

文章编号:1673-9981(2019)03-0207-04

# 等离子喷涂 CuNiIn 涂层性能研究

陈雄伟, 牟治国, 陈利刚

上海宝钢工业技术服务有限公司表面工程事业部, 上海 201900



**摘要:**通过等离子喷涂方法制备了 CuNiIn 涂层试样, 对不同参数所制备的涂层进行了金相组织分析、显微硬度及弯曲试验. 研究表明: 等离子焰流的功率对涂层材料有非常明显的影响作用; 随着氢气流量和喷涂功率的增大, 涂层致密度及显微硬度提高, 涂层中氧化物增多, 涂层弯曲后裂纹也增多, 涂层剪切强度则先增大后减小.

**关键词:** CuNiIn 涂层; 等离子喷涂; 涂层性能

**中图分类号:** TG174.442

**文献标识码:** A

钛及钛合金具有比强度高、抗腐蚀性好等一系列优点, 其被广泛应用于航空业中. 但是, 钛合金硬度低、耐磨性差, 尤其是微动磨损时, 严重的会造成部件失效. 钛合金对微动疲劳特别敏感的特性, 限制了它的进一步应用. 表面工程技术是降低钛合金微动损伤、提高钛合金抗微动疲劳性能的最有效的途径之一<sup>[1]</sup>.

CuNiIn 涂层是一种综合性能优异的软质固体润滑膜层, 其具有耐微动磨损性能好、耐腐蚀性和抗高温性能(使用温度上限 500 °C)良好的特性<sup>[2]</sup>. 外国的一些发动机制造商如 GE, Rolls-Royce 和 SNECMA 等, 已将 CuNiIn 涂层作为航空发动机压气机叶片之间及叶片和轮盘榫槽之间的抗微动磨损防护层. 钛合金表面喷涂 CuNiIn 金属涂层后, 其微动疲劳强度为常规疲劳强度的 63%, 而未喷涂的钛合金仅为 48%<sup>[3]</sup>.

等离子喷涂是一种材料表面强化和表面改性的技术, 可以使基体表面具有耐磨、耐蚀、耐高温氧化、电绝缘、隔热、防辐射、减磨和密封等性能. 等离子喷涂技术是采用由直流电驱动的等离子电弧作为热源, 将陶瓷、合金、金属等材料加热到熔融或半熔融状态, 并以高速喷向经过预处理的工件表面而形成

附着牢固的表面层的方法. 采用等离子喷涂制备 CuNiIn 涂层因其具有较好的高温抗微动磨损性能, 已成为航空发动机叶片中最常用的一种涂层. 因此, 研制和开发 CuNiIn 涂层具有重要的实际意义.

## 1 试验部分

### 1.1 试样

试样基体材料为 Ti 6-4, 其中金相和硬度试样尺寸为 50 mm×25 mm×1.6 mm, 剪切试样尺寸为 100 mm×25 mm×1.6 mm, 弯曲试样尺寸为 150 mm×25 mm×1.6 mm.

粉末材料采用 PAC 公司 (Powder Alloy Corporation) 生产的 CuNiIn 粉末, 粉末的化学成分列于表 1. 该粉末具有粒子粒度分布均匀, 粉末粒径分布为 15~45 μm (图 1), 粉末流动性好等特点.

表 1 CuNiIn 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of CuNiIn powder

成分	Cu	Ni	In	Fe
含量 w/%	余量	35	5	0.2

收稿日期: 2019-03-11

作者简介: 陈雄伟(1984-), 湖北咸宁人, 硕士研究生, 工程师, 从事热喷涂研究与应用。

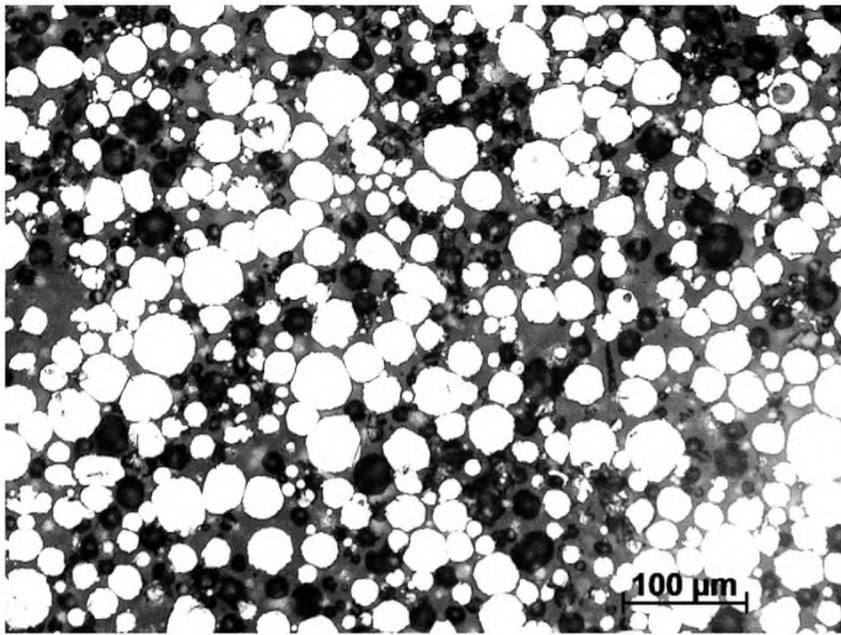


图1 CuNiIn粉末金相形貌

Fig. 1 The microstructure of CuNiIn powder

### 1.2 喷涂设备及工艺参数

采用美科 Unicoat F4 等离子喷涂设备进行喷涂试验. 喷涂前首先用丙酮清洗试样, 然后对试样表面进行喷砂粗化处理, 砂子材料为  $250\ \mu\text{m}$  的白刚玉, 喷砂压力为  $0.25\ \text{MPa}$ , 喷砂距离  $150\ \text{mm}$ . 为了研究不同的喷涂参数对涂层性能的影响, 一共设定了三组喷涂参数. 主要改变氢气流量, 通过不同的气体配比来改变火焰的温度和速度, 从而影响涂层的性能. 喷涂过程中, 利用压缩空气对基体背面进行强行冷却, 控制涂层的平均温度在  $60\ ^\circ\text{C}$  以下. 喷涂的工艺参数列于表 2.

表2 喷涂工艺参数

Table 2 Spray parameters

试样编号	氩气流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	氢气流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	送粉率 $/(\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	喷涂距离 $/\text{mm}$
1	1.4	0.15	24	125
2	1.4	0.20	24	125
3	1.4	0.25	24	125

### 1.3 涂层检测

分别对喷涂制备的 CuNiIn 涂层试样截取横截面, 经金相冷镶嵌、研磨、抛光后, 采用卡尔蔡司 Observer 倒置式金相显微镜, 及系统内置的 AxioVision 图像分析软件, 观察涂层的微观形貌和涂层与基体界面的结合情况, 并进行孔隙率测量. 采用 Struers 公司的 DuraSan-50 显微硬度计, 测试涂

层硬度. 采用 Sans 的 CMT5305 万能试验机, 测试涂层的剪切强度. 采用自制的三点弯曲实验装置测试涂层的抗弯曲性能, 测试在直径为  $12.7\ \text{mm}$  的支撑芯轴上进行, 弯曲角度为  $180^\circ$ , 弯曲速度为  $2\sim 5\ \text{s}$  完成弯曲.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 涂层的金相组织

三种不同喷涂工艺参数制备的 CuNiIn 涂层金相形貌见图 2. 从图 2 可以看出: 涂层与基体之间均形成了良好的界面结合, 呈典型的热喷涂涂层机械咬合形貌; 涂层均无分层、横向裂纹、团聚氧化物和界面分离; 涂层呈明显的层状结构, 组织均匀, 涂层中孔隙和氧化物均匀分布.

从图 2 还可以看出: 试样 1 涂层未熔颗粒较多 (见图 2(a)), 孔隙率相对较高, 约为  $3\%\sim 5\%$ , 涂层氧化物相对较少; 试样 2 涂层未熔颗粒明显减少, 但也存在少量未熔颗粒 (见图 2(b)), 涂层孔隙率有所减少, 约为  $3\%$  左右, 涂层层间细长氧化物增多; 试样 3 涂层未见明显未熔颗粒 (见图 2(c)), 涂层孔隙率最少, 约为  $2\%\sim 3\%$ , 涂层层间氧化物最多. 这是由于氢气流量少时, 喷涂功率低, 粉末加热熔化效果不佳, 涂层氧化物相对较少. 而且在较低的等离子功率下, 粒子撞击速度小, 粒子还未获得充分的加速, 撞击后变形不充分, 层与层之间孔隙增加, 因而孔隙率高. 随着氢气流量增加, 喷涂功率的增大, 焰流温度增加, 速度加快, 涂层未熔颗粒减少, 涂层孔隙率减少, 涂层氧化物也相应增多. 特别是 CuNiIn 涂层中 In 的存在, In 在高温下特别容易烧损, 更容易形成氧化物<sup>[3]</sup>.

### 2.2 涂层显微硬度

三种不同喷涂工艺参数制备的 CuNiIn 涂层显微硬度见表 3. 由表 3 可知, 试样 1 涂层平均硬度最低, 随着氢气流量增多, 硬度升高. 这是由于随着氢气流量增加, 功率增大, 涂层内氧化物增, 硬度提高. CuNiIn 涂层是一种软质涂层, 主要是抵抗微动磨损, 硬度低时在载荷反复接触过程中容易产生韧性变形, 释放应力. 因此, 在满足其它要求的前提下涂层显微硬度应尽量低<sup>[2]</sup>.

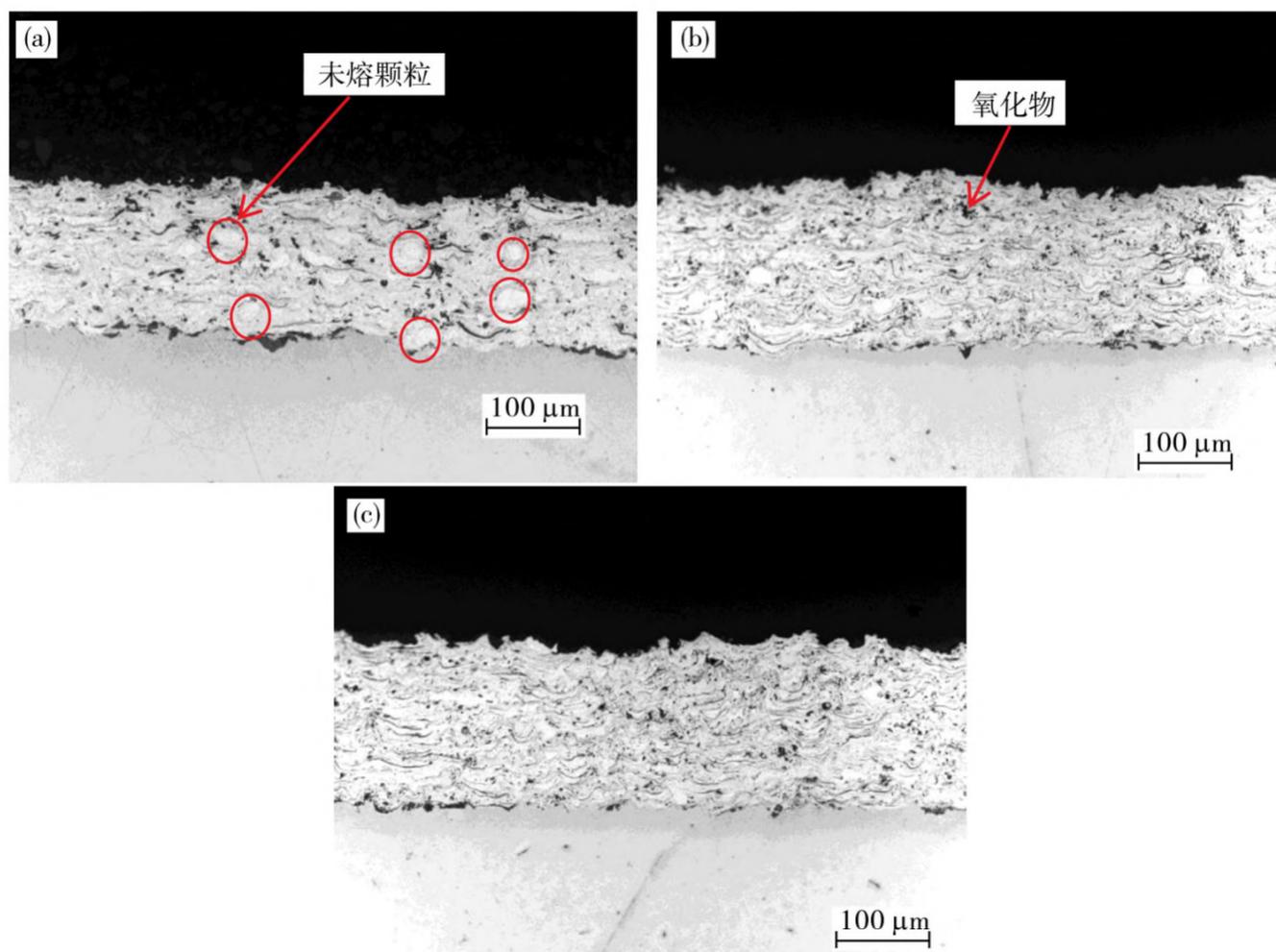


图 2 CuNiIn 涂层金相形貌  
(a)试样 1;(b)试样 2;(c)试样 3

Fig. 2 The microstructure of CuNiIn coating  
(a)specimen No. 1;(b)specimen No. 2;(c)specimen No. 3

表 3 CuNiIn 涂层显微硬度  
Table 3 The micro hardness of CuNiIn coatings

试样编号	硬度值 HV <sub>0.3</sub>	平均值
1	169.4,162.8,152.6,162.8,189.8,165.6,172.8,162.5,173.2,162.8	167.4
2	188.8,186.2,191.0,191.4,189.8,187.2,187.3,188.2,188.1,190.6	188.9
3	208.2,216.7,211.9,191.9,209.8,197.7,197.9,208.5,198.3,210.9	205.2

### 2.3 涂层抗弯曲性能

三种不同喷涂工艺参数制备的 CuNiIn 涂层的弯曲测试结果如图 3 所示.从图 3 可见,试样 1 涂层(图 3(a))弯曲部位涂层裂纹最少,最细小,试样 2(图 3(b))涂层的裂纹相对多一些,试样 3(图 3(c))涂层弯曲部位的裂纹最多且相对最大.这与涂层喷涂时功率增大,涂层内部氧化物增多有关.但采用三种参数制备的涂层整体上看均抗弯曲性能较好,涂层均没有发生起皱、翘起、层裂和剥落等现象.

### 2.4 涂层剪切性能

三种不同喷涂工艺参数制备的 CuNiIn 涂层剪切测试结果列于表 4.由表 4 可见,试样 1 的剪切强度值最小,次之为试样 3,试样 2 的最大.这是由于

试样 1 的等离子焰流温度相对最小,因而涂层内具有较多的未熔颗粒,涂层熔化状态不良会导致涂层层间结合强度下降,从而使涂层剪切结合强度下降,试样 3 的功率最大,等离子焰流温度最高,涂层最致密,但涂层内部氧化物也相对较多,因而剪切强度相比试样 2 的略有降低.

表 4 CuNiIn 涂层剪切强度  
Table 4 The lap shear bond strength results of CuNiIn coatings

试样编号	剪切强度/MPa	断裂位置
1	37.2	涂层内部
2	42.8	涂层内部
3	40.9	涂层内部

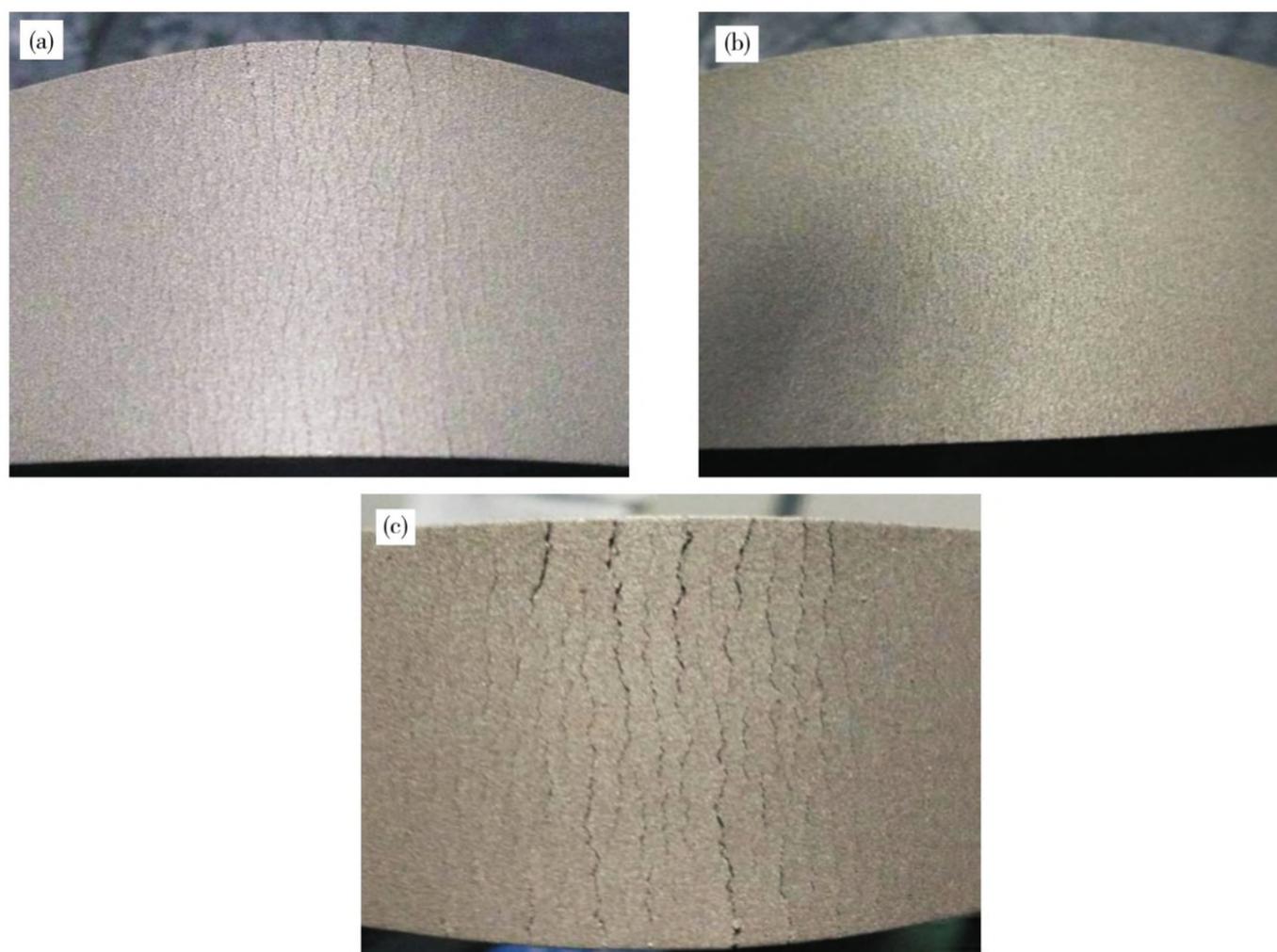


图3 CuNiIn 涂层弯曲测试结果

(a)试样 1;(b)试样 2;(c)试样 3

Fig. 3 The bend test results of CuNiIn coating

(a)specimen No. 1;(b)specimen No. 2;(c)specimen No. 3

### 3 结 论

采用三种等离子喷涂工艺参数制备了 CuNiIn 涂层,并对其涂层性能进行分析.随着氢气流量的增加,喷涂功率的增大,涂层更加致密,涂层氧化物也相应增多,涂层显微硬度增大,涂层弯曲测试时裂纹也相应增多,而涂层剪切强度先增后减.

#### 参考文献:

- [1] 李启鹏,李伟,杨磊,等.航空用钛合金抗微动疲劳表面改性技术的研究进展[J].机械工程材料,2012(11):9-13.
- [2] 朱晨,孙波,程涛涛,等.飞机发动机风扇叶片 CuNiIn 涂层等离子喷涂的工艺优化[J].材料保护,2015(2):37-40.
- [3] 郭志宏,王辉,张淑婷,等.电弧喷涂 CuNiIn 抗微动磨损涂层性能研究[J].热喷涂技术,2013(12):33-38.

## Investigation on the performance of plasma spray CuNiIn coating

CHEN Xiongwei, MU Zhiguo, CHEN Ligang

Department of Surface Engineering, Shanghai Baosteel Industry Technological Services Co. Ltd., Shanghai 201900, China

**Abstract:** Metallographic structure analysis, micro hardness, bend test and lap shear bond strength test were down on CuNiIn coatings sprayed by different parameters. It shows that the spray powder has a very significant effect on coatings performance. The higher power comes with more H<sub>2</sub> flow rate exhibits lower porosity rate, more oxidation, micro hardness and bend cracks, while the lap shear bond strength increase first then decrease.

**Key words:** CuNiIn coating; APS; coating performance