

# 哈萨克斯坦 KKM 油田钻具强稳降振提速技术研究

赵全民

(中国石化集团国际石油勘探开发有限公司,北京 100121)

**摘要:**KKM 油田下部砂泥岩互层非均质性强导致井下钻具振动剧烈、PDC 切削齿寿命低,且井眼易偏斜。目前在用 PDC 钻头多采用 5 刀翼或 6 刀翼 16 mm 切削齿以降低井下振动保证 PDC 钻头寿命,但降低了钻头攻击性导致机械钻速较低。针对 KKM 油田下部地层特点,优选了 4 刀翼 19 mm 复合片 PDC 钻头。该钻头具有较高的破岩效率和攻击性,可大幅度提高机械钻速;同时通过底部钻具组合动力学分析,优化形成了双稳定器+单稳单弯(0.5°)钻具组合,3 个稳定器串联具有较强的稳定降振作用,配合小弯角螺杆钻进可有效提高防斜能力,降低了井下振动,配合大尺寸聚晶金刚石复合片 PDC 钻头实现了三开井段一趟钻完成的目标,机械钻速提高 115.35%。

**关键词:**KKM 油田;非均质地层;钻具振动;钻具组合;强稳降振;PDC 钻头

**中图分类号:**P634.4;TE242 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)05-0034-05

## Research on enhancing stability and reducing vibration of the drilling string in KKM Oilfield in Kazakhstan

ZHAO Quanmin

(International Petroleum Exploration and Development Co., Ltd., Sinopec Group, Beijing 100121, China)

**Abstract:** The heterogeneity of the sand-shale interbeds in the lower part of the oilfield produced strong vibration of the downhole drilling string, leading to short life of PDC cutting teeth and easy hole deviation. At present, PDC drill bits are designed with 5 blades or 6 blades with 16mm cutting teeth to reduce the downhole tool vibration to ensure the life of the PDC bit, but the drill bit aggression is reduced and the mechanical drilling speed is lower. Based on the characteristics of lower formation in KKM Oilfield, a 4-blade 19mm composite PDC bit was selected. The drill bit provided high rock breaking efficiency and aggression capacity, which can greatly increase ROP. At the same time, through the bottom hole assembly dynamic analysis, the bisector + single stable single bending (0.5°) drilling tool combination was optimized. The application of three stabilizers can achieve strong vibration reduction effect, which can effectively improve the anti-deviation ability and reduce the downhole vibration with the small-angle downhole motor tool, and also with large-size PDC bit, the goal of drilling the lower section in one run was achieved. The ROP was increased by 115.35%.

**Key words:** KKM Oilfield; heterogeneity formation; drilling tool vibration; drilling tool combination; enhancing stability and reducing vibration; PDC bit

哈萨克斯坦 KKM 油田钻遇了中新世代的沉积地层,最大厚度 3662 m。以三叠系地层开始,以新近系—第四系地层(含第四系地层)结束。该油田为受断层影响的近东西走向的长轴背斜构造,主要储层为中侏罗系,埋深 2550~3150 m。岩性为含泥质砂岩,属于低孔、低渗、高温、高矿化度、砂岩复杂油

藏。由于油田油藏地质条件复杂,软硬地层互层,对钻井和增产工程技术提出了较大挑战,钻井机械钻速平均 11.27 m,钻井周期达到 29.5 d,提高了钻井成本,降低了开发效益,因此需要开展适合该油田的钻井提速技术研究。

**收稿日期:**2019-03-28; **修回日期:**2019-04-19 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.05.006

**基金项目:**中国石化科技部项目“哈萨克斯坦 BOL、KKM 油田增产关键技术研究”(编号:P18091)

**作者简介:**赵全民,男,汉族,1966 年生,高级工程师,从事石油钻井工程技术管理工作,北京市朝阳区惠新东街甲 6 号中国石化集团国际石油勘探开发有限公司,qmzhao.sipc@sinopec.com。

**引用格式:**赵全民.哈萨克斯坦 KKM 油田钻具强稳降振提速技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):34-38.

ZHAO Quanmin. Research on enhancing stability and reducing vibration of the drilling string in KKM Oilfield in Kazakhstan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):34-38.

### 1 高攻击性钻头设计

KKM 油田三开地层岩性 600~950 m 为灰色灰岩, 950~2300 m 岩性为灰色、棕红色泥岩和灰色砂岩互层, 2300~2550 m 岩性为泥岩、砂岩和泥灰岩, 2550 m 至井底为大段的砂岩和泥岩地层。基于测井资料, 首先对 KKM 地层的可钻性剖面进行了分析, 见图 1。KKM 油田下部地层, 岩性为砂泥岩, 可钻性级值大部分在 2~6。

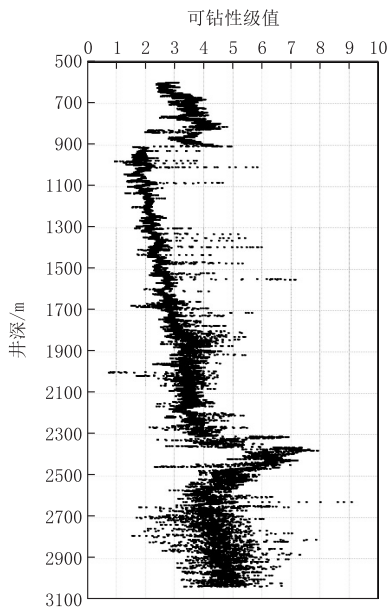


图 1 KKM 油田地层可钻性分析  
Fig.1 Drillability analysis of KKM Oilfield

钻头是通过钻头牙齿来直接破碎岩石的, 每个牙齿的破岩过程是钻头破碎地层的微小单元和基本过程。对于牙轮钻头来讲主要的破碎过程是冲击, 剪切为次要作用; 虽然 PDC 钻头的主要破岩过程是切削, 但是切削的前提必须是牙齿进入地层。因此无论对于牙轮钻头还是 PDC 钻头来讲, 牙齿进入地层的深度都是影响机械钻速的重要原因。

牙齿破碎岩石是一个非常复杂的过程, 目前并没有一个完善的模型去描述这个过程。从钻井的实际出发, 机械钻速是最为关注的结果, 通过分析, 牙齿吃入地层的深度是一个关键的影响因素。因此本文以牙齿吃入地层深度为研究重点, 分析牙齿形状、岩石力学性质以及破岩的力学环境对于牙齿吃入地层深度的影响规律。

根据实验及理论证实, 钻头牙齿吃入地层分为两个步骤: 牙齿在力的作用下接触岩石, 随着力的增大岩石内部应力变大, 尤其是靠近牙齿的部分, 内部

的应力状态很快就超过了岩石的强度而出现破碎, 由于力足够大, 并且破碎的碎片在无法流动到其他地方因此被重复破碎直至成为粉末, 粉末被挤压成为可以观察得到的密实核。如果施加的力继续增加, 则更多的岩石被压碎; 与此同时牙齿和密实核共同作用在岩石内部形成了新的应力场, 尤其是粉末形成的密实核在高压下具有一定的流动性, 因此在轴向方向的力会被流动的密实核传递到周围, 这就是岩石破碎的第二阶段。指向周围的压力随着轴向压力的增大而增大, 吃入深度也在增加, 这样的过程一直持续到周围压力超过了岩石强度, 而出现大范围的岩块崩落, 至此一个周期的破碎过程结束<sup>[1]</sup>。

首先建立了“地层特性—钻压—PDC 齿尺寸”吃入深度计算模型<sup>[2]</sup>, 采用常用的摩尔库伦准则作为岩石的破坏准则:

$$\tau - \sigma \operatorname{tg} \varphi = c \quad (1)$$

式中:  $\tau$ ——岩石受到的剪切应力, MPa;  $\varphi$ ——岩石内摩擦角, ( $^{\circ}$ );  $c$ ——岩石粘聚力, MPa。

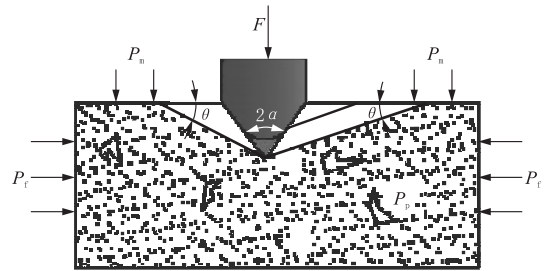


图 2 牙齿吃入岩层示意图  
Fig.2 Sketch map of PDC invasion

综合考虑地应力、PDC 齿尺寸、钻压、地层强度等因素, 推导了牙齿吃入地层深度的计算公式, 因此可以将各种因素对吃入深度的影响反映出这些因素对机械钻速的影响<sup>[3-5]</sup>。

$$h = [\cos(\alpha + \theta) - \sin(\alpha + \theta) \operatorname{tg} \varphi] / \{ [(P_f + P_m) / 2 - \cos(2\theta) (P_f - P_m) / 2 - b P_p] \operatorname{tg} \varphi + c_0 - \sin(2\theta) (P_f - P_m) / 2 \} \cdot F \sin \theta / (2 \sin \alpha) \quad (2)$$

式中:  $h$ ——吃入深度, m;  $P_f$ ——水平围压, MPa;  $P_m$ ——钻井液井底压力, MPa;  $P_p$ ——地层孔隙压力, MPa;  $\theta$ ——岩石剪切破坏面与井底平面夹角, ( $^{\circ}$ );  $\alpha$ ——牙齿一半尖角, ( $^{\circ}$ );  $F$ ——牙齿受到的力, N。

从公式中可以看出这些因素包括: 牙齿形状及受力、地层压力、钻井液井底压力、岩石力学性质、地层性质以及井底流性质等。因此就可以将各种因素

对吃入深度的影响反映出这些因素对机械钻速的影响。

基于模型计算结果(见图3),设计的4刀翼19 mm大尺寸复合片可切削破碎更大体积的砂泥岩地层,吃入地层更深;相对于常规的5~6刀翼小尺寸PDC复合片钻头,机械钻速更高。

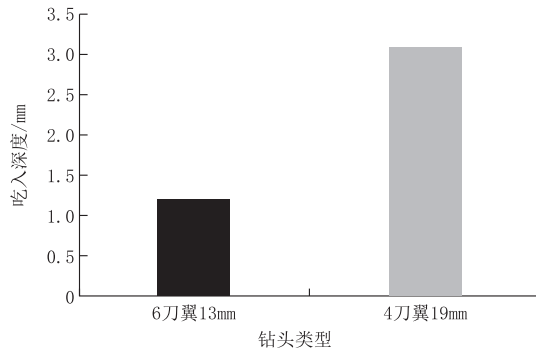


图3 不同钻头类型吃入岩层深度计算结果

Fig.3 Calculation results of different bit invasion depth

## 2 强稳减振提速钻具组合设计

4刀翼19 mm大尺寸复合片在提高机械钻速的同时也加剧了井下振动,将导致钻头及钻具组合的损坏。为了解决这一问题,提高钻井效率,降低钻井成本,在借鉴国内水平井井眼轨迹控制技术的基础上,单弯双扶螺杆菌具有优良的降斜性能,后面再配有一个 $\varnothing 214$  mm稳定器可起到稳定钻具组合、降低井下振动的作用。单弯螺杆菌形成的微扩径井段,可有效避免三扶钻具组合的卡钻事故。

造斜或增斜时,弯外壳钻具组合滑动钻进可以完成,旋转钻进时可以保持稳斜钻进,外壳体螺杆菌复合钻进时,弯壳体螺杆菌在弯曲井眼中旋转,其变形受力呈周期性变化形成交变应力,尤其当螺杆菌弯曲与井眼弯曲方向相反时,要经受巨大的变形和受力。而之后形成的小曲率井眼使得本来弯曲的螺杆菌钻具组合变直,因此受力变形同样很大。

对于KKM油田地层,虽然疏松的地层不利于井眼轨迹的控制,但是由于井眼的扩大使得弯外壳导向马达复合钻进时的受力降低很多,这就有利于大角度导向钻具的旋转复合钻进,因此可以采用一套钻具组合,使用一趟钻打完造斜段、稳斜调整段以及水平段。

基于上述组合和较为疏松的哈国地层,对于上述组合旋转钻进时的力学参数进行计算,利用纵横弯曲连续理论可以计算不同弯角的弯壳体螺杆菌钻具

在不同曲率井眼中各处的弯矩,钻头以及稳定器处的受力:

$$\begin{cases} M_{i-1}Z(u_i) + 2M_i[Y(u_i) + L_{i+1}I_i/(L_iI_{i+1}) \cdot \\ Y(u_{i+1})] + M_{i+1}L_{i+1}I_i/(L_iI_{i+1}) \cdot Z(u_{i+1}) \\ = -q_iL_i^2/4 \cdot X(u_i) - q_{i+1}L_{i+1}^2/4 \cdot L_{i+1}I_i/(L_i \\ I_{i+1}) \cdot X(u_{i+1}) + 6EI_i(e_i - e_{i-1})/L_i^2 - 6EI_i \\ (e_{i+1} - e_i)/(L_iL_{i+1}) \quad (i=1 \sim n) \\ L_3^4 + 4M_2Z(u_3)/[q_3X(u_3)] \cdot L_3^2 = 24EI_3/[q_3X(u_3)] \cdot \\ (e_3 - e_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $M(i)$ ——第*i*个稳定器处的弯矩, $N \cdot m$ ;  $X(u_i)$ 、 $Y(u_i)$ 、 $Z(u_i)$ ——为第*i*跨梁柱的放大因子;  $L_i$ ——第*i*跨梁柱的长度, $m$ ;  $I_i$ ——第*i*跨梁柱的截面轴惯性矩, $m^4$ ;  $q_i$ ——第*i*跨梁柱上的均布横向载荷集度, $N/m$ ;  $E$ ——钻柱弹性模量, $N \cdot m^2$ ;  $e_i$ ——第*i*个稳定器处的间隙, $m$ 。

设计了以下钻具组合: $\varnothing 215.9$  mm PDC钻头 +  $\varnothing 172$  mm  $0.5^\circ$ 单弯双扶螺杆菌 $\times 1$ 根 +  $\varnothing 158.8$  mm钻铤 $\times 1$ 根 +  $\varnothing 214$  mm稳定器 +  $\varnothing 158.8$  mm无磁钻铤 $\times 1$ 根 +  $\varnothing 158.8$  mm钻铤 $\times 1 \sim 4$ 根 +  $\varnothing 127$  mm加重钻杆 $\times 15$ 根 +  $\varnothing 127$  mm钻杆。钻井参数:钻压 $10 \sim 60$  kN,转速 $50+$ 螺杆菌,排量 $25 \sim 32$  L/s。

对上述钻具组合进行了分析:图4计算结果显示,KKM采用的单弯双扶+稳定器组合随着钻压的增加,其侧向力变化小,相对常规的单弯单扶+稳定器组合其稳定性更强。这就意味着可以在较高的钻压下进行钻进,侧向力保持相对稳定,从而可以在保持井眼轨迹稳定的同时提高机械钻速。

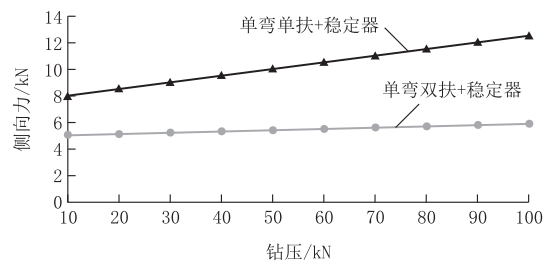


图4 不同钻具组合侧向力对比

Fig.4 Comparison of different BHA side force

根据美国石油学会推荐公式,钻柱横向振动是钻铤两个接触点为铰支点,发生琴弦状的振动,横振固有转速公式如下:

$$n_c = 4.76 \times 10^2 \sqrt{D^2 + d^2} / l^2$$

式中:  $n_c$ ——钻铤横震频率;  $D$ ——钻铤外径, m;  $d$ ——钻铤内径, m;  $l$ ——两个稳定器之间的长度, m。

基于图 5 计算结果, 对于常规钻具组合, 两稳定器之间距离在 20~30 m, 其固有转速在 100 r/min,

与正常钻进时的转速相当, 因此容易引起横向振动。KKM 油田采用的单弯双扶+稳定器组合的两稳定器之间距离控制在 10 m 以内, 固有转速可达 700 r/min, 基本避开了正常钻进的钻柱转速, 因而可保持稳定, 避免横向振动。

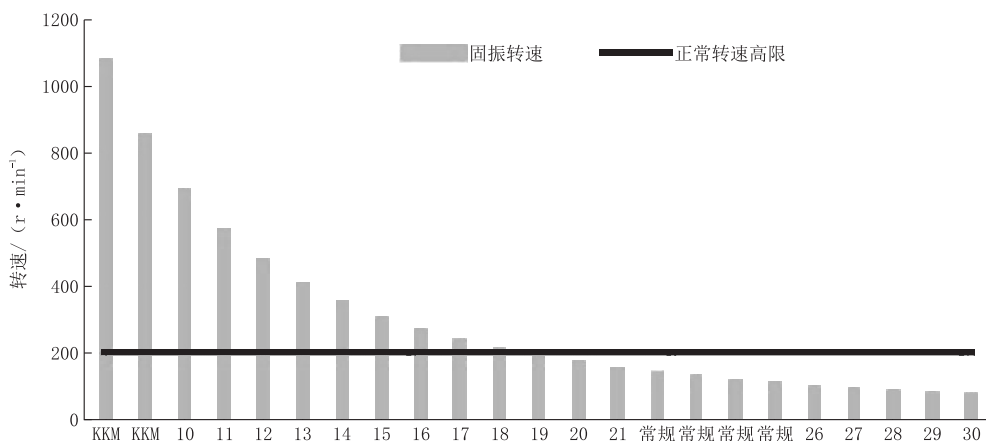


图 5 不同钻具组合稳定性对比

Fig.5 Comparison of different BHA stability

### 3 应用及效果分析

基于研究成果, 在 KKM 油田先后顺利完成 10 口井深 3200 m 左右的钻井工程, 各项指标大幅提高。如 KKM814 井在三开 768~2181 m 井段使用了一只 4 刀翼 19 mm 1914D 钻头, 进尺 1413 m, 纯钻时间 28 h, 平均机械钻速 50.46 m/h, 机械钻速明显优于同井段的其他钻头; 而在 KKM813 井三开使用一只 VIS519 钻头从井深 1019 m 钻至 3225.5 m, 单只钻头进尺 2206.0 m, 纯钻时间 180.5 h, 机械钻速 12.22 m/h, 创出该区块单只钻头最大进尺记录, 较大地提高了工作效率。总体上, 攻击力强的 19 mm 复合片 PDC 钻头能在  $\varnothing 215.9$  mm 井段取得较好钻速。4 刀翼的 19 mm PDC 钻头在 2300 m 以浅明显优于 5 刀翼的 MS1951KZ 型号的 PDC 钻头。通过成功的钻头设计, 10 口井平均机械钻速 24.27 m/h, 比卢克公司 11.27 m/h 提高了 13 m/h, 提高幅度达 115.35%。在钻头大幅度提高机械钻速的同时, 井斜角保持在  $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$ , 完全符合井身质量要求, 体现出 KKM 单弯双扶+稳定器组合优秀的防斜效果。

### 4 结论

(1) 基于 KKM 油田地层分析, 研究提出了高攻

击性 PDC 钻头与强稳减振提速钻具组合, 形成了针对性的提速技术, 取得了良好的提速效果。

(2) 形成的强稳减振提速技术主要是钻头和钻具组合研究, 建议对钻压、转速及水力等钻井参数进行进一步研究。

### 参考文献 (References):

- [1] 王大勋, 刘洪, 韩松, 等. 深部岩石力学与深井钻井技术研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(3): 6-10.  
WANG Daxun, LIU Hong, HAN Song, et al. Deep rock mechanics and deep or ultra-deep well drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(3): 6-10.
- [2] 徐小荷, 俞静, 等. 岩石破碎原理[M]. 北京: 煤矿工业出版社, 1984: 17-22.  
XU Xiaohu, YU Jing, et al. Principle of rock fragmentation [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing Press, 1984: 17-22.
- [3] 熊虎林, 李谦. 基于地层成分和钻进参数的钻速预测模型[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10): 195-201.  
XIONG Hulin, LI Qian. ROP prediction model based on formation composition and drilling parameters[J]. Exploration Engineering (Rock & soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10): 195-201.
- [4] 周海涛, 周玉海. 压差对 PDC 钻头钻速影响规律的研究[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(2): 31-36.  
ZHOU Haitao, ZHOU Yuhai. Differential pressure effecting PDC bit on penetration rate[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(2): 31-36.
- [5] 王滨, 李军, 邹德永. 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. 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 Reservoir, 2018,25(1):169-174.
- [6] 石林,汪海阁,纪国栋.中石油钻井工程技术现状、挑战及发展趋势[J].天然气工业,2013,33(10):1-10.  
SHI Lin, WANG Haige, JI Guodong. Current situation, challenges and developing trend of CNPC's oil & gas drilling[J]. Natural Gas Industry, 2013,33(10):1-10.
- [7] 汪海阁,郑新权.中石油深井钻井技术现状与面临的挑战[J].石油钻采工艺,2005,27(2):4-8.  
WANG Haige, ZHENG Xinquan. Status quo and faced challenges of deep well drilling techniques of Petrochina[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(2):4-8.
- [8] 谭春飞,李树盛.影响深井和超深井钻速的主要原因分析[J].石油钻采工艺,1998,20(4):32-37.  
TAN Chunfei, LI Shusheng. Analysis of main causes affecting ROP of deep and ultra-deep wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998,20(4):32-37.
- [9] CRANE D, ZHANG Y, DOUGLAS C, et al. Innovative PDC cutter with elongated ridge combines shear and crush action to improve PDC bit performance[J]. SPE183984, 2017:1-17.
- [10] KAHRAMAN S, BALCI C, YAZICI S, et al. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000,37(5):729-743.
- [11] 潘起峰,高德利.用声波法评价地层可钻性各向异性的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):162-167.  
PAN Qifeng, GAO Deli. Experimental study on evaluation of formation drillability anisotropy by acoustic wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(1):162-167.
- [12] 韩来聚,李祖奎,燕静,等.碳酸盐岩地层岩石声学特性的试验研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(14):2444-2447.  
HAN Laiju, LI Zukui, YAN Jing, et al. Test and application to sonic properties of carbonate rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(14):2444-2447.
- [13] 钻井手册(甲方)编写组.钻井手册(甲方):上册[M].北京:石油工业出版社,1990:205-206.  
Drilling Manual Preparation Group for Party A. Drilling handbook: party A: volume 1[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990:205-206.
- [14] 高德利,刘希圣.钻头与地层相互作用的新模型[J].石油钻采工艺,1989,11(5):23-28,32.  
GAO Deli, LIU Xisheng. A new model of bit-formation interaction[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1989,11(5):23-28,32.
- [15] 马凤清,唐波,冯光通,等.三牙轮钻头与地层相互作用动力学数值模拟[J].石油矿场机械,2012,41(9):5-9.  
MA Fengqing, TANG Bo, FENG Guangtong, et al. Study of dynamical numerical simulation of the interaction between three-cone bit and formation[J]. Oil Field Equipment, 2012,41(9):5-9.
- [16] 韩来聚,周延军,唐志军.胜利油田非常规油气优快钻井技术[J].石油钻采工艺,2012,34(3):11-15.  
HAN Laiju, ZHOU Yanjun, TANG Zhijun. High quality and fast drilling techniques for unconventional oil and gas reservoirs in Shengli Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(3):11-15.

(编辑 韩丽丽)