

镀铜碳纳米管对铜基复合薄膜组织及性能的影响

赵鑫宇¹, 刘强¹, 程国文¹, 林铁松², 黄永德¹

(1. 南昌航空大学, 南昌, 330063; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 150001)

摘要: 解决碳纳米管团聚问题以及改善碳纳米管与基体材料间界面的结合是提升碳纳米管铜基复合薄膜性能的关键. 文中通过对比碳纳米管铜基复合薄膜和镀铜碳纳米管铜基复合薄膜的组织 and 性能的差异, 结合量子隧道效应、DLVO 理论以及材料力学相关理论, 分析了镀铜碳纳米管对复合薄膜组织及性能的影响. 结果表明, 未镀铜和镀铜的碳纳米管含量为 1.0 % (质量分数) 时, 碳纳米管铜基复合薄膜和镀铜碳纳米管铜基复合薄膜电阻率分别为 25.17 和 17.73 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$, 在不同的弯曲循环次数下的电阻变化率均是前者大于后者. 碳纳米管镀铜后, 其尺寸和表面结构所发生的改变抑制了团聚, 提高了其与铜基体之间的结合强度, 进而提升复合薄膜性能. 从增强材料对复合材料的组织和性能影响的角度出发, 得出了镀铜碳纳米管对铜基复合薄膜组织及性能的影响机理, 为后续柔性印刷电子技术的研究提供理论依据.

创新点: (1) 研究了碳纳米管镀铜层对铜基复合薄膜中碳纳米管团聚现象的抑制作用.

(2) 研究了镀铜碳纳米管在铜基复合薄膜中的增强作用机理.

关键词: 碳纳米管; 镀铜碳纳米管; 团聚; 结合强度

中图分类号: TG 425

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20230613014

0 序言

柔性印刷电子技术是一种直接在柔性基板上印刷电子产品的高效新型技术^[1], 该技术将由纳米材料制成的导电油墨在基板上结构化, 再通过烧结工艺制备成导电薄膜^[2], 以该技术生产的电子产品相较于传统电子产品, 重量更轻、塑性和韧性更优^[3]. 而纳米材料烧结连接工艺是实现纳米材料低温连接的技术手段之一^[4], 纳米材料及其烧结连接工艺的研究对于推动电子产品向着小型化^[5]、柔性化发展具有重要作用. 纳米铜作为常用的纳米材料, 其导电性能良好、熔点比块状铜低, 通过烧结可以实现低温连接、高温服役的目的^[6], 且用纳米铜制做薄膜成本较低, 铜基薄膜吸引了众多研究者的关注. 碳纳米管能够增强复合薄膜的力学性能和导电性能^[7], 但由于碳纳米管长径比高、弯曲刚度低、比表面积大, 因而容易团聚^[8-9], 团聚对复合薄膜的

性能造成不利的影响. 通常碳纳米管和铜基体的结合强度较低, 提高碳纳米管和铜基体的结合强度能够提升复合薄膜的性能.

在碳纳米管的表面加上覆盖层, 隔绝其与周围环境的接触可以抑制团聚^[10]. 镀铜技术是一种将铜溶液中的铜离子沉积在基材表面形成铜金属覆盖层的工艺, 镀铜碳纳米管相比于碳纳米管, 其表面具有一层镀铜层, 镀铜层能够增加其与基体的界面润湿性, 并改善碳纳米管的分散性, 提升材料的导电性能和力学性能^[11-12]. 冯敏^[11]研究发现碳纳米管和镀铜碳纳米管含量为 0.25 % 时, 碳纳米管铜基复合材料和镀铜碳纳米管铜基复合材料的导电率分别为 62.5% IACS 和 77.21% IACS. Zeng 等人^[12]发现碳纳米管和镀铜碳纳米管含量为 1.5 % 时, 镀铜碳纳米管铝基复合材料的屈服强度和极限抗拉强度分别为 203 和 287 MPa, 而碳纳米管铝基复合材料的屈服强度和极限抗拉强度为 188 和 256 MPa. Maqbool 等人^[13]发现碳纳米管和镀铜碳纳米管含量为 1.0 % 时, 镀铜碳纳米管铝基复合材料的屈服强度和极限抗拉强度与碳纳米管铝基复合材料相比分别提高了 63% 和 45%.

收稿日期: 2023-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52065048); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金 (AWJ-22Z02).

文中对比了碳纳米管铜基复合薄膜和镀铜碳纳米管铜基复合薄膜的组织、力学性能和导电性能的差异,运用量子力学和材料力学相关理论得出组织和性能差异的原因,并得出镀铜碳纳米管表面镀铜层抑制团聚现象机理和对界面结合强度增强作用机理,进而得出镀铜碳纳米管对组织和性能的影响机理,为复合薄膜性能的提升以及柔性印刷电子技术的发展提供了帮助。

1 试验方法

复合薄膜采用粉末冶金法制备,所用的碳纳米管直径为 $10 \sim 30 \text{ nm}$, 长度为 $10 \sim 30 \text{ }\mu\text{m}$, 镀铜碳纳米管镀铜含量为 60%, 直径为 $30 \sim 50 \text{ nm}$, 长度为 $10 \sim 20 \text{ }\mu\text{m}$, 纳米铜颗粒尺寸为 $30 \sim 60 \text{ nm}$, 图 1 和图 2 为两种类型碳纳米管 FE-SEM 图。

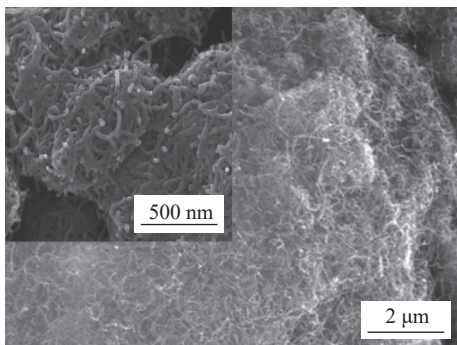


图 1 碳纳米管 FE-SEM 图

Fig. 1 FE-SEM image of carbon nanotubes

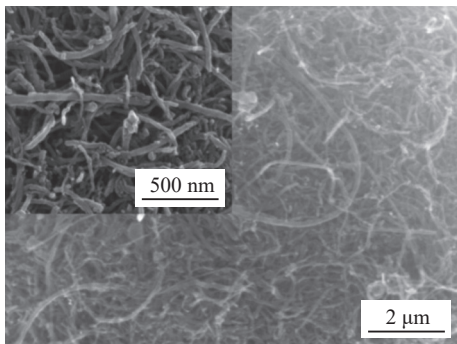


图 2 镀铜碳纳米管 FE-SEM 图

Fig. 2 FE-SEM image of copper-plated carbon nanotubes

将纳米铜颗粒分别与碳纳米管、镀铜碳纳米管混合均匀后获得两种类型的导电油墨,油墨中两种碳纳米管含量均为 1.0%。粘结剂为聚乙烯吡咯烷酮,溶剂为乙二醇,皆为分析纯。将两种导电油墨丝网印刷至 PI 薄膜上,放入真空干燥箱干燥 12 h,再

放入管式真空炉中保持通入纯度为 100% 的氢气,以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速度升温至 $310 \text{ }^\circ\text{C}$, 烧结 30 min 后冷却至室温,获得复合薄膜,其外形和尺寸如图 3 所示。

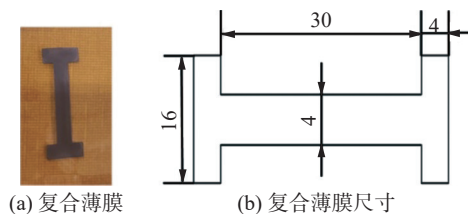


图 3 复合薄膜及其尺寸示意图 (mm)

Fig. 3 Composite film and its dimensional drawing. (a) composite film; (b) dimensions of composite film

利用 Phenom XL 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察复合薄膜弯曲疲劳后的组织形貌;利用蔡司 GeminiSEM360 型场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscope, FE-SEM) 观察两种类型碳纳米管和复合薄膜组织形貌;用 RTS-11 型金属四探针测试仪测量复合薄膜电阻,探针直径为 $1 \text{ }\mu\text{m}$, 探针间距为 1 mm 。弯曲疲劳试验采用 Joo 等人^[14]的方法,弯曲疲劳的频率为 1 Hz , 共弯曲 1 000 次,弯曲半径为 5 mm 。

2 试验结果

2.1 两种类型的复合薄膜的组织

图 4 和图 5 为两种复合薄膜组织 FE-SEM 图。图 4 中,烧结后的碳纳米管出现团聚,由于碳纳米管与铜之间结合较差,碳纳米管对铜基体组织的长大起到抑制作用,因此在复合薄膜组织中具有独立分布的铜颗粒^[14],铜颗粒平均尺寸约为 170 nm 。

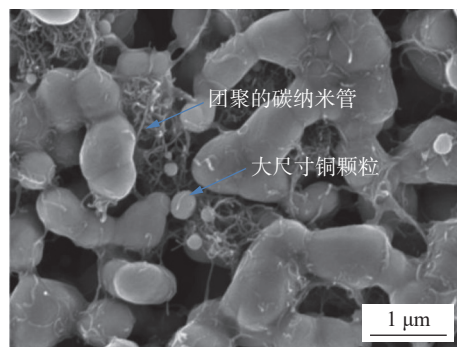


图 4 碳纳米管铜基复合薄膜 FE-SEM 图

Fig. 4 FE-SEM image of carbon nanotubes copper-based composite film

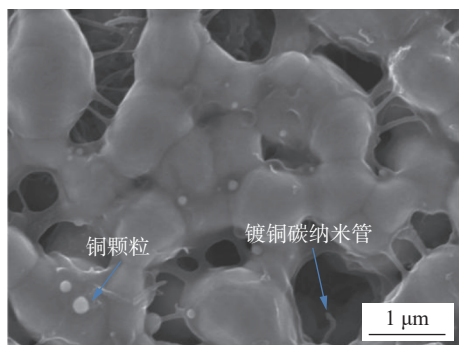


图 5 镀铜碳纳米管铜基复合薄膜 FE-SEM 图
Fig. 5 FE-SEM image of copper-plated carbon nanotubes copper-based composite thin film

图 5 中, 镀铜碳纳米管均匀分布在铜组织中, 由于未出现团聚现象, 且铜基体和镀铜碳纳米管的结合良好, 其组织间隙小、连续性良好, 组织中独立分布的铜颗粒的数量大量减少, 铜颗粒平均尺寸约为 110 nm.

2.2 两种类型的复合薄膜的性能

图 6 和图 7 为弯曲疲劳后两种复合薄膜组织 SEM 形貌. 镀铜碳纳米管铜基复合薄膜组织经弯曲疲劳试验后, 产生的裂纹数量少于碳纳米管铜基复合薄膜, 镀铜碳纳米管铜基复合薄膜组织的抗弯曲疲劳性能较优. 图 8 和图 9 为两种复合薄膜电阻率和弯曲疲劳试验后电阻变化率, 由图可知弯曲疲劳后两种复合薄膜电阻变化率都呈增大趋势, 镀铜碳纳米管铜基复合薄膜电阻率和不同的弯曲循环次数下的电阻变化率都更小. 当材料抗疲劳性能不足时在弯曲疲劳后容易出现较大的电阻变化率, 材料的电阻变化率能够反映抗弯曲疲劳性能, 因此试验数据表明, 镀铜碳纳米管铜基复合薄膜的导电性能和抗弯曲疲劳性能优于碳纳米管铜基复合薄膜.

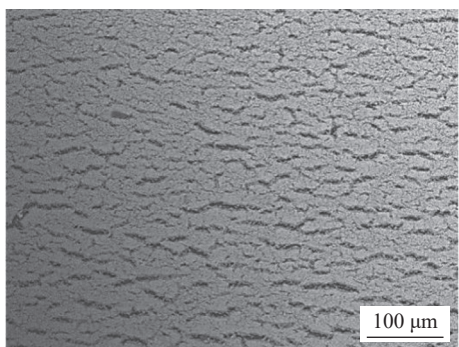


图 6 弯曲疲劳后碳纳米管铜基复合薄膜 SEM 形貌
Fig. 6 SEM image of carbon nanotubes copper-based composite thin film after bending fatigue test

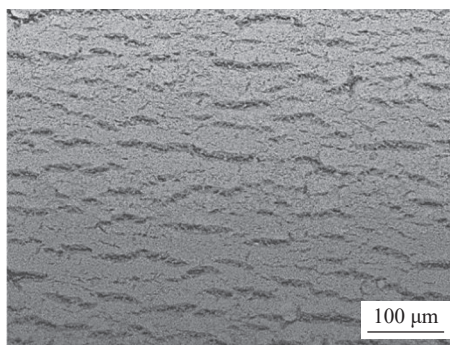


图 7 弯曲疲劳后镀铜碳纳米管铜基复合薄膜 SEM 形貌
Fig. 7 SEM image of copper-plated carbon nanotubes copper-based composite thin film after bending fatigue test

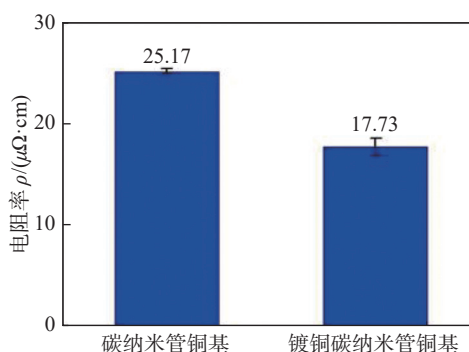


图 8 复合薄膜电阻率统计
Fig. 8 Composite film resistivity statistical chart

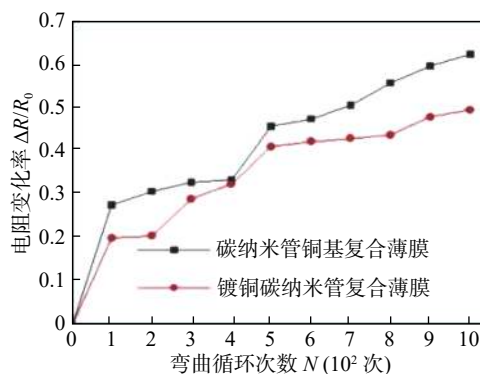


图 9 复合薄膜弯曲疲劳后的电阻变化率统计
Fig. 9 Statistical chart of resistance change rate after bending fatigue test of composite film

3 结果分析

3.1 镀铜层对团聚现象抑制作用

在两个碳纳米管靠近的瞬间, 它们当中原子之间电场和电荷的分布发生了变化, 产生瞬时偶极间的相互作用, 导致碳纳米管吸引彼此, 该吸引力是碳纳米管之间的范德华引力, 在碳纳米管相互吸引

和靠近后发生弯曲形变造成团聚. 对比图 4 和图 5, 可看出未镀铜的碳纳米管发生了团聚, 而镀铜的碳纳米管未发生团聚, 团聚会使复合薄膜的性能下降.

潘静等人^[15]建立了碳纳米管球型夹杂弹性模型, 即

$$C_1 = \xi, \quad C_m = 1 - \xi \quad (1)$$

$$K = K_m - \frac{C_1 K_m (K_m - K_1)}{(K_m - \alpha C_m (K_m - K_1))} \quad (2)$$

$$G = G_m - \frac{C_1 G_m (G_m - G_1)}{(G_m - \beta C_m (G_m - G_1))} \quad (3)$$

式中: ξ 为团聚参数; C_1 和 C_m 为球型夹杂和基体的体积分数; K, K_1 和 K_m 为复合薄膜、基体和球型夹杂的体积模量; G, G_1 和 G_m 为复合薄膜、基体和球型夹杂的剪切模量; α 和 β 是与 K_m 和 G_m 相关的系数. 随着团聚的进行, 碳纳米管间复杂的相互作用力增加了材料内部应力集中的程度, 团聚参数 ξ 不断增大, 导致体积模量和剪切模量的下降, 进而促进裂纹的产生和扩展, 这是图 6 碳纳米管铜基复合薄膜裂纹比图 7 镀铜碳纳米管铜基复合薄膜裂纹多的原因, 印证了两种类型碳纳米管铜基复合薄膜的抗弯曲疲劳性能的差异.

从图 8 中可以看出碳纳米管铜基复合薄膜组织电阻率较大, 其原因在量子力学中, 电子的传递需要克服势垒, 电子的能量小于势垒时, 由于隧道效应电子有概率穿过势垒, 计算式为

$$\ln P = -\frac{2D}{\hbar} \sqrt{2m(E_{P0} - E)} \quad (4)$$

式中: P 为电子穿过势垒的概率; D 为势垒宽度; \hbar 为狄拉克常量; m 为电子质量; E 为电子的能量; E_{P0} 为势垒高度. 若势垒越宽、势垒越高, 电子通过的概率越小, 电流传输速度越慢, 材料的导电性能越差. 发生团聚时, 范德华力使碳纳米管之间形成更多的交互作用和相互作用能量, 增大势垒, 从而增大电阻, 因此碳纳米管铜基复合薄膜电阻率较高.

碳纳米管尽可能保持直线状和均匀分布才能避免碳纳米管在组织发生团聚现象. 碳纳米管镀铜层对团聚的抑制作用可以借助 DLVO 理论分析^[16-17], 即

$$V_T = V_A + V_R \quad (5)$$

式中: V_T 为分散体系总的势能; V_A 为范德华吸引能; V_R 为静电排斥能. 镀铜碳纳米管之间存在两种

相互作用势能, 即范德华吸引能和静电排斥能, 二者之和为分散体系总的势能. 碳纳米管经过镀铜预处理后羧基、羟基等含氧官能团增多, 使得碳纳米管表面的负电荷的电荷量增加^[18], 碳纳米管之间静电排斥作用得到增强, 进而抑制了范德华吸引力实现体系的稳定, 如图 10 所示. 随着分散体系总势能减小, 团聚现象减少, 碳纳米管的分散性得到提升.

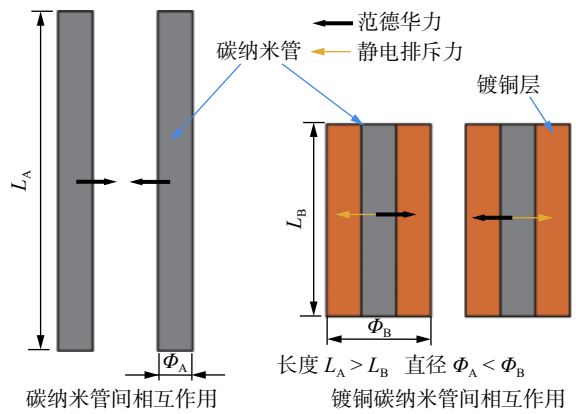


图 10 两种类型碳纳米管之间相互作用示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the interaction between two types of carbon nanotubes

碳纳米管发生团聚时会发生弯曲形变, 镀铜前后碳纳米管的弯曲刚度 D 的变化, 可以借助材料力学中弯曲刚度的计算式进行分析, 即

$$D = EI \quad (6)$$

式中: E 是材料的杨氏模量; I 为材料的截面惯性矩. 碳纳米管镀铜后直径变大, 增大了截面惯性矩, 镀铜层增大了碳纳米管的弯曲刚度, 弯曲刚度的增大可以减少碳纳米管在相互吸引后产生的弯曲形变. 碳纳米管弯曲产生的形变也与其长度成正比, 在镀铜前的预处理过程中, 强酸破坏了碳纳米管功能化位点的 SP^2 杂化结构, 会使碳纳米管长度变短, 减小了弯曲形变. 总之, 镀铜工艺通过改变碳纳米管的尺寸和表面结构抑制团聚.

3.2 镀铜层碳纳米管在铜基复合薄膜中增强作用

复合薄膜的力学性能也与碳纳米管和铜基体间结合强度相关, 从图 4 和图 5 中可以看出两种类型的复合薄膜结合强度存在差异, 碳纳米管和镀铜碳纳米管表面与铜结合情况如图 11 所示. 端部接触和侧面接触是碳纳米管与铜基体间的两种相互作用方式, 通过外平面轨道形成的 π 键与铜基体发生相互作用的侧面接触十分脆弱, 且较难发生化学反应, 仅依靠端部接触结合形成的 σ 键结合界面强度很低.

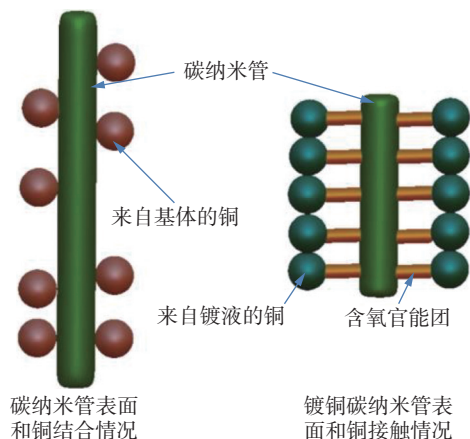


图 11 两种类型的碳纳米管表面与铜结合情况示意图
Fig. 11 Schematic diagram of surface bonding of two types of carbon nanotubes to copper

在化学镀铜过程中,铜会优先沉积在预处理中形成官能团的位置并发生反应,形成 C-O-Cu 键^[19]. 化学键的形成提高了铜与碳纳米管之间的相互作用力. 镀铜层也增大了碳纳米管表面粗糙度,进而增大了碳纳米管和铜基体间机械结合力.

图 12 和图 13 为两种类型复合薄膜弯曲疲劳后组织形貌,可以看出碳纳米管铜基复合薄膜的组织中存在有团聚的碳纳米管,且组织中铜颗粒数量相较于弯曲疲劳试验前大量增多;在开裂的镀铜碳纳米管铜基复合薄膜组织中间有着镀铜碳纳米管将其连接,此时的镀铜碳纳米管可以起到阻碍裂纹扩展的作用^[20]. 这种现象的原因是界面以机械结合为主的碳纳米管与铜基体结合强度较弱,在外力作用下容易分离,形成较多铜颗粒(图 12). 镀铜过后具有化学结合的镀铜碳纳米管与铜基体结合强度高于碳纳米管与铜基体的结合强度,弯曲疲劳产生的影响较小,因此弯曲疲劳后的裂纹数量少.

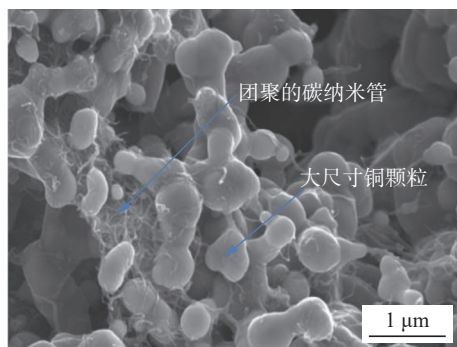


图 12 弯曲疲劳后碳纳米管铜基复合薄膜 FE-SEM 图
Fig. 12 FE-SEM image of carbon nanotubes copper-based composite thin film after bending fatigue test

在弯曲疲劳试验后还出现了镀铜碳纳米管直

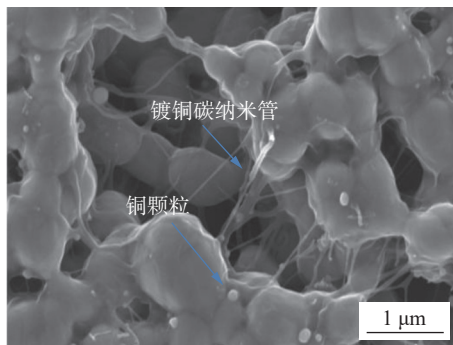


图 13 弯曲疲劳后镀铜碳纳米管铜基复合薄膜 FE-SEM 图
Fig. 13 FE-SEM image of copper-plated carbon nanotubes copper-based composite thin film after bending fatigue test

径发生变化的现象,如图 13 所示,这可能是由于碳纳米管抗弯曲疲劳性能优于铜,在外力作用下,镀铜碳纳米管表面的镀铜层发生形变,而碳纳米管受到的影响较小. 由于镀铜碳纳米管直径并不绝对一致,直径略小的镀铜碳纳米管在受到垂直于横截面上的作用力时,其应力、应变可以借助关系式进行分析,即

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (8)$$

式中: σ 为应力; F 为作用力; A 为横截面积; ε 为应变; E 为杨氏模量. 镀铜碳纳米管直径越小,在受到外力时其应力越大,镀铜碳纳米管在受到外界作用后发生的形变量越大,镀铜碳纳米管的直径在形变的影响下发生变化.

3.3 碳纳米管的表面镀铜层对复合薄膜综合作用

两种类型碳纳米管与铜基体结合情况如图 14 所示,左边为碳纳米管铜基复合薄膜组织,右边为镀铜碳纳米管铜基复合薄膜组织. 碳纳米管和铜组织的结合较差,且会发生团聚,因此复合薄膜组织的间隙较大. 镀铜碳纳米管不仅与铜组织的结合强度高,而且其团聚现象得到抑制,因此镀铜碳纳米管比较分散,且镀铜碳纳米管与铜组织的结合也更加均匀,在减少组织间隙的同时使材料不同区域间的强度、刚度等力学性能达到更加接近的水平,减少了容易形成应力集中的区域的数量和面积,抑制了裂纹的产生和发展,从而提升了复合薄膜的力学性能.

文中的两种复合薄膜的铜基体的含量相同,复合薄膜导电性能的差异是碳纳米管类型的不同导

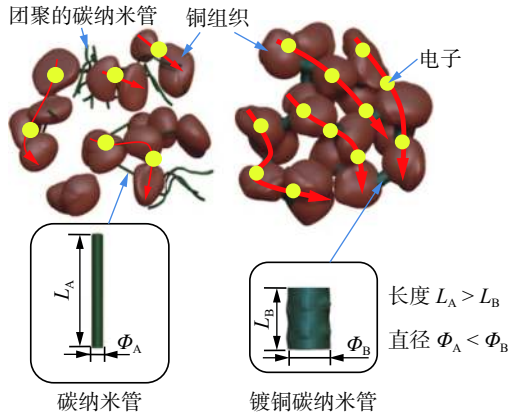


图 14 两种类型的碳纳米管与铜基体结合情况示意图
Fig. 14 Schematic diagram of the binding of two types of carbon nanotubes to copper matrix

致,材料的电阻和电阻率、长度、横截面积有以下关系

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (9)$$

式中: R 为电阻; ρ 为电阻率; L 为长度; S 为横截面积. 如图 14 所示,碳纳米管镀铜后长度变短、横截面积变大,同时由于镀铜层导电性能良好,有利于电子的传递,减小了电阻,因此碳纳米管镀铜后电阻减小,导电性能得到提升. 镀铜层也会使复合薄膜组织的间隙减少、碳纳米管和铜组织间的结合面积增大,电子在复合薄膜中移动所遇到的阻碍减少,进而提高了复合薄膜的导电性能.

4 结论

(1) 与碳纳米管相比,镀铜碳纳米管与铜组织间的结合较好,镀铜碳纳米管铜基复合薄膜的组织连续性高. 碳纳米管铜基复合薄膜的电阻率为 $25.17 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 镀铜碳纳米管铜基复合薄膜电阻率为 $17.73 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. 与碳纳米管铜基复合薄膜相比,镀铜碳纳米管铜基复合薄膜弯曲疲劳后裂纹数量少、电阻变化率小.

(2) 碳纳米管由于范德华力的作用容易发生团聚,团聚对复合薄膜的力学性能和导电性能造成不利影响. 碳纳米管和铜基体之间由于结合强度低,弯曲疲劳过后复合薄膜中碳纳米管和铜基体会出现分离现象,影响复合薄膜性能. 碳纳米管镀铜后,表面镀铜层能够改变碳纳米管的尺寸和表面结构,减少范德华力的影响,抑制团聚;在烧结过后,镀铜碳纳米管的镀铜层和铜基体间具有金属键,提升了

结合强度,进而使得复合薄膜的性能得到了提升.

(3) 相较于碳纳米管,镀铜碳纳米管具有分散性更好、横截面积更大、长度更短、与铜基体结合度更高等特点,正是这些特点使得镀铜碳纳米管铜基复合薄膜的性能更优.

参考文献

- [1] Sundriyal P, Bhattacharya S. Inkjet-printed electrodes on A4 paper substrates for low-cost, disposable, and flexible asymmetric supercapacitors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(44): 38507–38521.
- [2] 黄永德, 彭鹏, 郭伟, 等. 纳米铜基柔性导电薄膜制备现状及前景[J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 147–156.
Huang Yongde, Peng Peng, Guo Wei, *et al.* Current status and prospect of preparation of nano-copper based flexible conductive films[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 147–156.
- [3] Wang Y, Xu C, Yu X, *et al.* Multilayer flexible electronics: Manufacturing approaches and applications[J]. Materials Today Physics, 2022, 23: 100647.
- [4] 王帅奇, 邹贵生, 刘磊. 先进封装中铜-铜低温键合技术研究进展[J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 112–125.
Wang Shuaiqi, Zou Guisheng, Liu Lei. Research progress of low-temperature Cu-Cu bonding technology for advanced packaging[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 112–125.
- [5] 邹贵生, 闫剑锋, 母凤文, 等. 微连接和纳连接的研究新进展[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 107–112.
Zou Guisheng, Yan Jianfeng, Mu Fengwen, *et al.* Recent progress in microjoining and nanojoining[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 107–112.
- [6] 李昭, 刘洋, 张浩, 等. 多尺度纳米银烧结接头连接强度及塑性[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 106–110.
Li Zhao, Liu Yang, Zhang Hao, *et al.* Bonding strength and plasticity of multiscale composite nanosilver paste for low temperature sintering[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 106–110.
- [7] He C, Xu B, Li X. Effects of modified single-wall carbon nanotubes on the mechanical properties of polyvinyl alcohol composites by molecular dynamics simulation[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105598.
- [8] 亓钧雷, 万禹含, 张丽霞, 等. 碳纳米管增强 TiNi 复合钎料的制备与表征[J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 27–30.
Qi Junlei, Wan Yuhang, Zhang Lixia, *et al.* Synthesis and characterization of carbon nanotubes reinforced TiNi composite solder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 27–30.

- [9] Ingo Alig, Pötschke P, Lellinger D, *et al.* Establishment, morphology and properties of carbon nanotube networks in polymer melts[J]. *Polymer*, 2012, 53(1): 4 – 28.
- [10] Gu Y, Wu A, Federici J F, *et al.* Inkjet printable constantan ink for the fabrication of flexible and conductive film[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 27 – 36.
- [11] 冯敏. 碳纳米管化学镀铜增强铜基复合材料的工艺研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- Feng Min. Process research on electroless copper plating of carbon nanotubes reinforced copper matrix composites[D]. Kunming: Kunming University of Science And Technology, 2017.
- [12] Zeng M, Ling Y, Zhang P, *et al.* Improvement of interfacial interaction and mechanical properties in aluminum matrix composites reinforced with Cu-coated carbon nanotubes[J]. *Materials Science & Engineering, A*, 2023, 870: 144918.
- [13] Maqbool A, Hussain M A, Khalid F A, *et al.* Mechanical characterization of copper coated carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites[J]. *Materials Characterization*, 2013, 86(8): 39 – 48.
- [14] Joo S J, Park S H, Moon C J, *et al.* A highly reliable copper nanowire/ nanoparticle ink pattern with high conductivity on flexible substrate prepared via a flash light-sintering technique[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(10): 5674 – 5684.
- [15] 潘静, 卞立春, 高明. 团聚参数对纳米复合材料性能的影响分析 [C]//中国力学大会-2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集 (A), 2017.
- Pan Jing, Bian Lichun, Gao Ming. The effect of agglomeration parameters on the properties of nanocomposites[C]//Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics-Proceedings of the 2017 Celebration of the 60th Anniversary of the Establishment of the Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics (A), 2017.
- [16] 刘中常. 纳米材料中纳米粒子团聚的原因及解决方法 [J]. *价值工程*, 2017, 36(13): 2.
- Liu Zhongchang. Reason for aggregation of nanoparticles in nanomaterials and solutions[J]. *Value Engineering*, 2017, 36(13): 2.
- [17] Khan I A, Flora J R V, Afrooz A R M N, *et al.* Change in chirality of semiconducting single-walled carbon nanotubes can overcome anionic surfactant stabilisation: a systematic study of aggregation kinetics[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(6): 652.
- [18] 郭鲤, 詹浩, 游玉萍, 等. 预处理及化学镀铜后碳纳米管的微观形貌及成分 [J]. *机械工程材料*, 2019, 43(8): 6.
- Guo Li, Zhan Hao, You Yuping, *et al.* Micromorphology and chemical composition of carbon nanotubes after pretreatment and electroless copper plating[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(8): 6.
- [19] 王艳. 碳纳米管铜复合材料的制备及性能研究 [D]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2019.
- Wang Yan. Study on preparation and properties of carbon nanotube/copper composites[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Aeronautics, 2019.
- [20] Chen B, Li S, Imai H, *et al.* Load transfer strengthening in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via in-situ tensile tests[J]. *Composites Science & Technology*, 2015, 113(5): 1 – 8.
-
- 第一作者: 赵鑫宇, 硕士; 主要从事电子封装技术方面的研究工作; Email: xinyu2648357@163.com.
- 通信作者: 黄永德, 博士, 教授; Email: huangydhm@nchu.edu.cn.

(编辑: 郑红)

[上接第 48 页]

- [24] Yao X, Zhao Y, Huang Y, *et al.* A novel CoCrNi medium entropy alloy enhanced AgCuTi composite filler to braze Kovar alloy and sapphire[J]. *Materials Characterization*, 2023, 197: 112668.
- [25] Guo W, Lin T, He P, *et al.* Microstructure and characterization of interfacial phases of sapphire/sapphire joint bonded using Bi₂O₃-B₂O₃-ZnO glass[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(3): 1073 – 1081.
- [26] Richter S, Zimmermann F, Döring S, *et al.* Ultrashort high repetition rate exposure of dielectric materials: laser bonding of glasses analyzed by micro-Raman spectroscopy[J]. *Applied Physics A*, 2012, 110(1): 9 – 15.
- [27] Lipateva T O, Okhrimchuk A G, Lipatiev A S, *et al.* Robust and adhesive-free joint of Nd: YAG crystals by femtosecond laser-assisted welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107594.
- [28] Zhang Y, Jiang Q, Long M, *et al.* Femtosecond laser-induced periodic structures: mechanisms, techniques, and applications[J]. *Opto-Electronic Science*, 2022, 1(6): 220005.
-
- 第一作者: 蒋青, 硕士; 主要研究方向为蓝宝石异质超快激光连接工艺与机理; Email: jiangq_ng@163.com.
- 通信作者: 杨瑾, 博士, 副教授; Email: jyang@sues.edu.cn.

(编辑: 郑红)