

普光气田集输管道清管周期优化

赵果¹

摘要：长时间运行的湿气管道，会造成缓蚀剂涂膜破坏、腐蚀速率增加、管道输送效率降低，影响集输管网的安全高效运行。为提高系统效率并减缓腐蚀，普光气田对集输管道内壁定期进行清管和批处理涂膜作业，然而频繁地进行清管和批处理作业将影响气田的产气量，同时还增加现场操作人员的劳动强度和生产成本。通过对油溶性缓蚀剂的失效规律进行分析，并结合气田腐蚀数据，将清管周期优化为35 d，在有效控制管道内腐蚀速率的前提下，降低了清管作业费用，减少了管线停运时间，取得了显著的经济效益，并保障了集输系统的平稳运行。

关键词：普光气田；集输管道；清管；缓蚀剂；腐蚀

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.10.017

The Optimization of the Pigging Period Scheme of the Transportation Pipeline in Puguang Gasfield

Zhao Guo

Abstract: If the pigging period is too long, the inhibitor coating will be destroyed, causing the increase of the corrosion speed and the reduction of the efficiency of the gathering and transportation pipeline system, which will threaten the safety and the efficiency of the pipeline system. To improve the efficiency of the gathering and transportation pipeline system and to reduce the corrosion speed, the inner wall of the gathering and transportation pipeline should be cleaned regularly and the batch coating is carried out. If the pigging operation and the batch coating is carried out too frequently, the total amount of natural gas will be reduced and the production cost will rise up. At the same time, the intensity of labor will be raised. Through the failure analysis of the oil soluble corrosion inhibitor and the corrosion data, the pigging cycle is optimized for 35 days. Under the premise of the effective control of the corrosion rate of pipeline, we can reduce the cost of the pigging operation, shorten the period of the pipeline outage, bringing significant economic benefits and guaranteeing the smooth operation of the gathering and transportation pipeline system.

Key words: Puguang Gasfield; gathering and transportation pipeline system; the pigging operation; corrosion inhibitor; corrosion

普光气田集输管线为气液混输湿气管道，在湿气集输过程中，随着运行压力和温度的下降，天然气的水露点也不断上升，从而析出冷凝水；同时，随着气田不断开发，地层边底水将陆续采出，导致集输管线中产生液体，特别是类似于普光气田的复杂山地集输管道，液体将聚积在管线的低处。由于上述原因，管道长时间连续运行会导致管道内腐蚀产物、固体沉积物不断增多，缓蚀剂涂膜逐渐失效，腐蚀速率显著增加^[1-2]。该油田集输系统防腐工艺采用抗硫管材+缓蚀剂+防腐涂层+阴极保护+腐

蚀监测+智能清管的联合技术。

缓蚀剂预膜及批处理工艺是指投产前进行缓蚀剂预涂膜，投产后进行定期批处理，在集输管道内形成保护膜，使集输系统腐蚀处于受控状态，然而频繁地进行清管和批处理作业将影响气田的产气量，同时还增加现场操作人员的劳动强度和生产成本^[3-4]。目前气田集输管道批处理缓蚀剂为油溶性缓蚀剂，清管与批处理周期为30天。通过对油溶性缓蚀剂的失效规律进行分析，并结合气田腐蚀数据，以期估算出最长的清管周期。

¹中原油田普光分公司

1 油溶性缓蚀剂失效规律

1.1 油溶性缓蚀剂涂覆及流动过程分析

油溶性缓蚀剂作用机理是：靠化学键的表面极性吸附，使缓蚀剂的有效成分依次均匀地吸附在管道内壁的金属表面上，从而形成一层完整致密的化学保护膜；当缓蚀剂与柴油混合物涂覆在管壁表面后，缓蚀剂的有效成分与金属材料发生化学吸附，位于涂膜的底层，而缓蚀剂主体成分与柴油混合物位于涂膜的中上部分（图1）。

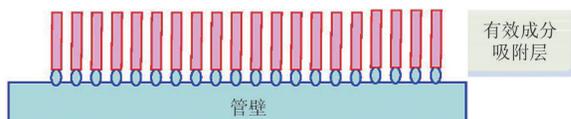


图1 缓蚀剂有效成分作用机理示意图

由于缓蚀剂涂膜通常控制在微米量级，而且油溶性涂膜的黏度较大（远大于气相），所以一般情况下认为油溶性缓蚀剂在管底积聚液的流动处于层流子层区。缓蚀剂管道底部速度分布如图2所示。

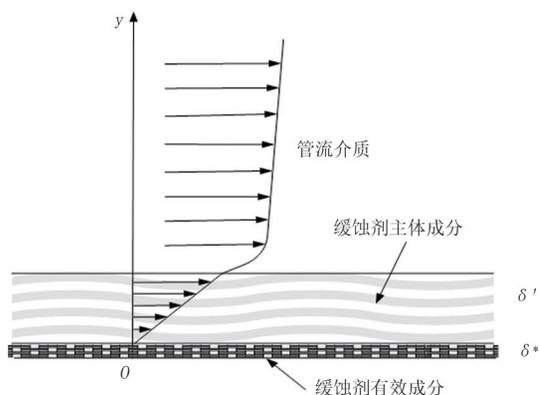


图2 缓蚀剂管道底部速度分布示意图

缓蚀剂涂膜流动时，远离管道起点位置处可得到后方来流补充，厚度减小较缓慢，近似用下式表示

$$\delta(x,t) = \begin{cases} \frac{x \cdot \mu}{t \tau_w} & x < \delta' \frac{\tau_w}{\mu} t \\ \delta' & x \geq \delta' \frac{\tau_w}{\mu} t \end{cases} \quad (1)$$

式中： δ 为可剪切流动部分缓蚀剂膜厚度， μ m； τ_w 为管道内壁剪切应力，Pa； x 为管道距起点位置，m； t 为吹扫时间，h； μ 为缓蚀剂黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

针对不易流动部分的缓蚀剂涂膜流动过程进行分析认为，这类较稳定的缓蚀剂涂膜的失效主要源于涂层与主流介质间的分子浓差扩散，有

$$u(y,t) = c_0 \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\beta_n^2 a^2 t) \cos(\beta_n y) \quad (2)$$

式中： $\beta_n = \pi/2 + n\pi$ ， C_n 为系数； y 为与管壁距离。

综合以上两式，油溶性缓蚀剂涂膜流动方程简化为

$$\delta(t) = \frac{a_1}{t} + a_2 \exp(-bt) \quad x < \delta' \frac{\tau_w}{\mu} t \quad (3)$$

式中： a_1 为与挂片几何尺寸、缓蚀剂动力黏度、壁面剪切应力参数相关的系数； a_2 为缓蚀剂不可流动层厚度相关的系数； b 为与分子扩散系数有关的参数。

a_1 随剪切应力 τ 增大而减小， a_2 是不易流动部分初始厚度 C_0 的倍数，随剪切力 τ 增大而减小，随吸附能力增大而增大。

1.2 油溶性缓蚀剂失效测试实验

参照《油田采出水用缓蚀剂性能评价方法(SY/T 5273—2000)》打磨以及清洗挂片（图3），使用注射器往称重后的金属挂片表面添加0.12~0.13 mL（即初始厚度约100 μ m）的缓蚀剂，将挂片置入气流流速为5~7 m/s的管道，隔不同时间取出测试厚度，记录数据。



图3 管道内挂片放置图

利用公式对实验数据进行拟合，发现缓蚀剂涂膜失效速度随时间变小，涂覆结束的20 h内缓蚀剂涂膜急剧减小至10 μ m左右，之后缓蚀剂涂膜厚度变化平缓（图4）。

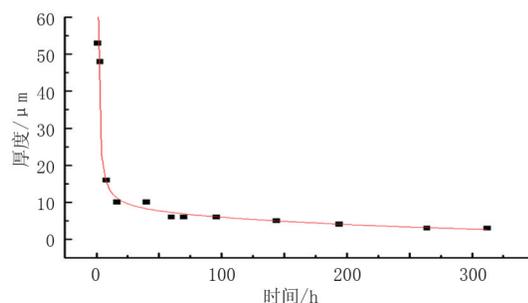


图4 缓蚀剂涂膜厚度随时间变化规律

1.3 油溶性缓蚀剂电化学失效规律

(1) 腐蚀电化学阻抗变化规律。将涂有油溶性缓蚀剂的腐蚀电极安装在特殊的支架上（图5），置入容器内，利用搅拌器产生强制扰动，对金属电极表面进行剪切。通过Fluent软件可以计算得到金

属表面所承受的剪切应力。实验中控制转速为 350 r/min, 可对金属表面产生 3~5 Pa 的剪切应力。

利用等效电路对不同浓度下的阻抗谱图进行拟合, 得出电化学阻抗随时间变化趋势 (图 6)。

根据图 6 可以看出, 缓蚀剂涂膜与金属界面的双电层电荷转移电阻 R_3 随时间的增加一直在减小; 缓蚀剂涂膜电阻 R_2 在开始的一段时间内减小, 之后稳定在一个范围内; 溶液电阻 R_1 变化不大。所以缓蚀剂涂膜在经受剪切冲刷的过程中, 吸附层电阻 R_3 随时间一直在减小, 而可流动的缓蚀剂主剂产生的阻抗值 R_2 先急剧减小, 但吸附层电阻 R_3 数值较大, 对防腐效果起着决定作用。



图 5 强制剪切容器内电极置放图

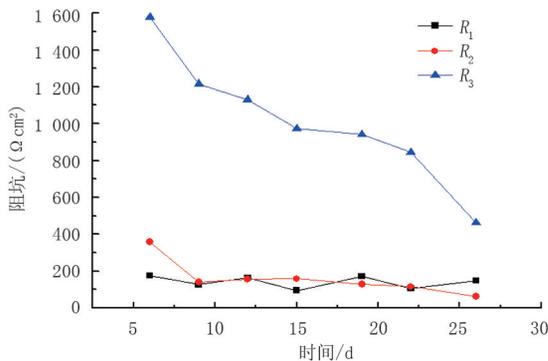


图 6 电化学阻抗随时间变化图

(2) 腐蚀电流密度变化规律。腐蚀电流密度与腐蚀速率具有一定的数值对应关系, 是评价腐蚀速率的直接指标。所以研究涂膜金属表面腐蚀电流密度随冲刷时间的变化情况, 对确定缓蚀剂涂覆周期具有决定性作用。

利用特殊搅拌设备, 控制壁面剪切强度为 5 Pa, 冲刷介质为现场采出液, 电极安装在特殊构件中, 隔不同时间取出电极, 置入相同的腐蚀环境 (pH 值为 4, 水溶性缓蚀剂浓度 600 mg/L), 利用 2273 电化学工作站, 施加扫描电压, 获得 E-log I 曲线, 并读取腐蚀电流密度数值, 最终获得腐蚀电流密度随冲刷时间的变化规律。

腐蚀电流密度代表了金属失电子数, 与腐蚀速率直接相关, 根据管道内壁金属腐蚀特点, 得出二者关系如下

$$I_{\text{corr}} = 85.238 8x \quad (4)$$

式中: x 为金属腐蚀速率。

实验中, 控制与现场近似的溶液环境, 对涂覆有缓蚀剂涂膜的金属进行冲刷实验。间隔一定的天数, 取出金属电极, 在相同的溶液环境中进行电化学特性测试, 并拟合相应的腐蚀电流密度数据, 如图 7 所示。

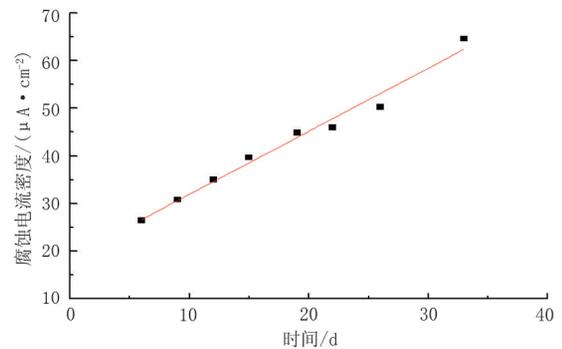


图 7 涂膜电极表面腐蚀电流密度随时间的变化曲线

从图 7 中可以看出, 腐蚀电流密度 (腐蚀速率) 随冲刷时间的延长, 呈线性规律增长。这与缓蚀剂涂膜厚度的变化规律存在差别, 也不同于常见裸露金属电极表面腐蚀变化规律。拟合公式中的系数 k 与冲刷剪切强度、缓蚀剂与金属表面吸附特性、冲刷介质性质等因素有关。

$$I = kt + I_0 \quad (5)$$

式中: I_0 为初始时刻腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; t 为时间, d; k 为系数, $\mu\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。

2 管道清管周期计算方法

由于现场腐蚀环境、剪切应力与实验室环境存在很大差异, 可以借助现场的腐蚀监测数据, 结合实验室内测试的腐蚀变化规律, 对现场腐蚀情况进行合理的预测。通过涂膜的电极表面腐蚀电流密度随冲刷时间的变化规律, 可以得出涂膜金属管壁腐蚀速率随时间的变化规律

$$x = k't + x_0 \quad (6)$$

式中: x 为腐蚀速率, mm/a; x_0 为初始时刻腐蚀速率, mm/a; k' 为系数, mm/(a · d)。

现场管道内挂片腐蚀速率为一个清管周期内的平均腐蚀速率, 对于一个涂覆周期为 T 的管道, 其平均腐蚀速率可以表达为

$$\bar{x} = \frac{\int_0^T x dt}{T} = \frac{\int_0^T (k't + x_0) dt}{T} = x_0 + \frac{1}{2}k'T^2 \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 所测试的挂片平均腐蚀速率与涂覆作业周期的平方呈线性关系, 与管道涂覆作业完成的初始时刻腐蚀速率 x_0 有关。

根据现场腐蚀挂片数据,可确定管道在目前情况下的平均腐蚀速率 \bar{x} ,根据现场允许的最大平均腐蚀速率 \bar{x}_{lim} 可计算管道的允许最大清管周期。

普光气田目前清管周期下的管线平均腐蚀速率 \bar{x} 为0.035 mm/a;最小腐蚀速率 x_0 为0.002 7 mm/a,可近似认为是管道初始时刻腐蚀速率; \bar{x}_{lim} 为0.076 mm/a;目前清管周期 T 为30 d,代入下式中,即可计算出管道的允许最大清管周期

$$T_{\text{lim}} = T \sqrt{\frac{\bar{x}_{\text{lim}} - x_0}{\bar{x} - x_0}} = 45 \quad (8)$$

从安全角度考虑,除以1.3的安全系数,得出最长清管周期为

$$T_{\text{lim}} = 45 \div 1.3 = 34.615 \approx 35(\text{d})$$

3 结论

通过对普光气田集输管道批处理用油溶性缓蚀剂涂膜失效规律进行理论分析、模型建立和实验研究可以得出,缓蚀剂涂膜失效速度随时间变小,初始时刻缓蚀剂涂膜急剧减小,而后期减小缓慢,但涂膜金属表面腐蚀电流密度(腐蚀速率)随冲刷时间的变化呈线性关系。通过实验研究与数值模拟,研究各因素对油溶性缓蚀剂涂膜失效速率的影响,并根据研究结果和现场数据综合分析,估算出最长

(上接第53页)程中运动速度得以降低,提高了清管效率,避免了清管器上下游发生窜漏的现象,降低了对管道涂层破坏的风险。

(2)轴心射流清管器可有效降低清管器的压力波动,实现平稳清管,降低对管线设备的冲击。

(3)轴心射流清管器由于旁通气体吹扫清管器前的液塞,延长了液相的分布,降低了管段持液率,有效延长了清管器下游液塞进入末端液塞捕集器的时间,降低了单位时间内进入末端分离器的液体量,减小了末端分离器的体积。

参考文献

- [1] MINAMI K. Pigging dynamics in two-phase flow pipeline: experiment and modeling[J]. SPE Production Facility, 1995, 10 (4): 225-231.
- [2] 黎洪珍,刘正雄,谢黎昶,等.湿气管道内涂缓蚀剂防腐效果评价探讨[J].石油与天然气化工,2012,41 (2): 200-203.
- [3] 喻西崇,赵金洲,郭建春,等.天然气水合物生成条件预测模型比较[J].油气储运,2002,21 (1): 20-24.
- [4] 喻西崇,吴九军.海底混输管道清管过程的数值模拟研究[J].中国海上油气,2005,17 (3): 203-208.
- [5] 邓晓辉,邓卫东,廖伍彬,等.番禺气田天然气管道积

清管周期为45天,优化为35天,比原30天延长了5天,每年可减少1.5次清管批处理作业,减少了管线停运时间,取得了显著的经济效益,并保障了集输系统的平稳运行。

参考文献

- [1] 龚金海,刘德绪,高继峰,等.普光气田集输系统综合防腐技术[J].油气田地面工程,2014,33 (3): 62-63.
- [2] 杨发平,王贵波.普光气田地面集输系统腐蚀监测与控制体系[J].天然气工业,2012,32 (1): 94-94.
- [3] 黄雪松,安思彤,陈长风.普光气田集输管材腐蚀评价及缓蚀剂加药工艺优化[J].天然气工业,2011,31 (9): 120-123.
- [4] 苏国丰,刘二喜,朱明喜.普光气田集输系统设备和管道腐蚀原因分析与防护[J].石油化工设备技术,2014,35 (1): 45-48.

作者简介

赵果:工程师,2008年毕业于西南石油大学石油工程专业,现从事天然气集输工程管理与研究工作,0818-4776725,myzhaoguo@126.com,四川省达州市通川区凤凰大道中石化达州基地,636156。

收稿日期 2015-02-04

(栏目编辑 张秀丽)

液及清管可行性分析[J].全面腐蚀控制,2010,24 (12): 40-43.

- [6] 冯书俭,庞广明,张金成.自动解堵型圆盘清管器的研制与应用[J].石油工程建设,2000 (5): 42-43.
- [7] 吕平,吴明,栗佳,等.清管器在输油管道中的运动规律研究[J].管道技术与设备,2006 (5): 42-44.
- [8] 耿岱,张仕民,刘恒,等.天然气管道速度可控清管器的设计[J].油气储运,2010,29 (9): 698-700.
- [9] 喻西崇,安维杰,吴应湘,等.海底混输管道瞬态过程中稳定平衡时间和总持液量变化规律研究[J].中国海上油气,2004,16 (6): 414-421.
- [10] 朱海山,罗小明,姚海元,等.天然气凝析液管道射流清管器清管效果分析[J].石油与天然气化工,2013,42 (6): 598-601.

作者简介

郑洪峰:硕士研究生,2016年毕业于中国石油大学(华东)石油与天然气工程专业,现主要从事燃气管道设计工作,15628839876,zheng5612@126.com,山东省济南市历下区甸柳新村1区4号,250014。

收稿日期 2015-10-09

(栏目编辑 张秀丽)