

麦盖提区块钻井关键技术研究及应用

周祥林¹, 张进双², 王磊²

(1. 中石化石油工程技术服务有限公司西部项目部, 新疆 轮台 841699; 2. 中国石化石油工程技术研究院钻井工艺研究所, 北京 100101)

摘要:塔里木盆地麦盖提地区异常地应力发育、古近系盐膏层易蠕变挤毁套管、二叠系火山岩钻井速度慢、古生界地层岩性复杂钻头选型难、三开井眼井壁稳定性差、奥陶系裂缝性地层涌漏风险高, 为此开展了断裂带异常地应力分布规律、井身结构优化、高效破岩工具研制、刀翼式孕镶钻头研发、井壁稳定高效钻井液、欠平衡钻井等关键技术研究, 提出了非常规井身结构优化设计系列, 研制了高效破岩工具和刀翼式孕镶金刚石钻头, 研发了高效抑制性防塌钻井液体系。在此基础上形成了钻井提速配套技术系列, 完钻井平均机械钻速提高 17.89%, 钻井周期缩短 34.55%。

关键词:塔里木盆地; 非常规井身结构; 刀翼式孕镶金刚石钻头; 防塌钻井液

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)03-0001-05

Research and Application of Key Drilling Technologies Used in Makit Area/ZHOU Xiang-lin¹, ZHANG Jin-shuang², WANG Lei² (1. Sinopec Petroleum Engineering Technology Service Co., Ltd., Luntai Xinjiang 841699, China; 2. Drilling Technology Research Institute, SRIPE, Beijing 100101, China)

Abstract: Because of the abnormal formation stress in Makit area of Tarim basin, the casing creep collapsing in paleogene evaporate bed, low drilling efficiency in Permian volcanic rock, difficult bit selection for complex Paleozoic strata lithology, poor stability of three open hole and high water leakage risk in the Ordovician fractured formation, the research on distributing rules of abnormal formation stress in fault zone, optimization of well profile, high efficient rock breaking technology, blade type impregnated diamond bit, efficient drilling fluid and under-balance drilling technology were made and optimized unconventional casing program design was put forward, high efficient rock-breaking tools and blade type impregnated diamond bit and efficient inhibitive anti-sloughing drilling fluid system were researched and developed. Basing on the above, drilling efficiency increasing technology series was formed, the average ROP of completed well was improved by 17.89% and the drilling cycle was decreased by 34.55%.

Key words: Tarim basin; unconventional casing program; blade type impregnated diamond bit; anti-sloughing drilling fluid

1 概述

塔里木盆地麦盖提地区自上而发育第四系、新近系、古近系、二叠系、石炭系和奥陶系地层, 目的层埋深 5200 ~ 7500 m。影响该地区钻井周期的主要工程地质特征及钻井复杂情况主要有: (1) 古近系膏岩层存在异常地层应力, 泥膏岩蠕变严重, 造成多口井在该层段钻遇复杂情况, 甚至导致恶性钻井故障, 玉北 5 井、玉北 6 井套管挤压变形; (2) 三开下部的二叠系开派兹雷克组火山岩发育, PDC 钻头不适应; (3) 石炭系卡拉沙依、巴楚组硅质胶结, 研磨性强、可钻性差, 单只钻头进尺少、机械钻速低;

(4) 二叠系和石炭系泥岩地层井壁稳定性差, 玉北 1 井、玉北 1-1 井、玉北 4 井在二叠系卡钻, 南闸组、石炭系小海子组和卡拉沙依组等均有井壁失稳垮塌问题; (5) 奥陶系碳酸盐岩地层溶蚀孔洞、裂缝发育, 由于区域勘探程度低, 地层卡层难度大, 实钻过程中易发生漏失并导致溢流。

通过麦盖提地区工程地质特征分析, 明确了机械钻速影响因素; 提出了以走滑断裂带塑性盐膏层异常地应力为套管外等效边界载荷的强度校核原则, 优化了区域井身结构; 进行了量化钻头类型优选和钻井参数优化, 研制了高效破岩工具和特种刀

收稿日期: 2015-01-18; 修回日期: 2015-03-16

基金项目: “十二五”国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题六“海相碳酸盐岩油气井井筒关键技术”(编号: 2011ZX05005-006)

作者简介: 周祥林, 男, 汉族, 1961 年生, 高级工程师, 从事钻井科研、生产与管理工作。

通讯作者: 张进双, 男, 汉族, 1973 年生, 高级工程师, 博士, 钻井工程专业, 北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 916 房, zhangjs.sripe@sinopec.com。

翼式孕镶钻头;研发了 KCl-聚胺聚磺微裂缝封堵防塌钻井液体系;单项提速技术效果显著,综合配套技术推广应用大幅度降低钻井周期。

2 非常规井身结构优化设计

2.1 地层压力剖面异常地应力分析

综合实钻中地破实验、井漏处理、压井以及压力测试数据,建立了麦盖提地区三压力剖面:安居安组以上地层均为常压地层,压力系数处于 0.91~1.10,克孜洛依组上部地层压力逐渐升高,压力系数达到 1.14,古近系至石炭系均存在异常高压层,压力系数处于 1.30~1.75,二叠系及石炭系存在异常高压层,地层压力系数处于 0.94~1.48,进入奥陶系逐步降低为常压地层,处于 0.91~1.18。麦盖提地区分层段地层压力预测情况见表 1。

表 1 麦盖提地区分层段地层压力预测

层位	井深/m	分层预测当量密度/ (g·cm ⁻³)		实用钻井液密度/ (g·cm ⁻³)	
		地层压力	地层破裂压力	玉北 3 井	玉北 1 井
Q-N	0~3500	1.10~1.15	1.80~1.87	1.11~1.13	1.11~1.18
E	3500~4000	1.30~1.50	1.80~2.11	1.11~1.71	1.18~1.71
P	4000~5000	1.30~1.75	1.84~2.11	1.40~1.71	1.25~1.35
C ₂ x	5000~5200	1.25~1.40	1.84~2.10	1.30~1.40	1.30~1.40
C ₁ kl-C ₁ b	5200~6000	1.20~1.45	1.84~2.11	1.35~1.41	1.35~1.40
O ₁₋₂ y-O ₁ p	6000~6500	1.05~1.15	1.70~2.25	1.11~1.13	1.19~1.23

古近系部分井构造地应力异常,导致膏泥岩层蠕变缩径、挤毁套管,常规以地层孔隙压力进行套管校核难以满足安全要求,按照上覆岩层压力进行设计的套管依然挤毁,说明盐膏层受到了更大的外挤荷载。地应力主要来源于地层自身的重力和构造应力,同时地应力受到包括弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角等岩石力学参数影响,在主断裂带两侧,地应力呈对称分布,大小上呈现驼峰状,靠近主断裂带区域受构造运动影响,局部水平应力异常增大,属走滑构造力学特征;通过破裂压力与最大、最小水平地应力的数值关系,依靠现场地破实验数据、断裂力学数值模拟分析,反算出不同区域的构造应力系数,进而得到塑性盐膏层处的异常地应力分布规律。玉北 5 和玉北 6 井地应力剖面显示:最大水平主应力 σ_H > 上覆岩层压力 $\sigma_\perp$ > 最小水平主应力 σ_h ;表明受构造运动影响,2 口井的局部水平应力异常增大;膏泥层应变能高,蠕变速度较快,作用在套管上的外挤力增大,套管易挤毁变形;单纯考虑地应力情况下,套

管内按静水压力计算,套管抗外挤强度需达到 150 MPa 以上(之前的 $\varnothing 250$ mm 套管抗挤强度 99 MPa)。YB5 井和 YB6 井处于高应力区域,膏泥岩蠕变能强,这是导致套管变形的一个重要原因。

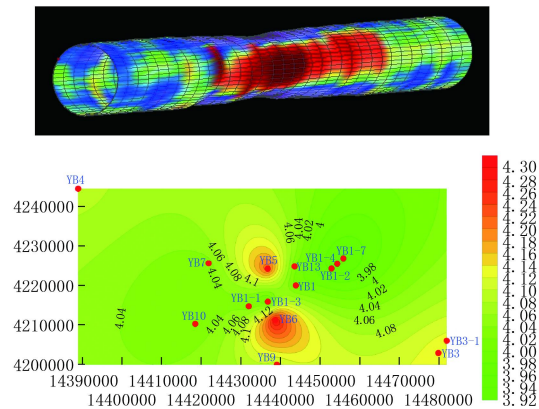


图 1 麦盖提玉北 6 井套管挤毁成像测井图及异常地应力分布规律图

2.2 优化后的井身结构方案

前期四级常规井身结构钻井过程中存在的主要问题如下:上部低压力地层和下部沙井子组地层易发生漏失;古近系构造地应力异常,导致膏泥岩层蠕变缩径、挤毁套管;过渡揭开奥陶系鹰山组导致地层漏失。针对上述不足,进行井身结构优化设计如下:(1)一开采用 $\varnothing 444.5$ mm 钻头钻深 1000~1500 m,下 $\varnothing 339.7$ mm 表层套管,封隔第四系与新近系上部地层;(2)二开采用 $\varnothing 311.2$ mm 钻头钻至古近系底界以下中完,扩孔作业后在古近系地层下入 $\varnothing 265.13$ mm 无接箍厚壁套管,钢级 TP155V,壁厚 22 mm,抗外挤强度 161.6 MPa;(3)三开 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻进,根据地质卡层要求揭开奥陶系顶界三开中完,下入 $\varnothing 177.8$ mm 尾管,与上层套管重叠 200 m;(4)四开采用 $\varnothing 149.2$ mm 钻头钻至设计井深完钻,先期裸眼完井。

3 井壁稳定机理及高效防塌钻井液体系

3.1 麦盖提玉北地区地层失稳特征分析

测井井筒破损地应力模型预测分析表明,麦盖提地区三开 8 1/2 in (1 in = 25.4 mm,下同)井眼在 4000~5400 m 之间垮塌严重(垮塌宽度角大),测井显示该段井径呈整体性扩大。通过“X 射线粉晶衍射分析实验”分析了二叠系、石炭系地层泥岩全岩矿物组分及粘土矿物主要成分和含量(见表 2)。二

叠系、石炭系地层各层系粘土成分含量差别较大,对粘土矿物测定数据进行分析可以看出:(1)全部 P、C 地层中均不含蒙脱石;(2)I/S 型粘土矿物相对含量最高;(3)伊利石含量仅次于 I/S 的含量;(4)高岭石和绿泥石相对含量大致相当;(5)除 P_2kp 、 P_1kk 和 C_1b 以外,其余地层中的绿蒙混晶型粘土矿物含量为零。

表 2 麦盖提玉北地区二叠、石炭系地层粘土矿物组分平均值统计

地层	粘土矿物含量/%					粘土矿物总量(平均)
	伊蒙混晶 (I/S)	伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	绿蒙混晶 (C/S)	
P_3s	70.00	16.67	7.00	6.33	0.00	33.10
P_2kp	61.17	12.08	7.00	6.85	10.70	37.20
P_1kk	76.67	14.33	3.83	3.67	1.50	34.85
P_1n	73.33	14.00	5.67	7.00	0.00	29.07
C_2x	77.00	13.33	5.67	4.00	0.00	25.17
C_1kl	64.50	13.25	13.50	8.75	0.00	43.35
C_1b	36.67	31.80	6.67	8.17	5.00	17.43

从泥页岩膨胀率实验结果可以看出,二叠系泥页岩中等膨胀,岩样回收率较低,分散性较强,井壁稳定性较差。二叠系、石炭系地层的硬脆性泥页岩包括 P_2kp 的火成岩则以应力型失稳为主,应力的产生主要来自原地应力,粘土矿物水化应力以及在化学势差作用下水力尖劈效应进一步加剧失稳过程。

3.2 高效防塌钻井液体系研究

通过降低钻井液活度、提高抑制封堵能力,研发了高效防塌钻井液体系,基于常规理化性能试验、最小初始吸水率、最终吸水量、砂床渗滤性和水化屈服硬度等判别标准,进行了复合抑制、封堵材料和钻井液体系的综合评价。钻井液体系设计思路如下:保持钻井液体系具有强抑制性及合适密度,使用适量抗高温降失水剂降低泥浆失水量,保持良好的泥饼质量,加入封堵防塌剂,防止井眼坍塌;二开井段在聚合物钻井液体系基础上加入聚胺形成聚胺聚合物钻井液体系,进一步提高体系的抑制防塌性能;三开井段在 KCl-聚磺钻井液体系的基础上,引入聚胺形成强抑制性聚胺聚磺防塌钻井液,与 KCl 相互配合,提高钻井液的抑制能力,满足稳定井壁的要求。

高效防塌钻井液体系配方为:4% 膨润土 + 0.3% KPAM + 3.0% SMP-1 + 3.0% SPNH + 2% SYP-1 + 2.5% 沥青 + 0.3% 乳化剂 + 0.5% XJA-1 + 0.5% HA-1。

KCl 聚胺聚磺抗盐抗钙能力更强,体系性能稳

定。聚胺随加量的增加,对体系的流变性和滤失性影响不大,抑制性提高明显,有利于提高封堵防塌性能,降低井壁失稳的风险,减少井下复杂。

4 工程地质特征和个性化钻头研制

4.1 麦盖提地区工程地质特征

综合利用钻井、测井、录井等数据,分析了地区地层岩石杨氏模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、粘聚力、内摩擦角、硬度等岩石力学特性参数剖面,建立了该地区岩石力学参数剖面 and 地层岩石可钻性剖面(见图 2)。玉北地区三开井段地层强度随着地层深度的增加而增加,从上部地层至下部地层,岩石泊松比由 0.30 逐渐降低到 0.20,弹性模量由 6.03 GPa 增加到 86.36 GPa,抗压强度由 25.14 MPa 增加到 265.0 MPa,粘聚力由 4.81 MPa 增加到 38.17 MPa。其中,二叠系开派兹雷克组为玄武岩,地层强度及研磨性都较高,钻头选型困难;石炭系巴楚组硅质胶结,地层岩石强度高,研磨性强。

4.2 刀翼式孕镶金刚石钻头研制

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,用于钻进深部致密难钻地层和研磨性高的软硬交错地层。目前国外孕镶金刚石钻头价格比较高,国内孕镶金刚石钻头现场应用存在孕镶层耐磨性差、钻头中心磨损、本体强度不足等问题。针对上述问题,进行了适于火山岩等地层的特种孕镶钻头胎体预合金材料、钻头结构、水力流道和防卡、径设计:

(1)通过在钻头胎体配方中添加稀土元素,使钻头抗弯强度提高 30% ~ 50%、硬度提高 10% ~ 15%;

(2)改进钻头的冠部形状,在胎体上镶焊耐磨孕镶切削块,提高了钻头排屑能力和冷却效果,优化环形布齿排列,实现了井底全面积覆盖;

(3)孕镶切削块表层为天然金刚石,内孕镶层胎体中添加高品级人造金刚石单晶,使钻头寿命和进尺大幅度提高;

(4)在钻头中心部位非干涉式偏心 PDC 布齿,避免了因中心转速低、线速度慢导致的中心死点先期磨损问题;

(5)切削块布齿结构减小井底接触工作层面积 30% ~ 40%,可与不同动力钻具配合使用;

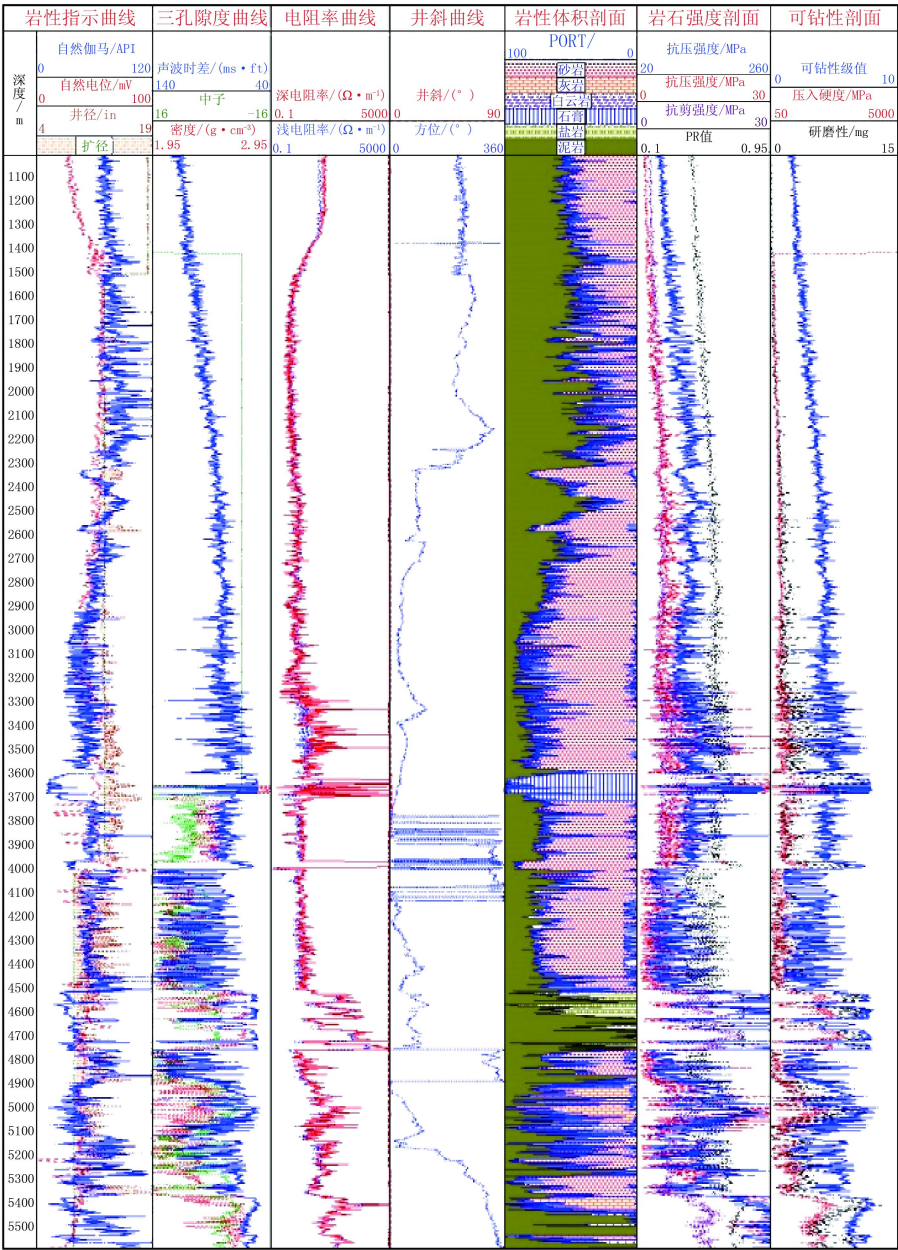


图2 地层岩性、岩石力学特性及可钻性级值剖面图

(6)采用大直径底喷式、深流道辐射状水路,充分满足钻头冷却和井底排屑要求,保径部位将水路流道槽合并加宽,大间隙刀翼结构不易被掉落岩块卡死。研制的刀翼式孕镶金刚石钻头性能参数为:尺寸8½~13¾ in,表镶工作层金刚石粒度8~10粒/克拉,孕镶工作层金刚石粒度20~40目,孕镶工作层高度20~30 mm,保径长度90 mm,磨合钻压20~40 kN,钻进钻压80~120 kN,上扣扭矩24~26.5 kN·m,适用转速300~500 r/min,排量范围20~35 L/s,流道面积3760 mm²,接头4½ in API Reg。

5 重点层段高效破岩钻井技术优选

- (1)二开上部地层采用高压喷射、PDC+螺杆动力钻具等高效破岩钻井工艺,复合钻进采用钟摆钻具组合,加入随钻振击器预防井下复杂情况。克孜洛依组地层下部砂泥岩交错,选用耐磨性强的胎体M1655SS型PDC钻头复合钻进,采用大扭矩螺杆。
- (2)三开井眼沙井子组通过加入润滑剂或快钻剂改善井下钻头工作状态,加强固相含量的控制,防止钻头泥包,推广使用Torkbuster扭力冲击发生器,配合UD系列MD1646型防泥包PDC钻头,提高钻

头切削效率和使用寿命。进入二叠系火山岩地层通过高效孕镶金刚石+涡轮钻具或高速螺杆复合钻井技术提高钻井速度。库普库兹满组泥岩发育,地层易失稳掉块,同时上部开派兹雷克组地层应力释放进入垮塌周期,为钻井安全,建议采用牙轮钻头钻进。南闸组—卡拉沙依组地层采用 $\varnothing 13$ mm小切削齿PDC钻头,配合螺杆动力钻具复合钻进;南闸组、小海子组地层软硬交错,推荐使用DBS FX55型、EM1615SGU型钻头。石炭系巴楚组地层厚度大、硅质含量高,使用DBS FX56型PDC钻头或HJT537GK/617型牙轮钻头,探索刀翼式孕镶钻头+高速螺杆钻井试验。

(3) 四开奥陶系鹰山组地层以灰岩为主,钻进过程中易漏失诱发井涌,部分地层高角度裂缝发育,灰岩断层附近易井斜,利用MWD或机械式随钻测斜仪监测井眼轨迹,推荐使用M1365D型、EM1316GU型PDC钻头和MD系列牙轮钻头,为有效发现和保护油气储层,避免井底漏失、降低井控风险,采用欠平衡钻进技术。

6 钻井提速关键技术现场应用效果

(1) 麦盖提玉北地区沙井子组广泛采用扭力冲击器钻井,优选了4刀翼MD1646型钻头,在玉北9井、玉北6A井、玉北1-3H井等三开上部沙井子组应用,提速效果稳步提高,平均机械钻速提高168.5%。

(2) 玉北4井涡轮钻具+孕镶钻头复合钻进,平均机械钻速3.07 m/h,械钻速提高1.86~2.46倍。玉东4井采用特制刀翼式切削齿孕镶钻头+高速螺杆钻具复合钻进,进尺78.22 m,提高2倍多,机械钻速1.70 m/h,提速68.7%,钻头出井新度95%以上。

(3) YB3-1等井应用物化封堵和抑制水化的KCl-聚胺聚磺高效防塌钻井液体系,有效避免了井壁失稳问题,三开井眼井径扩大率<7%。

(4) 奥陶系目的层采用欠平衡钻井技术,避免了漏涌同层问题。玉北1-1井欠平衡钻进5957~6309 m,实现成功点火;玉北1-2X井试验井段5105~5450 m,进尺345 m,发现良好油气层。

(5) 通过单项钻井提速技术现场应用,形成了

全井段钻井提速配套关键技术系列,完钻井平均机械钻速提高17.89%,钻井周期缩短34.55%。

7 结语

(1) 通过麦盖提古近系膏岩层蠕变缩径套、管挤毁机理分析,提出了玉北地区非常规井身结构优化设计方案,研究成果应用于10余口井钻井工程设计,未出现套管挤毁复杂情况。

(2) 根据麦盖提地区不同层段工程特征,优选了针对性钻头类型和钻井方式,通过应用PDC+螺杆复合钻井技术、扭力冲击器钻井技术、防塌钻井液体系等提速技术措施,有效确保了区域钻探开发钻井任务的顺利完成。

(3) 玉东4井在二叠系火山岩地层采用特制刀翼式孕镶金刚石钻头复配中速螺杆动力钻具复合钻进,提速、防卡效果明显,孕镶切削块布齿方式,减少了与地层接触面积,同样适用于泥岩夹层,类似PDC钻头的岩石切削方式,可以获得更高的机械钻速。

参考文献:

- [1] R. Corthésy, D. E. Gill. A Novel Approach to Stress Measurement in Rock Salt [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, 1989, 27(2): 95-107.
- [2] F. Rummel, G. Klee, U. Weber. Technical Note Hydraulic vs Pneumatic Fracturing for In Situ Stress Determination in Rock Salt [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, 1995, 32(4): 337-342.
- [3] 马林建, 刘新宇, 马淑娜, 等. 深部盐岩含夹层地层初始地应力场模拟分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6): 604-609.
- [4] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 91-93.
- [5] 赵志国. 巴麦地区钻井技术难点及提速对策[J]. 西部探矿工程, 2011(6): 102-105.
- [6] 邓虎. 裂缝性泥页岩的水化稳定性研究及其应用[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2004.
- [7] 李梦刚. 塔河油田外围区块超深井优快钻井技术研究[D]. 山东东营: 中国石油大学(华东), 2011.
- [8] 孙友宏, 任露泉, 高科. 仿生孕镶金刚石钻头及其制造方法: 中国, 200610016924[P]. 2007-01-17.
- [9] 孙明光, 黄涛. 利用测井资料进行金刚石钻头设计和选型[J]. 石油钻探技术, 1999, 2(27): 38-39.
- [10] 王兴武, 赵国顺, 孙雪. 巴楚探区深井钻井难点分析与技术对策[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(3): 1-3.