

Available online at www.sciencedirect.com**SciVerse ScienceDirect**

Procedia Engineering 27 (2012) 828 – 832

**Procedia
Engineering**www.elsevier.com/locate/procedia

2011 Chinese Materials Conference

Microstructure and properties of ceramic coatings on 7N01 aluminum alloy by micro-arc oxidation

Wanhui Liu^{a,b,*}, Wenbin Liu^a, Ailian Bao^b^aHarbin Engineering University, College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin 150001, China^bHeilongjiang Institute of Science and Technology, College of Material Science and Technology, Harbin 150027, China

Abstract

Ceramic oxide coatings were deposited on 7N01 Al alloy by micro-arc oxidation (MAO) in the electrolytic solution. Microstructure, phase composition and wear resistance of the oxide coatings were investigated by SEM, XRD as well as friction and wear test. The micro-hardness and thickness of the oxide coatings were measured. The results showed that the ceramic coating was mainly composed of α -Al₂O₃ and γ -Al₂O₃. During oxidation, the temperature in the micro-arc discharge channel was very high to make the local coating molten. From the surface to the interior of the coating, 30~35 μ m, micro-hardness of coatings gradually increased, which was about 1300HV0.1. It has been found that the micro-arc oxidation coatings greatly improved the anti-wear properties of aluminum alloys.

© 2011 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of Chinese Materials Research Society. Open access under [CC BY-NC-ND license](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/).

Keywords: micro-arc oxidation; aluminum alloys; ceramic coatings; wear resistance

7N01 铝合金表面微弧氧化陶瓷层的组织与性能

刘万辉^{a,b,*}, 刘文彬^a, 鲍爱莲^b^a哈尔滨工程大学, 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001, 中国^b黑龙江科技学院, 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150027, 中国

* Corresponding author. Tel.: +86-451-88036690;
E-mail address: liuwanhui@hrbeu.edu.cn.

摘要

利用微弧氧化技术在 7N01 铝合金表面形成微弧氧化陶瓷膜层, 分析了微弧氧化陶瓷膜的相组成和显微结构、表面形貌; 并测试陶瓷膜的摩擦学性能。结果表明: 微弧氧化陶瓷膜层相组成主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 两相构成, 氧化陶瓷层与基体界面结合良好, 但呈现疏松层和致密层两层结构, 厚度为 30~35 μm , 表面硬度可达到 1300HV_{0.1} 左右; 微弧氧化技术可以显著提高铝合金的表面耐磨性, 降低铝合金基体的磨损率和摩擦系数。

关键词: 微弧氧化; 铝合金; 陶瓷层; 耐磨性

1. 引言

7N01 铝合金为 Al-Zn-Mg 热处理强化型高强铝合金, 并加入适量 Mn、Zr 等微量元素, 是综合性能较为优异的铝合金, 其强度高、挤压性较好、耐蚀性好, 适于制造承重较大的车体、底架、框架等结构型材, 是生产高速列车的关键用材, 为当今各国竞相研制和生产加工, 但目前我国对该合金制造及使用, 仍处于初步阶段[1]。

微弧氧化 (Micro-arc Oxidation) 又称阳极火花放电沉积或微等离子体氧化, 是近年来兴起的一种表面处理新技术, 是将 Al、Mg、Ti 等有色金属或其合金置于电解质水溶液中, 通过高电压击穿氧化膜, 阳极表面出现微区弧光放电现象, 由热化学氧化、等离子体氧化和电化学氧化的共同作用, 在基体合金表面原位生成具有优良的耐磨、耐蚀、抗热冲击及绝缘性能的陶瓷层, 且与基体结合力强, 从而提高了基体合金的使用寿命和应用领域[2-7]。通过微弧氧化表面技术改善 7N01 铝合金的表面耐磨性, 提高合金的使用寿命周期, 是决定高速列车长期安全运行的基础, 对推进国高速列车制造技术的发展, 实现轨道交通轻量化、高速化和国产化具有重要意义。

2. 材料及试验方法

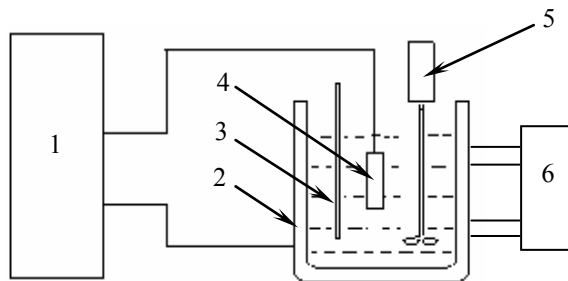


图.1 微弧氧化设备示意图

1-专用电源; 2-不锈钢槽; 3-温度计; 4-阳极试样; 5-搅拌器; 6-冷却系统

Fig.1 Schema of experimental arrangement of micro-arc oxidation

1-power supply; 2-electrolyzer; 3-thermometer; 4-sample; 5-stirrer; 6-cooling system

实验材料选用东北轻合金厂生产的 7N01 铝合金, 其名义成分为 (质量分数, %)。

Zn4.5~5.5, Mg1.0~2.0, Mn0.2~0.7, Cu0.20, Cr0.30, Ti0.20, Zr0.25, Fe0.35, Si0.30, 余量为铝, 且样品加工成 $\phi 20\text{mm} \times 8\text{mm}$ 。采用自行研制的 30kW 脉冲微弧氧化装置进行表面处理, 包括专用电源、电解槽、搅拌系统、冷却系统等, 如图 1 所示。使用去离子水配制磷酸盐体系碱性电解液, pH 值为 8~10。电解液温度不超过 40℃, 电压 500~700V, 电流密度 8~10A/dm², 氧化时间 40min。使用 X 射线衍射仪 (XD-2) 测定微弧氧化陶瓷层的相组成, 利用扫描电子显微镜 (MS-2600 型) 分析陶瓷层的表面形貌和微观结构; 用 HVS-1000 型硬度计测定其显微硬度, 采用淬火态 GCr15 摩擦球 ($\phi 10\text{mm}$, 硬度 62HRC) 为对磨件, 在哈尔滨工业大学生产的 HIT-2 型的球-盘式摩擦磨损试验机测试试样的耐磨性, 载荷 8N, 滑动距离 600m。使用美国丹佛 TP-214 电子天平测量试样的失重量, 计算磨损率。

3. 试验结果及分析

3.1. 陶瓷层表面形貌

微弧氧化陶瓷层表面形貌如图 2a、图 2b 所示, 可以观察到其表面较粗糙, 整个膜层表面为凹凸不平, 分布着熔融烧结凝固氧化物小颗粒, 以及大量呈火山口状的直径大小不一的微米级孔洞。这是由于铝合金微弧氧化是一个高阻抗膜击穿形成放电通道、熔融氧化铝形成、氧化铝凝固生成、氧化铝晶型转变等依次进行的过程。在微弧放电微区产生的瞬时高温, 在微区内形成熔化态的氧化物, 但随着微等离子弧游走, 熔化微区在电解液的冷却作用下激冷, 氧化物凝固成小颗粒。陶瓷层在形成过程中, 表面残留了大量放电孔洞, 且微孔周围明显呈现火山口形态。如图 2b 所示, 在陶瓷层表面及放电微孔内部都能观察到微小裂纹, 这是熔融氧化物在低温电解液中急速冷却凝固, 热应力过大而导致的^[3-5]。

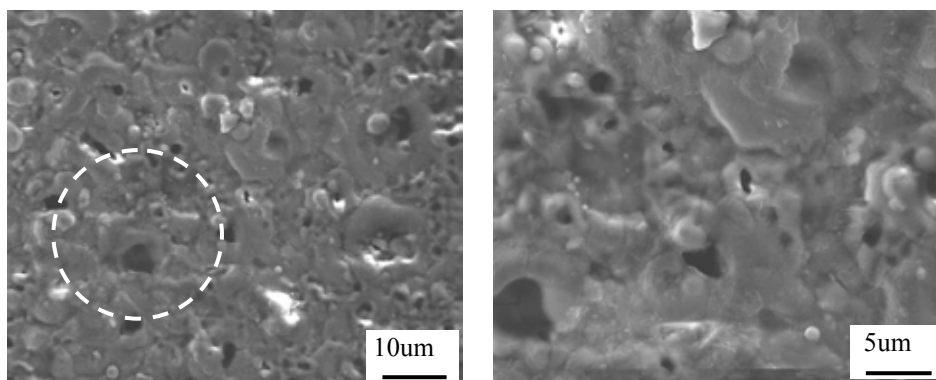


图 2 微弧氧化陶瓷层表面形貌 a) 微观形貌; b) 标注区域的局部放大

Fig2. Surface morphology of the micro-arc oxidized ceramic coating

(a) surface morphology; (b) magnifying picture of the white circle area in Fig. 2a

3.2. 陶瓷层微观结构

图 3 为 7N01 铝合金表面微弧氧化陶瓷层的微观结构。如图所示, 微弧氧化陶瓷层具有疏松层两层结构, 氧化物与基体金属的结合界面处相互渗透, 结合较好。研究表明^[5-7]: 微弧氧化陶瓷层主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 两相组成, 随着氧化时间越长, 7N01 铝合金微弧氧化陶瓷层层越厚, 氧化层增厚主要是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的共同生长决定的, 在氧化初期, 陶瓷层生长主要以

疏松层增厚为主，并首先会生成核自由能较低的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相，又因为合金内的 Zn 元素质量分数的较高， $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 向 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的相转变会得到部分抑制。微弧氧化过程的中后期，陶瓷层生长速率明显降低，且表面粗糙度增加，膜表面所分布不均匀沟壑及孔隙增加。

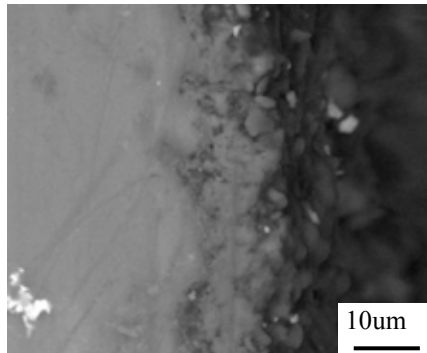


图3 微弧氧化陶瓷层微观结构

Fig.3 microstructure of MAO ceramic coating

3.3. 微弧氧化陶瓷层的耐磨性

Table 1. Friction and wear test results of MAO coatings

Specimens	Friction coefficient	wear rate $/(m^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1})$
7N01 alloy	0.4~0.45	2.46×10^{-3}
MAO coatings	0.24~0.35	1.28×10^{-5}

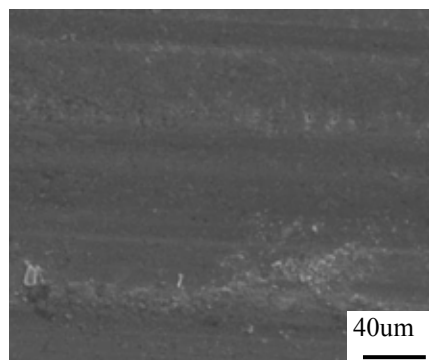


图4 微弧氧化陶瓷层磨损后表面形貌

Fig.4 Surface morphology of MAO coatings worn

表 1 是微弧氧化陶瓷层与基体分别同 GCr15 钢球干摩擦时的摩擦结果，给出了 2 种试样磨损距离为 600m 时的磨损率和摩擦因数的对比关系。

由于陶瓷层平均硬度值可达到 1300HV，铝合金微弧氧化后耐磨性能显著提高。如表所示，在干摩擦条件，相同的磨损距离，微弧氧化陶瓷层的磨损率和摩擦系数都明显低于铝合金基体。试

验过程中, 观察到可能由于微弧氧化后试样表面粗糙度较大, 其摩擦系数变化波动较大, 跑合时间比原始基材的时间长。

图 4 为微弧氧化涂层稳定磨损后期的微观形貌, 磨痕非常轻微, 呈现粘着和擦伤作用机制, 这是由于微弧氧化陶瓷层的硬度相对较大, 且陶瓷膜层表面具有特有的多孔形态, 孔隙的存在为磨损过程中产生的细小磨屑提供了贮存空间, 抑制了磨屑向硬化磨粒的转化, 同时起到了固体润滑的作用, 摩擦系数保持稳定低值, 磨损量降低, 耐磨性提高。

4. 结论

1. 微弧氧化陶瓷层表面较粗糙, 呈现多孔形态, 分布着熔融烧结凝固氧化物小颗粒, 以及大量放电形成的微米级孔洞, 并呈火山口状形态, 内部存在微小裂纹。
2. 7N01 铝合金微弧氧化陶瓷膜主要由具有疏松层、致密层结构, 且与基体结合较好, 显微硬度提高。
3. 微弧氧化涂层表面分布着微裂纹和孔隙, 为磨屑提供了贮存空间, 使摩擦系数减小, 磨损率降低, 提高 7N01 基体铝合金的耐磨性。

References

- [1] Yan DJ, Liu XS, Li J, et al. Effect of strain hardening and strain softening on welding distortion and residual stress of A7N01-T4 aluminum alloy by simulation analysis. *Journal of Central South University of Technology* 2010; **22** (4): 667-670.
- [2] Tian J, Luo ZZ, Qi SK et al. Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology* 2002; **154**: 1-7.
- [3] Nie X, Leyland A, Song HW et al. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology* 1999; **116** : 1055–1060.
- [4] Yerokhi AL, Voevodin AA, Lyubimov VV et al. Plasma electrolytic fabrication of oxide ceramic surface layers for tribotechnical purposes on aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology* 1998; **110**: 140-146.
- [5] Xue WB, Deng ZW, Chen RY et al. Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al-Cu-Mg alloy. *Thin Solid Films* 2000; **372**: 114-117
- [6] Wei TB, Yan FY, Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 2005; **389**: 169–176.
- [7] Tillous K, Toll-Duchanoy T, Bauer-Grosse E et al. Microstructure and phase composition of microarc oxidation surface layers formed on aluminium and its alloys 2214-T6 and 7050-T74. *Surface & Coatings Technology* 2009; **203**: 2969–2973