

CNTs 增强金属铜复合泡沫的制备工艺 及电磁屏蔽性能

汪从珍¹, 谢明², 易健宏¹, 刘意春¹

(1.昆明理工大学, 昆明 650093; 2.昆明贵金属研究所, 昆明 650106)

摘要: **目的** 金属铜泡沫是一种综合性能优良的电磁屏蔽材料, 采用碳纳米管 (CNTs) 对其进行复合, 拟进一步改善其电磁屏蔽性能。 **方法** 以三聚氰胺泡沫为模板, 采用化学镀和电沉积技术相结合的工艺, 制备 CNTs 增强金属铜泡沫。在对基底泡沫进行化学镀银实现导电化的基础上, 研究了电沉积时间、CNTs 含量以及后续热处理对复合泡沫形貌及镀层结构的影响。并采用矢量网络仪对 CNTs 增强金属铜复合泡沫的电磁屏蔽性能进行了测试。 **结果** 化学镀银采用 AgNO_3 质量浓度为 20 g/L、反应温度为 25 °C 的条件时, 银镀层较为均匀完整。复合泡沫的孔隙率随电沉积时间的增加而变小; CNTs 体积分数为 1.134% 的复合泡沫镀层致密连续, CNTs 分布较为均匀且无团聚现象。热处理后, 复合镀层微观表面更加平整致密。在 8.2~12.4 GHz 范围内, CNTs/Cu 复合泡沫的平均电磁屏蔽效能 SE 为 43.07 dB, 平均高出纯铜泡沫约 18.77 dB。 **结论** CNTs 均匀分散嵌入铜泡沫骨架的结构中, 对于吸收损耗和反射损耗都有明显的提升效果, 复合泡沫的总体电磁屏蔽性能得到显著提升。

关键词: 碳纳米管; 金属铜泡沫; 化学镀银; 电沉积; 电磁屏蔽性能

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0108-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.012

Preparation and Electromagnetic Shielding Performance of CNTs/Cu Composite Foams

WANG Cong-zhen¹, XIE Ming², YI Jian-hong¹, LIU Yi-chun¹

(1.Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2.Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

ABSTRACT: Metallic copper foam is a kind of electromagnetic shielding material of good overall performance. The addition of Carbon nanotubes (CNTs) into copper foams may improve the electromagnetic shielding performance. Copper foams reinforced by embedded CNTs with uniform dispersion were prepared through combination of electroless deposition and electrodeposition on melamine foam templates. The effects of electrodeposition time, CNTs content and subsequent heat treatments on the composite coating morphology were studied based on electric conduction through silver electroless deposition

收稿日期: 2019-09-02; 修订日期: 2019-10-29

Received: 2019-09-02; Revised: 2019-10-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51861014); 云南省基础 Research 计划 (2018FB084); 湖南省教育厅优秀青年项目 (14B042)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51861014), Applied Basic Research Foundation of Yunnan Province (2018FB084), the Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (14B042)

作者简介: 汪从珍 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: WANG Cong-zhen (1995—), Female, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 刘意春 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复合材料。邮箱: spsjtu@163.com

Corresponding author: LIU Yi-chun (1982—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: composite materials. E-mail: spsjtu@163.com

of base form. The electromagnetic shielding performance of CNTs/Cu composite foams were tested with vector network analyzer. With AgNO_3 concentration of 20 g/L and electroless deposition temperature of 25 °C, the silver layer was uniform and dense. The porosity of the composite foams reduced with increase of electro-deposition time. The composite foam plating was dense and continuous with CNTs content of 1.134 vol%. The CNTs were distributed uniformly without agglomeration. After heat treatments, the composite coating was smoother and denser. Within the range of 8.2~12.4 GHz, the average electromagnetic shielding SE of the CNTs/Cu composite foam was 43.07 dB, which was averagely 18.77 dB higher than that of the pure copper foam. The CNTs are uniformly embedded into the copper foam frame structure. It can significantly improve the absorption loss and reflection loss, and thus greatly improve the overall electromagnetic shielding performance of composite foams.

KEY WORDS: carbon nanotubes (CNTs); Cu foam; silver electroless deposition; electro-deposition; electromagnetic shielding performance

泡沫金属是近年来新兴起的一种新型多功能结构材料,因其兼具低密度、高比表面积、吸能抗震以及高电磁屏蔽等综合性能^[1-3],在汽车、航空航天、工业设备和建筑等领域具有广泛的应用前景^[4-6]。例如,铝和铜泡沫在商业上已成功用于减震器、热交换器、催化剂载体、过滤器和电磁屏蔽材料等^[7-9]。为优化金属泡沫的性能及拓宽其应用范围,通过往泡沫骨架中添加增强体以形成复合金属泡沫,是一种行之有效的办法^[10-12]。CNTs 本身具有优异的电磁波吸收性能和机械性能,适合作为金属泡沫骨架的复合增强体,有望能够有效提升金属泡沫的电磁屏蔽性能及力学性能^[13-15]。本文采用模板法,通过化学镀和电沉积相结合的方法,制备 CNTs 增强金属铜复合泡沫,并对其微观结构及电磁屏蔽性能进行表征及测试。预期这种复合泡沫具有良好的电磁屏蔽性能。

1 试验

1.1 材料

采用三聚氰胺泡沫(郑州耀迪化工产品有限公司)为原材料,模板尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。CNTs 分散液(成都有机化学公司)由 10% 的多壁 CNTs 组成,其平均长度为 2 μm ,内径为 5~20 nm,外径为 30~50 nm。其他试剂均为阿拉丁销售的分析纯试剂,未经特殊处理。

1.2 模板表面化学镀银

化学镀银溶液是由银氨溶液和还原性溶液两种组分组成,为了控制模板表面的银层结构,温度和银氨溶液的浓度是两个重要因素。银氨溶液的配制过程为:将氨水逐滴加入到 20 g/L 的 AgNO_3 溶液中直到沉淀物完全溶解,此时溶液刚好完全澄清。还原性组分配制成 100 g/L 的葡萄糖溶液。试验时,将三聚氰胺模板浸泡在银氨溶液中 5 min,然后将烧杯放入温度设置为 25 °C 的水浴锅中,温控精度为 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$,缓慢加入还原性溶液反应 10 min 后,立即取出泡沫^[16]。镀覆完成后用去离子水反复冲洗,60 °C 真空干燥 4 h,

取出后备用。

1.3 银层表面电沉积 CNTs/Cu 复合镀层

复合镀液的组成为: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 200 g/L, H_2SO_4 60 g/L,分散剂 0.03 g/L,表面活性剂 0.2 g/L, CNTs 分散剂含量不一。镀液加热至 25 °C,将化学镀银后的泡沫作为阴极,99.98% 的铜板作为阳极,设定名义阴极电流密度为 2 A/dm^2 (由于阴极为多孔泡沫,其实际阴极表面积难以确定,本文定义名义阴极电流密度为:电流密度/阴极的外形尺寸所计算的面积),经不同时间的电沉积之后,将试样洗净,并真空干燥,得到金属铜复合泡沫试样。

1.4 热处理

复合泡沫的热处理分为三个阶段:阶段一为三聚氰胺模板的去除,即采取一定的程序(升温速率 5 °C/min,热解温度 650 °C,保温时间 150 min,炉冷),升温使三聚氰胺在高温中被分解,以 N_2 及氢化物等形式挥发。阶段二为去除氧化铜(相同的升温速率和保温时间下,还原温度为 450 °C,气氛为 $\text{H}_2 : \text{N}_2 = 1 : 19$)。阶段三为退火处理(相同的升温速率和气氛下,退火温度 750 °C,保温时间 60 min)。

1.5 测试方法

主要对复合泡沫的微观结构、物相、CNTs 含量、CNTs 的完整度、电磁屏蔽性能等进行了表征和测试。

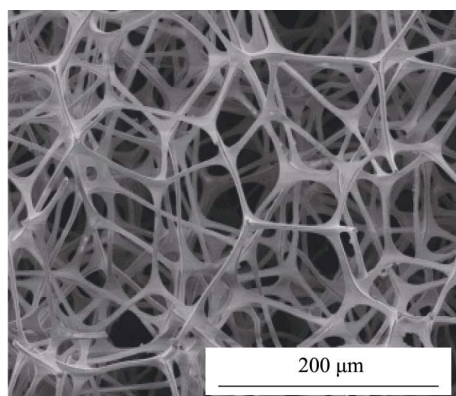
采用 FEI Nova Nano-450 型扫描电镜对化学镀银后的银层结构、电沉积后 CNTs/Cu 复合镀层的形貌、CNTs 在铜层表面的分布状态以及热处理之后镀层表面形貌的变化进行观察。采用 FJ-2000 型 X 射线衍射仪分析 CNTs/Cu 复合泡沫的物相组成,角度范围 10°~80°,扫描步长 5 (°)/min。采用 SDF2-HCS878 型碳硫分析仪测试复合泡沫中 CNTs 含量。采用 LabRam HR Evolution 型拉曼光谱仪测试复合泡沫中 CNTs 结构的完整度,扫描的波长范围为 500~2000 nm,激光探针的波长为 532 nm。通过 Agilent Key-sight E5071C ENA 型矢量网络仪对复合泡沫进行电磁屏蔽测试,试样裁剪成尺寸为 22.9 mm \times 10.2 mm \times 3 mm 的长方

体, 测试频率范围为 8.2~12.4 GHz。

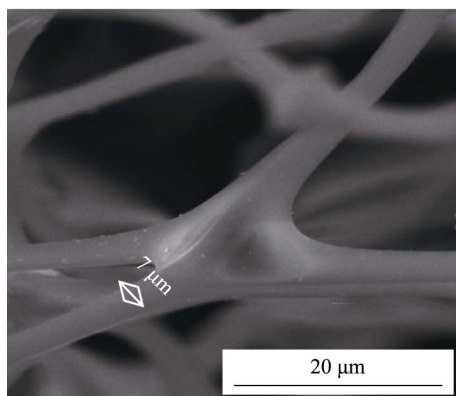
2 结果与分析

2.1 化学镀对银层结构的影响

三聚氰胺泡沫模板的扫描电镜图片如图 1 所示, 从低倍数下的形貌图中可以看到, 三聚氰胺泡沫是完全的开孔结构, 且具有很高的孔隙率(如图 1a 所示)。从泡沫的丝径形貌(如图 1b 所示)可以看出, 丝径的表面很光滑, 这有利于形成连续且较薄的镀层。



a 低倍微观形貌



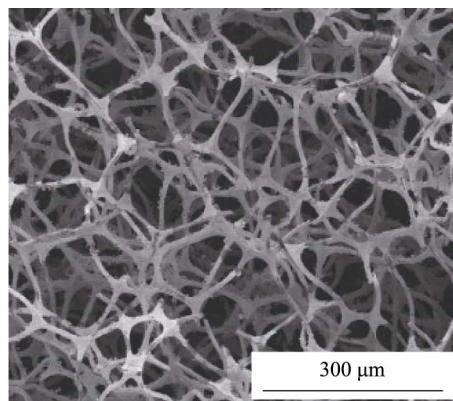
b 丝径表面形貌

图 1 三聚氰胺泡沫的扫描电镜图

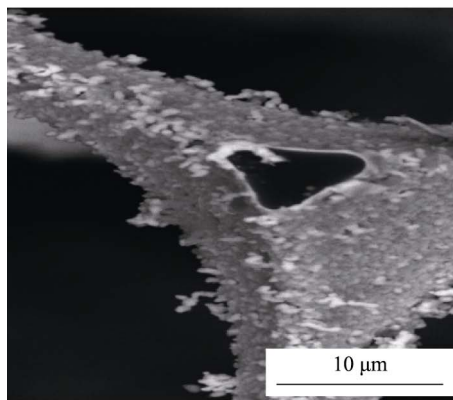
Fig.1 SEM images of melamine foam: a) low power micromorphology; b) surface morphology of wire diameter

虽然化学镀较简单就能得到银膜, 但是 AgNO_3 浓度和反应温度对银膜的形成影响较大。当反应物浓度过大和反应温度过高时, 反应的驱动力就会很大^[17], 不能形成细小银颗粒组成的均匀连续的银膜。并且 AgNO_3 浓度过高, 银的活性强, 导致 AgNO_3 溶液自分解, 而这些分解产物粘附在银层上, 这不利于后期的电镀形成致密均匀的铜层。而 AgNO_3 浓度过小和反应温度过低时, 由于三聚氰胺泡沫的孔径尺寸非常小, 进入三维结构中的银源较少, 可能导致银层的形成不可能一次性完成, 最终会出现镀层不连续的现象。因此本文选取的 AgNO_3 质量浓度为 20 g/L, 温度为 25 °C^[16]。

图 2 为化学镀银后所得的镀层结构。图 2a 为低倍下的微观形貌, 可以看到三聚氰胺泡沫的丝径上形成了连续的银层。图 2b 为高倍下的丝径表面形貌, 丝径表面的颗粒相互连接形成了银膜, 且均匀分布在泡沫的丝径周围, 银颗粒之间结合比较紧密, 且银膜厚度均匀。



a 泡沫的低倍微观形貌



b 高倍下的丝径形貌

图 2 化学镀银后的镀层结构

Fig.2 Plating structure after electroless silver plating:

- a) low density micromorphology of foam;
b) morphology of wire diameter at high power

2.2 时间对电沉积 CNTs/Cu 复合镀层的影响

图 3 为不同的电沉积时间下复合泡沫的微观形貌。图 3a 为电沉积时间为 6 h 的复合镀层的扫描电镜图片。可以看出, 复合镀层表面的微观形貌出现了不连续现象, 可能会导致在后续去除模板时, CNTs/Cu 复合泡沫骨架坍塌, 不能形成完整的三维结构。图 3b 为 7 h 电沉积时间下的微观形貌图, 可以看出镀层连续且均匀。图 3c 是电沉积时间为 8 h 的复合镀层的微观形貌, 可以看到其孔隙率明显低于 6 h 和 7 h 的复合泡沫, 得到的复合镀层很厚。因而本文采用沉积时间为 7 h 的复合泡沫做后续的检测。

2.3 不同 CNTs 含量对复合镀层的影响

在电沉积时间为 7 h 不变的条件下, 通过改变镀液中 CNTs 的掺入量, 来改变镀层中 CNTs 的含量。图 4

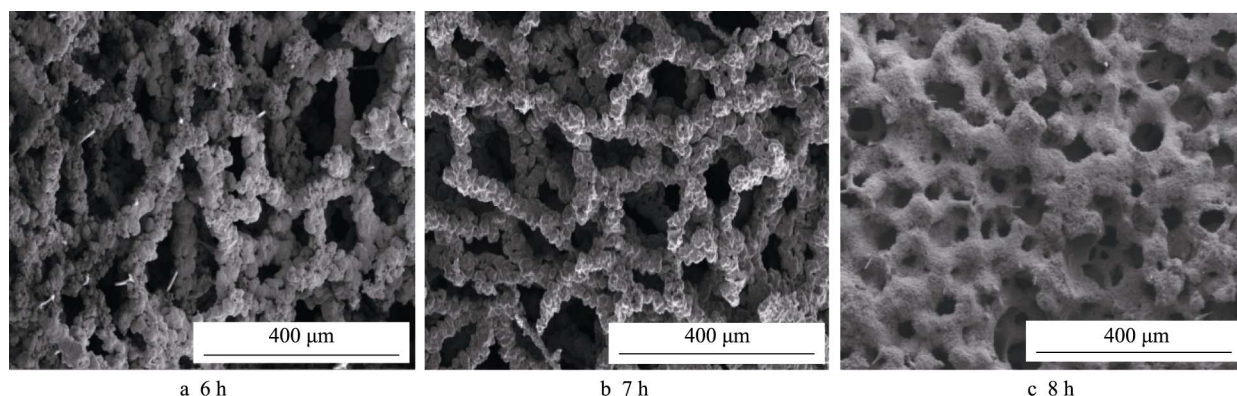


图 3 不同电沉积时间下泡沫的微观形貌

Fig.3 SEM images of foams under different electrodeposition time

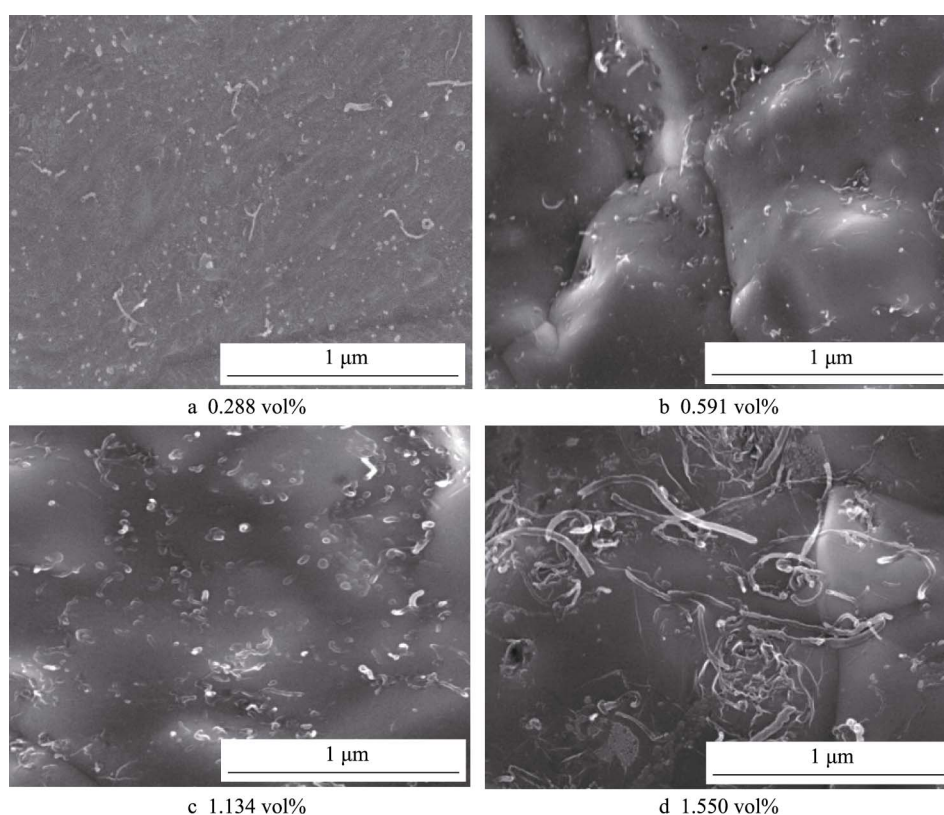


图 4 不同 CNT 含量的复合镀层表面扫描图

Fig.4 SEM images of composite coating surface of different CNTs contents

是复合泡沫中 CNTs 体积分数分别为 0.288%、0.591%、1.134%、1.550% 所对应样品的复合镀层表面形貌。当 CNTs 含量低于 1.134% 时, CNTs 在铜基体中呈嵌入状态, 分散均匀且没有发现明显的团聚现象。嵌入式 CNTs 有利于机械性能的提高, 使复合泡沫不容易被破坏。当镀层中 CNTs 含量达到 1.550% 时, CNTs 在镀层表面分布不均匀并且相互缠绕 (如图 4d 所示)。CNTs 复合电沉积过程符合 Guglielmi 的两步吸附原理: 第一步是 CNTs 在电沉积过程中受到负离子范德华力的作用, 弱吸附到含有银层的泡沫上。第二步是 CNTs 在库仑力的作用下, 强吸附到铜基体表面, 并被同时沉积的 Cu^{2+} 逐渐覆盖在铜层中^[18]。CNTs 的吸

附和脱离在达到动态平衡之前, CNTs 的吸附速率随着加入 CNTs 的浓度的增加而增加。当进一步提高复合镀液中的 CNTs 浓度时, CNTs 容易发生团聚, 因 CNTs 团聚体所需要的吸附力较大, 难以在镀层中形成紧密吸附, 因而镀层呈现一定程度的疏松形貌 (如图 4d 所示)。

2.4 热处理对复合镀层的影响

选择 CNTs 含量为 1.134% 的复合泡沫进行后续检测。图 5 为电镀 7 h 的 CNTs/Cu 复合泡沫热处理前后的形貌图, 由图 5a 和 5b 可以看出, 电沉积后未处理的 CNTs/Cu 复合泡沫表面比较粗糙且不平整, 镀

层呈疏松且颗粒粗大形貌。原因可能是化学镀之后的银层不完全平整,且在电沉积过程中电场不均匀导致尖端放电现象,加之电沉积过程中的镀层以岛状生长模式为主,从而使镀层表面形貌呈现粗糙不平的状

态。由图 5c 和 5d 可以看出,经过热处理之后, CNTs/Cu 复合泡沫表面变得致密光滑。这可能是因为高温热处理作用下,镀层颗粒发生再次结晶和重组,使镀层表面粗糙程度发生改变。

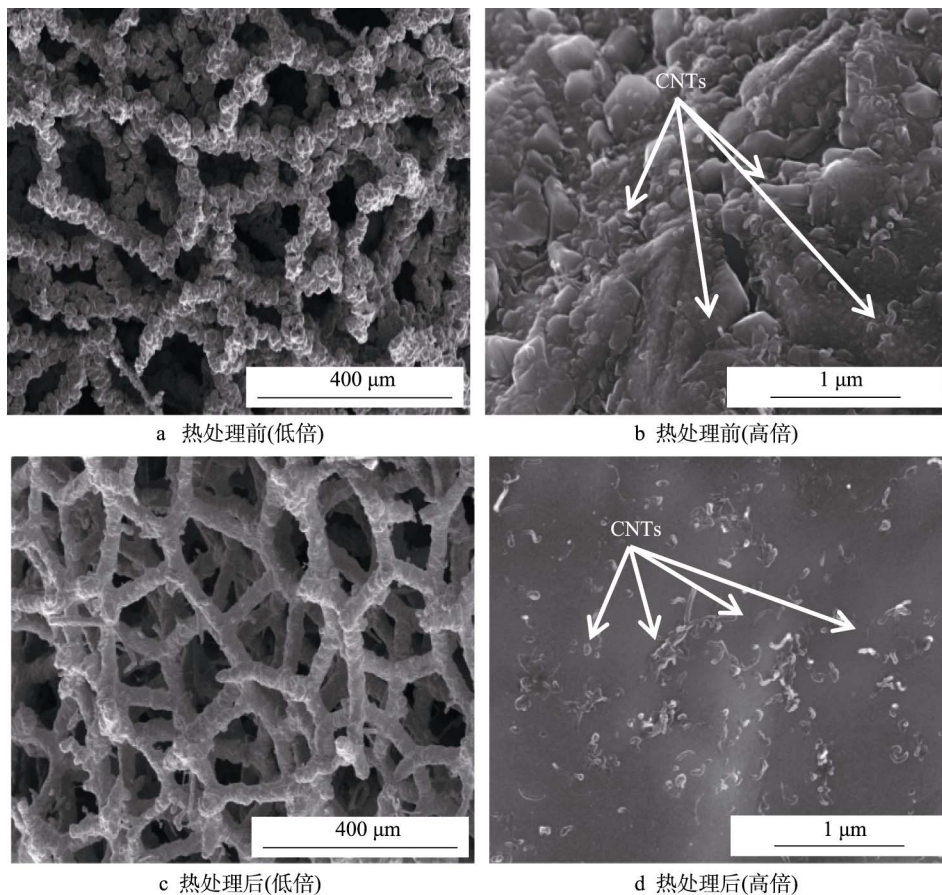


图 5 电镀 7 h 的 CNTs/Cu 复合泡沫热处理前后的扫描图

Fig.5 SEM observation of CNTs/Cu composite foams before and after 7 h of heat treatment: a) before heat treatment (low power); b) before heat treatment (high power); c) after heat treatment (low power); d) after heat treatment (high power)

2.5 CNTs/Cu 镀层的结构分析

Cu 泡沫和 CNTs/Cu 复合泡沫的 XRD 图谱如图 6a 所示。这三个衍射峰是 FCC 结构的 Cu 峰的(111)、(200)、(220)面。在 XRD 检测中没有检测到 CNTs 的衍射峰,是因为通过碳硫分析仪检测其 C 含量很低(1.134%)。同时也没有检测到银峰,是因为在化学镀过程中,表面只形成一层薄薄的银膜,银的含量很少。通常,电沉积铜的晶粒取向会影响复合材料的性能。晶粒取向可以通过(111)面与(200)面峰的强度比来确定。在本研究中,未检测到取向的显著变化。

原始 CNTs 和热处理后的 CNTs/Cu 复合泡沫的拉曼光谱如图 6b 所示。D 峰(1355.7 cm^{-1})和 G 峰(1587.22 cm^{-1})分别表示 CNTs 结构中的不完全程度和 CNTs 结构中碳原子 sp^2 的结合模式。D 峰与 G 峰的比率表示 CNTs 结构的完整性。如图 6b 所示,两条曲线的 I_D/I_G 比率彼此非常接近,表明在热处理期间, CNTs 的结构几乎没有受到破坏^[19]。

2.6 CNTs 对 Cu 泡沫电磁屏蔽性能的影响

电镀 7 h 后的 Cu 泡沫和 CNTs/Cu 复合泡沫的电磁屏蔽性能如图 7 所示。CNTs/Cu 复合泡沫和 Cu 泡沫的平均屏蔽效能(SE)分别约为 43.07 dB 和 24.30 dB。与纯铜泡沫相比, CNTs/Cu 复合泡沫的电磁屏蔽性能得到显著提高。文献[20]报道的 Cu 泡沫、CNTs 电沉积 Cu 复合泡沫的 SE 分别在 11~27、21.5~33.5 dB 之间,文献[21]报道的一种多层蜂窝夹层材料的 SE 在 10~25 dB 之间。相对而言,本研究采用化学镀、电沉积所制备的复合泡沫的电磁屏蔽效应更为明显。从图 7 中可见,复合泡沫的吸收损耗和反射损耗都高于纯铜泡沫。可以推断, CNTs 呈均匀分散嵌入骨架的状态有助于提升其电磁屏蔽性能,其可能的机制有: 1) 金属与 CNTs 之间的共轭体系相互作用,使自由电子的数目提高,提高了复合泡沫的导电性,从而改善其电磁屏蔽性能。2) CNTs 本身是一种吸波性能优异的材料,可以提升复合泡沫的吸收损耗。3)

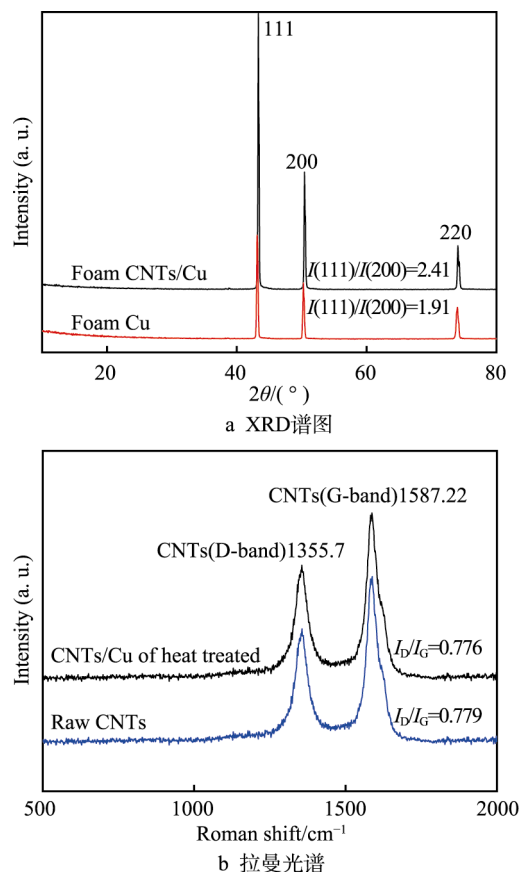


图 6 CNTs/Cu 泡沫和 Cu 泡沫的结构分析图
Fig.6 Structural analysis of CNTs/Cu foam and Cu foam:
a) XRD; b) Raman spectra

电磁波在开孔复合泡沫之间发生多重反射和多重吸收,可进一步提高其电磁屏蔽性能。

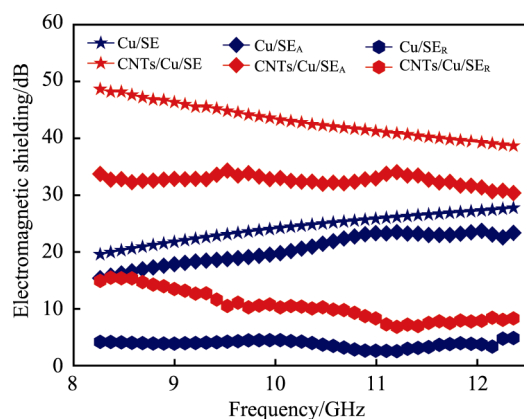


图 7 Cu 泡沫和 CNTs/Cu 复合泡沫在不同频率下的电磁屏蔽、吸收损耗和反射损失
Fig.7 SE, SE_A, and SE_R of the Cu foams and CNTs/Cu foams at different frequency

3 结论

化学镀银时,当硝酸银质量浓度为 20 g/L 和反应温度为 25 ℃时,形成了连续均匀的银膜。当电沉积时间为 7 h 和 CNTs 含量为 1.134%时,获得了均匀的

复合镀层。CNTs 镶嵌在铜基体中,分散均匀且无团聚现象。经热处理后,复合镀层表面更加光滑致密,CNTs 的分散性得以保留,且结构没有发生明显破坏。CNTs 均匀分散嵌入铜泡沫骨架的结构,对于吸收损耗和反射损耗都有明显的提升效果,因而复合泡沫的总体电磁屏蔽性能得到显著提升。

参考文献:

- [1] 赵亮, 田洋, 张丰华, 等. 开孔泡沫金属散热性能实验研究[J]. 航空计算技术, 2018, 48(5): 221-223.
ZHAO Liang, TIAN Feng, ZHANG Feng-hua, et al. Experimental study on heat dissipation performance of open cell foam metal[J]. Aeronautical computing technology, 2018, 48(5): 221-223.
- [2] 吴进, 贾芬, 王蒙蒙, 等. 泡沫金属的制备工艺及应用[J]. 精密成形工程, 2011, 3(3): 62-65.
WU Jin, JIA Fen, WANG Meng-meng, et al. Preparation process and application of foam metal[J]. Precision forming engineering, 2011, 3(3): 62-65.
- [3] 张健, 赵桂平, 卢天健. 泡沫金属在冲击载荷下的能量吸收特性[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11): 105-112.
ZHANG Jian, ZHAO Gui-ping, LU Tian-jian. Energy absorption characteristics of foam metal under impact load [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(11): 105-112.
- [4] 黄福祥, 金吉琰, 范嗣元, 等. 发泡金属的电磁屏蔽性能研究[J]. 功能材料, 1996, 27(2): 147-149.
HUANG Fu-xiang, JIN Ji-yan, FAN Si-yuan, et al. Study on electromagnetic shielding properties of foamed metal [J]. Functional materials, 1996, 27(2): 147-149.
- [5] ASHBY M F, EVANS A, FLECK N A, et al. Metal foams: A design guide[J]. Applied mechanics reviews, 2012, 23: 119.
- [6] WEAIRE D, PHELAN R. The physics of foam[J]. Journal of physics condensed matter, 1999, 8: 9519-9524.
- [7] 秦江涛. 金属泡沫填充式电子器件散热器换热特性实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
QIN Jiang-tao. Experimental study on heat transfer characteristics of metal foam filled electronic device heat sink[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [8] KIM S, LEE C W. A review on manufacturing and application of open-cell metal foam[J]. Procedia materials science, 2014, 4: 305-309.
- [9] ODABAE M, HOOMAN K. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a tube bank[J]. Applied thermal engineering, 2012, 36: 456-463.
- [10] HAN X H, WANG Q, PARK Y G, et al. A review of metal foam and metal matrix composites for heat exchangers and heat sinks[J]. Heat transfer engineering, 2012, 33(12): 991-1009.

(下转第 139 页)

- deposited on different substrates[J]. Surface and coatings technology, 2013, 235: 552-560.
- [16] 朱丽娟, 朱圣龙, 王福会. 偏压和氮气流量对 Ni+CrAlYSiN 纳米复合涂层性能的影响[J]. 材料研究学报, 2013, 27(1): 53-59.
ZHU Li-juan, ZHU Sheng-long, WANG Fu-hui. Effects of bias voltage and nitrogen flow rate on the properties of Ni+CrAlYSiN nanocomposite coatings[J]. Journal of materials research, 2013, 27(1): 53-59.
- [17] 贺春林, 高建君, 王苓飞, 等. N₂ 流量对反应共溅 TiN/Ni 纳米复合膜结构和结合强度的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(6): 2038-2041.
HE Chun-lin, GAO Jian-jun, WANG Ling-fei, et al. Effect of N₂ flow rate on structure and bond strength of reaction co-splashed TiN/Ni nanocomposite films[J]. Materials review, 2018, 32(6): 2038-2041.
- [18] 张以忱. 真空镀膜技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
ZHANG Yi-chen. Vacuum coating technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [19] VINAYAK S, VYAS H P, VANKAR V D. Microstructure and electrical characteristics of Ni-Cr thin films[J]. Thin solid films, 2007, 515: 7109-7116.
- [20] HOWSON M A. Incipient localisation and electron-electron correlation effects in metallic glass alloys[J]. Journal of physics F: Metal physics, 1984, 14: 25-31.
- [21] SONDHEIMER E H. The mean free path of electrons in metals[J]. Advances in physics, 1952, 1: 1-42.
- [22] 杨芳儿, 陈占领, 郑晓华, 等. 沉积气压对脉冲激光沉积 CN_x 薄膜结构和摩擦学特性的影响[J]. 光电子·激光, 2013, 24(6): 1126-1132.
YANG Fang-er, CHEN Zhan-ling, ZHENG Xiao-hua, et al. Effect of deposition pressure on structure and tribological properties of CN_x films deposited by pulsed laser[J]. Photoelectron laser, 2013, 24(6): 1126-1132.
- [23] ASL A M, KAMELI P, RANJBAR M, et al. Correlations between microstructure and hydrophobicity properties of pulsed laser deposited diamond-like carbon[J]. Superlattices & microstructures, 2015, 81: 64-79.
- [24] CHHOWALLA M, FERRARI A, ROBERTSON J, et al. Evolution of sp² bonding with deposition temperature in tetrahedral amorphous carbon studied by Raman spectroscopy[J]. Appl phys lett, 2000, 76: 1419.
- [25] KHOJIER K, SAVALONI H, ZOLGHADR S, et al. Study of electrical, mechanical, and tribological properties of CrN_x thin films as a Function of sputtering conditions[J]. Journal of materials engineering and performance, 2014, 23(10): 3444-3448.

(上接第 113 页)

- [11] ISABEL D, FERREIRA J. Composite and nanocomposite metal foams[J]. Materials, 2016, 9(2): 34-79.
- [12] JI K, ZHAO H, ZHANG J, et al. Fabrication and electromagnetic interference shielding performance of open-cell foam of a Cu-Ni alloy integrated with CNTs[J]. Applied surface science, 2014, 311: 351-356.
- [13] JI K, ZHAO H, HUANG Z, et al. Performance of open-cell foam of Cu-Ni alloy integrated with graphene as a shield against electromagnetic interference[J]. Materials-letters, 2014, 122: 244-247.
- [14] KARTAL M, UYSAL M, GUL H, et al. Pulse electrodeposition of Ni/MWCNT nanocomposite coatings[J]. Surface engineering, 2015, 31: 659-665.
- [15] 赵琪, 马俊宾, 谢明, 等. 复合金属包覆碳纳米管的制备及电磁屏蔽性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(1): 249-253.
ZHAO Qi, MA Jun-bin, XIE Ming, et al. Preparation and electromagnetic shielding properties of composite metal-coated carbon nanotubes[J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(1): 249-253.
- [16] 姜斌. 超轻泡沫金属的简易高效制备及其性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
JIANG Bin. Simple and efficient preparation of ultra-light foam metal and its performance study[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [17] 李嘉. 自制装置探究浓度与温度对化学反应速率的影响[J]. 化学教育, 2017(15): 57-59.
LI Jia. Self-made device to explore the effect of concentration and temperature on the rate of chemical reaction[J]. Chemistry education, 2017(15): 57-59.
- [18] 李卫东, 胡进, 左正忠, 等. 有关复合电沉积机理研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 2000, 46(6): 695-700.
LI Wei-dong, HU Jin, ZUO Zheng-zhong, et al. Study on the mechanism of composite electrodeposition[J]. Journal of Wuhan University (Science edition), 2000, 46(6): 695-700.
- [19] WANG C Z, GAN X P, TAO J M, et al. Compression and electromagnetic shielding properties of CNTs reinforced copper foams prepared through electrodeposition[J]. Vacuum, 2019, 167: 159-162.
- [20] 赵慧慧. 泡沫型电磁屏蔽复合材料的制备及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
ZHAO Hui-hui. Preparation and properties of foam electromagnetic shielding composites[D]. Nanjing: Nanjing Aerospace University, 2014.
- [21] GHOSH P, CHAKRABARTI A. Conducting carbon black filled EPDM vulcanizates: Assessment of dependence of physical and mechanical properties and conducting character on variation of filler loading[J]. European polymer journal, 2000, 36: 1043-1054.