

阿尔油田集输系统结垢机理与防治措施研究

王颖¹ 黄启玉¹ 邓心茹¹ 徐永峰²

1. 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室 石油工程教育部重点实验室
城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249;
2. 中国石油华北油田二连分公司, 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要:阿尔油田生产过程中,集输系统存在严重的结垢腐蚀情况,直接影响了油田的安全生产。针对这一问题,基于集输系统各水样及垢样分析结果,利用实验室动态环道实验装置对油田水结垢影响因素进行比较全面的实验研究。考察不同温度、不同离子浓度、不同流速下的结垢行为,分析结垢原因,并结合阿尔油田实际情况,总结常用的化学和物理防垢方法及工艺。通过现场试验,确定了添加阻垢剂与超声波除垢仪相结合的防垢方案。研究结果为阿尔油田解决结垢问题提供了依据。

关键词:油田;集输系统;结垢;机理;防垢

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2017.01.010

0 前言

近年来,随着注水采油,排水采气等油田开发新工艺的日益兴起,油井采出液含水率越来越高。由于油田水大多成分复杂,含有大量的有机物和细菌,并有较高硬度和矿化度,很容易使油田各个部分出现结垢问题。阿尔油田自投产以来,结垢腐蚀情况非常严重,阿尔油田联合站外掺水环线平均结垢厚度达到14~24 mm/a;站内换热器管束更换速度为1台/a;掺水泵清垢周期为10~15 d。设备与管道的结垢腐蚀问题严重影响到阿尔油田的运行安全,并造成巨大经济损失。本文对阿尔油田集输系统结垢机理及防治措施进行研究,以现场油田水的水质分析结果为基础,以动态环道实验为研究手段,揭示集输系统的结垢机理,探究油田水的结垢趋势,研究有效的阻垢除垢方法,为解决阿尔油田集输系统结垢问题提供技术保障。

1 水质及垢样分析

选取阿尔油田三个水源井、三条站外环线及联合站

内三台设备为研究对象,采用石油天然气行业标准SY/T 5523-2000《油气田水分析方法》对指定位置的水样进行水质分析,具体结果见表1。

水质分析结果表明:

1) 阿尔油田三个水源井 SO_4^{2-} 含量较高(262.7~325.2 mg/L);三条环线回液 HCO_3^- 浓度较大(2 386~3 943 mg/L),且SRB(硫酸盐还原菌)含量超标;站内集输设备前含有较多 Ca^{2+} (481~722.6 mg/L)、 Cl^- (4 778~4 875 mg/L)且SRB含量超标。

2) 根据SY/T 5523-2000《油气田水分析方法》中之7.5节“油田水分类(苏林分类)”进行分类,阿尔油田集输系统水型可分为两种:碳酸氢钠型、氯化钙型。从理论上分析,这两种水型的水混合易生成碳酸钙垢。

3) SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 浓度较大,初步分析垢样中可能含有少量的 CaSO_4 及 MgCO_3 。

根据金属化学分析方法(容量法)进行水溶液及加酸实验对掺水泵中取得的垢样进行组分分析,具体结果见表2。

收稿日期:2016-07-12

作者简介:王颖(1989-),女,河北沧州人,硕士研究生,主要从事石油与天然气工程研究工作。

溶液掺混后温度有很大变化,较大的温差造成了溶液离子平衡破坏^[13],使集输系统结垢严重。

根据阿尔油田结垢现状,基于采集的油田作业条件

配置油田水,分别研究联合站内换热器、三相分离器及掺水泵的结垢速率随温度的变化规律,研究温度的实验条件见表 3,结垢速率与温度的关系见图 2。

表 3 研究温度的实验条件汇总表

取样地点	离子浓度 / (mol · L ⁻¹)			溶液温度 /℃	管壁温度 /℃	流速 / (m · s ⁻¹)	pH 值
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻				
换热器	0.002 22	0.018 1	0.014	40	50、60、70	1	7.6
分离器	0.001 48	0.012	0.014	42	50、58、65	1	7.7
掺水泵	0.000 51	0.012	0.012	42	50、58、65	1	7.7

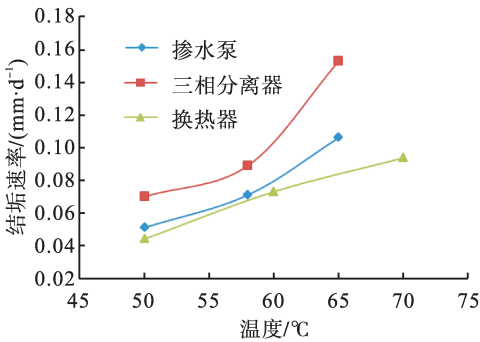


图 2 温度对结构速率的影响

从图 2 看出,在三个设备工作温度范围内,随着换热表面温度升高,站内设备结垢速率明显加快。其中掺水泵的结垢速率范围为 0.062 ~ 0.106 mm / d,三相分离器

的结垢速率范围为 0.071 ~ 0.153 mm / d,换热器的结垢速率范围为 0.058 ~ 0.094 mm / d。如果将工作温度降低到 50 ~ 60 ℃,该结垢速率大大降低。

2.3.2 流速对结垢的影响

关于流速对结垢的影响,目前没有统一结论。Bansal B^[14]和 Watkinson A P^[15]研究表明流速的提高可以抑制结垢,因为流速提高,增大了流体对结垢沉积物的切应力,从而加剧了垢质表面的脱除。而 Elgi H^[16]和 Qingfeng Yang^[17]等人认为,流速提高能促进结垢生长,因为流速的提高可以使离子扩散系数增大。

本文用阿尔油田联合站内换热器的水质分析结果作为实验条件,研究结垢速率随流速的变化,研究溶液速率实验条件见表 4,结垢速率与溶液速率的关系见图 3。

表 4 研究溶液速率的实验条件汇总表

取样地点	离子浓度 / (mol · L ⁻¹)			溶液温度 /℃	管壁温度 /℃	流速 / (m · s ⁻¹)	pH 值
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻				
换热器	0.002 22	0.018 1	0.014	42	60	0.5、0.72、1	7.6

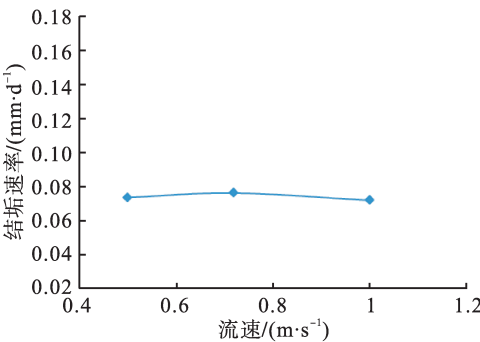


图 3 溶液速率对结垢速率的影响

从图 3 看出,随着溶液流速的变化,结垢速率范围为 0.072 ~ 0.076 3 mm / d 没有明显变化。这是因为流速对结垢过程有两方面的作用,一方面流速增大,流体对实验管段的剪切作用加强,剥蚀率增大;另一方面流速增

大,单位时间内通过实验管段热边界层的颗粒垢的量增加,污垢沉积率增大。因此最终的结垢速率需要考虑两方面的共同作用^[18]。

2.3.3 离子浓度对结垢的影响

根据换热器的水质分析结果配置相应实验用水,研究结垢速率与离子浓度的关系,研究易结垢总离子浓度的实验条件见表 5。结垢速率与总离子浓度的关系见图 4。

从图 4 看出,在一定范围内随着溶液浓度的增加结垢速率增大,但当溶液中结垢离子浓度增至一定值后,随着溶液浓度的增大结垢速率减小,这是因为当离子浓度增大到一定值后, CaCO₃ 会因过饱和而在溶液中析晶,析出的晶粒又作为晶核,使大量的 CaCO₃ 二次成核结晶析出,在流体的冲刷作用下导致壁面上的成垢离子减少,结垢速率相应降低^[18]。

表 5 研究离子浓度的实验条件汇总表

配置水样	离子浓度 / (mol · L ⁻¹)				溶液温度 /℃	管壁温度 /℃	流速 / (m · s ⁻¹)	pH 值
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	总离子浓度				
换热器水样	0.002 22	0.018 1	0.014	0.034	40	60	1	7.6
2 倍浓度配置	0.004 44	0.036 2	0.028	0.069	40	60	1	7.6
3 倍浓度配置	0.006 66	0.054 3	0.042	0.103	40	60	1	7.6

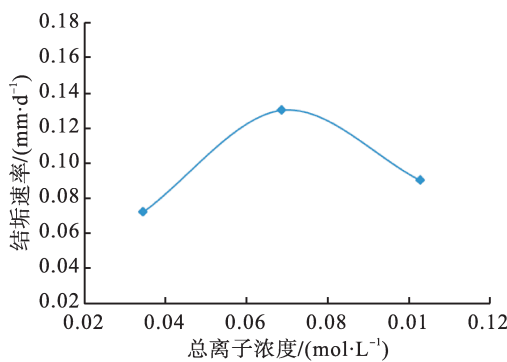


图 4 离子浓度对结垢速率的影响

3 防垢措施

目前,国内外防垢方法有很多,主要分为化学法和物理法。化学法是利用化学药剂的溶解性或者螯合作用阻止垢的生成;物理法是对油田水进行磁场或电场方面的处理以及采用超声波,通过物理仪器的功能抑制垢的形成。

3.1 化学防垢

阿尔油田集输系统目前使用的化学防垢方法为添加化学阻垢剂,通过阻止无机盐如 CaCO₃、CaSO₄ 等在管线壁面上结晶沉淀,达到防垢的目的。添加化学阻垢剂时需要注意到以下几点^[19]:

- 1)阻垢效果的测定。通过沉淀重量法或成垢离子平衡法来测定阻垢剂的阻垢效果。
- 2)阻垢剂的配伍性实验。注入油田水中的试剂不只阻垢剂,还可能有缓蚀剂、破乳剂等,需要进行配伍性实验研究,确定最佳配伍量。
- 3)阻垢剂的投加方式。阻垢剂应投加在结垢部位前,投入后需进行现场监测。

为研究阻垢剂对阿尔油田集输系统的阻垢效果,测试了油田现场阻垢剂不同浓度下阻垢效果,优选出阻垢剂的最佳浓度范围,并将阻垢剂与油田现场破乳剂进行配伍实验,评价阻垢剂与破乳剂两种药剂混合后的阻垢效果,得到配伍性最好的阻垢剂浓度。本文用阿尔油田联合站内换热器的水质分析结果作为实验条件研究阻垢剂与破乳剂的配伍性,实验结果见表 6。

表 6 阻垢剂与破乳剂配伍性实验结果

破乳剂浓度 / (mg · L ⁻¹)	阻垢剂浓度 / (mg · L ⁻¹)	平均结垢速率 / (mm · d ⁻¹)	阻垢率 / (%)
0	0	0.072	0
0	20	0.016 4	77.3
0	25	0.018 8	74.0
0	30	0.012 9	82.2
65	20	0.012 5	82.8
65	25	0.022	69.7
65	30	0.013	81.8

从表 6 看出,单独使用阻垢剂时,浓度为 30 mg/L 的阻垢剂阻垢效果最佳,阻垢率达到 82.2%;当阻垢剂与破乳剂共同使用时,浓度为 20 mg/L 的阻垢剂阻垢效果最佳,阻垢率达到 82.8%,因此确定阻垢剂添加浓度为 20 mg/L。

3.2 物理防垢

3.2.1 磁场防垢

磁防垢技术投资小、效率高、无污染。主要是通过强磁场的作用,使油水中水分子及离子等产生取向运动,改变水的电荷状态,从而降低阴阳离子结合成粗大粒子的概率。磁场还可以改变晶核的生成速率及晶体生成过程,水中微晶增多,不容易在金属表面结垢,从而达到防垢的目的^[20-21]。但复杂的水系统给磁防垢的研究带来很大困难,在磁防垢机理方面还需深入探讨。

3.2.2 电场防垢

电场防垢技术适用于任何类型的管材,安装施工方便。随着电子工业的快速发展,国内外电场防垢技术分为静电场、电流场、交变电场三种类型^[22]。关于静电场防垢机理,全贞花等人^[23]利用污垢热阻动态监测装置进行了高压静电抗垢实验。经高压静电处理后,其晶体形态发生了变化,壁面的附着力变小,从而达到防垢效果。关于电流场防垢机理,何俊等人^[22]研究认为向水体施加直流电时,会产生微电解电场,这种电场在常温下增加水的溶解能力,高温下使水垢形状变松散达到防垢效果。关于交变电场防垢机理,研究人员初步探讨认为,静电斥力作用和晶体畸变作用减少了垢的沉积^[24]。然

而电场防垢对各方面的参数匹配有一定要求,否则不能取得良好的防垢效果。

3.2.3 超声波防垢

超声波防垢操作简单,效率较高,不污染环境。主要是利用超声波在管道设备中产生的剪切力,使垢的附着力降低并通过改变垢的物理形态,将形成的垢微粒粉碎脱落进入管输介质,达到防垢目的^[25-26]。

针对阿尔油田集输系统结垢问题,探究了超声波除垢仪的阻垢效果,在阿尔联合站掺水泵出口汇管、总机关1#掺水环线、两台换热器进口管线各安装了1台超声波除垢仪。超声波除垢仪安装后,有效缓解站外管网结垢情况,各掺水环线压力减小,降低了动力能耗,确保了系统运行安全。

4 结论

1)通过对阿尔油田集输系统的水质分析和垢样分析,发现水质中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等易结垢离子含量较高,确定垢样是碳酸盐及含铁腐蚀物,其主要成分为碳酸钙。

2)利用实验室动态环道实验装置对油田水结垢影响因素如温度、流速、离子浓度进行了实验研究,其中温度对结垢过程影响最大,当三相分离器工作温度从65℃降低到58℃时,结垢速率减小42%;溶液浓度影响次之,由于 CaCO_3 二次成核结晶的作用,随着溶液浓度的增加,结垢速率先增大后减小;流速对结垢的影响最小,其影响结垢需要考虑到剥蚀率和沉积率的双重作用,本次实验中随着流速的改变,结垢速率没有明显变化。

3)总结了目前常用的物理、化学防垢方法,推荐阿尔油田采用超声波防垢和添加阻垢剂共同作用的防垢方法,并通过阻垢实验和现场试验表明,当阻垢剂质量浓度为20 mg/L时,阻垢率为82.8%,与破乳剂配伍性最好。

参考文献:

- [1] 路遥,陈立滇. 油田水结垢问题[J]. 油田化学, 1995, 12 (3): 281-286.
Lu Yao, Chen Lidian. Scaling Problems of Oilfield Water [J]. Oilfield Chemistry, 1995, 12 (3): 281-286.
- [2] 邢晓凯,荆冬峰. CaCO_3 结垢过程控制机理分析[J]. 热能动力工程, 2007, 22 (3): 336-339.
Xing Xiaokai, Jing Dongfeng. An Analysis of the Mechanism Governing the Control of CaCO_3 Scale Formation Process [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22 (3): 336-339.
- [3] Andritsos N. Calcium Carbonate Deposit Formation Under Isothermal Conditions [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1996, 74 (6): 911-919.
- [4] 蒋伟,郑云萍,梁光川. 陆梁油田作业区生产系统结垢机理研究[J]. 石油与天然气工程, 2005, 34 (6): 516-519.
Jiang Wei, Zheng Yunping, Liang Guangchuan. A Research of Scale Deposit Mechanism on Production System, Job Region of Luliang Oilfield [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2005, 34 (6): 516-519.
- [5] 贾红育,曲志浩. 注水开发油田油层结垢机理及油层伤害[J]. 石油学报, 2001, 22 (1): 58-62.
Jia Hongyu, Qu Zhihao. Formation Scaling Mechanism and the Related Formation Damage of Waterflooding Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22 (1): 58-62.
- [6] 王兵,李长俊,朱伟,等. 结垢及除垢技术在管道中的应用研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2008, 25 (1): 28-30.
Wang Bing, Li Changjun, Zhu Wei, et al. Application of De-Fouling Technology in Pipelines [J]. Corrosion and Protection in Petrochemical Industry, 2008, 25 (1): 28-30.
- [7] 蒋官澄,马先平,纪朝凤,等. 注水系统结垢趋势预测及影响因素研究[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29 (2): 49-52.
Jiang Guancheng, Ma Xianping, Ji Chaofeng, et al. Scaling Prediction in Waterflood System and Its Implication [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29 (2): 49-52.
- [8] 董世涛. 油田管道结垢治理技术分析[J]. 科技创新与应用, 2013, (26): 76-78.
Dong Shitao. Technical Analysis of Scale Management in Oil Pipeline [J]. Technology Innovation and Application, 2013, (26): 76-78.
- [9] Kim W T, Cho Y I. Experimental Study of the Crystal Growth Behavior of CaCO_3 Fouling Using a Microscope [J]. Experimental Heat Transfer, 2000, 13 (2): 153-161.
- [10] Brahim F, Augustin W, Bohnet M. Numerical Simulation of the Fouling Process [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42 (3): 323-334.
- [11] Sheikholeslami R. Calcium Sulfate Fouling-Precipitation or Particulate: A Proposed Composite Model [J]. Heat Transfer Engineering, 2000, 21 (3): 24-33.
- [12] 陈永昌,马重芳,邢晓凯. 换热表面结垢过程及机理的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2005, (增刊1): 86-89.
Chen Yongchang, Ma Chongfang, Xing Xiaokai. Experimental Study on Fouling Process and Mechanism on Heat Transfer Surface [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, (S1): 86-89.

- [13] 舒 勇,熊春明,张建军. 高含水期油田集输系统腐蚀结垢原因及综合防治技术[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010,22(1):67-70.
Shu Yong, Xiong Chunming, Zhang Jianjun. Influence Factors of Corrosion and Scaling and Preventive Measures for Gathering and Transporting Systems in High Water Containing Oilfield [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22 (1): 67-70.
- [14] Bansal B, Chen X D, Muller-Steinhagen H. Analysis of Classical Deposition Pate Law for Crystallisation Fouling [J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47 (58): 1201-1210.
- [15] Watkinson A P, Martinez O. Scaling of Heat Exchanger Tubes by Calcium Carbonate [J]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97 (4): 504-508.
- [16] Elfil H, Hannachi A. Reconsidering Watter Scaling Tendency Assessment [J]. AICHE Journal, 2006, 52 (10): 3583-3591.
- [17] Yang Qingfeng. Investigation of Induction Period and Morphology of CaCO_3 Fouling on Heated Surface [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57 (6): 921-931.
- [18] 张兵强,李 云,徐志明. CaCO_3 析晶污垢成垢过程影响因素的实验研究[J]. 东北电力大学学报,2008,28(1): 49-54.
Zhang Bingqiang, Li Yun, Xu Zhiming. Experimental Study of Factors Influencing Fouling Period of CaCO_3 Scaling [J]. Journal of Northeast Dianli University (Natural Science Edition), 2008, 28 (1): 49-54.
- [19] 舒 干,邓 皓,王蓉沙. 油气田防垢技术与应用[J]. 油气田地面工程,1996,15(4):40-43.
Shu Gan, Deng Hao, Wang Rongsha. Technique and Application of Oil and Gasfield Antiscaling [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 1996, 15 (4): 40-43.
- [20] 伍家忠,刘玉章,韦 莉,等. 西峰油田注入水磁处理防垢技术[J]. 石油勘探与开发,2010,37(4):490-493.
Wu Jiazhong, Liu Yuzhang, Wei Li, et al. Scale Inhibition in Injection Water with Magnetic Treatment in Xifeng Oil-field [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (4): 490-493.
- [21] 杨祖荣. 浅谈换热器表面的成垢和控制方法[J]. 化学工程,1991,9(2):1-5.
Yang Zurong. Comments on Fouling and Its Controlling Method of Heat-Transfer Surface [J]. Chemical Engineering, 1991, 9 (2): 1-5.
- [22] 何 俊,赵宗泽,李跃华,等. 物理方法除垢阻垢技术的研究现状及进展[J]. 工业水处理,2010,30(9):5-9.
He Jun, Zhao Zongze, Li Yuehua, et al. Research Status and Progress in Scale Inhibition and Removal by Physical Technology [J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30 (9): 5-9.
- [23] 全贞花. 碳酸钙于换热表面结垢与物理抗垢的实验及机理研究[D]. 北京:北京工业大学,2007.
Quan Zhenhua. Experiment and Mechanism Research on Calcium Carbonate on Heat Transfer Surface Fouling Resistance and Physical Scale [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [24] 柴天禹. 高频电场处理水的试验研究[J]. 水处理技术, 1997,23(4):222-225.
Chai Tianyu. Studies on Water Treatment Test by High-Frequency Electric Field [J]. Water Treatment Technology, 1997, 23 (4): 222-225.
- [25] 李晓莉. 超声波防垢的室内实验研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2011.
Li Xiaoli. Laboratory Experiment Study on Ultrasonic Antiscaling [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.
- [26] 刘翠芬. 超声波防垢器的原理及其应用[J]. 河南化工, 2003,(12):28-29.
Liu Cuifen. Theory and Application of Ultrasonic Antiscruster [J]. Henan Chemical Industry, 2003, (12): 28-29.