DOI:10.20038/j.cnki.mra.2024.000513

# 微弧氧化法制备2A12铝合金高发射率涂层的性能研究

张凯凯<sup>1</sup>,呼丹<sup>1</sup>,屈静<sup>1</sup>,孟伟<sup>2</sup>

(1. 西安赛福斯材料防护有限责任公司,陕西西安710200; 2. 兰州空间技术物理研究所,甘肃兰州730010)

**摘要:** 铝合金作为航天电推进器用加速喷射电真空器件的常用材料得到广泛应用,然而其在应用过程中容易出现过热现象,进而影响工作性能和使用寿命。因此,严重限制了铝合金的进一步应用。为了有效地解决铝合金过热问题,需将其表面聚集的热量进行有效地散发。采用微弧氧化(MAO)技术,以磷酸盐为基础电解液的主要成分,以FeSO<sub>4</sub>为添加剂,通过调控FeSO<sub>4</sub>的浓度,在2A12铝合金表面制备出组分分布均匀的具有红外高发射率的热控辐射涂层。使用扫描电子显微镜、能谱仪、X射线衍射仪、涡流测厚仪、粗糙度仪、万能材料试验机、傅里叶变换红外光谱仪,对不同FeSO<sub>4</sub>浓度下制备的微弧氧化涂层的表面形貌、元素组成、相组成、厚度、粗糙度、结合强度及红外发射率进行了系统分析。结果表明,随着FeSO<sub>4</sub>浓度从0g·L<sup>-1</sup>增加到8g·L<sup>-1</sup>,涂层表面的孔洞数量逐渐减少,孔洞尺寸逐渐增加且出现裂纹,涂层的厚度和粗糙度逐渐增加。其中,厚度从17.2 µm增加至39.1 µm,粗糙度从1.94 µm增加至2.96 µm。另外,XRD及XPS分析结果表明,涂层主要由 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> $\alpha$ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相组成,且均为基体与电解液反应生成的产物。值得注意的是,当FeSO<sub>4</sub>浓度为6g·L<sup>-1</sup>时,涂层的结合强度、红外发射率值达到最佳值,分别为 39.8 MPa和0.909。本研究为2A12铝合金在航空航天领域中进一步应用提供了理论依据。

关键词: 2A12 铝合金;微弧氧化;FeSO<sub>4</sub>;表面形貌;厚度;粗糙度;结合强度;红外发射率
 中图分类号:TQ127.2
 文献标志码: A
 文章编号:1673-9981(2024)05-0796-07

**引文格式:**张凯凯,呼丹,屈静,等. 微弧氧化法制备2A12铝合金高发射率涂层的性能研究[J]. 材料研究与应用,2024,18(5): 796-802.

ZHANG Kaikai, HU Du, QU Jing, et al. Study on Properties of High Emissivity Coating of 2A12 Aluminum Alloy Prepared by Micro-Arc Oxidation[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(5):796-802.

## 0 引言

二十一世纪以来,随着我国航空航天领域的快 速发展,以及各类空间研究任务的增加,对推进器系 统的使用需求呈多样化。航天电推进系统作为一类 采用电能加热或电离推进器加速喷射而产生推力的 推进系统,可极大地提高卫星的有效载荷,延长其使 用寿命及降低成本<sup>[1-3]</sup>。但是,电推进产品属于电真 空器件范畴,工作时产生的热量难以散出,严重影响 其工作性能和使用寿命。因此,要求电推进的放电 室(如屏栅筒)及其他外部构件表面需具备较高的发 射率,这样才能防止电推进器内部温度过高。2A12 铝合金具有密度低、加工性能好、导电导热性能优 良、力学性能佳等优点<sup>[4]</sup>,被作为制备电推进器的放 电室及其它外部构件的材料。但是,铝合金存在发 射率低,以及不能在高温环境中将表面聚集的热量 进行有效散发的问题,严重影响了其使用性能,因此 需要选用适宜的涂层制备技术来提高其表面的红外 发射率。

微弧氧化 (Micro-oxidation, MAO)<sup>[58]</sup>, 是铝、 镁、钛等阀金属基体与氧离子、电解质离子在电化 学、热化学和等离子化的作用下,经历熔融、喷发和 高温相变一系列反应,最终使材料基体表面原位生 长涂层的制备技术。MAO技术被广泛用于制备金 属表面耐磨、耐蚀涂层及功能性涂层<sup>[6,8-10]</sup>。近年 来,研究人员开始利用MAO技术制备热控辐射散 热涂层。李涛等<sup>[11]</sup>在铝合金表面制备出ZnO/ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>微弧氧化涂层,该涂层红外发射率为 0.859,显示出优异的热控性能。Bmms等<sup>[12]</sup>利用 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+NaOH体系在6061A1合金表面制备出微 弧氧化涂层,当电解液温度增加到90.5℃时涂层发 射率高达0.94。目前,铝合金红外高发射率热控涂 层的制备主要采用阳极氧化、电镀、涂刷、喷涂

收稿日期:2024-07-17

基金项目:"慧眼行动"创新成果项目(3326D4DA)

作者简介:张凯凯,硕士,助理工程师,研究方向为材料表面工程技术。Email:zkk08166157@163.com。

等<sup>[11,13-14]</sup>方法,采用MAO技术在铝合金表面制备高 发射率涂层的研究还较少。在微弧氧化涂层制备过 程中,电解液作为关键因素之一,通常分为酸性和碱 性两大类<sup>[15-16]</sup>。由于酸性电解液会对环境造成一定 的污染,因此电解液主要选用硅酸盐、磷酸盐、铝酸 盐等含金属或非金属的碱性电解液。过渡金属氧化 物(如MnO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、TiO<sub>2</sub>、Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 因具有较高的红外发射率<sup>[17-19]</sup>,通常也被添加到高 发射率涂层的制备中,以改变涂层的性能。

本研究以磷酸盐体系作为电解液,通过添加不同浓度的过渡金属氧化物FeSO4,采用MAO技术, 以期在2A12铝合金表面制备的微弧氧化涂层中形 成Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,从而提高涂层的红外发射率。通过探究 FeSO4浓度对制备的铝合金涂层表面形貌、物相组 成、厚度和粗糙度、结合强度及红外发射率的影响, 获得最优的电解液配比,为2A12铝合金在航空航 天方面的进一步应用提供理论依据。

#### 1 实验部分

## 1.1 原材料及设备

实验原材料为 2A12 铝合金,将其加工成 30 mm×30 mm×2 mm 的方片试样,并在端面一角加 工 出 直 径 3 mm 的 通 孔 。试样 经 300<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、 1200<sup>#</sup>、2000<sup>#</sup>、3000<sup>#</sup>砂纸打磨处理,再进行超声除 油,清洗、吹干待用。先将钛金属丝穿过试样通孔并 牢固贴合,随后将试样浸入电解液中。涂层制备设 备为 JCL-WH200A 型微弧氧化系统,其中电参数 为频率 300 Hz、占空比 15%、电压 520 V,溅射时间 20 min,电解液中磷酸盐的添加量为 20 g·L<sup>-1</sup>, FeSO<sub>4</sub>的添加量分别为 0、2、4、6 和 8 g·L<sup>-1</sup>。在涂层 制备过程中,为防止溶液温度过高,使用溶液循环冷 却装置来控制温度,并使之低于 25 ℃。

### 1.2 测试与表征

利用 JSM-6460 型扫描电子显微镜(SEM,配 有能谱仪(EDS)),对制备的试样进行表面形貌观 察和元素含量分析,其中加速电压为20 kV。利用 D/max 2200PC 型X射线衍射仪,对制备的试样进 行相成分分析,其中靶材为CuKa、20为10°—90°、步 长为0.02°。使用德国马尔 MarSurf PS10便携式表 面粗糙度测量仪,对制备的试样进行表面粗糙度测 试。运用德国 EPK MINITEST735型涂层测厚仪, 对制备的试样进行厚度测试。利用日本岛津 IRTracer 100型傅里叶变换红外光谱仪,对制备的 试样进行红外发射率测试。使用 CMT5105万能材 料试验机,对制备的试样进行涂层与基体结合的强 度测试。

## 2 结果与分析

#### 2.1 涂层厚度和粗糙度

图 1 为不同 FeSO<sub>4</sub>浓度下 2A12 铝合金微弧氧 化涂层的厚度和粗糙度。从图 1 可见,随着 FeSO<sub>4</sub> 浓度从 0 g·L<sup>-1</sup>增加到 8 g·L<sup>-1</sup>,微弧氧化涂层厚度从 17.2 μm增加至 39.1 μm,涂层粗糙度从 1.94 μm增 加至 2.96 μm,二者均呈现出明显的递增趋势。涂 层厚度和粗糙度的变化,主要是因电解液中 FeSO<sub>4</sub> 浓度的增加,使溶液中离子浓度增大,随之电导率也 增加,导致表面击穿熔融效应剧烈化,熔融物从击穿 通道内不断喷涌、冷却、堆积,最终使制备的涂层厚 度不断增加,粗糙度也不断增加。



图 1 不同 FeSO₄浓度下2A12 铝合金涂层的厚度及粗糙度 Figure 1 Thickness and roughness of 2A12 aluminum alloy coatings produced using different concentrations of FeSO₄

#### 2.2 涂层表面形貌

图 2 为不同 FeSO<sub>4</sub>浓度下 2A12 铝合金微弧氧 化涂层的表面形貌。从图2可见,不同FeSO4浓度 制备的铝合金微弧氧化涂层的表面凹凸不平,且分 布着不同大小的孔洞,呈现出典型火山口微孔形貌。 当 $FeSO_4$ 浓度从 $0g\cdot L^{-1}$ 提高至 $8g\cdot L^{-1}$ 时,所制备涂 层的表面形貌粗糙程度逐渐增加,其中微孔数量随 着 FeSO 浓度的增加而逐渐减少,但孔洞的尺寸却 逐渐增大。这是由于在涂层制备过程中,随着 FeSO<sub>4</sub>浓度的增加会引起微弧氧化程度变得剧烈, 产出的冷凝熔融物增多导致底层部分较小的微孔被 盖住。因此,通常认为涂层表面孔洞数量的减少与 微弧氧化过程中产生的熔融产物增加有关<sup>[20]</sup>。值 得注意的是,当 $FeSO_4$ 浓度进一步提高至8g·L<sup>-1</sup> 时,涂层表面出现明显裂纹,说明FeSO4浓度过高会 导致微裂纹延伸。通常涂层裂纹的形成与微弧氧化 反应过程中反应产物在放电通道中冷却有关。反应 产物经放电通道排出时,在电解液的冷却作用下反

应产物瞬间冷却,导致涂层中存在应力,并在应力的 释放过程中使涂层表面出现裂纹[15.21-22]。



(a)-0 g·L<sup>-1</sup>; (b)-2 g·L<sup>-1</sup>; (c)-4 g·L<sup>-1</sup>; (d)-6 g·L<sup>-1</sup>; (e)-8 g·L<sup>-1</sup>.

表1为不同FeSO<sub>4</sub>浓度下2A12铝合金微弧氧 化涂层的元素组成。由表1可知,涂层主要由元素 O、Na、Al、P和Fe组成。其中,元素Na、P、Fe为电 解液的组成成分,元素Al的含量随着FeSO<sub>4</sub>浓度的

#### 表1 不同 FeSO₄浓度下 2A12 铝合金涂层元素组成

Table 1	Surface	elementa	al compo	ositions	of	2A12			
	aluminum	alloy	coatings	produc	ced	using			
	different concentrations of FeSO <sub>4</sub>								

$ ho({ m FeSO_4})/$	涂层中各元素含量w/%						
$(g \cdot L^{-1})$	О	Na	Al	Р	Fe		
0	44.82	0.14	53.28	1.76	0.00		
2	41.52	0.33	46.11	5.62	6.42		
4	37.43	0.85	38.49	9.92	13.31		
6	35.43	0.65	34.91	7.43	21.58		
8	36.32	0.79	28.02	8.57	26.30		

增加逐渐降低。这主要是由于FeSO4浓度的增加会使Fe元素大量附着于涂层表面,引起Al元素含量占比降低。另外,涂层厚度随FeSO4浓度增加而增加,而Al元素作为基体元素在涂层表面的含量比例降低。

#### 2.3 涂层的相组成及成分分析

图 3 为不同 FeSO<sub>4</sub>浓度下 2A12 铝合金微弧氧 化涂层的 XRD 图谱。从图 3(a)可见,不同 FeSO<sub>4</sub>浓 度制备的微弧氧化涂层由 Al、α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相 组成,未出现其他物相衍射峰。其中,α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相是在微弧氧化过程中元素 Al与元素 O在 放电通道中相互作用形成的。随着 FeSO<sub>4</sub>浓度增 加,元素 Al的衍射峰强度呈现逐渐降低的趋势,这 是因为涂层厚度的增加导致的。从图 3(b)可见,样



(a)一涂层的XRD谱图;(b)一为图(a)中FeSO<sub>4</sub>浓度为6和8g·L<sup>-1</sup>的放大图。

(a)—XRD pattern of the coating; (b)—enlarged images of  $FeSO_4$  concentrations of 6 and 8 g·L<sup>-1</sup> in (a).

图 3 不同 FeSO₄浓度制备的 2A12 铝合金涂层的 XRD 谱图

Figure 3 XRD patterns of 2A12 aluminum alloy coatings produced using different concentrations of FeSO<sub>4</sub>

物相组成以非晶态形式存在。

品在衍射角度10°-30°范围内出现了明显的非晶包 531.5 eV处的特征峰对应OH<sup>-</sup>,533.2 eV处的特征峰 特征峰。说明,样品的结晶度较差,元素Fe和P等 对应吸附的 $H_2O_134.1 \text{ eV}$  处的特征峰对应 $H_2PO_4^-$ , 而 133.3 eV 处的特征峰对应 P<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>4-</sup>。从图 4 还可 图 4 为 $\rho$ (FeSO<sub>4</sub>)=6 g·L<sup>-1</sup>时所得 2A12 铝合金 见,元素Fe的2p1/2轨道结合能为724.0eV,而 微弧氧化涂层的 XPS 图谱。从图4可见:元素 O存 2p3/2轨道的结合能为710.7 eV。该结果与元素Fe 在两个特征峰,分别对应的结合能为531.5和 的2p1/2和2p3/2标准峰位相对应。因此,可以肯定 533.2 eV;元素P存在两个特征峰,分别对应的结合能 电解液中的Fe元素是以Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>形式存在于2A12铝 合金微弧氧化涂层[19]。







#### 2.4 涂层的结合强度

涂层在实际工况的应用中与基体的结合强度需 要达到一定的性能,以防止使用过程中出现脱落问 题<sup>[23-24]</sup>。依据标准GB8642—2002进行不同FeSO<sub>4</sub> 浓度制备的2A12铝合金微弧氧化涂层与基体的结 合强度测试,测试结果如图5所示。从图5可以看 出:随着FeSO4浓度逐渐增加,涂层与基体的结合强 度呈现上升的趋势;当FeSO4浓度为6g·L<sup>-1</sup>时,涂 层与基体的结合强度可达 39.8 MPa;当FeSO4浓度 增加至8g·L<sup>-1</sup>时,涂层与基体的结合强度降低为 33.2 MPa。这是由于FeSO4浓度过高,会导致涂层 结合界面处出现较大的应力并形成裂纹,从而导致 涂层的结合性能下降。





#### 2.5 涂层的发射率

图 6 为不同 FeSO<sub>4</sub>浓度下 2A12 铝合金微弧氧 化涂层在波长 5—20 µm 下的红外发射率曲线图。 从图 6 可以看出:在波长 5—20 µm 范围内,不同 FeSO<sub>4</sub>浓度制备的 2A12 铝合金涂层的红外发射率 随着波长的增加呈现出先增后降再升的趋势,当发 射波长为 14 µm 时发射率趋于稳定;随着 FeSO<sub>4</sub>浓 度的增加,涂层的红外发射率存在明显的增加,在当 FeSO<sub>4</sub>浓度为 6 g·L<sup>-1</sup>时红外发射率达到最大。



图 6 不同 FeSO₄浓度制备的 2A12 铝合金涂层在波长 5—20 µm下的红外发射率曲线

Figure 6 Infrared emissivity curves of 2A12 aluminum alloy coatings produced using different FeSO₄ concentrations at 5—20 µm

为了进一步确认红外发射率值的变化率,对图 6的红外发射率曲线进行拟合,结果如图7所示。从 图 7 可见,涂层平均红外发射率整体数值随着 FeSO<sub>4</sub>浓度的增加呈现先增后降的趋势,与红外发 射率曲线的变化一致。当 $FeSO_4$ 浓度为 $6g\cdot L^{-1}$ 时, 涂层红外发射率数值提高至0.909,相比于2A12铝 合金提高了14.9%;当FeSO<sub>4</sub>浓度进一步增加至 8g·L<sup>-1</sup>时,涂层发射率数值出现了小幅下降。涂层 的红外发射率增加是由多种因素导致的。首先,添 加的FeSO4在2A12铝合金微弧氧化涂层中形成了 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,由于Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>外层存在未成对的电子,这有利于 电子的跃迁,进而提高了涂层表面的红外发射 率<sup>[17,25-26]</sup>。其次,涂层的红外发射率与涂层的厚度、 粗糙度、表面形貌等多种因素相关,涂层的厚度和粗 糙度与红外发射率呈正相关[27],即厚度和粗糙度越 大涂层红外发射率越高。最后,涂层中含有非晶态 P和Fe氧化物,非晶态结构的混乱度会造成原子之 间的极性振动,进而提高红外发射率数值的上升。 当 $FeSO_4$ 浓度为 $8g\cdot L^{-1}$ 时,涂层的微孔数量较少, 导致入射电磁波在其孔隙中散射的频次降低,使涂 层的红外发射率降低。因此,需要考察各类因素对 涂层红外发射率产生的影响。



coatings produced using different FeSO<sub>4</sub> concentrations at

#### 3 结论

(1)在以磷酸盐为主的电解液中,不同 FeSO<sub>4</sub>浓 度制备的 2A12 铝合金微弧氧化涂层形貌呈现典型 的火山口孔洞特征。从 XRD 和 XPS 图谱分析可 得,涂层由 Al、α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相组成,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以非 晶态的形式存在。涂层的厚度与粗糙度,伴随着 FeSO<sub>4</sub>浓度的增加逐渐增大。

(2)涂层结合强度在FeSO<sub>4</sub>浓度为6g·L<sup>-1</sup>时达 到最高,其值为39.8 MPa。但是,FeSO<sub>4</sub>浓度过高 会导致涂层结合界面处出现较大应力而形成裂纹, 导致涂层结合性能下降。

(3)FeSO<sub>4</sub>的添加可提高涂层的红外发射率。 当FeSO<sub>4</sub>浓度为6g·L<sup>-1</sup>时红外发射率值可达 0.909,但随着其浓度进一步增加会导致红外发射率 降低。这主要归因于涂层表面微孔数量减少,导致 入射电磁波在涂层孔隙中散射频次降低,进而引起 红外发射率降低。

## 参考文献:

- [1] 姚轩宇. 电推进:航空动力发展的新篇章[J]. 航空动力, 2023(5): 55.
- [2]于达仁,乔磊,蒋文嘉,等.中国电推进技术发展及展 望[J].推进技术,2020,41(1):1-12.
- [3] 罗彧. 2023年航空电推进系统进展[J]. 航空动力, 2024(1): 33-37.
- [4] 张丽娇. 航空航天高强铝合金材料应用及发展趋势研

801

究[J]. 新材料产业, 2021(3): 7-11.

- [5] 赵小荣,马国峰.微弧氧化技术在铝基复合材料方面的研究进展[J].铝加工,2023(4):3-8.
- [6] 王燕, 乔爱家. 铝合金微弧氧化膜的制备及耐蚀性研究[J]. 长春工业大学学报, 2023, 44(6): 490-494.
- [7] 余海洋,谷艳飞.铝合金表面微弧氧化涂层制备的影响因素分析[J].冶金与材料,2024,44(1):25-27.
- [8] 胡光,陈鼎.合金成分对铝合金微弧氧化陶瓷层耐蚀 性能的影响[J].热加工工艺,2023,52(24):121-125.
- [9] JI R L, LIU L, YIN H X, et al. Synthesis of corundum rich coating on 7055 aluminum alloy by micro-arc oxidation and its corrosion resistant property in a saline medium [J]. Surface & Coatings Technology, 2024, 170(8): 130182.
- [10] WANG K, WU S J, HUANG Y D, et al. Increasing the compact density and its consistency in the crosssection for enhancing the anti-corrosion and mechanical properties of micro-arc oxidation coatings [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 1344-1352.
- [11] 李涛,张鹏,卢松涛,等. 铝合金表面 ZnO/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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.
- [12] BMMS A B, MA K J, CHIEN H H, et al. The effect of MAO processing time on surface properties and low temperature infrared emissivity of ceramic coating on aluminium 6061 alloy [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60: 323-334.
- [13] 刘丁.室温固化涂料型热控涂层的制备及性能研究 [D].上海:中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐 研究所),2018.
- [14] 乔亚东. ZnO@ZIF-8复合涂层的构筑及其热控性能 研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- [15] 张义.电流密度和FeSO₄对纯铝微弧氧化膜层结构及 特性的影响[D].秦皇岛:燕山大学,2016.
- [16] TANG Q, QIU T, NI P, et al. Soft sparking

discharge mechanism of micro-arc oxidation occurring on titanium alloys in different electrolytes [J]. Coatings, 2022, 12(8): 1191.

- [17] 任首龙. 高温热辐射涂料的制备与热性能研究[D]. 常州:常州大学, 2022.
- [18] 牛翱翔. 钛合金表面高发射率涂层原位制备及性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [19] 高广睿. Ti-6Al-4V表面微弧氧化高发射率涂层的研 究[D]. 沈阳:东北大学, 2018.
- [20] 杨艳,穆耀钊,孙长涛,等.添加剂对铝基复合材料 微弧氧化膜层性能的影响[J].热加工工艺,2014,43 (4):150-152.
- [21] 文陈,郝雪龙,崔庆新,等.Fe<sup>2+</sup>浓度对2A12铝合金 微弧氧化膜性能的影响[J].中国表面工程,2017,30 (5):67-73.
- [22] CHAI Y S, YAN J P, WANG C H, et al. Effect of temperature and thermal stress on micropores and cracks in aluminum alloy film during micro-arc oxidation [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2023, 170(8): 83507.
- [23] 王亚明, 邹永纯, 王树棋, 等. 金属微弧氧化功能陶 瓷涂层设计制备与使役性能研究进展[J]. 中国表面 工程, 2018, 31(4): 20-45.
- [24] 姜冬雪, 付颖, 张峻巍, 等. 钛合金表面 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷膜 制备及性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39 (6): 469-476.
- [25] WANG Y K, BA F H, CHAI Z, et al. A review of thermal control coatings prepared by micro-arc oxidation on light alloys [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, 19(3): 100514.
- [26] 鞠鹏飞,刘冠杰,吴超,等.工艺参数对钛合金微弧 氧化涂层热控性能的影响[J].材料保护,2016,49 (5):30-33.
- [27] 李扬扬,马文,李敏,等.高红外辐射材料研究与应 用进展[J].陶瓷学报,2024,45(1):17-31.

## Study on Properties of High Emissivity Coating of 2A12 Aluminum Alloy Prepared by Micro-Arc Oxidation

#### ZHANG Kaikai<sup>1</sup>, HU Dan<sup>1</sup>, QU Jing<sup>1</sup>, MENG Wei<sup>2</sup>

(1. Xi'an Surface Material Protection Co., Ltd., Xi'an 710200, China; 2. Lanzhou Institute of Physics CAST, Lanzhou 730010, China)

**Abstract:** Aluminum alloys are widely used as materials for electric vacuum devices in aerospace electric propulsion systems. However, they tend to overheat during operation, significantly impacting performance and service life, thus limiting their border application. Effectively dissipating the heat accumulated on the surface is a key approach to addressing this issue. In this context, a high-emissivity thermal control and radiative heat dissipation coating was developed on aluminum alloy surfaces using micro-arc oxidation (MAO) technology. Phosphate was selected as the primary component of the electrolyte, with FeSO<sub>4</sub> added as an additive. By adjusting the concentration of the additive FeSO<sub>4</sub> in the electrolyte, a uniform, highemissivity infrared coating was successfully fabricated on the surface of 2A12 aluminum alloy. Scanning electron microscope, energy spectrometer, X-ray diffractometer, eddy current thickness meter, roughness meter, universal material testing machine and Fourier transform infrared spectrometer were used to analyze the surface morphology, elemental composition, phase composition, thickness, roughness, bonding strength and infrared emissivity of the micro-arc oxidation coatings prepared at different concentrations of FeSO<sub>4</sub>. The results show that as the FeSO<sub>4</sub> concentration increased from 0 g·L<sup>-1</sup> to 8 g·L<sup>-1</sup>, the number of holes on the coating surface gradually decreased, while pore size increased, and cracks began to form. The coating' s thickness and roughness of the coating increased from 17.2 µm to 39.1 µm, and from 1.94 µm to 2.96 µm, respectively. XRD and XPS analyzes revealed that the coatings consisted primarily of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phases, which originated from the substrate and electrolyte. Notably, at a FeSO<sub>4</sub> concentration of 6 g·L<sup>-1</sup>, the coating exhibited optimal bonding strength and infrared emissivity, measured at 39.8 MPa and 0.909, respectively.

**Keywords:** 2A12 aluminum alloy; micro arc oxidation; FeSO<sub>4</sub>; surface morphology; thickness; roughness; bonding strength; infrared emissivity

(学术编辑:孙文)