

TA1 纯钛基体热处理对阳极氧化膜层的影响

夏亚锋^{1,2}, 赵思雨^{1,2}, 赵婧^{1,2}, 罗艺琳^{1,2}, 种阳^{1,2}

(1. 西安秦钛思捷科技有限公司, 陕西 西安 710016)

(2. 西安秦钛智造科技有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 研究了 TA1 纯钛基体热处理对阳极氧化膜层的影响。通过对比不同热处理条件下, 钛基体试样阳极氧化前后的宏观照片和微观形貌, 得到了基体热处理对阳极氧化膜层性能、色彩的影响规律。结果表明, 随着热处理次数的增加, 基体表面形成的颗粒尺寸增大, 粗糙度增加, 阳极氧化时越易生成连续氧化膜, 膜层厚度越大。基体表面颗粒尺寸和粗糙度对阳极氧化膜层色彩鲜亮度、均匀度影响较大, 颜色分布与基体表面颗粒或片层状形貌及其大小、取向相关。此外, 在热处理过程中, 基体表面粗糙度增大, 形成颗粒状或片层状结构, 有利于高电压阳极氧化后形成锐钛矿相晶体结构。

关键词: TA1 纯钛; 热处理; 阳极氧化; 氧化膜; 锐钛矿相

中图分类号: TG178.2; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)04-027-06

Effect of Heat Treatment on Anodic Oxide Film of TA1 Pure Titanium Substrate

Xia Yafeng^{1,2}, Zhao Siyu^{1,2}, Zhao Jing^{1,2}, Luo Yilin^{1,2}, Chong Yang^{1,2}

(1. Xi'an QinTi Sijie Technologies Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

(2. Xi'an QinTi Intelligent Manufacturing Technologies Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The influence of heat treatment on the anodic oxide film of TA1 pure titanium substrate was investigated. By comparing the macroscopic photographs and microscopic morphologies of titanium substrate specimens before and after anodic oxidation under different heat treatment conditions, the effects of substrate heat treatment on the performance and coloration of the anodic oxide films were determined. The research results show that as the number of heat treatments increases, the size of particles formed on the substrate surface increases and the roughness becomes larger. During anodic oxidation, it is easier to generate a continuous oxide film, and the coating thickness is greater. The grain size and roughness of the substrate significantly affect the brightness and uniformity of the anodic oxide coating coloration, and the color distribution is related to the granular or lamellar morphology, size and orientation of the substrate surface. Moreover, during heat treatment, the substrate surface roughness increases, forms a granular or lamellar substrate, which readily promote the formation of anatase-phase crystal structures after high-voltage anodic oxidation.

Keywords: TA1 pure titanium; heat treatment; anodic oxidation; oxide film; anatase phase

钛及钛合金具有高强度、低密度、耐腐蚀以及耐高温等优良特性, 在航空航天、生物医疗、石油化工以及日用品等众多领域得到了广泛应用^[1-3]。阳极氧化是一种简单、快速、低成本的表面处理方法, 通过阳极氧化可以在钛及钛合金表面制备厚度不同的氧化膜层, 从而获得颜色不同的钛制品——水杯、茶壶、筷子等^[4-5]。然而, 阳极氧化膜层的性能受到多种因素

的影响, 如电解液成分与浓度^[6]、氧化电压^[7]、氧化温度^[8]、氧化时间^[9]、材料成分^[10]及组织结构^[11]等。

对钛及钛合金基体进行前处理会改变材料表面的组织结构、表面形貌, 从而影响阳极氧化膜层的性能。Kocabas 等人^[12]研究了预机械抛光处理基材对阳极氧化膜层的影响, 发现与未处理试样相比, 机械抛光试样的氧化膜层颜色饱和度更高, 耐蚀性更好。陈均焕等人^[13]对比了机械抛光和化学抛光处理基材对阳极氧化膜层的影响, 机械抛光前处理获得的结晶膜表面

收稿日期: 2025-03-05

通信作者: 夏亚锋 (1983—), 男, 工程师。

质量和着色效果相比化学抛光更好, 结晶颗粒分布更加均匀。梁立业^[14]对 TC4 钛合金的阳极氧化着色工艺进行了研究, 发现对 TC4 钛合金基体进行碱洗加酸洗预处理, 酸洗均匀试样生长的氧化膜均匀致密, 酸洗不均匀试样反之。Vera 等人^[11]研究了基体织构对阳极氧化 TiO₂ 膜层颜色和色调的影响。结果表明, 不同的基体晶粒取向会生成不同颜色的氧化物, 晶粒取向决定了氧化膜的厚度, 并且基体的预氧化热处理会改变表面的纹理, 从而减少膜层厚度的不均匀性。目前, 钛及钛合金基体前处理对阳极氧化膜层影响的研究大多集中在酸洗、机械抛光、化学抛光及喷砂等, 对基体热处理的影响研究甚少。

热处理作为一种重要的材料改性手段, 对钛及钛合金的组织结构有着显著影响, 包括晶粒尺寸、析出相分布、组织形貌等^[15-17]。不同的热处理参数, 如温度^[18]、时间^[19]和冷却方式^[20]等, 都会对钛及钛合金的组织结构、表面形貌产生较大影响, 进而对钛日用品的阳极氧化膜层结构、色彩等产生重要影响^[11]。考虑到阳极氧化制备的膜层的结构一定程度上取决于钛基体的特性, 本研究选取了三种不同的基体: 未经热处理、分别经过一次和两次热处理的 TA1 纯钛基材, 通过场发射扫描电镜、拉曼光谱等研究了热处理对 TA1 基体的影响, 分析了热处理前后 TA1 基体结构及形貌对阳极氧化膜层颜色及其均匀性、晶体结构的影响, 以期优化阳极氧化工艺, 在钛基体表面获得目标性能的阳极氧化膜层及丰富多彩的颜色。

1 实验

1.1 实验材料与试样制备

实验所用原材料为 TA1 钛板, 其化学成分如表 1 所示。将原材料切割成 9 个尺寸为 20 mm×20 mm×0.5 mm 的试样, 分为 3 组, 每组 3 个。热处理前, 对 3 组试样进行除油、清洗、烘干处理。

表 1 TA1 钛板的化学成分 (w/%)

Table 1 Chemical composition of TA1 titanium plate

Ti	O	N	C	H	Fe
Bal.	0.13	0.03	0.10	0.01	0.20

第一组试样不进行热处理; 第二组试样进行一次热处理, 处理方式: 将样品置于 AFDG100/17 真空炉中, 抽真空后以 3.5 °C/min 的升温速率将炉温升高至 650 °C, 保温 50 min, 继续升温至 850 °C, 并保温 50 min, 再次升温至 1000 °C, 保温 150 min, 自然冷却至 200 °C 取出试样; 第三组试样的热处理步骤与第

二组试样相同, 重复两次。

采用 DXK-150V/30A 型直流稳压电源进行阳极氧化。以试样为阳极, 304 不锈钢为阴极, 氧化液为 1.0 mol/L 的磷酸和 0.7 mol/L 的葡萄糖酸钠混合液。每组试样中 1 个试样不进行阳极氧化, 剩余 2 个试样在室温下进行阳极氧化, 氧化电压分别为 35 V 和 70 V, 氧化时间为 1 min。氧化后的试样用去离子水冲洗, 放置在干燥箱中备用。上述试样命名为 *m-nV*, 其中 *m* 表示热处理次数, *n* 表示阳极氧化所用电压 (*m*=0、1、2, *n*=0、35、70)。 *m* 为 0 时代表未经热处理, *n* 为 0 时代表未经阳极氧化处理。

1.2 试样表征

通过 SU8220 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样表面形貌; 通过 DLSURF-DR160 型表面粗糙度仪测试基体试样的粗糙度; 通过 LabRAM Odyssey 激光共聚焦显微拉曼光谱仪分析阳极氧化膜层的物相组成。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌分析

图 1 为不同热处理试样阳极氧化后的宏观照片。从图 1a~1c 可以看出, 未经热处理的 0-0V 基体表面平整, 呈现银灰色, 颜色分布较一致; 热处理后, 两种基体的颗粒取向呈随机分布, 表面粗糙度增加, 呈现银灰色和银白色, 且颜色分布与颗粒取向相关。其中, 经一次热处理的 1-0V 基体表面呈现颗粒状; 经两次热处理的 2-0V 基体表面出现了片层状及针状形貌。在结晶过程中, 原子重排和晶体生长会导致表面形成微小凸起、颗粒状结构或显现晶界。随着热处理时间延长, 晶粒长大和融合现象加剧, 形成尺寸更大的颗粒或片层结构^[21-22]。因此, 1-0V 试样表面呈现颗粒状形貌, 而 2-0V 试样表面则呈现片层状形貌。

从图 1d~1i 可以看出, 在 35 V 电压下, 0-35V、1-35V、2-35V 试样分别呈现蓝色、蓝白色、青色, 其中, 0-35V 试样颜色分布较均匀, 而 1-35V 和 2-35V 试样颜色分布不均匀, 分别出现了斑点状和片状的颜色; 在 70 V 电压下, 0-70V、1-70V、2-70V 试样分别呈现黄色、黄灰色、紫色和黄色, 与 35 V 电压下试样相似, 0-70V 试样颜色分布较均匀, 而 1-70V 和 2-70V 试样颜色分布不均匀, 尤其是 2-70V 试样呈现出黄色和紫色两种差别较大的颜色。

未经热处理的试样氧化后无明显色差, 而热处理后的试样氧化后颜色分布不均匀, 不同颗粒 (或片层) 区域呈现不同的颜色, 且颜色较未热处理的试样更为鲜艳。这是由于高温结晶导致颗粒 (或片层) 尺寸和取向的差异, 使得不同区域的氧化膜生长速率不同^[23-24]。

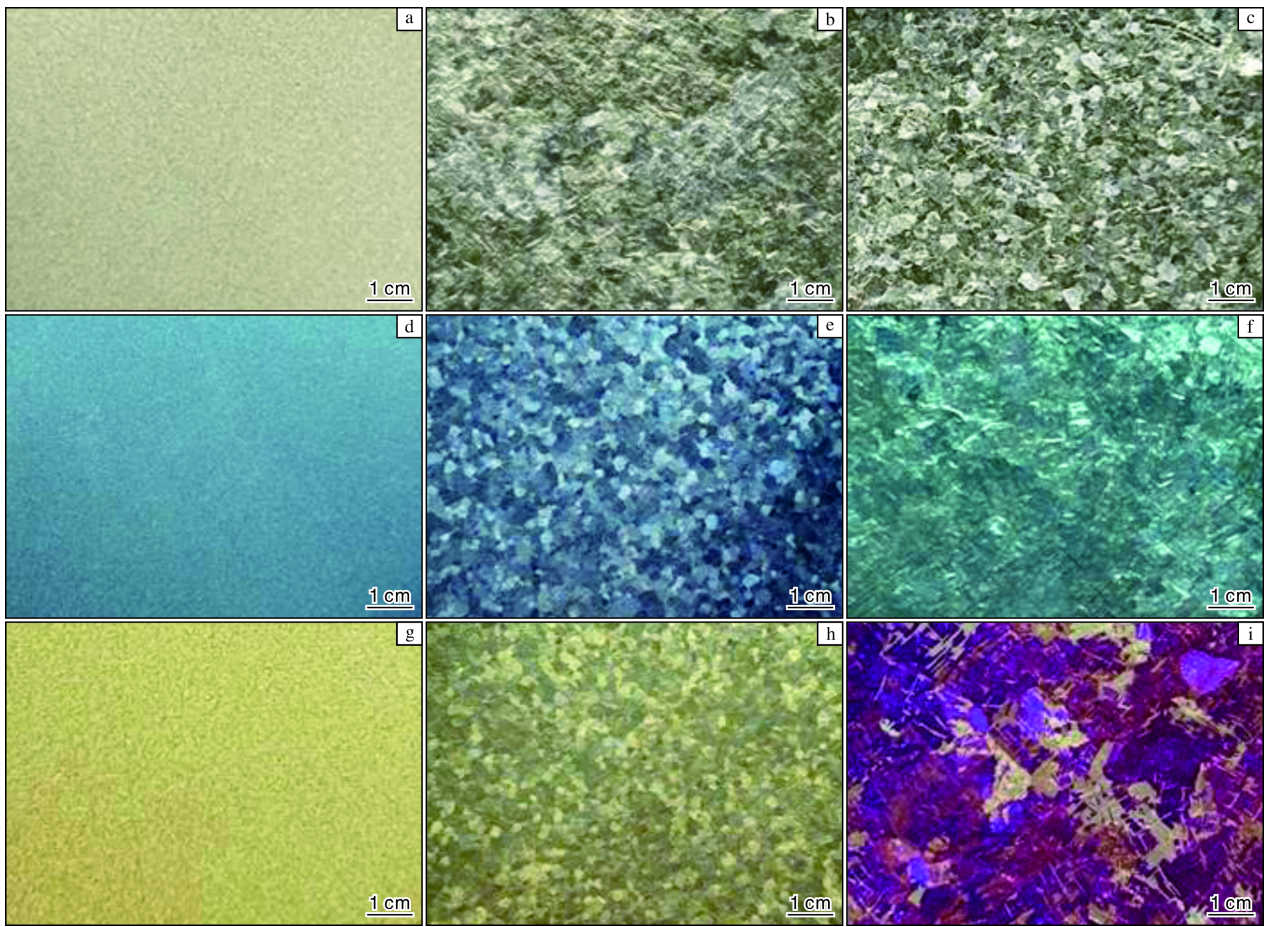


图 1 不同热处理试样阳极氧化前后的宏观照片

Fig.1 Macroscopic photographs of specimens before and after anodizing under different heat treatments:

(a) 0-0V; (b) 1-0V; (c) 2-0V; (d) 0-35V; (e) 1-35V; (f) 2-35V; (g) 0-70V; (h) 1-70V; (i) 2-70V

较大的颗粒或片层结构可提供更多的活性反应位点,从而加速氧化膜的生长;而较小的颗粒或片层则可能抑制氧化膜的快速形成。根据光的薄膜干涉机理^[25],2-35V 试样表面氧化膜厚度大于 1-35V 试样,同样 2-70V 试样表面氧化膜厚度大于 1-70V 试样,且 2-70V 试样紫色区域的氧化膜厚度大于黄色区域^[26-27]。在相同条件下,片层状基体生成的氧化膜更厚,这是由于片层状结构提供了更大的表面积,使得氧化反应更加充分。此外,片层状基体在高电压下氧化后,不同区域颜色差异较大,这是因为高电压加速了氧化反应^[7],使得不同取向的片层之间氧化膜生长速度差异更加明显。因此,热处理后颗粒状基体和片层状基体在阳极氧化后颜色及色彩均匀度不同,颜色分布与其大小、取向以及表面形貌相关。

2.2 微观结构分析

图 2 为不同热处理试样的 SEM 形貌。从图 2 可以看出,未经热处理的试样表面平整,热处理后试样呈现出台阶状,台阶具有明显的方向性,且 2-0V 试样的

台阶尺寸明显大于 1-0V 试样,这与图 1 中的宏观形貌相符合。在热处理过程中,钛原子活动性增强,开始重新排列和结晶,不同区域的结晶速度和方向存在差异,导致形成台阶状结构^[28]。在相同热处理温度下,增加热处理次数,台阶尺寸明显增大,这是由于 TA1 基体第二相粒子数较少,颗粒长大阻力较小,随着热处理时间延长,界面继续迁移^[29]。台阶为阳极氧化膜的生长提供了有利条件。

图 3 为不同热处理试样阳极氧化后的 SEM 形貌。从图 3a、3d 可以看出,未经热处理的试样在 35 V 和 70 V 氧化条件下均呈现颗粒状,且颗粒分布相对均匀。0-70V 试样颗粒更加平整,彼此之间界限相对模糊,这是因为更强的电场驱动力促使氧化反应更加剧烈。如图 3b、3c 所示,在 35 V 电压下,1-35V 和 2-35V 试样表面有明显的覆盖物,且氧化膜均沿着基体台阶生长,受基体形貌的影响较小,这是因为在结晶区域内,原子排列和晶体取向为氧化反应提供了相对规整的路径,使得氧化膜有序生长,从而形成平整光滑且

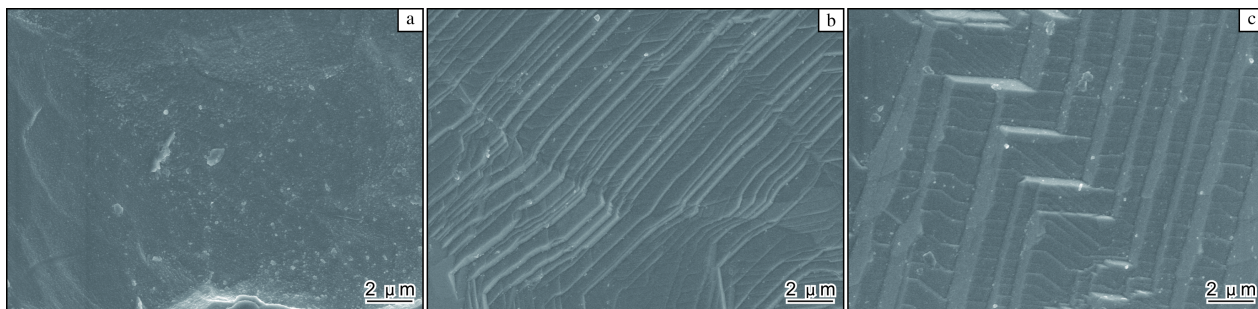


图2 不同热处理试样的 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphologies of specimens under different heat treatments: (a) 0-0V; (b) 1-0V; (c) 2-0V

具有特定生长方向的形貌^[30]。如图 3e、3f 所示，在 70 V 电压下，1-70V 试样氧化后表面形貌呈颗粒状，颗粒主要集中在台阶界面位置，台阶内相对平整或颗粒生长现象不明显，而 2-70V 试样表面氧化膜相对连续，表明片层状基体结构有利于氧化膜的连续生长。一方面，表面形貌由颗粒状向片层状转变，可能使得晶体结构中的缺陷数量减少，降低了氧化膜生长相关能量^[31]；另一方面，台阶界面区域的畸变程度大，位

错密度高，原子平均能量高于台阶内部，因此台阶内部和界面区域的阳极氧化反应速度存在差异^[32]，这也是图 1 中试样颜色产生差异的主要原因之一。但 2-70V 试样表面氧化膜有微裂纹产生，一是由于氧化膜溶解速率大于生成速率，凹陷发展成了裂纹；二是由于在 70 V 的高电压下进行阳极氧化的过程中，膜内应力的积累或基体与氧化膜之间热膨胀系数不匹配等因素所致^[32-33]。

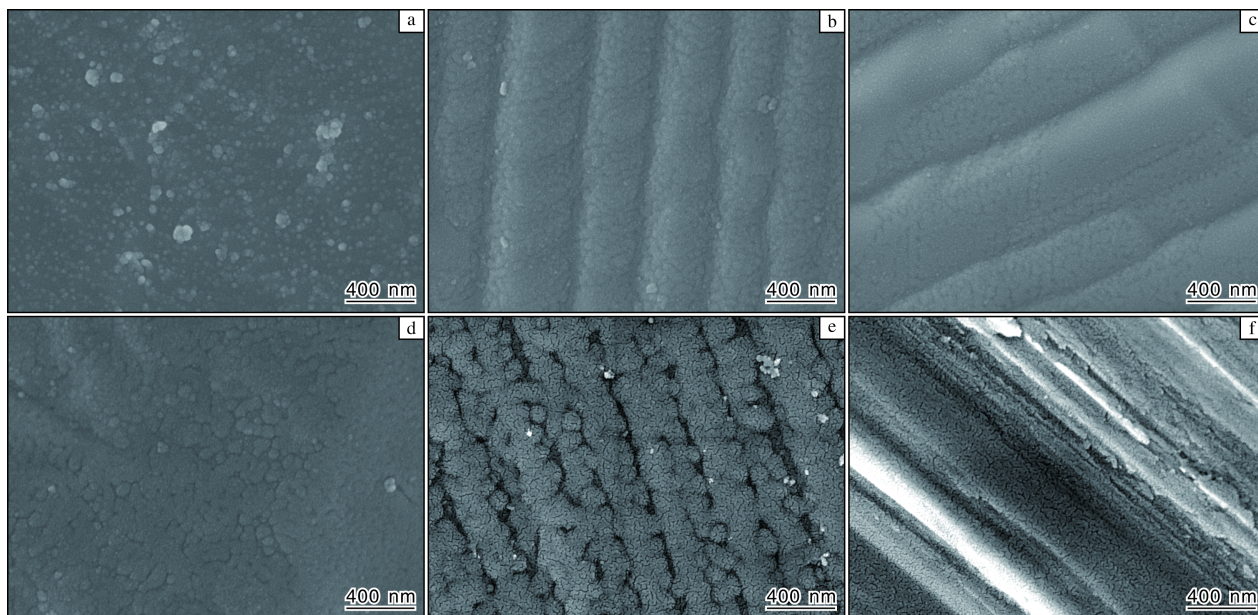


图3 不同热处理试样阳极氧化后的 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphologies of anodized specimens under different heat treatments: (a) 0-35V; (b) 1-35V; (c) 2-35V; (d) 0-70V; (e) 1-70V; (f) 2-70V

表 2 为不同热处理条件下试样的表面粗糙度。从表 2 可以看出，随着热处理次数的增加，基体表面粗糙度越高，其中 2-0V 试样基体表面粗糙度最大。表面粗糙度对氧化膜的生长也具有较大的影响，一方面，粗糙度较大时，表面有更多的微观凸起和凹陷，实际的反应表面积增加，反应活性位点增多，从而加速了

氧化膜的生长^[34]；另一方面，粗糙度较大会导致氧化膜不均匀，基体的凸起部分由于与电解液的接触更直接，电场分布和离子扩散情况与凹陷部分存在差异^[35]，使得氧化膜在厚度和致密程度上不一致，表现为同一氧化条件下试样色差较大，但粗糙度过大可能会导致氧化膜产生微裂纹。因此，2-70V 试样氧化膜最厚，

可呈现出紫色,且其微观上也更易生长出连续氧化膜,而 0-70V 和 1-70V 试样呈现出黄色,氧化膜厚度相对较低,微观上仅表现为颗粒状。

表 2 不同热处理条件下试样的表面粗糙度 (μm)

Table 2 Surface roughness of specimens under different heat treatment conditions

0-0V	1-0V	2-0V
0.91	2.19	3.62

2.3 物相分析

图 4 为不同热处理试样经阳极氧化后的拉曼光谱图。在 35 V 电压下,热处理与未热处理的 3 个试样均未出现锐钛矿 TiO_2 特征峰,这是因为电场强度较弱, Ti^{4+} 和 O^{2-} 等离子的迁移速率较低,难以形成锐钛矿相晶体结构,氧化膜主要是非晶态物质^[36]。在 70 V 电压下,0-70V 试样未出现锐钛矿 TiO_2 特征峰,而 1-70V 和 2-70V 试样具有较好的结晶性,表现出锐钛矿 TiO_2 特征峰^[37],表明对基体进行热处理有利于锐钛矿 TiO_2 氧化膜的形成。此外,2-70V 试样的特征峰强度远高于 1-70V 试样,说明两次热处理使基体氧化形成的锐钛矿相晶化结构更加完整或含量更高,氧化膜更厚。热处理不仅会增大基体表面的粗糙度,还能提高基体中原子扩散能力^[38],同时释放基体内应力,避免应力导致结构破坏。这些因素共同促进了 TiO_2 氧化膜的生成。

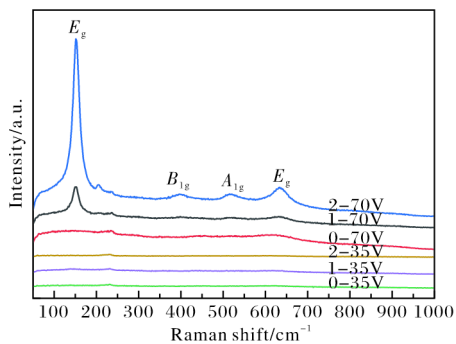


图 4 不同热处理试样经不同阳极氧化后的拉曼光谱图

Fig.4 Raman spectra of anodized specimens under different heat treatments

3 结 论

(1) 随着热处理次数的增加,TA1 纯钛基体表面颗粒尺寸增大,由颗粒状发展为片层状,表面粗糙度增大,后续相同阳极氧化条件下形成的膜层呈现的色彩更鲜亮。

(2) 微观上,基体表面颗粒尺寸和粗糙度越大,

阳极氧化时越容易生成连续的氧化膜。宏观上,不同颗粒尺寸和粗糙度的基体在阳极氧化后颜色均匀度不同,颜色分布与基体表面形貌及颗粒或片层状结构的大小、取向相关,片层状结构试样在高电压下氧化后色彩更加丰富,也呈现出区域色差。

(3) 热处理后的试样在高电压条件下氧化,表面粗糙度越大,越容易形成锐钛矿相晶体。

参考文献 References

- [1] Xu J B, Zhang B W, Qu W T, et al. Advancements and applications of laser surface treatment on titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(5): 1296-1309.
- [2] 南榕,蔡建华,杨健,等. 钛及钛合金腐蚀行为研究进展[J]. 钛工业进展, 2023, 40(5): 40-48.
- [3] 辛社伟,刘向宏,张思远,等. 钛合金低成本化技术的研究与发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(11): 3971-3980.
- [4] Simka W, Sadkowski A, Warczak M, et al. Characterization of passive films formed on titanium during anodic oxidation[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(24): 8962-8968.
- [5] Aloia Games L, Gomez Sanchez A, Jimenez-Pique E, et al. Chemical and mechanical properties of anodized cp-titanium in $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4/\text{NH}_4\text{F}$ media for biomedical applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(23): 4791-4798.
- [6] Hlinka J, Dostalova K, Cabanova K, et al. Electrochemical, biological, and technological properties of anodized titanium for color coded implants[J]. Materials, 2023, 16: 6020632.
- [7] Balaji U, Pradhan S K. Titanium anodisation designed for surface colouration-systemisation of parametric interaction using response surface methodology[J]. Materials & Design, 2018, 139: 409-418.
- [8] Mohan L, Dennis C, Padmapriya N, et al. Effect of electrolyte temperature and anodization time on formation of TiO_2 nanotubes for biomedical applications[J]. Materials Today Communications, 2020, 23: 101103.
- [9] Winiarski J, Pawlyta M, Szczygieł B. Titanium anodization in deep eutectic solvents: the effect of anodizing time on the morphology and structure of anodic layers[J]. Applied Surface Science, 2021, 577: 151892.
- [10] Wu G L, Wang Y, Liu J H, et al. Influence of the Ti alloy substrate on the anodic oxidation in an environmentally-friendly electrolyte[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344: 680-688.
- [11] Vera M L, Avalos M C, Rosenberger M R, et al. Evaluation of the influence of texture and microstructure of titanium

- substrates on TiO₂ anodic coatings at 60V[J]. *Materials Characterization*, 2017, 131: 348-358.
- [12] Kocabas M. Effect of surface finish on the colour anodising of Ti-6Al-4V at various voltages[J]. *Transactions of the IMF*, 2023, 101(1): 6-13.
- [13] 陈均焕. 纯钛表面超疏水着色膜工艺及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [14] 梁立业. TC4 钛合金阳极氧化着色工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
- [15] Zhou C, Zhan L H, Li H, et al. Influence of temperature on creep behavior, mechanical properties and microstructural evolution of an Al-Cu-Li alloy during creep age forming[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28: 2285-2294.
- [16] Wei K, Xiao L R, Gao B, et al. Effect of aging temperature on the hardening behavior and precipitation evolution of Mg-10Gd alloy[J]. *Materials Characterization*, 2023, 196: 112580.
- [17] Lee S W, Park C H, Hong J K, et al. Effect of solution treatment and aging conditions on tensile properties of Ti-Al-Fe-Si alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 697: 158-166.
- [18] 鲁媛媛, 张怡, 郭帅, 等. 固溶温度对 3D 打印 TC4 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(11): 171-176.
- [19] 高星, 张宁, 丁燕, 等. 热处理时间对激光选区成形 TC4 钛合金组织及力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(9): 12-17.
- [20] Lu B, Li Y, Wang H Y, et al. Effects of cooling rates on the solidification behavior, microstructural evolution and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 2532-2548.
- [21] Yeh K C, Chan C H. Combining SSVD and subsequent heat treatment processes to fabricate high-quality CsPbBr₃ perovskite films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(13): 135303.
- [22] 白洁. TA2 钛合金微观组织结构与耐腐蚀性能的关联性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [23] Hermann R, Uhlemann M, Wendrock H, et al. Magnetic field controlled single crystal growth and surface modification of titanium alloys exposed for biocompatibility[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 318(1): 1048-1052.
- [24] Leonardi S, Russo V, Li Bassi A, et al. TiO₂ nanotubes: interdependence of substrate grain orientation and growth rate[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(3): 1662-1668.
- [25] Van Gils S, Mast P, Stijns E, et al. Colour properties of barrier anodic oxide films on aluminium and titanium studied with total reflectance and spectroscopic ellipsometry[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 185(2): 303-310.
- [26] Diamanti M V, Pozzi P, Randone F, et al. Robust anodic colouring of titanium: effect of electrolyte and colour durability[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 1085-1091.
- [27] Diamanti M V, Del Curto B, Pedferri M. Interference colors of thin oxide layers on titanium[J]. *Color Research and Application*, 2008, 33(3): 221-228.
- [28] Tang Q H, Qi P, Wang T B, et al. Formation mechanism of lamellar bimodal microstructure and mechanical property in the high temperature near α titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 938: 168289.
- [29] 张舒. 阳极氧化法 TiO₂ 纳米管多孔结构的形成机制及孔参数控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [30] 邢俊恒. 钛表面阳极氧化物的生长、结构及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [31] Ferreira C P, Gonçalves M C, Caram R, et al. Effects of substrate microstructure on the formation of oriented oxide nanotube arrays on Ti and Ti alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 285: 226-234.
- [32] Zhang W G, Kang K, Wei A L, et al. Anodizing-induced cracking in the preparation of TiO₂ nanotube arrays[J]. *Micro and Nanostructures*, 2023, 181: 207626.
- [33] 慕伟意. 电解液内含物与钛表面阳极氧化膜早期结晶的关系[J]. *钛工业进展*, 2012, 29(6): 43.
- [34] Senaslan F, Tasdemir M, Celik A, et al. Enhanced wear resistance and surface properties of oxide film coating on biocompatible Ti45Nb alloy by anodization method[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 469: 129797.
- [35] Fan M, La Mantia F. Effect of surface topography on the anodization of titanium[J]. *Electrochemistry Communications*, 2013, 37: 91-95.
- [36] 严继康, 杨钢, 唐婉霞, 等. 阳极氧化电压对钛合金 TC4 阳极氧化 TiO₂ 膜层表面的影响[J]. *材料研究学报*, 2015, 29(12): 895-903.
- [37] 肖萍, 郑少波, 尤静林, 等. 钛氧化物结构及其拉曼光谱表征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(5): 936-939.
- [38] 孙曙宇. 热处理以及等温压缩过程中 TC18 钛基复合材料组织性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.