



碳纳米管含量对 MWCNTs/Ag 复合材料组织和力学性能的影响

李爱坤, 谢 明, 王 松, 刘满门, 张吉明, 陈永泰

(昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 利用化学镀法对 MWCNTs 镀银并通过高能球磨制备 MWCNTs/Ag 复合粉末, 然后采用粉末冶金法制备 MWCNTs 增强 Ag 复合材料, 利用扫描电镜对复合粉末的形貌以及复合材料中 MWCNTs 的分布进行分析, 研究 MWCNTs 含量对 MWCNTs/Ag 复合材料力学性能的影响。结果表明: 球磨后 Ag 颗粒聚集形成二次大颗粒, 随着 MWCNTs 含量增加, 颗粒聚集程度提高。MWCNTs 体积分数达到 10% 后, MWCNTs/Ag 复合材料中 MWCNTs 团聚严重; MWCNTs 体积分数增大, 复合材料强度、硬度先增大后减小, 体积分数为 8% 时力学性能最佳, 抗拉强度和屈服强度分别达到 297MPa 和 245MPa, 硬度 $HV_{0.1}$ 为 80.1。复合材料表现出明显的塑性断裂特征, 断裂面形成了较多的韧窝, 且存在明显的 MWCNTs 拔出现象, 说明 MWCNTs 起到载荷传递和增强作用。

关键词: 碳纳米管; 化学镀; 力学性能; 复合材料

中图分类号: TB333

文献标志码: A

银-石墨材料因具有良好的导电导热、低而稳定的接触电阻以及优异的低温升特性和优良的抗熔焊性, 被广泛应用于各种保护电器上^[1-3]。传统的银-石墨电接触材料主要采用粉末冶金和烧结挤压法制备, 但是由于石墨本身强度低, 且与 Ag 基体不发生冶金结合, 使复合材料强度低且加工性能差, 成品需切割, 贵金属浪费大, 成本高, 导致银石墨电接触材料在实际应用中受限。且随着各类电机、仪表朝小型化、轻质、高速方向发展, 要求电接触材料的强度高、耐磨损性能好且载流能力大, 银-石墨电接触材料已难以满足新的使用要求。与石墨相比, 碳纳米管(CNTs)具有优异的力学性能(抗拉强度达到 50~200 GPa, 弹性模量可达 1TPa, 硬度与金刚石的相当)以及良好的导电、导热性^[4-5], 且 CNTs 具有较高的长径比, 以 CNTs 作为增强相^[6], 可以提高 Ag 基体的强度和耐磨性。目前, 已有大量关于 CNTs 增强金属基复合材料的报道, 其结果表明 CNTs 增强 Cu^[7-9]、Al^[10-11]、Mg^[12-13] 基等复合材料具有高强度、高导电、耐腐蚀、耐磨、易加工等优势, 具有很好的应用前景。关于 CNTs 增强 Ag 基复合材料的已有一些报道, 国内合肥工业大学对 CNTs/Ag 复合材料开展了制备工艺以及相关

性能测定等方面的研究^[14-15], 研究的关键问题主要是改善 CNTs 在 Ag 基体中的分散性及其与 Ag 基体界面结合, 但是由于获得的复合材料致密性不足等缺点, 针对其力学性能方面的研究还不够完善; PAL 等^[16]通过分子水平层级混合制备了碳纳米管增强银基复合材料, 研究了碳纳米管加入后对材料导热性的影响, 结果表明碳纳米管均匀地嵌在银基体中, 并讨论了材料的导热性与单壁和多壁纳米碳管的功能化处理的关系, 但是没有分析材料的力学性能与碳纳米管之间的关系。根据金属基复合材料的特点, 若能通过挤压、拉拔等方法对 CNTs/Ag 复合材料进行加工, 一方面可减少由加工过程导致材料损耗, 降低贵金属电接触元器件的生产成本; 另一方面, 挤压、拉拔等过程有利于提高复合材料的致密性, 并进一步提高最终 CNTs/Ag 电接触材料的强度, 以适应新一代电接触材料的性能要求。

本文作者采用化学镀方法在 CNTs 表面镀银, 将包覆银的 CNTs 与 Ag 粉高能球磨后采用粉末冶金方法获得 CNTs/Ag 复合材料烧结体, 通过挤压拉拔等加工手段获得高致密度的 CNTs/Ag 复合材料, 并研究了碳纳米管含量对 CNTs/Ag 复合材料组织和力学性能

基金项目: NSFC-云南联合基金项目(u1302272); 云南省科技厅重大项目(KKSB201451004); 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室开放课题(SKL-SPM-201522)

收稿日期: 2015-10-23; **修订日期:** 2016-04-10

通信作者: 谢 明, 教授, 博士; 电话: 0871-68328841; E-mail: powder@ipm.com.cn

的影响, 为 CNTs/Ag 的进一步研究和应用提供实验基础。

1 实验

实验选用的多壁碳纳米管(Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs), 直径 30~50 nm, 长度 10~20 μm , 纯度大于 98%; 基体材料选用纳米银粉, 粒径约 500 nm。图 1 所示为实验所用的银粉和原始 MWCNTs 的 SEM 像。

通过盐酸浸泡 24h 除去制备 MWCNTs 时引入的金属催化剂; 在磁力搅拌下用混酸(浓硫酸和浓硝酸体积比为 3:1)在 90℃ 下回流 6h 进行酸化处理, 然后用蒸馏水清洗数次, 直至 pH 为 7。然后将 MWCNTs 分散到含有 SnCl_2 的溶液中进行敏化处理, 再加入 PdCl_2 进行活化处理, 每一步充分清洗抽滤。将活化后的 MWCNTs 超声分散, 加入一定量的十二烷基苯磺酸钠

作为分散剂, 将一定浓度的银氨溶液和 VC 还原剂溶液缓慢加入到分散的 MWCNTs 明胶溶液中, 同时机械搅拌和超声分散 15 min 完成化学镀, 最后清洗抽滤、烘干, 获得镀银 MWCNTs。将化学镀银的 MWCNTs 与 Ag 粉进行球磨混合(其中 MWCNTs 体积分数分别为 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%), 球磨采用行星球磨机, 转速 150 r/min, 球料比 5:1, 球磨时间 20 h。将球磨后的混合粉压成直径 d 27 mm 的圆柱体, 在 850℃ 下氩气保护烧结 2 h, 然后在 800℃ 热挤压, 挤压比为 30:1。紧接着将体积分数分别为 2%, 4%, 6%, 8% 的 MWCNTs/Ag 复合材料拉拔成 d 2 mm 丝材。将丝材在 600℃ 气氛保护退火 1 h。

采用阿基米德排水法测试 MWCNTs/Ag 试样的密度。采用 Instron3369 型万能力学试验机测试材料的拉伸强度, 试样尺寸为 120 mm $\times$ d 2 mm, 标距 100 mm。对 MWCNTs/Ag 烧结态试样进行显微硬度测试, 条件为 $\text{HV}_{0.1/15\text{s}}$, 每个样品测试 5 个点。用 RIGAKU-3014 X 射线衍射仪分析材料的物相组成, 用 Nova NanoSEM 230、日立 S-3400N 型扫描电镜以及 FEI Helios Nanolab 600i 型电子束/离子束双束显微镜分析粉末形貌、复合材料的组织以及断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 MWCNTs 含量对 MWCNTs/Ag 复合材料组织的影响

图 2(a)所示为镀银后的 MWCNTs 扫描电镜形貌, 从图 2(a)中可以看出, 管径在 30~50 nm 的 MWCNTs 表面获得了连续的 Ag 层, 图 2(b)所示为镀银后 MWCNTs 的 XRD 谱, 结果显示化学镀银后的 MWCNTs 粉末只有 Ag 和 MWCNTs 吸收峰, 衍射峰比较平稳, 无杂质峰出现, 表明化学镀银后的 MWCNTs 粉末纯度较好, 没有明显的杂质, MWCNTs 吸收峰的存在表明碳管未包覆完全, 有裸露现象。将此镀银的 MWCNTs 与 Ag 粉混合, 可以有效解决 MWCNTs 与 Ag 的不润湿问题, 改善 MWCNTs 与 Ag 的界面结合, 获得 MWCNTs 较为分散的 Ag-MWCNTs 复合粉末。

图 3 所示为添加不同体积分数 MWCNTs 的镀银 MWCNTs 和 Ag 粉球磨后的复合粉末 SEM 像。从图 3 中可以看到随着 MWCNTs 体积分数增加, Ag 二次颗粒增多, 且二次颗粒有增大趋势, 即粉末团聚程度提高。Ag 粉与 MWCNTs 表面的银镀层发生机械合金化, 随着 MWCNTs 含量的增加, 机械合金化程度增大使

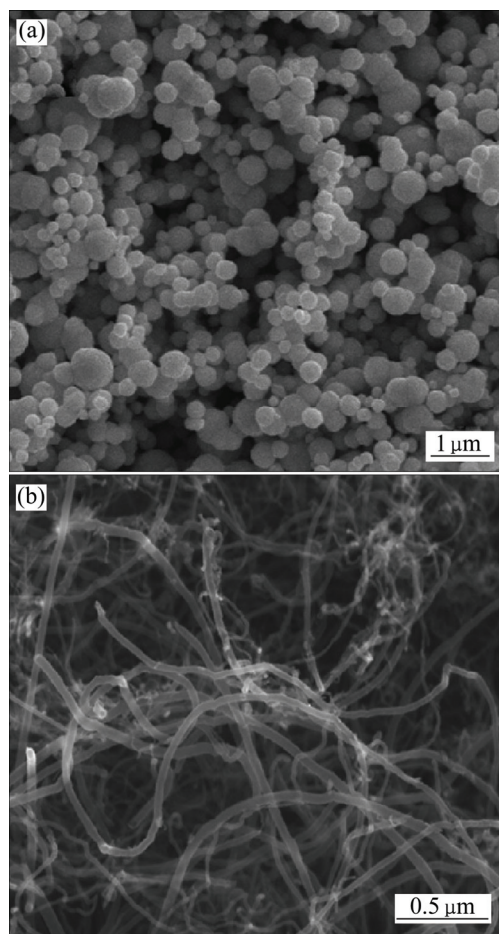


图 1 银粉和原始 MWCNTs SEM 像

Fig. 1 SEM images of silver powder and MWCNTs: (a) Silver powder; (b) MWCNTs

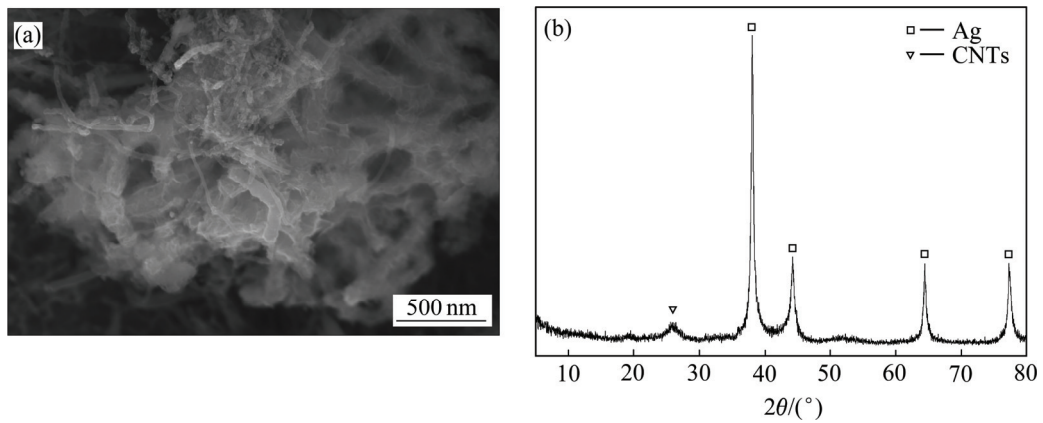


图 2 镀银 MWCNTs SEM 像和 XRD 谱

Fig. 2 SEM image(a) and XRD pattern(b) of Ag-coated MWCNTs

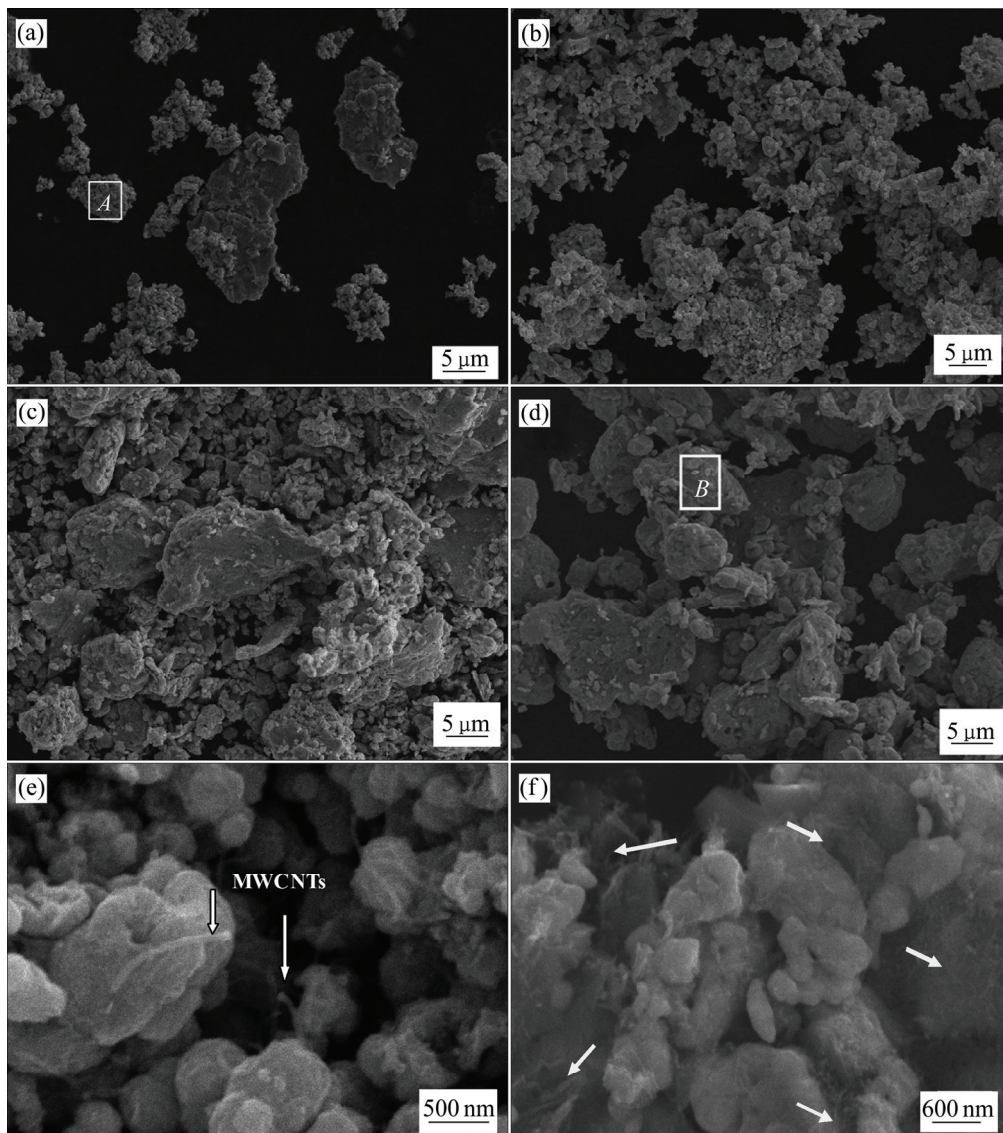


图 3 球磨后复合粉末的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of ball milled composite powders with various volume fractions of MWCNTs: (a) 4%; (b) 8%; (c) 10%; (d) 12%; (e) Higher magnification of area A marked by rectangle in (a); (f) Higher magnification of area B marked by rectangle in (d)

得 Ag 二次颗粒增多且尺寸略有增大。体积分数为 4% 和 12% 的高倍 SEM 像如图 3(e)、(f) 所示, 4% 的 Ag 二次颗粒(见图 3(e))表面 MWCNTs 没有明显的团聚, 而体积分数为 12% 的 Ag 二次颗粒(见图 3(f))表面能够看到明显的 MWCNTs 且团聚明显。

图 4 所示为不同 MWCNTs 含量的 MWCNTs/Ag 复合材料的 SEM 像。从图 4 可以看到, 随 MWCNTs 含量增加, 第二相明显增多, 在 MWCNTs 为 4% 和 8% 时, 第二相分布较均匀, 没有出现明显的团聚, 当 MWCNTs 含量达到 10% 时, 出现了 MWCNTs 团聚的区域, 且随 MWCNTs 含量继续增加, MWCNTs 团聚

现象更为严重, MWCNTs 的团聚直接导致了 MWCNTs/Ag 复合材料的致密性和加工性能降低, 对复合材料的性能造成严重的影响。

图 5 所示为 MWCNTs 体积分数 8% 的 MWCNTs/Ag 复合材料经拉拔后的组织。对比图 4(b), 图 5(a) 的横截面拉拔组织中 MWCNTs 聚集程度较低, 尺寸明显减小, 分布更加均匀。从图 5(b) 纵截面的 SEM 像中可以看到, MWCNTs 存在随加工方向的定向分布。说明 MWCNTs 在加工过程中能发生变形, 烧结组织中的 MWCNTs 团聚体在拉拔过程中变小, 更加均匀地分散在基体中。因此, 复合材料的后期加工能

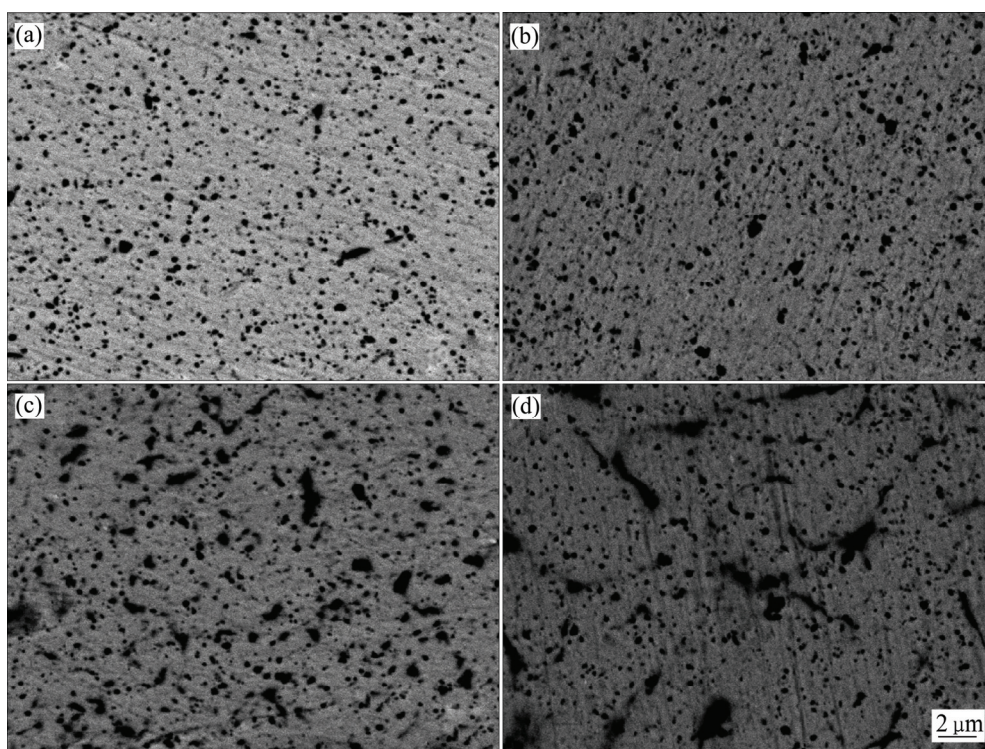


图 4 不同 MWCNTs 含量的 MWCNTs/Ag 复合材料的 SEM 像

Fig. 4 SEM images of polished surface of MWCNTs/Ag composites with various volume fractions of MWCNTs: (a) 4%; (b) 8%; (c) 10%; (d) 12%

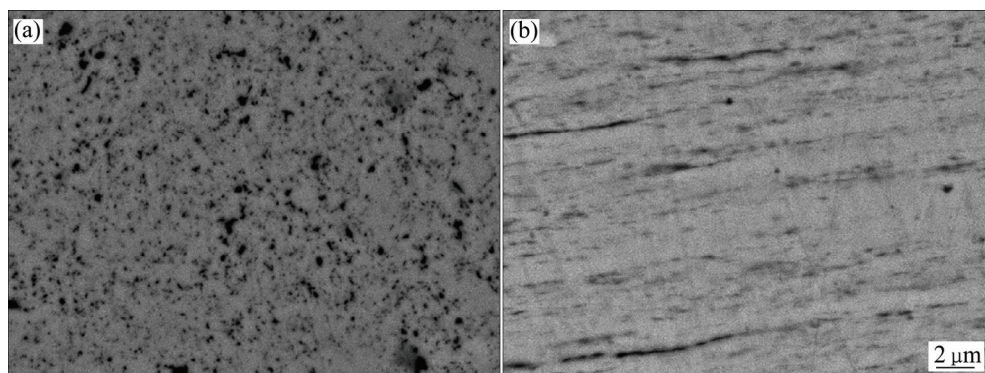


图 5 MWCNTs 体积分数 8% 的 MWCNTs/Ag 复合材料拉拔后的 SEM 像

Fig. 5 SEM images of MWCNTs/Ag composites with 8% MWCNTs: (a) Cross section; (b) Longitudinal section

够对 MWCNTs 的分散起到有效的促进作用, 同时 MWCNTs 的定向分布能够有效改善复合材料的力学性能。

2.2 MWCNTs 含量对 MWCNTs/Ag 复合材料的力学性能的影响

图 6 所示为 MWCNTs/Ag 复合材料烧结态、挤压态和拉拔后的密度随 MWCNTs 含量的变化曲线。图 6 中体积分数为 10% 的 MWCNTs/Ag 复合材料由于 MWCNTs 含量高不能完成拉拔过程故其加工态密度仅为挤压态的密度, 而体积分数为 12% 的 MWCNTs/Ag 复合材料由于不能完成挤压过程则仅存在烧结态密度。从图 6 中可以看到, 随 MWCNTs 含量增加 MWCNTs/Ag 复合材料密度下降, MWCNTs/Ag 复合材料挤压态的密度明显高于烧结态的密度, 经拉拔加工后密度又有进一步地提升, 除去体积分数为 10% 的 MWCNTs/Ag 复合材料, 经后续拉拔加工的 MWCNTs/Ag 致密度比挤压态提高近 3%, 拉拔后的复合材料致密度能达到 99% 左右, 说明 MWCNTs/Ag 经挤压和拉拔加工能有效提高材料的致密度。8% MWCNTs/Ag 复合材料拉拔加工后的密度为 9.71 g/cm^3 , 致密度达到 99.2%。而体积分数达到 10% 后由于 CNTs 在晶界处堆积, 导致致密度下降, 从而影响复合材料的加工性能。

图 7 所示为 MWCNTs/Ag 复合材料烧结态显微硬度随 MWCNTs 含量变化曲线, 从图 7 中可以看到, 随 MWCNTs 体积分数的增加, 硬度先增大后减小, 当体积分数达到 8% 时硬度达到最大值, $\text{HV}_{0.1}$ 为 80.1, 此时按纯 Ag 的显微硬度 $30^{[17]}$ 计算, 8% MWCNTs/Ag

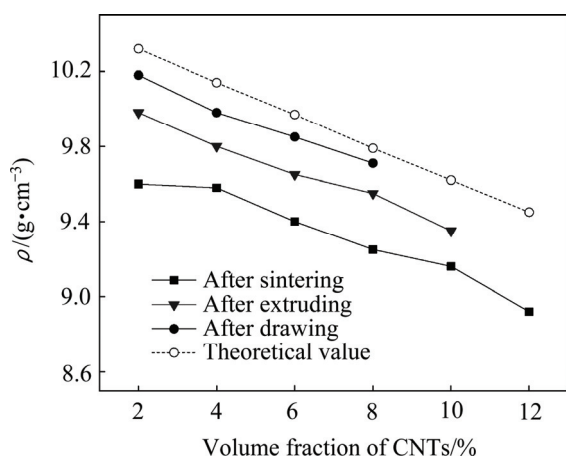


图 6 MWCNTs/Ag 复合材料的密度随 MWCNTs 含量变化曲线

Fig. 6 Density of MWCNTs/Ag composites with various volume fractions of MWCNTs

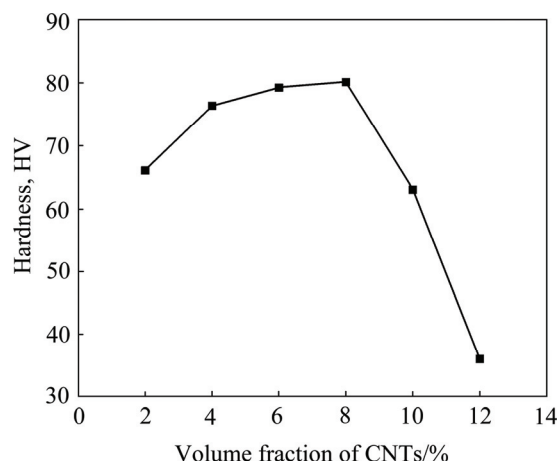


图 7 MWCNTs/Ag 复合材料的硬度随 MWCNTs 含量的变化曲线

Fig. 7 Hardness of MWCNTs/Ag composites at various volume fractions of MWCNTs

的显微硬度是纯银的 2.67 倍, 说明此时的 MWCNTs 较均匀地分散在 Ag 基体中, 有效地起到增强 Ag 基体的作用。当 MWCNTs 体积分数继续增加, 结合图 4 中 10% MWCNTs/Ag 和 12% MWCNTs/Ag 复合材料的 SEM 像可知, MWCNTs 在晶界处团聚, 导致 MWCNTs/Ag 复合材料中缺陷增多, Ag 基体不连续, 致密性下降造成硬度下降。

图 8 所示为不同 MWCNTs 含量的 MWCNTs/Ag 复合材料的应力-应变曲线。从应力应变曲线可以看到在体积分数不超过 8% 时材料表现出明显的塑性断裂特征。表 1 所列为不同 MWCNTs 体积分数的 MWCNTs/Ag 力学性能数值, 其中纯银的数值参照文献[12]。结合表 1, 从图 8 中可以看出, 随着 MWCNTs

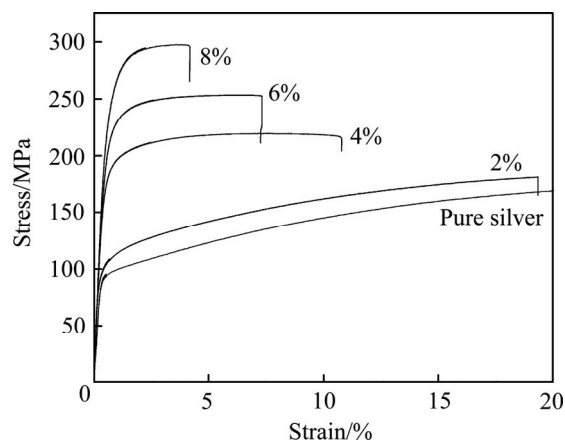


图 8 不同 MWCNTs 体积分数的 MWCNTs/Ag 应力-应变曲线

Fig. 8 Tensile stress-strain curves of MWCNTs/Ag composites with various volume fractions of MWCNTs

表 1 不同 MWCNTs 体积分数的 MWCNTs /Ag 力学性能

Table 1 Mechanical properties of MWCNTs/Ag composites at various volume fractions of MWCNTs

Volume fraction of MWCNTs/%	Tensile strength, σ_b /MPa	Yield strength, $\sigma_{0.2}$ /MPa	Ductility/%
0	160	25	38
2	181	98	19.3
4	218	180	10
6	253	214	7.1
8	296	245	4.2

体积分数的增加, 抗拉强度增大, 但是伸长率则随之减小。MWCNTs 体积分数为 8% 时抗拉强度达到 296 MPa, 屈服强度为 245 MPa, 伸长率则降至 4.2%, 与纯银相比, 抗拉强度提高了近 1 倍, 屈服强度提高了近 10 倍。

图 9 所示为 Ag/MWCNTs(8%) 复合材料拉伸断口的 FESEM 像。如图 9(a) 所示, 复合材料的断口由大量韧窝组成, 放大后的 (如图 9(b) 所示) 断口出现明显的 MWCNTs 拔出现象, 表明 MWCNTs 与 Ag 基体有较好的结合力, 受到外力作用时 MWCNTs 起到了承载作用, 由于 MWCNTs 具有良好的力学性能, Ag 基

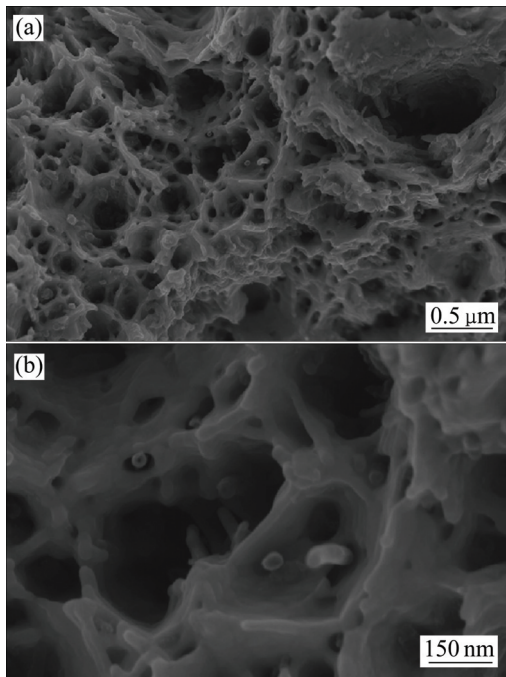


图 9 MWCNTs/Ag(8%) 复合材料的拉伸断口 FESEM 像

Fig. 9 FESEM images of fracture surfaces of MWCNTs/Ag(8%) composite: (a) Low magnification; (b) High magnification

体受力产生塑性变形, 在与 MWCNTs 结合的位置产生空穴, 随着拉力的增加材料断裂失效, 从而产生 MWCNTs 拔出现象, 这种断裂方式是典型的纤维增强复合材料的韧性断裂, 说明 MWCNTs 增强 Ag 基复合材料为载荷传递增强机制。

根据载荷传递理论, 不连续短纤维增强金属基复合材料的强度可应用 shear-lag 模型预测^[18]。因此, MWCNTs/Ag 复合材料的屈服强度可表示为式 (1)^[19-21]:

$$\sigma = \sigma_m(1 + V_f R) \tag{1}$$

式中: σ 为基体的屈服强度; V_f 为增强相的体积分数; R 为强化因子; σ_m 为基体屈服强度, 根据表 1 可得 σ_m 为 25 MPa。根据变形后的 Shear-Lag 模型, $R=S/2$, S 为增强体的纵横比, 对碳纳米管来说为碳管长度和管径的比, 取碳管长度 15 μm , 管径 50 nm, 可得 $R=150$ 。图 10 所示为 MWCNTs/Ag 复合材料屈服强度理论值与实验值的对比, 图中虚线为根据式 (1) 计算的理论值, 在 CNTs 体积分数为 2% 和 4% 时理论值与实验值较吻合, 说明此模型可适用于 MWCNTs/Ag 复合材料屈服强度的模拟计算, 而随着 CNTs 含量的增加, 实验值小于理论值, 且随着含量的增加, 差值呈增大趋势。MWCNTs 含量达到 6% 以上时实验值逐渐偏小, 主要原因是随 MWCNTs 含量增加, MWCNTs 在基体中存在一定的团聚, 使得式 (1) 中 R 值比 CNTs 的实际长径比偏小, MWCNTs 含量越多, 团聚越严重, 会导致力学性能下降。

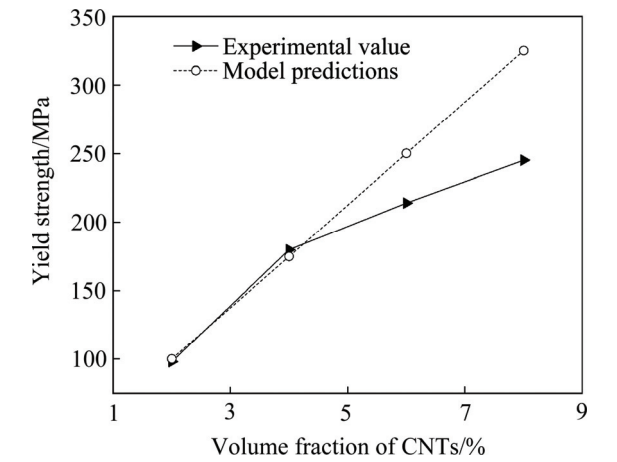


图 10 MWCNTs/Ag 复合材料屈服强度理论值与实验值的对比

Fig. 10 Comparison between predictions of model and experimental value for yield strength of MWCNTs/Ag composites with various MWCNTs contents

3 结论

1) 经化学镀银 MWCNTs 和 Ag 粉球磨制备的 MWCNTs/Ag 在 MWCNTs 体积分数不高于 8% 时, 增强相 MWCNTs 分布均匀, 当体积分数继续增加, MWCNTs 团聚加剧。

2) 随 MWCNTs 含量增加, 复合材料密度下降; 挤压拉拔等后续加工有利于提高 MWCNTs/Ag 复合材料的致密度。

3) MWCNTs/Ag 复合材料的强度、硬度随 MWCNTs 含量增加先增大后减小, 当 MWCNTs 体积分数为 8% 时, 抗拉强度和屈服强度分别达到 297 MPa 和 245 MPa, 硬度为 80.1 HV_{0.1}, 此时拉伸断口表现为韧性断裂, MWCNTs 有明显的拉拔露头, 对 Ag 基体起到了载荷传递和增强作用。

REFERENCES

- [1] WINGERT P C. The effects of interrupting elevated currents on the erosion and structure of silver-graphite[C]// Proceedings of the 42nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Chicago, IL, 1996: 60–69.
- [2] REHANI B R, JOSHI P B. Silver-graphite nanocomposite materials for electrical contact applications[J]. Trans Powder Metall Assoc India, 2005, 31: 7–10.
- [3] AFONIN M P, BOIKO A V. Effect of structural anisotropy on contact properties in a silver-graphite composite[J]. Powder Metall Met Ceram, 2005, 44(1/2): 84–87.
- [4] TERRONES M. Carbon nanotubes: Synthesis and properties, electronic devices and other emerging applications[J]. International Materials Reviews, 2004, 49: 325–377.
- [5] POPOV V N. Carbon nanotubes: Properties and application[J]. Materials Science and Engineering R, 2004, 43: 61–102.
- [6] BAKSHI S R, LAHIRI D. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites—A review[J]. International Materials Review, 2010, 55: 41–64.
- [7] 聂俊辉, 张亚丰, 史娜. 镀钨碳纳米管增强铜基复合材料的制备及性能[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(7): 823–829.
NIE Jun-hui, ZHANG Ya-feng, SHI Na. Fabrication and properties of Cu matrix composites reinforced by tungsten coated carbon nanotubes[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(7): 823–829.
- [8] YOO S J, HAN S H, KIM W J. A combination of ball milling and high-ratio differential speed rolling for synthesizing carbon nanotube/copper composites[J]. Carbon, 2013, 61: 487–500.
- [9] EDWARD J T P, CHAN W P. Cold spray deposition characteristics of mechanically alloyed Cu-CNT composite powders[J]. Applied Surface Science, 2014, 308: 63–74.
- [10] ESAWI A M K, MORSI K, SAYED A, GAWAD A A, BORAH P. Fabrication and properties of dispersed carbon nanotube-aluminum composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 508: 167–173.
- [11] LIN Jiang, FAN Gen-lian, LI Zhi-qiang, KAI Xi-zhou, ZHANG Di, CHEN Zhi-xin, HUMPHRIES S, HENESS G, YEUNG W Y. An approach to the uniform dispersion of a high volume fraction of carbon nanotubes in aluminum powder[J]. Carbon, 2011, 49: 1965–1971.
- [12] 刘奋成, 贺立华, 柯黎明, 简晓光, 刘强. 热处理对 MWCNTs/AZ80 镁基复合材料组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(4): 989–994.
LIU Fen-cheng, HE Li-hua, KE Li-ming, JIAN Xiao-guang, LIU Qiang. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of MWCNTs/AZ80 composite[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 989–994.
- [13] 袁秋红, 曾效舒, 刘勇, 周国华, 罗雷, 吴俊斌. 碳纳米管增强镁基复合材料弹性模量的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 15(1): 86–97.
YUAN Qiu-hong, ZENG Xiao-shu, LIU Yong, ZHOU Guo-hua, LUO Lei, WU Jun-bin. Research progress of elastic modulus of magnesium matrix composite reinforced by carbon nanotubes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 15(1): 86–97.
- [14] 凤仪, 袁海龙, 张敏. 碳纳米管-银复合材料的制备工艺和电导率[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(9): 1451–1455.
FENG Yi, YUAN Hai-long, ZHANG Min. Processing and electrical conductivity of carbon nanotubes-silver composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(9): 1451–1455.
- [15] 凤仪, 袁海龙, 张敏, 冯建平. 碳纳米管表面镀覆对碳纳米管-银复合材料性能的影响[J]. 中国机械工程, 2005, 16(10): 924–927.
FENG Yi, YUAN Hai-long, ZHANG Min, FENG Jian-ping. Influence of electroless plating of CNTs with silver on the properties of CNTs-Ag composites[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 16(10): 924–927.
- [16] PAL H, SHARMA V. Thermal conductivity of carbon nanotube-silver composite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(1): 154–161.
- [17] 宁远涛, 赵怀志. 银[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 67.
NING Yuan-tao, ZHAO Huai-zhi. Silver[M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 67.
- [18] RYU H J, CHA S I, HONG S H. Generalized shear-lag model for load transfer in SiC/Al metal-matrix composites[J]. Journal

- of Materials Research, 2003, 18(12): 2851–2858.
- [19] MA P C, ZHENG Q B, EDITH M, KIM J K. Behavior of load transfer in functionalized carbon nanotube/epoxy nano-composites[J]. Polymer, 2012, 53: 6081–6088.
- [20] Cha S I, KIM K T, ARSHAD S N, MO C B, HONG S H. Extraordinary strengthening effect of carbon nanotubes in metal-matrix nanocomposites processed by molecular-level mixing[J]. Advanced Materials, 2005, 17: 1377–1381.
- [21] TANG Yan-xia, YANG Xiao-min, WANG Rong-rong, LI Mao-xin. Enhancement of the mechanical properties of graphene-copper composites with graphene-nickel hybrids[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 599: 247–254.

Effect of MWCNTs content on microstructure and mechanical properties of MWCNTs/Ag composites

LI Ai-kun, XIE Ming, WANG Song, LIU Man-men, ZHANG Ji-ming, CHEN Yong-tai

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were coated by silver using chemical plating, MWCNTs/Ag composite powders were fabricated by high energy ball milling, and MWCNTs reinforced silver composites were obtained with powder metallurgy method. Morphologies of the composite powder and distribution of MWCNTs in the composite were analyzed by scanning electron microscopy. The effect of the MWCNTs content on the mechanical properties of the composites was studied. The results show that Ag particles gather to larger secondary particles after ball milling and the degree of aggregation increases with the increase of MWCNTs content. The MWCNTs present severe aggregation in the composites when the volume fraction of MWCNTs exceeds 10% (volume fraction). With the increase of the volume fraction of MWCNTs, strength and hardness of the composite first increase and then decrease. The composite containing 8% MWCNTs exhibits optimal mechanical properties with tensile strength of 297 MPa, yield strength of 245 MPa, and hardness of 80.1 HV_{0.1}. The MWCNTs/Ag composite shows obvious plastic fracture with many dimples on the fracture surface. Pull-out of the MWCNTs illustrates the load transferring and strengthening effect of MWCNTs.

Key words: carbon nanotube; chemical plating; mechanical property; composite

Foundation item: Project(u1302272) supported by the National Natural Science Foundation of China-Yunnan Joint Fund; Project(KKSB201451004) supported by Major Program of Science and Technology Department of Yunnan Province, China; Project(SKL-SPM-201522) supported by the fund of the State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, China

Received date: 2015-10-23; **Accepted date:** 2016-04-10

Corresponding author: XIE Ming; Tel: +86-871-68328841; E-mail: powder@ipm.com.cn

(编辑 王 超)