



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
全国中文核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊  
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊  
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)  
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)  
中国科技论文统计源期刊  
RCCSE中国核心学术期刊

## 深井超深井短轻尾管短路故障测试方法与现场应用

刘国祥 赵德利 李振 孔博

### Short Circuit Fault Test Method and Field Application of Short and Light Liners in Deep and Ultra-Deep Wells

LIU Guoxiang, ZHAO Deli, LI Zhen, KONG Bo

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021042>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 顺北一区超深井窄间隙小尾管固井技术研究

Slim Liner Cementing Technology for Ultra-Deep Wells with a Narrow Annulus in No.1 District of Shunbei Block

石油钻探技术. 2019, 47(6): 60–66 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019114>

#### 埕海油田大斜度井超短尾管固井技术

Ultra-Short Liner Cementing Technology for Highly Deviated Wells in the Chenghai Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(3): 81–86 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020132>

#### 顺北一区小井眼超深井井筒温度场特征研究与应用

Study and Application of Wellbore Temperature Field Characteristics in the Ultra-Deep Slim-Hole Wells in the Shunbei No.1 Area

石油钻探技术. 2021, 49(3): 67–74 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021006>

#### 塔里木克深9气田复杂超深井钻井关键技术

Key Drilling Technologies for Complex Ultra-Deep Wells in the Tarim Keshen 9 Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(1): 15–20 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020028>

#### 顺北油气田火成岩侵入体覆盖区超深井优快钻井技术

Ultra-Deep Well Drilling Technology in the Igneous Invasion Coverage Area of the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(2): 1–5 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020004>

#### 塔里木博孜区块超深井自动垂直钻井难点与技术对策

Difficulties and Technical Countermeasures for Automatic Vertical Drilling in Ultra-Deep Wells in the Bozi Block of the Tarim Basin

石油钻探技术. 2021, 49(1): 11–15 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020113>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021042

引用格式: 刘国祥, 赵德利, 李振, 等. 深井超深井短轻尾管短路故障测试方法与现场应用 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 70-74.

LIU Guoxiang, ZHAO Deli, LI Zhen, et al. Short circuit fault test method and field application of short and light liners in deep and ultra-deep wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 70-74.

# 深井超深井短轻尾管短路故障测试方法与现场应用

刘国祥, 赵德利, 李振, 孔博

(中国石油化工工程技术研发院, 北京 102206)

**摘要:** 为了精准测试深井超深井短轻尾管是否发生短路, 在尾管短路常规测试方法的基础上, 结合实际施工作业条件, 提出了变密度浆体循环压力变化曲线测试方法, 分析了变密度循环测试原理、控制过程, 研究了可操作的测试流程与技术关键点。变密度浆体循环压力对井下循环通道变化具有较高的敏感性, 反映在压力曲线上会有不同的压力变化, 通过对比现场实测压力曲线与理论压力曲线, 可准确判断井下管柱短路情况。现场应用表明, 该测试方法具有抗干扰因素强、测试结果精准度高和现场操作简便的优点, 能够准确判断尾管管柱是否发生短路。变密度浆体循环压力变化曲线测试方法解决了深井超深井短轻尾管短路测试难的问题, 具有较好的现场推广应用价值。

**关键词:** 尾管; 短路; 迟到时间; 循环压力; 变密度浆体; 线容积

中图分类号: TE256<sup>+</sup>.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)05-0070-05

## Short Circuit Fault Test Method and Field Application of Short and Light Liners in Deep and Ultra-Deep Wells

LIU Guoxiang, ZHAO Deli, LI Zhen, KONG Bo

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China)

**Abstract:** To accurately test the short circuit of short and light liners in deep and ultra-deep wells, a test method for the circulating pressure curves of variable density slurry was proposed after analyzing conventional test methods for liner short circuits and considering actual construction conditions. The principle and control processes of variable density cyclic tests, operable test programs, and key technical points were studied. The circulating pressure of variable density slurry was highly sensitive to the changes in downhole circulation channels, shown in pressure curves as variations. The comparison between the measured and theoretical pressure curves can reveal the short circuit situation of downhole strings. Field application results prove the test method has the characteristics of strong anti-interference capability, accurate measurement results, and simple operation, which can correctly identify the short circuit of liner strings. The test method for the circulating pressure curves of variable density slurry has overcome the difficulty in testing the short and light liner short circuits in deep and ultra-deep wells, which is worthy of wide application.

**Key words:** liner; short circuit; lag time; circulating pressure; variable density slurry; volume per meter

近年来, 随着国内外油气勘探力度不断加大, 尾管悬挂固井工艺在实际生产中得到广泛应用。尾管固井作业过程中, 井下管柱的密封完整性是整个固井作业顺利施工的基础<sup>[1-4]</sup>。一旦发生固井短路事故, 若不能及时采取有效措施进行补救, 将无法进行固井作业<sup>[5-7]</sup>, 严重时可能造成整口井报废。深井超深井短轻尾管作业过程中, 受尾管长度、尾管下

入深度和循环压力占比等因素影响, 尾管短路常规测试方法的精准性较差, 严重影响了现场正常作业<sup>[8-9]</sup>。为了研究一种具有现场可操作性的尾管短路测试方法, 避免误判造成更严重的井下事故, 笔者在尾管短路常规测试方法处理疑似短路问题的基础上, 提出了变密度浆体循环压力曲线测试方法, 现场应用后效果较好, 具有现场推广应用价值。

收稿日期: 2020-10-25; 改回日期: 2021-07-13。

作者简介: 刘国祥 (1980—), 男, 山东德州人, 2004 年毕业于石油大学 (华东) 石油工程专业, 2013 年获中国石油大学 (北京) 石油与天然气工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事固井完井工具及工艺技术研究。E-mail: lgx@shelfoil.com。

## 1 尾管短路常规测试方法

### 1.1 循环压力对比

均质钻井液以恒定排量在井下固有通道循环时,压力会保持恒定。尾管固井作业施工过程中,循环压力的变化可以反映井下循环条件发生了变化。这些变化有:循环通道改变(包括循环管柱短路与裸眼环空砂堵);裸眼地层漏失;循环钻井液密度不均匀;地层油、气和水入侵井筒。

循环压力对比法是通过对比邻井或本井相同条件下的循环压力,分析压力变化原因、初步分析井下情况、预判尾管短路风险。但由于循环压力变化受井下影响因素较多,该方法并不能准确判断是哪一种因素造成压力异常。另外,深井超深井短轻尾管固井作业时,循环压力消耗主要发生在钻杆内,尾管循环压耗在循环压力中占比小,发生短路时压力变化不明显,无法通过压力变化判断井下管柱是否发生短路。

### 1.2 环空反向憋压测试

环空反向憋压是验证井下管柱密封是否正常的一种测试方法。管柱中设置的单流阀组允许流体由管内向环空方向循环,反向则无法循环。利用该装置循环流通特点,可以通过环空反向憋压,验证井下管柱密封性能。憋压值要求小于地层破裂压力、且大于钻井液流动启动压力。反向憋压稳压,井口

不返浆,表明井下管柱密封和单流阀密封均无问题;但若反向憋压失败,则无法判断是单流阀密封失效还是管柱短路。

### 1.3 循环迟到时间

迟到时间是综合录井的基本参数之一,是岩屑或岩屑中的气体从井底随钻井液上返至地面所需的时间。现场作业过程中,将指示物(通常使用瓷片或自身会轻微上浮的塑料片)泵入井内,循环监测记录指示物实际返出井口时间,并与理论井底循环时间进行对比,分析井下循环情况,判断是否存在循环短路,确定短路的具体位置<sup>[10]</sup>。

测试指示物循环迟到时间时,测试结果受井眼轨迹、钻井液密度和尾管长度影响较大。短尾管固井作业时,尾管短、套管段循环时间很短,测试结果存在很大偏差,仅根据迟到时间无法准确判断管柱是否短路。大斜度井、长水平段水平井所用钻井液密度与指示物密度差较大,实测循环迟到时间存在严重的失真,容易干扰短路判断。

西南地区10#井 $\phi 177.8\text{ mm}$ 尾管固井作业时,尾管悬挂器坐挂过程中投球憋压无法稳压,反向憋压失败,出现疑似短路现象,循环迟到时间测试情况见表1。从表1可以看出,7次循环迟到时间测试结果都显示悬挂器位置短路。采用重浆循环迟到时间测试方法,根据返出口流体密度变化与时间关系分析结果,决定进行固井施工。最终该井替浆到量碰压 $13\sim 17\text{ MPa}$ ,管内稳压 $17\text{ MPa}$ 无压降,管柱密封无短路点。

表1 西南地区10#井 $\phi 177.8\text{ mm}$ 尾管循环迟到时间测试结果

Table 1 Test results of the circulation lag time of  $\phi 177.8\text{ mm}$  liner in Well 10# of Soutwest Area

序号	实测时间/min	泵冲	排量/ $(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	指示物	返出情况	理论返出时间/min	
						从井底	从悬挂器
1	176	62	21.0	塑料条	107 min后出现第一片塑料条, 109~116 min返出量增多	263	189
2	170	66	22.8	塑料条	153 min出现第一片塑料条, 163~170 min返出量增多	242	174
3	120	93	30.0	塑料条、瓷片	120 min时见塑料条	172	123
4	107	93	30.0	瓜子、塑料条	64~77 min发现瓜子, 107 min发现瓜子、塑料条; 112~127 min返出物数量增多	172	123
5	131	90	29.0	塑料条、云母	109 min见第一片塑料片, 121 min时共见22片; 127 min见云母片, 131 min见大量云母片, 之后一直出	174	125
6	138	92	29.7	瓜子、塑料条	138 min见第一片塑料片; 153 min时指示物增多, 后零星出现瓜子和塑料条	173	125
7	167	93	30.0	密度 $1.80\text{ kg/L}$ 的重浆 $16\text{ m}^3$	162~167 min 钻井液密度变化, 167~189 min 钻井液密度变化明显	172	123

## 2 变密度浆体循环压力曲线测试方法

尾管短路常规测试方法在直井、长尾管井的应用效果较好,但在一些复杂井,尤其是深井、超深井短轻尾管固井作业时的测试结果具有不确定性,很难判断尾管是否短路,需要研究一种简单有效的测试方法进行现场作业,降低施工风险。因此,在西南地区 10#井疑似短路异常问题处理方法的基础上,提出了变密度浆体循环压力曲线测试方法。

### 2.1 测试原理

正常循环过程中,泵入与钻井液有一定密度差的一定量变密度浆体,浆体流经钻杆、套管和环空时,因每段线容积不同,变密度浆体高度不同,产生的静液柱压力也不同,反映在“循环压力-时间”曲线上,会出现拐点。循环排量恒定条件下,变密度浆体进入每段空间时的高度变化速率、压力变化速率会有明显的不同,在压力曲线上表现为不同斜率曲线与拐点。利用这一原理,绘制变密度浆体井底循环与尾管顶部循环 2 条理论“压力-时间”曲线,以及实测变密度浆体实际循环“压力-时间”曲线,通过对分析实测与理论“压力-时间”曲线,可以直观、准确地判断井下管柱是否短路。测试原理如图 1 所示。

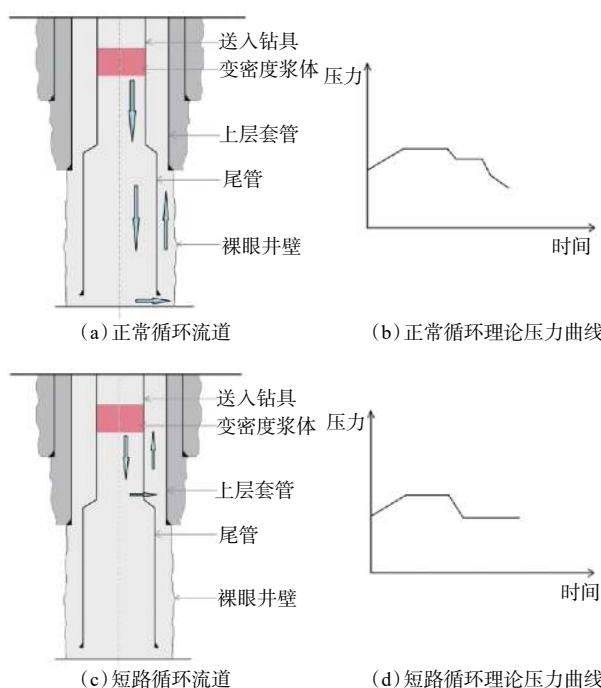


图 1 变密度浆体循环压力曲线测试原理

Fig.1 Test principle for the circulating pressure curves of variable density slurry

### 2.2 变密度浆体选择

选择变密度浆体时,要充分考虑浆体对原钻井液、地层特性和井壁稳定性等方面的影响。浆体优选与替入量优化过程中,遵循以下原则:

1) 优选与原钻井液同配方的低密度/高密度钻井液,以确保在钻井液接触过程中对原钻井液性能无明显的影响,不改变原钻井液基本性能。

2) 浆体黏度与原钻井液相近或相等,变密度浆体进入尾管裸眼环空后对井壁、地层无不良影响,不会造成井壁掉块、坍塌,不会对产层造成污染。

3) 选择合适的浆体替入量,保证变密度浆体进入尾管裸眼环空后的环空静液柱压力满足地层压稳与防漏要求,即不能引起井控与漏失风险。

### 2.3 测试流程

1) 依据变密度浆体选择原则,选择变密度浆体,确定浆体密度、黏度等性能参数和替入量;

2) 根据实际井况条件,邻井或本井正常循环排量作为测试排量,泵入原井浆循环,测试该排量下正常循环压力;

3) 变密度浆体自开始泵入到全部进入尾管裸眼环空所用的时间  $t$  作为测试时间,根据管柱内容积计算测试时间  $t$ ;

4) 根据井身结构与管柱数据,计算变密度浆体在不同线容积段的静液柱压力变化与循环时间,制作循环测试压力控制表;

5) 绘制理论循环压力曲线。依据循环测试压力控制表,绘制  $t$  时间段内浆体通过井底循环与通过尾管顶部循环的 2 条“压力-时间”曲线;

6) 泵入变密度浆体,跟踪记录  $t$  时间段内各时间点的实际循环压力值,在步骤 5) 的坐标系中绘制实测循环“压力-时间”曲线;

7) 将实测变密度循环压力曲线与 2 条理论循环压力曲线进行对比,判断尾管柱是否短路。

## 3 现场应用

西南 15#井在  $\phi 193.7 \text{ mm}$  套管中下入  $\phi 139.7 \text{ mm}$  尾管进行尾管固井作业,尾管悬挂器憋压坐挂过程中,管内憋压 21 MPa 无法稳压,同时井口返浆,疑似井下管串出现短路问题。多次对比循环压力和进行环空憋压测试均无法确定是否短路,因此进行变密度浆体循环测试。

### 3.1 基本数据

西南 15#井完钻井深 7 063.00 m,裸眼井段直径

165.1 mm;  $\phi 193.7$  mm 套管壁厚为 12.70 mm, 下深 6 237.00 m;  $\phi 139.7$  mm 尾管壁厚 10.54 mm, 线容积 11.0 L/m, 下深 5 998.04~6 453.00 m。复合送入钻具:  $\phi 139.7$  mm 钻杆壁厚为 10.54 mm, 线容积 11.0 L/m, 下深 0~3 525.74 m;  $\phi 101.6$  mm 钻杆壁厚为 9.65 mm, 线容积 5.4 L/m, 下深 3 525.74~5 998.04 m。

钻井液密度为 1.55 kg/L, 变密度浆体选取密度

1.02 kg/L 的胶液 8.5 m<sup>3</sup>, 循环排量 8.0 L/s, 实测循环压力 7.5 MPa。根据管柱结构计算出管内总容积, 再除以循环排量, 即可得到变密度浆体自井口全部进入  $\phi 139.7$  mm 套管环空的时间  $t$  为 136.7 min。

变密度浆体在不同井段循环, 计算管柱内外静压差和与之对应的循环时间, 制作循环测试压力控制表(见表 2)。

表 2 变密度浆体循环测试压力控制表

Table 2 Pressure control table for cyclic tests of variable density slurry

循环井段	替入量/m <sup>3</sup>	内外静压差/MPa	循环压力/MPa	循环时间/min	变密度浆体循环控制点
钻杆内	0	0	7.50	0	开始进入 $\phi 139.7$ mm 钻杆
	8.50	-4.09	11.59	17.7	全部进入 $\phi 139.7$ mm 钻杆
	30.28	-4.09	11.59	80.8	开始进入 $\phi 101.6$ mm 钻杆
	8.50	-8.34	15.84	98.5	全部进入 $\phi 101.6$ mm 钻杆
	4.85	-8.34	15.84	108.6	开始进入 $\phi 139.7$ mm 套管
套管底进环空	5.00	-5.84	13.34	119.0	开始进入 $\phi 139.9$ mm 套管环空
	1.31	-3.41	10.91	121.8	开始进入环空 $\phi 193.7$ mm 套管
	1.65	-0.53	8.03	125.2	开始进入 $\phi 101.6$ mm 钻杆环空
	0.54	0.20	7.30	126.3	全部进入 $\phi 139.9$ mm 套管
	5.00	4.49	3.01	136.7	全部进入 $\phi 139.9$ mm 套管环空
尾管顶部短路进环空	8.50	3.18	4.32	126.3	经 $\phi 139.9$ mm 套管顶部全部进入钻套环空

### 3.2 压力曲线分析

井眼环空泵入变密度浆体进行循环, 记录循环压力与对应的循环时间, 绘制实测循环压力曲线。根据循环测试压力控制表, 绘制尾管顶部循环压力预测曲线和井底循环压力预测曲线(见图 2)。

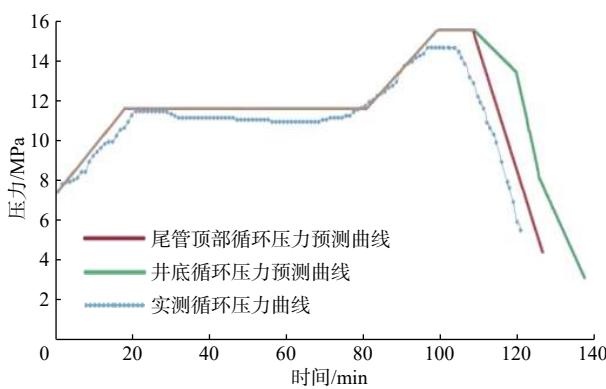


图 2 循环压力-时间曲线

Fig.2 Curves of circulating pressure versus time

对比图 2 中的变密度浆体循环压力实测与预测曲线可看出, 实际压力曲线与尾管顶部循环压力预测曲线上的拐点和曲率变化高度吻合, 确定井下通

过尾管顶部进行循环, 即尾管柱存在短路点。

现场起钻后发现, 尾管胶塞传压孔明显发生刺漏, 说明该处出现短路, 根据测试结果判断的短路情况准确可靠。

## 4 结论

1) 尾管短路常规测试方法可以用来检测尾管柱的完整性, 检测结果正常时, 可以确定尾管柱密封良好, 无短路点; 检测结果出现较大偏差时, 由于影响因素较多, 并不能判定井下尾管柱是否发生短路。实际作业过程中, 一旦出现循环压力异常偏低、正反向憋压密封失效、循环迟到时间偏短现象, 应对井下尾管柱进行进一步短路测试。

2) 变密度浆体循环压力曲线测试方法利用变密度浆体在井下不同线容积空间循环时的静液柱压力不断发生变化的原理, 在正常循环过程中泵入一定量的变密度浆体, 进行循环压力实测与理论模拟, 得出 3 条变密度浆体循环“压力-时间”变化曲线。通过曲线对比, 即可精准判断尾管短路情况。

3) 现场应用结果表明, 变密度浆体循环压力变化曲线测试方法在深井超深井短轻尾管短路测试中具有良好的应用效果, 相较于常规测试方法, 测试准确度更高和操作便捷性更好。

4) 变密度浆体循环压力变化曲线测试方法对变密度浆体体系选择有严格的要求, 现场应用过程中, 应谨慎设计注入浆体的密度与性能参数, 以避免出现井控和井壁垮塌风险。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 马开华, 谷磊, 叶海超. 深层油气勘探开发需求与尾管悬挂器技术进步 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 34–40.  
MA Kaihua, GU Lei, YE Haichao. The demands on deep oil/gas exploration & development and the technical advancement of liner hangers[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 34–40.
- [2] 郑晓志, 徐明会, 杜鹏德. 带胶塞系统可提出式回接装置在尾管补救固井中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(6): 36–38.  
ZHENG Xiaozhi, XU Minghui, DU Pengde. Application of retrievable tie-back device of system with rubber plug in remedial cementing with liner[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(6): 36–38.
- [3] 张峰, 刘子帅, 李宁, 等. 塔里木库车山前深井窄间隙小尾管固井技术 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(4): 473–479, 485.  
ZHANG Feng, LIU Zishuai, LI Ning, et al. Cementing small liner strings with narrow clearance in deep wells in the Kuche piedmont structure in Tarim Basin[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(4): 473–479, 485.
- [4] 邓昌松, 何思龙, 段永贤, 等. 复杂超深井 KS1 井四开尾管固井技术 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 708–713.  
DENG Changsong, HE Silong, DUAN Yongxian, et al. Fourth-section liner cementing technology used in the complex ultradep Well KS1[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6): 708–713.
- [5] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题 [M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2006: 426–481.  
JIANG Xiwen. Drilling accident and complicated problems[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 486–481.
- [6] 刘春文, 沈海超, 袁济华, 等. 尾管固井短路复杂情况及其补救固井方案 [J]. 中国海上油气, 2013, 25(3): 53–56, 60.  
LIU Chunwen, SHEN Haichao, YUAN Jihua, et al. Handing of the circulation short circuit during liner cementing[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(3): 53–56, 60.
- [7] 费中明, 高飞, 蒋世伟, 等. 柴达木盆地冷探 1 井尾管悬挂器丢手异常固井实践 [J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 606–609.  
FEI Zhongming, GAO Fei, JIANG Shiwei, et al. Cementing practice with abnormal release of liner hanger in Well Lengtan 1 in the Qaidam Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 606–609.
- [8] 丁士东, 赵向阳. 中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展理念 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(4): 11–20.  
DING Shidong, ZHAO Xiangyang. New progress and development suggestions for drilling and completion technologies in Sinopec key exploration areas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 11–20.
- [9] 邹书强, 张红卫, 伊尔齐木, 等. 顺北一区超深井窄间隙小尾管固井技术研究 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 60–66.  
ZOU Shuqiang, ZHANG Hongwei, Yierqimu, et al. Slim liner cementing technology for ultra-deep wells with a narrow annulus in No. 1 District of Shunbei Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 60–66.
- [10] 沈海超, 胡晓庆, 王希玲, 等. 监测井下循环情况的迟到时间法在固井中的应用 [J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 58–60.  
SHEN Haichao, HU Xiaoqing, WANG Xiling, et al. Lag time method used in cementing[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(3): 58–60.

[ 编辑 滕春鸣 ]