

# 油田水平井合金防垢器研制与效果评价

王明军<sup>1</sup>, 李春福<sup>1</sup>, 胡文涛<sup>2</sup>

(1.西南石油大学, 成都 610500; 2.中石化华北油气分公司, 郑州 450000)

**摘要:** **目的** 探寻合金防垢在某油田的适用性。**方法** 利用设计的模拟试验装置, 以防垢效果为评价指标, 优选出作为合金防垢器核心部件合金扇形片的元素配比, 设计并研制扇形合金片螺旋排列结构的串联式合金防垢器, 选择油田的油井进行5个月的现场试验。**结果** 地层水中的钙镁离子质量浓度提高了260%, 防垢率较化学阻垢提高了76%。**结论** 该合金防垢器防垢效果较好。

**关键词:** 管柱结垢; 合金防垢; 钙镁离子; 防垢率

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.03.025

**中图分类号:** TE258 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)03-0151-05

## Development and Performance Evaluation of Alloy Antiscale in Horizontal Wells Oil-field

WANG Ming-jun<sup>1</sup>, LI Chun-fu<sup>1</sup>, HU Wen-tao<sup>2</sup>

(1.Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2.North China Branch of Sinopec, Zhengzhou 450000, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the applicability of alloy antiscale in certain oilfield. **Methods** A simulation test device was designed, and the scale prevention effect was selected as the evaluation index, the ratio of elements as material for the alloy segment, which was the core component of alloy antiscale device, was optimized, and tandem alloy antiscale device with spiral arrangement structure of segments was designed and developed. Finally, a 5-month field test was conducted in wells of oilfield. **Results** The calcium and magnesium ion mass concentrations in formation water were increased by 260%, and the anti-scaling efficiency was 76% higher than that of chemical anti-scaling. **Conclusion** The alloy antiscale device showed relatively good antiscale effect.

**KEY WORDS:** string scale; alloy antiscale; calcium and magnesium ions. antiscaling efficiency

某油田为典型的低孔特低渗致密储层, 储层油、水两相区域较窄, 随含水饱和度的增加, 油相渗透率快速下降, 水相渗透率略呈直线上升<sup>[1]</sup>。由于水敏性较强, 且地层水矿化度特别是钙镁离子含量较高, 油井易在生产管柱内结垢<sup>[2]</sup>。同时油井生产过程中因各种因素造成的偏磨损害严重, 进而造成产量下降, 生产困难。

目前油田防垢技术主要包括化学法、物理法和工艺法<sup>[3-4]</sup>。针对越来越严重的井结垢问题, 油田自开采以来主要采用了向井内加注防垢剂的方法来预防结垢<sup>[5]</sup>, 防垢率仅80%。文中针对油田化学药剂防垢率较低的现状, 对部分油井地层液进行检测, 根据分析结果, 对目前国内物理防垢技术进行了优选, 确定采用合金防垢技术, 进行试验研究。

收稿日期: 2016-02-18; 修订日期: 2016-04-05

Received: 2016-02-18; Revised: 2016-04-05

作者简介: 王明军(1979—), 男, 河南太康人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为油气田管道安全输送技术。

Biography: WANG Ming-jun(1979—), Male, from Taikang, Henan, Ph.D. candidate, Senior engineer, Research focus: safety transportation technology for oil and gas pipeline.

# 1 合金防垢原理

防垢合金主要由铜、锌、锡、镍、锰、银等具有不同电负性的金属元素构成,这些元素之间存在电极电位差异,因此在加工制备的合金中会有电势差存在,形成多个微小的原电池,构成了特殊的电化学催化体,可以向流体介质释放自由电子,使流体介质产生极化效应<sup>[6]</sup>。其中电极电位较低的锌首先被氧化为离子进入水中,释放出电子。相比  $\text{CO}_3^{2-}$  和自由电子,  $\text{Ca}^{2+}$  和带正电的胶体更容易与电子结合,水偶极子与钙镁离子形成牢固的水合离子,使正负电荷重心偏离增大,增加了矿化物的溶解度,从而达到防垢目的<sup>[7]</sup>。

# 2 合金防垢配比

## 2.1 合金材料组成

在现场应用中,合金材料不断接触高矿化度地层液,同时受到地层液的上升冲刷,所以选取的合金元素相互之间既要有较高电位差,又能保持化学性质稳定<sup>[6]</sup>。理论上合金元素种类越多,形成的微电池越多,防垢能力越强,但会产生诸如比例调整等冶炼工艺问题。考虑到以上及经济因素,初步选取铜、锌、锡、镍、锰、银等,合金配比以铜为溶剂,以锌为主要溶质。

根据国内外文献和文献[7]等的报道,3个典型专利中合金成分列于表1。由表1可见,合金材料的各元素含量是一个范围值,最佳防垢效果的元素配比也应处于该范围之内。

试验中,在各元素最优防垢范围内选取几个配比,见表2。通过防垢动态评价选取防垢效果较好的组合,为进一步优化合金组合打下基础。

表 1 各类合金组合元素含量

Table 1 Combination of element contents in various alloys %

| 合金元素 | Waler 合金    | Craft 合金 | Weaver 合金 |
|------|-------------|----------|-----------|
| 铜    | 40 ~ 60     | 57.64    | 58 ~ 62   |
| 锌    | 2 ~ 28      | 17.63    | 20 ~ 25   |
| 锡    | 1 ~ 5       | 2.69     | 2 ~ 3.5   |
| 镍    | 5 ~ 25      | 13.45    | 12 ~ 16   |
| 锰    | 0.01 ~ 0.09 | 0.05     |           |
| 银    | 0.02 ~ 0.12 | 0.07     |           |

表 2 实验合金组合元素含量

Table 2 Composite element contents in the experimental alloy %

| 合金元素 | 合金 1 | 合金 2 | 合金 3 | 合金 4 | 合金 5 |
|------|------|------|------|------|------|
| 铜    | 40   | 44   | 48   | 52   | 56   |
| 锌    | 38   | 36   | 34   | 32   | 30   |
| 锡    | 6    | 5.3  | 5    | 3    | 2    |
| 镍    | 16   | 14.5 | 12.4 | 12   | 10.6 |
| 锰    | 0    | 0.15 | 0.35 | 0.55 | 0.75 |
| 银    | 0    | 0.05 | 0.25 | 0.45 | 0.65 |

## 2.2 合金防垢室内实验

### 2.2.1 实验装置设计

防垢实验装置采用两条平行管路系统,两条管路所含部件及管线相同,具备加热和流量控制功能。实验装置主要由容器水箱、热电偶、温控调节器、加热器、循环水泵、管道、调节阀门、流量计、台架等组成。其中在平行管路1上连接合金防垢器(可更换不同合金),平行管路2作为参照。

加工制造时,容器水箱容积为80 L,由PVC板材制作,其中间用PVC板间隔开而不会给循环水带来干扰。管线选取有热承载能力的PPR热水管,选取增压式循环水泵,泵体满足耐腐蚀又可循环冷热水的要求,其流速控制在10 L/min以上。实验装置设计如图1所示。

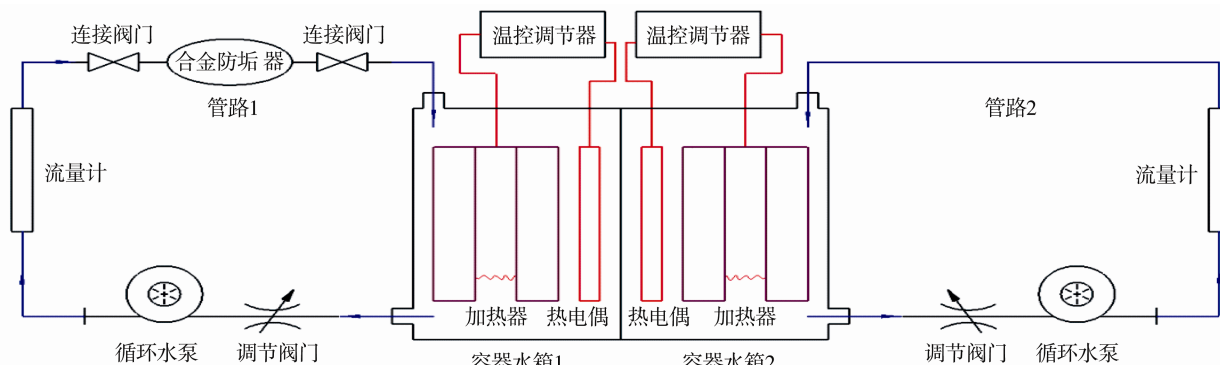


图 1 合金防垢动态实验装置

Fig.1 Dynamic experiment device for alloy antiscale

### 2.2.2 实验设计

模拟油田油井井筒条件:取 W2-44-2 井管内垢样作为实验的防垢对象, 容器水箱温度控制在 80~90 °C 之间, 设定循环水泵工作参数及调节阀门, 使得管线流量与该井现场流速接近。

1) 合金材料配比实验。为减少因实验水样差异而造成实验误差, 将实验容器 1、容器 2 同时装入根据 W2-44-2 井地层液成分含量配置的实验水样。实验设置为 5 组, 每组实验选用 W2-44-2 井相同垢样各 2 份, 垢样按照组序进行编号 (1—10), 并称量初始质量。每组实验开始前, 将垢样分别放置于 2 个垢样夹持器, 然后将夹持器分别固定于容器水箱 1 和容器水箱 2 中。5 组实验依次进行, 实验时间设置为 15 天, 每隔 3 天将容器水箱 1、容器水箱 2 的垢样取出, 分别放入烘箱恒温 80 °C 下持续 30 min 后再称量记录, 然后重新放入夹持器中继续实验, 直至该组实验结束。实验过程中考虑到水分蒸发, 每天可向两容器水箱添加蒸馏水至实验水样的初始位置。通过该组实验数据对比, 优选出防垢效果较好的合金材料配比组合。

2) 合金防垢适应性实验。将实验装置管路 2 同样串联相同规格的合金防垢器, 改装后的防垢器内安装由配比实验优选出的合金材料, 采用 W2-43-5, W2-27-2, W2-46-2, W2-41-1 井 4 组不同矿化度的地层采出液进行对比实验, 采取两组地层液实验同时进行。选择 W2-44-2 井管内垢样, 编号依次为 11—14, 过程中做好垢样称量, 并记录各垢样质量变化数据以及各地层液成分变化, 后续实验过程同上操作。

### 2.2.3 实验结果与分析

1) 合金材料配比实验数据。实验水样组成: 钙离子为 900 mg/L; 镁离子 260 mg/L; 矿化度为 31 900 mg/L。每组第二个垢样为空白对比样。实验过程中, 防垢率<sup>[9]</sup> (以第 1 组说明) =  $(\Delta m_2 - \Delta m_1) / \Delta m_2$ <sup>[10]</sup>。试验数据见表 3, 可以看出, 第 4 组合金配比的防垢效果较好, 防垢率可达 90% 以上。

2) 合金防垢适应性实验数据。合金防垢适应性实验各组垢样的质量增量趋势如图 2 所示, 图 2 中添加合金材料配比实验中最优防垢效果对比, 垢样编号为 7。W2-43-5, W2-27-2, W2-44-2, W2-46-2, W2-41-1 井液矿化度分别为: 10 450, 23 700, 42 000, 47 300 mg/L。由图 2 可见, 在 W2-43-5,

W2-27-2, W2-44-2, W2-46-2, W2-41-1 井液矿化度下, 各垢样的质量增幅约为 0.52, 1.26, 2.37, 3.7, 5.9 g。说明矿化度增加, 合金防垢效果减弱, 但对不同矿化度都有明显防垢效果。

表 3 合金材料配比实验数据

Table 3 The experimental data of different alloy material formula

| 组别 | 载体序号  | 初始质量 $m_0/g$ | 质量变化 $\Delta m/g$ | 防垢率/% |
|----|-------|--------------|-------------------|-------|
| 1  | 垢样 1  | 9.93         | 0.85              | 83    |
|    | 垢样 2  | 10.02        | 5.01              |       |
| 2  | 垢样 3  | 10.12        | 1.24              | 76    |
|    | 垢样 4  | 10.35        | 5.18              |       |
| 3  | 垢样 5  | 9.98         | 0.74              | 85    |
|    | 垢样 6  | 9.91         | 4.96              |       |
| 4  | 垢样 7  | 10.25        | 0.39              | 92    |
|    | 垢样 8  | 9.96         | 4.98              |       |
| 5  | 垢样 9  | 9.98         | 0.65              | 87    |
|    | 垢样 10 | 9.97         | 4.98              |       |

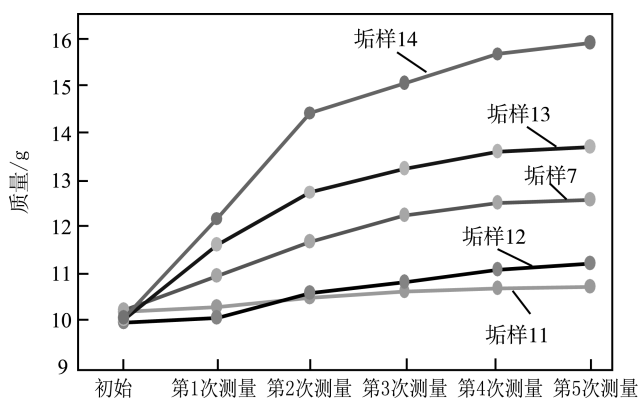


图 2 合金防垢适应性实验各组垢样增重趋势

Fig.2 Sample weight gain trends of different experimental groups in alloy antiscalant adaptability test

## 2.3 合金防垢器研制

### 2.3.1 性能要求

结合油田生产条件, 所研制合金防垢器应满足以下要求: 防垢器安装与管柱密封性能要好, 不影响油井后期维护及检测工作; 适应油井不同的生产工况, 具有耐压、耐温、耐高矿化度水质等性能; 可实现流体与防垢器充分接触, 增加两者接触时间, 充分发挥合金材料对流体的极化作用<sup>[11]</sup>; 防垢器易于取出, 且自去污能力强。

### 2.3.2 防垢器设计

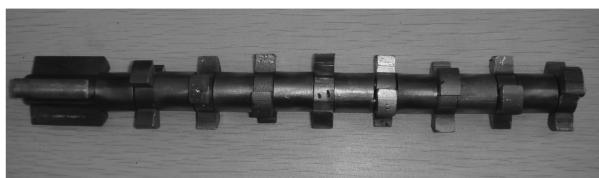
依据以上性能要求, 防垢器设计总体思路是: 流体从防垢器进液端进入内筒, 随后通过由多个合

金叠加形成的螺旋空腔，流动状态变为湍流，可与合金材料充分接触，最后从出液端流出。

防垢器分为支撑外壳和核心两大部分。支撑外壳包括进出液端连接器、保护套；核心部分则由合金连接管柱、内筒保护罩和合金扇片组成。内筒保护罩为圆筒结构，底端封口，断面及近底端筒面均匀布置多个进液孔眼。防垢器内部结构表面均作合金镀层处理，具有耐酸碱、耐中性盐性能以及较好的耐温性。



a 柱型合金防垢器



b 扇形合金防垢器

图3 防垢器核心部分分解

Fig.3 Core parts of the antiscale device

防垢功效主要通过核心部分发挥作用，文献[12—13]中合金防垢结构形式较多，主要目的是增加流体与合金材料的接触面积。以往防垢器的结构往往存在合金材料利用率不高、加工工序复杂等弊端。研制的合金防垢器把合金片做成扇形，并螺旋排列，它具有加工简单、接触面积大的特点<sup>[14]</sup>，如图4所示。同时该防垢器具有在井下可快捷安装、便捷打捞、精确固定的优点。



图4 防垢器合金材料结构

Fig.4 Alloy material structure of the antiscale device

### 3 安装形式

合金防垢器采取串联式安装，即油井作业时，

将防垢器安装于指定两根油管之间，防垢器随油管下放到井筒固定位置<sup>[15]</sup>。

### 4 现场试验

选取 W2-44-2 井进行合金防垢试验，该井于2014年5月16日下泵投产，初期日产液7.76 t，日产油2.06 t，含水73.5%，2014年8月15日日产液1.21 t，日产油0.8 t，含水33.8%。至2014年10月末出现结垢现象，随后加注阻垢剂，每天药剂加注量为200 L。2015年1月21日对该井安装合金防垢器，安装位置如图5所示。

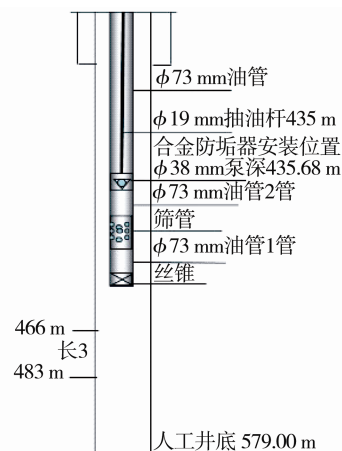


图5 现场试验防垢器安装位置

Fig.5 Installation location of the antiscale device in field test

现场试验分为两个阶段：第1阶段为检测合金防垢器安装之前加注阻垢剂时的生产情况；第2阶段为检测合金防垢器运行后油井的生产情况。试验结果如图6所示。

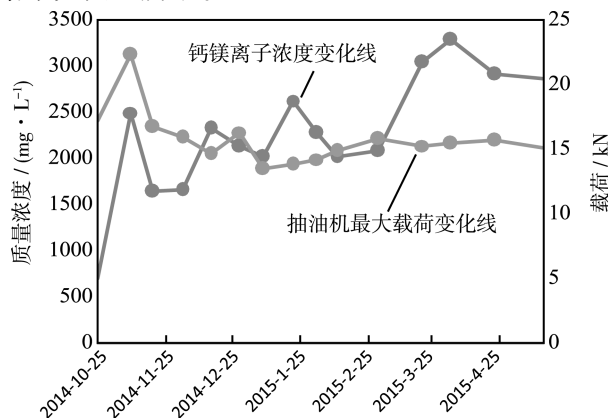


图6 W2-44-2井合金防垢试验数据对比

Fig.6 Alloy antiscale test data for W2-44-2 well

通过图6可以看出，安装合金阻垢仪后，抽油机最大载荷整体呈现降低趋势，而地层液钙镁离子

的质量浓度呈现上升趋势,说明合金防垢措施起到了阻垢作用。通过两阶段地层液钙镁离子最高浓度对比,即合金防垢与化学阻垢相比较,采用合金防垢后,地层液钙镁离子的质量浓度提高了 538 mg/L,防垢率提高了 76%。

## 5 结论

1) 针对油田油井垢质特征及油井结垢现状,利用设计出的室内动态模拟实验平台,优选出了合金防垢材料的最佳配比及制造工艺。

2) 根据油管井下实际情况,研制了采用螺旋排列的扇形合金片结构的串联式合金防垢器,具有加工简单、接触面积大的特点,同时密封可靠、快捷安装、便捷打捞、精确固定。

3) 现场试验表明,与化学防垢效果相比,合金防垢可明显提高钙镁离子质量浓度。

4) 模拟试验还表明,地层水矿化度越低,合金防垢器的防垢效果将越好,说明在地层水矿化度较低的情况下会起到良好防垢效果。

## 参考文献:

- [1] 和彦光. 合金材料的阻垢机理及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
HE Yan-guang. Alloy Material of Scale Inhibition Mechanism and Experimental Study[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2008.
- [2] 赵彦辉, 贾莹, 于宝海, 等. 管状构件内表面真空镀膜方法研究进展[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 228—125.  
ZHAO Yan-hui, JIA Ying, YU Bao-hai, et al. Surface Vacuum Coating Method Research Progress in a Tubular Components[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 228—125.
- [3] 朱义吾. 油田开发中的结垢机理及其防治技术[M]. 西安: 陕西科技技术出版社, 1995.  
ZHU Yi-wu. The Fouling Mechanism of Oilfield Development, and Its Prevention and Control Technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1995.
- [4] 闫方平. 江苏油田韦 2 断块油井挤注防垢技术研究与应用[J]. 钻采工艺, 2009, 22(4): 80—82.  
YAN Fang-ping. Jiangsu Wei 2 Fault Block Oil Field Oil Well Squeeze Antiscale Technology Research and Application [J]. Journal of Drilling Technology, 2009, 22 (4): 80—82.
- [5] 闫旭涛, 刘志刚. 油田采出水处理复合阻垢缓蚀剂的研究[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 116—120.  
YAN Xu-tao, LIU Zhi-gang. Oilfield Produced Water Treatment Research Experiences From[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 116—120.
- [6] 唐勤, 程秋菊, 李晓晨, 等. 陕北地区某油田注水水质现状评价与分析[J]. 江汉石油职工大学学报, 2014, 27(7): 55—56.  
TANG Qin, CHENG Qiu-ju, LI Xiao-chen, et al. Some Oil Field Water Injection Water Quality Status Evaluation and Analysis in Shanbei Region[J]. Journal of University of Jiangnan Oil Worker, 2014, 27(7): 55—56.
- [7] 黄征青, 黄光斗, 徐洪涛, 等. 水的磁处理防垢与除垢的研究[J]. 工业水处理, 2001, 21(1): 5—8.  
HUANG Zheng-qing, HUANG Guang-dou, XU Hong-tao, et al. Magnetic Treatment Antiscaling and Descaling Water[J]. Industrial Water Treatment, 2001, 21(1): 5—8.
- [8] 李强. 合金材料的防垢防腐蚀机理及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
LI Qiang. Alloy Material of Antiscale Anticorrosion Mechanism and Experimental Study[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2009.
- [9] 余锦涛, 郭占成, 冯婷, 等. X 射线光电子能谱在材料表面研究中的应用[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 119—124.  
YU Jin-tao, GUO Zhan-cheng, FENG Ting, et al. X-ray Photoelectron Spectroscopy Application in Material Surface Study[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 119—124.
- [10] MILLS RONALD VAN Auken. Method of and Means for Preventing Corrosion of Well Tubing: United States, US73701024A[P]. 1926-11-30.
- [11] 舒福昌, 余维初, 梅平, 等. 宝浪油田注水结垢趋势预测及试验验证[J]. 江汉石油学院学报, 2000, 22(3): 87—89.  
SHU Fu-chang, YU Wei-ping, MEI Ping, et al. Treasure Sea Oil Field Water Flooding Scaling Trend Prediction and Test[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2000, 22(3): 87—89.
- [12] 常辉, 徐卫峰, 罗满岐, 等. 物理防垢技术在大牛地气田的应用[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 407—408.  
CHANG Hui, XU Wei-feng, LUO Man-qi, et al. Physical Anti-scaling Technology Application in Daniudi Gas Field[J]. Journal of Fault Block Oil and Gas Fields, 2015, 22(3): 407—408.
- [13] WILLIAM W, DAVID N. Method and Apparatus to Enhance the Recovery of Crude Oil: United States, 08/423024[P]. 1996-01-23.
- [14] 侯亭波. 烧结多孔管的制作及其沸腾传热研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 91—95.  
HOU Ting-bo, et al. The Production of Sintered Porous Pipe and Boiling Heat Transfer Research[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 91—95.
- [15] 李勤. 装备研制项目可靠性风险预警技术研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 125—130.  
LI Kan. Reliability of Equipment Development Project Risk Early Warning Technology Research[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 125—130.