

Ti₂AlNb 合金微弧氧化电解液优化及耐磨性研究

刘欢欢^a, 王帅星^{a,b}, 刘小辉^a, 赵晴^{a,b}, 余丽霞^a, 高傲^a, 钟宏^a

(南昌航空大学 a.材料科学与工程学院 b.轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063)

摘要: **目的** 优化 Ti₂AlNb 合金微弧氧化的电解液配方, 提高 Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜的耐磨性。**方法** 借助 SEM、EDS、XRD 研究硅酸盐-磷酸盐电解液体系中 Na₂MoO₄ 浓度对 Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜形貌、成分及相结构的影响。利用 CFT-I 型磨损试验机测试不同微弧氧化膜的摩擦磨损性能。**结果** 电解液中添加 Na₂MoO₄ 后, 微弧氧化膜的生长速率增加, 膜层中出现了 Mo 元素且含量也逐渐增加。Na₂MoO₄ 的加入降低了 Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜的摩擦系数及比磨损率, 但微弧氧化膜的耐磨性并非随 Na₂MoO₄ 含量线性提高。含 6 g/L Na₂MoO₄ 的体系中, 微弧氧化膜摩擦系数低至 0.25 左右, 比磨损率仅为 1.20×10⁻³ mm³/(N·m), 表面呈轻微磨粒磨损特征。**结论** 电解液中的 Na₂MoO₄ 参与了成膜过程, 对 Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜的生长有显著的促进作用, 有效地改善了 Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜的耐磨性。

关键词: Ti₂AlNb 合金; 微弧氧化; Na₂MoO₄; 耐磨性

中图分类号: TG174.451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0085-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.014

Optimization of Micro-arc Oxidation Electrolyte for Ti₂AlNb Alloy and Wear Resistance of Coatings

LIU Huan-huan^a, WANG Shuai-xing^{a,b}, LIU Xiao-hui^a,
ZHAO Qing^{a,b}, YU Li-xia^a, GAO Ao^a, ZHONG Hong^a

(a.School of Materials Science and Engineering, b.National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize micro-arc oxidation (MAO) electrolyte formula for Ti₂AlNb alloy and improve wear resistance of MAO coatings on Ti₂AlNb alloy. Effects of Na₂MoO₄ concentration on morphology, element composition and phase structure of MAO coatings on Ti₂AlNb alloy were investigated in silicate-phosphate electrolyte system by virtue of SEM, EDS and XRD. Friction and wear properties of MAO coatings were tested with ball-disc wear tester. After the addition of Na₂MoO₄ in the electrolyte, growth rate of MAO coatings increased, Mo element appeared on the MAO coatings and Mo content increased gradually. Friction coefficient and volume wear rate of MAO coatings were reduced as Na₂MoO₄ was added in the electrolyte. However, the wear resistance of MAO coatings did not increase linearly with the increase of Na₂MoO₄ content.

收稿日期: 2017-05-28; 修订日期: 2017-06-12

Received: 2017-05-28; Revised: 2017-06-12

基金项目: 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放基金 (gf201501002); 江西省教育厅科学技术项目 (GJJ160712); 国家自然科学基金 (51361025)

Fund: Open Foundation of National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology (gf201501002), Science and Technology Project of Education Ministry of Jiangxi Province (GJJ160712) and National Natural Science Foundation of China (51361025)

作者简介: 王帅星 (1985—), 男, 博士, 主要研究方向为有色金属表面改性及电化学加工。

Biography: WANG Shuai-xing (1985—), Male, Doctor, Research focus: surface modification of non-ferrous metal and electrochemical machining.

In the system with 6 g/L Na_2MoO_4 , the friction coefficient of MAO coating reduced to nearly 0.25, and the volume wear rate was only $1.20 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and the surface featured in slight abrasive wear. Na_2MoO_4 in the electrolytes participates in the film-forming process, plays an important role in promoting growth of MAO coatings on Ti_2AlNb alloy and can effectively improve its wear resistance.

KEY WORDS: Ti_2AlNb alloy; micro-arc oxidation; Na_2MoO_4 ; wear resistance

TiAl 系金属间化合物因较高的比强度、断裂韧性、蠕变抗力以及抗高温氧化性能,广泛应用于航空航天领域^[1-3]。 Ti_2AlNb (Ti-22Al-25Nb) 合金作为 TiAl 系金属间化合物的一种,以优异的高温力学性能和抗氧化性能,在高温结构材料中占据重要地位。然而,在服役过程中的耐磨性较差,特别是由磨粒磨损带来的疲劳裂纹问题,很大程度上限制了其进一步的推广和应用。目前,普遍采用等离子喷涂^[4]、渗铝^[5]、渗氮^[6]等表面处理技术来改善 TiAl 基金属间化合物的综合力学性能,但这些方法存在着如结合力较差等问题。

微弧氧化(MAO)是近年发展较快的一种表面强化技术,是将 Al、Mg、Ti、Nb 等合金置于电解液中使其表面产生弧光放电,在热化学、等离子体化学和电学的共同作用下生长出以基体金属氧化物为主的陶瓷膜的技术^[7,8]。近年, TiAl 系金属间化合物的微弧氧化逐渐受到关注^[9-12],王元红等^[13-16]对 Ti_2AlNb 合金的微弧氧化电解液及两步控压工艺作了研究。然而, Ti_2AlNb 合金的微弧氧化目前仍存在膜层生长速率慢、均匀性差等问题。研究表明,微弧氧化膜的生长速率、结构及组成与电解液成分密切相关^[17,18]。因此,本文拟通过对硅酸盐-磷酸盐电解液的调整和优化来调控膜层的生长过程和成分,进而改善 Ti_2AlNb 合金微弧氧化膜的耐磨性。

1 试验

试验材料为 Ti_2AlNb 合金,其主要成分为:41.94% Ti、9.34% Al、48.72% Nb (按原子质量百分比计)。尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的试样经 $240^\# \sim 1000^\#$ 水磨砂纸逐次打磨后,置于酒精中超声除油 25 min,清洗、干燥。微弧氧化处理采用 WHD-20 型直流脉冲电源,不锈钢板为阴极,试样为阳极,电流密度 10 A/dm^2 ,频率 600 Hz,占空比 50%。基础电解液为 $8 \text{ g/L Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} + 6 \text{ g/L}(\text{NaPO}_3)_6$,分别加入 0、2、6、10 g/L Na_2MoO_4 ,并定义为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]。微弧氧化过程中,通过循环冷却水控制电解液温度在 30°C 以下。

采用 Elcometer 456 涡流测厚仪对膜层厚度进行测量,对 10 个采样点取平均值。使用 JB-6C 型粗糙度轮廓仪测量微弧氧化膜的粗糙度,取样长度 0.08

mm,测量长度 10 mm。通过 Nova Nano SEM450 场发射电子扫描显微镜(FE-SEM)观察陶瓷涂层的显微结构。利用 INCA 型能谱仪(EDS)及 Bruker D8-Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)分析膜层的表面成分及相结构。采用 CFT-I 型试验机对氧化膜进行摩擦测试。选用 $\phi 5 \text{ mm}$ 的 Si_3N_4 球(65HRC)作为摩擦副,转速 300 r/min,载荷 2 N,磨损轨迹半径 2.5 mm,磨损时间 20 min。磨损后采用 JB-6C 粗糙度轮廓仪测量磨痕剖面轮廓,借助 Origin 软件对磨痕轮廓积分得到剖面面积 $A (\text{mm}^2)$,按公式(1)算出比磨损率 $K (\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m}))$ 。

$$K = \frac{V}{PS} = \frac{2\pi r A}{PS} \quad (1)$$

式中, r 为磨痕轨道半径(mm), V 为磨损体积(mm^3), P 为载荷(N), S 为滑动距离(m)。

2 结果与讨论

2.1 Na_2MoO_4 对微弧氧化膜生长过程的影响

图 1 为 Na_2MoO_4 对 Ti_2AlNb 合金微弧氧化膜生长过程中槽电压及膜层厚度的影响。由图可知,无论电解液中是否添加 Na_2MoO_4 , Ti_2AlNb 合金微弧氧化过程中槽电压的变化规律类似。根据电压变化及放电现象,可大致分为阳极氧化、火花放电、弧光放电 3 个阶段。不同电解液中, Ti_2AlNb 微弧氧化膜的厚度均随氧化时间的增加而增加。当电解液中不含 Na_2MoO_4 时,膜层生长速率较小,氧化 30 min 时膜厚仅有 $8 \mu\text{m}$;当电解液中加入 Na_2MoO_4 后, Ti_2AlNb 合金的微弧氧化起弧时间明显缩短,起弧电压降低,相同氧化时间内,膜层厚度明显增加。在含 6 g/L Na_2MoO_4 的体系中氧化 30 min 时,微弧氧化膜的厚度约为基础电解液中膜厚的 3.5 倍,即 Na_2MoO_4 对膜层的生长具有明显的促进作用。

有研究表明, Na_2MoO_4 具有较强的吸附能力。氧化过程中 MoO_4^{2-} 易吸附在试样表面,形成外来杂质放电离子,产生等离子放电^[19]。电解液中 Na_2MoO_4 浓度增加时, MoO_4^{2-} 吸附量增大,这在一定程度上增大了放电发生的频率,提高了放电强度,单位时间内产生大量的熔融物喷射到膜层表面,加快了膜层的生长。此外, Na_2MoO_4 的添加提高了电解液的导电能力,

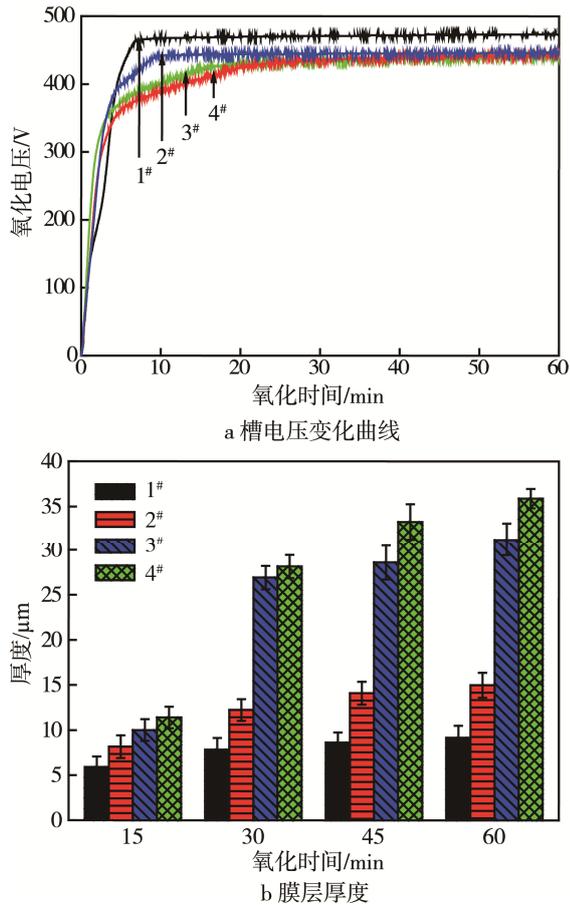


图 1 不同电解液中 Ti₂AlNb 合金微弧氧化槽电压变化曲线及膜层厚度

Fig.1 Cell voltage variation curve of MAO process (a) and coating thickness (b) for Ti₂AlNb alloy in different electrolytes

降低了起弧电压, 缩短了发生击穿放电所需的时间, 进而促进了 Ti₂AlNb 微弧氧化膜的生长。

2.2 Na₂MoO₄对微弧氧化膜微观形貌的影响

图 2 为 Ti₂AlNb 合金在不同电解液中氧化 30 min 形成的微弧氧化膜的表面和截面形貌。可以看出, 所有电解液体系下, Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜表面均分布着许多孔洞及少许微裂纹。一般认为, 孔洞是由放电通道残留所致, 而微裂纹则是熔融物在冷却过程中产生的热应力造成。硅酸盐-磷酸盐电解液中, 微弧氧化膜表面微孔较为密集细小(图 2a), 但膜层较薄, 仅为 8 μm 左右, 并且厚度不均(图 2e)。电解液中加入 Na₂MoO₄ 后, 微弧氧化膜表面放电微孔尺寸增大, 微孔数量减少, 表现为膜层粗糙度增加。基础电解液中, 氧化膜的粗糙度 $Ra \approx 0.93 \mu\text{m}$, 而含 2、6、10 g/L Na₂MoO₄ 中制备的氧化膜的 Ra 值分别为 1.35、1.77 和 2.09 μm。

此外, 图 2e~2f 表明微弧氧化膜厚度随 Na₂MoO₄ 含量的增加而不断增加, 但膜层致密性逐渐变差。当 Na₂MoO₄ 质量浓度为 2 g/L 时, 膜层较为均匀、致密, 内部未见大的孔洞及裂纹(图 2f)。当 Na₂MoO₄ 含量达到 10 g/L 时, 膜厚约为基础电解液的 4 倍左右, 但膜层致密度差, 内部存在较多孔洞。这是因为电解液中 Na₂MoO₄ 浓度较高时, 放电异常剧烈, 产生大量的熔融物堆积在表面, 使膜层在厚度上升的同时也变得较为粗糙, 且强烈的放电会在膜层局部造成不可恢复的损伤, 使表面留下大的放电孔洞(图 2d)。

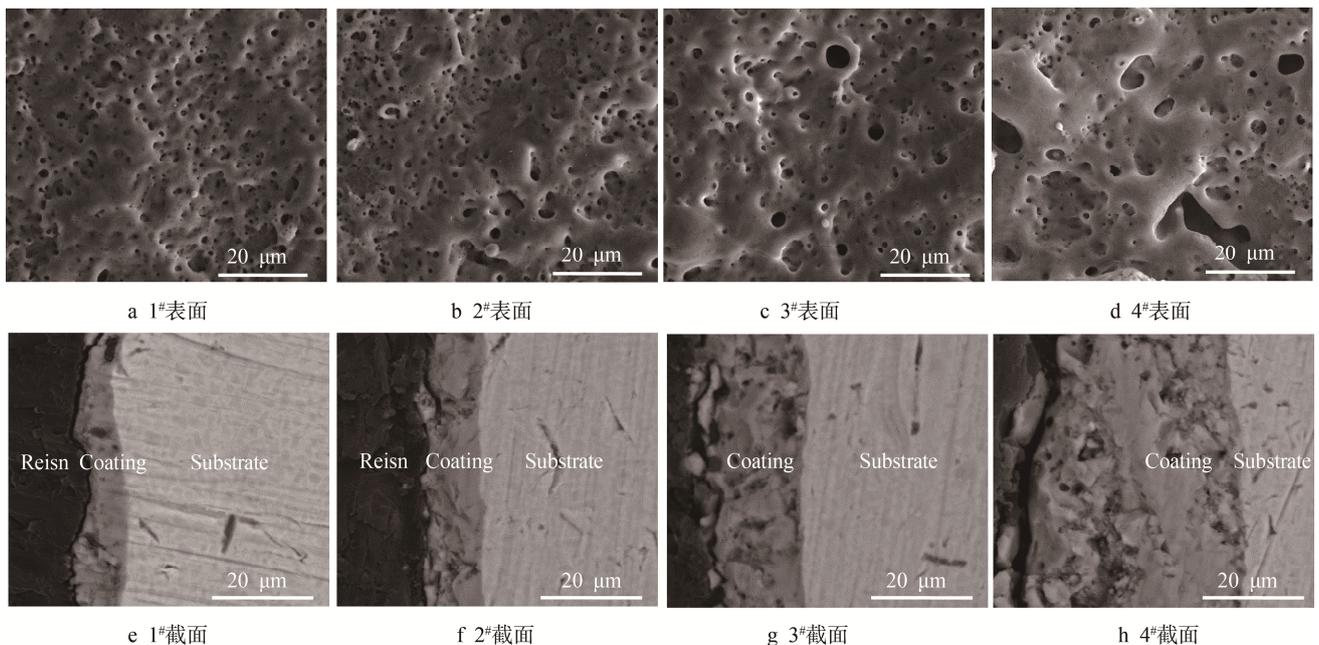


图 2 不同电解液中形成的 Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜的表面和截面形貌

Fig.2 Surface (a, b, c, d) and cross-sectional morphology (e, f, g, h) of MAO coatings on Ti₂AlNb alloy in different electrolytes

2.3 Na₂MoO₄对微弧氧化膜成分的影响

图3为不同电解液中制备的Ti₂AlNb微弧氧化膜表面元素分析结果。可知,硅酸盐-磷酸盐电解液体系中制备的Ti₂AlNb合金微弧氧化膜由O、Ti、Nb、Si、P、Al等元素组成;电解液中加入Na₂MoO₄后,膜层表面出现了Mo元素,且Mo的含量随电解液中MoO₄²⁻浓度的增加而增多。众所周知,微弧氧化膜层的生长过程同时包括基体金属的氧化和电解质化合物的沉积,其中,膜层中的Ti、Al、Nb元素来源于基体金属在等离子体放电作用下的氧化,而Si、P、Mo等元素则来源于电解液中的阴离子在试样表面发生的吸附、脱水、缩合等一系列复杂的反应^[10,18]。

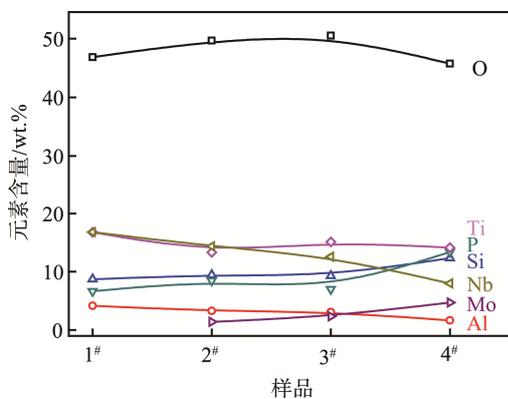
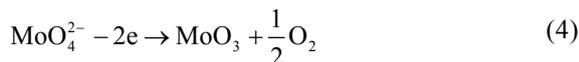
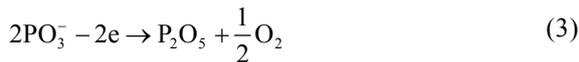


图3 不同电解液中制备的Ti₂AlNb微弧氧化膜表面元素分布

Fig.3 Surface element analysis of MAO coatings formed in different electrolytes for Ti₂AlNb alloy

图4为不同微弧氧化膜的XRD谱,由图可知,硅酸盐-磷酸盐电解液中制备的微弧氧化膜主要由金红石TiO₂、锐钛矿TiO₂及少量的Nb₂O₅、Al₂O₃组成。当电解液中添加Na₂MoO₄后,膜层中出现了少量MoO₃, MoO₃衍射峰强度随Na₂MoO₄浓度的增加而增强,与EDS分析结果一致。分析认为,溶液中的SiO₃²⁻、PO₃³⁻及MoO₄²⁻依靠强电场及吸附作用进入放电通道中,发生如下反应:



为验证MoO₄²⁻转变成MoO₃的可行性,从转变温度进行理论计算^[19]。利用标准生成吉布斯函数,令任意温度下处于标准态时各种最稳定单质的生成吉布斯函数为零。由于温度变化对ΔH_m[⊖]和ΔS_m[⊖]的影响不大,理论计算中以298 K时的ΔH_m[⊖]和ΔS_m[⊖]近似代替微弧氧化过程中的ΔH_m[⊖](T)和ΔS_m[⊖](T),查《兰氏化学手册》可知:

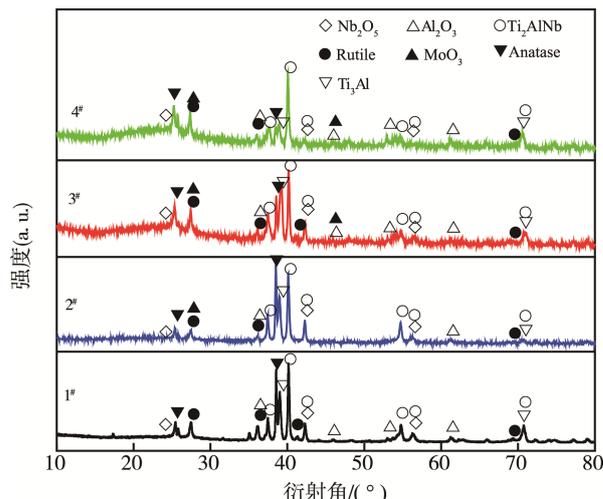


图4 不同电解液中制备的Ti₂AlNb微弧氧化膜的XRD谱
Fig.4 XRD pattern of MAO coatings on Ti₂AlNb alloy in different electrolytes

$$\Delta H_m^\ominus(298\text{ K}) = \Delta_f H_m^\ominus(\text{MoO}_3, \text{c}, 298\text{ K}) - \Delta_f H_m^\ominus(\text{MoO}_4^{2-}, \text{aq}, 298\text{ K}) = [(-754.2) - (-997.9)] \text{ kJ/mol} = 252.7 \text{ kJ/mol} \quad (5)$$

$$\Delta S_m^\ominus(298\text{ K}) = \Delta S_m^\ominus(\text{MoO}_3, \text{c}, 298\text{ K}) + \Delta S_m^\ominus(\text{O}_2, \text{g}, 298\text{ K}) - \Delta S_m^\ominus(\text{MoO}_4^{2-}, \text{aq}, 298\text{ K}) = 77.8 + 205.15 - 27.2 \text{ J/mol} = 0.25575 \text{ kJ/mol} \quad (6)$$

$$\Delta G_m^\ominus(T) \approx \Delta H_m^\ominus(298\text{ K}) - T \times \Delta S_m^\ominus(298\text{ K}) \quad (7)$$

$$\Delta G_m^\ominus(T) \approx 257.2 - 2273 \times 0.25575 = -324.12 \text{ kJ/mol} \quad (8)$$

由此可见, Ti₂AlNb合金微弧氧化过程中电解液中的MoO₄²⁻转变成MoO₃具有理论可行性。

2.4 Na₂MoO₄对微弧氧化膜耐磨性的影响

图5为不同电解液体系中制备的Ti₂AlNb微弧氧化膜的摩擦系数及比磨损率。从图5可知, Ti₂AlNb合金的摩擦系数相对较高,在0.50~0.60之间剧烈震荡,比磨损率高达2.04×10⁻³ mm³/(N·m)。Ti₂AlNb合金在硅酸盐-磷酸盐溶液(1#)中微弧氧化处理后,表面摩擦系数明显降低且较为平稳,磨损率下降至1.35×10⁻³ mm³/(N·m)。当电解液中加入Na₂MoO₄后,微弧氧化膜的摩擦系数、比磨损率进一步降低,摩擦系数较未添加之前下降了20%左右。但氧化膜的耐磨性并非随Na₂MoO₄含量线性提高,摩擦系数和比磨损率均呈现出先下降后上升的趋势。当Na₂MoO₄质量浓度为6 g/L时,氧化膜的摩擦系数和比磨损率均最低,分别为0.25和1.20×10⁻³ mm³/(N·m)。

图6为相应的磨损形貌,由图可知, Ti₂AlNb合金表面磨损严重,呈现较深的犁沟状,有明显的磨粒磨损特征。经微弧氧化处理后, Ti₂AlNb合金的磨损程度明显减轻,且Na₂MoO₄参与下制备的微弧氧化膜的耐磨性明显更好。含2~6 g/L Na₂MoO₄体系中的微弧氧化膜与Si₃N₄球摩擦20 min后,表面无明显的

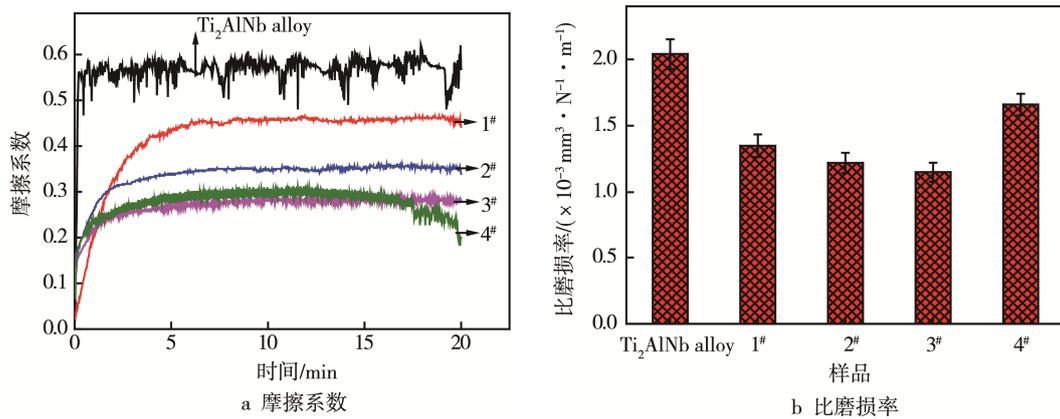


图 5 Ti₂AlNb 合金及不同微弧氧化膜的摩擦系数与比磨损率

Fig.5 Friction coefficient (a) and specific wear rate (b) of Ti₂AlNb alloy and different MAO coatings

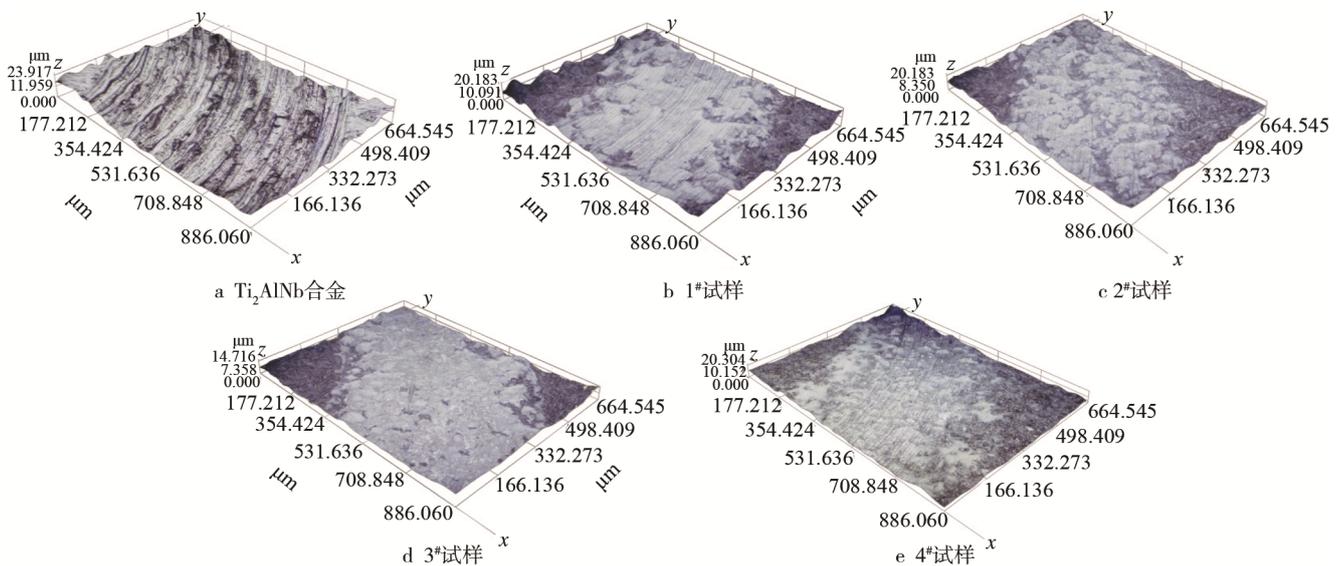


图 6 Ti₂AlNb 合金及不同微弧氧化膜与 Si₃N₄ 对磨后的表面磨损形貌

Fig.6 Surface wear morphology of Ti₂AlNb alloy and different MAO coatings in different electrolytes after grinding Si₃N₄

磨粒磨损特征, 仅表现出轻微的疲劳磨损特征。当 Na₂MoO₄ 质量浓度超过 6 g/L 后, 氧化膜的磨损反而加重, 表面又出现了磨粒磨损留下的细小犁沟。

微弧氧化膜层的摩擦磨损行为与其表面状态(如粗糙度)、厚度及致密度等因素密切相关^[7,16,21]。硅酸盐-磷酸盐体系中制备的 Ti₂AlNb 合金微弧氧化膜的摩擦系数显著低于 Ti₂AlNb 合金, 表明微弧氧化处理提高了 Ti₂AlNb 合金的耐磨性。然而, 由于此氧化膜较薄(图 1 和图 2), 在磨损过程中较早出现破损, 造成比磨损率较高(图 5b), 对基体无法起到有效的防护作用。当电解液中加入少量 Na₂MoO₄ (2 g/L) 时, 氧化膜较为致密均匀, 粗糙度相对较低, 摩擦系数及比磨损率显著下降。当 Na₂MoO₄ 质量浓度为 6 g/L、氧化时间 30 min 时, 膜层厚度达到约 20 μm, 表面孔洞分布较为均匀, 内部无明显缺陷, 在摩擦磨损过程中起到了良好的减摩耐磨作用。然而, 当电解液中 Na₂MoO₄ 质量浓度达到 10 g/L 时, 尽管膜层厚

度有了大幅提高, 但是摩擦系数及表面粗糙度均显著增高, 膜层质量下降(图 2d 和 2h)。在进行摩擦磨损试验时, 膜层表面疏松的凸起较早地被磨掉, 硬质细小的氧化物颗粒在摩擦副之间形成第三体, 摩擦过程对基体产生犁切作用^[21], 摩擦系数及比磨损率均有所上升。因此, 具有一定厚度且均匀致密的微弧氧化膜可以对 Ti₂AlNb 合金起到良好的防护作用。

3 结论

- 1) 硅酸盐-磷酸盐电解液中, Ti₂AlNb 合金的微弧氧化大致可分为阳极氧化、火花放电、弧光放电 3 个阶段。基础电解液中, 膜层生长速率较低。电解液中加入 Na₂MoO₄, 缩短了 Ti₂AlNb 合金微弧氧化起弧时间, 降低了起弧电压, 有效提高了膜层的生长速率。
- 2) 电解液中的 Na₂MoO₄ 参与了成膜过程。硅酸盐-磷酸盐电解液中, Ti₂AlNb 微弧氧化膜主要含 O、

Nb、Ti、Al、Si、P 等元素；加入 Na_2MoO_4 后，膜层中出现了 Mo 元素，且 Mo 含量随 Na_2MoO_4 浓度的增加而升高。

3) 硅酸盐-磷酸盐电解液中加入 Na_2MoO_4 ，降低了 Ti_2AlNb 合金微弧氧化膜的摩擦系数及比磨损率，但微弧氧化膜的耐磨性并非随 Na_2MoO_4 含量线性提高。含 6 g/L Na_2MoO_4 体系中值得的微弧氧化膜的摩擦系数低至 0.25，比磨损率仅为 $1.20 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ，耐磨性最佳。

参考文献:

- [1] 余龙, 宋西平, 张敏, 等. 高铌 TiAl 合金蠕变变形的原位观察[J]. 稀有金属材料与工程, 2014(4): 881-885.
YU Long, SONG Xi-ping, ZHANG Min, et al. In Situ Observation of High Nb Containing TiAl Alloy in Creep Deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014(4): 881-885.
- [2] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 等. Ti_3Al 和 Ti_2AlNb 基合金的研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(s1): 336-341.
ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong, LIANG Xiao-bo, et al. Research and Application of Ti_3Al and Ti_2AlNb Based Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(s1): 336-341.
- [3] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉, 等. TiAl 基合金的抗氧化性及其改善[J]. 稀有金属材料与工程, 1999(2): 30-33.
PENG Chao-qun, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, et al. Oxidation Resistance and Its Improvement of the Ti-Al Based Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1999(2): 30-33.
- [4] 田宗军, 高雪松, 黄因慧, 等. TiAl 合金表面等离子喷涂 MCrAlY 涂层热腐蚀行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(8): 1439-1442.
TIAN Zong-jun, GAO Xue-song, HUANG Yin-hui, et al. Study on Hot Corrosion Behavior of Plasma-sprayed NiCoCrAl- Y_2O_3 Coating on TiAl Alloy Surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1439-1442.
- [5] 唐兆麟, 王福会. 涂层对 Ti-Al 金属间化合物抗循环氧化性能的影响[J]. 中国有色金属报, 1998, 8(1): 56-60.
TANG Zhao-lin, WANG Fu-hui. Effect of MCrAlY Coatings on Oxidation Resistance of TiAl Intermetallic[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998 8(1): 56-60.
- [6] 王方亮, 王彦峰. 钛合金表面百微米级 Ti/TiN 多层复合涂层性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 96-100.
WANG Fang-liang, WANG Yan-feng. Properties of Hundred-micron Ti/TiN Multilayer Composite Coating on Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 96-100.
- [7] 唐艳茹, 潘利华, 常宇, 等. 微弧氧化提高铝合金耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 48-54.
TANG Yan-ru, PAN Li-hua, CHANG Yu, et al. Improving the Wear Resistance of Aluminum Alloy through the Micro-arc Oxidation Technology[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 48-54.
- [8] 郝建民, 魏小旂, 陈永楠, 等. 1060 铝合金微弧氧化黑色陶瓷膜显色特性及着色机理[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 44-49.
HAO Jian-min, WEI Xiao-yi, CHEN Yong-nan, et al. Color Characteristic and Formation Mechanism of Black Ceramic Coating by Micro Arc Oxidation on 1060 Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 44-49.
- [9] 李夕金, 程国安, 薛文斌, 等. Ti_3Al 基合金微弧氧化膜的制备和性质[J]. 航空材料学报, 2007, 27(5): 1-6.
LI Xi-jin, CHENG Guo-an, XUE Wen-bin, et al. Fabrication and Properties of Micro Arc Oxidation Coatings on Ti_3Al -based Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(5): 1-6.
- [10] 郝建民, 介万奇, 陈宏, 等. SiO_3^{2-} 对 TiAl 合金微弧氧化陶瓷层的影响[J]. 稀有金属材料工程, 2005, 34(9): 1455-1459.
HAO Jian-min, JIE Wan-qi, CHEN Hong, et al. The Effect of SiO_3^{2-} on Micro-arc Oxidization Ceramic Layer of TiAl Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(9): 1455-1459.
- [11] 唐兆麟, 王福会, 吴维弢, 等. 微弧氧化处理对 TiAl 合金抗氧化性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 63-68.
TANG Zhao-lin, WANG Fu-hui, WU Wei-tao, et al. Effect of Micro-arc Oxidation Treatment on Oxidation Resistance of TiAl Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(1): 63-68.
- [12] 苏琳, 谢发勤, 吴向清, 等. Ti-Al 合金在混合溶液体系中微弧氧化[J]. 电镀与环保, 2008, 28(4): 31-33.
SU Lin, XIE Fa-qin, WU Xiang-qing, et al. Micro-arc Oxidation of Ti-Al Alloys in Mixed Solution System[J]. Electroplating and Pollution Control, 2008, 28(4): 31-33.
- [13] WANG Yuan-hong, LIU Zhan-guo, WAN Ya-ming, et al. Influence of Electrolyte Compositions on Structure and High Temperature Oxidation Resistance of Micro-arc Oxidation Coatings Formed on Ti_2AlNb Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 647: 431-437.

- [14] WANG Yuan-hong, OUYANG Jia-hu, LIU Zhan-guo, et al. Microstructure and High Temperature Properties of Two-step Voltage-controlled MAO Ceramic Coatings Formed on Ti₂AlNb Alloy[J]. Applied Surface Science, 2014, 307: 62-68.
- [15] WANG Yuan-hong, LIU Zhan-guo, WANG Ya-ming, et al. Preparation and High Temperature Oxidation Resistance of Micro-arc Oxidation Ceramic Coatings Formed on Ti₂AlNb Alloy[J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 8946-8952.
- [16] OUYANG Jia-hu, WANG Yuan-hong, LIU Zhan-guo, et al. Preparation and High Temperature Tribological Properties of Micro-arc Oxidation Ceramic Coatings Formed on Ti₂AlNb Alloy[J]. Wear, 2015, 330: 239-249.
- [17] 陈明, 马跃洲, 马颖, 等. 电压增幅对镁合金微弧氧化膜层性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(11): 1943-1947.
CHEN Ming, MA Yue-zhou, MA Ying, et al. Effects of Voltage Increment on Performances of Micro-arc Oxidation Coatings of Magnesium Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(11): 1943-1947.
- [18] 张岱岚, 白新德, 李洪义, 等. 电解液参数对锆合金微弧氧化膜层结构和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(8): 1447-1451.
- ZHANG Dai-lan, BAI Xin-de, LI Hong-yi, et al. Influences of Electrolyte Parameters on the Structure and Properties of Micro-arc Oxidation Coatings of Zirconium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(8): 1447-1451.
- [19] 王平, 郭小阳, 梁奇. ZL108 铝合金微弧氧化膜的 Na₂MoO₄ 改性机理[J]. 稀有金属材料工程, 2015, 44(5): 1191-1196.
WANG Ping, GUO Xiao-yang, LIANG Qi. Na₂MoO₄ Modifying Mechanism of Micro-arc Oxidation Coating on ZL18 Aluminum Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1191-1196.
- [20] YEROKHIN A L, SNIZHKO I O, LEYLAND A, et al. Discharge Characterization in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium[J]. Journal of Physics D: Applied Physic, 2003, 36: 2110-2120.
- [21] WANG Shuai-xing, ZHAO Qing, LIU Dao-xin, et al. Microstructure and Elevated Temperature Tribological Behavior of TiO₂/Al₂O₃ Composite Ceramic Coating Formed by Microarc Oxidation of Ti6Al4V Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 272: 343-349.