

TC4 钛合金微弧氧化膜形成过程中熔池的温度探测

郝千驹¹, 杜楠¹, 赵晴¹, 王帅星¹, 李新义², 董超芳²

(1.南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063;

2.北京科技大学 腐蚀与防护中心, 北京 100083)

摘要: 目的 制取微弧氧化复合膜, 探讨 TC4 钛合金微弧氧化膜层的形成温度。方法 采用在微弧氧化电解液中分别加入第二相颗粒 (α -Al₂O₃、ZrO₂、W) 的方法, 制得相应的 TC4 钛合金微弧氧化复合膜, 利用第二相颗粒是否发生溶解相变来探测膜层形成的最高温度。结果 在微弧氧化复合膜中均发现了第二相颗粒, α -Al₂O₃、ZrO₂ 和 W 粉颗粒均发生了溶解, 小尺寸的第二相颗粒在膜层中全部溶解, 大尺寸颗粒由于动力学的原因, 熔池作用的时间很短, 颗粒来不及全部溶解, 仅发生了表壳和棱角的溶解, 导致大颗粒的尺寸变小, 轮廓变得更加圆润。在中粒径为 50 nm 的 W 粉制作的复合膜层中, 并未发现 W 粉颗粒的存在, 但是 W 元素均存在于膜层中。这是因为 W 粉颗粒太小 (仅 50 nm), 颗粒在膜层中全部溶解。在中粒径为 1 μ m 的 W 粉颗粒制作的复合膜中, 发现了 W 粉颗粒, 颗粒轮廓圆润, 尺寸小于 1 μ m。这是颗粒部分溶解的缘故 (仅表壳和轮廓发生了溶解)。在复合膜中, 不含有第二相颗粒的区域均能相应地检测到 Al、Zr、W 元素的存在。结论 根据 SEM 和 EDS 检测结果可以得知, 微弧氧化膜层形成的过程中, 熔池形成的最高温度超过了 W 的熔点 3410 $^{\circ}$ C。

关键词: TC4 钛合金; 微弧氧化; 第二相颗粒; 熔点

中图分类号: TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)04-0051-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.008

Temperature Detection of Molten Bath during Formation of Micro Arc Oxidation Film on TC4 Titanium Alloy

HAO Qian-ju¹, DU Nan¹, ZHAO Qing¹, WANG Shuai-xing¹, LI Xin-yi², DONG Chao-fang²

(1. National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the formation temperature of micro arc oxidation film on TC4 titanium alloy by preparation of micro arc oxidation composite film. The micro arc oxidation composite film on TC4 titanium alloy was prepared by adding the second phase particles (α -Al₂O₃, ZrO₂, W) in the micro arc oxidation electrolyte. The maximum temperature of the film formation was detected by the fusion of the second phase particles. The second phase particles were found in the micro arc oxidation composite film. The particles of α -Al₂O₃, ZrO₂ and W powder were all dissolved. The small second phase particles were dissolved in the film completely. However, the large size particles are not completely dissolved due to dynamics and short oper-

收稿日期: 2017-11-24; 修订日期: 2018-02-02

Received: 2017-11-24; Revised: 2018-02-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51361025)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51361025)

通讯作者: 杜楠 (1956—), 男, 教授, 从事金属材料腐蚀与防护研究工作。

Corresponding author: DU Nan(1956—), Male, Professor, Research focus: corrosion and protection of metal materials.

ation time of molten bath. The size of large particles became smaller and the outline became more rounded because of dissolution of surface and edge. In the composite film prepared by W powder with medium particle size of 50 nm, W particles were not found, but W element was found. The particles of W powder could be dissolved completely in the film due to small size. In the composite film made of W powder with medium particle size of 1 μm , particles of W powder were found and the particles were more rounded and smaller than 1 μm . This was caused by dissolution of partial particles (only dissolution of surface and profile). In the composite film, Al, Zr and W elements could be detected in the region without the second phase particles. According to the results of SEM and EDS, the maximum temperature of molten bath exceeds the melting point of W 3410 $^{\circ}\text{C}$ in the process of micro arc oxidation film formation.

KEY WORDS: TC4 titanium alloy; micro-arc oxidation; second-phase particles; melting point

钛合金作为轻质金属结构材料, 由于其比强度高、耐腐蚀性好而广泛地应用于航天航空领域^[1-2]。但钛合金的硬度较低, 耐磨性较差, 在使用中易产生“钛火”故障, 这严重影响了钛合金的使用安全性^[3]。微弧氧化是将 Al、Mg、Ti 等置于电解液中使其表面产生弧光放电, 在热化学、等离子体化学和电化学的共同作用下原位生长陶瓷膜的方法^[4-8]。该技术作为一种新兴表面处理技术, 能够显著降低钛合金的摩擦系数, 提高其强度, 改善其耐磨性^[9-12]。

一直以来, 关于微弧氧化膜层温度的研究相对较少。R. O. Hussein 等人^[13]用光谱法对 1100 铝合金微弧氧化的电子束温度进行了研究, 得出在单极性电流模式下的电子束温度在 4000~7000 K 之间, 在双极性电流模式下电子束温度在 4000~5500 K 之间, AJ62 镁合金微弧氧化等离子体温度在 3300~7000 K 之间^[14]。M. D. Klapkiv 等人^[15]用光谱法得出商业纯铝微弧氧化的等离子体温度为 6899~7700 K。但是这些工作报道的温度是微弧氧化电子束温度或等离子体温度, 对膜层形成过程中的熔池温度鲜有文献报告。本文将第二相颗粒 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 ZrO_2 、W ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔点为 2050 $^{\circ}\text{C}$, ZrO_2 熔点为 2700 $^{\circ}\text{C}$, W 是熔点最高的金属^[16], 其熔

点为 3410 $^{\circ}\text{C}$) 复合进入膜层, 对复合进入膜层中的第二相颗粒进行观察并对其金属元素的分布进行检测, 以此判断第二相颗粒是否发生溶解, 从而探测膜层形成的最高温度。

1 试验

实验采用 TC4 钛合金, 其主要成分(质量分数计)为: 5.50%~6.80% Al, 3.50%~4.50% V, 余量为 Ti。试样尺寸为 2 mm×2 mm×0.5 mm。氧化前, 试样经 240[#]~1000[#]砂纸依次打磨, 在酒精中用超声波清洗除油 20 min, 以除去油污。之后用 WHD-20 型微弧氧化电源进行微弧氧化。其中以不锈钢槽作为阴极, 试样作为阳极, 夹具为钛丝。第二相颗粒充分分散于表面活性剂溶液中, 超声震荡后将颗粒过滤出来, 第二相颗粒种类及其基本物理参数见表 1。

微弧氧化采用直流脉冲方式, 电流密度为 10 A/dm², 频率为 600 Hz, 正向占空比为 50%, 负向占空比为 0%。电解液采用硅酸钠-磷酸钠体系, 将第二相颗粒加入到电解液中, 并用搅拌器搅拌电解液, 搅拌速度为 600 r/min, 反应时间为 40 min。

表 1 复合颗粒种类及其基本物理参数
Tab.1 Types and basic physical parameters of composite particles

复合粒子	颜色	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	中粒径
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	白色	3.5~3.9	2050	2980	2 μm
ZrO_2	白色	5.2	2680	4300	2 μm
W	黑色	19.35	3410±20	5927	50 nm
W	黑色	19.35	3410±20	5927	1 μm

用 QUESTAR QM100 型长距离工作显微镜对微弧氧化过程进行观测, 利用 Microshot MDX-4T 图像采集器对微弧氧化过程录制视频。由于视频是由连续的图片组合而成, 根据视频的帧数 n 可以得出一张图片存在的时间 $1/n$ (s), 当一个火花出现在 m 张图片中, 可以得知一个火花存在的时间为 m/n (s)。

实验结束时记录 W 微弧氧化复合膜和原始膜层对应的终止电压, 并用 JB-6C 涡流测厚仪对反应 40 min 的膜层测量厚度。膜层/基体试样是将膜层打磨掉一面再将基体阳极溶解后制得, 用 Bruker D8-Advance 型 X 射线衍射仪对去除了基体的 W 微弧氧化复合膜进行物相分析。用 Nova Nano SEM 450

型场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 观察复合膜层的截面, 采用 OXFORD INCA 型能谱仪 (EDS) 进行检测, 判断膜层中的第二相颗粒是否发生溶解。

2 结果与讨论

2.1 TC4 钛合金微弧氧化过程的观察

在微弧氧化过程中, 膜层的一侧是电解液, 另一侧是基体, 电解液相对于膜层具有良好的冷却作用, 基体 TC4 是金属, 是热的良导体, 具有较好的散热作用, 因此在膜层中存在一个温度场分布, 膜层中部温度高, 靠近膜层两侧的温度相对较低, 即温度在膜层中心向两侧呈现递减的趋势, 图 1 为示意图。

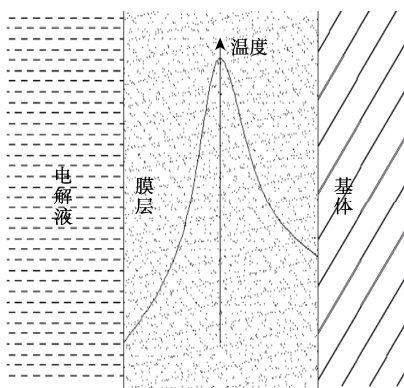
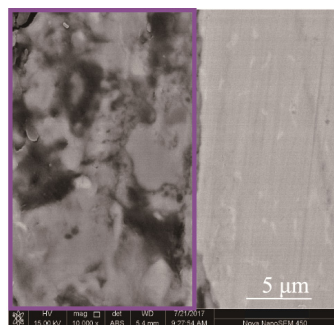
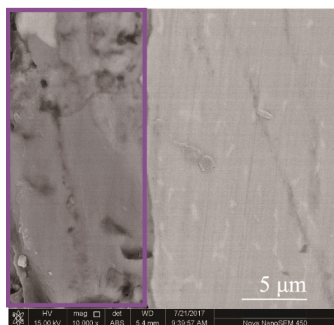


图 1 TC4 钛合金微弧氧化膜层温度分布示意图
Fig.1 Schematic diagram of temperature distribution of micro arc oxidation film on TC4 titanium alloy



a α - Al_2O_3 复合膜截面典型形貌1



c α - Al_2O_3 复合膜截面典型形貌2

图 2 为长距离显微镜对微弧氧化过程的拍摄图像, 此时微弧氧化反应时间为 38'47'', 膜层厚度约为 20 μm , 结合视频的帧数 28 帧/秒和火花图像的张数 18 张得知, 火花存在的时间为 643 ms, 认为膜层中熔池活跃时间约为 1 s。

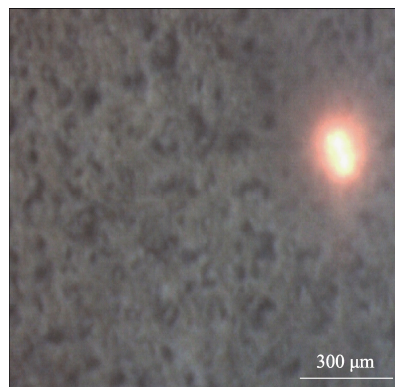
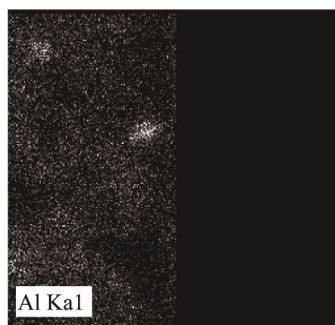


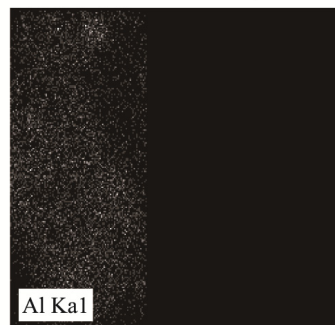
图 2 长距离显微镜对微弧氧化过程的观测
Fig.2 Observation of micro arc oxidation process by long distance microscope

2.2 α - Al_2O_3 微弧氧化复合膜第二相颗粒分析

图 3 为 α - Al_2O_3 微弧氧化膜层截面图, 膜层截面中只有少量 α - Al_2O_3 颗粒, 对图 3a 区域进行点扫描得知 Al 元素的质量分数为 8.2%, 比 TC4 (Ti-6Al-4V) 中的 5.50%~6.80% 高, 这是由于 α - Al_2O_3 颗粒在膜层中溶解, 导致膜层中 Al 元素增加。在图 3a 中可见少



b 对应图a的EDS面扫描



d 对应图c的EDS面扫描

图 3 TC4 钛合金 α - Al_2O_3 微弧氧化复合膜截面形貌及 EDS 能谱分析

Fig.3 SEM morphology and EDS element analysis of α - Al_2O_3 composite film cross section on micro-arc oxidation of TC4 titanium alloy: a) Cross section of α - Al_2O_3 composite film 1; b) EDS area scanning of cross section of a; c) Cross section of α - Al_2O_3 composite film 2; d) EDS area scanning of cross section of c

量的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒, 图 3b 为图 3a 的面扫描结果, 在观测区域可见两颗 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒, 这是复合进入膜层中尺寸相对较大的颗粒溶解残留下来的部分。复合进入膜层较小尺寸的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 在熔池的高温作用下全部溶解。由于动力学的原因, 熔池作用的时间很短(仅 1 s), 大尺寸的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒在熔池高温的作用下仅发生了表层和棱角的溶解, 在膜层中残留下来的颗粒的轮廓变得更加圆润。图 3c 为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合膜截面图, 图 3d 为图 3c 的面扫描结果, 膜层中均含有 Al 元素, 由于小尺寸的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒发生了溶解, 加之 Al 元素的扩散, 导致 Al 元素在膜层中的分布比较均匀。根据图 3 可以得知, 膜层形成的最高温度超过了 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的熔点 2050 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 ZrO_2 微弧氧化复合膜第二相颗粒分析

对熔点为 2700 $^{\circ}\text{C}$ 的 ZrO_2 进行类似地分析研究, 膜层截面形貌及 Zr 元素分布见图 4。图 4a 和图 4c 为 ZrO_2 复合膜截面背散射图像, 图 4b 和图 4d 分别为图 4a 和图 4c 的 EDS 面扫描结果。结合 EDS 面扫描可以得知, 图 4a 和图 4c 中的白色颗粒为 ZrO_2 颗粒。在图 4a 和图 4c 中, 大多数 ZrO_2 颗粒的尺寸小于原始颗粒的中粒径 2 μm , 这是由于在熔池的高温作用下, 颗粒表层发生溶解, 颗粒尺寸变得更小。复合进入膜层的较小颗粒已经全部溶解, 尺寸较大的颗粒由于动力学原因, 熔池作用时间很短(仅 1 s), 来

不及全部溶解, 大尺寸的颗粒在膜层中仅发生了表层和棱角的溶解, 溶解后尺寸相对变小, 其轮廓变得更加圆润。根据对图 4 的分析可以得知, 膜层形成的最高温度超过了 ZrO_2 的熔点 2700 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 W 微弧氧化复合膜 XRD 检测分析

金属粒子及金属阳离子容易在碱性溶液中转变为带负电的胶体粒子^[17], 在搅拌器的搅拌作用下, 溶液中悬浮的 W 粉颗粒很容易在电场力的作用下复合进入膜层。表 2 记录了实验时间为 40 min 的 W 微弧氧化复合膜和原始微弧氧化膜层的厚度和终止电压, 终止电压值/膜厚(即单位厚度(1 μm)所平均承担的电压值)与膜层的电阻率成正比。W 属于金属, 是良好的导体, 复合进入膜层中降低了膜层的电阻率, 降低的电阻率(原始膜层的终止电压/膜层厚度值-W 复合膜层的终止电压/膜层厚度值)/(原始膜层的终止电压/膜层厚度值) $\times 100\%$ 达 7.78%。

图 5 为电解去除基体后的 W 微弧氧化复合膜层(W 粉中粒径为 1 μm)的 XRD 扫描结果, 排除了基体对膜层中物相的干扰, 使得扫描结果更加精确。图 5 中出现了 3 个明显的 W 衍射峰, 可以得知复合进入膜层中的 W 含量比较多。表 3 为 DIFFRAC. EVA 软件对膜层中各物相质量分数的分析结果(半定量分析), 复合进入膜层的 W 的质量分数为 5.3%, 复合进入膜层的 W 相应地降低了膜层的电阻率。

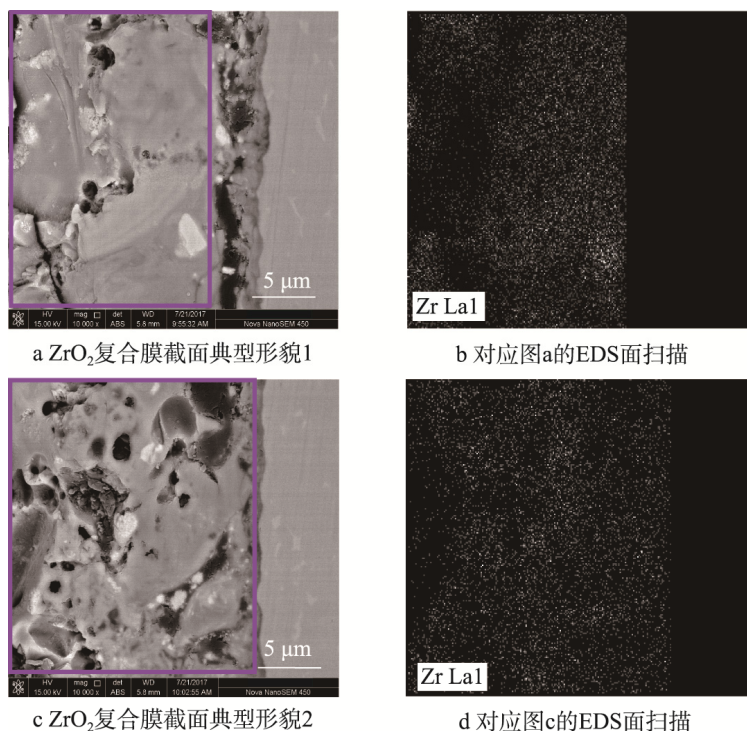


图 4 TC4 钛合金 ZrO_2 微弧氧化复合膜截面形貌及 EDS 能谱分析

Fig.4 SEM morphology and EDS element analysis of ZrO_2 composite film cross section on micro-arc oxidation of TC4 titanium alloy: a) Cross section of ZrO_2 composite film 1; b) EDS area scanning of cross section of a; c) Cross section of ZrO_2 composite film 2; d) EDS area scanning of cross section of c

表 2 反应时间 40 min 的 W 复合膜层与原始膜层的膜厚、电压、电压/膜厚
Tab.2 Film thickness, voltage and voltage/film thickness of W composite film and original film with reaction time of 40 min

试样	W 复合膜层	原始膜层
终止电压/V	461	450
膜厚/ μm	23.72	21.35
终止电压/膜厚/($\text{V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)	19.44	21.08

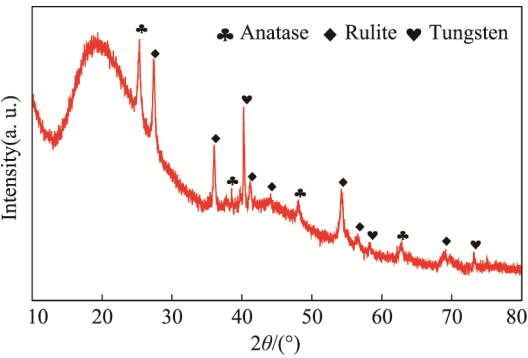


图 5 TC4 钛合金微弧氧化 W 复合膜层 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of MAO W composite film on micro-arc oxidation of TC4 titanium alloy

表 3 W 复合膜层中各物相质量分数
Tab.3 Mass fraction of phases in W composite film

Compound name	Formula	Mass/%
Rutile, syn	TiO_2	53.4
Anatase, syn	TiO_2	41.3
Tungsten	W	5.3

2.5 W 微弧氧化复合膜第二相颗粒分析

图 6a 为 W 微弧氧化复合膜截面的背散射图像 (第二相颗粒 W 粉中粒径为 50 nm), 图 6b 为其面扫

描结果。对扫描区域进行点扫描定量分析, 图中扫描区域 W 元素的质量分数为 6.69%, EDS 面扫描显示 W 元素在膜层中呈均匀分布, 膜层中含有一定的 W 元素。图中扫描区域为 $4.95\ \mu\text{m}\times 4.79\ \mu\text{m}$, W 粉颗粒的中粒径为 50 nm, 其测量面积 πr^2 为 $0.007\ 85\ \mu\text{m}^2$ 。图中扫描区域面积为颗粒测量面积的 3019 倍, 但是在观察区域并未发现 W 粉颗粒的存在, 这是由于 W 粉颗粒尺寸较小 (仅为 50 nm), 在膜层形成过程中, W 粉颗粒在熔池的高温作用下溶解完全。根据对图 6 的分析, 膜层形成的最高温度超过了 W 的熔点 $3410\ ^\circ\text{C}$ 。

图 7 为 W 微弧氧化膜层的截面图 (第二相颗粒 W 粉的中粒径为 $1\ \mu\text{m}$), 图 7 中观测区域为 $7.38\ \mu\text{m}\times 6.69\ \mu\text{m}$, 在该观测区域发现了一颗 W 粉颗粒。在膜层形成过程中, 小尺寸颗粒在膜层中由于熔池高温的作用而全部溶解, 大尺寸颗粒由于动力学原因, 熔池作用的时间很短 (仅 1 s), 来不及全部溶解。图 7a 为点扫描图像, spectrum 1 处的 W 元素质量分数为 89.25%, spectrum 2 处的 W 元素质量分数为 16.65%, spectrum 3 处的 W 元素质量分数为 8.76%, 距离扩散源 W 粉颗粒越远, W 元素的质量分数越低。图 7b 为该 W 粉颗粒的线扫描结果, W 峰的宽度明显大于 W 粉颗粒的尺寸, 可以得知 W 元素发生了扩散, 在整个线扫描区域中均有 W 元素的存在。结合图 7a、b 可以得知, W 粉颗粒的粒径大约为 660 nm, 小于颗粒的中粒径 $1\ \mu\text{m}$, 可认为该颗粒的原始粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 。这是由于颗粒的表层和棱角发生了溶解, 由于动力学原因, 熔池作用的时间较短 (仅 1 s), 颗粒来不及全部溶解, 溶解后颗粒的尺寸变小, 其轮廓变圆润。图 7c 为对应图 7a 的 W 元素面扫描结果, 根据图 7d 可以看出, W 元素存在于整个膜层中。根据对图 7 的分析, 膜层形成的最高温度高于 W 的熔点 $3410\ ^\circ\text{C}$ 。

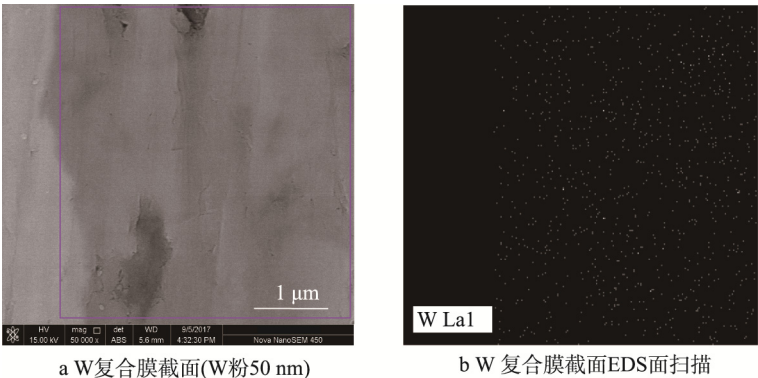


图 6 TC4 钛合金微弧氧化 W 复合膜截面 SEM 形貌及 EDS 元素分析
Fig.6 SEM morphology and EDS element analysis of W composite film on micro-arc oxidation of TC4 titanium alloy:
a) Cross section of W composite film; b) EDS area scanning of cross section of W composite film

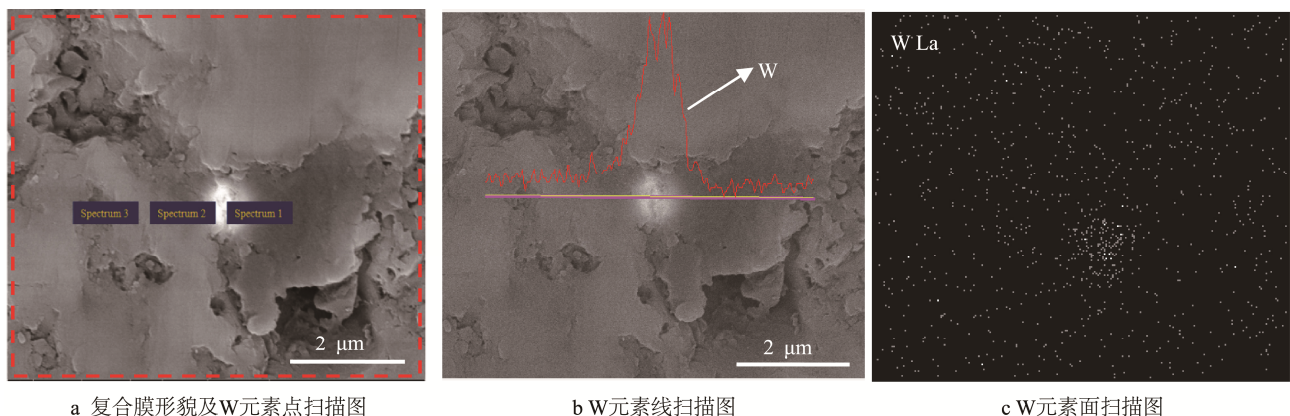


图7 TC4钛合金微弧氧化W复合膜截面SEM形貌及EDS元素分析
Fig.7 SEM morphology and EDS element analysis of W composite film on micro-arc oxidation of TC4 titanium alloy
a) EDS spot scanning; b) EDS line scanning; c) Cross section of W composite film; d) EDS area scanning

2.6 W微弧氧化复合膜/基体界面W元素分析

图8为W复合膜层/基体界面的SEM和EDS检测结果,在扫描区域内,W元素质量分数为5.66%。从图8a中可以看出,膜层/基体界面凹凸不平,界面并未发现W粉颗粒的存在,这是由于W粉颗粒在熔池活动过程中不能通过膜层到达膜层/基体界面。图8b为整个区域的面扫描结果,W元素在整个区域呈均匀分布。TC4基体的熔点远远低于W的熔点,由于基体的散热作用,导致膜层/基体界面处形成的最

the W composite film and substrate; b) EDS area scanning
高温小于W的熔点,膜层/基体界面处检测到的W元素是膜层中W元素扩散到膜层/基体界面处所致。

3 结论

1) 通过长距离工作显微镜对微弧氧化过程的观察,检测到火花存在的时间为643 ms,认为膜层中熔池活跃的时间为1 s。

2) 在微弧氧化电解液中分别添加 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 ZrO_2 、W粉颗粒并制得相应的微弧氧化复合膜,由于膜层形成的高温作用使复合进入膜层中的第二相颗粒发生了相变。较小尺寸的颗粒溶解消失,较大尺寸的颗粒由于熔池作用的时间很短(仅1 s),仅表层发生了溶解,说明微弧氧化膜层形成过程中,熔池的最高温度高于W的熔点 3410°C 。

参考文献:

- [1] 薛文斌,邓志威,陈如意,等. 钛合金在硅酸盐溶液中微弧氧化陶瓷膜的组织结构[J]. 金属热处理, 2000(2): 5-6.
XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, CHEN Ru-yi, et al. Microstructure of Ceramic Coating Formed by Micro Arc Oxidation in Silicate Solution on Ti-6Al-4V Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2000(2): 5-6.
- [2] CUI C X, HU B M, ZHAO L C, et al. Titanium Alloy Production Technology, Market Prospects and Industry Development[J]. Mater Des, 2011, 32: 1684-1691.
- [3] 杜楠,王帅星,赵晴,等. TC4钛合金微弧氧化 Cr_2O_3 复合膜的结构及摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 621-624.
DU Nan, WANG Shuai-xing, ZHAO Qing, et al. Microstructure and Tribological Properties of Microarc Oxidation Composite Coating Containing Cr_2O_3 Particles on TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engi-

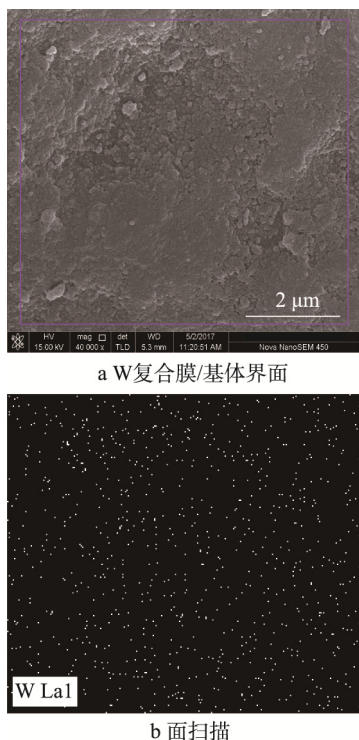


图8 TC4钛合金微弧氧化W复合膜/基体界面SEM形貌及EDS元素分析

Fig.8 SEM morphology and EDS element analysis of the interface between the W composite film and substrate on micro-arc oxidation of TC4 titanium alloy: a) Interface between

- neering, 2013, 42(3): 621-624.
- [4] YEROKHIN A L, NIE X, LEYLAND A, et al. Plasma Electrolysis for Surface Engineering[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 122(2/3): 73-93.
- [5] BUTYAGIN P I, KHOKHRY Y V, MAMAEV A I. Microplasma Systems for Creating Coatings on Aluminium Alloys[J]. Materials Letters, 2003, 57: 1748-1751.
- [6] 薛文斌, 邓志威, 李永良, 等. Ti-6Al-4V 在 NaAlO₂ 溶液中微弧氧化陶瓷膜的组织结构研究[J]. 材料科学与工艺, 2008, 8(3): 41-45.
- XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LI Yong-liang, et al. Microstructure of Ceramic Coatings Formed on Ti-6Al-4V Alloy by Microarc Oxidation in NaAlO₂ Solution[J]. Materials Science & Technology, 2008, 8(3): 41-45.
- [7] 杨巍, 蒋百灵, 时惠英. LY12 铝合金微弧氧化膜层的形成与生长机制[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10): 1949-1954.
- YANG Wei, JIANG Bai-ling, SHI Hui-ying. Formation and Growth Mechanism of Microarc Oxidation Coating on LY12 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10): 1949-1954.
- [8] WEI T, YAN F, TIAN J. Characterization and Wear- and Corrosion-resistance of Microarc Oxidation Ceramic Coatings on Aluminum Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 389(1/2): 169-176.
- [9] WANG Y M, LEI T Q, GUO L X, et al. Fretting Wear Behaviour of Microarc Oxidation Coatings Formed on Titanium Alloy against Steel in Unlubrication and Oil Lubrication[J]. Appl Surf Sci, 2006, 252: 8113-8120.
- [10] WANG Y M, JIANG B L, GUO L X, et al. Tribological Behavior of Microarc Oxidation Coatings Formed on Titanium Alloys against Steel in Dry and Solid Lubrication Sliding[J]. Appl Surf Sci, 2006, 252: 2989-2998.
- [11] 杨剑冰, 李伟洲. 颗粒添加对合金微弧氧化处理影响的研究进展[J]. 材料导报, 2011(S2): 212-220.
- YANG Jian-bing, LI Wei-zhou. Progress on Effect of Micro-arc Oxidation Treatment with the Particle Incorporated on the Coating Properties[J]. Materials Review, 2011(S2): 212-220.
- [12] 高广睿, 李争显, 杜继红. TC4 合金表面微弧氧化膜层耐蚀及摩擦性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4): 602-605.
- GAO Guang-rui, LI Zheng-xian, DU Ji-hong. Wear and Corrosion Resistance Properties of TC4 Alloy Micro-arc Oxidized Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(4): 602-605.
- [13] HUSSEIN R O, NIE X, NORTHWOOD D O. Influence of Process Parameters on Electrolytic Plasma Discharging Behaviour and Aluminum Oxide Coating Microstructure[J]. Surface and Coating Technology, 2010, 205(6): 1659-1667.
- [14] HUSSEIN R O, ZHANG P, NIE X, et al. The Effect of Current Mode and Discharge Type on the Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation(PEO) Coated Magnesium Alloy AJ62[J]. Surface and Coating Technology, 2011, 206(7): 1990-1997.
- [15] KLAPKIV M D, NYKYFORCHYN H M, POSUVAILO V M. Spectral-analysis of an Electrolytic Plasma in the Process of Synthesis of Aluminum-Oxide[J]. Materials Science, 1994, 30(3): 333-344.
- [16] 贾成广, 周武平. 钨——熔点最高的稀有金属[J]. 金属世界, 2012(6): 11-15.
- JIA Cheng-guang, ZHOU Wu-ping. Tungsten—A Rare Metal with the Highest[J]. Metal World, 2012(6): 11-15.
- [17] 钟涛生, 蒋百灵, 李均明. 微弧氧化技术的特点、应用前景及其研究方向[J]. 电镀与涂饰, 2005, 24(6): 47-51.
- ZHONG Tao-sheng, JIANG Bai-ling, LI Jun-ming. Characteristics, Applications and Research Direction of Micro-arc Oxidation Technology[J]. Electroplating & Finishing, 2005, 24(6): 47-51.