

# 融合设备状态和产品要求的电解铜箔制造工艺参数优化

姜洪权<sup>1</sup>, 黄开程<sup>1</sup>, 周智<sup>1</sup>, 苗东<sup>2</sup>, 陈富民<sup>1</sup>, 高建民<sup>1</sup>, 杨祥魁<sup>3</sup>, 朱义刚<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安泰金新能科技股份有限公司, 710001, 西安;

3. 山东金宝电子有限公司, 265400, 山东招远)

**摘要:** 针对当前电解铜箔制造工艺参数的优化仅考虑产品要求的问题,提出了一种融合设备状态和产品要求的电解铜箔制造工艺参数优化方法。首先,为辨识铜箔制造中工艺、设备与产品参数之间的非线性关系,建立了基于神经网络的“工艺-设备”与产品参数的映射模型,并通过构建当前生产模式与历史生产模式的相似性度量方法,确定当前工艺参数的优化初始点;然后,基于所建立的映射模型、设备状态和产品要求构建多目标约束函数,并利用遗传算法优化工艺参数,获得同时满足设备状态和产品要求的最佳工艺参数。企业的生产验证表明:相较于仅考虑产品要求的工艺优化方法,所提方法优化后的工艺参数能在相同的设备状态下获得质量更好的产品,在常温/高温抗拉强度、常温/高温延伸率和树脂剥离强度这5项关键指标上,分别提升了6.1 MPa、6.1 MPa、1.9%、0.7%和0.22 N/mm,生箔制备和表面处理的生产效率也提高了2.65%和7.5%,能够有效保证并提高铜箔的质量和生产效益。

**关键词:** 电解铜箔;设备状态;产品要求;多目标约束;工艺优化

**中图分类号:** TN41;TP391 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202407017 **文章编号:** 0253-987X(2024)07-0179-12

## Optimization of Electrolytic Copper Foil Manufacturing Process Parameters by Integrating Equipment Status and Product Requirements

JIANG Hongquan<sup>1</sup>, HUANG Kaicheng<sup>1</sup>, ZHOU Zhi<sup>1</sup>, MIAO Dong<sup>2</sup>, CHEN Fumin<sup>1</sup>,

GAO Jianmin<sup>1</sup>, YANG Xiangkui<sup>3</sup>, ZHU Yigang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Taijin Xinneng Technology Co., Ltd., Xi'an 710001, China;

3. Shandong Jinbao Electronics Co., Ltd., Zhaoyuan, Shandong 265400, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the current optimization methods of electrolytic copper foil manufacturing process parameters simply consider product requirements, an optimization method of electrolytic copper foil manufacturing process parameters by integrating equipment status and product requirements is proposed. Firstly, in order to identify the nonlinear relationship among process, equipment, and product parameters in the copper foil manufacturing, a mapping model of “process-equipment” and product parameters is established based on neural network. By

constructing the similarity measurement method between the current production mode and the historical production mode, the optimization starting point of the current process parameters is determined. Furthermore, based on the established mapping model, equipment status, and product requirements, a multi-objective constraints function is constructed, and genetic algorithm is used to optimize the process parameters, aiming to achieve the optimal process parameters that meet both equipment status and product requirements. Through the verification in the production of enterprises, it is shown that, compared with the process optimization method that only considers product requirements, the optimized process parameters can yield products with higher quality under the same equipment status, increasing the five key indicators of normal temperature and high temperature tensile strength, normal temperature and high temperature elongation, and resin peeling strength by 6.1 MPa, 6.1 MPa, 1.9%, 0.7%, and 0.22 N/mm respectively. Additionally, the production efficiency of raw foil preparation and surface treatment increase by 2.65% and 7.5% respectively. The research results can effectively ensure and improve the quality and production efficiency of copper foil.

**Keywords:** electrolytic copper foil; equipment status; product requirements; multi-objective constraints; process optimization

电解铜箔是覆铜板(CCL)、印制线路板(PCB)和电池集流体等产品的关键基础材料<sup>[1]</sup>。新能源、5G通信及大数据等产业的发展,对电解铜箔的需求飞速增长,同时对其产品质量、服役性能及制造效率等提出更高的要求<sup>[2]</sup>。电解铜箔的制造系统一般由溶铜系统、生箔机及表面处理机等核心制造单元组成,是一个典型的流程性强、工艺耦合性高的复杂制造过程<sup>[3]</sup>。铜箔产品质量的管控不仅包括生产人员、原材料和生产环境等<sup>[4]</sup>,而且需要对工艺参数进行设计与优化<sup>[5]</sup>,只有这样才能保证铜箔产品的稳定质量及高效生产。因此,电解铜箔制造过程中的工艺参数设计与优化已成为企业急需解决的问题。

当前,针对铜箔制造工艺优化主要采用基于实验设计的方法<sup>[6-8]</sup>。例如,彭雪嵩等<sup>[9]</sup>通过正交试验研究了3种添加剂对铜箔粗化效果的影响,发现优化后的添加剂组合能有效提高铜箔的剥离强度;由宏伟<sup>[10]</sup>通过正交试验研究了可制备出高温抗氧化性Ni-Mo合金镀层的电沉积工艺参数以及具有高剥离强度的表面粗化工艺参数的优化方法;文雯<sup>[11]</sup>通过单因素实验确定出最优的超薄铜箔镀液体系,并经正交试验优化3种添加剂的浓度,得到了制备表面光滑、无针孔的高质量超薄铜箔的工艺参数;Li等<sup>[12]</sup>通过单因素实验,研究了不同铜离子质量浓度对铜箔结构和力学性能的影响,得出当铜离子质量浓度为84 g/L时,铜箔表面的颗粒均匀且力学性能最佳;文献[13]、[14]分别通过单因素实验和正交试验对单一添加剂的浓度及多种添加剂的组合浓度进

行优化研究,均得到了低表面粗糙度和高抗拉强度的铜箔产品。上述基于实验设计的方法具有很好的应用价值,可以辨识过程因素与工艺设计目标的关联关系,提高实验过程效率,但是这类方法主要考虑到铜箔产品的质量特性要求,对于工艺参数是否匹配生产设备的状态信息缺乏考虑。

随着大数据、机器学习和深度学习等技术的发展,基于数据驱动的参数优化方法逐渐受到关注。例如,在铜箔工艺优化中,易光斌<sup>[15]</sup>基于历史数据,建立了粗糙度、抗拉强度和延伸率等产品参数与电流密度、铜浓度等工艺参数之间的关系式,并以此进行工艺优化;刘耀<sup>[16]</sup>分析并建立了基于多项式拟合的铜箔粗糙度、抗拉强度和剥离强度等质量指标与3种添加剂浓度的关联关系及工艺优化方法;周杰等<sup>[17]</sup>提出基于随机森林和改进竞争群算法的铜箔电解过程能耗优化算法,解决了铜箔电解过程中能耗高及建模困难问题。在其他场景的工艺优化中,Plathottam等<sup>[18]</sup>采用深度强化学习对不同原料成分组合的溶剂萃取工艺进行了优化设计;刘孝保等<sup>[19]</sup>基于集成学习和改进粒子群算法对多工序工艺参数进行优化;Abdullah等<sup>[20]</sup>采用神经网络和遗传算法优化苹果汁的提取工艺,提高了苹果汁质量。可以看出,基于数据驱动的方法符合当前制造过程信息化、智能化的发展需求,可以依据优化目标要求柔性制定数据分析方法,但是其主要难点是明确工艺、产品及制造过程之间的相互关系。同时,上述方法在多工艺参数和多产品参数的工艺优化中容易出

现矛盾点,即某一维度的工艺参数可能会造成两个不同产品参数分别为最好和最差。

一般地,在电解铜箔实际制造过程中,技术人员不仅要依据铜箔产品质量要求制定工艺(如产品的厚度、表面粗糙度以及抗拉强度等<sup>[21]</sup>),还要考虑生产线中核心设备状态的约束。实际上,在制造过程中,溶铜系统、生箔机和表面处理机等设备的状态会对铜箔质量产生重大影响,即使是在同一产品要求和同一生产线环境下,由于设备运行状态微观变化,产品的制造工艺参数也不完全相同,往往需要依据这些核心设备状态进行工艺优化调整。由此可见,若仅考虑核心生产设备的状态对工艺进行设计与优化,则难以生产出预期质量的铜箔产品,而仅基于产品质量要求来优化工艺,则难以在不同设备状态下实现铜箔产品的高效益、高质量以及稳定生产。因此,综合考虑设备状态及产品要求对铜箔制造工艺进行优化,对于提高铜箔制造的稳定性、生产效益和智能化等具有重大意义。显然,现有工艺优化技术忽视了这一领域特征,缺乏“核心设备状态+产品质量要求”的工艺优化技术体系。

针对以上问题,本文以电解铜箔的生产制造为应用背景,提出了一种融合设备状态和产品要求的电解铜箔制造工艺参数优化方法。首先,利用历史积累的制造过程数据建立了“工艺-设备”与产品参数的映射模型;然后,构建了当前生产模式与历史生产模式之间的相似性度量方法,以确定当前工艺参数的优化初始范围;最后,融合当前设备状态和产品质量要求构建多目标约束函数,实现对工艺参数的优化,从而得到可同时满足设备状态信息与产品质量要求的最优制造工艺参数。

# 1 电解铜箔制造工艺优化问题分析

电解铜箔的生产制造流程如图 1 所示,分为溶铜造液、生箔制备、表面处理以及分切包装 4 道工序<sup>[22-23]</sup>。完成铜箔制造后与树脂等材料压合形成基板可应用于下游产业。一般地,铜箔制造系统主要由溶铜系统、生箔机及表面处理机等设备单元组成,各单元之间具有密切的工艺关联性和耦合性。为实现制造过程状态及工艺优化问题分析,本文建立了如图 2 所示的制造过程数据逻辑关系,即以工艺参数和设备参数作为制造过程输入数据,以产品参数作为制造过程输出数据。实际上,这 3 类数据也是整个铜箔制造过程中最核心的管控要素。表 1 所示为典型电解铜箔制造过程数据的主要参数。

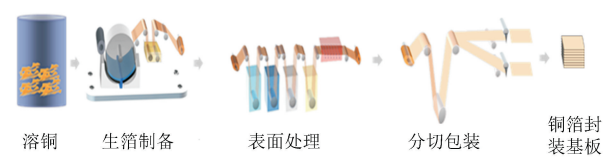


图 1 电解铜箔的生产制造流程

Fig. 1 Manufacturing process of electrolytic copper foil

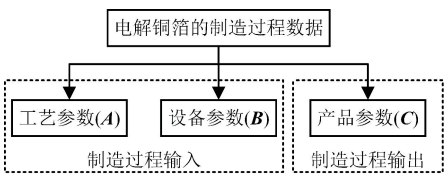


图 2 电解铜箔的制造过程数据

Fig. 2 Manufacturing process data of electrolytic copper foil

表 1 电解铜箔制造过程数据

Table 1 Manufacturing process data of electrolytic copper foil

| 参数类别        | 设备或工序  | 参数                                          | 参数个数 |
|-------------|--------|---------------------------------------------|------|
| 工艺参数<br>(A) | 生箔制备   | 硫酸铜浓度、硫酸浓度、溶液温度、溶液流量、生产电流、辅助阴极电流、阴极辊        | 11   |
|             | 工序     | 转速、收卷张力、添加剂浓度、添加剂流量、烘干温度                    |      |
|             | 表面处理   | 硫酸浓度、溶液温度、溶液流量、粗化 1 电流、粗化 2 电流、粗化 3 电流、粗化液  | 15   |
|             | 工序     | 浓度、固化 1 电流、固化 2 电流、固化 3 电流、固化液浓度、防氧化电流、防氧化  |      |
| 设备参数<br>(B) | 生箔机    | 阴极辊直径、阴极辊幅宽、极距、阴极辊表面粗糙度( $R_a$ )、阴极辊表面粗糙度   | 8    |
|             |        | ( $R_z$ )、阳极板长度、阳极板宽度、阳极板数量                 |      |
|             | 表面处理机  | 槽数、辊子直径、辊子幅宽、极距、阳极板长度、阳极板宽度、阳极板数量           | 7    |
| 产品参数<br>(C) | 质量检测工序 | 标称厚度、机械厚度、标称单位面积质量、单位面积质量、S 面粗糙度( $R_a$ )、  | 14   |
|             |        | M 面粗糙度( $R_z$ )、常温抗拉强度、常温延伸率、高温抗拉强度、高温延伸率、树 |      |
|             |        | 脂剥离强度、厚度偏差、单位面积质量偏差、宽度                      |      |



(1)工艺参数(**A**):主要包括溶铜造液工序中的各种溶液的状态参数(如浓度、温度和流量等)、生箔机和表面处理机上的电流、电压、转速等参数。这些参数通常是影响铜箔产品质量的关键核心要素,本文使用  $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_{m_1})$  表示,常见工艺参数如表1“工艺参数(**A**)”所示。

(2)设备参数(**B**):主要指设备固有的特征参数。为便于论述,本文重点关注生箔机和表面处理机这两套核心生产设备的参数。一般地,影响产品质量的设备参数有直径、幅宽、极距等,这些参数随着生产的进行一般会发生渐变,进而影响产品质量状态。本文使用  $\mathbf{B}=(b_1, b_2, \dots, b_{m_2})$  表示设备参数,常见设备参数如表1“设备参数(**B**)”所示。

(3)产品参数(**C**):主要包括最终铜箔成品所要达到的各项性能指标参数,一般有厚度、表面粗糙度和抗拉强度等,本文用  $\mathbf{C}=(c_1, c_2, \dots, c_{m_3})$  表示,关键产品参数如表1“产品参数(**C**)”所示。

依据以上工艺参数、设备参数和产品参数的定义及内容,优化电解铜箔的制造工艺参数时需要解决以下问题。

(1)工艺参数和设备参数对产品参数的影响关系辨识及初始工艺参数确定问题。首先,由图1及表1可知,铜箔制造过程复杂,产品质量影响因素多,且产品质量必然受到制造工艺和生产设备状态的双重影响,尤其是在相同的制造工艺下,核心生产设备的参数变化也将导致产品的质量状态发生变化。因此,在进行工艺优化时需要明确工艺参数、设备参数这两种参数对产品质量的影响机制,即需要构建“工艺-设备”与产品参数之间的非线性映射关系,进而实现对工艺参数的约束和反馈调节。再者,如表1所示,一般地,在生产设备特征与产品质量特征确定的情况下,生产工艺参数将是确定的,即可以将生产设备特征与产品质量特征构成的模式定义为生产模式参数  $\mathbf{D}=\{\mathbf{B}, \mathbf{C}\}$ 。由于企业在长期生产中积累了大量的生产模式参数集  $\{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_N\}$  及对应的工艺参数集  $\{\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_N\}$ ,  $N$  为数据集的样本个数,因此在优化工艺时依据当前生产模式参数  $\mathbf{D}_0$  (假设  $\mathbf{D}_0$  与  $\{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_n\}$  的子集  $\{\mathbf{D}_j, \mathbf{D}_k, \dots, \mathbf{D}_l\}$  的相似性较高),借鉴历史积累的生产模式参数  $\{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_N\}$  中对应的工艺参数  $\{\mathbf{A}_j, \mathbf{A}_k, \dots, \mathbf{A}_l\}$  (下标  $j, k, \dots, l$  表示数据个数为不定值),可以有效解决初始工艺参数集的确定问题。

(2)工艺参数的多目标优化函数构建及工艺参数求解问题。由图1和图2可知,电解铜箔制造过程的核心是通过制定合适的工艺参数,在特定的生

产设备状态下生产出质量最优的铜箔产品,因此需要融合相应的生产设备状态和产品质量要求对工艺参数的优化进行约束,即构建合适的工艺参数优化目标函数,使得优化后的工艺参数尽可能匹配当前的生产设备状态,并提高铜箔产品的关键质量指标和生产效益。工艺参数的优化求解主要过程是:在确定初始工艺参数集的基础上,依据“工艺-设备”与产品参数的映射关系及多目标函数的共同约束下进行求解。因此,如何建立可以包括上述要求的求解流程及算法也是需要解决的问题。

## 2 融合设备状态和产品要求的工艺参数优化

### 2.1 工艺参数优化技术框架

依据第1节的问题分析,提出一种融合设备状态和产品要求的电解铜箔制造工艺参数优化方法,其技术框架如图3所示,实现步骤如下:

(1)构建优良制造过程数据集:依据表1的数据示例,通过整理历史积累的产品参数较优的制造过程数据,形成电解铜箔的优良制造过程数据集  $\{\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1\}, \{\mathbf{A}_2, \mathbf{B}_2, \mathbf{C}_2\}, \dots, \{\mathbf{A}_N, \mathbf{B}_N, \mathbf{C}_N\}$ ;

(2)建立“工艺-设备”与产品参数之间的映射模型:利用优良制造过程数据集,建立工艺参数(**A**)和设备参数(**B**)与产品参数(**C**)的映射模型,即  $\mathbf{C}=f(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ ,从而建立“工艺-设备”与产品参数之间的非线性映射关系;

(3)当前生产模式的相似性度量:根据当前的设备参数  $\mathbf{B}_0$  和产品参数  $\mathbf{C}_0$  确定当前生产模式  $\mathbf{D}_0$ ,并在优良制造过程数据集中进行生产模式的相似性度量,从而获取与  $\mathbf{D}_0$  相似性较高的历史生产模式  $\{\mathbf{D}_j, \mathbf{D}_k, \dots, \mathbf{D}_l\}$  及对应的工艺参数集  $\{\mathbf{A}_j, \mathbf{A}_k, \dots, \mathbf{A}_l\}$ ;

(4)基于多目标函数的工艺优化:基于步骤2构建的映射模型  $\mathbf{C}=f(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ ,构建多目标约束优化函数  $f_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}^i(\mathbf{A})$ ,并将步骤3的工艺参数集  $\{\mathbf{A}_j, \mathbf{A}_k, \dots, \mathbf{A}_l\}$  作为优化起点,然后通过优化算法得到最优工艺参数  $\mathbf{A}_{op}$ ,实现工艺参数的设计及优化。

### 2.2 “工艺-设备”与产品的映射模型及初始工艺参数集确定

如第1节问题分析所述,“工艺-设备”与产品参数之间存在着非线性映射关系,这是影响产品质量的重要约束。例如,在铜箔产品制造过程中,一般根据标称厚度或标称单位面积质量、抗拉强度、延伸率等产品参数(**C**),选择调整生箔机上的阴极辊直径、极距等设备参数(**B**),不断调整电流、溶液流量、张

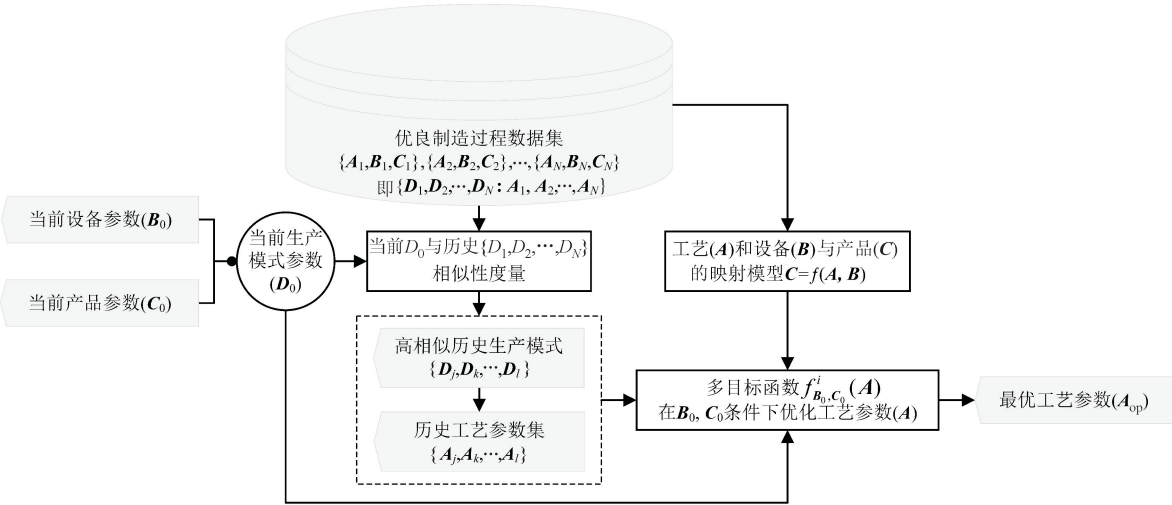


图 3 工艺参数优化技术框架

Fig. 3 Technical framework for process parameters optimization

力、阴极辊转速、粗化、固化、防氧化等工艺参数(A),从而完成铜箔的生产<sup>[3,5]</sup>。因此,“工艺-设备”与产品参数的映射模型不仅包含了工艺、设备对产品的影响机制,也是一种典型的多输入-多输出映射关系。BP神经网络是一种误差反向传播的多层前馈神经网络,可学习和贮存大量的输入-输出模式映射关系。通过梯度下降法和误差反向传播法,可快速利用已知的映射模式数据对BP神经网络进行训练,自此网络就具有了输入与输出之间的映射能力<sup>[24]</sup>。由此可见,BP神经网络能够快速对新数据进行学习,能够极好地满足铜箔的实际生产需求。

针对以上特点,利用BP神经网络构建这种多输入-多输出映射关系<sup>[24]</sup>,建立工艺参数(A)、设备参数(B)与产品参数(C)的映射模型 $C=f(A,B)$ ,如图4所示。

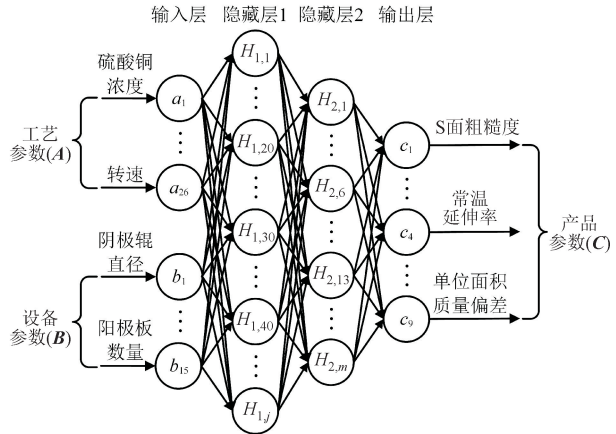


图 4 基于神经网络的“工艺-设备”与产品参数映射模型  
Fig. 4 “Process-equipment” and product parameters mapping model based on neural network

由图4可见,该模型由1个输入层、2个隐藏层和1个输出层组成。 $H_{1,j}$ 和 $H_{2,m}$ 分别表示隐藏层1中的第j个神经元、隐藏层2中的第n个神经元。其中,输入层由工艺参数(A)和设备参数(B)构成,输出层为除去标称厚度、机械厚度、标称单位面积质量、单位面积质量和宽度5个参数外的其余9项产品参数(C)。可以看出,通过建立映射模型 $C=f(A,B)$ ,既可利用历史积累的过程数据,也可以提取“工艺-设备”与产品参数的影响关系,并为后续构建多目标约束优化函数提供依据。

此外,如第1节所述,充分利用历史制造过程数据中积累的固有生产规律,有助于提高工艺参数的优化质量。在积累的优良制造过程数据集中,由图3可知,储存着大量生产模式参数(D)与工艺参数(A)的数据对即 $\{D_1, D_2, \dots, D_N: A_1, A_2, \dots, A_N\}$ ,通过对当前生产模式 $D_0$ 与历史生产模式 $D_1, D_2, \dots, D_N$ 进行相似性度量,可以从优良制造过程数据集中匹配出具有一定生产规律和知识的初始工艺参数。由表1可知,生产模式参数 $D=\{B,C\}$ 是高维空间数据,而传统基于空间距离的相似性度量,在高维数据空间中易出现维度灾难<sup>[25]</sup>问题,无法准确表征高维数据间的相似性。因此,本文采用文献<sup>[26]</sup>所述的相似性度量函数 $Esim(X,Y)$ ,定义如下

$$Esim(X,Y) = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \omega_i \exp\left(-\frac{|x_i - y_i|}{|x_i - y_i| + |x_i + y_i|/2}\right) \quad (1)$$

式中: $X=(x_1, x_2, \dots, x_d)$ 、 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_d)$ 为d维数据点; $\omega_i$ 为维度权重。 $Esim(X,Y) \in [0,1]$ ,当

取0和1时,分别表示 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 相似性最低和最高。

通过上述相似性度量,可以获得与 $\mathbf{D}_0$ 相似性较高的历史生产模式 $\{\mathbf{D}_j, \mathbf{D}_k, \dots, \mathbf{D}_l\}$ 及对应的工艺参数集 $\{\mathbf{A}_j, \mathbf{A}_k, \dots, \mathbf{A}_l\}$ ,作为 $\mathbf{D}_0$ 条件下的工艺优化的初始参数集。

### 2.3 工艺优化多目标函数构建

工艺优化的最终目标是生产出质量最佳的产品。一般地,铜箔的关键质量指标包括厚度、单位面积质量、S面粗糙度( $R_a$ )和M面粗糙度( $R_z$ )等,要求厚度偏差和单位面积质量偏差越小越好,抗拉强度、延伸率和树脂剥离强度越大越好<sup>[3,5]</sup>,且有较高生产效率。综上所述,在当前设备参数 $\mathbf{B}_0$ 和产品参数 $\mathbf{C}_0$ 的条件下,建立工艺优化所需的4项目标函数具体如下。

(1)最小目标函数。构建表面粗糙度、厚度偏差和单位面积质量偏差最小目标函数

$$f_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}^1(\mathbf{A}) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{1}{1 + \alpha_1 + (c_i^0 - c_i'^0)} \quad (2)$$

式中:优化工艺参数 $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_{26})$ 与当前设备参数 $\mathbf{B}_0=(b_1^0, b_2^0, \dots, b_{15}^0)$ 作为映射模型的输入向量; $\mathbf{C}'_0=f(\mathbf{A}, \mathbf{B}_0)=(c_1'^0, c_2'^0, \dots, c_9'^0)$ 为映射模型的输出向量,第1、2、8、9个输出分别为S面 $R_a$ 、M面 $R_z$ 、厚度偏差和单位面积质量偏差的预测值; $\mathbf{C}_0=(c_1^0, c_2^0, \dots, c_9^0)$ 为当前产品参数,第1、2、8、9个参数分别为S面 $R_a$ 、M面 $R_z$ 、厚度偏差和单位面积质量偏差; $\alpha_1$ 为范围控制参数,取 $\alpha_1=c_i^0, i=1, 2, 8, 9$ 。该函数越小,表明在当前设备状态下这4项产品参数越符合既定的产品质量要求。

(2)最大目标函数。构建抗拉强度、延伸率和树脂剥离强度最大目标函数

$$f_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}^2(\mathbf{A}) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{1}{1 + \alpha_2 + (c_i'^0 - c_i^0)} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{C}'_0=f(\mathbf{A}, \mathbf{B}_0)=(c_1'^0, c_2'^0, \dots, c_9'^0)$ 为映射模型的输出向量,第3至7个输出分别为常温/高温抗拉强度、常温/高温延伸率和树脂剥离强度的预测值; $\mathbf{C}_0=(c_1^0, c_2^0, \dots, c_9^0)$ 为当前产品参数,第3至7个参数分别为常温/高温抗拉强度、常温/高温延伸率和树脂剥离强度; $\alpha_2$ 为范围控制参数,取 $\alpha_2=0.5c_i^0, i=3, 4, 5, 6, 7$ 。该函数越小,表明在当前设备状态下这5项产品参数越符合既定的产品质量要求。

(3)产品规格目标函数。为满足特定厚度和单位面积质量的电解铜箔生产,构建产品规格目标

函数<sup>[3]</sup>

$$f_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}^3(\mathbf{A}) = \pi D \left| \alpha_3 \frac{I g_1}{60 n_1} - W m_g \right| \quad (4)$$

式中: $I, n_1$ 为待优化工艺参数 $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_{26})$ 中的某一参数, $I=a_5$ 为生产电流,单位为A, $n_1=a_7$ 为阴极辊转速,单位为m/min; $D, W$ 为当前设备参数 $\mathbf{B}_0=(b_1^0, b_2^0, \dots, b_{15}^0)$ 中的某一参数, $D$ 为阴极辊直径,单位为m, $W$ 为阴极辊幅宽,单位为m; $m_g$ 为当前的标称单位面积质量,单位为g/m<sup>2</sup>;  $g_1$ 为电流效率,取0.975; $\alpha_3$ 为生箔机设备常数,取1.33 kg/(kA·h)。该函数越小,表明在当前设备状态下厚度和单位面积质量越符合既定的产品规格要求。

(4)生产效率目标函数。在满足产品质量要求下,为提高生产效率,构建生产效率目标函数

$$f_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}^4(\mathbf{A}) = \left| \frac{1}{2} \left( 1.9 + \frac{n_1 - 2}{200} + \frac{n_2 - 10}{400} \right) - 1 \right| \quad (5)$$

式中: $n_1, n_2$ 为待优化工艺参数 $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_{26})$ 中的某一参数, $n_1=a_7 \geq 2$ 为阴极辊转速,单位为m/min, $n_2=a_{26} \geq 10$ 为表面处理机转速,单位为m/min。该函数取值越小代表生产效率越高。

### 2.4 综合设备状态及产品要求的工艺参数优化

由2.2及2.3小节可以获得映射模型 $\mathbf{C}=f(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ 以及4项优化约束目标函数。由于映射模型 $\mathbf{C}=f(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ 为复杂非线性关系,且上述4项目标函数存在难以或无法求导问题,因此本文采用遗传算法进行工艺参数优化求解。

遗传算法(GA)是一种借鉴生物界自然选择和遗传机制的算法。其主要思路是从初始种群开始,通过选择、交叉和变异产生适应度更高的种群,使种群不断进化,最后收敛得到适应度最高的种群,从而求得最优解<sup>[27-28]</sup>。由于遗传算法中对个体择优选择的依据是个体的适应度,因此需将多目标函数转化为单适应度函数。依据2.3小节中的4项目标函数建立如下所示的适应度函数

$$\text{Fit}_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^4 w_i f_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}^i(\mathbf{A}) \quad (6)$$

式中: $w_i$ 为权重参数。 $\text{Fit}_{\mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0}(\mathbf{A})$ 取值越低,代表个体的适应度越高,被淘汰的概率越低。由于4项目标函数都为最小化问题,即目标函数越小,对应的工艺参数的适应度越高。

综合2.2及2.3小节等内容,本文提出的工艺参数优化算法流程如图5所示。



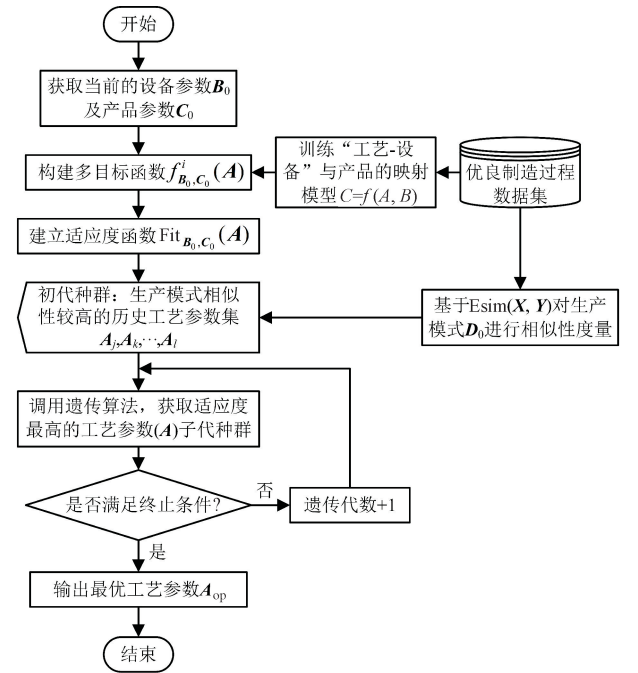


图 5 综合设备状态及产品要求的工艺参数优化算法流程  
Fig. 5 Process parameters optimization algorithm flow integrating equipment status and product requirements

具体实现步骤如下：

**步骤 1** 获取当前的设备参数  $B_0$  和产品参数  $C_0$ ，并依此确定当前的生产模式参数  $D_0$ ；

**步骤 2** 基于优良制造过程数据集，构建训练集和测试集，并对“工艺-设备”与产品参数的映射模型  $C = f(A, B)$  进行训练，终止训练条件为损失误差小于目标值或训练轮次大于设定值；

**步骤 3** 基于步骤 1 获取的参数  $B_0$  和  $C_0$  以及步骤 2 训练得到的映射模型  $C = f(A, B)$ ，构建工艺优化的多目标函数  $f_{B_0, C_0}^j(A)$ ；

**步骤 4** 将多目标函数转化为单适应度函数，建立综合适应度函数  $\text{Fit}_{B_0, C_0}(A)$ ；

**步骤 5** 利用  $\text{Esim}(X, Y)$  函数在优良制造过程数据集中进行数据匹配，获取与当前生产模式  $D_0$  相似性较高的历史生产模式  $\{D_j, D_k, \dots, D_l\}$  及对应的工艺数据集  $\{A_j, A_k, \dots, A_l\}$ ，将其作为遗传算法的初代种群；

**步骤 6** 通过遗传算法的选择、交叉和变异等操作，获取适应度函数  $\text{Fit}_{B_0, C_0}(A)$  较高的子代种群，使其不断繁衍进化；

**步骤 7** 当适应度函数不再变化或者遗传代数超过设定值时，算法终止，输出适应度最佳的工艺参数  $A_{\text{op}}$ 。

### 3 实例验证与分析

#### 3.1 铜箔制造过程实例数据概述

本文利用某企业在 2022 年 10 月生产的 15、18、35  $\mu\text{m}$  这 3 种标称厚度的优良制造过程数据集进行验证，数据集共计 793 条数据。典型示例数据如表 2～表 4 所示。需要说明的是，以表 2 的工艺参数和表 3 的设备参数作为制造过程输入，生产完成后得到的制造过程输出即为表 4 所示的产品参数。

表 2 优化前的工艺参数

| Table 2 Process parameters before optimization |                                            |        |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------|
| 工序                                             | 参数                                         | 数值     |
| 生箔制备                                           | 硫酸铜浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )   | 81.1   |
|                                                | 硫酸浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )    | 129.3  |
|                                                | 溶液温度/ $^{\circ}\text{C}$                   | 52.5   |
|                                                | 溶液流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )  | 60.3   |
|                                                | 生产电流/A                                     | 40 000 |
|                                                | 辅助阴极电流/A                                   | 20     |
|                                                | 阴极辊转速/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 4.15   |
|                                                | 收卷张力/N                                     | 764.4  |
|                                                | 添加剂浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )   | 15.0   |
|                                                | 添加剂流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 10.0   |
|                                                | 烘干温度/ $^{\circ}\text{C}$                   | 265.1  |
|                                                | 硫酸浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )    | 211.2  |
|                                                | 溶液温度/ $^{\circ}\text{C}$                   | 30.4   |
|                                                | 溶液流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )  | 60.5   |
|                                                | 粗化 1 电流/A                                  | 2 100  |
| 表面处理                                           | 粗化 2 电流/A                                  | 2 100  |
|                                                | 粗化 3 电流/A                                  | 2 200  |
|                                                | 粗化液浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )   | 30.1   |
|                                                | 固化 1 电流/A                                  | 2 200  |
|                                                | 固化 2 电流/A                                  | 2 200  |
|                                                | 固化 3 电流/A                                  | 2 200  |
|                                                | 固化液浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )   | 90.3   |
|                                                | 防氧化电流/A                                    | 200    |
|                                                | 防氧化液浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )  | 30.4   |
|                                                | 收卷张力/N                                     | 833.0  |
|                                                | 转速/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )    | 20     |

注：① 本文的浓度均代表质量浓度（单位为  $\text{mg/L}$  或  $\text{g/L}$ ），使用简称更贴合实际生产情况；② 线速度（单位为  $\text{m/min}$ ）表示转速，源于实际生产现场的制造过程数据，符合铜箔企业的生产特点以及行业惯例；③ 转速  $n$ （单位为  $\text{r/min}$ ）与线速度  $v$ （单位为  $\text{m/min}$ ）的换算关系为  $v = 2\pi rn$ ，其中  $r$  为半径（单位为  $\text{m}$ ）。

表 3 典型设备参数

Table 3 Typical equipment parameters

| 设备    | 参数                      | 数值     |
|-------|-------------------------|--------|
| 生箔机   | 阴极辊直径/mm                | 2 700  |
|       | 阴极辊幅宽/mm                | 1 400  |
|       | 极距/mm                   | 12     |
|       | 阴极辊表面 $R_a/\mu\text{m}$ | 0.35   |
|       | 阴极辊表面 $R_z/\mu\text{m}$ | 0.45   |
|       | 阳极板长度/mm                | 1 340  |
|       | 阳极板宽度/mm                | 319    |
|       | 阳极板数量                   | 14     |
| 表面处理机 | 槽数                      | 11     |
|       | 辊子直径/mm                 | 210    |
|       | 辊子幅宽/mm                 | 15 000 |
|       | 极距/mm                   | 50     |
|       | 阳极板长度/mm                | 1 400  |
|       | 阳极板宽度/mm                | 890    |
|       | 阳极板数量                   | 21     |

表 4 典型产品参数

Table 4 Typical product parameters

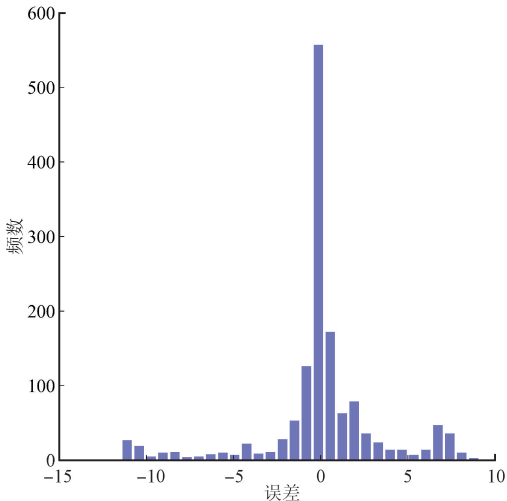
| 参数                                         | 数值    |
|--------------------------------------------|-------|
| 标称厚度/ $\mu\text{m}$                        | 18    |
| 机械厚度/ $\mu\text{m}$                        | 19.5  |
| 标称单位面积质量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$ | 152.5 |
| 单位面积质量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$   | 154.6 |
| S 面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$                   | 0.25  |
| M 面粗糙度 $R_z/\mu\text{m}$                   | 5.85  |
| 常温抗拉强度/MPa                                 | 340.5 |
| 常温延伸率/%                                    | 6.0   |
| 高温抗拉强度/MPa                                 | 200.3 |
| 高温延伸率/%                                    | 4.5   |
| 树脂剥离强度/ $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$  | 1.5   |
| 厚度偏差/%                                     | 8.33  |
| 单位面积质量偏差/%                                 | 1.38  |
| 宽度/mm                                      | 1 280 |

3.2 “工艺-设备”与产品的映射模型预测效果分析

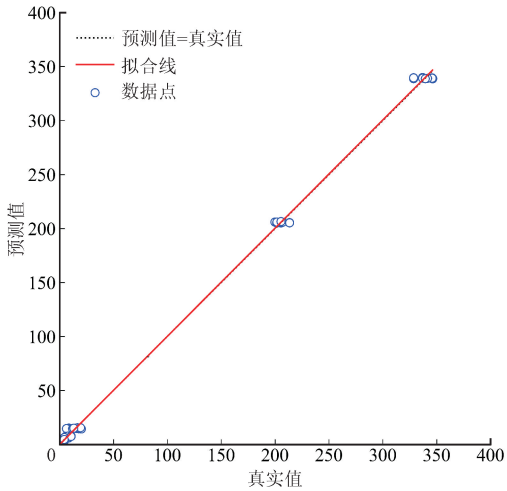
根据 2.2 小节构建的“工艺-设备”与产品参数的映射模型,使用上述 793 条数据对其进行训练和测试,训练集和测试集的比例为 8:2,并使用 Min-Max 法对数据进行标准化<sup>[29]</sup>。为保证模型能对数据进行非线性映射,使用 Tanh 函数为隐藏层激活函数,Linear 函数为输出层激活函数,输入层和输出层节点分别为 41 和 9,隐藏层 1 和 2 的节点分别为 50 和 20。

图 6(a)和(b)分别为映射模型在测试集上的 9 项产品参数的预测值与真实值间的误差分布和回归分析。由图 6(a)的误差直方图分布可知,对于 9 项

产品参数的误差集中出现在 0 附近,且误差较大值出现的频数较低;结合图 6(b)的回归分析可知,9 项产品参数的预测值与真实值间的皮尔逊相关系数  $R^{[30]}$  为 0.999 131,且预测值与真实值十分接近。由此可见,基于神经网络构建的“工艺-设备”与产品参数的映射模型具有较高的预测精度,有利于构建准确的多目标约束优化函数,提高工艺参数的优化质量。



(a)误差直方图分布



(b)预测值与真实值的回归分析

图 6 神经网络映射模型的预测效果

Fig. 6 Predictive effect of neural network mapping model

3.3 工艺参数优化结果分析

本节依据 2.4 小节所述的工艺优化流程进行实例分析。其中,设备参数  $B_0$  和产品参数  $C_0$  如表 3 和表 4 所示,优化前的工艺参数为表 2 所示。表 3 和表 4 构成当前生产模式参数  $D_0$ ,在 793 条数据中将与该生产模式  $\text{Esim}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  相似性高于 85% 的历史生产模式集  $\{\mathbf{D}_j, \mathbf{D}_k, \dots, \mathbf{D}_l\}$  对应的工艺参数集  $\{\mathbf{A}_j, \mathbf{A}_k, \dots, \mathbf{A}_l\}$  作为遗传算法的初始种群,得到的初始种群规模为 50,其中的部分工艺参数如表 5 所示。



表 5 初代种群中的部分工艺参数

Table 5 Some process parameters in primary populations

| 编号 | 硫酸铜<br>浓度/<br>(g · L <sup>-1</sup> ) | 硫酸浓度/<br>(g · L <sup>-1</sup> ) | 溶液<br>温度/℃ | 溶液流量/<br>(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ) | 固化液<br>浓度/<br>(g · L <sup>-1</sup> ) | 防氧化<br>电流/A | 防氧化<br>液浓度/<br>(g · L <sup>-1</sup> ) | 收卷<br>张力/<br>N | 转速/<br>(m · min <sup>-1</sup> ) | 生产模式的<br>Esim(X,Y)<br>相似性 |
|----|--------------------------------------|---------------------------------|------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|-------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------|
| 1  | 80.2                                 | 119.3                           | 55.1       | 60.3                                         | 90.2                                 | 200         | 29.8                                  | 833.0          | 22.0                            | 0.921                     |
| 2  | 90.1                                 | 120.5                           | 54.8       | 60.6                                         | 89.4                                 | 250         | 29.9                                  | 813.4          | 21.5                            | 0.918                     |
| 3  | 85.4                                 | 124.7                           | 54.9       | 59.7                                         | 87.8                                 | 220         | 30.3                                  | 852.6          | 20.0                            | 0.913                     |

在基于遗传算法的求解过程中,设定初代种群规模为 50,子代种群规模为 20,最大遗传代数为 100,交叉概率为 0.85,变异概率为 0.05。迭代过程中,子代种群适应度函数的最小值和平均值的变化如图 7 所示。随着迭代次数的增加,适应度函数的最小值和平均值逐渐下降,在第 50 代,适应度函数的最小值和平均值趋于一致,种群具有最佳的适应度。经过遗传算法优化得到的适应度函数最佳的工艺参数  $A_{op}$  如表 6 所示。

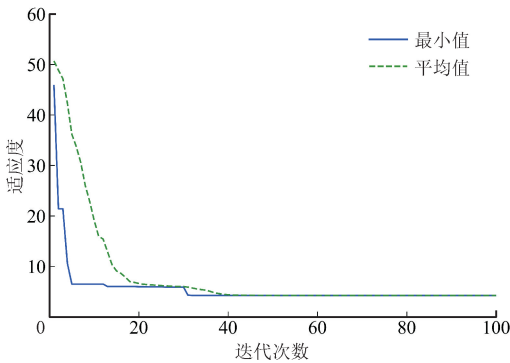


图 7 适应度函数变化曲线

Fig. 7 Curves of fitness values

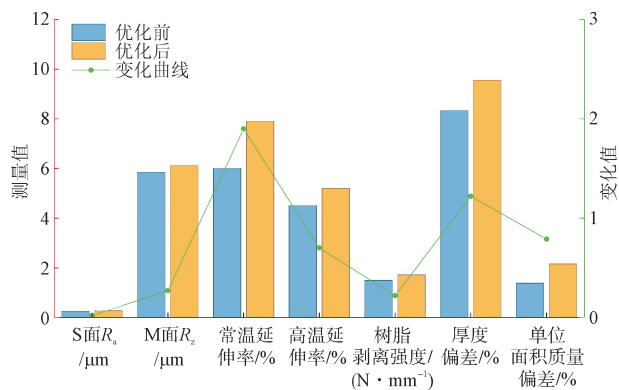
经企业使用最优工艺参数  $A_{op}$  进行铜箔的试验生产验证,得到优化前后 13 项关键产品参数的对比如图 8 所示,其中铜箔产品的宽度仍为 1 280 mm。由图 8 可知,优化后得到的铜箔产品的厚度偏差、单位面积质量偏差、S 面  $R_a$  和 M 面  $R_z$  分别为 9.56%、2.16%、0.27  $\mu\text{m}$  和 6.12  $\mu\text{m}$ ,虽然较优化前的产品指标(即 8.33%、1.38%、0.25  $\mu\text{m}$  和 5.85  $\mu\text{m}$ )有一定的增大,但是差值分别为 1.23%、0.78%、0.02  $\mu\text{m}$  和 0.27  $\mu\text{m}$ ,变化相对较小。根据电解铜箔行业的相关标准,如 IPC 4562A、GB/T 5230<sup>[31]</sup> 以及 SJ/T 11483 等,这 4 项产品参数仍能满足相关指标的技术要求,亦可保证铜箔产品在常规场景条件下的使用及服役性能;但是铜箔产品的常温/高温抗拉强度、常温/高温延伸率以及树脂剥

离强度 5 项更加关键的性能指标都有明显的提升,从优化前的 340.5 MPa、200.3 MPa、6.0%、4.5% 和 1.5 N/mm 分别提升到优化后的 346.6 MPa、206.4 MPa、7.9%、5.2% 和 1.72 N/mm,提升值分别为 6.1 MPa、6.1 MPa、1.9%、0.7% 和 0.22 N/mm,显著提高了铜箔产品在高温、高湿以高频等严苛场景下的使用服役性能。

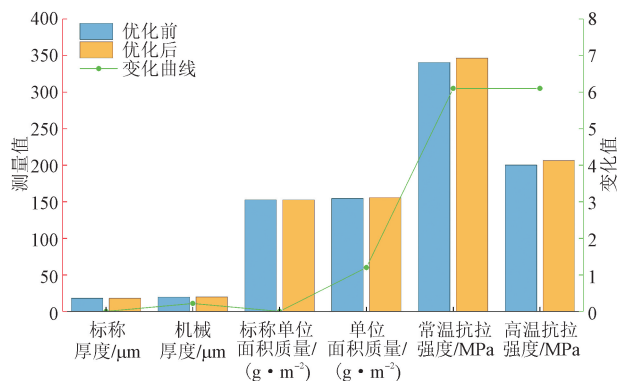
表 6 最优工艺参数

Table 6 Optimal process parameters

| 工序                          | 参数                                        | 数值     |
|-----------------------------|-------------------------------------------|--------|
| 生箔制备                        | 硫酸铜浓度/(g · L <sup>-1</sup> )              | 88.6   |
|                             | 硫酸浓度/(g · L <sup>-1</sup> )               | 140.2  |
|                             | 溶液温度/℃                                    | 55.3   |
|                             | 溶液流量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )  | 60.1   |
|                             | 生产电流/A                                    | 41 000 |
|                             | 辅助阴极电流/A                                  | 20     |
|                             | 阴极辊转速/(m · min <sup>-1</sup> )            | 4.26   |
|                             | 收卷张力/N                                    | 735.0  |
|                             | 添加剂浓度/(g · L <sup>-1</sup> )              | 15.2   |
|                             | 添加剂流量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ) | 10.0   |
|                             | 烘干温度/℃                                    | 260.2  |
|                             | 硫酸浓度/(g · L <sup>-1</sup> )               | 205.5  |
|                             | 溶液温度/℃                                    | 30.2   |
| 表面处理                        | 溶液流量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )  | 60.0   |
|                             | 粗化 1 电流/A                                 | 2 000  |
|                             | 粗化 2 电流/A                                 | 2 150  |
|                             | 粗化 3 电流/A                                 | 2 200  |
|                             | 粗化液浓度/(g · L <sup>-1</sup> )              | 30.1   |
|                             | 固化 1 电流/A                                 | 2 250  |
|                             | 固化 2 电流/A                                 | 2 300  |
|                             | 固化 3 电流/A                                 | 2 400  |
|                             | 固化液浓度/(g · L <sup>-1</sup> )              | 90.2   |
|                             | 防氧化电流/A                                   | 200    |
|                             | 防氧化液浓度/(g · L <sup>-1</sup> )             | 30.3   |
|                             | 收卷张力/N                                    | 793.8  |
| 转速/(m · min <sup>-1</sup> ) |                                           | 21.5   |



(a) 产品参数对比 1



(b) 产品参数对比 2

图8 工艺参数优化前后的产品参数对比

Fig. 8 Comparison of product parameters before and after process parameter optimization

根据表2和表6优化前后工艺参数的对比可知,优化后的阴极辊转速和表面处理机转速分别为4.26 m/min和21.5 m/min,相较于优化前(即4.15、20 m/min)有一定的增大,生箔制备工序和表面处理工序的效率分别提升了2.65%和7.5%,在大批量生产条件下将能够明显提高铜箔产品的生产效率。同时也可以看出,优化后的部分工艺参数基本没有发生变化,如溶液流量、添加剂浓度和添加剂流量等,而硫酸铜浓度、硫酸浓度、生产电流和阴极辊转速等关键参数的变化则相对明显,这一特点与企业在实际铜箔制造过程中需不断调整关键参数(主要为浓度、电流和转速)以使得铜箔产品的质量达到最佳的情况是一致的,也间接说明了通过积累并构建优良制造过程数据集对工艺参数进行优化,更加符合铜箔企业的生产需求及特点。

## 4 结 论

本文以电解铜箔的制造为背景,提出一种融合设备状态和产品要求的电解铜箔制造工艺参数优化方法,并通过企业的生产验证了该方法的有效性,得

到主要结论如下。

(1)本文以企业的实际生产数据为对象,基于BP神经网络建立了“工艺-设备”与产品参数的映射模型,克服了传统的参数拟合方法难以进行多输入和多输出间映射模型的构建。

(2)本文提出的“工艺-设备”与产品参数的映射模型、多目标约束函数和优化算法流程,融合了企业优化工艺的实践逻辑。企业的生产验证表明,相较于仅考虑产品要求的工艺优化方法,采用本文方法优化后的工艺参数能在同一设备状态下得到质量更好的铜箔产品,在常温/高温抗拉强度、常温/高温延伸率和树脂剥离强度这5项关键指标上,提升值分别为6.1 MPa、6.1 MPa、1.9%、0.7%和0.22 N/mm,且生箔制备和表面处理的生产速度提高到4.26和21.5 m/min,效率提升了2.65%和7.5%,具有更高的生产效益。

本文方法具有一定的普适性,在技术层面上可以推广到挤吹塑、压铸、焊接及冲压等与设备状态和产品质量密切相关的制造领域。

## 参考文献:

- [1] 祝大同. 高频高速 PCB 用铜箔技术与品种的新发展[J]. 印制电路资讯, 2019(1): 68-75.  
ZHU Datong. New development of copper foil technology and varieties for high frequency and high speed PCB [J]. Printed Circuit Board Information, 2019(1): 68-75.
- [2] 张惠源. 锂电铜箔发展现状及市场的研究[J]. 环渤海经济瞭望, 2018(11): 49.  
ZHANG Huiyuan. Research on the development status and market of lithium copper foil [J]. Economic Outlook the Bohai Sea, 2018(11): 49.
- [3] 金荣涛. 电解铜箔生产[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- [4] JURAN J M, DE FEO J A. 朱兰质量手册[M]. 焦叔斌, 苏强, 杨坤, 等, 译. 6版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
- [5] 杨祥魁, 刘建广, 徐树民, 等. 铜箔制程对 CCL 及 PCB 要求的应对[J]. 印制电路信息, 2012(1): 9-14.  
YANG Xiangkui, LIU Jianguang, XU Shumin, et al. Production process of copper foils to meet requirements of CCL and PCB [J]. Printed Circuit Information, 2012(1): 9-14.
- [6] 马逢时, 周暉, 刘传冰. 六西格玛管理统计指南[M]. 3版. 北京: 中国人民大学出版社, 2018.
- [7] 凌羽, 张少强, 卢伟伟, 等. 低轮廓电解铜箔制备工

- 艺参数的优化[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(20): 11-20.
- LING Yu, ZHANG Shaoqiang, LU Weiwei, et al. Optimization of process parameters for preparation of low-profile electrolytic copper foil [J]. *Electroplating & Finishing*, 2023, 42(20): 11-20.
- [8] 樊斌锋, 王绪军, 王庆福, 等. 添加剂对极薄锂电铜箔电沉积过程的影响[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(5): 85-89.
- FAN Binfeng, WANG Xujun, WANG Qingfu, et al. Effect of additives on electrodeposition of very thin lithium copper foil [J]. *Plating & Finishing*, 2023, 45(5): 85-89.
- [9] 彭雪嵩, 由宏伟, 李兰晨, 等. 钼酸钠-HEC-SPS 复合添加剂对电解铜箔粗化效果的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(17): 56-67.
- PENG Xuesong, YOU Hongwei, LI Lanchen, et al. Effect of a composite additive comprising sodium molybdate, HEC, and SPS on roughening of electrolytic copper foil [J]. *Electroplating & Finishing*, 2023, 42(17): 56-67.
- [10] 由宏伟. 高性能电解铜箔的表面处理工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [11] 文雯. 高频超薄载体铜箔制作及应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [12] LI Yanfeng, HUANG Guojie, YIN Xiangqian, et al. Effect of copper ion concentration on microstructure and mechanical properties of electrolytic copper foil [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 381(1): 012166.
- [13] LIU Lingling, BU Yeqiang, SUN Yue, et al. Trace bis-(3-sulfopropyl)-disulfide enhanced electrodeposited copper foils [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 74: 237-245.
- [14] YANG Lei, WENG Wei, ZHU Huanlin, et al. Preparing ultra-thin copper foil as current collector for improving the LIBs performances with reduced carbon footprint [J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105952.
- [15] 易光斌. 电解铜箔组织性能及其翘曲产生机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [16] 刘耀. 极薄载体铜箔制备及高抗剥离表面处理技术研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [17] 周杰, 顾伟伟, 张建, 等. 基于随机森林和改进竞争群算法的铜电解过程能耗优化[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(1): 60-67.
- ZHOU Jie, GU Weiwei, ZHANG Jian, et al. Energy consumption optimization of copper electrolysis process based on random forest and improved competitive group algorithm [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2023, 52(1): 60-67.
- [18] PLATHOTTAM S J, RICHEY B, CURRY G, et al. Solvent extraction process design using deep reinforcement learning [J]. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 2021, 3(2): e10079.
- [19] 刘孝保, 严清秀, 易斌, 等. 基于集成学习和改进粒子群优化算法的流程制造工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2023, 34(23): 2842-2853.
- LIU Xiaobao, YAN Qingxiu, YI Bin, et al. Optimization of process parameters in process manufacturing based on ensemble learning and improved particle swarm optimization algorithm [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(23): 2842-2853.
- [20] ABDULLAH S, PRADHAN R C, PRADHAN D, et al. Modeling and optimization of pectinase-assisted low-temperature extraction of cashew apple juice using artificial neural network coupled with genetic algorithm [J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127862.
- [21] 杨森. 锂电池用高性能超薄电解铜箔的研究[D]. 常州: 常州大学, 2022.
- [22] HONDA M, MAENISHIHARA O, SHIBUYA Y. Method of manufacturing copper foil with carrier, laminate, method of manufacturing printed wiring board and method of manufacturing electronic device: JP 6546836B2 [P]. 2019-07-17.
- [23] NAKAJIMA D, HANADA T, YOSHIKAWA K, et al. Ultra-thin copper foil with carrier, method for producing the same, copper-clad laminate and printed wiring board: JP 6650923B2 [P]. 2020-02-19.
- [24] 梁超, 张熊, 米高阳, 等. 基于神经网络与遗传算法的铝合金激光摆动焊工艺参数优化[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 43-49.
- LIANG Chao, ZHANG Xiong, MI Gaoyang, et al. Optimal design for laser oscillating welding process parameter based on artificial neural networks and genetic algorithm for aluminum alloy [J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(8): 43-49.
- [25] 姜洪权, 王岗, 高建民, 等. 一种适用于高维非线性特征数据的聚类算法及应用[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 49-55.
- JIANG Hongquan, WANG Gang, GAO Jianmin, et al. A clustering algorithm for high-dimensional nonlinear feature data with applications [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(12): 49-55.
- [26] 王晓阳, 张洪渊, 沈良忠, 等. 基于相似性度量的高维数据聚类算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2013,

23(5): 30-33.

WANG Xiaoyang, ZHANG Hongyuan, SHEN Liangzhong, et al. Research on high dimensional clustering algorithm based on similarity measurement [J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(5): 30-33.

[27] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.

[28] 黄明华, 刘广新, 何雅玲, 等. 基于遗传算法的太阳能烟囱发电站结构优化 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(10): 1-10.

HUANG Minghua, LIU Guangxin, HE Yaling, et al. Structural optimization of solar chimney power plant by a genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong

University, 2021, 55(10): 1-10.

[29] 周志华. 机器学习 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

[30] 陶洋, 祝小钧, 杨柳. 基于皮尔逊相关系数和信息熵的多传感器数据融合 [J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(5): 1075-1080.

TAO Yang, ZHU Xiaojun, YANG Liu. Multi-sensor data fusion based on Pearson coefficient and information entropy [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2023, 44(5): 1075-1080.

[31] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 印制板用电解铜箔: GB/T 5230—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

(编辑 亢列梅)