

DOI: 10.19666/j.rlfed.202301299

燃气轮机发电机组备用中余热锅炉 省煤器鳍片管防腐研究

俞哲锋¹, 陶振涛², 许茂贤¹, 闫凤平¹, 周永刚², 黄岳¹, 赵虹²

(1.浙江浙能常山天然气发电有限公司, 浙江 常山 324000;

2.浙江大学热能工程研究所(能源清洁利用国家重点实验室), 浙江 杭州 310027)

[摘要] 针对燃气轮机发电机组频繁长期停机备用期间, 余热锅炉省煤器鳍片管 08Al 碳钢表面腐蚀严重的问题, 通过挂片法和电阻探针法, 研究 08Al 碳钢在临界湿度以上环境下的宏观腐蚀现象及腐蚀速率。结果表明: 在恒定的 20 °C 及相对湿度 70% 环境下, 08Al 碳钢在前 5 天的腐蚀速率最快, 腐蚀深度达到了 0.85 μm, 占整个过程总变化量的 47.7%; 腐蚀现象变化最为明显的过程, 包括质量及表面腐蚀面积比例的变化, 发生在约第 19~25 天; 随着相对湿度从临界湿度 70% 逐渐增加(环境温度 20 °C), 08Al 碳钢的各项腐蚀评价指标均呈线性上升趋势。根据研究结果制定的燃气轮机发电机组长期停机备用下的充氮保养策略, 可有效缓解余热锅炉省煤器鳍片管的腐蚀状况。

[关键词] 燃气轮机发电机组; 鳍片管; 08Al 碳钢; 腐蚀过程; 防腐策略

[引用本文格式] 俞哲锋, 陶振涛, 许茂贤, 等. 燃气轮机发电机组备用中余热锅炉省煤器鳍片管防腐研究[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 186-192. YU Zhefeng, TAO Zhen tao, XU Maoxian, et al. Study on anticorrosion of waste heat boiler economizer fin tube of gas turbine generator unit in standby state[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 186-192.

Study on anticorrosion of waste heat boiler economizer fin tube of gas turbine generator unit in standby state

YU Zhefeng¹, TAO Zhen tao², XU Maoxian¹, YAN Fengping¹, ZHOU Yonggang², HUANG Yue¹, ZHAO Hong²

(1.Zhejiang Zheneng Changshan Natural Gas Power Generation Co., Ltd., Changshan 324000, China;

2.State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: During frequent long-term standby state of gas turbine generator unit, the surface of 08Al carbon steel of waste heat boiler economizer fin tube will have serious corrosion problems. In this paper, the macroscopic corrosion phenomenon and corrosion rate of 08Al carbon steel above the critical humidity were studied by the method of hanging piece and electrical resistance probe. The results show that the corrosion rate of 08Al carbon steel is the fastest in the first 5 days under the constant environment of 20 °C and relative humidity of 70%, and the corrosion depth reaches up to 0.85 μm, accounting for 47.7% of the total change in the whole process. However, the most obvious corrosion phenomenon, including the change of weight and the surface corrosion area, occurred from about the 19th to the 25th day. With the relative humidity gradually increasing from the critical humidity of 70% (ambient temperature 20 °C), the corrosion evaluation indexes of 08Al carbon steel show a linear upward trend. Nitrogen filling maintenance strategy under long-term standby state was formulated, effectively alleviating the corrosion condition of economizer fin tube of waste heat boiler.

Key words: gas turbine generator unit; fin tube; 08Al carbon steel; corrosion process; anticorrosion strategy

近年来燃气轮机发电机组主要作为调峰机组, 启、停频繁^[1-2], 计划停运和备用频繁交替, 且停用

时间不确定, 年利用小时数较少, 相当一部分时间处于停运备用状态^[3]。在频繁的长期停机备用期间,

修回日期: 2023-01-25

基金项目: 浙江省能源集团有限公司科学技术项目(ZNJK-2021-030)

Supported by: Science and Technology Project of Zhejiang Energy Group Co., Ltd. (ZNJK-2021-030)

第一作者简介: 俞哲锋(1979), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统生产管理, 17315319@qq.com。

通信作者简介: 周永刚(1977), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为燃煤电厂清洁高效智能燃烧, trooper@zju.edu.cn。

燃气轮机发电机组的金属部件存在较为严重的腐蚀现象,其中以余热锅炉低压省煤器受热面鳍片管(鳍片的材质主要是碳钢)处的腐蚀尤为严重^[4-6]。当鳍片管发生严重腐蚀后,其光洁的金属表面会出现锈斑,并随着腐蚀的进一步加深及锈蚀的累积,锈斑逐渐凸起乃至剥落,造成其表面不平整且粗糙度增加,影响鳍片管的使用寿命,并会导致烟气的流通阻力上升,严重时甚至影响机组的正常带负荷能力^[7]。燃气轮机发电机组停机保养期间在其余热锅炉内部充入氮气或热干风,使金属表面与氧气隔绝,或减少金属表面冷凝的水分,可以使余热锅炉金属材料免受氧腐蚀而得到保护^[8]。然而在停机保养过程中,燃气轮机发电机组余热锅炉金属材料的腐蚀是一个非常缓慢的过程,过早进行保养措施会增加停机保养的能耗,而过晚进行保养措施则无法有效抑制其金属材料的腐蚀。因此,如何选择合适的时机进行针对性的停机保养,需要掌握余热锅炉低压省煤器受热面鳍片管金属材料在长期停机期间的腐蚀状况及其变化情况。

以往的研究中发现,环境因素对金属特别是碳钢材料腐蚀过程的影响非常复杂^[9-12]。首先,不同环境因素对金属腐蚀速率的影响一般是非线性的^[13],金属的腐蚀速率随相对湿度的增加呈指数增加^[14];其次,不同环境因素之间可能存在交互作用,腐蚀行为会受到多种因素的复杂影响。Zhi 等人^[15]收集了 16 个国家在 16 个大气腐蚀试验站对 17 种低合金钢的腐蚀数据作为实验数据集,基于数据集,建立了随机森林模型以实现腐蚀速率预测。Bhaskar 等人^[16]提出了一种预测均匀腐蚀速率的累积损伤函数模型(CDFM),并将其应用于铁、碳钢、低碳钢等常用工程金属,建立了一个大气环境中腐蚀速率评价的统一模型,模型综合了敏感性因子,以考虑金属对临界腐蚀剂的腐蚀敏感性。Xia 等人^[17]通过电化学噪声(EN)技术监测 Q235B 钢的大气腐蚀,并使用统计参数和频域分析来量化 Q235B 钢的均匀腐蚀速率。Cai 等人^[18]建立了 2 级线性增长模型来分析个体腐蚀增长和环境对碳钢、锌和铜的腐蚀影响,通过将腐蚀时间和环境因素作为预测变量,模型预测与实验非常吻合,定量描述腐蚀数据的不确定性并获得置信区间,然后用幂线性腐蚀动力学模型预测长期腐蚀损失,分析腐蚀损伤风险。尽管已经建立了许多描述金属大气在各种环境下的腐蚀行为理论和经验模型^[19-21],但目前尚未有针对燃气轮机发电机组停机环境下受热面鳍片管腐蚀过程

的相关研究。

本文模拟燃气轮机发电机组余热锅炉省煤器鳍片管在长期停机过程中的腐蚀环境,采用挂片法和电阻探针法研究鳍片管金属在不同相对湿度下的表面腐蚀过程,建立质量变化及腐蚀速率与暴露时间的数学模型,获得其腐蚀速率的定量变化数据,以此建立其腐蚀预测模型,进而对燃气轮机发电机组长期停机备用下的保养提供技术指导。

1 试 验

1.1 材料的选取及试片的制备

燃气轮机发电机组长期停机备用下的腐蚀尤其以余热锅炉烟道尾部受热面鳍片管相对最为严重,该处鳍片的金属材质为 08Al 碳钢,其化学成分见表 1。当钢中铬元素(Cr)质量分数达到 1.2%左右时,铬与腐蚀介质中的氧会构成一个很薄的氧化膜在的钢外表面,能防止钢基体的进一步腐蚀^[22],然而 08Al 碳钢中几乎不含 Cr,且没有其他易形成表面氧化膜的金属成分,因此比较容易受到氧腐蚀的影响。本文选择与余热锅炉尾部省煤器鳍片材料 08Al 碳钢进行腐蚀过程的研究。

表 1 08Al 碳钢的化学成分 单位: w/%
Tab.1 Chemical composition of 08Al carbon steel

元素	成分	元素	成分
C	0.08	P	0.03
Mn	0.37	S	0.03
Si	0.03	Cu	0.21
Cr	0.02	Al _i	0.05
Ni	0.23		

将 08Al 碳钢加工成如图 1 所示的 50 mm×25 mm×2 mm 的长方形金属挂片,其中一侧设置直径 5 mm 的圆孔,用于穿线悬挂。同时,采用 08Al 碳钢制成梳状金属片,作为如图 2 所示腐蚀探头的电阻探针,尽可能的保证其表面均匀发生腐蚀,并最大限度地消除环境温度变化引起的电阻变化,以获得高精度的腐蚀定量数据。

1.2 试验装置

根据过去 2 年内燃气轮机发电机组所在地的气象条件,相对湿度通常在 30%~90%,温度在 0~30 ℃。在低于某一相对湿度时,金属锈蚀速度很小,而高于这一相对湿度后,锈蚀速度会陡然增加,一般把这一相对湿度称为临界湿度。文献[23]中研究发现碳钢的临界相对湿度为 70%~75%,文献[24]中研究发现碳钢的临界相对湿度为 56%~70%,因此本文设

置恒温恒湿箱的相对湿度在 70% 以上, 温度为 20 °C, 以充分反映金属挂片腐蚀变化情况。停机期间采用集气袋在腐蚀严重的余热锅炉省煤器空间收集其环境气氛, 化验得到其气体成分组成见表 2, 可见燃气轮机发电机组在长期停机过程中的炉内气氛接近于大气, 并无明显的腐蚀成分气体存在。

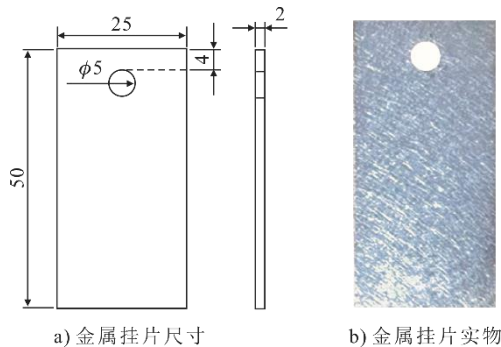


图 1 金属挂片结构尺寸及实物 (mm)

Fig.1 Structural dimension drawing and physical drawing of metal hanger (mm)

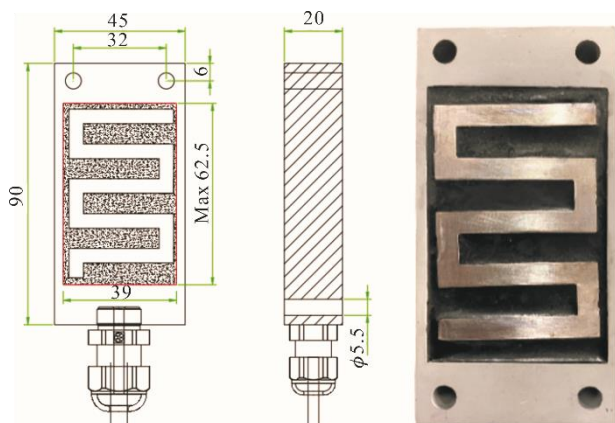


图 2 金属电阻探针结构尺寸及实物 (mm)

Fig.2 Structural dimensions and physical drawing of metal resistance probe (mm)

表 2 停机期间余热锅炉省煤器气氛组成 单位: %
Tab.2 Composition of atmosphere of waste heat boiler economizer in standby state

气体	体积分数	气体	体积分数
N ₂	77.60	SO ₂	≤0.10
O ₂	20.66	CO	≤0.10
H ₂ O	0.53	HCl	≤0.01
CO ₂	0.85		

试验装置示意如图 3 所示, 恒温恒湿箱提供试验所需且恒定的温度和湿度环境, 08A1 碳钢制成的电阻探针与金属挂片同时放置于恒温恒湿箱中, 模拟燃气轮机发电机组长期停机过程中余热锅炉省煤器鳍片管金属的腐蚀过程, DCM680 型大气腐蚀监测仪作为电阻探针电阻信号的输出设备, 连接

电阻探针并连续输出电阻变化值, 由计算机记录并计算用于描述腐蚀速率的定量数据。

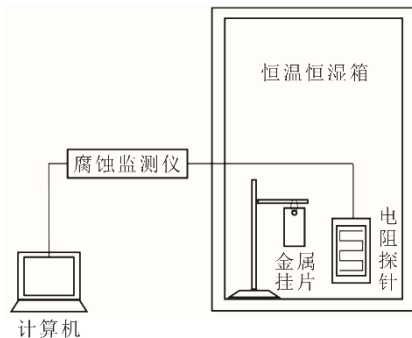


图 3 试验装置系统示意

Fig.3 Schematic diagram of test device system

1.3 试验方法及过程

腐蚀试片挂片法是指将一个试片放到腐蚀环境中, 一段时间后取出试片称量, 通过质量变化计算其腐蚀速度, 是工业上最为常用的简便腐蚀监测方法。在典型监测项目中, 试片在环境中的暴露时间一般为 1~3 个月, 然后取出进行称重分析。本文的试验步骤如下: 1) 用水和酒精对金属挂片的表面进行充分清洗, 并做干燥处理, 采用电子天平称量其质量 (精确到 0.1 mg), 记录及标记; 2) 用绝缘的悬挂线将多片金属挂片分别悬挂, 首先放置于烘箱中加热至余热锅炉省煤器鳍片管热态运行时的温度约 150 °C 并维持一段时间, 后打开烘箱门使其自然冷却后, 放置于恒温恒湿箱中, 并保证每片金属挂片之间及与恒温恒湿箱内壁互不接触且绝对绝缘; 3) 设定恒温恒湿箱的温度及湿度, 并长期保持恒定; 4) 定期观察金属挂片表面是否出现锈蚀痕迹, 并在特定的日期取出其中一片试片进行称重; 5) 为了获得金属挂片表面的腐蚀状态, 采用相机对取出的金属挂片表面腐蚀图像进行拍摄, 通过图像处理, 利用金属挂片表面裸露金属颜色与表面锈蚀成分颜色不同, 对图像每个像素的 RGB 值进行识别, 获得金属挂片表面腐蚀面积比例的定量数据。

采用称重法计算金属挂片的质量腐蚀速率 V_m (g/d), 计算公式为:

$$V_m = \frac{m_2 - m_1}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: m_1 为金属挂片前一时刻的质量, g; m_2 为金属挂片后一时刻的质量, g; Δt 为 2 次测量时间的间隔, d。

对腐蚀后的金属挂片拍照做图像处理, 表面腐蚀面积比例 P (%) 的计算公式为:

$$P = \frac{n}{N} \quad (2)$$

式中： n 为腐蚀区域像素点数； N 为金属试片区域像素点总数。

根据表面腐蚀面积比例 P ，可计算面积腐蚀速率 V_p (%/d)，计算公式为：

$$V_p = \frac{P_2 - P_1}{\Delta t} \quad (3)$$

式中： P_1 为金属挂片前一刻的表面腐蚀面积比例，%； P_2 为金属挂片后一刻的表面腐蚀面积比例，%。

上述腐蚀试片挂片法获得的质量腐蚀速率及面积腐蚀速率均不是连续的数据，只能获得一段时间里的平均腐蚀速率，不能反映腐蚀过程的变化情况，因此，需要同时采用电阻探针法进一步连续监测腐蚀速率和腐蚀深度的实时变化。电阻探针法通过监测金属挂片被腐蚀后电阻的变化描述腐蚀发生的程度，用于连续监测实时腐蚀深度和腐蚀速率的定量数据。通常用腐蚀深度 h (μm) 表征电阻探

针法的腐蚀速率，计算公式为：

$$h = \frac{l}{Gb} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

式中： G 为探头试片电导率， $1/(\Omega \cdot \text{m})$ ； b 为试片的横截面长度， m ； R_1 为电阻探针前一刻的电阻值， Ω ； R_2 为电阻探针后一刻的电阻值， Ω 。

根据前后 2 次测量的腐蚀深度 h ，计算腐蚀速率 v ($\mu\text{m}/\text{a}$)，计算公式为：

$$v = 8\,760 \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (5)$$

式中：8 760 为单位换算系数； Δh 为 2 次测量的腐蚀深度差值， μm 。

2 结果和讨论

2.1 特定环境下的宏观腐蚀现象

表 3 为环境温度 20 °C、相对湿度 70% 下，金属挂片的质量及表面腐蚀面积比例变化情况，其与腐蚀时间的关系如图 4 所示。

表 3 不同腐蚀时长下金属挂片表面腐蚀面积比例和质量变化
Tab.3 Change of corrosion area and weight of metal hanger surface under different corrosion duration

腐蚀天数/d	0	5	15	30	60	90
质量变化 $\Delta m/\text{mg}$	0	1.25	2.10	8.25	14.69	16.34
裸露表面图像						
颜色 RGB 值图像处理						
表面腐蚀面积比例 $P/\%$	0.3	3.6	13.8	75.2	82.6	88.2

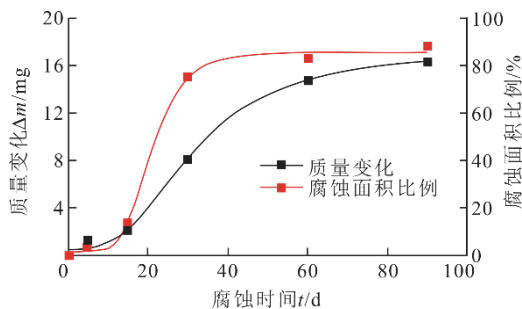


图 4 金属挂片表面腐蚀面积比例和质量变化
Fig.4 Change of corrosion area ratio and weight of metal hanging piece surface

由图 4 可知，随着时间增加，金属挂片表面的质量和裸露表面的表面腐蚀面积比例整体上呈上升趋势，并呈现出先缓慢上升再加速上升后逐渐减缓趋于平稳的过程。

根据金属挂片的质量及表面的腐蚀状况，其腐蚀现象可描述为：在前 5 天，金属挂片的质量几乎无变化，且其裸露表面光滑，几乎无任何腐蚀迹象；到第 15 天时，在金属挂片的下侧边缘首先发生表面的锈蚀，并通过左右两侧逐渐延伸至上部，此时对金属挂片的质量影响不大；15~30 天时，金属挂

片发生了明显的腐蚀现象,其表面锈蚀从四周逐步侵蚀到中心,表面腐蚀面积比例从13.8%增加到75.2%,同时质量明显发生变化;30~60天时,金属挂片的裸露表面几乎已经被锈蚀完全覆盖,同时质量也进一步明显发生变化;60~90天时,由于金属挂片的裸露表面被腐蚀后不能充分与氧气接触,腐蚀速率降低,其质量及裸露表面腐蚀比例变化减慢。

质量变化 Δm 及表面腐蚀面积比例 P 与腐蚀时间 t 的拟合曲线公式分别如式(6)和式(7),决定系数 R^2 分别为0.99和0.90。对2个公式进行求导可得质量变化及表面腐蚀面积比例的变化速率,具体如图5所示。由图5可知,质量腐蚀速率及面积腐蚀速率的最大值分别位于 $t=24.6$ 天和 $t=19.5$ 天,表明金属挂片腐蚀现象最为明显的过程发生在约第19~25天。

$$\Delta m = 17.07 - \frac{16.54}{1 + (t/31.64)^{2.87}} \quad (6)$$

$$P = 85.63 - \frac{83.72}{1 + (t/20.93)^{5.37}} \quad (7)$$

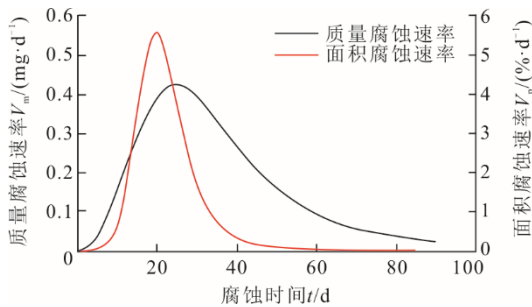


图5 面积腐蚀速率和质量腐蚀速率的变化
Fig.5 Variation of area corrosion rate and weight corrosion rate

2.2 特定环境下的微观腐蚀速率

图6为相同环境下金属电阻探针法获得的腐蚀深度 h 及腐蚀速率 v 的变化趋势。由图6可知:与挂片法获得的腐蚀现象最为明显的过程发生在约第19~25天不同,电阻探针法获得的腐蚀速率以初始时最快,达到了约 $50 \mu\text{m/a}$,此时电阻探针法的腐蚀深度为0;随着时间的推移,腐蚀速率在5天内迅速下降,后逐渐趋于平稳至约 $10 \mu\text{m/a}$,而腐蚀深度则逐渐加深,呈现先迅速增加,后缓慢上升的过程,其表现出的腐蚀变化趋势可能受到了金属表面形成的氧化物对后续腐蚀过程一定程度的抑制作用^[25]。腐蚀深度 h 及腐蚀速率 v 与腐蚀时间 t 的拟合曲线公式分别如式(8)和式(9),决定系数 R^2 分别为0.99和0.96。

电阻探针法所得的结果与前述的挂片法结果

不同,其主要原因在于挂片法观测的是金属宏观的长期腐蚀过程,表现的是腐蚀对金属质量及裸露表面状况的影响;而电阻探针法则反映了金属微观的瞬时腐蚀状态,得到的是腐蚀在深度上的变化。金属材料在特定的温度-湿度下初期即已迅速发生了腐蚀反应,尽管此时的腐蚀速率较快,但由于腐蚀深度较浅且腐蚀面积较小,因此未能反映在其外观上,只有累积到一定的腐蚀深度及腐蚀面积后,才能从外观上得到明显的质量及颜色的变化。

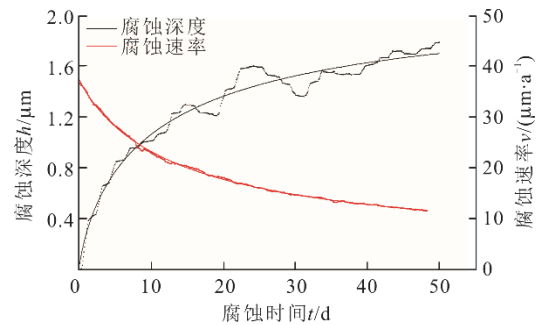


图6 电阻探针法的腐蚀深度和腐蚀速率
Fig.6 Corrosion depth and corrosion rate of resistance probe

图7为以5天为间隔得到的每5天的腐蚀深度变化量。由图7可知,前5天的腐蚀深度变化量达到了 $0.85 \mu\text{m}$,占到了整个过程总变化量的47.7%,而此后每个5天的腐蚀深度变化量最高尚不到 $0.3 \mu\text{m}$,可以认为从腐蚀深度上,金属在前5天的腐蚀过程最为剧烈。

$$h = \frac{0.31t^{0.79}}{1 + 0.14t^{0.79}} \quad (8)$$

$$v = 3.54 + \frac{33.92}{1 + (t/14.13)^{0.93}} \quad (9)$$

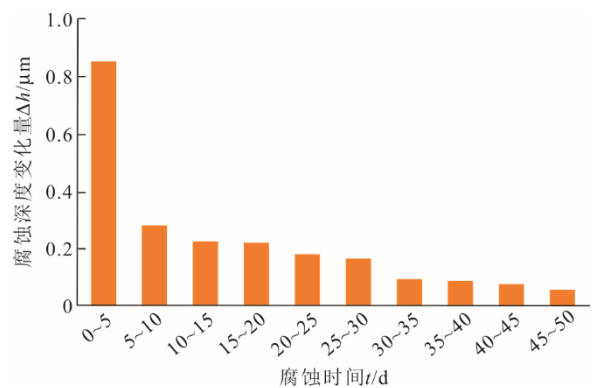


图7 每间隔5天的腐蚀深度变化
Fig.7 Corrosion depth change every 5 days

2.3 相对湿度对腐蚀状况的影响

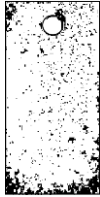




在上述试验的基础上,控制恒温恒湿箱温度

20 ℃不变,将相对湿度逐步从 70%提高到 90%,并放置 15 天。表 4 为金属挂片在不同湿度环境下的质量变化及表面腐蚀面积比例,其与相对湿度的关系以及电阻探针法获得的不同相对湿度下的平均腐蚀速率如图 8 所示。由图 8 可知,在临界湿度以上,随着相对湿度的增加,金属的质量变化、表

面腐蚀面积比例及平均腐蚀速率 3 个评价指标均呈现线性上升趋势,表明随着相对湿度的增加,金属的腐蚀程度及腐蚀速率线性上升。可以推测,与金属在相对湿度为 70%时前 5 天的腐蚀过程最剧烈且第 19~25 天的腐蚀现象最为明显相比,相对湿度增加后,相应的特征时间会有所提前。

表 4 不同湿度下金属挂片表面腐蚀面积和质量变化

Tab.4 Surface corrosion area and weight change of metal hanger under different humidity

相对湿度/%	70	75	80	85	90
金属挂片质量变化 $\Delta m/\text{mg}$	2.10	3.30	3.75	3.90	4.95
根据像素颜色值图像处理					
表面腐蚀面积比例 $P/\%$	13.8	19.6	19.9	29.4	30.9

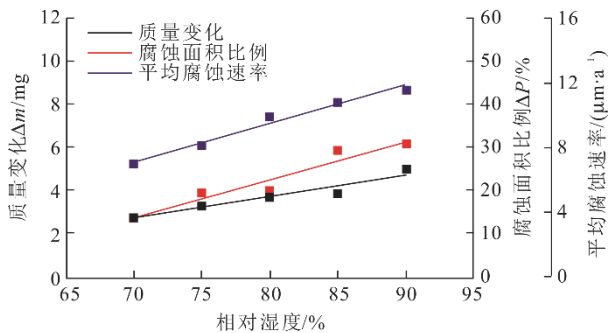


图 8 不同相对湿度下金属材料的各项腐蚀指标

Fig.8 Various corrosion indexes of metal materials under different relative humidity

3 长期停炉的保养策略及效果

金属材料在特定湿度及不同湿度下的宏观腐蚀现象及腐蚀速率的研究结果,可为燃气轮机发电机组长期停机备用下的充氮或热干风保养提供指导。某燃气轮机发电厂根据本文的研究结果,采用充氮的方法对余热锅炉进行保养,采取充 5 停 15 的充氮策略,即停机后第 0~5 天充氮,第 6~20 天暂停充氮,第 21~25 天继续充氮(前 5 天充氮后腐蚀过程会有所推迟),以此往复,同时根据停机备用期间的环境湿度,在环境湿度持续高于 70%时,适当缩短暂停充氮的间隔时长。采用上述充氮保养策略后,该燃气轮机发电厂余热锅炉省煤器鳍片管的腐蚀状况明显缓解。

4 结 论

1) 采用燃气轮机发电机组余热锅炉省煤器鳍

片管材料 08Al 碳钢制备的金属挂片在恒定的 20 ℃及相对湿度 70%环境下挂片质量及裸露表面的表面腐蚀面积比例随时间呈现出先缓慢上升再加速上升后逐渐减缓趋于平稳的过程,第 15~30 天时腐蚀现象变化最为明显。根据质量变化 Δm 及表面腐蚀面积比例 P 与腐蚀时间 t 的拟合曲线,其最大值分别位于 $t=19.5$ 天和 $t=24.6$ 天,表明金属挂片腐蚀现象最为明显的过程发生在约第 19~25 天。

2) 金属电阻探针得到在恒定的 20 ℃及相对湿度 70%环境下 08Al 碳钢的腐蚀速率以初始时最快,达到了约 $50 \mu\text{m}/\text{a}$,此时电阻探针的腐蚀深度为 0。随着时间的推移腐蚀深度加深腐蚀速率减缓,其中前 5 天的腐蚀深度变化量达到了 $0.85 \mu\text{m}$,占到了整个过程总变化量的 47.7%。

3) 保持环境温度 20 ℃不变,随着相对湿度从临界湿度 70%逐渐增加,08Al 碳钢的质量变化、表面腐蚀面积比例及平均腐蚀速率均呈线性上升趋势。根据本文的研究结果制定燃气轮机发电机组长期停机备用下充 5 停 15 的充氮保养策略,同时根据停机备用期间的环境湿度适当调整暂停充氮的间隔时长,余热锅炉省煤器鳍片管的腐蚀状况明显缓解。

[参 考 文 献]

- [1] 陈蕊,朱博骐,段天宇. 天然气发电在我国能源转型中的作用及发展建议[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 120-128.
CHEN Rui, ZHU Boqi, DUAN Tianyu. The role of natural gas power generation in China's energy transformation and development suggestions [J]. Natural Gas Industry,

- 2020, 40(7):120-128.
- [2] 刘志坦, 王文飞. 我国燃气发电发展现状及趋势[J]. 国际石油经济, 2018, 26(12): 43-50.
LIU Zhitan, WANG Wenfei. Current situation and trend of China's gas power generation development[J]. International Petroleum Economy, 2018, 26(12): 43-50.
- [3] 苏保兴, 姚勇. 9E 燃气-蒸汽联合循环调峰机组停(备)用保养技术研究[J]. 华电技术, 2012, 34(A01): 1-7.
SU Baoxing, YAO Yong. Research on maintenance technologies of 9E gas-steam combined cycle peak-shaving unit at stop and standby periods[J]. Huadian Technology, 2012, 34(A01): 1-7.
- [4] 刘正宁, 刘洋, 谭厚章, 等. 余热锅炉省煤器腐蚀机理的研究[J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 508-511.
LIU Zhengning, LIU Yang, TAN Houzhang, et al. Study on corrosion mechanism of economizer of waste heat boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(7): 508-511.
- [5] 李传胜, 聂鑫. 防止锅炉低温省煤器发生低温腐蚀的工程思路[J]. 电站系统工程, 2016, 32(5): 37-40.
LI Chuansheng, NIE Xin. Engineering design thinking of preventing low temperature corrosion of boiler[J]. Power System Engineering, 2016, 32(5):37-40.
- [6] 李楠, 张知翔, 邹小刚, 等. 低低温省煤器优化改造关键技术研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 151-156.
LI Nan, ZHANG Zhixiang, ZOU Xiaogang, et al. Key technology of optimization reform of ultra low pressure economizer[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 151-156.
- [7] 雷承勇, 刘家斌, 陈志华. 螺旋鳍片管在烟气余热回收换热器中的应用[J]. 锅炉技术, 2021, 52(3): 31-35.
LEI Chengyong, LIU Jiabin, CHEN Zhihua. Application of spiral finned tube in heat exchanger for flue gas waste heat recovery[J]. Boiler Technology, 2021, 52(3): 31-35.
- [8] 陈浩, 张金荣, 梁硕全, 等. 燃气-蒸汽联合循环发电机组停用充氮保护技术研究[J]. 广西电力, 2022, 45(2): 55-61.
CHEN Hao, ZHANG Jinrong, LIANG Shuoquan, et al. Research on nitrogen charging protection technology for shutdown of gas steam combined cycle generator unit[J]. Guangxi Electric Power, 2022, 45(2): 55-61.
- [9] SURNAM B, OLETI C. Using three-dimensional surface roughness parameters in analysis of atmospheric corrosion degradation of carbon steel[J]. British Corrosion Journal, 2013, 47(2): 96-106.
- [10] GUERRA J, CASTAÑEDA A, CORVO F, et al. Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea[J]. Materials and Corrosion, 2018, 71(6): 1019-1034.
- [11] 徐迪, 杨小佳, 李清, 等. 材料大气环境腐蚀试验方法与评价技术进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 447-457.
XU Di, YANG Xiaojia, LI Qing, et al. Progress in test methods and evaluation techniques for atmospheric corrosion of materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 447-457.
- [12] 夏晓健, 蔡建宾, 林德源, 等. 沿海变电站设备腐蚀状况及其腐蚀机理与防护[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(5): 697-704.
XIA Xiaojian, CAI Jianbin, LIN Deyuan, et al. Corrosion status, corrosion mechanism and protection of coastal substation equipment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(5): 697-704.
- [13] CAI Y, ZHAO Y, MA X, et al. Influence of environmental factors on atmospheric corrosion in dynamic environment[J]. Corrosion Science, 2018, 137: 163-175.
- [14] WANG X, LI X, TIAN X. Influence of temperature and relative humidity on the atmospheric corrosion of zinc in field exposures and laboratory environments by atmospheric corrosion monitor[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10: 8361-8373.
- [15] ZHI Y J, FU D M, ZHANG D W, et al. Prediction and knowledge mining of outdoor atmospheric corrosion rates of low alloy steels based on the random forests approach[J]. Metals, 2019, 9(3): 383.
- [16] BHASKAR S, IYER N R, RAJASANKAR J. Cumulative damage function model for prediction of uniform corrosion rate of metals in atmospheric corrosive environment[J]. British Corrosion Journal, 2004, 39(4): 313-320.
- [17] XIA D H, MAC, BEHNAMIAN Y, et al. Reliability of the estimation of uniform corrosion rate of Q235B steel under simulated marine atmospheric conditions by electrochemical noise (EN) analyses[J]. Measurement, 2019, 148: 106946.
- [18] CAI Y, ZHAO Y, MA X, et al. Application of hierarchical linear modelling to corrosion prediction in different atmospheric environments[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2019, 54: 266-275.
- [19] ALI N, FULAZZAKY M A. The empirical prediction of weight change and corrosion rate of low-carbon steel[J]. Heliyon, 2020, 6(9): e05050.
- [20] KATERINA K, DAGMAR K. The results of 45 years of atmospheric corrosion study in the czech republic[J]. Materials, 2017, 10(4): 394.
- [21] NATESAN M, SELVARAJ S, MANICKAM T, et al. Corrosion behavior of metals and alloys in marine-industrial environment[J]. Science & Technology of Advanced Materials, 2008, 9(4): 045002.
- [22] 张宏博, 张士宪, 李慧蓉, 等. 含铬碳钢梯度材料扩散行为的研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 124-127.
ZHANG Hongbo, ZHANG Shixian, LI Huirong, et al. Study on diffusion behavior of chromium containing carbon steel gradient materials[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(22): 124-127.
- [23] GUO L, STREET S R, MOHAMMED-ALI H B, et al. The effect of relative humidity change on atmospheric pitting corrosion of stainless steel 304L[J]. Corrosion Science, 2019, 150: 110-120.
- [24] VAN NAM T, TADA E, NISHIKATA A. Pit initiation and repassivation of stainless steels exposed to cyclic relative humidity changes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(9): C419-C425.
- [25] 王超逸, 夏呈祥, 王东胜, 等. 新型 F 级船用低温钢表面氧化物对其耐磨性能影响研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 395-402.
WANG Chaoyi, XIA Chengxiang, WANG Dongsheng, et al. Effect of surface oxides on wear resistance of new F-class marine low temperature steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 395-402.

(责任编辑 邓玲惠)