

页岩地层取心技术研究及现场应用

梁海明¹, 裴学良¹, 赵 波²

(1. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017; 2. 中石化胜利石油工程有限公司塔里木分公司, 新疆库尔勒 841600)

摘要:针对页岩地层取心钻进时存在的机械钻速慢, 岩心易破碎, 易堵心、卡心, 取心收获率偏低, 出心作业时岩心容易从层理处破裂而影响后期分析等问题, 采用高强度低摩阻铝合金内筒代替钢制内筒, 配套岩心吊装转移装置进行地面转移, 研发了新型耐磨抗冲击取心钻头, 建立了取心工具稳定性分析模型, 根据理论计算结果优选了取心钻具组合和施工工艺参数, 初步形成了页岩地层取心配套技术。该取心技术已现场应用 12 井次, 机械钻速提高 1 倍以上, 单筒进尺提高 50%, 出心时间缩短为 20~30 min, 典型区块的取心收获率达到 95% 以上。现场应用表明, 该取心技术可以满足页岩地层取心要求, 能显著提高取心效率及取心收获率。

关键词:页岩地层; 取心技术; 取心钻头; 稳定性; 取心收获率; 现场应用

中图分类号: TE921⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2016)01-0039-05

Coring Techniques in Shale Formations and Their Field Application

LIANG Haiming¹, PEI Xueliang¹, ZHAO Bo²

(1. *Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China*; 2. *Tarim Branch, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Korla, Xinjiang, 841600, China*)

Abstract: During coring in shale formations, the ROP (rate of penetration) is normally low, and core breakage, plugging and sticking occur frequently and the core recovery rate is low. In addition, they tend to fracture at bedding planes when being taken out of the core barrels. Therefore, the subsequent core analysis is impacted adversely. In order to deal with these difficulties, the original steel inner core barrels were replaced with high-strength low-friction aluminum alloy ones, and core lifting and transferring tools were transferred to the surface. New wear-proof and impact-resistant coring bits were developed too. A model was built to analyze the stability of coring tools. Finally, coring tool assembly and parameters were optimized on the basis of theoretical calculation results. When all these techniques were applied comprehensively on well site, ROP increased by 100%, single-barrel footage increased by 50%, core handling time reduced to 20–30 minutes, and the core recovery rate of typical blocks achieved over 95%. It indicated that new coring techniques can meet the requirements of coring in shale formations and considerably improve coring efficiency and recovery rate.

Key words: shale formation; coring techniques; coring bit; stability; core recovery; field application

我国页岩油气资源丰富, 开发前景广阔, 但其开发技术还处于前期探索阶段^[1-5]。准确研究页岩岩石力学性质、评估页岩储层开发前景的关键是要有高质量岩心样本, 这对取心技术提出了更高要求。目前, 页岩地层取心仍采用常规保形取心方式, 导致页岩地层取心存在机械钻速慢、回次进尺低、岩心质量差等问题, 如龙页 3 井在取心过程中, 机械钻速只有 0.48 m/h, 回次进尺不足 5.7 m, 多筒岩心破碎堵塞迹象明显, 取心收获率仅为 77.11%。针对页岩地层取心难点, 笔者研制了专用取心工具和取心钻头, 根据取心稳定性分析结果优化了取心钻具组

合及施工工艺参数, 在页岩地层中累计取心 12 井次, 平均取心收获率为 95.68%, 取得了良好的取心效果, 为页岩油气开发评价提供了高质量的岩心。

收稿日期: 2015-04-27; **改回日期:** 2015-10-21。

作者简介: 梁海明(1984—), 男, 山东东营人, 2007 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 2010 年获中国石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事井下工具研发及技术推广工作。

联系方式: (0546)8772430, lianghaiming1984@126.com。

基金项目: 中国石化集团公司科技攻关项目“页岩地层取心油气捕集工具及岩心后处理技术”(编号: JP14026)部分内容。

1 页岩地层钻井取心技术难点

页岩储层岩性主要是富含有机质的灰黑色泥页岩,含黏土矿物、石英长石等脆性矿物以及少量碳酸盐岩,储层表现出非常强的各向异性^[6-11]。从以往取心经验来看,页岩地层取心主要存在以下难点^[12-15]:

1) 取心过程中岩心容易破碎,进筒困难,易发生堵心、卡心等复杂情况;起钻过程中破碎岩心容易从岩心爪处脱落,影响取心收获率。

2) 取心层位往往夹杂石英砂岩,地层可钻性差,机械钻速低,取心钻头在同一位置反复研磨岩心,导致岩心直径变细,拔心作业时岩心爪无法抓牢岩心,导致丢心,影响取心收获率。

3) 取心钻头崩齿严重、寿命低,影响回次进尺。例如龙页3井九门冲组黑色泥页岩地层取心时,取心13筒次,使用取心钻头8只,磨损均很严重。

4) 页岩地层往往采用中长筒取心以提高取心效率,取心外筒长,稳定性差,稳定器过多又容易导致起下钻困难。

5) 采用铝合金内筒取心作业时,岩心下钻台时无扶正保护措施,内筒容易弯曲,导致岩心移位、破碎变形,影响岩心质量。

2 取心工具及配套出心装置改进

2.1 取心内筒改进

页岩在低围压下具有明显的脆性特征,岩心容易从层理处破裂,目前取心时多采用保形取心工艺措施。传统的保形取心工具是在钢质内筒中放入铝合金衬筒来解决岩心保形问题,在成柱性较好地层,该技术取得了非常好的效果。但在页岩地层取心时存在2个缺点:一是出心过程作业程序多,出心时间长,时效性差,不利于页岩气储层精确评价;二是作业程序繁琐导致岩心多次搬运,页岩岩心容易错位,对岩心造成二次伤害。

针对以上问题,研发了高强度铝合金内筒,替换钢制内筒,取心筒层次由3层减少为2层。铝合金内筒内壁光滑,摩擦系数小,减小了岩心进筒阻力,有效防止了岩心堵塞;同时该内筒具有良好的抗拉压性能,可以同岩心一起切割、包装、运输,防止岩心损坏,保证了页岩岩心的完整性。

2.2 内筒吊装转移装置

取心完毕岩心筒提至井口后,需将铝合金内筒抽出,连同岩心一块吊运至井场进行切割作业。铝合金内筒刚度小,吊运过程中容易弯曲,造成岩心形状破坏。目前国外使用内筒吊装支架(core cradle),将内筒与该支架捆绑在一块进行吊装作业,但该方法繁琐、笨重且需要高空作业,存在很高的危险性^[16]。针对这一问题,专门设计了内筒吊装转移装置(见图1)。出心时,铝合金内筒与该装置固定在一起进行吊装,避免了内筒弯曲,保证了岩心完整性;吊装支架下端配备4组滚轮,在场地上可以方便地进行转移切割辅助作业,节省了出心时间,降低了劳动强度和作业风险。

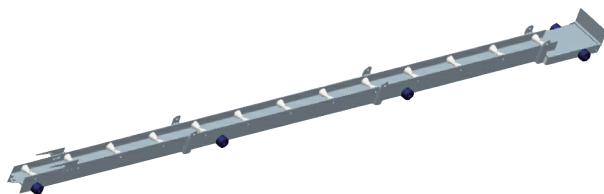


图1 岩心内筒吊装转移装置

Fig.1 Lifting and transferring tool for coring inner barrels

2.3 耐磨抗冲击取心钻头

页岩地层各向异性严重,地层软硬不均,局部石英质含量高,岩性致密且脆性很高。前期取心作业使用的三角聚晶及PDC取心钻头效果不理想,机械钻速慢,如在渝鄂地区龙马溪组浊积砂地层部分筒次取心速度仅为0.5~0.7 m/h,钻头磨损严重,单只钻头进尺不足3 m,影响了取心时效。

结合页岩地层特点,研制了SCM-8100高效PDC取心钻头(见图2)。该钻头为6刀翼结构,选用 $\phi 13$ mm抗冲击高性能PDC复合片,具有出刃高、钻头自锐性好、抗冲击和耐磨损等特点,有利于提高页岩地层钻进速度和钻头寿命。



图2 SCM-8100取心钻头

Fig.2 SCM-8100 coring bit

3 取心筒稳定性分析及技术措施

单筒取心由于回次进尺短、起下钻频繁、作业周期长,在页岩地层取心中逐渐被双筒或三筒取心技术所取代。在中长筒取心技术中不能简单套用单筒取心技术措施,否则会出现工具失稳、取心收获率降低等问题。为了合理制定取心技术措施,优选取心钻具组合,需要对取心筒进行稳定性分析。

3.1 取心筒稳定性分析

取心筒的稳定性是指取心工具在取心钻进中保持外筒垂直旋转和取心钻头垂直井底作平稳的同心圆运动。取心筒失去稳定是指外筒在钻压作用下发生弯曲,这种弯曲一方面造成钻头偏磨,导致单筒进尺降低;另一方面使进入钻头内的岩心受到侧向力作用,严重时,岩心在钻头进心处就破碎导致无法成心,收获率下降。因此,可以根据取心筒的一次弯曲临界钻压来研究取心筒的稳定性,临界钻压越高,取心筒越不容易发生弯曲,其稳定性越好,对取心越有利。

$$W_c = \frac{4(q\sin\alpha)^2 Gl^4 + EI\pi^6 T^2}{\pi^4 l^2 T^2} - \frac{\sqrt{4(q\sin\alpha)^2 Gl^4 + EI\pi^6 T^2 - \pi^2 T^2 [8(q\sin\alpha)^2 Gl^4 (g\pi^4 EI^2 - 2q\omega^2 Il^4) + g\pi^6 (EI\pi^2)^2 T^2]}}{\pi^4 l^2 T^2} \quad (1)$$

式中: W_c 为取心外筒发生一次弯曲时的钻压, N; q 为取心筒单位长度重量, N/m; α 为井斜角, ($^\circ$); G 为外筒剪切弹性模量, MPa; I 为取心筒惯性矩, m^4 ; l 为取心筒长度, m; T 为取心扭矩, $N \cdot m$; E 为弹性模量, MPa; ω 为取心筒旋转角速度, rad/s。

采用推导的临界钻压计算公式,以 Yb-8100 取心筒为例分别计算了不同取心筒长度、取心转速下取心外筒发生一次弯曲时的临界钻压,结果见图 4、图 5。

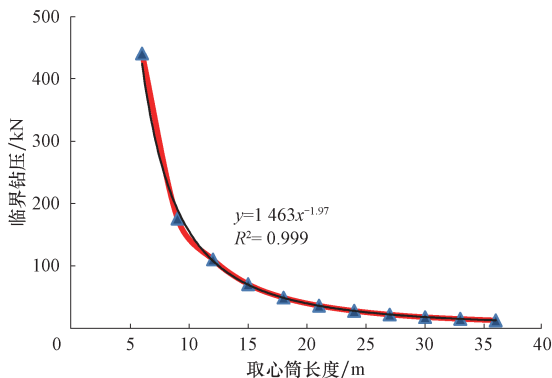


图4 取心筒长度对取心筒稳定性的影响

Fig. 4 The effect of coring barrel length on coring stability

参考普通钻柱稳定性分析方法^[17-20]研究取心筒稳定性,建立力学分析模型,为便于求解,并使理论计算结果具有普遍意义,作如下假设:1)不考虑井径扩大问题,即假设井眼直径等于钻头直径;2)取心筒质量呈连续均匀分布,不考虑取心外筒加厚接头影响,取心筒自重横向分力视为横向均布载荷;3)取心筒上端稳定器视为铰支固定。基于以上假设,建立了取心筒在井斜角 α 的井眼中受钻压的受力模型(见图 3)。

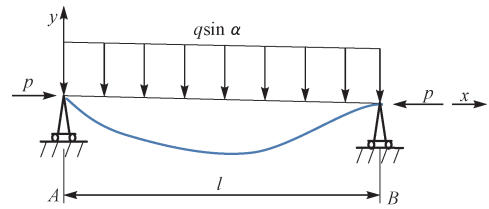


图3 取心筒受力模型

Fig. 3 The mechanical model for coring barrel

基于能量法求得取心外筒发生一次弯曲时的临界钻压为:

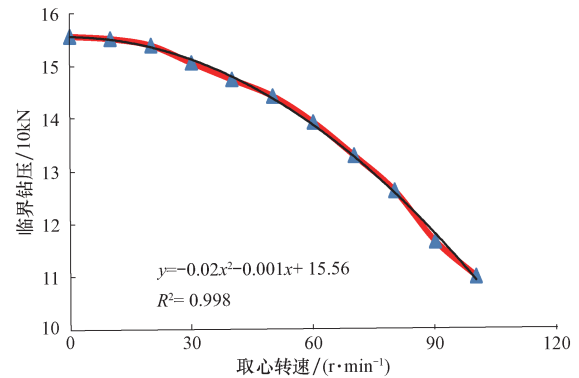


图5 取心转速对取心筒稳定性的影响

Fig. 5 The effect of coring ROP on coring stability

对图 4 中的临界钻压与取心外筒长度关系进行回归,可得:

$$W_c = 1463l^{-1.97} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,临界钻压与取心筒长度近似呈幂函数关系。取心筒越长,其一次弯曲临界钻压越低,取心筒越容易发生弯曲,其稳定性越差。单筒取心时其一次弯曲临界钻压为 190 kN,如果接双筒后临界钻压会下降为 50 kN 左右,已经在取心正常钻压范围内,因此在页岩地层进行双筒或者三筒取

心作业时必须在适当位置增加稳定器,否则会造成钻具失稳。

对图 5 中的临界钻压与取心转速关系进行回归,可得:

$$W_c = -0.02n^2 - 0.001n + 15.56 \quad (3)$$

式中: n 为取心转速, r/min。

从式(3)可以看出,临界钻压与取心转速近似呈二次函数关系,转速越高,取心筒稳定性越差,且一次弯曲临界钻压下降幅度呈增大趋势。长筒取心中由于取心筒长更容易失去稳定,要尽量避免同时采取高钻压和高转速,以防取心筒失稳造成取心收获率低。在页岩地层取心中,转速一般采取 40~60 r/min。

以 Yb-8100 取心筒双筒取心为例,分别计算两端加稳定器、上端加稳定器、下端加稳定器和无稳定器等 4 种情况下的取心筒临界钻压,结果如表 1 所示。

表 1 稳定器对取心筒稳定性的影响

Table 1 The effect of the centralizer on coring stability

稳定器情况	临界钻压/kN
取心筒两端加稳定器	384.4
取心筒上端加稳定器	182.9
取心筒下端加稳定器	110.3
不加稳定器	49.0

从表 1 可以看出,取心筒增加稳定器后会显著提高外筒临界钻压,正常钻压范围内可以避免外筒弯曲,保证取心筒稳定,提高井眼质量。另外,取心筒上端加稳定器提高其稳定性的作用优于下端加稳定器,下端加的稳定器可适当选用欠尺寸稳定器。

3.2 取心钻具组合及工艺参数

单筒取心钻具组合为:φ215.9 mm SCM-8100 取心钻头+φ212.0 mm 稳定器+φ177.8 mm 取心筒+φ212.0 mm 稳定器+φ194.0 mm 上接头+φ165.1 mm 钻铤×9 根+φ165.1 mm 震击器+φ127.0 mm 加重钻杆×15 根+φ127.0 mm 钻杆。

双筒取心钻具组合为:φ215.9 mm SCM-8100 取心钻头+φ212.0 mm 稳定器+φ177.8 mm 取心筒+φ212.0 mm 稳定器+φ177.8 mm 取心筒+φ212.0 mm 稳定器+φ194.0 mm 上接头+φ165.1 mm 钻铤×9 根+φ165.1 mm 震击器+φ127.0 mm 加重钻杆×15 根+φ127.0 mm 钻杆。其中,两个取心筒中间的稳定器可视实际情况安装或拆除,下端的稳定器可采用 φ210.0 mm 欠尺寸稳定器。

页岩地层长筒取心工艺参数选取原则为大排

量、低转速和低钻压,其参数选取范围一般为:钻压 20~60 kN,排量 25~30 L/s,转速 40~60 r/min。

4 现场应用

近几年,页岩地层取心技术累计现场应用 12 井次,总取心进尺达 2 045.38 m,取心收获率达 96.36%,获得了非常好的应用效果(见表 2)。其中,焦页 7 井全井共取心 14 筒次,取心进尺 199.20 m,平均机械钻速 1.14 m/h,共使用取心钻头 4 只,均为轻微磨损,与常规单筒取心相比,减少取心 7 筒次,钻井周期缩短 10 d,取心成本降低 70 万元,取心效率显著提高。

表 2 页岩地层取心技术现场应用情况

Table 2 Field application of coring techniques in shale formations

井号	取心井段/m	进尺/m	岩心长/m	收获率, %
罗 69 井	2 911.00~3 140.75	229.75	221.36	96.30
牛页 1 井	3 294.93~3 500.00	205.07	185.22	90.32
樊页 1 井	3 030.00~3 444.44	414.44	403.63	97.39
利页 1 井	3 580.00~3 835.21	215.74	200.05	92.70
龙页 1 井	3 845.00~3 889.40	44.40	44.32	99.80
利页 1 井	2 675.02~2 836.37	142.53	142.76	100.16
恩页 1 井	526.80~3 913.32	138.46	137.65	99.40
焦页 11 井	2 252.00~2 260.80	8.80	8.80	100.00
焦页 41 井	2 483.01~2 620.70	137.69	137.69	100.00
焦页 7 井	3 285.00~3 584.00	199.20	184.98	92.86
威页 1 井	3 500.00~3 596.21	96.21	92.83	96.49
孔探 1 井	2 833.00~3 442.36	213.09	211.63	99.31
合计		2 045.38	1 970.92	96.36

5 结论与建议

1) 高强度低摩阻铝合金内筒适用于页岩地层取心,配套岩心吊装转移装置有效避免了对岩心的二次伤害,为准确获取地质资料奠定了基础。

2) 中长筒取心技术结合耐磨抗冲击取心钻头提高了页岩地层取心回次进尺,降低了钻井成本,但采用中长筒取心时需考虑钻具组合及施工参数对取心筒稳定性的影响,防止钻具失稳影响取心收获率。

3) 由于起钻过程中存在大量油气逸出,地面获取的岩心无法精确评估页岩地层的真实油气含量,建议继续开展油气捕集取心技术研究。

参 考 文 献

References

- [1] 王兰生, 廖仕孟, 陈更生, 等. 中国页岩气勘探开发面临的问题与对策[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 119-122.
WANG Lansheng, LIAO Shimeng, CHEN Gengsheng, et al. Bottlenecks and countermeasures in shale gas exploration and development of China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 119-122.
- [2] 赵群. 世界页岩气发展现状及我国勘探前景[J]. 天然气技术, 2008, 2(3): 11-15.
ZHAO Qun. Global development and China's exploration for shale gas[J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(3): 11-15.
- [3] 李世臻, 姜文利, 王倩, 等. 中国页岩气地质调查评价研究现状与存在问题[J]. 地质通报, 2013, 32(9): 1440-1446.
LI Shizhen, JIANG Wenli, WANG Qian, et al. Research status and currently existent problems of shale gas geological survey and evaluation in China[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(9): 1440-1446.
- [4] 王世谦. 中国页岩气勘探评价若干问题评述[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 13-29.
WANG Shiqian. Shale gas exploration and appraisal in China: problems and discussion[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 13-29.
- [5] 王燕, 冯明刚, 魏祥峰, 等. 焦石坝页岩气储层黏土组分特征及其体积分数计算[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 301-304.
WANG Yan, FENG Minggang, WEI Xiangfeng, et al. Clay mineral component characteristics and volume fraction calculation for Jiaoshiba shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(3): 301-304.
- [6] 据宜文, 卜红玲, 王国昌. 页岩气储层主要特征及其对储层改造的影响[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 492-506.
JU Yiwen, BU Hongling, WANG Guochang. Main characteristics of shale gas reservoir and its effect on the reservoir reconstruction[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(4): 492-506.
- [7] 贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等. 层状页岩力学特性及其破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2013, 32(2): 57-61.
JIA Changgui, CHEN Junhai, GUO Yintong, et al. Research on mechanical behaviors and failure modes of layer shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 32(2): 57-61.
- [8] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 17-22.
LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17-22.
- [9] 罗鹏, 吉利明. 陆相页岩气储层特征与潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1060-1067.
LUO Peng, LI Liming. Reservoir characteristics and potential evaluation of continental shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1060-1067.
- [10] 李霞, 周灿灿, 李潮流, 等. 页岩气岩石物理分析技术及研究进展[J]. 测井技术, 2013, 37(4): 352-359.
LI Xia, ZHOU Cancan, LI Chaoliu, et al. Advances in physics analysis technology of shale gas[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 352-359.
- [11] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 1-6.
ZENG Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 1-6.
- [12] 罗军, 杨立文, 张国丽, 等. 中筒定向取心技术在煤层取心中的应用[J]. 钻采工艺, 2008, 31(4): 139-140.
LUO Jun, YANG Liwen, ZHANG Guoli, et al. Application of middle tube directional coring technique in the coal bed[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(4): 139-140.
- [13] 孔志刚, 于希. 辽河油田古潜山储层钻井取心技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 50-54.
KONG Zhigang, YU Xi. Coring techniques for buried hill reservoirs in Liaohe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 50-54.
- [14] 吴为, 令文学, 司英晖. YD 油田钻井取心技术难点及对策[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 18-22.
WU Wei, LING Wenxue, SI Yinghui. Coring challenges and solutions in the YD Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 18-22.
- [15] 孙少亮, 尹家峰. JH-1井取心实践与认识[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(5): 115-117.
SUN Shaoliang, YIN Jiafeng. Coring practice and understanding on Well JH-1[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(5): 115-117.
- [16] 孙少亮. 中长筒保形取心技术在页岩气井中的应用[J]. 钻采工艺, 2013, 36(5): 111-113.
SUN Shaoliang. Application of middle and long tube coring technique in the shale gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(5): 111-113.
- [17] 王兴武, 李让, 王万红. 我国西部地区超深井钻井取心技术[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 63-66.
WANG Xingwu, LI Rang, WANG Wanhong. Coring technology in ultra-deep wells in West China[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 63-66.
- [18] 姜伟. 水平井及大斜度井下部钻具组合的弹性稳定性[J]. 石油机械, 1995, 23(11): 32-37.
JIANG Wei. Elastic stability of lower drill string assembly in horizontal holes and high deviating holes[J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(11): 32-37.
- [19] 李子丰, 梁尔国. 钻柱力学研究现状及进展[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 1-8.
LI Zifeng, LIANG Erguo. Research and development of drill string mechanics[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 1-8.
- [20] 朱炳坤. 弯曲井眼中钻柱的稳定性分析[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(3): 15-16.
ZHU Bingkun. The analysis of stability of drill string in bending hole[J]. Oil Field Equipment, 2005, 34(3): 15-16.

[编辑 滕春鸣]