

表面功能化

基于神经网络遗传算法的超疏水涂层优化

苑昭阔¹, 吴俐俊¹, 王骏², 张萍¹, 韦增志¹

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804;

2. 南京同诚节能环保装备研究院, 南京 211100)

摘要: **目的** 探究超疏水涂层各成分的含量对涂层水接触角和导热系数的影响, 找到最优成分组合, 使涂层水接触角和导热系数同时获得最大值。**方法** 根据设计的 $L_{25}(5^5)$ 正交试验, 制作和测试涂层试样, 借助 Matlab 软件建立结构为 5-8-2 的 BP 神经网络, 通过正交试验结果训练和测试神经网络, 得到涂层水接触角和导热系数的预测模型。调用训练好的预测模型, 采用遗传算法对涂层各成分含量进行全局寻优。使用寻优得到的参数和调整后的参数进行试验, 检验寻优计算结果。**结果** BP 神经网络预测模型水接触角的最大误差为 0.061 98, 导热系数的最大误差为 0.065 77。基于遗传算法的优化结果, 涂层成分 (质量分数) 为纳米 SiO_2 10.1%+ TiO_2 6.4%+碳粉 5%+纳米石墨烯 0.6%+MTES 1.8%时, 涂层的水接触角达到 164.24° , 导热系数达到 $14.19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 其误差分别为 3.80%和 2.31%。采用调整后的参数进行试验, 测试得到涂层的水接触角为 155.02° , 导热系数为 $13.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 其误差分别 5.64%和 5.58%。**结论** 通过 BP 神经网络预测模型和遗传算法寻优, 可以使涂层的水接触角和导热系数都获得较大的提高。

关键词: 超疏水涂层; BP 神经网络; 遗传算法; 水接触角; 导热系数

中图分类号: TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)01-0240-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.01.025

Optimization of Superhydrophobic Coatings Based on Neural Network and Genetic Algorithm

YUAN Zhao-kuo¹, WU Li-jun¹, WANG Jun², ZHANG Ping¹, WEI Zeng-zhi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Nanjing Tongcheng Energy Saving and Environmental Protection Equipment Research Institute, Nanjing 211100, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the influence of the content of each coatings component on the coatings water contact angle (WCA) and thermal conductivity, and find the optimal composition so as to maximize the WCA thermal conductivity simultaneously. The coatings samples were made and tested according to the $L_{25}(5^5)$ orthogonal experimental design. The BP neural network with the structure of 5-8-2 was established by Matlab software. The prediction model of WCA and thermal conductivity of coatings was obtained by training and testing the neural network with the results of orthogonal test. The genetic

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-11-21

Received: 2021-07-29; Revised: 2021-11-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC1910100)

Fund: National Key Research and Development Plan of China (2020YFC1910100)

作者简介: 苑昭阔 (1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为换热和涂层。

Biography: YUAN Zhao-kuo (1989—), Male, Doctoral candidate, Research focus: heat transfer and coatings.

通讯作者: 吴俐俊 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为强化换热、有机朗肯循环、表面工程。

Corresponding author: WU Li-jun (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: enhanced heat transfer, ORC, surface engineering.

引文格式: 苑昭阔, 吴俐俊, 王骏, 等. 基于神经网络遗传算法的超疏水涂层优化[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 240-246.

YUAN Zhao-kuo, WU Li-jun, WANG Jun, et al. Optimization of Superhydrophobic Coatings Based on Neural Network and Genetic Algorithm [J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 240-246.

algorithm was used to optimize the content of each component by calling the trained prediction model. The optimized and adjusted parameters were used to test and verify the optimization results. After the BP neural network model was trained, the prediction results showed that the maximum error was 0.061 98 and WCA 0.065 77 for thermal conductivity. Based on the optimization results of genetic algorithm, the coatings would have 164.24° for WCA and 14.19 W/(m·K) for thermal conductivity, with 10.1wt% Nano-SiO₂, 6.4wt% TiO₂, 5wt% carbon powder, 0.6wt% nano graphene and 1.8wt% MTES. In the meanwhile, the error of the WCA and thermal conductivity was 3.80% and 2.31%, respectively. The coatings made with adjusted parameters had 155.02° for WCA and 13.25 W/(m·K) for thermal conductivity, with errors of 5.64% and 5.58%, respectively. Through BP neural network prediction model and genetic algorithm optimization, the water contact angle and thermal conductivity of coatings both got greatly improved.

KEY WORDS: superhydrophobic coatings; BP neural network; genetic algorithm; water contact angle; thermal conductivity

热泵^[1-2]和冷库^[3-4]制冷系统蒸发器因工作环境温度低、湿度大,极易发生结霜。霜是热的不良导体,结霜会增加蒸发器的传热热阻,降低换热效率,当结霜达到一定厚度时,还会堵塞排管以及翅片之间的通道,严重时蒸发器回液因吸热不足而不能完全蒸发,甚至造成压缩机损伤。现有研究^[5-8]表明,超疏水表面具有很低的表面能,可以避免水滴在涂层表面附着,抑制结霜。在融霜阶段,水滴在风力和重力的作用下更易在超疏水涂层表面滑走,起到加速融霜的作用。所以,在蒸发器换热表面喷涂超疏水涂层成为制冷系统蒸发器抗结霜行之有效的方法。但喷涂涂层会增加蒸发器传热过程的导热热阻,所以在提高涂层疏水性能的同时,还应考虑提高涂层的导热性能。本文以改性特氟龙为溶剂,以甲基三乙氧基硅烷(MTES)为低表面能物质,以纳米 SiO₂、TiO₂^[9]为添加剂,构造微/纳米多尺度结构,同时添加高导热性能的碳粉和纳米石墨烯^[10-13],采用溶胶凝胶法制备超疏水涂层。

各成分的含量对涂层的疏水性和导热性能具有特定的影响,且此影响包含十分复杂的非线性关系,通过数学公式描述这种关系非常困难。针对上述问题,具有自学习、自组织、自适应能力的人工神经网络,能够准确处理已知因素和实验结果之间没有明确数学关系的离散型数据,并在已知因素和实验结果之间建立多变量非线性映射关系,生成预测模型,其中尤以基于误差反向传播算法的 BP 神经网络在工业上的应用最为广泛^[14-15],已成功应用于理化材料的性质和寿命预测。遗传算法^[16-17]是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索优化算法,具有良好的全局寻优能力,通过神经网络建立涂层疏水性和导热性能的预测模型,为构建遗传算法适应度函数提供了数学关系。

本文以超疏水涂层为研究对象,首先通过正交试验得到了纳米 SiO₂、TiO₂、碳粉、纳米石墨烯和 MTES 成分含量与涂层水接触角和导热系数的对应关系,然后通过 BP 神经网络的训练、测试,建立适宜的涂层性能预测模型,最后结合遗传算法进行全局极值寻优,从而找到超疏水涂层的最优配方。

1 实验

1.1 材料与仪器

实验材料包括:改性特氟龙购于东莞市展阳高分子材料有限公司;纳米 SiO₂、TiO₂ 购于南京宏德纳米材料有限公司;碳粉、纳米石墨烯购于南京先丰纳米材料科技有限公司;MTES 购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。304 不锈钢基材由上海南华换热器制造有限公司提供。

实验仪器包括:HJ-3 恒温磁力搅拌器,常州市金坛区西城新瑞仪器厂;DHG9140 电热恒温干燥箱,绍兴市苏珀仪器有限公司;LEEB222 涂层测厚仪,上海高致精密仪器有限公司;LX-5617 水滴角试验仪,广东艾斯瑞仪器科技有限公司;DR-S 瞬态平面热源法导热仪,上海皆准仪器设备有限公司。

1.2 方法

制备涂层前,使直径为 $\phi 70$ mm、厚度为 3 mm 的 304 不锈钢圆片,经过质量分数为 6% 的 NaOH 溶液浸泡 20 min,去除材料表面油脂,然后进行喷砂处理,去除材料表面锈迹并提高粗糙度,最后清洗干燥制得涂层基材。涂层制备步骤为:

1) 根据实验方案设计的正交表,称取不同含量的骨料,混合后磁力搅拌(转速 500 r/min) 1 h 备用。配制改性特氟龙和 MTES 的混合溶液,将混合好的骨料加入其中制得涂层浆料,并将其置于磁力搅拌器上,高速分散(转速 1400 r/min) 2 h,得到混合均匀的涂料体系。

2) 采用喷涂法将涂料均匀喷涂在不锈钢表面,喷涂距离为 300 mm,喷涂角度为 90°,室温下固化时间 30 min,后放入 180 °C 干燥箱固化 2 h,取出后冷却得到不锈钢涂层样品,并进行测厚。

当改变涂层某种成分含量时,其他成分即使添加质量不变,其质量分数也会变动,为了消除不同成分含量变动时的相互影响,涂层成分含量采用溶质与溶剂的比值,本实验根据涂层样品的大小和厚度,选取

改性特氟龙溶剂质量为 5 g。为了减少实验次数且充分考察不同成分含量对涂层性能的影响,以纳米 SiO₂、TiO₂、碳粉、纳米石墨烯和 MTES 成分含量为影响因素,以涂层水接触角和导热系数为目标函数,采用正交设计法构造五因素五水平正交实验方案,选取的五因素五水平编码如表 1 所示。其中各成分含量的最大值由实验测试得出,通过不断增加各成分的含量,然后观察制取的待测涂层试样,当进一步增加各成分含量,会导致涂层出现皲裂、起皮、掉粉等不稳定现象,以此确定所制取涂层试样能够保持均匀稳定时各成分的最大添加量。

表 1 成分含量因素水平编码
Tab.1 Component proportion factor coding level wt. %

Factor level	Nano SiO ₂	TiO ₂	Carbon powder	Nano graphene	MTES
1	2.0	2.0	1.0	0.2	1.0
2	5.0	3.5	2.0	0.4	2.0
3	8.0	5.0	3.0	0.6	3.0
4	11.0	6.5	4.0	0.8	4.0
5	14.0	8.0	5.0	1.0	5.0

2 结果与分析

系统探讨了纳米 SiO₂、TiO₂、碳粉、纳米石墨烯和 MTES 成分含量对涂层水接触角和导热系数的作用规律和影响程度,构建了五因素五水平正交实验方案,根据实验方案制作得到了 25 组涂层试样,如图

1 所示。在每组涂层试样上随机选取 5 个点测量涂层的水接触角,水滴大小为 3 μL,测量结果的最大值和最小值之差不超过 2°,并取其平均值作为该组试样的水接触角。通过瞬态平面热源法测量涂层的导热系数,测试前对仪器进行校准,使其对校准用测试物块的测量结果相对误差小于 0.01。试验结果如表 2 所示。

涂层水接触角和导热系数随各因素成分含量的变化曲线如图 2 所示,方差分析如表 3 所示。由图 2 和表 3 可知,涂层水接触角随纳米 SiO₂、TiO₂ 和碳粉含量的增加,先增大后减小,随纳米石墨烯含量的

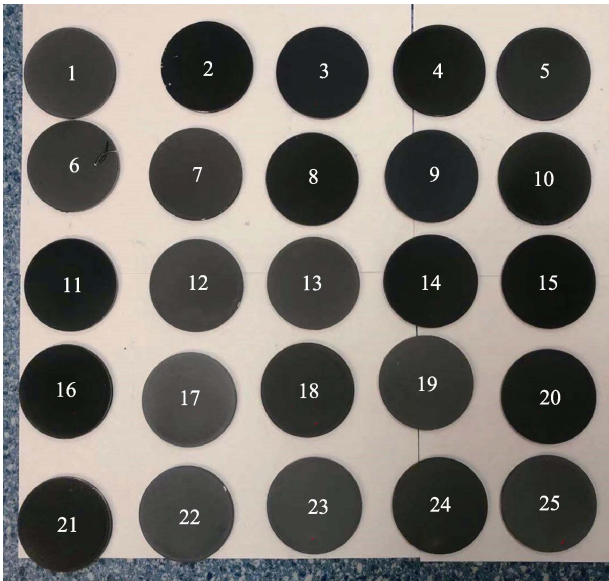


图 1 测试涂层试样效果
Fig.1 Picture of test coating samples

表 2 正交试验结果
Tab.2 Experimental results of orthogonal test

Experimental number	Nano SiO ₂ /wt. %	TiO ₂ /wt. %	Carbon powder/wt. %	Nano graphene/wt. %	MTES/wt. %	WCA/(°)	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
1	2.0	2.0	1.0	0.2	1.0	98.18	0.88
2	5.0	3.5	1.0	0.4	2.0	108.04	0.98
3	8.0	5.0	1.0	0.6	3.0	138.92	1.32
4	11.0	6.5	1.0	0.8	4.0	148.78	0.85
5	14.0	8.0	1.0	1.0	5.0	144.07	0.46
6	5.0	5.0	2.0	0.2	4.0	149.18	2.57
7	8.0	6.5	2.0	0.4	5.0	150.51	2.21
8	11.0	8.0	2.0	0.6	1.0	143.86	1.78
9	14.0	2.0	2.0	0.8	2.0	132.72	2.01
10	2.0	3.5	2.0	1.0	3.0	108.94	4.79
11	8.0	8.0	3.0	0.2	2.0	136.15	3.88
12	11.0	2.0	3.0	0.4	3.0	146.25	3.87
13	14.0	3.5	3.0	0.6	4.0	148.23	3.59
14	2.0	5.0	3.0	0.8	5.0	109.89	5.42
15	5.0	6.5	3.0	1.0	1.0	143.68	6.07
16	11.0	3.5	4.0	0.2	5.0	142.58	7.42

续表 2

Experimental number	Nano SiO ₂ /wt. %	TiO ₂ /wt. %	Carbon powder/wt. %	Nano graphene/wt. %	MTES/wt. %	WCA/(°)	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
17	14.0	5.0	4.0	0.4	1.0	144.36	6.97
18	2.0	6.5	4.0	0.6	2.0	107.57	10.02
19	5.0	8.0	4.0	0.8	3.0	141.37	9.87
20	8.0	2.0	4.0	1.0	4.0	148.20	11.87
21	14.0	6.5	5.0	0.2	3.0	147.33	9.46
22	2.0	8.0	5.0	0.4	4.0	110.90	12.13
23	5.0	2.0	5.0	0.6	5.0	127.43	13.49
24	8.0	3.5	5.0	0.8	1.0	148.59	13.19
25	11.0	5.0	5.0	1.0	2.0	144.06	13.57

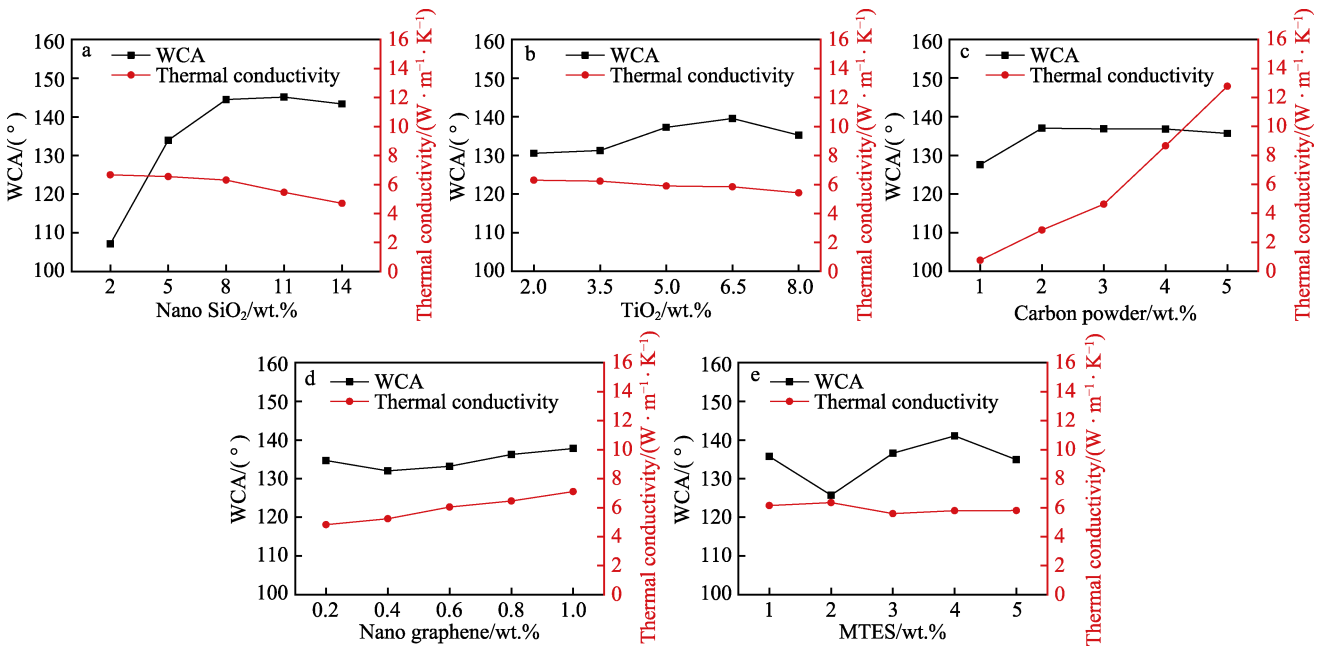


图 2 各因素对涂层水接触角及导热系数的作用规律
Fig.2 Effect law of various factors on WCA and thermal conductivity of coatings

表 3 各因素对涂层水接触角和导热系数的影响程度
Tab.3 Influence significance of various factors on WCA and thermal conductivity of coatings

Property	Factors	Sum of squares	DOF	Mean square	F	Significance
WCA	Nano SiO ₂	5205	4	1301	28.49	**
	TiO ₂	298	4	75	1.63	
	Carbon powder	329	4	82	1.80	
	Nano graphene	107	4	27	0.59	
	MTES	629	4	157	3.44	
Thermal conductivity	Nano SiO ₂	18	4	4.39	87.83	**
	TiO ₂	1.93	4	0.48	9.63	*
	Carbon powder	450	4	112.67	2253	**
	Nano graphene	19	4	4.77	95.45	**
	MTES	0.72	4	0.18	3.59	

增加，先减小后增大，且纳米 SiO₂ 含量对涂层水接触角的影响非常显著。涂层导热系数随纳米 SiO₂ 和 TiO₂ 含量的增加而减小，随碳粉和纳米石墨烯含量的增加而增大，且碳粉、纳米石墨烯和纳米 SiO₂ 含量对涂层导热系数的影响非常显著，TiO₂ 对涂层导热系数的影响较为显著。MTES 作为低表面能物质起到促进涂层各成分耦合交联的作用，其对涂层性能的作用受到各成分含量变化的影响。

3 BP 神经网络

3.1 BP 神经网络的基本原理

BP 神经网络是一种误差反向传播的前馈型神经网络，它由输入层、隐层和输出层构成，每一层含有一定数量的神经元，其模型拓扑结构如图 3 所示。神

经网络的学习过程包括信号的正向传播与误差的反向传播。误差反向传播是将输出误差以某种形式通过隐层向输入层逐层反传,进行二次输入后误差分配至各层,依据最速下降理论,不断调节各层连接权值和阈值,使得网络输出的均方误差和最小^[18-19]。

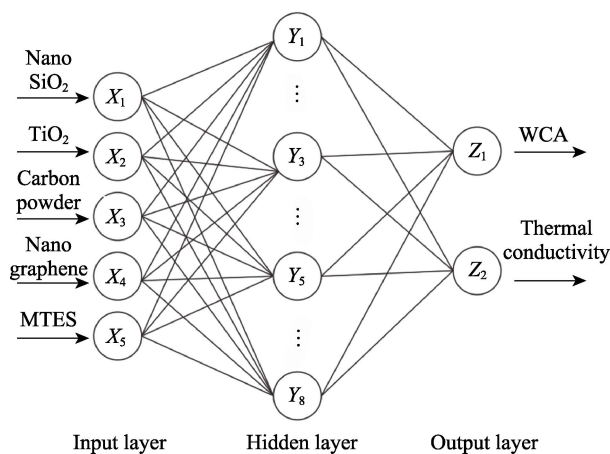


图 3 BP 神经网络结构

Fig.3 Structure of BP neural network

3.2 BP 神经网络的构建

1) 确定输入层节点。本文选取纳米 SiO₂、TiO₂、碳粉、纳米石墨烯和 MTES 成分含量 5 种因素为神经网络输入节点。

2) 确定输出层节点。本文选取涂层水接触角和导热系数 2 个结果作为评价指标。

3) 确定隐含层节点。隐含层神经元数按照公式(1)进行选择^[15]。

$$h = \sqrt{n + m} + a \quad (1)$$

式中: h 为隐含层神经元个数; n 为输入层神经元个数; m 为输出层神经元个数; a 为调节系数, $a \in [0, 10]$ 。

4) 数据规范化处理。由于各参数的取值范围和量纲有很大不同,对神经网络的构建有较大影响,为使神经网络在训练过程中的收敛速度更快,泛化能力更好,采用公式(2)将数据都规范化为 $[-1, 1]$ 之间的数^[14]。

$$y = 2 \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} - 1 \quad (2)$$

式中: y 为规范化数据; x 为原始数据; x_{\min} 为原始数据最小值; x_{\max} 为原始数据最大值。

本文借助 Matlab R2016a 软件建立 BP 神经网络模型,设置训练函数为 trainlm,传递函数为 S 型正切函数 tansig。根据公式(1)得出隐含层神经元个数范围为 $[3, 13]$ 。经试验,当隐含层神经元个数为 8 时,模型训练误差最小,为 0.0486。

3.3 BP 神经网络预测结果与分析

将表 2 中 25 组正交试验数据重新随机编号,选取 20 组数据作为训练样本,对建立好的神经网络进行训练,将剩余 5 组数据作为测试样本,并对训练好的模型进行检验。将实测值与预测值进行对比,得到相对误差列于表 4。涂层水接触角的最大相对误差为 0.061 98,导热系数的最大误差为 0.065 77,二者都不超过 7%。由此可知,实验得到的结果与预测值基本吻合,说明建立的 BP 神经网络模型的预测精度较高,能够满足工业生产的要求。

表 4 涂层水接触角和导热系数实测值与神经网络预测值对比

Tab.4 Comparison of measured coatings WCA and thermal conductivity by predictive values with neural network

Measured WCA/(°)	Predictive WCA/(°)	Relative error	Measured thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Predictive thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Relative error
138.92	140.03	0.008 00	1.32	1.40	0.062 50
132.72	131.26	-0.010 98	2.01	1.88	-0.065 77
133.68	129.41	-0.031 92	6.08	5.73	-0.057 34
143.87	152.79	0.061 98	11.87	11.21	-0.055 32
148.59	141.24	-0.049 49	13.09	12.32	-0.058 79

4 基于遗传算法全局寻优

4.1 参数设置及寻优结果

遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的数学计算模型,由于其具有全局搜索策略和寻优过程不依赖于梯度信息,而只需要影响寻优方向的目标函数和相应的适应度函数等优点,被广

泛应用于各种领域^[20-21]。由正交试验结果可知,试验中涂层水接触角的最大值为 150.51°,刚刚达到超疏水涂层标准,导热系数的最大值为 13.57 W/(m·K),接近不锈钢的导热系数,因此采用式(3)作为适应度函数。

$$y = \omega_1 \frac{\text{WCA}}{160} + \omega_2 \frac{\text{TC}}{15} \quad (3)$$

式中: WCA 为涂层水接触角; TC 涂层导热系数;

ω_1 、 ω_2 分别为涂层水接触角和导热系数的权重， $\omega_1=0.6$ ， $\omega_2=0.4$ 。将待优化参数纳米 SiO₂、TiO₂、碳粉、纳米石墨烯和 MTES 成分含量作为基因，合成一个独立的染色体并进行编码，对已编码的染色体进行选择、交叉和变异操作。调用训练好的 BP 神经网络，设定最大迭代次数为 200 次，种群大小为 50，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.2，各优化参数寻优范围设为零到表 2 中各成分含量的最大值。以适应度函数作为评价标准，根据优胜劣汰法则，不断得到更加优化的群体，最后在最优群体中选择适应度最高的个体作为最优个体。

经过 182 次迭代计算，得到最优的涂层水接触角为 164.24°，导热系数为 14.19 W/(m·K)，适应度值变化如图 4 所示。此时涂层成分（质量分数）为：纳米 SiO₂ 10.1%，TiO₂ 6.4%，碳粉 5%，纳米石墨烯 0.6%，MTES 1.8%。

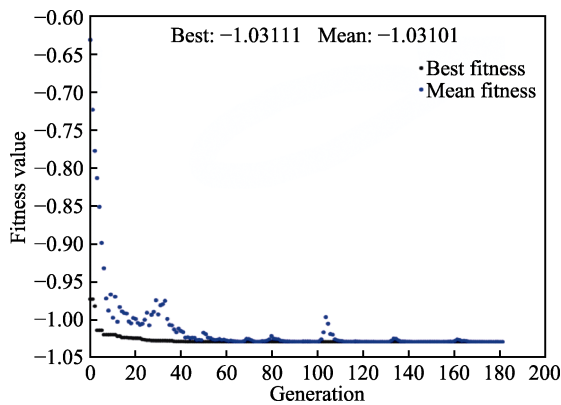


图 4 适应度函数值
Fig.4 Fitness value

4.2 寻优结果检验

采用相同的实验材料和实验方法，根据寻优得到的最佳数据进行试验，制得涂层试样，并进行涂层水接触角和导热系数测试。同时，为了优化涂层试样制作步骤，简化工作量，对寻优得到的实验参数进行调整，根据调整后的数据制作涂层试样并进行测试，测试结果如表 5 所示。由表 5 可知，由寻优参数和调整参数得到的实验结果与预测结果对比，水接触角误差均在 4.95%以内，导热系数均在 5.58%以内，在可接受范围内。根据寻优参数和调整后的参数制作的涂层试样及其水接触角测试结果如图 5 所示。

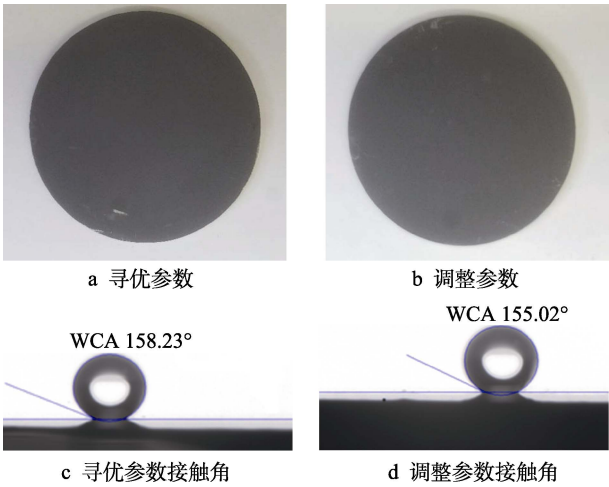


图 5 试样和水的接触角

Fig.5 Samples and water contact angle: (a) sample with optimized parameters; (b) sample with adjusted parameters; (c) water contact angle with optimized parameters; (d) water contact angle with adjusted parameters

表 5 寻优结果试验

Tab.5 Test of optimization result

Samples	Nano SiO ₂ / wt. %	TiO ₂ / wt. %	Carbon powder/ wt. %	Nano graphene/ wt. %	MTES/ wt. %	WCA			TC		
						Experiment/ (°)	Predicted/ (°)	Error/ %	Experiment/ (°)	Predicted/ (°)	Error/ %
Optimized	10.1	6.4	5.0	0.6	1.8	158.23	164.24	3.80	13.87	14.19	2.31
Adjusted	10.0	6.0	5.0	0.6	2.0	155.02	163.77	5.64	13.25	13.99	5.58

5 结论

1) 根据正交试验结果及其方差分析可知，涂层水接触角受纳米 SiO₂ 含量的影响最为显著，这与其含量变化范围最大有关，涂层导热系数随纳米 SiO₂ 和 TiO₂ 含量的增加而减小，随碳粉和纳米石墨烯含量的增加而增大，且碳粉、纳米石墨烯和纳米 SiO₂ 含量对涂层导热系数的影响非常显著，其中纳米石墨烯含量的变化范围小，影响程度非常显著，说明纳米石墨烯对提高涂层导热系数有重要影响。

2) 以纳米 SiO₂、TiO₂、碳粉、纳米石墨烯和 MTES

成分含量为输入参数，以涂层水接触角和导热系数为输出参数，建立了 5-8-2 BP 神经网络，通过正交试验结果训练和测试神经网络，得到预测模型水接触角的最大误差为 0.061 98，导热系数的最大误差为 0.065 77，二者都不超过 7%。

3) 基于遗传算法对涂层各成分含量参数进行优化，计算得到当涂层成分（质量分数）为纳米 SiO₂ 10.1%+TiO₂ 6.4%+碳粉 5%+纳米石墨烯 0.6%+MTES 1.8%时，涂层水接触角达到 158.23°，导热系数达到 14.19 W/(m·K)，通过实验测试得到涂层水接触角和导热系数的误差分别为 3.80%和 2.31%。

4) 采用调整后的参数进行试验，测试得到涂层

水接触角为 155.02° ，导热系数为 $13.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，通过神经网络模型预测得到的结果误差分别为 5.64% 和 5.58%。

参考文献:

- [1] 郭宪民, 王冬丽, 陈轶光, 等. 室外换热器迎面风速对空气源热泵结霜特性的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(S2): 32-37.
GUO Xian-min, WANG Dong-li, CHEN Yi-guang, et al. Effects of Face Velocity of Outdoor Heat Exchanger on Frosting Characteristics of Air Source Heat Pump System[J]. CIESC Journal, 2012, 63(S2): 32-37.
- [2] 包佳倩, 苏林, 刘明康, 等. 电动汽车热泵空调系统室外换热器结霜特性实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(3): 58-64.
BAO Jia-qian, SU Lin, LIU Ming-kang, et al. Experimental Study on Outdoor Heat Exchanger Frosting Characteristics of a Heat Pump Air-Conditioning System for Electric Vehicles[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(3): 58-64.
- [3] 刘耀民, 刘中良, 黄玲艳, 等. 结霜对微型冷库性能影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1755-1758.
LIU Yao-min, LIU Zhong-liang, HUANG Ling-yan, et al. An Experimental Study of the Influences of Frost Deposition on the Performance of a Small Cold Store[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(10): 1755-1758.
- [4] 余超群, 臧润清, 吴国强, 等. 集中送风式冷库结霜与除霜性能的研究[J]. 低温与超导, 2018, 46(5): 88-92.
YU Chao-qun, ZANG Run-qing, WU Guo-qiang, et al. Study on Frosting and Defrosting Performance of Centralized Air Supply Cold Storage[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2018, 46(5): 88-92.
- [5] 丁云飞, 殷帅, 廖云丹, 等. 纳微结构疏水表面结霜过程及抑霜特性[J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3213-3219.
DING Yun-fei, YIN Shuai, LIAO Yun-dan, et al. Frosting Mechanism and Suppression on Nano/Micro-Structured Hydrophobic Surfaces[J]. CIESC Journal, 2012, 63(10): 3213-3219.
- [6] 周艳艳, 于志家. 铝基超疏水表面抗结霜特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(6): 929-933.
ZHOU Yan-yan, YU Zhi-jia. The Defrosting Behavior of the Super-Hydrophobic Aluminum Surfaces[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012, 26(6): 929-933.
- [7] 颜兴艳, 陈广学. 印刷电解法制备具有可控微纳结构的防结霜铜金属功能表面[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 101-107.
YAN Xing-yan, CHEN Guang-xue. Preparation of Anti-Frosting Copper Functional Surface with Controllable Micro-Nano Structure in a Novel Silk-Screen Printing Aided Electrochemical Machining Method[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 101-107.
- [8] 赵玲倩, 刘中良, 李丽艳, 等. 疏水性对竖直冷表面上自然对流结霜特性的影响[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 43-51.
ZHAO Ling-qian, LIU Zhong-liang, LI Li-yan, et al. Effect of Hydrophobicity on Frost Deposition on Vertical Cold Surfaces under Natural Convection Conditions[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 43-51.
- [9] 汪怀远, 林丹, 张曦光, 等. 水性超疏水涂层的制备、调控与应用的研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(2): 669-680.
WANG Huai-yuan, LIN Dan, ZHANG Xi-guang, et al. Research Progress on Preparation, Regulation and Application of Waterborne Superhydrophobic Coatings[J]. CIESC Journal, 2021, 72(2): 669-680.
- [10] 吴俐俊, 张浩, 苑昭阔, 等. 省煤器表面耐腐超导热石墨烯复合涂层的性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 518-523.
WU Li-jun, ZHANG Hao, YUAN Zhao-kuo, et al. Properties of Corrosion-Resistant and Superconducting Heat Graphene Composite Coating on Economizer Surface[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(4): 518-523.
- [11] 聂晟楠, 吴俐俊, 柳盈含, 等. 换热器表面复合涂层的制备及耐腐蚀与导热性能[J]. 精细化工, 2020, 37(1): 66-71.
NIE Sheng-nan, WU Li-jun, LIU Ying-han, et al. Preparation, Corrosion Resistance and Thermal Conductivity of Graphene Composite Coating on the Surface of Heat Exchanger[J]. Fine Chemicals, 2020, 37(1): 66-71.
- [12] 高正源, 孙程锦, 杨栋, 等. 石墨烯及其衍生物在防腐蚀领域中的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 116-127.
GAO Zheng-yuan, SUN Cheng-jin, YANG Dong, et al. Research Progress of Graphene and Its Derivatives in the Field of Anti-Corrosion[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 116-127.
- [13] 韩宇莹, 刘梓良, 王文学, 等. 石墨烯在有机防腐涂层领域的应用研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 196-207, 286.
HAN Yu-ying, LIU Zi-liang, WANG Wen-xue, et al. Application and Development Progress of Graphene in the Field of Organic Anticorrosive Coatings[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 196-207, 286.
- [14] 赵传营, 赵玉刚, 刘宁, 等. 基于神经网络遗传算法的磁粒研磨 TC4 材料工艺参数优化[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 316-321.
ZHAO Chuan-ying, ZHAO Yu-gang, LIU Ning, et al. Optimization of Process Parameters of Magnetic Abrasive Finishing TC4 Material Based on Neural Network and Genetic Algorithm[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 316-321.

(下转第 271 页)