

天然气冷却器换热管腐蚀原因分析

白宇恒¹ 张仁勇¹ 张启超² 刘正文³ 任玉声³

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中国石油西南油气田公司输气管理处, 重庆 102649;
3. 襄垣县国新液化天然气有限公司, 山西 长治 046000

摘 要: 为了确定天然气冷却器换热管腐蚀的原因,应用扫描电子显微镜、能谱分析仪、X 射线衍射仪对某天然气处理厂天然气冷却器换热管的腐蚀形貌、腐蚀产物以及物象进行了分析,同时应用气相色谱仪、模拟试验法、平皿计数法、电化学法对天然气冷却器的工作介质进行了研究。分析和研究结果表明,天然气冷却器换热管腐蚀的主要原因是垢下腐蚀,防腐涂层不合格、缝隙以及细菌的存在进一步促进了垢下腐蚀。在同类工程建设过程中,要注意冷却器水压试验后的干燥、保护和施工过程中的清洁,循环水系统清洗时勿将污垢带入冷却器。换热管外防腐涂层质量不合格不但无法达到保护换热管防止腐蚀的目的,反而会加速局部区域的腐蚀。

关键词: 换热管; 腐蚀; 失效分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.06.019

Analysis on corrosion of natural gas cooler heat exchanger tube

BAI Yuheng¹, ZHANG Renyong¹, ZHANG Qichao², LIU Zhengwen³, REN Yusheng³

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. Gas Transmission Management Office, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chongqing, 102649, China;
3. Xiangyuan Guoxin Liquefied Natural Gas Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046000, China

Abstract: In order to determine the cause of the corrosion of the heat exchange tube of the natural gas cooler of a natural gas processing plant, a Scanning Electron Microscope, an energy spectrum analyzer and an X-ray diffractometer were used to analyse the corrosion morphology, corrosion products and physical appearance of the heat exchanger tubes of the natural gas coolers. Gas chromatography was used to study the working medium of the heat exchanger tube, together with the simulation test method, the plate count method and the electrochemical method. The research results show that the corrosion of the heat exchanger tube is mainly caused by the corrosion under the scale and by the fact that the corrosion protection coating is not up to standard, and the existence of crevices and bacteria further accelerated the corrosion under the scale. Therefore, during the construction of similar projects, attention should be paid to the drying and protection of the heat exchanger after the water pressure test, the cleaning during construction process and

收稿日期: 2021-07-07

基金项目: 中国石油集团工程股份有限公司科学研究与技术开发项目“800 万吨级超大型 LNG 成套技术研究”(2019ZYGC-07-01)

作者简介: 白宇恒(1984-), 男, 山西大同人, 工程师, 硕士, 主要从事油气田地面工程方面的研究工作。E-mail: baiyuh_sw@cnpc.com.cn

the prevention of dirt being re-introduced into the cooler while cleaning using circulating water. If the corrosion protection coatings do not meet the required standard, rather than protecting the heat exchanger tubes against corrosion, localised corrosion will accelerate instead.

Keywords: Heat exchanger tube; Corrosion; Failure analysis

0 前言

天然气、石油等化工厂均需要设置多台换热器,管壳式换热器因其投资成本低、传热面积大、选材容易等特点,相比板式换热器、蛇形管式换热器应用更广泛^[1]。管壳式换热器为增加换热面积布满换热管,少则几百根,多则近千根,因换热管数量大,故障率也相应增大。实际生产运行中,管壳式换热器的故障率是塔、压力容器等设备故障率总和的 2 倍,许多化工厂停工抢修的原因大多是因为换热管穿孔泄漏^[2]。

换热管的材料普遍采用碳钢,失效率较高,为了提高换热器的可靠性,船舶冷凝器采用了 B30 铜镍合金管,很大程度上降低了换热器的失效概率^[3-5],部分化工厂采用 321 奥氏体不锈钢作为换热管材料,降低了换热器失效的概率,但腐蚀问题仍然存在^[6]。以天然气为原料的化工厂,因其工艺介质相对清洁,为了降低建设成本,换热管多采用 10#无缝碳钢管,使得冷却器失效故障频繁发生。

换热器失效原因的分析总体上包括宏观观察、腐蚀产物的微观形貌观察、化学成分分析、物相分析方法^[7-16]。部分学者对工艺介质进行了组分分析,但很少对循环水进行化学分析^[17-19]。

某天然气处理厂设置 1 台鼓风机,将常压天然气增压后作为处理厂燃料气,在鼓风机后设置 1 台冷却器,用循环水对天然气进行冷却,投运不到 1 年,换热管大面积腐蚀穿孔。鼓风机为非主工艺设备,不影响处理厂主工艺装置的生产,但处理厂设置有多台天然气冷却器,若该设备腐蚀是因循环水引起的,则腐蚀情况具有普遍性,需立即停产对处理厂冷却器进行检查,避免因腐蚀而引起安全生产事故。本文针对该处理厂面临的现状,对鼓风机冷却器的运行工况、工作介质、换热管材质、腐蚀产物的宏观和微观形貌、化学成分及物相进行综合试验分析,旨在确定换热管腐蚀失效的原因,优化换热器设计,指导处理厂生产运行。

表 2 循环水检测结果表

Tab. 2 Table of test results of circulating water

样品	pH	电导率 / ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	浊度 / 度	总硬度 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	碱度 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	化学成分 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)							
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	Fe	Cu	氨氮	Cl	烃类
1#水样	8.96	705	0.2	29.7	685.8	7.81	1.46	6.10	—	—	0.21	0.015	—
2#水样	8.95	807	319.0	30.0	698.8	8.03	1.75	8.69	1.95	0.19	2.38	0.009	0.95

1 运行情况

某天然气处理厂鼓风机冷却器为卧式管壳式换热器,位于鼓风机后,作用是冷却增压和升温后的天然气,冷却器管程介质为天然气,壳程介质为循环水,见图 1。经鼓风机增压后的天然气压力为 100 kPa,温度为 75 ℃,进入冷却器管程,循环水从冷却器低温端侧面进入壳层,从高温端侧面流出,被冷却后的天然气从冷却器另一端流出。



图 1 鼓风机冷却器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blower cooler structure

鼓风机冷却器运行工况参数见表 1。从表 1 可以看出,该换热器管程工作介质为洁净天然气,组分为 CH₄ (摩尔含量 83.36%) 和 N₂ (摩尔含量 16.54%),壳程工作介质为循环水。

表 1 鼓风机冷却器运行工况参数表

Tab. 1 Table of operating parameters of blower cooler

冷却器位置	工作压力 / kPa	工作温度 / ℃	介质流量 / ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
壳程(循环水)			
进口	294	32	0.09
出口	270	40	0.09
管程(天然气)			
进口	100	75	600.00
出口	95	40	600.00

从现场循环水系统不同部分取样进行循环水水质分析,1#水样取自循环水泵出口,2#水样取自冷却器入口,循环水水质的检测结果无异常。分析结果见表 2。

2 检验与分析

2.1 换热管腐蚀宏观形貌

现场对冷却器进行拆解,发现冷却器的管束上沉积了大量垢样,垢样中发现泥沙及铁锈,折流板的背水面堆积的垢样尤为集中,见图 2。

将换热管抽出,查看换热管的腐蚀情况。共有 6 根换热管发生了穿孔腐蚀失效,其他换热管均发现有孔腐蚀,但尚未贯穿。发生孔腐蚀的部位主要位于换热管和折流板接触的区域,见图 3-a);除了在管板接触的区域发生腐蚀之外,在换热管管体(折流板与折流板之间管段)上也发

现有近似圆形的腐蚀坑,并未贯穿壁厚,见图 3-b)。

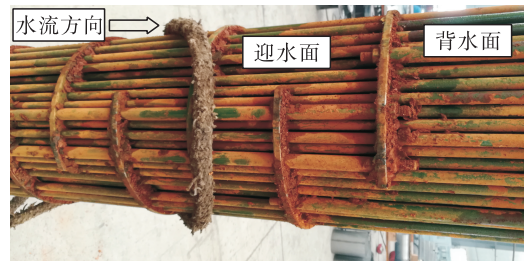
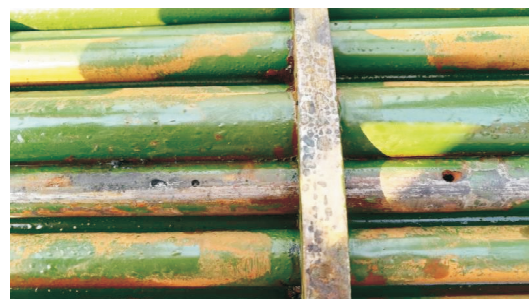


图 2 冷却器管束局部形貌图

Fig. 2 Local appearance figure of heat cooler tube bundles



a) 折流板区域
a) Baffle region



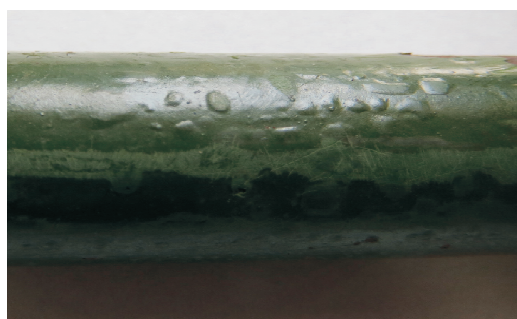
b) 非折流板区域
b) Non-baffle region

图 3 换热管腐蚀宏观形貌图

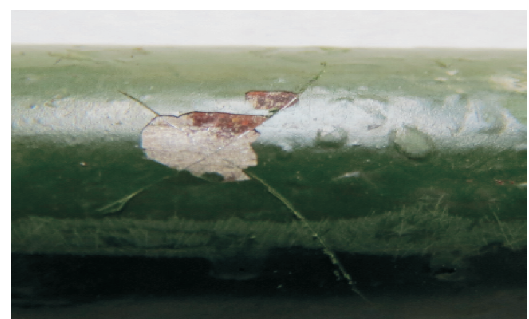
Fig. 3 Corrosion appearance figure of exchanger tube

换热管外表面采用淋涂法涂有防腐层,防腐涂料采用由改性耐热环氧有机硅高分子合成树脂、耐热颜料、导热填料配制而成的单组份换热器专用涂料。管束防腐层按机械打砂除锈、管外淋涂、漆膜处理、表干、高温固化施工程序,反复涂装 4 遍,漆膜厚度达 150 μm。有研究已证明,换热管表面涂刷防腐层可有效保护换热管^[20]。图 4 为放大的换热管防腐层形貌,换热管防腐层

鼓泡现象严重,划开鼓泡区域,换热管已存在腐蚀现象,而未鼓泡区域,换热管状态相对较好。防腐涂层起泡的原因较为复杂,涉及到涂料的性质、施工质量、运行环境等众多因素,本文不再进行深入研究。就结果来看,防腐涂层完好的部位,防腐涂层有效地保护了换热管,但是防腐涂层鼓泡部位,防腐涂层不但没有起到保护换热管的作用,反而加速了换热管的腐蚀。



a) 外防腐层鼓泡形貌
a) Bubbling appearance of external anticorrosion layer



b) 外防腐层鼓泡位置下换热管形貌
b) Figure of heat exchanger tube under bubbling position of external anticorrosion layer

图 4 换热管外防腐层形貌图

Fig. 4 Appearance of external anticorrosion layer of heat exchanger tube

2.2 换热管化学成分分析

引起换热管腐蚀失效主要有材料因素和环境因素。为了验证该换热管腐蚀失效是否与材料有关,对换热管材料进行化学成分分析。

根据冷却器设计文件,换热管采用 10 #无缝碳钢管,规格为 $\Phi 14 \times 1.6$ mm,执行标准为 GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》(以下简称 GB/T 699—2015)。10 #无缝碳钢管价格低,对碱性介质的化学腐蚀比较稳定,容易被酸性腐蚀,应用在鼓风机冷却器中合理。该天然气处理厂设计有 18 台冷却器,其中 2 台为低温工况,1 台工作介质呈酸性,换热管采用 S30408,其他 15 台冷却器换热管均采用 10 #无缝碳钢管,至发稿时尚未发现如鼓风

机冷却器的腐蚀情况。

从换热管上取 2 个样,根据 GB/T 223《钢铁及合金化学分析方法》和 GB/T 20123—2006《钢铁总碳硫含量的测定高频感应炉燃烧后红外吸收法(常规方法)》进行化学成分分析,结果见表 3。表 3 的分析结果表明,换热管的化学成分符合 GB/T 699—2015 对 10#无缝碳钢管的要求。

2.3 腐蚀坑分析

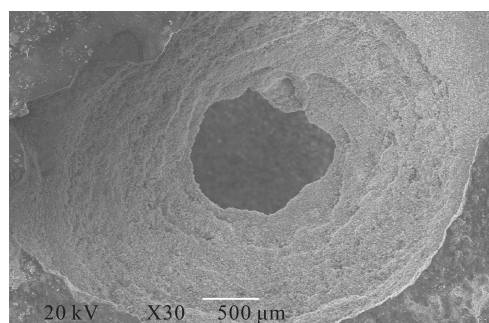
对换热管上的腐蚀坑进行 SEM 检测,整体形貌见图 5-a),局部腐蚀产物形貌见图 5-b)。

对腐蚀坑底部区域进行能量分散谱(EDS)分析,结果见表 4。腐蚀产物主要包含 C、O、Fe 元素,还包含少量的 S、Si、P、Mg 等元素。

表 3 换热管化学成分分析结果表

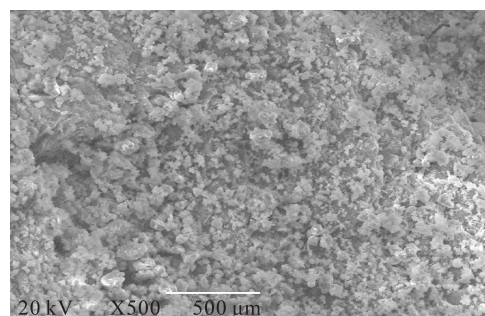
Tab.3 Results of chemical composition analysis of heat exchanger tubes

样品	分析结果(质量含量)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
1#样	0.09%	0.22%	0.53%	0.013%	0.003%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.005%
2#样	0.09%	0.25%	0.49%	0.015%	0.002%	0.01%	0.03%	0.01%	0.01%	0.005%



a) 腐蚀坑整体形貌

a) Overall appearance of corrosion pit



b) 腐蚀产物形貌

b) Appearance of corrosion product

图 5 换热管腐蚀坑形貌图

Fig.5 Corrosion pit appearance of heat exchanger tube

表 4 腐蚀坑底部区域产物 EDS 分析结果表

Tab.4 EDS analysis result of corrosion pit bottom area

元素	C	O	Cl	Mg	Al	Si	P	Ca	S	K	Fe	Ti	Cr
质量含量	28.0%	36.9%	0.2%	0.3%	0.1%	0.7%	0.4%	0.9%	0.7%	0.9%	28.5%	0.2%	1.3%

细菌腐蚀的原理是细菌在缺氧条件下繁殖时,将硫酸盐还原并与铁生成硫化铁,形成点状圆形腐蚀坑。鼓风机冷却器换热管上腐蚀坑近似圆形形状,是碳钢发生细菌腐蚀的典型形貌,腐蚀产物分析结果中含有 S 元素,是碳钢发生细菌腐蚀的典型产物。

2.4 循环水水质及细菌分析

根据表 2,循环水 pH 在 7~9 之间呈弱碱性,对照 GB 50050—2017《工业循环水冷却水处理设计规范》(以

下简称 GB 50050—2017)表 3.1.8 闭式系统循环冷却水质指标,在腐蚀速度较低的区间内。

2.3 节分析结果表明,换热管发生了细菌腐蚀,下面对循环水进行细菌分析。

根据 GB/T 50050—2017 要求,参照 HG/T 4207—2011《工业循环冷却水异养菌菌数测定平皿计数法》采用平皿计数法统计循环水中的异养菌落个数。

将 1#水样和 2#水样用 10 倍稀释法稀释 4 个的稀释

度(每个样品 2 个平行样),用移液枪将不同稀释度试样 0.1 mL 分别接种到无菌培养皿中,将 10~15 mL 冷却至 45 ℃ 灭菌后的培养基加入培养皿内,混合均匀;待固化

后置于 29 ℃ 生化培养箱中培养 72 h,培养期满后在进行计数,结果见表 5~6。

表 5 1#水样的异养菌计数结果表

Tab. 5 Heterotrophic count results of water sample 1

平行样	不同稀释度的菌落数 / (CFU · mL ⁻¹)				两稀释度菌落比	菌落群总数 / (10 ³ CFU · mL ⁻¹)
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴		
1	240	32	11	0	1.3	2.8
2	262	16	6	0	—	2.6

表 6 2#水样的异养菌计数结果表

Tab. 6 Heterotrophic count results of water sample 2

平行样	不同稀释度的菌落数 / (CFU · mL ⁻¹)				两稀释度菌落比	菌落群总数 / (10 ³ CFU · mL ⁻¹)
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴		
1	182	31	3	0	1.7	2.5
2	178	26	5	0	—	1.8

由表 5~6 可看出,29 ℃ 时 1#水样和 2#水样的异养菌平均含量分别为 2.7×10^3 CFU /mL 和 2.2×10^3 CFU /mL。循环水中异养菌无法完全消除,南京工业大学节水减排重点实验室研究了异养菌在循环水中的生长规律,研究表明,异养菌可在 pH 值 5.0~9.0、35~45 ℃ 含有机物的循环水中生长。该天然气处理厂循环水 pH 值约 8.95,偏酸或偏碱的循环水对设备、管道损害更大。循环水系统的供水、回水温度分别为 32 ℃、40 ℃,供水温度由环境温度确定,回水温度由凉水塔经济核算后确定,故工作温度亦无法避开异养菌的生长温度范围。循环水系统为处理厂 18 台冷却器提供冷源,因设备跑、冒、滴、漏,必然有少量重烃混入循环水中,为异养菌提供生长需要的有机物^[21]。

鉴于循环水系统中异养菌无法完全消除,只能尽量降低其含量,故 GB /T 50050—2017 对中间冷开式系统的异养菌总数要求是不大于 1×10^5 CFU /mL,在该数值内,认为异养菌的含量可以接受,不会对循环水系统设备、管道造成严重腐蚀。

3 腐蚀原因分析

经过一系列的试验分析,鼓风机冷却器腐蚀失效原因分析结果有以下几点。

1) 换热管束上沉积大量垢样,折流板的背水面堆积的垢样更多。垢样主要含泥沙及铁锈,推断是因为施工时循环水管道未清理干净,循环水系统清洗时未将冷却器隔离,导致循环水总管中大量泥沙进入冷却器,在折流版的背水面大量堆积。

2) 冷却器壳程进水端(也就是换热管的出气端)内壁的部分垢样被清除后,暴露出大小不一、分布不均的腐蚀坑,这些腐蚀坑主要分布在筒体 6 点钟方向附近区域。由于重力作用,腐蚀产物、泥沙、杂质混合的垢样逐渐沉淀在管板缝隙区域、换热管上方区域、壳程底部区域,折流板背水面区域垢样沉积最多,随着时间的推移,垢样不断沉积,使得垢样下的基体处于无氧状态,加之水中存在溶解氧,使得垢样外区域处于有氧状态,形成氧浓差电池,发生垢下腐蚀。换热管与管板接触的区域存在缝隙,这种缝隙本身由于所处体系的腐蚀性不同可能会发生不同程度的缝隙腐蚀,管板之间的缝隙会加速垢下腐蚀。同时,循环水的 pH 值、工作温度,适宜细菌生长,细菌的存在进一步促进垢下腐蚀。已经发生穿孔的腐蚀坑,其外表形貌具有典型的氧化铁垢下腐蚀水滴状形貌。

3) 换热管试样的外防腐涂层均存在鼓泡现象,折流板和换热管接触区域的防腐涂层不完整,鼓泡的外防腐涂层对换热管基体未能起到有效的防腐保护作用;破损的外防腐涂层电阻降低,也会削弱防腐保护效果。

4 结论

1) 设备制造完成后,尤其是在水试压后,应对设备进行吹扫、干燥处理,最好采取充氮保护。

2) 循环水系统施工及完成后,及时清理系统内的杂物。设计时在总管末端设置排污管口及排水措施,总管清洗完成后用盲法兰密封。

3) 在循环水系统循环清洗时,切记将冷却器等设备

进行隔离,循环水在管道内流速较高,进入设备后流速较低,另由于冷却器结构特点,污垢一旦进入设备后,很难通过循环水带出去。

4)有研究已证明,换热管表面涂刷防腐层可有效保护换热管,但需要根据设备运行工况选择合适的防腐涂料并严格控制施工质量。若防腐质量不合格,不但无法达到保护换热管防止腐蚀的目的,反而会加速局部区域的腐蚀。

5)开式循环水系统的 pH 值及工作温度适宜细菌生长,在运行过程中可采用循环水中加投次氯酸钠、液氯、有机氯、无机溴化物等溶剂来抑制异养菌的生长,循环水中氯含量应控制在 0.1 ~ 0.5 mg/L 范围内。

参考文献:

- [1] 刘玉梅. 列管式换热器中管板与换热管束膨胀焊结合连接工艺探讨[J]. 装备制造与技术, 2013(7): 157-159.
LIU Yumei. The expanded-and-welded connection technology of tube plate and piping heat exchanger were discussed [J]. Equipment Manufacture Technology, 2013 (7): 157-159.
- [2] 周涛. 浮头式换热器失效分析与延寿技术[D]. 西安: 西安石油大学, 2011.
ZHOU Tao. Floating head type heat exchanger failure analysis and life extension technology [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2011.
- [3] YUAN Shaojun, PEHKONEN S O. Surface characterization and corrosion behavior of 70/30 Cu-Ni alloy in pristine and sulfide-containing simulated seawater [J]. Corrosion Science, 2007, 49 (3): 1270-1304.
- [4] 林乐耘, 徐杰, 赵月红. 国产 B10 铜镍合金腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(6): 361-367.
LIN Yueyun, XU Jie, ZHAO Yuehong. Study on corrosion behavior of domestic B10 Cu-Ni alloy [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2000, 20 (6): 361-367.
- [5] 徐群杰, 丁茂荣, 陈子超. 模拟水中 B30 铜镍合金耐腐蚀性的电化学研究[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22 (3): 229-232.
XU Qunjie, DING Maorong, CHEN Zichao. Electrochemical simulation study on corrosion resistance of B30 Cu-Ni alloy in water [J]. Journal of the Shanghai University of Electric Power, 2006, 22 (3): 229-232.
- [6] 易成, 周超. 塔顶冷凝器换热管腐蚀原因分析与预防[J]. 压力容器, 2018, 35(2): 49-53.
YI Cheng, ZHOU Chao. Failure analysis on heat exchanger tubes of tower overhead condenser [J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35 (2): 49-53.
- [7] 鲁照玲, 周志毅, 周宇. 换热设备用不锈钢材料腐蚀失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(6): 443-445.
LU Zhaoling, ZHOU Zhiyi, ZHOU Yu. Failure analysis of stainless steel used in a heat-exchanger equipment [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18 (6): 443-445.
- [8] 黄庆祥, 卢喆, 郭祎民. CO₂ 压缩机段间冷却器泄漏原因分析及对策[J]. 化工设计通讯, 2012, 38(5): 64-66.
HUANG Qingxiang, LU Zhe, GUO Yimin. Reasons and measures of the interstage cooler leakage in CO₂ compressor unit [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2012, 38 (5): 64-66.
- [9] 陆昕, 哈胜男, 任颂赞. SAF 2205 双相不锈钢换热管腐蚀失效分析[J]. 热处理, 2013(4): 74-77.
LU Xin, HA Shengnan, REN Songzan. Failure analysis on SAF 2205 duplex stainless heat exchange pipe [J]. Heat Treatment, 2013 (6): 74-77.
- [10] 王恒, 王刚, 李育娟. 二氧化碳换热器失效原因分析及对策[J]. 化学工程与装备, 2015(5): 52-54.
WANG Heng, WANG Gang, LI Yujuan. Failure analysis and countermeasures of carbon dioxide heat exchanger [J]. Fujian Chemical Industry, 2015 (5): 52-54.
- [11] 刘志勇. 二氧化碳压缩机二段段间冷却器泄漏原因分析及处理措施[J]. 化肥设计, 2015(1): 43-46.
LIU Zhiyong. Analysis on the reason of leaking and its treatment measure for second stage cooler of carbon dioxide compressor [J]. Chemical Fertilizer Design, 2015 (1): 43-46.
- [12] 陈学忠. 聚合液加热器换热管应力腐蚀失效分析[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(10): 134-135.
CHEN Xuezhong. Stress corrosion failure analysis of heat exchanger in polymer heater [J]. Chemical Engineering Design Communication, 2017, 43 (10): 134-135.
- [13] 郭海霞, 张欣耀, 吴凤烨. 换热管腐蚀泄露原因分析[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(6): 44-48.
GUO Haixia, ZHANG Xinyao, WU Fengye. Failure analysis of heat exchanger tube [J]. Development and Application of Materials, 2019, 34 (6): 44-48.
- [14] 胡建洲. 列管式冷换设备管束失效原因分析及质量控制[J]. 天然气与石油, 2017, 35(5): 77-81.
HU Jianzhou. Analysis on tube failure of tubular heat exchanger and quality control [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (5): 77-81.
- [15] 鲜宁, 汤晓勇, 施岱艳, 等. CO₂ 凝析气田碳钢管道穿孔失效分析[J]. 天然气与石油, 2012, 30(3): 64-67.
XIAN Ning, TANG Xiaoyong, SHI Daiyan, et al. Analysis on perforation and failure of carbon steel pipes in CO₂ condensate gas field [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (5): 64-67.

- YANG Lin, WANG Xiaoyong, XIAO Guoqiang. Troubleshooting of crankcase oil seal of reciprocating vertical oil free vacuum pump [J]. General Machinery, 2018 (3): 37-38.
- [13] 虞晨阳,陈平,汪朝阳,等.基于ANSYS Workbench的新型浮动式无骨架鞍形橡胶密封圈的有限元分析[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(3):107-113.
- YU Chenyang, CHEN Ping, WANG Zhaoyang, et al. Finite element analysis of a new floating type skeletonless saddle rubber seal ring based on ANSYS Workbench [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2020, 47 (3): 107-113.
- [14] 史瑞,吕晓仁.采煤机浮动油封密封圈静态接触应力分析[J].橡塑技术与装备,2019,45(13):36-39.
- SHI Rui, LYU Xiaoren. Static contact stress analysis of floating oil sealing ring for coal mining machine [J]. China Rubber /Plastics Technology and Equipment, 2019, 45 (13): 36-39.
- [15] 张宝生,陈家庆,刘振宇,等.单金属浮动密封有限元模型研究[J].石油机械,2011,39(6):1-3.
- ZHANG Baosheng, CHEN Jiaqing, LIU Zhenyu, et al. Research on the finite element model of single-metal floating seal [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39 (6): 1-3.
- [16] 周同磊,解承华.浮动油封[J].机械制造,2004,42(8):46.
- ZHOU Tonglei, XIE Chenghua. Floating oil seal [J]. Machinery, 2004, 42 (8): 46.
- [17] 代晓瑛,雷兴平.丁腈橡胶O形密封圈失效原因分析[J].橡胶科技,2020,18(1):17-22.
- DAI Xiaoying, LEI Xingping. Failure cause analysis of NBR O-ring [J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18 (1): 17-22.
- [18] 潘帅,杨张义.O型橡胶密封圈的失效及预防探讨[J].中国设备工程,2020(19):132-133.
- PAN Shuai, YANG Zhangyi. Discussion on failure and prevention of O-type rubber sealing ring [J]. China Plant Engineering, 2020 (19): 132-133.
- [19] 张晓东,余鑫,张毅,等.基于ABAQUS的橡胶密封圈应力松弛分析[J].润滑与密封,2020,45(1):124-128.
- ZHANG Xiaodong, YU Xin, ZHANG Yi, et al. Stress relaxation analysis of rubber sealing ring based on ABAQUS [J]. Lubrication Engineering, 2020, 45 (1): 124-128.
- [20] 杨林.合成气余热回收器泄漏原因分析及维修方案[J].中国特种设备安全,2019,35(5):76-80.
- YANG Lin. Analysis of leakage reasons and maintenance scheme of waste heat recovery unit of syngas [J]. China Special Equipment Safety, 2019, 35 (5): 76-80.

(上接第126页)

- [16] 赵晨兴.热媒盐换热器换热管腐蚀穿孔失效分析[J].化工装备技术,2016,37(3):49-52.
- ZHAO Chenxing. Failure analysis of corrosion perforation of tubes in HTS heat exchanger [J]. Chemical Equipment Technology, 2016, 37 (3): 49-52.
- [17] 陈兵,樊玉光,周三平.水冷器腐蚀失效原因分析[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(6):547-550.
- CHEN Bing, FAN Yuguang, ZHOU Sanping. Corrosion failure analysis of heat exchange tubes water-coolers [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22 (6): 547-550.
- [18] 谭红莹,高铭志,张佃臣,等.某海洋平台发电机水冷器腐蚀分析[J].天然气与石油,2020,38(4):83-88.
- TAN Hongying, GAO Mingzhi, ZHANG Dianchen, et al. Corrosion analysis on sea water cooler of an offshore platform power generator [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (4): 83-88.
- [19] 赵琼.循环冷却水系统腐蚀情况分析及其药剂控制方法[J].天然气与石油,2010,28(2):46-50.
- ZHAO Qiong. Analysis on corrosion conditions in recycled cooling water system and chemical control method [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28 (2): 46-50.
- [20] 吴健.管壳式换热器防腐与腐蚀应用研究[J].广州化工,2017,45(23):129-131.
- WU Jian. Application study on corrosion and corrosion protection of shell-and-tube heat exchanger [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45 (23): 129-131.
- [21] 韦远扬,吕程,沙亚东,等.含机油循环冷却水中异养菌生长的主要影响因素及其规律[J].工业安全与环保,2013,39(3):8-10.
- WEI Yuanyang, LYU Cheng, SHA Yadong, et al. Main influence factors and laws of aerobic bacteria growth in engine oil contaminated industrial recirculating cooling water [J]. Industrial Safety Environmental Protection, 2013, 39 (3): 8-10.