

# T2/TC4 在静态人造海水中的电偶腐蚀行为

陈云飞<sup>1</sup>, 李争显<sup>1,2</sup>, 刘林涛<sup>2</sup>, 王浩楠<sup>2</sup>, 王毅飞<sup>2</sup>, 彭易发<sup>1</sup>

(1. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘 要:** 进行 T2/TC4 电偶对在静态人造海水中的电偶腐蚀实验, 通过电化学工作站、原子发射光谱分析仪、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)研究 T2/TC4 在静态人造海水中电偶腐蚀时的铜离子释放速率与腐蚀行为。结果表明: 当 T2/TC4 发生电偶腐蚀时反应强烈, T2 为电偶对阳极发生加速腐蚀, TC4 为电偶对阴极; 与 T2 自腐蚀相比, T2/TC4 电偶腐蚀的铜离子释放速率提高了数十倍, 可以维持在  $160 \mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$  左右, 能达到抑制大多数海洋生物附着的海洋防污要求; T2 自腐蚀的腐蚀产物以  $\text{Cu}_2\text{O}$  为主, 与 TC4 电偶腐蚀后的 T2 试样表面无腐蚀产物覆盖。

**关键词:** T2/TC4 电偶对; 电偶腐蚀; 铜离子释放速率; 海洋防污

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)04-1161-07

钛合金具有优异的机械性能与耐海水腐蚀抗力, 被广泛应用于航空、航天、海洋等领域<sup>[1,2]</sup>。但良好的生物相容性导致钛合金在海洋应用中面临海洋生物严重污损问题, 海洋生物污损会对钛制海洋设施带来如堵塞管道、改变材料导电率与传热率等一系列危害<sup>[3-5]</sup>。

研究发现, 当铜离子释放速率高于  $50 \mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$  时便可抑制绝大多数海洋生物的附着, 并且铜离子具有非亲脂性与低溶解性, 对环境的危害性较小, 可以利用铜离子的绿色环保与防污性能, 将铜离子应用于钛合金海洋防污领域<sup>[6,7]</sup>。但铜合金耐蚀性较好, 在海洋环境中的铜离子释放速率不能达到海洋防污标准, 因此西北有色金属研究院利用电偶腐蚀原理, 将铜合金与自腐蚀电位较高的钛合金组成电偶对, 在异种金属电位差的作用下使铜离子加速溶出以达到抑制钛合金表面海洋生物附着的目的。

电偶腐蚀现象在由不同金属制造的设备构件中经常可见, 降低了零部件的使用寿命<sup>[8]</sup>。以往文献主要研究如何避免电偶腐蚀现象的发生, 而西北有色金属研究院却利用电偶腐蚀加速铜离子溶出研发出一种新型的钛合金海洋防污方法, 与以往防污方法相比具有

结构简单、使用方便、成本较低等优势。但目前关于此方面的研究尚不够充分, 对相关机理的认识也不够清晰, 因此进行 T2/TC4 电偶腐蚀行为的研究不仅具有重要的学术意义, 同时具有实际的工程应用价值。

本实验以 T2/TC4 与 T2 为研究对象, 在静态人造海水中分别进行电偶腐蚀实验与自腐蚀实验, 采用电化学工作站、ICP 原子发射光谱分析仪、SEM、EDS 与 XRD 研究了两者腐蚀行为与腐蚀机理的差异, 评估了对于 T2 自腐蚀而言, T2/TC4 电偶腐蚀对铜离子溶出的加速作用与海洋防污效果。

## 1 实 验

将 1 mm 厚度的 T2 铜片与 TC4 钛片先用水磨砂纸将试样逐级打磨至 1200#, 然后用丙酮和无水乙醇进行超声清洗 30 min 除油, 最后将试样冷风干燥备用。在 T2/TC4 电偶对的电偶腐蚀实验中, 电偶对试样间距为 10 mm, T2 与 TC4 的面积比为 1:8, 腐蚀介质是采用 GB/T 15748-1995 标准<sup>[9]</sup>配制而成的人造海水, 其化学成分见表 1。pH 值为 7, 温度为 30 °C。为保证实验的准确性, 平行试样偶对数取 3 个。

表 1 人造海水化学组成

Table 1 Chemical composition of synthetic seawater (g/L)

NaCl	MgCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl	NaHCO <sub>3</sub>	KBr	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	SrCl <sub>2</sub>	NaF
24.53	5.20	4.09	1.16	0.695	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

收稿日期: 2018-04-20

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划项目-海洋先进金属创新团队 (2016KTC-27); 陕西省自然科学基金 (2017JM5056); 西安市未央区科技计划项目 (201821)

作者简介: 陈云飞, 男, 1992 年生, 硕士生, 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819, E-mail: 157877399660@163.com

采用 SEM (JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜) 观察腐蚀后 T2 试样的表面形貌; 并通过 INCAx-sight7574 型能谱仪对腐蚀后的 T2 试样表面腐蚀产物进行微区化学成分定性分析; 采用 ADVANCE 型 X 射线衍射仪对腐蚀后的 T2 试样表面进行物相分析。

依据国家标准<sup>[10]</sup>GB/T 6824-2008《船底防污漆铜离子渗出率测定法》测定 T2/TC4 电偶腐蚀与 T2 自腐蚀的铜离子渗出速率, 评估 T2/TC4 对铜离子溶出的加速作用及其防污效果。

采用普林斯特 PAR2273 型电化学工作站, 测定 T2 与 TC4 在静态人造海水中的电化学性能。采用三电极体系 (以金属铂电极为辅助电极、饱和甘汞电极为参比电极、T2 与 TC4 试样为工作电极) 在 30 °C 静态人造海水中对 T2 与 TC4 进行开路电位、极化曲线与交流阻抗测试, 并测试 T2 试样自腐蚀与电偶腐蚀 20 d 的电化学交流阻抗。采用 OCP-Scan 监测 T2 与 TC4 在静态人造海水中的开路电位变化; 动电位极化曲线测试参数: 扫描范围为 -500~+1000 mV (相对于开路电位), 扫描速度为 1 mV/s; 电化学阻抗测试参数: 测试频率范围为 50 mHz~100 kHz, 电压幅值为 10 mV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 T2 与 TC4 的电化学性能分析

T2 与 TC4 试样在静态人造海水中浸泡不同时间的开路电位如图 1 所示。由图 1 可知, 虽然 TC4 钛合金在刚浸入人造海水中的开路电位低至 -275 mV, 但 TC4 钛合金表面能够迅速形成致密且化学稳定的钝化层, 因此其开路电位得以迅速正移, 随着浸泡时间的延长 TC4 钛合金的开路电位稳定在 50 mV 左右。而 T2 铜的开路电位波动幅度始终较小, 在 -215~-235 mV 范围内变化。T2 铜合金与 TC4 钛合金在浸入人造海水初期的电位差较小, 而随着 TC4 钛合金开路电位的迅速正移, T2 铜与 TC4 钛合金之间的电位差也迅速增大随后基本保持不变, 由于异种金属之间电位差是发生电偶腐蚀反应的驱动力, 由此猜测 T2/TC4 发生电偶腐蚀时的铜离子释放速率与两者之间的电位差具有相似的变化规律。

图 2 为 TC4 钛合金与 T2 铜在 30 °C 静态人造海水中动电位极化曲线, 采用图 3 所示的塔菲尔外推法<sup>[11]</sup>对图 2 的极化曲线进行塔菲尔拟合求得的电化学参数见表 2。由表 2 可知, T2 具有较低的自腐蚀电位为 -300 mV, TC4 具有较高的自腐蚀电位为 -100 mV, 两者之间电位差为 200 mV, 当两者在离子导体中直接接触或满足电联结条件时便容易发生较为强烈的电偶腐蚀反应。并且 T2 较低的自腐蚀电位使其在 T2/TC4 发生电偶腐蚀时具有

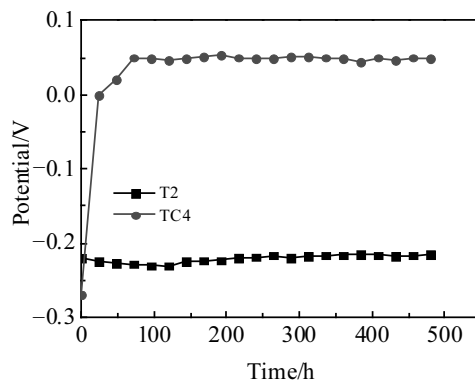


图 1 T2 与 TC4 试样在静态人造海水中的开路电位图

Fig.1 Open circuit potential of T2 and TC4 alloy in static artificial seawater

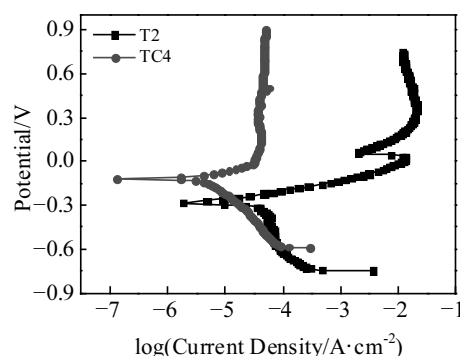


图 2 T2 与 TC4 试样在静态人造海水中的动电位极化曲线

Fig.2 Potentiodynamic polarization curves for T2 and TC4 alloy in static artificial seawater

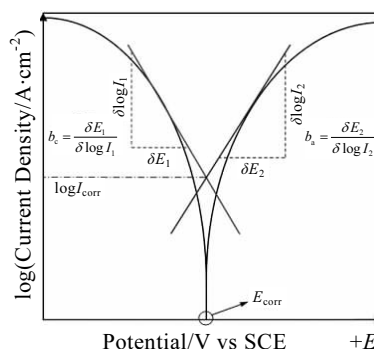


图 3 塔菲尔外推法推导电化学参数示意图

Fig.3 Tafel extrapolation method which defined the electrochemical parameters<sup>[11]</sup>

作为电偶对阳极发生加速腐蚀的倾向, 使得铜离子加速溶出达到防污效果。

表2 T2 与 TC4 试样在静态人造海水中的电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters of T2 and TC4 sample in static artificial seawater

Sample	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$i_{\text{corr}}/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$b_a/\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$	$b_c/\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$
TC4	-100	4.6	53	-27
T2	-300	15.2	180	-92

T2 与 TC4 试样在静态人造海水中的电化学阻抗图谱如图 4 所示,采用图 5 所示的等效电路模型<sup>[12]</sup>对两者的电化学阻抗图谱数据进行拟合分析,其中  $R_s$  为溶液电阻,  $R_{\text{ct}}$  为电荷转移电阻,  $C_{\text{dl}}$  为双层电容,  $R_p$  为腐蚀产物膜电阻,  $C_p$  为腐蚀产物膜层电容,采用等效电路模型对电化学阻抗进行拟合后的数据如表 3 所示。

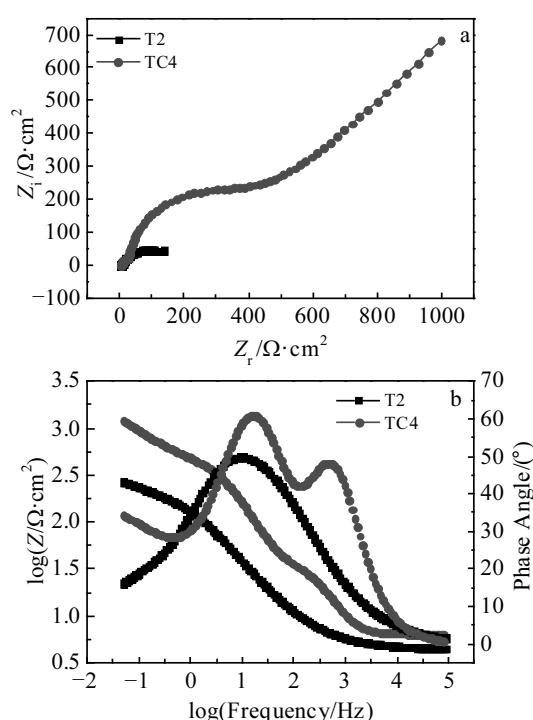


图4 T2 与 TC4 试样在静态人造海水中的 Nyquist 图与 Bode 图  
Fig.4 Nyquist (a) and Bode (b) plots of T2 and TC4 sample in static artificial seawater

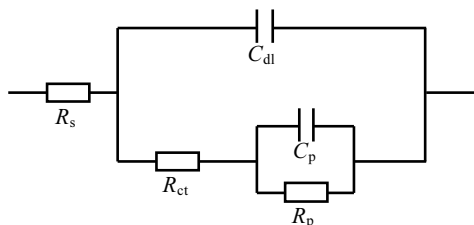


图5 T2 与 TC4 试样在人造海水中电化学阻抗数据拟合的等效电路模型  
Fig.5 Equivalent circuit model used in the fitting of the impedance data for T2 and TC4 sample in artificial seawater

表3 T2 与 TC4 试样在静态人造海水中的等效电路参数

Table 3 Equivalent circuit parameters for T2 and TC4 sample in static artificial seawater

Sample	$R_s/\Omega$	$R_{\text{ct}}/\Omega\cdot\text{cm}^2$	$C_{\text{dl}}/\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$	$R_p/\Omega\cdot\text{cm}^2$	$C_p/\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$
TC4	6.1	38.5	22.7	446.3	77.3
T2	5.7	12.0	56.2	65.8	480.6

在电偶腐蚀反应中腐蚀速率不仅取决于异种金属之间的电位差,而且受极化电阻的影响,由图 4 与表 3 可知,静态人造海水中 TC4 的阻抗弧度、初始阻抗与  $R_p$  值均大于 T2,这表明在静态人造海水中 TC4 的耐蚀性高于 T2。由于 TC4 不仅具有较高的自腐蚀电位,而且具有较为优异的耐蚀性,因此在 T2/TC4 发生电偶腐蚀时 T2 为电偶对阳极,TC4 为电偶对阴极。由于电偶腐蚀特征主要体现在电偶对阳极上,因此只对电偶腐蚀不同时间的 T2 试样进行研究分析。

## 2.2 铜离子释放速率

比较 T2/TC4 电偶腐蚀与 T2 自腐蚀的铜离子释放速率,评估 T2/TC4 电偶腐蚀对铜离子溶出的加速作用与防污效果。铜离子释放速率的测定参考国家标准 GB/T 6824-2008《船底防污漆铜离子渗出率测定法》修改实施。首先将试样放入装有 1000 mL 人造海水的烧杯储存槽中进行浸泡实验,然后将浸泡不同时间的试样从储存槽中取出放入装有 1000 mL 新鲜人造海水的烧杯渗出率测定容器中,过单位时间后采用原子发射光谱分析仪测定试样在此阶段内渗出的铜离子浓度,最后根据公式(1)计算出铜离子释放速率。

$$R = \frac{24\rho(\text{Cu})V}{TA} \quad (1)$$

其中,  $R$ : 铜离子释放速率,  $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ ;  $\rho(\text{Cu})$ : 铜离子浓度,  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;  $V$ : 渗出率测定容器中海水体积,  $\text{mL}$ ;  $T$ : 试样在渗出率测定容器中的浸泡时间,  $\text{h}$ ;  $A$ : 试样表面积,  $\text{cm}^2$ 。

图 6 所示为 T2/TC4 电偶对与 T2 铜在静态人造海水中不同腐蚀时间的铜离子释放速率。由图可知, T2 自腐蚀的铜离子释放速率低至  $10 \mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ ,远小于可抑制大多数海生物附着的铜离子释放速率 ( $50 \mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ )。而 T2/TC4 电偶对在刚浸入人造海水 24 h 内就具有较高的铜离子释放速率(约为  $40 \mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ ),随后其铜离子释放速率迅速升高并维持在  $160 \mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ 左右,与 T2 自腐蚀相比, T2/TC4 电偶腐蚀的铜离子释放速率提高了数十倍。T2/TC4 电偶腐蚀在整个阶段内都具有较高的铜离子释放速率,是由于异种金属之间的电位差具有加速电偶对阳极腐蚀的作用,从而使铜离子加速溶出。并且 T2/TC4 电偶腐蚀时的铜离子释放速率远高于可抑制大多数海生物附着

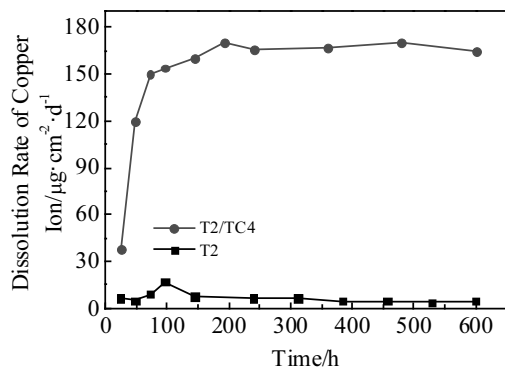


图 6 T2/TC4 电偶腐蚀与 T2 自腐蚀在静态人造海水中的铜离子释放速率

Fig.6 Dissolution rate of copper ion for galvanic corrosion of T2/TC4 and corrosion of T2 sample in static artificial seawater

的铜离子释放速率标准  $50 \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ , 理论上可以有效抑制海洋生物在钛合金表面的附着。

### 2.3 腐蚀行为分析

与 TC4 在静态人造海水中电偶腐蚀不同时间 T2 试样表面微观形貌如图 7 所示, T2 试样自腐蚀不同时间的表面微观形貌如图 8 所示。

由图 7、图 8 可知, T2 试样自腐蚀与电偶腐蚀 1 d 的试样较为平整且残留砂纸打磨的明显划痕; 当腐蚀时间为 5 d 时, 两者表面形貌存在明显区别, 与 TC4 偶合

的 T2 试样表面打磨划痕完全消失且变得非常粗糙, T2 试样表面裸露出铜基体 (XRD 分析所得), 而自腐蚀的 T2 试样表面较为平整, 且覆盖以  $\text{Cu}_2\text{O}$  为主的腐蚀产物 (XRD 分析所得); 随着腐蚀时间的延长, 与 TC4 偶合的 T2 试样表面变得更加粗糙, 且表面几乎无腐蚀产物, 而自腐蚀的 T2 试样表面会覆盖大量较为疏松的腐蚀产物, 随着腐蚀产物的逐渐湮没, 最终在基体表面形成一定厚度的腐蚀产物层, 从而提升了对基体保护作用, 减缓了铜离子的释放速率。

采用 EDS 区域扫描对图 7 与图 8 中 T2 试样表面进行化学元素分析, 结果如表 4 所示。从表 4 可知, 电偶腐蚀与自腐蚀的 T2 试样表面含有 Cu、O、Cl 3 种元素, O 元素来源于反应生成的  $\text{Cu}_2\text{O}$ , Cl 元素则来源于反应生成的  $\text{CuCl}$  等腐蚀产物。T2 试样自腐蚀 1 d 时的 O 元素原子分数较低, 成分接近 T2 基体, 当腐蚀时间为 5 d 时, T2 自腐蚀的 O 元素含量迅速升高至 23.70%, 并含有少量的 Cl 元素, 但随着浸泡时间的延长, 自腐蚀的 T2 试样表面 O 元素含量增加幅度逐渐减缓, Cl 元素含量出现小幅波动, 表明此阶段内的 T2 试样腐蚀程度虽在不断增加但腐蚀速率在降低, 这是由于随着浸泡时间的延长, T2 试样表面覆盖的腐蚀产物也不断增加, 减小了基体与溶液反应的有效接触面积, 从而减缓了 T2 的腐蚀速率, 降低了铜离子释放速率, 但由于自腐蚀的 T2 试样表面形成的腐蚀产物较为疏松, 因此腐蚀反应得以继续进行, 但仍会有少量铜离子

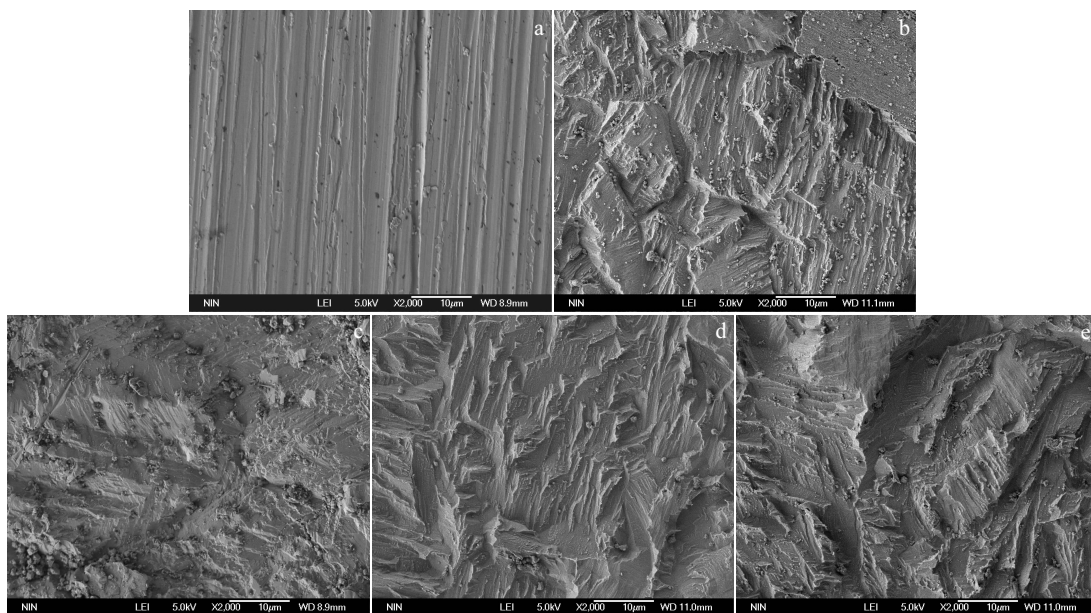


图 7 在静态人造海水中电偶腐蚀不同时间的 T2 试样表面形貌

Fig.7 SEM images of T2 sample after galvanic corrosion with different time in static artificial seawater:

(a) 1 d, (b) 5 d, (c) 10 d, (d) 15 d, and (e) 20 d

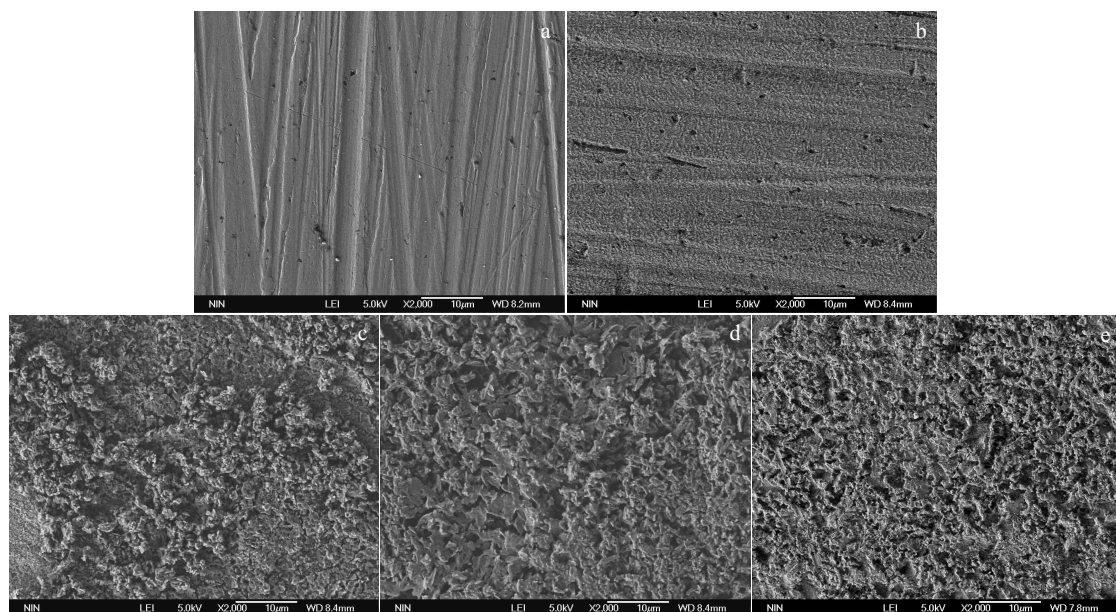


图8 在静态人造海水中 T2 试样自腐蚀不同时间的表面形貌

Fig.8 SEM images of T2 sample after corrosion with different time in static artificial seawater:

(a) 1 d, (b) 5 d, (c) 10 d, (d) 15 d, and (e) 20 d

表4 图7与图8中 T2 试样表面能谱分析结果

Table 4 Chemical compositions of T2 surface in Fig.7 and Fig.8 obtained by EDS (at%)

Time/d	T2/TC4			Time/d	T2		
	Cu	O	Cl		Cu	O	Cl
1	96.18	3.82	-	1	98.60	1.40	-
5	95.89	3.43	0.68	5	74.15	23.70	2.15
10	97.60	2.40	-	10	73.15	25.10	1.33
15	98.29	1.28	0.42	15	71.19	26.66	1.40
20	99.01	0.99	-	20	71.18	27.18	1.01

继续溶出。EDS 能谱分析结果表明,与 TC4 偶合发生电偶腐蚀的 T2 试样表面 O 元素与 Cl 元素的含量始终较低,成分与 T2 基体接近,表明与 TC4 耦合的 T2 试样表面几乎无腐蚀产物存在,基体可以裸露出来保证了与腐蚀溶液反应的有效接触面积,使得 T2 在与 TC4 电位差的作用下保持较高的铜离子释放速率。

T2 与 T2/TC4 腐蚀不同时间的 T2 试样物相分析结果如图 9 与图 10 所示。由图可知,自腐蚀的 T2 试样表面物相结构主要包括  $\text{Cu}_2\text{O}$  ( $2\theta=36.8^\circ, 42.9^\circ, 50.1^\circ$ ) 与 Cu ( $2\theta=42.9^\circ, 50.1^\circ, 74.3^\circ$ )。与 TC4 偶合发生电偶腐蚀的 T2 试样表面物相结构以 Cu 为主 ( $2\theta=42.9^\circ, 50.1^\circ$  和  $74.3^\circ$ ),物相分析结果验证了与 TC4 偶合发生电偶腐蚀的 T2 试样表面无腐蚀产物存在。

为了进一步揭示 T2/TC4 电偶腐蚀与 T2 自腐蚀两者腐蚀行为的差异,测试了 T2 自腐蚀与 T2/TC4 电偶

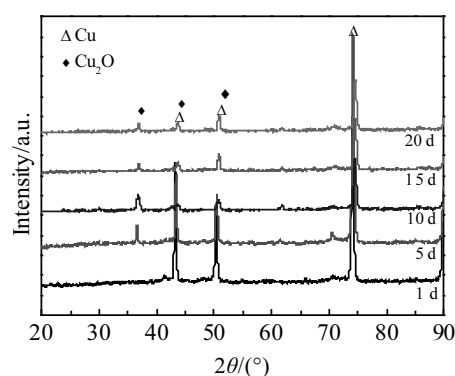


图9 在静态人造海水中 T2 试样自腐蚀不同时间的 XRD 图谱

Fig.9 XRD patterns of T2 sample after corrosion with different time in static artificial seawater

腐蚀 20 d 的电化学阻抗图谱,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,与 T2 试样自腐蚀相比,与 TC4 电偶腐蚀的 T2 铜的阻抗略有减小。这是由于在静态人造海水中,随着腐蚀时间的延长,T2 自腐蚀试样表面形成了一定厚度的腐蚀产物层,对基体的保护作用升高,阻抗变大。而与 TC4 电偶腐蚀的 T2 铜在异种金属电位差的作用下,作为电偶对阳极的 T2 铜发生加速腐蚀,表面腐蚀产物的形成受到影响,基体裸露出来,失去了腐蚀产物膜层的保护作用,阻抗降低,铜

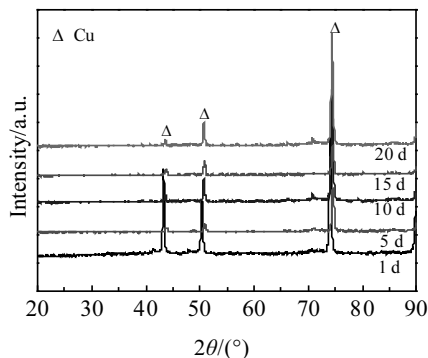


图 10 与 TC4 电偶腐蚀不同时间的 T2 试样表面 XRD 图谱  
Fig.10 XRD patterns of T2 sample after galvanic corrosion with different time in static artificial seawater

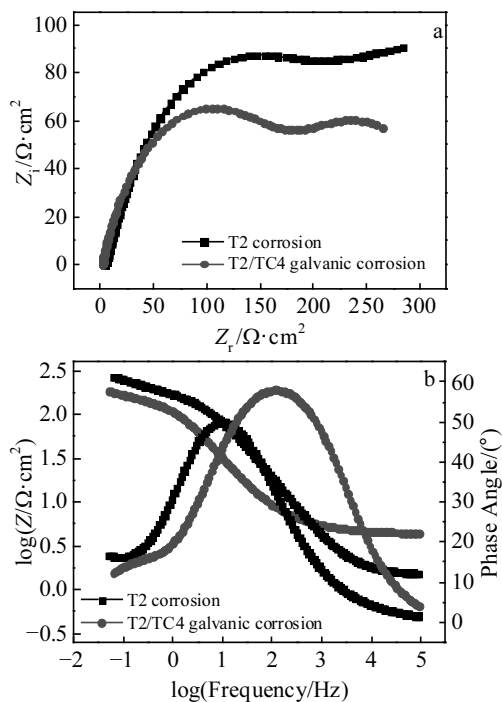
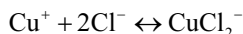
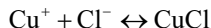
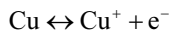


图 11 在静态人造海水中 T2 试样经自腐蚀与电偶腐蚀 20 d 的 Nyquist 图与 Bode 图  
Fig.11 Nyquist (a) and Bode (b) plots of T2 sample after galvanic corrosion and self-corrosion with different time in artificial seawater

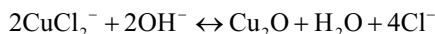
离子加速溶出, 起到良好的防污效果。

#### 2.4 腐蚀机理分析与讨论

T2 试样在静态人造海水中自腐蚀的腐蚀产物主要为  $\text{Cu}_2\text{O}$ , 与 TC4 耦合的 T2 试样表面无腐蚀产物存在, 基体完全裸露出来。T2 铜合金在静态人造海水中自腐蚀的腐蚀机理如下所示:



$\text{CuCl}_2^-$  发生沉淀反应形成  $\text{Cu}_2\text{O}$ :



在静态人造海水中与 TC4 耦合的 T2 试样表面无腐蚀产物的存在, 这是由于 T2 在与 TC4 电位差的作用下发生加速腐蚀, T2 表面腐蚀产物的形成受到影响, 铜基体裸露出来, 与腐蚀介质的有效接触面积增大, 从而使 T2/TC4 在静态人造海水中发生电偶腐蚀时能够保持较高的铜离子释放速率。

### 3 结 论

1) T2 试样在静态人造海水中的开路电位始终在  $-215 \sim -235 \text{ mV}$  范围内波动, TC4 试样在浸入人造海水中的开路电位能够迅速正移至  $50 \text{ mV}$ , 较大的电位差使 T2/TC4 电偶对容易发生强烈的电偶腐蚀反应, 在 T2/TC4 发生电偶腐蚀时 T2 为电偶对阳极, TC4 为电偶对阴极。

2) T2 自腐蚀的铜离子释放速率低至  $10 \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ , 远小于可以抑制大多数海洋生物附着的铜离子释放速率, 而 T2/TC4 电偶腐蚀时的铜离子释放速率可以维持在  $160 \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$  左右, 相对于 T2 自腐蚀提高了数十倍, 理论上具有抑制钛合金表面海洋生物附着的效果。

3) T2 试样在静态人造海水中自腐蚀的腐蚀产物以  $\text{Cu}_2\text{O}$  为主, 而与 TC4 耦合的 T2 试样表面无腐蚀产物存在, 在电位差的作用下使其具有较高的铜离子释放速率。

#### 参考文献 References

- [1] Zhang Xiyan(张喜燕), Zhao Yongqing(赵永庆), Bai Chenguang(白晨光) et al. *Titanium & Application*(钛合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 306
- [2] Zhou Lian(周 廉), Zhao Yongqing(赵永庆), Wang Xiangdong(王向东). *China Titanium Material & Application Development Strategy Research*(中国钛合金材料及应用进展发展战略研究)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 152
- [3] Rubio D, Casanueva J F, Nebot E. *Applied Thermal Engineering* [J], 2015, 85: 124
- [4] Zhao Q, Liu Y, Wang C et al. *Chemical Engineering Science*[J], 2005, 60(17): 4858
- [5] Li Zhengxian(李争显), Wang Haonan(王浩楠), Zhao Wen(赵文) et al. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2015, 32(6): 1
- [6] Ding Rui(丁 锐). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Qingdao:

- Ocean University of China, 2014
- [7] Ding Rui(丁 锐), Li Xiangbo(李相波), Wang Jia(王 佳) *et al. Paint & Coatings Industry*(涂料工业)[J], 2013, 43(9): 1
- [8] Xin Xiangjie(辛湘杰), Xue Junfeng(薛俊峰), Dong Min(董 敏). *Corrosion, Protection & Engineering Application of Titanium*(钛的腐蚀、防护及工程应用)[M]. Anhui: Anhui Science & Technology Press, 1988: 282
- [9] GB/T 15748-1995[S], 1995
- [10] GB/T 6824-2008[S], 2008
- [11] Xia C Q, Zhang Z G, Feng Z H *et al. Corrosion Science*[J], 2016, 112: 687
- [12] Ismail K M, Fathi A M, Badawy W A. *Corrosion Science*[J], 2006, 48(8): 1912

## Galvanic Corrosion Behavior of T2/TC4 Galvanic Couple in Static Artificial Seawater

Chen Yunfei<sup>1</sup>, Li Zhengxian<sup>1,2</sup>, Liu Lintao<sup>2</sup>, Wang Haonan<sup>2</sup>, Wang Yifei<sup>2</sup>, Peng Yifa<sup>1</sup>

(1. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The galvanic corrosion test of T2/TC4 galvanic couple in static artificial seawater was carried out. The dissolution rate of copper ion and the behaviors of T2/TC4 galvanic couple in static artificial seawater were analyzed by electrochemical workstation, ICP, SEM, EDS and XRD. The results show that the reaction is intensive when galvanic corrosion occurs between T2 and TC4 sample. T2 alloy acts as anode and the corrosion rate increases, while TC4 alloy acts as cathode. Compared with the corrosion of T2 sample, the dissolution rate of copper ion by T2/TC4 galvanic corrosion has been enhanced several times and maintains at around  $160 \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ . Therefore marine antifouling requirements for inhibiting the attachment of great majority can be achieved. The corrosion product is mainly  $\text{Cu}_2\text{O}$  when corrosion occurs in T2 sample, and no corrosion products are covered on the surface of T2 sample after galvanic corrosion with TC4 alloy.

**Key words:** T2/TC4 galvanic couple; galvanic corrosion; dissolution rate of copper ion; marine antifouling

---

Corresponding author: Li Zhengxian, Ph. D., Professor, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231077, E-mail: lizx@c-nin.com