

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.03.011

正交设计法优化碳纤维表面连续镀镍工艺及性能

赵晓莉^{1,2}, 齐暑华¹, 刘建军², 韩笑²

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 西安康本材料有限公司, 西安 710025)

摘要: 采用正交设计法, 以镀镍碳纤维镀层电阻率为考察目标, 对碳纤维表面连续电镀镍工艺参数进行优化。采用 $L_9(3^3)$ 正交试验对碳纤维表面进行电镀镍处理, 电镀温度、电流密度、电镀时间作为 3 个因素。采用冷热循环法测试镀镍碳纤维镀层和碳纤维的结合力, 采用 X 射线光电子能谱仪研究镀镍碳纤维镀层的元素组成及化学状态, 采用电子万能材料试验机测试镀镍碳纤维的力学性能。结果表明: 最优的碳纤维表面镀镍处理条件是: 电镀温度 50℃, 电流密度 0.5 A/dm², 电镀时间 6 min。镀镍碳纤维镀层和碳纤维是通过 Ni—C—O 键实现紧密结合的, 部分表层金属镍被氧化生成了 NiO。由于镀层的存在, 使得镀镍碳纤维和树脂间的界面结合力发生了改变, 从而导致镀镍碳纤维的力学性能有所下降。

关键词: 正交试验; 镀镍碳纤维; 冷热循环法; 电镀温度; 电流密度; 电镀时间

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)03-0055-05

Optimization of Continuous Nickel Plating on Carbon Fiber Surface by Orthogonal Design

Zhao Xiaoli^{1,2}, Qi Shuhua¹, Liu Jianjun², Han Xiao²

(1. North Western Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Xi'an Carbon Material Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: The process parameters of continuous nickel plating on carbon fibers were optimized by orthogonal design method with the resistivity of nickel-plated carbon fibers as the object of investigation. The surface of carbon fiber was electroplated by $L_9(3^3)$ orthogonal experiment. Electroplating temperature, current density, electroplating time was used as three factors. The adhesion of nickel coating on carbon fiber and carbon fiber was measured by the method of cold and hot cycling. The elemental composition and chemical state of nickel-coated carbon fiber were studied by X-ray photoelectron spectroscopy. The mechanical property of nickel-coated carbon fiber was measured by electronic universal testing machine. The results show that the optimum treatment conditions are as follows: electroplating temperature 50℃, current density 0.5A/dm², electroplating time 6 min. The nickel coating and carbon fiber are tightly bonded by Ni—C—O bond, and some metal nickel on the surface is oxidized to form NiO. Due to the existence of nickel coating, the interfacial adhesion between nickel-coated carbon fiber and resin is changed, which leads to the decrease of mechanical properties of nickel-coated carbon fiber.

Keywords: orthogonal experiment; nickel-coated carbon fiber; cold and hot cycling; electroplating temperature; current density; electroplating time

碳纤维是非常理想的增强材料, 被广泛应用在航空航天、生物材料、民用军工等领域^[1-5]。由于碳纤维与一般的金属的润湿性不好, 易发生固溶反应; 对碳纤维表面进行金属化处理可以解决这一问题。表面金属化的碳纤维具有电磁屏蔽性能和导电性能, 金属化碳纤维增强复合材料可制作具有隐身能力的军事飞机的骨架和蒙皮或制造飞机的鼻椎和机

翼前沿等高温部件。通常用来电镀的金属是铜和镍。铜具有良好的导电性能, 但易被氧化和腐蚀; 镍具有良好的导电性能又有较强的耐腐蚀性^[6-10]。笔者在自制的电镀装置上连续电镀 Ni 层, 研究电镀温度、电镀时间和电镀密度对镀层形貌和厚度的影响, 并对镀层和碳纤维的结合力、镀镍碳纤维的表面元素和镀镍碳纤维拉伸强度进行了测试分析。

基金项目: 军民两用 T700 级高性能碳纤维制备技术开发项目 (JZM009)

通讯作者: 赵晓莉, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事高性能碳纤维研究 E-mail: 414790831@qq.com

收稿日期: 2019-01-06

引用格式: 赵晓莉, 齐暑华, 刘建军, 等. 正交设计法优化碳纤维表面连续镀镍工艺及性能 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(3):55-59.

Zhao Xiaoli, Qi Shuhua, Liu Jianjun, et al. Optimization of continuous nickel plating on carbon fiber surface by orthogonal design[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):55-59.

目前大部分碳纤维出厂时表面均有一层环氧树脂保护膜,不利于金属镍附着沉积。无论是电镀镍还是化学镀镍在镀镍前都必须对碳纤维进行预处理。预处理一般包括表面脱胶、粗化、中和、敏化和活化、解胶和还原等一系列工序。笔者在碳纤维制备过程中直接加入镀镍工序,省去了对碳纤维进行预处理的工序,大大节约了时间和成本,提高了工作效率。为获得结构均匀、光滑、细致的碳纤维镀层,通过正交试验考察了主要工艺参数对碳纤维表面镀层质量的影响,并对镀镍碳纤维进行了性能分析。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维: T300级,未上浆的1K碳纤维,自制;
镍板: 纯度 $\geq 99\%$,市售;
六水合硫酸镍: 分析纯,500 g,西安富力化学厂;
氯化钠、硼酸: 分析纯,西安富力化学厂;
硫酸钠: 分析纯,天津博迪化工股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

扫描电子显微镜(SEM): JSM-6460LV型,日本电子株式会社;

X射线光电子能谱(XPS)仪: K-Alpha型,英国VG公司;

四探针测试仪: ST253型,苏州晶格电子有限公司;

电子万能材料试验机: Instron3365型,美国英斯特朗公司;

电源: E3616A型,安捷伦科技有限公司(中国)。

1.3 镀镍碳纤维制备

电镀液的配制: 在温度 30°C ,将 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 200 g/L, NaCl 10 g/L, H_3BO_3 35 g/L, Na_2SO_4 80 g/L混合在一起,搅拌均匀,pH控制在5;

制备条件: 纯镍板作阳极,碳纤维作为阴极;电镀温度 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$,电镀时间: $2 \sim 8 \text{ min}$,电流密度: $0.2 \sim 0.5 \text{ A}/\text{dm}^2$;

制备工艺: 连续碳纤维的镀镍工艺流程如图1所示。

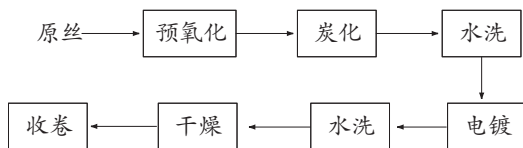


图1 碳纤维连续镀镍工艺流程

1.4 性能测试

采用四探针测试仪测试碳纤维镀层的电阻率^[11];
采用电子万能试验机对镀镍碳纤维的力学性

能进行测试;

采用SEM对碳纤维表面镀层进行测试;

采用XPS仪对碳纤维镀层进行元素分析^[12];

采用冷热循环法对镀层结合力进行测试。取约1 cm长的镀镍纤维称重后在 100°C 的沸水中煮沸约20 min,再在冰水中浸泡约10 min,取出后进行冷热循环3次后烘干、称重,计算试验前后的纤维失重率,并观察纤维镀层是否有起泡和脱落的现象。

2 结果和讨论

2.1 单因素试验确定影响因素

(1) 电镀温度对镀层的影响。

在pH值5.0、电流密度为 $0.3 \text{ A}/\text{dm}^2$,电镀时间4 min的条件下,改变电镀温度,得到镀层体积电阻率变化趋势图,如图2所示。实验结果表明,随着电镀温度的升高,镍碳纤维的体积电阻率快速下降;电镀温度为 30°C ,镀镍纤维的体积电阻率下降到 $3.1 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$,且随着电镀温度的增加,镀层厚度断增加,体积电阻率也持续下降;当电镀温度为 40°C 时,镀层体积电阻率下降到 $8.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$,且下降趋势逐渐缓和;当电镀温度为 50°C 时,镀层体积电阻率下降到 $5.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$;镀镍提高了碳纤维的导电性,并随着镀层厚度的增加而增大。

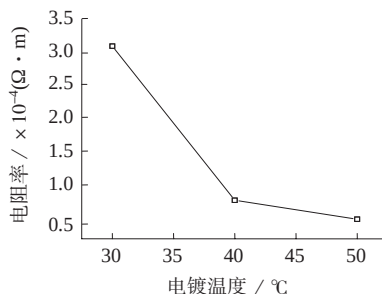
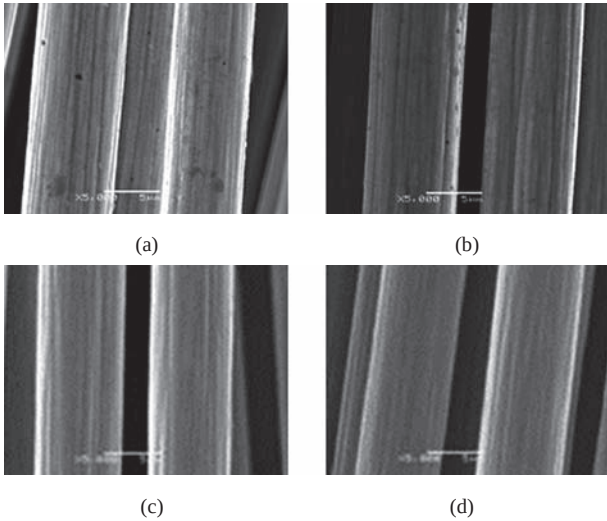


图2 不同电镀温度下镀镍碳纤维电阻率

(2) 电流密度对镀层的影响。

图3是在PH值5.0,电镀温度 50°C ,电镀时间(4 min)一定的条件下,随着电流密度的不同,碳纤维表面的镀层形貌图。由图3a可见,在电流密度为 $0.2 \text{ A}/\text{dm}^2$ 的工艺下,纤维表面虽然有明显的金属镍沉积,但是镀层均匀性较差,存在厚薄不均的情况,部分纤维表面并未被金属镍覆盖;将电流密度提高为 $0.3 \text{ A}/\text{dm}^2$ 时,仍然存在镀层不均匀的情况,但较电流密度较低的情况有所改善(见图3b);继续提高电流密度至 $0.4 \text{ A}/\text{dm}^2$, $0.5 \text{ A}/\text{dm}^2$ 时,纤维表面镀层较均匀(见图3c、图3d)。这是由于当电流密度较低时,在单位时间内,镀液发生还原反应

生成金属镍的含量也相对较少,在初始沉积时,纤维表面即存在没有被金属镍所覆盖的部分,随着电流密度增大,镀层均匀性有所提高,厚度也有所增加。

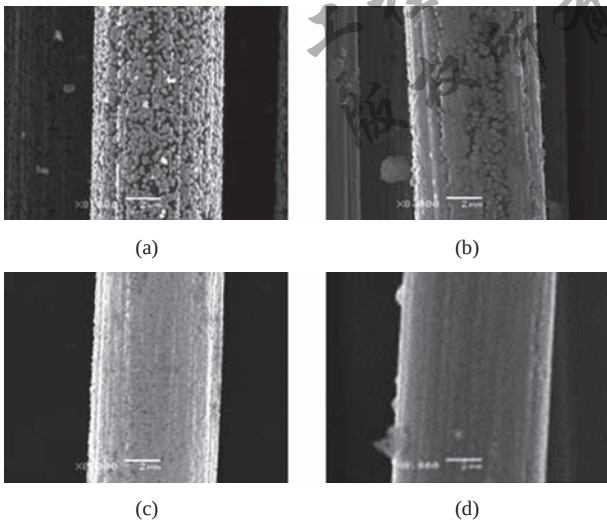


a—0.2 A/dm²; b—0.3 A/dm²; c—0.4 A/dm²; d—0.5 A/dm²

图3 不同电流密度下的镀镍碳纤维表面形貌

(3) 电镀时间对镀层的影响。

在 pH 值 5.0、电镀温度 50℃、电流密度 0.5 A/dm² 条件下,改变电镀时间,镀层的 SEM 图片如图 4 所示。



a—2 min; b—4 min; c—6 min; d—8 min

图4 不同电镀时间下的镀镍碳纤维表面形貌

随着电镀时间的增加,镀层不断增厚,这是由于碳纤维作为镀镍反应的阴极,镀液中的 Ni²⁺ 定向移动到碳纤维的表面发生还原反应, Ni²⁺+2e=Ni, 形成金属镍沉积在碳纤维表面,沉积在阴极纤维上的 Ni 仍为电负性,能继续提供电子,因此镀液中的 Ni²⁺ 继续移向其表面被还原成单质镍而沉积,表现为随着电镀时间的延长镀层由表面分散的颗粒状逐

渐变厚变致密^[13-17],但电镀时间过长镀层表面反而变得很粗糙。

2.2 正交试验确定最优的电镀工艺

通过单因素试验,可发现电镀温度、电流密度和电镀时间对镀镍碳纤维镀层质量影响较大。因此确定电镀温度 (A)、电流密度 (B)、电镀时间 (C) 作为正交试验的 3 个因素,每个因素 3 个水平,采用 L₉(3³) 正交实验表。因素表见表 1,正交试验表见表 2。在 pH 值为 5.0 时,以镀层电阻率为指标进行评价。

表1 镀镍工艺的正交因素水平

因素水平	A/℃	B/(A·dm ⁻²)	C/min
1	30	0.2	2
2	40	0.3	4
3	50	0.5	6

表2 镀镍工艺的正交试验及结果分析

试验号	A/℃	B/(A·dm ⁻²)	C/min	电阻率/(Ω·m)
1 [#]	30	0.2	2	7.2×10 ⁻⁴
2 [#]	30	0.3	4	3.1×10 ⁻⁴
3 [#]	30	0.5	6	1.4×10 ⁻⁴
4 [#]	40	0.2	4	2.8×10 ⁻⁴
5 [#]	40	0.3	6	8.9×10 ⁻⁵
6 [#]	40	0.5	2	6.5×10 ⁻⁵
7 [#]	50	0.2	6	9.3×10 ⁻⁵
8 [#]	50	0.3	2	7.2×10 ⁻⁵
9 [#]	50	0.5	4	4.7×10 ⁻⁵
K ₁	117×10 ⁻⁵	109.3×10 ⁻⁴	85.7×10 ⁻⁵	
K ₂	43.4×10 ⁻⁵	47.1×10 ⁻⁵	63.7×10 ⁻⁵	
K ₃	21.2×10 ⁻⁵	25.2×10 ⁻⁵	32.2×10 ⁻⁵	
k ₁	39×10 ⁻⁵	36.4×10 ⁻⁵	28.6×10 ⁻⁵	
k ₂	14.5×10 ⁻⁵	15.7×10 ⁻⁵	21.2×10 ⁻⁵	
k ₃	7.1×10 ⁻⁵	8.4×10 ⁻⁵	9.8×10 ⁻⁵	
极差 R	31.9×10 ⁻⁵	28.0×10 ⁻⁵	18.8×10 ⁻⁵	
主次顺序	A>B>C			
优水平	A ₃	B ₃	C ₃	
优组合	A ₃ B ₃ C ₃			
备注	以电阻率为考核指标,电阻率越小越好,所以 k 值越小越好。			

从表 2 可知,在 9 个实验结果中,以实验 9 产生的镀层质量最好。可知本实验各因素的最优组合为 A₃B₃C₃,通过 R 值的大小,可看出本实验因素存在显著性顺序,其主次关系为 A>B>C。即影响镀层质量主要因素是电镀温度 (A),其次是电流密度 (B)。

2.3 镀镍碳纤维的性能分析

(1) 镀层和碳纤维结合力的测试。

由于碳纤维与镍的热膨胀系数存在差异,温度的任何变化将会使界面上产生应力。采用 1.4 一节中冷热循环法对镀层结合力进行测试,取 1 cm 长的镀镍碳纤维进行测试,并观察纤维镀层是否有气泡和脱落的现象。表 3 是镀镍碳纤维结合力试验前后

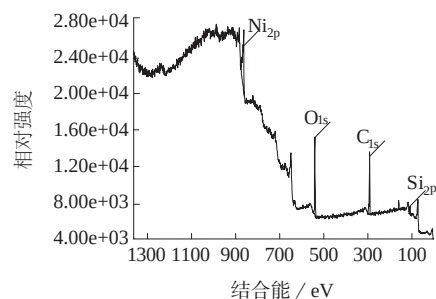
的对比情况。实验序号 A 表示 5 min, 0.5 A/dm^2 测试条件, 实验序号 B 表示 10 min, 0.5 A/dm^2 测试条件。由表 3 可见, 在电流密度都为 0.5 A/dm^2 的条件下, 电镀时间分别为 5 min 和 10 min 的镀镍碳纤维的失重率几乎相当, 分别为 3.80% 和 3.75%, 并且纤维表面仍然呈现金属色, 并无明显的起泡和脱落现象。因此表明: 金属镍和碳纤维基体是依靠 Ni—C—O 键实现紧密结合的, 部分表层金属镍被氧化生成了 NiO。主要原因是经过预处理的碳纤维表面存在大量极性含氧官能团, 沉积在纤维表面的 Ni 与这些官能团结合形成 Ni—C—O 键, 使 Ni 层与碳纤维紧密地结合, 反复冷热循环试验后镀层没有明显的脱落也印证了 Ni 层和碳纤维的结合不是靠微弱的物理吸附, 而是靠化学键紧紧地结合在一起。

表 3 镀镍碳纤维结合力试验对比情况

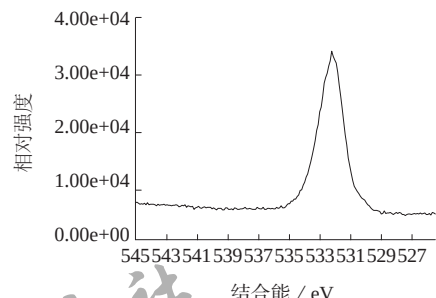
实验序号	镀后 Ni-CF	老化	减重	失重率/%	表观现象
A	0.036 7	0.035 3	0.001 4	3.80	无起泡和脱落
B	0.165 2	0.159 0	0.006 2	3.75	无起泡和脱落

(2) 镀层的 XPS 分析。

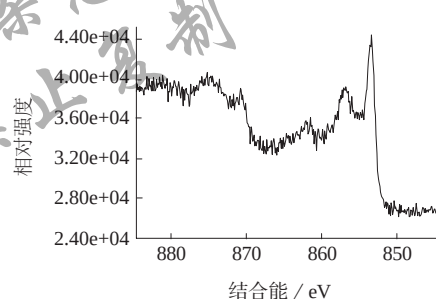
图 5 是对镀镍碳纤维表面进行 XPS 分析谱图。图 5a 为表层的 XPS 全谱图, 图 5b 为表层的 O_{1s} 峰, 图 5c 为表层的 Ni_{2p} 峰, 图 5d 为表层的 C_{1s} 峰。由图 5b 可得, 在 532.0 eV 处的 O_{1s} 峰的 O 是以 C=O 键或是 C—O 键的形式存在的。由图 5c 可得, 在 852.8 eV 处的 $2p_{3/2}$ 峰和 856.2 eV, 861.0 eV 的 $2p_{3/2}$ 峰分别为单质 Ni, Ni—C 和 Ni^{2+} ; 874.4 eV 处的 $2p_{1/2}$ 峰和其伴峰主要为 Co/Ni, Mn/Ni 和 Fe/Ni 的合金等影响, 这是由于在镀液中存在有少量的金属盐杂质, 这些杂质在电解过程中也参与阴极反应而沉淀到了镀层中。由此谱图可见, 纤维表面的镍元素主要是以单质镍的形式存在的, 但在空气中暴露被氧化形成了 NiO, 同时镀层中还含有由于镀液中的 Ni^{2+} 水解而产生的 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 。由图 5d 可得, 285.5 eV 处的 C_{1s} 峰是以 C=O 键或是 C—O 键形式存在的 C, 且多存在于 Ni 上。因此, 由图 5 的分析可得到: 碳纤维表面被电镀镍覆盖, 并且部分表层金属镍被氧化生成了 NiO, 电镀镍和纤维表面处主要是形成了 Ni—C—O 键的连接, 较为牢固, 从结合力试验中也可得到验证。



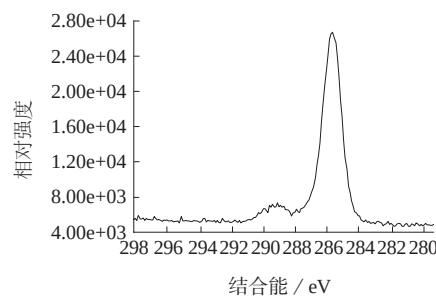
(a)



(b)



(c)



(d)

a—全谱图; b— O_{1s} 峰; c— Ni_{2p} 峰; d— C_{1s} 峰

图 5 镀镍碳纤维表面 XPS 谱图

(3) 镀镍碳纤维力学性能分析。

参照碳纤维力学性能测试方法对纤维镀镍前后的力学性能进行了表征, 结果见表 4。由表 4 可见, 镀镍碳纤维的主要力学性能较未镀镍的碳纤维有所下降, 但下降幅度并不大, 电镀 4 min 后的纤维强度为 3 120 MPa, 6 min 后为 3 278 MPa, 这主要是

由于镀镍后碳纤维本体的力学性能并没有改变,但由于镀镍层的存在,使得镀镍碳纤维和树脂间的界面结合力发生了改变,从而最终影响了力学性能。

表 4 镀镍碳纤维的力学性能

电镀时间 / min	拉伸强度 / MPa	拉伸弹性模量 / GPa	断裂伸长率 / %
0	3 745	220	1.75
4	3 120	214	1.48
6	3 278	217	1.46

3 结论

(1) 电镀温度、电流密度和电镀时间是影响镀层的形貌和厚度的重要因素。随着电镀时间的延长,镀层厚度逐渐增厚;电镀时间过短则镀层较薄,电镀时间过长镀层表面会变粗糙;电流密度较小将会导致镀层的不均匀,随着电流密度的增大,镀层的均匀性有所提高,厚度也有所增加;采用正交设计法,对碳纤维连续电镀镍工艺参数进行优化,可以快速的得到均匀、致密的镀层。通过对体积电阻率指标进行评价,获得最佳的碳纤维连续镀镍工艺条件:电镀温度 50℃,电流密度 0.5 A/dm²,电镀时间 6 min。

(2) 采用冷热循环法测试 Ni 层和碳纤维的结合力,发现镀层和碳纤维的结合不是靠微弱的物理吸附,而是依靠化学键紧紧地结合在一起的。

(3) 采用 XPS 分析镀镍碳纤维,可知碳纤维表面被电镀镍覆盖,并且部分表层金属镍被氧化生成了 NiO,电镀镍和纤维表面处主要是形成了 Ni—C—O 键的连接,较为牢固。

(4) 采用 Instron 3365 测试镀镍前后的碳纤维的力学性能,发现镀镍后碳纤维的力学性能有所下降。

参考文献

- [1] 霍彩虹,何为,范中晓.碳纤维表面金属化工艺研究[J].表面技术,2003,32(6):40-42.
Huo Caihong, He Wei, Fan Zhongxiao. Study on metalized technics on surface of carbon fiber[J]. Surface Technology, 2003, 32(6):40-42.
- [2] 罗嗣友,赵晨亮,李培涛.碳纤维化学镀镍技术研究进展[J].建材世界,2012,33(4):30-32.
Luo Siyou, Zhao Chenliang, Li Peitao. Progress research on nickel electroless plating on carbon fiber[J]. The World of Building Materials, 2012, 33(4):30-32.
- [3] 任富忠,高家诚,谭尊.碳纤维增强镁基复合材料的界面研究进展[J].功能材料,2009,40(12):1947-1950.
Ren Fuzhong, Gao Jiacheng, Tan Zun. Development of interface research in carbon fiber reinforced magnesium-based composite materials[J]. Journal of Function Materials, 2009, 40(12):1947-1950.
- [4] 吕晓轩,吕春祥,杨禹,等.碳纤维表面电镀镍研究[J].化工新型材料,2011,39(8):89-91.
Lv Xiaoxuan, Lv Chunxiang, Yang Yu, et al. Study on electroplated Ni coating of carbon fibers[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(8):89-91.
- [5] Huang Chiyuan, Wu Changcheng. The EMI shielding effectiveness of PC / ABS / nickel coated-carbon-fibre composites[J]. European Polymer Journal, 2000, 36:2 729-2 737.
- [6] 曹卓坤,刘宜汉,姚广春.硫酸盐酸性镀液中碳纤维电镀铜[J].过程工程学报,2006(4):651-655.
Cao Zhuokun, Liu Yihan, Yao Guangchun. Electroplating of carbon fibers in sulfate acidic solution[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006(4):651-655.
- [7] 高雷,王文芳,吴玉程,等.碳纤维表面连续镀铜工艺及性能研究[J].电镀与涂饰,2012,31(4):4-7.
Gao Lei, Wang Wenfang, Wu Yucheng, et al. Study on continuous copper plating and properties on surface of carbon fiber[J]. Electroplating & Finishing, 2012, 31(4):4-7.
- [8] 季涛,史蕾蕾,练敏芳.碳纤维表面镀铜的初步研究[J].产业用纺织品,2007(10):35-37,43.
Ji Tao, Shi Leilei, Lian Minfang. Preliminary study on surface copperize of carbon fiber[J]. Technical Textiles, 2007(10):35-37, 43.
- [9] 王敏,曲迎东,李广龙,等.镀镍短碳纤维增强铝基复合材料的组织及性能[J].特种铸造及有色合金,2017,37(10):1 117-1 120.
Wang Min, Qu Yingdong, Li Guanglong, et al. Microstructure and properties of short nickel coated carbon fibers reinforced aluminum matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(10):1 117-1 120.
- [10] 闫丽丽,乔妙杰,雷忆三,等.化学镀镍碳纤维/环氧树脂复合材料电磁屏蔽性能[J].复合材料学,2013,30(2):44-49.
Yan Lili, Qiao Miaojie, Lei Yisan, et al. EMI shielding effectiveness of electroless nickel-plated carbon fibers / epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2):44-49.
- [11] 刘靖忠,李国栋,熊翔,等.碳纤维电镀 Cu / Ni 双镀层及其性能表征,粉末冶金材料科学与工程,2016,21(1):180-188.
Liu Jingzhong, Li Guodong, Xiong Xiang, et al. Fabrication and properties of electroplating Cu / Ni duplex coating on carbon fiber[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2016, 21(1):180-188.
- [12] 华中胜,姚广春,马佳,等.碳纤维表面镍镀层的 XPS 分析[J].中国有色金属学报,2011,21(1):165-170.
Hua Zhongsheng, Yao Guangchun, Ma Jia, et al. XPS analysis of nickel layers on carbon fibers[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2011, 21(1):165-170.
- [13] 韩笑,周玉玺,王增加,等.电镀时间对碳纤维表面连续电镀镍的影响[J].电镀与涂饰,2014,33(9):363-365.

- Wang Yuan, Ma Xiuqing. Influence of materials physical parameters on flow field in three-layer coextrusion die flow channel[J]. *Plastics*, 2017, 46(1):96-100.
- [5] 齐斌. 挤塑管材成型的计算机优化研究[J]. *塑料科技*, 2015, 43(10):82-85.
- Qi Bin. Study on computer optimization of extrusion molding for plastic pipe[J]. *Plastics Science and Technology*, 2015, 43(10):82-85.
- [6] 邹武, 唐跃, 郝永亮. 芯棒式管材挤出机头的流动模拟分析[J]. *工程塑料应用*, 2007(6):33-37.
- Zou Wu, Tang Yue, Hao Yongliang. Flow simulation analysis of extruder head with core rod[J]. *Engineering Plastics Application*, 2007(6):33-37.
- [7] 许祥, 李白千, 靳明, 等. 基于 Polyflow 的一出二挤管机头模拟分析[J]. *中国塑料*, 2015, 29(6):98-101.
- Xu Xiang, Li Baiqian, Jin Ming, et al. Simulation for pipe molding devices with two dies based on polyflow[J]. *China Plastics*, 2015, 29(6):98-101.
- [8] 张文明, 许乾慰, 薛平. 螺旋式管材机头内熔体流动的计算机模拟[J]. *塑料工业*, 2006(S1):184-189.
- Zhang Wenming, Xu Qianwei, Xue Ping. Computer simulation of melt flow in the head of spiral pipe machine[J]. *China Plastics Industry*, 2006(S1):184-189.
- [9] 刘斌, 江开勇, 上官宁. 塑料挤出流动数值分析及其模具结构的设计优化[J]. *华侨大学学报: 自然科学版*, 2008(4):481-489.
- Liu Bin, Jiang Kaiyong, Shang Guanning. Numerical analysis of plastic extrusion flow and optimization design of die structure[J]. *Journal of Huaqiao University: Natural science Edition*, 2008(4):481-489.
- [10] 林丽红, 贾晓艳, 马铁军. 基于 Fluent 的橡胶挤出机流道设计[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(7):944-950.
- Lin Lihong, Jia Xiaoyan, Ma Tiejun. Design of extruder flow channel based on fluent[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(7):944-950.
- [11] 邹维东, 郭奕崇, 吴大鸣, 等. 小截面精密异型管材挤出模拟与实验研究[J]. *工程塑料应用*, 2006(3):54-57.
- Zou Weidong, Gou Yichong, Wu Daming, et al. Simulation and experimental study on extrusion of precision heterotype pipe with small section[J]. *Engineering Plastics Application*, 2006(3):54-57.
- [12] 杨涛. 常用 PVC-U 管材生产设备[J]. *塑料科技*, 2007(5):80-85.
- Yang Tao. Commonly used PVC-U pipe production equipment[J]. *Plastics Science and Technology*, 2007(5):80-85.
- [13] 宗大全, 朱弟雄. PVC-U 管材模具设计与改进[J]. *工程塑料应用*, 2000(8):34-36.
- Zong Daquan, Zhu Dixiong. Design and improvement of PVC-U pipe die[J]. *Engineering Plastics Application*, 2000(8):34-36.
- [14] 刘斌, 王玉龙, 岳潼雁. 直通式管材挤出模头智能化设计系统开发及应用[J]. *塑料*, 2013, 42(2):10-13.
- Liu Bin, Wang Yulong, Yue Tongyan. Development and application of intelligent design system of straight-through pipe extrusion die[J]. *Plastics*, 2013, 42(2):10-13.
- [15] 张礼华, 贾辉, 邱建成. 微层挤出机头的流道建模与仿真研究[J]. *塑料工业*, 2018, 46(1):37-39.
- Zhang Lihua, Jia Hui, Qiu Jiancheng. The finite element simulation and optimization of the runner for micro-layer extrusion blow molding head[J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(1):37-39.
- [16] 周秀民, 李晓林, 吴大鸣. 在挤出机口模中聚合物不稳定流动的模拟[J]. *塑料*, 2005(1):83-85+64.
- Zhou Xiumin, Li Xiaolin, Wu Daming. Simulation of the unstable flow of polymers in the extruding die[J]. *Plastics*, 2005(1):83-85+64.
- [17] 傅志红, 刘卫, 易琪, 等. 微通道塑料薄膜挤出机头流道优化及整体设计[J]. *塑料*, 2017, 46(2):106-109.
- Fu Zhihong, Liu Wei, Yi Qi, et al. Optimization of flow channel and integral design for the extrusion die of microcapillary film[J]. *Plastics*, 2017, 46(2):106-109.
- [18] 林峰, 张正红. UPVC 管材挤出成型机头模具的改进设计[J]. *轻工机械*, 2004(4):121-122.
- Lin Feng, Zhang Zhenghong. Improved design of mold for extruded pipe molding head of UPVC[J]. *Light Industrial Machinery*, 2004(4):121-122.

(上接第 59 页)

- Han Xiao, Zhou Yuxi, Wang Zengjia, et al. Influence of plating time on continuous nickel electroplating of carbon fiber[J]. *Electroplating & Finishing*, 2014, 33(9):363-365.
- [14] Djamel Akbarov, Bakhodir Baymurotov, Rustam Akbarovo, et al. Optimizing process parameters in polyacrylonitrile production for metallization with nickel[J]. *Textile Research Journal*, 2005, 75(3):197-202.
- [15] Satyaprakash Kushwaha¹, Kamal K Kar, P Santhana Gopala Krishnan, et al. Preparation and characterization of nickel coated carbon fiber reinforced polycarbonate composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2011, 30(14):1 185-1 196.
- [16] Khoddamzadeh A, Liu R, Liang M, et al. A new composite material-low-carbon stellite alloy reinforced with nickel-coated carbon fibers[J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(2):179-190.
- [17] Muhammad Muddassir, Miro Duhovic, Martin Gurka. A comprehensive study of metal-coated short carbon fibers, graphite particles, and hybrid fillers for induction heating[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018(1):1-20.