

碳纳米管增强铜基复合材料的制备、力学性能及电导率

周 川, 路 新, 贾成厂, 刘博文

(北京科技大学, 北京 100083)

摘 要: 以 CNTs、电解 Cu 粉、 $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为原料, 采用混酸处理、分子水平法结合行星球磨两步混合工艺制备含 0.5%~2% (质量分数) CNTs 的 Cu 基复合粉末, 然后通过放电等离子烧结技术制备了 Cu-CNTs 复合材料, 探讨了制备工艺及 CNTs 含量对 Cu-CNTs 复合材料的组织、电导率和力学性能的影响规律。结果表明: 当 CNTs 含量小于 1.0% 时, 采用两步混粉工艺制备的 Cu-CNTs 复合粉体均匀性、分散性良好, 经烧结后可获得致密度高、CNTs 分布均匀的 Cu-CNTs 复合材料; 当 CNTs 含量大于 1.0% 时, 复合材料的致密度及 CNTs 分布均匀性明显降低; 随 CNTs 含量的提高, 复合材料的强度先升高后降低, 塑性和电导率趋于降低; 相对高能球磨、分子水平法等单一混粉工艺而言, 两步法制备的 Cu-1.0% CNTs 复合材料综合性能更优, 其电导率为 51.7 MS/m (89.1% IACS), 维氏硬度为 1130 MPa, 抗拉强度为 279 MPa, 断后伸长率为 9.8%。

关键词: 铜基复合材料; 碳纳米管; 两步混粉; 力学性能; 电导率

中图分类号: TG146.1⁺1; TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)04-1249-07

铜具有极高的导电性能, 广泛应用于电子电工、航天航空、国防军事等领域。但随着现代工业的发展, 对其性能提出了更高的要求。如何在保持铜高的电导率情况下, 大幅提升其力学性能已成为铜材料研究领域的重要问题。目前通过合金化制备的铜合金以及添加 Al_2O_3 、SiC 等陶瓷颗粒增强的铜基复合材料可以显著提高铜的力学性能, 但与此同时却严重降低了基体的电导率^[1,2]。CNTs 独特的结构, 使其具有极高的强度 (抗拉强度约为高强钢的 100 倍) 和优异的导电性能, 成为当前复合材料研究的重要领域^[3,4]。近年来, 许多研究表明将 CNTs 作为增强相加入到金属基体、非金属基体和聚合物中, 增强效果显著, 且与传统复合材料相比已表现出明显的优势^[5-7]。

然而, 在 Cu-CNTs 复合材料的研究过程中也发现诸多问题, 比如 CNTs 与 Cu 基体之间界面结合差、CNTs 空间分布难以控制、CNTs 本身载流量高而电导率相对较低等, 导致 Cu-CNTs 复合材料难以同时兼顾电学性能和力学性能^[8]。为了改善 Cu 与 CNTs 之间的界面结合, 需要对 CNTs 表面进行处理, 目前常用的方法包括化学镀、混酸处理^[9-11]。化学镀可提高 Cu 与 CNTs 之间的界面结合强度, 但化学镀工艺复杂, 周期

长, 成本高^[9]。而混酸处理通过在 CNTs 表面接入的含 O 官能团能够提高 CNTs 与 Cu 基体之间的界面结合, 且工艺简单^[10,11]。为了改善 CNTs 在 Cu 基体中的分布, 目前常用的复合粉体制备方法包括分子水平法、高能球磨等^[12-15]。分子水平法可获得均匀性良好的复合粉体, 但是粉体容易出现氧化, 且成本高^[12,13]。单纯的高能球磨工艺简单, 但对粉体结构破坏严重, 且难以得到分布均匀的复合粉体^[14,15]。Daoush^[9]等采用化学镀制备了 Cu-15vol% CNTs 复合粉体, 然后采用放电等离子烧结 (SPS) 技术制备了 Cu-15vol% CNTs 复合材料, 其抗拉强度为 341.2 MPa, 电导率为 73% IACS; Xue^[12]等采用分子水平法制备了 Cu-5vol% CNTs 复合粉体, 然后通过 SPS 烧结技术制备得到的 Cu-5vol% CNTs 复合材料的抗拉强度为 380 MPa, 断后伸长率为 1.2%。聂俊辉^[16]等采用高能球磨工艺结合 SPS 烧结技术制备了 Cu-1.0% CNTs (质量分数) 复合材料, 其抗拉强度为 225 MPa, 电导率为 71% IACS。现有的研究报道表明采用以上不同工艺所制备的复合材料可显著提升基体的力学性能, 但与此同时电导率也出现了明显下降。这是因为基体中 CNTs 的分布难以控制, 且部分工艺对 CNTs 结构破坏严重。为此, 本研究提出采用混酸

收稿日期: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51471023)

作者简介: 周 川, 男, 1990 年生, 硕士, 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083, 电话: 010-82377286, E-mail: zhouch_0910@163.com

预处理 CNTs, 随后采用分子水平法结合行星球磨两步混合工艺制备了 Cu-CNTs 复合粉体, 并以其为原料采用放电等离子烧结工艺制备了 Cu-CNTs 复合材料, 目前鲜见相关研究报道。

本研究以 CNTs、电解 Cu 粉、 $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为原料, 采用混酸 (H_2SO_4 、 HNO_3) 处理、分子水平法结合行星球磨工艺制备 Cu-CNTs 复合粉末, 然后采用放电等离子烧结技术制备 Cu-CNTs 复合材料, 探讨制备工艺及 CNTs 含量对 Cu-CNTs 复合材料的组织、电导率和力学性能的影响规律。

1 实验

实验以多壁 CNTs、电解 Cu 粉、 $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (一水合乙酸铜) 为原料, 其中多壁 CNTs 外径为 20~30 nm, 长度为 20~30 μm , 纯度大于 97%, 电解 Cu 粉的平均粒径约为 45 μm , 纯度大于 99.8%。

将 1 g CNTs 置入 120 mL 配置好的 H_2SO_4 (97%) 和 HNO_3 (61%) 的混酸溶液 (H_2SO_4 和 HNO_3 的体积比为 3:1) 中, 在 50 $^\circ\text{C}$ 下超声处理 6 h, 待冷却后用去离子水洗涤至 pH 值为 7, 干燥得到预处理的 CNTs。将预处理的 1 g CNTs 超声分散在去离子水中得到 CNTs 悬浮液, 并分别将 3.14 g $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 1.26 g NaOH 溶于去离子水中, 随后将 $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液和 NaOH 溶液加入到 CNTs 悬浮液中, 加热到 80 $^\circ\text{C}$ 后经过滤、干燥得到 CuO-CNTs 复合粉体。之后将其放入管式炉中在高纯 H_2 气氛下进行 280 $^\circ\text{C}/2$ h 还原处理, 随炉冷却至室温即可得到 Cu-10%CNTs (质量分数, 下同) 复合粉末。采用行星式球磨机将制备的 Cu-10%CNTs 复合粉末与电解 Cu 粉进行机械球磨混合, 转速为 200 r/min, 球料比为 10:1 (不锈钢球, 磨球直径为 10 mm), 时间为 2 h, 无水乙醇作为过程控制剂。球磨完毕后, 取出湿粉放入真空干燥箱中抽真空至 0.1 Pa 以下进行室温干燥, 最终得到 CNTs 含量分别为 0.5%~2.0% 的 Cu-CNTs 复合粉末。

以制备 Cu-CNTs 复合粉末为原料, 采用放电等离子烧结工艺合成了 Cu-CNTs 复合材料。烧结工艺为: 以 100 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率由室温升至 850 $^\circ\text{C}$, 然后在该温度下保温 (5 min) 后随炉冷却, 外加轴向压力为 40 MPa, 得到 $\Phi 30$ mm \times 5 mm 的 Cu-(0.5%~2.0%)CNTs 复合材料烧结体。

为了研究不同混合制粉工艺对 Cu-CNTs 复合粉体的影响, 本实验另采用了分子水平法及行星球磨法 2 种单一混粉方式分别制得的 Cu-CNTs 复合粉体, 其工艺过程及参数均与上述两步法中提及的一致。

采用 NEXUS-670 型傅里叶变换红外光谱仪对混

酸处理前后的 CNTs 进行红外分析; 利用 Archimedes 排水法测量各烧结体的密度; 利用 Qutanta FEG 450 型热场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察粉末形貌、组织形貌及试样拉伸断口形貌。采用 WOLPERT 430SVD 型维氏显微硬度计测定样品的维氏显微硬度, 测试载荷为 25 N, 加载时间为 15 s, 沿某一方向测量 10 点取其平均值。采用电火花线切割机将制备的烧结体切成测试试样, 其中工字型拉伸试样的测试区尺寸为 15 mm \times 3 mm \times 3 mm, 导电试样尺寸为 1.0 mm \times 1.0 mm \times 20 mm, 试样表面采用 SiC 砂纸进行磨光处理。拉伸实验在室温下 REGER-3010 力学拉伸试验机上进行, 加载速率为 0.5 mm \cdot min $^{-1}$ 。室温下采用 TH2513/A 型直流低电阻测试仪测定导电试样的电导率。

2 结果与讨论

2.1 CNTs 的形貌、结构分析

图 1 为混酸处理前后的 CNTs 收缩振动吸收峰图谱。通过对比观察可以看出, 混酸处理后的 CNTs 不仅在 1570 cm^{-1} 处出现了 C=C 收缩振动吸收峰, 在 1713 cm^{-1} 处也出现了 C=O 收缩振动吸收峰, 且在 3434 cm^{-1} 处的峰强高于未经混酸处理的 CNTs 在该处的峰强, 这表明本研究采用的混酸处理工艺能够使 CNTs 表面成功引入 -COOH、-OH 等含 O 官能团, 这有利于提高其在溶液中的分散能力, 以及 CNTs 与 Cu 基体之间的界面结合^[10]。

2.2 Cu-CNTs 复合粉末的形貌分析

图 2 为不同方法制备的 Cu-1.0%CNTs 复合粉末形貌。从图 2a 中可以看出, 分子水平法制备的 Cu-1.0%CNTs 复合粉末粒度较小, 部分粉体表面出现了氧化。图 2b 为采用行星球磨得到的 Cu-1.0%CNTs 复合粉末, CNTs 团聚现象十分明显。如图 2c、2d 所示,

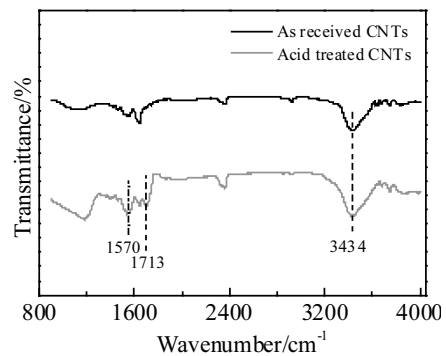


图 1 混酸处理前后 CNTs 的傅里叶变换红外光谱

Fig.1 FT-IR spectra of CNTs before and after mixed acid treatment

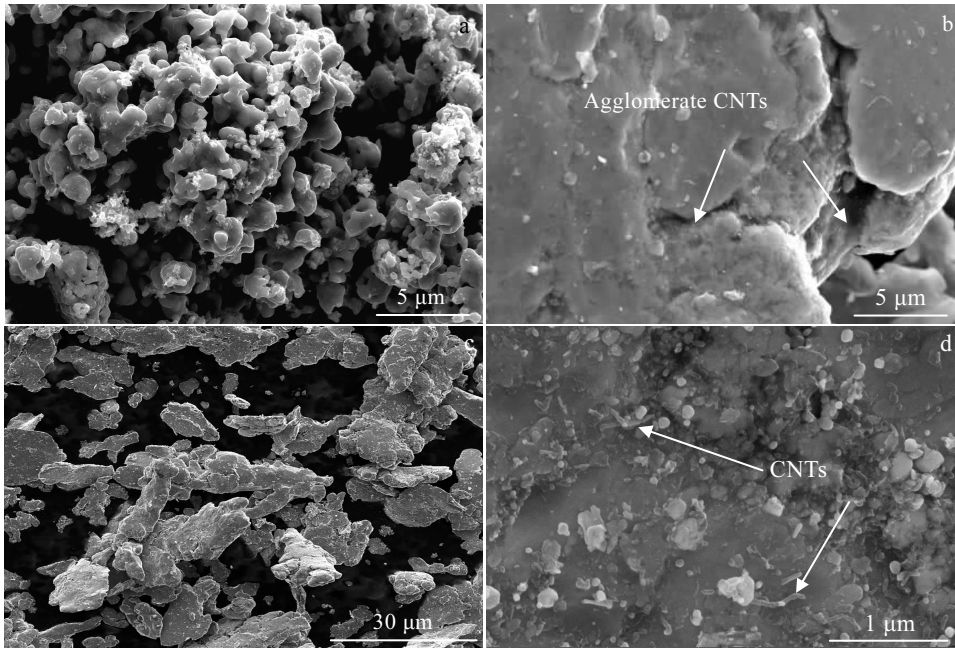


图 2 Cu-1.0%CNTs 复合粉末的 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of Cu-1.0%CNTs composite powders processed by molecular-level mixing (a), planetary milling (b), and two-step mixing (c, d)

经两步混合工艺制备的 Cu-1.0%CNTs 复合粉末, CNTs 和 Cu 粉被均匀的混合在一起, Cu 粉表面分布单根的 CNTs。可见, 行星球磨之前的分子水平法有利于制备出分散性、均匀性、CNT 结构均保持良好的复合粉末。

2.3 Cu-CNTs 复合材料的致密度、硬度

以两步混粉法制备的 Cu-CNTs 复合粉末为原料, 采用 SPS 烧结制备了 Cu-CNTs 复合材料。图 3 为 CNTs 含量对 Cu-CNTs 复合材料致密度、维氏硬度的影响曲线。从图中可以看出, 两步混合工艺结合 SPS 烧结工

艺制备的 Cu-CNTs 样品致密度为 97.4%~99.3%, 维氏硬度为 900~1220 MPa; CNTs 含量对制备复合材料的硬度及致密度影响显著。随着 CNTs 含量的增加, 复合材料的致密度呈下降趋势, 当 CNTs 含量超过 1.0% 后, 复合材料的致密度明显降低。而复合材料的维氏硬度随 CNTs 含量增加呈上升趋势, CNTs 含量为 1.0% 时, 复合材料硬度为 1130 MPa。在 CNTs 含量超过 1.0% 后, 复合材料硬度的增幅减小。

2.4 Cu-CNTs 复合材料的形貌分析

图 4 为采用两步混粉法结合 SPS 烧结制备的 Cu-CNTs 复合材料的 SEM 形貌。整体来看, Cu-CNTs 试样具有高致密且组织均匀的特点。从图中可以看出, Cu-0.5%CNTs 和 Cu-1.0%CNTs 复合材料试样表面并未出现明显的 CNTs 团聚和孔隙, 说明此时基体中的 CNTs 分布状态较好。而当 CNTs 含量达到 1.5% 时, 试样表面 (如图 4c) 出现了明显的孔隙, 且存在团聚的 CNTs, 这与图 3 中的致密度结果相一致。分析认为这是由于本研究采用的球磨工艺能量相对较低, 过多的 CNTs 在球磨过程中未能得到较好的分散, 这导致烧结过程中 CNTs 团聚处的 Cu 原子扩散困难, 从而阻碍了材料的致密化进程。另外, 对 Cu-1.0%CNTs 复合材料试样表面进行化学侵蚀可以发现 (如图 4d), 晶界处分布少量的 CNTs。

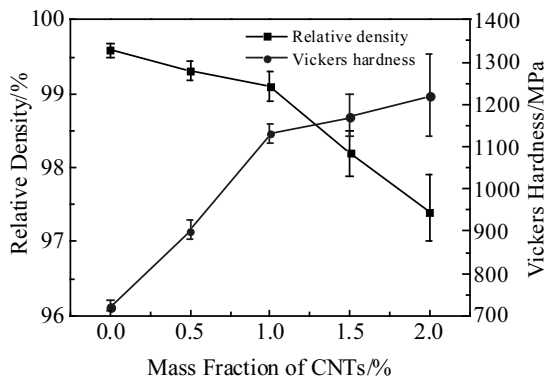


图 3 不同 CNTs 含量复合材料的相对密度、维氏硬度

Fig.3 Relative density and microhardness of composites with different CNTs contents

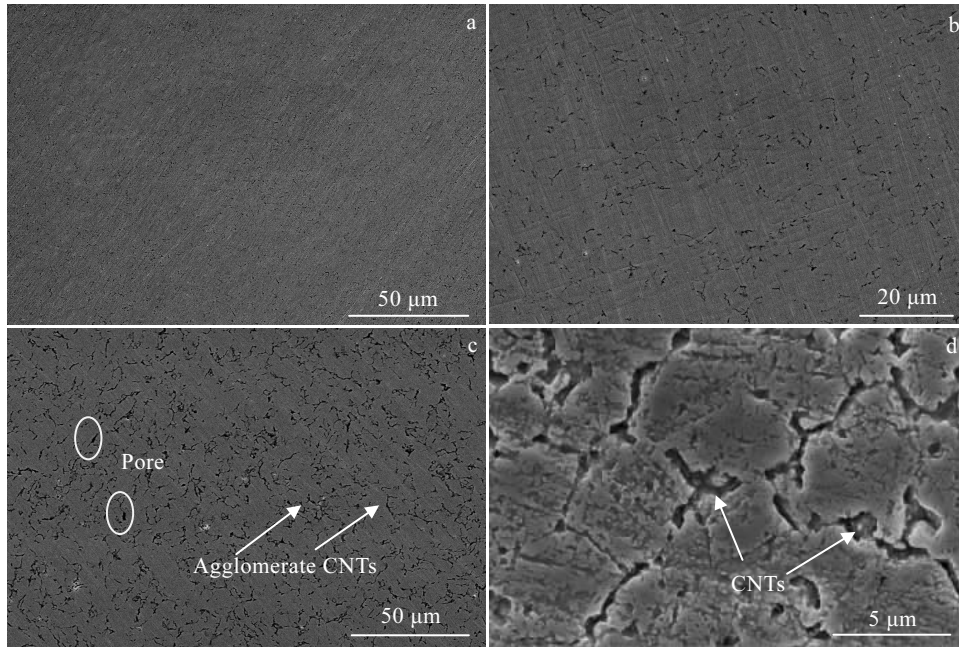


图 4 Cu-CNTs 复合材料的 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of Cu-CNTs composites: (a) 0.5%CNTs, (b) 1.0%CNTs, (c) 1.5%CNTs, and (d) 1.0%CNTs after chemical etching

2.5 Cu-CNTs 复合材料的拉伸性能

图 5 为 CNTs 含量对 Cu-CNTs 复合材料拉伸性能的影响曲线。从图中可以看出，随着 CNTs 含量的增加 Cu-CNTs 复合材料的强度逐渐提高，在 CNTs 含量为 1.0% 时抗拉强度达到最大值 279 MPa，较纯 Cu 提高了 53%，随后呈现下降趋势；随 CNTs 含量升高，复合材料的断后伸长率逐渐降低。

添加 CNTs 后，Cu-CNTs 复合材料的强度得到明显提升。一方面是因为 Cu 基体中分散的 CNTs 增大了 CNTs 与基体之间的界面面积，而 CNTs 本身具有极高

的弹性模量及强度，这使得在拉伸变形过程中有更大的载荷能够从基体通过界面传递到 CNTs。另外，混酸处理的 CNTs 表面带有的含 O 官能团，提高了 CNTs 与 Cu 基体之间的界面结合强度^[10]。当 CNTs 含量超过 1.0% 时，复合材料的强度出现了明显的下降，分析原因主要是因为基体中的 CNTs 出现了明显的团聚并导致材料孔隙的增加（如图 4c），这些缺陷在拉伸变形过程中容易形成裂纹并促进裂纹扩展，从而引起复合材料的强度急剧下降，这也与 Nie 等研究结果相一致^[17]。

Cu-CNTs 复合材料的断后伸长率随 CNTs 含量的增加逐渐降低。这主要是因为随着 CNTs 含量的增加，CNTs 与 Cu 基体的界面面积增大，复合材料的塑性变形能力降低，导致复合材料韧性下降。图 6 给出了 Cu-CNTs 复合材料的拉伸断口形貌。从图中可以看出，含有 1.0% CNTs 的复合材料断口处存在许多韧窝，说明此时材料仍具有良好的塑性；通过高倍观察发现，韧窝中存在少量短小的 CNTs，并未观察到被拔出的 CNTs，这表明 CNTs 与 Cu 基体之间的界面结合较牢固。而当 CNTs 含量达到 1.5% 时，复合材料断口处出现明显的孔洞，且存在团聚的 CNTs，导致材料的塑性出现了明显的恶化，这与图 5 中的结果相一致。

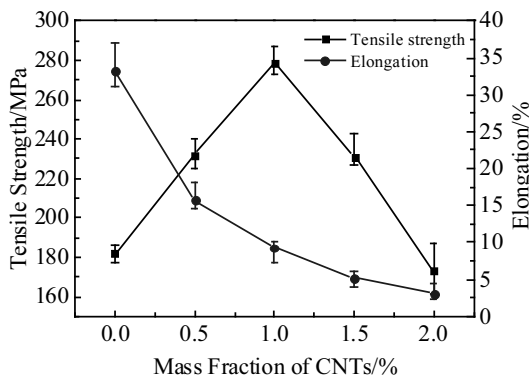


图 5 不同 CNTs 含量复合材料的抗拉强度、伸长率

Fig.5 Tensile strength and elongation of composites with different CNTs contents

2.6 Cu-CNTs 复合材料的电导率

图 7 为采用两步混粉法结合 SPS 烧结制备的 Cu-CNTs 复合材料的电导率随 CNTs 含量的变化关系。从

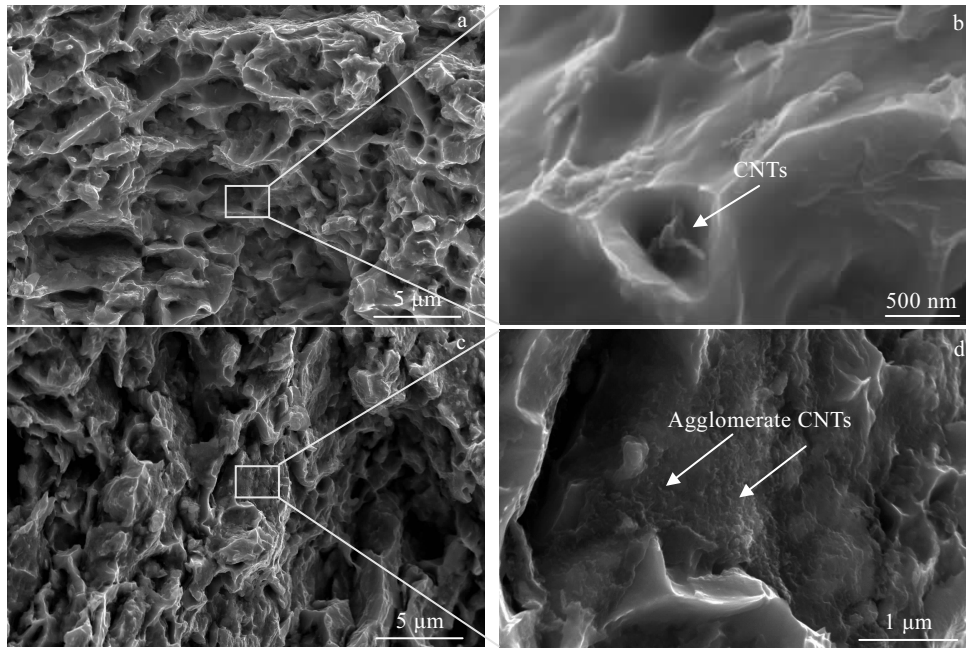


图 6 不同 CNTs 含量复合材料的拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fracture morphologies of composites with different CNTs contents: (a, b) 1.0% and (c, d) 1.5%

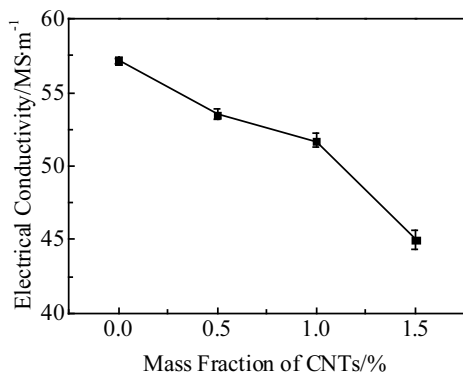


图 7 复合材料的电导率随 CNTs 含量的变化关系

Fig.7 Relationship between the electrical conductivity and CNTs content of composites

图中可以看出，随着 CNTs 含量的增加复合材料的电导率逐渐降低。当 CNTs 含量为 0.5%、1.0%时，复合材料的电导率分别为 53.5 和 51.7 MS/m (89.1%IACS)，较纯 Cu (57.2 MS/m) 分别下降 6.4%和 9.6%。而当 CNTs 含量超过 1.0%后，复合材料的电导率下降剧烈。

复合材料的电导率随 CNTs 含量的增加呈现一定程度的下降。分析认为造成这一结果的原因主要有以下几点：(1) CNTs 的电阻为 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ，而纯 Cu 的电阻为 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ，因此 CNTs 本身的电导率比纯 Cu 低

2~3 个数量级^[9]，CNTs 加入量越多，导电 Cu 的体积分数越少，因而电导率降低。(2) CNTs 的电学性能具有各向异性的特点，轴向和径向的电导率相差可达 100 倍^[18]，因此基体中任意取向的 CNTs 也会对复合材料的电导率产生不利的影响。(3) 基体中的 CNTs 含量越多，烧结过程中产生团聚和孔隙的现象就越严重（如图 4c），这些缺陷会阻碍电子的移动，从而降低复合材料的电导率。也因此，当 CNTs 含量超过 1.0%后，复合材料的电导率出现了明显下降。

表 1 为 3 种不同混粉工艺对 Cu-1.0%CNTs 复合材料的拉伸性能和电导率的影响。可以看出，与高能球磨、分子水平法单一混粉工艺相比，混酸处理结合两步法混合工艺得到的复合材料的综合性能更优。分子

表 1 不同混粉工艺制备 Cu-1.0%CNTs 复合材料的拉伸性能和电导率

Table 1 Tensile properties and electrical conductivity of Cu-1.0%CNTs composites prepared by different mixing processes

Mixing process	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Electrical conductivity/MS·m ⁻¹
High-energy ball milling ^[16]	225	-	41.2
Molecular-level mixing ^[12]	380	1.2	-
Two-step mixing	279	9.8	51.7

水平法制备的 Cu-1.0%CNTs 复合材料的抗拉强度最高, 约为 380 MPa, 而断后伸长率约为 1.2%; 高能球磨工艺制备得到的 Cu-1.0%CNTs 复合材料的抗拉强度和断后伸长率均较低; 而采用两步混合工艺制备的 Cu-1.0%CNTs 复合材料强度和塑性分别为 279 MPa、9.8%。这是因为传统的高能球磨制备的 Cu-CNTs 复合材料中 CNTs 的分布均匀性较差, 也导致 CNTs 与基体之间的界面结合减弱。而采用分子水平法制备的复合材料中 CNTs 的分布更均匀, 但是纳米粉体容易氧化, 从而导致复合材料塑性的恶化。另外, 采用混酸处理结合两步混合工艺制备的 Cu-CNTs 复合材料的电导率也具有明显的优势。这是因为本实验中的球磨工艺能量相对较低, 部分 CNTs 仅被植入到 Cu 粉表面^[19], 经过 SPS 烧结后, 粉末颗粒的原始接触面通过颗粒表面附近的原子扩散转变为原子间的冶金结合, 形成富含 Cu-CNTs 的晶界, 而晶粒内部则变成富 Cu 区 (如图 4d), 根据前期研究表明分布在晶界处的 CNTs 容易形成互为连通的网状结构, 这能够减弱电子的散射以及电子与声子之间的相互作用^[20,21]。经过混酸处理后, CNTs 表面接入的含 O 官能团能够改善其与 Cu 基体之间的界面结合^[10], 这也有利于电子在界面处的传递。另外, 较低能量的球磨对 Cu 颗粒和 CNTs 的结构破坏程度也较小, 因此电子在传输过程中因为缺陷导致的动量损耗就越少, 材料的电导率也就越高。

3 结 论

1) 以 CNTs、电解 Cu 粉、 $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为原料, 采用混酸处理、分子水平法结合行星球磨两步混合工艺可制备出分散性、均匀性、CNT 结构均保持良好的 Cu-CNTs 复合粉末。

2) 当 CNTs 含量小于 1.0% 时, Cu-CNTs 复合材料中 CNTs 的分布均匀性良好, 致密度可达到 99.1% 以上; 当 CNTs 含量大于 1.0% 时, 复合材料的致密度及 CNTs 的分布均匀性明显降低。

3) 随 CNTs 含量升高, Cu-CNTs 复合材料的塑性趋于降低, 而强度呈先升高后降低的趋势, 其中 Cu-1.0%CNTs 复合材料的抗拉强度达到最大值 279 MPa, 且断口存在明显的韧窝。

4) 随 CNTs 含量升高, Cu-CNTs 复合材料的电导率呈下降趋势, 当 CNTs 含量为 0.5%~1.0% 时, 复合材料的电导率为 53.5~51.7 MS/m (89.1% IACS), 当 CNTs 含量超过 1.0% 时, 电导率下降剧烈。

5) 相对高能球磨、分子水平法等单一混粉工艺而言, 两步法制备的 Cu-1.0%CNTs 复合材料的综合性能更优, 其维氏硬度为 1130 MPa, 抗拉强度 279 MPa, 断

后伸长率为 9.8%, 电导率为 51.7 MS/m (89.1% IACS)。

参考文献 References

- [1] Ďurišínová K, Ďurišín J, Orolínová M *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 618: 204
- [2] Dinaharan I, Sathiskumar R, Murugan N. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2016, 5(4): 302
- [3] Thostenson E, Ren Z F, Chou T W. *Composites Science and Technology*[J], 2001, 61(13): 1899
- [4] Bakshi S R, Lahiri D, Agarwal A *et al.* *International Materials Reviews*[J], 2010, 55(1): 41
- [5] Rikhtegar F, Shabestari S.G, Saghafian H. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 723: 633
- [6] Meng X, Liu T, Shi C S *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 633: 103
- [7] Rezazadeh V, Pourhossaini M R, Salimi A. *Progress in Organic Coatings*[J], 2017, 111: 389
- [8] Yi Jianhong(易健宏), Yang Peng(杨平), Shen Tao(沈韬). *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2016, 33(4): 689
- [9] Daoush W M, Lim B K, Mo C B *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 513-514: 247
- [10] Park M, Kim B H, Kim S *et al.* *Carbon*[J], 2011, 49(3): 811
- [11] Kim K T, Cha S I, Gemming T *et al.* *Small*[J], 2008, 4(11): 1936
- [12] Xue Z W, Wang L D, Zhao P T *et al.* *Materials & Design*[J], 2012, 34: 298
- [13] Cha S I, Kim K T, Arshad S N *et al.* *Advanced Materials*[J], 2005, 17(11): 1377
- [14] Sahraei A A, Fathi A, Givi M K B *et al.* *Journal of Composite Materials*[J], 2014, 48(28): 3485
- [15] Nayan N, Shukla A K, Chandran P *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 682: 229
- [16] Nie Junhui(聂俊辉), Jia Chengchang(贾成厂), Zhang Yafeng(张亚丰) *et al.* *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2011, 21(5): 44
- [17] Nie Junhui, Jia Chengchang, Jia Xian *et al.* *Rare Metals*[J], 2011, 30(4): 401
- [18] Zhang S J, Koziol K, Kinloch I A *et al.* *Small*[J], 2008, 4(8): 1217
- [19] Kim K T, Cha S I, Hong S H *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 430(1-2): 27
- [20] Yang Y L, Wang Y D, Ren Y *et al.* *Materials Letters*[J], 2008, 62(1): 47
- [21] Shin S, Choi H, Bae D H. *Journal of Composite Materials*[J], 2013, 47(18): 2249

Preparation, Mechanical Properties and Electrical Conductivity of Carbon Nanotube Reinforced Cu Matrix Composites

Zhou Chuan, Lu Xin, Jia Chengchang, Liu Bowen

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The copper based composite powders containing 0.5%~2% (mass fraction) CNTs were prepared by mixed acid treatment, two steps mixing process of molecular-level method and planetary ball milling using CNTs, electrolytic Cu powder and $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ as raw materials, and the Cu-CNTs composites were prepared by spark plasma sintering. The influence of preparation process and CNTs content on the microstructure, electrical conductivity and mechanical properties of Cu-CNTs composites were studied. The results show that when CNTs content is less than 1.0%, Cu-CNTs composite powders prepared by two-step mixing process have good homogeneity and good dispersibility. The Cu-CNTs composites with high density and uniform CNTs were obtained after sintering. When the content of CNTs is more than 1.0%, the densities and the uniformity of CNTs obviously decrease. With the increase of the CNTs content, the strength of composites increases in initial stage and then declines, and the plasticity and electrical conductivity tend to decrease. Compared with the composites prepared by high-energy ball milling and molecular level method, the Cu-1.0% CNTs composites prepared by two-step method exhibits the superior mechanical properties, including the electrical conductivity of 51.7 MS/m (89.1% IACS), the hardness of 1130 MPa, the tensile strength of 279 MPa, and the elongation of 9.8%.

Key words: Cu matrix composites; carbon nanotube; two-step mixing process; mechanical properties; electrical conductivity

Corresponding author: Lu Xin, Ph. D., Professor, Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-82377286, E-mail: luxin@ustb.edu.cn