

纳米 Cr_2O_3 微粒对 2024-T4 铝合金微弧氧化膜结构及耐磨性能的影响

李振伟, 狄士春

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在含有不同浓度纳米 Cr_2O_3 微粒的硅酸盐体系电解液中对 2024-T4 铝合金进行微弧氧化处理, 使用 SEM 观察陶瓷膜的表面形貌、截面形貌、磨痕形貌。使用 EDS 能谱仪分析膜层中各主要成分沿截面方向的分布, 使用 XRD 分析陶瓷膜的相结构, 使用纳米压痕硬度计测量陶瓷膜的硬度, 使用粗糙度仪测量陶瓷膜的表面粗糙度, 使用摩擦磨损试验机测量陶瓷膜的摩擦系数, 使用激光共聚焦显微镜测量磨痕体积, 评估磨损率。结果表明: 在电解液中加入纳米 Cr_2O_3 微粒后, 制备的陶瓷膜中出现了 Cr_2O_3 相, 电解液中纳米 Cr_2O_3 微粒浓度达到 2.4 g/L 时, 陶瓷膜的硬度最高, 摩擦系数最小, 磨损率最低, 耐磨性最好。

关键词: 2024-T4 铝合金; 微弧氧化; 纳米 Cr_2O_3 ; 耐磨性能

中图分类号: TG174.451

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)07-2022-06

铝合金具有密度小、比强度高且易成型加工等优点, 是制造航空器结构件、高速旋转结构件的理想材料之一。由于耐磨性、耐蚀性差, 应用受到限制, 对其进行表面改性处理提高耐磨性、耐蚀性对于扩大其应用领域具有重要意义^[1-3]。传统的表面改性技术存在制备的膜层硬度较低、耐磨性不高、工艺复杂等缺点^[4]。微弧氧化 (Micro-arc Oxidation, MAO) 又称微等离子体氧化、阳极火花沉积^[5,6], 是在含有特定离子的电解液中, 利用弧光放电产生的高温烧结作用, 在材料表面原位生长陶瓷膜的新技术^[7-10], 制备的陶瓷膜硬度高、耐磨性、耐蚀性好, 与基体结合牢固等优点正越来越受到国内、外研究单位的关注^[11-13]。

通过降低微弧氧化膜层孔隙率进一步提高微弧氧化膜层的致密性并最终达到提高膜层耐磨性的目的, 有学者在微弧氧化电解液中添加 ZrO_2 , SiC 等耐磨粒子或石墨、PTFE 等减磨粒子通过共生沉积方式制备出微弧氧化耐磨/减磨复合膜层, Cr_2O_3 粒子硬度高, 化学惰性好, 引入到微弧氧化膜中有助于提高膜层硬度和耐磨性。

本研究采用微弧氧化技术对 2024-T4 铝合金表面进行改性处理, 选取纳米 Cr_2O_3 微粒作为复合粒子, 采用共生沉积法在 2024-T4 铝合金表面制备出微弧氧化/ Cr_2O_3 复合膜层, 分析纳米 Cr_2O_3 粒子对微弧氧化膜形貌、相成分的影响, 研究纳米 Cr_2O_3 粒子复合量与微弧氧化膜层耐磨性之间的关系, 为铝合金的摩擦

学改性提供参考。

1 实验

实验材料为 2024-T4 铝合金板, 其化学成分 (质量分数): 3.8%~4.9%Cu、0.5%Si、0.5%Fe、0.3~0.9%Mn、1.2~1.8%Mg、0.25%Zn、0.10%Cr、0.15%Ti、余量为 Al。试样规格: 30 mm×15 mm×2 mm, 砂纸打磨, 表面除油, 去离子水清洗。设备采用自制 30 kW 交流脉冲微弧氧化装置。电解质溶液采用去离子水配制, 成分: Na_2SiO_3 (11 g/L)、KOH (1.5 g/L), 均为分析纯, 添加剂为粒径 50 nm 的 Cr_2O_3 微粒, 添加剂浓度分别为: 0、0.8、1.6、2.4、3.2 g/L。采用单极性/恒流模式, 电流值 4 A/dm²。微弧氧化处理时间 40 min, 每 2 min 记录一次电压值。占空比为 7%, 频率为 100 Hz。搅拌泵搅拌来改善 Cr_2O_3 微粒的悬浮性, 循环冷却系统开启, 确保电解液温度不超过 40 °C。

采用 FEI Sirion 扫描电子显微镜 (SEM) 观察陶瓷膜的表面形貌和截面形貌, 用自带的 EDS 能谱仪分析陶瓷膜中主要成分沿截面方向的分布。采用 X'Pert PRO X 射线衍射 (XRD) 仪分析膜层的相组成。采用纳米压痕硬度计测量陶瓷膜的硬度。采用粗糙度仪测量各膜层的表面粗糙度。对陶瓷膜抛光后, 采用 CJS111A 型摩擦磨损试验机测量陶瓷膜摩擦系数, 对磨件是半径为 3 mm 的 SiC 对磨球, 实验载荷 500 g,

收稿日期: 2016-07-15

作者简介: 李振伟, 男, 1986 年生, 博士生, 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001, E-mail: lizhenwei20071212@163.com

转速 200 r/min, 对磨时间 1800 s。

采用 OLS3000 激光共聚焦显微镜测量磨痕体积, 测量扫描长度为 1.28 mm, 圆环磨痕大致取 3 等份进行测量, 最后取 3 次测量的平均值, 依据测量的磨损体积计算磨损率 (W_s), 计算公式如下:

$$W_s = \frac{C\bar{V}}{1.28FL} \quad (1)$$

式中: W_s 为磨损率, $\text{mm}^3 (\text{N m})^{-1}$; C 为磨痕周长, mm; \bar{V} 为磨损体积平均值, mm^3 ; F 为法向载荷, N; L 为滑行距离, m。

采用扫描电子显微镜观察磨痕形貌。

2 结果与讨论

2.1 纳米 Cr_2O_3 微粒对微弧氧化工艺过程的影响

图 1a~1d 是制得的均质陶瓷膜, 随着 Cr_2O_3 浓度的增加, 陶瓷膜的颜色逐渐变深。图 1e~1h 是非均质陶瓷膜, 图 1e 中箭头指示, 当 Cr_2O_3 浓度为 2.5 g/L, 微弧氧化进行到 10 min 时出现 Cr_2O_3 块状团聚沉积, 在陶瓷膜表面分布有块状团聚体的位置火花熄灭, 微弧氧化终止, 电压曲线瞬间“跌落”, 如图 2e 所示。微弧氧化过程中, 陶瓷膜基本上是均匀增厚, Cr_2O_3 块状团聚体的出现, 使得陶瓷膜表面块状团聚体附着区域绝缘层大幅增厚, 绝缘性显著高于陶瓷膜其他部位, 这使得电弧不能在该部位击穿, 电流在该部位中断流通, 陶瓷膜表面导电截面突然减小, 流经截面的总电流减小, 陶瓷膜表面的总电压降低。当试样表面其他部位的陶瓷膜继续生长增厚, 厚度接近块状团聚体部位厚度时, 块状团聚体存在部位绝缘性与其他部位接近, 电弧再次在块状团聚物部位击穿, 电压再次

恢复到块状团聚体出现前的数值或者略高, 导致电压曲线瞬间出现跌落的“波谷”。随着 Cr_2O_3 浓度的增加, Cr_2O_3 块状团聚体增大、增多, 当 Cr_2O_3 浓度达到一定值时, 整个陶瓷膜表面被 Cr_2O_3 块状团聚体覆盖, 块状团聚体形成的绝缘层厚度足以达到使电弧在试样表面任何部位都无法击穿, 火花放电在整个陶瓷膜表面完全熄灭, 微弧氧化反应完全终止, 电压曲线跌落至零。块状团聚体的存在使得陶瓷膜结合力变差, 施加微小的力或者碰撞即行脱落, 不具有实用性。图 1f~1h 图中箭头所指位置是陶瓷膜剥落后露出一层非常薄的无光泽的苍白色氧化膜, 当 Cr_2O_3 浓度 ≥ 2.5 g/L 时, 陶瓷膜表面出现 Cr_2O_3 块状团聚体; 当 Cr_2O_3 浓度 ≤ 2.4 g/L 时, 陶瓷膜表面没有 Cr_2O_3 微粒块状团聚沉积发生, 因此纳米 Cr_2O_3 的最高掺杂浓度为 2.4 g/L。

2.2 微弧氧化过程电压随时间的变化关系

电压随时间的变化关系曲线如图 2 所示, 在含不同浓度纳米 Cr_2O_3 配制的电解液中制备陶瓷膜时, 电压随时间的变化关系曲线相似, 即随着微弧氧化反应的进行, 电压值均随之升高, 微弧氧化过程中电压不断升高的原因主要是在恒流模式下, 试样表面陶瓷层不断生长增厚, 电阻不断增大, 击穿更厚的陶瓷膜需要更高的电压值。

2.3 纳米 Cr_2O_3 微粒对微弧氧化陶瓷膜表面形貌的影响

陶瓷膜表面形貌如图 3a 所示, 相对应的各组成元素含量列于表 1。可见, 陶瓷膜呈多孔结构, 陶瓷膜表面分布着大量大小不一的类似火山口状的微孔, 这些微孔是微弧氧化过程中放电形成的内部不连通的放电通道。在电解液中添加纳米 Cr_2O_3 微粒后, 一部分纳米 Cr_2O_3 微粒在反应过程中被陶瓷膜表面微孔“捕

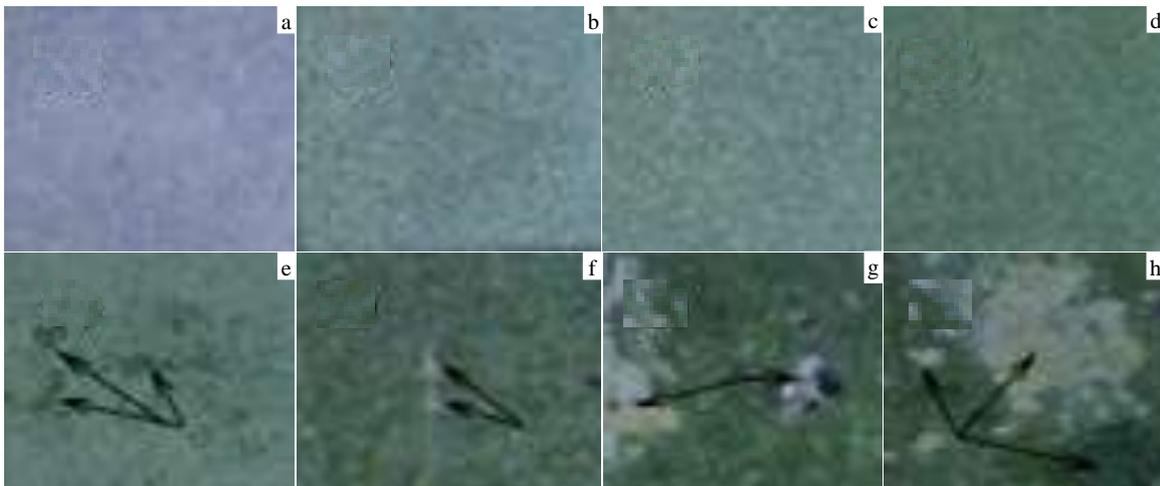


图 1 微弧氧化陶瓷膜

Fig.1 MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr_2O_3 microparticles: (a) 0 g/L, (b) 0.8 g/L, (c) 1.6 g/L, (d) 2.4 g/L, (e) 2.5 g/L (10 min), (f) 2.5 g/L, (g) 3.2 g/L, and (h) 4.0 g/L

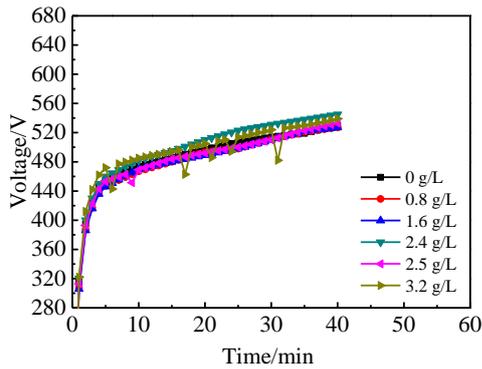


图 2 电压随时间的变化关系曲线

Fig.2 Variation curves of voltage for MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr₂O₃ microparticles

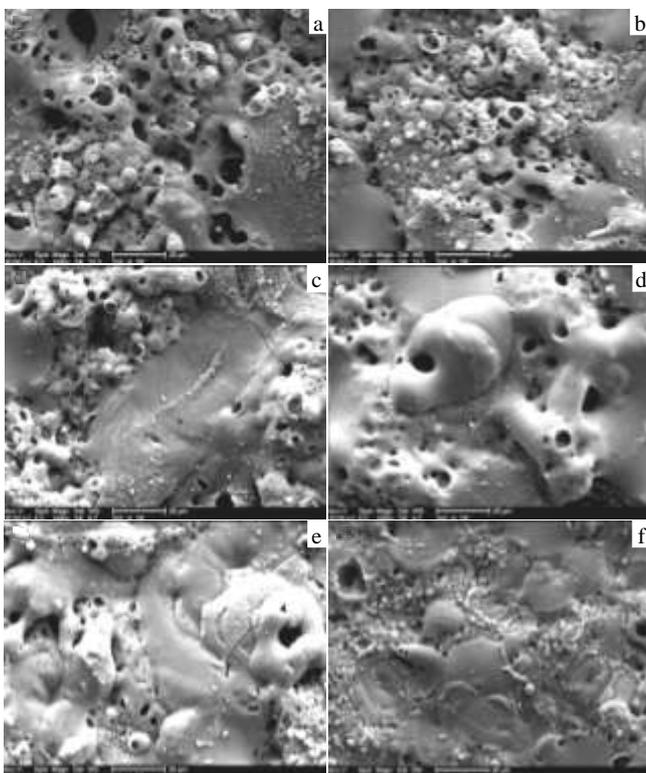


图 3 微弧氧化膜的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr₂O₃ microparticles: (a) 0 g/L, (b) 0.8 g/L, (c) 1.6 g/L, (d) 2.4 g/L, (e) 2.5 g/L, and (f) 3.2 g/L

获”，进入陶瓷膜表面微孔中，对微孔进行填充，使得陶瓷膜表面微孔数量明显减少。一部分 Cr₂O₃ 微粒以吸附、啮合的形式团聚在陶瓷膜表面，形成微凸体。另有一部分 Cr₂O₃ 微粒则融合进了陶瓷膜里面。随着 Cr₂O₃ 浓度的增加，会有更多的 Cr₂O₃ 粒子进入陶瓷膜，

表 1 图 3 中微弧氧化膜的元素含量

Table 1 Element composition of MAO coatings in Fig.3 (ω/%)

Elements	O	Al	Si	K	Cr
Fig.3a	26.31	25.97	42.59	05.31	-
Fig.3b	22.20	32.19	40.26	04.41	00.95
Fig.3c	21.66	35.60	36.13	03.37	03.25
Fig.3d	20.38	35.57	31.65	04.80	07.60
Fig.3e	21.22	34.21	31.24	04.52	08.81
Fig.3f	23.51	35.23	22.38	05.46	13.42

但当 Cr₂O₃ 微粒浓度达到一定值时，陶瓷膜表面裂纹迅速增加，如图 3f 所示，这是由于 Cr₂O₃ 微粒对微孔进行填充，以及块状团聚体的存在，使得击穿陶瓷膜需要更多的能量，导致热应力增加且分布不均匀，裂纹迅速增加。图 3a~3f 分别为陶瓷膜表面粗糙度值 (Ra) 为：3.693、3.673、4.309、4.361、5.861、7.434 μm。整体上呈现增加的趋势，随着电解液中纳米 Cr₂O₃ 微粒浓度的增加，吸附在陶瓷膜表面的 Cr₂O₃ 微粒不断增多，Cr₂O₃ 微粒对陶瓷膜表面微孔的填充作用，击穿陶瓷膜更加不易，击穿陶瓷膜需要更大的能量，陶瓷膜表面孔隙率减少，而单个孔径进一步增大。微孔中喷出夹杂着 Cr₂O₃ 微粒的熔融物在孔口周边形成更大的微凸体，陶瓷膜表面形貌随着 Cr₂O₃ 浓度的增加变得更加粗糙。

图 4 为陶瓷膜的截面形貌。可见，添加纳米 Cr₂O₃ 微粒对陶瓷膜厚度的影响不大，陶瓷膜的平均厚度为 38.5 μm，但当 Cr₂O₃ 浓度超过 2.4 g/L 时，陶瓷膜厚度迅速减小，这是由于陶瓷膜表面 Cr₂O₃ 块状团聚体的附着作用影响微弧氧化的进行，陶瓷膜生长受到阻碍。图 5 为陶瓷膜层中主要构成元素沿截面方向的分布。可见，

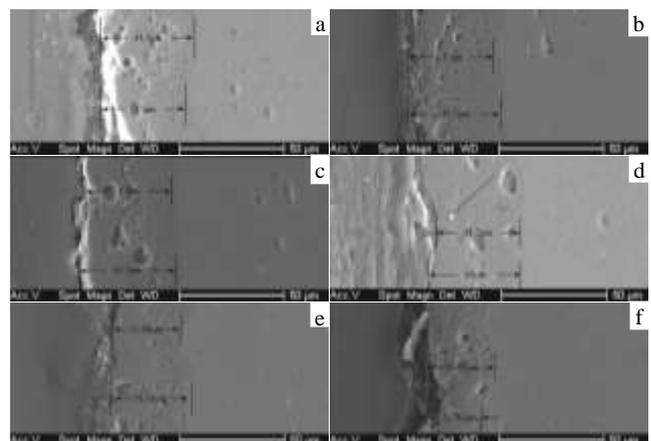


图 4 微弧氧化膜的截面形貌

Fig.4 Cross-section morphologies of MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr₂O₃ microparticles:(a) 0 g/L, (b) 0.8 g/L, (c) 1.6 g/L, (d) 2.4 g/L, (e) 2.5 g/L, and (f) 3.2 g/L

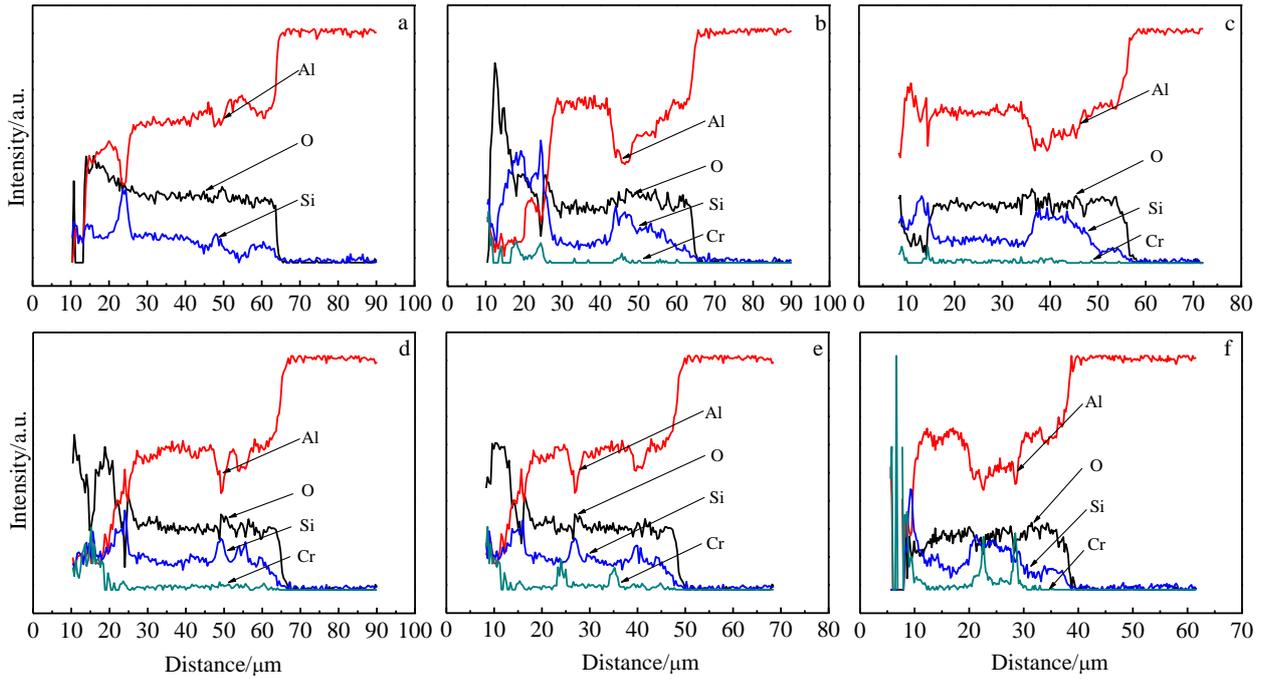


图 5 微弧氧化膜沿截面方向的 EDS 元素线分布

Fig.5 Cross-section EDS element line distribution of MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr₂O₃ microparticles: (a) 0 g/L, (b) 0.8 g/L, (c) 1.6 g/L, (d) 2.4 g/L, (e) 2.5 g/L, and (f) 3.2 g/L

随着 Cr₂O₃ 浓度的增加，膜层中 Cr₂O₃ 微粒含量增加。

2.4 纳米 Cr₂O₃ 微粒对陶瓷膜相结构的影响

图 6 为陶瓷膜的 XRD 图谱。可见，未添加纳米 Cr₂O₃ 微粒时，陶瓷膜主要由 γ -Al₂O₃，以及少量的 α -Al₂O₃ 和莫来石相组成，电解液中加入纳米 Cr₂O₃ 微粒后在陶瓷膜中出现了 Cr₂O₃ 相，且随着 Cr₂O₃ 浓度的增加，陶瓷膜中 Cr₂O₃ 相的含量增加，波峰增强，但当 Cr₂O₃ 浓度超过一定值时，制得的陶瓷膜表面出现片状脱落，脱落区域露出铝合金基体表面苍白色氧

化薄膜，如图 1e、1f 所示。XRD 分析表明， γ -Al₂O₃、 α -Al₂O₃、Cr₂O₃ 峰均减弱，在陶瓷膜中未发现有 Al₂O₃-Cr₂O₃ 相。

2.5 纳米 Cr₂O₃ 微粒对陶瓷膜摩擦磨损性能的影响

摩擦系数是表征材料耐磨性的一个重要参数，材料硬度高，摩擦系数小，材料耐磨性就好。测量图 3a~3f 所示陶瓷膜的硬度 (HV) 为：4750、4820、9340、12000、11300、5600 MPa。图 7 为摩擦系数随时间变

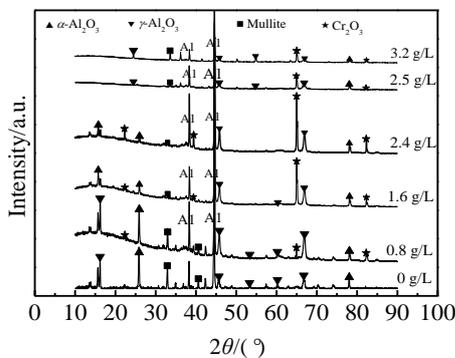


图 6 微弧氧化膜的 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr₂O₃ microparticles

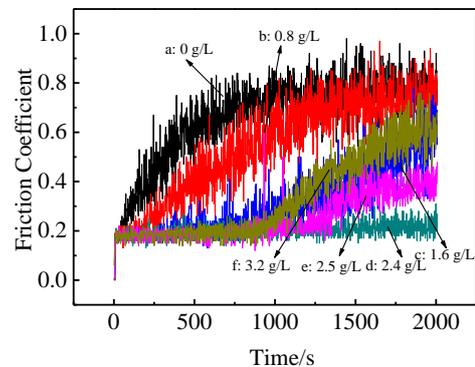


图 7 微弧氧化膜的摩擦系数变化曲线

Fig.7 Curves of friction coefficient for MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr₂O₃ microparticles

化的关系曲线，在与 SiC 对磨 250 s 时，图 7a 曲线增长迅速，且摩擦系数波动范围较大，摩擦不平稳，陶瓷膜的外层是疏松层，孔隙率高，孔径大小不一，对磨过程中摩擦系数大，波动剧烈。图 7b 曲线摩擦系数明显减小，且波动范围变小，摩擦趋于平稳。微弧氧化过程中纳米 Cr₂O₃ 微粒对陶瓷膜表面微孔的填充作用，使陶瓷膜表面的微孔减小，孔隙率降低，使陶瓷膜的疏松层更加致密，对磨过程中摩擦趋于平稳。另有一部分 Cr₂O₃ 微粒以吸附、啮合的方式镶嵌在陶瓷膜表面形成耐磨硬质点，增加了陶瓷膜的耐磨性，纳米 Cr₂O₃ 颗粒细小，对磨过程中不会造成明显的划伤，一部分纳米 Cr₂O₃ 颗粒从陶瓷膜表面脱落以固体润滑剂的形式存在于对磨过程中，使得摩擦系数减小。如图 7c, 7d, 7e, 7f 所示，摩擦系数波动范围更小，摩擦更加平稳。

对磨 1800 s 时，2 种陶瓷膜的摩擦系数趋于一致，在 0.75~0.85 之间 (7a, 7b)。图 7c 的摩擦系数为 0.65~0.8。图 7d 的摩擦系数基本稳定在 0.16~0.3 之间。摩擦系数增长缓慢，且平稳。如图 7e, 7f 所示，当电解液中 Cr₂O₃ 浓度超过一定值时，随着 Cr₂O₃ 浓度的增加，摩擦系数变大，陶瓷膜中 Cr₂O₃ 块状团聚体的存在，块状团聚体硬度低使得陶瓷膜硬度降低，结合力变差，摩擦过程中易于脱落，且块状团聚体导致微弧氧化过程中火花放电不均匀，热应力分布不均匀，陶瓷膜表面裂纹急剧增加，摩擦过程中形成裂纹源，促进疲劳磨损的发生，摩擦系数变大，磨损严重。

陶瓷膜的磨痕形貌如图 8 所示，摩擦产生的磨痕表面均表现为片状脱落，即主要发生了磨粒磨损、粘着磨损和疲劳磨损，且随着膜层中 Cr₂O₃ 成分含量的增加，片状剥落区域减小，根据粘着磨损理论，材料抵抗剪切变形能力越强，耐磨性越好，而在一定条件下剪切强度正比于硬度。硬度越高，磨粒和对磨球表面微凸峰不容易刺入陶瓷膜表面，随着硬度的提高，陶瓷膜磨粒磨损减小。黏着、划擦促进陶瓷膜表面和亚表层裂纹的滋生和扩展，硬度提高，黏着和划擦作用减小，裂纹的滋生和扩展受阻，疲劳磨损减小。当 Cr₂O₃ 浓度超过一定时，陶瓷膜表面出现 Cr₂O₃ 的块状团聚沉积，形成块状团聚体，块状团聚体的存在使得陶瓷膜硬度降低，陶瓷膜结合力差，易于脱落，形成较大体积的不规则磨粒，加剧磨粒磨损和黏着磨损。且块状团聚体导致微弧氧化过程中火花放电不均匀，热应力分布不均匀，陶瓷膜表面裂纹急剧增加，加剧了对磨过程中的疲劳磨损。表 2 为与图 8 所对应的陶瓷膜的磨损率。可见，Cr₂O₃ 浓度为 2.4 g/L 时制备的陶瓷膜磨损率最小，为 0.015×10⁻³ mm³ (N·m)⁻¹，仅是不含 Cr₂O₃ 相成分的陶瓷膜磨损率的 1/4。

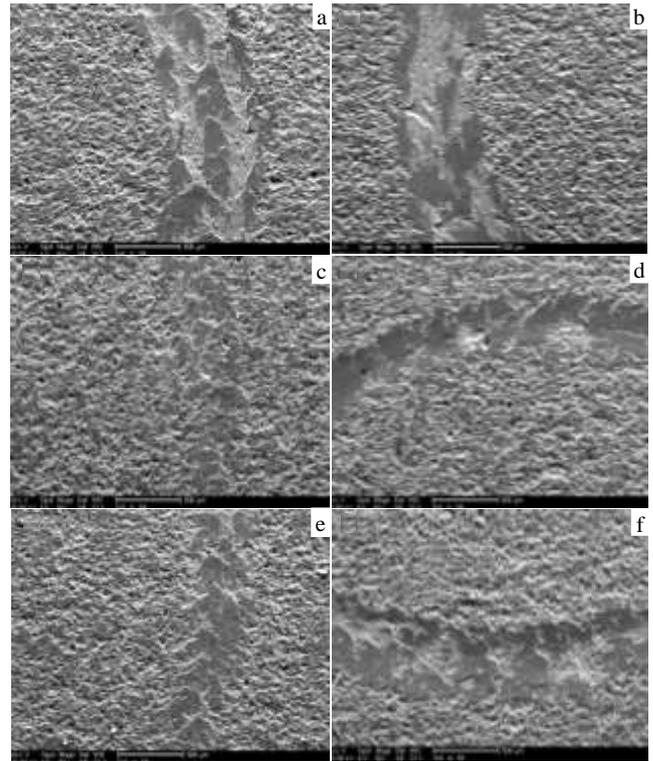


图 8 微弧氧化膜的磨痕形貌

Fig.8 Morphologies of wear tracks of MAO coatings prepared in electrolyte with different concentrations nano Cr₂O₃ micro-particles: (a) 0 g/L, (b) 0.8 g/L, (c) 1.6 g/L, (d) 2.4 g/L, (e) 2.5 g/L, and (f) 3.2 g/L

表 2 图 8 中微弧氧化膜的磨损率
Table 2 Wear rate of MAO coatings in Fig.8

Coatings	Wear time/s	Wear track width/ μm	Wear track depth/ μm	Wear rate/ $\times 10^{-3} \text{ mm}^3 (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$
Fig.8a	1800	781.03	4.62	0.060
Fig.8b	1800	734.38	4.52	0.05
Fig.8c	1800	484.37	2.45	0.020
Fig.8d	1800	421.88	2.18	0.015
Fig.8e	1800	437.50	2.25	0.017
Fig.8f	1800	625.00	3.15	0.033

3 结 论

1) 在硅酸盐体系电解液中加入纳米 Cr₂O₃ 微粒，可在 2024-T4 铝合金表面制得含有 Cr₂O₃ 相的微弧氧化复合陶瓷膜，该复合陶瓷膜主要由 γ -Al₂O₃、 α -Al₂O₃、莫来石以及 Cr₂O₃ 相组成。

2) 随着电解液中纳米 Cr₂O₃ 微粒浓度的增加，陶瓷膜表面粗糙度整体上呈现增加的趋势。陶瓷膜硬度

先增大后减小。

3) 电解液中, 纳米 Cr₂O₃ 添加剂的浓度为 2.4 g/L 时, 制备的复合陶瓷膜硬度最高, 摩擦系数最小, 仅为 0.16~0.3, 磨损率最低, 为 $0.015 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$, 仅是在相同条件下, 在不含 Cr₂O₃ 微粒的电解液中制得的陶瓷膜磨损率的 1/4, 陶瓷膜的耐磨性最好。

参考文献 References

- [1] Sun Zhihua(孙志华), Liu Ming(刘明), Guo Dapeng(国大鹏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(1): 64
- [2] Lv Pengxiang(吕鹏翔), Wei Dongbo(韦东波), Guo Chengbo(郭成波) et al. *Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报)[J], 2013, 28(4): 381
- [3] Zhang R F, Shi H W, Liu Z et al. *Applied Surface Science*[J], 2014, 49: 326
- [4] Yang Mei(杨眉), Liu Qingcai(刘清才), Xue Qi(薛妃) et al. *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2011, 42(1): 34
- [5] Li Zhaofeng(李兆峰), Yang Rui(杨瑞), Hu Guangyuan(胡光远) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(1): 237
- [6] Zeng Min(曾敏), Wang Xiaodong(王晓东), Cao Biao(曹彪) et al. *Transactions of The China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2009, 30(6): 47
- [7] Pan Mingqiang(潘明强), Di Shichun(狄士春). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(2): 333
- [8] Wen Lei, Wang Yaming, Jin Ying et al. *Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 228: 92
- [9] Yu Songnan(于松楠), Wu Hanhua(武汉华), Chen Genyu(陈根余) et al. *Acta Physics Sinica*(物理学报)[J], 2011, 60(2): 723
- [10] Xue Wenbin(薛文斌), Lu Liang(鲁亮), Du Jiancheng(杜建成) et al. *Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报)[J], 2011, 26(9): 897
- [11] Lu Liang(鲁亮), Xue Wenbin(薛文斌), Jin Xiaoyue(金小越) et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2011, 32(11): 140
- [12] Shchedrina, Rakoch A G, Henrion et al. *Surface & Coatings Technology*[J], 2014, 238: 27
- [13] Wang Xiaodong(王小东), Wu Xiaohong(吴晓宏), Wang Rui(王锐). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 275

Effect of Nano Cr₂O₃ Particles on Microstructure and Wear Resistance of Micro-arc Oxidation Coatings on 2024-T4 Aluminum Alloy

Li Zhenwei, Di Shichun

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: 2024-T4 aluminum alloy was treated by micro-arc oxidation in the silicate system electrolyte with different concentrations of nano Cr₂O₃ microparticles. The morphology of the surface, the cross-section and the track of ceramic coatings were observed by SEM. The distribution of main components of the ceramic coatings along the cross-section was analyzed by EDS, and the phase structure was analyzed by XRD. The hardness, surface roughness and friction coefficient of the ceramic coatings was measured by nano indentation hardness tester, roughness meter and friction and wear tester, respectively. The wear volume of the ceramic coatings was measured by laser confocal microscope and the wear rate was evaluated. The results show that the Cr₂O₃ phase is found in the ceramic coatings after nano Cr₂O₃ microparticles are added to the electrolyte. The hardness of the ceramic coatings is the highest, the friction coefficient is the minimum, the wear rate is the lowest, and the wear resistance is the best when the concentration of nano Cr₂O₃ microparticles is 2.4 g/L in the electrolyte.

Key words: 2024-T4 aluminum alloy; micro-arc oxidation; nano Cr₂O₃; wear resistance

Corresponding author: Di Shichun, Ph. D., Professor, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86413485, E-mail: dishichun@126.com