

杭锦旗地区裂缝性漏失钻井堵漏技术研究与应用

吴天乾¹, 李明忠¹, 蒋新立², 李德红¹, 刘 福¹, 韩 婧¹, 李 季¹, 宋文宇¹

(1. 中石化华北石油工程有限公司技术服务公司, 河南 郑州 450006;
2. 中石化华北石油工程有限公司井下作业分公司, 河南 郑州 450006)

摘要:杭锦旗区块在原生构造裂缝及工程诱导缝作用下, 井漏问题突出, 常规静止堵漏、桥接堵漏等效果差。基于“纤维架桥、填充驻留、胶结固化”原理, 优选纤维及优化长度配比, 漂珠、微硅和油井水泥进行粒径级配, 调控固化体膨胀、稠化、韧性等性能, 完成了堵漏浆开发; 配套堵漏设计方法、过程控制措施等, 形成适用于杭锦旗区块裂缝性井漏的堵漏工艺。现场应用 232 井次, 一次堵漏成功率 93.5%, 显著提高了钻井效率, 对其它地区裂缝性井漏具有参考意义。

关键词:裂缝性漏失; 钻井堵漏; 油井水泥; 堵漏浆

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2020)02-0049-05

Research and application of plugging technology for fracture type leakage in the Hangjinqi area

WU Tianqian¹, LI Mingzhong¹, JIANG Xinli², LI Dehong¹,
LIU Fu¹, HAN Jing¹, LI Ji¹, SONG Wenyu¹

(1. Technology Service Company of SINOPEC Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou Henan 450006, China;
2. Downhole Operation Company of SINOPEC Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: Under the action of primary structural fractures and drilling induced fractures, well leakage is prominent in the Hangjinqi block, and conventional static plugging or bridge plugging is not effective. Based on the principle of “fiber bridging, filling up and standstill, cementing and curing”, a leak plugging slurry was developed through optimization of fibers and their length make-up ratio, sizing of floating beads and micro-silicon, and cement, and conditioning of expansion, thickening and toughness of the solidified solids. The plugging design method and process control measures were adopted to form a leak plugging technology suitable for fracture type leakage in Hangjinqi block. It has been used in 162 wells in the field and the success rate of one-time plugging is 93.7%, which can significantly improve drilling efficiency. It can also provide some reference for fracture type lost circulation in other areas.

Key words: fracture leakage; plugging; oil well cement; plugging slurry

0 引言

杭锦旗区块位于鄂尔多斯盆地北部, 是中石化在国内陆上致密砂岩气开发的重要接替新区。区块横跨伊盟隆起、伊陕斜坡和天环向斜 3 个一级构造单元, 内部发育 30 余条具有一定规模的断裂。地层承压能力低^[1-3], 如区块内锦 58 井区刘家沟组、石千峰组地层承压当量密度仅 1.10 g/cm³, 钻井漏失

普遍。2015—2019 年累计新钻水平井 197 口, 漏失率达 40%, 平均单井损失时间 5.9 d, 严重影响新区钻井提速提效。

杭锦旗区块漏失以原生构造裂缝和工程诱导缝漏失为主, 裂缝最大宽度 3~10 mm。常规堵漏材料通过架桥、桥塞在裂缝内形成了封堵层, 但封堵层难以阻止压力传递, 在“激动”压力作用下裂缝产生

收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-12-31 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.02.007

作者简介: 吴天乾, 男, 汉族, 1967 年生, 高级工程师, 从事钻井工程施工和钻井技术研究等工作, 河南省郑州市中原区淮河西路 23 号新蒲大厦 8 层 818 室, petroleumupc@163.com。

引用格式: 吴天乾, 李明忠, 蒋新立, 等. 杭锦旗地区裂缝性漏失钻井堵漏技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2): 49-53.

WU Tianqian, LI Mingzhong, JIANG Xinli, et al. Research and application of plugging technology for fracture type leakage in the Hangjinqi area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2): 49-53.

呼吸效应,封堵层失稳破坏而复漏^[4-7]。堵漏材料尺寸优选不当,易在裂缝表面封门或裂缝内驻留能力差,导致堵漏失败。通过试验多种堵漏材料、反复颗粒级配,桥堵技术在杭锦旗的成功率不到30%,且易复漏;水泥浆堵漏技术的成功率不足40%。而且,杭锦旗同裸眼段的坍塌压力与漏失压力之间窗口较窄,堵漏过程易诱发井塌事故,加剧井内复杂。因此,开发一种适应杭锦旗裂缝性地层的堵漏技术,对缩短钻井周期、降低建井成本具有重要的意义。基于纤维架桥、填充驻留和胶结固化的原理,通过优选与裂缝宽度相匹配的堵漏材料,以纤维、漂珠、微硅和水泥灰复配开发了密度 $1.40\sim 1.45\text{g}/\text{cm}^3$ 的堵漏浆;根据作业时间优化堵漏浆初凝时间和触变性,调节固化体的抗压强度、膨胀和韧性等力学性能。采用“高注低堵”设计原则,规范堵漏作业设计,细化堵漏作业程序,完善过程控制措施,形成杭锦旗地区裂缝性地层堵漏配套技术,以提高堵漏效率和成功率。

1 堵漏浆开发

1.1 堵漏材料优选

优选纤维和漂珠对裂缝进行封堵,其中纤维对裂缝起架桥桥塞作用,漂珠对裂缝起填充封堵作用。根据架桥桥堵原理,当纤维长度为裂缝宽度 $2/3$ 时,可稳定架桥于裂缝;纤维长度为裂缝宽度 $1/3$ 时,可深入裂缝内部,堆积形成桥塞^[8-10]。因此,使用两类长度系列的纤维: $1\sim 3\text{mm}$ 和 $3\sim 6\text{mm}$,以 $2:1$ 的比例复配。纤维在不同裂缝宽度下发挥的作用如表1所示。

表1 纤维长度对不同宽度裂缝的封堵作用
Table 1 Sealing effect of fiber length on fractures with different width

裂缝宽度/mm	纤维长度 $1\sim 3\text{mm}$	纤维长度 $3\sim 6\text{mm}$
3.00	桥塞、架桥	
4.00	桥塞、架桥	
5.00	桥塞	架桥
7.00	桥塞	桥塞、架桥
9.00	桥塞	桥塞、架桥
10.00		桥塞

使用现场较为常见的电厂漂珠,在 $0.063\sim 0.256\text{mm}$ 粒径范围的累计百分比达95.21%,如图1所示,可起到良好的填充封堵作用。除漂珠外,水泥和微硅粒径范围分别为 $0.68\sim 63\text{ }\mu\text{m}$ (93.8%)和

$0.04\sim 0.68\text{ }\mu\text{m}$ (97.4%)。通过水泥胶结固化裂缝,阻止井筒压力沿裂缝向地层传递,有效避免裂缝诱导扩大。为避免因堵漏水泥浆密度过大,加剧井漏程度,借助颗粒级配原理^[11-15],三者按照一定比例混掺,开发了密度为 $1.40\sim 1.45\text{g}/\text{cm}^3$ 的低密度水泥浆,实现不同粒径球形颗粒堆积空隙率最小。

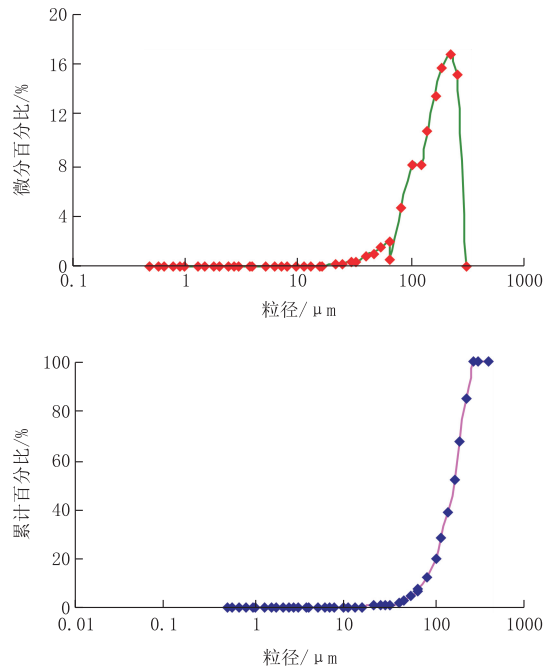


图1 漂珠粒径微分与累计百分比
Fig.1 Differentiation and accumulated percentage of floating bead size

1.2 堵漏浆性能优化与测试

杭锦旗地区的钻井井漏集中分布在刘家沟组中、下部和石千峰组上部,井深在 $2500\sim 2800\text{m}$ 范围内。结合具体堵漏工况,优选降失水剂、膨胀剂等外加剂并优化加量,开发了适用于杭锦旗地区的堵漏浆: 84% 水泥+ 8% 漂珠+ 8% 微硅+ 2% 复合纤维+ 1.8% 降失水剂+ 1% 膨胀剂+ 0.22% 缓凝剂+ 0.05% KPAM +水灰比 0.85 。

杭锦旗前期应用的堵漏水泥浆在固化后的体积收缩率 21.57% ,封堵后的裂缝内仍存在微裂缝,导致堵漏失败,而该体系固化后的体积收缩率仅 1.64% 。堵漏浆中的微硅、KPAM等均具有良好的悬浮稳定效果,沉降稳定实验测试的浆体上下密度差 $<0.02\text{g}/\text{cm}^3$,自由水为零,无论在水平裂缝或垂直裂缝均具有良好的封堵效果。堵漏浆中的复合纤维除具有架桥、拉筋作用外,能提高水泥石的韧性。在钻头扫塞产生的冲击载荷作用下,对裂纹的尖端

应力场形成屏蔽,防止固化体裂缝扩张,导致堵漏失败。在养护温度 70 °C 条件下,堵漏浆在 8 h 的抗压强度 4.2 MPa,24 h 抗压强度达 10.6 MPa,强度适中;减少了扫塞难度,避免“新井眼”的形成。

根据行业标准《钻井液用桥接堵漏材料室内试验方法》(SY/T 5840—2007),按照 API 规范测试堵漏水泥浆对漏失地层的堵漏能力。室内采用缝隙宽度为 7 mm 裂缝的钢板来模拟地层漏失缝隙,试验

数据如表 2 和图 2 所示。

表 2 堵漏浆堵漏效果测试
Table 2 Test on performance of plugging slurries

实例	试验温度/°C	压力/MPa	漏失量/mL	堵漏效果
实例 1	70	30	60	完全堵住
实例 2	70	30	80	完全堵住
实例 3	70	30	70	完全堵住

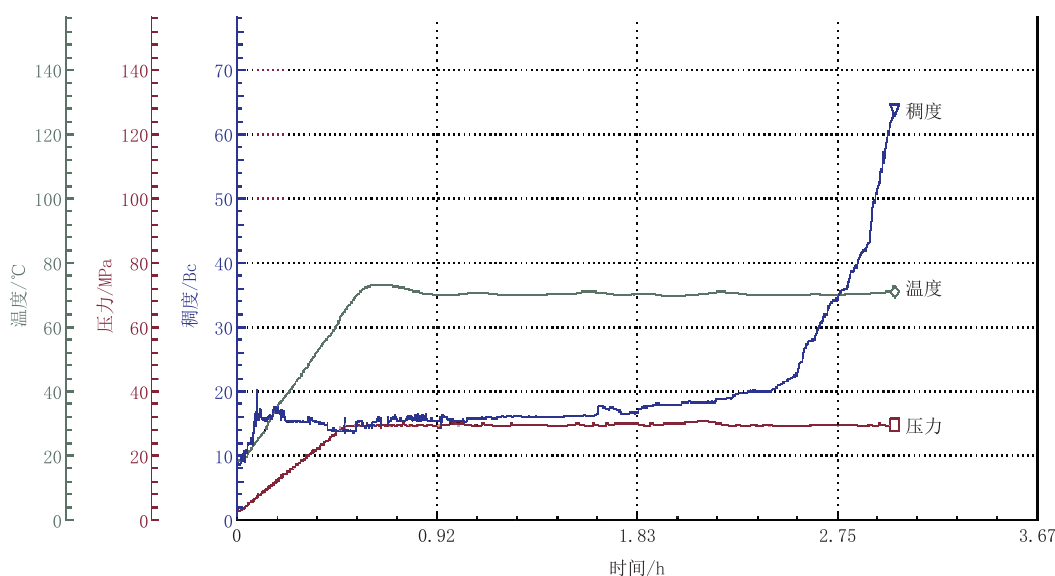


图 2 堵漏浆稠化性能

Fig.2 Thickening property of plugging slurries

堵漏浆的综合性能:流动度 210 mm,失水量 20 mL(70 °C、6.9 MPa、30 min);可泵时间 157 min(70 °C、30 MPa、30 min),稠化时间 176 min(70 °C、30 MPa、30 min)。从堵漏浆泵注、替浆、起钻、环空推挤至冲洗管柱,累计施工时间 140 min;在保证施工安全的前提下,进入漏层后堵漏浆能够迅速稠化,可提高堵漏成功率;流变参数 $n=0.492, k=1.306$ 。

2 堵漏施工设计与预案

2.1 堵漏施工设计

堵漏基于“高注低堵”原则,钻具下深高于漏点,在漏点判断有误时,推挤作业中二次自动寻找下部漏点,实现堵漏。

2.1.1 堵漏设计需要数据和参数

- (1)漏点所在层位底深 H_{Loss} , m;
- (2)设计封堵井段 L , m;
- (3)起钻后静止漏速 V_{Loss} , m^3/min ;
- (4)堵漏浆出钻具至泵注结束期间的实测漏失

量 Q_{Loss} , m^3 ;

- (5)堵漏钻具内截面积 S_1 , m^2 ;
- (6)裸眼段井眼截面积 S_2 , m^2 ;
- (7)堵漏浆可泵时间 T_1 , min;稠化时间 T_2 , min;
- (8)堵漏作业全程施工时间 t , min;开始注浆至关井推挤前施工时间 t_1 , min;
- (9)堵漏管柱下深 H_d , m;
- (10)钻杆下深位置至目标漏层底部段长对应的环空容积 Q_1 , m^3 ;
- (11)实际推挤量 Q_R , m^3 。

2.1.2 顶漏钻进

通过井口观察和测量液面,可证明井下稳定时,为充分暴露漏层,避免对同一层位重复堵漏,可小排量继续钻进以钻穿漏层。

2.1.3 堵漏水泥浆注入量

井内水泥塞设计封堵段长对应体积、候凝期间漏失量与推挤至地层 $10 m^3$ 三者之和。

(1)设计封堵段长建议不小于150 m;

(2)候凝期间漏失量 $=V_{Loss}(T_2 - t)$ 。

2.1.4 施工管柱设计下深 H_d

施工管柱为光钻杆。光钻杆设计下深为水泥塞设计封堵段顶以上15 m与关井推挤前静止漏失段长之和;关井推挤前静止漏失段长 $=V_{Loss}/S_2 \times t_1$ 。

2.1.5 堵漏浆柱结构

按照入井顺序依次为前置隔离液、堵漏浆、后置隔离液,隔离液与后置隔离液起到分隔堵漏浆、钻井液的作用。前置隔离液注入量 2 m^3 ,后置冲洗液注入量按照平衡法打水泥塞原则进行设计。

2.1.6 注替浆排量与替浆量

水泥车以 $400\sim 700\text{ L/min}$ 排量注浆,泥浆泵以 $500\sim 700\text{ L/min}$ 排量替浆。替浆至平衡面以上 $100\sim 150\text{ m}$ 停钻井队泥浆泵。

2.1.7 短起、冲洗钻杆

短程起钻至堵漏浆理论返高以上至少 100 m ,并开泵冲洗钻杆,防止堵漏浆滞留钻杆内,保证安全。冲洗量为替浆位置至钻杆底部段长对应的钻杆内容积。

2.1.8 推挤

为短起后关井向下推挤总量 Q_R 。

实际推挤量 $Q_R = Q_1 + 10 - Q_{Loss}$;其中, $Q_1 = S_2(H_{Loss} - H_d)$ 。

Q_{Loss} 测定:分别隔离两泥浆罐,一罐作为替浆罐,一罐作为回收罐。推挤前根据两泥浆罐体积变化,结合水泥车泵注量,计算堵漏浆出钻杆至泵注结束期间的实际漏失量。

2.1.9 施工时间控制

堵漏作业全程施工时间 t 与可泵时间 T_1 的关系: $T_1 = t + (20\sim 30\text{ min})$ 。

2.1.10 验漏、扫塞

候凝时间 $< 8\text{ h}$,钻具探塞承压,以正常钻进排量循环 20 min 验漏,记录塞顶、塞底。若判断无漏失,采用正常钻进排量扫塞。

2.2 堵漏施工预案

2.2.1 堵漏作业中漏点闭合或漏速减小

堵漏作业中漏点闭合或漏速减小,堵漏浆顶界会向上移动;钻杆短起段长要遵循理论短起段长附加 100 m 的原则。关井推挤量达到堵漏浆底部到漏层底部的井眼容积以及进入地层 10 m^3 的总量。

2.2.2 堵漏作业过程中完全失返

堵漏作业过程中完全失返,堵漏浆出钻杆后底界向下移动,替浆后短起仍然按照全返状态操作,钻杆到位后仅冲洗钻具不做推挤。

2.2.3 半返半漏

准确记录堵漏浆出钻具到泵注结束阶段漏失总量,钻杆短起到位后,实际推挤总量 $Q_R = S_2(H_{Loss} - H_d) + 10 - Q_{Loss}$ 。

3 应用效果

2016—2019年开发的新型堵漏浆及配套工艺累计应用232井次,一次堵漏成功率达93.5%。平均单次堵漏作业时间 20 h ,堵漏作业时间短、效率高,有效保证井下安全。与应用之前相比,井漏处理时间由2015年的 22.3 d 降至2019年的 3.88 d ,降幅达80.6%、钻井液漏失量由2015年的 597 m^3 降低至2019年的 116.1 m^3 ,降幅达82.6%;促进杭锦旗地区钻井周期下降,钻井周期由2015年的 100.5 d 降至2019年 68.04 d 。显著提高钻井效率,大幅降低钻井成本。表3为2016—2019年采用该堵漏技术的施工情况和堵漏效果。

表3 2016—2019年该堵漏技术应用情况及效果

年份	堵漏井次	失败井次	堵漏成功率/%
2016	99	7	92.90
2017	43	2	95.30
2018	52	4	92.30
2019	38	2	94.70

4 结论

(1)借助桥塞、桥接原理,优选了与裂缝宽度($3\sim 10\text{ mm}$)相匹配的复合纤维,利用漂珠、水泥和微硅的三元颗粒级配,并优选外加剂,完成了堵漏浆开发。密度 $1.40\sim 1.45\text{ g/cm}^3$,具有一定的触变性、适中的抗压强度、良好的膨胀性与止裂增韧性能。

(2)形成了适应于杭锦旗地区裂缝性井漏的钻井堵漏设计方法,细化了过程控制措施,制定了在漏点判断错误、漏速变化等情况下的施工预案,有效保证一次堵漏成功率。截止目前,累计应用232井次,一次堵漏成功率93.5%,具有堵漏作业时间段、堵漏成功率高的特点。

参考文献(References):

[1] 李建山.杭锦旗区块防塌防漏钻井液技术[J].钻井液与完井

- 液,2019,36(3):308-314.
- LI Jianshan. Drilling fluid technology for borehole wall stabilization and mud loss control in block Hangjinqi[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019,36(3):308-314.
- [2] 仓有军.杭锦旗区块锦 58 井区防漏技术应用探讨[J].*中国石油和化工标准与质量*,2019,39(7):215-216.
- CANG Youjun. Application of leakage prevention technology in the Jin-58 well area of Hangjinqi Block[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2019,39(7):215-216.
- [3] 冯英,王骁男.杭锦旗工区井漏机理分析与防漏堵漏技术[J].*西部探矿工程*,2017,29(10):82-85.
- FENG Ying, WANG Xiaonan. Analysis of well leakage mechanism and leakage prevention and blocking technology at the Hangjinqi site[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2017,29(10):82-85.
- [4] 曾义金,李大奇,杨春和.裂缝性地层防漏堵漏力学机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2016,35(10):2054-2061.
- ZENG Yijin, LI Daqi, YANG Chunhe. Leakage prevention and control in fractured formations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016,35(10):2054-2061.
- [5] 邱正松,暴丹,刘均一,等.裂缝封堵失稳微观机理及致密承压封堵实验[J].*石油学报*,2018,39(5):587-596.
- QIU Zhengsong, BAO Dan, LIU Junyi, et al. Microcosmic mechanism of fracture-plugging instability and experimental study on pressure bearing and tight plugging[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018,39(5):587-596.
- [6] 刘宇凡,刘滨,吴林龙.水泥浆堵漏技术探讨[J].*钻采工艺*,2014,37(4):110-112.
- LIU Yufan, LIU Bin, WU Linlong. Cement slurry for well leakage plugging[J]. *Drilling & Production Technology*, 2014,37(4):110-112.
- [7] 谷穗,乌效鸣,蔡记华.纤维水泥浆堵漏实验研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2009,36(4):4-6.
- GU Sui, WU Xiaoming, CAI Jihua. Sealing experiment research on fiber cement slurry[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009,36(4):4-6.
- [8] 李锦峰.恶性漏失地层堵漏技术研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2009,46(5):19-27.
- LI Jinfeng. The status and development direction of plugging technology for severe circulation loss formation[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009,46(5):19-27.
- [9] 余婷婷,邓建民,李键,等.高密度纤维堵漏水泥浆的实验研究[J].*钻井液与完井液*,2008,25(2):40-42.
- YU Tingting, DENG Jianmin, LI Jian, et al. Research on high density cement slurry containing fibers[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2008,25(2):40-42.
- [10] 杜坤.复合纤维水泥浆承压堵漏技术在马 2 井中的应用[J].*石油天然气学报*,2008,30(1):276-278.
- DU Kun. Application of pressure plugging technology with compound fiber cement slurry in Ma 2 well[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008,30(1):276-278.
- [11] 刘铮,张宏军,刘传仁,等.复合纤维水泥浆在川东北钻井承压堵漏中的应用[J].*钻采工艺*,2007,30(6):116-118.
- LIU Zheng, ZHANG Hongjun, LIU Chuanren, et al. Application of compound fiber cement slurry in drilling pressure-bearing leakage plugging in Northeast Sichuan[J]. *Drilling & Production Technology*, 2007,30(6):116-118.
- [12] 张云华,蒋卓颖,李雨威,等.粉煤灰低密度水泥浆在塔河油田堵漏中的应用[J].*石油与天然气化工*,2018,47(1):79-82.
- ZHANG Yunhua, JIANG Zhuoying, LI Yuwei, et al. Utilization of fly ash low density cement slurry for plugging in Tahe Oilfield[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2018,47(1):79-82.
- [13] 黄福友.裂缝性储层结垢暂堵堵漏方法研究[D].成都:成都理工大学,2014.
- HUANG Fuyou. Research of the plugging method which is used for fractured reservoirs[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [14] 王业众,康毅力,李航,等.裂缝性致密砂岩气层暂堵性堵漏钻井液技术[J].*天然气工业*,2011,31(3):63-65.
- WANG Yezhong, KANG Yili, LI Hang, et al. Drilling fluids for temporary sealing in fractured tight sandstone gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2011,31(3):63-65.
- [15] 姚晓,李华,步云鹏,等.防漏水泥浆体系在吉林油田严重漏失地层中的应用[J].*钻井液与完井液*,2005,22(1):35-37.
- YAO Xiao, LI Hua, BU Yunpeng, et al. A novel cement system to control lost circulation used in Haituo region[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2005,22(1):35-37.

(编辑 韩丽丽)