

表面镀 Ni 碳纤维增强 Cu 基复合材料的制备和表征

贾建刚¹, 高昌琦¹, 刘第强¹, 季根顺¹, 薛向军², 郭铁明¹, 郝相忠²

(1 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050; 2 甘肃郝氏碳纤维有限公司, 兰州 730010)

摘要 为提高碳纤维/铜(Cf/Cu)复合材料中 Cf 与 Cu 基体的结合强度, 通过电化学法在 Cf 表面沉积一层约 1 μm 厚的 Ni 镀层, 进而沉积厚约 6 μm 的 Cu 镀层, 将镀覆 Ni-Cu 复合镀层的短纤维复合丝在 800 $^{\circ}\text{C}$ 、20 MPa 下利用放电等离子烧结 (SPS) 制备镀镍碳纤维增强的铜基复合材料 (Cf/Cu(Ni)), 并与相同烧结工艺下制备的相同碳纤维体积分数的 Cf/Cu 复合材料进行对比。利用 XRD 和 SEM 分别研究了碳纤维表面 Ni 镀层的物相及表面形貌, 用附带 EDS 的 SEM 研究了 Cf 与 Ni-Cu 复合镀层断面、Cf/Cu (Ni) 复合材料表面及断面形貌, 采用电子式万能试验机研究了未经修饰的碳纤维、镀 Ni 碳纤维、镀 Cu 碳纤维和 Cf/Cu(Ni) 以及 Cf/Cu 复合材料的拉伸性能。结果表明, 镀 Ni 碳纤维复合丝的拉伸强度略高于未经修饰的碳纤维, 断裂伸长率则略低于未经修饰的碳纤维, 拉伸过程中 Ni 镀层无剥离, 这与其表面 Ni 镀层和 Cf 的结合强度较高有关。Cf/Cu(Ni) 复合材料呈塑性断裂, 力学性能明显优于 Cf/Cu 复合材料, 拉伸强度提高 20% 以上。

关键词 碳纤维 Cu 基复合材料 Ni-Cu 双镀层 拉伸性能

中图分类号: TB333 **文献标识码**: A **DOI**: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.14.025

Preparation and Characterization of Ni-coated Carbon Fiber Reinforced Cu-based Composites

JIA Jiangan¹, GAO Changqi¹, LIU Diqiang¹, JI Genshun¹, XUE Xiangjun², GUO Tieming¹, HAO Xiangzhong²

(1 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050; 2 Gansu Haoshi Carbon Fiber Co., Ltd., Lanzhou 730010)

Abstract In order to enhance the interface bonding strength between carbon fiber and the Cu-based composites, uniformly nickel coating with controlled thickness of 1 μm was electroplated on the short carbon fibers. Afterwards, the Cu coating with a thickness of about 6 μm is prepared. Based on that, the Nickel coated carbon fiber reinforced copper matrix composites was prepared by spark plasma sintering with Ni-Cu coated carbon fibers under 20 MPa at 800 $^{\circ}\text{C}$ for 5 min. Meanwhile, the carbon fiber reinforced copper with the same volume fraction of Cf was prepared under the same sintering conditions. The morphology and the phase composition of the Ni coating were characterized by SEM and XRD respectively. Furthermore, the surface and fracture morphology and the interface of Cf and Cu were researched through SEM equipped with EDS. The tensile mechanical properties of nickel-coated carbon fibers and copper-coated carbon fibers were preliminarily studied by the electronic tensile testing machine. Results show that the tensile strength of the nickel-coated carbon fibers were higher than that of the uncoated fibers, while the elongation was slightly reduced compared with the uncoated fibers. No delamination of Ni coating occurs during the tensile process, which can be attributed to the stronger bonding strength between Cf and Ni coating. The Ni-coated carbon fibers reinforced Cu-based composites (Cf/Cu(Ni)) show higher plastic deformation fracture and the mechanical properties of Cf/Cu(Ni) than that of Cf/Cu composites. The tensile strength of Cf/Cu(Ni) was about 20% higher than that of the Cf/Cu composites.

Key words carbon fibers, Cu-based composites, Ni-Cu duplex coating, tensile property

0 引言

碳纤维 (Cf) 具有强度高、模量高、耐酸性好、密度和热膨胀系数小等优异性能^[1-2], 作为增强体材料在高性能复合材料制备领域备受关注。碳纤维/铜 (Cf/Cu) 复合材料综合了铜的良好导电导热性和碳纤维的高比强度和比模量、低热膨胀系数及良好的润滑性, 使其具有良好的传导性、减摩耐磨

性、耐电弧烧蚀性、抗熔焊性等一系列优点, 已广泛用作电子元件材料、滑动材料、触头材料等, 用于制造电刷、轴瓦、滑块、轨道交通引电弓滑板等机电零部件^[3-4]。

粉末冶金法是制备短碳纤维/铜基复合材料的普遍方法, 但制备工艺复杂, 较难得到短纤维分布均匀和结合良好的复合材料^[5], 特别是纤维含量高时, 均匀分散十分困难。对短碳纤维进行表面均匀镀铜处理, 再利用 SPS 热压烧结,

基金项目: 国家自然科学基金 (51461029); 甘肃省科技重大专项计划项目 (1602GKDD012)

贾建刚, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为新型金属基复合材料 E-mail: lzjjjiajiangan@163.com 季根顺: 通信作者, 男, 1963 年生, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为碳碳复合材料研发与制备 E-mail: jiggsh@lut.cn

可以制备均匀分散的 Cf/Cu 复合材料^[6-8]。然而,碳纤维与铜基体的润湿性较差,二者界面仅为简单的机械弱结合,在承受载荷时,易发生碳纤维增强体的拔出、剥离或者脱落,外加载荷不能通过基体向碳纤维有效传递,导致碳纤维的优异性能无法充分发挥^[6,9]。因此,改善界面结合强度是提高 Cf/Cu 复合材料性能的关键。

合金元素 Ni 不仅与 Cu 基体可以无限互溶,也可以明显提高碳纤维与铜基体之间的界面结合强度^[10-12]。本工作在成功制备均匀分散的 Cf/Cu 复合材料的基础上^[6],针对 Cf 与 Cu 界面结合性较差的问题,首先在纤维表面均匀修饰约 1 μm 厚的 Ni 镀层,再镀覆 5~6 μm 厚的 Cu,通过 SPS 热压烧结制备碳纤维表面修饰 Ni 增强的 Cu 基复合材料(Cf/Cu(Ni)),并与未经修饰的 Cf/Cu 复合材料进行比较,考察了表面修饰 Ni 对碳纤维性能及碳纤维增强铜基复合材料的组织结构和性能的影响。

1 实验

1.1 实验流程

图 1 为本实验流程。将短切 Cf 镀镍后再镀铜处理,采用 SPS 热压烧制备镀镍碳纤维增强的 Cu 基复合材料,并与未经镀镍处理的 Cf 增强的 Cu 基复合材料进行对比。本实验利用 XRD、SEM 和 EDS 等对 Cf 表面镀层及复合材料进行表征,利用万能材料试验机测量 Cf 增强体及复合材料

的拉伸性能。

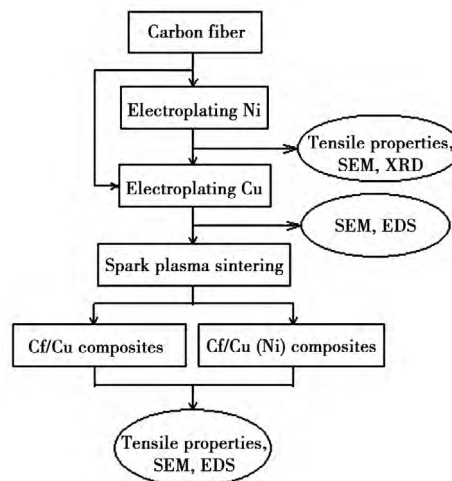


图 1 实验流程

Fig. 1 The process of experiment

1.2 实验材料及方法

实验材料选用甘肃郝氏碳纤维有限公司提供的无上浆 T300 型聚丙烯腈基碳纤维,性能参数如表 1 所示。电镀 Ni 和 Cu 的镀液成分分别如表 2^[13]和表 3^[14]所示。将碳纤维剪短至 2~3 mm,备用。采用 MCH-K3205D 型数显可调稳压恒流源为本实验提供直流电源。

表 1 碳纤维的性能参数

Table 1 Property parameter of carbon fibers

Commodity	TYPE-SPEC	Tensile strength/MPa	Modulus of elasticity/GPa	Elongation %	Linear density g · km ⁻¹	Density g · cm ⁻³	Carbon %
PAN-Carbon fibre	T300-TX6K	3 608	206	1.5	360	1.76	98.5

表 2 电镀镍镀液成分^[13]

Table 2 Chemical composition of electroplating nickel bath^[13]

Component	Concentration/(g/L)
NiSO ₄ · 6H ₂ O	270
NiCl ₂ · 6H ₂ O	70
H ₃ BO ₃	40
C ₁₂ H ₂₅ · SO ₄ Na	0.1

表 3 电镀铜镀液成分^[14]

Table 3 Chemical composition of electroplating copper bath^[14]

Component	Concentration/(g/L)
CuSO ₄ · 5H ₂ O	20
C ₄ H ₁₀ O ₆ Na ₂ · 2H ₂ O	4
C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ · 2H ₂ O	36
KNO ₃	4.8
H ₂ O	400

电化学沉积镀 Ni 在室温下进行,采用经打磨并酸洗处理的 Φ 8 mm 电解镍棒为阴极,100 mm × 20 mm × 3 mm 电解镍板为阳极,两电极间距为 75 mm。用 CP214 型电子天平(感重为 0.000 1 g)称取短切碳纤维 0.025 g 放入电镀液中,并用玻璃棒搅拌使其均匀分散。利用 JJ-1 型定时电动搅拌

器(300 r/min)进行机械搅拌,在 5 V 直流电压下沉积包覆 Ni,沉积时间为 10 min。将镀 Ni 的短碳纤维用蒸馏水多次清洗后进行镀 Cu 处理,镀 Cu 工艺过程参考文献^[6],参数选 6 V、30 min。将经处理的上述两种碳纤维用 SPS-20T-10 快速热压烧结炉进行烧结,制备 Cf/Cu(Ni)和 Cf/Cu 复合材料。SPS 脉冲比为 36:6。烧结温度为 800 °C,压力为 20 MPa,保温时间为 5 min。

镀镍碳纤维单丝拉伸试样是将 55 mm 长的碳纤维粘附在阴极上,在 4 V 电压下连续镀覆 5 min,以使单丝拉伸试样的镀镍层厚度与短纤维在 5 V、10 min 条件下的镀镍层厚度相近。

1.3 材料表征

根据 GB/T31290-2014^[15]将单丝粘结在防水相纸上,单丝有效长度为 25 mm,共 40 个平行试验样本。镀镍复合丝试样的固定方法如图 2 所示^[16],将防水相纸沿虚线(剪切线)处剪开后进行拉伸试验。

Cf/Cu(Ni)和 Cf/Cu 复合材料拉伸试样尺寸如图 3 所示,厚度为 3 mm。试样表面依次用 400 #、600 #、800 #、1000 # 金相砂纸进行打磨处理,使试样表面平整光滑。

用附带 EDS 的扫描电子显微镜(SEM,JSM-6700F)分析镀镍碳纤维、Cf/Cu(Ni)和 Cf/Cu 复合材料的微观形貌,用

D/max-2400 型 X 射线衍射仪(XRD)分析短碳纤维包覆 Ni 前后的物相。采用精度为 0.5% 的微机控制 E44.304 型电子万能试验机,以 0.1 mm/min 的拉伸速度分别对 Cf/Ni 复合丝与未经修饰的碳纤维单丝进行单丝拉伸性能测试,分别测试 40 个单体样本;以 0.5 mm/min 的拉伸速度分别测试 Cf/Cu、Cf/Cu(Ni)复合材料的拉伸强度,并通过 SEM 观察两种复合材料的断口。

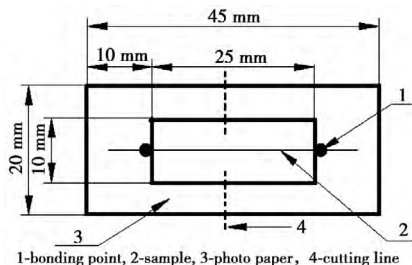


图 2 单丝拉伸模板

Fig. 2 The mold of single fiber

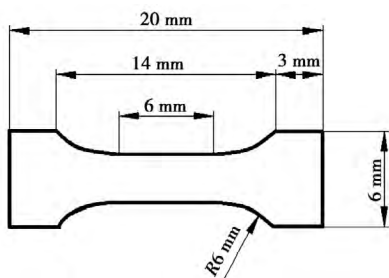


图 3 拉伸试样尺寸

Fig. 3 The shape of tensile sample

2 结果与讨论

2.1 Ni 镀层的物相分析

图 4 为碳纤维镀镍前后的 XRD 谱。由图 4(a)可知,未经修饰的碳纤维的 XRD 谱仅在衍射角(2θ)为 20~30°和 40~47°之间出现两个漫散射峰,而无明显衍射峰。图 4(b)为 5 V 直流电压下沉积 10 min 的 Cf/Ni 复合丝的 XRD 谱,在 25°附近的碳纤维漫散射峰的高度急剧减小,而 45°附近的漫散射峰完全消失,且谱图中主晶相为 Ni,表明碳纤维表面 Ni 单质镀层成分纯净,无氧化现象。

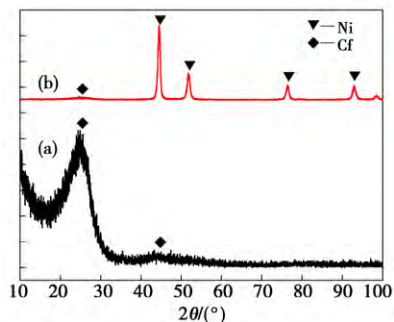


图 4 镀镍(a)前、(b)后短碳纤维的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of short carbon fiber (a) before and (b) after nickel deposition

2.2 镀 Ni 碳纤维的 SEM 形貌

图 5 为在 5 V 沉积电压下电镀 10 min 获得的 Ni 镀层的形貌,可见各单体纤维丝间镀层厚度均匀,表面无针孔,但镀层局部出现枝化点,形成小的胞状凸起。根据镀覆后碳纤维复合丝的平均直径可知,Ni 镀层的厚度约为 1 μm,镀镍后的纤维经清洗后再进行镀铜处理。

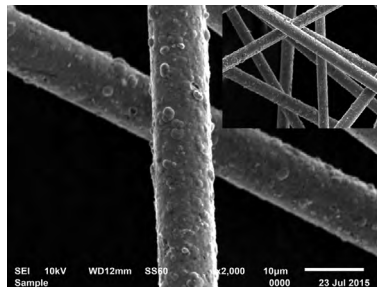


图 5 短碳纤维镍镀层的 SEM 形貌(5 V,10 min)

Fig. 5 SEM image of Ni coating on short carbon fibers at 5 V,10 min

图 6 为在 4 V 电压下沉积 5 min 制得的单丝拉伸试样镀镍层形貌,可见碳纤维表面镀层连续光滑,且厚度均匀。复合丝的直径为 7~8 μm,镀层厚度约为 0.6 μm。镀层表面未出现如图 5 所示的枝化点。这是由于单丝拉伸试样直接粘附于阴极上,而短纤维必须通过与阴极不断吸附才可进行沉积。因此,相较于短纤维镀覆,单丝拉伸试样镀覆条件较为稳定,表面不易出现枝化现象。

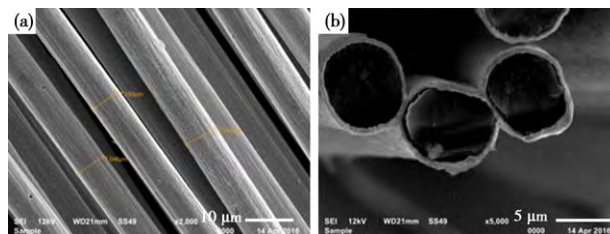


图 6 单丝拉伸试样(a)镀镍层及(b)其截面的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM image of (a) Ni coating and (b) its cross section

2.3 镀 Ni 碳纤维的拉伸性能

图 7 为未经修饰的碳纤维、镀镍碳纤维及镀铜碳纤维复合丝的单丝拉伸应力-应变曲线,右侧插图分别为镀镍碳纤维及镀铜碳纤维复合丝拉伸破坏后的 SEM 形貌。可见,未经修饰的碳纤维与镀镍碳纤维复合丝两种单丝的拉伸过程都比较平稳,未出现剧烈波动,而镀铜碳纤维复合丝在拉伸过程中波动较大,其拉伸强度和模量基本与未经修饰的碳纤维相当。而镀镍碳纤维复合丝的承载能力比未经修饰的碳纤维略有提高,这是由于 Ni 镀层与 Cf 间存在 Ni-C-O 化学键^[17-18],使得二者的结合强度较高,因此拉伸过程中 Ni 镀层与 Cf 间无相对滑移;同时,Ni 镀层覆盖了 Cf 表面沟槽和表面缺陷,降低了纤维表面的应力集中。由于 Ni 镀层的拉伸强度低于未经修饰的碳纤维,当 Ni 产生周向裂纹后,随着载荷的增大,Ni 镀层开裂处碳纤维应力增大,导致纤维与镀层同时断裂。如图 7 右侧插图所示,镀镍碳纤维复合丝的断口较为平齐。而 Cu 与 Cf 之间仅存在简单的机械弱结合,在拉

伸过程中二者界面处产生的切应力增大到一定程度时,造成 Cu 镀层断裂和剥离,相应的拉伸应力-应变曲线产生波动。应力-应变曲线上的多处较大范围波动对应复合丝表面 Cu 镀层的多处剥离^[6]。

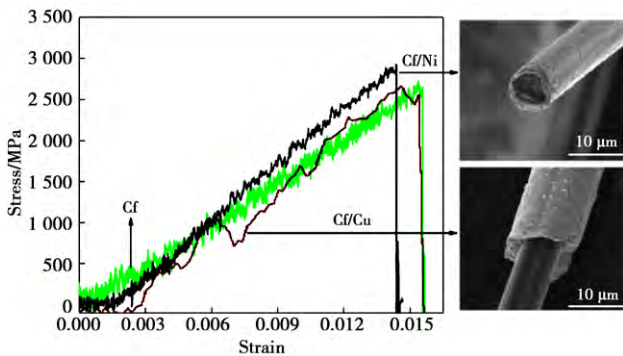


图 7 Cf, Cf/Cu 和 Cf/Ni 单丝拉伸应力-应变曲线及 Cf/Cu、Cf/Ni 单丝断口形貌

Fig. 7 Stress-strain curve of the Cf, Cf/Cu and Cf/Ni monofilaments and fracture morphologies of Cf/Cu and Cf/Ni monofilaments

2.3 Cf/Cu(Ni)复合材料的微观组织结构与性能

图 8 为 6 V 电压下 Cf、Ni/Cf 丝电镀铜 30 min 时的断面形貌,可见两种纤维丝表面镀层厚度基本一致,约为 6 μm。Ni 镀层与 Cu 镀层之间界面明显,两种镀层呈规则的圆环状均匀完整地包覆在碳纤维表面。根据镀层厚度推算,该工艺条件下制备的碳纤维复合丝经热压烧结制备的两种复合材料中 Cf 的体积分数约为 17%。

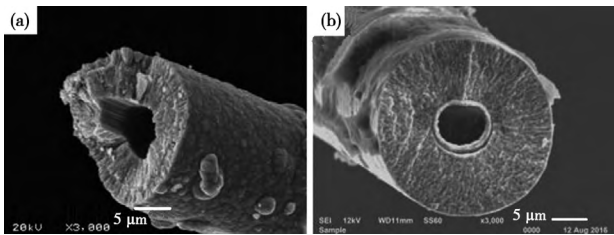


图 8 镀 Cu 碳纤维镀层 SEM 形貌(6 V, 30 min)

Fig. 8 SEM images of Cu coatings at 6 V, 30 min

图 9(a)、(b)分别为镀镍碳纤维增强铜基复合材料的受压表面和截面形貌,可见镀镍纤维在基体中分布均匀,并在垂直于受压方向形成择优取向。同时,可以清晰地看到碳纤维与基体间结合较好,镍与铜之间界面已无法分辨。并且纤维与基体之间结合良好,无剥离、孔洞等明显缺陷。

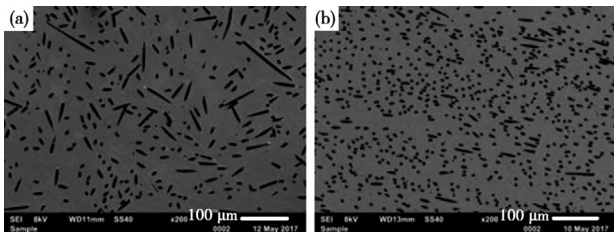


图 9 Cf/Cu(Ni)复合材料的(a)表面及(b)截面形貌

Fig. 9 SEM images of Cf/Cu(Ni) composites:
(a) perpendicular to the direction of pressure;
(b) parallel to the pressure direction

图 10 为 Cf/Cu(Ni)复合材料 Cf 周围区域的 EDS 元素线扫描,可以看出,碳纤维周围基体中 Ni 与 Cu 分布均匀,无明显界面,说明热压烧结过程中 Ni 与 Cu 之间进行了充分扩散,形成了碳纤维增强的铜镍固溶体。

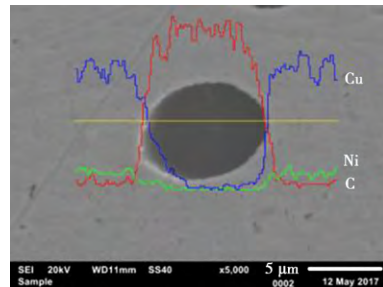


图 10 Cf/Cu(Ni)复合材料的 EDS 谱

Fig. 10 EDS spectra of Cf/Cu(Ni) composites

图 11 为 Cf/Cu(Ni)和 Cf/Cu 复合材料的拉伸应力-应变曲线。加载初始阶段,随着变形的增加,两种复合材料基体分别在应力为 60 MPa 和 50 MPa 时发生局部屈服,但随后屈服变形被碳纤维增强体所阻碍,弹性变形继续进行,直至材料发生整体屈服变形。两者的条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 分别为 160 MPa 和 145 MPa。可以看出,Cf/Cu(Ni)复合材料的强度和延伸率均高于 Cf/Cu 复合材料。另外,与 2 V 电压下镀覆 30 min 的短纤维热压得到的 Cf/Cu 复合材料相比^[6],本工艺条件(6 V, 30 min)下制备的 Cf/Cu 复合材料所用短纤维镀铜层的厚度有所增加,其抗拉强度也明显增加,由原来的 125~175 MPa^[6]增加至 190 MPa。而 Cf/Cu(Ni)复合材料的抗拉强度提高至 230 MPa,比 Cf/Cu 复合材料高 20% 以上。

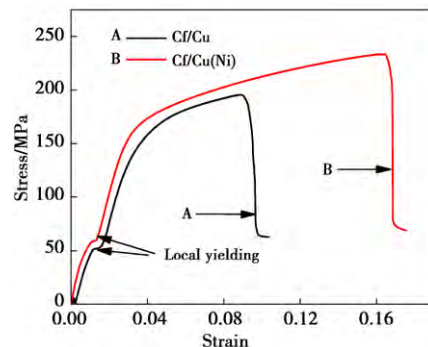


图 11 复合材料的拉伸应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves from tensile testing of composites

图 12 为 Cf/Cu(Ni)和 Cf/Cu 复合材料的断口形貌,可以看出,Cf/Cu(Ni)中的韧窝数量明显比 Cf/Cu 基体中多,分布

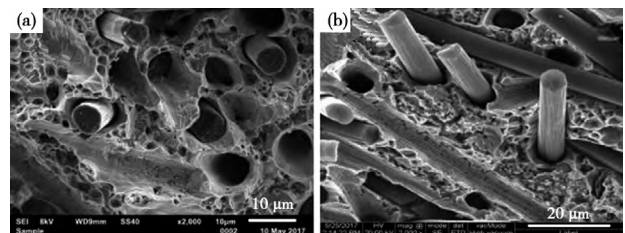


图 12 (a) Cf/Cu(Ni)和(b) Cf/Cu 复合材料的断口形貌

Fig. 12 Fracture morphologies of (a) Cf/Cu(Ni) and (b) Cf/Cu composites

也更加均匀。同时, Cf/Cu(Ni) 中 Cf 拔出长度明显小于 Cf/Cu 中 Cf 拔出长度。Ni 元素经过烧结溶于 Cu 基体后, 使得基体强度增加, 其抵抗均匀塑性变形的能力也得以提升。并且 Ni 元素强化了基体与碳纤维之间的结合强度^[11,19], 使得界面能够有效向纤维传递载荷, 避免了 Cf 在低应力状态下发生拔出、脱粘等破坏, 因此, Cf/Cu(Ni) 具有较高的强度和较大的塑性变形。

3 结论

(1) 在 5 V 下对短碳纤维进行镀 Ni 处理, 电镀 10 min 可获得厚度约为 1 μm 的均匀 Ni 镀层; 在 6 V、30 min 条件下再进行镀 Cu 处理, 可在 Ni 镀层外获得厚度约为 6 μm 的 Cu 镀层。

(2) 厚度约 1 μm 的镀镍碳纤维在拉伸变形过程中, Ni 镀层随碳纤维一起变形, 二者未出现剥层分离, 镀 Ni 复合丝的断裂强度略高于未经修饰的碳纤维, 断裂伸长率则略低于未经修饰的碳纤维。

(3) 在 800 °C、20 MPa 条件下, 将镀 Ni 后再镀 Cu 的短碳纤维及直接镀覆 6 μm 厚 Cu 镀层的短碳纤维利用 SPS 烧结 5 min, 制备 Cf/Cu(Ni) 和 Cf/Cu 两种复合材料。研究结果表明, 两种材料的组织均匀致密, Cf/Cu(Ni) 中的 Ni 经烧结后溶于 Cu 基体中, 其强度及延伸率均高于 Cf/Cu 复合材料; 两种复合材料的屈服强度分别为 160 MPa 和 145 MPa, 抗拉强度分别为 230 MPa 和 190 MPa。

参考文献

- 1 Bradley A Newcomb. Processing, structure, and properties of carbon fibers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91: 262.
- 2 朱和国, 张爱文. 复合材料原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 22.
- 3 Su Q Q, Li W W, Liu L, et al. Application and progress in development of the carbon fibre reinforced copper matrix composite[J]. Materials Review A: Review Papers, 2010, 24(3): 76 (in Chinese). 苏青青, 李薇薇, 刘磊, 等. 碳纤维增强铜基复合材料的最新研究进展和应用[J]. 材料导报: 综述篇, 2010, 24(3): 76.
- 4 Gao Q, Wu Y Y, Zhang G D, et al. Effect of carbon fiber on property of copper-graphite composite materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(s1): 97 (in Chinese). 高强, 吴渝英, 张国定, 等. 碳纤维对铜-石墨复合材料性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(s1): 97.
- 5 Shirvanimoghaddam K, Hamim S U, Akbari M K, et al. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 92: 70.
- 6 Ouyang W J, Jia J G, Ma Q, et al. Preparation and characterization of Cf/Cu composite based on copper-plating process of short carbon fibres[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(12): 2824 (in Chinese). 欧阳雯婧, 贾建刚, 马勤, 等. 基于短切碳纤维表面均匀包覆铜层工艺的 Cf/Cu 复合材料的制备与表征[J]. 复合材料学报, 2016, 33(12): 2824.
- 7 Zhu Z, Kuang X, Carotenuto G, et al. fabrication and properties of

- carbon fibre-reinforced copper composite by controlled three-step electrodeposition[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(4): 1061.
- 8 Liu L, Tang Y P, Zhao H J. Fabrication and properties of short carbon fibers reinforced copper matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(3): 974.
- 9 Wan Y Z, Wang Y L, Luo H L, et al. Effects of fiber volume fraction, hot pressing parameters and alloying elements on tensile strength of carbon fiber reinforced copper matrix composite prepared by continuous three-step electrodeposition[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 288(1): 26.
- 10 Lee S B, Matsunaga K, Ikuhara Y, et al. Effect of alloying elements on the interfacial bonding strength and electric conductivity of carbon nano-fiber reinforced Cu matrix composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 449-451(13): 778.
- 11 Inoue Y, Kim J H, Yonezawa S, et al. Enhanced mechanical strength of nickel-copper-coated carbon FIBER/Magnesium alloy composites fabricated using powder metallurgy[J]. Chemistry Letters, 2012, 41(5): 531.
- 12 Sorcoi L A, Constantinescu V R, Buharu M V, et al. Mechanical and technological properties of sintered Cu-Ni compacts[J]. Advanced Materials Research, 2007, 23: 75.
- 13 Han B H, Luo T J, Yao G C, et al. Nickel plating on carbon fiber [J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2006, 22(2): 37 (in Chinese). 韩变华, 罗天骄, 姚广春, 等. 碳纤维镀镍[J]. 有色矿冶, 2006, 22(2): 37.
- 14 Cheng T, Jia J G, Ma Q, et al. Deposition of homogeneous copper layer on short carbon fibers using electro-chemical method [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(9): 167 (in Chinese). 程韬, 贾建刚, 马勤, 等. 短碳纤维表面电沉积均匀镀铜工艺研究[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(9): 167.
- 15 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 碳纤维-单丝拉伸性能的测定: GB/T31290-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- 16 Yang Y F, Zhang X J, Tian Y H. Test methods for tensile properties of carbon fibers multifilament and mono-filament[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2013, 49(7): 441 (in Chinese). 杨延风, 张学军, 田艳红. 碳纤维复丝和单丝拉伸性能测试方法[J]. 理化检验-物理分册, 2013, 49(7): 441.
- 17 Hua Z S, Yao G C, Ma J, et al. XPS analysis of nickel layers on carbon fibers[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2011, 21(1): 165 (in Chinese). 华中胜, 姚广春, 马佳, 等. 碳纤维表面镀镍层的 XPS 分析[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(1): 165.
- 18 Hua Z S, Liu Y H, Yao G C, et al. Preparation and characterization of nickel-coated carbon fibers by electroplating[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(3): 324.
- 19 Wan Y Z, Wang Y L, Luo H L, et al. Relationship between elastic behavior and interfacial bonding strength for carbon fiber reinforced copper composites[J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19(3): 183.

(责任编辑 杨霞)