

网状结构5vol%TiBw/TA15复合材料抗腐蚀性能研究

冯养巨, 王 威, 陆云彬, 雷玉成

(江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为了研究网状结构5vol%TiBw/TA15复合材料耐腐蚀性能, 采用低能球磨加真空热压烧结技术制备5vol%TiBw/TA15复合材料。将纯TA15与5vol%TiBw/TA15复合材料进行电化学腐蚀试验, 测量和比较2种材料在3.5wt% NaCl腐蚀液环境中的开路电位、极化曲线和电化学阻抗谱。结果表明, 相较于纯TA15, 5vol%网状结构增强TiBw/TA15复合材料具有低的自腐蚀电流密度($0.033 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)、更高极化电阻值($42\,993 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$)和较少的腐蚀坑, 显现出更优异的耐腐蚀性。这是由于TiBw增强体的存在, 在电化学腐蚀过程中, 相较于纯TA15, 5vol%TiBw/TA15复合材料表面较快形成稳定的 TiO_2 钝化膜。

关键词: 真空热压烧结; TiBw/TA15复合材料; 极化曲线; EIS; 耐腐蚀性

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)06-1588-08

1 引言

随着科技的发展, 各国越来越重视航空航天、海洋工程、石油开采及运输等领域, 上述领域对材料的性能提出更高的要求, 传统钛合金已经无法满足使用要求, 故以纯钛或钛合金为基体和TiC、TiB、TiN等陶瓷相为增强相的钛基复合材料应运而生^[1-4]。钛基复合材料除了具有基体钛合金低密度、高比强度、高比刚度等优点以外, 还具有更好的高温性能、耐磨性能和耐腐蚀性能, 具有广泛的应用前景^[5-6]。

钛基复合材料经过几十年的研究发展, 制备方法、增强体种类、基体种类等对材料性能增强机制基本明确^[7-8]。为了进一步挖掘钛基复合材料性能潜力, 钛基复合材料增强体分布逐渐成为研究热点之一^[9]。目前TiB和TiC是钛基复合材料最常用的陶瓷增强体, 主要是通过TiB和TiC增强体的构型化设计提高钛基复合材料的性能^[10-11]。黄陆军^[12]采用热压烧结技术制备出增强体呈准连续网状分布的TiBw/TC4复合材料, 在提高强度的同时成功解决粉末冶金方式制备钛基复合材料存在的脆性问题。因此这种增强体呈网状分布的钛基复合材料, 近年来得到广泛关注。Feng等人^[13]对网状结构增强的TiBw/TA15复合材料进行挤压, 发现在673 K时, 相比于TA15合金5vol%TiBw/TA15高温抗拉性能提高了25.3%, 这主要是由于TiBw的添加有效地降低了高温下的晶界弱化效应并细化TiBw/TA15的晶粒。Li等^[14]对网状结构增强的TiBw/Ti6Al4V复合材料焊接性能进行研

究, 发现该复合材料的焊接接头极限抗拉强度可分别达到母材的96%(室温)和94%(600 °C)。Cui等^[15]对网状结构增强的TiBw/TA15复合材料切削过程进行模拟分析, 发现网状分布的TiB晶须在复合材料切削过程中起着重要作用, 主要是TiB晶须增强效应影响TA15基体的塑性流动模式, TiB晶须的脱粘和断裂, 促进基体裂纹沿剪切带的扩展。以上对网状结构增强钛基复合材料的研究大多趋向于力学性能的研究, 但是对这种网状结构的钛基复合材料在海洋环境中的耐腐蚀性能研究较少, 腐蚀机理尚不清楚。研究这种材料的抗腐蚀性对拓展钛基复合材料在海洋工程领域的应用都有很重要的意义。

综上所述, 为了研究网状TiBw增强体的引入对钛基复合材料耐腐蚀性的影响, 本工作采用电化学方法, 腐蚀液选择模拟海洋环境的3.5wt% NaCl, 从开路电位(OCP)、电化学阻抗谱(EIS)和动电位极化等方面研究了加入体积分数5%网状TiBw增强体钛基复合材料和纯TA15的腐蚀行为, 并对试样表面形貌和元素分布进行分析。通过研究TiBw增强体的加入及其构型化设计对钛基复合材料耐腐蚀性能的影响, 揭示其腐蚀机理。

2 实验

采用气雾化技术制备的球形TA15粉作为基体, 化学成分见表1。将TA15粉(平均粒度140 μm , 图1a)和TiB₂粉(颗粒尺寸1~10 μm , 纯度高于98%, 图1b)按比例混合形成混合粉, 然后将混合粉末放入氩气保护的行星式球

收稿日期: 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(52305364); 中国博士后科学基金(2023M741412); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX23-2073)

作者简介: 冯养巨, 男, 1989年生, 博士, 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013, E-mail: fengyj@ujs.edu.cn

表1 原材料TA15粉体的化学成分
Table 1 Chemical composition of TA15 powder (wt%)

Al	V	Zr	Fe	Si	O	C	N	H	Ti
6.62	2.25	2.10	0.04	0.04	0.15	0.003	0.07	0.001	Bal.

磨机中进行低能球磨,球磨速度为 100 r/min,球磨时间为 6 h,使细小的 TiB₂ 粉末均匀粘附在球形 TA15 粉体表面(图 1c)。采用真空热压烧结炉(锦州航星真空设备厂),压力为 0~50 MPa、温度极限为 2000 ℃、真空度极限为 6×10⁻² Pa。将混合粉末放入石墨模具中,然后随热压炉加热至 1200 ℃,压力为 25 MPa,保温保压 45 min。

将热压烧结制备纯 TA15 和 5vol%TiBw/TA15 这 2 种试样分别切割成尺寸 10 mm×10 mm×5 mm,试样表面经过打磨、抛光、乙醇清洗后,采用日本公司生产的 smartLab X 射线衍射仪进行物相分析。采用 Kroll 试剂(5vol% HF+10vol% HNO₃+85vol% H₂O)对样品进行蚀刻,然后利用美国 FEI 公司生产 Nova NanoSEM 450 场发射扫描电子显微镜(SEM)对样品的微观结构进行分析。

采用美国阿美特克公司生产的普林斯顿 1260A+1287A 型电化学工作站对试样进行电化学性能测试。使用三电极测试法,电解溶液由分析纯 NaCl 和去离子水配制,浓度为 3.5wt%。热压烧结制备的纯 TA15 和 5vol%TiBw/TA15 样品作为工作电极、铂片作为辅助电极、饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极。在电化学测试之前,试样需要在 NaCl 溶液中浸入溶液中 10 min 以获得稳定的开路电位。电化学阻抗谱是在 10⁻²~10⁵ Hz 的频率范围内,振

幅为 10 mV。采用 ZView 软件对 EIS 数据进行处理。之后,以 1 mV/s 的扫频速度在-1.0~1.6 V(vs. OCP)扫频范围内进行动电位极化测试。试样用铜导线四周缠绕引出,再用环氧树脂密封,只留一个工作端面,面积为 1 cm²。使用前用砂纸打磨工作面,抛光后用乙醇清洗、干燥。所有试验均在室温下进行,并至少重复 3 次。测试结束后,利用扫描电镜和 X 射线衍射仪(XRD)分别对腐蚀表面形貌和物相进行分析。为了方便讨论将纯 TA15 试样简称为 CP-TA15, 5vol%TiBw/TA15 样品简称为 TiBw/TA15。

3 结果与讨论

3.1 表面形貌

图 2 为热压烧结制备的 CP-TA15 和 TiBw/TA15 试样的 SEM 照片。CP-TA15 钛合金微观组织呈现明显的魏氏组织(图 2a),即深灰色为 α-Ti,浅白色为 β-Ti,与 Yang 等人^[16]制备铸态的 TiC_p/Ti 复合材料组织一致。魏氏组织是在热压烧结过程中,随着炉温加热至相变点以上,TA15 球粉全部生成 β 晶粒,组织为高温 β 相,但是 β 相能量高不稳定常温下无法大量保存。随后炉温冷却到相变点时在高温 β 相的晶界处生成 α 相(晶界 α 相),炉温进一步冷却时晶界 α 相向高温 β 相内部长大形成粗大集束 α 相,冷却至室温时残余 β 相呈片层状分布在集束 α 相之间^[17]。图 2b 为 TiBw/TA15,可以明显看出 TiB 增强体分布在高温 β 相周围呈现准连续网状分布,由于 TiBw 宏观呈现网状分布,微观上不连续,使得 TiBw/TA15 既具有较

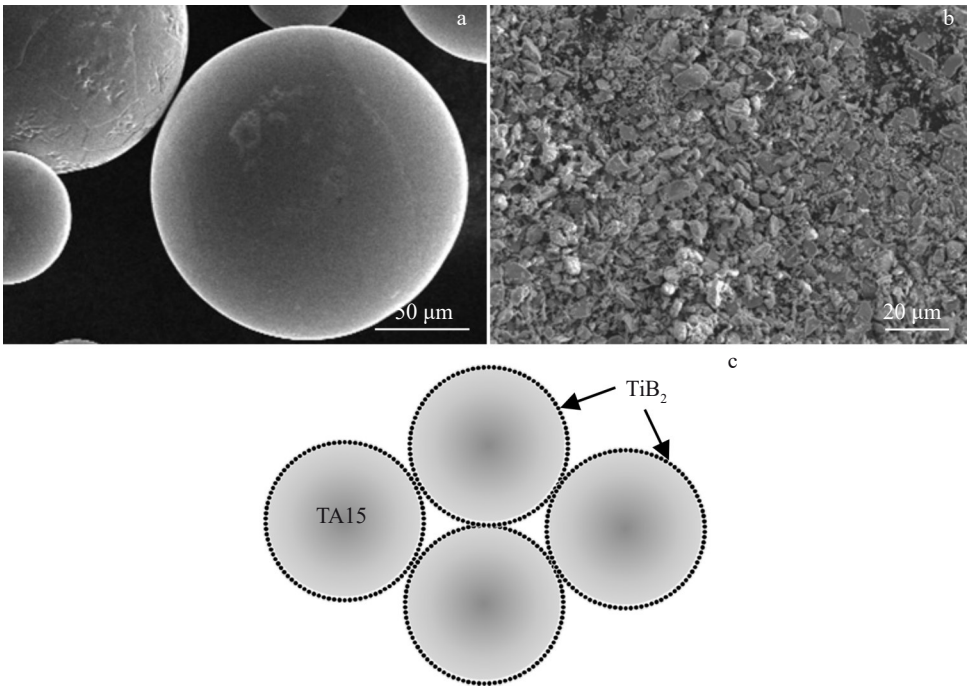


图1 TA15和TiB₂的SEM照片与混合后粉末示意图
Fig.1 SEM images of raw materials: (a) TA15 and (b) TiB₂; schematic diagram of the powder after mixing (c)

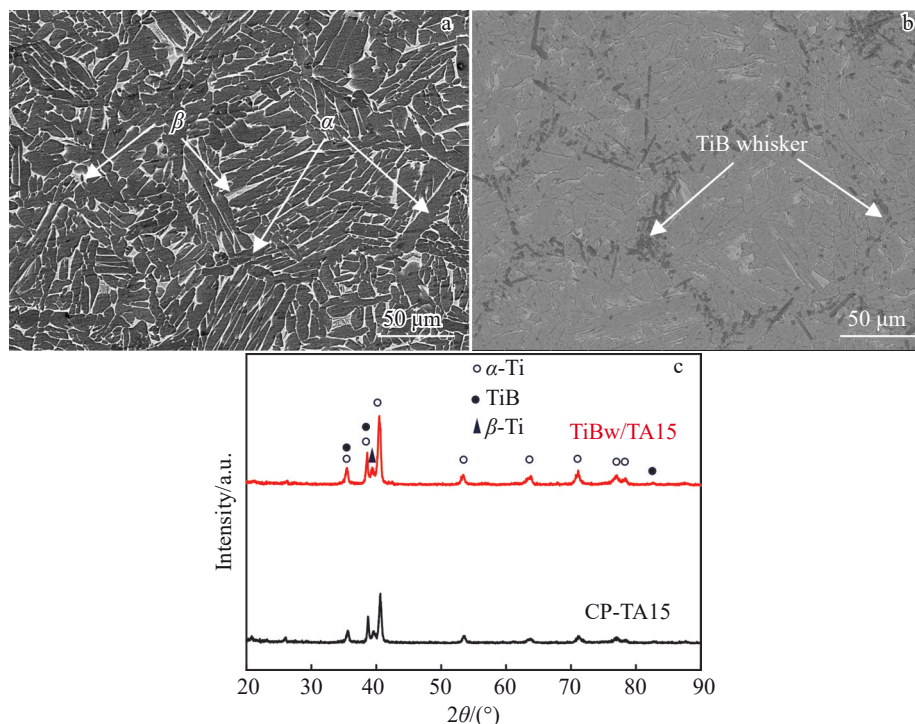


图2 热压烧结后CP-TA15和TiBw/TA15试样的SEM照片和XRD图谱

Fig.2 SEM images (a–b) and XRD patterns (c) of samples after hot pressing sintering: (a) CP-TA15; (b) TiBw/TA15

高的强度,也具有一定的塑性^[18]。图2c是2种烧结试样的XRD图谱,发现TiBw试样存在 α -Ti、 β -Ti和TiB3种类型的相。这是由于在低能球磨时,TiB₂粘附在球形TA15粉体上,在热压烧结时TiB₂与周围的Ti发生原位反应在TA15粉体表面(高温 β 相晶界)生成的呈现准连续的网状的TiB晶须,这种现象在Zou等人^[19]制备的TiBw/TC21复合材料已经报道过。

3.2 开路电位

OCP是一个用来评价金属及合金耐腐蚀性能的重要参数,通过研究表明,一般来说开路电位的值越高,该金属及合金的耐腐蚀性能就越好^[20]。图3为热压烧结制备的CP-TA15和加入TiBw(体积分数为5%)增强体的TiBw/TA15复合材料在3.5wt% NaCl溶液中的开路电位的变化情况,两试样电位都没有较大的波动起伏,但TiBw/TA15样品的 E_{OCP} 值始终大于CP-TA15样品。因此推断TiBw/TA15试样比CP-TA15试样具有更好的耐腐蚀性能。

3.3 极化曲线

图4为热压烧结制备的CP-TA15和TiBw/TA15样品动电位极化曲线图, E 为电位, I 为电流密度, E_{corr} 为自腐蚀电位, I_{corr} 为自腐蚀电流密度。图4a中所有试样都存在钝化区域范围(ΔE),其中TiBw/TA15样品比CP-TA15具有更长的钝化区域。有研究表明 ΔE 越长,耐腐蚀性能越好^[21]。因此TiBw/TA15复合材料具有更好的耐腐蚀性能。此外两试样都存在二次钝化区域,这是随着腐蚀电

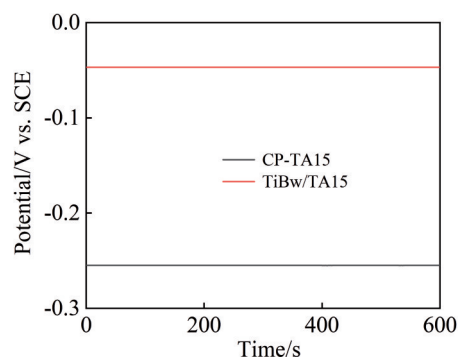


图3 热压烧结制备的CP-TA15和TiBw/TA15在3.5wt% NaCl溶液的开路电位

Fig.3 OCP of CP-TA15 and TiBw/TA15 prepared by hot pressing sintering in 3.5wt% NaCl solution

位增加,致密的钝化膜会开始溶解,产生空洞和裂缝,导致钝化层内部的材料发生再次钝化现象^[22]。相比TiBw/TA15极化曲线,CP-TA15的极化曲线在腐蚀电位在0.3~1.6 V区域出现较多的峰(图4a),这是由于腐蚀电位的增大,此时钝化层的溶解破裂和内部钝化层生成是同时发生的,在CP-TA15试样表面形成微小的腐蚀坑,使电流密度出现较大的波动^[22],因此TiBw/TA15复合材料具有更优异的耐腐蚀性能。

表2为2种材料的腐蚀参数。 E_{corr} 通常反映腐蚀发生的难易程度; I_{corr} 描述腐蚀反应的速率;极化电阻(R_p)

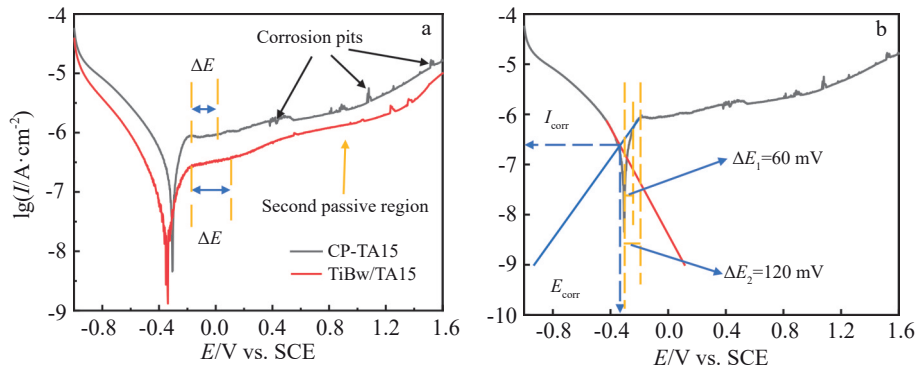


图4 CP-TA15 和 TiBw/TA15 的 Tafel 极化曲线和 Tafel 拟合示意图
Fig.4 Tafel polarization curves (a) and Tafel fitting diagram (b) of CP-TA15 and TiBw/TA15

表2 电化学腐蚀参数
Table 2 Electrochemical corrosion parameters

Sample	E_{corr}/V	$I_{\text{corr}}/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$R_p/\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$	$-\beta_c/\text{V}\cdot\text{dec}^{-1}$	$\beta_a/\text{V}\cdot\text{dec}^{-1}$
CP-TA15	-0.334	0.240	4128	5.312	4.001
TiBw/TA15	-0.360	0.033	42 993	7.925	5.594

能够反映试样的耐腐蚀性能,即动电位极化曲线中的极化电阻通常能够作为对应试样耐蚀性能的判断标准^[23]。如图 4b 所示, E_{corr} 和 I_{corr} 通过 Tafel 曲线外推法来得到电极在稳定状态下的瞬时电流和电位。

R_p 可以根据 SternGeary 方程计算得到:

$$I_{\text{corr}} = \frac{|\beta_c| |\beta_a|}{2.303 R_p (|\beta_c| + \beta_a)}$$

(1)

其中, β_c 和 β_a 为 Tafel 曲线的阴极和阳极斜率,是材料腐蚀动力学的重要参数。从表 2 数据分析,可以明显地发现 2 种试样的 E_{corr} 值接近,但是 CP-TA15 试样的 I_{corr} 值与 R_p 值相比 TiBw/TA15 试样相差较大, TiBw/TA15 试样 I_{corr} 和 R_p 数值分别为 $0.033 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $42\,993 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。根据一般理论来说, E_{corr} 的正电性越好, I_{corr} 值越小, R_p 值越大,材料被腐蚀的速率越小,材料抗腐蚀性能就越好^[24-25]。因此, TiBw/TA15 试样拥有更加稳定的钝化膜和较低的腐蚀速率,这些特征表示该材料具有更好的腐蚀性能。

此外网状结构的 TiBw/TA15 试样 I_{corr} 值远低于增强体均匀分布的(TiC+TiB)/Ti 复合材料的 I_{corr} 值^[22]。这是因为呈准连续网状分布 TiBw 增强体相当于一个“陶瓷壳”将每一个 TA15 球包裹,阻碍了电子在钛基体表面的移动,降低了材料腐蚀反应速率,从而提高了材料耐腐蚀性能。

3.4 阻抗曲线

图 5 为热压烧结制备的 CP-TA15 和 TiBw/TA15 试样的电化学阻抗图。从 Nyquist 图(图 5a)可以明显地观察到, 2 种试样都只有一个容抗弧,但 TiBw/TA15 样品的弧直径比 CP-TA15 样品更大,容抗弧直径越大,电荷转移

引起的阻抗值越大,试样的耐腐蚀性能就越好^[26-27],故 TiBw/TA15 试样有更好的耐腐蚀性能。从 Bode 图(图 5b、5c)可以明显看出 2 种试样曲线比较相似。图 5b 是反映阻抗模量($|Z|$)随频率的变化,可以看出由两部分组成,低频-中频区域($10^{-2}\sim 10^4 \text{ Hz}$)斜率接近-1,高频区域($10^4\sim 10^5 \text{ Hz}$)斜率接近 0。高频位置对应的阻抗幅值代表电解液阻抗,低频位置对应的阻抗幅值反应表面钝化膜的阻抗,是可以用来评价试样耐蚀性能的参数之一^[23,28]。在 0.01 Hz 时, TiBw/TA15 对应的阻抗模数值约为 $2.8\times 10^5 \Omega\cdot\text{cm}^2$,相同频率的 CP-TA15 的阻抗模数值约为 $1.6\times 10^5 \Omega\cdot\text{cm}^2$,说明 TiB 增强体的添加对试样耐蚀性能有一定的提高。图 5c 反应相角随频率的变化,存在一个相位角峰,并且从中频率(10^2 Hz)到低频率(10^{-2} Hz)相角呈现缓降趋势。在低频段中相位角越接近 90° 钝化膜越显示出电容特性^[21]。TiBw/TA15 低频段相位角高于 CP-TA15,表明 TiBw/TA15 钝化膜更显电容特性,电容特性越强、阻抗越大,可以很好地抵制电解液离子入侵;相比 TiBw/TA15, CP-TA15 钝化膜内将会含有更多电解液离子,造成该钝化膜更加疏松多孔,最终导致该材料的耐腐蚀性能减弱。

图 5d 为根据 EIS 数据拟合的等效电路。表 3 为 2 种试样电化学阻抗谱等效电路拟合数据。由于 TiBw/TA15 和 CP-TA15 试样都发生了二次钝化现象,钝化膜应该存在内外两层,等效电路模型为图 5d。Reyes-Riverol 等^[20]研究发现钛合金及其复合材料的双层钝化层,外层多孔疏松,内层紧致。等效电路中 R_s 、 R_f 分别表示溶液电阻和薄膜电阻,用来反映材料表面传导电流的难易程度,阻值越高导电率越低, R_{ct} 电荷转移电阻可以反映金属与电解

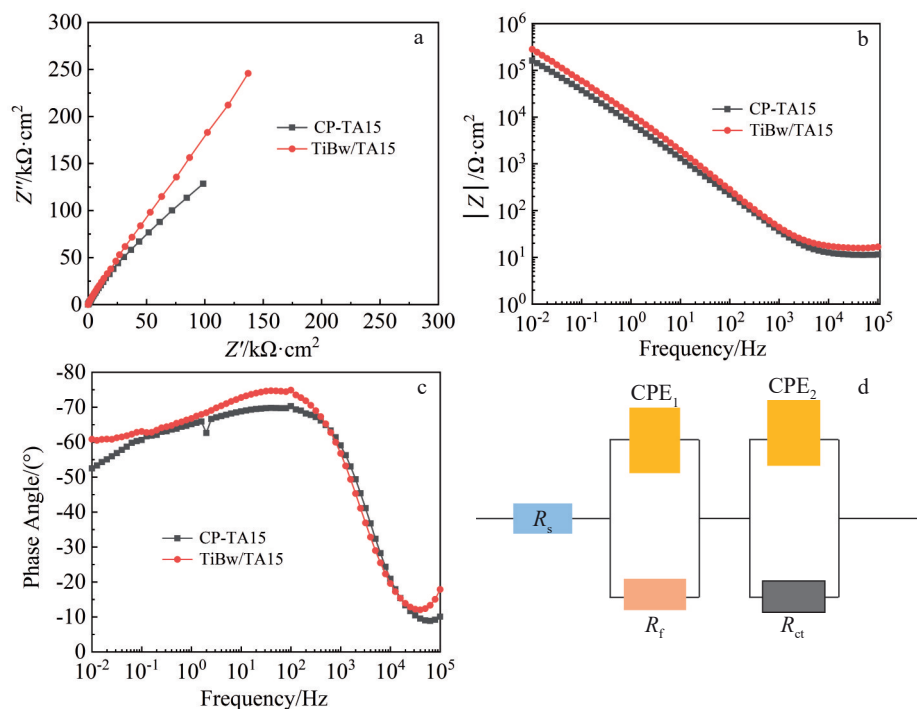


图5 CP-TA15 和 TiBw/TA15 电化学阻抗谱图和等效电路模型

Fig.5 Electrochemical impedance spectra (a–c) and equivalent circuit model (d) of CP-TA15 and TiBw/TA15: (a) Nyquist diagrams and (b–c) Bode diagrams

表 3 EIS 等效电路拟合参数

Table 3 Parameters of equivalent circuit obtained by fitting results of EIS experiment

Sample	$R_s/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$R_f/\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\text{CPE}_1/\times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-n}$	n_1	$\text{CPE}_2/\times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-n}$	n_2	$R_{ct}/\times 10^3 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\chi^2/\times 10^{-3}$
CP-TA15	10.22	6.236	73.58	0.8042	43.67	0.8002	0.411	2.23
TiBw/TA15	14.91	14.31	37.46	0.8447	29.87	0.8329	1.01	2.80

液反应速率,阻值越高腐蚀反应速率越低。表 3 显示 TiBw/TA15 具备更高的 R_s 、 R_f 和 R_{ct} 。恒相元件 CPE_1 和 CPE_2 为代替电容的常相位角元件,具有非理想纯电容的特性,通常是由于电极表面不均匀性造成的^[25]。

CPE 元件阻抗的数学表达式为^[27]:

$$Z_{\text{CPE}} = 1/[Q(j\omega)^n] \quad (2)$$

其中, Q 为钝化膜电容值, ω 为角频率, j 为虚部符号, n 为弥散指数($-1 \leq n \leq 1$)。当 $n=1$ 时,CPE 表现为理想电容;当 $n=0$ 时,CPE 表现为理想电阻;而当 $n=0.5$ 时,其表现为 Warburg 阻抗特性,根据表 3 所示,TiBw/TA15 钝化膜更具电容特性。 χ^2 用于评价拟合质量,从表 3 数据 χ^2 值(小于 0.003),表明两试样拟合质量良好,表示两试样的电化学腐蚀行为可以用该拟合的等效电路模型来描述。

3.5 腐蚀形态和相组成

图 6 为热压烧结制备的 CP-TA15 和 TiBw/TA15 样品经过 3.5wt% NaCl 溶液电化学腐蚀形貌的 SEM 照片和 XRD 图谱。首先分析 CP-TA15 试样,根据 CP-TA15 试样表面形貌(图 6a、6c)存在“黑洞”,EDS 线扫描分析

(图 6e)A 区域材料元素出现波谷和 CP-TA15 极化曲线(图 4a)出现波动,表明该试样存在较深的电化学腐蚀孔洞。这是由于随着腐蚀电位的增加,试样进一步被 Cl^- 腐蚀,表面的点蚀沿着大晶粒晶界向周围和基体内部扩散,形成腐蚀坑。此现象与 Jin 等人^[25]使用选区激光熔化(SLM)制备的纯 Ti 进行的耐蚀性能研究结果一致。

当添加 TiB 增强体后,TiBw/TA15 复合材料的增强体呈现准连续网状均匀分布在钛合金基体的晶界处,晶界本身是具有晶格缺陷和高能量状态,所以腐蚀优先在增强体分布的基体晶界处^[29]。故 TiBw/TA15 样品(图 6b、6d)表面形貌可以明显看出准连续的网状 TiB 晶须,通过 TiBw/TA15 样品 EDS 结果(图 6f)可以发现,腐蚀后晶须附近的 TA15 基体含氧量远大于增强体,并在 TA15 基体上存在点蚀现象,但未出现较大的腐蚀坑洞,说明材料被腐蚀程度较小,TiBw/TA15 复合材料耐腐蚀性能高。当前对钛基复合材料腐蚀机理研究较少,下面对腐蚀机理进行分析,腐蚀机理示意图如图 7a 所示。钛及钛基复合材料在腐蚀过程中,钛基体的腐蚀和钝化几乎是同步

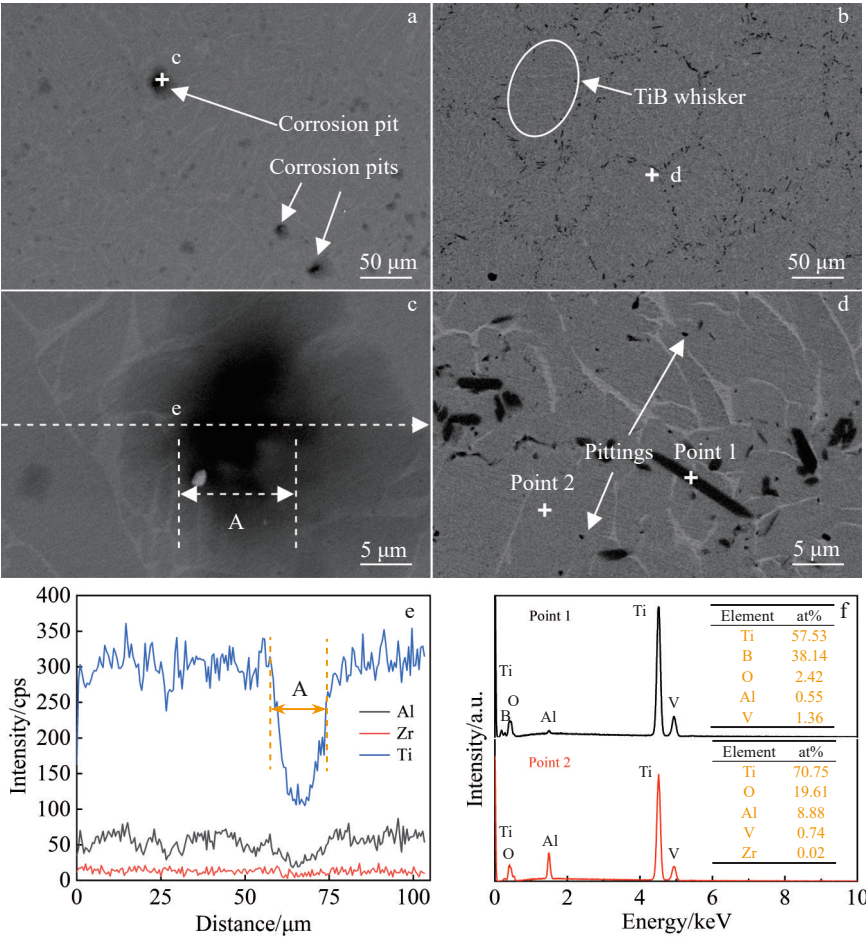


图6 热压烧结制备的CP-TA15和TiBw/TA15样品的电化学腐蚀形貌的SEM照片和EDS线扫图与点扫图
Fig.6 SEM images of electrochemical corrosion morphology of CP-TA15 and TiBw/TA15 samples prepared by hot pressing sintering:
(a, c) CP-TA15, and (b, d) TiBw/TA15; EDS line scanning result along line A in Fig.6c (e) and EDS spectra of marked points in Fig.6d (f)

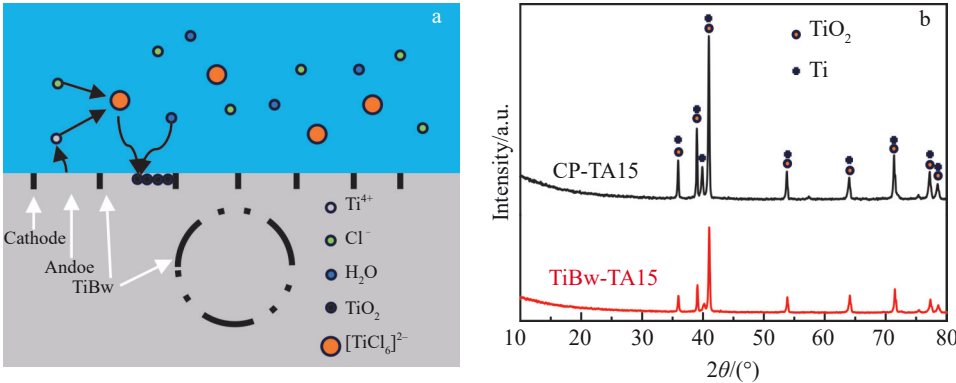


图7 TiBw/TA15复合材料腐蚀机理示意图和电化学腐蚀后两试样XRD图谱
Fig.7 Schematic diagram of corrosion mechanism of TiBw/TA15 composite (a) and XRD patterns of two samples after electrochemical corrosion (b)

进行的^[23],故首先在腐蚀过程中钛基体溶解形成 Ti^{4+} ,然后与溶液中大量的 Cl^- 结合生成 $[\text{TiCl}_6]^{2-}$ 络合物,但是 $[\text{TiCl}_6]^{2-}$ 络合物不太稳定,达到一定的临界浓度时,会发生水解反应(图7a),形成 TiO_2 钝化膜,结合试样腐蚀之

后的XRD图谱(图7b)检测出 TiO_2 相可以证明。由于TiBw是陶瓷增强体,耐蚀性比钛合金基体高,所以在腐蚀过程中TiBw可作为微阴极,钛基体作为阳极(图7a),增强体与基体存在电位差能构成电偶^[26,30]。这种电偶的

形成促进钛基体表面快速溶解,产生大量的 Ti^{4+} ,使得 $[\text{TiCl}_6]^{2-}$ 络合物大量生成,快速达到临界浓度,最终使得 TiO_2 钝化膜快速生成, TiO_2 钝化膜的生成会阻碍腐蚀液与基体内部的进一步反应,降低材料被腐蚀的倾向,并一定程度上避免较大腐蚀孔洞的缺陷。Su 等人^[31]在 TiC/Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 复合材料已经证实此类观点。点蚀的出现是由于随着电化学试验的进行,当电压超过 0.3 V 时,电流密度逐渐上升(图 4a),此时在电压和腐蚀液的作用下, Cl^- 渗透到钝化层中,导致表面钝化膜破裂^[32],TiBw/TA15 试样与腐蚀液再次接触所造成的。

4 结 论

1) TiBw/TA15 复合材料具有更加优异的耐腐蚀参数,自腐蚀电流密度为 $0.033 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$,极化电阻值为 $42\,993 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

2) TiBw 的添加增强了材料耐腐蚀性能。这是因为 TiBw/TA15 复合材料的容抗弧更大,低频阻抗模量和相位角更高,所以该材料电容性较强,阻碍电解液离子的入侵。TiBw/TA15 复合材料的溶液电阻、薄膜电阻、电荷转移电阻值更高,则材料导电率和腐蚀反应速率较低。

3) 腐蚀后 CP-TA15 表面存在明显的腐蚀坑洞,而 TiBw/TA15 表面形貌存在区域点蚀现象。这是由于 TiBw 增强体可以作为微阴极,可以促进 TiO_2 钝化膜的快速生成,增强 TiBw/TA15 复合材料耐腐蚀性能。

4) 相较于纯 TA15,加入 TiBw 增强体的网状结构 TiBw/TA15 复合材料具有更加优异的耐腐蚀性能。

参考文献 References

- [1] Zhang X J, Yu W J, Wang J *et al.* *Vacuum*[J], 2023, 207: 111635
- [2] Wu Hao(吴昊), Zhang Long(张龙), Yu Jiashi(于佳石) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(6): 2205
- [3] Cao Qichuan(曹起川), Wang Huiming(王慧明), Lv Xiaoren(吕晓仁) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2024, 41(1): 15
- [4] Wang H P, Hu L, Xie W J *et al.* *Angewandte Chemie*[J], 2024, 136(15): e202400312
- [5] Fang M H, Han Y F, Shi Z S *et al.* *Composites Part B: Engineering*[J], 2021, 211: 108683
- [6] Han Wei(韩威), Jiang Zhongtao(姜中涛), Yang Xin(杨鑫) *et al.* *Iron Steel Vanadium Titanium*(钢铁钒钛)[J], 2022, 43(3): 59
- [7] Guo S, Li Y N, Gu J R *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 23: 1934
- [8] Jiao T, Jiang T, Dai G Q *et al.* *Materials Characterization*[J], 2023, 197: 112665
- [9] Lv Weijie(吕维洁), Zhang Di(张荻), Han Yuanfei(韩远飞) *et al.* *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2023, 66(4): 38
- [10] Zheng Y F, Xu L J, Chi D Z *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 864: 144279
- [11] Pan D, Li S F, Liu L *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2022, 50: 102519
- [12] Huang Lujun(黄陆军). *Research on the Titanium Matrix Composites with a Quasi-Continuous Network Reinforcement Distribution*(增强体准连续网状分布钛基复合材料研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
- [13] Feng Y J, Zhang W C, Cui G R *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 721: 383
- [14] Li N, Wang T, Jiang S Y *et al.* *Materials Characterization*[J], 2021, 178: 111275
- [15] Cui F J, Yang M H, Deng B *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2023, 317: 118008
- [16] Yang Z B, Zhang C J, Ji X *et al.* *Materials Characterization*[J], 2022, 189: 111933
- [17] Lei Z N, Gao P F, Li H W *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 788: 831
- [18] Feng Y J, Lu Y B, Liu X S *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2023, 229: 115349
- [19] Zou H, Hu R, Luo X *et al.* *Vacuum*[J], 2024, 219: 112660
- [20] Reyes-Riverol R, Lieblich M, Fajardo S. *Corrosion Science*[J], 2022, 208: 110635
- [21] Lv J, Chen Z L, Tang J *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2023, 465: 129581
- [22] Xia M J, Luo Q X, Tan R J *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 929: 167255
- [23] Chen Y, Zhang J X, Dai N W *et al.* *Electrochimica Acta*[J], 2017, 232: 89
- [24] Li J Q, Lin X, Guo P F *et al.* *Corrosion Science*[J], 2018, 142: 161
- [25] Jin J B, Zhou S F, Zhang W C *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 918: 165704
- [26] Zhu T, Yuan Y, Yu Q *et al.* *Materials Chemistry and Physics*[J], 2023, 306: 128073
- [27] Bai Y, Gai X, Li S J *et al.* *Corrosion Science*[J], 2017, 123: 289
- [28] Bai P K, Huo P C, Zhao Z Y *et al.* *Ceramics International*[J], 2023, 49(2): 2752
- [29] Shi Y L, Li W C, Tian L *et al.* *Corrosion Science*[J], 2023, 222: 111384
- [30] Hu H, Wen S F, Duan L C *et al.* *Optics and Laser Technology*[J], 2019, 119: 105588
- [31] Su B X, Jiang B T, Zhu G Q *et al.* *Corrosion Science*[J], 2024, 230: 111901
- [32] Falodun O E, Oke S R, Solomon M M *et al.* *Ceramics International*[J], 2024, 50(9): 15124

Corrosion Resistance of 5vol%TiBw/TA15 Composite with Mesh Structure

Feng Yangju, Wang Wei, Lu Yunbin, Lei Yucheng

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The 5vol% TiBw/TA15 composite with mesh structure was prepared by low-energy ball milling in conjunction with vacuum hot pressing sintering technique, and its corrosion resistance was investigated. Pure TA15 and 5vol% TiBw/TA15 composite were subjected to electrochemical corrosion tests. The open circuit potential, polarization curves, and electrochemical impedance spectra of the two materials were measured and compared in 3.5wt% NaCl corrosion solution. The results show that compared with pure TA15, the composite reinforced by 5vol% TiBw with mesh structure has a lower self-corrosion current density ($0.033 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$), higher polarization resistance value ($42993 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$), and fewer corrosion pits, demonstrating superior corrosion resistance. This phenomenon is attributed to the presence of TiBw reinforcement, which accelerates the formation of a stable TiO_2 passivation film on the surface of the 5vol%TiBw/TA15 composite compared to pure TA15 during the electrochemical corrosion process.

Key words: vacuum hot pressing sintering; TiBw/TA15 composite; polarization curve; EIS; corrosion resistance

Corresponding author: Lei Yucheng, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, E-mail: yclei@ujs.edu.cn