

## 综述·专论

## 铝合金微弧氧化陶瓷涂层研究进展

慕伟意, 李争显, 杜继红, 李少龙

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

[摘要] 简述了微弧氧化技术的基本原理和优点,着重介绍了实验参量,如电源模式、电解液组成、电压、频率、占空比、氧化时间、基材成分等对铝合金微弧氧化的影响,总结和分析了铝合金微弧氧化陶瓷涂层微观结构与性能的特点及其关系。最后,针对目前铝合金微弧氧化陶瓷涂层研究领域存在的问题,提出了今后的研究方向。

[关键词] 铝合金;微弧氧化;陶瓷涂层

[中图分类号] TG174.453

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)04-0094-06

## Research Progress of Ceramic Coatings Formed on Aluminum Alloys by Micro-arc Oxidation

MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, LI Shao-long

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

[Abstract] The principle and advantages of micro-arc oxidation (MAO) were briefly described. The influences of experimental parameter such as power supply mode, electrolyte composing, voltage, frequency, duty ratio, oxidation time and substrate material component, etc. on the ceramic coating performance and MAO process of the aluminum alloys were emphasized to be reviewed. The characteristics and its relation of the microstructure and performance of the coatings formed on aluminum alloys by MAO were also analyzed. In the last, the research orientations of the coatings formed on aluminum alloys by MAO in future were suggested based on the problems including the present study of the coatings formed on aluminum alloys by MAO.

[Key words] aluminum alloys; micro-arc oxidation; ceramic coating

铝合金具有密度小、比强度高、易于成形加工等优点,在军工、航空、航天、汽车等工程领域有着广泛的应用前景,但表面硬度低、耐磨性能差制约着其进一步应用,因此进行表面处理显得尤为必要。陶瓷具有高硬度和良好的耐磨、耐蚀性能,是一种具有广阔开发应用前景的重要涂层材料,陶瓷涂层可以赋予基体金属材料一些其他表面强化技术无法赋予的特殊性能<sup>[1]</sup>。目前,铝合金表面陶瓷涂层的常用制备方法主要有激光熔覆<sup>[2]</sup>、等离子喷涂<sup>[3]</sup>、阳极氧化<sup>[4]</sup>和微弧氧化<sup>[5]</sup>等。激光熔覆易在铝合金表面形成脆性相和裂纹,使得涂覆困难;等离子喷涂制备的陶瓷涂层存在与基体结合不牢、厚度均匀性差的缺点;阳极氧化前处理要求严格,制备的涂层较薄,致密性差且硬度不高;微弧氧化(MAO)在铝合金表面生成的陶瓷涂层硬度高,厚度均

匀,与基体结合牢固,能使铝合金的耐磨损性、耐腐蚀性、绝缘性等综合表面性能得到显著改善。笔者基于在这方面所做的研究工作,先对 MAO 基本原理和优点进行介绍,再对铝合金 MAO 陶瓷涂层的研究进展进行综述,为研究者提供信息和参考。

## 1 MAO 技术基本原理及优点

MAO 是在 Al, Mg, Ti 等有色金属材料表面原位生长陶瓷涂层的一种新技术。采用 MAO 技术能将金属材料 and 陶瓷材料的特点有机地结合起来,获得复合材料,使之既具有金属材料的强韧性、可加工性、导电性、导热性,又具有陶瓷材料的耐高温、耐腐蚀、耐磨损等优点。随着铝合金的开发与应用,铝合金 MAO 已成为

[收稿日期] 2013-02-16; [修回日期] 2013-04-13

[基金项目] 陕西省自然科学基金资助(2011JM6009);西安市未央区科技计划项目资助(201115);国家“十二”某协作配套项目资助

[作者简介] 慕伟意(1974—),男,江西铜鼓人,博士,高级工程师,主要研究方向为微弧氧化陶瓷涂层。

研究的热点<sup>[6]</sup>。

MAO 设备示意图如图 1 所示,电源分直流<sup>[7]</sup>、交流<sup>[6]</sup>和脉冲<sup>[8]</sup>等工作模式。微弧氧化时,不锈钢板为阴极,试样为阳极,控制电解液温度不超过 60 ℃。MAO 的基本过程<sup>[5,9]</sup>是:接通电源后,适宜的电压使阳极(试样)表面析出大量氧气气泡,在其周围形成一个以氧气为主的气封,此时试样表面形成一层绝缘膜;电压继续升高,电极间的强电场使气封中的气体发生微弧放电并形成等离子体,击穿绝缘膜,试样表面出现大量游走的细密火花;随着氧化时间的延长,试样表面出现分散的微弧,并快速游动,到后来,微弧逐渐变成稀疏、缓慢移动的弧光斑点,在热氧化、等离子体氧化和电化学反应的共同作用下,试样表面形成与基体结合牢固、性能优良的陶瓷涂层。

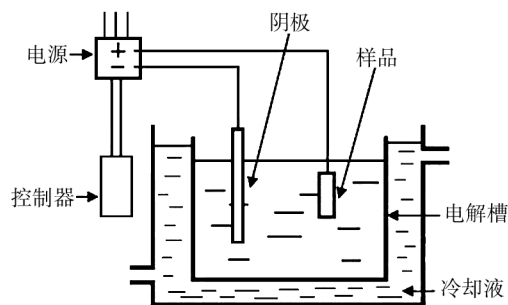


图 1 微弧氧化设备示意图

Fig. 1 Sketch map of MAO equipment

MAO 的优点主要有:1) 陶瓷涂层是原位生长<sup>[5]</sup>,与基体结合牢固;2) 电解液成分会参与氧化反应,通过调节电解液组分可改变涂层的结构与性能,从而实现涂层的设计<sup>[10]</sup>;3) 微区瞬间温度很高,可达 8000 K,在此微区的氧化产物会发生熔化,涂层中形成高温结晶相,而基体的温度低于 300 ℃,不影响基体原有的性能<sup>[5]</sup>;4) 非线性操作,对工件形状适应性广,生成的涂层厚度均匀;5) 工艺简单,流程短,对高温或真空条件没有要求,对前处理的要求低,性价比极高。

MAO 过程中,影响陶瓷涂层形成及生长过程、涂层组织结构与性能的因素主要有电源模式、电解液组成、电参数、氧化时间、基材成分等实验参量<sup>[8]</sup>,通过控制和优化这些实验参量,可以提高涂层生长速率,改善涂层微观结构,从而获得性能优异的陶瓷涂层。

## 2 实验参量对铝合金 MAO 的影响

### 2.1 电源模式的影响

最初的 MAO 采用直流电源,然而直流电源对金属表面的放电行为难以控制,且该电源模式下形成的陶瓷涂层性能不高。随着研究的不断深入,交流和脉冲

电源模式因其成膜效率高、所形成的涂层性能优异而被广泛采用<sup>[11-12]</sup>。杜军等<sup>[13]</sup>发现,在方波脉冲电源模式下,电流密度和氧化时间对铝合金 MAO 涂层的相组成影响不大,涂层由晶态  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和非晶态  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成,这是由于脉冲电源具有特殊的“针尖”特性作用。Arslan 等<sup>[6]</sup>在非对称交流电源模式下制备铝合金 MAO 涂层,涂层表面呈现出由类似火山喷射口状的熔融氧化铝和放电气孔组成的形貌特征,涂层由  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  组成。Xing 等<sup>[14]</sup>对比研究了在直流和非对称交流两种电源模式下制备的铝合金 MAO 陶瓷涂层,结果表明,直流模式(DC)下制得的涂层表面多孔,有许多开口状的放电气孔,而交流模式(AC)下制得的涂层,放电气孔基本呈闭合状态,且更致密、更厚。AC 涂层由  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  组成,而 DC 涂层仅由  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  组成。AC 涂层与基体结合牢固,而 DC 涂层/基体的界面处有许多孔洞和裂纹。采用 AC,涂层孔隙减少,致密度增加,硬度最高达 20 GPa,而 DC 涂层硬度约为 14 GPa。此外,AC 涂层具有优异的耐蚀性能。这是由于非对称交流电源能很好地避免电极表面产生的附加极化作用,并能改变正反半周的电容,调节电位大小。

### 2.2 电解液组成的影响

胡正前等<sup>[15]</sup>在以硅酸钠为主要成分的电解液中对 LY12 铝合金微弧氧化处理 80 min,制备出了厚度 76  $\mu\text{m}$ 、显微硬度 1500HV 的陶瓷涂层,涂层分为疏松层和致密层两层,由  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  两相组成, $\gamma$  相所占比例高于  $\alpha$  相,涂层有较高的耐腐蚀性和较好的抗热震性。郝建民等<sup>[16]</sup>研究了铝合金分别在铝酸钠体系、柠檬酸钠体系和酒石酸钠体系中的 MAO,发现在氧化初期,弱酸性电解液中 MAO 电压随时间的变化规律类似于碱性电解液中的情况;在氧化中期,碱性电解液中的生长速度明显高于弱酸性电解液中的;在后期,碱性电解液中的生长速度有所升高,而弱酸性电解液中的生长速度明显降低。Wu 等<sup>[17]</sup>在氟锆酸钾体系电解液中对 LY12 铝合金进行了 MAO 处理,涂层由  $m\text{-ZrO}_2$ 、 $t\text{-ZrO}_2$  和少量的  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  组成。刘文亮等<sup>[18]</sup>研究了 LY12 铝合金在氢氧化钠、硅酸盐、铝酸盐和磷酸盐等溶液体系中的 MAO,发现在硅酸盐和磷酸盐体系中,涂层生长较快。索相波等<sup>[19]</sup>研究了电解液中添加纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒对涂层生长过程及其组织结构和性能的影响,结果表明:在电解液中添加纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒,提高了铝合金 MAO 涂层的生长速率,纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒能够通过 MAO 过程复合于陶瓷涂层中;经纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒复合处理后,涂层孔径尺寸减小,孔隙率降低,硬度提高了 50% 左右,摩擦系数由 0.49 左右下降到 0.39 左右,相对应的质量磨损率由  $2.9 \times 10^{-3} \text{ mg/min}$  下降到  $1.9 \times 10^{-3} \text{ mg/min}$ 。研究者们

还开展了铝合金在分别添加了 SiC 粉末<sup>[20]</sup>、碳纳米管<sup>[10]</sup>、TiO<sub>2</sub> 溶胶<sup>[21]</sup>、石墨粉末<sup>[22]</sup> 等添加剂的电解液中 MAO 的研究。电解液溶液在 MAO 过程中除了起到电极间的连通导电作用外,其中的某些离子成分还会参与微弧区的电化学反应,进入涂层成为其中的一部分,这是造成在不同的电解液中 MAO 过程及制得的陶瓷涂层性能存在差异的原因。

### 2.3 电参数的影响

在 MAO 过程中,电参数(电压、电流密度、占空比、频率等)的控制对获得优异性能的陶瓷涂层是至关重要的。郭锋等<sup>[23]</sup>研究了电压对铝合金 MAO 涂层相组成的影响,发现单独提高正向电压,涂层组成物相中的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数呈现出先增加大、后减小的规律,质量分数的最大值出现在正向电压 440 ~ 460 V 的区间内;负向电压对相组成的影响要比正向电压更为显著,负向电压提高时,涂层中  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数明显提高。此外,电压变化时,涂层中  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数的变化基本与  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相反,涂层内侧的莫来石相质量分数受电压影响较小,但外侧的质量分数则在电压提高时有所增加。魏同波等<sup>[24]</sup>的研究表明,增加电流密度,会加快涂层及涂层中致密层的增长速度,但降低了致密层厚度占总涂层厚度的比例。翁海峰等<sup>[25]</sup>在不同占空比(2% ~ 18%)下制备涂层,厚度在占空比为 10% 时达到了最大值(17  $\mu\text{m}$ ),涂层主要由亚稳态的  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和稳定态的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成,随着占空比的增长,稳定态的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 逐渐成为涂层的主要成分。涂层的表面粗糙度也随着占空比的增长而变大,当占空比超过 14% 时,涂层的表面开始有裂纹出现。董玉英等<sup>[26]</sup>的研究表明,在高频条件下对铝合金进行微弧氧化,涂层的生长速率快,非晶相所占比例远远高于低频下生成的涂层。造成这些影响的原因目前还不清楚,需要进一步的研究。

### 2.4 氧化时间的影响

吴振东等<sup>[27]</sup>研究表明,随着 MAO 时间的延长,涂层的粗糙度增大,致密性有所提高,厚度近似线性增加,生长速率为 0.95  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。涂层内结晶相的含量随着氧化时间的延长而增多。此外,随着氧化时间的延长,涂层的耐蚀性提高,硬度增大,抗热震性减弱,摩擦磨损实验中的磨损量先降低,后升高,摩擦系数减小。因为随着时间的延长,涂层厚度增加,涂层电阻增大,表面击穿点变少,如维持电流不变,则击穿通道的电流升高,温度也随之升高,反应趋于平衡,导致涂层特性发生了相应变化。

### 2.5 基材成分的影响

侯朝辉等<sup>[28]</sup>对 Si 质量分数为 8% ~ 12% 的 ZL 系

列铸铝合金 MAO 进行了研究,发现高硅铸铝合金在水玻璃复合体系中进行 MAO 可以得到一层细腻、均匀、较厚、显微硬度较高的陶瓷涂层。崔丽华等<sup>[29]</sup>研究表明,在磷酸盐体系中,以 Si 和 Cu 为主要合金元素的铸造铝合金 MAO 电流密度大,能源消耗大, Si 和 Cu 元素对 MAO 有不利影响。金玲等<sup>[30]</sup>研究发现, ZL109 合金和 SiC<sub>p</sub>/ZL109 复合材料都可以进行 MAO,其涂层均由疏松层和致密层组成。ZL109 铝合金 MAO 涂层主要由不同结构的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相组成,而 SiC<sub>p</sub>/ZL109 复合材料 MAO 涂层由 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgAl<sub>13</sub>O<sub>40</sub> 组成。薛文斌等<sup>[31—32]</sup>研究了 SiC<sub>p</sub>/2024 铝基复合材料在硅酸盐溶液中的 MAO,发现涂层具有两层结构,内层由莫来石、 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 结晶相组成,外层除结晶相外,还含有大量 SiO<sub>2</sub> 非晶相,其中的硅元素主要来自电解液,而不是 SiC<sub>p</sub>/2024 基体。在微弧放电烧结作用下,参与成膜的 SiC<sub>p</sub> 增强体大部分被氧化,只有少数残余 SiC<sub>p</sub> 颗粒仍然保留在靠近界面的涂层内。SiC<sub>p</sub> 增强体阻碍了涂层的生长,但它并没有破坏涂层的完整性和连续性, SiC<sub>p</sub> 增强体氧化促进了涂层中莫来石形成。MAO 对铝合金有较好的适应性,基体中其他成分含量越低,越有利于成膜,这些非铝成分对铝合金 MAO 造成影响的原因尚有待进一步的研究。

### 2.6 其他实验参量的影响

MAO 是一个多种因素控制的过程,影响铝合金 MAO 的因素很多,除上述主要实验参量外,温度、阴极材料等对铝合金 MAO 也有较大的影响。李翠玲等<sup>[33]</sup>研究发现,槽液温度越高,则起弧电压越低,起弧时间越短,涂层厚度越厚。但当槽液温度达到一定值时,由于温度过高,对涂层厚度的增加不利,电流密度为 1.98 A/dm<sup>2</sup> 时,槽液温度最好控制在 40 ~ 60  $^{\circ}\text{C}$ 。MAO 的阴极材料一般采用不溶性金属材料,如不锈钢材料<sup>[5]</sup>。

## 3 铝合金 MAO 涂层微观结构与性能的特点及其关系

铝合金 MAO 涂层颜色一般为白色或灰色居多,彩色涂层也有报道。金光等<sup>[34]</sup>认为, LY12 铝合金 MAO 涂层中含 O, Al 和 Si 元素时,呈白色;含 24.95% O, 32.25% Al, 20.99% Si 和 15.81% Co 元素时,呈天蓝色。吴振东等<sup>[35]</sup>认为, LY12 铝合金 MAO 涂层中含 O, Al 和 Cu 元素时,呈深乳白色;含 O, Al, Cu 和 Cr 元素时,呈黑色。崔作兴等<sup>[36]</sup>的研究中, LY12 铝合金 MAO 涂层的主要组成相为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>5</sub>O<sub>8</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 MnWO<sub>4</sub> 时,呈黄色。通过往涂层中掺入某种能够反射出颜色的元素成分,可获得彩色的铝合金 MAO 陶瓷涂层。

铝合金 MAO 涂层一般呈晶态结构,主要的结晶物质为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。随着实验参量的不同,涂层的相组成也会各不相同。例如 Nykyforchyn 等<sup>[37]</sup>在制得的涂层中观察到了合金元素 Mg, Cu 等的氧化物 MgO, CuO 相;采用硅酸盐、磷酸盐、锆酸盐或钨酸盐等体系电解液制备涂层,涂层中会出现溶液中的粒子成分<sup>[15-16,18,27,36]</sup>,如在氟锆酸钾体系电解液中制备的涂层主要由 m-ZrO<sub>2</sub> 和 t-ZrO<sub>2</sub> 组成,以 t-ZrO<sub>2</sub> 为主相,还含有少量  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{KZr}_2(\text{PO}_4)_3$ <sup>[17,27]</sup>;此外,  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$  以及非晶物质等均会因工艺的不同而以不同的量出现在涂层中<sup>[5,21]</sup>。

一般情况下,铝合金 MAO 涂层为内层致密、外表层粗糙多孔的双层结构<sup>[38-39]</sup>。Curran 等<sup>[39]</sup>系统研究了铝合金 MAO 涂层的孔隙率、孔分布和孔大小,结果表明,平均孔隙率约为 20%,位于外表层,多为表面开口状的孔洞,几乎没发现有闭合状态的孔洞,孔的平均大小为 30 nm,大多数孔的大小介于 5 nm ~ 1  $\mu\text{m}$  之间。涂层的这些结构特点,决定了涂层具有结合力好、硬度高、耐磨耐蚀性能和电绝缘性能好等优点。

笔者在由水玻璃、氢氧化钠和去离子水配制而成的电解液中,采用脉冲电源模式、合适的电参数分别对纯铝(试样 1)和 LY12 铝合金(试样 2)进行 MAO 处理 180 min。经 XRD 检测(如图 2 所示)发现,试样 1 涂

层由 23.5%  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 17.5%  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  和 59%  $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$  所组成,试样 2 涂层由 37.4%  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 39.4%  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 14.3%  $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$  和 8.9%  $\text{SiO}_2$  所组成。试样 1 和试样 2 涂层的横截面形貌如图 3 所示,涂层的厚度分别为 250  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$ ,为内层致密、外表层多孔的结构。试样 1 和试样 2 涂层的硬度分布如图 4 所示,试样 1 涂层的硬度大于 1500HV 0.1kg,涂层厚度约为 85  $\mu\text{m}$ ,试样 2 涂层的硬度值大于 1500HV0.1kg,涂层厚度约为 115  $\mu\text{m}$ 。由基体/涂层界面向外,硬度值逐渐降低,分析认为是越往外,涂层中  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  越少所致。试样 1 和试样 2 涂层的硬度相近,涂层硬度分布变化趋势相同。

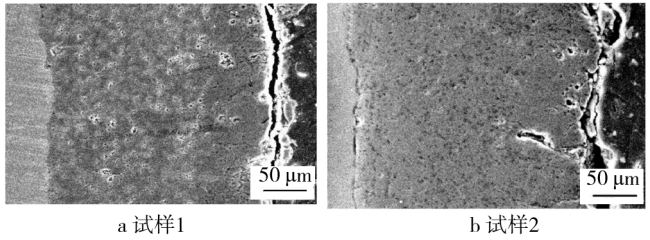


图 3 试样微弧氧化涂层的横截面形貌  
Fig. 3 The cross sectional morphologies of the MAO coating samples

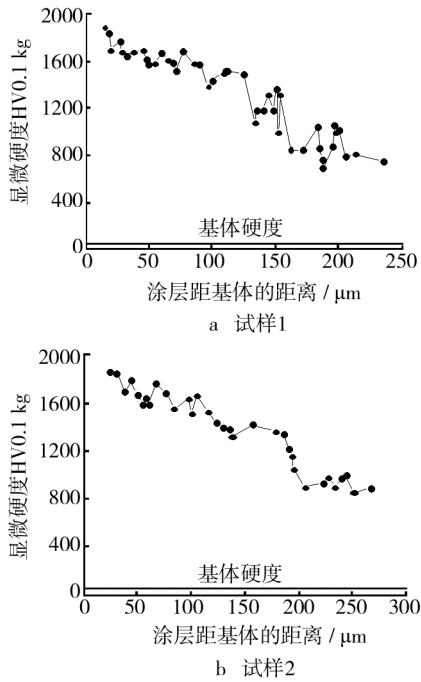


图 4 试样涂层的横截面硬度分布

Fig. 4 The cross sectional hardness profiles of the coating samples

Malyshev 等<sup>[40]</sup>认为,尽管铝合金 MAO 陶瓷涂层的表面层中孔隙率较高,但孔隙率的大小对涂层厚度、耐磨性几乎没有影响。Curran 等<sup>[39]</sup>认为,孔的存在使涂层在润滑条件下具有好的耐磨性能,但对硬度有一点负面的影响。Kurze 等<sup>[41]</sup>对涂层结构与性能之间的对应关系进行了探讨,认为涂层具有牢固的结合力,较

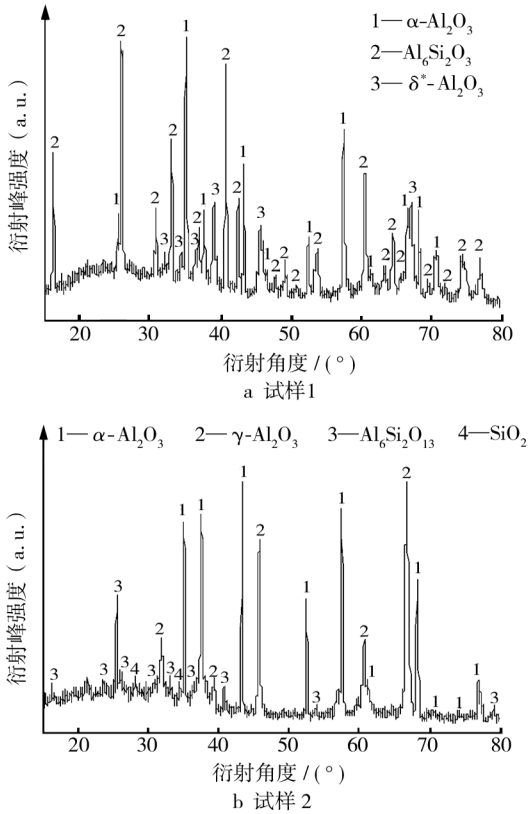


图 2 试样微弧氧化涂层的 XRD 谱

Fig. 2 The XRD patterns of MAO coating samples

高的硬度、耐磨性能、耐蚀性能和电绝缘性能是与涂层的结构和组成成分不开的,其中,高的涂层/基体结合强度、涂层内聚强度是保证铝合金 MAO 陶瓷涂层其他优异性能得以实现的基石。Fan 等<sup>[42]</sup>制备了 14  $\mu\text{m}$ , 38  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  的铝合金 MAO 涂层,研究发现粗糙度随着厚度的增加而增大,不同厚度的涂层在 1650 ~ 3000 nm 的红外线反射率是相同的,而在 780 ~ 1650 nm 的红外线反射率随着厚度的增加而降低,影响红外线反射率的主要因素是涂层表面的孔隙和粗糙度。

## 4 结语

MAO 技术克服了激光熔覆、等离子喷涂、阳极氧化等工艺制备铝合金表面陶瓷涂层的缺点,其操作简单,环保,经济,对基材成分和工件形状适应性广,生成的陶瓷涂层具有厚度均匀、硬度高、耐蚀及耐磨性能好、与基体结合牢固等优良特性。电源模式、电解液组成、电压、频率、占空比、氧化时间、基材成分等实验参数都会影响铝合金表面 MAO 陶瓷涂层的结构,涂层的结构又会决定着涂层的性能。总的看来,现有的研究多停留在试样上,应用研究较少,对陶瓷涂层的形成过程和形成机理等理论方面的研究还不够系统和深入,这就表明铝合金表面 MAO 陶瓷涂层离实际应用和对其进行组织控制生产还有较远的距离。因此,基于铝合金 MAO 涂层的实际应用,开展实验参量对涂层微观结构和性能的影响及其优化、与性能技术指标相对应微观结构的匹配控制、涂层形成过程及其机理等内容的研究将是今后的重点方向。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 黄海滨,邵新海,宋高伟,等. 陶瓷涂层性能影响因素及工艺优化研究[J]. 装备环境工程,2012,9(1):90—93.
- [2] 范常刚,王爱华. 铝合金表面激光熔覆的新进展[J]. 激光技术,1996,20(6):366—369.
- [3] 刘腾彬,王泽华,方学锋,等. 铝基体喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2/\text{NiCoCrAlY}$  系梯度涂层的抗热震性能[J]. 机械工程材料,2006,30(12):19—22.
- [4] 王彬,苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. 装备环境工程,2012,9(2):64—68.
- [5] YEROKHIN A L, NIE X, LEYLAND A, et al. Plasma Electrolysis for Surface Engineering[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 122(2/3):73—93.
- [6] ARSLAN E, TOTIK Y, DEMIRCI E E, et al. High Temperature Wear Behavior of Aluminum Oxide Layers Produced by AC Micro-arc Oxidation[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204:829—833.
- [7] LIU Z W, JUN K W, ROH Hyun-seog, et al. Pulse Study on the Partial Oxidation of Methane over  $\text{Ni}/\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  Catalyst[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2002, 189(2):283—293.
- [8] MU W Y, HAN Y. Characterization and Properties of the  $\text{MgF}_2/\text{ZrO}_2$  Composite Coatings on Magnesium Prepared by Micro-arc Oxidation[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202:4278—4284.
- [9] 慕伟意,李争显,杜继红,等. 镁合金的应用及其表面处理研究进展[J]. 表面技术,2011,40(2):86—91.
- [10] LEE Kang Min, KO Young Gun, SHIN Dong Hyuk. Incorporation of Carbon Nanotubes into Micro-coatings Film Formed on Aluminum Alloy via Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Materials Letters, 2011, 65:2269—2273.
- [11] KRYSMANN W, KURZE P, DITTRICH K H, et al. Process Characteristics and Parameters of Anodic Oxidation by Spark Discharge (ANOF)[J]. Crystal Research and Technology, 1984, 19(7):973—979.
- [12] 陈克选,祖立国,李春旭,等. 微弧氧化电源 IGBT 驱动和保护研究[J]. 电焊机,2006,36(10):40—44.
- [13] 杜军,陈东初,李文芳,等. 铝合金微弧氧化陶瓷膜的微观结构和耐蚀性[J]. 华南理工大学学报,2007,35(3):6—10.
- [14] XIN S G, SONG L X, ZHAO R G, et al. Influence of Cathodic Current on Composition, Structure and Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings on Aluminum Alloy Prepared by Micro-arc Oxidation Process[J]. Thin Solid Films, 2006, 515:326—332.
- [15] 胡正前,马晋. 硅酸盐电解液中铝合金微弧氧化陶瓷膜层的结构与性能[J]. 金属热处理,2003,28(3):23—26.
- [16] 郝建民,李波,王利捷,等. 弱酸性介质中铝合金微弧氧化研究[J]. 轻合金加工技术,2005,33(6):32—34.
- [17] WU Z D, JIANG Z H, YAO Z P. Adhesive Strength and Structure of Micro-arc Oxidation Ceramic Coatings Grown in-situ on LY12 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16:1588—1591.
- [18] 刘文亮. 铝合金在不同溶液中的微弧氧化膜层性能研究[J]. 电镀与精饰,1999,21(4):9—11.
- [19] 索相波,邱骥,刘吉延. 电解液中添加纳米  $\text{SiO}_2$  对 7A52 铝合金表面微弧氧化陶瓷层生长过程及性能的影响[J]. 中国表面工程,2010,23(3):42—45.
- [20] 熊仁章,盛磊,杨生荣,等. 添加剂对铝合金微弧氧化陶瓷涂层结构和耐磨性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2002,25(3):17—19.
- [21] TANG M Q, LI W P, LIU H C, et al. Influence of Titania Sol in the Electrolyte on Characteristics of the Microarc Oxidation Coating Formed on 2A70 Aluminum Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205:4135—4140.
- [22] 王继东. NaOH 体系中添加石墨对铝合金微弧氧化层生长及磨损性能的影响[J]. 材料开发与应用,2003,19(3):

- 8—11.
- [23] 郭锋,刘荣明,李鹏飞. 电压参数对铝合金微弧氧化陶瓷层相组成的影响[J]. 金属热处理,2007,32(10):38—40.
- [24] 魏同波,张学俊,王博,等. 电流密度对铝合金微弧氧化膜的生长及结合力的影响[J]. 材料保护,2004,37(4):4—6.
- [25] 翁海峰,陈秋龙,蔡珣,等. 脉冲占空比对纯铝微弧氧化膜的影响[J]. 表面技术,2005,34(5):59—62.
- [26] 董玉英,沈丽如,铁军,等. 铝及其合金微弧氧化过程中工艺条件对氧化膜性能的影响[J]. 核工业西南物理研究院年报,2001(1):109—110.
- [27] 吴振东,姜兆华,姚忠平,等. 反应时间对 LY12 铝合金微弧氧化膜层组织及性能的影响[J]. 无机材料学报,2007,22(3):555—559.
- [28] 侯朝辉,旷亚非,周海晖,等. 铸铝合金微弧氧化工艺研究[J]. 电镀与精饰,2001,23(5):5—8.
- [29] 崔丽华,郝建民,陈宏,等. 铸造铝合金微弧氧化工艺及其优化[J]. 热加工工艺,2009,38(16):107—109.
- [30] 金玲,扬忠,李高宏,等.  $\text{SiC}_p/\text{ZL109}$  铝基复合材料微弧氧化层的微观组织特征[J]. 兵器材料科学与工程,2003,26(3):31—35.
- [31] 薛文斌,吴晓玲,施修龄,等.  $\text{SiC}_p/2024$  铝基复合材料表面微弧氧化膜组织结构及其耐蚀性[J]. 复合材料学报,2006,23(6):98—102.
- [32] 薛文斌.  $\text{SiC}$  颗粒增强体对铝基复合材料微弧氧化膜生长的影响[J]. 金属学报,2006,42(4):350—354.
- [33] 李翠玲,欧阳贵. 6063 铝材微弧氧化最佳电流密度和槽液温度的探讨[J]. 复合材料学报,2009,43(4):108—111.
- [34] 金光,李玉海,张罡,等. LY12 铝合金天蓝色微弧氧化膜层的制备及其耐磨性能[J]. 金属热处理,2009,34(5):61—63.
- [35] 吴振东,姜兆华,姚忠平,等. LY12 铝合金微弧氧化黑色陶瓷膜结构及耐腐蚀性研究[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(增刊2):687—689.
- [36] 崔作兴,王彩丽,邵忠财,等. 铝合金黄色微弧氧化膜的制备及其性能[J]. 材料保护,2009,42(6):4—6.
- [37] NYKYFOREHYN H M, KLAPKIV M D, POSUVAILO V M. Properties of Synthesised Oxide Ceramic Coatings in Electrolyte Plasma on Aluminum Alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 100:219—221.
- [38] 薛文斌,邓志威,来永春,等. 有色金属表面微弧氧化技术评述[J]. 金属热处理,2000,1(1):1—3.
- [39] CURRAN J A, CLYNE T W. Porosity in Plasma Electrolytic Oxide Coatings[J]. Acta Materialia, 2006, 54:1985—1993.
- [40] MALYSHEV V, MOSKAU. Micro-arc Oxidation, A New Method for Strengthening Aluminun Surface[J]. Matelloberfkarche, 1995, 49(8):606—608.
- [41] DITTRICH K H, KRYSMANN W, KURZE P, et al. Structure and Properties of ANOF Layers [J]. Crystal Research and Technology, 1984, 19(1):93—99.
- [42] FAN Y J, KE W, MING Z, et al. Infrared Reflection by Alumina Films Produced on Aluminum Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 114(1):398—401.

(上接第 64 页)

- [2] 葛中民. 耐磨损设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1991.
- [3] 代汉达,曲建俊. 水润滑下偶件表面粗糙度对 PTFE 复合材料摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封,2009,34(2):8—11.
- [4] FANG L, DULIAS U, ZUM GAHR K H. Effect of Surface Roughness of Self-mated Alumina on Friction a Wear in Lubricated Reciprocating Sliding Contact [C]//Contributions of Surface Engineering to Modern Manufacturing and Remanufacturing—Proceedings of the 3rd International Conference on Surface Engineering, 2002. (余不详)
- [5] 车建明. 碳纤维增强铜基复合材料摩擦磨损性能同其磨损表面形貌相关性研究[J]. 摩擦学学报,2004,24(2):144—147
- [6] 伊万·伊留克. 薄层摩擦学[M]. 王一麟,陈耕译. 北京:机械工业出版社,1986.
- [7] AIRMAN V A, MALAKNOV G V, MEMLOR V L. Study of Mechanism of Surface Film Formation in the Friction of Copper Graphite Material [J]. J Friction and Wear, 1989(10):873—881.
- [8] 胡献国. 混合润滑状态下表面粗糙度对拉深摩擦系数的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1994, 17(2):167—172.
- [9] 周银生,金永听. 表面粗糙度对边界摩擦与磨损性能的影响[J]. 润滑与密封,1994,34(2):9—10.
- [10] 冀盛亚,孙乐民,上官宝,等. 表面粗糙度对黄铜/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损性能影响的研究[J]. 润滑与密封, 2009,34(1):29—32.
- [11] 田世新,马先贵,张会臣. 钢铜摩擦副表面粗糙度、硬度对摩擦磨损性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报,1991,13(3):33—41
- [12] 王成彪,温诗铸. 铸件滑动摩擦副润滑状态转化之部分影响因素的考察[J]. 摩擦学学报,1993,13(4):297—304.