

T91 钢在碱金属氯化物介质中的高温腐蚀行为

何玉武¹, 李宇春¹, 张宏亮², 李梅¹, 徐召金¹, 钟峰¹, 杨帆¹

(1. 长沙理工大学 化学与生物工程学院, 长沙 410114; 2. 广东电网公司电力科学研究院 化学所, 广州 510080)

摘要: 模拟生物质电厂锅炉过热器的烟气侧环境, 对过热器材料 T91 进行了高温腐蚀研究。采用试样腐蚀增重试验, 测得了腐蚀动力学曲线; 采用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 等, 对 T91 试样腐蚀后的形貌、结构、元素含量和腐蚀产物的组成进行了分析。结果表明, T91 的腐蚀对 KCl 蒸汽和反应温度比较敏感, 随着温度的增高, 腐蚀速率增加, 腐蚀动力学曲线基本符合抛物线规律; T91 的主要腐蚀产物为 Fe_2O_3 和 $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$, 同时含有少量的 Fe_3O_4 和 $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$ 。

关键词: T91; 生物质电厂; 过热器; 碱金属氯化物; 高温腐蚀

中图分类号: TG172.8

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2015)11-1021-05

High Temperature Corrosion Behavior of T91 in Alkali Metal Chloride Medium

HE Yu-wu¹, LI Yu-chun¹, ZHANG Hong-liang², LI Mei¹, XU Zhao-jin¹, ZHONG Feng¹, YANG Fan¹

(1. School of Chemistry & Biological Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Chemistry Department, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The corrosion behavior of T91 was studied by simulating the gas-side condition in super-heater of a biomass power plant. The corrosion kinetics curves were obtained through mass gain. By SEM, EDS and XRD, the appearance, microstructure, element contents and composition of corrosion products on the samples after corrosion were analyzed. The results showed that the corrosion of T91 was very sensitive to the gaseous-phase of KCl and the reaction temperature, as the reaction temperature increased, the corrosion-resistant behavior of T91 reduced and the corrosion kinetics of T91 steel was in line with parabolic law. The main components of the corrosion product were Fe_2O_3 and $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$, a small amount of Fe_3O_4 and $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$.

Key words: T91; biomass power plant; super-heater; alkali metal chloride; high-temperature corrosion

生物质电厂是一种重要的绿色可再生能源的利用设施, 但由于其燃料中含有高量的碱性物质, 会对生物质发电设备产生重要的影响, 特别是高碱性物质燃烧过程中形成的氯化物对锅炉过热器产生严重的腐蚀, 每年都会造成生物质电厂较大的经济损失。在已有关于碱性物质腐蚀的研究中, 研究者更多的关注 Cl_2 、 HCl 及氯盐对材料的腐蚀, 虽然有人注意到 NaCl 蒸汽对材料高温腐蚀的影响^[1-5], 但对生物燃料经常出现的 KCl 蒸汽的影响很少研究。

T91 铁素体不锈钢具有良好的耐热性和耐腐蚀性, 目前广泛应用于电厂锅炉高温过热器和再热

器^[6]。本工作设计了模拟生物质锅炉过热器高温腐蚀的试验系统, 研究探讨 T91 在饱和 KCl 蒸汽气氛中的高温腐蚀行为。

1 试验

1.1 试验装置

试验系统示意图见图 1。T91 试样通过石英支撑管放置在氧化铝坩埚上并置于箱式电阻炉的恒温区, 氧化铝坩埚底部盛放固体 KCl, 通过恒温加热使其挥发产生饱和 KCl 蒸汽, 为了确保试样和 KCl 蒸汽充分接触, 防止 KCl 蒸气过度溢出, 试验时用盖子盖住坩埚。

1.2 试样制备及表面处理

试验所用 T91 材料由华能玉环电厂提供, 试样取自锅炉顶棚过热器后的末级过热器出口处。首先将材料加工成 $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的片状试

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 广东电网有限责任公司电力科学研究院项目 (14430101000950)

通信作者: 李宇春 (1972—), 教授, 博士, 从事电厂化学、材料腐蚀与防护等方面研究, 1198768930@qq.com

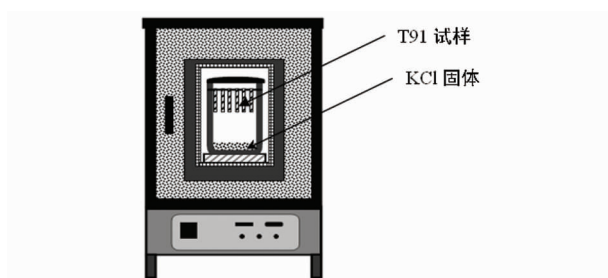


图1 高温腐蚀试验台架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the high temperature corrosion test bench

样,采用金相砂纸将试样表面打磨致镜面光滑,然后用乙醇、丙酮溶液清洗,用滤纸吸干后放置在干燥箱中,在 150 °C 下干燥 2 h,称量并测量试样的长、宽及厚度。T91 的化学成分见表 1。

表 1 T91 钢的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Main chemical composition of T91(mass) %

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	S	P
0.08~	0.3~	0.02~	8.0~	0.85~	0.18~			
0.12	0.6	0.5	9.5	1.05	0.25	≤0.4	≤0.02	≤0.02

1.3 试验方法

将 T91 试样放置在箱式电阻炉中进行恒温加热,试验温度分别设定为 600 °C、650 °C 和 700 °C。按照“静态氧化简易试验”,采用增重法测定试样腐蚀量,绘制腐蚀动力学曲线,腐蚀周期为 20 h。腐蚀后的试样采用光学显微镜、SEM 观察表面形貌,用 EDS 测试腐蚀层某一区域的化学成分;采用 XRD 分析腐蚀产物的组成。腐蚀后的试样经过切割、环氧树脂镶嵌、打磨抛光后用 SEM 观察腐蚀产物的剖面^[7]。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀动力学

2.1.1 KCl 蒸汽对腐蚀动力学曲线的影响

图 2 为 T91 在 700 °C 饱和 KCl 蒸汽介质和空白介质中的腐蚀动力学曲线。由图 2 可见,T91 在腐蚀初期呈快速增重的趋势,随后增重量趋于平缓,其腐蚀过程基本遵循抛物线规律^[8]。说明 T91 具有一定的抗高温腐蚀性能。对比两种介质中的腐蚀动力学曲线可知,T91 在饱和 KCl 蒸汽介质中腐蚀增重出现明显增大现象,腐蚀 20 h 后增重量约为 7.1 mg/cm²,而空白试验增重量约为 1.9 mg/cm²,前者是后者的 3.7 倍。在试验过程发现,T91 在

KCl 蒸汽中表面有大量鼓包形成,并且鼓包有裂痕,形成的氧化膜疏松不致密,容易脱落,而在空白试验中金属表面光滑平整,形成的氧化膜致密,不易脱落。由此可知 KCl 蒸汽的存在可明显加速 T91 的高温腐蚀。

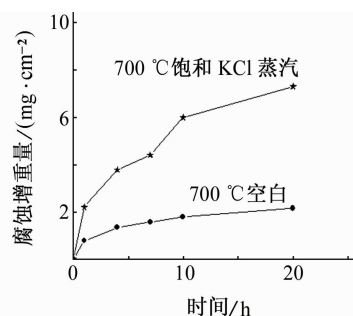


图2 T91 的腐蚀动力学增重曲线

Fig. 2 Corrosion kinetics curves of T91

2.1.2 温度对腐蚀动力学曲线的影响

图 3 为 T91 在不同温度含有饱和 KCl 蒸汽气氛中的腐蚀增重试验结果和拟合曲线。由图 3 可见,温度对 T91 的腐蚀增重产生了显著的影响。随着温度的增高,腐蚀增重量逐渐增加,且温度越高,腐蚀增重量增加越快。T91 在不同温度下的腐蚀动力学曲线整体呈抛物线规律,可用式(1)表示:

$$y = K_p t^{\frac{1}{2}} + C \quad (1)$$

式中: y 表示腐蚀增重量, K_p 为抛物线曲线的速度常数,表征了腐蚀速率,反映了金属材料的耐腐蚀性能,是与材料和温度有关而与时间无关的常数。 C 为积分常数,表述了反映初期对抛物线曲线的偏离^[9]。利用 origin8.0 软件对不同温度下 T91 腐蚀动力学增重曲线进行拟合,从而得到在不同温度下的 K_p 值。拟合曲线的优劣用修正的判定系数 R_a^2 表示,其取值范围为 0~1,取值越接近 1,则拟合程度越好,反之越差^[10]。表 2 为不同温度下 T91 腐蚀

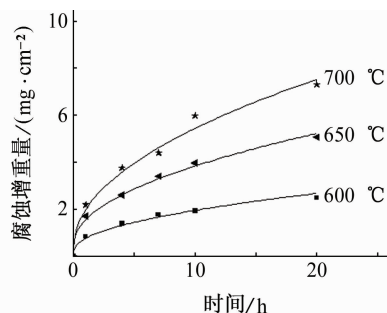


图3 T91 腐蚀动力学增重试验结果拟合曲线

Fig. 3 Fitting corrosion kinetics curves of T91 at different temperatures

表 2 不同温度下 T91 腐蚀动力学增重曲线
拟合关系式

Tab. 2 The fitting relation expression of T91 corrosion kinetics curves

温度/℃	拟合关系式	K_p	R_a^2
600	$y=0.54779t^{\frac{1}{2}}+0.23885$	0.54779	0.94118
650	$y=1.05307t^{\frac{1}{2}}+0.52347$	1.05307	0.94385
700	$y=1.58996t^{\frac{1}{2}}+0.42183$	1.58996	0.93365

动力学增重曲线拟合关系式,由表 2 可见, R_a^2 均在 0.93 以上,拟合结果良好。通过绘制腐蚀速率 K_p 值与温度的关系曲线(图 4)可见,T91 的 K_p 值随温度的升高而增加,且以直线的形式增加。分析认为随着反应温度的升高,参与腐蚀反应的分子量也随之增大,使的参与反应的活化分子数目增多,加速金属的腐蚀反应。

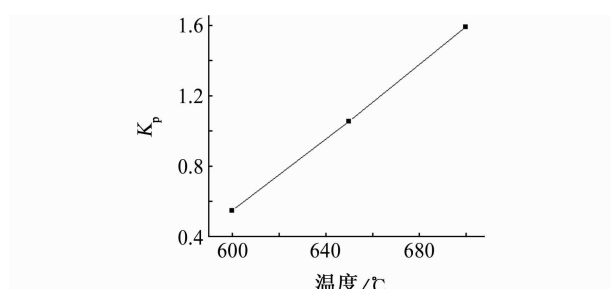


图 4 不同温度下 T91 的 K_p 值

Fig. 4 K_p of T91 at different temperatures

2.2 腐蚀产物形貌及成分分析

2.2.1 表面宏观形貌

图 5 为 T91 初始试样和在各温度下腐蚀后的表面宏观形貌。初始试样表面光滑平整;在 600~700 ℃温度区间内,腐蚀后试样表面均出现浅红色腐蚀产物,随着温度的升高,表面形貌出现不同程度的变化。在 600 ℃时试样表面较为平整,无掉氧化皮现象,说明形成的氧化膜跟金属基体粘接性好;在 650 ℃时试样表面变得粗糙,有大量鼓包形成;700 ℃时,试样表面不平整,出现大量的裂痕和鼓包,同时有少许的氧化皮脱落,说明形成的氧化膜与金属基体的粘接性变差,已不能很好地附着在金属基体表面保护金属基体不被腐蚀。

2.2.2 腐蚀产物微观形貌及 EDS 分析

图 6 为 T91 在不同温度下腐蚀后的表面微观形貌。在 600 ℃下腐蚀后,试样表面出现两种不同的形貌,即少量的尖晶石结构颗粒覆盖区和较为平坦的区域。平坦区域为形成的致密保护膜,但由于高温腐蚀,保护膜已逐渐开始破裂故在平坦区域发

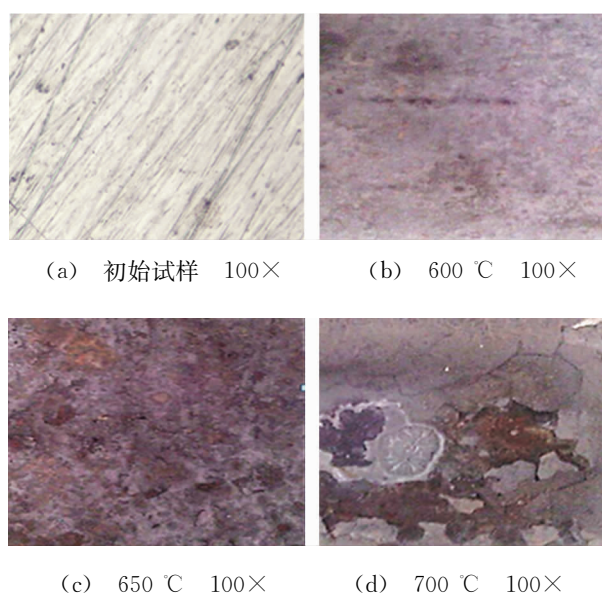
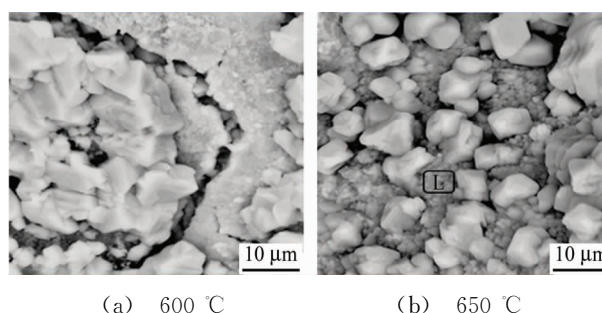


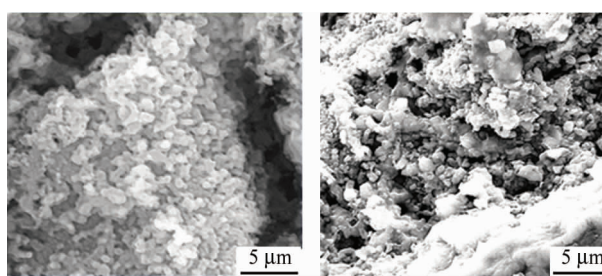
图 5 T91 在不同温度下腐蚀后的宏观形貌

Fig. 5 Macro-morphology of T91 at different temperatures

(a) original sample (b) 600 ℃
(c) 650 ℃ (d) 700 ℃



(a) 600 ℃ (b) 650 ℃



(c) b 图中 L 区域的放大 (d) 700 ℃

图 6 T91 腐蚀后的 SEM 形貌图

Fig. 6 SEM of T91 at different temperatures

(a) 600 ℃ (b) 650 ℃
(c) an enlarged region in Figure b (d) 700 ℃

现裂痕。EDS 分析表明,试样表面含有铁、铬、氧以及微量的钾元素。从图 6(b)可以看出,在 650 ℃下腐蚀后,试样表面腐蚀产物疏松多孔,尖晶石结构氧化物颗粒变逐渐变大,镶嵌在疏松的氧化膜中间。图 6(c)为(b)图中 L 区放大,观察发现此区域为疏

松多孔的团聚状氧化物,对这个区域进行 EDS 分析,分析表明此区域富集铁和氧,还有少量的铬和钾,分析认为团聚状氧化物主要成分为 Fe_2O_3 。试样在 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 下腐蚀后,表面的腐蚀十分严重,腐蚀产物疏松多孔并从样品表面有少量脱落,EDS 分析表明,腐蚀产物表面主要元素为铁、氧还有少量的铬、钾。

2.2.3 腐蚀产物成分分析

为了确定 T91 试样腐蚀产物的组成成分,对腐蚀后的试样进行了 XRD 分析,结果见图 7。XRD 结果表明,在三种温度下,腐蚀产物中均主要是铁的氧化物和铬的氧化物,主要相为 Fe_2O_3 和 $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$,其中 $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$ 为铁和铬形成的具有保护性的尖晶石型复合氧化物,次要相为致密性较强的 Fe_3O_4 。文献^[11]指出,纯铁在 KCl 蒸汽介质中的高温腐蚀产物有少量的 $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$ 相,虽然本研究 XRD 分析中未检测出 $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$ 相,但通过 EDS 分析发现腐蚀后的试样表面有少量钾元素的存在。分析认为,首先腐蚀后试样表面形成的 $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$ 与金属基体粘接性不牢固,易脱落,腐蚀后的试样在进行 XRD 检测之前,腐蚀产物 $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$ 可能已脱落;其次形成的 $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$ 量较少,因此 XRD 未能检测出次相。

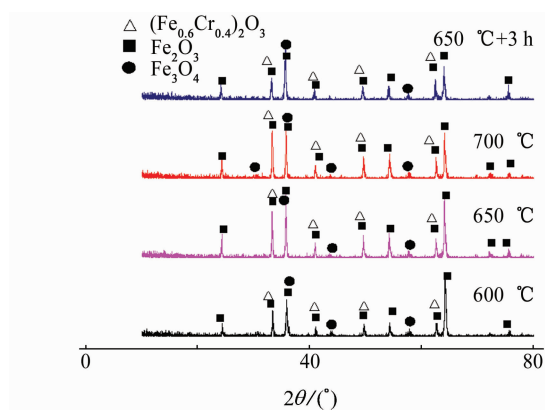


图 7 不同的温度下 T91 腐蚀产物的 XRD 图

Fig. 7 XRD patterns of T91 at different temperatures

2.2.4 腐蚀产物截面形貌及其能谱分析

图 8 为 T91 在 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 下腐蚀后的截面图。图中金属基体表面覆盖着一层较薄、不连续的氧化膜。同时观察到近基体部分出现较多的孔洞和裂痕,有大量氧化物侵入到基体内部。图 8(b)为(a)图中 M 区放大,由图可见,氧化膜与金属基体表面出现明显分层现象,并且氧化膜疏松不致密,与金属基体分层的膜在外力作用下极易脱落,这与在试验过程中试

样表面出现少量的氧化皮脱离金属基体是一致的。对腐蚀后的横截面选不同的区域进行能谱分析,不同区域的 EDS 元素含量见表 3。分析图表可发现,在金属基体缺陷处氯元素相对较高。分析认为, Cl^- 穿透致密的金属氧化膜,扩散到氧化膜与金属基体之间,并沿着金属晶界渗入到金属基体内部,促进金属基体加速腐蚀产生大量的坑洞与裂痕。铬在腐蚀层与金属基体表面交界处有富集,试样中较高的铬含量可提高金属的耐腐蚀性,铬含量虽然未达到发生选择性氧化的铬含量($>15\%$),但在高温条件下,可以形成保护性的尖晶石型复合氧化物 $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$,可以有效减缓金属的腐蚀^[12]。腐蚀层的最外层铁、氧含量较高,根据铁和氧的原子百分比,可知其成分主要是疏松的 Fe_2O_3 ,XRD 分析脱落的腐蚀产物也证实了这一点。

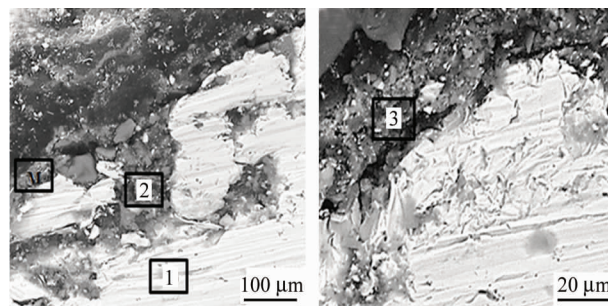


图 8 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 下 T91 腐蚀后的截面 SEM 图

Fig. 8 SEM of T91 section at $700\text{ }^\circ\text{C}$ after corrosion

表 3 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 下 T91 试样腐蚀后的截面 EDS 元素组成(原子分数/%)

Tab. 3 EDS elemental composition of T91 at $700\text{ }^\circ\text{C}$

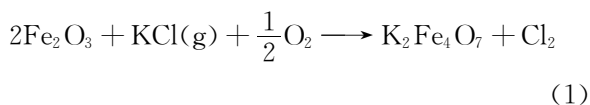
元素	材料基体(1)	内层氧化皮(2)	外层氧化皮(3)
O	—	11.23	21.41
Cl	—	1.69	0.76
Fe	87.51	71.43	50.87
Cr	8.96	12.21	7.28

2.3 腐蚀机理分析

T91 在高温含氯气氛中的加速腐蚀行为可用“活化氧化”理论解释。本研究中,试样表面出现鼓包,氧化膜与基体剥离、开裂以及金属基体出现坑洞等现象与“活化氧化”过程中的现象十分相符,而活化氧化行为得以实现的关键是试验过程中生成了一定的 Cl_2 ^[13]。

在试验初期,T91 基体表面直接暴露在介质中,试样主要发生高温氧化反应,即生成氧化膜,随着氧化膜的逐渐增厚,腐蚀动力学表现为快速的增长趋

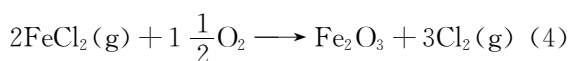
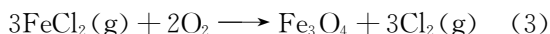
势,腐蚀速度主要受化学反应速度控制^[14]。而在腐蚀后期,增重区域平稳,这是由于 KCl 蒸汽直接与金属表面发生化学反应,其反应方程见式(1):



生成的 Cl_2 具有很强的渗透能力,在氧化膜和金属基体界面的氧分压逐渐降低时,渗透性强的 Cl_2 在一定的分压下穿透致密的氧化膜,在金属基体与氧化膜界面处富集。 Cl_2 的渗入破坏了氧化膜的致密性,使其变得疏松多孔。同时 Cl^- 通过金属晶界向金属基体扩散,在晶界生成金属氯化物,加速了 T91 基体的腐蚀,并在金属基体表面形成坑洞与裂痕。其反应方程见式(2):



形成的金属氯化物具有较低的熔点($T = 677\text{ }^\circ\text{C}$)和高挥发性,当大量的金属氯化物形成后会向外连续扩散,当金属氯化物达到氧势较高的地方会被氧化生成 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 Cl_2 ,其反应方程见式(3)、(4):



该 Fe_2O_3 在氧化膜中生成会造成很大的组织应力,使氧化膜的完整性遭到破坏,出现与金属基体脱落现象。同时生成的 Cl_2 部分重新返回到氧化膜与基体界面对基体进行腐蚀,即产生“活化氧化”。在此过程中,大量生成的金属氯化物很难通过“活化氧化”的途径在短时间内扩散达到平衡,因而金属氯化物向外散逸,这与在试验过程中发现盛放样品的坩埚内壁附着黄色挥发物这一现象是一致的,金属氯化物的向外散逸以及“活化氧化”使金属氯化物在腐蚀层含量非常少,因此在 XRD 分析中,也未能检测出次相。同时外界的氧气也可从氧化膜破损处扩散进来,金属基体表面又可以形成新的氧化膜。由于铁以金属氯化物的形式向外散逸以及氧气的进入形成新的氧化膜,腐蚀动力学表现为平缓趋势,此时,金属高温腐蚀速度主要受氯在氧化膜的扩散行为控制,于此同时,生成的 Cl_2 进入新一轮的加速腐蚀过程。

3 结论

(1) 气氛中含微量的 KCl 蒸汽能明显促进 T91 的高温腐蚀,主要是通过与试样表面的氧化膜反应

生成 Cl_2 ,而 Cl_2 能够渗透到基体界面处生成具有挥发性的铁的氯化物实现的,此加速腐蚀行为可用“活化氧化”理论来解释。

(2) T91 腐蚀动力学曲线符合抛物线形规律,对不同温度下的腐蚀动力学曲线进行拟合,其关系式为 $y = K_p t^{1/2} + C$ 。温度对 T91 腐蚀具有显著影响,随着温度的升高,腐蚀速率呈直线形式增加。

(3) T91 在试验温度下腐蚀后均出现浅红色腐蚀产物,产物的主要成分为 Fe_2O_3 和 $(\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.4})_2\text{O}_3$,还有少量的 Fe_3O_4 和 $\text{K}_2\text{Fe}_4\text{O}_7$;在 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 下试样基体表面出现较多的坑洞和裂痕,腐蚀产物与基体表面出现明显的分层现象,腐蚀产物疏松多孔且有少许的脱落。

(4) T91 在腐蚀初期主要受高温氧化控制,腐蚀后期主要受氯元素在氧化膜中的扩散行为控制。

参考文献:

- [1] YUTAKA S M H N. Accelerated oxidation of chromium by trace of sodium chloride vapor[J]. Materials Transactions,1991,32(10):969-972.
- [2] HARA M,NAKAGAWA T. Effect of trace amount of NaCl vapor on high-temperature oxidation of TiAl[J]. Oxidation of Metals,1999,52(1/2).
- [3] MOTOI H,KYOU S,YOSHIRO K. Effect of preoxidation in oxygen containing a trace amount of NaCl vapor on the oxidation resistance of TiAl[J]. J Japan InstMetals,2000,64(12):1196-1205.
- [4] MICHIO I,MOTOI H,TOKIKO N, et al. Effect of trace of NaCl vapor on high temperature oxidation of pure Ti and Ti-6% Al alloy[J]. Japan InstMetals,1997,61(6):511-518.
- [5] MOTOI H,MICHIO I,TOKIKO N. Effect of trace NaCl vapor on high-temperature oxidation of Ti-6Al-4V alloy[J]. J Japan Inst-Metals,1998,62(8):691-700.
- [6] 孟庆若. P92 钢埋弧焊焊接工艺[J]. 焊接技术,2008,37(4):36-39.
- [7] 罗比雄. TP316L 在生物质锅炉过热器气相条件下的腐蚀特性[J]. 热力发电,2011,40(3):34-38.
- [8] 李美栓. 金属的高温腐蚀[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [9] 潘葱英. 垃圾焚烧炉内过热器区 HCl 高温腐蚀研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [10] 胡荣祖,史启祯. 热分析动力学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [11] 马海涛. 纯铁在含 KCl 蒸汽的 O_2 气氛中的高温腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术,2005,17(1):21-23.

(下转第 1076 页)

范围为 803 ~ 1 119 mV, 平均保护电流密度为 10.68 mA/m², 总保护电流为 364.60 A, 其中由电源 1 提供 121 A, 由电源 2 提供 169 A, 牺牲阳极提供 74 A。外加电流系统的电源电压为 3.20 V 和 2.42 V, 电源 1 有效功率为 388 W, 电源 2 有效功率为 409 W, 阳极屏总面积 4 420 m²。

使用“单纯外加电流阴极保护”时, 由于吸收效应导致横撑角隅处以及螺旋桨附近电位偏低^[19-20], 因此需要提高电源电压以使水下结构整体电位处于阴极保护范围, 这样就导致电源输出功率提高、保护电位分布不均匀、阳极屏面积增大。使用“外加电流+牺牲阳极辅助的联合阴极保护”时, 在受吸收效应影响的区域布置牺牲阳极以提高局部表面电位, 从而减小了电源功率, 也使得表面电位更均匀, 阳极屏面积更小。

5 结论

(1) 数值模拟计算方法可以实现对水下结构腐蚀防护状态的准确预报。

(2) 采用“单纯外加电流阴极保护”方案时, 水下结构外表面保护电位不均匀。

(3) 比较两种阴极保护方式, 采用“外加电流+牺牲阳极辅助的联合阴极保护”时, 可以有效解决使用“单纯外加电流阴极保护”时, 表面电位分布不均匀, 阳极屏面积及电源功率过大的问题。

参考文献:

- [1] 王芷芳. 阴极保护的几个误区及其解决方案[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(7): 635-637.
- [2] 马桂君, 刘福国, 王伊诺, 等. 船体压载舱牺牲阳极阴极保护的数值模拟[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(3): 257-260.
- [3] 刘福国, 尹鹏飞, 张国庆, 等. 海洋石油平台外加电流阴极保护延寿修复技术[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(3): 276-280.
- [4] 赵景波, 吴建华, 姚萍. 舰船双区域外加电流阴极保护系统的优化[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(12): 1114-1118.
- [5] 李成杰, 杜敏. 深海钢铁材料的阴极保护技术研究及发展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(1): 10-15.
- [6] 吴世刚, 常斌. 多点阴极保护技术的研究与应用[J]. 化工设备与防腐蚀, 2003, 6(2): 64-66.
- [7] 王晨, 顾望平. 12.5 × 10⁴ m³ 储油罐底板阴极保护方案比选[J]. 石油化工设备技术, 2003, 24(3): 45-49.
- [8] 方志刚, 黄一. 铝合金船体阴极保护系统的数值模拟仿真[J]. 船舶工程, 2012, 33(4): 73-76.
- [9] 王爱萍, 杜敏, 陆长山, 等. 海洋平台复杂节点阴极保护电位分布的有限元法计算[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(1): 129-134.
- [10] 侯志强, 邢少华. 压载水舱阴极保护设计与保护效果评价[J]. 材料保护, 2008, 41(6): 67-68.
- [11] 赵景波, 吴建华, 姚萍. 舰船双区域外加电流阴极保护系统的优化[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(12): 1114-1118.
- [12] HUANG Y, IWATA M, NAGAI K. BEM analysis of the potential distribution on a tubular structure under cathodic protection[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1993(174): 777-986.
- [13] HUANG Y, IWATA M, MOTOMURA T. A study on protection potential monitoring system for a large scale floating structure[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1998, 184: 443-452.
- [14] 郝宏娜, 李自力, 王太源, 等. 阴极保护数值模拟计算边界条件的确定[J]. 油气储运, 2011, 30(7): 504-507.
- [15] WANG Y, KARISALLEN K J. Comparison of impressed current cathodic protection numerical modeling results with physical scale modeling data[J]. Corrosion, 2010, 66(10): 105001-105015.
- [16] WANG Y, KARISALLEN K J. Validating impressed current cathodic protection numerical modelling results using physical scale modelling data[C]//Corrosion 2008. [S. l.]: NACE International, 2008.
- [17] 梁成浩, 于楠, 吴建华, 等. 船体双区域外加电流阴极保护缩比模型模拟研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(5): 656-660.
- [18] B/T 3108—1999 船体外加电流阴极保护系统[S].
- [19] 方志刚, 黄一. 复杂结构阴极保护设计中电流屏蔽效应数值模拟仿真[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(9): 98-102.
- [20] HUANG Y, FANG Z G. Studying on shielding effect in the sacrificial anode cathodic protection system [C]//Advanced Materials Research. [S. l.]: [s. n.], 2012, 567: 275-282.
- [12] 庞飞飞. 620 ℃ 条件下 T/P92 耐热钢的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(12): 1086-1089.
- [13] 马海涛. 高温氯盐环境中金属材料的腐蚀[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [14] 缪筱玲, 刘光明, 于斐, 等. 超超临界锅炉用 TP310HCbN 不锈钢的热腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 31-39.

~~~~~

(上接第 1025 页)