

硫磺再生塔内件腐蚀失效分析

杨立东¹, 赵永峰¹, 王蒙², 熊金平²

(1. 中国石油技术开发公司 石化分公司, 北京 100009;

2. 北京化工大学 材料电化学过程与技术北京市重点实验室, 北京 100029)

摘要: **目的** 查明硫磺再生塔内件腐蚀失效的原因, 提出避免该内件再次失效的对策。**方法** 采用目测、金相显微镜和电子显微镜以及能谱分析等手段, 分析内件腐蚀失效的原因。**结果** 能谱分析表明, 该内件基体镍含量偏低, 腐蚀产物中硫含量较高。目测可见内件断口表面粗糙, 电子显微镜形貌与金相显微分析表明, 在晶界处有大量颗粒状碳化物析出。**结论** 导致该内件失效的原因主要是热处理不当, 造成了晶间碳化物的析出, 从而导致了晶间腐蚀的发生。同时镍含量偏低也降低了材料的耐蚀性, 含硫腐蚀性介质的冲刷作用也加重了低耐蚀性内件的晶间腐蚀。应使用化学成分符合国标 304 不锈钢材料生产的内件, 同时要避免内件在生产与使用过程中因热处理不当造成晶间碳化物的析出。

关键词: 硫磺再生塔; 不锈钢内件; 失效分析; 晶间腐蚀

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0072-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.011

Corrosion Failure Analysis of Internals in Sulfur Regeneration Tower

YANG Li-dong¹, ZHAO Yong-feng¹, WANG Meng², XIONG Jin-ping²

(1. Petrochemical Branch, China Petroleum Technology Development Corporation, Beijing 100009, China;

2. Beijing Key Laboratory of Electrochemical Process and Technology for Materials,
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: The work aims to find out the failure mechanism of internals in sulfur regeneration tower and put forward the solution to avoid the secondary failure. Visual inspection, metallographic microscope, energy dispersive spectroscopy (EDS) and other methods were used to analyze the corrosion mechanism of internals. EDS showed that the content of nickel in internal substrate was lower, but the content of sulfur in corrosion product was higher. The fracture of the internals was rough. Electron microscopy and metallographic microstructure analysis showed that there were a large number of granular carbides precipitated at the grain boundary. The failure of the internals is induced by improper heat treatment which causes intergranular corrosion due to the precipitation of intergranular carbide. Meanwhile, the low content of nickel element also reduces the corrosion resistance of the material. Besides, the intergranular corrosion is accelerated by the corrosive medium containing sulfur. The 304 stainless steel internals with chemical composition meeting national standard should be used to avoid the precipitation of intergranular carbide due to improper heat treatment during production and use.

KEY WORDS: sulfur regeneration tower; stainless steel internals; failure analysis; intergranular corrosion

收稿日期: 2018-08-09; 修订日期: 2018-10-18

Received: 2018-08-09; Revised: 2018-10-18

作者简介: 杨立东 (1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为材料的腐蚀与防护。

Biography: YANG Li-dong (1972—), Male, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection of material.

通讯作者: 熊金平 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料的腐蚀与防护。邮箱: xiongjp@mail.buct.edu.cn

Corresponding author: XIONG Jin-ping (1963—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: corrosion and protection of material. E-mail: xiongjp@mail.buct.edu.cn

近几年来,由于环保压力日益增大,化工行业特别是炼油行业对尾气排放的重视程度空前高涨,对处理含硫尾气的设备,尤其是硫磺再生装置的关注度也逐渐增大,硫磺再生设备的腐蚀问题已经成为各大炼油企业亟需解决的问题之一。卞凤鸣^[1]和胡敏^[2]等都关注了硫磺回收联合装置在运行过程中出现的问题。特别是目前由于加工的浓稠原油中硫含量持续升高,导致了炼化设备,尤其是硫磺再生设备的腐蚀问题日益突出^[3-7]。陈敏^[8]分析了某炼油厂硫磺尾气脱硫装置再生塔塔壁出现较大面积凹坑的原因。白洪波^[9]、孙继慧^[10]、陈平^[11]和刘燕敦^[12]等分别介绍了硫磺再生塔重沸器腐蚀失效的原因,均认为硫磺再生设备的腐蚀失效主要是由于 H_2S 、胺液等的腐蚀作用造成的。

待进行失效分析的某石化公司的硫磺再生塔内件的材质牌号为 304 SS,硫磺再生塔内介质为富胺液(胺液 35%, H_2S +水 65%),操作温度为 127 °C,操作压力为 0.08 MPa。为了搞清该硫磺再生塔内件腐蚀的失效模式和机理,需要对其进行失效分析。为此,文中运用目测、SEM 和金相形貌分析、EDS 化学成分分析等技术,着重分析了失效样品的宏观形貌与微观形貌、组织与结构、化学成分与含量等,以此为基础,分析了硫磺再生塔内用于支撑塔板的内件的失效原因。

1 分析方法

目测并用数码相机记录下失效件的外观形貌,用游标卡尺记录失效件的长度、宽度和厚度。从失效件的基体部位切取试样,按照 2.1 小节中的试样制备方法处理后,用 4XC 型金相显微镜观察其金相组织结构。

分别从失效件的断面处切取两个试样,从远离断面的基体部位切取一个试样,采用 S-4700 型扫描电子显微镜观察三个试样的表面微观形貌^[13]。采用 S-4700 型扫描电子显微镜联用能谱仪对失效件基体及表面附着的腐蚀产物进行化学组成与成分分析^[14]。

2 分析结果

2.1 试样的制备

如图 1 所示,1#样品和 2#样品分别用于清除腐蚀产物前后的断切面化学组成与成分分析。将 1#样品切下后,腐蚀部位的基体断切面朝上,按照 GB/T 16545—2015《金属和合金的腐蚀——腐蚀试样上腐蚀产物的清除》中的规定来清除断切面的腐蚀产物;将 2#样品切下后,腐蚀部位的基体断切面朝上,不清除腐蚀产物,仅用无水乙醇和丙酮除去断面的油渍。然后将 1#样品和 2#样品置于 S-4700 型扫描电子显微镜下进行形貌观察,并用与之联用的 EDS 能谱仪对两个样品的化学组成与成分进行分析。

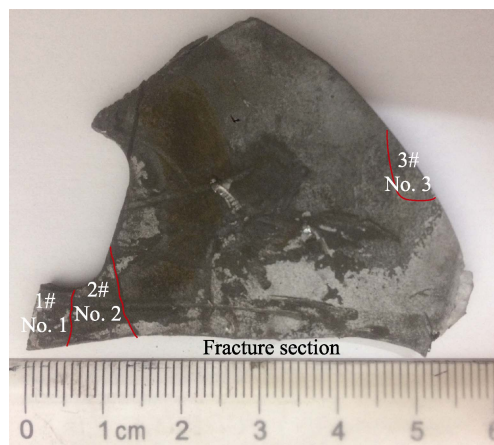


图 1 待分析样品在失效内件上的位置

Fig.1 Locations of samples to be analyzed on failure internals

3#样品用于金相分析。该样品取样位置远离腐蚀失效部位,能够代表内件基体的金相组织结构。按照图 1 中划线位置切下样品,然后用环氧树脂对非切面部位进行密封,露出切面部分,依次用 240#、360#、600#、800#、1000#砂纸打磨切面后,再对其进行抛光处理。随后依次用蒸馏水和无水乙醇洗净该切面,用冷风迅速吹干表面,紧接着按照 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》中的规定,将切面在王水酒精溶液中蚀刻 3 min,然后在 4XC 型金相显微镜下观察其金相组织结构。

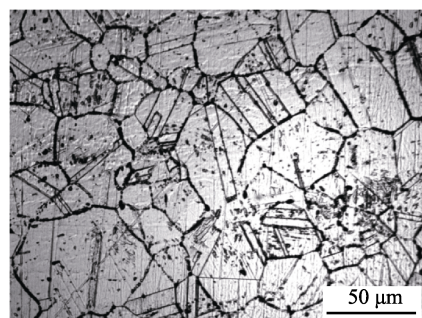
2.2 基体金相观察

失效分析时,通过金相观察来确定样品的组织结构以及可能发生的腐蚀类型。图 2 为远离腐蚀部位的内件基体(3#样品)的金相形貌。从图 2a 可以看出,该金相组织中既有大部分晶粒呈现不规则的五边形,也有少部分晶粒呈现长方形的孪晶形态,这与奥氏体不锈钢的金相组织结构相吻合^[15]。由此可判断出,该内件的材质为奥氏体不锈钢^[16]。从图 2b 可以看出,与图中正常的较细晶界相比,不仅大部分晶粒的晶间沟槽较宽,而且还有连续的颗粒状黑色斑点,这是晶间碳化物析出的典型特征^[16]。这种大量析出晶间碳化物的奥氏体不锈钢易于发生晶间腐蚀。

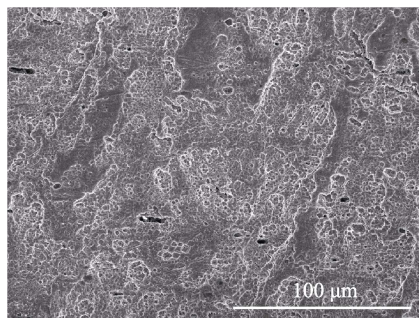
2.3 断口 SEM 分析

2.3.1 清除腐蚀产物后的断口表面

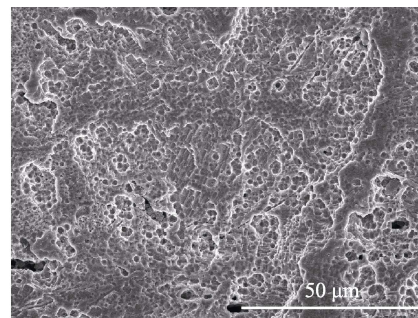
通过 SEM 观察断口的显微形貌特征,可以初步确定出样品的腐蚀类型。图 3 为清除腐蚀产物后的断口表面(1#样品)于不同放大倍数下的 SEM 形貌。从图 3a 与图 3b 可以看出,腐蚀后的断口表面凹凸不平。而高放大倍数(2000 倍)下的断口主要为冰糖状的沿晶断口(见图 3c)^[18],特别是 5000 倍放大倍数下,断口形貌上出现了五边形凹坑(见图 3d),进一步印证了金相观察得到的结论。这说明腐蚀失效主要是由晶间腐蚀引起的^[19]。



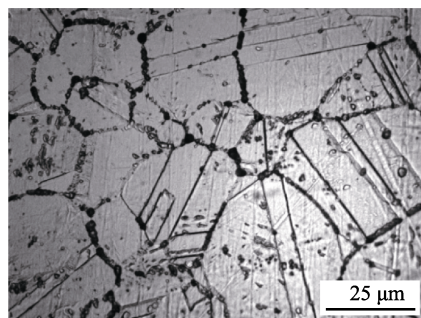
a 200×



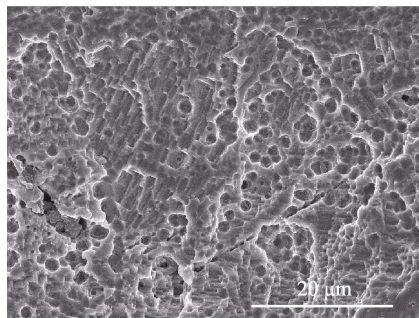
a 500×



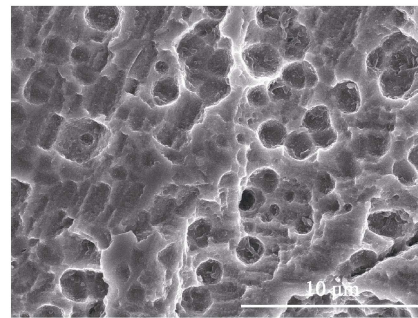
b 1000×



b 400×



c 2000×



d 5000×

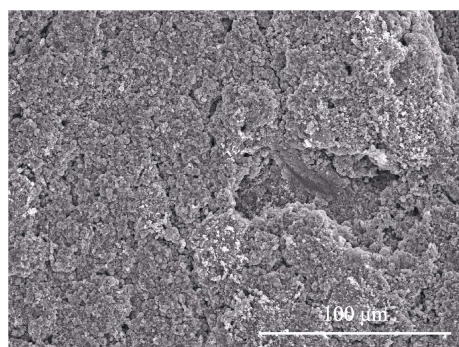
图2 内件基体(3#样品)的金相形貌
Fig.2 OP morphology of the
internals (No. 3 sample)

图3 清除腐蚀产物后的断口表面 SEM 形貌
Fig.3 SEM morphology of the fracture surface without corrosion products

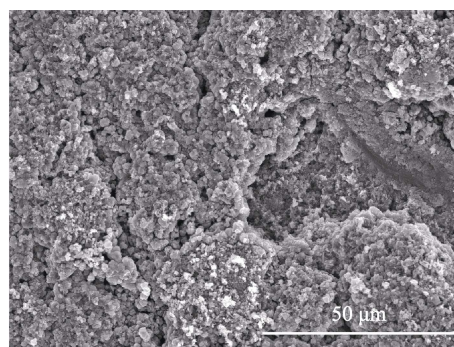
2.3.2 带腐蚀产物的断口表面

观察断口表面附着的腐蚀产物形貌,可得到腐蚀产物的相关信息,为后续解释失效机理提供数据支持。图4是附着有腐蚀产物的断口表面(2#样品)的SEM形貌。由图4a可见,腐蚀产物呈层状分布,并

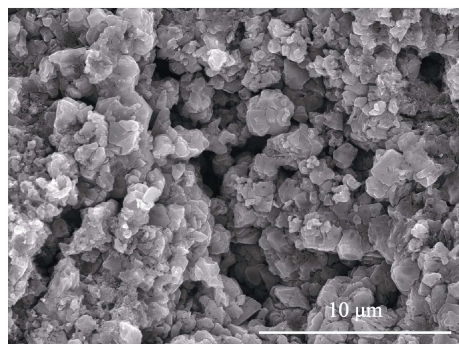
疏松多孔。高放大倍数下,腐蚀产物由不规则的颗粒堆叠而成,大部分腐蚀产物颗粒直径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,直径最大的颗粒为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右。颗粒之间的空隙较大,结构松散,便于介质穿过腐蚀产物,到达基体表面,引起基体的进一步腐蚀。



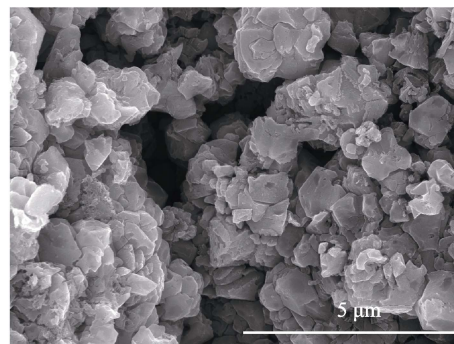
a 500×



b 1000×



c 5000×



d 10000×

图4 附着有腐蚀产物的断口表面 SEM 形貌
Fig.4 SEM morphology of the fracture surface with corrosion products

2.4 断口 EDS 分析

对清除腐蚀产物后的 1#样品进行 EDS 分析，可得到断口基体的化学组成与成分信息，进而可判断出该样品所属的不锈钢种类。对附着有腐蚀产物的断口 2#样品进行 EDS 分析，可得到腐蚀产物的化学组成与成分信息，进而可判断出腐蚀失效机理与影响因素。两个样品的取样分析区如图 5 所示。

对于 1#样品来说，整个断口的形貌相似，EDS 能谱分析的取样区位于有代表性的位置（Pt1）。对于 2#样品来说，腐蚀产物的形貌差别较大，需从不同部位取样进行 EDS 能谱分析，取样处分别位于腐蚀产物层的光亮平滑处（Pt1）、暗淡平滑处（Pt2）、光亮平滑与暗淡平滑交界处（Pt3）以及光亮粗糙处（Pt4）等四个位置。

这四个部位的化学组成与成分的 EDS 分析结果

见表 1。从 1#样品的 EDS 分析结果来看，清除腐蚀产物后，断口表面 Ni 的质量分数仅为 5.7%，低于 GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》对 304 不锈钢中 Ni 质量分数应为 8%~12%的规定，不符合选材设计要求。这是因为 Ni 含量偏低可造成不锈钢材质耐蚀性的下降。从 2#样品的 EDS 分析结果来看，腐蚀产物中 Cr、Ni、S、O 和 Fe 元素的含量均较高，在 Pt1—Pt3 区域的腐蚀产物中，均含有 Cr、Ni、S、O 和 Fe 元素，在 Pt4 区域腐蚀产物中只检测到 S、O、Fe 元素。Cr、Ni 和 Fe 元素主要来源于材料本身，根据前述的硫磺再生塔的工艺条件可知，含量如此之高的 S 元素只能来源于介质。因此可以推测，腐蚀产物主要是 Fe 的硫化物或者硫酸盐，其次则是 Cr、Ni 的硫化物或者硫酸盐，而硫化氢或者稀硫酸水溶液介质对 304 不锈钢均有较强的腐蚀性^[20]。

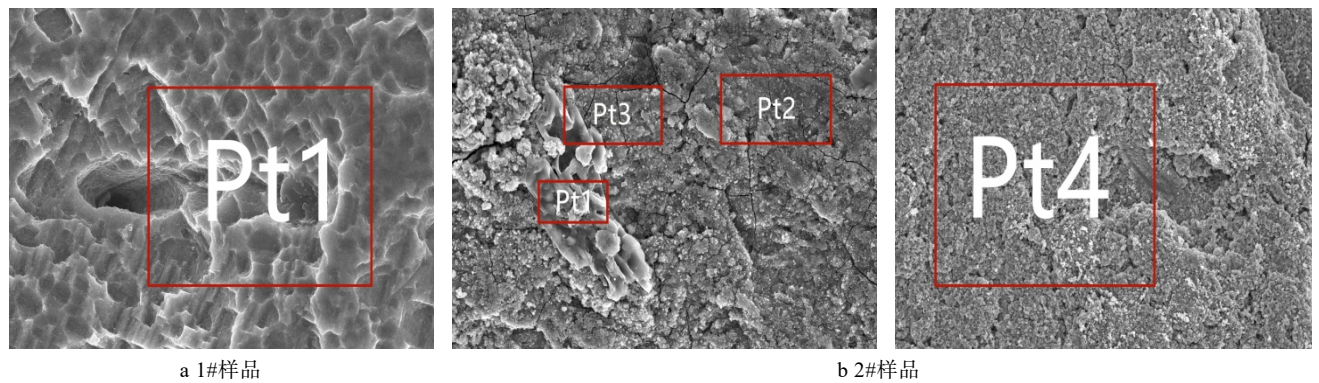


图 5 清除腐蚀产物前后样品的 EDS 分析取样区
Fig.5 Locations of samples with and without corrosion products by EDS analysis

表 1 1#和 2#样品的 EDS 分析结果
Tab.1 EDS results of 1# and 2# samples

Sample No.	Corrosion products	Location									wt. %
			C	O	Mo	Si	S	Cr	Al	Fe	Ni
1# 304 (0Cr18Ni9)	No	Pt1	13.8			0.3		17.6	1.0	61.6	5.7
			<0.08			<1.0	<0.03	18~20			8~12
2#	Yes	Pt1	0	5.16	0.98	0	10.53	15.50	1.64	60.42	5.18
		Pt2	13.81	3.44	0	0.4	2.17	16.08	0.23	58.30	5.56
		Pt3	31.61	3.44	0.08	0.22	13.40	3.16	0.49	35.81	0
		Pt4	0	7.66	0	0	46.58	0	0	45.76	0

3 失效机理分析

3.1 腐蚀失效的原因

金属材质失效通常是由内因和外因共同作用导致的。追溯具体影响因素时，一般需从以下方面入手寻找：材质、介质以及其他因素等。

3.1.1 材质因素

根据设计要求，该内件需使用 304 不锈钢，但根据 1#样品的 EDS 分析结果可知，去除腐蚀产物后，

该内件断口表面的成分与 304 不锈钢的成分有差别。主要是 Ni 含量偏低，达不到 304 不锈钢化学成分的国标规定要求，导致了材料的耐蚀性降低，是内因之一。因为 Ni 含量偏低将直接导致不锈钢材料的耐蚀性下降。

观察发生腐蚀失效的不锈钢内件的金相形貌可知，该内件的晶粒呈五边形，且晶粒间又可见大量连续的颗粒状碳化物，形成了晶间贫铬区。这是由于热处理不当，或者使用温度正好处于敏化温度范围所导致的^[21]。此为导致材料耐蚀性降低的另一内因，具有

这类缺陷的不锈钢易于发生点腐蚀和晶间腐蚀。

3.1.2 介质因素

内件失效的内部因素是其本身存在易发生晶间腐蚀的倾向,外部因素则是介质的作用。从 2#样品腐蚀产物 EDS 结果来看,腐蚀产物中含有较多的 S 元素和 O 元素。结合前述硫磺再生塔的工艺条件可知,硫元素来自介质中的含硫化合物,氧元素一部分来自介质中溶解氧,它们为不锈钢阳极腐蚀溶解过程提供了阴极反应的去极化剂^[22]。与此同时,晶间腐蚀所形成的腐蚀产物在介质的冲刷作用下更容易被带走,导致更容易发生腐蚀的活性表面裸露出来。

3.1.3 其他因素

从现场考察和对失效试样的分析来看,失效试样没有受到其他因素的作用。例如人为的机械损伤、工艺操作不当导致工艺介质的剧烈波动等,因此可以排除其他因素对试样失效的影响。

3.2 腐蚀失效机制

一般来讲,室温下,碳(C)在奥氏体不锈钢中的溶解度较低,因此只有经过恰当的固溶处理后,C才能均匀地分散在奥氏体中,以保证其具有较高的化学稳定性。如果固溶处理时温度偏低或保温时间不足,C会在奥氏体的晶界处富集,与Cr形成复杂、不稳定的间隙碳化物 Cr_{23}C_6 析出,造成晶界附近Cr含量小于钝化所需的临界浓度,形成由处于活化态的晶界贫铬区与处于钝态的中心富铬区组成的具有较大电位差的活化-钝化电池,从而增大不锈钢材料的晶间腐蚀倾向,在腐蚀性介质的作用下,最终引起腐蚀的发生。

观察发生腐蚀失效的不锈钢内件的金相形貌可知,该内件的晶粒呈五边形,且晶粒间又可见大量连续的颗粒状碳化物,形成了晶间贫铬区。通常来讲,形成晶间贫铬区的原因^[23]有两个:其一是材料出厂前未经过固溶处理,或者固溶处理时温度偏低,保温时间不足,进而造成碳化物析出;其二是材料出厂时固溶处理合格,但在使用过程中,材料所处温度达到该材料的敏化温度(600℃左右),进而导致晶间贫铬。结合前述失效内件的使用工况条件可知,该内件使用温度为127℃,远未达到材料的敏化温度,故可判断出材料晶间贫铬区的形成是由于固溶处理不合格造成的,属于非敏化状态。

从图3d中可看出,该内件断口呈现出冰糖块状沿晶断口形貌,而这正是晶间腐蚀的典型特征^[24],由此可以判断出内件的失效原因应归结于晶间腐蚀。又由于材料处于非敏化态,因而是发生了非敏化态晶间腐蚀。此外,由表1的EDS结果可知,内件材质的含Ni量偏低,其结果是进一步降低了材料的钝化与修复能力,使晶间腐蚀更容易发生。

综合上述检测结果与分析讨论来看,硫磺再生塔

内件的失效原因是钝化修复能力偏差的不锈钢内件发生了非敏化态晶间腐蚀。

4 结论

1) 硫磺再生塔内件材质成分与设计要求的304不锈钢的成分不太符合,其中Ni元素含量比国标所规定的304不锈钢低,从而降低了内件的耐蚀性,是腐蚀发生的内因之一。

2) 腐蚀失效的另一内因是,内件未经固溶处理或固溶处理不当,导致了晶界处析出大量的碳化物,进而在晶间形成了贫铬区,导致了材料非敏化态晶间腐蚀的发生。

3) 腐蚀介质中含S化合物和 O_2 的阴极去极化作用,保证了内件基体阳极溶解的进行,这是诱发内件非敏化态晶间腐蚀失效的外因之一。

4) 高速流动的腐蚀介质的冲刷作用加快了腐蚀产物从基体表面剥离和新活性基体表面的露出,同时加快了含S化合物和 O_2 到达去极化地点,进而加速了晶间腐蚀进程,这是诱发内件发生非敏化态晶间腐蚀的另一外部因素。

综合以上分析结果,为防止内件腐蚀失效的再次发生,建议采取如下改进措施:

1) 更换合格的304奥氏体不锈钢内件,并对新更换的内件进行化学成分和组织结构的复验,以确保其Ni、Cr含量符合国标所规定的要求和固溶处理合格。

2) 改变工作介质的流向和降低其流速,以避免或降低工作介质对内件晶间腐蚀的加速作用。

3) 可考虑将内件更换为耐晶间腐蚀的双相钢,代替目前使用的304奥氏体不锈钢。

参考文献:

- [1] 卞凤鸣,谭国强,刘文. 茂名分公司硫磺回收联合装置运行总结[J]. 石油与天然气化工, 2003, 32(3): 150-155. BIAN Feng-ming, TAN Guo-qiang, LIU Wen. Sulfur recovery unit operation summary of maoming branch[J]. Petroleum and natural gas chemical industry, 2003, 32(3): 150-155.
- [2] 胡敏. 云南石化硫磺回收装置设计特点与试运行总结[J]. 炼油技术与工程, 2018(1): 1-6. HU Min. Design features and trial operation summary of sulfur recovery unit of yunnan petrochemical company[J]. Refining technology and engineering, 2018(1): 1-6.
- [3] 葛晶,冯忠亮. 管壳式换热器和板式换热器的腐蚀与防护[J]. 化学工程师, 2008, 22(9): 45-47. GE Jing, FENG Zhong-liang. Corrosion and protection of shell and tube and plate heat exchanger[J]. Chemical engineer, 2008, 22(9): 45-47.
- [4] 熊金平,左禹,田梅. 制氢装置水分离器入口法兰及三

- 通失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(1): 54-56.
XIONG Jin-ping, ZUO Yu, TIAN Mei. Failure of tee and flange of hydrogen producing set[J]. Corrosion science & protection technology, 2000, 12(1): 54-56.
- [5] 熊金平, 左禹, 胡定铸. 重油加氢装置脱硫系统再生塔顶空冷器出口管束腐蚀穿孔原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(3): 178-179.
XIONG Jin-ping, ZUO Yu, HU Ding-zhu. Failure analysis for pitting of carbon steel tube on heavy oil hydrogenation equipment[J]. Corrosion science & protection technology, 2002, 14(3): 178-179.
- [6] 李庆华, 王博, 杨根柱, 等. T0103 苯甲酸蒸馏塔内壁腐蚀沟槽产生原因[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(7): 570-573.
LI Qing-hua, WANG Bo, YANG Gen-zhu, et al. Inwall corrosion of T0103 distillation tower of benzoic acid[J]. Corrosion & protection, 2011, 32(7): 570-573.
- [7] 熊金平, 胡定铸. 不锈钢换热器失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(2): 83-84.
XIONG Jin-ping, HU Ding-zhu. Failure analysis for stainless steel heat-exchanger[J]. Corrosion & protection, 2001, 22(2): 83-84.
- [8] 陈敏. 硫磺尾气脱硫装置再生塔塔壁凹坑成因分析[J]. 石油化工设备技术, 2003, 24(4): 41-43.
CHEN Min. Cause analysis of wall depression of regeneration tower in sulfur tail gas desulfurization unit[J]. Petrochemical equipment and technology, 2003, 24(4): 41-43.
- [9] 白洪波, 杨文军. 硫磺回收装置再生塔重沸器泄漏的原因分析及对策[C]// 中国化工学会 2012 年石油化学学术年会论文集. 北京: 中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 2012.
BAI Hong-bo, YANG Wen-jun. Reason analysis and countermeasures of reboiler leakage in regenerator of sulfur recovery unit[C]// China society of chemical industry 2012 petrochemical annual meeting. Beijing: PRI, 2012.
- [10] 孙继慧. 硫磺回收塔底重沸器腐蚀原因分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2004, 21(2): 34-36.
SUN Ji-hui. Causes of corrosion of bottom reboiler of sulfur recovery tower[J]. Petrochemical corrosion and protection, 2004, 21(2): 34-36.
- [11] 陈平. 硫磺回收装置再生系统腐蚀原因及对策[J]. 石油和化工设备, 2017(3): 85-88.
CHEN Ping. Reasons and countermeasures for corrosion of regeneration system of sulfur recovery unit[J]. Petroleum and chemical equipment, 2017 (3): 85-88.
- [12] 刘燕敦. 硫磺回收装置工艺设备腐蚀原因分析及防护对策[J]. 石油化工设备技术, 2010, 31(4): 43-48.
LIU Yan-dun. Analysis of corrosion causes and protective measures for process equipment of sulfur recovery unit [J]. Petrochemical equipment technology, 2010, 31(4): 43-48.
- [13] 王博, 李德超, 李庆华, 等. 硝酸重沸器的腐蚀失效分析和防护对策[J]. 表面技术, 2011, 40(1): 63-67.
WANG Bo, LI De-chao, LI Qing-hua, et al. Failure analysis and protection of nitric acid multiple-boiler[J]. Surface technology, 2011, 40(1): 63-67.
- [14] 熊金平, 左禹, 郭超, 等. 苯酚生产装置的 316L 不锈钢塔开裂失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(5): 363-365.
XIONG Jin-ping, ZUO Yu, GUO Chao, et al. Failure analysis for crack of stainless steel tower on phenol equipment[J]. Corrosion science & protection technology, 2005, 17(5): 363-365.
- [15] 张胜寒, 贾伟, 郭彦磊, 等. 304 不锈钢晶间腐蚀的研究[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(3): 236-238.
ZHANG Sheng-han, JIA Wei, GUO Yan-lei, et al. Intergranular corrosion of 304 stainless steel[J]. Steam turbine technology, 2011, 53(3): 236-238.
- [16] 贺睿, 曹平. 304 不锈钢酸性气体压力管道开裂失效分析[J]. 山东化工, 2018(3): 71-72.
HE Rui, CAO Ping. Cracking failure analysis of 304 stainless steel acid gas pressure pipe[J]. Shandong chemical industry, 2018(3): 71-72.
- [17] 屈兴胜, 林成, 刘志林. 奥氏体不锈钢晶间腐蚀[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2007, 27(1): 45-46.
QU Xing-sheng, LIN Cheng, LIU Zhi-lin. Study on intergranular corrosion of 304 stainless steel[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology(Natural science edition), 2007, 27(1): 45-46.
- [18] 郑海生. 奥氏体不锈钢晶间腐蚀问题的研究及防止[J]. 机电工程技术, 2004, 33(1): 46-47.
ZHENG Hai-sheng. Study on intergranular corrosion of austenitic stainless steel and its prevention[J]. Electromechanical engineering technology, 2004, 33(1): 46-47.
- [19] 窦丽娟, 党辉, 尚秀丽. 304 不锈钢晶间腐蚀裂纹失效分析[J]. 金属世界, 2013(4): 22-24.
DOU Li-juan, DANG Hui, SHANG Xiu-li. 304 Stainless steel intergranular corrosion crack failure analysis[J]. Metal world, 2013(4): 22-24.
- [20] 熊金平, 左禹, 胡定铸. 波纹不锈钢换热板腐蚀开裂失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(6): 435-437.
XIONG Jin-ping, ZUO Yu, HU Ding-zhu. Failure analysis for corrosion cracking of a heat-exchanger of stainless steel[J]. Corrosion science & protection technology, 2005, 17(6): 435-437.
- [21] 孙晓娜, 雷毅, 张鹰. 厚板奥氏体不锈钢焊缝显微组织分析[J]. 金属热处理, 2006, 31(10): 21-23.
SUN Xiao-na, LEI Yi, ZHANG Ying. Microstructure analysis of thick plate austenitic stainless steel weld[J]. Metal heat treatment, 2006, 31 (10): 21-23.
- [22] GAO Y, ZHANG C, XIONG X, et al. Intergranular corrosion susceptibility of a novel Super304H stainless steel[J]. Engineering failure analysis, 2012, 24(9): 26-32.
- [23] SHIMADA M, KOKAWA H, WANG Z J, et al. Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin-induced grain boundary engineering[J]. Actamaterialia, 2002, 50(9): 2331-2341.
- [24] 王荣滨. 18-8 型奥氏体不锈钢晶间腐蚀原因分析[J]. 材料保护, 1999, 30(12): 31-32.
WANG Rong-bin. Cause analysis of intergranular corrosion of type 18-8 austenitic stainless steel[J]. Material protection, 1999, 30(12): 31-32.