铝合金表面 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 微弧氧化涂层的制备及其热控性能研究

李涛，张鹏，卢松涛，吴晓宏

（哈尔滨工业大学 化工与化学学院，哈尔滨 150001）

摘　要：目的 改善铝合金表面热控性能。**方法** 通过微弧氧化技术，采用六水合硝酸钇（$Y(NO_3)_3·6H_2O$）为稀土改性剂，在铝合金表面原位构筑 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 微弧氧化涂层。利用 X 射线衍射仪、X 射线光电子能谱仪和扫描电子显微镜，分析涂层晶体结构、化学组成和表面形貌；利用红外发射率仪和紫外/可见/近红外分光光度计分别测量涂层的发射率与太阳吸收率，进而探究涂层热控性能及其影响因素。**结果** 实验表明，钇源的用量能够显著影响涂层结构和热控性能，当钇源质量浓度为 6 g/L 时，所得 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层的红外发射率为 0.859，太阳吸收率为 0.405，具有最低吸辐比 0.471，显示出优异的热控性能。**结论** 原位构筑稀土元素 Y 改性的微弧氧化涂层可有效提高铝合金表面的热控性能。这得益于微弧氧化过程中所生成的 Y_2O_3，它可有效调控涂层的形貌、粗糙度和厚度。此外，由于 Y_2O_3 具有较大的禁带宽度，可降低微弧氧化涂层中 ZnO 在高能紫外光波段的吸收。

关键词：铝合金；微弧氧化；稀土元素钇；ZnO；热控涂层

中图分类号：TG174.4；TB333　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2020)12-0008-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.002

Preparation and Thermal Control Performance of $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ Micro-arc Oxidation Coating on Aluminum Alloy Surface

LI Tao, ZHANG Peng, LU Song-tao, WU Xiao-hong

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: To improve the surface thermal control performance of aluminum alloy. Using $Y(NO_3)_3·6H_2O$ as rare earth modifier, $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coating was fabricated on the aluminum alloy surface by micro-arc oxidation technology. The crystal structure, chemical composition and surface morphology of the coating were analyzed by powder X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and scanning electron microscope (SEM). In addition, the emissivity and absorptivity

收稿日期：2020-11-19；**修订日期：**2020-12-10

Received：2020-11-19；**Revised：**2020-12-10

基金项目：国家自然科学基金（51671074）

Fund：National Natural Science Foundation of China (51671074)

作者简介：李涛（1981—），男，博士，研究员，主要研究方向为功能涂层及其空间环境服役行为。

Biography：LI Tao (1981—), Male, Doctor, Professor, Research focus: functional coating and its service behavior in space environment.

通讯作者：吴晓宏（1977—），女，博士，教授，主要研究方向为特种功能涂层。邮箱：wuxiaohong@hit.edu.cn

Corresponding author：WU Xiao-hong (1977—), Female, Doctor, Professor, Research focus: special functional coatings. E-mail: wuxiaohong@hit.edu.cn

引文格式：李涛，张鹏，卢松涛，等. 铝合金表面 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 微弧氧化涂层的制备及其热控性能研究[J]. 表面技术，2020，49(12)：8-13.

LI Tao, ZHANG Peng, LU Song-tao, et al. Preparation and thermal control performance of $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ micro-arc oxidation coating on aluminum alloy surface[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 8-13.

of the coating were measured by infrared emissivity meter and ultraviolet/visible/near-infrared spectrophotometer respectively, and then the thermal control performance of the coating and its influencing factors were explored. The results show that the amount of $Y(NO_3)_3·6H_2O$ can significantly affect the structure and thermal control performance of the coating. When the concentration of $Y(NO_3)_3·6H_2O$ is 6 g/L, the emissivity and absorptivity of $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coating are 0.859 and 0.405, respectively, a minimum absorptivity/emissivity ratio of 0.471, showing excellent thermal control performance. Y modified micro-arc oxidation coating can effectively improve the thermal control performance of aluminum alloy surface. This is due to the formation of Y_2O_3 in micro-arc oxidation process, which can effectively control the morphology, roughness and thickness of the coating. In addition, because of the large band gap of Y_2O_3, the absorption of ZnO based micro-arc oxidation coating in high-energy ultraviolet band can be reduced.

KEY WORDS: aluminum alloy; micro-arc oxidation; rare earth element yttrium; ZnO; thermal control coatings

金属元素中，铝在地壳中含量最高，其合金具有制造成本低、机械强度高、阻尼减振性优良和易机械加工等优点，广泛应用于航天器仪表壳体、支架和转动展开机构等结构[1-3]。航天器在太空中按照预设轨道运转时，由于太阳照射和空间环境而经历交替加热与冷却过程。同时，由于航天仪器设备自身的热功耗，致使铝合金结构件承受过高的热载荷，严重影响航天器内部热环境及正常的在轨运行[4-5]。目前，常采用在航天器表面修饰热控涂层的方式来实现对热的控制。

具有低吸辐比（低太阳吸收率 α_s 和高红外发射率 ε）的热控涂层能够改善航天器及其仪器设备表面对热的排散能，从而保障它们的正常运转[6-7]。氧化锌（ZnO）由于其低吸辐比和优异的稳定性，是常用的热控涂层材料。周博等人[8]制备得到太阳吸收率仅为 0.2 的 ZnO-有机硅树脂涂层。马宏等人[9]制备了太阳吸收率为 0.12、发射率为 0.85 的 ZnO-甲基硅树脂涂层。但是，ZnO 的禁带宽度 E_g 为 3.4 eV，因而对低于 370 nm 的紫外光吸收能力较强[10]。稀土元素因其独特的电子结构而显示出特有的电、磁与化学性质。研究发现，稀土改性 ZnO 基微弧氧化涂层可有效降低紫外光的吸收能力[11]。钇（Y）是最先发现的稀土元素之一，Y 用作稳定剂时，可抑制金属氧化物（如 ZnO、ZrO_2）在使用过程中发生晶相转变，从而提高金属氧化物的稳定性[12-14]。

目前，铝合金表面热控涂层的制备技术主要有电镀法、化学镀法、电弧喷涂法、阳极氧化法、磁控溅射法、微弧氧化法和高能束（激光、电子束）表面改性等。其中，微弧氧化技术，又称等离子体氧化技术，是基于阳极氧化技术发展而来。该技术通过等离子体电化学氧化反应，在合金材料表面原位构筑陶瓷层，并利用电解液的掺杂改性调控其组成和结构[15-16]，能显著改善涂层的热控性能。因此，本文通过微弧氧化技术在 6061 铝合金表面原位构筑 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层，并探究钇源用量与涂层结构和热控性能的关系。

1　实验材料及方法

实验材料选用 6061 铝合金，其化学组成为（以质量分数计）：0.4%~8% Si，0.7% Fe，0.15%~0.4% Cu，0.8%~1.2% Mg，其余为 Al。6061 铝合金为 35 mm×35 mm×5 mm 的样片，使用 100#、400#、800#和 2000#砂纸将样片逐级打磨抛光，再用无水乙醇清洗、烘干。采用 WH-20 型多波形程控式微弧氧化脉冲电源。电解液组成：30 g/L 的 $Na_5P_3O_{10}$、20 g/L 的 $Na_2Si_2O_3$、8 g/L 的 KOH、10 g/L 的 EDTA、10 g/L 的 $Zn(H_2PO_4)_2$、$Y(NO_3)_3·6H_2O$（质量浓度分别为 0、2、4、6、8 和 10 g/L），溶剂为蒸馏水。电源模式为恒流模式，选用 500 Hz 的电源频率，30%的占空比，10 A/dm^2 的电流密度，利用循环系统将电解液温度控制在 30 ℃以下，氧化时间为 15 min。

利用 S-570 扫描电子显微镜（SEM）来观察微弧氧化涂层的表面形貌；利用 D/max-rb 型 X 射线衍射仪（XRD）分析涂层组成；利用 PHI5700 型 X 射线光电子能谱仪（XPS）确定涂层化学组成；利用 TR200 型表面粗糙度测量仪测量涂层粗糙度；利用 CTG260 型涂层测厚仪确定涂层生长高度；利用 TEMP2000A 型红外发射率仪测量在 2~16 μm 波段的发射率；利用 Perkin Elmer Lambda 950 型紫外/可见/近红外分光光度计测量涂层在 200~2500 nm 光谱范围内的反射率。

2　结果与讨论

2.1　钇用量对微弧氧化过程中电压的影响

采用双向对称恒流模式并固定电源参数，反应过程中阳极电压与时间的变化曲线如图 1 所示。根据曲线特征可将微弧氧化进程分为三阶段：初始阶段为阳极氧化过程，电压呈现线性增长，阳极表面无火花现象并吸附气泡，此过程中，基底表面通过氧化反应形成 Al_2O_3 薄膜层；第二阶段为火花放电过程，电压增速明显放缓，因为表面 Al_2O_3 膜容易发生高电压击穿，在击穿处出现明亮的火花并伴随啸叫声；第三阶段为微弧氧化过程，电压增速放缓，基底表面出现大量密集的火花，此过程产生尖锐的爆鸣声，这是涂层生长的主要阶段，涂层厚度明显增长[5-6]。钇的添加主要改变了第一和第二阶段，这是因为在微弧氧化过程中，

Y^{3+}首先在阳极表面富集，提高电导率，使微弧氧化过程更快进入稳压阶段[17-18]。此外，在微弧氧化过程中，表面富集的 Y^{3+}生成 Y_2O_3，进而促进成核，使 ZnO 均匀生长，提高了涂层的致密度和绝缘性[19-20]。

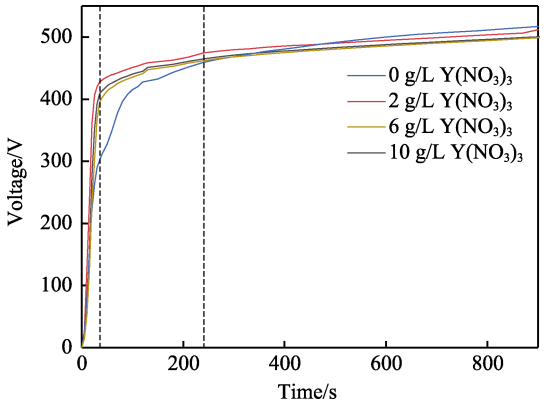


图 1　不同 $Y(NO_3)_3·6H_2O$ 浓度下阳极电压-时间曲线

Fig.1 Anode voltage-time curves under different concentrations of $Y(NO_3)_3·6H_2O$

2.2　晶体结构和化学组成分析

$ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层（电解液为 2 g/L 和 6 g/L 的 $Y(NO_3)_3·6H_2O$）的 XRD 测试结果如图 2 所示。通过与标准卡片比对可知，位于 36.5°、45.5°和 66.5°的特征峰分别对应 Al_2O_3 的(131)、(040)和(440)晶面；位于 39.1°和 58.7°的特征峰来自于 ZnO；位于 31.5°、41.7°和 56.6°的特征峰分别对应 Y_2O_3 的(40-2)、(51-1)和(711)晶面，这说明 ZnO、Y_2O_3 和 Al_2O_3 是热控涂层的主要组分。此外，由图 2 可见，采用不同质量浓度 $Y(NO_3)_3·6H_2O$ 电解液所制备的涂层 XRD 谱图没有明显差异，说明两种涂层的物相组成没有明显差异。

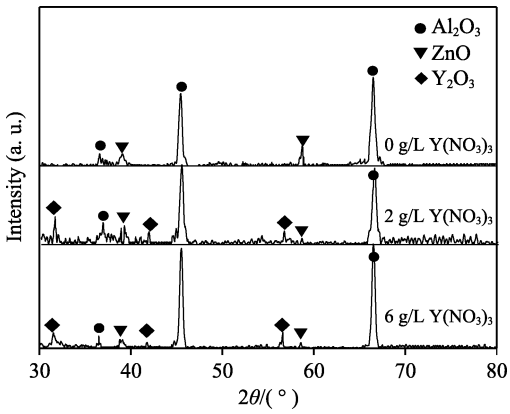


图 2　$ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层（2 g/L 和 6 g/L $Y(NO_3)_3·6H_2O$）的 XRD 谱图

Fig.2 XRD patterns of $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coatings (2 g/L, 6 g/L $Y(NO_3)_3·6H_2O$)

图 3 为 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层(6 g/L $Y(NO_3)_3·6H_2O$ 电解液条件下）的 XPS 图谱，再次验证了涂层的化学组成为 ZnO、Y_2O_3 和 Al_2O_3。表 1 为涂层组成元素的原子百分比，随 $Y(NO_3)_3·6H_2O$ 浓度的增加，涂层中 Y 含量逐步增加。如图 3b 所示，Al 2p 的结合能为 73.2 eV。Zn $2p_{1/2}$ 和 Zn $2p_{3/2}$ 结合能分别为 1036.5 eV 和 1021.7 eV（图 3c 所示）。由图 3d 可见，Y $2p_{5/2}$ 和

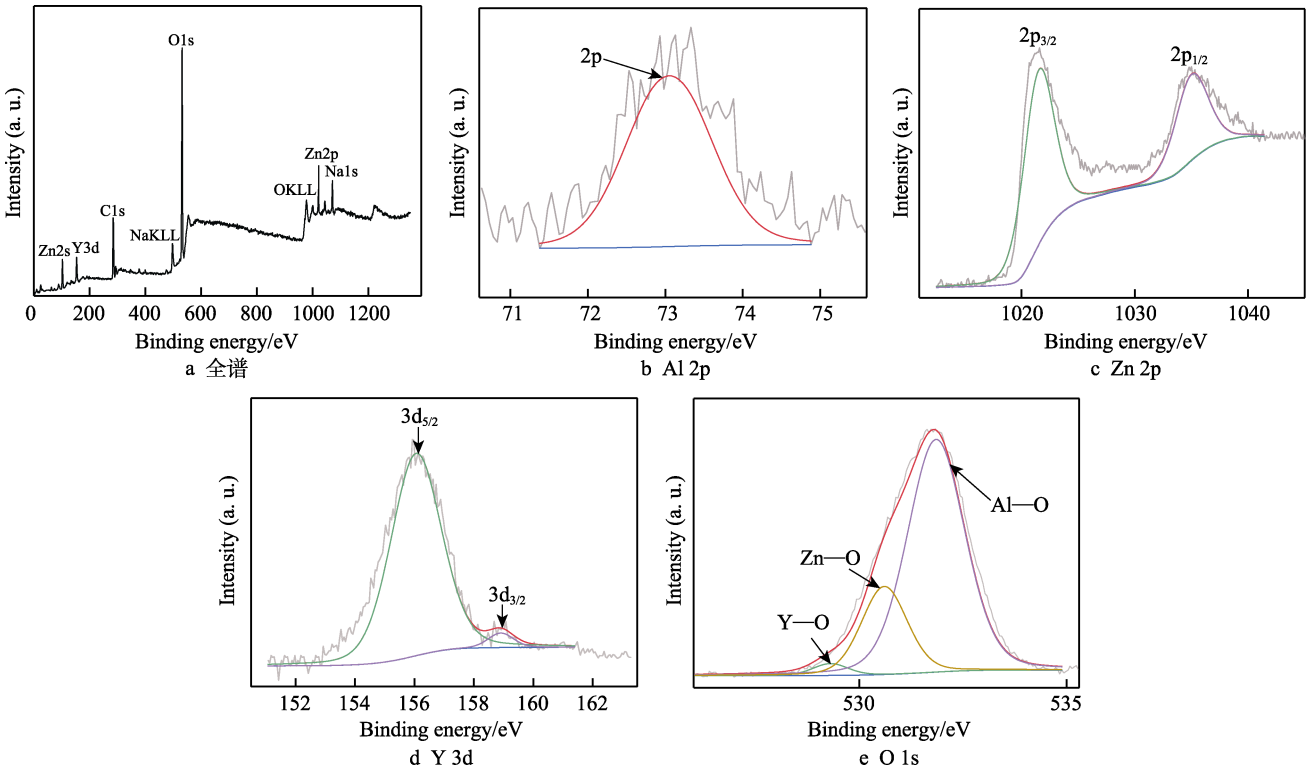


图 3　$ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层的 XPS 图谱

Fig.3 XPS spectra of $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coatings

表 1　Y 改性前后涂层的元素原子百分比

Tab.1 The atomic percentage of the coating before and after modification

Concentration of $Y(NO_3)_3·6H_2O$/(g·L^{-1})	Atomic percentage/%			
	Al	O	Zn	Y
0	31	55	14	0
2	27	59	12	2
6	25	58	12	5

Y $2p_{3/2}$ 的结合能分别为 157.0 eV 和 158.9 eV[21]，此时，Y^{3+}的内层 f 层电子轨道处于全空状态，外层 s 层和 p 层电子对其产生屏蔽效应[18]。通过图 3e 可知，Y—O、Zn—O 和 Al—O 键的结合能分别为 529.3、530.5、531.8 eV。

2.3　微观形貌分析

本文探究了钇源用量与微观结构关系。不同 ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3 微弧氧化涂层的扫描电子显微镜照片（SEM）如图 4 所示。涂层表面均分布着大小不一的类“火山形”孔状结构，这是高电压击穿涂层薄弱点而产生的微等离子体放电通道[19]。随着 $Y(NO_3)_3·6H_2O$ 用量增加至 6 g/L，这些孔状结构逐渐减少（图 4a—d），这与涂层粗糙度变化规律相吻合（图 5），所得 Y-ZnO 涂层的孔最少且粗糙度最低。在电场和基底表面高温的双重作用下，适量的 Y^{3+}富集在基底表面并生 Y_2O_3，促进了成核过程，有利于 ZnO 的生长，因而得到均匀致密的涂层，且其厚度也随钇用量的增加而增加（图 6）[14,18]。然而，当 $Y(NO_3)_3·6H_2O$ 用量过多时（6~10 g/L），由于 Y 活性高，极易填补 ZnO 涂层缺陷，并生成表面活性膜，使微弧氧化的过电位提高，电弧强度提高，出现二次击穿现象，从而缩短了熔融物流动时间，提高凝固速率，导致涂层分布不均，因而涂层孔结构又开始增多（图 4e 和 f），粗糙度也相应变大（图 5），厚度则增加缓慢（图 6）[22-24]。

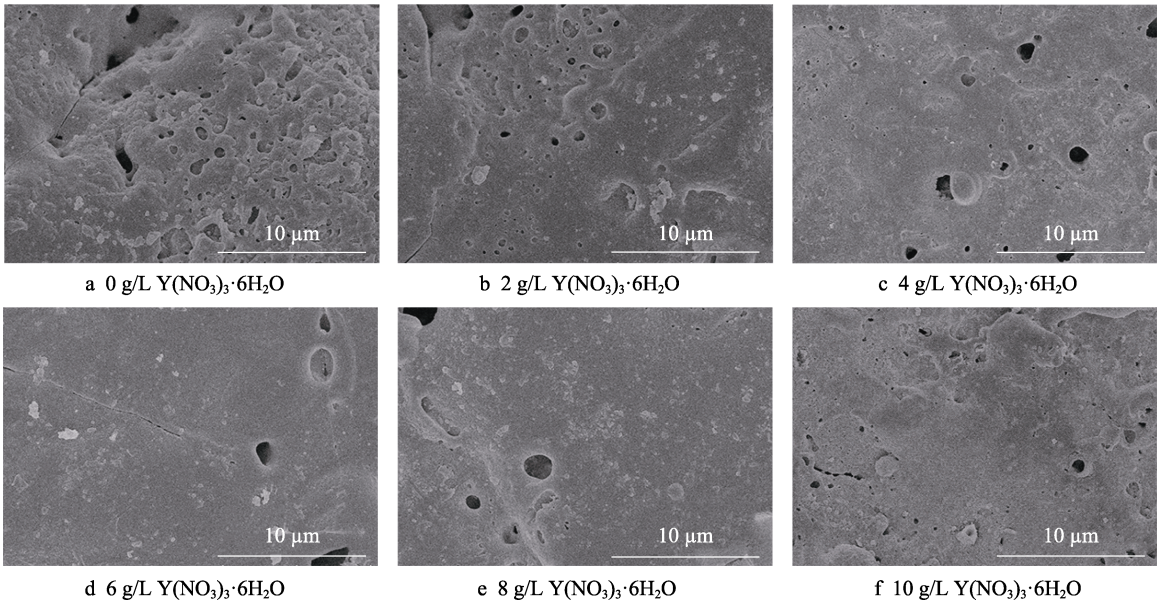


图 4　反应 15 min 后不同 Y-ZnO 涂层的 SEM 照片

Fig.4 SEM images of different Y-ZnO coatings after reaction of 15 min

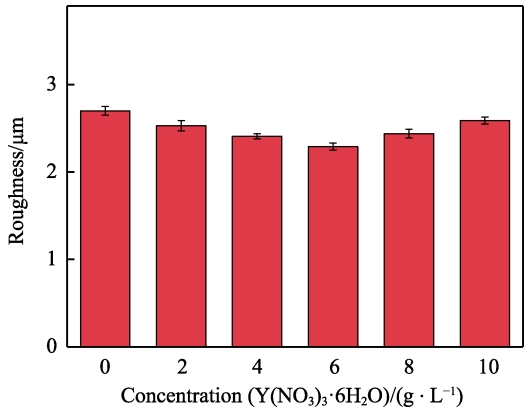


图 5　不同 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层表面粗糙度

Fig.5 Roughness of different $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coatings

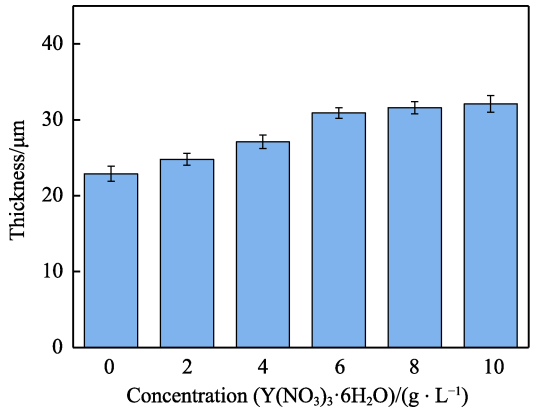


图 6　不同 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层厚度

Fig.6 Thickness of different $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coatings

2.4　钇用量对涂层发射率和吸收率的影响

吸收率 α_λ、反射率 ρ_λ 和发射率 ε_λ 的关系如公式(1)和(2)[25]：

$$\alpha_\lambda+\rho_\lambda=1 \tag{1}$$

$$\varepsilon_\lambda \text{ or } \alpha_\lambda=1-\rho_\lambda \tag{2}$$

使用红外发射率仪测量 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 热控涂层的红外发射率 ε，其结果如图 7 所示。稀土改性前，ZnO/Al_2O_3 涂层的红外发射率 ε 为 0.829；稀土改性后，$ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层的红外发射率 ε 提高，且随钇用量的增加而增大，其变化趋势与涂层厚度的变化趋势相吻合（图 6）。其中，当 $Y(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ 质量浓度为 10 g/L 时，$ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 微弧氧化涂层的红外发射率 ε 为 0.862。这是因为较厚的涂层能有效阻隔辐射到达铝合金表面。此外，涂层粗糙度对发射率的影响也十分重要，涂层粗糙度越大，其比表面积越大，因而涂层的发射率也越大[26-28]。

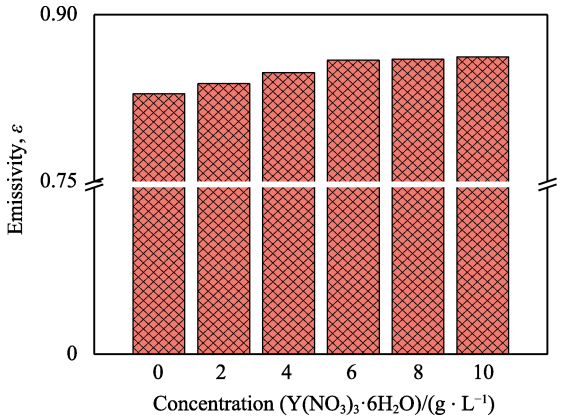


图 7　钇用量对 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层发射率的影响

Fig.7 Effect of yttrium amount on emissivity of $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coatings

利用紫外/可见/近红外分光光度计测量 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层在 200~2500 nm 光谱范围内的反射率，并运用公式(3)计算涂层的太阳吸收率 α_s[2]：

$$\alpha_s=1-\rho_s=\frac{\int_{200\text{ nm}}^{2500\text{ nm}}\rho_\lambda S_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_{20\text{ nm}}^{2500\text{ nm}}S_\lambda \mathrm{d}\lambda} \tag{3}$$

式中，α_s 为太阳吸收率，ρ_s 为太阳反射率，ρ_λ 为反射率，S_λ 为太阳光谱强度（cd）。

$ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层的吸收光谱如图 8 所示。稀土改性前，ZnO/Al_2O_3 微弧氧化涂层的太阳吸收率 α_s 最大，为 0.448；Y 改性后，太阳吸收率均有所下降，当 $Y(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ 质量浓度为 6 g/L 时，涂层的太阳吸收率 α_s 最小，为 0.405。如图 8 所示，钇的添加明显改变了涂层在高能紫外波段的吸收情况，这是因为 Y_2O_3 的禁带宽度大于 ZnO，其 220~370 nm 波段吸收能力弱于 ZnO，降低了涂层对此波段的吸收强度。此外，Y_2O_3 中 Y^{3+} 属于全空结构，外层电子结构十分稳定，且 4f 轨道属于内层轨道，受到外层 s 和 p 轨道的屏蔽，难以接收外部能量[17,29]。图 9 为 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层的太阳吸收率 α_s 和吸辐比 α_s/ε，其变化规律与涂层粗糙度的变化规律（图 5）一致。随粗糙度的增加，在两相界面处的光学性能改变，提高了 α_s[29-31]。综合考虑涂层红外发射率 ε 和太阳吸收率 α_s 的变化情况，适宜的钇用量可得到最佳吸辐比，例如当用量为 6 g/L 时，涂层吸辐比最低，为 0.471。

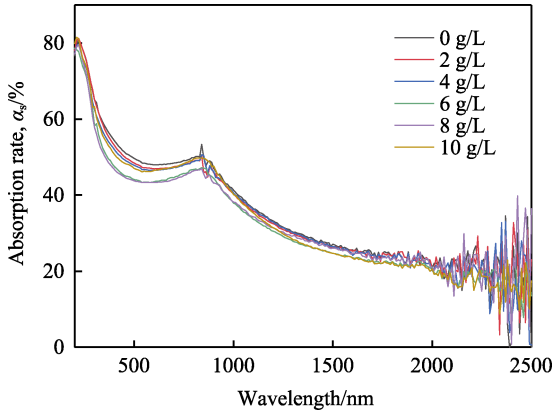


图 8　不同 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层的吸收光谱

Fig.8 The absorption spectra of different $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coatings

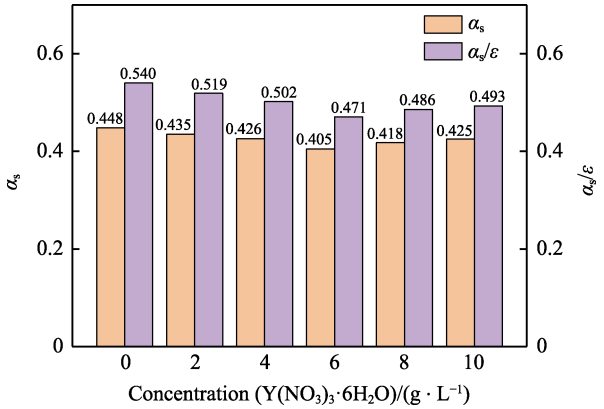


图 9　不同 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 涂层的太阳吸收率 α_s 与吸辐比 α_s/ε

Fig.9 α_s and α_s/ε of different $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ coatings

3　结论

通过微弧氧化技术，在 6061 铝合金表面原位构筑高性能 $ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 热控涂层。得到以下结论：

1）该涂层的主要组成为 ZnO、Y_2O_3 和 Al_2O_3。其中，Y_2O_3 有助于 ZnO 的成核和生长，从而改善涂层的均匀性和粗糙度，同时调控涂层厚度，影响涂层对光的吸收和发射。

2）Y_2O_3 对 220~400 nm 波段的紫外光的吸收较弱，从而削弱了 ZnO 基涂层在该波段的吸收。研究结果表明，当 $Y(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ 用量为 6 g/L 时，$ZnO/Y_2O_3/Al_2O_3$ 微弧氧化涂层的红外发射率为 0.859，太阳吸收率为 0.405，吸辐比为 0.471。

参考文献：

[1] DEHNAVI V, LUAN B L, SHOESMITH D W, et al. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior [J]. Surface and coatings technology, 2013, 226(5): 100-107.

[2] GENCER Y, GULEC A E. The effect of Zn on the microarc oxidation coating behavior of synthetic Al-Zn binary alloys[J]. Journal of alloys and compounds, 2012, 525: 159-165.

[3] 雷欣, 林乃明, 邹娇娟, 等. 铝合金微弧氧化的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48 (12): 10-22.
LEI Xin, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. Research progress of micro-arc oxidation on aluminum alloys[J]. Surface technology, 2019, 48 (12): 10-22.

[4] GOUEFFON Y, ARURAULT L, FONTORBES S, et al. Chemical characteristics, mechanical and thermo-optical properties of black anodic films prepared on 7175 aluminum alloy for apace applications[J]. Materials chemistry and physics, 2010, 120(15): 636-642.

[5] GRILIR, BAKER M, CASTLE J E, et al. Corrosion behavior of a 2219 aluminum alloy treated with a chromate conversion coating exposed to a 3.5% NaCl solution [J]. Corrosion science, 2011, 53(4): 1214-1223.

[6] 李航, 卢松涛, 秦伟, 等. 电流密度对 MgO-ZnO 陶瓷薄膜结构和热控性能的影响[J]. 无机材料学报, 2017, 32(12): 1292-1298.
LI Hang, LU Song-tao, QIN Wei, et al. Current density on microstructure and thermal control performances of MgO-ZnO ceramic coatings[J]. Journal of inorganic materials, 2017, 32(12): 1292-1298.

[7] JOHNSON J A, HEIDENREICH J J, MANTZ R A, et al. A multiple-scattering model analysis of zinc oxide pigment for spacecraft thermal control coatings[J]. Progress in organic coatings, 2003, 47: 432-442.

[8] 周博. 改性 ZnO 基有机热控白漆的合成与表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
ZHOU Bo. The synthesis and characterized of modified ZnO-based organic thermal control coating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[9] 马宏, 孟军峰, 谭海龙. 高空间稳定低污染防静电有机热控涂层[J]. 特种功能型涂料, 2005, 13(1): 11-15.
MA Hong, MENG Jun-feng, TAN Hai-long. Organic thermal control coatings with excellent stability, low pollution and anti-static performance[J]. Special functional coating, 2005, 13(1): 11-15.

[10] VAHID H, ZAKER B, MASOUD H, et al. Synthesis of Zn-SBA-15 as a new pigment for spacecraft white thermal control coatings[J]. Journal of coatings technology and research, 2016, 13(4): 727-733.

[11] KHUILI M, FAZOUAN N, MAKARIM H, et al. First-principles calculations of rare earth (RE=Tm, Yb, Ce) doped ZnO: Structural, optoelectronic, magnetic, and electrical properties[J]. Vacuum, 2020, 181(6): 109603-109611.

[12] 姜玮. 稀土元素有机配合物导数吸收光谱和荧光光谱特性的研究及其分析应用[D]. 济南: 山东大学, 2003.
JIANG Wei. Study on the derivative absorption and fluorescence spectra of organic complexes of rare earth elements and their analytical applications[D]. Jinan: Shandong University, 2003.

[13] 穆柏春，孙旭东. 稀土对 Al_2O_3 陶瓷烧结温度、显微结构和力学性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2002, 22(S1): 104-107.
MU Bo-chun, SUN Xu-dong. Effect of rare earth on sintering temperature, microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 ceramics[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2002, 22(S1): 104-107.

[14] 朱勇, 李涓. 医用氧化钇稳定氧化锆陶瓷的制备及成型工艺[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(5): 16-21.
ZHU Yong, LI Juan. Preparation and molding process of medical yttria stabilized zirconia ceramics[J]. China ceramics, 2020, 56(5): 16-21.

[15] GANG L, MOATAZ M A, YUN J, et al. Rheological characterization and shape control in gel-casting of nano-sized zirconia powders[J]. Ceramics international, 2014, 40(9): 14405-14412.

[16] XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, CHEN Ru-yi, et al. Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al-Cu-Mg alloy[J]. Thin solid films, 2000, 372(1/2): 114-117.

[17] 王成磊, 梁朝杰, 周承华, 等. 基于稀土调控的激光熔覆 Ni60 强化铝合金的高温摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 69-80.
WANG Cheng-lei, LIANG Chao-jie, ZHOU Cheng-hua, et al. High temperature friction and wear properties of laser cladding Ni60coating modified with rare earth on 6063 aluminum alloy bases[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 69-80.

[18] 刘瑞霞, 郭峰, 李鹏飞, 等. 稀土元素对镁合金微弧氧化陶瓷层表面形貌和结构的影响[J]. 金属热处理, 2008, 33(11): 70-73.
LIU Rui-xia, GUO Feng, LI Peng-fei, et al. Effect of elements in magnesium alloton surface morphology and structure of ceramic coating by micro-arc oxidation[J]. Metal heat treatment, 2008, 33(11): 70-73.

[19] 马跃宇, 何德山, 涂思京, 等. 稀土对镁合金微弧氧化层的作用综述[J]. 稀有金属, 2017, 41(6): 709-713.
MA Yue-yu, HE De-shan, TU Si-jing, et al. Effects of rare earths on micro-arc oxidation of magnesium alloys: a review [J]. Chinese journal of rare metals, 2017, 41(6): 709-713.

[20] 郭峰, 刘瑞霞, 李鹏飞, 等. 电解液中的稀土对 AZ91D 镁合金微弧氧化陶瓷层的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(2): 134-138.
GUO Feng, LIU Rui-xia, LI Peng-fei, et al. Effect of rare earth elements in electrolyte on ceramic coating prepared by micro-arc oxidation on AZ91D magnesium alloy [J]. Transactions of materials and heat treatment, 2011, 32(2): 134-138.

[21] KATABATHINI N, ABDULMOHSEN A. Gold supported yttrium oxide nanorods for catalytic oxidative cracking of propane to light olefins[J]. Fuel, 2020, 278(11): 118375-118386.

（下转第 37 页）