靖安油田注水管线结垢原因分析及新型高效阻垢剂的研制

李俊莉[1,2]，张颖[1,2]，刘彦锋[1,2]，陈强[1,2]，白玉潇[3]

（1.陕西省石油化工研究设计院，西安 710054；2.陕西省石油精细化学品重点实验室，西安 710054；3.延长油田股份有限公司杏子川采油厂，陕西 安塞 717400）

摘 要：目的 解决靖安油田三号联合站注水管线内结垢问题。**方法** 采用扫描电镜和 X 射线衍射仪对注水管线内垢样进行分析，采用油气田水分析方法对各站区油水混合物的离子浓度进行分析。选取自制马来酸酐-丙烯酸羟丙酯-亚磷酸钠（MASP）、聚环氧琥珀酸（PESA）和乙二胺四亚甲基磷酸钠（EDTMPS）三种药剂为原料，采用正交试验法 $L_9(3^4)$研制出了一种新型高效阻垢剂 Inhi-MPE。参照油田用防垢剂性能评定方法，评价了 Inhi-MPE 与常用阻垢剂 PESA、AA/MA、PBTCA 的阻垢性能。**结果** 注水管线垢样主要为 $CaSO_4$ 结垢和少量的 $Ba(Sr)SO_4$ 垢。靖安油田三号联合站注水管线结垢主要是由两种不相容的水混合，并在注水管线中生成 $CaSO_4$、$CaCO_3$ 和 $Ba(Sr)SO_4$ 垢。Inhi-MPE 的最优水平组合为：MASP 10 g，PESA 7 g，EDTMPS 7 g。随着 Inhi-MPE 含量的增加，Inhi-MPE 的阻垢性能增加。当 Inhi-MPE 的质量浓度为 100 mg/L 时，对靖安油田三号联合站混合水样的阻垢率达 93.71%。在相同实验条件下，Inhi-MPE 对靖安油田三号联合站混合水样的阻垢效果最优，AA/MA 和 PESA 次之，PBTCA 效果最差，表明 Inhi-MPE 具有优良的阻垢性能。**结论** 在靖安油田三号联合站注水中连续投加 Inhi-MPE，平均注水量可控制在 608~628 m^3 之间变动，注水压力在 8.15~8.27 MPa 之间变动，两者变动基本保持不变。这说明 Inhi-MPE 可有效地减缓 $CaSO_4$ 的结垢速度，保证了注水量的稳定和注入压力的平稳，注水管线结垢的问题得以解决。

关键词：注水管线；垢样；硫酸钙；阻垢剂；正交试验；阻垢性能

中图分类号：TQ085 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2016)08-0022-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.08.004

Scaling Analysis of Waterflooding Pipeline in Jing'an Oilfield and Study of a Novel High-Efficiency Scale Inhibitor

LI Jun-li[1,2], ZHANG Ying[1,2], LIU Yan-feng[1,2], CHEN Qiang[1,2], BAI Yu-xiao[3]

(1.Shannxi Research Design Institute of Petroleum and Chemical Industry, Xi′an 710054, China;
2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Petroleum Fine Chemicals, Xi′an 710054, China;
3. Xingzichuan Oil Recovery Plant of Yanchang Oil Field Co., Ltd, Ansai 717400, China)

收稿日期：2016-05-05；修订日期：2016-06-13

Received：2016-05-05；**Revised**：2016-06-13

基金项目：陕西省科技攻关项目（2013K11-06）

Fund：Supported by Science and Technology Project of Shaanxi Province (2013K11-06)

作者简介：李俊莉（1972—），女，高级工程师，主要从事油气田化学品的研制与应用。

Biography：LI Jun-li (1972—), Female, Senior engineer, Research focus: development and application of the chemicals for the oil and gas field.

ABSTRACT: **Objective** To solve the scaling problem of waterflooding pipeline of No.3 United Station in Jing'an Oilfield. **Methods** Scale samples were analyzed by using scanning electron microscope and X-ray diffraction method. Ionic concentration of oil-water mixture in each station was analyzed by the analysis on oil and gas field water. A novel high-efficiency scale inhibitor Inhi-MPE was developed by orthogonal test $L_9(3^4)$ with self-made maleic anhydride- hydroxypropyl acrylate-sodium subphosphite (MASP), polyepoxysucc-inate (PESA) and ethylene diamine tetramethylene sodium phosphate EDTMPS) as raw materials. Scale inhibition performance of Inhi-MPE and commonly used PESA, AA/MA and PBTCA were evaluated according to evaluation method for behavior of inhibitor used in oil field. **Results** Scaling sample of the waterflooding pipeline was mainly made of calcium sulfate and a small amount of barium or strontium sulfate scale. The scale of waterflooding pipeline of No.3 United Station in Jing'an was mainly mixed by two incompatible waters and produced the scale of $CaSO_4$, $CaCO_3$ and $Ba(Sr)SO_4$ in the pipeline. The optimal level combination of the Inhi-MPE was MASP 10 g, PESA 7 g and EDTMPS 7 g. The scale inhibition performance of Inhi-MPE was improved with the increase of Inhi-MPE'dosage. The scale inhibition rate to the mixed water sample of No.3 United Station in Jing'an was 93.71% when the dosage of Inhi-MPE was 100 mg/L. The scale inhibition effect of Inhi-MPE was best, AA/MA and PESA successively, and PBTCA worst under the same experimental conditions. These indicated that Inhi-MPE had excellent scale inhibition performance. **Conclusion** When Inhi-MPE is added continuously to the mixed water of the No.3 United Station in Jing'an, the average quantity of water injection can be controlled at 608~628 m^3 and the average pressure at 8.15~8.27 MPa, and both of them remain basically unchanged. It indicates that Inhi-MPE can retard effectively scaling rate of $CaSO_4$, and ensure the stability of waterflooding quantity and the stableness of injection pressure. By this way, the scaling problem of water injection pipeline can be solved.

KEY WORDS: waterflooding pipeline; scale; calcium sulfate; scale inhibitor; orthogonal test; scale inhibition performance

靖安油田三号联合站位于鄂尔多斯盆地的陕北斜坡中部，属典型的低渗透油田，所采层位为长 6 油层，油井深度为 1500~1800 m，日注水量为 400 m^3，但主力层长 6 物性差，原始地层压力系数只有 0.67，孔隙度为 12.3%，渗透率仅为 1.4 md[1]，2004 年开始注水开发。近年来，随着开采程度的加深，注水量越来越大，油田的含水率逐渐上升，油田结垢越来越严重，为治理结垢投入的资金也越来越多[2—4]。靖安油田三号联合站总共有注水井 68 口，目前已有 26 口注水井管线结垢严重，占总注水井的 38%。结垢直接引起管线堵塞、管径变细，导致注水量下降，注入压力增加。目前，注水井管线结垢堵塞不但给安全生产带来隐患，而且还成为影响油田正常开发的主要问题。

1　实验

1.1　主要试剂和仪器

所用试剂：无水硫酸钠、硝酸银、氯化钡、氢氧化钠、氯化铵、丙酮、钙羧酸指示剂、EDTA 等均为分析纯试剂，马来酸酐-丙烯酸羟丙酯-亚磷酸钠（MASP）为自制品，聚环氧琥珀酸（PESA）、丙烯酸/马来酸酐共聚物（AA/MA）、2-膦酸丁烷-1,2,4-三羧酸（PBTCA）、乙二胺四亚甲基磷酸钠（EDTMPS）等均为工业品。

主要仪器：扫描电镜，JSM-840 型，日本 JEOL 公司；X 射线衍射仪，D/MAX-2400 型，日本理学公司；电热恒温水浴锅，DK-98-II 型，天津泰斯特仪器有限公司；天平（感量 0.1 mg），BS-224 S 型，赛多利斯科学仪器有限公司。

1.2　阻垢性能评价方法

选用靖安油田三号联合站油田的污水、深井水体积比为 1:1 的混合水样作为实验介质。依据 SY/T 5673—93《油田用防垢剂性能评定方法》[5]对阻垢剂的阻垢性能进行评价，实验温度为(60±2) ℃。

2　结果与讨论

2.1　垢样分析

2.1.1　垢样外观

取一定量的三号站注水管线结垢产物，使用汽油去除表面油污，烘干后对垢样进行定性分析，结果见表 1。由表 1 可初步确定垢样中基本不含碳酸

盐垢，可能含有硫酸盐垢。

表 1　去除油污后的注水管线结垢产物分析结果
Table 1 Analysis of scale product of waterflooding pipeline after sump oil removed

项目	实验现象
外观	白色略带灰色，垢质坚硬致密
结垢剖面状态	呈环状，已有 3/4 截面堵塞
垢样中加入 15%（质量分数）盐酸	白色垢基本不溶解，无气泡放出
将垢样放入饱和 Na_2CO_3 溶液中加热后，再加入 15%盐酸	白色垢量减少，有气泡放出

2.1.2　扫描电镜分析

取一定量的注水管线垢样，在研钵中研磨至全部通过 120 目分样筛，装广口瓶中，并贮存于干燥器内备用。采用 JSM-480 型电子扫描显微镜对垢样进行微观形貌检测（SEM），并利用 X 射线能量色谱分析仪对垢样进行成分分析（EDX），结果见图 1。由图 1 可知，注水管线垢样中存在 Ca、O、S、Ba、Sr、Cl 六种主要元素，Ca、Ba、Sr、S、O 五种元素主要来自 $CaSO_4$、$BaSO_4$、$SrSO_4$ 等结垢产物，Cl 元素主要来自油水混合样结晶的无机盐。

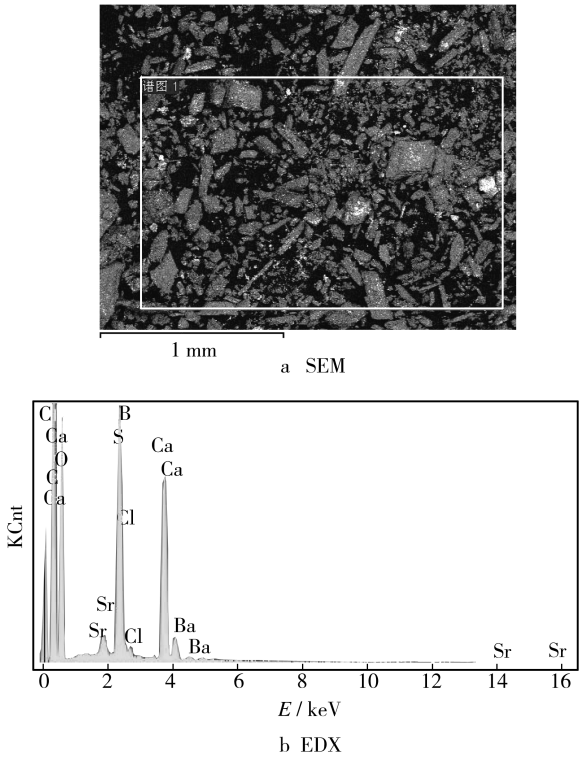


图 1　垢样的 SEM 和 EDX 谱图
Fig.1 SEM and EDX spectrum of scale

2.1.3　X 射线衍射分析

为了进一步确定注水管线垢样的组成，利用 D/MAX-2400 型 X 射线衍射仪对注水管线垢样进行分析，结果见图 2 和表 2。由表 2 可知，垢样的主要成分为二水硫酸钙（石膏），此外还含有少量的半水硫酸钙。这可能是由于 X 射线衍射的定性分析是把对材料测得的点阵平面间距及衍射强度与标准物相的衍射数据相比较，从而确定材料中存在的物相；定量分析是根据衍射花样的强度确定材料中各相的含量，而垢样中钡锶垢含量低，故未测出。因此靖安三号联合站注水管线垢样主要为硫酸钙结垢和少量的硫酸钡锶垢。

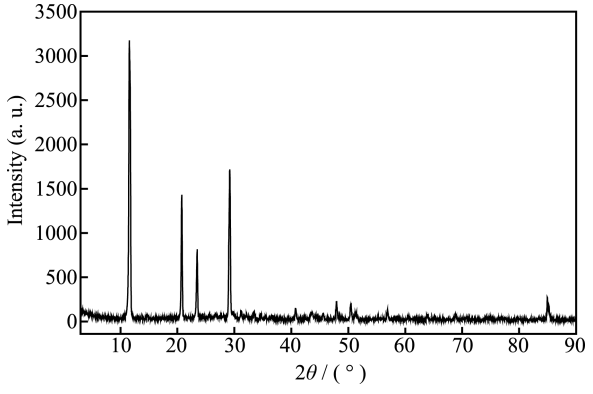


图 2　靖安三号联合站注水管线垢样 XRD 谱图
Fig.2 XRD spectrum of the scale of waterflooding pipeline of No.3 United Station in Jing'an

2.1.4　注入水中成垢离子来源分析

结垢是由系统内的热力学不稳定性与化学不相容性引起的，虽然温度、压力、含盐量和 pH 值等因素均会对油田水的结垢产生重要影响，但是成垢离子是结垢的物质基础[6]。靖安油田三号联合站水样为一号站、二号站和三号站的油田污水混合样，污水回注一般按照深井水与油田污水 1:1（体积比）进行配注。参照石油天然气行业标准 SY/T 5523—2000《油气田水分析方法》[7]，对进入三号联合站的油田注入水样进行离子浓度分析，结果见表 3。

从表 3 可知，靖安油田三号联合站深井水样为 Na_2SO_4 型，富含 SO_4^{2-} 和 HCO_3^-，而 Ca^{2+}、Ba^{2+} 和 Sr^{2+} 的含量较低。一号注水站至三号注水站地层水样为 $CaCl_2$ 型，富含 Ca^{2+}、Ba^{2+} 和 Sr^{2+}，不含或含有少量的 CO_3^{2-}，HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的含量也较低。富含 SO_4^{2-} 的深井水样与富含 Ca^{2+}、Ba^{2+} 和 Sr^{2+} 的地层水样混合配注，必将产生硫酸盐结垢。

靖安油田三号联合站注水管线垢样主要由两

表 2　靖安三号联合站注水管线垢样 XRD 图谱解析

Table 2 XRD Spectrum analysis of the scale of waterflooding pipeline of No.3 United Station in Jing′an

序号	化学分子式	质量分数/%	X 射线衍射特征峰值	
			2θ/(°)	d 值/μm
1	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	97.40	11.620	7.6092
			20.780	4.2711
			29.180	3.0579
			31.200	2.8644
2	$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$	2.60	14.740	6.0049
			25.780	3.4529
			29.800	2.9957
			31.860	2.8065

表 3　各注水站离子浓度分析结果

Table 3 Analysis of the ion concentration of each waterflooding station　　mg/L

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ba^{2+}+Sr^{2+}	Na^{+}+K^{+}	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	总矿化度	水型
深井水样	26.70	46.63	0.00	1506.37	18.60	361.24	54.95	2976.41	4990.90	$NaHCO_3$
一号站	20 073.50	95.49	99.29	11 039.05	0.00	55.53	52 466.00	282.47	84 111.33	$CaCl_2$
二号站	22 293.40	76.39	119.80	9964.76	0.00	79.33	56 028.73	270.92	88 833.33	$CaCl_2$
三号站	15 366.07	30.56	91.61	7789.06	0.00	36.61	39 792.63	297.00	64 563.54	$CaCl_2$

种不相容的水混合，即在富含成垢阳离子的地层水中混入富含 SO_4^{2-}、HCO_3^{-}的深井水，从而在注水管线中生成 $CaSO_4$、$CaCO_3$ 和 $Ba(Sr)SO_4$ 垢。消除水质上的不相容性是防治注水地层的根本性措施，但限于油田的地理环境与水处理的工艺和成本，向注入水中加入阻垢剂是油田常用的控制结垢措施[8—12]。这种方法简便易行，使用时需对阻垢剂进行合理的评价与选择。

2.2　新型高效阻垢剂的研制

2.2.1　阻垢剂配方优化

本着复配增效的原则，采用多组分阻垢剂配合使用，可增加阻垢效果[13—14]。针对靖安油田三号联合深井水与油田污水 1:1 注水，采用正交试验 $L_9(3^4)$ 正交表进行复配研究，从而筛选出一组高效环保的复合配方。因注水系统主要为硫酸钙结垢，聚羧酸类的共聚物阻垢剂具有很好的水溶性，且溶于水后的 $RCOO^{-}$、OH^{-}等能与 Ca^{2+}形成稳定的水溶性配合物，抑制硫酸垢形成的作用明显。而有机磷类化合物对 Ca^{2+}的阻垢作用表现在螯合作用和溶限作用，这种作用使得生长中的小晶体与其他微晶体在碰撞过程中难以按正常的晶格排列生长，导致不易生成大尺寸的晶体，使得硫酸盐垢层具有许多缺陷（空洞），从而使硬垢变成软垢，并且两者复配对其阻垢性能有增效作用[15]，因此实验选取自制马来酸酐-丙烯酸羟丙酯-亚磷酸钠（MASP）、聚环氧琥珀酸（PESA）和乙二胺四亚甲基磷酸钠（EDTMPS）三种药剂作为考察因素，以各因素的添加量作为水平数，以阻垢率作为评价指标。具体因素与水平、正交试验结果及其直观分析分别见表 4—5。

由表 5 可知，影响阻垢性能的各因素主次顺序为 A>C>B。因阻垢率是越高越好，最优水平组合为 $A_3B_2C_3$，即 MASP 10 g，PESA 7 g，EDTMPS 7 g。

在最优水平组合 $A_3B_2C_3$ 条件下，复配了三组阻垢剂并测定其阻垢性能。由测试结果可知，同样实验条件下测得的阻垢率分别为 93.71%、94.76% 和 94.5%，均高于优化前正交试验所复配的任一组。将该配比的阻垢剂命名为 Inhi-MPE。

表 4　因素和水平

Table 4 Factors and levels

水平	因　素		
	MASP（A）/g	PESA（B）/g	EDTMPS（C）/g
1	6	5	3
2	8	7	5
3	10	9	7

表 5　正交试验结果及直观分析

Table 5 Results of orthogonal test and intuitive analysis

试验号	因素			阻垢率/%
	A	B	C	
1	1	1	1	62.78
2	1	2	2	72.21
3	1	3	3	77.98
4	2	1	2	90.30
5	2	2	3	88.47
6	2	3	1	76.02
7	3	1	3	87.16
8	3	2	1	93.45
9	3	3	2	86.24
均值 1	70.99	80.08	77.41	
均值 2	84.93	84.71	82.92	
均值 3	88.95	80.08	84.53	
极差	17.96	4.63	7.12	

注：阻垢剂质量浓度为 100 mg/L。

2.2.2　Inhi-MPE 与常用阻垢剂的阻垢性能对比

按照 1.2 小节的方法，评价了 Inhi-MPE 与常用阻垢剂聚环氧琥珀酸（PESA）、丙烯酸/马来酸酐共聚物（AA/MA）、2-膦酸丁烷-1,2,4-三羧酸（PBTCA）对靖安油田三号联合站混合水样的阻垢性能，结果见图 3。

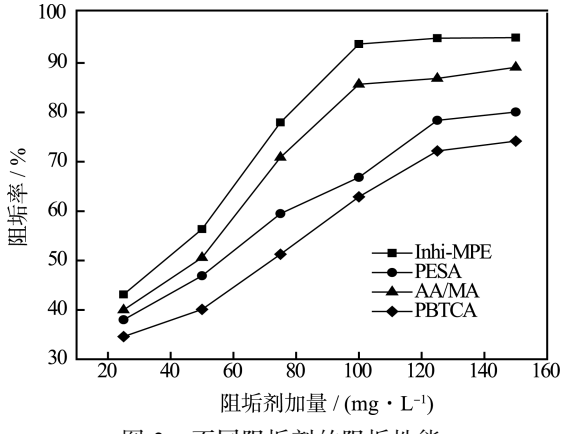


图 3　不同阻垢剂的阻垢性能

Fig.3 Inhibition performance of different scale inhibitors

由图 3 可知，随着 Inhi-MPE 含量的增加，Inhi-MPE 的阻垢性能增加，当 Inhi-MPE 的质量浓度为 100 mg/L 时，对靖安油田三号联合站混合水样的 $CaSO_4$ 和 $CaCO_3$ 混合垢样的阻垢率达 93.71%，且随着 Inhi-MPE 含量的进一步增加，阻垢率无明显改变。在相同实验条件下，Inhi-MPE 对靖安油田三号联合站混合水样的阻垢效果最优，其次为 AA/MA 和 PESA，PBTCA 效果最差，表明 Inhi-MPE 具有优良的阻垢性能。

3　现场应用试验

在油田注水开发过程中，油田注水和混输过程中的结垢大多都是由于水的不相容造成的，并且结垢不仅发生在近井地带，而且在距井底相当远的地方也存在结垢[16]。结垢会直接导致注入量的下降，注水压力提高。为验证 Inhi-MPE 的有效性，在靖安油田三号联合站注水中投加 Inhi-MPE 阻垢剂，现场采用连续投加的方式，用量以注水量的 100 mg/L 计。注水中投加 Inhi-MPE 阻垢剂后，连续监测联合站相同压力下的月平均注水量变化和相同注水量下的压力曲线，如图 4 所示。

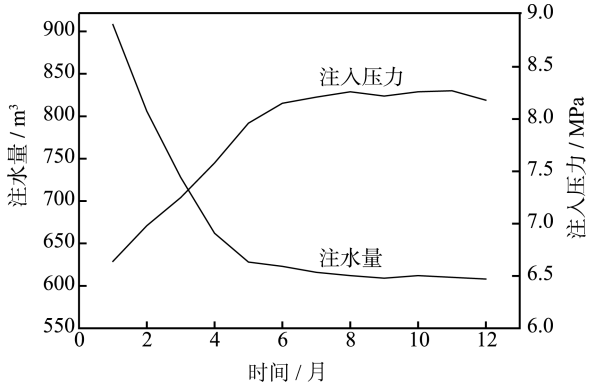


图 4　相同压力下的月平均注水量变化曲线及相同注水量下的压力变化曲线

Fig.4 Variation curve of the monthly average waterflooding quantity under the same pressure and the pressure curve under the same waterflooding quantity

如图 4 所示，投加 Inhi-MPE 阻垢剂前，月平均注水量 5 个月内大幅度下降，下降率为 30%。投加 Inhi-MPE 阻垢剂后，6 至 12 月平均注水量控制在 608~628m^3 之间变动，基本保持不变。注水压力在投加 Inhi-MPE 阻垢剂前，由 6.64 MPa 增加至 8.15 MPa，增幅为 22%；投加 Inhi-MPE 阻垢剂后，在 8.15~8.27 MPa 之间变动，压力幅度基本保持不变。这说明 Inhi-MPE 阻垢剂中的羧酸根能与水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}等阳离子形成稳定的可溶性多元螯合物，将更多的钙离子稳定在水中，减缓了 $CaSO_4$ 的结垢速度，保证了注水量的稳定和注入压力的平稳，使靖安油田三号联合站深井水与油田污水混注管线内结垢的问题得到解决。

4　结语

1）注水管线垢样主要为硫酸钙结垢和少量的

硫酸钡锶垢，其由两种不相容的水混合，即在富含成垢阳离子的油层中注入含 SO_4^{2-}、HCO_3^{2-}的注入水，从而在注水管线中生成 $CaSO_4$、$CaCO_3$ 垢。

2）选取自制马来酸酐-丙烯酸羟丙酯-亚磷酸钠（MASP）、聚环氧琥珀酸（PESA）和乙二胺四亚甲基磷酸钠（EDTMPS）三种药剂为原料，研制出了一种新型高效阻垢剂 Inhi-MPE，其最优组合为：MASP 10 g，PESA 7 g，EDTMPS 7 g。

3）随着 Inhi-MPE 含量的增加，Inhi-MPE 的阻垢性能增加，当 Inhi-MPE 的质量浓度为 100 mg/L时，对靖安油田三号联合站混合水样中 $CaSO_4$ 和 $CaCO_3$ 混合垢样的阻垢率达 93.71%，且随着 Inhi-MPE 含量的进一步增加，阻垢率无明显改变。在相同实验条件下，Inhi-MPE 对靖安油田三号联合站混合水样的阻垢效果最优，其次为 AA/MA 和 PESA，PBTCA 效果最差，表明 Inhi-MPE 具有优良的阻垢性能。

4）Inhi-MPE 阻垢剂中的羧酸根能与水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+}等阳离子形成稳定、可溶的多元螯合物，将更多的钙离子稳定在水中，减缓了 $CaSO_4$ 的结垢速度，保证了注水量的稳定和注入压力的平稳，使靖安油田三号联合站深井水与油田污水混注管线内结垢的问题得到解决。

参考文献

[1] 王道富. 鄂尔多斯盆地特低渗透油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
WANG Dao-fu. ORDOS Basin Extra-low Permeability Oilfield Development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.

[2] 马广彦.油田硫酸钡垢化学防治技术研究[J].化学清洗,2000(4):5—9.
MA Guang-yan. Study on Technology of Barium/Strontium Scale Removing in Oil Field[J]. Cleaning World, 2000(4): 5—9.

[3] 王忠辉. 油田污水回注阻垢剂的研制[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2005.
WANG Zhong-hui. The Research on Scale Inhibitor of Circular Injection Sewage in Oilfield[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2005.

[4] 曹怀山, 姜红. 纯化油田回注污水腐蚀原因分析及治理措施[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2005, 22(6): 38—40.
CAO Huai-shan, JIANG Hong. Analysis of Corrosion of Chunhua Oil Field Re-injection Water and Treatment[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2005, 22(6): 38—40.

[5] SY/T 5673—93, 油田用防垢剂性能评定方法[S].
SY/T 5673—93, Evaluation Method for Behavior of Inhibitor Used in Oil Field[S].

[6] 张现斌. 硫酸钡(锶)阻垢剂的合成与应用性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2007.
ZHANG Xian-bin. The Synthesis and Application Performance of Scale Inhibitor of Barium Sulfate (Sr) [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2007.

[7] SY/T 5523—2000, 油气田水分析方法[S].
SY/T 5523—2000, Analysis for Oil and Gas Field Water [S].

[8] 周厚安. 油气田开发中硫酸盐垢的形成及防垢剂和除垢剂研究与应用进展[J].石油与天然气化工, 1999, 28(3): 212—214.
ZHOU Hou-an. The Formation of Sulfate Scale in Oil and Gas Field and the Trend of Development and Application of Scale Inhibitor and Detergent[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 1999, 28(3): 212—214.

[9] 王小琳, 武平仓, 韩亚萍, 等. 华池油田结垢机理及其防治技术效果分析[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 73—75.
WANG Xiao-lin, WU Ping-cang, HAN Ya-ping, et al. Scaling Mechanism and Effect of Its Prevention Techniques in Huachi Oilfield[J]. PGRE, 2003 , 10 (1) : 73—75.

[10] 朱谦雅. 油田水管线结垢机理及阻垢缓蚀新技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
ZHU Qian-ya. A Study on Scale Mechanism and the Technology of Antiscale and Corrosion Inhibition in the Oil Field Water Pipeline[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.

[11] 李学文. 吉林油田英台注水系统结垢与腐蚀防治对策[J].石油化工腐蚀与防护, 2005, 22(2): 34—36.
LI Xue-wen. Measures for Preventing Fouling and Corrosion in Waterflooding System of Yingtai Oil Production Plant of Jilin Oil Field[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2005, 22(2): 34—36.

[12] 孙莉, 江元汝, 许启明. 坪桥油田采油管道结垢机理与防治措施[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(3): 232—234.
SUN Li, JIANG Yuan-ru, XU Qi-ming. Scaling and It's Prevention Measure for Pipeline in Pingqiao Oilfield[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(3): 232—234.

[13] KESSER S M. Method of Inhibiting Corrosion in Aqueous Systems. US, 5256332[P]. 1993-10-26.

[14] 柳鑫华, 律文智, 孔毅超, 等. 聚环氧琥珀酸在阻垢与缓蚀方面的研究进展[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 83—86.
LIU Xin-hua, LYU Wen-zhi, KONG Yi-chao, et al. The Study Progress of PESA in Scale-Corrosion Inhibition[J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 83—86.

[15] 王晓云, 姚拉拉, 刘瑛, 等. 几种阻垢剂对硫酸钙垢的抑制作用[J].工业水处理, 2012, 32(10): 72—74.
WANG Xiao-yun, YAO La-la, LIU Ying, et al. Inhibition of Some Scale Inhibitors on Calcium Sulfate Scale[J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(10): 72—74.

[16] 朱义吾, 赵作滋, 巨全义, 等. 油田开发中的结垢机理及其防治技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
ZHU Yi-wu, ZHAO Zuo-zi, JU Quan-yi, et al. Scaling Mechanism and Its Prevention and Control Technology in Oilfield Development[M]. Xi′an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1995.