

# 真空电弧离子镀 CoCrAlY 涂层工艺研究

## Research on Vacuum Arc Ion Plating CoCrAlY Coating Process

总参谋部陆航部驻株洲地区军事代表室 彭秀云  
中航工业南方航空工业(集团)有限公司 汪云程 苗小锋

**[摘要]** 采用真空电弧离子镀工艺在渗铝后的镍基铸造高温合金表面制备 CoCrAlY 涂层,通过 SEM、光学显微镜检查了沉积工艺参数对涂层表面颗粒状态、涂层组织形貌及涂层沉积速率的影响,优化了真空电弧离子镀工艺参数。经高温退火处理后,CoCrAlY 涂层与渗铝层之间有明显的扩散层,涂层与渗铝层结合良好。

**关键词:** 真空电弧离子镀 导向叶片 CoCrAlY 涂层

**[ABSTRACT]** The vacuum arc ion plating is used in making a CoCrAlY coating on the surface of casted Ni-base alloys after aluminized treatment. SEM and optical microscope is used to examine the influences of deposition process parameters to the status of particles on the coating's surface, microstructure and the rate of plating, so as to get the optimization of process parameters. The result indicates that there are good and clear diffusion layers between the CoCrAlY coatings and the aluminized layers after the high-temperature annealing treatment.

**Keywords:** Vacuum arc ion plating Guide vane CoCrAlY coating

航空发动机涡轮导向叶片工作环境恶劣,不仅受高温氧化、高速燃气气流冲刷,还承受较大热应力等<sup>[1]</sup>。对使用过的涡轮导向叶片分析发现,燃气对叶片的高温氧化和热腐蚀是叶片失效的主要模式。解决这一难题的措施是在叶片型面涂覆抗高温氧化及热腐蚀涂层。目前涂层材料多为 MCrAlY(M 为 Fe、Co、Ni 及 NiCo)合金,制备 MCrAlY 涂层的主要工艺为热喷涂法、物理气相沉积法。本文利用电弧离子镀制备涂层具有容易控制、组织致密、涂层附着力好、无污染的优点,通过在渗铝后的镍基铸造高温合金表面沉积 CoCrAlY 涂层的研究,为该技术应用用于航空发动机涡轮导向叶片的防护打下基础。

### 1 试样制备和方法

#### 1.1 试样

K447A 铸造高温合金,规格为 30mm×20mm×3mm,用于镀覆前渗铝、镀覆涂层后表面形貌检查、涂渗层热

震性能试验。

#### 1.2 涂层制备设备

本研究采用设备为国产 LD-10A 型计算机全自动控制真空电弧离子镀膜机,偏压源为直流脉冲偏压源,在 10~1200V 连续可调;弧电源为直流逆变弧电源,工作范围为 0~200A;设备工作真空度小于  $6.67 \times 10^{-3}$  Pa,压升率小于 0.67Pa/h(试验前检测为 0.1055Pa/h),该设备分 4 组布置了 10 个蒸发源。图 1 为所用电弧离子镀装置及试件布置示意图。

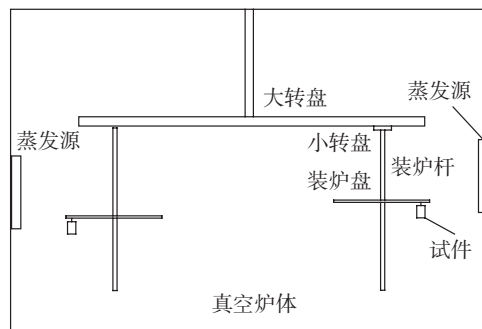


图 1 电弧离子镀装置图

Fig.1 Arc ion plating equipment drawing

#### 1.3 试件渗铝

采用料浆法渗铝工艺在试片上进行扩散渗铝(950~1000℃,4~6h)。

#### 1.4 测试方法

用 LEO1430VP 扫描电镜(SEM)对涂层进行表面宏观、微观观察,同时对涂渗层组织结构进行分析。

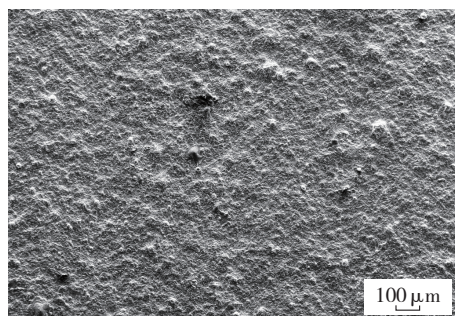
### 2 涂层镀覆工艺试验

在电弧离子镀沉积膜层的过程中,影响膜层结构和性能的主要因素有弧流、偏压。一般情况,增加弧流会使阴极靶材蒸发速率提高,膜层沉积速率增加,但在膜层表面产生大量金属颗粒,导致膜层表面粗糙、不光亮,影响膜层性能;偏压的大小直接影响入射到表面的粒子能量,随着偏压的增加,膜层的沉积速率逐渐减小,表面颗粒也有减小的趋势,但过高的偏压会使反溅射增大,甚至轰击产生大量的缺陷,损伤膜层<sup>[2]</sup>。本文通过设计一系列的试验,验证弧流、偏压对涂层表面颗粒分布、沉

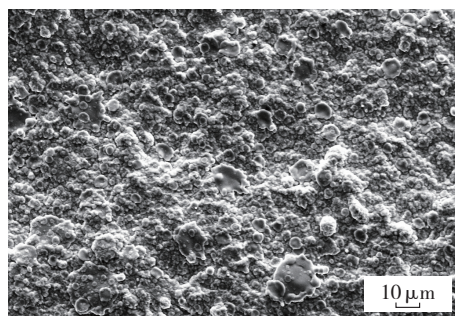
积速率的影响,优化膜层的制备工艺。

### 2.1 弧流对膜层表面及沉积速率的影响

图 2~图 4 为不同弧流下沉积 CoCrAlY 涂层表面宏观及微观形貌,在弧流 80A 时沉积的膜层表面颗粒分布较少,颗粒尺寸较小;弧流 90A 与弧流 100A 时,沉积的



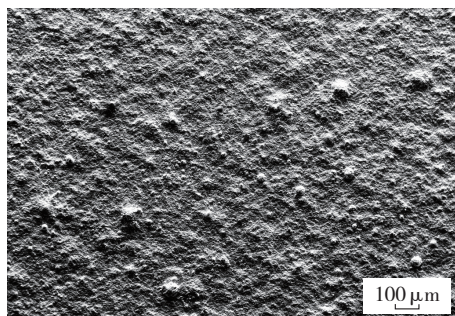
(a) 宏观



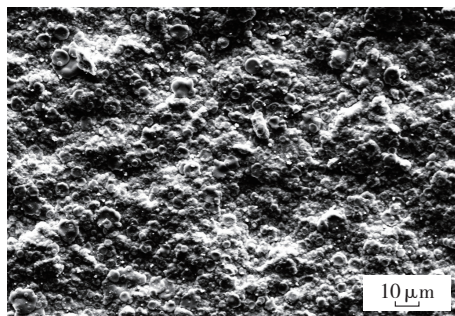
(b) 微观

图2 80A时涂层表面形貌

Fig.2 Coating surface morphology under 80A



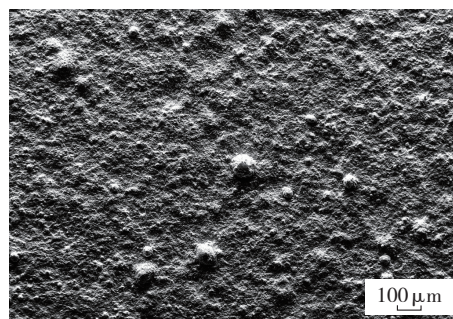
(a) 宏观



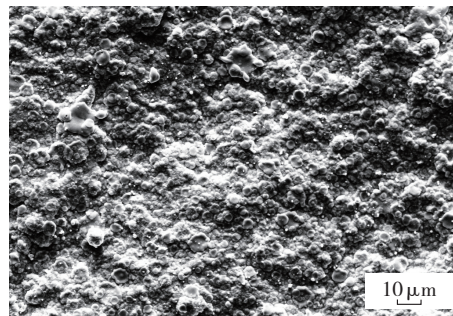
(b) 微观

图3 90A时涂层表面形貌

Fig.3 Coating surface morphology under 90A



(a) 宏观



(b) 微观

图4 100A时涂层表面形貌

Fig.4 Coating surface morphology under 100A

涂层表面存在较多的颗粒,且颗粒尺寸较大。这是由于提高弧流加强了电弧放电,使靶材表面温度升高,蒸发加剧,使蒸发过程中颗粒增多。弧流过小会导致在沉积过程中出现灭弧、起弧现象,弧流不稳定。从提高膜层沉积速率角度考虑,应加大弧流,但考虑到颗粒对膜层结构及性能的影响,则选择可以稳弧的小电流。

弧流对 CoCrAlY 涂层沉积速率的影响见图 5,在相同的沉积时间(120min),随着弧流的增加,膜层的沉积速率有所增加,80A 弧流沉积涂层厚度约 40 μm,100A 弧流沉积涂层厚度约 50 μm。大的弧流会增加涂层表面的颗粒,影响涂层结构及性能,综合弧流对涂层表面颗粒影响及沉积效率,选择 80A 的弧流。

### 2.2 偏压对膜层表面和沉积速率的影响

图 6~图 8 是不同偏压下沉积的 CoCrAlY 涂层表面

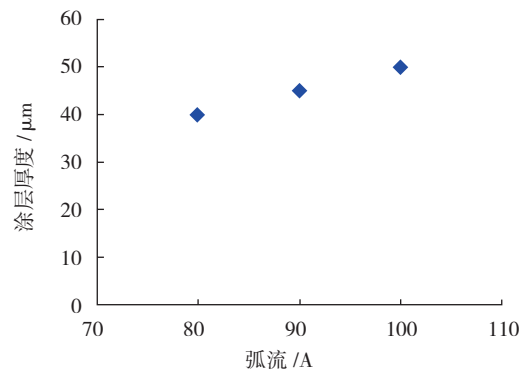
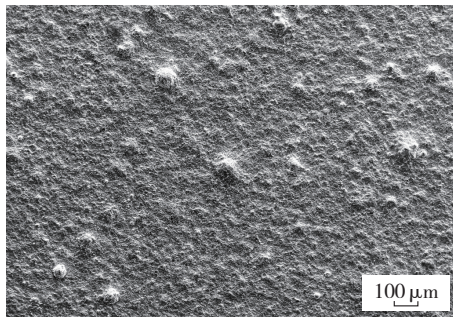


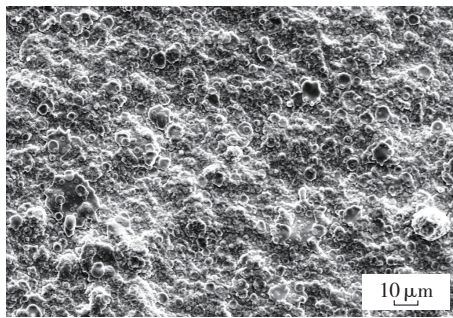
图5 弧流对涂层沉积速率的影响

Fig.5 Influence of arc flow on coating deposition rate

宏观及微观形貌,由图可见,随着偏压增加,涂层表面颗粒分布减少,尺寸也减小。偏压的大小直接影响入射到表面的粒子能量,随着偏压的增加,粒子膜层的沉积速率逐渐减小,表面颗粒也有减小的趋势,但过高的偏压会使反溅射增大,甚至轰击产生大量的缺陷,损伤膜层。



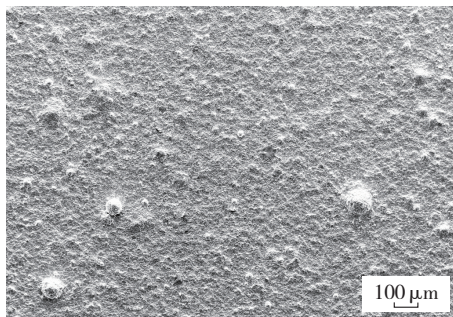
(a) 宏观



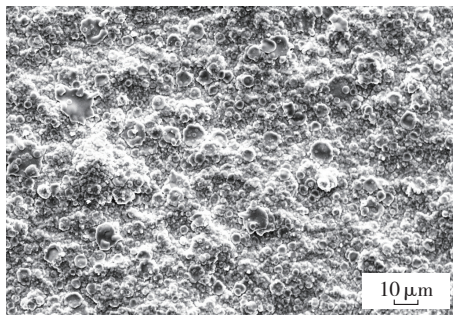
(b) 微观

图6 50V时涂层表面形貌

Fig.6 Coating surface morphology under 50V



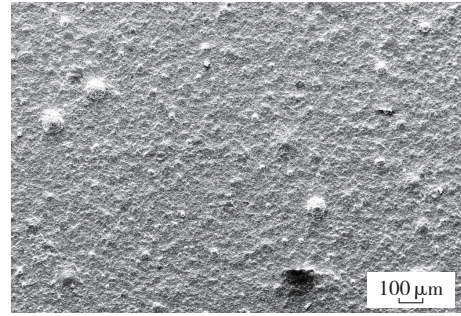
(a) 宏观



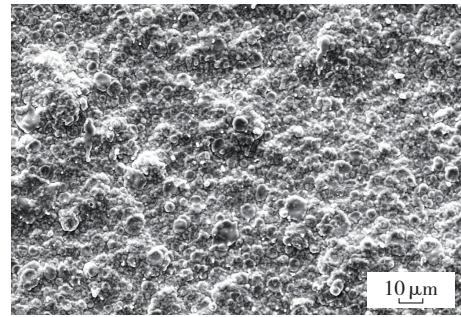
(b) 微观

图7 150V时涂层表面形貌

Fig.7 Coating surface morphology under 150V



(a) 宏观



(b) 微观

图8 200V时涂层表面形貌

Fig.8 Coating surface morphology under 200V

图9 是不同偏压下对 CoCrAlY 涂层沉积速率的影响,随着偏压的增加,涂层沉积速率减小。50V 时沉积速率最大,沉积的涂层厚度最大,约 100 μm,沉积速率 0.86 μm/min;150V 和 200V 时沉积速率基本相同,均为 0.33 μm/min 左右。进一步增大偏压,粒子获得的动能增大,与工件表面的碰撞更激烈,对已沉积的粒子反溅射更严重,会使涂层的沉积速率下降。从沉积速率和膜层质量综合考虑,选择 100V 的镀膜偏压。

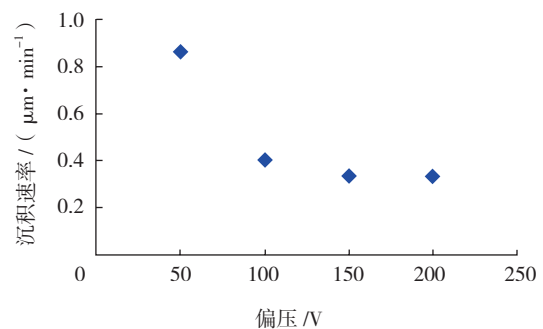


图9 偏压对涂层沉积速率的影响

Fig.9 Bias effects on coating deposition rate

### 2.3 优化后工艺参数

由镀膜弧流和镀膜电压试验可知镀膜电流 80A、镀膜电压 100V 是电弧离子镀 CoCrAlY 工艺的最佳参数。为了保证膜层的结合力和沉积速率,采用从高压到低压分级沉积的方式进行镀膜。

镀膜工艺: 离子清洗→主弧轰击→离子镀 CoCrAlY

(镀膜偏压 200V, 弧流 80A, 30min) → 离子镀 CoCrAlY (镀膜偏压 150V, 弧流 80A, 60min) → 离子镀 CoCrAlY (镀膜偏压 100V, 弧流 80A, 360min) → 随炉冷却出炉。

图 10 是优化后的工艺涂覆涂层表面形貌, 采用转镀后的涂层表面颗粒尺寸变小, 且分布明显减少。图 11 为 CoCrAlY 涂层 + 渗铝层组织形貌, 可见 CoCrAlY 涂层与渗铝层结合良好。

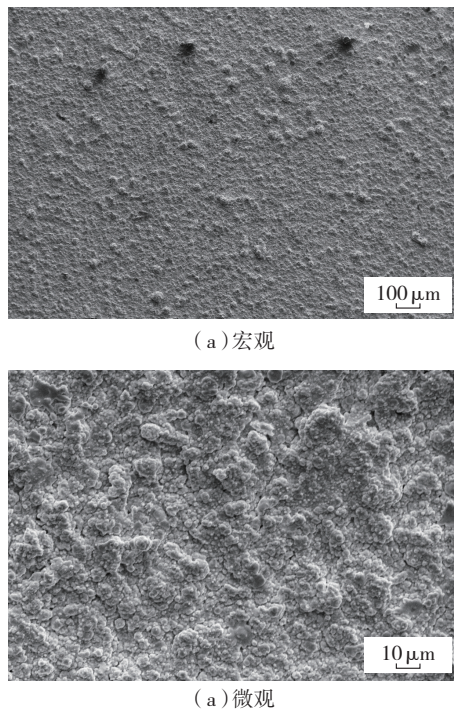


图 10 优化后涂层表面形貌 (50A)

Fig.10 Coating surface morphology after optimization

### 3 涂渗层退火处理

CoCrAlY 涂层退火处理前, 涂层表面比较粗糙, 表面分布着尺寸不等的颗粒状物(图 11), 未见微裂纹; 经 980℃、4h 退火处理后的 CoCrAlY 涂层表面的颗粒较扩散前涂层表面的颗粒细小, 也更加致密。图 12 为退火后 CoCrAlY 涂层 + 渗铝层组织形貌: 外层 CoCrAlY 涂

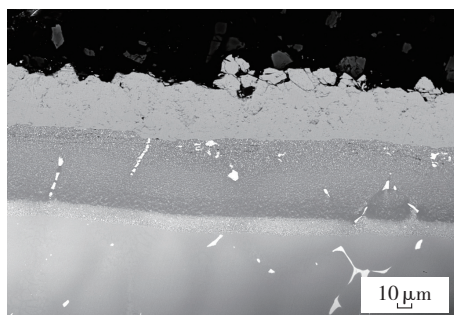


图 11 CoCrAlY 涂层+渗铝层组织 (退火前)

Fig.11 CoCrAlY coating+aluminized layer organization (before annealing)

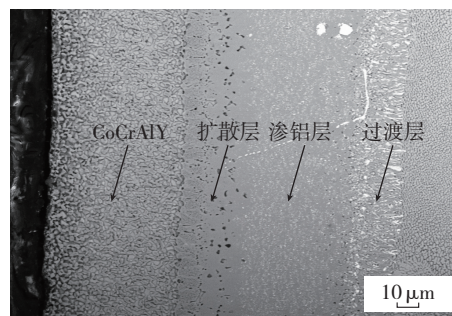


图 12 CoCrAlY涂层+渗铝层组织 (退火后)

Fig.12 CoCrAlY coating +aluminized layer organization (after annealing)

层显微组织为  $\beta$ (CoAl)+富Cr的  $\gamma$  固溶体的两相结构, Al 大部分处于  $\beta$  相中, 而 Cr 则存在于 Co 固溶体中<sup>[3]</sup>; 内层渗铝层, 渗铝层组织结构外层是  $\beta$ -NiAl 为基上面密集散布着微小沉淀相(第二相点), 内层  $\beta$ -NiAl 相的第二相粒子较少, 扩散层基体相为  $\beta + \gamma' +$  碳化物 + 指状  $\sigma$  相; CoCrAlY 涂层与渗铝层之间形成互扩散层, 厚度约 10  $\mu\text{m}$ , 有利于提高 CoCrAlY 涂层与渗铝层之间的结合强度。

### 4 涂渗层热震性能

为验证 CoCrAlY 涂层与渗铝层之间的结合性, 对退火后的带涂渗层试片进行热震性能试验。带涂渗层试片在 1050℃下保温 10min、水冷, 经 100 次循环后观察发现, 试片表面涂层完整, 无起皮、剥落、掉块及开裂等缺陷, 说明 CoCrAlY 涂层与渗铝层基体具有优良的结合性。

### 5 结论

通过摸索电弧离子镀工艺各参数对涂层表面颗粒及沉积速率的影响, 确定合适的涂层镀覆工艺, 具体工艺流程: 湿吹砂 → 清洗 → 干燥 → 装炉 → 主弧轰击 → 离子镀 CoCrAlY (镀膜偏压 200V, 弧流 80A, 30min) → 离子镀 CoCrAlY (镀膜偏压 150V, 弧流 80A, 60min) → 离子镀 CoCrAlY (镀膜偏压 100V, 弧流 80A, 360min) → 出炉。

退火处理后, CoCrAlY 涂层与渗铝层之间形成互扩散层, 增强了 CoCrAlY 涂层与渗铝层的结合性。

### 参考文献

- [1] 苏清友. 航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南. 北京: 航空工业出版社, 2004: 142.
  - [2] 戴达煌. 现代材料表面技术科学. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 472-482.
  - [3] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀. 北京: 化学工业出版社, 2003: 285.
- (责编 良辰)