

引文格式:曹华军,李亚鹏,葛威威,等.基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放建模与减碳分析[J].航空制造技术,2025,68(6):28-37.

CAO Huajun, LI Yapeng, GE Weiwei, et al. Carbon emission modeling and carbon reduction analysis of surface treatment process for large aircraft parts based on improved value stream mapping[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(6): 28-37.

# 基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放建模与减碳分析\*

曹华军<sup>1</sup>,李亚鹏<sup>1</sup>,葛威威<sup>1</sup>,丁瑶<sup>2</sup>,王超<sup>2</sup>,何思航<sup>2</sup>

(1. 重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室,重庆 400044;

2. 中国商飞上海飞机制造有限公司,上海 201324)

**[摘要]** 在“双碳”战略的背景下,绿色低碳已成为航空制造业发展的必由之路。表面处理工艺作为大飞机零部件加工的关键工艺,具有多工序、长流程和多碳排放源的特点,且存在能耗高、能效低、碳排放严重的问题,对绿色低碳发展提出了挑战。为此,本研究以大飞机零部件表面处理工艺为对象,定义了表面处理工艺碳排放边界,分析了该工艺的碳排放特性,在此基础上,提出了基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放核算方法,并基于敏感性分析对其热点工序进行剖析以阐明表面处理工艺减碳潜力。最后,以某大飞机铝合金零部件硼硫酸阳极化为研究案例,验证了所提方法的有效性。该研究可为表面处理工艺碳排放精细化建模提供方法支撑,并为后续开展节能减碳奠定理论基础。

**关键词:** 绿色制造;航空制造;碳排放;表面处理工艺;改进价值流图

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2025.06.028



曹华军

教授,博士生导师,研究方向为绿色制造与装备、制造系统工程等。

随着全球气候变暖与环境恶化,减少温室气体排放已成为全球共识。根据国际能源署报告<sup>[1]</sup>,2022年全球与能源相关的二氧化碳排放量已超360亿t,较上一年增长0.9%,我国作为能源消耗和碳排放大国,二氧化碳排放形势十分严峻,中国与能源相关的排放量达121亿t。进一步,2018年我国工业领域碳排放已达76.23亿t,其中制造业产生的碳排放约占工业领域碳排放的83.1%<sup>[2]</sup>。因此,加快制造业节能降碳是促进工业绿色发展的核心任务之一。低碳制造作为一种全新的可持续制造模式,是实现节能减排的有效途径<sup>[3-4]</sup>。近年来,我国大飞机制造业进入快速发

展时期,其快速增长的产能需求与严格节能降碳约束之间的矛盾日益突出。根据Ticiano<sup>[5]</sup>和Howe<sup>[6]</sup>等的研究,飞机在制造阶段的碳排放仅占运营阶段碳排放的0.1%,但考虑全球大飞机的产能,其制造过程中的碳排放总量不容小觑。因此发展绿色航空制造业是应对全球气候变化、实现航空产业可持续发展的必然要求<sup>[7]</sup>。大飞机复杂、严酷的服役环境对其零部件的性能提出极高要求,其中表面处理工艺作为大飞机零部件制造的关键工艺<sup>[8-9]</sup>,通过对零部件进行阳极氧化、化学氧化等表面处理,以满足零部件耐腐蚀、抗疲劳、耐磨损等性能需求。为此,围绕表面处理工艺的研究

\* 基金项目:国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金资助项目(COMAC-SFGS-2023-2026)。

得到学术界和产业界的广泛关注。

Abedini 等<sup>[10]</sup>采用阳极氧化和电镀工艺对纯铝进行表面处理以提高其耐磨性,并通过试验研究磨损寿命最大时的工艺参数。Sun 等<sup>[11]</sup>在乙酸-草酸混合电解质中开展表面处理研究,对该工艺的能耗、生产效率和阳极氧化膜硬度进行评价,并对该工艺的加工参数进行优化。Gu 等<sup>[12]</sup>采用柠檬酸-硫酸电解液对 5052 铝合金进行表面处理,并对其表面形貌组织和性能进行了表征分析。程文礼等<sup>[13]</sup>采用盐雾试验研究了不同表面处理状态下铝合金试样的腐蚀特性。郑战光等<sup>[14]</sup>采用有限元分析方法研究阳极氧化表面处理对材料疲劳裂纹萌生的影响。杨堃等<sup>[15]</sup>通过对铝合金进行阳极氧化表面处理,研究了工艺参数对氧化膜耐蚀性、表面形貌及其元素组成的影响规律。目前围绕铝合金表面处理工艺的研究主要聚焦加工质量方面,但缺乏对表面处理工艺碳排放的相关研究。

价值流图作为精益生产管理的重要工具<sup>[16-17]</sup>,通过图形符号实现对生产加工周期、原材料等信息的可视化表征,但传统价值流图无法捕获能量流、碳排放流等信息<sup>[18]</sup>。所以,一些学者通过对传统价值流图进行改进以实现制造过程能耗、碳排放等指标的精细化表征。Li 等<sup>[19]</sup>采用改进价值流图对制造过程的碳效率进行计算,并直观地显示资源消耗、机器和工人的安排,从而可以识别碳排放影响因素。之后,孙菡悦<sup>[20]</sup>提出用于表征时间流、物料流、能耗流、运输流及碳排放流的改进价值流图,并建立了基于改进价值流图的机械制造系统碳排放模型。此外,宋丹丹<sup>[21]</sup>将传统价值流图中的现状图扩展为能量价值流图,并通过生产能耗建模实现对车间能效的优化。通过对传统价值流图的改进,可实现对制造过程中的时间流、能耗流、物料流及碳排放流的精细化表征,以挖

掘生产过程中瓶颈工序、定位减碳热点、支撑减碳措施制定。

大飞机零部件表面处理工艺受到多工序、长流程、多碳排放源等因素影响,其碳排放多源动态、规律复杂;同时加工过程中能耗高、能效低、碳排放严重,上述因素对表面处理工艺碳排放建模提出挑战,且目前针对大飞机零部件表面处理工艺碳排放相关研究尚待深入探索。基于表面处理工艺碳排放特点并结合改进价值流图在可视化建模方面的优点,本文面向大飞机零部件绿色制造需求,以大飞机零部件表面处理工艺为研究对象,开展基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放建模与减碳分析研究,该研究可为表面处理工艺碳排放建模提供理论与方法基础,并为后续制定节能减碳措施提供支撑。

## 1 大飞机零部件表面处理工艺碳排放特性分析

### 1.1 大飞机零部件表面处理工艺碳排放边界

常见大飞机铝合金零部件表面

处理工艺全工艺链包括:表面处理工艺前处理、表面处理、表面处理工艺后处理。本文以硼硫酸阳极化和化学氧化的工艺流程为例,进行表面处理工艺边界划分及碳排放特性分析,表面处理工艺系统边界如图 1 所示。

制造系统碳排放源包括能源碳排放、物料碳排放和过程碳排放<sup>[22]</sup>。通过对大飞机零部件表面处理工艺全流程清单进行分析,其碳排放主要为能源碳排放和物料碳排放,而过程碳排放占比极小,故此处不予考虑。其中能源碳排放即生产过程中加工设备、辅助设备电能的消耗,如阳极氧化的电能消耗、行车运输的电能消耗等;物料碳排放即生产过程中硫酸、自来水和去离子水等消耗引起的碳排放。

### 1.2 大飞机零部件表面处理工艺碳排放特性

大飞机零部件表面处理工艺具有多工序、长流程和多碳排放源的特点,且在多品种小批量生产模式下,往往存在工艺设备运行效率低下、物料选用不合理等问题,加之其生产连

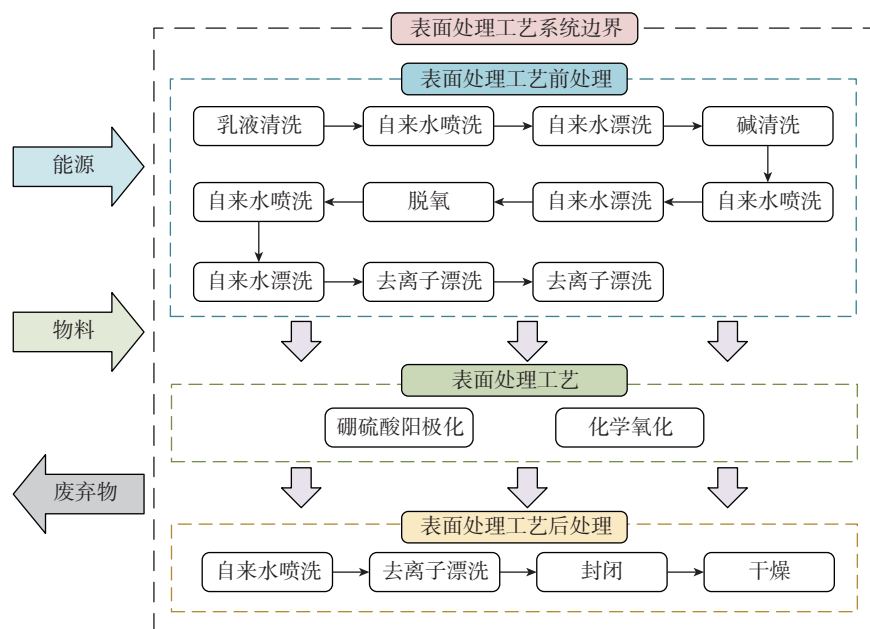


图 1 大飞机零部件表面处理工艺系统边界

Fig.1 Surface treatment process system boundary of large aircraft parts

续性强、生产过程复杂,碳排放影响因素众多,生产过程中的价值、能耗、碳排放存在复杂的动态耦合关系,使得其生产全流程碳排放特性不清晰,呈现全工艺链能源资源浪费严重、碳排放强度高的现状。

通过对大飞机零部件表面处理工艺流程的分析,并结合实际生产情况,用图2描述考虑多碳排放源、多加工阶段、多运行状态的表面处理工艺时序耦合关系。表面处理工艺全流程中部分工序存在包含能源碳排放和物料碳排放在内的多种碳排放源,如硼硫酸阳极化工序中既存在硫酸等物料消耗产生的碳排放,又有电能消耗产生的碳排放;多加工阶段指表面处理全流程包括前处理、表面处理和后处理多加工阶段,且各加工阶段对应多种加工工序;多运行状态指某些处理槽存在加工和待机状

态,如当零部件在脱氧处理槽加工时存在电能、物料消耗产生的碳排放,当脱氧处理槽未加工工件而处于待机状态时仍存在电能消耗产生的碳排放。根据上述表面处理工艺碳排放特性并结合碳排放核算因子法,能源碳排放和物料碳排放由生产过程中能源和物料的消耗量及其碳排放因子决定,进一步考虑表面处理工艺多加工阶段、多运行状态的特点可建立对应的碳排放核算模型。

## 2 基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放模型及减碳分析

### 2.1 大飞机零部件表面处理工艺全流程碳排放核算模型

表面处理工艺中碳排放计算是通过对各阶段中的物料、能源等进行累计,收集涉及生产过程中物料与能

源的输入和输出、使用量和碳排放系数等。表面处理工艺碳排放建模如下,为简化计算并直观地表示出物料、时间、碳排放等多维数据<sup>[18]</sup>,将之写成矩阵形式。

(1) 表面处理物料消耗矩阵。

第*i*个表面处理工序单位时间消耗所有物料的矩阵 $M_i$ 为

$$M_i = [M_{i,1}, \dots, M_{i,q}, \dots, M_{i,Q}] \quad (1)$$

式中, $M_{i,q}$ 为第*i*道表面处理工序单位时间消耗物料,其中*q*表示第*q*种类型的物料, $M_{i,q}$ 的值根据每道工序实际消耗物料确定,若某种物质未消耗则设置为0; $Q$ 为表面处理工艺链消耗物质种类的总数。

表面处理全工艺链的物料消耗矩阵 $M$ 为

$$M = \text{diag}[M_1, \dots, M_p, \dots, M_N] \quad (2)$$

式中, $M_i$ 为第*i*道处理工序的物料消耗矩阵; $N$ 为表面处理工艺总工序数。

(2) 表面处理工艺时间矩阵。

表面处理工艺时间由表面处理加工时间和待机时间组成,待机时间可分为加工待机时间和转运待机时间,其中加工待机时间即当零件在某个处理槽加工时,其他处理槽的等待时间;转运待机时间即零件在转运过程中处理槽的等待时间。

第*i*道工序处理槽的加工时间矩阵 $T_i$ 如式(3)所示,表面处理全工艺链的时间矩阵 $T_{pr}$ 如式(4)所示。

$$T_i = \text{diag}[t_i, \dots, t_i, \dots, t_i] \quad (3)$$

$$T_{pr} = [T_1, \dots, T_i, \dots, T_N]^T \quad (4)$$

式中, $t_i$ 为第*i*个工序的加工时间,式(4)中T表示矩阵的转置运算。

表面处理工艺转运时间矩阵 $T_{tr}$ 为

$$T_{tr} = [t_{0,1}, \dots, t_{i,i+1}, \dots, t_{N,N+1}] \quad (5)$$

式中, $t_{i,i+1}$ 表示第*i*道工序到第*i+1*道工序的转运时间,其中 $t_{0,1}$ 表示零



图2 考虑多碳排放源、多加工阶段、多运行状态的表面处理工艺时序耦合图

Fig.2 Time sequence coupling diagram of surface treatment processes considering multiple carbon emission sources, multiple processing stages and multiple operating states

件加工前到第一个处理槽的转运时间,  $t_{N, N+1}$  表示最后一个处理槽到处理完成取出零件的转运时间。

第  $i$  个处理槽的转运待机时间  $t_{ts, i}$  可由所有工序间转运时间之和计算得出, 加工待机时间  $t_{ps, i}$  由所有工序加工时间之和减去本工序加工时间  $t_i$  计算得出, 第  $i$  个处理槽的总待机时间  $t_{s, i}$  为转运待机时间  $t_{ts, i}$  与加工待机时间  $t_{ps, i}$  之和, 即

$$t_{s, i} = t_{ts, i} + t_{ps, i} = \sum_{i=0}^N t_{i, i+1} + \left[ \left( \sum_{i=1}^N t_i \right) - t_i \right] \quad (6)$$

第  $i$  个处理槽待机时间矩阵  $T_{s, i}$  如式(7)所示, 表面处理工艺全工艺的待机时间矩阵  $T_s$  如式(8)所示。

$$T_{s, i} = \text{diag} [t_{s, i}, \dots, t_{s, i}, \dots, t_{s, i}] \quad (7)$$

$$T_s = [T_{s, 1}, \dots, T_{s, i}, \dots, T_{s, N}]^T \quad (8)$$

式中,  $t_{s, i}$  为第  $i$  个处理槽的总待机时间。

(3) 表面处理工艺碳排放矩阵。

表面处理工艺碳排放矩阵由物料消耗矩阵、时间矩阵和碳排放因子矩阵相乘得到, 其中碳排放因子矩阵  $CEF$  为

$$CEF = \text{diag} [CEF_1, \dots, CEF_q, \dots, CEF_Q] \quad (9)$$

式中,  $CEF_q$  为第  $q$  种物质或排放的碳排放因子。

表面处理工艺加工过程中的碳排放矩阵  $CE_{pr}$  为

$$CE_{pr} = M \times T_{pr} \times CEF = \begin{bmatrix} M_{1,1} \times t_1 \times CEF_1 & \dots \\ \vdots & \ddots \\ M_{i,1} \times t_i \times CEF_1 & \dots \\ \vdots & \ddots \\ M_{N,1} \times t_N \times CEF_1 & \dots \\ M_{1,q} \times t_1 \times CEF_q & \dots & M_{1,Q} \times t_1 \times CEF_Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{i,q} \times t_i \times CEF_q & \dots & M_{i,Q} \times t_i \times CEF_Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N,q} \times t_N \times CEF_q & \dots & M_{N,Q} \times t_N \times CEF_Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, 矩阵的行和为第  $i$  道工序加工时产生的碳排放, 列和为第  $q$  种物质在整个表面处理流程中加工时产生的碳排放。

表面处理工艺待机过程中的碳

排放矩阵  $CE_s$  为

$$CE_s = M \times T_s \times CEF = \begin{bmatrix} M_{1,1} \times t_{s,1} \times CEF_1 & \dots \\ \vdots & \ddots \\ M_{i,1} \times t_{s,i} \times CEF_1 & \dots \\ \vdots & \ddots \\ M_{N,1} \times t_{s,N} \times CEF_1 & \dots \\ M_{1,q} \times t_{s,1} \times CEF_q & \dots & M_{1,Q} \times t_{s,1} \times CEF_Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{i,q} \times t_{s,i} \times CEF_q & \dots & M_{i,Q} \times t_{s,i} \times CEF_Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N,q} \times t_{s,N} \times CEF_q & \dots & M_{N,Q} \times t_{s,N} \times CEF_Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, 矩阵的行和为第  $i$  个处理槽待机时产生的碳排放, 列和为第  $q$  种物质在整个表面处理流程中待机时产生的碳排放。表面处理工艺的总碳排放矩阵  $CE$  为加工碳排放矩阵与待机碳排放矩阵之和, 即

$$CE = CE_{pr} + CE_s \quad (12)$$

## 2.2 基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放表征

改进价值流程图能够对大飞机零部件表面处理工艺中的每一道工序进行研究, 将每个工序所涉及的活动分为增值和非增值两部分, 表征表面处理过程中的时间流、物料流、能量流及碳排放流, 通过区分增值碳排放和非增值碳排放, 为后续基于敏感分析的表面处理各工序增值碳排放效率评价奠定基础。

由 1.1 节分析可知, 表面处理工艺中的碳排放来源包括生产过程中所需物料消耗引起的碳排放, 加工设备、辅助设备(如运输工具)消耗电能引起的碳排放。结合碳排放核算模型, 为对表面处理工艺中碳排放流可视化表征与精细化分析, 采用基于改进价值流图对表面处理工艺碳排放进行表征, 改进价值流图如图 3 所示。其中,  $i$  表示工序号, 取值为 1~17;  $M_i$  和  $m_i$  分别表示工序  $i$  的增值物料消耗和非增值物料消耗;  $E_i$  表示工序  $i$  的能耗;  $E_{i, i+1}$  表示零件从工序  $i$  到工序  $i+1$  转运的能耗;  $E_{ps, i}$  表示工序  $i$  的待机能耗;  $CE_i$  表示工序  $i$  的加工碳排放;  $CE_{ps, i}$  表示第  $i$  道工序待机状态的碳排放量;  $CE_{i, i+1}$  表示零件从工序  $i$  到  $i+1$  转运的碳排放量;  $t_{va}$  和

$t_{nva}$  分别表示表面处理全流程的总增值时间和总非增值时间;  $CE_{va}$  和  $CE_{nva}$  分别表示表面处理全流程的总增值碳排放和总非增值碳排放。

改进价值流图由传统价值流图的标准符号、时间流、物料流、能耗流、碳排放流及其参数组成。改进价值流图考虑了整个表面处理工艺过程中碳排放的流动, 而不只是孤立的工艺过程, 不仅直观地体现了表面处理工艺中增值和非增值的时间、能耗及碳排放流, 也说明了减少非增值碳排放的必要性。图 3 中各类流线顶端代表加工过程的非增值部分, 底端代表增值部分。

## 2.3 基于敏感分析的表面处理

### 各工序增值碳排放效率评价

敏感性分析是指通过数值计算分析输入参数的改变对输出结果影响程度的方法, 通过敏感性分析可以用具体的数值来定量分析每个参数对结果输出的影响程度<sup>[23]</sup>。因此, 敏感性分析对于工艺过程中最优参数的选定起着重要作用<sup>[24]</sup>。

针对表面处理工艺的特点, 同时结合上述碳排放核算模型可知, 各工序对表面处理全流程的碳排放影响程度不同。对表面处理工艺碳排放热点工序进行敏感性分析, 有助于揭示其减碳潜力, 并为后续制定节能减碳措施指明方向。

各工序的增值碳排放效率  $\eta_i$  为工序增值碳排放与工序总碳排放之比, 即

$$\eta_i = \frac{CE_{va, i}}{CE_{total, i}} = \frac{\sum_q (M_{i, q} \times t_i \times CEF_q)}{\sum_q (M_{i, q} \times t_i \times CEF_q + M_{i, q} \times t_{s, i} \times CEF_q)} \quad (13)$$

式中,  $CE_{va, i}$  表示第  $i$  道工序的增值碳排放;  $CE_{total, i}$  表示第  $i$  道工序的总碳排放。

表面处理工艺全流程的增值碳排放效率  $\eta$  为表面处理工艺全流程的总增值碳排放与总碳排放之比, 即

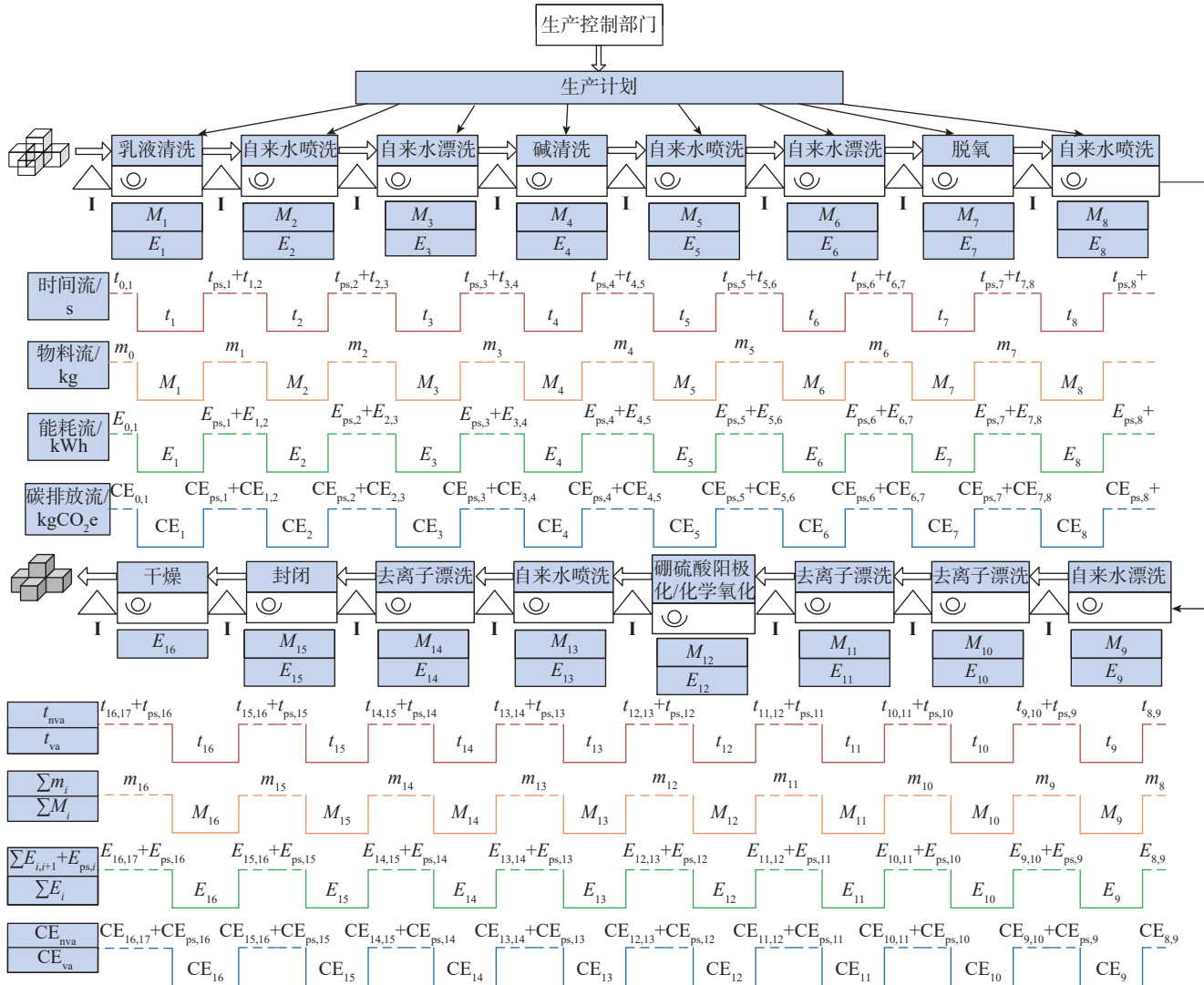


图3 基于改进价值流图的表面处理工艺碳排放表征

Fig.3 Carbon emission characterization of surface treatment processes based on improved value stream mapping

$$\eta = \frac{CE_{va}}{CE_{total}} = \frac{\sum_i CE_{va,i}}{\sum_i CE_{total,i}} \quad (14)$$

将增值碳效率作为敏感性分析指标,其中式(15)表示当表面处理工艺第*i*道工序的增值碳效率改变量为 $\sigma$ 时,计算得到相应的表面处理工艺全流程的增值碳效率 $\eta'$ 。

$$\eta' = \frac{CE_{va}}{CE'_{total}} = \frac{CE_{va}}{CE_{total,i} + \dots + \frac{CE_{total,i}}{1 \pm \sigma} + \dots + CE_{total,N}} \quad (15)$$

式中,  $CE'_{total}$  表示改变第*i*道工序的增

值碳效率后的工艺总碳排放量。

根据计算结果,以增值碳效率改变量为横轴,以相应的表面处理工艺全流程的增值碳效率 $\eta'$ 为纵轴,可绘制表面工艺全流程各工序的增值碳效率敏感性曲线。若所绘制工序的敏感性曲线斜率越大,则说明该工序敏感性越大,表示对表面处理工艺全流程的碳排放影响大。

### 3 案例研究

#### 3.1 表面处理工艺试验参数

为验证所提方法的有效性,以某大飞机铝合金零部件硼硫酸阳极化产线为研究案例,依据表面处理工艺

产线生产流程操作规程、工艺参数和历史统计数据,获取该工艺各工序的物料消耗种类与加工时间。结合表面处理产线槽液实际更换或补充周期,并根据槽液有效成分维护标准,可得到单位时间各物料消耗量。同时可通过自来水喷头流量参数计算单位时间自来水消耗量;零部件转运运行车功率与转运时间可分别根据行车历史功率统计数据 and 工艺流程参数获取,其功率设置为 3.3 kW,转运平均时间设置为 12 s;表面处理中加热槽的功率可根据设备运行功率历史统计数据获得。表面处理产线各工序生产参数如表 1 所示。此

处,乳液清洗和碱清洗工序槽液主要采用碳酸钠溶液;由于脱氧工序槽液成分复杂,其中硝酸占比最大,此处采用硝酸消耗量计算该工序的碳排放;在封闭工序中,绝大部分碳排放由电能消耗产生,而物料消耗产生的碳排放极少,此处根据能耗计算该工序碳排放。根据生态环保部公布数据,2022年度全国电网平均排放因子为0.5703 kgCO<sub>2</sub>/kWh,通过Ecoinvent 3.9数据库查询获得表面处理工艺产线中物料碳排放因子如表2所示。

### 3.2 结果与讨论

将3.1节中的数据代入已建立的表面处理工艺碳排放模型进行计算,结果如表3所示,增值能耗为加工过程中的电能消耗;非增值能耗为设备待机状态与转运电能消耗总和;增值碳排放为加工过程中产生的碳排放;非增值排放为设备待机状态下的碳排放与转运碳排放总和。该产线增值碳效率为50.1%。根据核算结果使用改进价值流图对硼硫酸阳极化产线时间流、物料流、能耗流和碳排放流进行可视化表征,如图4所示。

根据表3中硼硫酸阳极化产线碳排放核算结果,计算得到表面处理工艺产线的各工序间转运能耗和碳排放量分别为0.011 kWh和0.006 kgCO<sub>2</sub>e,产线总碳排放量为42.864 kgCO<sub>2</sub>e。其中总增值碳排放为21.454 kgCO<sub>2</sub>e,总非增值碳排放为21.407 kgCO<sub>2</sub>e。在各工序中,硼硫酸阳极化工序的碳排放量最高,为14.584 kgCO<sub>2</sub>e,主要原因是该工序加工时间长,且在加工过程和待机过程中均需要消耗大量的电能,从而导致该工序碳排放量最高。其次是乳液清洗工序,其碳排放量为10.154 kgCO<sub>2</sub>e,主要原因是该工序消耗大量的碳酸钠和电能,导致此工序的碳排放量较高。碳排放量最低的工序是去离子漂洗,仅为0.007 kgCO<sub>2</sub>e,

表1 硼硫酸阳极化产线参数

Table 1 Boric-sulfuric acid anodizing production line parameters

工序	物料种类	单位时间物料消耗量 / (g · s <sup>-1</sup> )	电加热功率 /W	加工时间 /s
乳液清洗	主要为碳酸钠	16.5	5000	300
自来水喷洗	自来水	133.3	0	120
自来水漂洗	自来水	10	0	180
碱清洗	主要为碳酸钠	1.9	5000	300
自来水喷洗	自来水	133.3	0	120
自来水漂洗	自来水	10	0	180
脱氧	主要为硝酸	5	3000	60
自来水喷洗	自来水	133.3	0	120
自来水漂洗	自来水	10	0	180
去离子漂洗	去离子水	10	0	120
去离子漂洗	去离子水	10	0	120
硼硫酸阳极化	硫酸	6	5500	1200
	硼酸	5		
自来水喷洗	自来水	133.3	0	120
去离子漂洗	去离子水	10	0	180
封闭	—	—	7500	1200
干燥	—	—	5000	300

表2 耗能工质碳排放因子

Table 2 Carbon emission factor of energy-consumed medium

序号	物料类别	碳排放因子 / ( kgCO <sub>2</sub> e/kg )
1	碳酸钠	1.25
2	自来水	1.27 × 10 <sup>-3</sup>
3	硝酸	3.41
4	去离子水	4.85 × 10 <sup>-4</sup>
5	硫酸	1.79 × 10 <sup>-1</sup>
6	硼酸	1.49

注:硝酸、硼酸为无水状态;硫酸为质量分数70%溶液状态;碳酸钠为固体状态。

由于该工序不消耗电能,且去离子水消耗也较少,因此碳排放量最低。此外,在增值碳效率方面,硼硫酸阳极化的增值碳效率最高,达到77.3%,主要原因是在硼硫酸阳极化工序中,加工过程消耗大量电能和物料,因此其增值碳排放量占其总碳排放的主要部分,同时该工序待机时间相对较短,使该工序的非增值碳排放量较

低,因此该工序的增值碳效率较高。而增值碳效率最低的工序是干燥,为6.0%,主要原因是该工序需要在较高的温度下进行,而大量电能在此过程中被消耗,从而使其非增值碳排放量相对较高,导致该工序的增值碳效率最低。

图4展现了大飞机铝合金零部件硼硫酸阳极化生产线中增值和非

表 3 硼硫酸阳极化产线碳排放核算结果

Table 3 Carbon emission accounting results of boric-sulfuric acid anodizing production line

工序	增值 能耗 / kWh	非增值 能耗 / kWh	增值 碳排放 / kgCO <sub>2</sub> e	非增值 碳排放 / kgCO <sub>2</sub> e	工序 增值碳 效率 /%	工序	增值 能耗 / kWh	非增值 能耗 / kWh	增值 碳排放 / kgCO <sub>2</sub> e	非增值 碳排放 / kgCO <sub>2</sub> e	工序 增值碳 效率 /%
乳液清洗	0.417	6.539	6.425	3.729	63.3	自来水漂洗	0.000	0.011	0.002	0.006	25.0
自来水喷洗	0.000	0.011	0.020	0.006	76.9	去离子漂洗	0.000	0.011	0.001	0.006	14.3
自来水漂洗	0.000	0.011	0.002	0.006	25.0	去离子漂洗	0.000	0.011	0.001	0.006	14.3
碱清洗	0.417	6.528	0.950	3.723	20.3	硼硫酸阳极化	1.833	5.804	11.274	3.310	77.3
自来水喷洗	0.000	0.011	0.020	0.006	76.9	自来水喷洗	0.000	0.011	0.020	0.006	76.9
自来水漂洗	0.000	0.011	0.002	0.006	25.0	去离子漂洗	0.000	0.011	0.001	0.006	14.3
脱氧	0.050	4.121	1.052	2.350	30.9	封闭	2.500	7.911	1.426	4.512	24.0
自来水喷洗	0.000	0.011	0.020	0.006	76.9	干燥	0.417	6.528	0.238	3.723	6.0

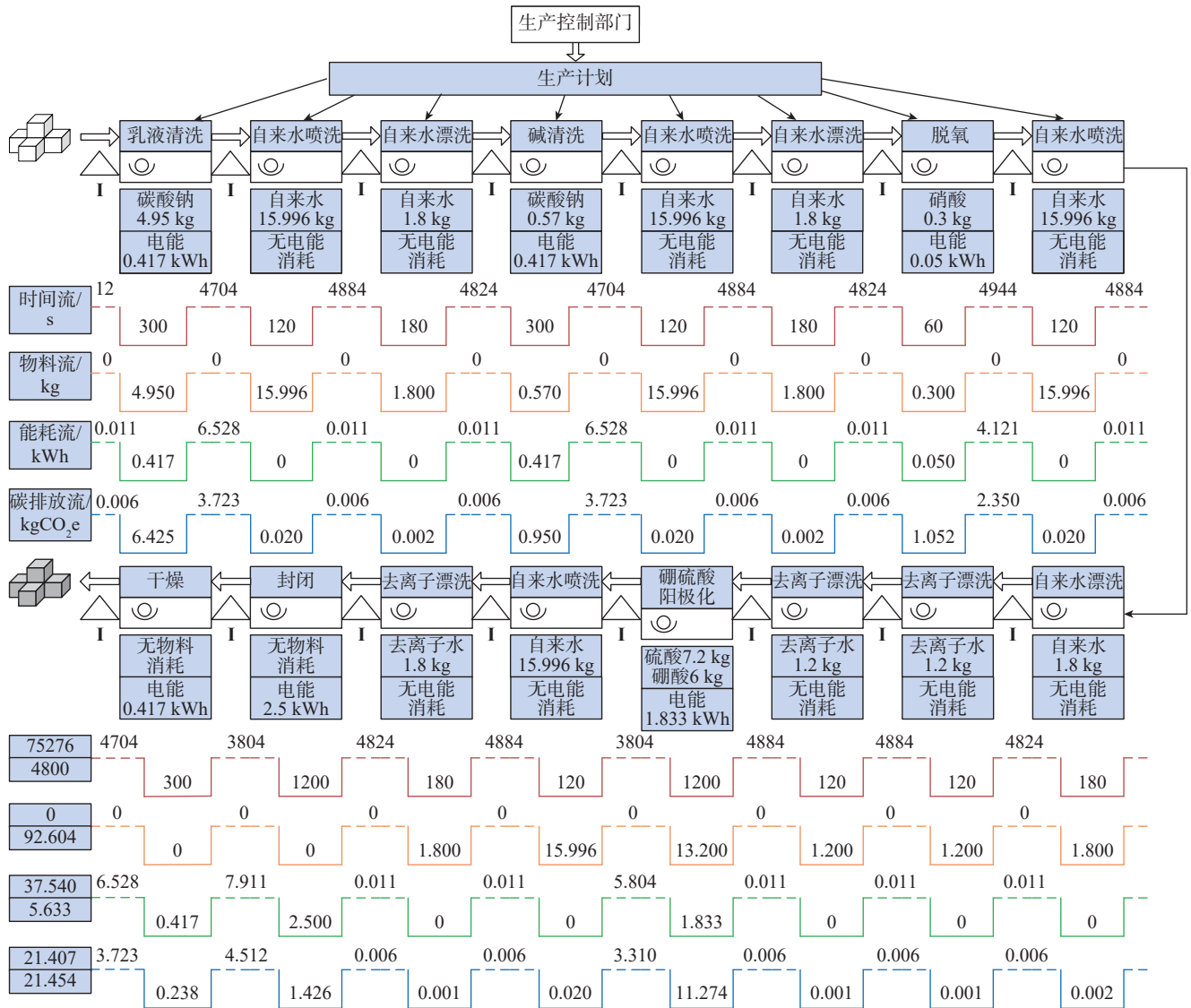


图 4 硼硫酸阳极化产线碳排放价值流图

Fig.4 Carbon emission value stream mapping of boric-sulfuric acid anodization

增值的时间、能耗、物料及碳排放流,也说明了减少非增值物耗、能耗和碳排放的必要性。各类流线顶端代表加工过程的非增值部分,底端代表增值部分。根据表3硼硫酸阳极化产线增值碳效率为50.1%,为揭示减碳潜力并为制定减碳措施指明方向,对工序进行敏感性分析,将增值碳效率作为计算指标,分别对各工序的增值碳效率-5%、-10%、0、+5%、+10%,计算得到对应的产线增值碳效率见表4。可见,自来水喷洗、自来水漂洗和去离子漂洗3种工艺敏感性分析结果基本一致,同时对产线的碳排放和增值碳效率影响较小,因此针对产线增值碳效率影响较大的典型工艺绘制敏感性曲线结果见图5。

由表4数值和图5典型工序曲线斜率可知,硼硫酸阳极化工序的敏感性最大,其次是乳液清洗工序,两种工序的共同特点是在表面处理工艺产线中所占的碳排放量较高,同时加工过程和待机过程消耗大量的电能。因此硼硫酸阳极化、乳液清洗是表面处理产线中的热点工序,这些工艺对表面处理产线的碳排放影响较大,后续可围绕硼硫酸阳极化和乳液清洗制定减碳措施,促进表面处理工艺和航空制造业绿色低碳发展。

#### 4 结论

本文针对大飞机零部件表面处理工艺碳排放精细化核算的难题,开展了基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放建模与减碳分析研究,得到以下主要结论。

(1)建立了表面处理工艺碳排放核算矩阵,为该工艺碳排放精细化核算提供了理论基础;提出了基于改进价值流图的大飞机零部件表面处理工艺碳排放表征方法,直观地体现了工艺中增值和非增值的时间流、物料流、能耗流及碳排放流,从而识别碳排放的影响因素,同时说明了减少非增值碳排放的必要性。

(2)提出了增值碳效率指标对表面处理工艺进行评价,并采用敏感性分析对工艺中的热点工序进行挖掘以阐明表面处理工艺减碳潜力。案例研究表明,产线增值碳效率为50.1%,热点工序为硼硫酸阳极化,其次是乳液清洗,后续可围绕热点

工序制定减碳措施以提高产线增值碳效率,促进表面处理工艺绿色低碳发展。

(3)本研究聚焦大飞机零部件表面处理工艺碳排放核算表征和减碳分析,目前研究主要以典型硼硫酸阳极化为验证案例,后续将在其他表

表4 工艺增值碳效率敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of value-added carbon efficiency for each process

工序	增值碳效率-10%	增值碳效率-5%	增值碳效率0	增值碳效率+5%	增值碳效率+10%
乳液清洗	48.8%	49.4%	50.1%	50.6%	51.2%
自来水喷洗	50.0%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
自来水漂洗	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
碱清洗	49.5%	49.8%	50.1%	50.3%	50.6%
自来水喷洗	50.0%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
自来水漂洗	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
脱氧	49.6%	49.8%	50.1%	50.2%	50.4%
自来水喷洗	50.0%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
自来水漂洗	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
去离子漂洗	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
去离子漂洗	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
硼硫酸阳极化	48.2%	49.2%	50.1%	50.9%	51.7%
自来水喷洗	50.0%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
去离子漂洗	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%	50.1%
封闭	49.3%	49.7%	50.1%	50.4%	50.7%
干燥	49.5%	49.8%	50.1%	50.3%	50.5%

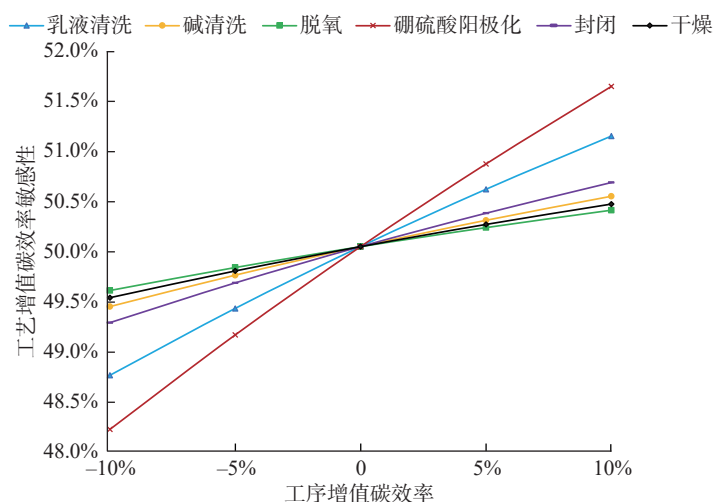


图5 增值碳效率敏感性分析结果

Fig.5 Sensitivity analysis of value-added carbon efficiency

面处理工艺中所提方法进行验证;同时,针对敏感性分析的深入探索仍有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] International Energy Agency. CO<sub>2</sub> Emissions in 2022[EB/OL]. (2023-03)[2024-05-22]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [2] 刘仁厚,王革,黄宁,等. 中国科技创新支撑碳达峰、碳中和的路径研究[J]. 广西社会科学, 2021(8): 1-7.
- LIU Renhou, WANG Ge, HUANG Ning, et al. On path of supporting carbon peak and carbon neutralization by science and technology innovation China[J]. Social Sciences in Guangxi, 2021(8): 1-7.
- [3] 曹华军,李洪丞,曾丹,等. 绿色制造研究现状及未来发展策略[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 135-144.
- CAO Huajun, LI Hongcheng, ZENG Dan, et al. The state-of-art and future development strategies of green manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2): 135-144.
- [4] 曹华军,李洪丞,杜彦斌,等. 低碳制造研究现状、发展趋势及挑战[J]. 航空制造技术, 2012, 55(9): 26-31.
- CAO Huajun, LI Hongcheng, DU Yanbin, et al. Current situation and development trend of low-carbon manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(9): 26-31.
- [5] TICIANO C J. Life cycle assessment oriented to climate change mitigation by aviation[C]//15th International Conference on Environmental Economy, Policy and International Environmental Relations. Prague: University of Economics, 2013.
- [6] HOWE S, KOLIOS A J, BRENNAN F P. Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 19: 34-41.
- [7] 雷国东,徐悦. 未来大型客机发展方向及关键设计技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 26-37.
- LEI Guodong, XU Yue. Development directions and key design technologies research of future large airliners[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 26-37.
- [8] 陈松祺. 谈谈“航空铝合金表面处理特种工艺的重要性”[C]//2011年全国电子电镀及表面处理学术交流会论文集. 上海: 中国电子学会, 2011.
- CHEN Songqi. Talk about “The importance of aviation aluminum alloy surface treatment special process” [C]//Proceedings of the 2011 National Electronic Plating and surface Treatment Academic Exchange meeting. Shanghai: Chinese Institute of Electronics, 2011.
- [9] 司力琼,徐晓东. 航天装备材料表面处理工艺技术现状与发展方向[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(9): 64-65.
- SI Liqiong, XU Xiaodong. Present situation and developing trends of surface processing technology for aerospace materials[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2017, 7(9): 64-65.
- [10] ABEDINI M, HANKE S. Improving the wear resistance of aluminum by a nickel-filled anodized porous alumina layer[J]. Wear, 2023, 522: 204858.
- [11] SUN M X, HUANG H J, JIANG M L, et al. Influence of oxalic additive on etidronic acid anodizing of aluminum alloy[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2023, 944: 117641.
- [12] GU J M, ZHANG X Y, YU L Y. Investigation on anodized 5052 aluminum alloy and its corrosion resistance in simulated acid rain[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023, 18(11): 100336.
- [13] 程文礼,杨慧,任德杰,等. 表面处理对铝合金盐雾环境下的腐蚀特性试验研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 92-96.
- CHENG Wenli, YANG Hui, REN Dejie, et al. Experimental study on corrosion characteristics of aluminum alloy in salt spray environment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(12): 92-96.
- [14] 郑战光,罗广源,孙腾,等. 阳极氧化膜对铝合金疲劳裂纹萌生的影响[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(10): 181-187.
- ZHENG Zhanguang, LUO Guangyuan, SUN Teng, et al. Effect of anodic oxide film on fatigue crack initiation of aluminum alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(10): 181-187.
- [15] 杨堃,许世娇,韩冬宁,等. 工艺参数对 2024 铝合金 HEDP 阳极氧化膜耐蚀性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(24): 1759-1763.
- YANG Kun, XU Shijiao, HAN Dongning, et al. Effects of process parameters on corrosion resistance of anodic oxide film prepared in a HEDP electrolyte on 2024 aluminum alloy[J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41(24): 1759-1763.
- [16] 赵相忠,解淑芸. 价值流图技术在离散型制造业生产线优化上的应用[J]. 机床与液压, 2018, 46(13): 93-97, 109.
- ZHAO Xiangzhong, XIE Shuyun. Application of value stream mapping technology in optimization of discrete manufacturing enterprise production line[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(13): 93-97, 109.
- [17] 宋庭新,董一鸣,李西兴. 基于价值流图技术的传动轴装配流程优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(9): 2463-2473.
- SONG Tingxin, TONG Yiming, LI Xixing. Optimization of drive shaft assembly process based on value flow graph technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(9): 2463-2473.
- [18] WEN X H, CAO H J, HON B, et al. Energy value mapping: A novel lean method to integrate energy efficiency into production management[J]. Energy, 2021, 217: 119353.
- [19] LI H C, CAO H J, PAN X Y. A carbon emission analysis model for electronics manufacturing process based on value-stream mapping and sensitivity analysis[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2012, 25(12): 1102-1110.
- [20] 孙茜悦. 基于改进价值流程图分析的机械制造系统碳排放模型及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- SUN Hanyue. Carbon emissions model of mechanical manufacturing system based on modified value stream mapping and its application research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [21] 宋丹丹. 铝合金压铸车间绿色生产过程精益评价及优化方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- SONG Dandan. Lean evaluation and optimization method of green production process in aluminum alloy die casting workshop[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [22] 李洪丞. 机械制造系统碳排放动态特性及其碳效率评估优化方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LI Hongcheng. Research on dynamic

characteristics of carbon emission and optimization method of carbon efficiency evaluation in mechanical manufacturing system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[23] 张耘瑞. 高速干式滚齿加工工艺参

数优化研究及仿真[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.

ZHANG Yunrui. Research and simulation on optimization of process parameters for high-speed dry gear hobbing[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology,

2022.

[24] WANG X L, LU J W, YANG S Q. Sensitivity analysis and optimization design of hypoid gears' contact pattern to misalignments[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2019, 20(6): 411-430.

## Carbon Emission Modeling and Carbon Reduction Analysis of Surface Treatment Process for Large Aircraft Parts Based on Improved Value Stream Mapping

CAO Huajun<sup>1</sup>, LI Yapeng<sup>1</sup>, GE Weiwei<sup>1</sup>, DING Yao<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>2</sup>, HE Sihang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

**[ABSTRACT]** In the context of the “Dual carbon” strategy, green and low-carbon development has become a necessary route for the aerospace manufacturing industry development. Surface treatment process, as a key process of large aircraft parts processing, is characterized by multiple processing procedure, long processing flow, and multiple carbon emission sources, and there are problems of high energy consumption, low energy efficiency, and severe carbon emissions, which poses challenges to its green and low-carbon development. To this end, this study takes the surface treatment process of large aircraft parts as an object to define the carbon emission boundary of the surface treatment process, and analyze the carbon emission characteristics of this process. On this basis, a carbon emission accounting method for the surface treatment process of large aircraft parts based on the improved value stream mapping is proposed, and the carbon emission hotspot is obtained to elucidate the carbon reduction potential of the surface treatment process based on the sensitivity analysis. Finally, the boric-sulfuric acid anodic oxidation of the large aircraft aluminum alloy parts is performed to verify the effectiveness of the proposed method. This research can provide methodological support for the refined carbon emission modeling for surface treatment process, and also lays a theoretical foundation for the subsequent development of energy-saving and carbon-reducing strategies.

**Keywords:** Green manufacturing; Aerospace manufacturing; Carbon emission; Surface treatment process; Improved value stream mapping

(责编 逸飞)