

砂型铸件碳排放定量计算方法及其应用

庄澳杰^{1, 2}, 赵秀栩^{1, 2}, 蔡薇^{1, 2}, 秦艳平³, 刘国兵³

(1. 武汉理工大学机电工程学院, 湖北武汉 430070; 2. 数字制造湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070;

3. 广东省金志利科技股份有限公司, 广东韶关 512100)

摘要: 针对单个铸件砂型铸造过程中的碳排放定量计算问题, 提出了一种基于投入-产出法与过程分析法相结合的砂型铸造过程的碳排放量计算模型。使用生命周期理论对铸件产品生命周期中的铸造过程中的物料、能源消耗和碳排放特性进行定量分析, 以铸件和铸件的能源、物料消耗量及废弃物产生量为单位对整个铸造过程的各生产阶段碳排放量进行分摊计算, 实现对批量生产中单个铸件产品的碳排放定量计算, 并结合某风电铸造企业生产的锁定盘铸件进行分析, 从物料和能源的角度为砂型铸造过程减少碳排放提供理论基础。

关键词: 单个铸件; 砂型铸造过程; 生命周期理论; 碳排放; 定量计算模型

由于人类的工业化活动加剧, 造成越来越多的以二氧化碳为主的温室气体排放到大气中, 我国2019年碳排放98.25亿吨, 约占全球碳排放量的29%, 位列全球之首^[1]。2021年国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》指出工业是产生碳排放的主要领域之一, 对全国整体实现碳达峰具有重要影响^[2]。工业和信息化部发布的《“十四五”工业绿色发展规划》将工业降碳作为我国“十四五”工业绿色发展核心任务之一^[3], 是促进产业技术创新与绿色转型的重点战略方向。传统铸造行业作为我国传统制造业中的基础, 仍然是资源消耗与环境污染问题的重要源头, 其能源利用率仅为15%~25%^[4], 远低于世界铸造行业的能源平均利用率, 其废砂、废渣、废气的排放量更是发达国家的10倍以上^[5], 具有很大的降碳潜力。

国际上对于一般行业或产品的碳排放计算, 基本方法可归为投入产出法 (input-output, IO) 和过程分析法 (process analysis, PA) 两大类, 其基本依据均是生命周期评价理论。其中, IO是一种自上而下的方法, 典型代表有联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 提出的《2006年IPCC 国家温室气体清单指南》^[6]。它通过一个企业或生产活动总投入和产出的平衡关系进行相对宏观的碳排放计算, 该方法计算相对简单, 但缺少过程细节。与此相对应的PA是一种自下而上的分析方法, 典型代表有国际标准化组织 (ISO) 制定的ISO14067: 2018《温室气体—产品碳足迹—量化要求和指南》标准和英国标准协会 (BSI) 的PAS 2050: 2011《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》^[7]。PA方法通过建立计算对象生命周期中所涉及的物料、能源和过程清单, 通过对每项物料或能源消耗量与相应碳排放系数的乘积获得各分项产生的碳排放, 最终将各分项碳排放累加得到总的碳排放。相比于IO, PA法的计算过程更为详细, 但数据收集较为烦琐, 更适合微观层面, 需分析具体碳排放来源的碳排放计算。

国内外对生命周期评价法在低碳制造领域的应用进行了一些研究。例如, FANG等针对机床低碳设计提出了一种面向可持续设计指数的方法, 使用LCA和层次分析法对环境, 经济, 社会和技术四个方面的机床设计方案进行定量评估^[8]。SONG等研究提出基于嵌入式温室气体 (Green House Gas, GHG) 排放量的物料清单g—BOM的低碳产品设计系统, 其将外部成本作为衡量产品低碳性能的指标, 并与生命周期成本方法进行集成^[9]。GUI等提出一种基于活动的产品碳足迹分配方法, 类似于零件

作者简介:

庄澳杰 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为生产运作与企业信息化。E-mail: 1297753612@qq.com

通讯作者:

赵秀栩, 女, 教授, 博士, 博士生导师。E-mail: zhaoxiuxu@whut.edu.cn

中图分类号: TG2; X76

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024)

11-1521-08

收稿日期:

2023-11-17 收到初稿,
2024-01-15 收到修订稿。

材料、成本等参数,真正使碳排放成为产品的参数之一,为产品低碳材料选择、工艺选择以及产品碳排放足迹定额提供了基础依据^[10]。

目前国内外针对砂型铸造碳排放的研究大都是针对铸造过程的整体碳排放计算,缺乏针对单个铸件的碳排放量定量计算方法。因此,本文作者结合生命周

期理论对铸件全生命周期过程中的铸造过程(图1)进行碳排放量化方法研究,基于混合生命周期评价法对铸造过程各阶段进行分析评价,建立单个铸件的碳排放计算模型;并以某企业生产的风电产品锁定盘为实例进行定量分析验证,为企业生产决策者制定减排策略提供理论依据。

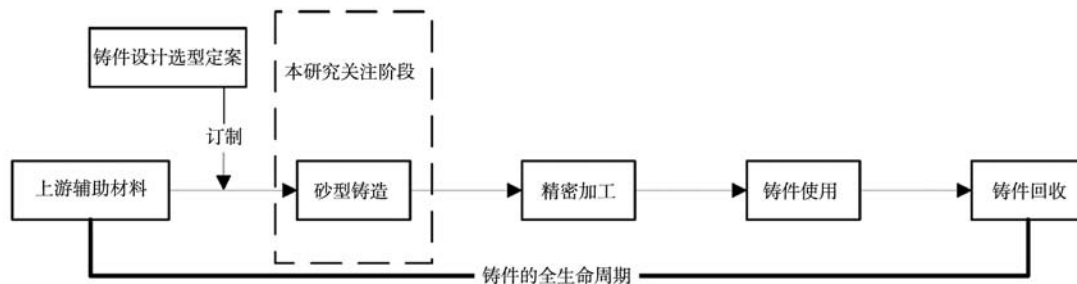


图1 砂型铸造在铸件全生命周期的位置

Fig. 1 Position of sand casting in the full life cycle of a casting

1 砂型铸造工艺过程碳源及系统边界

典型制造业的碳排放计算通常包括两个部分,直接碳排放和间接碳排放,直接碳排放就是生产现场直接向大气产生的碳排放,也称工艺碳排放和过程碳排放,间接碳排放包括物料碳排放以及能源碳排放^[11]。

根据砂型铸造过程工艺加工特点可以将铸造过程划分为造型、熔炼、回收、加工四个阶段,各个工艺环节产生的碳排放可以分为三类:①物料碳排放,主要为当前加工阶段的物料消耗产生的间接碳排放^[12-14],具体到砂型铸造过程中体现为造型过程使用的树脂砂在回收过程造成的损耗,熔炼过程铁液配料(废钢、生铁等)的消耗等产生的间接碳排放;②能源碳排放,主要为当前加工阶段设备运行产生的能耗碳排放^[15-16],如铸造过程中混砂机、熔炼过程中的中频炉等加工设备以及铸件搬运设备起重机在铸件加工过程中产生的能源碳排放;③废弃物碳排放,主要为当前加工阶段产生的不可回收物的回收处理产生的碳排放^[17],如造型制芯过程挥发的少量非甲烷烃、熔炼过程产生的废气处理过程产生的能耗所造成的碳排放。进一步总结得到砂型铸造过程碳排放边界如图2所示。

2 铸造过程碳排放定量计算模型

2.1 物料碳排放

碳排放核算过程中,根据物料数据的获取方式可以将物料碳排放分为两类:铸件物料消耗数据可以根据工艺方案或者工艺参数设置直接求得的称之为可变量,由其计算得到的碳排放称之为可变量碳排放;铸件物料消耗数据需通过投入-产出法进行均摊的称之为

固定物料,由这部分数据计算得来的碳排放量只与铸件吨位有关,故可将其视为固定碳排放。

在造型阶段可变碳排放主要体现为树脂砂的消耗产生的间接碳排放,旧砂回收产生的碳排放归类到回收阶段的能源碳排放中。此阶段可变物料的消耗量主要受两个因素共同影响:一为树脂砂用量与铸件重量比值,称之为砂铁比^[18],决定了总的树脂砂投入量;二是树脂砂回收率,决定了树脂砂的实际消耗量。

则铸件 d 在造型阶段的可变碳排放量 $C_{VR,d}^1$ 为

$$R^1 = \frac{\rho_b (V_x - V_d)}{M_d} \quad (1)$$

$$C_{VR,d}^1 = M_d R^1 (1 - \eta) f_b \quad (2)$$

式中: M_d 为产品 d 重量; R^1 为产品 d 砂铁比; ρ_b 为树脂砂的密度; V_x 为砂箱体积; V_d 为产品体积; f_b 为树脂砂 b 碳排放系数; η 为树脂砂回收率。(对于一个铸件而言树脂砂用量由公式(1)计算得到)。

造型阶段铸件 d 的固定碳排放量 $C_{ST,d}^1$ 为

$$C_{ST,d}^1 = \sum_{c=1}^{c_0} M_d \frac{I_c^1}{O_d} f_c \quad (3)$$

式中: I_c^1 为一段时间内造型阶段固定物料 c 消耗量; c_0 为固定物料 c 的种类数量; O_d 为一段时间内铸件产品 d 产出量; f_c 为固定物料 c 的碳排放系数。

根据式(2)、(3)可得造型阶段产品 d 的物料碳排放为 CM_d^1 :

$$CM_d^1 = M_d R^1 (1 - \eta) f_b + \sum_{c=1}^{c_0} M_d \frac{I_c^1}{O_d} f_c \quad (4)$$

在熔炼阶段物料碳排放主要体现为废钢、生铁、增碳剂等熔炼铁液原料消耗产生的间接碳排放,各原料投入量都能通过熔炼铁液量和原料投入量所占比例

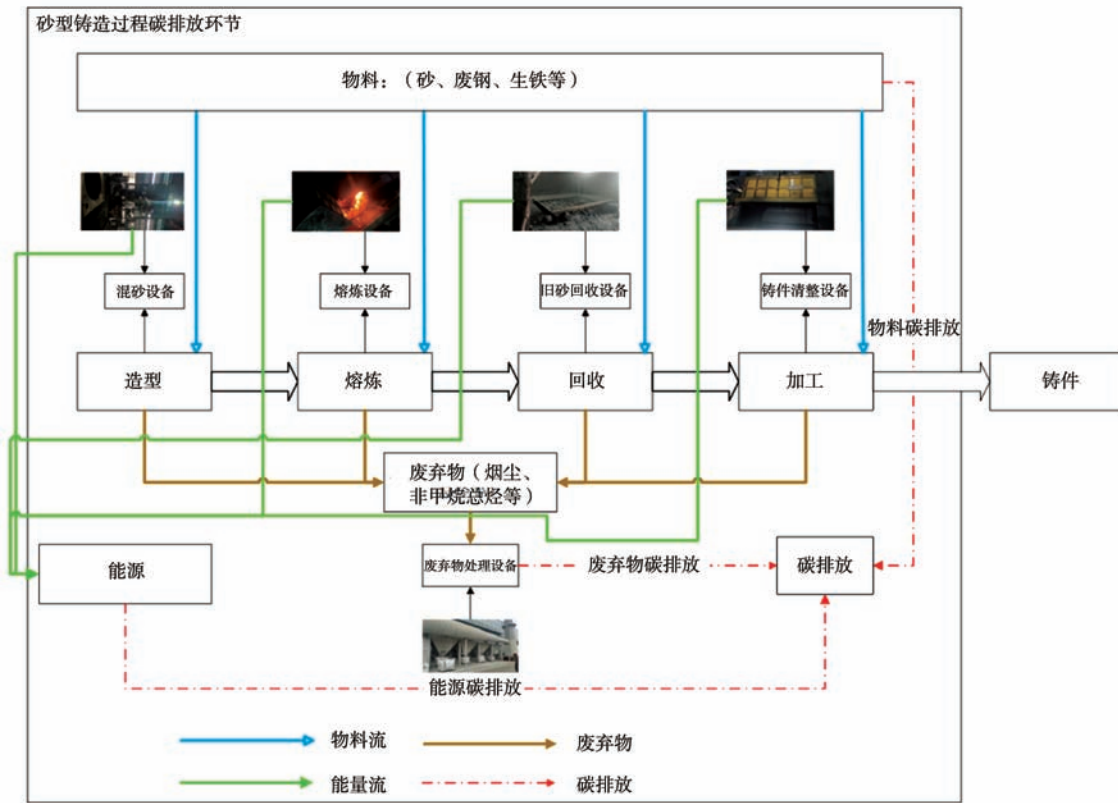


图2 砂型铸造过程碳排放边界

Fig. 2 Carbon emission boundary of sand casting process

进行计算获得，故此阶段物料碳排放等于可变碳排放，即熔炼阶段物料碳排放 CM_d^2 为：

$$CM_d^2 = \sum_{g=1}^{g_0} M_d (1+M_{IR}) R_g^2 f_g \quad (5)$$

式中： M_d 为产品 d 重量； M_{IR} 为铸件浇注铁液余量与铸件重量比值； g_0 代表铁液原料的种类数量； R_g^2 为铁液原料 g 占铁液总重量的比； f_g 为铁液原料 g 的碳排放系数。

回收阶段和加工阶段的碳排放均表现为随着产品加工的持续性物料损耗产生的间接碳排放，故这两个阶段的碳排放均等于固定碳排放，分别表示为：

$$CM_d^3 = \sum_{c=1}^{c_0} M_d \frac{I_c^3}{O_d} f_c \quad (6)$$

$$CM_d^4 = \sum_{c=1}^{c_0} M_d \frac{I_c^4}{O_d} f_c \quad (7)$$

式中： CM_d^3 为回收阶段物料碳排放； CM_d^4 为加工阶段物料碳排放； I_c^3 为一段时间内回收阶段固定物料 c 消耗量； I_c^4 为一段时间内加工阶段固定物料 c 消耗量。

根据式(4) - (7)可得铸造过程的铸件 d 的物料碳排放 CM_d 为：

$$CM_d = M_d R^1 (1-\eta) f_b + \sum_{a=1}^4 \sum_{c=1}^{c_0} M_d \frac{I_c^a}{O_d} f_c + \sum_{g=1}^{g_0} M_d (1+M_{IR}) R_g^2 f_g \quad (8)$$

式中： a 表示铸造过程中的某一生产阶段。

2.2 能源碳排放

铸造过程中能源碳排放主要体现在加工设备和运输设备的电力消耗产生的碳排放，电力消耗量可以由功率法^[9]求得。造型阶段的能源碳排放主要体现在混砂机 l 和起重机 m^1 的电力能耗，熔炼阶段的能源碳排放主要体现在熔炼炉 n 和起重机 m^2 的电力能耗，回收阶段的能源碳排放主要体现在砂处理回收线 o 和起重机 m^3 的电力能耗，加工阶段的能源碳排放主要体现在抛丸机 u 和起重机 m^4 的电力能耗。

造型阶段的铸件 d 的能源碳排放 CE_d^1 为：

$$CE_d^1 = \sum_{l=1}^{l_0} p_l \frac{M_d R^1}{v_l \times 3600} f_e + \sum_{m^1=1}^{m_0^1} p_{m^1} \frac{s_{m^1}}{s_{m^1} \times 60} f_e \quad (9)$$

式中： p_l 为混砂机的运行功率； l_0 为混砂机的数量； M_d 为铸件 d 重量； R^1 为铸件 d 砂铁比； v_l 为混砂机的混砂效率； p_{m^1} 为造型阶段起重机 m^1 的运行功率； v_{m^1} 为造型阶段起重机 m^1 的运行速度； s_{m^1} 为造型阶段起重机 m^1 的搬运距离； m_0^1 为造型阶段参与搬运铸件的起重机数量； f_e 为电力 e 的碳排放系数。

熔炼阶段的铸件 d 的能源碳排放 CE_d^2 为：

$$CE_d^2 = M_d (1 + M_{IR}) E_n f_e + \sum_{m^2=1}^{m_0^2} p_{m^2} \frac{S_{m^2}}{v_{m^2} \times 60} f_e \quad (10)$$

式中： E_n 为熔炉 n 熔炼单吨位铁液耗电； M_{IR} 为铸件浇注铁液余量与铸件重量比值（此处浇注铁液余量表示浇注系统、浇冒口所需的铁液重量之和）； p_{m^2} 为熔炼阶段起重机 m^2 的运行功率； v_{m^2} 为熔炼阶段起重机 m^2 的搬运速度； s_{m^2} 为熔炼阶段起重机 m^2 的搬运距离； m_0^2 为熔炼阶段参与搬运铸件的起重机数量。

回收阶段的铸件 d 的能源碳排放 CE_d^3 为

$$CE_d^3 = M_d R^1 E_o f_e + \sum_{m^3=1}^{m_0^3} p_{m^3} \frac{S_{m^3}}{v_{m^3} \times 60} f_e \quad (11)$$

式中： E_o 为砂处理回收线处理单吨位树脂砂的电力能耗； p_{m^3} 为回收阶段起重机 m^3 的运行功率； v_{m^3} 为回收阶段起重机 m^3 的搬运速度； s_{m^3} 为回收阶段起重机 m^3 的搬运距离； m_0^3 为回收阶段参与搬运铸件的起重机数量。

加工阶段的铸件 d 的能源碳排放 CE_d^4 为

$$CE_d^4 = \sum_{u=1}^{u_0} p_u t_u f_e + \sum_{m^4=1}^{m_0^4} p_{m^4} \frac{S_{m^4}}{v_{m^4} \times 60} f_e \quad (12)$$

式中： p_u 为抛丸机 u 的运行功率； t_u 为抛丸机运行时间； u_0 为抛丸机的种类数量； p_{m^4} 为回收阶段起重机 m^4 的运行功率； v_{m^4} 为加工阶段起重机 m^4 的搬运速度； s_{m^4} 为加工阶段起重机 m^4 的搬运距离； m_0^4 为加工阶段参与搬运铸件的起重机数量。

根据（9）-（12）计算可得整个铸造过程的能源碳排放 CE_d 为：

$$CE_d = \sum_{l=1}^{l_0} p_l \frac{M_d R^1}{v_l \times 3600} f_e + M_d (1 + M_{IR}) E_n f_e + M_d R^1 E_o f_e + \sum_{u=1}^{u_0} p_u t_u f_e + \sum_{a=1}^4 \sum_{m^a=1}^{m_0^a} p_{m^a} \frac{S_{m^a}}{v_{m^a} \times 60} f_e \quad (13)$$

2.3 废弃物碳排放

废弃物碳排放主要体现为铸造过程中产生的烟尘、废气、固体等形式的废弃物处理过程产生的能量消耗产生的碳排放，其中烟尘、废气等烟气类废弃物都是通过烟尘处理设备统一回收处理，固体类废弃物则是通过搬运设备进行统一回收处理，故废弃物碳排放可以通过烟尘处理设备和搬运设备在处理废弃物时的设备能耗计算得到。

在造型阶段主要废弃物碳排放为烟尘处理设备 w 处理的混砂产生的粉尘，造型制芯过程中产生的非甲烷总烃等废弃物产生的能耗；在熔炼阶段主要体现为电炉炉渣、熔炼炉烟尘等废弃物处理产生的碳排放。其中在熔炼阶段的铸件凝固过程中产生的排放主要来源于呋喃树脂砂受热分解造成的碳排放^[12]，此处归入造

型阶段统一计算；在回收阶段主要体现为落砂和旧砂回收过程中产生粉尘、废砂等废弃物处理产生的碳排放，废砂的处理过程中能耗为砂处理线的运行能耗，已经归入回收阶段能源碳排放，故此处仅计算烟尘等烟气类废弃物回收产生的碳排放；在加工阶段为抛丸、打磨等工序产生的烟尘等废弃物处理产生的碳排放。

造型阶段铸件 d 的废弃物碳排放可表示 CU_d^1 为：

$$CU_d^1 = \sum_{w^1=1}^{w_0^1} M_u p_{w^1} \frac{M_{U^1}}{v_{w^1} \times 1000} f_e \quad (14)$$

式中： v_{w^1} 为造型阶段烟尘回收设备 w^1 的废弃物处理速度； p_{w^1} 为造型阶段烟尘回收设备 w^1 功率； w_0^1 为造型阶段烟尘回收设备的数量； M_{U^1} 为单吨位铸件造型阶段烟气类废弃物 U^1 产生量； M_d 为铸件 d 重量； f_e 为电力 e 的碳排放系数。

熔炼阶段铸件 d 的废弃物碳排放 CU_d^2 可表示为：

$$CU_d^2 = \sum_{w^2=1}^{w_0^2} M_u p_{w^2} \frac{M_{U^1}}{v_{w^2} \times 1000} f_e + \sum_{i^2=1}^{i_0^2} p_{i^2} \frac{s_{i^2}}{v_{i^2} \times 60} \frac{M_d \times M_{U^2}}{M_i^2 \times 1000} f_e \quad (15)$$

式中： v_{w^2} 为熔炼阶段烟尘回收设备 w^2 的废弃物处理速度； p_{w^2} 为熔炼阶段烟尘回收设备 w^2 功率； w_0^2 为熔炼阶段烟尘回收设备的数量； M_{U^1} 为单吨位铸件熔炼阶段烟气类废弃物 U^1 产生量； M_{U^2} 为单吨位铸件熔炼阶段固体类废弃物 U^2 产生量； M_i^2 为熔炼阶段废弃物搬运设备 i^2 的单车运输量； v_{i^2} 为熔炼阶段废弃物搬运设备 i^2 的运输速度； s_{i^2} 为熔炼阶段废弃物搬运设备 i^2 的运行功率； i_0^2 为熔炼阶段废弃物搬运设备的运输距离；为熔炼阶段废弃物搬运设备的数量； M_d 为铸件 d 重量

回收阶段铸件 d 的废弃物碳排放 CU_d^3 可表示为：

$$CU_d^3 = \sum_{w^3=1}^{w_0^3} M_d p_{w^3} \frac{M_{U^1}}{v_{w^3} \times 1000} f_e \quad (16)$$

式中： M_d 为铸件 d 重量； p_{w^3} 为回收阶段烟尘回收设备 w^3 功率； M_{U^1} 为单吨位铸件回收阶段烟气类废弃物 U^1 产生量； v_{w^3} 为回收阶段烟尘回收设备 w^3 的废弃物处理速度； w_0^3 为回收阶段烟尘回收设备的数量。

加工阶段铸件 d 的废弃物碳排放 CU_d^4 可表示为：

$$CU_d^4 = \sum_{w^4=1}^{w_0^4} M_d p_{w^4} \frac{M_{U^1}}{v_{w^4} \times 1000} f_e \quad (17)$$

式中： M_d 为铸件 d 重量； p_{w^4} 为加工阶段烟尘回收设备 w^4 功率； M_{U^1} 为单吨位铸件加工阶段烟气类废弃物 U^1 产生量； v_{w^4} 为加工阶段烟尘回收设备 w^4 的废弃物处理速度； w_0^4 为加工阶段烟尘回收设备的数量。

根据式（13）-（16）可得到整个铸造过程铸件 d 的废弃物碳排放 CU_d 为：

$$CU_d = \sum_{a=1}^4 \sum_{m^a=1}^{m_0^a} M_d P_{m^a} \frac{M_{U^1}^a}{v_{m^a} \times 1000} f_e + \sum_{i^2=1}^{i_0^2} P_{i^2} \frac{s_{i^2}}{v_{i^2} \times 60} \frac{M_d \times M_{U^2}^2}{M_i^2 \times 1000} f_e \quad (18)$$

根据(8), (13), (18)可得砂型铸造过程铸件d的碳排放总量C_d为:

$$C_d = M_d R^1 (1-\eta) f_b + \sum_{g=1}^{g_0} M_d (1+M_{IR}) R_g^2 f_g + \sum_{a=1}^4 \sum_{c=1}^{c_0} M_d \frac{I_c^a}{O_d} f_c + \sum_{l=1}^{l_0} p_l \frac{M_d R^1}{v_l} f_e + M_d (1+M_{IR}) E_n f_e + M_d R^1 E_o f_e + \sum_{u=1}^{u_0} p_u t_u f_e + \sum_{a=1}^4 \sum_{m^a=1}^{m_0^a} p_{m^a} \frac{s_{m^a}}{v_{m^a}} f_e + \sum_{i^2=1}^{i_0^2} P_{i^2} \frac{s_{i^2}}{v_{i^2} \times 60} \frac{M_d \times M_{U^2}^2}{M_i^2 \times 1000} f_e + \sum_{a=1}^4 \sum_{m^a=1}^{m_0^a} M_d P_{m^a} \frac{M_{U^1}^a}{v_{m^a} \times 1000} f_e \quad (19)$$

上述模型中的相关参数整理如表1所示。

表1 模型参数表
Table 1 List of model parameters

| 参数名称 | 参数含义 |
|--|--------------------------------------|
| V_s/mm^3 | 砂箱体积 |
| V_d/mm^3 | 铸件体积 |
| $\rho_b/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 树脂砂密度 |
| M_d/kg | 铸件d重量 |
| R^1 | 砂铁比(填砂量与铸件重量之比) |
| η | 树脂砂回收率 |
| f_a/t | 一段时间内阶段a固定物料c消耗量 |
| O_d/t | 一段时间内铸件产品d产出量 |
| M_{IR} | 浇注余量与铸件重量之比 |
| R_g^2 | 铁液原料g占浇注铁液总重量的比例 |
| p_l/kW | 混砂机的运行功率 |
| $v_l/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ | 混砂机的混砂效率 |
| $E_n/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1})$ | 熔炉n熔炼单吨位铁液耗电量 |
| $E_o/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1})$ | 砂处理回收线处理单吨位树脂砂的电力能耗 |
| p_u/kW | 抛丸机u的运行功率 |
| t_u/min | 抛丸机运行时间 |
| p_{m^a}/kW | 铸造阶段a起重机m ^a 的运行功率 |
| s_{m^a}/m | 铸造阶段a起重机m ^a 的搬运距离 |
| $v_{m^a}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 铸造阶段a起重机m ^a 的运行速度 |
| p_{i^2}/kW | 熔炼阶段废弃物搬运设备i ² 的运行功率 |
| s_{i^2}/m | 熔炼阶段废弃物搬运设备i ² 的运输距离 |
| $v_{i^2}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 熔炼阶段废弃物搬运设备i ² 的运输速度 |
| M_{i^2}/kg | 熔炼阶段废弃物搬运设备i ² 的单车运输量 |
| $M_{U^2}^2/\text{kg}$ | 单吨位铸件熔炼阶段固体类废弃物U ² 产生量 |
| p_w/kW | 铸造阶段a烟尘回收设备w ^a 功率 |
| $M_{U^1}^a/\text{kg}$ | 单吨位铸件在铸造阶段a的烟气类废弃物U ¹ 产生量 |
| $v_w/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ | 铸造阶段a烟尘回收设备w ^a 的废弃物处理速度 |

3 铸件铸造过程碳排放分析实例

某砂型铸造企业生产一11 MW锁定盘组件如图3所示,砂型铸造企业的客户要求锁定盘材料选用牌号QT500—14的球墨铸铁,产品重量为6 932 kg。

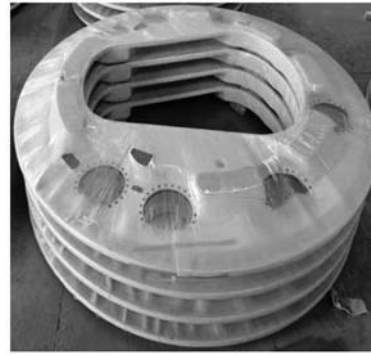


图3 锁定盘
Fig. 3 Locking disk

综合相关文献[11, 19]中的研究结果可得铸造过程主要因素的碳排放系数如表2所示,其中关于增碳剂,碳化硅等碳系数根据物料内元素含量加权计算求得^[20]。

表2 不同能源和物料的碳排放系数
Table 2 Carbon emission coefficients for different energy sources and materials

| 序号 | 能源/物料 | 碳排放系数 | 单位 |
|----|-------|----------|---------------------------|
| 1 | 树脂砂 | 0.025 43 | kgCO ₂ /kgce |
| 2 | 耐火涂料 | 6.023 2 | kgCO ₂ /kgce |
| 3 | 甲醇 | 2.5 | kgCO ₂ /kgce |
| 4 | 钢 | 8.2 | kgCO ₂ /kgce |
| 5 | 生铁 | 2.13 | kgCO ₂ /kgce |
| 6 | 回炉料 | 2.67 | kgCO ₂ /kgce |
| 7 | 增碳剂 | 4.2 | kgCO ₂ /kgce |
| 8 | 碳化硅 | 14.68 | kgCO ₂ /kgce |
| 9 | 硅铁 | 2.3 | kgCO ₂ /kgce |
| 10 | 电 | 0.93 | kgCO ₂ /(kW·h) |

根据企业生产要求其铁液余量M_{IR}=0.1,铸铁密度为7.08 g/cm³,树脂砂密度为1.48 g/cm³,砂箱选型方案1为6 000 mm×6 000 mm×550 mm,代入式(1)可求得砂铁比R¹为8.25,旧砂回收率为93%。熔炼阶段铁液原料配比比例如表3所示。基于投出一产出的企业铸件物料平衡表如表4所示。

考虑到安全性因素,搬运设备速度统一设定为16 m/min,各阶段的搬运能耗仅受其搬运距离影响,风电铸件一般为原地造型,故生产阶段1、2、3、4的搬运距离分别为0、70 m、40 m、110 m,起重机功率为20.5 kW,混砂机功率为11.5 kW,混砂效率为

表3 熔炼阶段铁液原料占比
Table 3 Raw material share of molten iron in the melting stage

| 铁液原料 | <i>g</i> | <i>R_d</i> /% |
|------|----------|-------------------------|
| 废钢 | 1 | 58.19 |
| 生铁 | 2 | 24.69 |
| 回炉料 | 3 | 14.26 |
| 增碳剂 | 4 | 2.20 |
| 碳化硅 | 5 | 0.49 |
| 硅铁 | 6 | 0.17 |

表4 企业铸件物料平衡表
Table 4 Casting material balance list in the enterprise

| 物料 | 物料投入重量/t | 铸件产出重量/t |
|------|----------|----------|
| 耐火涂料 | 94.07 | |
| 甲醇 | 141.11 | 60 000 |
| 钢丸 | 0.129 | |

6.285 5 kg/s, 熔炼炉能耗受熔炼、物料、工人操作熟练度以及出炉温度等因素的影响, 此处通过统计一段时间内熔炼铁液量的熔炼能耗得到单吨位铁液熔炼能耗为500 kW·h, 处理回收单吨位旧砂的能耗为0.011 9 kW·h; 抛丸机单次只能处理一个铸件, 因此其抛丸时间仅与机器以及铸件自身的大小和结构有关, 此处作定值处理, 经过统计企业处理锁定盘的时间平均值为20 min, 抛丸机功率为80 kW。

各阶段单吨位铸件废弃物产生量如表5所示, 数据参考《逸散性工业粉尘控制技术》^[21]和《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》^[22]。烟气回收设备功率为7.5 kW, 回收效率为14.251 5 kg/h, 炉渣回收单次运输量为500 kg, 运输距离为126.25 m。

生产锁定盘所需材料种类如表2所示, 将上述参数代入公式计算可得锁定盘铸造过程的物料碳排放*CM_d*。

表5 单吨位铸件废弃物产生量
Table 5 Waste generation from castings per tonnage

| 类型 | 单吨位铸件产生量/kg | 生产阶段 |
|----|-------------|------|
| 烟尘 | 0.586 | 造型 |
| 烟尘 | 0.500 | 熔炼 |
| 烟尘 | 1.050 | 回收 |
| 烟尘 | 0.011 | 加工 |
| 炉渣 | 0.054 | 熔炼 |

$$CM_d = M_d R^1 (1 - \eta) f_b + \sum_{a=1}^4 \sum_{c=1}^{c_0} M_d \frac{I_c^a}{O_d} f_c + \sum_{g=1}^{g_0} M_d (1 + M_{IR}) R_g^2 f_g$$

= 44 791.79 kg

锁定盘铸造过程的能源碳排放*CE_d*如下:

$$CE_d = \sum_{l=1}^{l_0} p_l \frac{M_d R^1}{v_l} \times 3600 f_e + M_d (1 + M_{IR}) E_n f_e + M_d R^1 E_o f_e + \sum_{u=1}^{u_0} p_u t_u f_e$$

$$+ \sum_{a=1}^4 \sum_{m=1}^{m_0} p_m^a \frac{S_m^a}{v_m^a \times 60} f_e = 4\ 234.82\ \text{kg}$$

锁定盘铸造过程的废弃物碳排放*CU_d*如下:

$$CU_d = \sum_{a=1}^4 \sum_{m=1}^{m_0} M_d p_m^a \frac{M_{U^1}^a}{v_m^a \times 1\ 000} f_e + \sum_{i=1}^{i_0} p_i^2 \frac{S_i^2}{v_i^2 \times 60} \frac{M_d \times M_{U^2}^2}{M_i^2 \times 1\ 000} f_e = 14.552\ \text{kg}$$

通过上述计算过程及数据可得到11 MW锁定盘组件铸造过程中总物料、能源消耗量及物料碳排放量如表6所示。进一步对表中数据进行分析, 可以得到铸件铸造过程中各类碳排放占比如图4所示。

由表6和图4可以得出结论, 整个铸造过程碳排放中物料碳排放占比最大, 其中熔炼阶段的物料碳排放对整个铸造过程的物料碳排放影响最大, 占总量的99%以上, 未来的减排方向可以通过调整熔炼阶段的铁液余量, 减少物料消耗量, 或者优化铁液配方, 在不改变铁液元素质量的情况下, 增大低碳系数原料占比进

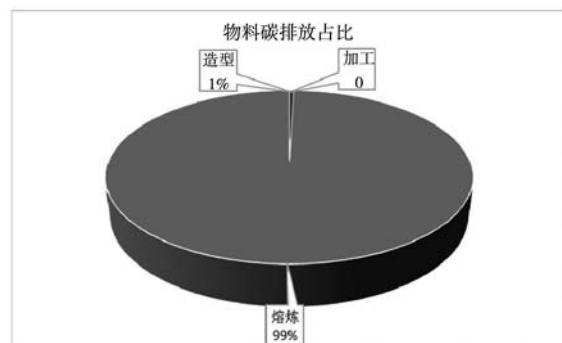
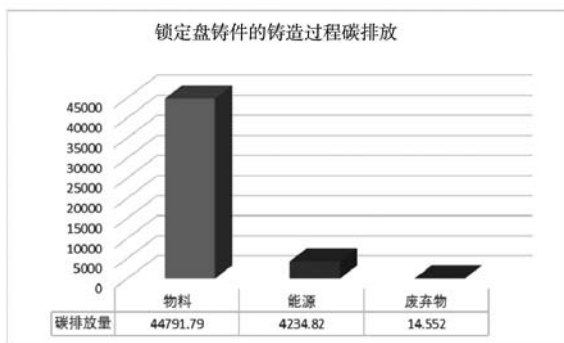


图4 铸造过程碳排放量

Fig. 4 Carbon emissions from casting process

表6 锁定盘铸件铸造过程碳排放计算结果
Table 6 Calculation results of carbon emission during the foundry processes of locking disk castings

| 碳排放类型 | 物料/能源 | 消耗量 | 单位 | CO ₂ 排放量/kg | 碳排放比重/% | 生产阶段 |
|--------|----------|----------|----------|------------------------|-----------|-------|
| 物料碳排放 | 树脂砂 | 4 001.13 | kg | 101.75 | 0.21 | 造型 |
| | 耐火涂料 | 10.87 | kg | 65.46 | 0.13 | |
| | 甲醇 | 16.3 | kg | 40.76 | 0.08 | |
| | 熔炼 | 废钢 | 4 437.1 | kg | 36 384.25 | 74.19 |
| | | 生铁 | 1 882.66 | kg | 4 010.07 | 8.18 |
| | | 回炉料 | 1 087.35 | kg | 2 906.5 | 5.93 |
| | | 增碳剂 | 167.75 | kg | 704.57 | 1.44 |
| | | 碳化硅 | 37.36 | kg | 548.5 | 1.12 |
| | | 硅铁 | 12.96 | kg | 29.81 | 0.06 |
| 加工 | 钢丸 | 0.01 | kg | 0.12 | 0.00 | |
| 能源碳排放 | 起重机搬运能耗 | 0 | kW·h | 0 | 0.00 | 造型 |
| | 混砂机加工能耗 | 29.05 | kW·h | 27.03 | 0.06 | |
| | 起重机搬运能耗 | 1.49 | kW·h | 1.39 | 0.00 | 熔炼 |
| | 中频炉熔炼能耗 | 3 812.6 | kW·h | 3545.72 | 7.23 | |
| | 起重机搬运能耗 | 0.85 | kW·h | 0.79 | 0.00 | 回收 |
| | 砂处理线回收能耗 | 680.19 | kW·h | 632.91 | 1.29 | |
| | 起重机搬运能耗 | 2.35 | kW·h | 2.18 | 0.00 | 加工 |
| | 抛丸机加工能耗 | 26.67 | kW·h | 24.80 | 0.05 | |
| 废弃物碳排放 | | 4.28 | kW·h | 3.97 | 0.01 | 造型 |
| | 烟尘处理能耗 | 3.65 | kW·h | 3.39 | 0.01 | 熔炼 |
| | | 7.66 | kW·h | 7.12 | 0.00 | 回收 |
| | | 0.08 | kW·h | 0.07 | 0.00 | 加工 |
| | 炉渣处理能耗 | 0.002 | kW·h | 0.002 | 0.00 | 熔炼 |

而降低铸件的碳排放。

4 结束语

以国际标准化组织（ISO）制定的ISO14067《温室气体—产品碳足迹—量化要求和指南》标准和英国标准协会（BSI）的PAS 2050《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》为参考，在对铸造过程中

物料、能源和碳排放特点进行研究的基础上，分析了碳排放在各个生产阶段的作用规律，针对铸件的批量生产，将铸造过程中产生的部分碳排放量分摊到单个铸件，建立了碳排放评价模型，结合企业生产实例对某铸件各生产阶段的碳排放进行分析和计算，可为企业的碳排放量化提供理论基础，为铸造过程的节能减排提供方法支持。

参考文献：

- [1] 焦丽杰. 我国的碳排放现状和实现“双碳”目标的挑战[J]. 中国总会计师, 2021(6): 38-39.
- [2] 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. (2021-10-24)[2023-08-13]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm.
- [3] “十四五”工业绿色发展规划[EB/OL]. (2021-11-15)[2023-08-13]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content_5655701.htm.
- [4] 邓丽萍, 郭新玲, 杨兵兵. 熔模铸造生产成本分析及控制研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(8): 1728-1730.
- [5] 张翠花, 杨兵兵. 我国铸造企业生产物流存在的问题及对策研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(10): 2390-2392.
- [6] IPCC[EB/OL]. [2023-12-11]. <https://www.ipcc.ch/about>.
- [7] ISO. Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification: ISO14067: 2018[S]. Switzerland, 2018.

- [8] FANG F, CHENG K, DING H, et al. Sustainable design and analysis of CNC machine tools: sustainable design index based approach and its application perspectives [C]// 11th ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC), 2016.
- [9] SONG J S, LEE K M. Development of a low-carbon product design system based on embedded GHG emissions [J]. Resources Conservation and Recycling, 2010, 54 (9): 547-556.
- [10] GUI F, REN S, ZHAO Y, et al. Activity-based allocation and optimization for carbon footprint and cost in product lifecycle [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117627.
- [11] 尹瑞雪, 曹华军, 李洪丞, 等. 砂型铸造生产系统碳排放量化方法及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (5): 1071-1076.
- [12] MA Y, LI F, WANG L, et al. Life cycle carbon emission assessments and comparisons of cast iron and resin mineral composite machine tool bed in China [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113 (3-4): 1143-1152.
- [13] 宋安安. 铸造行业碳排放来源及碳排放总量初探 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (4): 51-55.
- [14] ZHOU F, NING Y, GUO X, et al. Analyze differences in carbon emissions from traditional and prefabricated buildings combining the life cycle [J]. Buildings, 2023, 13 (4).
- [15] YIN R X. Environmental impacts analysis and evaluation for sand casting [C]// International Conference on Mechatronics Engineering and Computing Technology (ICMECT), 2014.
- [16] 郑军, 唐任仲, 胡罗克. 基于工序碳源的砂型铸造过程碳排放建模方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20 (4): 898-908.
- [17] 姚金康. 无模砂型铸造复合铸型模块化及其结构低碳优化设计 [D]. 杭州: 浙江科技学院, 2021.
- [18] 杨磊, 马瑞, 李文辉, 等. 砂型铸造砂铁比降低方法研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54 (1): 34-36.
- [19] 黄彬彬. 基于工艺参数的砂型铸造工艺碳排放计算及其优化 [D]. 杭州: 浙江科技学院, 2019.
- [20] 陈华周, 张相勇, 李任戈, 等. 钢结构建筑装配式产品制作阶段碳排放研究 [C]// 2022年工业建筑学术交流会, 2022.
- [21] 奥里蒙 J A. 逸散性工业粉尘控制技术 [M]. 张良璧, 刘敬严, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [22] 第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册 [EB/OL]. (2018-03-21) [2023-10-13].

Quantitative Calculation Method of Carbon Emission for Sand Castings and Its Application

ZHUANG Ao-jie^{1,2}, ZHAO Xiu-xu^{1,2}, CAI Wei³, QIN Yan-ping⁴, LIU Guo-bing⁴

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Digital Manufacturing, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Guangdong Jin Zhili Technology Co., Ltd., Shaoguan 512100, Guangdong, China)

Abstract:

Aiming at the quantitative calculation of carbon emission in sand casting process, a calculation model of carbon emission in sand casting process based on input-output method and process analysis method was proposed. The material, energy consumption and carbon emission characteristics in the casting process during the life cycle of casting products are quantitatively analyzed using the life cycle theory. The carbon emission of each production stage of the whole casting process is apportioned and calculated based on the energy, material consumption and waste generation of castings and castings, so as to realize the quantitative calculation of carbon emission of a single casting product in mass production. Based on the analysis of locking disc castings produced by a wind power casting enterprise, the theoretical basis for reducing carbon emissions in sand casting process is provided from the perspective of material and energy.

Key words:

individual casting; sand casting process; life cycle theory; carbon emission; quantitative calculation model