



金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti 的腐蚀行为

王 帅¹, 韦宁霞¹, 果春焕¹, 刘 郅², 孟国哲¹, 姜凤春¹

(1. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院

超轻材料与表面技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 南京大学 现代工程和应用科学学院, 南京 210093)

摘 要: 以 TC4 钛合金箔片和纯 Al 箔片为原料, 采用真空热压烧结工艺制备单相金属间化合物 Al₃Ti 和金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti。采用动电位极化曲线和交流阻抗谱等测试技术, 研究对供货态的 TC4、随炉热处理的 TC4、单相金属间化合物 Al₃Ti、金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti 在模拟海水环境下的腐蚀性能, 并对腐蚀之后材料表面的形貌及腐蚀产物进行观察和标定, 获得单相金属间化合物 Al₃Ti 和金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti 的耐海水腐蚀性能。结果表明: 金属间化合物 Al₃Ti 的耐海水腐蚀性能比层状复合材料 Ti/Al₃Ti 的腐蚀性能要好, 但腐蚀性能都比复合材料单元 TC4 合金的要差; 层状复合材料海水浸泡的腐蚀产物主要分布在界面处, 且有局部腐蚀现象出现。

关键词: 金属间化合物; 层状复合材料; 腐蚀性能; 电化学测试

中图分类号: TG171

文献标志码: A

目前, 国内外在层状材料方面的研究只要集中在金属-金属层状材料、金属-陶瓷层状材料、金属-金属间化合物层状材料、金属-高分子层状材料、陶瓷-陶瓷/高分子层状材料^[1]。因其具有较高的比强度、比模量、良好的抗氧化性、抗蠕变性能, 优良的高温强度及低密度等优点, 钛铝系金属间化合物 Al₃Ti 已成为一种具有良好发展前景的高性能结构材料。但是金属间化合物 Al₃Ti 固有的室温变形能力差, 使其实际应用受到限制^[2]。为改善 Al₃Ti 的室温塑性, 20 世纪 90 年代中期, 美国研制低密度、高强度的金属间化合物层状复合材料 Ti-Al₃Ti 用于国防尖端领域, 它是由美国奥尔巴尼研究中心依据是自然界贝壳结构的仿生学设计^[3-4]。人们发展了金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti^[5-8], 采用真空烧结的方法于 20 世纪 90 年代中期提出来的^[9], 21 世纪初加州大学圣迭戈分校又开发了无真空烧结制备复合材料专利技术^[10-12], 从而使这种复合材料实现了低成本、商用化; VECCHIO 等^[13-14]通过热压复合的方法制备 Ti/Al₃Ti 层状复合材

料将铝和钛的箔片在 500~700 °C 条件下加压复合。采用热轧复合法制备层状复合材料的过程中层间距、层厚比难以控制, 从而难以对材料的性能进行调整和控制。因此, 本文作者采用热压复合法制备 Ti/Al₃Ti 层状复合材料。

迄今为止, 人们对 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的研究大都集中在微结构与力学性能方面^[15-19]。研究表明^[20-25], 该层状复合材料不仅具有良好的韧性, 而且还具有轻质、高强、耐冲击以及高可靠性等性能, 在舰船领域有着较广泛的应用前景^[26-30]。由此可见, 该材料抗海洋环境的能力需要开展深入的研究。层状材料由于存在不同的组分, 同时在苛刻的服役条件下, 一旦层状材料发生腐蚀, 就会形成腐蚀磨损, 使材料的寿命降低^[31-34]。目前, 虽然国内外很多研究结果表明 TC4 的耐腐蚀性能十分优越, 然而对金属间化合物 Al₃Ti 和金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti 在海洋环境下的腐蚀性能未见报道。因此, 本文作者对 Ti/Al₃Ti 层状复合材料开展在模拟海水环境下的腐蚀

基金项目: 国防基础科研基金资助项目(B2420133004)

收稿日期: 2015-06-09; 修订日期: 2015-12-26

通信作者: 姜凤春, 教授, 博士; 电话: 0451-82569890; E-mail: fengchunjiang@hrbeu.edu.cn

性能的研究, 并分析其腐蚀机理。

析腐蚀产物的化学成分。

1 实验

本研究主要目的是为了分析金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti 的海水腐蚀行为, 对于复合材料的组成相韧性金属 Ti 和金属间化合物基体 Al₃Ti 的腐蚀行为也需要进行分析。考虑到复合材料制备过程中原始金属箔材 Ti 合金经历了热处理过程, 为了进行比较, 将复合材料分为 Ti 层与 Al₃Ti 层进行分析。因此, 本实验所用的实验材料共有 4 种, 分别是原始供货态 TC4、经过热处理 TC4, 单相金属间化合物 Al₃Ti、金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti。单相金属间化合物 Al₃Ti 合金是在金属间化合物基层状复合材料制备的基础上得到的, 当原始箔材钛合金和铝合金完全反应没有剩余时, 得到单一的金属间化合物 Al₃Ti。关于金属间化合物基层状复合材料制备的细节可见本文作者早期的研究工作^[21]。

采用如表 1 所示配比的模拟海水溶液作为工作液对各试样进行浸泡, 同时采用精度为 0.1 mg(BS124S 型)电子天平称量试样的质量, 记录质量变化并绘制腐蚀产物随时间的变化曲线。

表 1 每 1 L 溶液所需化学药品含量

Table 1 Chemical content of solution per 1 L (g)				
NaCl	NaHCO ₃	MgCl ₂	KBr	Na ₂ SO ₄
24.53	0.201	5.2	0.11	4.09
H ₃ BO ₃	CaCl ₂	SrCl ₂	KCl	NaF
0.027	1.16	0.025	6.95	0.003

采用三电极体系, 铂电极为辅助电极, 饱和甘汞电极(SCE)为参比电极, 在 CHI660E 型电化学工作站开展实验用材料 25 °C 恒温条件下的电化学实验。试样工作面在待测溶液中浸泡 30 min, 其中动电位极化曲线测试实验参数为扫描范围从-2 V 扫描至 1.5 V 停止, 测试扫描速度为 1 mV/s; 而电化学阻抗谱测试实验参数为振幅 0.01 Hz, 低频 0.01 Hz, 时间约为 800 s。

为了分析材料表面的腐蚀产物成分及其微观形貌, 分别采用 Rigaku D/Max-III A 型 X 射线衍射仪在扫描速度为 15(°)/min, 加速电压为 40 kV, 管电流为 150 mA, 衍射角为 20°~90°等参数的条件下分析试样腐蚀产物的成分; 采用 JEOL jsm-6480A 型扫描电子显微镜(SEM)、JEOL JED-2300 型能谱仪等仪器在加速电压为 20 kV 的条件下观察试样表面腐蚀形貌和分

2 结果与分析

2.1 试样质量变化

材料的质量增加变化曲线如图 1 所示。由图 1 可见, 材料的质量变化曲线呈现出质量增加速率较大和缓慢增加两个阶段, 在浸泡的前期过程中, 质量增加速率较快, 但当浸泡时间超过 800 h, 质量增加速率趋于平缓。同时, 通过图 1 曲线高度差别分析可知, Ti/Al₃Ti 层状复合材料的质量增加速率略大于 Al₃Ti 材料的, 明显大于两种 TC4 材料的。由此可见, 层状复合材料的腐蚀性能低于 TC4 材料和 Al₃Ti 材料, 由于 Ti/Al₃Ti 在界面处更易发生缝隙腐蚀。

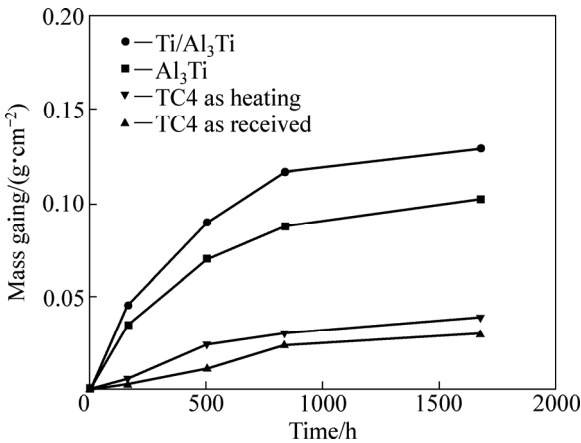


图 1 材料质量增加随时间的变化

Fig. 1 Variation of mass gain of material with time

2.2 电化学腐蚀行为

实验测得的材料的动电位极化曲线如图 2 所示, 针对获得的极化曲线, 采用塔菲尔外推法, 得到相应的腐蚀电位和腐蚀电流密度(见表 2)。由表 2 可见, 实验所测材料的腐蚀电位为-0.562 V~-0.375 V, Ti/Al₃Ti 层面的腐蚀电位最低, 一定程度上表明其最容易发生腐蚀。腐蚀电流密度由供货态 TC4、随炉热处理 TC4、Ti/Al₃Ti 层状复合材料、Al₃Ti 的顺序依次增大, 由此可见, Ti/Al₃Ti 层状复合材料的腐蚀速率很大程度上受到金属间化合物 Al₃Ti 的影响, 同时, 两个界面之间形成的原电池还加剧了腐蚀的发生。

钛合金 TC4 是一种钝化材料易在表面形成钝化膜, 由图 2 分析, TC4 合金几乎没有经过活化区和过渡区, 直接进入钝化区。在实验溶液中活性阴离子 Cl⁻ 的作用导致 TC4 合金在钝化区出现轻微极化电流的

“振荡”。Ti/Al₃Ti 层状复合材料在电位大约-0.1 V 附近出现明显的缝隙腐蚀特征，钝化膜被击破，腐蚀电流迅速增大，腐蚀加快。Ti/Al₃Ti 与 Al₃Ti 所形成的腐蚀产物和钝化膜成分不同，且层状复合材料的钝化膜成分不均匀。在很小的一个区域内复合材料不同层与溶液形成了闭合回路的原电池加速了腐蚀的进行，然后加速对其氧化膜产生破坏作用，因此，在复合材料界面上腐蚀速率较快^[35-37]。

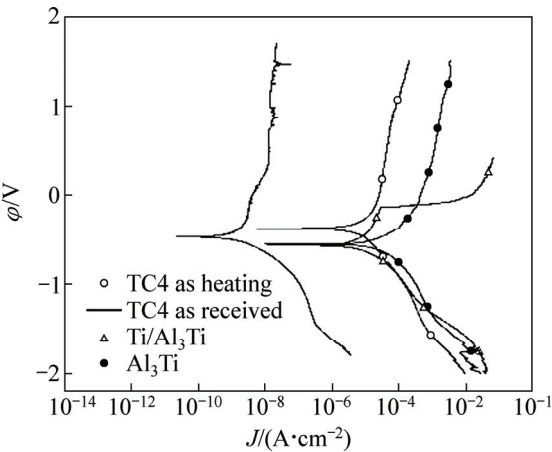


图 2 实验材料的动电位极化曲线

Fig. 2 Potentiodynamic polarization curves of tested materials

表 2 试样的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Table 2 Corrosion potential and corrosion current density of samples

Sample	Corrosion potential/V	Corrosion current density/($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
TC4 as reserved	-0.466	1.995×10^{-4}
TC4 as heating	-0.375	1.059
Ti/Al ₃ Ti	-0.562	2.644
Al ₃ Ti alloy	-0.559	3.415

材料的电化学阻抗谱(Nyquist 图)如图 3 所示。由图 3 可以看出，4 条曲线都存在于高频区，极化电阻(R_p)大小可以通过图中曲线的曲率半径来表征。曲线 1(表供货态 TC4)的耐腐蚀性能最好；随着时间的增加，金属间化合物复合材料特殊的叠层结构和不同的腐蚀机理造成导致发生波动现象导致曲线 2 增高。由于电化学阻抗谱测试对材料表面不造成损伤，所以其表面的钝化膜没有遭到破坏。Ti/Al₃Ti 层状复合材料形成钝化膜的成分复杂不均匀造成在实验条件下 Ti/Al₃Ti 材料钝化膜没有受到破坏前具有较好的腐蚀性能，但是在真实海洋环境中，由于海水成分极其复

杂，钝化膜容易受到影响，且在界面处电极电位差异易形成原电池从而加快了材料腐蚀，与其他实验结果基本吻合。

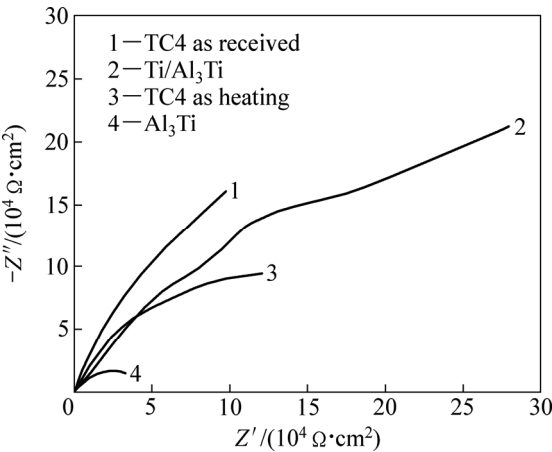


图 3 材料的电化学阻抗谱图

Fig. 3 Nyquist diagram of tested samples

2.3 腐蚀产物分析

图 4(a)所示为层状复合材料 Ti/Al₃Ti 在模拟海水溶液中浸泡 10 周后的腐蚀产物微观形貌和 EDS 分析区域，可见，无论在基体 Al₃Ti 层还是在增强相 Ti 层的表面都出现了腐蚀层，在界面周围存在疏松的腐蚀

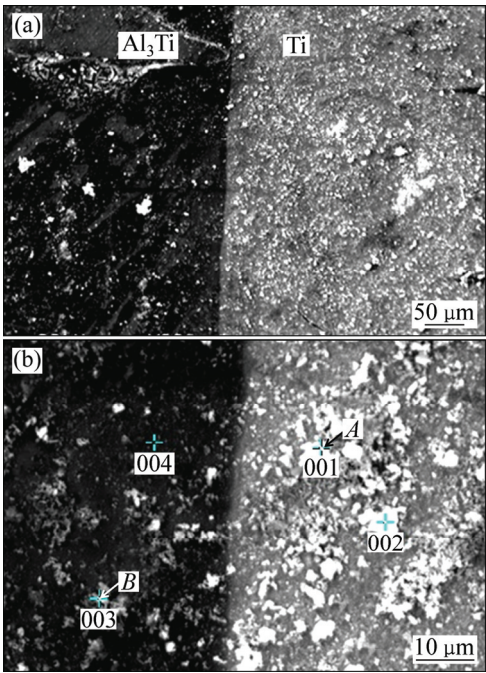


图 4 复合材料 Ti/Al₃Ti 腐蚀表面分析

Fig. 4 Corrosion surface analysis of laminated composite Ti/Al₃Ti: (a) Surface morphology observed by SEM; (b) Selected areas for EDS analysis

产物。从电化学角度分析, 当金属浸入电解质溶液中, 在金属表面上由于特定的活化阴离子(如 Cl⁻)的存在, 促进阳极反应, 而氧化剂的存在促进了阴极反应^[37]。

为了分析腐蚀产物的元素含量, 对复合材料层面(界面区域)进行能谱分析, 分别在 Ti 层和 Al₃Ti 层选取典型区域分析, 具体选点区域如图 4(b)所示, *A* 为 Ti 层上的点, *B* 为 Al₃Ti 层上的点。复合材料层面能谱分析结果如表 3 所列, 给出的典型结果可以看出, 复合材料 Ti 层表面腐蚀产物中出现溶液中存在的元素, 元素分析的定量分析结果如表 3 所列, 其中有 Na 和 Cl 元素, 说明复合材料与溶液中成分发生了化学反应。同时, 氧含量明显提高, 表明材料表面已被氧化。但是金属间化合物层中的 EDS 分析结果并没有明显的 Na 和 Cl 元素, 说明 Al₃Ti 腐蚀后表面主要生成的并不是氯化物。

表 3 Ti 层和 Al₃Ti 层表面腐蚀产物的 EDS 分析结果
Table 3 EDS analysis results of corrosion products on surface of Ti and Al₃Ti layers

Element	Mass fraction/%		Mole fraction/%	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
C	5.39		8.80	
O	59.97	25.35	73.52	40.31
Na	1.67		1.42	
Al	8.19	48.71	5.95	45.92
Cl	1.04		0.58	
Ti	23.74	25.93	9.72	13.77
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

图 5 所示为复合材料 Ti/Al₃Ti 表面腐蚀产物 XRD 谱。通过与标准 PDF 卡片对照, 标定出若干种腐蚀之后的产物, 包括 Al(OH)₃、Ti(AlCl₄)₂、TiO₂、AlOOH 等, 其中由于溶液中存在氧气并且钛和铝本身是活泼金属, 在长时间海水环境中表面极易形成 TiO₂ 等金属氧化物。在海水环境中钛和铝的电极电位不同, 两种材料会形成腐蚀原电池, 与环境中的 Na、Cl、H 和 O 等形成 Al(OH)₃、AlOOH、Ti(AlCl₄)₂ 一系列腐蚀产物。

图 6 所示为单相金属金属间化合物 Al₃Ti 试样腐蚀 10 周之后的表面形貌, 图 6(a)所示为 Al₃Ti 试样表面放大 300 倍的腐蚀形貌, 图 6(b)所示为 Al₃Ti 试样表面放大 1000 倍的腐蚀形貌。分析可知, 金属间化合物 Al₃Ti 在海水环境中浸泡数周之后表面开始发生腐蚀, 表面生成氧化膜的同时, 由于表面氧化不均匀导致部分区域发生点蚀, 局部出现了腐蚀坑。但是与 Ti/Al₃Ti 层状复合材料中的 Al₃Ti 层的腐蚀形貌相比

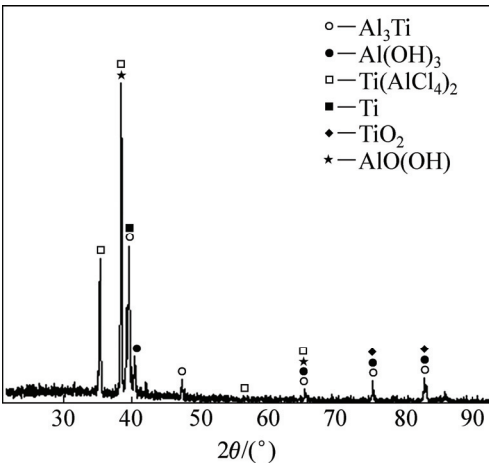


图 5 复合材料 Ti/Al₃Ti 表面腐蚀产物的 XRD 谱
Fig. 5 XRD patterns of laminated composite Ti/Al₃Ti after corrosion

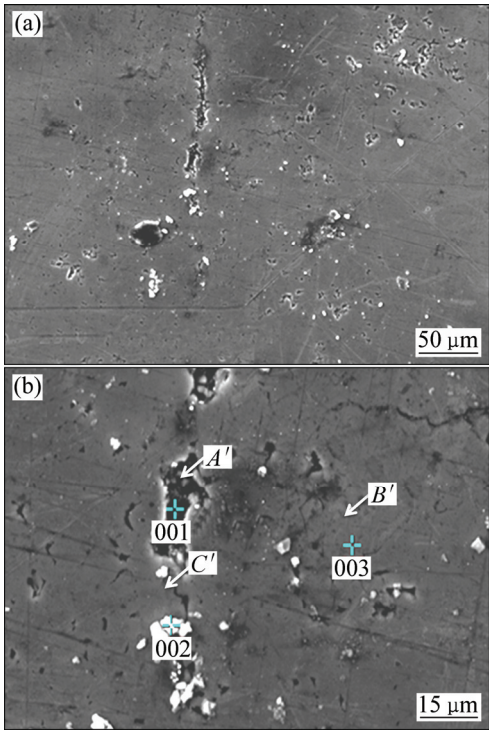


图 6 单相金属间化合物 Al₃Ti 合金的表面腐蚀产物
Fig. 6 Corrosion surface of monolithic intermetallic Al₃Ti alloy: (a) Surface morphology observed by SEM; (b) Selected areas for EDS analysis

(见图 4), 单相金属间化合物 Al₃Ti 试样的腐蚀特征明显不同, 表面出现白色腐蚀产物, 说明两者的腐蚀机理存在着差异; Ti/Al₃Ti 在腐蚀过程中不仅有海水环境导致的腐蚀还伴随着电化学腐蚀, 而 Al₃Ti 发生腐蚀主要是海水环境导致。

在 Al_3Ti 腐蚀表面上选取 3 个点进行 EDS 能谱分析, 元素的定量分析结果分别见表 4。结果发现金属间化合物 Al_3Ti 试样表面少量的白色腐蚀物质存在海水溶液中含有的 Cl 元素, 说明 Al_3Ti 表面与腐蚀溶液中一些元素发生反应, 而测试出的 C 元素为污染元素不作考虑。

图 7 所示为 Al_3Ti 腐蚀后表面的 XRD 谱, 说明腐蚀产物中存在 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Ti}(\text{AlCl}_4)_2$ 、 Al_2O_3 、 Ti_3O_5 等物质, 其中的金属氧化物 Al_2O_3 和 Ti_3O_5 是在 Al_3Ti 试样表面形成钝化膜的主要成份, 其他的则为腐蚀产物。

表 4 单相金属间化合物 Al_3Ti 合金表面腐蚀产物的 EDS 分析结果

Table 4 EDS analysis results of corrosion products on surface of monolithic inter metallic Al_3Ti alloy

Element	Mass fraction/%			Mole fraction/%		
	A'	B'	C'	A'	B'	C'
C	41.32	18.51		53.59	27.39	
O	34.53	45.79	2.90	33.62	50.86	5.52
Al	19.58	29.06	66.74	11.30	19.14	75.21
Cl		1.12			0.56	
Ti	4.57	5.51	30.36	1.49	2.04	19.27
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

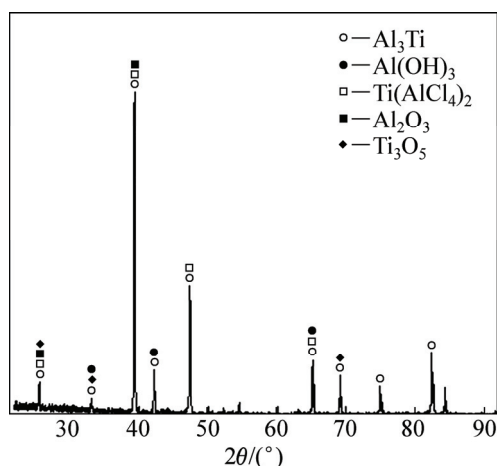


图 7 单相金属间化合物合金 Al_3Ti 腐蚀后表面 XRD 谱
Fig. 7 XRD patterns of monolithic intermetallic Al_3Ti alloy after corrosion

3 结论

1) 金属间化合物层状复合材料 $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 的腐蚀速率大于单相金属间化合物 Al_3Ti 的; Al_3Ti 及 $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 材料层面的腐蚀电流密度较大, $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 材料层面的

腐蚀电位最小; 交流阻抗谱图分析可见 $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层面的腐蚀性能受到 Al_3Ti 合金的影响较大, 但低于 TC4 合金; 金属间化合物 Al_3Ti 由于表面氧化膜被破坏导致发生点蚀; $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料在界面发生腐蚀, 主要发生电化学反应导致腐蚀加剧从而低于其他几种材料。

2) TC4 合金表面几乎无腐蚀产物, 而 Al_3Ti 合金腐蚀产物分布不均匀, 在点蚀坑附近; $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料界面处有明显的沿界面处展开的腐蚀产物。

3) 单相金属间化合物 Al_3Ti 材料的腐蚀产物主要为 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Ti}(\text{AlCl}_4)_2$ 及少量 Al_2O_3 氧化物; 层状复合材料 $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 的腐蚀产物主要有 $\text{Ti}(\text{AlCl}_4)_2$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{AlO}(\text{OH})$ 等。

致谢: 本研究部分腐蚀实验在哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院金国教授实验室完成, 在此表示感谢。

REFERENCES

- [1] 易 剑, 郝晓东, 李 焱. 微叠层材料及其制备工艺研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(5): 16–21.
YI Jian, HE Xiao-dong, LI Yao. Research on microlaminates and their preparation[J]. Aerospace Materials & Technology, 2005, 35(5): 16–21.
- [2] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
ZHANG Yong-gang, HAN Ya-fang, CHEN Guo-liang. Intermetallic structure materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [3] HANAMURA T, HASHIMOTO K. Ductility improvement of direct-cast gamma TiAl -based alloy sheet[J]. Materials Transactions, JIM, 1997, 40(7): 599–639.
- [4] FUKUTOMI H, MASAYASU U, NAKAMURA M. Production of TiAl sheet with oriented lamellar microstructure by diffusional reaction of aluminum and textured titanium foils[J]. Materials Transactions, JIM, 1999, 40(7): 654–658.
- [5] RAWERS J C, ALMAN D E. Fracture characteristics of metal/intermetallic laminar composites produced by reaction sintering and hot pressing[J]. Composites Science and Technology, 1995, 54(4): 379–384.
- [6] DAVID J H, VECCHIO K S. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(6): 1493–1505.
- [7] LI T, JIANG F, OLEVSKY E A, VECCHIO K S, MEYERS M A. Damage evolution in $\text{Ti6Al4V}-\text{Al}_3\text{Ti}$ metal intermetallic laminate composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2007,

- 443(1): 1–15.
- [8] DING X F, TAN Y, ZENG B Q. Effect of microstructure on mechanical properties of Ti-Al based alloys[J]. *Materials Science Forum*, 2011, 675: 709–712.
- [9] PLUEDDEMANN E P. *Interfaces in polymer matrix composites*[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [10] AHLATCI H, DURMAZ A, BALTA A, ACARER M, CANDAN E. Effect of Ti on the corrosion behaviour of in situ Mg₂Si particle reinforced Al-12Si-20Mg-xTi alloys[C]. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2010, 636/637: 511–516.
- [11] 孙彦波, 赵业青, 张 迪, 马朝利. 箔-箔法制备微叠层 Ti-Al 系金属间化合物基合金板材[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 1064–1067.
- SUN Yan-bo, ZHAO Ye-qing, ZHANG Di, MA Chao-li. Fabrication of multilayered Ti-Al intermetallic sheets by foil-foil method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 1064–1067.
- [12] SUN Y B, LIU M W, GE S J, MA F M, MA L C. Preparation of multilayered Ti-Al alloys by solid reaction[J]. *Materials Science Forum*, 2013, 747: 1–8.
- [13] VECCHIO K S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites[J]. *Journal of Metal, Materials and Mineral Society*, 2005, 57: 25–31.
- [14] ROHATGI A, DAVID J H, VECCHIO K S, HARVEY K P. Resistance-curve and fracture behavior of Ti-Al₃Ti metallic-intermetallic laminate (MIL) composites[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(10): 2933–2957.
- [15] LI T, GRIGNON F, BENSON D J, VECCHIO K S, OLEVSKY E A, JIANG F, ROHATGI A, SCHWARZ R B, MEYERS M A. Modeling the elastic properties and damage evolution in Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 374(1): 0–26.
- [16] MALI V I, PAVLIUKOVA D V, BATAEV I A. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 311: 236–239.
- [17] 曹 阳, 朱世范, 果春焕, 侯红亮, 姜凤春. 新型金属间化合物基层状装甲防护复合材料[J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(6): 122–128.
- CAO Yang, ZHU Shi-fan, GUO Chun-huan, HOU Hong-liang, JIANG Feng-chun. Novel metal-intermetallic laminate composite for armor material[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(6): 122–128.
- [18] WANG G, DAHMS M. Synthesizing gamma-TiAl alloys by reactive powder processing[J]. *JOM*, 1993, 45(5): 52–56.
- [19] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S, JIANG F, ROHATGI A. Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate composites[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(6): 1595–1608.
- [20] PRICE R D, JIANG F, KULIN R M, VECCHIO K S. Effects of ductile phase volume fraction on the mechanical properties of Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(7): 3134–3146.
- [21] 常云鹏, 哈金奋, 党 超, 果春焕, 姜凤春. 金属间化合物基层状复合材料 Ti-Al₃Ti 制备及其力学行为[C]//第17届全国复合材料学术会议(陶瓷基、C/C 及金属基复合材料分论坛)论文集. 北京: 中国航空学会, 2012: 5.
- CHANG Yun-peng, HA Jin-fen, DANG Chao, GUO Chun-huan, JIANG Feng-chun. Synthesis and mechanical behavior of metal-intermetallic laminate(MIL) composites Ti-Al₃Ti[C]//CSAA. 17th National Conference on Composite Materials (Ceramic-matrix, C/C & Sub-Forum of Metal matrix composite). Beijing: CSAA, 2015: 5.
- [22] PENG L M, LI H, WANG J H. Processing and mechanical behavior of laminated titanium-titanium tri-aluminide (Ti-Al₃Ti) composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 406(1): 309–318.
- [23] VECCHIO K S, JIANG F. Fracture toughness of ceramic-fiber-reinforced metallic-intermetallic-laminate (CFR-MIL) composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 649: 407–416.
- [24] PENG L M, WANG J H, LI H. Synthesis and microstructural characterization of Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(3): 243–248.
- [25] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S, JIANG F. Fracture of Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate composites: Effects of lamination on resistance-curve behavior[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(11): 3217–3236.
- [26] 曹阳, 朱世范, 姜凤春. 金属间化合物基层状复合材料装甲防护性能的数值模拟[C]//第五届全国计算爆炸力学会议论文摘要. 北京: 爆炸科学与技术国家重点实验室, 2012: 60.
- CAO Yang, ZHU Shi-fan, JIANG Feng-chun. Novel metal-intermetallic laminate composite for armor material[C]//The Fifth Session of Calculating Mechanics of Explosion. Beijing: State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, 2012: 60.
- [27] 程玉洁, 果春焕, 周培俊, 曹 阳, 侯红亮, 王耀琦, 姜凤春. 金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al₃Ti 制备技术及其研究进展[J]. *中国材料进展*, 2014, 32(5): 275–283.
- CHENG Yu-jie, GUO Chun-huan, ZHOU Pei-jun, CAO Yang, HOU Hong-liang, WANG Yao-qi, JIANG Feng-chun. Synthesis techniques and research progress of the metal-intermetallic laminate composites Ti/Al₃Ti[J]. *Materials China*, 2014, 32(5): 275–283.
- [28] CAO Y, ZHU S, GUO C, VECCHIO K S, JIANG F. Numerical investigation of the ballistic performance of metal-intermetallic laminate composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2015, 22(4): 437–456.
- [29] 盖鹏涛, 吴 为, 曾元松. 热压复合制备 Ti-Al₃Ti 层状复合材

- 料组织结构研究[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(2): 45-49.
- GAI Peng-tao, WU Wei, ZENG Yuan-song. Microstructure analysis of Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate(MIL) composites synthesized by hot-press sintering[J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(2): 45-49.
- [30] 有色金属及其热处理编写组. 有色金属及其热处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- Writing groups of non-ferrous metals and heat treatment. Non-ferrous metals and heat treatment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981.
- [31] WOOD R J K. Erosion-corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials[J]. Wear, 2006, 261(9): 1012-1023.
- [32] BERTOL L S, JUNIOR W K, SILVA F P D, AUMUND K C. Medical design: Direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V[J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3982-3988.
- [33] GULERYUZ H, CIMENOGLU H. Effect of thermal oxidation on corrosion and corrosion-wear behaviour of a Ti-6Al-4V alloy[J]. Biomaterials, 2004, 25(16): 3325-3333.
- [34] 陈 君, 阎逢元, 王建章. 海水环境下 TC4 钛合金腐蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 1-6.
- CHEN Jun, YAN Feng-yuan, WANG Jian-zhang. Corrosion wear properties of TC4 titanium alloy in artificial seawater[J]. Tribology, 2012, 32(1): 1-6.
- [35] 陆 柱. 可持续发展战略与腐蚀防护技术[J]. 腐蚀与防护, 1997, 18(2): 3-6.
- LU Zhu. Sustainable development and corrosion protection technology[J]. Corrosion and Protection, 1997, 18(2): 3-6.
- [36] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 20-22.
- CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. Introduction of electrochemical impedance spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002: 20-22.
- [37] 邹 妍, 王 佳, 郑莹莹. 锈层下碳钢的腐蚀电化学行为特征[J]. 物理化学学报, 2010, 26(9): 2361-2368.
- ZOU Yan, WANG Jia, ZHENG Ying-ying. Electrochemical Corrosion behaviors of rusted carbon steel[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2010, 26(9): 2361-2368.

Corrosion behavior of metal-intermetallic laminate composite Ti/Al₃Ti

WANG Shuai¹, WEI Ning-xia¹, GUO Chun-huan¹, LIU Ying², MENG Guo-zhe¹, JIANG Feng-chun¹

(1. Key Laboratory of Superlight Materials and Surface Technology, Ministry of Education, College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The monolithic intermetallic tri-aluminide Al₃Ti and metal-intermetallic-laminate composite Ti/Al₃Ti were synthesized by Ti and Al foils using vacuum sintering process. The corrosion behaviors of TC4 alloys with and without heat treatment, monolithic intermetallic Al₃Ti alloy and metal-intermetallic-laminate composite Ti/Al₃Ti in marine environments were studied using potentiodynamic polarization curve, AC impedance. The surface morphologies and corrosion products of these materials were observed and analyzed, the corrosion-resistance monolithic intermetallic tri-aluminide Al₃Ti and metal-intermetallic-laminate composite Ti/Al₃Ti were obtained. The experimental results show that the monolithic intermetallic tri-aluminide Al₃Ti has a good corrosion resistance comparing with the laminated composite Ti/Al₃Ti, while their corrosion resistances are both poor than that of TC4 alloy. The corrosion products mainly distribute at the interface, and a local corrosion is found to occur in the metallic intermetallic laminate composite in marine environments.

Key words: intermetallic compound; laminar composite; corrosion resistance; electrochemical testing

Foundation item: Projects(B2420133004) supported by the National Defense Basic Research Foundation of China

Received date: 2015-06-09; **Accepted date:** 2015-12-26

Corresponding author: JIANG feng-chun; Tel: +86-451-82569890; E-mail: fengchunjiang@hrbeu.edu.cn

(编辑 李艳红)