

碳纤维表面沉积铜工艺及其参数影响机理

吕钊钊¹, 沙建军¹, 林冠璋¹, 张兆甫¹, 祖宇飞¹, 代吉祥¹,
鲜玉强², 张伟², 崔鼎², 严从林²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

(2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了改善碳纤维与铝基体的界面润湿性能和抑制基体与纤维的界面反应, 需要在碳纤维表面沉积铜界面层。通过对传统电镀装置的改进, 采用了超声振荡分散的电镀装置在碳纤维表面沉积了铜界面层, 通过对电镀前碳纤维的预处理、电镀液成分的优选调配, 解决了碳纤维铜界面层沉积过程中因纤维束丝难以分散而出现的“夹心”问题(束丝内部纤维难以沉积或不能均匀沉积); 在此基础上, 详细研究了电镀液添加剂、电镀液 pH 值、电镀时间等工艺参数对铜界面层的微观结构、铜界面层质量的影响机制, 为制备碳纤维增强铝基复合材料提供了一定的技术支持。结果表明: 使用适当的添加剂(CuCl₂, C₆H₁₂O₆S₄Na₂, OP-10)能够有效细化铜晶粒, 可获得光滑连续且与碳纤维结合力强的铜界面层; pH 值过高时, 沉积的铜界面层不连续, 适宜的 pH 值为 0.8; 同时也发现适宜条件下铜界面层厚度与电镀时间近似于正比关系。

关键词: 碳纤维; 电镀; 铜界面层; 金属基复合材料

中图分类号: TG174.441

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)12-4010-06

碳纤维由于具有高比强度、高比模量、低密度、低热膨胀系数、优异的热稳定性和耐化学腐蚀等性能特征, 在近年来已广泛应用于各类复合材料中。特别是在金属基复合材料中, 其作为一种新型增强体材料展现了传统材料不可比拟的优越性^[1-4]。

在金属基复合材料中, 特别是铝基复合材料, 与传统铝合金相比, 碳纤维增强铝基复合材料因同时具备碳纤维与铝的优良性能, 高比强度、比模量, 良好的热稳定性及性能与功能的可设计性等特点, 在光机结构、航空航天结构件、发动机耐热和耐磨部件等方面具有巨大的应用潜力, 成为金属基复合材料研究的主流之一^[5,6]。

在碳纤维增强铝基复合材料中, 碳纤维承担载荷且作为最主要的强化因素, 其强化效果的充分发挥关键在于载荷由基体向碳纤维的有效传递, 因此基体与纤维界面的结合状态是载荷有效传递的决定性因素。在相关的碳纤维增强铝基复合材料制备过程研究中发现: 碳纤维与铝熔体之间界面润湿性差导致纤维与基体界面结合状态差, 影响了载荷从基体向碳纤维的有效传递; 高温下铝基体与碳纤维容易发生界面反应导致纤维增强体的损伤, 同时生成针刺状脆性反应物

Al₄C₃, 从而在一定程度上影响材料的综合力学性能; 另一方面, 脆性 Al₄C₃ 相在潮湿或水存在的环境下, 易发生水解反应, 这些问题是制约碳纤维增强铝基复合材料发展的主要因素^[7-9]。

综上所述, 要改善碳纤维与铝基体的界面润湿性能和抑制基体与纤维的界面反应, 需要从界面状况改变和设计入手。特别是在纤维表面涂覆界面层将是非常有效的手段之一, 目前纤维表面涂覆界面层主要有金属和陶瓷两类界面层, 与陶瓷界面层相比, 金属界面层与纤维结合力更强, 不易形成裂纹脱落。常用的金属界面层主要包括铜、镍、钛等, 然而钛界面层制备过程中容易受氧、氮、氢污染, 给界面层制备带来一定的难度, 而且钛界面层相对于铜、镍界面层致密度较低^[10,11]。与镍相比, 铜与铝之间的界面能更低, 有利于降低纤维与铝之间的润湿角, 提高纤维与铝的润湿性; 同时铜能扩散到纤维周围的铝基体中, 在纤维的界面处形成固溶体和金属间化合物, 这些固溶体与金属间化合物能够抑制碳纤维表面碳的扩散, 从而抑制 Al₄C₃ 生成, 使得铝基体能够与碳纤维有效复合, 从而提高碳纤维增强铝基复合材料的环境稳定性和综合力学性能^[12,13]。

收稿日期: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1630129)

作者简介: 吕钊钊, 男, 1990 年生, 博士, 大连理工大学运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116024, E-mail: lvzhaozho@mail.dlut.edu.cn

在碳纤维表面包覆界面层的主要工艺技术途径有电镀和化学镀^[14-16]。相比化学镀而言, 电镀工艺更为高效, 在碳纤维表面包覆界面层过程简单、界面层质量易于控制, 而且涂覆周期短, 电镀液可长时重复利用等优点, 使得该工艺在工业化生产方面技术实施可行性高^[17,18]。尽管利用电镀工艺在碳纤维表面可以制备界面层, 但也面临着一些关键的问题: 在碳纤维束的生产过程中, 纤维束丝表面具有上浆剂, 由于上浆剂的作用和纤维束中大量单丝, 导致纤维束单丝在电镀液中难以有效分散开; 碳纤维单丝直径小 (大约 7 μm), 具有很大的比表面积和很高的长径比以及表面能, 相互之间易受静电力及范德华力的影响, 很容易团聚, 在电镀过程容易对外加电场产生屏蔽效应。上述问题将会导致电镀液中电镀离子浓度分布的不均匀性和纤维束内部的碳纤维单丝界面层涂覆不均匀, 导致纤维束内部容易出现所谓“夹心”问题, 从而在铝基复合材料制备过程中, 导致铝熔体难以充分渗透到纤维束内部, 难以形成铝基体和纤维增强体的有效复合, 从而影响碳纤维增强铝基复合材料的综合性能。同时界面层的厚度和涂覆质量等其它因素也会影响铝基复合材料的性能。

为此, 本研究通过对电镀前碳纤维的预处理、电镀液成分的优选调配和对电镀装置的优化改进, 解决了碳纤维铜界面层沉积过程中因纤维束丝难以分散而出现的“夹心”问题 (束丝内部纤维不能均匀沉积), 在此基础上, 进一步详细研究了电镀工艺参数对铜界面层的微观结构、铜界面层质量的影响机制, 为制备高质量碳纤维增强铝基复合材料提供一些技术支持。

1 实验

实验所用碳纤维为日本东丽公司生产的 T300 型聚丙烯腈基碳纤维, 每束纤维的束丝含量为 3000 根, 单丝平均直径约为 7 μm , 纤维密度为 1.76 g/cm^3 。采用电镀工艺在碳纤维表面进行铜界面层包覆, 硫酸铜溶液被用作电镀母液, 经过大量的实验对比分析后, 对电镀液的成分进行了优选, 优选后电镀液的主要成分包括: 硫酸铜 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 80 g/L), 硫酸 (H_2SO_4 , 68 g/L), 氯化铜 (CuCl_2 , 0.24 g/L), 聚二硫二丙烷磺酸钠 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6\text{S}_4\text{Na}_2$, 0.025 g/L), 乳化剂 (OP-10, 0.4 g/L), 其中 CuCl_2 , $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6\text{S}_4\text{Na}_2$, OP-10 作为添加剂用来改善界面层的质量。

为了更好地解决在纤维表面难以涂覆铜或夹心等问题, 首先要对纤维的表面进行预处理, 工业生产的碳纤维表面往往有一层上浆剂 (sizing), 极其不利于纤维束丝的分散。为此, 首先对碳纤维表面进行除胶

处理。将碳纤维浸入热丙酮中充分浸泡, 然后再将碳纤维干燥后转移至马弗炉中, 在大气氛围中约 400 $^{\circ}\text{C}$ 进行处理, 之后在去离子水中清洗并干燥备用。

在沉积铜界面层的过程中, 将两块纯铜板夹持住并放置在电镀槽的两端作为阳极, 将预处理后的碳纤维夹持后作为阴极, 并放置在两个阳极铜板的中间, 之后注入按优选比例调配的电镀液, 如图 1 所示。为了克服传统电镀中由于碳纤维表面铜离子的析出而引起的电镀液中铜离子浓度的不均匀性, 本研究对电镀装置进行了改进, 在电镀槽下加装了一个超声振荡分散装置, 在超声振荡的作用下, 可以减小纤维束中铜离子的过度消耗而引起的束内和束外之间的铜离子浓度差别; 同时, 由于超声振荡, 使得纤维束中的束丝更易于在电镀液中分散, 便于内外束丝沉积均匀的铜界面层。为了研究电镀工艺参数对铜界面层的微观结构、铜界面层质量及影响机制, 在试验中研究了添加剂、pH 值、电镀时间对铜界面层质量的影响。采用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 对各种工艺参数条件下获得的铜界面层微观组织结构和晶粒尺寸大小进行了观察分析, 用以阐明工艺参数对界面层质量的影响。

2 结果与分析

2.1 预处理对纤维表面微观形貌的影响

图 2 所示为未经预处理的原始碳纤维丝的表面微观形貌和沉积铜界面层后的宏观形貌。从图 2a 可见, 纤维表面光滑平顺。对于 T300 碳纤维而言, 其石墨

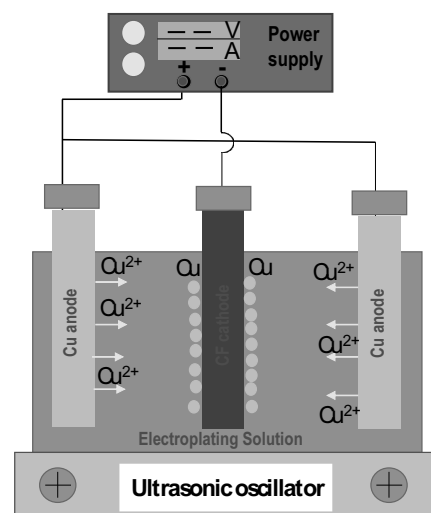


图 1 碳纤维表面沉积铜界面层的电镀装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of electroplating setup used for the deposition of Cu interphase on the surface of carbon fiber

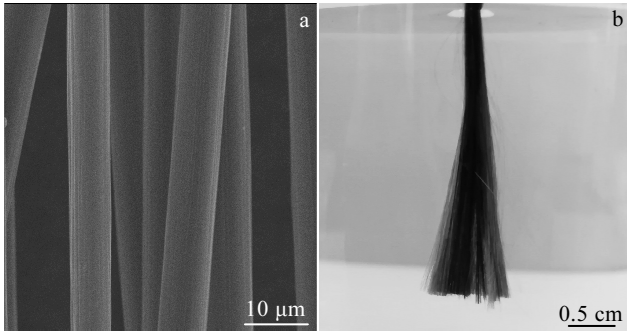


图 2 未经处理碳纤维表面微观形貌及沉积铜界面层宏观形貌

Fig.2 SEM image of the carbon fibers before pretreatment (a) and macrograph of Cu interphase (b)

化程度较低，特别是表面石墨微晶呈乱层结构排列，碳原子之间主要以非极性共价键相结合，导致纤维表面具有一定的化学惰性和疏液性；另一方面，上浆剂的存在也会影响碳纤维的导电性能。在电镀过程中，即使从电镀液中析出的铜原子能够沉积在碳纤维表面上，但优先在一些表面沟槽内具有高导电性的位置沉积，并主要以范德华力的方式与碳纤维表面结合在一起，如此的沉积方式导致铜原子不能均匀而坚固地沉积在纤维表面上。图 2b 为采用预处理前的碳纤维经表面沉积铜后的宏观形貌，可以清晰地看到纤维束丝在去离子水中不易分散开，纤维束内部束丝大部分保持了原始碳纤维的黑色，同时也观察到多根碳纤维束丝同时被沉积铜包覆的现象，出现了“夹心”现象。研究发现即使在水流的快速冲刷下，沉积的铜界面层也容易从纤维表面脱落。

图 3 为碳纤维完成预处理后的表面微观形貌照片

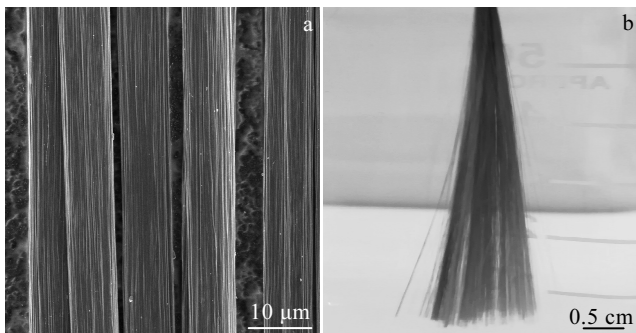


图 3 预处理后碳纤维表面微观形貌及沉积铜界面层宏观形貌
Fig.3 SEM image of the carbon fibers after pretreatment (a) and macrograph of Cu interphase (b)

和沉积铜界面层后的宏观形貌。预处理后的纤维表面粗糙但轮廓清晰，呈现出沿纤维轴向取向的沟槽状条纹如图 3a 所示。在这样的处理条件下，碳纤维表面并不会发生明显的氧化损伤，经测试纤维单丝力学性能基本保持不变（预处理前单丝抗拉伸强度：2.99 GPa，预处理后单丝抗拉伸强度：2.78 GPa）。粗糙的表面将会增大纤维的比表面积和表面能，而在氧化氛围条件下的预处理，将会产生一些极性的含氧官能团，提高了纤维的表面活性，有利于提高沉积铜界面层与碳纤维界面之间的结合力，显著改善了碳纤维与电镀液浸润性。而未除胶的光滑表面和上浆剂的存在，会大大削弱界面结合力。从图 3b 中可以看到，对于预处理的碳纤维，在未约束的一端，碳纤维束丝呈放射状分散，没有观察到束丝内部有“夹心”现象，束丝表面被均匀地沉积上了具有明亮光泽的铜界面层，铜界面层在纤维表面附着牢固。

2.2 添加剂对铜界面层微观结构和形貌的影响

为研究添加剂对铜界面层微观结构和形貌的影响，2 种不同成分的电镀液被用于沉积铜界面层，分别为不含添加剂和含添加剂（CuCl₂，C₆H₁₂O₆S₄Na₂，OP-10）的电镀液。其它电镀工艺参数为：电镀时间 5 min，电流密度 1.0 A/dm²，pH 值 0.8，温度 25 ℃。

图 4 为采用 2 种不同成分电镀液沉积的铜界面层微观形貌。对于不含添加剂沉积的铜界面层如图 4a，4b 所示，铜界面层主要由粗大的铜晶粒堆砌而成，界面层表面粗糙不平，沿纤维轴向在局部位置存在一定的铜聚集形成了结节，如图 4a 所示；从横截面可以看到，铜界面层与纤维表面之间结合较弱，在个别纤维中可观察到界面层与纤维表面之间存在有明显的剥离缝隙，如图 4b 所示。图 4c，4d 为碳纤维在含添加剂的电镀液中沉积铜界面层后的微观形貌。可以看到铜界面层细腻且表面整洁光滑，沿纤维轴向铜界面层厚度分布均匀；从横截面可以看到，铜界面层与碳纤维结合紧密，没有观察到缝隙。

为进一步研究添加剂对铜界面层晶粒尺寸影响，对 2 种电镀液成分条件下获得的铜界面层进行了 X 射线衍射分析，如图 5 所示。沉积的铜界面层出现了尖锐的多晶衍射峰。根据 Scherrer 公式（1）计算了铜的晶粒尺寸^[19]。

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

其中， D 为晶粒尺寸； λ 为 X 射线波长（0.154 056 nm）； β 为实测样品衍射峰半高宽； θ 为布拉格衍射角。经计算发现无添加剂的铜晶粒尺寸为 41.37 nm，含添加剂的铜晶粒尺寸为 28.70 nm，两者晶粒尺寸差别显著，这与 SEM 观察的微观形貌差别是一致的。通过以上

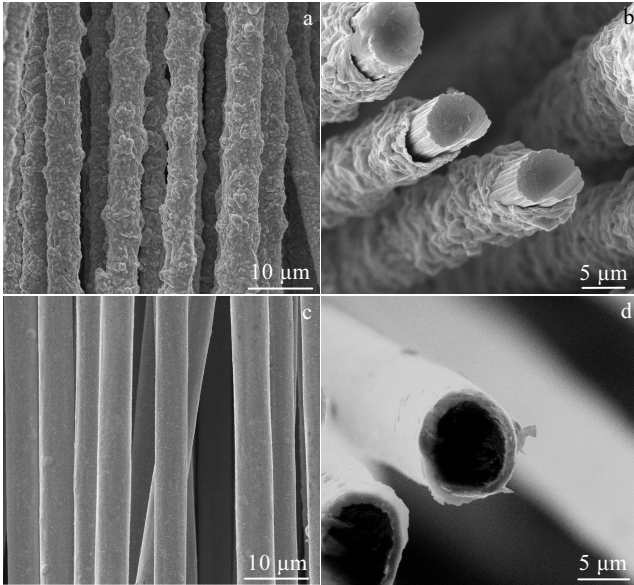


图 4 2 种不同成分镀液获得铜界面层微观形貌

Fig.4 SEM images of Cu interphase deposited in two different electroplating solutions: (a, b) without additives and (c, d) with additives

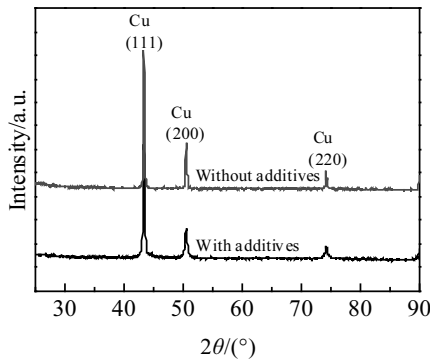


图 5 不同成分镀液下碳纤维表面铜界面层 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of Cu interphase deposited on carbon fibers in different electroplating solutions

分析发现，添加剂对铜界面层微观形貌和结构有重要的影响，每种添加剂在铜界面层沉积过程中起着不同的作用。 CuCl_2 在电镀液中能够离解出 Cl^- ，而 Cl^- 在电镀过程中可以有效抑制阳极发生钝化。钝化主要是由于在电镀过程中阳极会发生一些副反应生成 O_2 ， O_2 能与阳极 Cu 生成 Cu_2O 并吸附在阳极极板表面，阻隔了阳极极板与电镀液的充分接触，使阳极铜溶解速度变慢，从而发生钝化现象，这种钝化现象会减少电镀液中 Cu^{2+} 的浓度，从而对电镀过程与铜界面层质量都

有一定影响^[17]。 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6\text{S}_4\text{Na}_2$ 能够有效抑制铜晶粒长大现象。在没有 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6\text{S}_4\text{Na}_2$ 的电镀液中，电镀过程中阴极表面的铜界面层会有氢气析出，氢气的析出降低了局部区域的电流效率，减慢了 Cu^{2+} 的还原反应速度，在没有氢气析出的区域 Cu^{2+} 以正常的还原反应速度沉积在纤维表面，因而导致了碳纤维表面形成了粗糙和结节的沉积铜界面层，而凸出的铜界面层区域较凹陷的铜界面层区域活性高，如此以致凸出区域面上 Cu^{2+} 形核和沉积速率更快，从而导致表面粗糙度加剧， Cu 晶粒尺寸比较大。而在有 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6\text{S}_4\text{Na}_2$ 的电镀液中， $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6\text{S}_4\text{Na}_2$ 能够率先吸附到凸出区域的铜界面层面上，减缓 Cu^{2+} 在凸界面层面上的形核和沉积速率，使得 Cu 晶粒细化。 OP-10 能够减少极板与电镀液之间的固-液表面张力，这样一方面能够降低极板与电镀液之间的电阻，另一方面能够抑制氢泡在铜界面层表面滞留，从而提高了铜界面层的细腻性和致密性。

2.3 电镀液 pH 值对铜界面层微观形貌的影响

为研究 pH 值对铜界面层微观结构的影响，通过调节电镀液中 H_2SO_4 的含量获得了不同 pH 值的电镀液。其它电镀工艺参数为：电镀时间 5 min，电流密度 0.8 A/dm^2 ，温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 6 为不同 pH 值条件下沉积的铜界面层微观形貌。当 $\text{pH}=0.8$ 时，从铜界面层微观形貌中可以看出镀层均匀致密，铜界面层连续细腻且与纤维结合紧密，如图 6a 所示；当 $\text{pH}=3$ 时，球形铜颗粒呈非规则链条状堆积在纤维表面，大部分纤维表面没有被铜界面层包覆，纤维表面裸露在外，如图 6b 所示。

为进一步研究 pH 值对铜界面层沉积效率的影响，选取同等质量的碳纤维，对不同 pH 值条件下的铜界面层沉积速率做了计算和比较分析。在 $\text{pH}=0.8$ 条件下，铜沉积速率约为 2.97 mg/min ；然而 $\text{pH}=3$ 条件下铜沉积速率仅为 2.53 mg/min 。

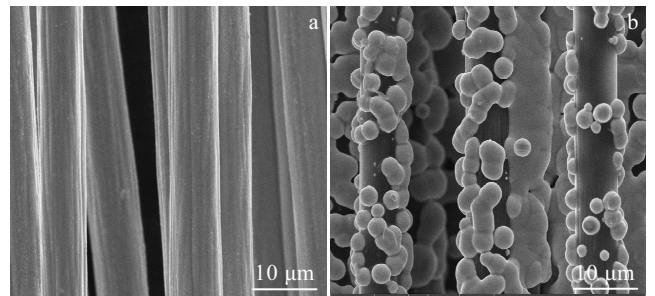


图 6 不同 pH 值条件下沉积铜界面层的微观形貌

Fig.6 Surface morphologies of Cu interphase deposited in different electroplating solutions: (a) $\text{pH}=0.8$ and (b) $\text{pH}=3$

可见,不同的 pH 值不仅对沉积铜界面层的微观形貌产生影响,而且对铜界面层的沉积速率具有一定的影响。由于 pH 值受 H_2SO_4 含量影响, H_2SO_4 作为一种强电解质,在电解液中容易电离为离子,对溶液电导率有一定影响。 H_2SO_4 含量较低时,电镀液的电导率较低,电子在电镀液中迁移难度较大,导致阴极 Cu^{2+} 无法及时获得电子,从而不能在纤维表面均匀沉积铜原子。

2.4 电镀时间对镀层微观结构影响

为研究电镀时间对铜界面层微观结构和形貌的影响,通过改变电镀时间(4~10 min)对碳纤维表面实施了铜界面层沉积。其它电镀工艺参数为:电流密度 0.8 A/dm^2 , pH 值 0.8, 温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 7 为不同电镀时间条件下获得铜界面层微观形貌。通过观察发现随着电镀的时间增加,铜界面层厚度不断增加。测量了不同时间条件下铜界面层的厚度:时间 4 min 时,铜界面层厚度为 $0.55 \text{ }\mu\text{m}$; 6 min 时,铜界面层厚度为 $0.78 \text{ }\mu\text{m}$; 8 min 时,铜界面层厚度为 $1.09 \text{ }\mu\text{m}$; 10 min 时,铜界面层厚度为 $1.37 \text{ }\mu\text{m}$ 。分析发现铜界面层厚度与电镀时间接近于正比关系,表明在该电镀工艺条件下,对电镀液中 Cu^{2+} 的利用率是比较高的。因此当采用具有该界面层的碳纤维在制备金属基复合材料时,需要根据工艺条件,来选择合适的电镀时间来沉积满足工艺和性能所需求的界面层厚度。

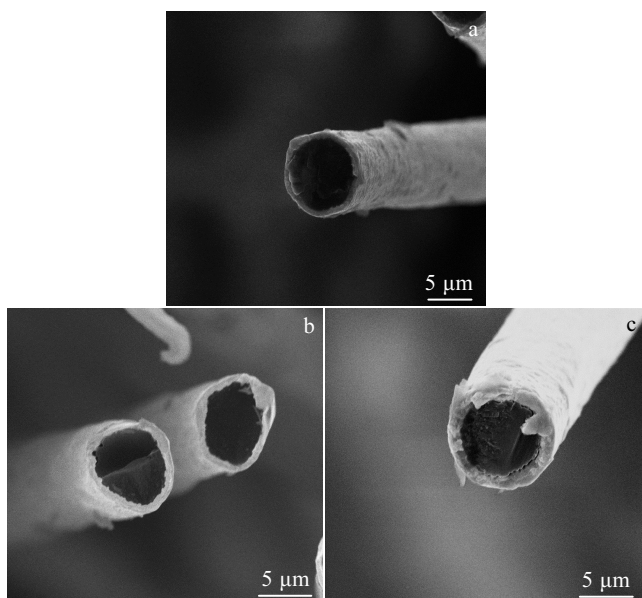


图 7 不同电镀时间条件下获得铜界面层微观形貌

Fig.7 SEM images of Cu interphase deposited in electroplating solution for different plating time: (a) 4 min, (b) 6 min, and (c) 10 min

3 结 论

1) 采用超声振荡分散的电镀装置在碳纤维表面成功沉积了铜界面层,超声振荡不仅可以使得纤维束中的束丝更易于在电镀液中分散,而且可以减小纤维束内和束外之间铜离子的浓度差别,有利于沉积均匀的铜界面层,解决了碳纤维在电镀过程中出现的“夹心”问题,提高了铜界面层的沉积效率和质量。

2) 碳纤维预处理后,纤维表面变得粗糙,有利于增大纤维的比表面积和表面能,显著改善了碳纤维与电镀液浸润性,有利于提高沉积铜界面层与碳纤维界面之间的结合力,而未预处理的碳纤维由于光滑表面和上浆剂的存在,会削弱界面结合力。

3) 在电镀液中加入合适的添加剂能够促使铜晶粒细化,得到光滑均匀且结合力强的铜界面层;当 pH 值较大时,沉积的铜界面层不连续并呈颗粒状堆积,同时 pH 值过高会导致铜界面层沉积速率较慢;通过改变电镀时间发现,沉积铜界面层厚度与电镀时间近于正比关系。

参考文献 References

- [1] Frank E, Hermanutz F, Buchmeiser M R. *Macromolecular Materials and Engineering*[J], 2012, 297(6): 493
- [2] Soutis C. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 412(1-2): 171
- [3] Shirvanimoghaddam K, Hamim S U, Akbari M K *et al. Composites: Part A*[J], 2017, 92: 70
- [4] Sha J J, Li J, Wang S H *et al. Materials & Design*[J], 2015, 75: 160
- [5] Rawal S P. *JOM*[J], 2001, 53(4): 14
- [6] Wu Gaohui(武高辉), Zhang Yunhe(张云鹤), Chen Guoqin(陈国钦) *et al. Manned Spaceflight(载人航天)*[J], 2012, 18(1): 73
- [7] Wang Xu, Jiang Daming, Wu Guohui *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 497(1-2): 31
- [8] Deng Chunfeng, Zhang Xuexi, Wang Dezun. *Materials Letters* [J], 2007, 61(3): 904
- [9] Trivedi M K, Tallapragada R M, Branton A *et al. Aeronautics & Aerospace Engineering*[J], 2015, 4(1): 1
- [10] Li Changjun, Li Wenya. *Surface and Coatings Technology*[J], 2003, 167(2-3): 278
- [11] Cheng Zhengming(程正明), Deng Chunming(邓春明), Lin Qiusheng(林秋生) *et al. Thermal Spray Technology(热喷涂技术)*[J], 2013, 5(4): 17
- [12] Silvain J F, Prout A, Lahaye M *et al. Composites Part A:*

- Applied Science and Manufacturing*[J], 2003, 34(12): 1143 8108
- [13] Tanaka Y, Kajihara M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 459(1-2): 101
- [14] Abraham S, Pai B C, Satyanarayana K G *et al. Journal of Materials Science*[J], 1990, 25: 2839
- [15] Xu Chunju, Zhou Ruihua, Chen Huiyu *et al. J Mater Sci: Mater Electron*[J], 2014, 25: 46 384
- [16] Fei Yan, Liu Liu, Ming Li *et al. J Mater Sci*[J], 2018, 53: 8108
- [17] Hua Zhongsheng, Liu Yihan, Yao Guangchun *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2012, 21(3): 324
- [18] Zhang Junjia, Liu Shichao, Zhang Yingxin *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 226: 78
- [19] Lenka R K, Mahata T, Sinha P K *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 466(1-2): 326

Deposition of Cu on Carbon Fibers and Influence Mechanisms

Lv Zhaozhao¹, Sha Jianjun¹, Lin Guanzhang¹, Zhang Zhaofu¹, Zu Yufei¹,
Dai Jixiang¹, Xian Yuqiang², Zhang Wei², Cui Ding², Yan Conglin²

(1. State Key Laboratory of Structural Analyses for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to improve the wetting behavior and refrain the chemical reaction, to prepare an interphase between carbon fiber and aluminum matrix is essential. In the present paper, conventional electroplating equipment was improved to deposit copper interphase on the carbon fibers. It was found that the improved equipment could effectively prepare a homogeneous interphase on carbon fibers with the help of fiber pretreatment. On this basis, the influence of plating additives, pH value of electroplating solution and plating time on the quality of copper interphase was investigated. The scanning electron microscopy and X-ray diffractometer were applied to characterize the microstructure and the consisting phase of interphase. The results indicate that a fine copper interphase with good interfacial bonding strength can be uniformly deposited on the carbon fibers with the help of plating additives. For obtaining a continuous copper interphase, the pH value of 0.8 is appropriate. Besides, the interphase thickness almost linearly increases with the increase of plating time under the appropriate condition.

Key words: carbon fiber; electroplating; Cu interphase; metal matrix composite

Corresponding author: Sha Jianjun, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Structural Analyses for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China, E-mail: jjsha@dlut.edu.cn