

砂砾岩地层的岩石力学特性及钻头优化方法

朱海燕¹, 邓金根¹, 朱晓梅², 李贲², 黄凯文³, 邓福成¹, 赵永丽⁴, 杜向东⁵

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 河南石油勘探局钻井工程公司, 河南南阳 473132
3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司钻井部, 广东湛江 524057
4. 中国石化胜利油田桩西采油厂, 山东东营 257077
5. 成都百施特金刚石钻头有限公司, 成都 610041

摘要 为了提高珠江口盆地含砾地层的钻井速度, 对该油田的矿物组份及岩性进行了分析, 开展了含砾地层的强度、可钻性和研磨性室内实验, 弄清了该油田砂砾岩地层的岩石力学特性。根据地层的岩石力学特性和邻井钻头的使用效果, 从聚晶金刚石复合片(PDC)钻头的复合片、冠部轮廓、布齿方式和水力结构等方面, 对 PDC 钻头进行结构优化。优化后的新型 PDC 钻头进尺比普通 PDC 钻头提高 131% 以上, 钻速提高 82% 以上, 钻井成本每米减少 28%。本文提出了考虑地层岩石力学特性、钻头使用效果和钻头综合性能相结合的优化方法, 该方法简单有效。

关键词 砂砾岩; 岩石力学; PDC 钻头; 结构优化

中图分类号 TE21

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h1.015

Rock Mechanics Properties of Glutenite Formation and Bit Structure Optimization

ZHU Haiyan¹, DENG Jinggen¹, ZHU Xiaomei², LI Ben², HUANG Kaiwen³, DENG Fucheng¹, ZHAO Yongli⁴, DU Xiangdong⁵

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China
2. Henan Petroleum Exploration Bureau Drilling Engineering Company, Nanyang 473132, Henan Province, China
3. Drilling Department of Zhanjiang Company, China National Offshore Oil Company Limited, Zhanjiang 524057, Guangdong Province, China
4. Zhuangxi Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company Limited, Sinopec, Dongying 257077, Shandong Province, China
5. Chengdu Best Diamond Bit Company Limited, Chengdu 610041, China

Abstract In order to improve the Rate of Penetration (ROP) of the glutenite formation in the Pearl River Mouth Basin (PRMB) Oilfields, the lithological characters of glutenite formation was identified by the X-ray diffractometer. Laboratory experiments on core Uniaxial Compressive Strength (UCS), drill ability, and abrasive property were conducted to study their rock mechanics properties. According to the rock mechanics properties and the drilling data of the used PDC bit, the Polycrystalline Diamond Compact (PDC) cutters are optimized in terms of the bit crown, cutters distribution method, and hydraulic structure of the PDC bit. Comparing with the bits used in the adjacent wells, the drilling footage and the ROP of the optimized PDC bit are improve by 131% and 48%, respectively; and the drilling cost per meter is also reduced by 28%. The bit optimization method proposed takes the effects of the rock mechanics parameters,

收稿日期: 2012-08-28; 修回日期: 2012-12-28

基金项目: 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb2011008); 国家油气重大专项(2008ZX05026-001-01); 国家自然科学基金重点项目(51134004)

作者简介: 朱海燕, 博士研究生, 研究方向为石油工程岩石力学与配套装备等, 电子邮箱: zuhaiyan040129@163.com

the drilling data of the used PDC bits, and the total property of all the bit parts into consideration and is simple and effective, which might be able to apply to the bit optimization of complex formation in the future.

Keywords glutenite formation; rock mechanics properties; PDC bit; structure optimization

0 引言

石油钻井中经常会遇到大量含砾地层,砾石质地坚硬,在地层中非均质分布,致使地层软硬交错,非均质性强,研磨性较高。统计 2008—2009 年南海西部海域珠江口盆地的钻井情况发现,在钻遇含砾地层时,平均机械钻速较之前的地层降低 50%以上,最严重的井段机械钻甚至降低达 80%,同时钻头磨损严重,钻头断齿、碎齿情况经常发生,严重影响钻井效率。因此,在含砾复杂地层中的油气钻探作业,一直是石油钻井工程中的一个技术难题^[1-3]。随着 PDC 复合片材料、结构及加工工艺的不断改进,PDC 钻头应用于含砾地层的高效钻井已成为可能。国内外学者对于 PDC 钻头与含砾地层的相互作用和适用于含砾地层的 PDC 钻头结构做了一定的研究,但研究具有一定的针对性^[4-10]。对于含砾石地层的 PDC 钻头的优化设计研究,应首先以岩石力学为基础,弄清地层的力学特性,结合临井钻头的使用情况,对症下药。对珠江口盆地的含砾地层,有必要进行岩石力学特性和 PDC 钻头在含砾地层中的应用研究,针对地层的岩石力学特性,开发适用于该地层的 PDC 钻头,力求建立一套通用的含砾地层钻进的 PDC 钻头结构优化方法,以满足高效钻井的要求,缩短钻井周期,节约钻井成本。

1 砂砾岩地层的岩石力学特性

1.1 矿物组份测定

采用 X 射线衍射仪 Rigaku D/Max 2500 PC,对珠江口盆地

9 口井的矿物组份测定,分析执行标准 SY/T 6210—1996^[11]。珠江口盆地地层含石英 31.2%~62.5%,含黏土矿物 18.3%~38.6%,石英含量较高;Z-1 段部分井含菱铁矿 5.7%,Z-2 段部分油田菱铁矿含量高达 18%。统计 16 口探井的录井资料,发现珠江口盆地以砂岩为主,砂、泥岩不等厚互层,含有 2~3mm 的砾石颗粒 6%以上,岩性变化频繁,地层非均质性强,致密压实。

1.2 地层强度实验

珠江口盆地 3341~3986m 井段(Z 组)取心 23 块。按照标准,岩样分别加工成直径 25mm 和 38mm,长径比为 1.8~2.0 的岩样,部分加工岩样如图 1 所示。试验设备采用 TAW-1000 深水孔隙压力伺服试验系统^[12],实验结果见表 1。



图 1 珠江口盆地部分 ϕ 38mm 岩样

Fig. 1 Partial ϕ 38mm samples in Pearl River Mouth Basin

Z 组砂岩地层属于中高强度,呈硬脆性,但在围压下强度增加很快,围压每增加 15MPa,岩石的破坏强度约增加到原来的 2~3 倍。中砂岩的破坏强度远远小于细砂岩,约为细砂岩的 1/2。

表 1 三轴强度试验结果

Table 1 Results of rock compressive strength test

井号	井深/m	层位	围压/MPa	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	岩性
C-11-2	3070.7	Z-2 段	0	33.7	14.7	泥质粉砂岩
C-10-2	3347.8	Z-1 段	0	23.0	5.2	中砂岩
	3347.8	Z-1 段	30	178.1	15.6	中砂岩
C-9-2	3985.9	Z-2 段	0	58.8	10.4	细砂岩
	3985.9	Z-2 段	15	161.2	15.3	细砂岩
	3985.9	Z-2 段	30	293.6	21.7	细砂岩

1.3 岩心微钻头可钻性实验

38mm 岩心由于直径太小而在实验过程中无法固定,因此将岩心用隔水材料包裹,用水泥固结成 100mm×100mm×100mm 的方形试样,再磨平水泥-岩心样两端。根据行业标准 SY/T 5426—2000^[13],对岩心可钻性进行测定(表 2)。珠江口盆地可钻性级值为 4.6~6.44,地层整体偏软,可钻性较好。

1.4 研磨性实验

用改装的岩石可钻性仪设计了基于 PDC 钻头钻进过程

特点的岩石研磨性实验装置。实验采用 PDC 微钻头作为切削工具。为了模拟实际钻井过程中的井底情况,保证微钻头始终破碎新鲜岩面并使 PDC 片处于正常的研磨状态,采用清水冷却钻头和冲洗岩屑。实验仪器为改装的可钻性仪,将其最高轴压从 900N 提高至 1200N,最高转速从 55r/min 提高至 300r/min,并对仪器箱体做防水处理,改装简单易行,实验装置通用性好。PDC 微钻头轴压 1000N,转速 200r/min,每次实验时间 30min。实验结束后用游标卡尺测量岩石破碎坑体积,

表 2 岩石可钻性测试结果

Table 2 Results of rock drill ability experiment

井号	井深/m	地层	岩性	钻时/s	实测级值
C-9-2	3784.7	Z-2 段	泥质粉砂岩	86.61	6.44
	3785.5	Z-2 段	含砾砂岩	28.50	4.83
	3785.5	Z-2 段	含砾砂岩	30.22	4.92
C-10-2	3341.5	Z-1 段	中砂岩	27.17	4.76
	3341.5	Z-1 段	中砂岩	24.31	4.6
	3348.7	Z-1 段	中砂岩	24.18	4.6
	3348.7	Z-1 段	中砂岩	25.76	4.69

用精度为 0.01mg 的天平测量 PDC 微钻头复合片的磨损损失重量。实验以破碎单位体积岩石时 PDC 微钻头复合片的磨损重量作为岩石的研磨性指标,称之为相对磨损率。研磨性指标 w 为

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta V} \quad (1)$$

式(1)中, ΔW 为 PDC 微钻头磨损重量,mg; ΔV 为岩石破碎体积,cm³; w 为研磨性指标,mg/cm³。

由表 3 可以看出,珠江口盆地 Z 组地层中砂岩研磨性低,含砾砂岩研磨性高,细砂岩研磨性较高。砂岩研磨性大小与其颗粒大小及是否含砾有关。

表 3 岩石研磨性实验结果

Table 3 Results of abrasivity test

井号	井深	岩性	地层	硬度/MPa	内摩擦角/(°)	研磨性/(mg·cm ⁻³)
C-10-2	3348	中砂岩	Z-1 段	420.5	42.51	0.94
C-9-2	3986	含砾细砂岩	Z-2 段	759.5	50.66	2.38
C-11-2	4026	中砂岩	Z-3 段	614.6	40.80	1.83
C-11-2	4224	含砾中砂岩	Z-3 段	659.3	36.66	2.13
C-11-2	4424	细砂岩	EP 组	774.9	36.93	2.54
C-11-2	4474	泥质粉砂岩	EP 组	430.7	25.13	1.00

2 PDC 钻头结构的优化设计

将每米钻井成本法和钻头结构参数法结合起来(图 2),优选最合理的钻头类型。首先,根据每米钻井成本法,对各地层已用钻头进行优选^[14];其次,根据钻头结构参数法,根据地层岩石力学性质对 PDC 钻头进行结构优化^[15]。

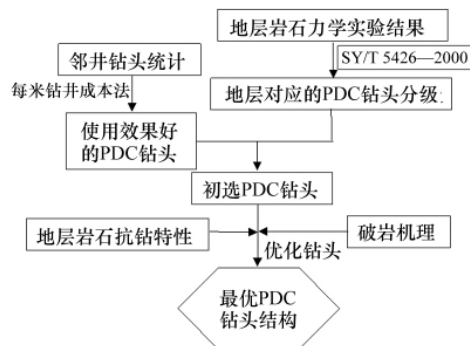


图 2 PDC 钻头优选流程

Fig. 2 Optimization flowchart of PDC bit

该盆地的抗压强度为 60~120MPa,可钻性级值为 4~7,研磨性为 2~8,根据岩石力学性质选择 PDC 钻头的 IADC 码均

为 M323,即 PDC 钻头布齿 40~50 个;齿径为 14~24mm;钻头冠部形状为中抛物线。PDC 钻头的最优结构,如刀翼数量、布齿方式、牙齿特性、刀翼形状等,还需要根据邻井钻头的使用效果和岩石力学性质进一步确定。

2.1 PDC 钻头在含砾石地层的应用情况

对珠江口盆地 2006—2009 年 26 口探井的钻头使用情况,进行统计分析,得出如下结果。(1) Z-2 段 37%的钻头因钻速低起钻,共使用了 11 只 PDC,1 只牙轮。其中 PDC 钻头:5/6/7-16 组合磨损为 45.5%,5-19 组合磨损为 18.2%,6/7-13 组合磨损为 27.3%;内排齿 72%磨损均在 25%以内,外排齿 54.5%磨损一半以上,1 只碎裂,1 只断齿,3 只磨出环形槽,2 只堵喷嘴;6-16 组合和 5-19 组合钻头使用效果较好;钻头磨损量大,特别是外排齿磨损严重,耐磨性和抗冲击性有待提高。(2) Z-3 段 64%的钻头因钻速原因起钻,共使用了 7 只 PDC,1 只牙轮。其中 PDC 钻头:6-16 组合磨损为 29%,5/6-19 组合磨损为 43%;内排齿 86%磨损均在 25%以内,外排齿 72%磨损一半以上,无碎裂、断齿现象;钻头磨损量较大,特别是外排齿磨损严重,耐磨性有待提高;6-16 组合和 5/6-19 组合效果较好。(3) EP 组 43%的钻头因钻速低起钻。EP 组共使用 4 只 PDC,2 只牙轮。其中 PDC 钻头:7-13 组合磨损为 75%,8-13 组合磨损

为 25%;内、外排齿 75%磨损均在 25%以内,有一钻头齿发生碎裂;钻头磨损一般,钻速有较大提升空间。

珠江口盆地抗压强度处于 50~120MPa,可钻性级值 4~7.3,根据国际 PDC 的分级标准,PDC 钻头在该范围内具有良好的切削性。PDC 钻头的平均进尺为 460.2m,平均钻速 8.68m,平均每米钻井成本为 3.31 万元/m;牙轮钻头的平均进尺为 179.78m,平均钻速 2.66m,平均每米钻井成本为 3.84 万元/m;PDC 钻头的进尺和钻速均高于牙轮钻头,每米钻井成本低于牙轮钻头,可知 PDC 钻头的使用效果明显优于牙轮钻头。虽然地层中的砂砾岩粒径 2~3mm,含量 6%~10%,增加 PDC 的切削齿的抗冲击性和抗研磨性,并在该层位使用合适的钻压和转速,PDC 钻头可以适应该地层。因此结合岩石力学性质可以得出,珠江口盆地均采用 PDC 钻头。

2.2 PDC 钻头的结构优化

珠江口盆地 PDC 钻头磨损、碎断齿严重,40%以上甚至 64%因钻头磨钝而钻速过慢起钻,不易采用动力钻具方式。最优转速推荐 110~150r/min 之间,砂岩层段取较小值,泥岩层段取较大值;地层的研磨性较强,采用较小钻压 30~80kN。PDC 钻头应配合减震器使用,来减小钻头的跳动,提高钻头使用寿命。根据每米钻井成本法优选出各层段的最优结构:珠海二、三段采用 6-16/19 组合,确保钻头的攻击性,同时需提高其抗冲击性和抗研磨性。EP 组可以采用更具有攻击性的 5-19 组合,或仍采用 6-19 组合。造成珠江口盆地钻头使用效果不理想的原因是钻头的先期破坏,提高钻头(特别是外锥)的抗冲击性和抗研磨性是提高钻头使用寿命的关键。在钻头的优化设计时需要考虑从以下几个方面考虑:(1) 提高牙齿的耐磨性和攻击性,以提高钻头在软硬夹层及含砾地层中的适应性;(2) 耐磨性好、抗冲击性、保径效果好的胎体结构;(3) 双排布齿,耐磨性好和抗冲击的后备切削齿,提高钻头的使用寿命;(4) 延长冠部抛物线,增加钻头外锥的布齿密度,以提高钻头耐磨性;(5) 设计保径面,提高钻头的保径能力。

2.2.1 新型 T 齿及其出刃

运用最新的压力系统,提高金刚石粉末的烧结压力,以得到更多的 D-D 化学键,使金刚石微粉之间的物理黏合转化为化学键联接,研制了新型 T 齿,从而大大提高 PDC 复合片的抗冲击能力和抗研磨的能力^[6]。PDC 复合片金刚石配方配合烧结工艺,使 T 齿的金属残留量比标准齿下降 20%,提高了复合片的热稳定性。将 T 齿和 Standard 齿在研磨性测试装置上,切削 8 边形花岗岩以测试复合片的抗研磨性。在切削过程中,采用碱性的皂液冷却复合片,称为 VTL(Wet)测试。经过 50 次的 VTL(Wet)测试,发现破碎相同体积的岩石,T 齿的磨损量要小于标准齿磨损量 50%(图 3)。在相同的冲击能量下,T 齿在落锤冲击试验中,每颗齿接受 10 次冲击,如果一次冲击后有 30%的面积破损就停止实验,实验表明 T 的破损率较上一代主力齿下降了 27%(图 4)。以上实验充分表明了 T 齿在没有降低抗冲击能力的情况下,抗研磨性提高 50%,即寿命提高了 50%以上。

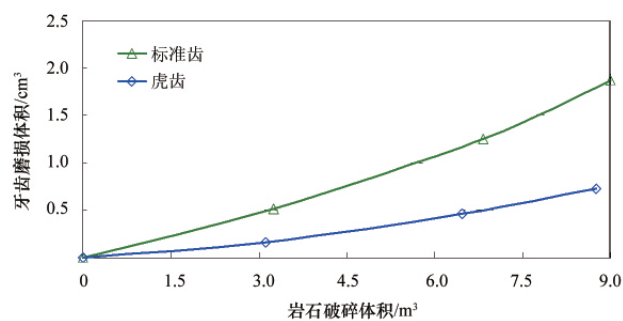


图 3 不同牙齿磨损体积与破碎岩石体积

Fig. 3 Rock breaking volumes and teeth wear volumes

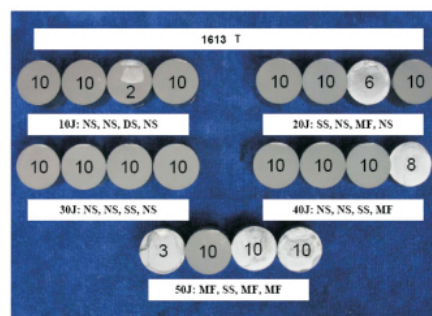


图 4 复合片冲击实验

Fig. 4 Results of drop weight impact test

采用专用焊剂,使其钎焊强度提高了 19%,剪切力从 170MPa 提升到 200MPa 以上。同时焊接温度从 710°,降低到 680°,这样不仅钻头的固齿能力得到提高,还降低了钎焊时高温对复合片的损伤。由于固齿能力的提高,使得钻头减少了掉齿的风险,在相同的焊接强度下,焊接面积减少了 12%,复合片出刃增加 15%达到 65%,使钻头更具攻击性,并能保持更长的时间。

2.2.2 钻头冠部轮廓、布齿及保径

新型 PDC 钻头采用了下列措施:(1) 6 刀翼包括 3 个长刀翼及 3 个短刀翼,环绕钻头体中心分布,冠型抛物线比原设计长 5%,采用 16mmT 系列复合片,增强钻头抗研磨能力;(2) 出刃的高度比原设计高出 15%;(3) 心部齿后角不变,肩部比原设计调大了 3°,加强了肩部抗冲击能力;(4) 刀翼采用 2 寸保径,以增强钻头的保径能力;(5) 增加后排齿和防撞节,提高钻头穿硬夹层的能力;(6) 肩部比原设计调大了 3°,加强钻头肩部抗冲击和稳定性。在钻头提高了复合片出刃后,采用 ANSYS 有限元分析软件,对新型 PDC 钻头进行有限元受力分析,确认钻头复合片受力在安全范围内。

2.2.3 钻头水力优化设计

在刀翼前端各分布 1 个喷嘴,长刀翼除前端布有喷嘴外,刀翼中部处也各布一个喷嘴。从两个方面改进钻头的井底流场:(1) 高比重泥浆如何带走岩屑,避免重复切削。在满足排屑的情况下减小了排屑的截面积,使流体速度提高了 36%,强化流场带屑和冷却复合片的作用,以达到避免重复切削和冷却复合片的要求;(2) 从有效冷却复合片的方向对钻头水

力进行优化,使前刀面流体的流速和流动方向有利于排屑和冷却复合片。

3 新型 PDC 钻头的现场应用

该钻头(图5)于2010-09-02在C-14-2井Z组井段使用,采用顶驱钻进;并采用推荐的钻压、转速和排量,实钻平均钻速11.37m/h,平均转速97.2r/min,平均钻压60.3kN,平均排量3182L/min。入井深度1911m,出井深度2386m,钻穿整个Z组,钻头纯进尺495m,纯钻时间42.87h,平均机械钻速11.55m/h,钻头出井磨损评价1-2-WT-A-X-I-BU-TD,其中2139~2297m为含砾粗砂岩,砾径2~7mm;2312~2386m为含砾粗砂岩,砾径1~4mm。C-14-2井进尺比临井C-14-3提高131%;钻速比邻井提高82%,每米钻井成本减少28%,新型PDC钻头使用效果较好。



图5 新型 PDC 钻头

Fig. 5 New typed PDC bit

4 结论

(1) 砂砾岩地层以石英为主,存在菱铁矿,地层强度为中硬地层,可钻性级值较好,研磨性较强,地层钻头的破坏主要以碎齿、断齿和磨损为主。

(2) 提出了一种综合考虑地层岩石的可钻性、研磨性、钻头使用效果和钻头各结构综合性能相结合的新型PDC钻头优化设计方法,以提高钻头的综合性能,使PDC钻头在该油田含砾地层具有较好的适应性。

(3) 采用新型的T齿,后排齿的布齿结构,并增加防撞短节,在保证钻头抗冲击性和抗研磨性的同时,提高牙齿出刃,以保证其破岩效率。研制的新型PDC钻头,进尺比临井提高131%,钻速比邻井提高82%,每米钻井成本减少28%,缩短了建井周期,降低了钻井成本,具有显著的经济效益和社会效益,建议该设计方法在各油田的含砾地区推广使用。

参考文献 (References)

- [1] 郭鸣黎. 西部地区巨厚砾石层钻井难点及对策[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 49-52.
Guo Mingli. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(6): 49-52.
- [2] 方甲兴, 王兴武. 塔1井巨厚砾石层钻井技术[J]. 钻采工艺, 2003, 26(6): 4-6.
Fang Jiaying, Wang Xingwu. Drilling & Production Technology, 2003, 26

(6): 4-6.

- [3] Zhu H Y, Deng J G, Xie Y H, et al. Rock mechanics characteristic of complex formation and faster drilling technique in Western South China Sea oilfields[J]. Ocean Engineering, 2012, (44): 33-45.
- [4] 翁炜. 含砾夹层用PDC钻头研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
Weng Wei. The study of PDC drilling bit for interbedded formation with gravel[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- [5] Sun M G, Zhang Y L, Yang Y K, et al. New cutting structure design improves the performance of the PDC bit [C]. SPE 62858, SPE/AAPG Western Regional Meeting, Long Beach, California, 19-22 June 2000.
- [6] Armour J E, Sankar R, Thomson I, et al. Depth analysis of drilling dynamics data solves severe vibration issues drilling interbedded sand/shale sequences in 3D-directional well profiles [C]. SPE 122051, SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Cartagena, Colombia, 31 May-3 June, 2009.
- [7] Behr S M, Warren T M, Snor L A, et al. 3D PDC bit model predicts higher cutter loads [C]. SPE 21928, SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands, 11-14 March, 1991.
- [8] 李天明, 李大佛, 陈洪俊, 等. 用于砾石夹层钻进的新型PDC钻头的研制与使用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006(8): 57-60, 63.
Li Tianming, Li Dafo, Chen Hongjun, et al. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006(8): 57-60, 63.
- [9] 高绍智, 张建华, 李天明, 等. 适用于砾石夹层钻进的新型PDC钻头[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(4): 20-21, 28.
Gao Shaozhi, Zhang Jianhua, Li Tianming, et al. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(4): 20-21, 28.
- [10] 孙明光, 张云连, 马德坤. 适合多夹层地层PDC钻头设计及应用[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 95-99.
Sun Mingguang, Zhan Yunlian, Ma Dekun. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 95-99.
- [11] 中国石油天然气总公司. SY/T 6210-1996: 沉积岩中黏土矿物总量和常见非粘土矿物X射线衍射定量分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
China National Petroleum Corp (CNPC). SY/T 6210-1996: Quantitative analysis of total contents of clay minerals and common non-clay minerals in sedimentary rocks by X-ray diff [S]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 1996.
- [12] 邓金根, 朱海燕, 谢玉洪, 等. 南海西部海域难钻地层特征及破碎机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2097-2102.
Deng Jingen, Zhu Haiyan, Xie Yuhong, et al. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2097-2102.
- [13] 国家石油和化学工业局. SY/T 5426-2000: 岩石可钻性测定及分级方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
State Bureau of Petroleum and Chemical Industry. SY/T 5426-2000: Rock drillability measurement and its classification [S]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2000.
- [14] 朱海燕, 祝效华, 刘清友. PDC钻头选型方法研究[J]. 矿山机械, 2008, 36(21): 14-16.
Zhu Haiyan, Zhu Xiaohua, Liu Qingyou. Mining & Processing Equipment, 2008, 36(21): 14-16.
- [15] Snor L A, Powers J R, Warren T M. The effect of PDC cutter density, back rake, size and speed on performance [C]. SPE 39306, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 3-6 March, 1998.
- [16] 钟尤刚, 杜向东, 张衡. 南海西部海域难钻地层高效破岩钻头技术研究[R]. 湛江: 成都百施特金刚石钻头有限公司, 2010.
Zhong Yougang, Du Xiangdong, Zhang Heng. High rock-breaking technology of the complex formation of the western South China Sea oilfields[R]. Zhanjiang: Chengdu Best Diamond Bit Co. Ltd, 2010.

(责任编辑 岳臣)