

# 过油管桥塞封堵工艺改进

刘飞<sup>1</sup>,张凯权<sup>2</sup>,朱永国<sup>2</sup>,关健<sup>2</sup>,马礼<sup>2</sup>,王吉飞<sup>2</sup>

- 1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下作业分公司 河北任丘 062552
- 2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者:Email: 99769960@163.com

引用:刘飞,张凯权,朱永国,等. 过油管桥塞封堵工艺改进[J]. 油气井测试,2020,29(4):35-39.

Cite: LIU Fei,ZHANG Kaiquan,ZHU Yongguo,et al. Plugging technology improvement of through tubing bridge plug[J]. Well Testing, 2020,29(4): 35-39.

**摘要** 过油管打塞作业所形成的水泥塞长度较短,造成可靠性差、密封性不好,施工成功率相对较低。根据水泥塞封堵高压的原理,分析影响水泥塞胶结强度的诸多因素,以及造成施工成功率低的原因,通过配套使用膨胀式水泥和套管清洁剂,有效地改善了过油管打灰作业的封堵能力、可靠性,提高了作业成功率。在某国东部油田 67 口井的应用,成功率由 89.5% 提高到 98.5%。该技术改进有效可靠,具有一定的市场前景和推广价值。

**关键词** 完井; 过油管; 桥塞; 水泥塞; 封堵; 套管清洁剂; 胶结强度

**中图分类号**:TE257      **文献标识码**:B      **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.006

## Plugging technology improvement of through tubing bridge plug

LIU Fei<sup>1</sup>, ZHANG Kaiquan<sup>2</sup>, ZHU Yongguo<sup>2</sup>, GUAN Jian<sup>2</sup>, MA Li<sup>2</sup>, WANG Jifei<sup>2</sup>

- 1. Downhole Operating Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company, Renqiu, Hebei 062552, China
- 2. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

**Abstract:** The length of the cement plug formed by the plugging operation through tubing is relatively short, resulting in poor reliability, poor sealing, and relatively low operating success rate. According to the principle of the high pressure of the cement plug, the influencing factors on the cementing strength of the cement plug and the reasons for the low operating success rate were analyzed. The combined use of expandable cement and casing cleaner can effectively improve the sealing ability, reliability and the success rate of the operation. The improved technology has been applied to 67 wells in an eastern oilfield in some country, and the success rate has been increased from 89.5% to 98.5%. The technology improvement is effective and reliable with certain market prospects and promotion value.

**Keywords:** well completion; through tubing; cement plug; plugging; casing cleaner; cementing strength

过油管桥塞封堵工艺通常采用测井电缆将膨胀式桥塞下入到封堵目的层后,地面操作桥塞完成坐封和丢手,用过油管倒灰筒在已坐封的桥塞上面倾倒水泥,待水泥固化后形成水泥塞,实现封堵地层的目的<sup>[1-2]</sup>。但是,常用的过油管倒灰筒外径仅为 54 mm,单支内容积仅为 4.54 L,同时受防喷管高度的限制,一般情况下最多只能将三支倒灰筒(单支长 3 m)串连起来使用,一次倒灰量最多只能达到 13.62 L。并且,由于受水泥初凝时间的限制(一般为 24 h),通常倒灰次数为 3~4 次(最多 5 次)。

受上述条件的限制,常规的过油管桥塞封堵工

艺在外径 139.7 mm 套管内仅能打水泥塞 3 m 左右,尽管石油作业标准(SY/T 5587 142013)<sup>[3]</sup>并没有对水泥塞长度做出明确规定,但是从修井作业惯例来看,水泥塞厚度均不少于 20 m<sup>[4-6]</sup>。可见,常规的过油管桥塞封堵工艺形成的水泥塞长度远不及使用修井机作业的水泥塞长度。同时,常规的过油管桥塞封堵工艺形成的水泥塞时有开裂、开缝的现象,稳定性和可靠性较差,也曾经发生过水泥长时间不凝结,封堵作业完全失败的情况<sup>[7-9]</sup>。

2013-2018 年,某公司在伊拉克鲁迈拉油田采用常规过油管桥塞封堵工艺进行封堵技术作业 314 井次,其中失败 30 井次,存在着提升成功率的空间

和必要性<sup>[10]</sup>。采用膨胀式水泥和套管清洁剂配合使用的改进办法,可提高过油管桥塞封堵作业的封堵能力和成功率,能使失败率降低到1.5%,具备一定的推广价值。

## 1 水泥塞封堵效果影响因素分析

水泥塞的封堵能力主要取决于水泥浆所形成水泥塞的机械强度和胶结强度。水泥塞的机械强度是指水泥塞所能承受外力破坏的能力,胶结强度则是指凝固以后的水泥和套管或者地层岩石融合的强度。油田水泥通常都能满足井下环境下的机械强度要求,决定桥塞封堵能力的主要因素是水泥塞的胶结强度。

水泥塞与所处套管内壁接触作用而产生胶结力是三种力的合力:

第一,黏结力。黏结力是一种化学键,水泥浆液内所含化学物质与某些活性基因组合而产生的可使套管与水泥塞之间的作用力;

第二,摩擦力。水泥浆固化在套管内部后,形成沿套管径向向外的压力,套管与水泥塞之间的径向合应力越大,接触面越大越粗糙,则摩擦力越大;

第三,机械咬合力。凹凸不平的套管表面与水泥塞直接相互作用产生的机械咬合力,这种力取决于水泥环剪切强度、套管突起大小与分布<sup>[11-13]</sup>。

这三种力,黏结力比较小,而且会随着套管的和水泥塞之间轻微的相对位移而消失;机械咬合力的决定因素有两个:一是水泥塞的剪切强度和套管上突起的形状、大小和分布;二是套管突起的形状、大小和分布无法人为干预<sup>[14-16]</sup>。因此,改善水泥塞的胶结强度则需要从摩擦力和机械咬合力入手。也就是说,改善胶结强度的主要办法是:增加套管与水泥塞之间径向合应力的大小,以及改善水泥塞的剪切强度。

常用的油田水泥在固化过程中是收缩的,所以形成的水泥环就能从外部紧紧地包裹住套管,从而形成沿套管径向向内的压力,这样就能保证水泥环-套管外表面(固井质量评价的第一界面)的胶结力(图1)<sup>[17-18]</sup>。

但是,如果在套管内部使用这种水泥用来封堵套管内径,固化过程中的收缩效应会使形成的水泥塞不能有效地支撑在套管内部,从而不能提供足够的摩擦力(图2)。

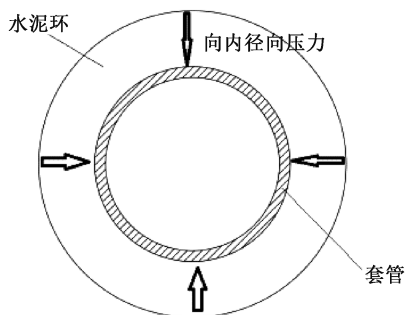


图1 固井第一界面摩擦力示意图

Fig.1 Friction at the first interface of cementing

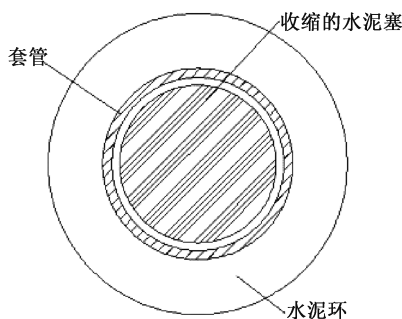


图2 常规水泥在套管内使用效果图

Fig.2 Effect of using conventional cement in casing

其次,由于过油管封堵作业经常在已经生产多年的“老井”内进行。多年的生产史使得套管内壁存在着一层油污<sup>[19]</sup>(图3),其主要成分是难溶的烃类结晶。由于它的存在,水泥固化以后不能直接有效地和套管内表面咬合,会极大地降低水泥塞的机械咬合力<sup>[20]</sup>。同时,这层油膜严重影响水泥的初凝时间,从而影响封堵作业的成功率。

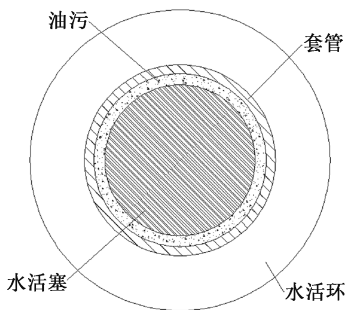


图3 油污影响咬合力示意图

Fig.3 Influence of oil stains on bite force

## 2 施工工艺改进

为提高过油管桥塞封堵工艺的封堵能力,提高封堵成功率,采用膨胀式水泥和套管清洁剂配合使用的办法来保证水泥塞封堵能力。

### 2.1 膨胀式水泥

使用膨胀式水泥替代普通油井水泥来提高水

泥塞的胶结力的办法主要是通过提高水泥塞产生的径向向外的压力,提高水泥塞的摩擦力,进而提高水泥塞的胶结力。通过加入膨胀剂等化学药剂,使得水泥在固化的过程中不是收缩的而是膨胀的,这种膨胀效应使得形成的水泥塞能紧密地支撑在套管内部,形成沿套管径向向外的压力,从而保证水泥塞-套管内表面处的胶结强度(图 4)。因此,膨胀式水泥的使用提供了可靠的机械强度和胶结强度(摩擦力),提高了过油管封堵作业的可靠性。

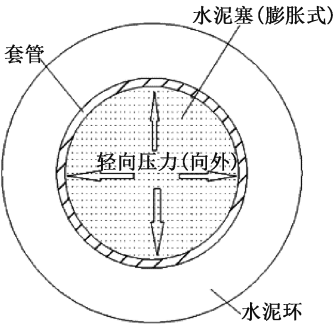


图 4 膨胀式水泥增强于套管摩擦力示意图  
Fig. 4 Casing friction enhancement by expandable cement

为了适应不同的井温、井深以及施工要求,膨胀水泥设置了四种不同的型号(表 1),分别为 G1 级水泥白色包装、G2 级水泥灰色包装、G3 级水泥绿色包装和 G4 级红色包装,使用时可以根据井温、井深和施工要求,选择适合的水泥型号。

表 1 膨胀式水泥各型号参数  
Table 1 Parameters of various types of expandable cement

温度/℃	不同级水泥抗剪黏结强度/kPa			
	G1 级	G2 级	G3 级	G4 级
25~38	1 172	621	552	低于 149 ℃ 不固化
38~79	1 862	1 517	1 379	
79~93	1 172	1 034	896	
93~107	2 206	1 379	1 034	
107~121	2 620	1 517	1 207	
121~135	2 896	1 586	1 379	
135~149	1 931	2 413	2 206	
149~163	1 931	689	2 413	2 758
163~177	1 379	2 275	2 068	2 275

2.2 套管清洁剂

使用套管清洁剂(Casing Cleaner)可解决机械咬合力不足和油污造成水泥浆长时间不固化的问题。套管清洁剂是一种液态的化学药剂,由盐水、表面活性剂和清洁剂构成,使用方法和水泥浆一样,使用过油管倒灰筒倾倒至坐封后的桥塞上即可。

套管清洁剂比重大于 1.1,当通过倒灰筒将其倾倒在桥塞上表面时,较大的比重能将原油等井内流体置换到远离桥塞的地方,从而清除桥塞上方的

液体杂质,保证水泥浆固化的环境,使得水泥浆按照预定的时间固化。

套管清洁剂的有效成分能有效地去除桥塞上表面以及套管壁上的原油油污,使得套管内壁相对比较洁净,从而让水泥浆和套管内壁直接接触并咬合,其剪切强度可以提高 50%左右,从而有效地提高水泥塞密封的机械咬合力。

2.3 施工方案

- 在桥塞坐封作业结束后,按以下步骤操作:
- (1)根据井况和施工要求优选需要使用的水泥型号,并确定下井次数;
  - (2)将套管清洁剂通过专用工具注入到过油管倒灰筒内部;
  - (3)将倒灰筒连接无源磁定位,并将整个工具串送入井内;
  - (4)当工具到达设计深度后,从地面下达指令,将套管清洁剂倾倒在桥塞上方,然后将工具起出地面;
  - (5)根据不同水泥型号的不同要求,将水泥和对应量的清水进行混合;
  - (6)将混合后的水泥浆通过专用工具注入倒灰筒;
  - (7)将倒灰筒连接无源磁定位,并将整个工具串送入井内;
  - (8)当工具到达设计深度后,从地面下达指令,释放水泥浆,向上起出工具串;
  - (9)按照施工设计的需要,重复步骤 5-8 若干次;
  - (10)候凝 12~24 h。

2.4 工艺特点

- (1)所使用的四种水泥能适用不同的井况和施工要求,配比方式简单,性能可靠;
- (2)使用的套管清洁剂无毒无污染,是一种绿色化学药剂;
- (3)套管清洁剂和水泥浆的投放使用相同的投送工具,无需单独购买专用工具;
- (4)工艺管串结构简单,仅需要和无源磁定位相连接。

3 实际应用

SBC-193 井是位于委内瑞拉东部油田 SANTA BARBARA 区块的一口生产井,井深 4 520.40 m,2019 年 4 月 17 日进行生产测井作业(PLT)显示该

井有两个主力产层,分别是:NAR-3(对应井深 4 925.75 ~ 4 937.95 m, 4 945.93 ~ 4 948.93 m, 4 965.40 ~ 4 965.40 m,三段共 26.23 m)和 NAR-4(对应井深 5 002.61 ~ 5 006.58 m, 5 025.18 ~ 5 037.39 m,两段共 16.17 m)。产层 NAR-3 中井段 4 925.75 ~ 4 937.95 m,油产量为  $192 \text{ m}^3/\text{d}$ ,气产量  $41.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (油嘴尺寸为 12.7 mm),本层贡献了 100%的原油产量输出。而产层 NAR-4 没有原油产出,产出基本上是水。遂决定使用过油管桥塞并上覆水泥的办法来封堵 NAR-4 产层,其井身及管柱结构如图 5 所示。本次作业有两个难点:第一,所封堵的井生产史较长,井筒内壁比较脏;第二,所封堵的地层压力较大,虽然是一口有较长生产史的老井,但是其地层压力仍然有 31.5 MPa。

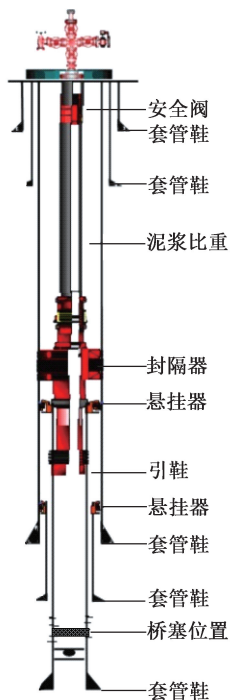


图 5 SBC-193 井井身结构示意图  
Fig. 5 Structure of Well SBC-193

施工采用外径为 54 mm 的过油管桥塞,坐封/丢手位置为 4 995.9 m。通过综合考虑井深和井温等因素,本次作业选择 G2 型膨胀式水泥倒灰两次的施工方案。

桥塞坐封/丢手后首先采用倒灰筒在桥塞上部倾倒 13.63 L 套管清洁剂,后采用倒灰筒三次共倾倒膨胀式水泥  $40.89 \text{ m}^3$ ,打塞长度 3.29 m。候凝 24 h 后,再次用电缆下入相关工具进行 PLT 测试作业,发现 NAR-3 层产量没有变化,而 NAR-4 产层深度无法下入,说明该层封堵成功。新的工

艺保证了此次作业一次成功,且仅耗时 72 h,相对传统工艺,封堵能力和封堵效率都有了一定的提升。

在委内瑞拉东部油田,2017-2018 年应用该项技术作业 67 口井次,成功 66 井次,取得了比较明显的堵水效果,成功率由 89% 提升至 90.5%,成效显著。

## 4 结论

(1) 膨胀式水泥与套管清洁剂的组合改善了过油管桥塞封堵工艺的可靠性和封堵能力,提高了施工作业的成功率,具备一定的推广前景。

(2) 所开发的新型水泥仍无法应对超高温和高深的井况,需要进一步研发性能更好的新型水泥。

(3) 套管清洁剂的性能仍不足以清洁套管内壁油污及水泥浆凝结的良好环境,可尝试开发新型的套管清洁剂。

致谢:感谢渤海钻探油气井测试分公司同意本论文公开发表。

## 参考文献

- [1] 谭玉春. 电缆桥塞技术在川西油气田开发中的应用[J]. 天然气工业, 2002, 22(3): 74-75.  
TAN Yuchun. Application of cable bridge plug technique in oil and gas field development in West Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(3): 74-75.
- [2] 卢军. 特殊井注灰打塞工艺研究应用[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(1): 98-100.  
LU Jun. Research and application of cementing and plugging technology in special wells [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2018, 44(1): 98-100.
- [3] SYT 5587. 14-2013, 常规修井作业规程 第 14 部分 注塞、钻塞[S]. 北京:采油采气专业标准化技术委员会, 2013.
- [4] 游旭升. 注水泥塞失败原因分析与对策[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2016(3): 272.  
YOU Xusheng. Cause analysis and countermeasures of failure of cement injection plug [J]. Management & Technology of SME, 2016(3): 272.
- [5] 李爱春. 油井找漏打塞挤堵技术——在八面河油田北区修井作业中的应用[A]. 湖北省石油学会、江汉石油管理局科学技术学会. 江汉油田难采储量开发技术研讨会论文集(二)[C]. 湖北省石油学会、江汉石油管理局科学技术学会;湖北省科学技术协会, 2007: 68-72.  
LI Aichun. Oil well leak detection, drilling, plugging and plugging technology — Application of workover operation in Bamianhe Oilfield North area [A]. Hubei Petroleum Institute, Kong Hon Petroleum Administration Science and



- Technology Association. Proceedings of the Technical Seminar on the development of difficult-to-produce reserves in the Kong Hon Oilfield (二) [C]. Hubei Petroleum Institute, Kong Hon Petroleum Administration Science and Technology Association; Science and Technology Association of Hubei Province, 2007: 68-72.
- [6] 李希亮,尹锐,李凤廷,等. 带压注灰打塞工艺技术的研究与应用[J]. 内江科技,2007(4):116.
- LI Xiliang, YIN Rui, LI Fengting, et al. Research and application of the technology of injecting ash with pressure to make plug [J]. Nei Jiang Ke Ji, 2007(4):116.
- [7] 李早元,柳洪华,郭小阳,等. 套管表面润湿性对固井界面胶结强度的影响[J]. 油田化学,2016,33(1):20-24.
- LI Zaoyuan, LIU Honghua, GUO Xiaoyang, et al. Effects of casing surface wetting on interfacial bonding strength of cement [J]. Oilfield Chemistry, 2016,33(1):20-24.
- [8] 杨景海,闫术,赵向民,等. 利用试井技术检测报废井封堵效果[J]. 油气井测试,2019,28(6):66-72.
- YANG Jinghai, YAN Shu, ZHAO Xiangmin, et al. Testing the plugging effect of abandoned wells by well testing technology [J]. Well Testing, 2019,28(6):66-72.
- [9] 王鹏. 电缆输送式电动液压坐封桥塞技术[J]. 油气井测试,2019,28(5):39-43.
- WANG Peng. Wireline electro-hydraulic bridge setting technology [J]. Well Testing, 2019,28(5):39-43.
- [10] 徐浩,李濛,王喻雄. 过油管桥塞堵水技术在鲁迈拉油田的应用[J]. 非常规油气,2018,5(4):54-57.
- XU Hao, LI Meng, WANG Yuxiong. The application of through tubing bridge plug for water shut off in Rumaila Oilfield [J]. Unconventional Oil & Gas, 2018,5(4):54-57.
- [11] 杨红滨,罗旭哲,陈旭,等. 钻井工程固井胶结界面探究思考[J]. 中国高新区,2018(11):201.
- YANG Hongbin, LUO Xuzhe, CHEN Xu, et al. Study on cementing interface in drilling engineering [J]. Science & Technology Industry Parks, 2018(11):201.
- [12] 夏富国,夏玉琴,张冲,等. 免钻桥塞在致密气藏储层改造中的适应性评价[J]. 油气井测试,2018,27(6):63-67.
- XIA Fuguo, XIA Yuqin, ZHANG Chong, et al. Feasibility evaluation of drill-free bridge plug in stimulation of tight gas reservoirs [J]. 2018,27(6):63-67.
- [13] 仇炜谏,李纯金,吉浩,等. 一种新型电动式液压增力桥塞坐封工具的研制[J]. 机械工程师,2018(10):13-15.
- QIU Weijian, LI Chunjin, JI Hao, et al. Manufacture of a new type of electric hydraulic reinforcement bridge plug setting tool [J]. Mechanical Engineer, 2018(10):13-15.
- [14] 孔凡就. 提高固井第一界面胶结力的研究[D]. 武汉:长江大学,2013.
- KONG Fanjiu. Research on the improving the first interface cementation force of cementing well [D]. Wuhan: Yangtze University, 2013.
- [15] 付汉平,汤启星,任利宝,等. 井下作业小修设备钻捞桥塞工艺技术研究[J]. 化工设计通讯,2018,44(4):215,235.
- FU Hanping, TANG Qixing, REN Libao, et al. Study on fishing bridging technology downhole drilling equipment repair [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018,44(4):215,235.
- [16] 周小林,高志华,张冲. 龙凤山气田大通径免钻桥塞分段压裂先导试验[J]. 油气井测试,2018,27(1):62-67.
- ZHOU Xiaolin, GAO Zhihua, ZHANG Chong. Pilot tests of staged fracturing involving large-diameter drill-free bridge plugs in the Longfengshan gas field [J]. Well Testing, 2018,27(1):62-67.
- [17] 卢琳,张麦云,林军良,等. Halliburton 机械桥塞的改进与应用[J]. 油气井测试,2004,13(2):65-66.
- LU Lin, ZHANG Maiyun, LIN Junliang, et al. Development and application for Halliburton mechanical plug [J]. Well Testing, 2004,13(2):65-66.
- [18] 任源峰,刘平. Y445-114 桥塞在煤层气井压裂中的应用[J]. 油气井测试,2002,11(5):58-59.
- REN Yuanfeng, LIU Ping. Application of bridge plug Y445-114 in fracture stimulation of coalbed gas wells [J]. Well Testing, 2002,11(5):58-59.
- [19] 石岩,王茂盛. 沥青-胶质-石蜡沉积物在采油系统不同工艺设备上的形成特点[J]. 国外油田工程,2009,25(6):23,46.
- SHI Yan, WANG Maosheng. Formation characteristics of asphalt-gum-paraffin deposits on different process equipment in oil recovery system [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2009,25(6):23,46.
- [20] 苑司军,王杏梅,林伟民. 电缆桥塞工艺在胡状油田堵水开发中的应用[J]. 油气井测试,2001,10(3):42-44.
- YUAN Sijun, WANG Xingmei, LIN Weimin. The application of wireline bridge plug for water-plugging in Huzhuang Oilfield [J]. Well Testing, 2001,10(3):42-44.

编辑 穆立婷

第一作者简介:刘飞,男,1980年11月出生,硕士,工程师,2019年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,目前从事国内试油试气工作。电话:13643289206;Email:99769960@163.com。通信地址:河北省任丘市渤海钻井下作业分公司,邮政编码:062552。