岩。随着井深增加,地层岩石抗压强度升高,哈山区块岩石

力学试验结果表明,上部地层岩石单轴抗压强度 $158.44\sim 288.79\text{ MPa}$,硬度 $1\,647\sim 2\,307\text{ MPa}$,深部火山岩地层围压 60 MPa 条件下的抗压强度达 530.6 MPa (见表1),岩石可钻性级值普遍在10以上。

表1 哈山区块岩石力学试验结果

Table 1 Test results of the mechanical performance of coring rock in Hashan Block

样品编号	围压/ MPa	温度/ ℃	饱和 状态	抗压强度/ MPa	杨氏模量/ GPa
hs101-3326-sp0	0	20	干燥	163.58	27.89
hs101-3326-sp45	0	20	干燥	158.44	26.98
hs101-3326-cz1	0	20	干燥	175.65	28.97
hs101-3937-cz1	0	20	干燥	288.79	59.72
hs101-3326-cz2	30	20	干燥	408.81	46.54
hs101-3326-cz3	60	20	干燥	530.60	55.48

1.2 钻井技术难点

钻进不同岩性地层时的钻速差异很大,哈山区块上部凝灰岩地层可钻性好、钻速较快,玄武岩地层次之。该区块地层岩石力学试验结果发现,下部地层岩石强度高、可钻性差,围压条件下岩石的抗压强度甚至高于川东北地区须家河组二段地层,其中火山岩地层岩石硬度高、研磨性强,破岩难度极大,钻井提速面临巨大挑战。

1)下部地层强度高,PDC钻头易崩齿和断齿;牙轮钻头进尺少、机械钻速低,起下钻频繁^[6]。哈深2井完钻井深 $5\,238.26\text{ m}$,共使用钻头162只,平均机械钻速仅 0.73 m/h (见表2)。哈山101井上部井段气体钻井发生燃爆后转换为常规钻井,平均单只牙轮钻头进尺 10.72 m ,纯钻时间 30.86 h ,机械钻速 0.35 m/h ,掉齿磨损严重(见图1)。

表2 哈山区块部分完钻井的钻井技术指标

Table 2 Drilling technical indicators of some drilled wells in the Hashan Block

井号	井深/m	火山岩厚度/m	钻井周期/d	机械钻速/ $(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	钻头总量/只	牙轮钻头用量/只
哈山1井	2 554.00	2 008.00	105.4	1.86	29	20
哈山3井	4 139.80	3 532.80	412.3	1.24	62	52
哈深2井	5 238.26	5 148.30	823.8	0.73	162	142

2)哈山区块受地壳运动和造山运动影响,区域构造地应力异常,钻井过程中易发生井眼失稳、剥落掉块等井下故障,卡钻风险高。哈深2井采用“常规孕镶金刚石钻头+高速螺杆钻具”复合钻进

时发生卡钻事故,采取多种解卡措施无法解卡,被迫提前完钻。哈山101井钻进过程中扭矩波动幅度大,钻井泵时有憋压(压力增幅约 1.0 MPa),振动筛始终有掉块返出(见图2)。



图 1 哈山 101 井火山岩地层牙轮钻头出井形貌

Fig. 1 POOH morphology of roller bit after drilling in the volcanic rock formation of Well Hashan101



图 2 哈山 101 井稠浆携岩返出掉块

Fig. 2 Caving returns carried out by viscous mud of Well Hashan101

2 刀翼式孕镶金刚石钻头设计

孕镶金刚石钻头是一种自锐性钻头,以微剪切和研磨联合作用方式破碎岩石,用于钻进致密难钻地层和强研磨性软硬交错地层,是强研磨性、高抗压强度和高温地层提速的有效工具。不同火山岩地层岩性和物理力学性质差别大,钻头结构、地层岩性变化、岩石特性直接影响钻头的使用寿命和钻进速度^[7-8],通过优化钻头结构、胎体性能、烧结工艺和水力流场,可以提高孕镶金刚石钻头的性能^[9]。针对常规孕镶金刚石钻头易发生阻卡、中心易磨损及本体强度不足等问题,在总结前期现场应用经验的基础上,根据哈山区块火山岩地层特征,进行了特种孕镶金刚石钻头结构和水力流道防卡优化设计,研发了新型胎体合金材料和切削齿,在此基础上设计了刀翼式孕镶金刚石钻头。

2.1 钻头结构及水力流道优化

前期针对高研磨性砂砾岩地层钻井提速难题,综合考虑钻头寿命、钻井效率及配套使用高速螺杆钻具,增大了钻头保径长度,以提高其工作稳定性;

钻头设计为双锥形 15 刀翼结构,切削齿在井底平衡均布,以增大岩石接触面积(见图 3(a))。

为了能够适应哈山区块火山岩地层抗压强度高、胶结致密、井壁易剥落掉块的特点,并满足提高机械钻速、延长钻头使用寿命和防卡的要求,对刀翼式孕镶金刚石钻头进行了以下改进:1)刀翼数量减少为 9 个(见图 3(b)),刀翼间宽度设计超过 2.5 cm;2)进一步强化保径部分的防卡设计,优化水力流道,将 2 个刀翼合并为 1 个,形成宽刀翼排屑槽(有 3 个比较大的水路从井底连通到外保径),配合斜倾角弯流道设计,掉落岩块落入排泄槽可受到向上的推力,从而防止钻头被卡死;3)钻头保径部位布设倒划眼切削齿,使钻头在划眼作业时具有一定的切削能力。

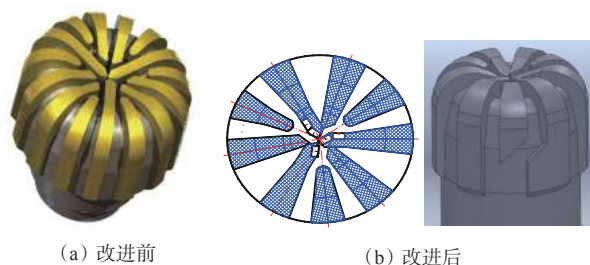


图 3 刀翼式孕镶金刚石钻头改进前后的结构对比

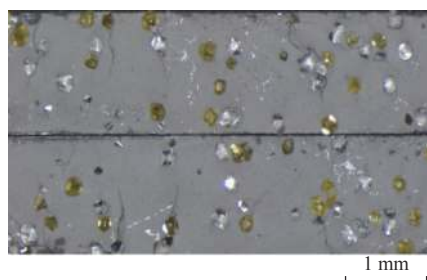
Fig. 3 Structural comparison of the blade-type impregnated diamond drill bit before and after improvement

2.2 新型预合金钻头胎体材料的研发

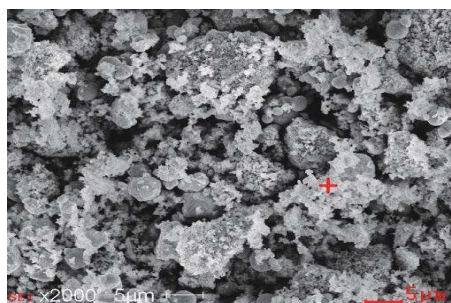
胎体预合金超细粉末材料要求能牢固地烧结,不同材料微观表面上的原子要相互作用成键,成键能力越强,烧结越牢固。浸渍合金的选择遵循以下原则:1)结构对应原则,即合金表面上原子分布有一定对应关系,各有 2 个或 3 个未成对电子;2)共价成键原理,不同合金未成对电子互相配对形成结构稳定的共价键;3)低熔点原则,即在烧结过程中熔融态的浸渍合金保留有序结构,与金刚石晶面充分接触并实现化学冶金结合,同时所选择的浸渍合金在烧结时对金刚石的浸蚀作用尽量小。

通过多次钻头烧结试验,获得了新型预合金胎体材料的最佳烧结温度,此时金刚石与胎体粉末不发生化学反应,胎体中的金刚石石墨化程度小,依然呈黄亮色(见图 4(a)),钻进时金刚石颗粒能够保持良好的切削性能。由预合金粉末扫描电镜图(见图 4(b))可以看出,粉末颗粒中包孕了预合金粉末的多种金属材料,胎体中各元素分布均匀、合金化

程度高,未出现粉末元素机械混合偏析现象,胎体的力学性能得到了很大改善,强度提高30%~50%。



(a) 烧结后金刚石晶体形貌



(b) 胎体粉末扫描电镜图

图4 金刚石钻头晶体形貌和胎体粉末扫描电镜图

Fig.4 Crystal morphology of diamond bit and scanning electron micrograph of matrix powder

2.3 钻头整体设计

为了提高刀翼式孕镶金刚石钻头的综合性能,对其进行了整体设计。针对哈山区块火山岩的强研磨特性,增大了金刚石颗粒含量和工作层厚度,以提高钻头进尺、延长使用寿命。胎体上二次镶焊切削齿,设计为“表镶层+孕镶层”,表层为天然金刚石颗粒,内层为胎体中添加高品质人造金刚石单晶的孕镶层。表层天然金刚石消耗完后,孕镶层胎体可继续工作,增大钻头进尺。钻头中心线速度比较低、耐磨性差,利用复合片耐磨性高、抗冲击韧性好的特点,在钻头中心部位进行非干涉式偏心布齿,增强钻头中心部位的抗磨性,从而实现钻头工作面整体均匀磨损。

3 现场应用

哈山101井上部井段采用气体钻井技术,钻速较高^[10],但三开 $\phi 215.9$ mm井段钻至井深2 977.65 m时发生燃爆,形成了大肚子井眼,于是转换为转盘钻井方式,单只牙轮钻头进尺10.72 m,机械钻速仅为0.35 m/h,钻井过程中掉块较多,蹩跳钻频繁。为

提高该井火山岩地层钻井效率,应用了“刀翼式孕镶金刚石钻头+高速螺杆钻具”的提速技术,单只钻头进尺和机械钻速大幅度提高。

3.1 钻具组合和钻井参数

钻具组合为: $\phi 215.9$ mm刀翼式孕镶金刚石钻头+随钻打捞杯+ $\phi 172.0$ mm高速螺杆钻具+单流阀+减振器+ $\phi 158.8$ mm钻铤 $\times 17$ 根+随钻上下震击器+ $\phi 158.8$ mm钻铤 $\times 2$ 根+ $\phi 127.0$ mm加重钻杆 $\times 14$ 根+ $\phi 127.0$ mm钻杆。

钻井参数为:钻压60~80 kN,排量30 L/s,转盘转速30~50 r/min,泵压22 MPa,高速螺杆钻具输出转速500 r/min。

3.2 防掉块卡钻措施

上部井段采取的防掉块卡钻技术措施为:1)采用加长高速螺杆钻具,提高工作扭矩,以防憋停;2)钻具组合中加入减振器防止跳钻,去掉稳定器,尽可能降低卡钻风险;3)钻具组合中加入随钻上下震击器,提高处理井下复杂情况的能力;4)提高钻井液的抑制防塌封堵性能,采用强触变钻井液(塑性黏度大于35 mPa·s),间断泵入稠浆塞清洗携岩。

3.3 现场应用过程及效果分析

钻具组合下钻至井深3 415.00 m(距井底120.00 m)时遇阻严重,钻压10~30 kN划眼,用时3 h仅下钻10.00 m。分析认为,上部井段钻头磨损严重,井径缩小0.9 mm左右,于是增大钻压划眼,以不超过螺杆额定工作泵压为限,6 h后下钻至井底。

划眼到井底后采用递增钻压造型,钻井参数为:钻压20~40 kN,转盘转速30 r/min,排量30 L/s,立压21 MPa;造型后正常钻进时的钻井参数为:钻压60~80 kN,转盘转速30~50 r/min,排量30 L/s,立压22 MPa。

钻至井深3 592.00 m后起钻,高速螺杆钻具工作时间120 h,起出的钻头冠部磨损2~3 mm、径径无磨损缩径,出井新度评价80%。单只孕镶金刚石钻头进尺相当于5只牙轮钻头,机械钻速提高54.3%,行程钻速提高115.0%,为此下部井段继续应用该技术钻进,应用效果见表3。

4 结论与建议

1)哈山区块火山岩地层岩性致密、强度高、硬

表 3 刀翼式孕镶金刚石钻头应用技术数据

Table 3 Technical data of blade-type impregnated diamond bit

序号	钻进井段/ m	进尺/ m	钻速/ (m·h ⁻¹)	排量/ (L·s ⁻¹)	转盘转速/ (r·min ⁻¹)	螺杆转速/ (r·min ⁻¹)	泵压/ MPa	钻压/ kN	备注
1	3 539.50~3 592.00	52.50	0.54	30	30~50	500	22.0	60~70	螺杆到寿命后起钻
2	3 592.00~3 639.89	47.89	0.44	30	30~50	500	22.5	70~80	泵压升高后起钻
3	3 814.10~3 848.52	34.42	0.42	30	30~50	500	23.0	80~100	钻速变慢后起钻

度大,可钻性差,常规钻井方式钻速慢、钻头进尺少,“刀翼式孕镶金刚石钻头+高速螺杆钻具”提速技术应用获得成功,成为钻井提速的有效手段。

2)通过改进孕镶金刚石钻头胎体材料的耐磨性,增大了单只钻头进尺,延长了钻头使用寿命;采用刀翼式结构,提高了钻头的防卡能力。

3)哈山区块火山岩地层稳定性差,应辅以简化钻具组合、稳定钻头工况和提高钻井液防塌抑制性等配套安全钻井技术措施,最大限度地减少井下复杂情况,降低钻井风险。

4)预合金钻头胎体材料的耐磨性得到了检验,但如何提高孕镶层金刚石出刃速度、增强刀翼式孕镶金刚石钻头在各种工况下的稳定性,需要进行进一步研究。

参 考 文 献

References

[1] 张奎华, 林会喜, 张关龙, 等. 哈山构造带火山岩储层发育特征及控制因素 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 16–22.

ZHANG Kuihua, LIN Huixi, ZHANG Guanlong, et al. Characteristics and controlling factors of volcanic reservoirs of Hala’alate mountains tectonic belt[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 16–22.

[2] 王贵新. 准噶尔盆地哈山山前构造带钻井分析 [J]. 石化技术, 2017(3): 128.

WANG Guixin. Analysis of drilling in Hassan piedmont tectonic belt of Zhungeer Basin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017(3): 128.

[3] 张学光. 哈山 3 井石炭系钻井提速探索与实践 [J]. 内蒙古石油化工, 2013, 39(20): 38–40.

ZHANG Xueguang. The exploration and practice of carboniferous ROP enhancement in Hassan 3 Well[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2013, 39(20): 38–40.

[4] 梁奇敏, 何俊才, 张弘, 等. 钻井提速工具经济性预测评价方法 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(3): 57–61.

LIANG Qimin, HE Juncai, ZHANG Hong, et al. Assessment of the economic performance of ROP enhancement tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(3): 57–61.

[5] 王滨, 李军, 邹德永, 等. 适合强研磨性硬地层 PDC–金刚石孕镶块混合钻头设计与应用 [J]. 特种油气藏, 2018, 25(1): 169–174.

WANG Bin, LI Jun, ZOU Deyong, et al. Design and application of a PDC hybrid drill bit with impregnated diamond insert for the hard formation with strong abrasivity[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 169–174.

[6] 马凤清. 哈山 3 井火成岩地层快速钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 112–116.

MA Fengqing. Fast drilling technique through igneous rocks in Well Hashan 3[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 112–116.

[7] 罗治奇. 火山岩地层钻进金刚石钻头寿命与效率的探讨 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(2): 63–66.

LUO Zhiqi. Discussion on service life and efficiency of diamond bit drilling in volcanic strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(2): 63–66.

[8] 蔡家品, 贾美玲, 史强. 元坝地区新型金刚石钻头的应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(11): 70–72.

CAI Jiapin, JIA Meiling, SHI Qiang. Research and application of new type of diamond bit in Yuanba Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(11): 70–72.

[9] 赵尔信, 蔡家品, 贾美玲, 等. 浅谈国内外金刚石钻头的发展趋势: 高效、低耗 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 70–73, 81.

ZHAO Erxin, CAI Jiapin, JIA Meiling, et al. Discussion on development trend of diamond bit both in China and abroad[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(10): 70–73, 81.

[10] 牛洪波, 冯光通, 赵洪山, 等. 哈山 101 井火成岩地层空气锤钻井技术 [J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(2): 164–168.

NIU Hongbo, FENG Guangtong, ZHAO Hongshan, et al. Application of air hammer drilling technology in the igneous strata of Well Hashan 101[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(2): 164–168.

[编辑 令文学]