

NaOH 和 NiSO₄ 添加剂浓度对短碳纤维 化学镀银结构和导电率的影响

左鹏, 张治国, 李卫

(暨南大学 先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广州 510632)

摘要: **目的** 制备镀层均匀、结合力好的短碳纤维镀银层。**方法** 以葡萄糖为还原剂, 在短碳纤维表面进行化学镀银, 研究了 NaOH 浓度、NiSO₄ 添加剂浓度对短碳纤维化学镀银层结构和性能的影响。采用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜对镀银碳纤维的结构、形貌和成分进行分析, 测试了镀银后纤维的密度、导电率。采用冷热循环法评估镀层与碳纤维的结合强度。**结果** 增大 NaOH 浓度可提高银氨络合物离子浓度, 加快了反应速率。合适的 NaOH 浓度有助于获得高质量的镀银层, 低浓度和高浓度 NaOH 条件下均会产生漏镀和镀层不均匀现象, 导致镀银碳纤维性能的降低。NiSO₄ 添加剂加入到溶液中后, Ni²⁺ 将优先吸附在碳纤维表面, 这不仅增大了碳纤维表面银单质的形核率, 同时也降低了反应速率。合适的 NiSO₄ 浓度有助于改善银镀层的质量, 低浓度和高浓度 NiSO₄ 条件下得到的镀层性能均不足。**结论** NaOH 质量浓度为 7 g/L 时获得的镀银层分布均匀, 结晶度良好, 密度较大, 导电率也较好。NiSO₄ 浓度为 5×10⁻⁵ mol/L 时能获得光滑、均匀、平整的镀层, 密度最大, 导电率最优。

关键词: 碳纤维; 葡萄糖; 化学镀银; NaOH; NiSO₄

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0153-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.023

Effects of Concentration of NaOH and NiSO₄ Additives on Structure and Electrical Conductivity of Silver-coated Short Carbon Fibers by Electroless Plating

ZUO Peng, ZHANG Zhi-guo, LI Wei

(Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare the short carbon fiber silver layer with good uniformity and binding force. The silver-coated short carbon fibers were prepared by plating methods with glucose as reducing agent. The effects of NaOH and NiSO₄ concentrations on the microstructure and properties of the silver-plated layers were studied. X-ray diffraction method and scanning electron microscopy were used to analyze the microstructure, morphology and composition of the electroless plated silver layers. The density and conductivity of silver-plated fibers were tested. The hot and cold cycling test method was em-

收稿日期: 2018-11-05; 修订日期: 2019-02-19

Received: 2018-11-05; **Revised:** 2019-02-19

基金项目: 广东省自然科学基金 (2016A030313101); 广东省科技计划项目 (2017B090903005); 广州市科技计划 (201704030045)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2016A030313101) and the Guangdong Province Science and Technology Plan (2017B090903005) and the Science and Technology Planning Project of Guangzhou (201704030045)

作者简介: 左鹏 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高强高导铜基复合材料。

Biography: ZUO Peng (1992—), Male, Master, Research focus: high strength and high conductivity copper matrix composite.

通讯作者: 张治国 (1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为金属基复合材料。邮箱: zhigzhang@jnu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Zhi-guo (1977—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: metal matrix composites. E-mail: zhigzhang@jnu.edu.cn

ployed to evaluate the bonding strength between the silver-plated layers and the short carbon fibers. Increasing NaOH concentrations led to the increase of the silver-ammonium complex ions, and thus accelerated the reaction rate. Proper NaOH concentration was beneficial to obtaining high-quality silver-plated layer. However, the leakage plating phenomena and coating unevenness occurred under both low and high concentrations of NaOH, which reduced the performance of silver-plated carbon fiber. The Ni^{2+} ions in NiSO_4 additives could be adsorbed on the surface of the carbon fibers prior to other particles. This could improve the nucleation rates during silver depositions. However, the high concentrations of NiSO_4 additives depressed the reaction rate of silver depositions. When NaOH concentration is 7 g/L, uniform silver-plated layer with good crystallinity, large density and better conductivity can be obtained. When 5×10^{-5} mol/L NiSO_4 is selected, the smooth, uniform and flat silver-plated layer with the highest density and the best conductivity can be produced.

KEY WORDS: carbon fiber; glucose; electroless silver plating; NaOH; NiSO_4

碳纤维是有机纤维经碳化或石墨化处理后得到的具有微晶结构的纤维,它不但具有碳材料的一些本征特性,还保留了纤维的高强度、可加工性,在现代工业中具有重要的应用价值。碳纤维具有高比强度、比模量、优异的导热、导电性能、低的热膨胀系数和良好的自润滑性能,可作为复合材料中优良的增强体材料^[1]。然而,因碳纤维表面缺少活性官能团,使得其与复合材料中基体之间的结合强度低,从而制约了复合材料整体力学性能的提升,这一点在碳纤维增强金属基复合材料中表现得尤为突出。为解决此问题,碳纤维在使用前需要进行表面改性^[2-4]。为此,碳纤维化学镀铜^[5-6]、化学镀镍^[7]、化学镀铬^[8]等方法得到了广泛的研究和应用。

金属银具有优异的导电性、导热性和耐腐蚀性。在纤维表面镀银,不仅可以提升纤维本身的导电性能,而且可以拓展其应用领域^[9]。Wang W.等^[10]在聚丙烯腈(PAN)纤维表面化学镀银,使得此镀银 PAN 纤维具有优异的表面抗菌性能。刘延坤等^[11]发现在碳纤维表面镀银可使其电阻率降低一个数量级,拓展了其在电磁屏蔽材料中的应用。关华等^[12]通过在碳纤维布表面化学镀银,为发展新型碳纤维基无源干扰材料提供了科学依据。

此外,研究表明,复合材料中的碳纤维增强体经镀银处理后能明显改善纤维和基体之间的界面结合。

Wang C.等^[13]运用电化学沉积和电泳技术制备了银纳米颗粒和氧化石墨烯双层增强碳纤维,并以此纤维增强环氧树脂,结果表明碳纤维与基体的结合情况得到了极大的改善,使得复合材料的力学性能得到了极大的提高。He J.等^[14]采用经表面化学镀银的碳纤维增强环氧树脂,制备了界面可控的碳纤维增强环氧树脂复合材料。

然而,碳纤维化学镀银处理过程中存在反应速度过快^[15]、镀液稳定性较差^[16]、银利用率不高导致镀层不致密以及均匀性差等问题,改善的方法主要有控制碱的浓度和加入添加剂等方法。同时,化学镀银溶液无法重复使用,提高镀层的厚度和结合力成为了镀银研究的主要方向^[17]。因此,本文拟以葡萄糖替代目前在化学镀银中常用的甲醛作为还原剂,这不仅有助于增加反应的可控性,而且有利于改善化学镀对环境的污染。本文重点研究了 NaOH 浓度、 NiSO_4 添加剂浓度等因素对碳纤维化学镀银效果的影响。

1 实验

1.1 实验材料

短碳纤维原料(1 mm× ϕ 4 μm)购自河北沧州中丽新材料科技有限公司。化学镀银过程中所用的化学试剂如表 1 所示。

表 1 化学镀银过程中使用的试剂

Tab.1 Reagents used in the electroless silver plating process

Name	Chemical formula	Purity	Manufacturer
Silver nitrate	AgNO_3	AR	National Pharmaceutical Reagent Co., Ltd.
Glucose	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	AR	Guangzhou Chemical Reagent Co., Ltd.
Ammonia	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	AR	Guangzhou Chemical Reagent Co., Ltd.
Absolute ethanol	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	AR	Guangzhou Chemical Reagent Co., Ltd.
Sodium hydroxide	NaOH	AR	Aladdin Reagent Co., Ltd.
Nickel sulfate	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	AR	Tianjin Damao Chemical Reagent Co., Ltd.

1.2 碳纤维预处理

碳纤维表面惰性大,无催化活性,不利于直接化

学镀,因此在进行化学镀之前需对碳纤维进行预处理^[18]。本文中碳纤维的预处理过程由除胶、粗化、敏化、活化等步骤组成,具体工艺过程如表 2 所示。

表 2 碳纤维预处理过程及工艺
Tab.2 Carbon fiber pretreatment process and technology

Procedure	Pretreatment process	Process
1	Degumming	Calcined at 400 °C for 30 min, then ultrasonic cleaning for 30 min.
2	Roughening	The mixture was stirred magnetically for 1 h in a mixed acid consisting of concentrated sulfuric acid concentrated nitric acid (2 : 1 Vol) and then washed with deionized water until neutral.
3	Sensitized	Soak in a solution of 20 g/L SnCl ₂ , 40 mL/L HCl at 60 °C for 40 min, then rinse with deionized water.
4	Activation	After immersing for 40 min at 60 °C in a mixed solution consisting of 0.2 g/L PdCl ₂ , 10 mL/L HCl, it was washed with deionized water.

1.3 碳纤维化学镀银

镀液组成为：硝酸银 4 g/L，葡萄糖 7 g/L，无水乙醇 50 mL/L，碳纤维装载量 2.5 g/L，氨水适量。实验中首先研究 NaOH 浓度对镀银效果的影响，并在优化得到的 NaOH 浓度基础上，进一步研究 NiSO₄ 添加剂浓度对镀银效果的影响。在镀液配制过程中，银氨溶液和还原组分溶液分别单独配制，至化学镀实

施时再取等体积逐渐混合。银氨溶液和还原溶液的配方如表 3 所示。配制银氨溶液时，先向硝酸银溶液中边滴加氨水边搅拌溶液，直至溶液刚好变澄清，然后加入 NaOH，此时溶液变浑浊，然后再次滴加氨水至溶液重新变澄清。化学镀过程中，温度为 35 °C，先将一定量的碳纤维经超声分散于还原组分溶液中，然后用滴管缓慢加入银氨溶液，同时采用超声分散。银氨溶液加入完毕后停止超声，静置至反应完成。

表 3 银氨溶液和还原溶液的配方
Tab.3 Formulation of silver ammonia solution and reduction solution

Solution	Silver ammonia solution	Reduction solution
Formula	Deionized water (50 mL), silver nitrate (0.4 g), ammonia water (moderate amount), NaOH (variable)	Deionized water (45 mL), glucose (0.7 g), absolute ethanol (5 mL)

1.4 测试与表征

采用扫描电子显微镜 (SEM, Phenom XL, Phenom World, Netherlands) 观察镀银碳纤维的表面形貌，分析镀层与基体的结合形态。采用 X 射线衍射仪 (XRD, UltimaIV, Rigaku, Japan) 分析镀银碳纤维的物相组成。镀层与碳纤维的结合状况通过冷热循环来确定^[2]，具体为：将镀银碳纤维置于 100 °C 下保温 25 min，然后迅速将镀银碳纤维转移至 0~5 °C 下保温 5 min，如此循环测试 5 次后，通过 SEM 观察是否有镀层剥落。

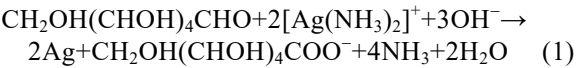
采用排水法测量镀银碳纤维的密度，依此推断纤维表面增重，具体方法为：将镀银碳纤维分散到液态树脂中，固化后用排水法测定其密度并与相同条件下固化的树脂密度比较，进而计算出镀银碳纤维的密度。采用 CT-3031 导电率仪来表征镀银碳纤维的导电性^[19]，首先将 0.1 g 的镀银碳纤维均匀分散到 50 mL 无水乙醇（导电率为 0 mS/cm）和 50 mL（导电率为 0.28 mS/cm）自来水组成的混合溶液（导电率为 0.04 mS/cm）中，然后用导电率仪测定溶液导电率。

2 结果与讨论

2.1 NaOH 浓度对镀银效果的影响

采用葡萄糖作为还原剂进行化学镀银的反应机

理为：



依式 (1) 可知，化学镀银过程中会不断消耗 OH⁻，镀液中添加的 NaOH 提供了额外的 OH⁻，其浓度可影响反应的驱动力以及反应速度。图 1 为不同 NaOH 质量浓度（6、7、8、9 g/L）下制备的镀银碳纤维形貌，可以看出镀覆完整的碳纤维表面都能够均匀地覆盖一层银单质（高倍图）。当 NaOH 质量浓度为 6 g/L 时，碳纤维表面出现了明显的镀覆不均匀现象（图 1a），表明银氨溶液中由于 OH⁻ 浓度不足导致银氨络离子数量不够，从而使镀液中的反应较缓慢，碳纤维表面易出现漏镀现象。当 NaOH 质量浓度为 7 g/L 时，镀银效果良好，碳纤维表面都均匀地覆盖了一层银单质（图 1b），表明镀液中的反应速度适中。继续增大 NaOH 质量浓度至 8 g/L 或 9 g/L 时，可见到大量银块单独或依附于纤维形成，碳纤维镀覆不均匀和漏镀的现象更为突出（图 1c、d），主要原因是 OH⁻ 浓度的提升导致大量银氨络离子生成，加快了镀液中的反应速度。实验中可以观察到大量银单质析出并游离于镀液中，导致沉积于碳纤维表面的银减少，从而造成碳纤维漏镀或不均匀镀覆。

图 2 是原始碳纤维和不同 NaOH 浓度下制备的镀银碳纤维的 XRD 图谱，分析可知，碳纤维表面镀上了一层面心立方结构的银，银的各衍射峰峰形均较尖

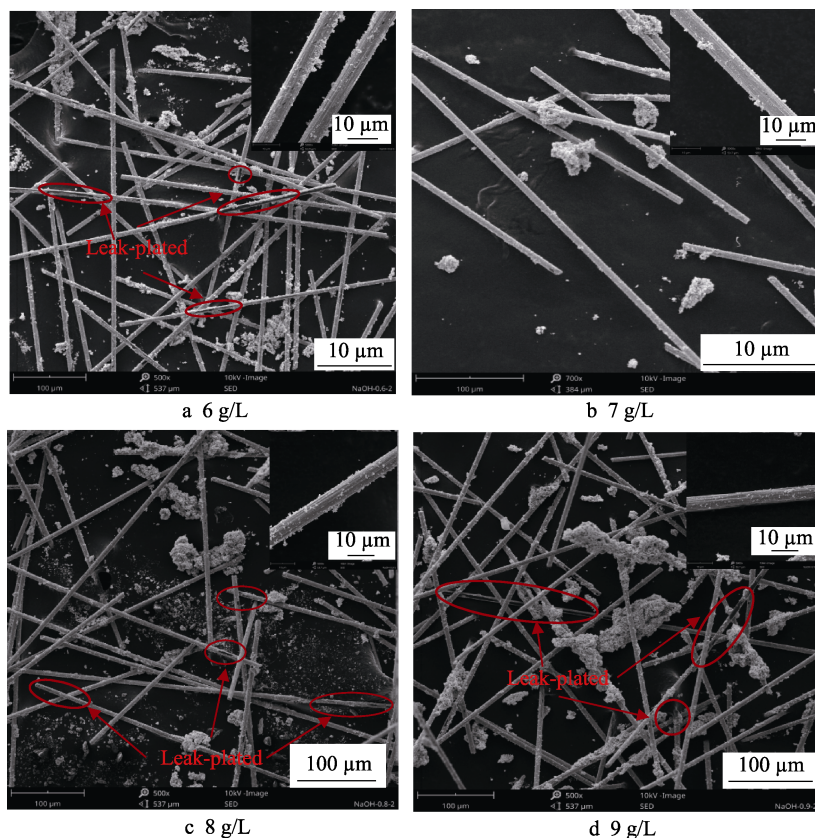


图1 不同 NaOH 浓度下制备的镀银碳纤维形貌

Fig.1 SEM images of silver-coated carbon fibers prepared at different NaOH concentrations

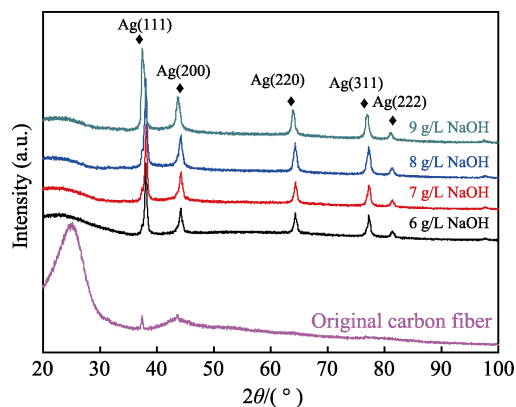
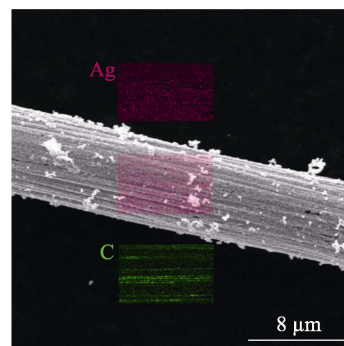


图2 原始碳纤维和不同 NaOH 浓度下制备的镀银碳纤维的 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of raw carbon fiber and silver-coated carbon fiber prepared at different NaOH concentrations

锐，峰宽较窄，表明镀层结晶度良好。XRD 没有检测出其他杂质。图3为 NaOH 质量浓度为 7 g/L 时制备的镀银碳纤维表面能谱分析结果，可以看出碳纤维表面仅有碳 (C) 和银 (Ag) 两种元素，镀层分布较为均匀。

不同 NaOH 浓度下制备的镀银碳纤维密度如图4所示。与未镀银的碳纤维密度 (1.73 g/cm^3) 相比，镀银碳纤维密度明显增加，最大为 2.705 g/cm^3 。随着 NaOH 浓度的增加，镀银碳纤维的密度先增加后减小。结合镀层表面的形貌分析结果可知，由于在



a 镀银碳纤维表面扫描元素分布图

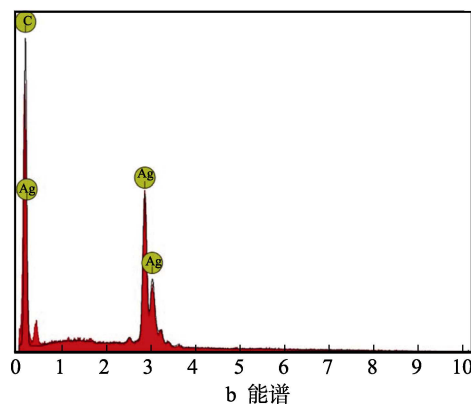


图3 NaOH 质量浓度为 7 g/L 时的镀银碳纤维的面扫描图像及能谱

Fig.3 Element mapping and EDS analysis of silver-coated carbon fiber prepared with 7 g/L NaOH

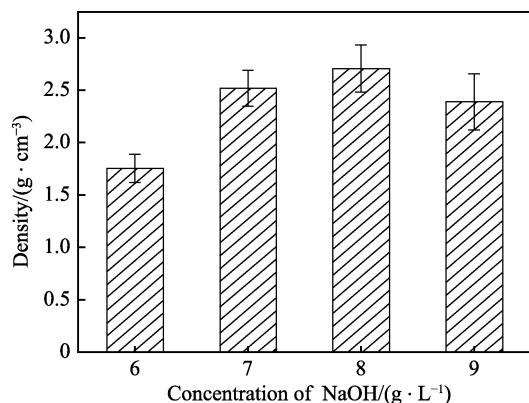


图 4 不同 NaOH 浓度下制备的镀银碳纤维的密度
Fig.4 Density of silver-coated carbon fibers prepared at different NaOH concentrations

NaOH 浓度过低和过高时均容易出现漏镀和镀层不均匀现象,因此在这些条件下,碳纤维表层镀覆的银减少,致使其密度减少。

图 5 为含镀银碳纤维混合溶液的导电率随镀银碳纤维制备条件的演化趋势图。与密度变化趋势类似,混合溶液的导电率也随着 NaOH 浓度的增加先增加后减小,其最大导电率为 0.072 mS/cm,相较于未加镀银碳纤维溶液的导电率 (0.04 mS/cm) 有了较大提升,说明碳纤维镀银对于提升其导电率有较大帮助。

制备的镀银碳纤维经冷热循环测试后会出现镀层剥落现象,这种情形对于低浓度 NaOH (6 g/L) 和高浓度 NaOH (9 g/L) 制备的碳纤维尤为明显 (图 6a、c、d)。这些结果说明,较低和较高的镀覆速率均不利于形成与基体有良好结合的镀银层,只有控制反应条件使镀液中的反应速度适中时,镀层才具有较好的结合力。

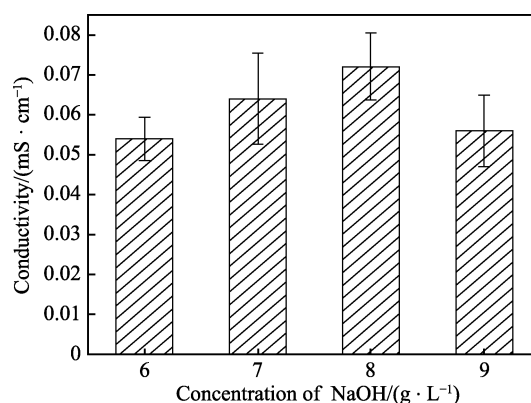


图 5 不同 NaOH 浓度下制备的镀银碳纤维加入到混合溶液中后溶液的导电率
Fig.5 Conductivity of mixed solution added with silver coated carbon fibers prepared at different NaOH concentrations

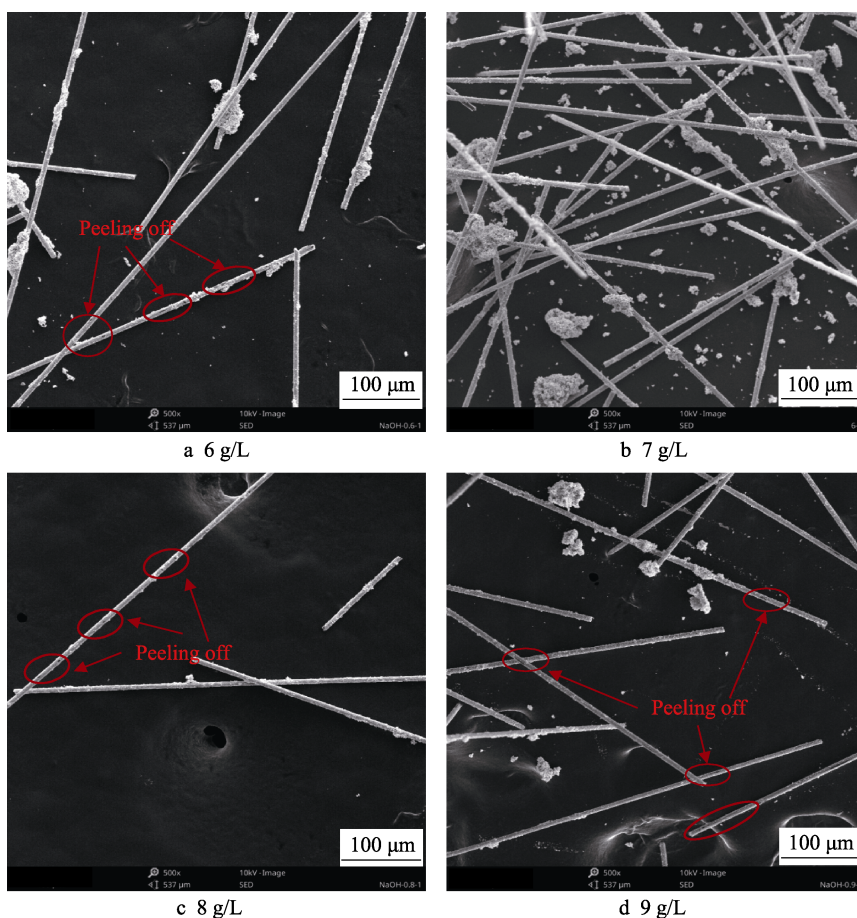


图 6 不同 NaOH 浓度下制备的镀银碳纤维冷热循环测试后的表面形貌图

Fig.6 Surface topographies of the silver-coated carbon fibers prepared at different NaOH concentrations after hot and cold cycle test

综合冷热循环测试前后镀银碳纤维的表面形貌和镀层与碳纤维的结合情况,以及镀银碳纤维的密度和导电性,得出最佳的 NaOH 质量浓度为 7 g/L。

2.2 NiSO_4 添加剂浓度对镀银效果的影响

为了使制备的碳纤维镀银层更加均匀、致密,选择向银氨溶液中添加不同浓度的 NiSO_4 作为添加剂^[20]。图 7 为不同浓度 NiSO_4 添加剂对碳纤维表面银镀层形貌影响的 SEM 图。与未加入添加剂制备的镀银碳纤维

维形貌相比(图 1),加入 NiSO_4 添加剂后,碳纤维表面形成的银颗粒之间非常容易形成相互联系,获得致密的镀层,且镀银层相对均匀,能实现完全包覆(图 7)。此外,硫酸镍的加入还导致从镀液中直接析出大块银单质的现象减少,有助于获得平整、光滑的镀层(图 7a、b)。然而, NiSO_4 浓度过高时会出现镀覆不均匀的现象(图 7c、d)。进一步对制备的镀银碳纤维相和成分的分析表明,镀层中没有含 Ni 的相存在,且在镀层中也没有发现 Ni 元素。

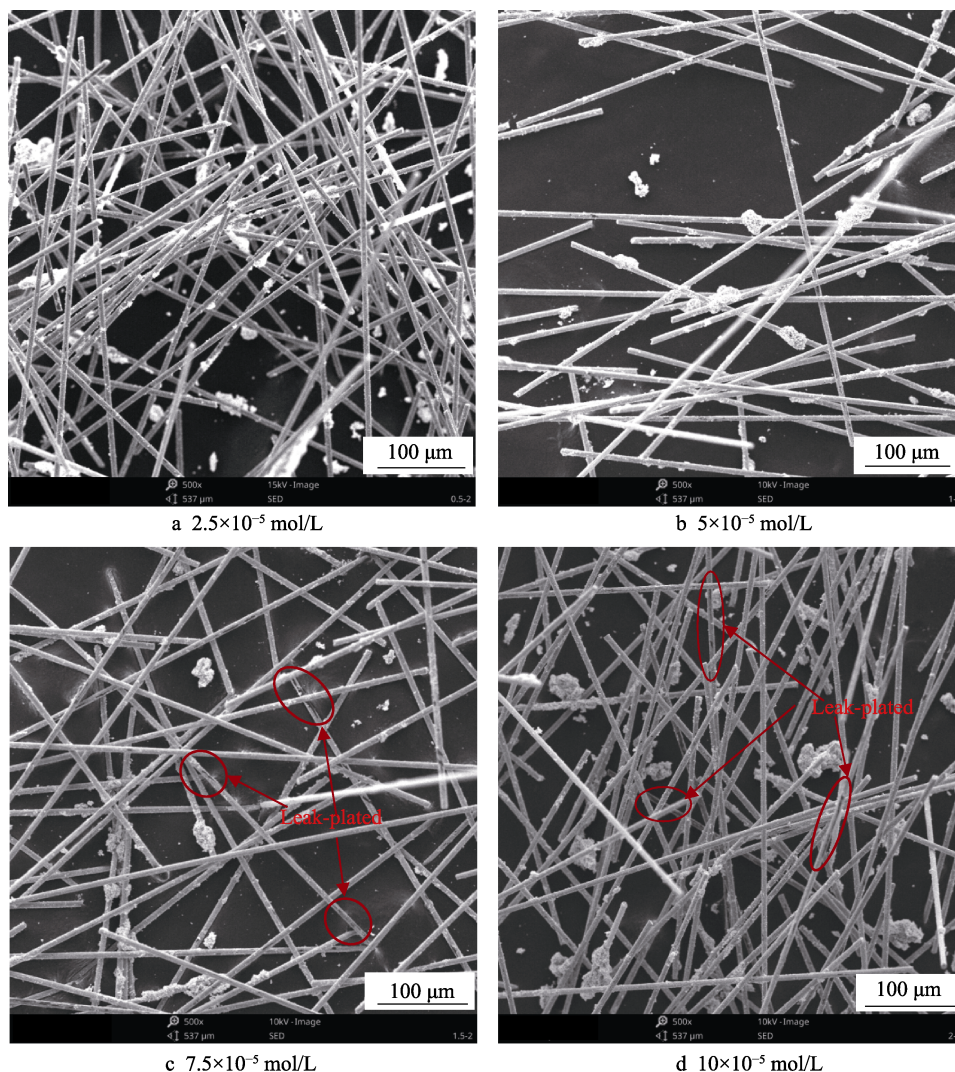


图 7 不同 NiSO_4 浓度下制备的镀银碳纤维的表面形貌图

Fig.7 Surface topography of silver-coated carbon fibers prepared at different NiSO_4 concentrations

NiSO_4 添加剂浓度对制备镀银碳纤维密度的影响如图 8 所示。与未添加 NiSO_4 制备的镀银碳纤维最大密度 (2.705 g/cm^3) 相比,硫酸镍的添加可明显增大镀银碳纤维的密度。其中,当硫酸镍浓度为 $5 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 时,可获得镀银碳纤维最大密度,为 3.460 g/cm^3 ,提升约 30%。这些结果说明,硫酸镍能调控镀液中的形核位置和反应速度,有助于改善碳纤维镀银层的质量。然而,随着硫酸镍浓度的进一步增加,镀银碳纤维的密度有所减小,这主要与碳纤维表

层的漏镀和镀层不均匀现象有关。

图 9 为镀银碳纤维加入到乙醇水混合溶液后的导电率随 NiSO_4 浓度的演化趋势。添加硫酸镍后,含有镀银碳纤维的混合溶液的导电率略微增加,当达到最大导电率 (0.066 mS/cm) 后,继续增加硫酸镍浓度将使混合溶液的导电率减小。冷热循环测试的结果表明,加入 NiSO_4 添加剂后,镀层剥落现象有所缓解。

综合冷热循环测试前后镀银碳纤维的表面形貌和镀层与碳纤维的结合情况,以及镀银碳纤维的密度

和导电性, 得出最佳的 NiSO₄ 浓度为 5×10^{-5} mol/L。

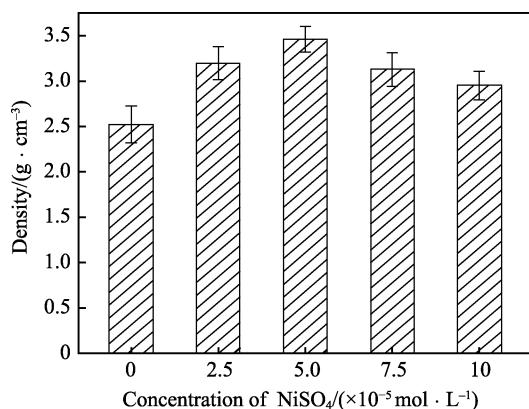


图 8 不同 NiSO₄ 浓度下制备的镀银碳纤维的密度
Fig.8 Density of silver-coated carbon fibers prepared at different NiSO₄ concentrations

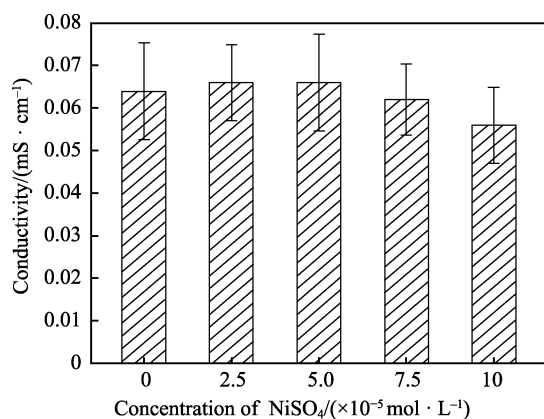


图 9 不同 NiSO₄ 浓度下制备的银碳纤维加入到混合溶液中后溶液的导电率
Fig.9 Conductivity of the mixed solution added with silver-coated carbon fibers prepared at different NiSO₄ concentrations

2.3 讨论

本实验中的化学镀银过程为氧化还原反应, 反应物 NaOH 的浓度以及 NiSO₄ 添加剂的量对产物的组成影响不大, 但对化学反应动力学过程的影响较大。从化学反应式 (1) 可知, 银氨溶液中 OH⁻ 的增加将促进硝酸银与氨水络合, 增大银氨溶液中银氨络合物粒子的数量, 因此, 增大银氨溶液中 OH⁻ 浓度可增大反应速度, 加速生成银单质。当银离子从液相中被还原而析出之后, 将发生形核和长大两个过程^[21]。本实验中的形核主要以非均匀形核为主, 核心既可以是碳纤维表面经敏化后的核心 (如 Pd), 也可以是溶液中的杂质。短碳纤维化学镀银的目的是使大量银单质依附于碳纤维表面形核并生长。这样, 当纤维表面的银颗粒生长到一定尺寸后, 将相互接触连接, 从而在纤维表面形成层状结构的银, 实现制备银镀层的目的。当镀液中反应速度较低时, 生成的银大部分可依附于碳纤维表面形核生长, 但形核速率低, 导致后继析出的

银优先依附于碳纤维表面已经形核长大的银上生长, 并最终向溶液中生长, 这样反而不利于沉积出的银在碳纤维表面覆盖, 从而出现漏镀现象。图 1 中银块裹带碳纤维的现象由此而产生。另一方面, 当银单质析出速度过大时, 将有大量银以镀液中的杂质和自催化核心为核心形核长大, 将直接在镀液中形成银块, 也不利于在碳纤维表面形成完整的镀银层。因此, 适当的 NaOH 浓度才有利于形成碳纤维表层的镀银包覆。本实验中, NaOH 质量浓度优选 7 g/L。

NiSO₄ 为无机化合物, 添加到银氨溶液中将形成 Ni²⁺ 和 SO₄²⁻, 不会对银氨络合离子的形成产生影响。加入到镀液中后因与碳纤维中碳的相互作用较强, 将优先吸附在碳纤维表面, 成为后继银单质形核的核心。这将极大增加碳纤维表面的形核能力, 使大部分反应生成的银依附于碳纤维表面生长, 间接导致从镀液中析出的大块银单质减少, 有利于在碳纤维表面获得平整光滑的镀银层。同时 Ni²⁺ 吸附在碳纤维表面会“掩盖”一部分催化活性点, 起到了降低反应速率的作用, 同样有利于提高镀层质量, 获得光滑、均匀、致密的镀层。然而, Ni²⁺ 浓度过高时会使得镀液过于稳定, 表现出严重的“抑制”作用, 使反应速率过低。化学镀银反应进程变得缓慢, 银单质不能够充分地在碳纤维表面结晶生长, 反而使得镀银效果变差。因此, NiSO₄ 添加剂中起作用的主要是 Ni²⁺, 阴离子所起作用不大。胡建^[20]在化学镀银溶液中加入 Ni(NO₃)₂ 添加剂后, 成功地制备出了包覆完整、均匀、致密的镀银碳纳米纤维, 并且发现对镀银效果产生影响的是 Ni²⁺, 与阴离子无关。本实验中 NiSO₄ 对短碳纤维化学镀银效果的影响机理与其类似。文中 (2.5~5) $\times 10^{-5}$ mol/L 的 NiSO₄ 浓度较为适中。

3 结论

1) NaOH 浓度对短碳纤维化学镀银的反应速率有显著影响, 浓度过低和过高都会出现漏镀和镀层不均匀的现象, 随着 NaOH 浓度的增加, 镀银碳纤维的密度、导电率均先增加后减小。适中的 NaOH 浓度有利于得到结合良好的镀银层。文中 NaOH 质量浓度为 7 g/L 较为合适。

2) NiSO₄ 添加剂增大了银单质在碳纤维表面的形核率, 同时降低了镀银过程的反应速率。随着 NiSO₄ 添加剂浓度的增加, 镀银碳纤维的密度先增加后减小, 导电率变化不大。适中的 NiSO₄ 添加剂浓度有利于获得光滑、均匀、致密的镀层。文中 (2.5 ~ 5) $\times 10^{-5}$ mol/L 的 NiSO₄ 浓度较为合适。

参考文献:

- [1] 唐谊平, 刘磊, 赵海军, 等. 短碳纤维增强铜基复合材

- 料的摩擦磨损性能研究[J]. 材料工程, 2007(4): 53-56.
- TANG Yi-ping, LIU Lei, ZHAO Hai-jun, et al. Study of friction and wear properties of Cu/short carbon fibers composites[J]. Journal of materials engineering, 2007(4): 53-56.
- [2] 高嵩, 姚广春. 化学镀铜前碳纤维预处理的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(7): 43-45.
- GAO Song, YAO Guang-chun. Pretreatment of carbon fiber for electroless copper plating[J]. Materials protection, 2005, 38(7): 43-45.
- [3] ZHANG Y H, WU G H. Interface and thermal expansion of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2148-2151.
- [4] 易增博, 冯利邦, 郝相忠, 等. 表面处理对碳纤维及其复合材料性能的影响[J]. 材料研究学报, 2015, 29(1): 67-74.
- YI Zeng-bo, FENG Li-bang, HAO Xiang-zhong, et al. Effect of surface treatment on properties of carbon fiber and reinforced composites[J]. Chinese journal of materials research, 2015, 29(1): 67-74.
- [5] CHEN H, LIU G, XU C, et al. Copper@carbon fiber composites prepared by a simple electroless plating technique[J]. Materials letters, 2016, 173: 211-213.
- [6] LIU L, TANG Y, ZHAO H, et al. Fabrication and properties of short carbon fibers reinforced copper matrix composites[J]. Journal of materials science, 2008, 43(3): 974-979.
- [7] RAMS J, UREÑA A, ESCALERA M D, et al. Electroless nickel coated short carbon fibres in aluminium matrix composites[J]. Composites part A: Applied science & manufacturing, 2007, 38(2): 566-575.
- [8] WAN Y Z, WANG Y L, LUO H L, et al. Effect of metal diffusion barrier on thermal stability of metal-coated carbon fibers[J]. Journal of materials science, 2001, 36(11): 2809-2814.
- [9] 唐爱东, 李传常, 周涛. 化学镀银在材料表面金属化中的应用[J]. 电镀与精饰, 2007, 26(10): 20-24.
- TANG Ai-dong, LI Chuan-chang, ZHOU Tao. Application of electroless silver plating to metallization of material surface[J]. Electroplating & finishing, 2007, 26(10): 20-24.
- [10] WANG W, LI W, GAO C, et al. A novel preparation of silver-plated polyacrylonitrile fibers functionalized with antibacterial and electromagnetic shielding properties[J]. Applied surface science, 2015, 342: 120-126.
- [11] 刘延坤, 冯玉杰, 高培源, 等. 碳纤维表面化学镀银工艺的研究[C]// 全国功能材料学术年会专辑. 兰州: [出版者不详], 2006.
- LIU Yan-kun, FENG Yu-jie, GAO Pei-yuan, et al. Study on electroless silver plating on carbon fiber surface[C]// National Functional Materials Academic Annual Conference Album. Lanzhou: [s.n], 2006.
- [12] 关华, 潘功配, 侯伟, 等. 碳纤维布化学镀银工艺的优化[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(1): 20-23.
- GUAN Hua, PAN Gong-pei, HOU Wei, et al. Optimization of electroless silver plating process on carbon fiber fabric[J]. Electroplating & finishing, 2008, 27(1): 20-23.
- [13] WANG C, ZHAO M, LI J, et al. Silver nanoparticles/graphene oxide decorated carbon fiber synergistic reinforcement in epoxy-based composites[J]. Polymer, 2017, 131: 263-271.
- [14] HE J, HUANG Y, LI L, et al. Controlled interface between carbon fiber and epoxy by molecular self-assembly method[J]. Materials chemistry & physics, 2006, 99(2): 388-393.
- [15] YU D, MU S, LIU L, et al. Preparation of electroless silver plating on aramid fiber with good conductivity and adhesion strength[J]. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 2015, 483: 53-59.
- [16] CAI J, LAN M, ZHANG D, et al. Electrical resistivity and dielectric properties of helical microorganism cells coated with silver by electroless plating[J]. Applied surface science, 2012, 258(22): 8769-8774.
- [17] 黄少强, 邱文革, 李生华. 非金属材料表面化学镀银[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(1): 75-80.
- HUANG Shao-qiang, QIU Wen-ge, LI Sheng-hua. Electroless silver plating on the surface of nonmetallic materials[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(1): 75-80.
- [18] 张乾, 谢发勤. 碳纤维的表面改性研究进展[J]. 金属热处理, 2001, 26(8): 1-4.
- ZHANG Qian, XIE Fa-qin. Review of carbon fiber's surface modification progress[J]. Heat treatment of metals, 2001, 26(8): 1-4.
- [19] 曾大海, 张鹏, 李卫. 石墨纤维表面镀铜工艺及性能研究[J]. 功能材料, 2016, 47(4): 218-224.
- ZENG Da-hai, ZHANG Peng, LI Wei. Study on copper plating and properties on surface of graphite fiber[J]. Journal of functional materials, 2016, 47(4): 218-224.
- [20] 胡健. 银/碳复合纳米纤维的制备及其导电性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- HU Jian. Research on preparation of silver/carbon composite nanofibers and their conductive properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [21] MERGA G, WILSON R, LYNN G, et al. Redox catalysis on "naked" silver nanoparticles[J]. Physics chemistry, 2007, 111(33): 12220-12226.