

榆林和子洲气田水套加热炉的运行与管理

刘青¹ 田喜军¹ 韩东兴¹ 高亮¹ 常霞¹

摘要：榆林气田南区 and 子洲气田使用的水套加热炉在运行过程中，逐渐暴露出腐蚀结垢严重、进加热炉单井管线布局不合理和燃烧系统缺少熄火保护等问题，造成加热炉壁厚减薄甚至穿孔、热效率降低以及安全隐患突出。针对上述问题，通过现场调研、分析日常管理漏洞，采用腐蚀监测、试剂防腐、安装隔氧除尘装置和电子除垢仪等措施，降低了加热炉在各层的腐蚀速率，使其低于国家行业标准（0.076 mm/a）；对加热炉定期清洗除垢以及合理调整进加热炉单井管线，提高了加热炉的能效，可节约燃料气5%~15%；在加热炉燃烧系统中增设熄火联锁保护，预计可将炉膛熄火引发的安全事故发生概率从 $10^{-3}/a$ 降低至 $10^{-5}/a$ ，降低加热炉的运行风险。

关键词：水套加热炉；腐蚀防护；节能增效；安全控制

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.2.025

Operation and Management of Water-jacket Heater in Yulin and Zizhou Gas Field

Liu Qing, Tian Xijun, Han Dongxing, Gao Liang, Chang Xia

Abstract: The water-jacket heaters installed in Yulin and Zizhou gas field have the problem of serious corrosion and scaling, unreasonable pipelines arrangement, lack of flameout protection, which results in thinner wall and even perforations, lower energy efficiency, and high security risks. To solve the above problems, effective measures have been taken based on the field investigation and management analysis. By using methods of corrosion monitoring, corrosion inhibitor injection, oxygen isolators and electronic scalers installation, corrosion rates of the heaters have reduced under national industry standard (0.076 mm/a). To enhance the heaters energy efficiency, regular chemical cleaning and gas pipelines rearrangement have been taken, which can save fuel gas of 5%~15%. Moreover, through flameout interlock protection installation, the contingency occurrence probability caused by flameout can be reduced from $10^{-3}/a$ to $10^{-5}/a$.

Key words: water-jacket heater; corrosion prevention; energy efficiency; safety control

集气站水套加热炉以天然气为燃料，水为换热介质，通过加热天然气确保天然气节流降压时不产生水合物堵塞管道^[1]。榆林气田南区 and 子洲气田共投运集气站27座，安装水套加热炉70台。其中投运时间超过10年的加热炉占全部加热炉的比例为35.7%，具体运行参数见表1。

榆林和子洲气田加热炉投运时间久、使用频率高，导致腐蚀严重。炉水中钙、镁离子引起的炉膛和盘管结垢，以及早期进加热炉单井管线布局不当是造成加热炉热效率偏低的主要原因。加热炉燃烧系统缺少熄火保护，存在安全隐患。

表1 加热炉参数统计

主要技术参数	四井式加热炉	八井式加热炉
额定负荷/kW	400	400/630
盘管工作压力/MPa	25	25
设计热效率/%	85	85
夏季介质运行温度/°C	60%的加热炉常温下运行，需要加热的炉体只点母火	
冬季介质运行温度/°C	30~50	
数量总计	31	39

1 存在的问题

1.1 腐蚀严重

通过对集气站加热炉的腐蚀调研，发现加热炉

¹中国石油长庆油田分公司第二采气厂

的腐蚀规律表现为壁厚减薄，然后出现点蚀甚至穿孔。以集气站使用的四井式加热炉为例，炉膛内壁、换热盘管的设计壁厚为10 mm，盘管弯头的设计壁厚为12 mm。运行5年后，壁厚检测结果表明：炉膛平均腐蚀速率为0.112 mm/a，盘管平均腐蚀速率为0.092 mm/a，弯头平均腐蚀速率为0.575 mm/a，详见图1，均超过国家行业标准（0.076 mm/a）^[2]，且以弯头腐蚀最为严重。其次，伴随结垢的出现，加热炉开始产生严重点蚀，并以斑点状腐蚀和溃疡状腐蚀为主。对洲X站2#加热炉进行红外检测后发现，2、3、4号盘管内壁各有两处中度腐蚀缺陷，如图2所示。点蚀进一步加剧则会造成腐蚀穿孔，榆X站的1#和2#加热炉均发生过炉底穿孔问题。

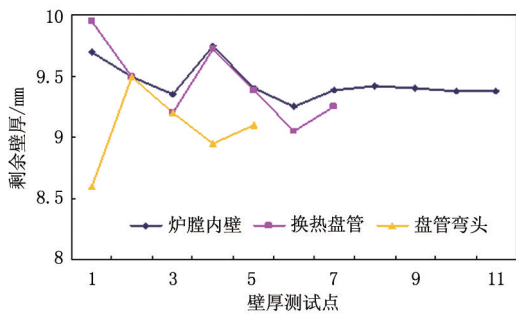


图1 壁厚测试结果

1.2 热效率偏低

加热炉热效率偏低的主要原因有两点：①结垢

严重；②进加热炉单井管线布局不当。集气站加热炉全年处于运行或备用状态，过去常用的阻垢方式是添加阻垢剂，很少进行清洗除垢，导致其结垢问题突出。经调研，炉内平均每年结垢可达1 mm，降低了换热效率。据统计，如果加热炉换热面平均结垢1~5 mm，燃料将多消耗5%~15%^[3]。

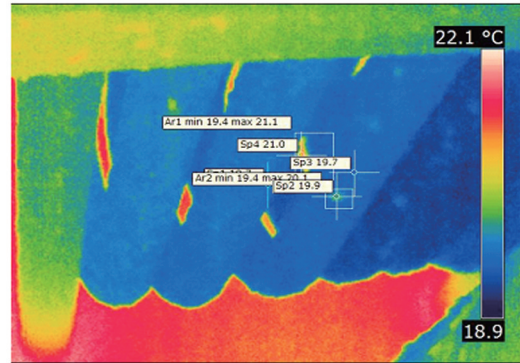


图2 洲X站2#加热炉盘管红外热像图

子洲气田自投产以来，由于缺乏对单井进站压力、产量等因素的综合考虑，造成进加热炉单井管线布局不合理，导致进入同一台加热炉的气井节流后温度差异较大。以洲Y站为例，进入1#炉的洲a井节流前后压差仅有0.8 MPa，导致节流后温度远高于1#炉的其他单井节流后温度（表2）。因此造成了外输温度偏高、管线积液加重、加热炉热能利用不合理等问题。

表2 洲Y站单井管线运行参数

井号	单井产量/ 10 ³ m ³	进站压力/ MPa	节流后压力/ MPa	节流压差/ MPa	节流前温度/ ℃	节流后温度/ ℃	节流温差/ ℃	进加热炉号	炉温/ ℃
榆a	3.567	14.1	4.9	9.2	46	16	30		
洲a	2.623	5.8	5.0	0.8	52	45	7		
洲b	5.460	17.2	5.0	12.2	42	4	40		
洲c	2.754	12.8	5.1	7.7	44	22	22		
洲d	2.335	13.6	4.9	8.7	46	20	26	1#	55
洲e	2.376	11.9	5.0	6.9	54	25	29		
洲f	1.753	10.1	4.9	5.2	49	29	20		
洲g	5.689	13	5.0	8.0	42	16	26		
洲h	0.590	8.5	4.9	3.6	25	8	17	2#	30
洲i	0.414	6.1	5.0	1.1	26	16	10		

1.3 燃烧系统存在安全隐患

对集气站进行HAZOP分析，结果表明加热炉燃烧系统存在安全隐患。当炉膛熄火时，会造成水温降低、燃料气外泄等后果。综合分析，该风险发生的可能性极小（D），但后果严重（II），评价结果落入风险矩阵表3中的黄色区域，应采取合理措施，阻止其发生或尽可能减小其发生后造成的影响。目前的控制措施为人工巡检以及水温监控报警；发现炉膛熄火时，采取手动方式关闭进气闸

阀。该方式对人为因素依赖较大，会导致风险发生时无法及时发现处理，因此存在安全隐患。

表3 风险矩阵表

可能性	严重性			
	I(灾难型)	II(严重)	III(轻度)	IV(轻微)
A(频繁)	1	2	7	13
B(很可能)	2	5	9	16
C(有时)	4	6	11	18
D(极少)	8	10	14	19
E(不可能)	12	15	17	20

2 加热炉的管理措施

2.1 腐蚀防护

(1) 开展腐蚀监测。加热炉运行过程中，采用垂直四点监测挂片实现了对加热炉的连续分层腐蚀监测。该四点监测挂片系统由四个垂直排列的挂片构成，可同时监测炉体内上部气相，下部液相上层、中层以及下层固液混相四点的腐蚀状态。加热炉检修期间，利用红外热像检测手段掌握盘管破损情况。通过红外热像仪检测到的细微温度变化，可以判断腐蚀的严重程度。当温差 $< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，有轻微缺陷； $1\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{温差} < 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，有中度缺陷；温差 $\geq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，有重度缺陷。该方法能准确给出加热炉盘管上的热点分布及大小，从而辅助制定出合理、经济的维修计划。

(2) 合理加注缓蚀阻垢剂。根据现场加热炉炉水的性质，通过室内筛选结合现场应用的方式研发出一种适合本厂的新型缓蚀阻垢剂 S2，并确定其有效加注浓度为 1.1 g/L 。为了使 S2 在炉水中达到均匀分散，采用间歇式加药，即按照“加水→加药→加水→加药”的顺序循环加注。一般在加热炉更换炉水时均需重新加注缓蚀阻垢剂。

(3) 隔氧除尘。为了减缓溶解氧和矿化物造成的点腐蚀，同时防止泥沙及灰尘进入炉体，选择榆林南区腐蚀严重的加热炉，对加水口进行改造，增加隔氧除尘装置。该装置以水蒸气为驱动力，可有效去除水中的溶解氧，降低炉膛水的氧化程度，保证隔氧效果。

(4) 漏点修补。加热炉经过长期运行后，严重的点蚀现象可能恶化造成炉体穿孔；另外，由于炉体壁厚减薄，在停炉检修期，炉体打磨作业也可能使炉体产生漏点。为了延长加热炉使用寿命，保证加热炉的安全运行，应当及时采取漏点修补措施，并确保达到补强厚度要求，加水后无渗漏现象。

2.2 改善热效率措施

2.2.1 加热炉除垢

加热炉检修时，根据炉内结垢情况，可开展机械清洗或化学清洗作业^[4]。若炉内结垢物较为疏松，利用大流量强水力冲洗可以去除炉内疏松的脏物和结垢，则采用机械清洗；若炉内结垢物较牢固，水力冲刷无法剥离，则采用化学清洗。

对于化学清洗作业，针对所调研加热炉结垢物的分析结果，研发了以缓蚀剂、浓盐酸、柠檬酸和除垢软化剂为主要组分的清洗剂。其中浓盐酸主要起渗透和除垢作用，并且可以与缓蚀剂配合使用以

减少对炉膛及换热盘管的腐蚀；柠檬酸能够沉淀金属离子，形成金属螯合物，使污垢分散悬浮。清洗时，按照“水力清洗→化学除垢→漂洗→钝化→废液处理”的步骤进行。

另外，还可以安装电子除垢仪。电子除垢仪可以发出特定频谱的射频式电磁波，使水分子排列有序，阻止钙、镁离子形成晶核产生新垢；另外电磁波还可与旧垢形成共振实现除垢功能。2010年，根据现场调研结果，选择榆林南区6座集气站共10台加热炉安装电子除垢仪，并配合隔氧除尘装置共同使用。

2.2.2 调整进加热炉单井管线

2010年，根据子洲气田各集气站单井井口温度、进站压力、日产气量、节流前后温度等参数，对6座集气站共19口气井的进加热炉管线进行了合理调整，确保进入同一台加热炉的各单井进站压力、节流后温度相近。以洲Y站为例，将洲a的管线从1#加热炉调整至进入2#加热炉。

2.3 燃烧系统改造

目前加热炉现有的燃烧保护系统为火焰探测器和水温监控报警，两者并未对炉膛熄火形成自动连锁保护^[5]。因此，建议在燃料气进气管线上安装电磁阀。控制思路为：采集火焰探测器和水温信号后，控制DO动作继电器，切断或打开电磁阀。其运行流程如图3所示。

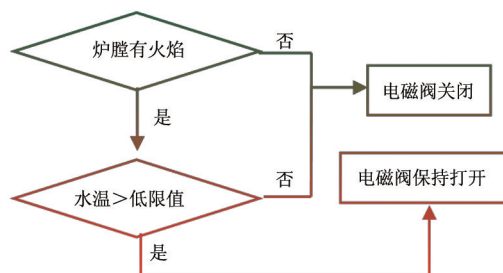


图3 熄火保护系统运行流程图

目前，榆林南区12座集气站共41台加热炉均已完成进气截断电磁阀的安装，但仍然需要人工判断，远程手动关闭，尚未形成自动连锁保护。

3 效果评价

3.1 腐蚀防护效果

选择榆Y站2#和3#加热炉，在相同工况条件下开展挂片实验，其中3#炉为未加药剂的空白炉水，2#炉加缓蚀阻垢剂S2。挂片时间为60天。实验结果表明，加入S2后，可将A3和20#钢的腐蚀速率明显降低至 0.030 mm/a 以内（图4）。

另外，选榆X站1#和2#加热炉评价安装隔氧除尘装置和电子除垢仪的应用效果。如表4所示，在

相同工况条件下,安装该装置的1[#]加热炉的腐蚀程度在四个监测点上均低于未安装该装置的2[#]加热炉,腐蚀速率平均降低83.7%,且低于国家行业标准。

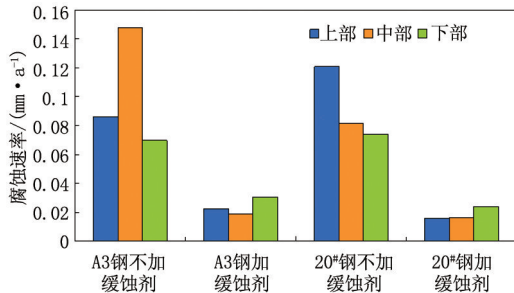


图4 缓蚀阻垢剂的缓蚀效果

表4 榆X站加热炉挂片实验数据统计

试验时间/h	挂片材质	悬挂位置	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	
			1 [#] (安装)	2 [#] (未装)
3 600	C20	气相	0.004 5	0.052 8
3 600	C20	液相上层	0.011 9	0.067 3
3 600	C20	液相中层	0.013 2	0.129 9
3 600	C20	底部液固混相层	0.033 0	0.115 1

3.2 热效率改善效果

3.2.1 清洗除垢

采用清洗剂清洗后,炉内可见金属表面的垢去除率在95%以上,泥沙全部去除,达到化工部二级标准。清除水垢后,传热面的导热系数由水垢导热系数恢复为金属导热系数,可增加1~2个数量级,从而提高了加热炉的热效率。根据水垢厚度与耗能的关系,去除1~5 mm的水垢,预计节约燃料气5%~15%。

3.2.2 单井管线改造

2010年,通过对子洲气田多个集气站进加热炉单井管线的调整,达到了合理利用加热炉热能、有效降低集气站外输温度的目的。以洲Y站为例,管线调整后,1[#]炉炉温由55℃降低至50℃,2[#]炉炉温基本不变,总体表现为炉温下降,节约燃料气10%左右。

3.3 燃烧系统改造预计效果

假设一场景为加热炉熄火,燃料气未及时关闭,手动二次点火过程中发生闪爆,造成人员损失和财产损失。该后果发生的概率为

$$f_i^c = f_i^l \times PFD_{IPL} \times P_{ig} \times P_{ex} \times P_d$$

式中: f_i^c 为场景 i 的后果 C 发生的频率, a ; f_i^l 为场景 i 发生的频率, a ; PFD_{IPL} 为独立保护层的失效率; P_{ig} 为点火概率; P_{ex} 为人员暴露概率; P_d 为人员伤亡概率。

在该场景中,目前现有的独立保护层仅为水温监控报警和人员行动。根据行业内典型场景发生的

频率和典型保护层的失效率,取 f_i^l 为 $10^{-2}/a$ 、 PFD_{IPL} 为 10^{-1} 、 P_{ig} 为 1、 P_{ex} 为 0.5、 P_d 为 1,则后果发生的概率为 $1 \times 10^{-3}/a$ (取整)。

若在燃料气进气管线上安装电磁阀,形成加热炉熄火连锁保护,并确定连锁 SIL 等级为 1;则该场景又新增一独立保护层,根据其 SIL 等级,该保护层的失效率为 $10^{-2} \sim 10^{-1}$,取其为 10^{-2} ,其他参数不变,则后果发生的概率为 $1 \times 10^{-5}/a$ (取整)。

由此可见,若安装电磁阀并形成熄火连锁保护,模拟场景发生的概率可由 $10^{-3}/a$ 降低至 $10^{-5}/a$,即显著降低了加热炉的运行风险。然而,应当注意的是,炉膛熄火重新点火前,必须先给烟火管通风,防止二次点火闪爆。

4 结论与认识

加热炉在长期运行中存在的问题突出:腐蚀严重导致壁厚减薄、点蚀甚至穿孔;结垢和进加热炉管线布局不合理,导致加热炉热效率偏低;燃烧系统缺少熄火保护,存在安全隐患。

通过腐蚀监测、合理加注缓蚀阻垢剂、安装隔氧除尘装置和电子除垢仪装置等措施,可有效降低加热炉在各层的腐蚀速率,使其低于国家行业标准 (0.076 mm/a)。通过定期清洗除垢以及调整进加热炉单井管线等措施,有效提高了加热炉的热效率,预计节约燃料气 5%~15%。

建议在加热炉燃烧系统中增设熄火连锁保护,可将炉膛熄火引发的安全事故发生概率从 $10^{-3}/a$ 降低至 $10^{-5}/a$,有效解决燃烧系统安全隐患问题。

参考文献

- [1] 李昌忠. 水套加热炉烟道堵渣及腐蚀的原因和预防[J]. 石油工程建设, 2006, 32 (2): 71-74.
- [2] 国家能源局. 碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法: SY/T 5329—2012[S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [3] 王保卫, 瞿玉华. 浅谈锅炉水垢与燃料消耗[J]. 工业锅炉, 1996 (1): 46-49.
- [4] 王亚利. 天然气水套加热炉的清洗和防腐[J]. 油气田地面工程, 2011, 30 (6): 10-11.
- [5] 门虎, 李国荣, 陈宇. 水套炉安全保护与控制的改进[J]. 油气田地面工程, 2011, 30 (5): 70-71.

作者简介

刘青: 2013年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发工程专业,从事气田防腐方面工作,13679134698, liuqing01_cq@petrochina.com.cn, 陕西省西安市高陵县崇皇乡长庆产业园B座0201(采气二厂工艺所), 710200。

收稿日期 2015-03-27

(栏目编辑 焦晓梅)