

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.009

某深度调峰锅炉水冷壁管的氧化腐蚀及其机理

张健¹, 王波², 杨平³, 王若民¹, 胡玉璋³, 汤文明²

(1. 安徽新力电业科技咨询有限责任公司, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 皖能合肥发电有限公司 技术部, 安徽 合肥 230041)

摘要:针对某超超临界燃煤锅炉运行 4×10^4 h, 深度调峰(负荷40%~45%)300 h的SA-213T2钢内螺纹水冷壁管内壁产生较严重腐蚀坑的现象, 文章对腐蚀产物物相、腐蚀层的结构和形貌、微区成分进行检测, 分析了腐蚀坑形成及该水冷壁管的氧化腐蚀机理。结果表明:该水冷壁管内壁氧化层由细小的球形颗粒堆积而成、结构致密, 但在腐蚀坑周围的颗粒状腐蚀产物尺寸较大、结构松散; 腐蚀坑呈半封闭或敞开状, 深度达150 μm 。水冷壁管内壁腐蚀坑主要发生氧腐蚀和氧浓差腐蚀, 腐蚀速度快, 腐蚀产物结构疏松; 而水冷壁管内壁发生氧化腐蚀, 腐蚀产物为 Fe_3O_4 和少量的 Fe_2O_3 , 腐蚀层结构致密, 腐蚀速率慢。该水冷壁管内壁腐蚀坑可能成为锅炉的安全隐患, 须予以重视。

关键词:深度调峰; 水冷壁; 腐蚀坑; 氧腐蚀; 氧浓差腐蚀

中图分类号: TG172.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)01-0059-06

Oxidation corrosion of water wall tubes in a boiler under deeply-varied load and its mechanism

ZHANG Jian¹, WANG Bo², YANG Ping³, WANG Ruomin¹, HU Yuzhang³, TANG Wenming²

(1. Anhui Xinli Electric Technology Consulting Co., Ltd., Hefei 230601, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Department of Technology, Wenergy Hefei Power Generation Co., Ltd., Hefei 230041, China)

Abstract: Aiming at serious corrosion pits in the inner walls of SA-213T2 steel rifled water wall tubes of an ultra-supercritical coal-fired boiler running for 4×10^4 h under deeply-varied load of 40%-45% for 300 h, the phases, microstructures and morphologies of corrosion layers and micro-zone compositions were tested and analyzed to clarify the formation of the corrosion pits and oxidation corrosion mechanism of the water wall tubes. The results show that the inner-wall oxidation layer has a dense structure and is piled by ultra-fine spherical particles, however, the oxide particles near the corrosion pits are coarser with a loose structure. The corrosion pits are semi-closed or completely open, having an average depth of 150 μm . Corrosion pits in the inner-wall water wall tubes result from the oxygen corrosion and the oxygen concentration corrosion, which have a high corrosion rate and a loose corrosion product structure. On the contrary, the oxygen oxidation of the inner walls of the water wall tubes takes place to form Fe_3O_4 and small amount of Fe_2O_3 as the corrosion product. The corrosion layer is dense and has a small growth rate. The corrosion pits in the inner walls of the water wall tubes may be a potential safety hazard of the boiler and should be taken seriously.

Key words: deeply-varied load; water wall; corrosion pit; oxygen corrosion; oxygen concentration corrosion

收稿日期: 2021-02-28; 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目(202103a05020002); 安徽新力电业科技咨询有限责任公司科技资助项目(2020 咨-KJ-02)

作者简介: 张健(1991—), 男, 安徽长丰人, 安徽新力电业科技咨询有限责任公司工程师;

汤文明(1969—), 男, 安徽巢湖人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: wmtang69@126.com.

为积极应对全球气候变化,实现经济高质量发展,按期达成“双碳”目标,近年来,我国太阳能、风能等新能源发电迅速提升,甚至造成火力发电相对过剩。为避免机组频繁启停,维持电力系统的灵活安全性,火电机组快速调节负荷及低负荷深度调峰运行将愈加频繁^[1-2]。然而,在低负荷深度调峰运行状况下,燃煤锅炉燃烧不稳定,局部超温运行,锅炉“四管”承压部件因腐蚀、疲劳等因素造成爆管失效时有发生^[3-5]。因此加强监督,及时合理地采取应对措施,避免非计划停运事故的发生,具有重要的工程价值。

某 600 MW 超超临界机组水冷壁管采用规格为 $\phi 38.1 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ 、材质为 SA-213T2 钢的内螺纹管。在运行 $4 \times 10^4 \text{ h}$,深度调峰(负荷 40%~45%)300 h 后割管检查时发现,该水冷壁管内壁存在比较严重的氧化腐蚀,形成较为密集的溃疡状腐蚀坑,会产生明显的减薄效应和缺口效应,为水冷壁管带来较为严重的安全隐患。本文对该水冷壁管内壁腐蚀产物和腐蚀层结构进行研究,以探明深度调峰状态下,该水冷壁管内壁氧化腐蚀特性及机理。

表 1 SA-213T2 水冷壁管的成分及其质量分数

管样	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
燃烧器上管样	0.160	0.280	0.330	0.800	0.470	0.012	0.015
标高 30 m 管样	0.150	0.260	0.350	0.750	0.510	0.013	0.016
ASME 标准	0.10~0.20	0.10~0.30	0.30~0.61	0.50~0.81	0.44~0.65	≤ 0.025	≤ 0.025

在进行氧化腐蚀产物测试分析的基础上,结合 Fe-H₂O 体系电位 E-pH 值图,开展相关机理研究。

2 结果与讨论

2.1 老化评级

供货态水冷壁管的显微组织如图 1 所示。

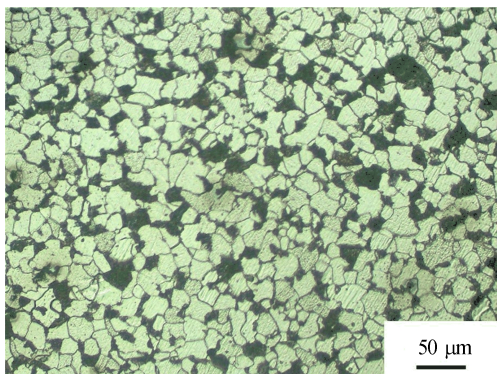


图 1 供货态水冷壁管的显微组织

1 实验方法

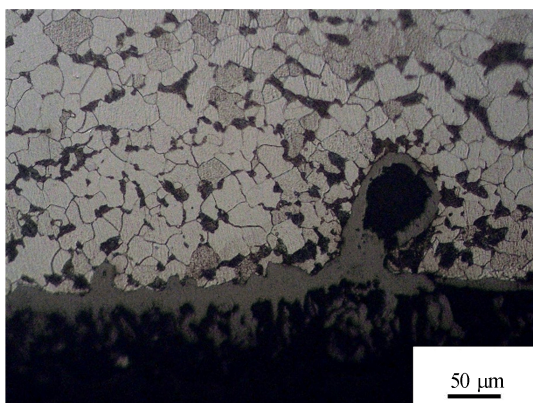
在该深度调峰锅炉后墙上层燃烧器上方及左墙标高约 30 m 处分别取水冷壁管样,对其进行成分分析,见表 1 所列。由表 1 可知,2 个部位管样的成分与 ASME SEC II A SA-213/SA-213M-2002 标准^[6]一致。采用线切割方法沿水冷壁管径向割取试样,用 JSM-6490 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察水冷壁管内壁表面形貌。部分试样使用环氧树脂镶嵌,经研磨、抛光,最终用 4% 硝酸酒精腐蚀,采用 M3000 光学显微镜及 SEM 观察试样截面形貌, Oxford INCA 型能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)测试试样表面和截面微区成分。采用 D/MAX2500V 型 X-射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)对在水冷壁管样内壁刮取的外层氧化腐蚀产物及刮取外层氧化腐蚀产物后的水冷壁管内层氧化腐蚀产物进行物相分析。XRD 测试条件为:Cu 靶(K α , 波长 $\lambda = 0.154 \text{ nm}$),管电压和管电流分别为 20 kV 和 200 mA,扫描范围为 $10^\circ \sim 90^\circ$,扫描速率为 $3^\circ/\text{min}$ 。

由图 1 可知,供货态水冷壁管的显微组织由铁素体与珠光体组成,铁素体晶粒大小均匀,平均晶粒尺寸在 $25 \mu\text{m}$ 左右,根据 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》,判定为 7.5~8.0 级晶粒度。珠光体团在铁素体基体中分布均匀、界面清晰,根据 DL/T 773—2016《火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准》,判定球化级别为 1 级,未球化。

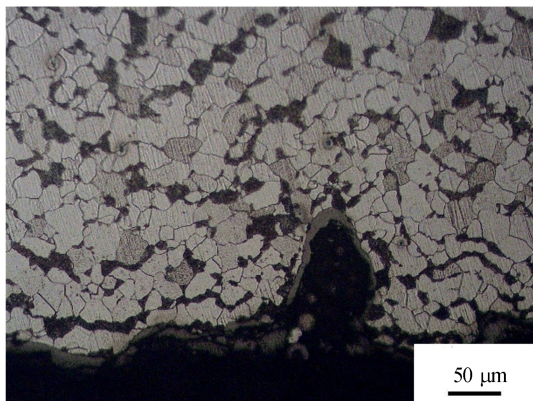
不同位置处服役态水冷壁管内壁的显微组织如图 2 所示。

由图 2 可知:运行 $4 \times 10^4 \text{ h}$,深度调峰(负荷 40%~45%)300 h 后的锅炉后墙上层燃烧器上方和左墙标高约 30 m 处的 SA-213T2 钢内螺纹管内壁处的铁素体晶粒长大均不明显,为 7.0~7.5 级晶粒度;同时,该服役态水冷壁管中的珠光体区域尺寸与形态也没有发生明显变化,但珠光体区域开始分散,与铁素体边界线开始变得模糊,球化等级 2 级,轻度球化。

因此,从老化程度上判定,该水冷壁管运行状态良好,仍可继续服役,参与锅炉深度调峰运行。此外,这两处水冷壁管内壁表面均覆盖一层连续的氧化腐蚀层,其中,后墙上层燃烧器上方水冷壁管内壁氧化腐蚀层较厚,厚度为 15~20 μm,而左墙标高约 30 m 处水冷壁管的内壁氧化腐蚀层较薄,厚度为 10~15 μm。



(a) 后墙上层燃烧器上方位置



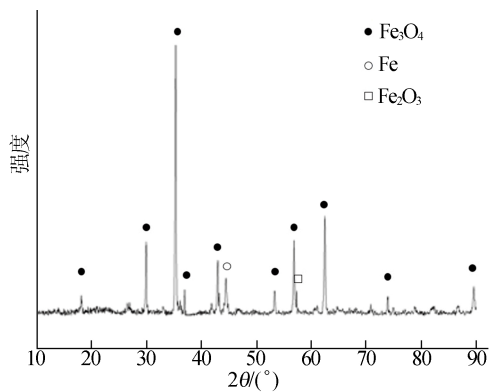
(b) 左墙标高约 30 m 处位置

图 2 不同位置处服役态水冷壁管内壁的显微组织

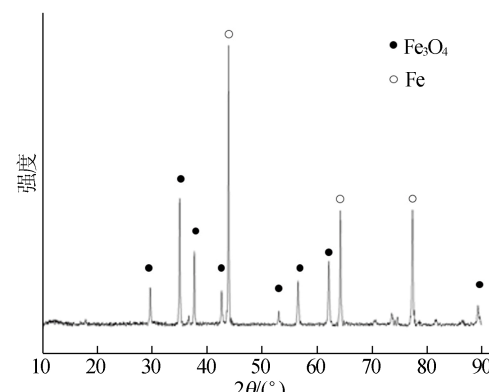
2.2 腐蚀产物的相组成

由图 2 可知,服役态 SA-213T2 钢内螺纹管内壁发生氧化,该氧化腐蚀层具有内、外层结构。内层连续,结构致密,与钢基体紧密结合;外层结构疏松,与内侧氧化腐蚀层结合不紧密。为确定内、外两侧氧化腐蚀层的物相组成,分别对从水冷壁管内壁刮取的粉末样品(外层)和刮取氧化腐蚀粉末后的氧化腐蚀内层样品进行 XRD 测试,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,该氧化腐蚀产物主要由 Fe₃O₄ 组成,外侧氧化腐蚀层除 Fe₃O₄ 外,还含有少量的 Fe₂O₃。Fe 的衍射峰来自于 SA-213T2 钢基体,这是由于该钢固溶了一定量的 C、Mo 等合金元素,导致其衍射峰左移^[7]。



(a) 外层



(b) 内层

图 3 服役态水冷壁管内壁内、外层氧化腐蚀产物的 XRD 谱图

2.3 腐蚀层表面形貌

服役态后墙上层燃烧器上方水冷壁管内壁表面 SEM 照片如图 4 所示。由图 4 可知,服役态后墙上层燃烧器上方水冷壁管内壁表面覆盖着较为致密的氧化层,该氧化层由许多大小不一的球形颗粒构成,EDS 测得不同点处的成分及其质量分数见表 2 所列。

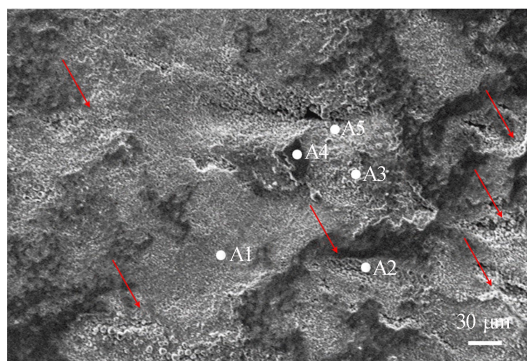


图 4 后墙上层燃烧器上方水冷壁管内壁表面 SEM 照片

从图 4 可以看出,氧化腐蚀层结构致密部位的球形颗粒更加细小,表面覆盖着氧化皮,均为 Fe 及合金元素 Cr、Mn 的氧化物。在元素周期表

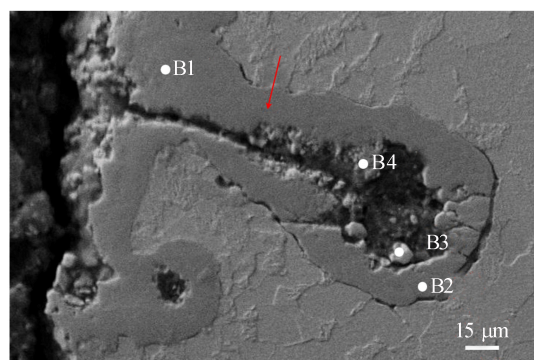
中, Mn、Cr 与 Fe 原子序数相近, 晶体结构相同, 可部分替代 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 中的 Fe, 形成 M_3O_4 和 M_2O_3 型的合金化合物 (M 为 Fe、Cr、Mn)。因此, 在图 3 中, 采用 XRD 测得的服役态水冷壁管内壁内、外层氧化腐蚀产物为 M_3O_4 和 M_2O_3 , 但其中的 Cr、Mn 质量分数低, 因此本文仍以 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 表示。图 4 上箭头所指部位的氧化膜结构疏松, 氧化物颗粒较大, 甚至还存在不规则的孔洞和裂纹, 为服役态水冷壁管内壁表面的腐蚀坑。

表 2 图 4 中各位置的成分及其质量分数 %

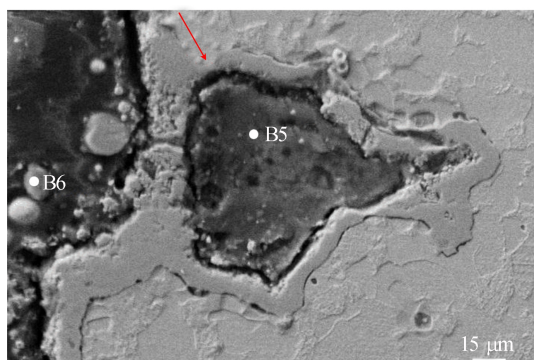
位置	O	Cr	Mn	Fe
A1	28.70	1.66	—	69.63
A2	36.44	0.70	—	62.86
A3	36.27	—	—	63.73
A4	26.37	2.44	0.84	70.35
A5	23.52	—	—	76.48

2.4 腐蚀层截面形貌

服役态后不同位置处水冷壁管内壁截面的 SEM 照片如图 5、图 6 所示。



(a) 区域1

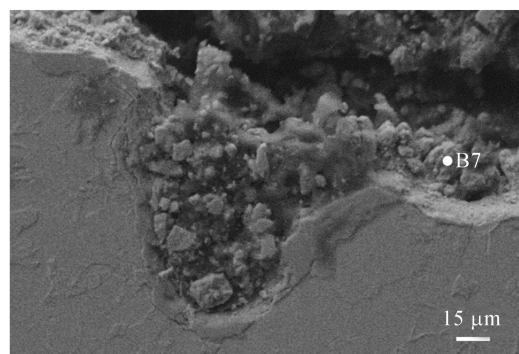


(b) 区域2

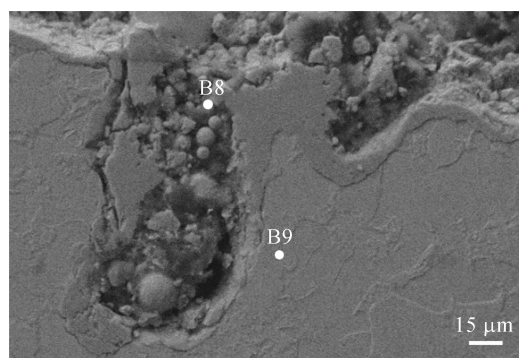
图 5 服役态后墙上层燃烧器上方水冷壁管内壁截面 SEM 照片

服役态水冷壁管内壁表面氧化腐蚀层具有内、外两层结构。内层连续, 结构致密, 与钢基体紧密结合; 外层结构疏松, 松散地堆积在内层表

面, 导致水冷壁管内壁的粗糙度显著增大。由图 2、图 5 和图 6 可知, 由氧化表面深入水冷壁管内 100~150 μm 范围内形成一些“溃疡”式的腐蚀坑。锅炉后墙上层燃烧器上方水冷壁管内壁腐蚀坑为封闭式, 腐蚀坑与水冷壁管腔体的连通状态不明显 (图 4、图 5); 相反, 锅炉左墙标高约 30 m 处水冷壁管内壁氧化腐蚀程度更大, 内壁表面呈波浪形, 平整度低, 且腐蚀坑为敞开式, 腐蚀坑与水冷壁管内水蒸气能充分接触 (图 6)。



(a) 区域1



(b) 区域2

图 6 服役态左墙标高约 30 m 处水冷壁管内壁截面 SEM 照片

由图 5 可知, 服役态锅炉后墙上层燃烧器上方水冷壁管内壁氧化腐蚀内层结构致密, 与钢基体结合较为紧密, 但腐蚀外层的结构较疏松。在腐蚀坑内和氧化腐蚀外层分布着颗粒尺寸约 1 μm 的细小球形颗粒以及由这些小颗粒聚集而成的大球, 直径可达 10 μm 。这些球形颗粒在腐蚀坑至水冷壁管内腔出口处堆积, 形成“皮下型”的腐蚀坑, 仅通过一条宽为 2~3 μm 的管道与水冷壁管内腔相通, 增大了两者间物质传输的阻力, 导致腐蚀坑内的氧化腐蚀环境与水冷壁管内壁存在差异。

由图 6 可知, 服役态锅炉左墙标高约 30 m 处水冷壁管内壁开放的腐蚀坑内基本上填满球形与不规则形的腐蚀物颗粒, 以及脱落的氧化腐蚀内

层(图 6 中箭头所示)。此外,水冷壁管内壁氧化腐蚀层表面也堆积着此类腐蚀产物,同样形成内、外两层的腐蚀产物层结构。但由于图 6 中的腐蚀坑敞开,腐蚀坑内与水冷壁管腔体间的物质交流更加充分,不会导致腐蚀坑内的氧化腐蚀环境与水冷壁管内壁产生明显差异。

水冷壁管内壁截面 SEM 照片上各位置成分及其质量分数见表 3 所列。由表 3 可知:B1、B2 处对应水冷壁管内壁氧化腐蚀内层的成分为 Fe、Cr、Mn 和 Mo 的合金氧化物 M_3O_4 ;B3、B4 处对应水冷壁管内壁腐蚀坑内大小不一氧化物颗粒的成分,含 Fe、O 2 种元素,主要为 Fe_3O_4 ;B5 处(腐蚀坑底部)的成分与 B1、B2 处的成分十分接近;在图 5、图 6 的腐蚀坑内外有一些或大或小的球状物,都含有质量分数较高的 Fe 成分(表 3 中 B6、B7),可能为含有 Fe 内核的氧化物球,称之为富铁的 Fe_3O_4 ^[8];B8(腐蚀坑球形)的氧化物产物中,其 O、Fe 原子个数比为 1.31,与 Fe_3O_4 的成分相当;B9 处对应水冷壁管钢基体的成分。

表 3 图 5、图 6 中各位置的成分及其质量分数 %

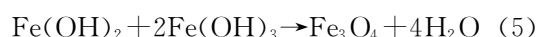
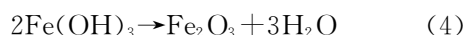
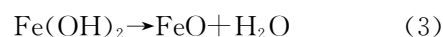
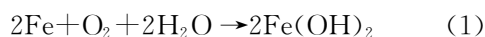
位置	O	Cr	Mn	Mo	Si	Fe
B1	36.66	1.96	0.56	2.02	—	58.80
B2	33.61	—	0.33	0.64	—	65.42
B3	39.22	—	—	—	—	60.78
B4	35.60	—	—	—	—	64.40
B5	21.69	2.67	—	2.54	—	73.10
B6	15.59	0.41	0.59	3.54	—	79.87
B7	8.24	—	—	—	—	91.76
B8	27.25	—	—	—	—	72.75
B9	—	0.98	0.23	0.31	0.36	98.12

2.5 氧化腐蚀机理

通常,锅炉受热面管内壁高温氧化的机理包括碱性腐蚀、酸性腐蚀和氧腐蚀^[9-15]。其中,碱性腐蚀、酸性腐蚀均属于沉积物下腐蚀。碱性腐蚀形成 Na_2FeO_2 腐蚀产物,腐蚀坑下钢基体无脱碳现象,不会发生氢脆^[16]。碱性腐蚀下水冷壁管爆破口呈凿槽型典型特征,表明腐蚀坑尺寸大,底部不尖锐。而酸性腐蚀更为常见,不仅形成 Fe_3O_4 、FeO 及 Fe_2O_3 等腐蚀产物,反应形成的活性氢原子[H]扩散进入钢基体,与珠光体中的 Fe_3C 反应形成 CH_4 ,造成腐蚀坑前沿钢基体脱碳;同时,钢中 CH_4 聚集达到一定量时,沿铁素体晶界扩散,形成晶间裂纹,甚至可能在高压蒸气作用下失稳扩展,发生脆性断裂,造成爆管失效^[17-19]。SA-

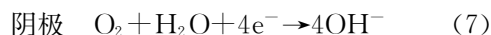
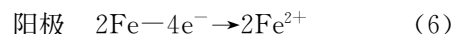
213T2 钢内螺纹水冷壁管内壁氧化腐蚀未形成 Na_2FeO_2 腐蚀产物,没有发生碱性腐蚀;同时,图 3 中腐蚀坑前沿钢基体与远离腐蚀坑的钢基体中的珠光体团量并无区别,该水冷壁管内壁氧化腐蚀未造成钢基体脱碳,也没有在腐蚀坑前沿的钢基体中观察到晶界裂纹(图 5、图 6),因此,该水冷壁管内壁的酸性腐蚀特征也不明显。

当锅炉管道中溶有氧后,钢表面的 Fe 与氧构成腐蚀电池,Fe 的电位低,为阳极,发生氧化反应,而 O_2 得到电子转变为 OH^- ,反应过程^[20]如下:



氧腐蚀的主要特征是溃疡或小孔式的局部腐蚀,反应形成的 FeO、 Fe_3O_4 及 Fe_2O_3 的量与受热面管炉水中的氧含量有关,分别呈现黑色、黄褐色及砖红色等颜色。当炉管内水蒸气中氧含量减小时,作为腐蚀电池的阴极去极化剂 $Fe(OH)_3$ 发生还原,生成低价氧化物(如 Fe_3O_4 、FeO),而随着炉管内水蒸气中氧含量增加,低价氧化物又会被氧化成 Fe_2O_3 ^[21]。一般认为,锅炉给水中的溶解氧大部分被消耗在省煤器受热面上,但对于调峰机组,启停频繁、负荷波动大,溶解氧也可以进入受热面管,加剧腐蚀^[22]。

300 °C 下 Fe-H₂O 体系电位 E-pH 值图^[22]如图 7 所示,由图 7 可知,在不含氧及近中性高温炉水中,碳钢的腐蚀电位接近氢电极的可逆电位(图 7 中 a 线),并在其表面形成 Fe_3O_4 氧化膜。但当炉水中存在氧时,其电位会正移数百毫伏,并形成 Fe_2O_3 。图 5 上半封闭的腐蚀坑内贫氧,而水冷壁管内壁氧化物层表面富氧,从而构成氧浓差腐蚀电池。该氧浓差电池腐蚀的电极反应方程式为:



其中,腐蚀坑为阳极,持续处于快速、稳定的腐蚀状态,形成有代表性的层状多孔(结构疏松)性腐蚀产物,腐蚀坑内介质呈弱酸性(如图 7 中的 A 点)。而水冷壁管内壁为阴极,氧化腐蚀速率慢,而水冷壁管内壁氧化物层表面介质呈中性,甚至弱碱性(如图 7 中的 B 点和 C 点),形成由 Fe_3O_4 和少量 Fe_2O_3 构成致密的钝化膜。

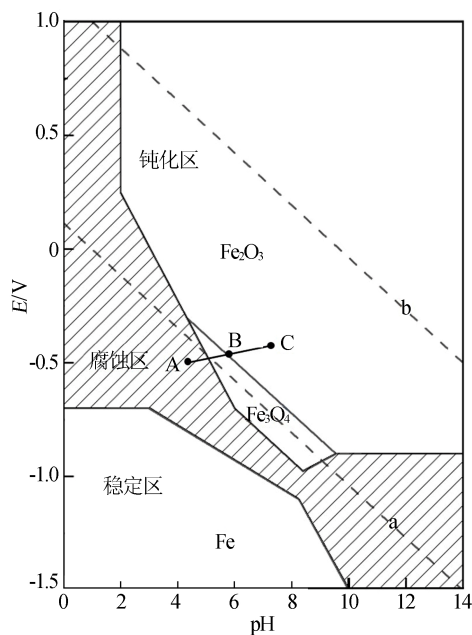


图 7 300 °C 下 Fe-H₂O 体系电位 E-pH 值图

综上所述,长期服役的深度调峰超超临界机组燃煤锅炉 SA-213T2 钢内螺纹水冷壁管内壁腐蚀坑主要是氧浓差腐蚀,腐蚀坑内氧浓度低,腐蚀速率快,腐蚀产物结构疏松;而水冷壁管内壁腐蚀为氧腐蚀,腐蚀速率慢,腐蚀产物层结构致密,生长缓慢。

3 结 论

长期服役的深度调峰锅炉 SA-213T2 钢内螺纹水冷壁管老化等级较低,结构较稳定,但内壁发生不均匀氧化腐蚀,形成深度达 150 μm 的腐蚀坑。

水冷壁管内壁表面氧化层由细小的球形颗粒堆积而成,结构致密,腐蚀坑周围的氧化层表面松散地堆积着尺寸较大的颗粒状腐蚀产物,由腐蚀坑内的腐蚀产物向外迁移淤积而成,导致腐蚀坑呈半封闭状态。

水冷壁管内壁腐蚀坑是氧腐蚀与氧浓差腐蚀共同作用的结果,腐蚀速率快,腐蚀产物结构疏松;而水冷壁管内壁氧化则为氧腐蚀,发生钝化氧化,腐蚀产物层结构致密,腐蚀速率慢。

[参 考 文 献]

[1] 赵国涛,钱国明,王盛.“双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术,2021,43(6):11-20.
 [2] 喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J]. 华电技术,2021,43(6):21-33.
 [3] 梁学东,曹海涛,任锐,等.1 000 MW 超超临界垂直管圈锅炉水冷壁管横向裂纹实验研究[J]. 铸造技术,2017,

28(11):2661-2663.

[4] 赵雨兰. 调峰对锅炉寿命影响分析[D]. 北京:华北电力大学,2018.
 [5] 蔡晖,史志刚,秦承鹏,等. 深度调峰机组水冷壁管开裂原因分析[J]. 热力发电,2020,49(11):176-181.
 [6] US-ASTM. Standard specification for seamless ferritic and austenitic alloy-steel boiler superheater, and heat-exchanger tubes; ASTM A213/A213M-99e1[S]. [S. l. : s. n.], 2019: 1-17.
 [7] 张波,鲁晓宇,代富平,等. 深过冷 Fe-Mo 合金中初生 α -Fe 相的快速生长[J]. 中国有色金属学报,2011,21(11): 2744-2750.
 [8] 王志武,邓芳,王玉山,等. 20 g 钢高温高压水蒸汽氧化行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2008,20(3):170-172.
 [9] 徐洪. 高压锅炉水冷壁管碱腐蚀诊断与机理研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):183-187.
 [10] OTHMAN N K, ZHANG J Q, YOUNG D J. Temperature and water vapour effects on the cyclic oxidation behaviour of Fe-Cr alloys [J]. Corrosion Science, 2010, 52(9): 2827-2836.
 [11] RAKOWSKI J M. The oxidation of metal alloy foils in the presence of water vapor [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 867-873.
 [12] GALERIE A, WOUTERS Y, PIJOLAT M, et al. Mechanisms of corrosion and oxidation of metals and alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(8): 555-561.
 [13] OTHMAN N K, ZHANG J Q, YOUNG D J. Effect of water vapour on cyclic oxidation of Fe-Cr alloys[J]. Materials and Corrosion, 2011, 62(6): 596-503.
 [14] 龙会国,谢国胜,龙毅,等. 锅炉水冷壁管沉积物下氧化腐蚀特征及其机理[J]. 腐蚀与防护,2014,35(6):579-564.
 [15] 齐慧滨,郭英俦,何业东,等. 燃煤火电厂锅炉“四管”的高温腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术,2002,14(2):113-117.
 [16] DOOLEY R B, PATERSON S. Phosphate treatment; boiler tube failures lead to optimum treatment [C]//Proceedings of the 55th International Water Conference. Pittsburgh: [s. n.], 1994: 50-94.
 [17] 袁超,胡正飞,吴细毛. 热电厂 15CrMo 钢管高温蒸汽氧化腐蚀机理研究[J]. 材料热处理学报,2012,33(增刊 1): 90-95.
 [18] 黄隆焜. 220 t/h 锅炉水冷壁爆管事故分析及处理[J]. 腐蚀与防护,2003,24(8):365-367.
 [19] 杨厚君,倪进飞,于振杰,等. SG420/140-M418 型锅炉水冷壁爆管事故综合分析及防止措施[J]. 中国电机工程学报,1995,15(1):41-44.
 [20] 程明辉,刘杰. 电站锅炉水冷壁管腐蚀失效分析[J]. 中国特种设备安全,2018,34(2):56-59.
 [21] 钟桥,赵林生. 锅炉的水侧腐蚀[J]. 中国锅炉压力容器安全,2003,10(2):30-32.
 [22] 黄秋龙. 含 O₂/Cl 炉水对锅炉受热面的腐蚀机理[J]. 华北电力技术,1990(5):32-34.

(责任编辑 闫杏丽)