

汽车制造过程中焊接能耗及碳排放分析

顾勇¹, 杨清云², 张培磊²

1. 上海汇众汽车制造有限公司 上海 200122

2. 上海工程技术大学材料科学与工程学院 上海 201620

摘要: 汽车制造企业一直被认为是能源消耗大户和碳排放的重要来源, 其已经采用了一种新的实践, 对汽车制造阶段的碳排放进行定量评估, 在实现所需加工性能的同时减少了对环境的影响。各种焊接工艺在汽车制造业中被广泛采用, 不同焊接工艺的碳排放各不相同, 然而很少有研究不同焊接方法的碳排放。实现汽车制造焊接过程的低碳排放是构建低碳制造的必要手段。对汽车制造中涉及的焊接工艺碳排放源进行分析, 同时对焊接过程中的碳排放量进行核算总结。计算汽车制造过程中的能耗和碳排放有助于节能, 从而实现低碳制造。因此, 对汽车制造过程中焊接能耗及碳排放进行分析与研究是低碳制造的重中之重, 也是未来的一大趋势。

关键词: 碳排放; 低碳制造; 焊接; 碳排放核算

Analysis of welding energy consumption and carbon emissions in automobile manufacturing processes

GU Yong¹, YANG Qingyun², ZHANG Peilei²

1. Shanghai Huizhong Automobile Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200122, China

2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: Automobile manufacturing companies have long been recognized as large energy consumers and significant sources of carbon emissions. They have adopted a new practice of quantitatively assessing carbon emissions at the automobile manufacturing stage, which reduces the environmental impact while achieving the desired process performance. Various welding processes are widely used in the automobile manufacturing industry and carbon emissions vary from one welding process to another, however little research has been conducted on the carbon emissions of different welding methods. Achieving low carbon emissions from the welding process in automobile manufacturing is a necessary means of constructing low carbon manufacturing. This paper analyses the sources of carbon emissions from the welding process involved in automobile manufacturing, and at the same time summarizes the carbon emissions from the welding process in terms of accounting. Calculating the energy consumption and carbon emissions in the automobile manufacturing process helps to achieve energy saving and thus low carbon manufacturing. Therefore, the study of welding energy consumption and carbon emission analysis in the automobile manufacturing process is the top priority and a major trend in the future of low-carbon manufacturing.

Keywords: carbon emissions; low-carbon manufacturing; welding; carbon accounting

基金项目: 国家自然科学基金(52075317); 上海汽车工业科技发展基金会(1604)。

第一作者: 顾勇, 高级工程师, 主要从事汽车底盘结构件的焊接工艺设计研究, E-mail: guyong@shac.com.cn。

1 序言

在汽车生产制造期间会排放大量的温室气体 (GHG)，而温室气体的排放会导致气候变化。气候变化及其社会、环境和经济后果被广泛认为是人类社会面临的一系列相互关联的问题，其影响是巨大而深远的，并且不均衡地分布在全球^[1]。制造业占全球碳排放的1/3以上^[2]。可想而知，低碳和节能制造的趋势迫在眉睫，这显然成为了制造业未来的主要发展方向。如今，汽车制造业已经成为中国经济的重要组成部分，而在制造过程中，焊接是其必不可少的一个过程，期间会产生大量的CO₂。汽车制造业也是全球能源消耗和碳排放的主要来源。因此，研究焊接过程的碳排放对节能减排至关重要，对汽车制造业的可持续发展具有指导作用^[3]。

车辆的制造包括以下流程：零部件制造和车辆装配。前者涉及成形工艺，如冲压、铸造、锻造和挤压等，以及连接操作，如胶合、焊接和紧固等。后者包括将车辆部件组装到汽车中，以及涂漆、阳极氧化和车辆表面镀锌。VAN HOEK^[4]以两家汽车公司为例，指出环境思想在汽车制造的系统管理和供应链中发挥着重要作用，并将这些思想应用于设计、回收、拆解和维护等环节的节能减排。ORSATO等^[5]从生命周期和可持续发展的角度出发，将产品在生命周期的各个过程都考虑在内，指出环境、社会、经济均应处于良好的状态，同时提出了汽车工业可持续发展的途径。BALL等^[6]提出了零碳制造的概念，并建立了系统的框架模型，分析了碳流、物流、能量流和废弃物流的输入与输出之间的关系。对汽车制造业的节能减排方法进行了一定程度的研究。然而，汽车制造业中关于不同焊接工艺的碳排放研究不多，YILBAS等^[7]对AISI304、Ti6Al4V和铬镍铁625合金3种不同材料的激光焊接过程进行了生命周期分析，指出激光焊接过程中的废料往往是环境恶化的原因。UM等^[8]建立了激光加工系统、机器人机械臂、激光头和冷却系统总能耗的估算模型，考虑了包括机器人操作参数、机械臂路径和焊件所决定的能量，而不是焊接熔化过程中的能量，分析得出加工时间和激光功率是影响焊接能效的主要因素。CAO等^[9]综合考虑了激光焊接加工系统的环境特性和焊件质量，开展了激光焊接系

统碳排放与焊接质量系统优化分析方法研究。本文总结了汽车制造过程典型的3种焊接过程碳排放模型，然后分析了能源消耗和碳排放的特点，并对相关问题进行了数学分析。

2 汽车焊接碳排放边界

汽车制造涉及多种类型的制造过程，包括零件的加工和组装。由于工艺机理不同，因此其碳排放特性也不同。零件的焊接是汽车制造过程碳排放的主要来源。此外，辅助生产设施也会造成碳排放。因此，汽车零件焊接的碳排放具有多环节、难以量化的特点。从能源和材料消耗、废物排放和温室气体直接排放的角度定义汽车焊接过程的碳排放边界。系统边界决定了碳排放评估对象的范围，制造过程每个阶段涉及是直接/间接碳排放活动。碳排放源主要从4个方面考虑：能源消耗、材料消耗、废物排放及温室气体直接排放。

2.1 估算数据方法

气体排放的核算方式包括以下3种：实测法、物料衡算法及排放系数法^[10]。实测法是对排放气体进行现场实测，通过测定得到气体的排放浓度及流量，然后计算得出排放量^[11]。现场样品的选择将直接影响数据的准确性，因此需要对样品进行合理的选择。同时烟气排放监测设备的成本较高，对焊接过程中碳排放进行单独监测的性价比很低。因此，实测法不适用于焊接过程中碳排放量的估算。

物料衡算法是一种广泛用于气体排放量核算的分析方法，它基于物质守恒定律。采用物料衡算法计算气体排放量时需要对生产流程及生产过程中的消耗情况进行充分调研，综合分析才能较为真实地反应生产过程中的排放情况^[12]。当涉及到复杂的生产过程时，此方法的核算难度极大。因为伴随着极大的工作量，数据的准确性也难以确保^[13]。因此，物料衡算法也不适用于焊接过程中的碳排放估算。

排放因子法是适用范围最广、应用更为普遍的一种碳排放核算方式。这种方法根据能源消耗量与排放因子相乘来估算碳排放量，计算公式为^[10]

$$CE = \sum CE_i = \sum E_i \times CEF_i \quad (1)$$

式中 CE ——焊接过程中总的碳排放量 (kgCO₂)；

CE_i ——第 i 种能源消耗产生的碳排放量 (kgCO₂)；

E_i ——第*i*种能源的消耗量;
 CEF_i ——第*i*种能源的碳排放系数。

不同能源排放系数的数值均可从《国家温室气体排放清单指南》中查到,因此只需要得到能源消耗量的相关数据即可计算碳排放量。与前两种方式相比,排放因子法易于人员操作,可行性更高。

2.2 碳排放核算

根据能源消耗的主体不同,排放因子可划分为直接和间接排放因子^[10]。CO₂直接排放是源于焊接过程中能源直接消耗而随之产生的碳排放,主要包括一些化石燃料,如煤、焦炭等,以及非化石燃料,如塑料、有机溶剂等。不同能源的直接排放因子排放系数见表1。

间接排放是由企业生产所引起的,但不直接来自其自身运营的温室气体排放。这种排放通常发生在生产、运输等其他企业的产品上。不同能源的间接排放因子排放系数见表2。

表1 直接排放因子排放系数

能源种类	排放系数
原煤	1.90kgCO ₂ /kg
天然气	2.16kgCO ₂ /m ³
汽油	0.5538kgCO ₂ /kg
煤油	0.5713kgCO ₂ /kg
柴油	0.5921kgCO ₂ /kg

表2 间接排放因子排放系数

能源种类	排放系数
电	0.980kgCO ₂ / (kW·h)
蒸汽	0.195kgCO ₂ /kg
氧气	0.355kgCO ₂ /m ³
氮气	0.103kgCO ₂ /m ³

3 汽车制造焊接碳排放模型

3.1 核算边界

制造设备全过程产生的碳排放 CE_{equip_p} 主要由直接碳排放 CE_{equip_dir} 和间接碳排放 CE_{equip_indir} 组成。间接碳排放 CE_{equip_indir} 包括设备能耗产生的碳排放 CE_e 、材料消耗产生的碳排放 CE_{mc} 和废物处理产生的碳排放 CE_w 。其中,直接碳排放 CE_{equip_dir} 指加工过程中化学反应产生的碳排放,如燃料燃烧、材料热分解等。 CE_e 主要考虑生产过程中电力消耗产生的碳排放。

CE_{mc} 指原料、辅助材料、一次/二次能源(电能除外)制备过程中产生的碳排放量。 CE_e 考虑处理废物过程中产生的碳排放量。因此,设备层碳足迹模型为^[14]

$$CE_{equip_p} = CE_{equip_dir} + CE_{equip_indir} = CE_{equip_dir} + CE_e + CE_{mc} + CE_w \tag{2}$$

3.2 激光焊接工艺碳排放

激光焊接是一种以熔化或汽化为特征的热工艺,能源效率相对较低。KELLENS等^[15]研究表明,通常用于激光焊接的光纤激光器的输出功率与输入功率之比为20%~30%。基于相应的工艺特点和能耗,WEI等^[16]提出了热丝激光焊接的能效评价模型。PASTRAS等^[17]定义了能效指标,并建立了不同激光焊接类型的工艺参数、能源效率和熔池几何形状之间的关系。LE-QUANG等^[18]通过参数化方法研究了使用光束振荡技术的激光焊接,同时建立了上述过程的节能模型。

激光焊接系统的碳排放主要由能源消耗和材料消耗组成。能源消耗的碳排放主要来源于激光装置、冷却装置、运动装置和气体装置^[19]。材料消耗的碳排放主要由保护气体和冷却水产生。激光焊接参数(即激光功率、焊接速度和离焦量)会影响激光焊接系统的能源和材料消耗^[20, 21]。激光功率决定了焊接区域的热量大小,而焊接速度决定了焊接过程中的激光-材料相互作用时间。另外,激光焊接参数会影响焊接性能。激光焊接作为一种熔焊工艺,由于热量高度集中和快速加热与冷却,不可避免地会产生焊接变形。作为工程中金属材料的关键力学性能之一,抗拉强度可用于评估激光焊接性能^[22]。因此,重点对激光焊接工艺的碳排放和焊接性能进行多目标响应评价。考虑到激光功率、焊接速度和离焦量等参数,具体的响应过程如图1所示。

对于激光器来说,主要的碳排放源是电能的消耗。根据激光器的能耗特性,激光器的加工状态分为起动、待机、空闲和运行。由于起动时间相对较短,因此起动能耗极低,可以忽略不计。在空闲状态下,激光设备在不发光的情况下被激活。待机功率和空闲功率由激光器的固有特性决定,其近似恒定。在运行状态下,激光设备发射激光。根据相关文献^[23],设定的输入功率与输出功率呈线性关系,其系数与激光器的固有性质有关。碳排放可以通过

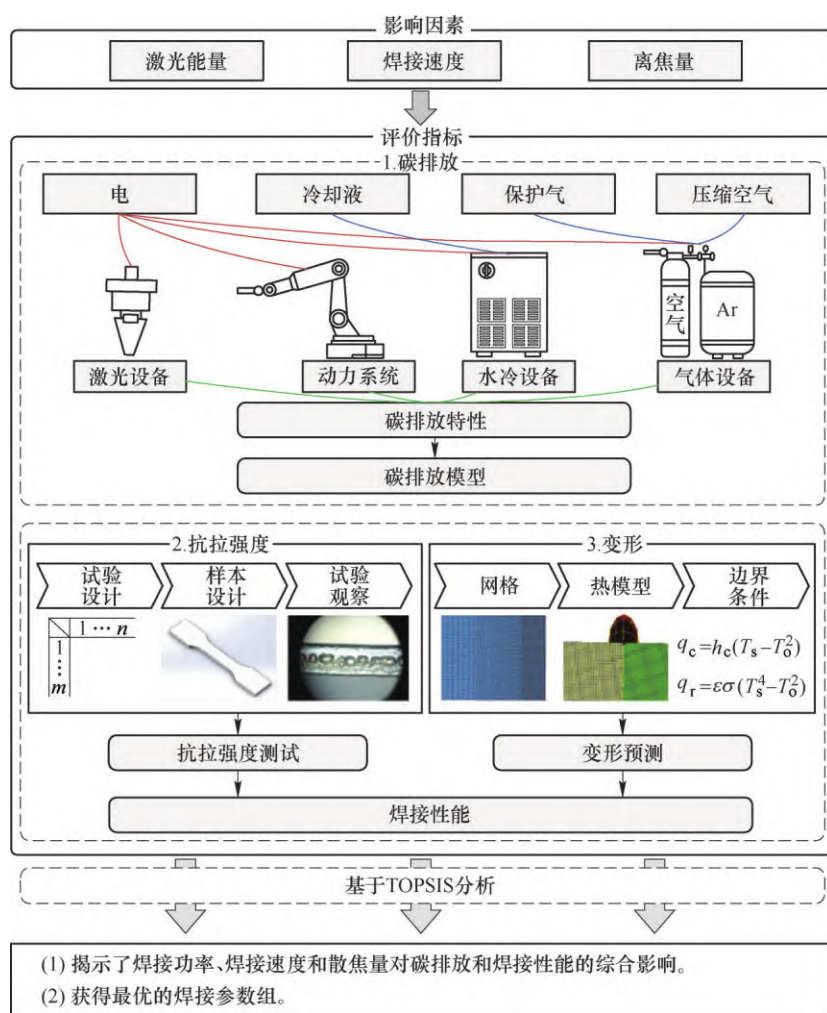


图1 碳排放与焊接性能的多目标响应过程^[9]

运行状态下的激光输出功率和电光转换效率获得。
激光设备的碳排放量可以根据方程计算。

综合设备和能源消耗的特性，将激光焊接过程中的碳排放计算公式定义为^[19]

$$CE_{total} = CE_{lw} + CE_{robot} + CE_{chiller} + CE_{Ar} + CE_{ca} \quad (3)$$

式中 CE_{total} ——总的碳排放 (kgCO_2)；

CE_{lw} ——激光器运行产生的碳排放 (kgCO_2)；

CE_{robot} ——机器人运转产生的碳排放 (kgCO_2)；

$CE_{chiller}$ ——水冷机冷却激光器产生的碳排放 (kgCO_2)；

CE_{Ar} ——保护气体消耗产生的碳排放 (kgCO_2)；

CE_{ca} ——压缩机运作产生的碳排放 (kgCO_2)。

激光器产生的碳排放均源于电力的消耗，但在焊接过程中激光器存在运行和待机两种状态，因此

激光器的碳排放定义为^[24]

$$CE_{lw} = CEF_{elec} \times EC_{lw} = CEF_{elec} \times (P_{lws} \times t_{lws} + P_{lwo} \times t_{lwo} / \eta) \quad (4)$$

式中 CEF_{elec} ——电力的排放系数 ($\text{kgCO}_2/\text{kW}\cdot\text{h}$)；

EC_{lw} ——电力消耗量 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)；

P_{lws} 、 P_{lwo} ——不同状态下的功率 (kW)；

t_{lws} 、 t_{lwo} ——不同状态下的工作时间 (h)；

η ——设备的能量转换率 (%)。

运动系统包括机器人多个轴，不同轴的运动状态也是不同的，将运动系统视为一个整体，并通过能耗来定义碳排放^[24]，即

$$CE_{robot} = CEF_{elec} \times EC_{robot} = CEF_{elec} \times \int_0^T P_{robot}(t) dt \quad (5)$$

式中 EC_{robot} ——机器人电力消耗量 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)；

P_{robot} ——机器人的工作功率 (kW)；

t ——机器人的工作时间 (h)。

忽略机器人工作时的功率波动,视功率为一个恒定值。同时考虑机器人的工作状态,将式(5)写为

$$CE_{\text{robot}} = CEF_{\text{elec}} \times (P_{\text{rs}} \times t_{\text{rs}} + P_{\text{m}} \times t_{\text{m}}) \quad (6)$$

式中 P_{rs} 、 P_{m} ——运动系统不同状态下功率(kW);

t_{rs} 、 t_{m} ——不同状态下的工作时间(h)。

冷却系统的碳排放要分为两部分,即电力 CE_{ce} 和冷却液 CE_{cf} 的消耗产生的碳排放。根据相关文献^[25],可将水冷机的碳排放写为

$$CE_{\text{chiller}} = CE_{\text{cf}} + CE_{\text{ce}} = CEF_{\text{cf}} \times V_{\text{cf}} \times \frac{t_{\text{cs}} + t_{\text{con}}}{T} + CEF_{\text{elec}} (P_{\text{cs}} \times t_{\text{cs}} + P_{\text{con}} \times t_{\text{con}}) \quad (7)$$

式中 V_{cf} ——冷却液体积耗损的体积(m^3);

P_{cs} 、 P_{con} ——不同工作状态下的功率(kW);

t_{cs} 、 t_{con} ——不同工作状态下的时间(h);

T ——冷却剂的循环时间(h)。

通过对水冷机的过程进行分析,将冷却系统的开启时间定义为^[9]

$$t_{\text{con}} = \frac{V_{\text{f}} \times \rho_{\text{f}} \times C_{\text{f}} \times \Delta T}{P_{\text{lwo}} \times \left(\frac{1}{\eta_{\text{lw}}} - 1 \right) \times t_{\text{lwo}}} \quad (8)$$

式中 V_{f} ——设备中冷却液的体积(m^3);

ρ_{f} ——冷却液的密度(kg/m^3);

ΔT ——指激光器内、外的温度差($^{\circ}\text{C}$);

C_{f} ——冷却水的比热容($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)。

通入保护气体吹散等离子体保证焊接质量是至关重要的,其产生的碳排放也是不可忽视的,将保护气的碳排放定义为^[9]

$$CE_{\text{Ar}} = CEF_{\text{Ar}} \times Q_{\text{Ar}} \times t_{\text{Ar}} \quad (9)$$

式中 CEF_{Ar} ——氩气的碳排放系数(kgCO_2/m^3);

Q_{Ar} ——焊接过程中的氩气流量(m^3/h);

t_{Ar} ——保护气开启的时间(h)。

为保护光学镜片不受飞溅等影响,需要采用压缩机来输出压缩空气。因此,空气压缩设备产生的碳排放为^[9]

$$CE_{\text{ca}} = CEF_{\text{elec}} \times P_{\text{ca}} \times t_{\text{ca}} = CEF_{\text{elec}} \times \rho_{\text{ca}} \times Q_{\text{ca}} \times C_{\text{p,ca}} \times T_0 \times \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \times t_{\text{ca}} \quad (10)$$

式中 P_{ca} ——压缩机的功率(kW);

t_{ca} ——工作时间(h);

ρ_{ca} ——气体密度(kg/m^3);

Q_{ca} ——气体流速(m^3/h);

$C_{\text{p,ca}}$ ——比热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$);

K ——热容比;

T_0 ——环境温度($^{\circ}\text{C}$);

p_1 、 p_2 ——压缩前后的压力(N)。

基于相关文献^[9]描述激光功率、焊接速度和离焦量对碳排放的影响,如图2所示。激光功率、焊接速度和离焦量的 F 值分别为0.57、109.31和1.40。因此,首先焊接速度是碳排放的主要因素,其次是离焦量,最后是激光功率。换句话说,焊接速度直接影响激光焊接系统的运行时间,对碳排放有主导影响。同时,为研究激光焊接过程中的碳排放与焊接质量协同优化,对焊件的抗拉强度和变形量进行了同步研究(见图3、图4)。从图3、图4可看出,激光功率和焊接速度对焊件的抗拉强度、变形量的影响都是比较明显的,而离焦量的影响相对较小。

3.3 气体保护焊接工艺碳排放

CO_2 气体保护焊是以 CO_2 为保护气体进行焊接的方法,其焊接过程中 CO_2 气体作为直接碳排放源向

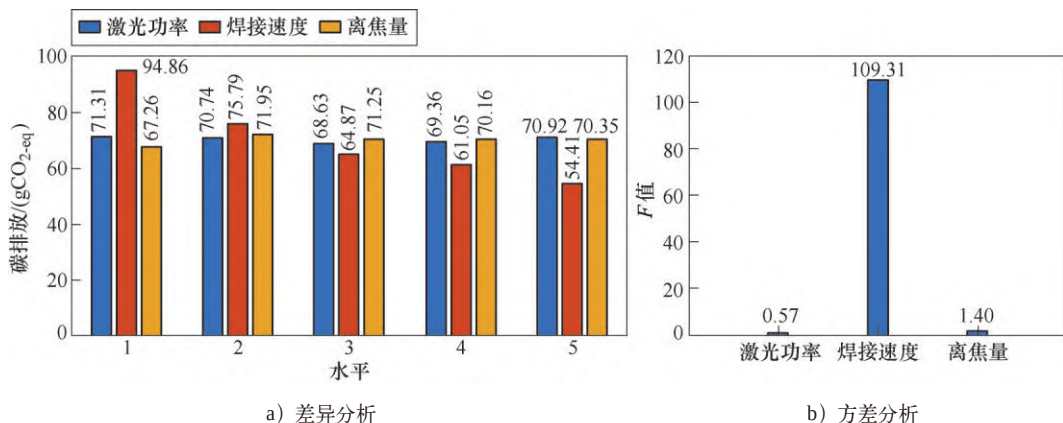


图2 不同工艺参数下碳排放的分析

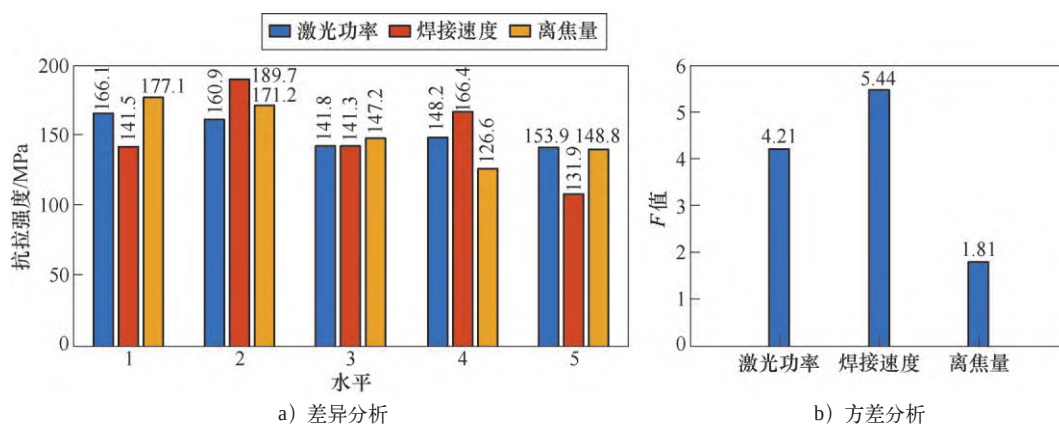


图3 不同工艺参数下抗拉强度的分析

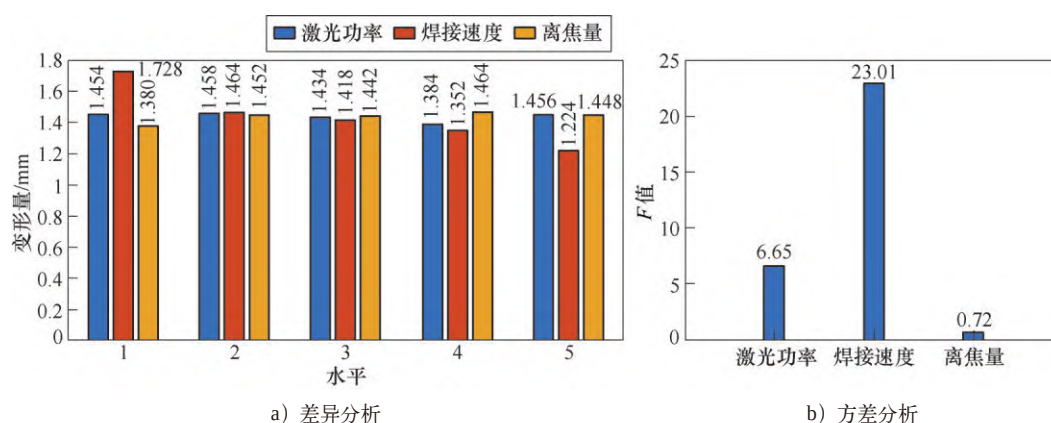


图4 不同工艺参数下变形量的分析

外排放。同时，气体保护焊焊接过程中还含有其他物料消耗及电耗等间接碳排放源（见图5）^[25]。从图5可知，CO₂气体保护焊焊接过程包括焊前处理、施

焊及对焊件进行后处理3个不同的阶段，每个阶段的碳排放形式均有所不同，但排放量最多的阶段发生在施焊过程。其焊接过程中的碳排放往往会受焊丝

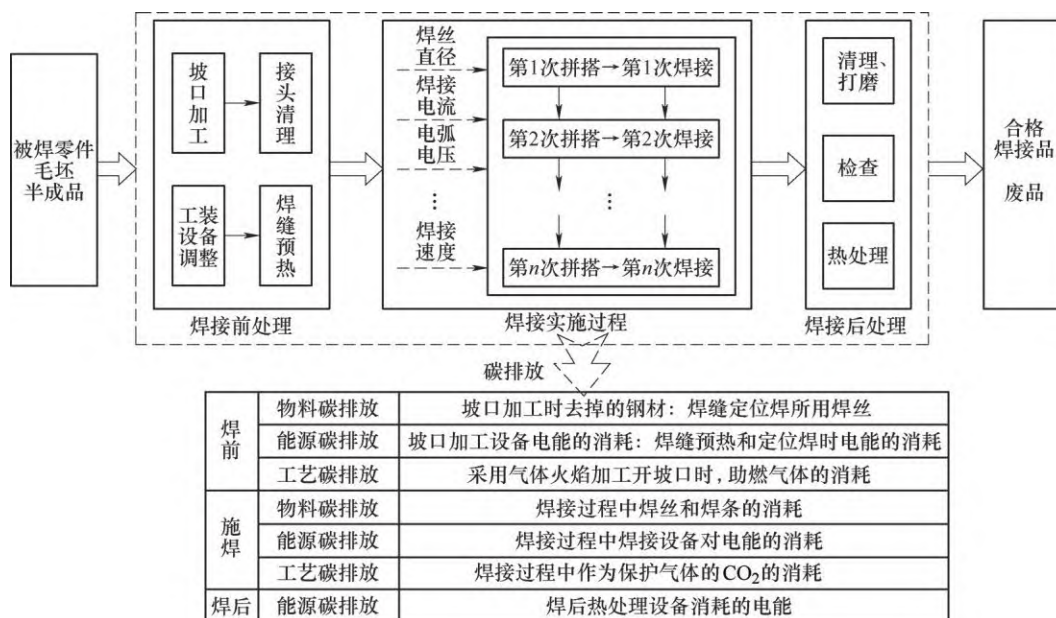


图5 焊接过程碳排放评估边界及碳排放源^[25]

直径、电弧电压等众多参数的影响,因此其排放机理很复杂,参数选定与碳排放的关系成为碳核算的关键。

将气体保护焊的碳排放定义为^[25]

$$CE = CE_1 + CE_2 + CE_3$$

$$= \alpha_1 \sum_{b=1}^n E_{1b} f_b + \alpha_2 \sum_{k=1}^m \sum_{b=1}^n M_{2k} E_{2b} f_b + \alpha_3 \sum_{k=1}^m \sum_{b=1}^n M_{3k} E_{3b} f_b + C_d \quad (11)$$

式中 CE ——总的碳排放 (kgCO_2) ;

CE_1 、 CE_2 、 CE_3 ——不同碳排放源的碳排放 (kgCO_2) ;

E_{ab} ($a=1, 2, 3; b=1, 2, \dots, n$) ——第 a 类碳排放源中 b 种能源消耗量;

f_b ——第 b 种能源的转化系数 (%) ;

α_1 、 α_2 、 α_3 ——不同碳排放源的排放系数;

M_{2k} 、 M_{3k} ($k=1, 2, \dots, m$) ——第 b 种物料的消耗量;

C_d ——气体保护焊中的 CO_2 气体的消耗量 (kg) 。

由式 (11) 可知,影响碳排放的变量有很多,如焊丝直径 ϕ 、焊接电流 I 、电弧电压 U 、焊接速度 v 、气体流量 q 、干伸长 L 及电感 l 等。所述参数之间存在复杂的关系,同时与碳排放量成非线性关系,因此可以建立以下函数^[25],即

$$CE(x) = CE(\phi, I, U, v, q, L, l) \quad (12)$$

其中, $X = \{\phi, I, U, v, q, L, l\}$ 为气体保护焊的参数集,并且参数会影响成本和焊接质量,其相应的关系表达式为^[25]

$$C(X) = C(\phi, I, U, v, q, L, l) \quad (13)$$

$$Q(X) = Q(\phi, I, U, v, q, L, l) \quad (14)$$

式中 $C(X)$ ——生产成本 (元) 。

$Q(X)$ ——焊件合格率 (%) 。

参数选择的不同会导致成本和焊接质量的不

同。如在焊接过程中焊接速度的增加会让焊接成本随之降低,同时也会减少碳排放,但会导致焊件质量不良。因此,需要兼顾好三者的关系,于是可以建立如下综合模型^[25]

$$\min CE(X) \quad C(X) / Q(X) \quad (15)$$

$$\text{s.t. } I_1 \leq I \leq I_2 \quad U_1 \leq U \leq U_2 \quad v_1 \leq v \leq v_2 \quad (16)$$

$$l_1 \leq l \leq l_2 \quad L_1 \leq L \leq L_2 \quad q_1 \leq q \leq q_2 \quad (17)$$

$$\phi = \{0.8, 1.0, 1., 1.6\} \text{ mm} \quad (18)$$

$$C_1(X) \leq C(X) \leq C_2(X) \quad (19)$$

$$Q_1(X) \leq Q(X) \leq Q_2(X) \quad (20)$$

3.4 点焊焊接工艺碳排放

电阻点焊 (RSW) 在汽车行业的大量制造和装配工艺中脱颖而出。这是一种广泛使用的方法,通过电极施加高电流来连接两个或多个重叠的金属板^[26]。在典型的电阻点焊 (见图6) 中,两个铜合金电极提供电流并对被焊接的元件施加挤压力^[27]。这个过程导致点焊的形成,该点焊由在被接合元件的界面处材料的熔化产生。超过90%的车身车间组装是通过这个工艺进行的^[28]。在一辆客车上,有4000~6000个焊点^[29, 30]。如此大量的生产和应用,其能耗的研究是必不可少的。焊点的质量可以使用破坏性和非破坏性方法进行评估。破坏性方法应用更广泛,但是它比焊接过程需要更多的时间,因此通常通过采样进行^[31]。由于电阻点焊过程的检测受到样品的限制,因此预计会增加30%的冗余焊缝和操作参数组合,导致更高的热输入,从而浪费大量能源。电阻点焊与汽车行业息息相关,由于其操作特性,因此该过程能耗高。尽管如此,很少有研究提出减少能源消耗的解决方案。几乎没有人提出一种基于实证试验的方法来同时优化能源消耗和质量。从这个意义上讲,相关文献^[26]总结了一种在不影响其质量的情况下提高电阻点焊工艺能量性能的方法,减少电阻点焊过程中的碳排放。同时,统计分析

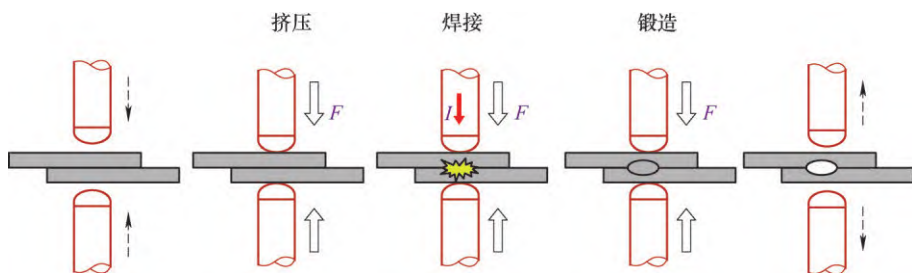


图6 电阻点焊过程的各个阶段

并量化了控制因素对能源和质量的影响,预测模型使得通过调整焊接参数来预测能耗和质量成为可能。

点焊过程中释放的热量将取决于施加的焊接电流、通过的时间和系统的总电阻。提出了计算初级和次级转换的能量效率^[29]和计算有用能量的方法,有用能量是焊缝形成的实际能量^[31]。然而,没有发现同时根据这两种方法定义RSW能源效率的工作。就此而言,基于Carvalho和Gomes对加工过程的能量分析,根据式(21)提出总RSW能效指标(EE_{total})。同时,考虑机器的能源效率和过程的能源性能。

$$EE_{total} = EE_{machine} \times EE_{PROCESS} \quad (21)$$

式中 EE_{total} ——总RSW能效指标(kW·h);

$EE_{machine}$ ——RSW机器能效(%);

$EE_{PROCESS}$ ——RSW过程能效指标(kWh)。

RSW机器能效的计算式为^[26]

$$EE_{machine}(\%) = \frac{EC_{secondary}}{EC_{total}} \times 100 \quad (22)$$

基于过程能效指标的计算,给出了焊点的热能效率系数 $\rho(t)$ 。式(24)表示 ρ 作为输送到系统的总能量的函数^[30],相应的 $EC_{secondary}$ 及 E_{useful} 为时间 t 内焊点形成而提供的能量。 E_{useful} 通过式(25)将其定义为热能传递系数 C 、熔核直径 d 和熔深 h 的函数。 K_{hd} 表示熔核直径 d 和熔深 h 之间的比例,即

$$K_{hd} = \frac{2h}{d} \quad (23)$$

$$\rho(t) = \frac{EC_{useful}(t)}{CE_{secondary}(t)} \quad (24)$$

$$E_{useful} = \frac{1}{4} C \pi d^3 K_{hd} \quad (25)$$

过程效率的计算可以定义为 $\rho(t)$ 。但是,在计算 E_{useful} 焊缝熔深对应的函数时,需要更多的试验,从而阻碍了所提出的方法在工业环境中的可复制性。出于这个原因,提出了方程式(26),这是通过佩尔试验获得的熔核直径所必需的,广泛用于车间,以及焊接夹具中能量的测量,即

$$EE_{PROCESS} \left(\frac{mm}{Wh} \right) = \frac{d_{nugget}}{CE_{secondary}} \quad (26)$$

点焊过程总能效指标的计算,由式(27)给出,即

$$EE_{total} = \frac{d_{nugget}}{EC_{total}} \quad (27)$$

从式(27)可看出,当能耗降低且熔核直径保持不变时, EE_{total} 值增加了。同样,通过保持能耗恒定并增加熔核直径, EE_{total} 值也增加了。 EE_{total} 值的增加表示制造焊点所消耗的能量更少。

4 结束语

全球变暖促使各国进行低碳研究,汽车制造业是巨大碳排放的产生者,因此系统化、全面的碳排放量化模型对于降低制造业的碳强度具有重要意义。本文总结了汽车制造涉及的重要的焊接工艺碳排放量化模型,介绍了激光焊、CO₂气体保护焊、点焊焊接工艺过程中的碳排放模型。基于上述分析结果,本文的研究结论如下。

1) 丰富了制造车间焊接碳排放理论。汽车制造焊接的碳排放模型是低碳化的前提和基础。但是,现有模型缺乏系统性和全面性。因此总结车间焊接碳排放模型,有助于研究焊接各个阶段的碳排放量,进一步推动汽车制造业碳排放理论的研究。

2) 为汽车制造业焊接低碳管理提供方向。合理选择焊接参数,以降低碳排放、生产成本和提高焊接质量为目标。本文针对激光焊、CO₂气体保护焊及点焊工艺为研究对象,对不同焊接工艺的碳排放源进行了分类分析,构建了不同焊接工艺的碳排放模型。但本文总结缺乏对于模型最优解的计算,后续应求得模型最优解的工艺参数,以便实现碳排放量的最小化。

3) 推动国家低碳化发展。温室效应是当前社会亟待解决的环境问题。因此,国家的低碳化是未来的发展趋势。碳标签制度的发展可以提高居民的低碳观念,促进国民经济的绿色转型。因此,碳排放模式间接促进了国家低碳化的发展。

参考文献:

- [1] HUISINGH D, ZHANG Z, MOORE J C, et al. Recent advances in carbon emissions reduction: policies, technologies, monitoring, assessment and modeling[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 1-12.
- [2] GARWOOD T L, HUGHES B R, OATES M R, et al. A review of energy simulation tools for the manufacturing sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 895-911.

- [3] 柯喜相. 基于低碳经济的我国汽车制造企业环境战略选择研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2011.
- [4] VAN HOEK R I. Case studies of greening the automotive supply chain through technology and operations[J]. International Journal of Technology Management, 2002, 23 (1-3) : 89-112.
- [5] ORSATO R J, WELLS P. The automobile industry & sustainability[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15 (11-12) : 989-993.
- [6] BALL P D, EVANS S, LEVERS A, et al. Zero carbon manufacturing facility—towards integrating material, energy, and waste process flows[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223 (9) : 1085-1096.
- [7] YILBAS B S, SHAUKAT M M, AFZAL A A, et al. Life cycle analysis for laser welding of alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 106064.
- [8] UM J, STROUD I A. Total energy estimation model for remote laser welding process[J]. Procedia Cirp, 2013, 7: 658-663.
- [9] CAO H, LI Y, LI H, et al. Multi-objective response evaluation for carbon emission and welding performance of laser welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121 (5) : 3005-3023.
- [10] 张铁山, 陈小双. 汽车制造企业生产过程碳排放核算与策略[J]. 企业经济, 2014 (10) : 17-21.
- [11] 王大川. 四川省制造业碳排放源分类与计量研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [12] 王燕, 黄永刚, 赵菲菲, 等. 基于物料衡算法的复杂化工过程产排污量核算软件的开发及应用[J]. 环境保护科学, 2010, 36 (2) : 96-99.
- [13] 齐绍洲, 付坤. 低碳经济转型中省级碳排放核算方法比较分析[J]. 武汉大学学报: 哲学社会科学版, 2013 (2) : 85-92.
- [14] FYSIKOPOULOS A, PASTRAS G, ALEXOPOULOS T, et al. On a generalized approach to manufacturing energy efficiency[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73: 1437-1452.
- [15] KELLENS K, RODRIGUES G C, DEWULF W, et al. Energy and resource efficiency of laser cutting processes[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 854-864.
- [16] WEI H, ZHANG Y, TAN L, et al. Energy efficiency evaluation of hot-wire laser welding based on process characteristic and power consumption[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 255-262.
- [17] PASTRAS G, FYSIKOPOULOS A, CHRYSSOLOURIS G. A numerical approach to the energy efficiency of laser welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 1243-1253.
- [18] LE-QUANG T, FAIVRE N, VAKILI-FARAHANI F, et al. Energy-efficient laser welding with beam oscillating technique—A parametric study[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127796.
- [19] 李彦妮. 激光焊接系统碳排放与焊接质量协同优化方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [20] YAN T, ZHAN X, GAO Q, et al. Influence of laser power on molten pool flow field of laser-MIG hybrid welded Invar alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 133: 106539.
- [21] LUO Y, ZHU L, HAN J, et al. Effect of focusing condition on laser energy absorption characteristics in pulsed laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 117: 52-63.
- [22] PADMANABAN G, BALASUBRAMANIAN V. Optimization of laser beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42 (8) : 1253-1260.
- [23] 段诚茂, 曹华军, 李洪丞, 等. 基于碳效率的铝合金激光焊接工艺系统低碳优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (5) : 1309.
- [24] LI C, TANG Y, CUI L, et al. A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015, 26: 911-922.
- [25] 罗毅, 曹华军, 李洪丞, 等. 基于 GRNN 网络的 CO₂ 气体保护焊工艺碳排放建模与参数优化[J]. 中国机械工程, 2013, 24 (17) : 2398.

(下转第111页)

- in metallic materials[J]. Acta Materialia, 2009, 57 (14) : 4148-4157.
- [21] KUMAR M, SCHWARTZ A J, KING W E. Microstructural evolution during grain boundary engineering of low to medium stacking fault energy fcc materials[J]. Acta Materialia, 2002, 50 (10) : 2599-2612.
- [22] XU S, WU X, HAN E, et al. Crack initiation mechanisms for low cycle fatigue of type 316Ti stainless steel in high temperature water[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490 (1-2) : 16-25.
- [23] LIU T, XIA S, LI H, et al. The highly twinned grain boundary network formation during grain boundary engineering[J]. Materials Letters, 2014, 133: 97-100.
- [24] XIA S, ZHOU B, CHEN W, et al. Effects of strain and annealing processes on the distribution of $\Sigma 3$ boundaries in a Ni-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2006, 54 (12) : 2019-2022.
- [25] GERTSMAN V Y, HENAGER C H. Grain boundary junctions in microstructure generated by multiple twinning[J]. Interface Science, 2003, 11: 403-415.
- [26] XIA S, ZHOU B, CHEN W. Effect of single-step strain and annealing on grain boundary character distribution and intergranular corrosion in Alloy 690[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43: 2990-3000.
- [27] XIA S, ZHOU B, CHEN W. Grain cluster microstructure and grain boundary character distribution in alloy 690[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2009, 40: 3016-3030.
- [28] LIU T, XIA S, ZHOU B, et al. Effect of initial grain sizes on the grain boundary network during grain boundary engineering in Alloy 690[J]. Journal of Materials Research, 2013, 28 (9) : 1165-1176.
- [29] LIND J, LI S F, KUMAR M. Twin related domains in 3D microstructures of conventionally processed and grain boundary engineered materials[J]. Acta Materialia, 2016, 114: 43-53.
- [30] FUJII T, SUZUKI M, SHIMAMURA Y. Susceptibility to intergranular corrosion in sensitized austenitic stainless steel characterized via crystallographic characteristics of grain boundaries[J]. Corrosion Science, 2022, 195: 109946.
- [31] XIA S, LI H, LIU T G, et al. Applying grain boundary engineering to Alloy 690 tube for enhancing intergranular corrosion resistance[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 416 (3) : 303-310.

MW 20241031

(下转第104页)

- [26] CUNHA C F A, DE OLIVEIRA G J, DE CARVALHO H M B. A new approach to reduce the carbon footprint in resistance spot welding by energy efficiency evaluation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119 (9) : 6503-6520.
- [27] 崔厚学, 刘昌雄, 孙志强, 等. 轻量化铝合金车身连接技术及其评价[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (4) : 13-16.
- [28] PODRŽAJ P, SIMON I S. Resistance spot welding control based on fuzzy logic[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52: 959-967.
- [29] LI W, DANIEL C, GA G. A comparative study of single-phase AC and multiphase DC resistance spot welding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005 (3) : 583-589.
- [30] NAGASATHYA N, BOOPATH S R, SANTHAKUMARI A. MFDC-An Energy efficient adaptive technology for welding of thin sheets: International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability[C]. USA: IEEE, 2013: 901-906.
- [31] ZHOU K, CAI L L. On the development of nugget growth model for resistance spot welding[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115 (16) : 45-75.

MW 20240904