

# Research on the Hybrid Fiber Electromagnetic Shielding Composites Preparation and Performance

Peng Liu<sup>1</sup>, Fuqiang Wang<sup>1,2</sup>, Yan Liu<sup>1</sup>, Jiandong Zhang<sup>1</sup>, Xiaowen Zhao<sup>1</sup>, Qinglin Su<sup>1</sup>,  
Donghong Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>Key Laboratory of the Technology of Electromagnetic Protection, Taiyuan Shanxi

Email: 616-616@163.com

Received: May 11<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 25<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Based on the fiber nickel-plating coating process, the conductive carbon fiber can be made. The nickel-plating surface microstructure of the carbon fiber was observed by SEM. The hybrid fiber was made of the carbon fiber and the nickel-coated carbon fiber by the autoclave equipment. By electro-magnetic shielding effectiveness test (100 kHz - 18 GHz) and environment adaptability test, the results showed that electro-magnetic shielding effectiveness and anti-adverse environmental adaptability of the hybrid fiber composites were better than normal carbon fiber composites.

## Keywords

Hybrid Fiber Composite Material, Nickel-Coated Carbon Fiber, Shielding Effectiveness,  
Environmental Adaptability

---

# 混杂纤维电磁防护复合材料制备工艺及性能 研究

刘 鹏<sup>1</sup>, 王富强<sup>1,2</sup>, 刘 艳<sup>1</sup>, 张建东<sup>1</sup>, 赵小文<sup>1</sup>, 苏青林<sup>1</sup>, 王东红<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

<sup>2</sup>电磁防护技术山西省重点实验室, 山西 太原

Email: 616-616@163.com

收稿日期: 2018年5月11日; 录用日期: 2018年5月25日; 发布日期: 2018年6月6日

## 摘要

本文通过碳纤维电镀镍工艺得到了电磁性能优异的镀镍碳纤维；对镀镍碳纤维进行SEM电镜等测试，观察其镀层表面形貌特征；利用热压罐成型设备，利用制得的镀镍纤维，制备了一种混杂纤维电磁防护功能一体化复合材料，通过对其电磁屏蔽效能(100 kHz~18 GHz)、环境适应性等进行测试，表明该混杂纤维复合材料的电磁屏蔽性能及耐恶劣环境性能优于普通碳纤维复合材料。

## 关键词

混杂纤维复合材料，镀镍碳纤维，屏蔽效能，环境适应性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

碳纤维复合材料具有重量轻、模量高、热膨胀系数低、耐腐蚀等优异特点，在机箱、机柜壳体等支撑结构件上得到了广泛的应用。为了提高碳纤维复合材料的电磁屏蔽效能，常采用镀镍碳纤维作为复合材料的功能填料。本文选用镀镍碳纤维、碳纤维和玻璃纤维为主要增强材料，采用热压罐成型工艺，制备一种混杂纤维电磁防护复合材料。通过测试混杂纤维复合材料的电磁防护性能和环境适应性能，发现该类复合材料具备优异的环境适应性，同时其电磁防护性能得到了很大的提高，可广泛应用于武器装备机箱、机柜壳体制造，例如雷达的电子设备高频机箱，满足电子设备研制的小型化、轻型化、高机动性要求，提高机箱的电磁防护性能，从而保证电子设备在恶劣环境下最大程度发挥电子器件的性能。

## 2. 实验部分

### 2.1. 原材料

原材料如表 1 所示。

Table 1. The raw materials

表 1. 原材料

名称	规格
碳纤维	T700, 12K
玻璃纤维	12K
硫酸镍	市售
硼酸	市售
氯化镍	市售
十二烷基苯磺酸钠	市售
浓 HCl	市售
HNO <sub>3</sub>	市售
丙酮	市售
环氧树脂	E51
固化剂	T31

## 2.2. 碳纤维表面镀镍

### 2.2.1. 镀镍工艺

目前碳纤维表面金属化大致分为物理方法和化学方法两大类。物理方法包括溅射法、离子镀膜法、金属粉末喷涂和金属涂敷等。化学法主要采用化学镀和电镀。其中电镀法具有设备简单、成本低、可连续生产等特点[1]，是一种有效的碳纤维表面金属化技术。

采用电镀镍法实现金属化的过程是：

碳纤维 → 去胶 → 水洗 → 酸洗 → 电镀镍 → 水洗 → 烘干。

### 2.2.2. 关键技术

在混杂纤维电磁防护功能一体化复合材料制备的过程中，纤维表面金属化处理和所选用的成型工艺手段是其关键技术。其中主要包括两个方面：镀镍配方和参数选取，成型工艺工序和参数选取。

### 2.2.3. 镀镍纤维制备

镀镍液的配方如下：

硫酸镍：155 g/L

硼酸：30 g/L

氯化镍：65 g/L

十二烷基苯磺酸钠：0.2 g/L

镀镍工艺：

用蒸馏水清洗碳纤维的表面，用 pH 试纸测试至 pH 值中性；将处理后的碳纤维在丙酮中浸泡 120 min 去除上浆剂，再用蒸馏水清洗至 pH 值中性；将碳纤维在浓度为 50% (V/V)、温度为  $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  的  $\text{HNO}_3$  溶液中浸泡 120 min，再用蒸馏水清洗至 pH 值中性；用浓 HCl 调节溶液的 pH 值为 4~5。将酸洗处理后的碳纤维连接直流电源正极、金属镍板连接直流电源负极，共同置于镀镍工艺系统中。将镍块放入镀槽底部。接通电源，设置电压 3.0 V、电流密度为  $0.5 \text{ A}/\text{dm}^2$ ，调整阴极、阳极间的距离为  $10 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$ ，保持溶液温度为  $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，沉积时间为 10 min；沉积结束之后，将镀镍碳纤维用蒸馏水反复冲洗，烘干。

镀镍碳纤维应满足以下技术要求：

1) 碳纤维成束状，箝食直径 7 微米，每束都有几千根，在碳纤上镀镍，不仅要使每根上的镀层均匀，而且整束纤维要保持松散。2) 镍在碳纤维基体上附着力要好，保证镍在电解镀过程中不脱落。3) 控制镀层在适当厚度内，保证碳纤维的硬度[2]。

## 2.3. 电磁防护复合材料制备

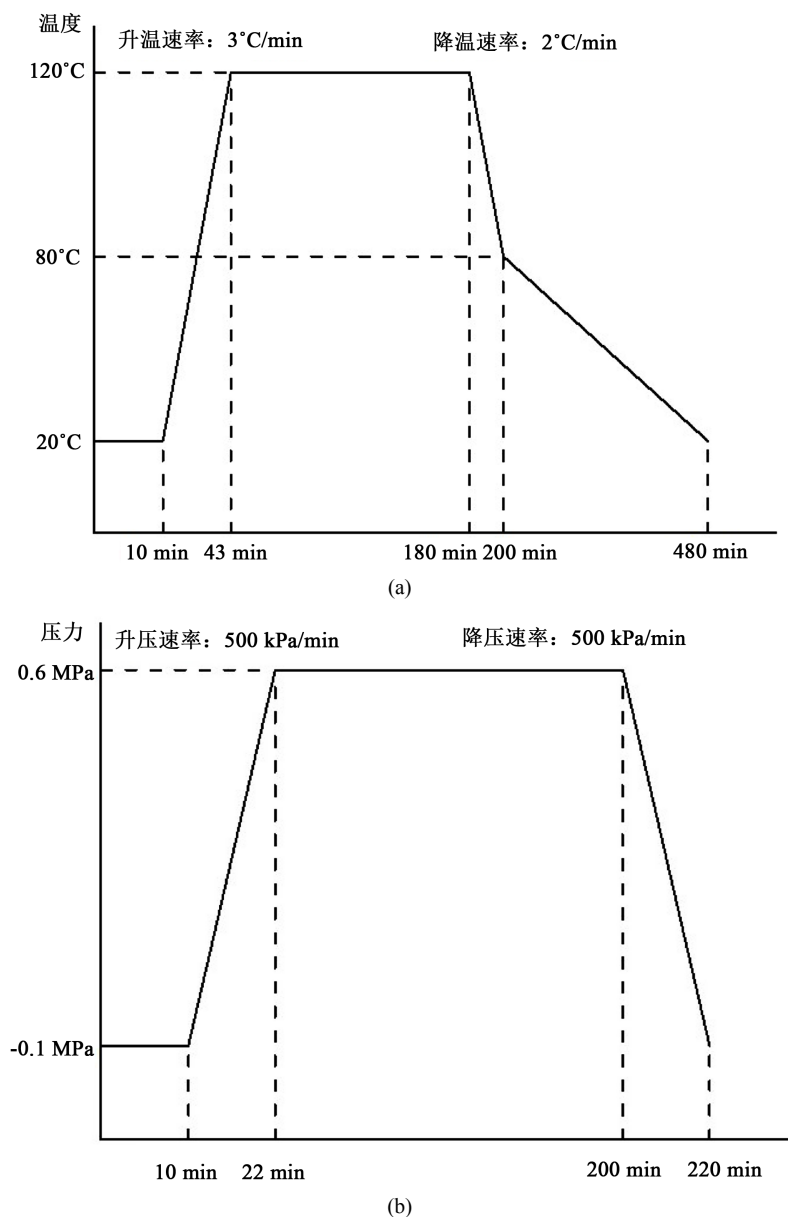
热压罐成型工艺流程：

碳纤维和镀镍碳纤维 → 刷胶 → 铺层 → 气密封 → 设置温度压力参数 → 固化 → 脱模。

本文中选取的树脂体系为双酚 A 型环氧树脂 E51，固化剂为胺类固化剂 T31。

热压罐工艺参数设置：

确保真空气路无泄漏，真空度仪表显示值大于  $-95 \text{ kPa}$ 。设置温度  $20^{\circ}\text{C}$ ，保温时间 10 min；设置温度  $120^{\circ}\text{C}$ ，升温速率  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，保温时间 137 min；设置温度  $80^{\circ}\text{C}$ ，降温速率  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；设置压力 0.6 MPa，升压速率为  $50 \text{ kPa}/\text{min}$ ，保压时间 178 min；降低压力，设置降压速率  $50 \text{ kPa}/\text{min}$ 。待固化结束后，将碳纤维复合材料从模具脱出。温度曲线和压力曲线如图 1 所示。



**Figure 1.** Temperature curve and pressure curve for autoclave process. (a) Temperature curve; (b) Pressure curve

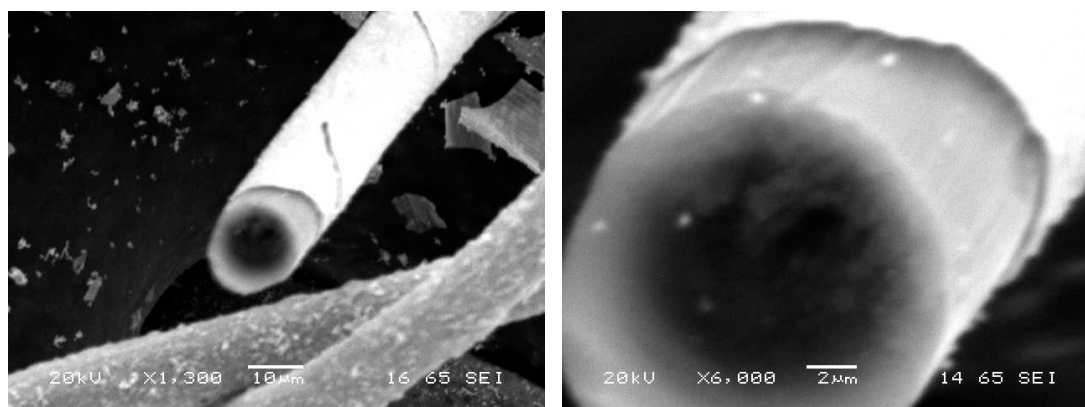
**图 1.** 热压罐成型温度曲线和压力曲线。(a) 温度曲线；(b) 压力曲线

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 形貌分析

本文中制备的镀镍碳纤维，要求镀层厚度在  $0.3\ \mu\text{m}$  左右，可通过控制电流强度和电镀时间两个参数来实现。电流过小，电镀时间应相应延长。电流过大，镍原子沉积速度增大，容易使镀层疏松，结合力变差。

本文利用扫描电镜对碳纤维电解镀镍纤维进行了形貌分析，从镀镍碳纤维的表面形貌来看，镀镍工艺参数选取合理，镀镍效果较好，纤维表面镀层缺陷少，镍层与纤维基体结合牢固，未见有明显脱落，如图 2 所示。



**Figure 2.** The compact coated fiber microstructure by SEM  
**图 2.** 表面镀层均匀的 SEM 形貌

工艺参数选取不合理,如镀镍电流过小或过大、镀镍时间过长或过短,都会影响到镀镍工艺的效果,可造成镀镍层与基体严重脱离、结合力差等问题。镀镍表面镀镍层发生碎裂,镀镍层从纤维基体脱落严重,如图 3 所示。

### 3.2. 纤维电阻率测试

对镀镍碳纤维的纤维电阻率进行测试,结果见表 2。

通过测试结果发现,在电流密度为  $0.5 \text{ A/dm}^2$ ,电镀时间为 10 min 时,镀镍碳纤维电阻率达到最小。电流密度过小或过大,镀镍时间的过长或过短都会引起纤维电阻率的上升。可以看到,本测试与形貌分析结果基本一致。

### 3.3. 屏蔽效能测试

采用 GB/T 12190-2006 电磁屏蔽室屏蔽效能[3]的测量方法,测试原理如图 4 所示。

本文选取了 100 kHz、10 MHz、450 MHz、1 GHz、10 GHz、18 GHz 六个频点对混杂纤维电磁防护功能复合材料样品进行了屏蔽效能测试,测试结果如表 3。

### 3.4. 环境适应性测试

经过温度冲击试验(低温:  $-55^\circ\text{C}$ , 高温:  $150^\circ\text{C}$ , 1 h 为一循环, 5 次循环结束)、低温贮存试验(低温:  $-55^\circ\text{C}$ 、48 h)、高温贮存试验(高温:  $150^\circ\text{C}$ , 48 h)、湿热试验(温度:  $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , 相对湿度: 90%~95%, 96 h)后,混杂纤维电磁防护功能一体化复合材料的表面裂纹面积不大于总面积的 5%; 经过盐雾试验(盐溶液浓度:  $5\% \pm 1\%$ , pH: 6.5~7.2, 沉降率:  $(1\sim 2) \text{ ml}/80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h}$ , 温度:  $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , 48 h)后,表面的锈蚀面积不大于总面积的 5%。环境试验前后,复合材料的表面如图 5 所示。

上述测试结果满足 GJB150.3A-2009 军用装备实验室环境试验方法的第三部分: 高温试验[4]、GJB150.4A-2009 军用装备实验室环境试验方法的第四部分: 低温试验[5]、GJB150.5A-2009 军用装备实验室环境试验方法的第五部分: 温度冲击试验[6]、GJB150.4A-2009 军用装备实验室环境试验方法的第十一部分: 盐雾试验[7]、GJB360B-2009 电子及电气元件试验方法[8]中规定的相应指标要求。

## 4. 结论

通过碳纤维表面镀镍关键技术的研究,确定了碳纤维电解镀镍的配方及镀镍的工艺参数,制备了镀镍碳纤维。通过对镀镍碳纤维进行形貌分析和纤维线电阻测试,发现在电流密度为  $0.5 \text{ A/dm}^2$ ,电镀时间

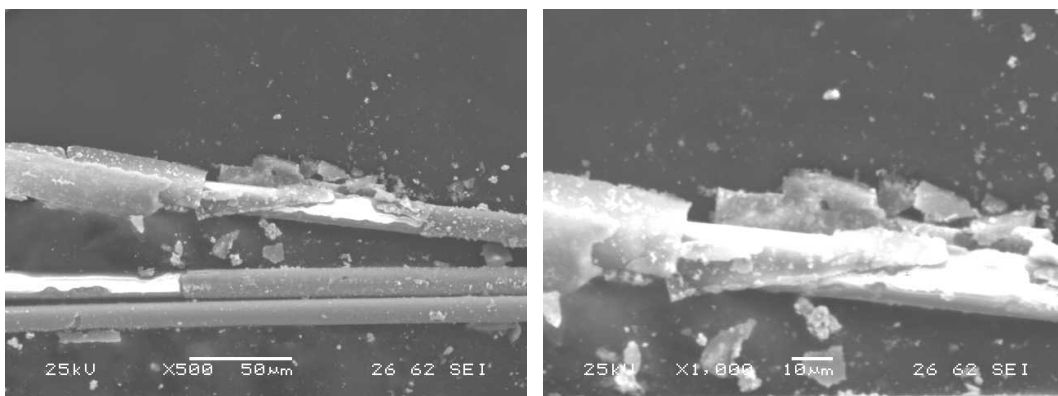


Figure 3. The stripping coated fiber microstructure by SEM

图 3. 表面镀层脱落、剥离的 SEM 形貌

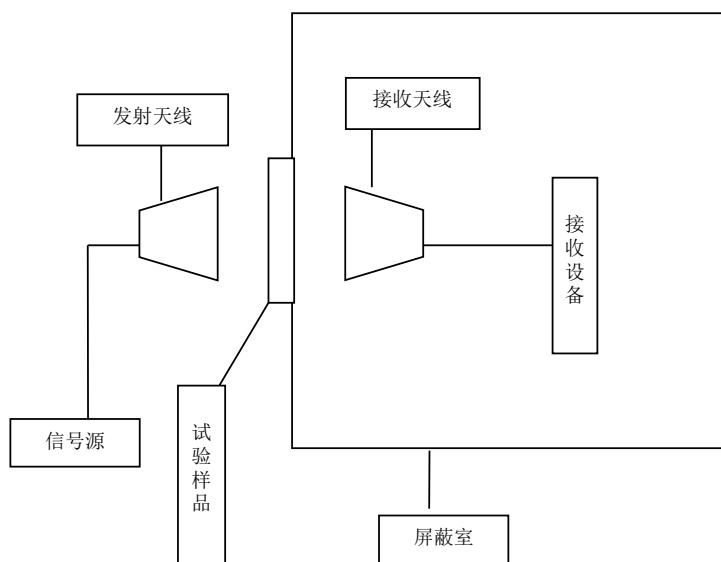


Figure 4. The method for shielding effectiveness of shielding enclosure

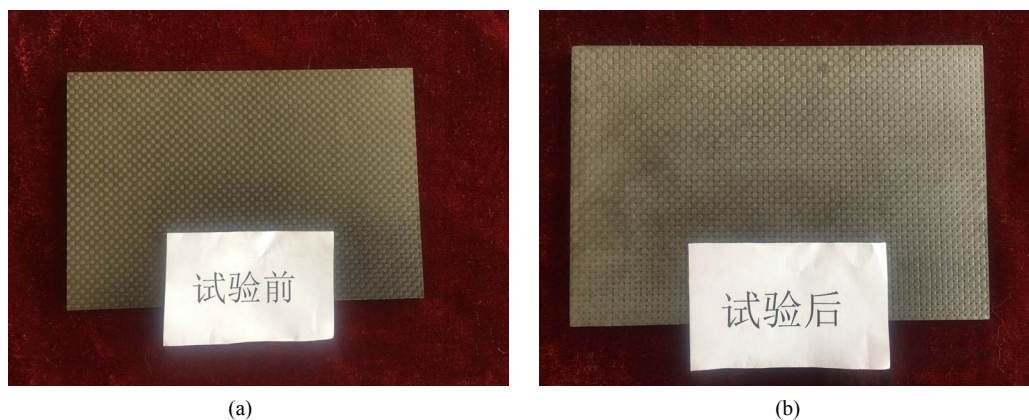
图 4. 屏蔽室法测试原理图

Table 2. The relation among current density, time of nickel plating and fiber resistivity

表 2. 电流密度、镀镍时间与纤维电阻率的关系

电流密度/A/dm <sup>2</sup>	镀镍时间/min	纤维电阻率/μΩ·m
0.3	7	0.557
0.3	10	0.151
0.3	13	0.251
0.5	7	0.158
0.5	10	0.089
0.5	13	0.233
0.7	7	0.265
0.7	10	0.134
0.7	13	0.458





**Figure 5.** The surface comparison before and after the environmental test. (a) Before the environmental test; (b) After the environmental test

**图 5.** 环境试验前后复合材料表面对比图。(a) 环境试验前; (b) 环境试验后

**Table 3.** Results of the shielding effectiveness

**表 3.** 屏蔽效能测试结果

频点	100 kHz	10 MHz	450 MHz	1 GHz	10 GHz	18 GHz
水平极化	76	90	84	95	94	70
垂直极化	77	86	85	93	95	72

为 10 min 时, 镀镍效果最好。通过热压罐成型工艺, 以镀镍碳纤维和碳纤维为主要增强材料, 制备得到了混杂纤维电磁防护功能一体化复合材料, 其屏蔽效能和环境适应性均得到了有效提高。在 100 kHz~18 GHz, 选取六个频点, 其屏蔽效能达到 72 dB~95 dB, 复合材料的电磁防护性能得到极大提高。

## 基金项目

技术推动项目、中国网安创新。

## 参考文献

- [1] 韩变华, 罗天骄, 姚广春, 刘宜汉. 碳纤维镀镍[J]. 有色矿冶, 2006, 22(2): 37-40.
- [2] 李晓天, 吕广宏, 姜汉成, 刘志成. 碳纤维基材连续电镀[J]. 材料保护, 1995, 28(7): 26-27.
- [3] 陈世钢, 蒋全兴, 张戈, 赵磊, 周忠元. GB/T12190-2006 电磁屏蔽室屏蔽效能[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [4] 吴彦灵, 祝耀昌. GJB150.3A-2009 军用装备实验室环境试验方法 第 3 部分: 高温试验[S]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [5] 吴彦灵, 祝耀昌. GJB150.4A-2009 军用装备实验室环境试验方法 第 4 部分: 低温试验[S]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [6] 吴彦灵, 祝耀昌. GJB150.5A-2009 军用装备实验室环境试验方法 第 5 部分: 温度冲击试验[S]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [7] 邓国华, 夏越美, 刘凤吉, 李晓钢, 陈明. GJB150.11A-2009 军用装备实验室环境试验方法 第 11 部分: 盐雾试验[S]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [8] 周钦浣, 张秋, 王静, 王宝友, 陈士新, 刘砚君. GJB360B-2009 电子及电气元件试验方法[S]. 北京: 总装备部军标出版社, 2009.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)