

# 复合电镀制备 WC@W-Cu 复合材料的组织与性能

赵玉超, 唐建成, 叶楠, 卓海鸥, 韦朝龙, 周威威

(南昌大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** W-Cu 复合材料因具有低膨胀系数、高强度及较好的导电导热性能而广泛用作电子封装、电极、电触头和炮弹的罩壳等材料。W-Cu 复合材料传统制备方法在致密化、微观组织的均匀性等方面难以兼顾, 导致材料的导电导热性能不足, 难以满足现代电子工业的要求。本研究以 W 粉及 W 粉表面碳化得到的 WC@W 粉为原料, 采用复合电镀技术制备了 W-Cu 和 WC@W-Cu 复合材料。结果表明, W-Cu 复合材料表面粗糙, 微观组织存在孔洞, 而 WC@W-Cu 复合材料晶粒细化, 微观结构组织均匀、致密。WC@W-Cu 复合材料的 W 含量(质量分数)为 43.6%, 硬度(HV)达 2050 MPa, 相对密度为 99.3%, 电导率可达 54.6 MS/m。采用 WC@W 纳米粉, 电镀制备的 WC@W-Cu 复合材料不仅增加了 W 含量, 明显提高了硬度, 而且在相对密度和导电性方面也优于 W-Cu 复合材料。

**关键词:** W-Cu 复合材料; WC@W-Cu 复合材料; 复合电镀; 微观结构; 电导率

**中图分类号:** TB333; TG139.45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2021)04-1384-07

W-Cu 复合材料是由互不相溶的金属 W 和金属 Cu 组成的典型伪合金。因其兼具金属 W 的高强度、高硬度、低膨胀系数和金属 Cu 的高塑性、优异的导电导热性能, 作为电子封装材料、电触头和电极材料、反坦克炮弹的罩壳材料及火箭喷管、喉衬材料, 广泛应用于电气工程、航空航天、军工等领域<sup>[1]</sup>。

目前 W-Cu 复合材料的制备方法主要以液相烧结、熔渗法为主, 微米/纳米级粉末的制备和恰当的烧结工艺是改善合金致密度和提升材料性能的前提和关键<sup>[2]</sup>。研究表明, 降低 W 颗粒的尺寸或添加少量的纳米 W 粉可提高 W-Cu 复合材料的硬度和导电导热性能。但是随 W 晶粒的减小, 在致密化、微观组织的均匀性等方面难以兼顾, 导致材料的导电导热性能不足, 难以满足现代电子工业的要求<sup>[3-5]</sup>。并且制备过程中对烧结工艺要求高, 烧结设备昂贵, 烧结成本较高。

电镀技术因工艺简单、成本低, 能制备低孔隙率、高密度的镀层等优点, 成为近年来研究较多的方法之一<sup>[6-10]</sup>。而复合电镀能使固体微粒与金属离子共沉积, 得到兼具金属镀层与微粒特性的复合镀层, 并且操作简单<sup>[11,12]</sup>。Morteza 等人<sup>[13]</sup>在镀液中加入纳米级 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微粒, 制备出 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层, 并研究了镀层的微观形貌和性能, 结果表明均匀分布的纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒细化了镀层的组织结构。Jin 等人<sup>[14]</sup>也使用复合电镀的方法制备了 Ni-W-SiC 复合镀层, 并研究了 SiC 颗粒的

粒径对复合镀层性能的影响。当 SiC 微粒的粒径为亚微米和纳米级时, 复合镀层的硬度和摩擦学性能非常优异。Zhou 等<sup>[15]</sup>报道了一种在低碳钢基体上一步电镀 Ni/WC/WS<sub>2</sub> 复合镀层的方法, 成功地获得了镍基超疏水涂层。复合电镀制备法较传统的粉末冶金法制备的复合材料具有晶粒小、组织细致且均匀的特点。但目前使用复合电镀方法制备 W-Cu 合金的报道较少, 电镀制备复合材料中界面形成对材料性能的影响尚罕见研究。

本实验采用纳米 W 粉, 使用复合电镀法制备了 W-Cu 复合材料, 同时将 W 粉表面碳化得到 WC@W 纳米粉, 制备了 WC@W-Cu 复合材料, 并对试样的相对密度、组织和性能进行评价, 研究了电镀试样的 WC@W 界面对材料性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 纳米 W 粉及 W 粉的表面碳化

采用实验室自制的纳米 W 粉为原料<sup>[16]</sup>, 在制备成功 W 粉取出时, 采用 N<sub>2</sub> 对其进行表面钝化处理, 采用脉冲加热惰气熔融-红外吸收法测得氧含量为 0.012%。其形貌如图 1 所示, 可见 W 粉大部分呈规则的球形, 颗粒分布均匀, 平均粒径为 100 nm。

W 粉的表面碳化: 以无水乙醇作溶剂, 聚乙烯醇缩丁醛 (PVB) 作为碳源, 将其混合均匀, 再将纳米

收稿日期: 2020-08-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51864034)

作者简介: 赵玉超, 女, 1985 年生, 博士生, 南昌大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031, E-mail: zyzhaoyuchao@163.com

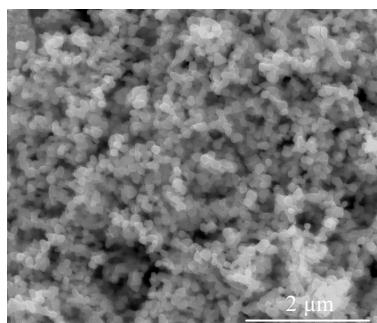


图1 W粉的SEM照片

Fig.1 SEM image of W powder

W粉掺入溶液中快速搅拌。纳米钨粉, PVB和无水乙醇的质量分数分别为80%, 2%和18%。将混合物充分搅拌并在80℃下干燥直至乙醇溶剂完全蒸发, 然后将其置于管式炉中, 于N<sub>2</sub>气氛中于600℃保温1h, 以将PVB转化为碳(C)层<sup>[17]</sup>, 再提高温度至1200℃保温1h, 反应结束后随炉冷却至室温取出样品, 研磨之后进行检测。

## 1.2 WC@W-Cu 复合材料的电镀制备方法

使用赫尔槽作为电镀设备, 脉冲整流器(岳阳电器, 60V/20A)作脉冲电源, 纯铜板用作阴极和阳极。电镀工艺参数和电镀液的组成如表1所示。所用试剂为分析纯试剂, 使用去离子水作为溶剂。在溶解过程中使用超声波分散。电镀之前, 用一系列碳化硅砂纸按800#、1000#、1200#、1500#和2000#的顺序打磨铜板, 以防止任何潜在的污染物影响电镀操作。随后, 依次用体积分数为5%的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液和10%的HCl溶液进行活化。最后, 将铜板在无水乙醇溶液中进一步清洗, 以加快干燥过程。为了增强W颗粒的分散性,

表1 电镀液的组成和电镀工艺参数

Table 1 Composition of electroplating solution and the parameters of electroplating process

Composition and process parameter	Value
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O/g·L <sup>-1</sup>	125
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /g·L <sup>-1</sup>	200
NaCl/mg·L <sup>-1</sup>	60
Polyethylene glycol (PEG)/g·L <sup>-1</sup>	0.2
Sodium dodecyl sulfate (SDS)/g·L <sup>-1</sup>	0.1
W (or carbonized W) powders/g·L <sup>-1</sup>	10
Current density/A·dm <sup>-2</sup>	2
Frequency/Hz	1000
Positive pulse duty cycle/%	20
Negative pulse duty cycle/%	10
Temperature/℃	30
Plating time/h	2

在电镀过程中用磁力搅拌器连续搅拌溶液。电镀完成后, 将样品用无水乙醇轻轻冲洗, 并在60℃的烘箱中干燥。

## 2 结果与讨论

### 2.1 W粉表面碳化产物的表面形貌及成分分析

图2为纳米W粉表面碳化处理后所得产物的SEM像和XRD图谱。从图2a可以看出, W粉表面碳化后所得产物的表面形貌与原始W粉相似, 近似球形, 颗粒分布均匀, 颗粒大小仍为纳米尺寸, 但颗粒之间发生了联结。由图2b中XRD分析可知, W粉碳化后的粉末由W和WC两相组成, 无C、W<sub>2</sub>C相及氧化物相的存在。由于自制W粉取出时已采用N<sub>2</sub>进行了表面钝化处理, 并且在N<sub>2</sub>气氛中进行PVB的碳层转化和W粉的碳化为非计量比的碳化过程, 碳化过程中会中和部分吸附的氧。综合XRD分析结果表明, PVB的碳转化及W粉的碳化过程中氧含量对本实验结果不会产生影响。WC的衍射峰明显低于W的衍射峰, 说明粉末以W为主, 含有少量的WC。根据XRD物相组成分析结果, 推测W粉表面生成薄的WC层。为进一步证实WC的分布, 对颗粒界面附近进行了TEM分析, 如图3所示。

图3a为W粉表面碳化产物的TEM照片, 图3b

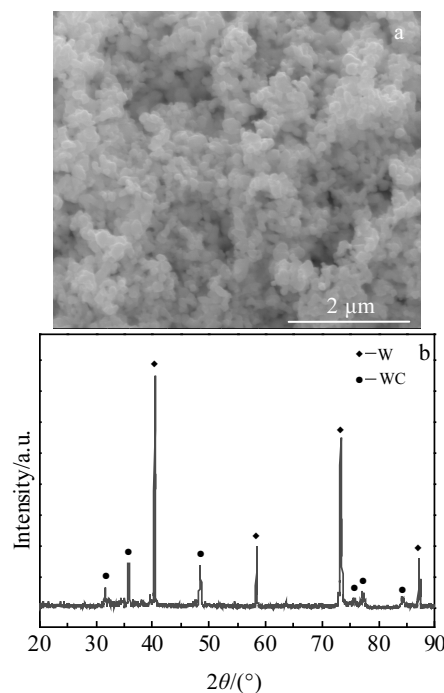


图2 W粉表面碳化产物的SEM照片和XRD图谱

Fig.2 SEM image (a) and XRD pattern (b) of carbonized product of W powder

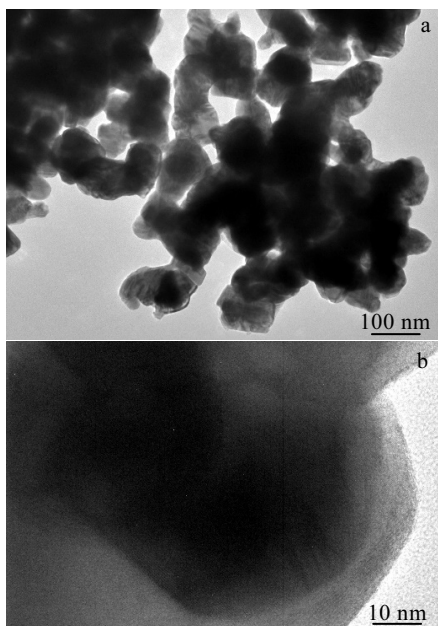


图 3 W 粉表面碳化产物的 TEM 照片

Fig.3 TEM images of carbonized product of W powder

为高分辨透射电镜图。从图 3b 中可见，W 颗粒表面包裹着薄的 WC 层，这一结果与 XRD 物相组成分析结果一致。在此，定义 W 粉表面碳化后所得产物为 WC@W 纳米粉，并用于电镀制备 WC@W-Cu 复合材料。

### 2.2 电镀制备样品的 SEM 及 TEM 分析

图 4 为电镀制备的 W-Cu 复合材料的表面及截面 SEM 照片。从图 4a 可见，W-Cu 复合材料的表面较为均匀、致密，由不规则形状的突起颗粒组成。这是由于电镀液中加入的有机添加剂 PEG 和 SDS 协同作用于  $\text{Cu}^{2+}$  还原过程造成的。接通脉冲电源后，阳极 Cu 失去电子，并溶解在溶液中，而在阴极  $\text{Cu}^{2+}$  吸收电子被还原为 Cu<sup>+</sup> 离子再至 Cu 原子。电镀液中的 PEG 吸附在阴极和 W 颗粒表面，与电镀液中的  $\text{Cl}^-$  及  $\text{Cu}^+$  离子螯合形成 PEG-Cu<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup> 络合物，从而抑制铜沉积速率。由于 PEG 与电极表面之间存在静电力和范德华力，因此 PEG 可以吸附在电极表面形成阻挡层，进一步阻碍镀液中铜离子向电极表面扩散放电<sup>[18]</sup>。添加剂 SDS 能在生长的铜表面上化学吸附，并具有末端阴离子磺酸基团，能吸引镀液中的  $\text{Cu}^{2+}$  离子，从而加速 Cu 沉积。但 Cu 沉积过快时会导致粗晶粒的结节状沉积铜及孔洞的出现<sup>[19]</sup>。同时使用 PEG 和 SDS 可产生协同效应，当两者之间的相互作用(吸附竞争)达到平衡<sup>[20]</sup>时，可防止粗晶沉积铜及孔洞的生成，从而制备出致密的 W-Cu 复合材料。经多次试验后，本实验电镀液中采用 PEG 和 SDS 最佳的添加量为 0.2 g/L 和 0.1 g/L。

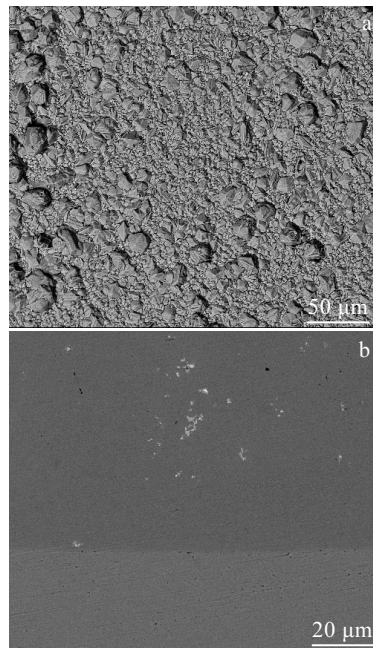


图 4 W-Cu 复合材料的表面及截面 SEM 照片

Fig.4 SEM surface morphology (a) and cross-section morphology (b) of the W-Cu composite

由图 4b 中复合材料的截面形貌也可看出电镀制备的样品致密，只存在少量较小的孔洞。图中灰白色颗粒为 W，大部分呈暗灰色的区域为 Cu，W 分散在 Cu 基体中有一定的团聚现象，并且 W 与 Cu 的边界处易存在孔洞、孔隙。这是由于 W 与 Cu 不润湿、互不相溶引起的，导致 W-Cu 复合材料中 W 的含量较少。经过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测试 W-Cu 复合材料中的 W 的含量(质量分数，下同)为 8.3%。

图 5a 是 W-Cu 复合材料的 TEM 像。可见纳米 W 颗粒存在于 Cu 晶粒之间，且 Cu 与 Cu 晶粒之间结合紧密，但 W 与 Cu 边界处存在空隙，这将影响 W-Cu 复合材料的性能。图 5b 为图 5a 中选区 b 的电子衍射花样，图 5c 为选区 c 的电子衍射花样，进一步证明了复合材料中 W、Cu 两相的存在与分布。

图 6 是电镀制备的 WC@W-Cu 复合材料的表面及截面 SEM 照片。如图 6a 所示，与 W-Cu 复合材料相比，WC@W-Cu 复合材料的表面更加均匀、致密，表面粗糙度小。表面仍由不规则形状的突起颗粒组成，但颗粒明显变小，说明 WC@W 纳米粉的使用有利于晶粒的细化。图 6b 为 WC@W-Cu 复合材料的截面 SEM 图，其中灰白色区域是 WC@W 相，暗灰色区域是 Cu 相，结构均匀、致密，无孔洞，与阴极 Cu 板结合紧密。重要的是 WC@W-Cu 复合材料中 WC@W 颗粒的含量

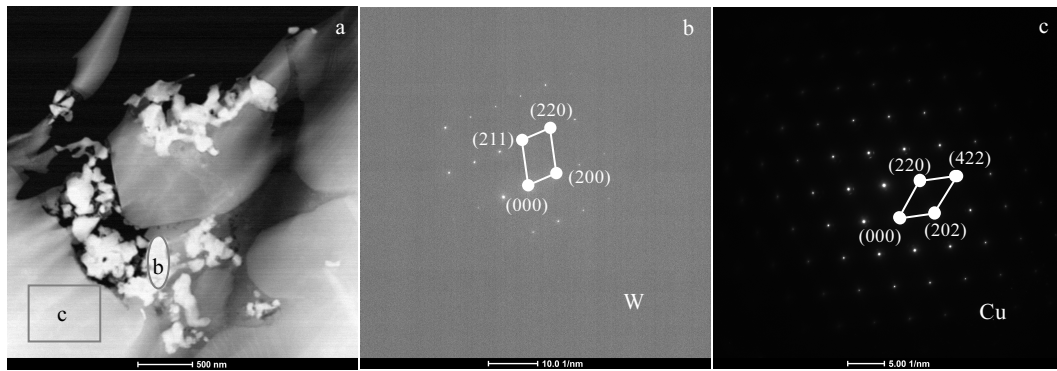


图 5 W-Cu 复合材料的 TEM 照片及选区 b 和选区 c 的电子衍射花样

Fig.5 TEM image of W-Cu composite (a), SAED patterns of area b (b) and area c (c) in Fig.5a

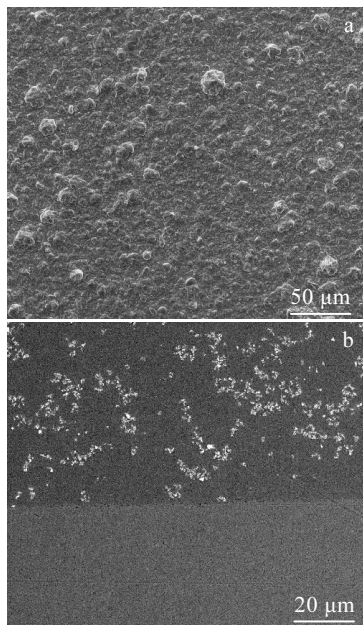


图 6 WC@W-Cu 复合材料的表面及截面 SEM 照片

Fig.6 SEM surface morphology (a) and cross-section morphology (b) of WC@W-Cu composite

明显增多且分布均匀。经 ICP 分析测试 WC@W-Cu 电镀样品中 W 的含量为 43.6%，远远高于 W-Cu 复合材料中的 W 含量(8.3%)。

图 7a 显示了 WC@W-Cu 复合材料的 TEM 照片，图 7b 为图 7a 中选区 b 的 HR-TEM 照片，图 7c、7d、7e 为图 7b 中选区 c、d、e 的电子衍射花样。图 7c、7d、7e 的分析计算结果确认了 W、WC 和 Cu 相的存在。从图 7a、7b 可见，纳米 WC@W 颗粒分布在 Cu 晶粒之间，颗粒外围的 WC 相与 Cu 结合紧密，几乎无空隙。由于 W、Cu 两相互不相溶，而 Cu 对 WC 的

润湿角在  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$  范围内变化，表明 WC 具有更好的润湿性和更强的界面结合力，WC 相使 W 相和 Cu 相的结合更好<sup>[17]</sup>。WC 对两相间的润湿性也有利<sup>[21]</sup>。实验结果证明，WC 相的形成使 W、Cu 相间更好地结合，WC 改善了两相之间的界面接触。

分析结果表明，在相同实验条件下得到的 W-Cu 和 WC@W-Cu 复合材料，因 WC@W 纳米粉的使用，有利于晶粒细化、致密，使样品的微观结构更加均匀。WC 包裹 W 粉形成过渡层，改善了电镀复合材料中 W 和 Cu 之间的界面，使晶粒间结合紧密，易于电镀形成 W 含量较高的 WC@W-Cu 复合材料，将会提高复合材料的高温强度和耐磨性等性能。

### 2.3 W-Cu 和 WC@W-Cu 复合材料的性能

图 8 是 W-Cu 和 WC@W-Cu 复合材料的 W 含量与相对密度的比较。从图中可以看出，WC@W-Cu 电镀样品中 W 的含量为 43.6%，远远高于 W-Cu 复合材料中的 W 含量(8.3%)。W-Cu 复合材料的相对密度为 95.2%，WC@W-Cu 复合材料的相对密度达到 99.3%。结合材料的 SEM 及 TEM 分析，出现此现象是由于 WC@W 使电镀制备过程中晶粒细化、致密，制得的复合材料结构均匀、无孔洞，从而增加了 WC@W 颗粒在材料中的分布数量，提高了 W 含量和相对密度。

图 9 为 W-Cu 和 WC@W-Cu 复合材料的维氏硬度与电导率的比较。将抛光好的样品置于 HV 硬度计上，使用压力载荷为 1.96 N，保压时间为 15 s，对样品的不同位置测试 5 次取平均值，测得 W-Cu 复合材料的硬度为 1270 MPa，高于实验用阴极 Cu 板的硬度(经检测为 850 MPa)，可知 W 的加入提高了复合材料的硬度。而 WC@W-Cu 复合材料的硬度增加更明显，达到 2050 MPa。这是由三方面的原因造成的，一是 WC@W-Cu 复合材料的微观结构均匀、致密，二是 WC@W-Cu 复

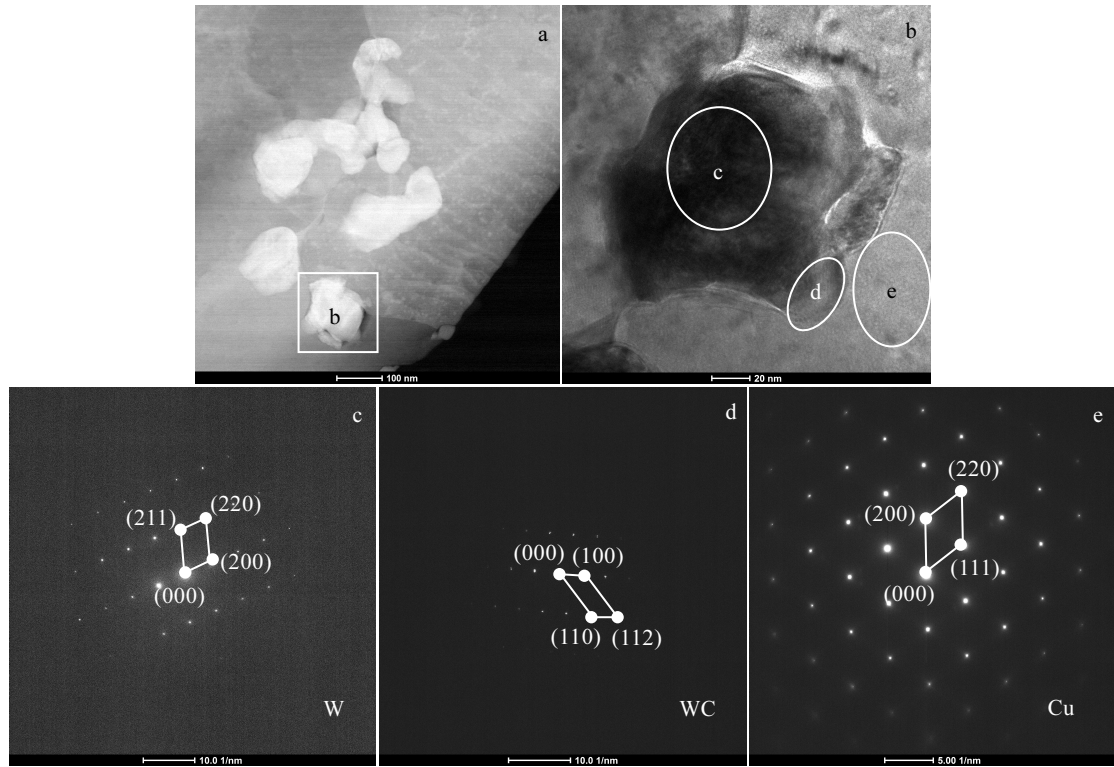


图 7 WC@W-Cu 复合材料的 TEM 照片和选区 b 的 HRTEM 照片；选区 c、选区 d 和选区 e 的电子衍射花样

Fig.7 TEM image (a) and HRTEM image of area b in Fig.7a (b) of WC@W-Cu composite; SAED patterns of area c (c), area d (d), and area e (e) in Fig.7b

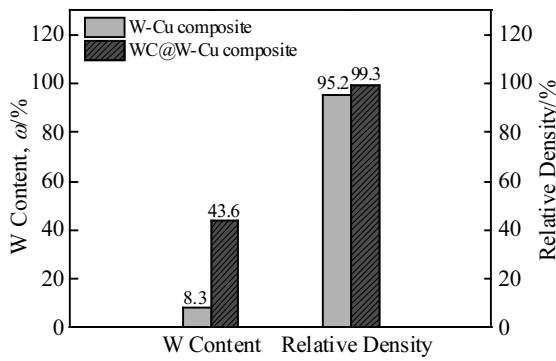


图 8 W-Cu 和 WC@W-Cu 复合材料的 W 含量与相对密度的比较

Fig.8 Comparison of W content and relative density between W-Cu and WC@W-Cu composite

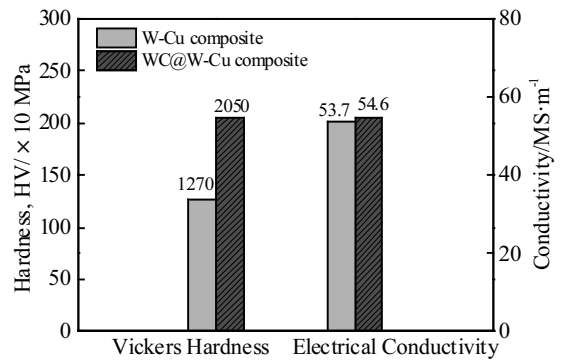


图 9 W-Cu 和 WC@W-Cu 复合材料的维氏硬度与电导率的比较

Fig.9 Comparison of Vickers hardness and electrical conductivity between W-Cu and WC@W-Cu composite

合材料中 WC@W 颗粒数量增加，从而 W 含量增加，三是 WC 的硬度很高，可达 12 GPa 以上，WC@W 颗粒中 WC 层的存在增加了 WC@W-Cu 复合材料的硬度。另外，采用涡流电导率仪测量 W-Cu 复合材料的

电导率为 53.7 MS/m，而 WC@W-Cu 复合材料的电导率增加至 54.6 MS/m。金属 W 的电导率低于纯 Cu 的电导率(57.1 MS/m)，并且 W-Cu 复合材料中 W 与 Cu 间的界面存在空隙，有孔洞，会阻断电子传递，所以 W-Cu

复合材料的电导率降低。虽然 WC 的导电性低于金属 W, 但是 WC@W-Cu 复合材料的微观结构均匀、致密, 无孔洞, WC@W 颗粒使 Cu 晶粒细化, 形成连续的 Cu 网结构, 易于电子传递<sup>[17]</sup>, 因而 WC@W-Cu 复合材料的电导率较 W-Cu 复合材料有所提高。

综合分析表明, 采用 WC@W 纳米粉, 电镀制备出的 WC@W-Cu 复合材料不仅增加了 W 含量, 明显提高了硬度, 而且在相对密度和导电性方面也优于 W-Cu 复合材料。这归功于表面具有 WC 层的 WC@W 纳米粉对复合材料微观结构的影响。WC 层改善 W、Cu 界面润湿性, 增加与基体之间的结合力, 细化晶粒, 使 WC@W-Cu 复合材料的微观结构组织均匀、致密, 从而提高了 WC@W-Cu 复合材料的硬度和导电性能。

### 3 结 论

1) 对纳米 W 粉作表面碳化处理, 可得到 WC@W 纳米粉。W 颗粒表面包裹着薄的 WC 层。利用复合电镀法制备的 W-Cu 复合材料粗糙, 存在孔洞, 因 W 与 Cu 的互不相溶性, 其界面结合不紧密存在空隙。采用 WC@W 纳米粉制备的 WC@W-Cu 复合材料微观结构组织均匀, 晶粒细化、致密。

2) 采用 WC@W 纳米粉, 电镀制备的 WC@W-Cu 复合材料的 W 含量为 43.6%, 硬度达 2050 MPa, 相对密度为 99.3%, 电导率可达 54.6 MS/m。与相同实验条件下制备的 W-Cu 复合材料比较, 不仅增加了 W 含量, 明显提高了硬度, 而且在相对密度和导电性方面也有所提高。

3) WC@W 纳米粉表面的 WC 层改善 W、Cu 界面润湿性, 增加与基体之间的结合力, 细化晶粒, 使 WC@W-Cu 复合材料的微观结构组织均匀、致密, 从而提高了 WC@W-Cu 复合材料的硬度和导电性能。

#### 参考文献 References

- [1] Dong L L, Ahangarkani M, Chen W G *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2018, 75: 30
- [2] Li Baoqiang, Sun Zhiqiang, Hou Guolin *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 766: 204
- [3] Chen Wenge, Dong Longlong, Wang Jiaojiao *et al.* *Scientific Reports*[J], 2017, 7: 17 836
- [4] Yao Huilong(姚惠龙), Lin Tao(林涛), Luo Ji(罗骥) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(2): 348
- [5] Zhuo Haiou(卓海鸥), Liu Wensheng(刘文胜), Chen Shumao(陈树茂) *et al.* *China Tungsten Industry*(中国钨业)[J], 2016, 31(5): 60
- [6] Zhuo Longchao, Zhang Yiheng, Zhao Zhao *et al.* *Materials Letters*[J], 2019, 243: 26
- [7] Nayana K O, Ranganatha S, Shubha H N *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2019, 29(11): 2371
- [8] Fu Xiuqing(傅秀清), Duan Shuanglu(段双陆), Lin Jinran(林尽染) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 2095
- [9] Yu Guangwei(于光伟), Liu Hong(刘宏), Wang Jiyang(王继扬). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(1): 209
- [10] Yang Bilian(杨碧莲), Li Xingwu(李星吾), Ruan Ying(阮莹) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(10): 3215
- [11] Ye Zhiguo(叶志国), He Qingqing(何庆庆), Liu Lei(刘磊) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3989
- [12] Denis S Solovjev, Inna A Solovjeva, Victoria V Konkina *et al.* *Materials Today: Proceedings*[J], 2019, 19(5): 1895
- [13] Morteza Alizadeh, Hamed Safaei. *Applied Surface Science*[J], 2018, 456: 195
- [14] Jin Pen, Sun Chufeng, Zhang Zhonghui *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 392: 125 738
- [15] Zhou Jixue, Zhao Guochen, Li Jinshang *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2019, 487: 1329
- [16] Wu Tong, Tang Jiancheng, Ye Nan *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(5): 1027
- [17] Zhang Chengcheng, Luo Guoqiang, Zhang Jian *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 127: 233
- [18] Lee Hsuan, Yu Tai-Yi, Cheng Hsi-Kuei *et al.* *Journal of the Electrochemical Society*[J], 2017, 164(7): 457
- [19] James J Kelly, Tian Chunyan, Alan C West. *Journal of the Electrochemical Society*[J], 1999, 146(7): 2540
- [20] Feng Z V, Li Xiao, Gewirth A A. *The Journal of Physical Chemistry B*[J], 2003, 107(35): 9415
- [21] Li Yurong, Hou Chao, Lu Hao *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2019, 79: 154

## Microstructures and Properties of WC@W-Cu Composite Prepared by Composite Electroplating

Zhao Yuchao, Tang Jiancheng, Ye Nan, Zhuo Haiou, Wei Chaolong, Zhou Weiwei  
(School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** W-Cu composites are widely used as materials for electronic packaging, electrodes, electrical contacts, and shells of artillery shells because of their low expansion coefficient, high strength, high electrical and thermal conductivity. The traditional preparation methods of W-Cu composite are difficult to take into account the densification and the uniformity of the microstructure, resulting in insufficient electrical and thermal conductivity of the material, and it is difficult to meet the requirements of the modern electronics industry. Using W powder and WC@W powder obtained by carbonization of the surface of W powder as raw materials, W-Cu and WC@W-Cu composites were prepared by composite electroplating technology. The results show that the surface of W-Cu composite is rough and there are holes in the microstructure, while the WC@W-Cu composite has refined grains, and the microstructure is uniform and dense. The W content of WC@W-Cu composite is 43.6wt%, the HV hardness is 2050 MPa, the relative density is 99.3%, and the electrical conductivity can reach 54.6 MS/m. The WC@W-Cu composite not only increases the W content and significantly improves the hardness, but also is better than the W-Cu composite in relative density and conductivity.

**Key words:** W-Cu composite; WC@W-Cu composite; composite electroplating; microstructure; electrical conductivity

---

Corresponding author: Tang Jiancheng, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China, E-mail: tangjiancheng@ncu.edu.cn