

引用格式: 刘鹏瑞, 鲍天骄, 张桐, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜制备工艺对高温阻挡性能的影响[J]. 航空材料学报, 2025, 45(4): 37-44.  
LIU Pengrui, BAO Tianjiao, ZHANG Tong, et al. Effect of preparation process of aluminum oxide thin films on high temperature barrier performance[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(4): 37-44.

## $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜制备工艺对高温阻挡性能的影响

刘鹏瑞\*, 鲍天骄, 张桐, 张亚发, 王浩森

(中国航发北京航空材料研究院 隐身材料重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 随着探测技术的飞速发展, 武器装备对于具有低红外辐射特性材料需求越来越高, 尤其是高温部件的红外辐射信号抑制材料。Pt 金属薄膜具有超低的红外发射率, 但由于金属薄膜在高温下存在与基体元素的扩散, 从而造成红外发射率大幅上升, 因此需要制备具有高温稳定性的阻挡层。采用磁控溅射和电子束气相沉积工艺制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜阻挡层, 通过 SEM、XRD 研究不同工艺制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜微观形貌、相组成, 并研究不同工艺制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜上磁控溅射镀 Pt 后红外发射率的变化规律。结果表明: 采用电子束气相沉积工艺制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 具有稳定的晶体结构。表面镀覆 Pt 金属薄膜后, 薄膜初始红外发射率为 0.16, 经过 900 °C、20 h 高温后, 红外发射率为 0.172, 具有良好的耐高温性能, 有望应用于高温低红外发射率薄膜的阻挡层。

**关键词:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜; 电子束气相沉积; 磁控溅射; 红外发射率; 阻挡层

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000060

中图分类号: TJ765.5; V259

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)04-0037-08

## Effect of preparation process of aluminum oxide thin films on high temperature barrier performance

LIU Pengrui\*, BAO Tianjiao, ZHANG Tong, ZHANG Yafa, WANG Haosen

(Key Laboratory of Stealth Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** With the rapid development of detection technology, the demand for infrared stealth performance in weapons and equipment is increasing, especially the urgent need to suppress the infrared radiation signal of high-temperature components. Pt metal films have ultra-low infrared emissivity, However, due to the diffusion of metal films with matrix elements at high temperatures, the infrared emissivity increases significantly. Therefore, it is necessary to prepare a barrier layer with high temperature stability. An alumina thin film barrier layer is prepared using magnetron sputtering and electron beam vapor deposition processes, respectively. The microstructure, phase composition of alumina thin films prepared by different processes and variation of emissivity after magnetron sputtering Pt coating on alumina thin films are studied by SEM and XRD. The results indicate that the alumina films prepared by electron beam vapor deposition process have a stable crystal structure. After surface coating with Pt metal film, the initial infrared emissivity of the film is 0.16. After high-temperature treatment at 900 °C for 20 h, the infrared emissivity is 0.172. It has good high-temperature resistance and is expected to be applied as a barrier layer for high-temperature and low infrared emissivity films.

**Key words:** alumina thin film; electron beam vapor deposition; magnetron sputtering; infrared emissivity; barrier layer

随着军事科学技术的迅速发展, 红外探测和红外精确制导技术不断提高, 严重威胁武器装备的安全性。先进武器装备朝着实现全方位、多频谱隐身

方向不断发展, 然而发动机及其各类热端部件的红外辐射较高, 针对性的辐射信号抑制技术研究起步比较晚。为实现发动机等热端部件在红外信号的

抑制目标,需要降低发动机等热端部件在高温工作环境下的红外辐射,特别是3~5  $\mu\text{m}$ 的红外辐射<sup>[1-5]</sup>。西北工业大学对Ni基高温合金表面沉积Au、Pt薄膜开展了系统的研究,研究表明金属薄膜具有较低的高温红外发射率,然而,在高温保持一段时间后,薄膜红外发射率大幅提高,分析表明,主要是由于高温合金中金属元素向金属薄膜表面扩散导致薄膜完整性破坏<sup>[6-7]</sup>。目前,高温下金属元素的扩散已经成为影响金属薄膜使用的关键瓶颈问题。在薄膜与基体间增加扩散阻挡层是解决元素扩散问题的一种有效办法。高温合金表面通常涂覆抗氧化性防护薄膜,常用的高温防护薄膜MCrAlY或渗Al涂层,通过薄膜中的Al元素在环境中形成连续致密的热生长氧化物层(thermally grown oxide, TGO),实现其良好的高温氧化性能<sup>[8-9]</sup>。因此,为了提高与基体材料的热匹配性以及结合强度,采用与TGO成分一致的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜作为扩散阻挡层是一种较好的选择。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷阻挡层组织致密,能够有效抑制高温下基材与金属薄膜之间的元素扩散。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜是一类重要的高温薄膜材料,具有良好的机械强度、耐磨、抗蚀、高温稳定性好,并且具有结构致密度高,常用于作为高温阻挡层<sup>[10-11]</sup>。然而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在高温(900  $^{\circ}\text{C}$ )发生相变,会产生大量形变,引起薄膜裂纹,影响阻挡效果。采用不同工艺制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜具有不同的微观结构、相组成以及组织形貌,在高温作用下将发生不同的变化,影响薄膜的高温稳定性。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的主要制备工艺包括化学气相沉积、物理气相沉积和溶胶凝胶工艺<sup>[12-15]</sup>。其中化学气相沉积成型温度高,而溶胶凝胶工艺制备薄膜工艺复杂,均不利于连续化批量生产。物理气相沉积主要有磁控溅射和电子束气相沉积,两类工艺工业化程度高,均有利于工程应用。然而,不同工艺制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜具有不同的相组成和微观形貌,本工作通过对不同工艺制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜进行对比分析,测试了耐热前后薄膜的形貌、晶体结构,抗氧化性能以及表面镀膜后高温发射率变化,进而对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜高温阻挡性能进行研究。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

采用磁控溅射仪与电子束蒸发设备分别沉积1  $\mu\text{m}$ 厚的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜。基材为Ni基高温合金,尺

寸为40 mm×20 mm×2 mm。沉积薄膜前对样品进行逐级打磨,采用丙酮超声清洗处理。磁控溅射工艺中,采用的靶材为金属Al(纯度高于99%),靶基距为150 mm,将样品放入样品室后,真空度抽至 $1\times 10^{-3}$  Pa,通入Ar气至0.2 Pa,通入O<sub>2</sub>气流量为100 L/min。电子束气相沉积制备Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜,采用99%以上的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>靶材作为蒸发源,e型电子枪作为加热源,背底真空 $5\times 10^{-4}$  Pa,基体温度300  $^{\circ}\text{C}$ ,电子束流75 mA。在不同工艺制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜上磁控溅射镀Pt后,可得到两种Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt复合薄膜。磁控溅射镀Pt采用的靶材为金属Pt(纯度高于99%),靶基距为120 mm,将样品放入样品室后,真空度抽至 $1\times 10^{-3}$  Pa,通入Ar气至0.2 Pa,溅射功率200 W,Pt层厚度控制在(1±0.1)  $\mu\text{m}$ 。

### 1.2 实验方法

采用马弗炉(TM-0917P)模拟静态高温实验环境,对两种工艺制备Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜以及相应的两种Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt复合薄膜进行高温处理,条件为900  $^{\circ}\text{C}$ 热处理20 h。采用扫描电子显微镜(SU8020)测试高温前后Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜以及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt复合薄膜的表面微观形貌。采用XRD(D8 ADVANCE)测试Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜高温前后的晶体结构。

采用HB 5258钢及高温合金的抗氧化性测定实验方法中重量增加法对两种工艺制备Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的高温抗氧化性能进行测试,具体测试过程:将样品在900  $^{\circ}\text{C}$ 环境下进行静态氧化实验,每隔25 h取出测试样品并进行称重,根据样品增重及样品的原始表面积计算平均氧化速率,从而绘制得到平均氧化曲线。

采用HB 20540隐身材料红外发射率测试方法测试不同Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt复合薄膜高温处理前后的法向红外发射率,具体测试过程:采用光谱发射率测试系统分别接收同一对应波长、同一对应温度条件下样品与标准黑体辐射的光谱辐射亮度,按式(1)进行计算得到样品的光谱发射率,对获得的光谱发射率在要求的波段内进行积分,按式(2)计算获得波段发射率。

$$\varepsilon(\lambda, \theta, T) = \frac{L(\lambda, \theta, T)}{L_b(\lambda, \theta, T)} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(\lambda, \theta, T)$ 为样品在温度 $T$ 、辐射波长为 $\lambda$ 条件下,沿样品表面法向 $\theta$ 角的光谱发射率; $L(\lambda, \theta, T)$ 为样品在温度 $T$ 、辐射波长为 $\lambda$ 条件下,沿样品表面法向 $\theta$ 角的光谱辐射亮度; $L_b(\lambda, \theta, T)$ 为标准黑体辐射源在温度 $T$ 、辐射波长为 $\lambda$ 条件下的光谱辐射亮度。

$$\int_{\lambda_i}^{\lambda_j} \varepsilon(\theta, T) = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_j} L(\theta, T) d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_j} L_b(\theta, T) d\lambda} \quad (2)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 不同制备工艺对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜微观结构的影响

通过不同工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面微观形貌如图 1(a-1)、(b-1)所示,其中图 1(a-1)为采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面形貌,而图 1(b-1)为采用电子束气相沉积工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面形貌。从微观形貌结果可以看到,采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面平整,微观颗粒均匀细密,无明显的微观缺陷存在,呈现典型的非晶体微观形貌,见图 1(a-1);采用电子束气相沉积制备的

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜呈现典型的晶体形貌,大的晶粒聚集体呈现粗大的球状形貌,表面有起伏,晶界明显,平整度较磁控溅射工艺制备的氧化铝薄膜略差,如图 1(b-1)所示。从图 1(a-2)中可以看到,经过高温处理后磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面形貌发生了显著变化,表面呈现晶体形貌,晶粒尺寸变大,并且表面粗糙度显著增加。而采用电子束气相沉积制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面微观形貌经过 900 °C 高温热处理 20 h 后,见图 1(b-2),没有发生明显的变化,整体表面起伏变小,平整度提高,没有显著的晶粒增大现象。通过高温前后不同工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的形貌观察可知,不同工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的金相结构不同,因此,高温稳定性存在较大的差异。其中采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为高能态结构,在高温处理下会发生显著的形貌变化。

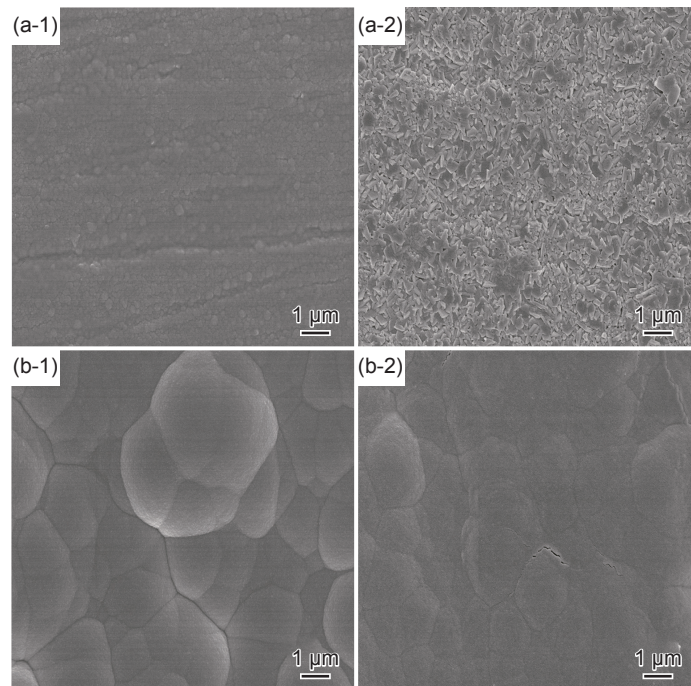


图 1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜 SEM 图 (a)磁控溅射;(b)电子束气相沉积;(1)高温前;(2)高温后

Fig. 1 SEM images of alumina thin films (a)magnetron sputtering; (b)electron beam vapor deposition; (1)before high temperature; (2)after high temperature

### 2.2 不同制备工艺对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜相结构的影响

采用 XRD 测试高温处理前后不同工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的相结构,结果见图 2。由结果可知,高温处理前,采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜呈现非晶相结构,XRD 衍射峰只呈现基底材料的特征峰,如图 2(a-1)所示;采用电子束气相沉积制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜呈现出部分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 特征峰,如图 2(b-1)所示。这是由于在磁控溅射工艺中,工艺温度较低,低温沉积过程,基片表面 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分子或分子团

簇凝结的晶核尺寸小,分子的横向运动排布能量不足,不能形成规整排布的晶体形貌。而采用电子束气相沉积制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 过程,电子束能量密度高,蒸发出的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有较高的能量,同时沉积 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基底温度较高,因此有利于形成热力学更稳定的晶体结构。由于蒸发过程 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以分子团的形式从靶材中脱离,因此,在基片表面呈现球状聚集体形貌。采用高温 900 °C 处理 20 h 后,两种工艺制备的薄膜晶体结构都发生变化。采用磁控溅射工艺

制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜高温后出现晶体特征峰, 为  $\theta$  相和  $\alpha$  相的混合, 见图 2(a-2), 说明经过高温处理后  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜开始从非晶相向晶体转变, 为  $\theta$  晶相和  $\alpha$  晶相混合存在, 且晶体特征峰强度较低, 说明该薄膜中同时也存在非晶态成分, 从表面形貌可以观察到粗糙、不均匀的晶体表面形貌, 见图 1(a-2)。采用电子束气相沉积制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜高温后,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜晶体特征峰增加, 并且强度变大, 证明经过高温后晶体更加完善。通过微观

形貌和相结构的分析可知, 采用磁控溅射制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜初始呈现非晶结构, 热力学稳定性最低, 因此, 经过高温处理后会显著的非晶到晶体的相变化, 导致表面结构变化较大, 高温热稳定性较差。采用电子束气相沉积制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 制备得到较稳定的晶体薄膜, 经过高温处理后, 晶体薄膜得到进一步完善化, 但整体结构变化较小, 高温处理后仍然保持连续完整, 高温稳定性较高。

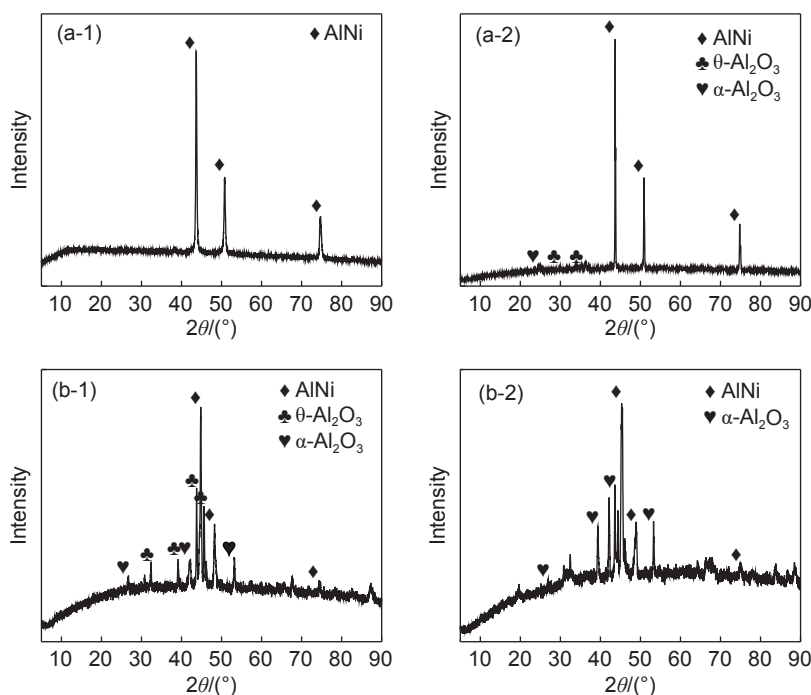


图 2  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜 XRD 图谱 (a)磁控溅射; (b)电子束气相沉积; (1)高温前; (2)高温后

Fig. 2 XRD patterns of alumina thin films (a)magnetron sputtering; (b)electron beam vapor deposition; (1)before high temperature; (2)after high temperature

### 2.3 不同制备工艺对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜高温抗氧化性能的影响

图 3 为不同工艺制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜在  $900\text{ }^\circ\text{C}$  的恒温氧化动力学曲线, 可以看出: 随着氧化时间的

延长, 两种工艺制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  抗氧化层的氧化增重均呈现线性增加, 表明两种阻挡层存在时, 高温合金氧化物生长受扩散控制。其中, 采用磁控溅射制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  经过 200 h 的平均氧化速率为  $0.124\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,

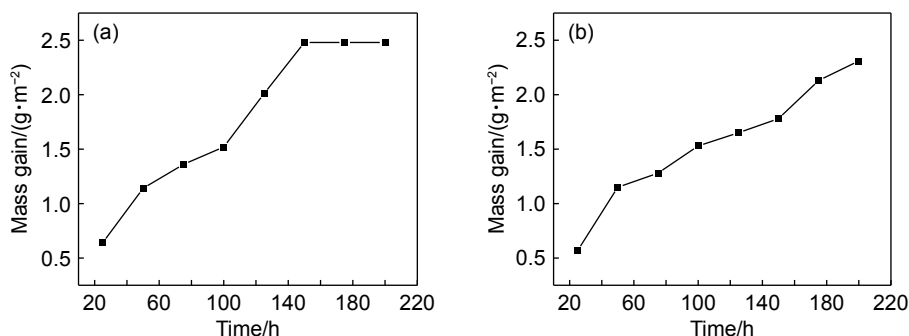


图 3  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜恒温氧化曲线 (a)磁控溅射; (b)电子束气相沉积

Fig. 3 Thermostatic oxidation curves of alumina thin films (a)magnetron sputtering; (b)electron beam vapor deposition

而采用电子束气相沉积制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为阻挡层时,基体的平均氧化速率为 0.116 g/(m<sup>2</sup>·h)。由前期讨论可知,由于在高温处理过程中,电子束气相沉积制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜随着处理时间延长其结构变化相对较小,表面没有出现明显缺陷,完整性、致密性较高,而采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,在高温处理过程中,由于晶化转变作用,导致表面原子发生迁移重排,薄膜发生收缩,出现裂纹等缺陷,提高了氧分子扩散的速率,因此,采用电子束气相沉积制备的薄膜抗氧化性能相比于磁控溅射制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜更优异。

#### 2.4 不同制备工艺对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 复合薄膜微观形貌及高温红外发射率的影响

在不同工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面镀制金属 Pt 薄膜的表面微观形貌如图 4(a-1)、(b-1)所示,两种新镀制的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 复合薄膜均呈现典型的微晶

形貌,致密度高,从宏观观察到表面均具有高反射特性。根据 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜微观形貌分析可知,采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜经过高温处理后表面相变显著,发生了晶化,表面微观形貌粗糙化,见图 1(a-2),因此,其表面镀覆的金属 Pt 薄膜在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相变过程中,也发生了明显的破坏,薄膜完整性显著受损,表面出现大量杂质,见图 4(a-2)。从宏观形貌来看,采用磁控溅射制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 扩散阻挡层的金属 Pt 薄膜表面亮度显著下降,呈现灰黑色,完全失去了金属光泽。采用电子束气相沉积制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面 Pt 薄膜,经过高温处理后表面形貌如图 4(b-2)所示,由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面显微结构变化较小,因此,金属 Pt 表面只出现了晶粒增大现象,金属薄膜微观形貌仍然呈现连续的金薄膜形貌,宏观仍呈现金属光泽,光泽较高温处理前略有降低。

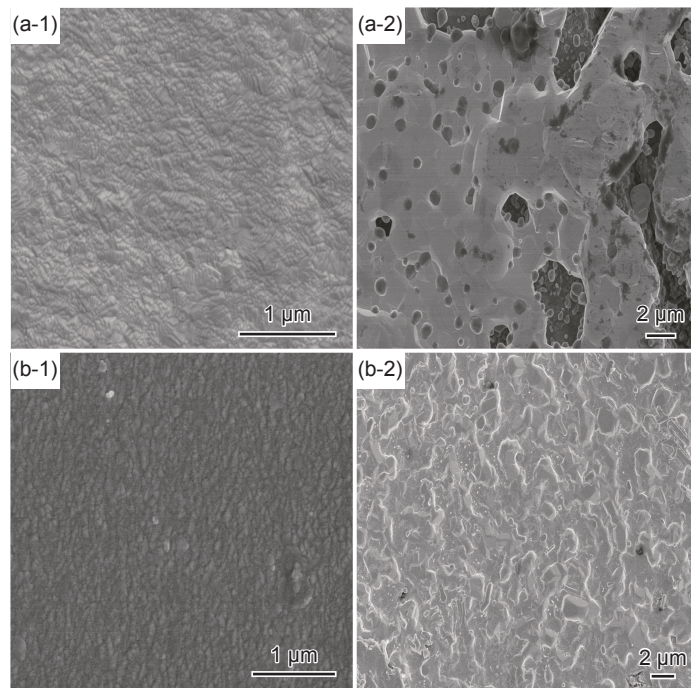


图 4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 复合薄膜微观形貌图 (a)磁控溅射;(b)电子束气相沉积;(1)高温前;(2)高温后

Fig. 4 Microscopic morphologies of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt composite thin films (a)magnetron sputtering; (b)electron beam vapor deposition; (1)before high temperature; (2)after high temperature

采用 EDS 能谱分析对高温处理后不同工艺制备的复合薄膜表面进行了元素面扫描,如图 5 所示,从结果可知,高温处理后采用磁控溅射工艺制备的薄膜表面 Pt 元素含量下降,扫描表面局部黑色区域已经没有 Pt 覆盖,同时表面 Ni 元素比例大幅提高,材料表面由于阻挡层的破损出现了大量 Ni 元素渗透的现象。而采用电子束气相沉积制备的材料表面,Ni 元素含量较低,薄膜表面覆盖完整

连续的 Pt。

采用磁控溅射工艺在不同工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面镀金属 Pt 薄膜得到两种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 复合薄膜,测试其经过 900 °C、20 h 热处理前后的 900 °C 高温红外发射率,测试的性能结果如图 6 所示。

经过统计计算,采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 复合薄膜,900 °C 下 3~5 μm 的红外发射率为 0.15,经过 900 °C 高温处理 20 h 后,红外发射

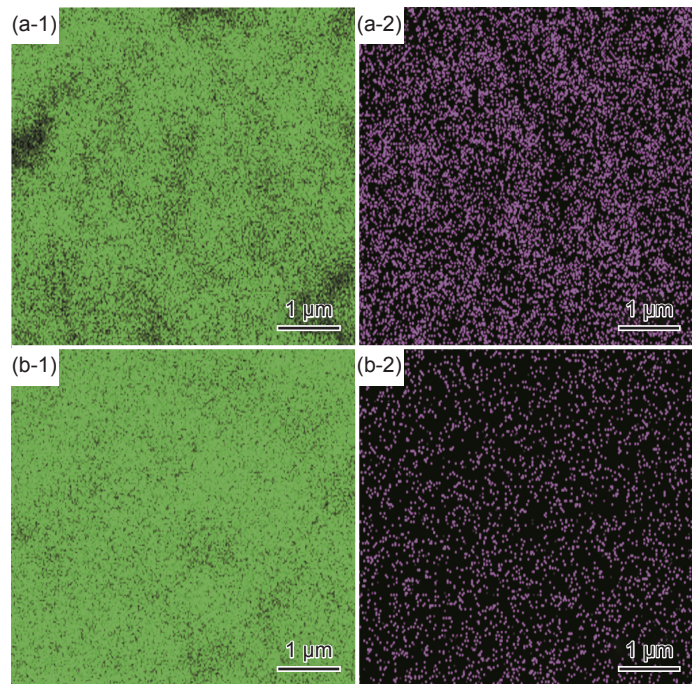


图 5 高温后  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  复合薄膜表面元素面扫描图 (a)磁控溅射;(b)电子束气相沉积;(1)Pt 元素;(2)Ni 元素  
Fig. 5 Surface elemental mapping images of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  composite film after high temperature (a)magnetron sputtering;  
(b)electron beam vapor deposition; (1)Pt element; (2)Ni element

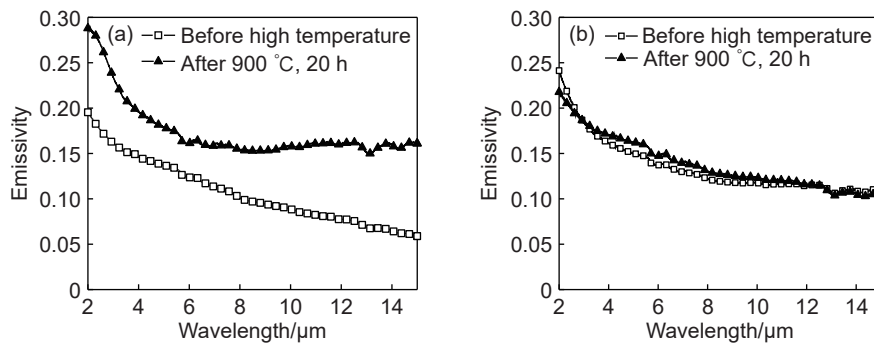


图 6  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  复合薄膜红外发射率谱图 (a)磁控溅射;(b)电子束气相沉积  
Fig. 6 Infrared emissivity spectrum of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  thin films (a)magnetron sputtered; (b)electron beam vapor deposition

率升高为 0.20。从前期的分析可知,采用磁控溅射工艺制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜,经过高温处理后,表面发生了显著的变化,由于底层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的结构重排和缺陷的出现,导致表面金属 Pt 薄膜及 Pt 薄膜连续性发生破坏,因此,导致高温后薄膜的红外发射率升高。采用电子束气相沉积工艺制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  复合薄膜,900 °C 下 3~5  $\mu\text{m}$  的红外发射率为 0.16,较磁控溅射制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  复合薄膜红外发射率略高,经过 900 °C 高温处理 20 h 后,电子束气相沉积工艺制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  复合薄膜红外发射率升高为 0.172,较高温后磁控溅射制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  复合薄膜红外发射率明显降低。

红外发射率是物体本身的热物性之一,它的数值主要受到材料组成成分以及材料表面粗糙度的

影响。采用磁控溅射制备的复合薄膜,由于表面 Pt 金属层连续性被破坏,同时析出大量 Ni 元素,在高温下形成 Ni 的氧化物,薄膜表面组成成分发生了显著变化,表面红外发射率大幅提高。此外,对于光滑平整的表面,可近似认为辐射与物体的相互作用发生在二维界面上,此时反射率最高,发射率最低<sup>[16-17]</sup>。对于粗糙的表面,辐射在物体凹凸不平的表面上发生多次漫反射,一方面增加了物体表面对红外辐射吸收的机会,从而增加了发射率,另一方面粗糙的表面也减少了物体表面法向反射功率。因此,表面粗糙的薄膜材料,发射率偏高。经过高温处理后,采用电子束气相沉积工艺制备的复合薄膜中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  阻挡层的结构变化较小,热处理后表面缺陷少,对其表面的 Pt 薄膜基本无破坏,金属

薄膜保持完整连续的表面状态,所以整体复合薄膜保持金属 Pt 较低的高温红外发射率。综上可知,采用电子束气相沉积工艺制备相比磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜具有更佳的高温稳定性和高温阻挡性能。

### 3 结论

(1)采用磁控溅射工艺制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,由于工艺温度低,制备的薄膜为非晶结构,经过高温处理后 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜相变显著,产生大量缺陷,严重破坏了阻挡性能和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 复合薄膜中金属 Pt 层的连续性。采用磁控溅射工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,经过高温处理后,薄膜发生相变,表面缺陷增多,出现了基底 Ni 元素的渗出。

(2)采用电子束气相沉积工艺制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,成型工艺温度高,薄膜成型过程中能量高,制备薄膜为较稳定的晶体结构。经过高温处理后,薄膜不发生明显的相变,完整性良好。

(3)采用电子束气相沉积工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,表面镀覆 Pt 金属薄膜后,薄膜初始红外发射率为 0.16,经过 900 ℃、20 h 高温后,红外发射率为 0.172,具有良好的耐高温性能。因此,采用电子束气相沉积工艺制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜有望应用于高温低红外发射率薄膜的阻挡层。

### 参考文献:

- [1] KOW W. Error analysis of temperature measurement using infrared thermography for naval ship[J]. *Energy Conversion Application*, 2001, 2: 1301.
- [2] ZUECO J. Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 101(1): 73-75.
- [3] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2004.  
ZHANG J Q, FANG X P. *Infrared physics*[M]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology Press, 2004.
- [4] 徐顶国,桑建华,罗明东. 无人机蒙皮红外辐射特征研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 880-884.  
XU D G, SANG J H, LUO M D. Research on infrared radiation characteristics of drone skin[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 880-884.
- [5] 吴剑锋,何广军,赵玉芹. 飞机尾向的红外辐射特性计算[J]. *空军工程大学学报*, 2007, 7(6): 26-27.  
WU J F, HE G J, ZHAO Y Q. Calculation of infrared radiation characteristics in aircraft wake[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2007, 7(6): 26-27.
- [6] HUANG Z B, ZHOU W C, TANG X F. Effects of annealing time on infrared emissivity of the Pt film grown on Ni alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(7): 2025-2030.
- [7] HUANG Z B, ZHOU W C, TANG X F. High-temperature application of the low-emissivity Au/Ni films on alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(22): 6893-6898.
- [8] KAPLIN C, BROCHU M. The effect of grain size on the oxidation of NiCoCrAlY[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 301(19): 258-263.
- [9] 王心悦,辛丽,韦华,等. Al-Si 共渗涂层对 M951 合金高温氧化和热腐蚀的影响[J]. *材料研究学报*, 2012, 26(6): 643-651.  
WANG X Y, XIN L, WEI H, et al. Influence of Al-Si coating on oxidation and hot corrosion of a nickel-base super-alloy M951[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2012, 26(6): 643-651.
- [10] 崔成成,蒋书文,张万里. 涡轮叶片上 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的高温绝缘性能研究[J]. *信息记录材料*, 2021(4): 23-24.  
CUI CC, JIANG S W, ZHANG W L. High temperature insulation performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film on turbine blades[J]. *Information Recording Materials*, 2021(4): 23-24.
- [11] 蔡妍,易军,陆峰,等. 热障涂层金属元素扩散阻挡层研究进展[J]. *材料工程*, 2011(9): 92-96.  
CAI Y, YI J, LU F, et al. Research progress on metal element diffusion barrier layers in thermal barrier coatings[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011(9): 92-96.
- [12] 张健,巴德纯,刘坤,等. 微波化学气相沉积制备氧化铝薄膜及钝化性能研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2016(5): 529-533.  
ZHANG J, BA D C, LIU K, et al. Preparation of alumina thin films and passivation properties by microwave chemical vapor deposition[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2016(5): 529-533.
- [13] 唐秀凤,罗发,周万城,等. 直流反应磁控溅射制备氧化铝薄膜[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(14): 120-123.  
TANG X F, LUO F, ZHOU W C, et al. Preparation of alumina thin films by DC reactive magnetron sputtering[J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(14): 120-123.
- [14] 单威,姚曼文,胡保付,等. 溶胶-凝胶法制备氧化铝绝缘薄膜及其电性能研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(4): 581-584.  
SHAN W, YAO M W, HU B F, et al. Study on preparation of alumina insulating film by sol-gel method and its electrical properties[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(4): 581-584.

- [15] 黄肖容, 黄仲涛. 用快速胶凝法制备无机氧化铝膜[J]. 材料研究学报, 1999, 13(4): 372-375.  
HUANG X R, HUANG Z T. Preparation of alumina membrane by fast gelation of sol[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1999, 13(4): 372-375.
- [16] 黄智斌, 朱冬梅, 唐秀凤, 等. K424 合金镀金膜后红外发射率变化[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(8): 1402-1405.  
HUANG Z B, ZHU D M, TANG X F, et al. Changes in infrared emissivity of K424 alloy after gold plating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(8): 1402-1405.
- [17] 黄智斌, 周万城, 唐秀凤, 等. 磁控溅射 Ni/Au/Pt 多层膜红外发射率特征研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(3): 534-537.  
HUANG Z B, ZHU D M, TANG X F, et al. Study on the infrared emissivity characteristics of Ni/Au/Pt multilayer films deposited by magnetron sputtering[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(3): 534-537.

---

收稿日期: 2025-04-11; 录用日期: 2025-06-10

通讯作者: 刘鹏瑞(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为航空用红外材料, 联系地址: 北京市 81 信箱 9 分箱 (100095), E-mail: [liu\\_pr@126.com](mailto:liu_pr@126.com)

(本文责编: 高磊)