

某沿海火电厂贮煤仓构件腐蚀机制分析

赵忠贤¹, 李文戈¹, 赵远涛¹, 王双喜², 白玉峰³, 吴新锋¹, 姜涛¹

(1.上海海事大学 商船学院, 上海 201306, 2.汕头大学 工学院, 广东 汕头 515063,
3.华能国际电力股份公司 海门电厂, 广东 汕头 515132)

摘要:目的 研究某火电厂沿海煤仓构件的腐蚀情况, 分析其腐蚀机制。方法 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对构件表面与内部区域的腐蚀形貌及腐蚀产物分布进行表征, 借助能量色散 X 射线光谱仪 (EDS) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 等仪器, 对腐蚀产物元素组成及物相进行表征分析, 结合贮煤仓构件服役环境探讨腐蚀机制。结果 沿海火电厂贮煤仓构件腐蚀情况较为严重且分布极广, 腐蚀类型主要为点蚀。腐蚀产物厚度约为 3.82 mm, 表层和内部分别为黄色物质和灰黑色疏松物质, 且聚集有球状和丝状或棉团状铁锈。腐蚀产物组成元素以 O、Fe 为主, 其中表面黄色物质的主要物相为 Fe_2O_3 , 表面丝状或棉团状物质主要为 $\alpha\text{-FeOOH}$, 内部灰黑色物质的主要物相为 Fe_3O_4 , 针片状物质为 $\gamma\text{-FeOOH}$, 球状物质的 C、Si、Al、Ca、Mg 等元素含量较高且主要物相为 SiO_2 , 为煤粉颗粒。结论 沿海电厂贮煤仓构件腐蚀初期为 Fe 的吸氧腐蚀, 并发生完全氧化脱水生成 Fe_2O_3 , 其良好致密性使内部发生氧浓差腐蚀生成 Fe_3O_4 , 底面产物主要为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 的混合物, 而煤粉颗粒和燃煤产生的 CO_2 、 SO_2 等酸性气体为腐蚀的快速发生提供了环境。发生的点蚀极易造成穿孔, 需采取更有效的防护措施。

关键词: 沿海煤仓; 产物; 机制; 煤粉; 吸氧腐蚀; 氧浓差

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)04-0332-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.039

Corrosion Mechanism Analysis of Parts of Coal Storage Bunker in a Thermal Power Plant along the Coast

ZHAO Zhong-xian¹, LI Wen-ge¹, ZHAO Yuan-tao¹, WANG Shuang-xi²,
BAI Yu-feng³, WU Xin-feng¹, JIANG Tao¹

(1.School of Merchant Marine Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2.School of Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China; 3.Haimen Power Plant, Huaneng Power International, Inc, Shantou 515132, China)

ABSTRACT: This work aims to investigate the corrosion mechanism of coal storage bunker parts in a thermal power plant. The study focuses on the analysis of corrosion mechanisms and causes on the coal storage bunker of power plant situated in coastal

收稿日期: 2019-10-25; 修订日期: 2020-01-25

Received: 2019-10-25; Revised: 2020-01-25

基金项目: 中国华能集团科技计划项目基金 (HNKJ17-G18)

Fund: Supported by China Huaneng Group Technology Project Funding (HNKJ17-G18)

作者简介: 赵忠贤 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋材料的腐蚀与防护。

Biography: ZHAO Zhong-xian (1993—), Male, Master, Research focus: material corrosion and protection.

通讯作者: 李文戈 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶与海洋结构物腐蚀、污损与防护。邮箱: liwenge66@163.com

Corresponding author: LI Wen-ge (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion, fouling and protection of ships and marine structures. E-mail: liwenge66@163.com

引文格式: 赵忠贤, 李文戈, 赵远涛, 等. 某沿海火电厂贮煤仓构件腐蚀机制分析[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 332-338.

ZHAO Zhong-xian, LI Wen-ge, ZHAO Yuan-tao, et al. Corrosion mechanism analysis of parts of coal storage bunker in a thermal power plant along the coast[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 332-338.

environment. The corrosion morphologies and the extent of corrosion products distribution on the surface and internal layers of the parts were systematically characterized by scanning electron microscopy (SEM). The phases and composition of the corrosion products were analyzed by the energy dispersed X-ray spectrum (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The corrosion mechanism of parts were extensively discussed. It was noted that the mode of corrosion was localized corrosion, which severely attacked the working parts and structural materials on the coal storage bunker. The thickness of the corrosion area was about 3.82 mm. The corrosion morphology was heterogenous in nature with surface layer appearing rust brown while the internal layers had loose gray coloration. Aggregation of spherical and filamentous or cotton like rust alternated between outer and internal layers. The O and Fe were the main ingredient elements of the corrosion products. The main phase constituents of the brown rust, filamentous or cotton-like, gray-black substances and the needle-like substance were Fe_2O_3 , $\alpha\text{-FeOOH}$, Fe_3O_4 and $\gamma\text{-FeOOH}$, respectively. Whereas, the globular substance consisted of a relatively high content of C, Si, Al, Ca, Mg and the main component was SiO_2 , which was caused by the pulverized coal particles. The corrosion mechanism of the parts was a complex reaction between various factors. At the initial stage of corrosion, the oxygen-absorbing corrosion reaction happened between the anode of Fe and the cathode of O_2 , and the following dehydration led to the production of the Fe_2O_3 . However, due to lack of O_2 in internal and bottom of the parts the corrosion products of Fe_3O_4 appeared as oxygen concentration cell corrosion. Thus, the bottom products were mainly the mixture of Fe_3O_4 and Fe_2O_3 . Acidic gases such as CO_2 and SO_2 produced by pulverized coal particles and coal combustion created the conducive environment for the rapid corrosion. In these severe corrosive environments, failures of the parts like perforation could happen due to the pitting corrosion, which needed to be minimized by effective protective measures.

KEY WORDS: coal storage bunker; products; mechanism; pulverized coal; oxygen corrosion; oxygen concentration

沿海火电厂常年处于高温、高湿、高盐的大气环境中,加之周围大气污染较重,使该地区 CO_2 、 SO_2 等酸性氧化物浓度较高^[1-3],导致该地区火电厂的腐蚀极为严重且范围极广。在火电厂中,贮煤仓环境则更为恶劣,其在输煤、堆煤过程中,产生大量的煤粉尘污染,污浊度较高,使仓内腐蚀等级最高可达 C5 级,腐蚀性很高^[4]。近年来,为减少污染,国内新建或升级改造的火电厂贮煤仓几乎全部为封闭式。因此,为避免因仓体跨度过大而发生垮塌,建造过程中大量采用强度高、承载大、自重小的钢构件以增加支撑强度,减轻整体结构重量。目前,我国结构钢大多采用低碳钢或低合金钢(如 Q235B、Q235C、Q345B 等),但这一类钢材的耐腐蚀性能较差,而相应的防护措施也不够完善,极易发生腐蚀^[5]。由于贮煤仓钢结构跨度较大且中部无支撑柱,一旦因腐蚀造成构件强度下降极易发生安全事故。因此,对沿海火电厂恶劣环境中构件腐蚀机制的研究具有重要的工程应用及科研价值,能够为工程材料的腐蚀防护提供重要的指导意义。

对海洋大气环境下构件腐蚀问题的研究开始较早也极为广泛。高岩等人^[6]采用实地暴露实验探究了 Q235 钢分别在工业大气、海洋大气及其混合大气环境中的腐蚀行为,结果表明,重工业和海洋大气环境中的腐蚀最为严重。研究方法多采用单一条件控制下的关键因素腐蚀模拟。WANG 等人^[7]通过盐雾和恒温恒湿实验研究了海洋大气 Q235 钢的腐蚀规律,并发现随着温度、相对湿度、氯离子浓度的升高,腐蚀速率皆随之增加,氯离子浓度和相对湿度分别为 1.75%

和 85%时,腐蚀速率达到峰值。在盐雾环境中, Q235 钢的腐蚀表现为点腐蚀。郭明晓等人^[8]借助 NaHSO_3 和 NaCl 模拟了海洋工业大气环境,研究了 SO_2 和盐雾两个因素对碳钢初期腐蚀行为的影响,实验结果表明初期腐蚀呈现由加速向减速过程转化的特点,并且产物呈外层疏松、内层致密的层状结构。上述海洋腐蚀行为模拟大多只能对一或两个腐蚀因素进行研究,并且忽略了恶劣环境中工业粉尘等污染物颗粒对腐蚀的影响,很难准确反映出真实的腐蚀条件及过程,所以需要根据实际服役场景进行研究,更准确地反映材料的真实腐蚀状况。

本文针对沿海地区某火电厂贮煤仓内件发生的严重腐蚀情况进行勘察取样,采用 SEM、EDS 和 XRD 等方法对采集到的腐蚀产物样品的形貌、元素及物相等方面进行了表征分析,探讨了仓内构件的腐蚀机制。

1 沿海贮煤仓服役(腐蚀)环境

在大气环境中,构件的腐蚀与大气湿度、温度以及腐蚀介质浓度有直接关系。相对湿度达到 70%以上时,发生腐蚀速率较高且较为严重的电化学腐蚀^[9]。汕头地区为亚热带季风海洋性气候,属于腐蚀环境最恶劣的海洋大气环境,表 1 所示为该地区 2018 年度大气环境特征,湿度和温度常年保持较高水平,表明大气中所含水蒸气和含盐量都相对较高。而沿海地区水汽中含有大量随海水蒸发的 Cl^- 而形成盐雾,盐雾的沉积率随 Cl^- 浓度的升高而增加,所以高盐度的沿海地区的盐雾沉积率也很高^[10-11]。

表 1 汕头地区 2018 年大气环境特征
Tab.1 Characteristics of atmospheric environment
in Shantou area in 2018

Area	Temperature/°C			Relative humidity/%			Precipitation/mm		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
Shantou	29	15	22.9	82	68	75.8	272	31	119.3

该研究对象贮煤仓位于汕头海湾内,距海边直线距离约 3 km,其周围及内部属于湿热工业-海洋大气环境,燃煤发电排放的烟气中含有 SO_x 、 CO_2 、 NO_x 及 H_2S 等酸碱性氧化物^[11-13],且周边建有石化等工业企业,使得沿海工业湿热大气环境中的酸根离子大量

表 2 贮煤仓内空气质量监测数据
Tab.2 Air quality monitoring data in coal storage bunker

Area	Temperature /°C	Relative humidity/%	Dust concentration/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dust particle/%		
				< 60 head	60~160 head	> 160 head
Transport trunk	24.3	80.4	312	5.1	92.7	2.2
Inside of bunker	23.5	81.1	182	5.0	91.9	3.1

2 沿海贮煤仓构件腐蚀机制研究

为研究沿海贮煤仓构件的腐蚀机制,对汕头某沿海火电厂贮煤仓内部构件的腐蚀状况进行了勘察,并采集了输煤设备钢构件部分典型区域的腐蚀产物作为样品,通过 SEM、EDS 和 XRD 对样品的微观形貌、元素与物相组成等方面进行了表征和半定量分析。

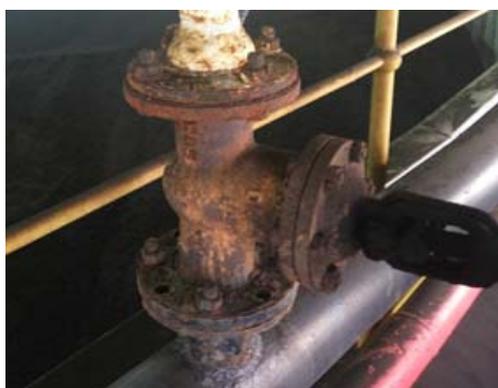
2.1 构件腐蚀及其宏观形貌分析

如图 1 所示分别为贮煤仓喷淋设施和输煤设备的腐蚀情况,其服役时长仅为 5~7 a,采用防腐性能较差的低碳钢,涂层为常规防腐涂料,其耐腐蚀性能一般,多适用于内陆等轻防腐环境,而目标区域为

积聚。同时,原煤在存储过程中会挥发 CH_4 、 H_2S 和 CO_2 等气体,堆取料机取煤、堆煤过程中产生大量的煤尘等固体污染物,煤仓内空气监测数据如表 2 所示,贮煤仓内平均温度和湿度都略高于室外,干道粉尘质量浓度为 $312\text{ mg}/\text{m}^3$,瞬时最高超过 $500\text{ mg}/\text{m}^3$;仓内粉尘平均质量浓度为 $182\text{ mg}/\text{m}^3$,瞬时最高达 $286\text{ mg}/\text{m}^3$,粉尘颗粒的粒径主要分布在 60~160 μm 。而贮煤仓实施全封闭后仓内形成密闭空间,为降低仓内污浊度,煤仓不得不进行大量的喷淋降尘作业^[12],导致仓内湿度升高,按照 ISO 9223—1992 大气环境标准规定划分,贮煤仓大气腐蚀等级为 C4 或 C5 级,腐蚀性极高,为腐蚀的发生提供了极佳的条件。

强腐蚀环境,加之缺少日常维护,仓内各构件已经发生大面积严重腐蚀,涂装的防腐蚀涂层也已经失效,对应区域的涂层出现起皮、脱落等失效现象,而覆盖有污染物的区域腐蚀情况更加严重,且由于煤灰、扬尘等污染物积聚在表面使腐蚀区域产物的体积和疏松度都相对较高。

选取输煤设备的一根支撑脚架作为研究目标区域,并选取一较重腐蚀区域进行腐蚀产物样品采集及基体清洁,以观察基体的腐蚀形貌及状态,清洁后基体腐蚀区域形貌如图 2 所示。从图 2 中可以发现,基体腐蚀区域的整体腐蚀情况较为严重,其中如黄标区域大量腐蚀点在表面分布较为密集、均匀,而红标区域的腐蚀坑则更大,表明该区域发生点蚀特征明显,并且已经出现深度腐蚀。



a 喷淋装置



b 输煤装置

图 1 贮煤仓构件部分腐蚀区域

Fig.1 Corroded area of steel structure of coal storage bunker: a) spraying facilities, b) coal handling

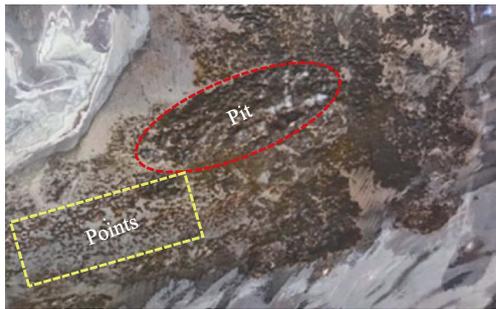


图 2 目标区域基体腐蚀形貌
Fig.2 Corrosion morphology of the target area

在支撑脚架中间区域上表面采集的腐蚀产物样品宏观形貌如图 3 所示，可以看出，腐蚀产物表面为黄色，表面部分区域分布有颗粒状凸起，底部腐蚀产物颜色不均一，为黄黑交织分布。腐蚀产物表内颜色不一，表明产物组成物质较为复杂，样品整体厚度约为 3.82 mm，内部为较为稀疏的黑灰色夹杂少许黄色物质。

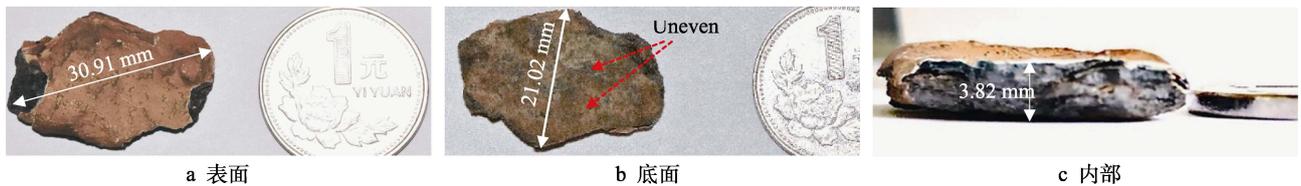


图 3 腐蚀产物样品宏观形貌
Fig.3 Macroscopic morphology of corrosion product samples: a) surface, b) bottom, c) interior

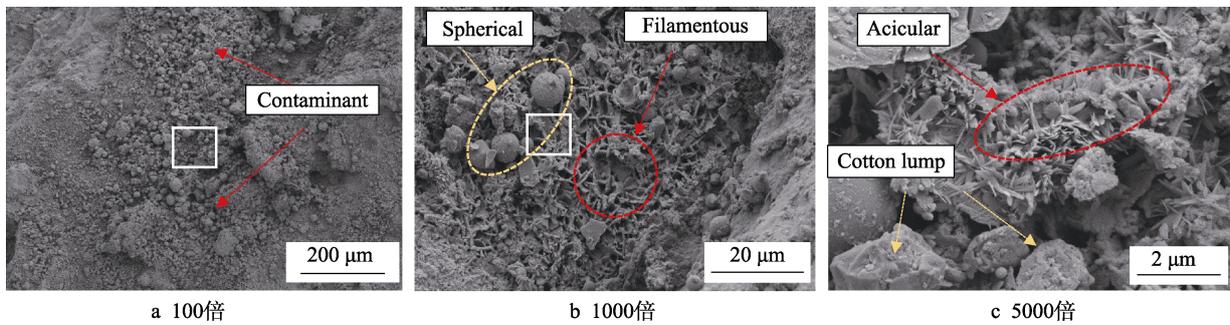


图 4 腐蚀产物表面 SEM 照片

Fig.4 SEM photos of the surface of the corrosion product: a) low magnification, b) medium magnification, c) high magnification

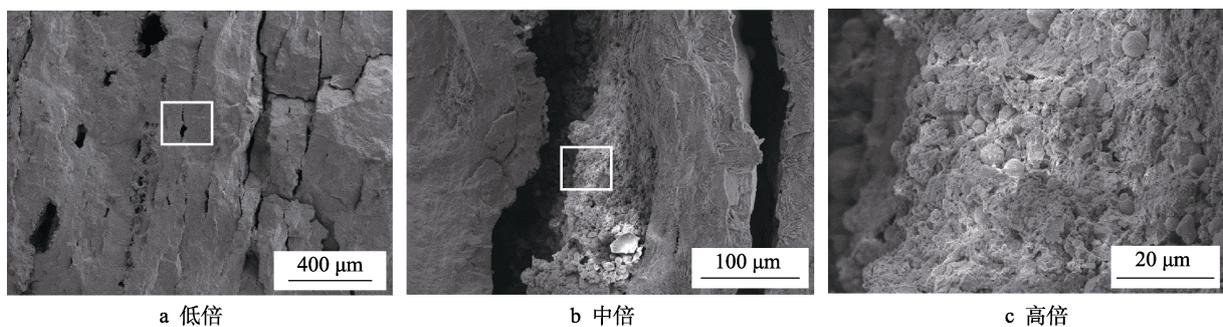


图 5 腐蚀产物内部 SEM 照片

Fig.5 Internal SEM photograph of corrosion products: a) low magnification, b) medium magnification, c) high magnification

2.2 腐蚀产物微观形貌分析

腐蚀产物样品表面不同倍数下的微观形貌观察结果如图 4 所示。由图 4a 可见，腐蚀产物表面部分区域覆盖一层极为稀疏的污染物，并分布着规则不一的颗粒状物质及其团聚物。由图 4b 可知，表面覆盖物为大量丝状物质和部分球状颗粒，但积聚状态较为稀疏松散。进一步放大至 5000 倍（如图 4c）可以发现，腐蚀产物表面覆盖有棉团状物质。此外，部分颗粒表面附着有针片状物质。

图 5 为腐蚀产物样品内部不同倍数下的微观形貌图。从图 5 中可见，腐蚀产物内部物质结构分层明显，腐蚀层相对致密，但腐蚀产物层结构复杂，层间有较多缺陷，如缝隙较多且宽度较大、孔洞明显等，部分孔隙内积聚有球状颗粒等疏松结构物质。该区域的 1000 倍放大图（图 5c）也进一步说明球状颗粒在腐蚀产物表面和内部层间裂纹、缝隙之中都有广泛的分布。

2.3 腐蚀产物表面元素分析

图6和表3分别为样品表面EDS测试分析点位与能谱分析结果。表3的能谱分析结果可知,样品表面物质的组成元素除Fe和O,还有C、Si、Al、Mg、Ca、S以及Cl等元素。其中Fe和O比例相对较高,说明腐蚀产物表层主要为Fe的氧化物,推测表面附着的丝状或棉团状物相可能为 α -FeOOH,文献[12-13]中的研究过程中也发现有类似结构形貌的物质及结果出现,点位7、8、9还存在一定比例的C、Mg、Ca、Si和Al等元素。由此可知,腐蚀产物表面聚集的球状物质的组成元素主要为C、Si、Al、Ca以及Mg等元素。由于煤的主要成分为碳、二氧化硅、氧化铝、氧化铁、氧化钙、氧化镁等物质^[13],与EDS能谱分析结果相吻合,故腐蚀产物表面和缝隙中分布的球状物质为煤粉尘颗粒。

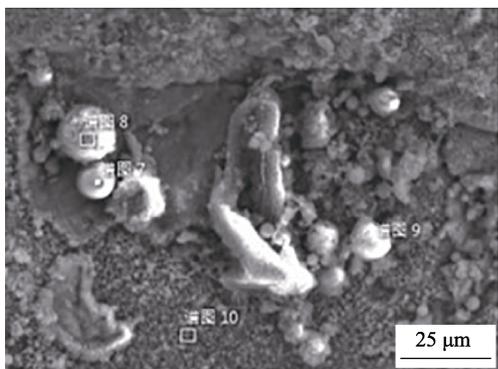


图6 表面SEM测试分析点位图
Fig.6 Surface SEM test analysis point location

表3 腐蚀产物表面EDS检测结果
Tab.3 EDS test results of corrosion products

Element	7		8		9		10	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
C	6.32	10.64	8.18	13.92	7.48	14.75	4.76	11.47
O	45.50	57.55	47.29	60.38	36.93	54.66	29.83	53.92
Fe	6.96	2.52	15.64	5.72	37.11	15.73	59.49	30.79
Si	19.34	13.94	16.90	12.29	5.95	5.02	0.62	0.64
Al	12.64	9.48	7.58	5.74	4.89	4.29	1.10	1.18
Ca	4.52	2.28	1.42	0.72	1.46	0.86	0.07	0.05
Mg	2.21	1.84			3.71	3.61		
Cl					0.10	0.07	0.1	0.08
S							0.14	0.13

2.4 腐蚀产物内部元素分析

图7和表4分别为样品表面EDS测试分析点位与能谱分析结果。相较表面,内部能谱分析结果显示C、Si及Al三种元素明显减少,而各点的Fe和O质量分数总计超过80%,表明腐蚀产物内部主要成分是

Fe的氧化物。其中1、2点位腐蚀产物呈现针片状,据此推断其物相可能为 γ -FeOOH^[14-15]。

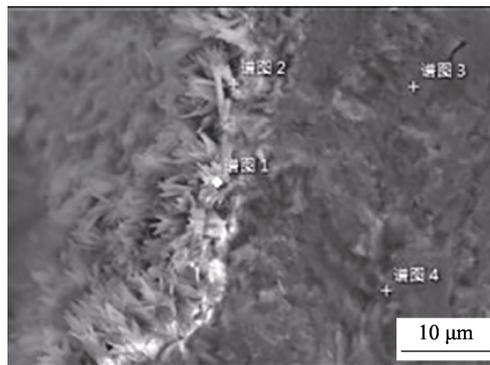


图7 内部SEM测试分析点位微观形貌
Fig.7 Internal SEM test analysis point microtopography

表4 腐蚀产物内部EDS检测结果
Tab.4 Internal EDS test results of corrosion products

Element	1		2		3		4	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
C	4.60	9.99	4.10	9.06	2.25	5.95	5.15	10.56
O	39.07	63.64	38.19	63.34	27.17	53.88	43.16	66.48
Fe	55.68	25.98	57.05	27.10	70.39	39.98	51.26	22.62
Cl	0.42	0.31	0.66	0.50	0.07	0.06	0.14	0.10
Si	0.22	0.09			0.12	0.13	0.18	0.16
S							0.11	0.08

2.5 腐蚀产物物相分析

图8为在贮煤仓腐蚀构件目标区采集的腐蚀产物XRD图谱。从图8中可知,腐蚀锈层中 Fe_3O_4 衍射峰最强,之后 Fe_2O_3 、 α -FeOOH、 γ -FeOOH等物相依次减弱,说明该腐蚀产物中的主要物相为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 ,并夹杂产生有少量的 α -FeOOH和 γ -FeOOH。

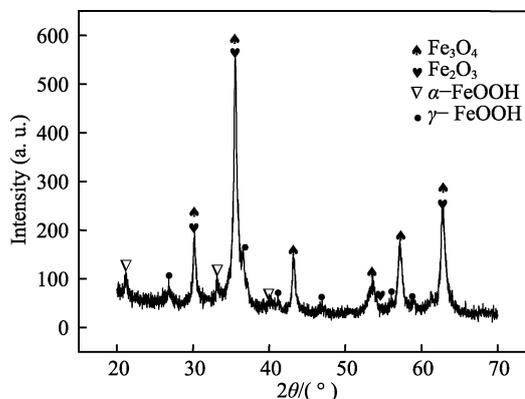


图8 贮煤仓构件腐蚀产物XRD图谱
Fig.8 XRD pattern of corrosion products of coal storage bunker components

综上,根据腐蚀产物定点元素分析结合四种物质的物理特性可以认为,腐蚀产物黄色表层内主要物相

为 Fe_2O_3 和少量 $\alpha\text{-FeOOH}$, 内部黑色物相主要为 Fe_3O_4 和少量 $\gamma\text{-FeOOH}$, 因此推断沿海火电厂贮煤仓构件发生的腐蚀主要是吸氧腐蚀, 同时煤粉也大量分布于腐蚀产物的表面和内部缺陷中。

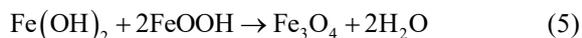
3 腐蚀机制分析及讨论

沿海电厂贮煤仓构件腐蚀过程主要是以铁的吸氧腐蚀为主的一系列复杂电化学反应。从电化学动力学过程来说, 其为 Fe 的氧化过程与氧的还原过程, 腐蚀类型为腐蚀前期因涂层或基材自身缺陷与液膜协同作用引起的点蚀和后期较厚锈层引起的氧浓差腐蚀, 而煤粉颗粒和 SO_2 、 Cl^- 等因素营造的酸性介质气氛则为加速腐蚀提供了环境。

腐蚀初期钢材表面由于空气中含有大量水蒸气极易积聚形成含有氯离子、氧分子的液膜, 由于氧的极化作用使基材极易发生吸氧腐蚀^[16,17]。铁在电化学反应过程中被氧化是阶段性的, 具体转变为: 铁在空气中以游离态在阳极被氧化成+2 价, 与 OH^- 接触后转化为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 形成不稳定的金属钝化膜(见式(1)—(2)), 而大气中 SO_2 和 Cl^- 可以轻易穿透金属钝化膜, 使其转变成 Fe 的羟基硫酸盐和羟基氯化物^[18], 从而进一步氧化, 最终转变为黄色易碎的 Fe 氧化物(Fe_2O_3 、 Fe_3O_4) 和氢氧化物($\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 等)(见式(3)—(4))。本研究中腐蚀产物主要为 Fe_2O_3 和针片状的 $\gamma\text{-FeOOH}$, 这是因为热力学不稳定、吉布斯自由能大的产物往往先生成, 即 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 最快, Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 次之, $\gamma\text{-FeOOH}$ 和 $\alpha\text{-FeOOH}$ 最慢^[19]。



而工业大气中的 SO_2 会促进还原性较强的 $\gamma\text{-FeOOH}$ 部分转变为非晶羟基氧化物 $[\text{FeO}_x(\text{OH})_{3-2x}]$ ^[20], 进一步分解脱水转化成图 5 中丝状或棉团状 $\alpha\text{-FeOOH}$ 并积聚平铺在 Fe_2O_3 表层(图 4a)。随着腐蚀的进行, 锈层厚度逐渐增加, 具有一定的致密性, 可以延缓 O_2 、 H_2O 等腐蚀介质渗入, 但同时也使铁锈表层和底层之间形成闭塞环境, 造成内部氧含量明显低于外部, 此时覆盖层下方基材发生氧浓差腐蚀^[21], 在该条件下, 腐蚀只进行到过程(3), 之后活化水解生成 Fe_3O_4 , 即:



由于该类腐蚀产物质地疏松且间断覆盖在钢材表面, 一旦堆积在腐蚀区域, 就会造成腐蚀产物的溶氧浓度表内不一, 使覆盖边缘成为富氧的阴极区, 而覆盖下方的钢材成为阳极, 进一步加快深度腐蚀^[22], 形成图 3 中点蚀坑。腐蚀产物与基材接触区域的黄褐色物质主要为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 的混合物(图 4b), 这

是因为该区域氧浓度不均, Fe_3O_4 与空气接触进一步被氧化为 Fe_2O_3 。

沿海火电厂燃煤烟气中的 S、C 含量范围为 1%~4%^[23], 原煤在存储过程中挥发的 CH_4 、 H_2S 和 CO_2 等气体, 使贮煤仓内水蒸气的酸根离子浓度增加, 盐雾沉降率增加, 去极化活化反应速率升高, 导致腐蚀速率升高。 H_2S 溶于水后电离呈酸性, 长期作用下极易造成基材减薄或加速局部深度点蚀甚至穿孔。同时, 腐蚀过程中产生的氢原子被钢铁吸收后, 在冶金缺陷区富集, 可能导致钢材产生脆化、裂纹等缺陷^[23-24], 最终缩短构件使用年限甚至造成坍塌。

仓内煤粉等固体污染物颗粒浓度极高, 其对腐蚀过程产生重要影响。最主要是煤粉颗粒在和机体接触后会发生电化学腐蚀, 此时煤粉充当阴极, 基体成为阳极, 加速基体腐蚀。其次, 煤粉尘的物理性质使其具有较强的吸附性, 沿海工业大气中的 SO_3 、 NH_3 及水汽遇到煤粉尘固体颗粒后加速在构件表面冷凝。最后, SEM 和 EDS 分析结果表明, 煤粉夹杂到腐蚀产物中使腐蚀产物内部过于疏松, 不仅其阻隔作用明显减弱甚至消失, 而且还极易造成氧浓差腐蚀, 导致基材内部更加深入的腐蚀, 严重威胁构件的服役强度和时间。

4 结论

1) 通过对贮煤仓构件典型腐蚀区域的观察后发现, 沿海电厂贮煤仓构件腐蚀极为严重, 腐蚀类型主要为点蚀, 腐蚀产物较多且结构稀疏。

2) 腐蚀产物样品的 SEM、EDS 和 XRD 的检测分析得出腐蚀产物主要分三部分: 表面黄色铁锈的主要物相为 Fe_2O_3 和 $\alpha\text{-FeOOH}$, 且积聚着大量的煤粉尘颗粒等污染物; 内部物相则主要为 Fe_3O_4 和 $\gamma\text{-FeOOH}$, 缝隙、孔洞等缺陷较多, 且同样积聚较多的煤粉尘颗粒等污染物; 底面黄褐色产物主要为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 的混合物。

3) 结合构件服役环境, 综合分析贮煤仓构件腐蚀主要是 Fe 的吸氧腐蚀, 主要腐蚀类型为点蚀和氧浓差腐蚀, 而混入的煤粉尘在加速水蒸气冷凝的同时造成腐蚀产物质地更加疏松, 加速腐蚀进程。燃煤产生的 CO_2 、 SO_2 等酸性氧化物极易在湿热大气中形成酸根离子, 与 Cl^- 共同作用为腐蚀的发生提供了条件。

参考文献:

- [1] WANG H, LYU X, GUO H, et al. Ozone pollution around a coastal region of South China Sea: Interaction between marine and continental air[J]. Atmospheric chemistry and physics discussions, 2017, 895: 1-35.
- [2] WANG J, VIRKKULA A, GAO Y, et al. Observations of aerosol optical properties at a coastal site in Hong Kong, South China[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2017,

- 17(4): 2653-2671.
- [3] CHEN W J, HAO L, DONG J H, et al. Effect of sulphur dioxide on the corrosion of a low alloy steel in simulated coastal industrial atmosphere[J]. *Corrosion science*, 2014, 83(7): 155-163.
- [4] 孙立峰. 选煤厂给煤仓系统粉尘安全防控理论与技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
SUN Li-feng. Research on theory and technology of dust safety prevention and control in coal bunker system of coal preparation plant[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2015.
- [5] 杜超然. 沿海钢栈桥构件的腐蚀状态评价与防护技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
DU Chao-ran. Corrosion state evaluation and protection technology of coastal steel trestle members[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [6] 高岩, 黄殷辉, 郑志军, 等. Q235 钢在广东省输电杆塔现场的大气腐蚀行为[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 39-46.
GAO Yan, HUANG Yin-hui, ZHENG Zhi-jun, et al. Atmospheric corrosion behavior of Q235 steel in transmission tower of Guangdong province[J]. *Journal of South China University of Technology(natural science edition)*, 2018, 46(7): 39-46.
- [7] 王秀民, 王培, 孙阳超, 等. Q235 钢在模拟海洋大气环境中的耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 104-111.
WANG Xiu-min, WANG Pei, SUN Yang-chao, et al. Study on corrosion resistance of Q235 steel in simulated ocean atmosphere[J]. *Surface technology*, 2015, 44(11): 104-111.
- [8] 郭明晓, 潘晨, 王振尧, 等. 碳钢在模拟海洋工业大气环境中初期腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2018, 54(1): 65-75.
GUO Ming-xiao, PAN Chen, WANG Zhen-yao, et al. Study on initial corrosion behavior of carbon steel in simulated atmospheric environment of marine industry[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2018, 54(1): 65-75.
- [9] 刘国超, 董俊华, 韩恩厚, 等. 耐候钢锈层研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006(4): 268-272.
LIU Guo-chao, DONG Jun-hua, HAN En-hou, et al. Progress in research on rust layer of weathering steel[J]. *Corrosion science and protection technology*, 2006(4): 268-272.
- [10] WANG J H, WEI F I, CHANG Y S, et al. The corrosion mechanisms of carbon steel and weathering steel in SO₂ polluted atmospheres[J]. *Materials chemistry and physics*, 1997, 47(1): 1-8.
- [11] 梁彩凤. 钢在中国大陆的大气腐蚀研究[J]. 电化学, 2001(2): 215-219.
LIANG Cai-feng. Atmospheric corrosion of parts in China[J]. *Electrochemistry*, 2001(2): 215-219.
- [12] 艾至伟. 燃煤电厂贮煤系统防尘技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
AI Zhi-wei. Research on dust prevention technology of coal storage system in coal-fired power plants [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [13] 康玉国, 闫伟, 肖建伟, 等. 依兰煤田依兰煤矿达连河组煤质特征研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(3): 65-67.
KANG Yu-guo, YAN Wei, XIAO Jian-wei, et al. Study on coal quality characteristics of Dalianhe formation in Yilan coal mine, Yilan coalfield[J]. *Coal technology*, 2019, 38(3): 65-67.
- [14] 李晓刚. 金属大气腐蚀初期行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LI Xiao-gang. Initial behavior and mechanism of metal atmospheric corrosion [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] 李巧霞, 王振尧, 韩薇, 等. 碳钢和耐候钢的大气腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(5): 394-400.
LI Qiao-xia, WANG Zhen-yao, HAN Wei, et al. Atmospheric corrosion of carbon steel and weathering steel[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2009, 29(5): 394-400.
- [16] 程子非, 金文倩, 马春红, 等. 金属材料在模拟地热水环境中的腐蚀与结垢特性[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 92-96.
CHENG Zi-fei, JIN Wen-qian, MA Chun-hong, et al. Corrosion and scaling characteristics of metallic materials in simulated geothermal water environment [J]. *Surface technology*, 2015, 44(8): 92-96.
- [17] 卢思敏. 沿海变电站金属材料的腐蚀成因及防腐[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
LU Si-min. Corrosion causes and corrosion protection of metal materials in coastal substations [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [18] 张宇, 刘亚鹏, 李开伟, 等. 南海大气环境下 304 不锈钢的点蚀特性研究[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 44-50.
ZHANG Yu, LIU Ya-peng, LI Kai-wei, et al. Pitting corrosion characteristics of 304 stainless steel in the atmosphere of the South China Sea[J]. *Surface technology*, 2018, 47(12): 44-50.
- [19] 林翠, 李晓刚, 刘晓东. 碳钢和耐候钢在北京城市大气环境中初期腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005(4): 193-199.
LIN Cui, LI Xiao-gang, LIU Xiao-dong. Initial corrosion behavior of carbon steel and weathering steel in Beijing urban atmosphere[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2005(4): 193-199.
- [20] 刘刚, 张奎志, 曲政, 等. 某滨海电厂钢结构腐蚀防护[J]. 腐蚀与防护, 2004(9): 400-401.
LIU Gang, ZHANG Kui-zhi, QU Zheng, et al. Corrosion protection of steel structure in a coastal power plant[J]. *Corrosion and protection*, 2004(9): 400-401.
- [21] WANG J S, TANG X, LI Y, et al. Observation and micro-electrochemical characterisation for micro-droplets in initial marine atmospheric corrosion[J]. *Corrosion engineering science and technology*, 2016, 51(4): 160.
- [22] 张民强, 黄丽琴, 刘光明, 等. S30432 在不同煤灰/烟气环境中的高温腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 251-256.
ZHANG Min-qiang, HUANG Li-qin, LIU Guang-ming, et al. Study on high temperature corrosion behavior of S30432 in different coal ash/smoke environments[J]. *Surface technology*, 2018, 47(8): 251-256.
- [23] 张耀丰, 丁毅, 陆晓峰, 等. 304 不锈钢在 H₂S 介质条件下的应力腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(2): 101-103.
ZHANG Yao-feng, DING Yi, LU Xiao-feng, et al. Stress corrosion of 304 stainless steel under H₂S medium[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2007, 27(2): 101-103.
- [24] 何松, 邢希金, 刘书杰, 等. 硫化氢环境下常用油井管材质腐蚀规律研究[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 14-20.
HE Song, XING Xi-jie, LIU Shu-jie, et al. Study on corrosion law of common oil well tube materials in hydrogen sulfide environment[J]. *Surface technology*, 2018, 47(12): 14-20.