

太阳能吸收 AAO 复合氧化膜的制备与性能

Preparation and Properties of Solar Absorbing AAO Composite Oxide Film Coatings

魏红阳^{1,2}, 常萌蕾¹, 陈东初¹, 王梅丰², 叶秀芳¹

(1 佛山科学技术学院 材料科学与能源工程学院, 广东 佛山 528000;

2 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

WEI Hong-yang^{1,2}, CHANG Meng-lei¹, CHEN Dong-chu¹,

WANG Mei-feng², YE Xiu-fang¹

(1 School of Materials Science and Energy Engineering, Foshan University,

Foshan 528000, Guangdong, China; 2 School of Materials Science and

Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

摘要: 通过阳极氧化技术制备高度有序的多孔阳极氧化铝(AAO), 交流扩孔后, 在不同条件下向氧化铝孔内以 50Hz 的交流频率沉积 Cu-Ni 纳米复合粒子。经光谱测试分析可知: 在电压 12V、时间 600s、温度 25℃ 条件下制备的涂层具有良好的太阳光吸收性能, 吸收率为 0.91、发射率为 0.18、品质因子为 4.9。经 SEM、XRD 分析可知, 复合氧化膜涂层表面得到 CuAl_2O_4 /Cu-Ni 复合纳米棒阵列。目标涂层经 600℃ 高温处理后, 吸收率、发射率波动很小, 涂层体系的热稳定性得到提高。其中, CuAl_2O_4 的存在限制高温环境下 Cu、Ni 金属颗粒在界面处的扩散, 减小氧化概率。

关键词: 阳极氧化铝; 交流电沉积; Cu-Ni 纳米复合粒子; 吸收率; 发射率

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.001143

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2017)11-0042-07

Abstract: The highly ordered porous anodic alumina was prepared by anodic oxidation technology, after being treated by AC phosphoric pore broadening, the Cu-Ni nano composite particles were deposited into anodic alumina pores by AC frequency with 50Hz in different voltages, different time and different temperatures. The spectra result shows that the coating prepared under the conditions of voltage is 12V, time is 600s, temperature is 25℃ has good solar absorption performance, the absorptivity is 0.91, emissivity is 0.18, quality factor is 4.9. The SEM and XRD analysis show that CuAl_2O_4 /Cu-Ni composite nanorods were deposited on the surface of the composite oxide coating. After heat treatment at 600℃, the solar absorption and infrared emission of target coating have a small fluctuation and the thermal stability of the coating system is greatly improved. The existing of CuAl_2O_4 limits the diffusion of metal particles under high temperature environment at the interface, which prevents the Cu/Ni from being oxidized.

Key words: anodic aluminum oxide; AC deposition; Cu-Ni nano composite particle; absorptivity; emissivity

利用太阳能的各种新材料、新设计、新技术成为当今新能源领域的研究热点^[1-5]。太阳能直接利用的方式主要是光热转化技术^[6]。平板型集热器广泛地应用于太阳能热水系统^[7], 太阳能吸收涂层是集热器的关键组成部分。依据光谱选择性吸收涂层的吸收原理、涂层结构, 主要可以将其归为以下几类: 本征吸收涂层、渐变型吸收涂层、表面纹理型吸收涂层、金属-电介

质复合吸收涂层^[8]。制备太阳能吸收涂层的方法也多种多样, 其中, 在多孔氧化铝内部沉积一定厚度的金属构成的金属-氧化铝复合材料表现出了太阳光的选择吸收性。金属-氧化铝复合材料中, 多孔氧化铝提供了一个理想的低介电常数的电介质环境, 纳米级大小的金属/半导体颗粒组成的纳米棒竖立在其中, 主要起到吸收光的作用^[9-13]。一直以来, 太阳能吸收涂层受到

不少研究者的关注,但其大多数吸收涂层热稳定性较差,在高温环境的应用还不够成熟,Ding 等^[14]利用电化学方法在氧化铝孔中原位沉积 $\text{CuAl}_2\text{O}_4/\text{Cu}$ 复合纳米棒阵列,该阵列具有良好的光吸收性,但其温度超过 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 以后涂层品质因子开始下降。Gao 等^[15]用超音速火焰喷涂制备了 Ni-Mo 复合涂层,并加以激光处理,对涂层中 Ni-Mo 金属相在涂层中的所占物相比比例对光谱吸收的影响做出了研究,其吸收率最高为 0.88。本工作在 AAO 氧化膜中通过交流共沉积 Cu-Ni 纳米复合粒子,研究了电沉积溶液配方和工艺条件,从而制备出太阳能吸收性能优越、高温热稳定性更好的吸收涂层。研究发现本实验制备的涂层吸收率可以达到 0.91,发射率可以低至 0.18,而且涂层体系的热稳定性得到改善,经 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 高温处理后,吸收率与发射率波动很小。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

采用退火状态的 6063 铝合金板材,6063 合金中的主要合金元素为镁与硅,试样尺寸规格: $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 2\text{mm}$ 。

所需试剂有碱蚀液: 45g/L NaOH , $2\text{g/L C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$;酸洗液: 10% (质量分数,下同) H_2SO_4 , 4% HNO_3 ;阳极氧化电解液: 17% H_2SO_4 ;扩孔液: $90\sim 110\text{g/L H}_3\text{PO}_4$;电沉积液: $40\text{g/L NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 4g/L CuSO_4 , $25\text{g/L H}_3\text{BO}_3$ ($\text{pH}=4.0$), $15\text{g/L MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $3\text{g/L C}_6\text{H}_5\text{O}_7(\text{NH}_4)_3$ 。

1.2 实验仪器

采用 EOECD-30A 型氧化着色实验电源,对 6063 铝合金试样进行氧化、交流扩孔、交流电沉积。在氧化、沉积过程中用 BC/BD-143 转换型冷藏冷冻柜、电热恒温水浴锅以及 AR842A⁺ 型非接触式红外测温仪对实验温度进行严格控制。采用 Hitachi U-4100 分光光度计以及 Tensor27 红外光谱仪对制得样品进行吸收率与发射率的检测,结合 Hitachi JSM-7500F 型扫描电镜及 TD-3500 型 X 射线衍射仪对实验样品微观形貌及物相成分进行分析研究。

1.3 实验参数

阳极氧化过程中在 17% H_2SO_4 的硫酸溶液中进行,电流密度 $1.2\text{A}/\text{dm}^2$,氧化时间为 30min ,温度控制在 $15\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 。扩孔在 $105\text{g/L H}_3\text{PO}_4$ 溶液中进行,交流电压 4V (峰值电压),预浸 10s ,扩孔时间为 600s ,温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。交流电沉积实验参数如表 1 所示。

表 1 交流电沉积 L9(3³) 正交实验表
Table 1 Orthogonal experimental parameters of AC electroplating

Number	Electroplating	Electroplating	Temperature/ ℃
	voltage/V	time/s	
1	6	300	25
2	6	600	40
3	6	900	55
4	9	300	40
5	9	600	55
6	9	900	25
7	12	300	55
8	12	600	25
9	12	900	40

2 结果与讨论

2.1 试样吸收率及红外发射率分析

2.1.1 紫外-可见-近红外反射图谱分析

根据美国测试与材料学会提供的太阳光谱辐射照度数据,导入 Origin 作图(如图 1 所示),数据执行标准为 ASTM G173-03(2012)。由图 1 可知大气层上部太阳辐射照度明显高于地球表面及海平面附近太阳辐射照度,这是由于大气层对太阳辐射光波有一定的反射、散射和吸收。太阳光谱射入地球表面主要辐射照度波长范围集中在 $300\sim 2500\text{nm}$ 之间,在 495nm 处出现峰值,达到 $1.685\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。所以吸收涂层在 $300\sim 2500\text{nm}$ 之间的光谱吸收性能就显得十分重要。

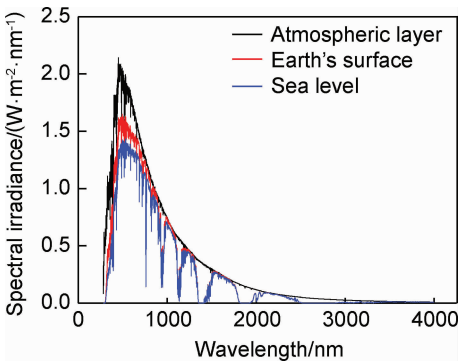


图 1 太阳光谱在大气层上面、地球表面以及海平面附近太阳辐射照度
Fig.1 Radiant illumination of solar spectrum in upper atmosphere, the earth's surface and near sea level

本实验对表 1 正交实验制备的 1~9 号试样以及在相同条件下进行阳极氧化而未进行电化学沉积的空白试样进行紫外-可见-近红外反射图谱测试,根据太阳能吸收率^[16]计算公式进行计算,即式(1):

$$\alpha(\theta,\lambda)=\frac{\int_{0.3}^{2.5}[1-R(\theta,\lambda)]\cdot I_s(\lambda)d\lambda}{\int_{0.3}^{2.5}I_s(\lambda)d\lambda}\tag{1}$$

式中： θ,λ,T 分别是入射光线的入射角，波长以及测试温度； $I_s(\lambda)$ 为太阳光谱的辐射能量密度； $R(\theta,\lambda)$ 是反射率的函数； $\alpha(\theta,\lambda)$ 为选择性吸收涂层在太阳光谱范围内的平均吸收率。对所测反射率数值进行离散化积分求解。图 2 和图 3 所示为试样所测紫外-可见-近红外反射图谱。

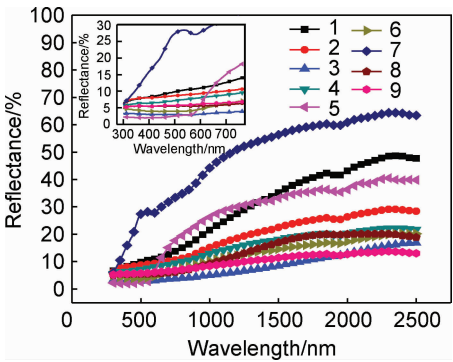


图 2 1~9 号试样紫外-可见-近红外反射光谱
Fig. 2 UV-Vis near infrared reflectance spectra of sample 1-9

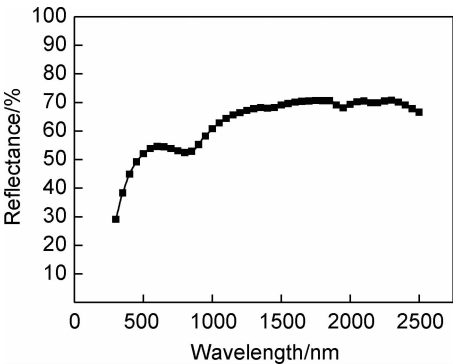


图 3 阳极氧化空白试样紫外-可见-近红外反射光谱
Fig. 3 UV-Vis near infrared reflectance spectra of anodic oxidation blank sample

图 2 是 1~9 号试样在 300~2500nm 之间的反射光谱图，可以看出，试样涂层从 300~2000nm 之间其反射率均呈上升趋势，2000~2500nm 阶段其反射率趋于平稳。这种趋势的产生与涂层本身属性有一定的关联，涂层表面的微观凹坑结构对短波长的光波会形成一定的光学陷阱，在涂层微观陷阱中的多角度折射与反射增加了其在涂层中被反复吸收的机会，所以呈现出在较短波段的低反射率，在较长波段的高反射率。由图 2 与图 3 图谱对比可知，沉积 Cu-Ni 纳米复合粒子后的试样全波段反射率主要集中在 0%~40% 之间（7 号样品除外），而阳极氧化空白试样主要集中在 30%~75% 之间。直观上可以看出沉积 Cu-Ni 纳米复合粒子的试样吸收率明显高于未沉积金属粒子的试样。Cu-Ni 纳米复合粒子对光谱的吸收机制表现为：Cu, Ni 原子外层电子对太阳光波具有较强的敏感性，当太阳光谱射入 Cu, Ni 纳米粒子吸收层时，其外层电子发生跃迁并伴随 Cu, Ni 原子晶格与入射光发生的光子-声子耦合而获得的能量，从而转化为原子或晶格的振动，这些对光子的吸收结果导致材料本身内能增加，宏观表现就是温度升高，材料被加热。另外由图 2 全波长反射率图谱与局部放大可知 2, 3, 4, 6, 8, 9 号试样涂层均表现出优异的光谱吸收性能（具体全波长吸收率数值见表 2），7 号反射率相对较大，光谱吸收性能较差。

2.1.2 红外反射波谱分析

太阳能吸热涂层在吸收太阳光谱的同时，温度上升，涂层本身又以辐射红外光波的形式向外发射能量，所以涂层的红外发射率高低对太阳能吸热涂层来说也是至关重要的。本实验对表 1 正交实验制备的 1~9 号试样以及在相同条件下进行阳极氧化而未进行电化学沉积的空白试样进行红外反射图谱测试。涂层发射率计算公式^[16]如下：

$$\epsilon_T(\lambda,T)=\frac{\int_{2.5}^{20}[1-R(\theta,\lambda)]\cdot I_b(\lambda)d\lambda}{\int_{2.5}^{20}I_b(\lambda,T)d\lambda}\tag{2}$$

表 2 试样太阳光谱吸收与红外发射计算结果

Table 2 Calculation of sample with solar absorption and infrared emission

Parameter	Value									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Blank
Absorptance(α)	0.82	0.87	0.95	0.89	0.84	0.92	0.64	0.91	0.92	0.43
Emittance(ϵ)	0.23	0.22	0.20	0.23	0.24	0.20	0.19	0.18	0.26	0.65
Quality factor(α/ϵ)	3.59	3.81	4.60	3.88	3.46	4.51	3.37	4.92	3.45	0.67

式中： θ,λ,T 分别是入射光线的入射角，波长以及测试温度； $I_b(\lambda,T)$ 是黑体的辐射能量密度； $R(\theta,\lambda)$ 是测试温度下波长范围内的反射率； $\epsilon_T(\lambda,T)$ 是红外波段范围内的平均热发射率。其中 $I_b(\lambda,T)$ 是由普朗克辐射

公式计算得到。

图 4 是 1~9 号样品红外反射光谱，由图谱直观可知在 2500~10000nm 之间红外反射图谱噪点较少，数据点较为饱满，在 10000~25000nm 之间数据噪点较

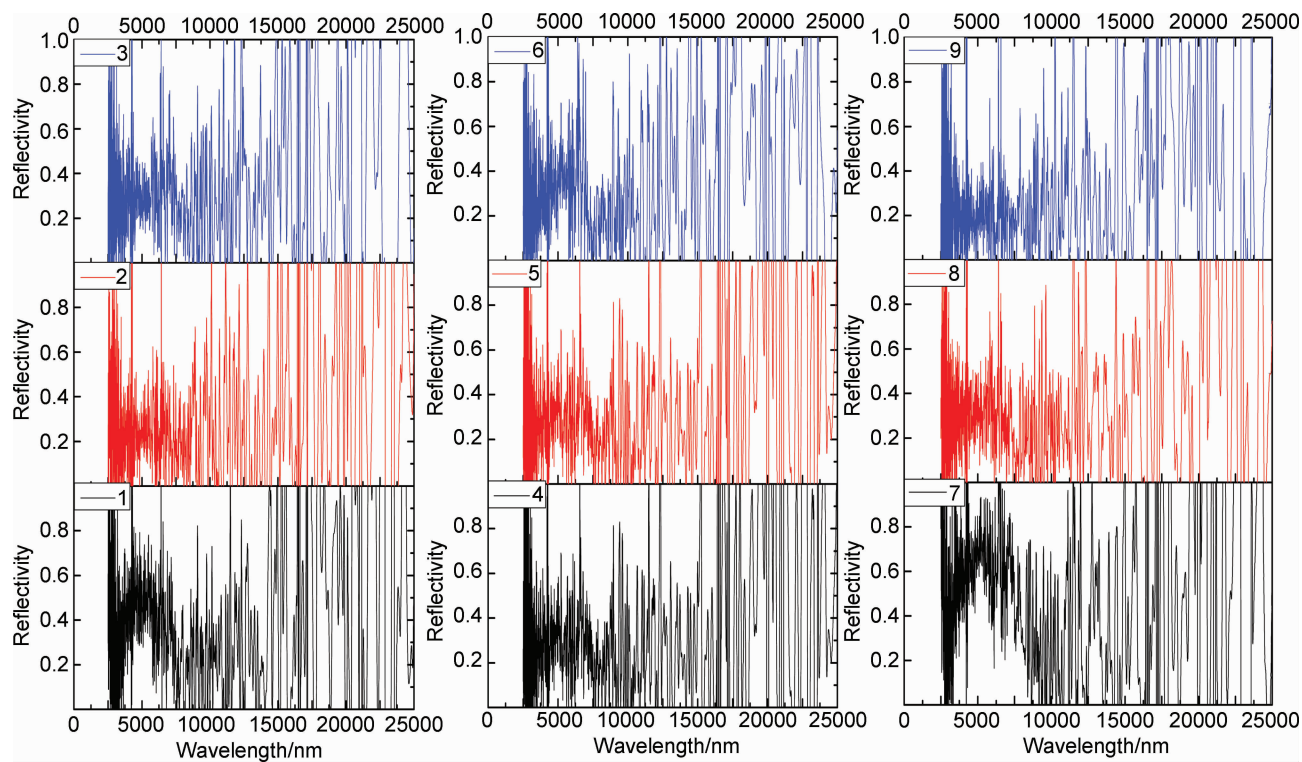


图 4 1~9 号试样红外反射光谱
Fig. 4 Infrared reflection spectra of samples 1-9

多,出现这种状况的原因在于在整个全反射光波中,较短波长部分以镜面反射为主,环境干扰较小,在较长波段部分以漫反射为主,仪器噪声较大,由于任何高于绝对零度的物体都会发射红外线,所以环境干扰较大,测试结果噪点较多。通过反射图谱很难直观判断 1~9 号样品红外光波反射情况以及与图 5 空白样品的对比情况。因此,需要通过式(2)发射率的计算公式,把测的数据离散化积分求出每个样品的具体发射率数值,从而更好地比较不同样品发射率的高低。数据计算结果如表 2 所示。

从表 2 计算结果可知:经沉积 Cu-Ni 纳米复合粒

子后的 1~9 号试样吸收率均高于空白阳极氧化试样,发射率均低于空白阳极氧化试样,试样品质因子得到明显提高。2,3,4,6,8,9 号试样吸收率均在 0.85 以上,表现出较好的太阳光谱吸收性能。其中,3,6,8 号品质因子均达到 4 以上,8 号品质因子 $\alpha/\epsilon=4.92$,太阳能光谱选择性吸收性能相对最佳。由此可以推断,在 50Hz 交流频率下,电压 12V、时间 600s、温度 25℃ 下 Cu-Ni 纳米复合粒子的条件与上述制备 AAO 模板的条件更为契合,该条件下制备的太阳能吸收涂层对下一步的性能分析具有重要意义。

2.2 扫描电镜分析

由 2.1 光谱分析结果可知在 1~9 号所有沉积了 Cu-Ni 纳米复合粒子的试样中,8 号品质因子最高,太阳光谱选择吸收性能最佳;7 号品质因子最低,太阳光谱选择吸收性能较差。由此,本实验选择 7 号、8 号试样以及没有进行电化学沉积的空白试样进行微观形貌分析对比观察,其扫描电镜微观形貌如图 6 所示。

图 6(a),(b)是未进行电化学沉积的空白试样微观表面形貌图,空白样品与 1~9 号样品在相同条件下进行阳极氧化与扩孔处理,扩孔后由测厚仪测得平均膜厚在 11μm 左右。由图可以看出未进行电化学沉积的空白试样表面呈现较为规则的“蜂窝状”多孔结

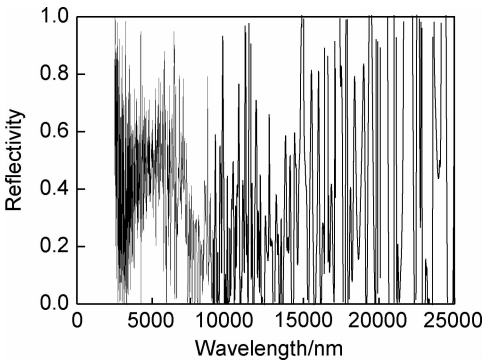


图 5 阳极氧化空白试样红外反射光谱
Fig. 5 Infrared reflectance spectra of blank sample

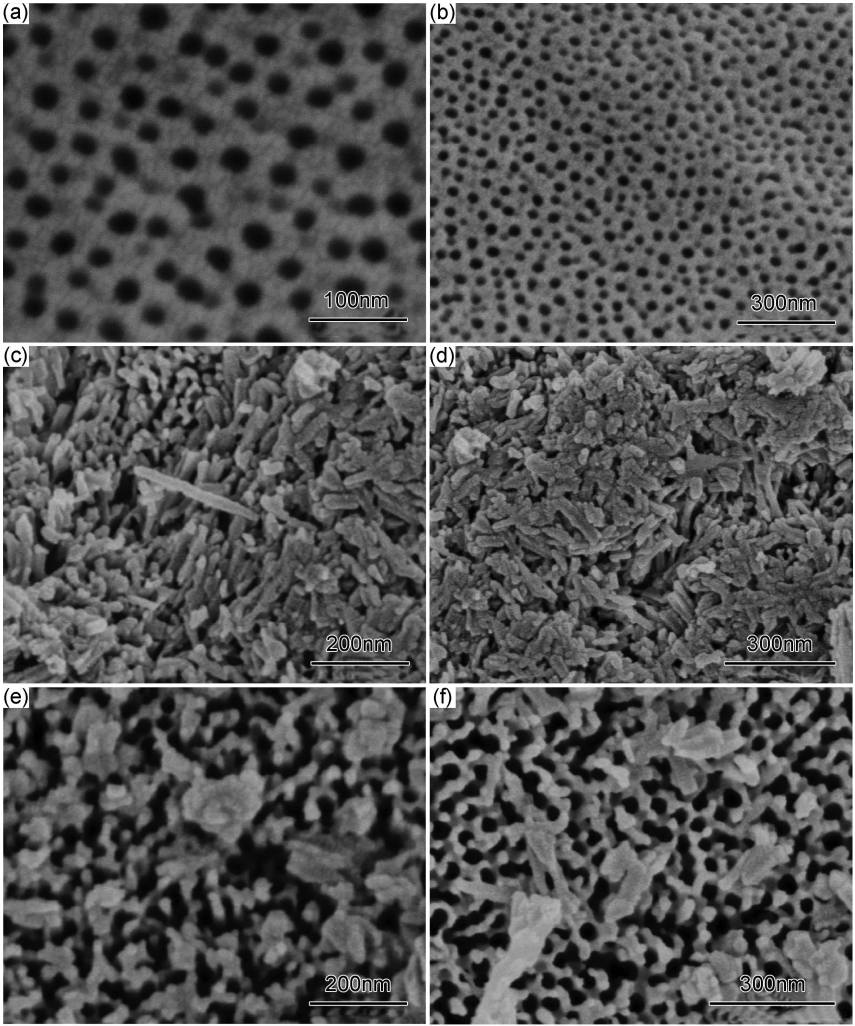


图 6 空白试样及 7 号、8 号试样扫描电镜图 (a),(b)空白试样;(c),(d)8 号试样;(e),(f)7 号试样
Fig. 6 SEM images of blank sample and samples 7,8 (a),(b) blank sample;(c),(d) sample 8;(e),(f) sample 7

构,孔径在 40~60nm 左右,孔间距在 100nm 左右,排列有序。大且深的阳极氧化孔为电沉积 Cu-Ni 纳米复合粒子提供了较为理想的 AAO 模板。图 6(c),(d)是太阳光谱吸收品质因子最高的 8 号样品微观表面形貌图,从图 6(c)可以看出沉积后的样品表面并未有“蜂窝状”的多孔结构,氧化膜孔已被沉积物填满并外延生长出一些排列紧密的棒状结构,由于在测试制样过程中涂层表面可能受到剪切应力的作用使得表面棒状纳米结构倾斜、折断,也有部分纳米棒从孔底向上生长的过程中,局部电流密度过高,沉积速率偏快,纳米棒生长取向发生偏移,造成部分棒状结构发生倾斜交织、团聚。图 6(e),(f)是太阳光谱吸收品质因子较差的 7 号试样微观表面形貌图。由图可知试样表面部分被沉积物颗粒覆盖,部分多孔结构裸露,孔洞并未被沉积颗粒填满,没有呈现出如 8 号样品所示的棒状结构。原因可能是该样品沉积温度较高,金属离子在交流电的负半周扩散太快,不利于纳米金属粒子有序结晶生长,7

号样品沉积时间较短,沉积物在孔内沉积量过少,从而并未表现出较好的太阳光谱吸收性能。

2.3 X 射线衍射物相分析

将太阳光谱吸收品质因子较高的 8 号试样和品质因子较低的 7 号试样以及空白试样进行 X 射线衍射分析,试样测得涂层表面 X 射线衍射三维图谱如图 7 所示。

由图 7 可以看出 8 号试样涂层表面不仅呈现出 Cu, Ni 的衍射峰,而且在 $2\theta = 36.8^\circ$ 处出现的明显 CuAl_2O_4 衍射峰,对应 (311) 晶面峰值较为强烈。 CuAl_2O_4 的晶体结构类似于立方尖晶石结构。然而在 7 号对应的衍射峰中却并未见到 CuAl_2O_4 的特征峰。空白试样既没有发现 Cu, Ni 的衍射峰,也没有 CuAl_2O_4 衍射峰,只有晶态 Al 对应的衍射峰,并且在 7 号、8 号样品中都出现了类似的衍射峰。由于在阳极氧化过程中,生成的 Al_2O_3 主要以非晶态形式存在,所以其衍射峰主要呈现出“馒头峰”,然而该衍射峰被

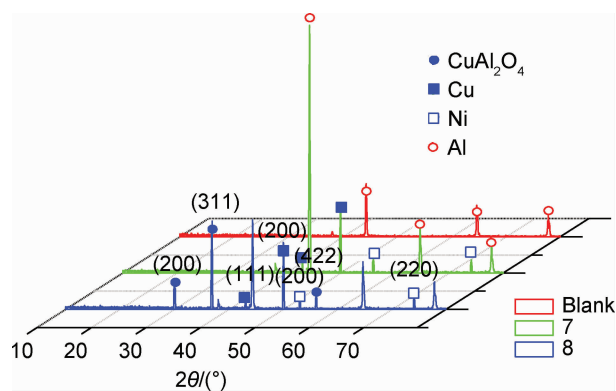


图 7 空白试样及 7 号、8 号试样涂层表面 X 射线衍射图

Fig. 7 XRD diffraction patterns on coatings of blank sample and samples 7, 8

较为尖锐的晶态衍射峰所掩盖,并未显现。

2.4 热稳定性分析

制备 7 号、8 号以及空白试样若干,分别将 3 种试样放入 100, 200, 300, 400, 500, 600℃ 的高温环境中,焙烧 24h,然后测其各个样品焙烧后的太阳光谱吸收率与发射率情况。不同温度下焙烧后样品吸收率与发射率情况如图 8 与图 9 所示。

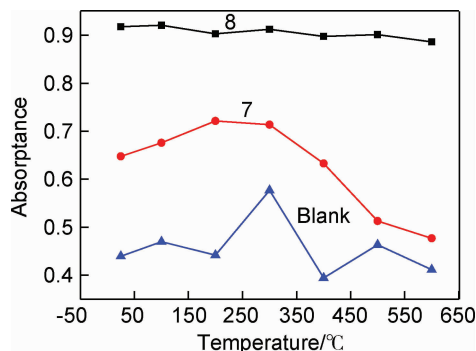


图 8 不同温度下焙烧后空白试样及 7 号、8 号试样的吸收率

Fig. 8 Absorbance of blank sample and samples 7, 8 after baking at different temperatures

图 8 所示为不同温度下焙烧后空白试样及 7 号、8 号试样的吸收率情况,由图可知 8 号试样在 100~600℃ 范围处理后,吸收率基本保持在 0.9 左右,与未经焙烧样品在室温下吸收率基本持平,而 7 号样品吸收率在 100~300℃ 范围处理后,吸收率变化不大,但高于 300℃ 样品吸收率逐渐下降,而空白样品在 100~600℃ 范围处理后,吸收率基本在 0.4 上下波动,但波动不大。

图 9 所示为不同温度下焙烧后空白试样及 7 号、8 号试样的红外发射率情况,由图可知 8 号试样在 100~600℃ 范围处理后,发射率保持在 0.2 左右,与未经焙烧样品在室温下发射率基本保持一致。空白试样发射

率较高,但在该温度范围处理后,发射率波动不大,仍旧保持在 0.7 左右。然而 7 号试样随处理温度的升高,发射率却不断的增大。

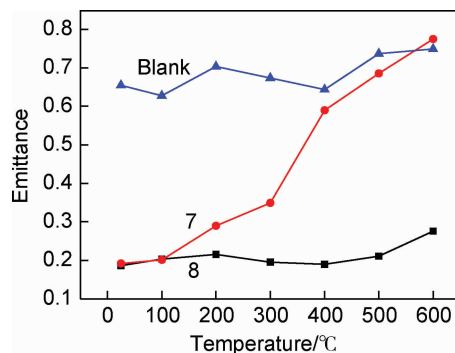


图 9 不同温度下焙烧后空白试样及 7 号、8 号试样的发射率

Fig. 9 Emittance of blank sample and samples 7, 8 after baking at different temperatures

综上所述,空白试样和 8 号试样在处理温度不断上升过程中,其吸收率与发射率的测试结果基本保持稳定,其高温热稳定性相对较好。对空白试样来讲,其热稳定性较好的原因可能是其涂层主要由非晶态的 Al_2O_3 组成,阳极氧化铝本身抗高温性能与热稳定性较好,所以该温度范围内的处理并不会对其组织结构产生太大影响。对 8 号试样来讲, CuAl_2O_4 的存在限制了高温环境下金属颗粒 Cu, Ni 在界面处的扩散,减小了氧化概率,涂层体系的热稳定性得到提高。对 7 号样品而言,涂层结构中并没有 CuAl_2O_4 的存在,以纳米颗粒单质形式存在的 Cu, Ni 随温度的上升其氧化程度逐渐加深,致使其组织结构发生改变,由原本较高吸收率、较低发射率的 Cu, Ni 纳米颗粒转变为吸收率较低、发射率较高的氧化相,所以温度的改变对其影响较大,对于在高温环境下物相组成基本不变的 8 号试样和空白试样的发射率、吸收率相对影响较小。

当太阳光谱这种电磁波沿着一定的方向入射涂层表面时,涂层内部 Cu, Ni 金属颗粒的自由电子在这个电磁振动场的影响下发生带间跃迁和颗粒间相互作用,使复合涂层在太阳光辐射区具有很高的吸收率,而在红外区具有很高的透明性。有研究表明, CuAl_2O_4 在高温环境下具有抑制纳米金属颗粒团聚的作用,可以提高纳米金属颗粒的热稳定性^[17]。所以,在共沉积过程中形成的 CuAl_2O_4 保护 Cu, Ni 金属颗粒在高温下不被氧化,从而保持了对太阳光谱较高的吸收率。

3 结论

(1)在室温 25℃、电压 12V(峰值电压)、沉积时间

600s、交流频率 50Hz 的条件下,向多孔 AAO 模板中沉积 Cu-Ni 纳米复合粒子,得到了较为理想的太阳能吸收涂层,经分析该涂层表面形成了 $\text{CuAl}_2\text{O}_4/\text{Cu-Ni}$ 复合纳米棒阵列,且该纳米棒阵列形貌的涂层具有更高的太阳能吸收率和较低的红外发射率,涂层吸收率 α 为 0.91、发射率 ϵ 为 0.18、品质因子为 4.9。

(2)Cu-Ni 纳米颗粒、 CuAl_2O_4 与电介质 Al_2O_3 构成了三元复合体系, CuAl_2O_4 的存在限制了高温环境下金属颗粒 Ni,Cu 在界面处的扩散,减小了其被氧化的概率,涂层体系的热稳定性得到提高,最高在 600℃ 下,涂层品质因子 α/ϵ 波动很小。

参考文献

- [1] ZHANG Q C. Recent progress in high-temperature solar selective coatings[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, 62(1): 63—74.
- [2] KENNEDY C E. Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials[J]. *Solar Energy*, 2002, 7: 1—52.
- [3] GRANQVIST C G. Solar energy materials[J]. *Applied Physics A*, 1991, 52(2): 83—93.
- [4] FAROOQ M, RAJA I A. Optimisation of metal sputtered and electroplated substrates for solar selective coatings[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(6): 1275—1285.
- [5] 蒋家兴,赵剑曦,姜蓉,等. 太阳光热转换吸收薄膜制备方法: 现状与发展[J]. *材料导报*, 2009, 23(21): 101—104.
JANG J X, ZHAO J X, JIANG R, et al. Preparation methods for solar thermal absorbing films: present situation and development [J]. *Materials Review*, 2009, 23(21): 101—104.
- [6] 马鹏军,耿庆芬,刘刚. 太阳能光谱选择性吸收涂层研究进展[J]. *材料导报*, 2015, 29(1): 48—50.
MA P J, GENG Q F, LIU G. Progress in solar spectral selective absorption coatings[J]. *Materials Review*, 2015, 29(1): 48—50.
- [7] 岑幻霞. 太阳能的热利用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 21.
CEN H X. Heat utilization of solar energy[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 21.
- [8] CAO F, MCENANEY K, CHEN G, et al. A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers[J]. *Energy and Environmental Science*, 2014, 7(5): 1615—1627.
- [9] ZHAO S, RIBBING C G, WACKELGARD E. Optical constants of sputtered Ni/NiO solar absorber film—depth-profiled characterization[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004, 84(1/4): 193—203.
- [10] ZHAO S, WACKELGARD E. Optimization of solar absorbing three-layer coatings[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2006, 90(3): 243—261.
- [11] FAROOQ M, LEE Z H. Computations of the optical properties of metal/insulator-composites for solar selective absorbers[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(9): 1421—1431.
- [12] FAROOQ M, HUTCHINS M G. A novel design in composites of various materials for solar selective coatings[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, 71(4): 523—535.
- [13] FAROOQ M, HUTCHINS M G. Optical properties of higher and lower refractive index composites in solar selective coatings [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, 7(1): 36—41.
- [14] DING D W, CAI W M, LONG M. Optical structural and thermal characteristics of Cu/ CuAl_2O_4 hybrids deposited in anodic aluminum oxides selective solar absorber[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(10): 1578—1581.
- [15] GAO Y, XIONG J, GONG D, et al. Improvement of solar absorbing property of Ni-Mo based thermal spray coatings by laser surface treatment [J]. *Vacuum*, 2015, 121: 64—69.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 366—374.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 366—374.
- [17] DHAK D, PANCHANAN P P. Particle size comparison of soft-chemically prepared transition metal (Co, Ni, Cu, Zn) aluminate spinels[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 89(3): 1014—1021.

基金项目:国家自然科学基金项目(21671038);广东省教育厅特色创新项目(2015KTSCX155);佛山市科技创新专项资金项目(2014AG10009)

收稿日期:2016-09-22;**修订日期:**2017-08-15

通讯作者:陈东初(1972—),男,教授,博士,从事材料表面与应用电化学研究,联系地址:广东省佛山市禅城区江湾一路18号佛山科学技术学院(528000),E-mail:2575437546@qq.com

(本文责编:高磊)