

海上油田地面生产工艺流程管道结垢研究与处理

马 亮（中海石油（中国）有限公司天津分公司，天津 300452）

摘 要：在油田生产过程中，油井产物举升到井口后进入地面工艺系统进行处理。受生产系统管道中含水、温度、压力、pH 值等因素影响，进而导致无机盐类及其他腐蚀产物会在生产管道上形成沉积，进而发生结垢现象，通过分析海上生产管道结垢的主要原理，提出相应的预防结垢和除垢方法，对海上生产管道预防结垢具有一定的现实意义。

关键词：结垢；除垢工艺；结垢原因

0 前言

在油田中常见垢包括碳酸钙垢、硫酸钙垢、硫酸锶垢和硫酸钡垢等盐类垢；碳酸亚铁、硫化亚铁、氢氧化亚铁、氢氧化铁和三氧化二铁等腐蚀产物垢。管道结垢给平台生产带来许多危害，如在井筒内结垢会引起油井产液量减少，生产管道结垢会引起管道运输能力下降、堵塞，加剧管道内部垢下腐蚀情况，影响换热器的换热效率等。因此，出现结垢情况后，要及时清理，否则随着垢的堆积，堵塞管道，直接影响管道的输送能力。

1 地面生产管道结垢现状分析

渤海某油田油井 A17 井在生产过程中产液由 350m³/d 逐渐下降到 318m³/d，井口回压由 0.6MPa 逐渐升高到 1.9MPa，生产数据见表 1。

针对这一现象，以油嘴为节点分析压力变化，判断油嘴之后的生产管道存在堵塞导致该井回压上升。

通过拆解采油树出口油嘴、至生产管汇单向阀、部分管段发现管线内存在结垢现象，如图 1，导致管道直径变小引起油井回压升高，产量下降。对取出的垢样利用 X 射线多晶衍射仪进行 XRD 定性分析，垢样中结晶主体存在（Ca，Mg）CO₃，属于常见垢的类型。A17 井水质分析结果见表 2，XRD 分析结果见表 3。



图 1 A17 井油嘴下游管道弯头结垢情况

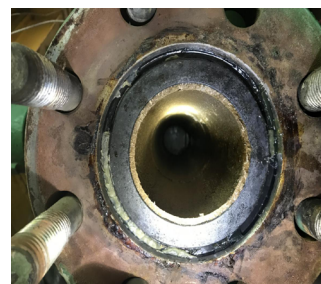


图 2 斜板隔油器入口管道内部结垢情况

结合工艺系统运行中出现的现象及作业中发现的

表 1 A17 井生产数据

井号	生产方式	油压 MPa	套压 MPa	回压 MPa	井口温度℃	含水 %	日产液 m ³ /d	日产气 10 ⁴ m ³ /d	备注
A17	ESP	3.1	1.8	1.9	62.5	59.0	318.7	0.8904	该井高温、高含水

表 2 A17 井水质分析数据

水常规分析							
检测内容	mg/L	mmol/L	mmol/%	检测内容	mg/L	mmol/L	mmol/%
Na ⁺	2314.67	100.64	44.08	Cl ⁻	2088.86	58.92	24.00
K ⁺	30.43	0.78	0.34	SO ₄ ²⁻	25.72	0.27	0.22
Mg ²⁺	87.57	3.60	3.15	HCO ₃ ⁻	3313.76	54.31	22.12
Ca ²⁺	111.13	2.77	2.43	CO ₃ ²⁻	269.91	4.50	3.67
Total	2543.80	114.16	50.0	Total	5698.25	122.77	50.0
总矿化度（mg/L）：8242.05；总硬度（H）：35.67；永久硬度（HP）：0；暂时硬度（HT）：35.67；总碱度（A）：63.31；pH 值：9.17；水型：Sodium bicarbonate							

表 3 A17 井垢样分析数据

检测项目	XRF 无标样半定量									
检测依据	JY/T016-1996			仪器名称 / 型号			X 射线荧光仪 /S4Pioneer			
检测结果	样品编号	A17 井								
	成分	C	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K
	质量百分比 (%)	11	0.1	1.7	/	/	/	0.2	0.1	/
	成分	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Ba	Pb
	质量百分比 (%)	49.71	/	0.09	2.59	0.01	/	0.88	1.04	/

问题,地面管道结垢常见于高温高含水油井采油树至生产管汇、水源井至污水系统、生产分离器或电脱水器水相出口、污水处理系统各级设备间管线及换热器盘管等,特别是在上述管道的弯头、单向阀、阀门等位置结垢尤为明显,结垢厚度要远大于直管段部分。

2 地面生产管道结垢机理分析

2.1 结晶吸附型结垢

结垢在油井产出物内析出,并逐渐附着在管道内壁上的过程,可分为以下3个阶段:①油井产出物内的成垢离子处于过饱和状态,离子析出成盐;②析出的盐分子结合形成晶体;③晶体在管道或设备内逐渐结合、堆积,产生结垢现象。

其中,成垢离子的过饱和度是结垢的主要原因;管道内壁的粗糙度和水中的杂质颗粒含量过多等对垢的结晶过程也有促进作用。

2.2 热力学条件变化对结垢的影响

2.2.1 温度变化对结垢的影响

温度升高加速垢体的生成。例如 CaCO_3 、 CaSO_4 。温度变化,也会导致细菌大量繁殖,导致管道内腐蚀加剧,导致腐蚀垢增多。

2.2.2 压力变化对结垢的影响

当压力下降时,产出物中溶解的二氧化碳从液体中出, CaCO_3 的化学反应朝着 CaCO_3 沉淀生成的方向移动,加速 CaCO_3 垢的生成;压力降低时,硫酸盐垢其在水中的溶解度降低,逐渐从水中析出,导致结垢量增大。因此,当管道内压力升高时,管道内结垢量减少。

2.2.3 pH 值变化影响

管道内 pH 值增大时, CaCO_3 垢的结垢速率加快,导致管道内碳酸钙垢增多。管道内 pH 值降低时,成垢盐类的溶解度增大,结垢趋势减弱。但是,但当 pH 值过低,会加速生产管线的腐蚀,导致管道内腐蚀结垢量的增加。

2.2.4 含盐量变化影响

碳酸盐垢和硫酸盐垢的溶解度随产出物内含盐度的增加而增大。含盐量越低,结垢趋势越小,垢量越小。此外,难溶盐类的溶解度均是随含盐量的增加先升高、再降低。

2.3 流体动力学型结垢

管道结垢与管道内流体的流速及管道结构的变化有一定关系。在管道内流体流速较快的地方,结垢情况相对较弱;管道内流体流速较慢的地方,结垢情况

相对严重。此外,管道弯头部分改变了管道内流体的流速和流向,也会加剧结垢的趋势。

2.4 细菌腐蚀型结垢

地层及油井产出物中含有硫酸盐还原菌(SRB)、腐生菌(TGB)及铁细菌(FB)等细菌。硫酸盐还原菌中的 SO_4^{2-} 常存在于地层水中,地层内高温高压环境不利于 SRB 的繁衍。但在产出物输送过程中,因为温度压力相较于地层降低,导致硫酸盐还原菌数量快速增加,加剧了井筒、地面管线、设备的腐蚀,并导致腐蚀垢产生^[1]。

3 工艺系统防垢

针对成垢机理、易成垢位置及其影响成垢的因素,针对管道成垢问题的治理就要坚持预防为主,防治结合的工作方针,做好对易结垢管段的动态监测,建立动态跟踪档案,实行分类管理、综合治理,以消除因结垢造成的减产或者生产隐患。

预防管道内部出现结垢现象,首先可以考虑采用调整生产工艺流程中的一些参数,如温度、压力和流速等。但在油田实际生产过程中,为达到工艺流程的处理效果,这些参数需要满足工艺流程运行要求是不能改变的,或者在其可调节范围内对防垢没有效果。因此控制平台地面工艺流程结垢主要是连续加注防垢剂、工艺流程的优化。

3.1 化学法防垢

化学防垢主要通过化学方法将垢物溶解清除,针对不同的垢物选择不同的化学试剂。本平台常用的防垢剂包括缩聚磷酸盐、膦酸盐、氨基多羧酸盐,在使用过程中需要每年对防垢剂效果进行第三方评价,定期进行药剂的评选,以使防垢剂效果达到最佳。

3.2 优化工艺流程

地面工艺管线进行配管时应选择合理走向,并减少弯头、变径管件使用量,降低因压力波动的影响。综合考虑易结垢位置、结垢点流程压力,选择合理加药点位置。

3.3 做好结垢监测

通过生产动态分析、现场直接观察、管道短节、结垢挂片等方式,系统性做好结垢及防垢情况监测,做好结垢的预防、及时处理生产中出现的结垢问题,针对不同结垢位置及结垢情况采取有效的除垢措施。

4 工艺系统除垢

突出预防为主的同时,要坚持防治结合。在管道内部产生垢后,通过一定的处理措施,尽可能消除已

经产生的垢或者减少管道内的垢,以降低结垢所带来危害后果和损失。

4.1 人工手动除垢

对于便于拆卸的管线、管件、阀门结垢后,可利用管线材质与结垢物热膨胀系数不同,拆卸后采用外加热法与机械震击相结合的方式结垢物清理,适用于可在线拆卸或者拆卸后不会引起停产的管件、阀门、长度相对较短的管线。

4.2 酸洗除垢

是一种化学除垢方式,目前常用酸为氨基磺酸。酸洗除垢时先根据结垢位置建立循环,首先进行水洗、碱洗清除系统内部的附着的油膜,之后根据清洗系统容积在清洗槽内加入缓蚀剂,自循环均匀后,注入氨基磺酸酸液进行循环酸洗,同时酸洗循环和酸液浸泡交替进行以便达到更好效果,酸洗完成后利用氢氧化钠、清水进行中和系统内的残余酸液,避免对管线造成腐蚀。酸洗除垢具有作业费用低、实施效率高、除垢效果好等特点,属于被动式除垢,需要周期性如每年度酸洗一次,在海上油田污水系统、注水系统除垢时使用比较普遍。

4.3 电磁防垢除垢仪除垢

基于变频共振、活性极化理论而开发的电磁防垢除垢工艺技术,采用管道外壁缠绕安装方式,两组线圈同时输出,形成复合电磁场,改变垢结晶结构和特性,将致密紧凑的硬垢变成了稀疏松散的软垢,在介质流动状态下不易附着于罐体、管道等内壁,从而达到防垢除垢的效果。具有不受安装位置限制、无需停产,运行安全、可靠,操作简单、易维护等特点,根据电镜扫描结果显示,对管线内壁产生的钙镁垢、钡锶垢等具有良好的防治效果,可应用于高压注水、油井产出液等流体介质。

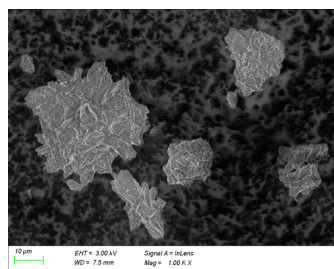


图3 未经电磁

处理放大 1K 倍

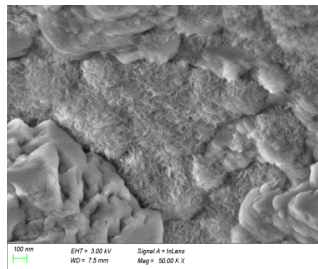


图4 未经电磁

场处理放大 50K 倍

图3为未经电磁场处理,放大 1K 倍的电镜照片,垢颗粒整体不规则,呈球状,结构紧凑;图4为未经电磁场处理,放大 50K 倍的电镜照片,整体表面呈放

射状。图5为电磁场处理后,放大 1K 倍的电镜照片,垢颗粒整体规则,呈长条状,结构松散;图6为电磁场处理后,放大 50K 倍的电镜照片,不规则附着物的结构与垢整体结构完全不一样。

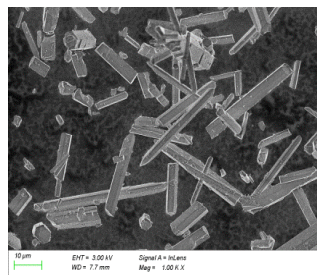


图5 电磁

处理后放大 1K 倍

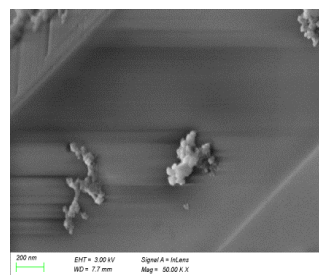


图6 电磁

处理后放大 50K 倍

4.4 量子管通环除垢

量子管通环通过超精微振动波打散水的大分子团,增加水的溶解性;同时改变垢质的微观结构,使表面由针尖锯齿状变圆润,使垢不易吸附在管壁上,在超精微震动波的作用下阻止钙离子与阴离子的结合,达到阻垢防垢的功效。当量子管通环安装在管道上,钙离子不再沉积,老垢逐渐溶解在水中,水中钙离子浓度会逐渐上升,起到阻防垢的作用。

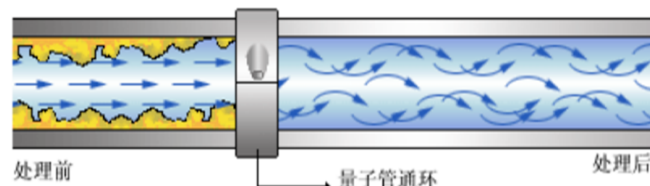


图7

5 结论

①海上平台地面管线结垢的主要原因包括:a 产出物不配伍;b 产出物生产及处理过程中热力学条件的变化;c 垢在管线内结晶析出;d 管道内径弯头的影响;e 管道内因细菌导致的腐蚀等;②海上平台管线结垢的预测需要考虑多方面的因素,才能精准的选择防垢措施;管道结垢是材料、环境、结构共同作用的结果,只有将三者综合考虑,才能有效预防管道结垢,将结垢降低至最低限度;③海上平台管线的清垢需要根据的实际情况选择,目前最有效的清垢技术为化学防垢技术,物理防垢方法在实际运行过程中会受到多种因素的影响,存在局限性。

参考文献:

- [1] 闫艳. 采出水结垢机理及趋势预测研究 [M]. 重庆: 装备环境工程, 2021:101-106.