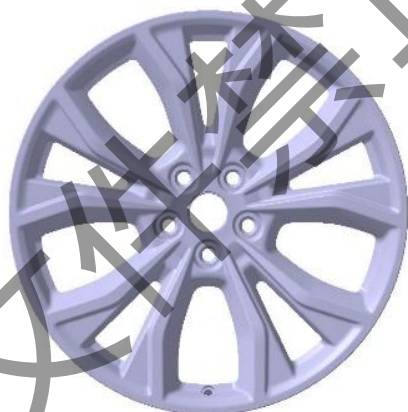




# 中信戴卡铝车轮生命周期研究报告



编制单位：中信戴卡股份有限公司

二〇二四年五月

## 执行摘要

中信戴卡股份有限公司是全球知名的铝合金轮毂生产商，本报告以铝合金轮毂为研究对象，对其全生命周期进行了详细的调研与数据收集，主要包括铝合金熔炼、压铸、热处理、机加工、涂装及产品包装过程。对各过程 LCA 数据进行反复确认，得到最终的 LCA 数据清单。采用亿科开发的轻量化铝车轮绿色设计平台和中国生命周期基础数据库 CLCD 完成了铝合金轮毂产品 LCA 模型的建立，通过计算得到 LCA 结果和灵敏度清单，量化分析影响铝合金轮毂生命周期资源环境影响的重要因素，发现铝合金轮毂生命周期各过程绿色改进的重点。

目录

执行摘要 ..... 2

1. 背景介绍 ..... 5

    1.1. 生命周期评价方法 ..... 5

    1.2. 研究目的 ..... 6

2. 目标与范围定义 ..... 8

    2.1. 目标定义 ..... 8

        2.1.1. 企业简介 ..... 8

        2.1.2. 产品信息 ..... 8

        2.1.3. 功能单位与基准流 ..... 9

        2.1.4. 数据代表性 ..... 9

    2.2. 范围定义 ..... 10

        2.2.1. 系统边界 ..... 10

        2.2.2. 取舍原则 ..... 10

        2.2.3. 环境影响类型 ..... 11

        2.2.4. 数据质量要求 ..... 12

        2.2.5. 软件与数据库 ..... 12

3. 数据收集 ..... 13

    3.1. A356 铝液生产 ..... 13

    3.2. 铝合金液生产 ..... 14

    3.3. 压铸过程 ..... 16

|                      |    |
|----------------------|----|
| 3.4. 热处理过程 .....     | 17 |
| 3.5. 机加工过程 .....     | 18 |
| 3.6. 涂装过程 .....      | 19 |
| 3.7. 包装过程 .....      | 21 |
| 3.8. 污水处理过程 .....    | 22 |
| 3.9. 空压站过程 .....     | 23 |
| 3.10. 背景数据来源 .....   | 24 |
| 4. 生命周期评价结果 .....    | 26 |
| 4.1. 建立 LCA 模型 ..... | 26 |
| 4.2. LCA 计算方法 .....  | 26 |
| 4.3. LCA 计算结果 .....  | 27 |
| 4.4. LCA 结果分析 .....  | 28 |
| 4.4.1. 贡献分析 .....    | 28 |
| 4.4.2. 清单灵敏度分析 ..... | 35 |
| 4.5. 完整性说明 .....     | 42 |
| 4.6. 数据质量评估 .....    | 42 |
| 4.7. 结论与建议 .....     | 43 |
| 参考文献 .....           | 45 |

## 1. 背景介绍

### 1.1. 生命周期评价方法

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 方法是系统化、定量化评价产品生命周期过程中资源环境效率的标准方法<sup>[1,2]</sup>，它通过对产品上下游生产与消费过程的追溯，帮助生产者识别环境问题所产生的阶段，并进一步规避其在产品不同生命周期阶段和不同环境影响类型之间进行转移<sup>[3]</sup>。

根据 ISO14040 中的定义，LCA 过程由目标与范围的定义 (Goal and Scope Definition)、生命周期清单分析 (Life Cycle Inventory Analysis)、生命周期影响评价 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) 和结果解释 (Interpretation) 这四个部分组成<sup>[1]</sup>，如图 1.1<sup>[3]</sup>所示。

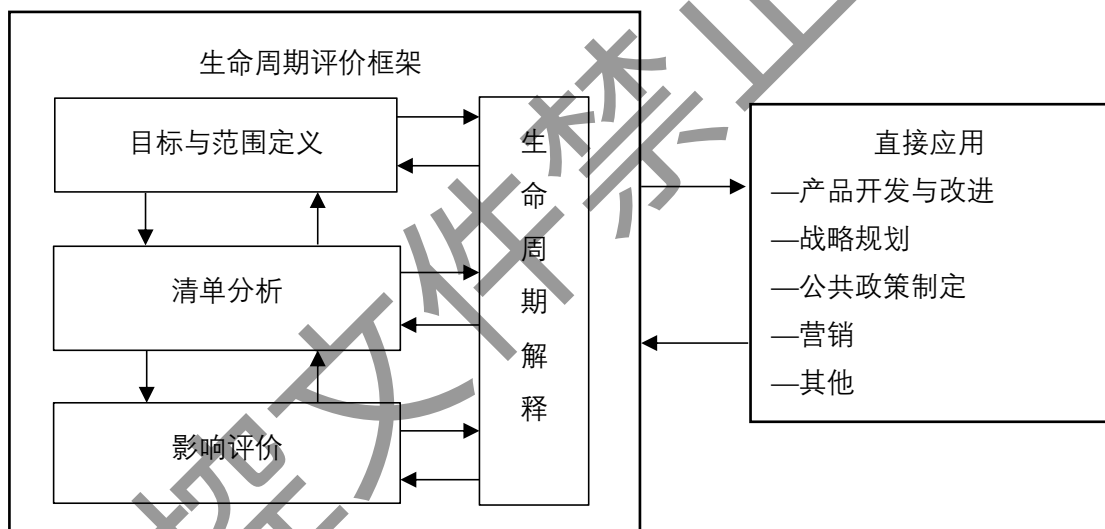


图 1.1 LCA 技术路线

- 1) 目标与范围定义。作为 LCA 的第一步，是后续工作步骤选择和判断的主要依据来源<sup>[4]</sup>。首先要明确研究目标，根据研究目标确定研究对象的功能单位、基准流、系统边界，应描述生命周期包含和未包含的过程、所选择的环境影响类型、数据取舍准则等。这些内容能帮助目标用户正确理解 LCA 结果的含义。
- 2) 生命周期清单 (Life Cycle Inventory, LCI) 分析。LCI 分析是 LCA 核心和关键的一步。通过建立生命周期模型，收集上下游单元过程清单数据，

计算得到研究对象功能单位的生命周期清单表,并以此作为生命周期影响评价的依据。

- 3) 生命周期影响评价。在 LCI 分析的基础上,将清单数据与特定环境影响类别和分类指标相结合,对其作定性或定量的评价和描述。
- 4) 生命周期解释。应按照目标和范围定义,以透明的方式对 LCIA 结果作出分析并得出结论,解释局限性,提供建议,报告生命周期解释的最终结果。

LCA 被认为是评价产品潜在环境影响的最好的框架,它不仅可以解决微观层面——产品层面的生命周期各阶段的资源与环境的效率问题,还可以了解宏观层面——经济与生态规律间的相互作用和影响,为政府部门制订地区和行业的环境发展政策提供依据<sup>[5]</sup>。LCA 已经广泛应用于各种技术评价、产品设计、生产管理、环境标志、政策制订中的环境分析。

## 1.2. 研究目的

产品生命周期评价作为生态设计和绿色制造实施的基础,近年来已经成为人们研究和关注的热点。开展生命周期评价能够最大限度实现资源节约,对于汽车行业绿色发展和产业升级转型、应对出口潜在的贸易壁垒而言,都是很有价值和意义的。

本研究的目的是按照国际 ISO14040 系列标准和中国 GB24040 系列标准所规定的 LCA 方法,结合《生态设计产品评价通则》GB/T 32161-2015,以中信戴卡股份有限公司典型铝合金轮毂为例,收集产品从原材料生产到产品出厂各主要过程的原辅料消耗、能源消耗与环境排放数据,建立产品的生命周期模型,最终实现铝合金轮毂 LCA 评价与分析,编写 LCA 分析报告。与此同时,建立铝合金轮毂生命周期各过程的数据收集模板与原料数据库。本次 LCA 报告的结果和相关分析可用于以下目的:

- (1) 得到产品的生命周期各项环境影响指标结果,识别产品生命周期中重要的过程和改进的重点;

- (2) 产品 LCA 结果和报告可用于下游整车产品绿色设计与供应链绿色制造。整车设计师可在产品设计阶段对比不同铝合金轮毂的 LCA 结果，对比结果可用于制造商采购时选择环境友好的铝合金轮毂产品；
- (3) LCA 报告可用于市场宣传，展示新工艺下生产的铝合金轮毂在资源环境效率方面的优势，为汽车制造商的零部件采购和汽车铝合金轮毂制造企业的产品销售提供材料支持；
- (4) 汽车铝合金轮毂制造企业比较不同工艺下铝合金轮毂的 LCA 结果，选择更为环境友好的工艺技术；
- (5) 本报告中包含气候变化指标（也叫产品碳足迹）结果，可作为企业开展产品碳足迹认证的基础；
- (6) 生命周期各过程 LCA 数据收集模板的建立不仅规范了数据收集的范围、提升了单元过程数据的完整性，还提高了铝合金轮毂生命周期评价工作的效率。LCA 数据库的建立为企业产品绿色设计提供依据

## 2. 目标与范围定义

### 2.1. 目标定义

#### 2.1.1. 企业简介

中信戴卡股份有限公司是中国中信集团公司于 1988 年投资组建的中国大陆第一家铝车轮制造企业，经过 35 年的发展，现已成为全球最大的铝车轮和铝制底盘零部件供应商。中信戴卡致力于成为全球领先的具有核心技术、自主品牌的轻量化、模块化、创新型综合零部件企业集团，持续为人类轻量、安全、绿色出行贡献力量。

中信戴卡从零起步，到“件布”全球，中信戴卡积极践行国家战略，契合汽车产业全球化发展规律，一步步实现“全球制造、全球服务”，为汽车产业提供“中国制造方案”。如今，戴卡联营平台铝车轮总产能超过 8000 万件/年，平均每 2 秒钟就有一件产品在全球工厂下线。2023 年 11 月，恰逢中摩建交 65 周年，共建“一带一路”伟大倡议提出 10 周年之际，中信戴卡摩洛哥铝铸件工厂如期建成达产。

#### 2.1.2. 产品信息

本报告的研究对象为：北美福特铝合金轮毂（以下简称“铝合金轮毂”）。产品具体信息如下：

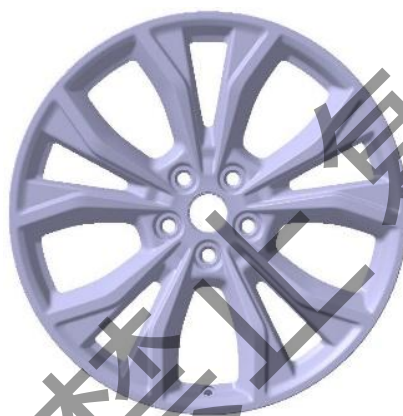
表 2.1 产品信息

| 基本信息 | 内容              |
|------|-----------------|
| 生产厂家 | 中信戴卡股份有限公司      |
| 产品型号 | 02016C33        |
| 产品重量 | 净重 13.77±0.2 kg |



|         |                     |
|---------|---------------------|
|         | 胶合板托盘，1170mm*1150mm |
|         | 胶合板盖板，1170*1150*12  |
|         | 20 寸纸塑              |
| 包装材料及规格 | 覆膜珍珠棉 125           |
|         | 塑料缠包布 500*0.025     |
|         | 塑钢打包带 9.5*0.55RV    |

产品图片



### 2.1.3. 功能单位与基准流

本报告的功能单位为：生产 1 件铝合金轮毂，重量为 13.77kg。

### 2.1.4. 数据代表性

本报告 LCA 结果代表此企业及供应链水平（采用实际生产数据），时间、地理、技术代表性如下：

(1) 时间代表性：2023 年

(2) 地理代表性：中国

(3) 技术代表性，包括以下方面：

- 工艺路线：熔炼→压铸→热处理→机加工→涂装→包装
- 工艺设备：熔化炉、低压铸造机、热处理连续炉、旋压机、毛坯缓存炉、机加工混线单元、柔性化涂装生产线、自动刷毛刺机、自动化包装机

- 生产规模：300 万件/年
- 主要原料：铝锭、涂料等
- 主要能耗：电力、天然气

## 2.2. 范围定义

### 2.2.1. 系统边界

本报告的系统边界为“摇篮到大门”（从资源开采到产品出厂），分为原料获取阶段和产品生产阶段。产品生产阶段包括铝合金液生产、压铸、热处理、机加工、涂装以及产品包装过程。产品生命周期系统边界图如下：

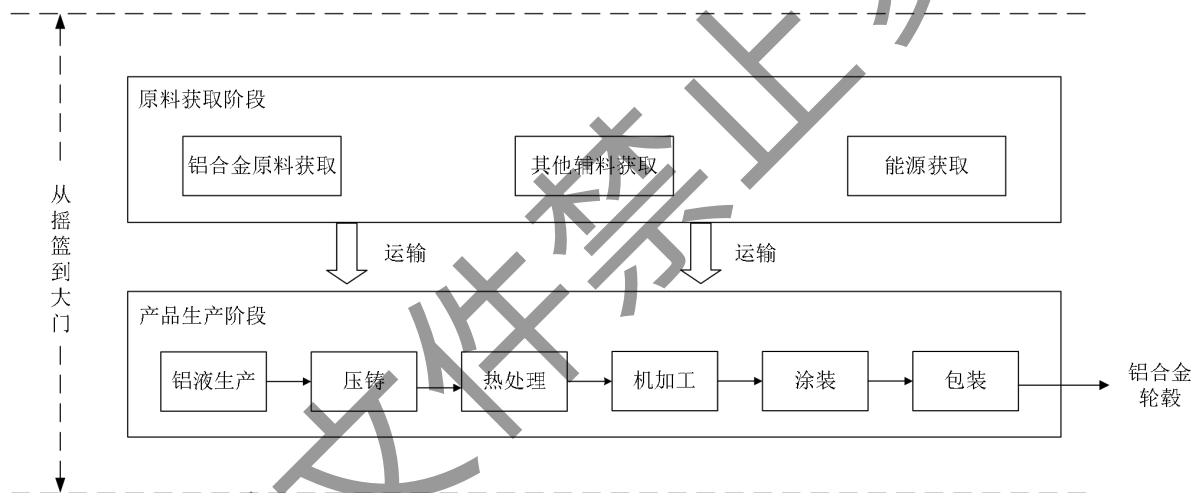


图 2.1 铝合金轮毂生命周期系统边界图

### 2.2.2. 取舍原则

本报告的取舍原则如下：

- 所有能耗均列出；
- 所有主要原料消耗均列出；
- 重量小于产品重量 1% 的辅料消耗可忽略，但总忽略的重量不应超过产品重量的 5%；

- 已有法规、标准、文件要求监测的大气、水体、土壤的各种排放均列出，如环保法规、行业环境标准、环境监测报告、环境影响评价报告等；
- 小于固体废弃物排放总量 1%的一般性固体废弃物可忽略；

道路与厂房的基础设施、各工序的设备、厂房内人员及生活设施的消耗和排放，均忽略。

### 2.2.3. 环境影响类型

为支持中国节能减排约束性政策目标的实现，本报告选择了 7 种环境影响类型指标进行了计算，分别为气候变化 (Climate Change, GWP)、初级能源消耗 (Primary Energy Demand, PED)、水资源消耗 (Resource Depletion – water, WU)、酸化 (Acidification, AP)、淡水富营养化 (Eutrophication – freshwater, EP)、颗粒物 (Particulate matter, PM)、光化学臭氧合成 (Photochemical Ozone Formation, POFP)。

表 2.2 环境影响类型指标

| 环境影响类型指标 | 影响类型指标单位                             | 主要清单物质                                                  |
|----------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 气候变化     | kg CO <sub>2</sub> eq.               | CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O... |
| 初级能源消耗*  | MJ                                   | 硬煤、原油、天然气...                                            |
| 水资源消耗    | kg                                   | 淡水，地表水，地下水...                                           |
| 酸化       | SO <sub>2</sub> eq.                  | 二氧化硫、三氧化硫、氮氧化物...                                       |
| 淡水富营养化   | kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. | 磷、磷酸、磷酸盐...                                             |
| 颗粒物      | kg PM <sub>2.5</sub> eq.             | 颗粒 (PM <sub>2.5</sub> )、二氧化氮、二氧化硫...                    |
| 光化学臭氧合成  | kg NMVOC eq.                         | 乙烷、丙烷、甲苯...                                             |

注：eq.是 equivalent 的缩写，意为当量。

\*PED 指标为铝合金轮毂生命周期系统边界内使用的所有一次能源之和；

\*\*WU 指标为铝合金轮毂生命周期系统边界内使用的所有水资源（特指径流）之和。

#### 2.2.4. 数据质量要求

数据质量代表 LCA 研究的目标代表性与数据实际代表性之间的差异，本报告的数据质量评估方法采用 CLCD 方法。

CLCD 方法对模型中的消耗与排放清单数据，从①清单数据来源与算法、②时间代表性、③地理代表性、④技术代表性等四个方面进行评估，并对关联背景数据库的消耗，评估其与上游背景过程匹配的不确定度。完成清单不确定度评估后，采用解析公式法计算不确定度传递与累积，得到 LCA 结果的不确定度。

#### 2.2.5. 软件与数据库

本研究采用戴卡轻量化铝车轮绿色设计平台中的 LCA 模块，建立了中信戴卡铝合金轮毂生命周期模型，并计算得到 LCA 结果。戴卡轻量化铝车轮绿色设计平台（以下简称绿色设计平）是在线的分析评价系统，其中 LCA 模块支持铝合金轮毂产品全生命周期过程的数据收集与计算分析，并内置了中国生命周期基础数据库（CLCD）等基础数据库。中国生命周期基础数据库（CLCD）是基于中国基础工业系统生命周期核心模型的行业平均数据库。

3. 数据收集

3.1. A356铝液生产

(1) 过程基本信息

过程名称：A356 铝液生产过程

过程边界：从铝锭等原辅料进厂到 A356 铝液出厂

(2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：秦皇岛安冶金属工业有限公司

产地：中国·河北·秦皇岛

基准年：2023 年

工艺设备：熔炼炉

主要原料：电解铝等

主要能耗：电力、蒸汽等

表 3.1 A356 铝液生产过程清单数据表

| 类型 | 清单名称    | 数量    | 单位 | 上游数据来源                | 用途/排放原因 |
|----|---------|-------|----|-----------------------|---------|
| 产品 | A356 铝液 | 1     | t  | ——                    | ——      |
| 消耗 | 铝锭      | 917.5 | kg | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 原料      |
| 消耗 | 金属硅     | 72.5  | kg | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 原料      |
| 消耗 | 镁锭      | 3.5   | kg | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 原料      |
| 消耗 | 铝锆合金    | 3.3   | kg | Ecoinvent 3.1.0       | 原料      |
| 消耗 | 铝钛合金    | 12    | kg | Ecoinvent 3.1.0       | 原料      |

|    |      |          |     |                       |         |
|----|------|----------|-----|-----------------------|---------|
| 消耗 | 精炼剂  | 1.5      | kg  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 辅料      |
| 能耗 | 电力   | 0.2      | kWh | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |
| 能耗 | 天然气  | 66.98    | m3  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 熔炼主要燃料  |
| 排放 | 氧化亚氮 | 2.50E-04 | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 二氧化碳 | 139.98   | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 甲烷   | 0.002    | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |

### (3) 运输信息

表 3.2 过程运输信息表

| 物料名称 | 毛重      | 起点         | 终点 | 运输距离<br>(km) | 运输类型         |
|------|---------|------------|----|--------------|--------------|
| 精炼剂  | 1.5kg   | 徐州-汉久      | 安治 | 859          | 货车运输（10t）-汽油 |
| 金属硅  | 72.5kg  | 新疆乌鲁木齐-合盛  | 安治 | 3083         | 货车运输（10t）-汽油 |
| 铝锆合金 | 3.3kg   | 保定-四通      | 安治 | 404          | 货车运输（8t）-汽油  |
| 铝锭   | 917.5kg | 内蒙古锡林郭勒-鸿骏 | 安治 | 806          | 货车运输（18t）-汽油 |
| 镁锭   | 3.5kg   | 包头-执友      | 安治 | 946          | 货车运输（10t）-汽油 |
| 铝钛合金 | 12kg    | 保定-四通      | 安治 | 404          | 货车运输（10t）-汽油 |

注：运输数据上游数据来源均来自 CLCD 数据库

## 3.2. 铝合金液生产

### (1) 过程基本信息

过程名称：铝合金液生产过程

过程边界：从 A356 铝液进厂到铝合金液出厂

(2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国·河北·秦皇岛

基准年：2023 年

工艺设备：铝屑炉、静置炉

主要原料：A356 铝液、铝屑等

主要能耗：电力、天然气

表 3.3 铝屑炉过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量       | 单位             | 上游数据来源                | 用途/排放原因 |
|----|-------|----------|----------------|-----------------------|---------|
| 产品 | 铝屑炉铝液 | 1        | kg             | ——                    | ——      |
| 消耗 | 铝屑    | 1.02     | kg             | ——                    | 主要原料    |
| 能耗 | 天然气   | 0.20     | m <sup>3</sup> | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 熔炼主要燃料  |
| 能耗 | 电力    | 0.07     | kWh            | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |
| 排放 | 二氧化碳  | 0.42     | kg             | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 甲烷    | 7.55E-06 | kg             | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 氧化亚氮  | 7.55E-07 | kg             | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |

表 3.4 静置炉过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量   | 单位 | 上游数据来源 | 用途/排放原因 |
|----|-------|------|----|--------|---------|
| 产品 | 铝合金液  | 1    | kg | ——     | ——      |
| 消耗 | 铝屑炉铝液 | 0.56 | kg | 实际调查数据 | 原料      |

|    |         |      |    |        |    |
|----|---------|------|----|--------|----|
| 消耗 | A356 铝液 | 0.44 | kg | 实际调查数据 | 原料 |
|----|---------|------|----|--------|----|

### 3.3. 压铸过程

#### (1) 过程基本信息

过程名称：压铸过程

过程边界：从铝合金液等原料进厂到压铸产品出厂

#### (2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国·河北·秦皇岛

基准年：2023 年

主要原料：铝合金液

主要能耗：电力、天然气

表 3.5 压铸过程清单数据表

| 类型 | 清单名称 | 数量    | 单位  | 上游数据来源                | 用途/排放原因 |
|----|------|-------|-----|-----------------------|---------|
| 产品 | 压铸产品 | 1     | 件   | ——                    | ——      |
| 消耗 | 铝合金液 | 19.39 | kg  | 实景过程数据                | 原料      |
| 能耗 | 天然气  | 0.077 | m3  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 主要燃料    |
| 能耗 | 电力   | 3.61  | kWh | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |
| 能耗 | 压缩空气 | 14.69 | m3  | 实景过程数据                | ——      |
| 消耗 | 自来水  | 0.002 | t   | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |
| 排放 | 二氧化碳 | 0.16  | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |



|    |      |          |    |      |         |
|----|------|----------|----|------|---------|
| 排放 | 甲烷   | 2.86E-06 | kg | IPCC | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 氧化亚氮 | 2.86E-07 | kg | IPCC | 天然气燃烧排放 |

### 3.4. 热处理过程

#### （1）过程基本信息

过程名称：热处理过程

过程边界：从压铸产品等原料进厂到热处理产品出厂

#### （2）数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国·河北·秦皇岛

基准年：2023 年

工艺设备：热处理连续炉

主要原料：压铸产品

主要能耗：天然气、电力

表 3.6 热处理过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量   | 单位 | 上游数据来源                | 用途/排放原因 |
|----|-------|------|----|-----------------------|---------|
| 产品 | 热处理产品 | 1    | 件  | ——                    | ——      |
| 消耗 | 压铸产品  | 1    | 件  | 实景过程数据                | 原料      |
| 消耗 | 压缩空气  | 1.41 | m3 | 实景过程数据                | ——      |
| 能耗 | 天然气   | 0.48 | m3 | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 主要燃料    |
| 消耗 | 自来水   | 4.65 | kg | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |

|    |      |          |     |                       |         |
|----|------|----------|-----|-----------------------|---------|
| 消耗 | 电力   | 2.91     | kWh | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |
| 排放 | 二氧化碳 | 1        | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 氧化亚氮 | 1.78E-06 | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 甲烷   | 1.78E-05 | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |

### 3.5. 机加工过程

#### (1) 过程基本信息

过程名称：机加工过程

过程边界：从热处理产品等原料进厂到机加工产品出厂

#### (2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国·河北·秦皇岛

基准年：2023 年

工艺设备：机加工混线单元

主要原料：热处理产品

主要能耗：天然气、电力

表 3.7 机加工过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量   | 单位 | 上游数据来源          | 用途/排放原因 |
|----|-------|------|----|-----------------|---------|
| 产品 | 机加工产品 | 1    | 件  | ——              | ——      |
| 消耗 | 热处理产品 | 1.02 | 件  | 实景过程数据          | 主要原料    |
| 消耗 | 乳化液   | 0.02 | kg | Ecoinvent 3.1.0 | 辅料      |

|    |      |      |     |                       |    |
|----|------|------|-----|-----------------------|----|
| 消耗 | 压缩空气 | 6.66 | m3  | 实景过程数据                | —— |
| 能耗 | 电力   | 4.75 | kWh | CLCD-China-ECER 0.8.1 | —— |
| 能耗 | 自来水  | 4.63 | kg  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | —— |

### 3.6. 涂装过程

#### (1) 过程基本信息

过程名称：涂装过程

过程边界：从机加工产品等原料进厂到涂装产品出厂

#### (2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国·河北·秦皇岛

基准年：2023 年

工艺设备：预处理→喷底粉+烘干→喷底漆+烘干→喷色漆+烘干→喷透明粉+烘干

主要原料：机加工产品、底粉、底漆、色漆等

主要能耗：天然气、电力

表 3.8 预处理过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量       | 单位 | 上游数据来源 | 用途/排放原因 |
|----|-------|----------|----|--------|---------|
| 产品 | 预处理产品 | 1        | 件  | ——     | ——      |
| 消耗 | 机加工产品 | 1        | 件  | 实景过程数据 | 主要原料    |
| 消耗 | 酸洗添加剂 | 1.10E-04 | kg | 忽略     | 辅料      |
| 消耗 | 脱脂剂   | 0.012    | kg | 文献数据   | 辅料      |

|    |      |          |     |                       |         |
|----|------|----------|-----|-----------------------|---------|
| 消耗 | 酸洗液  | 0.01     | kg  | 文献数据                  | 辅料      |
| 能耗 | 电力   | 4.35     | kWh | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |
| 能耗 | 压缩空气 | 5.69     | m3  | 实景过程数据                | ——      |
| 消耗 | 自来水  | 21.85    | kg  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | ——      |
| 能耗 | 天然气  | 0.59     | m3  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 主要燃料    |
| 排放 | 二氧化碳 | 1.22     | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 甲烷   | 2.18E-05 | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |
| 排放 | 氧化亚氮 | 2.18E-06 | kg  | IPCC                  | 天然气燃烧排放 |

表 3.9 喷底粉过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量  | 单位 | 上游数据来源          | 用途/排放原因 |
|----|-------|-----|----|-----------------|---------|
| 产品 | 喷底粉产品 | 1   | 件  | ——              | ——      |
| 消耗 | 预处理产品 | 1   | 件  | 实景过程数据          | 原料      |
| 消耗 | 底粉    | 0.1 | kg | Ecoinvent 3.1.0 | 原料      |

表 3.10 喷底漆过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量   | 单位 | 上游数据来源          | 用途/排放原因 |
|----|-------|------|----|-----------------|---------|
| 产品 | 喷底漆产品 | 1    | 件  | ——              | ——      |
| 消耗 | 喷底粉产品 | 1    | 件  | 实景过程数据          | 原料      |
| 消耗 | 底漆    | 0.04 | kg | Ecoinvent 3.1.0 | 原料      |

表 3.11 喷色漆过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量 | 单位 | 上游数据来源 | 用途/排放原因 |
|----|-------|----|----|--------|---------|
| 产品 | 喷色漆产品 | 1  | 件  | ——     | ——      |

|    |       |      |    |                 |    |
|----|-------|------|----|-----------------|----|
| 消耗 | 喷底漆产品 | 1    | 件  | 实景过程数据          | 原料 |
| 消耗 | 色漆    | 0.03 | kg | Ecoinvent 3.1.0 | 原料 |

表 3.12 喷透明粉过程清单数据表

| 类型 | 清单名称  | 数量   | 单位 | 上游数据来源          | 用途/排放原因 |
|----|-------|------|----|-----------------|---------|
| 产品 | 涂装产品  | 1    | 件  | ——              | ——      |
| 消耗 | 喷色漆产品 | 1    | 件  | 实景过程数据          | 原料      |
| 消耗 | 透明粉   | 0.04 | kg | Ecoinvent 3.1.0 | 原料      |

### 3.7. 包装过程

#### (1) 过程基本信息

过程名称：包装过程

过程边界：从涂装产品等原料进厂到铝合金轮毂出厂

#### (2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国

基准年：2023 年

主要原料：涂装产品、胶合板、覆膜珍珠棉等

表 3.13 包装过程清单数据表

| 类型 | 清单名称     | 数量 | 单位 | 上游数据来源 | 用途/排放原因 |
|----|----------|----|----|--------|---------|
| 产品 | 六号线铝合金轮毂 | 1  | 件  | ——     | ——      |
| 消耗 | 涂装产品     | 1  | 件  | 实景过程数据 | 原料      |

|    |       |      |    |                       |    |
|----|-------|------|----|-----------------------|----|
| 消耗 | 胶合板托盘 | 0.49 | kg | Ecoinvent 3.1.0       | 原料 |
| 消耗 | 胶合板盖板 | 0.38 | kg | Ecoinvent 3.1.0       | 原料 |
| 消耗 | 塑钢打包带 | 12.5 | g  | ELCD 3.0.0            | 原料 |
| 消耗 | 覆膜珍珠棉 | 46.8 | g  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 原料 |
| 消耗 | 塑料缠包布 | 0.05 | kg | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 原料 |
| 消耗 | 纸塑    | 0.3  | kg | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 原料 |

### 3.8. 污水处理过程

#### (1) 过程基本信息

过程名称：废水处理过程

过程边界：从试剂等原料进入企业污水站后排放到市政污水管网

#### (2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国

基准年：2023 年

工艺设备：污水处理设备

主要原料：生产和生活废水、处理试剂等

主要能耗：电力

处理规模：216388 kg/a

末端治理：企业处理后达标废水排入城市集中污水处理厂

表 3.14 废水处理过程清单数据表

| 类型   | 清单名称 | 数量    | 单位  | 上游数据来源                | 用途/排放原因 |
|------|------|-------|-----|-----------------------|---------|
| 产品   | 污水处理 | 6.55  | kg  | CLCD-China 0.9.0      | 排水量     |
| 消耗   | 废水量  | 8.03  | kg  | ——                    | 进水量     |
| 消耗   | PAM  | 0.031 | g   | Ecoinvent 3.1.0       | 污水处理试剂  |
| 消耗   | PAC  | 1.39  | g   | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 污水处理试剂  |
| 消耗   | 用电   | 0.053 | kWh | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 能耗      |
| 消耗   | 阻垢剂  | 1.28  | g   | 忽略                    | ——      |
| 废弃处理 | 污泥   | 28.44 | g   | Ecoinvent 3.1.0       | 第三方处理   |

### 3.9. 空压站过程

#### (1) 过程基本信息

过程名称：压缩空气过程

过程边界：从空气进空压站到压缩空气出厂

#### (2) 数据代表性

主要数据来源：企业现场调查

企业名称：中信戴卡

产地：中国

基准年：2023 年

主要能耗：电力

表 3.15 空压站过程清单数据表

| 类型 | 清单名称 | 数量 | 单位 | 上游数据来源 | 用途/排放原因 |
|----|------|----|----|--------|---------|
| 产品 | 压缩空气 | 1  | m3 | ——     | ——      |

|    |     |       |     |                       |    |
|----|-----|-------|-----|-----------------------|----|
| 消耗 | 电力  | 0.195 | kWh | CLCD-China-ECER 0.8.1 | 能源 |
| 消耗 | 自来水 | 0.01  | kg  | CLCD-China-ECER 0.8.1 | —— |

### 3.10.背景数据来源

表 3.16 背景数据来源表

| 清单名称 | 数据集名称                  | 数据库名称               |
|------|------------------------|---------------------|
| 电力   | 华北电网电力                 | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 自来水  | 自来水                    | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 天然气  | 天然气（运输后）               | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 乳化液  | fatty alcohol          | Ecoinvent 3.1       |
| PAM  | polyacrylamide         | Ecoinvent 3.1       |
| 污泥处理 | digester sludge        | Ecoinvent 3.1       |
| PAC  | 碱式氯化铝\聚合氯化铝PAC         | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 污水处理 | 城市污水集中处理               | CLCD-China 0.9      |
| 底粉   | electrostatic paint    | Ecoinvent 3.1       |
| 透明粉  | electrostatic paint    | Ecoinvent 3.1       |
| 色漆   | electrostatic paint    | Ecoinvent 3.1       |
| 精炼剂  | 原盐                     | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 金属硅  | 工业硅/金属硅                | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 铝锆合金 | aluminium alloy, AlMg3 | Ecoinvent 3.1       |
| 铝锭   | 铝                      | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 镁锭   | 镁                      | CLCD-China-ECER 0.8 |



|       |                                               |                     |
|-------|-----------------------------------------------|---------------------|
| 铝钛合金  | aluminium, cast alloy                         | Ecoinvent 3.1       |
| 底漆    | electrostatic paint                           | Ecoinvent 3.1       |
| 胶合板盖板 | plywood, for outdoor use                      | Ecoinvent 3.1       |
| 胶合板托盘 | plywood, for outdoor use                      | Ecoinvent 3.1       |
| 纸塑    | 高密度聚乙烯                                        | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 塑钢打包带 | polyethylene terephthalate (PET)<br>granulate | ELCD 3.0            |
| 覆膜珍珠棉 | 聚乙烯                                           | CLCD-China-ECER 0.8 |
| 塑料缠包布 | 聚乙烯                                           | CLCD-China-ECER 0.8 |

---

## 4. 生命周期评价结果

### 4.1. 建立LCA模型

在轻量化铝车轮绿色设计平台 LCA 模块中建立了铝合金轮毂的生命周期模型，见图 4.1。

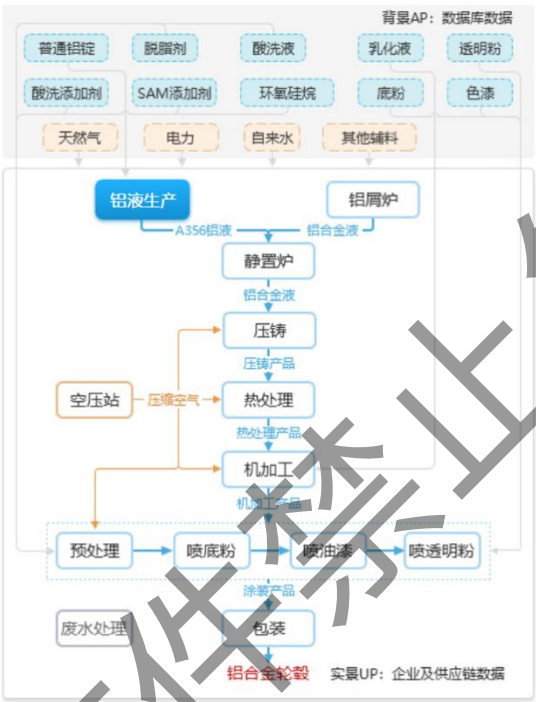


图 4.1 绿色设计平台上建立的铝合金轮毂的 LCA 模型示意图

### 4.2. LCA计算方法

#### (1) LCI 结果的计算

在整个生命周期过程中将同种清单物质累加，得到 LCI 结果。清单物质汇总的计算公式定义为：

$$LCI_i = \sum_p S_p \times inv_{ip}$$

式中， $i$  代表产品生命周期中的某种清单物质，如水耗、VOC、CO<sub>2</sub> 等； $P$  代表产品生命周期中的某个单元过程； $inv_{ip}$  表示某种清单物质  $i$  在产品全生命周期中某个单元过程  $p$  中的数量， $S_p$  是给定 LCA 计算基准流之后确定的过程  $p$

的过程系数； $LCI_i$ 表示在产品生命周期评价中包含的某种清单物质  $i$  的 LCA 累加结果。<sup>[5]</sup>

## (2) LCIA 指标的计算

基于累加得到的 LCI 结果，每项物质乘以各自在一类 LCIA 指标中对应的特征化因子（即同类 LCIA 指标中各种清单物质对应的当量折算因子），累加之后可以得到 LCIA 指标，其计算公式为：

$$LCIA_c = \sum_i LCI_i \times CF_i$$

式中， $C$  代表某种环境影响类型，例如碳足迹、酸化、富营养化等； $LCIA_c$  表示类型  $C$  的 LCIA 指标的计算结果； $CF_i$  表示某种清单物质  $i$  在类型  $C$  的 LCIA 指标中所对应的特征化因子值 (Characteristic Factor)。<sup>[5]</sup>

## 4.3. LCA 计算结果

基于产品生命周期模型和计算方法，利用绿色设计平台的 LCA 模块，计算得到 1 件 02016C33 铝合金轮毂的 LCA 结果如下。计算指标分为气候变化 (Climate Change, GWP)，初级能源消耗 (Primary Energy Demand, PED)、水资源消耗 (Resource Depletion – water, WU)、酸化 (Acidification, AP)、淡水富营养化 (Eutrophication – freshwater, EP)、颗粒物 (Particulate matter, PM)、光化学臭氧合成 (Photochemical Ozone Formation, POFP)，共七个指标。

表 4.1 1 件铝合金轮毂的 LCA 结果

| 指标名称   | 缩写  | 单位                     | 结果       |
|--------|-----|------------------------|----------|
| 气候变化   | GWP | kg CO <sub>2</sub> eq. | 2.37E+02 |
| 初级能源消耗 | PED | MJ                     | 2.86E+03 |
| 水资源消耗  | WU  | kg                     | 9.32E+02 |

|         |      |                                      |          |
|---------|------|--------------------------------------|----------|
| 酸化      | AP   | kg SO <sub>2</sub> eq.               | 1.12E+00 |
| 淡水富营养化  | EP   | kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. | 8.82E-02 |
| 颗粒物     | PM   | kg PM2.5 eq.                         | 3.65E-01 |
| 光化学臭氧合成 | POFP | kg NMVOC eq.                         | 1.71E-01 |

指标说明：

- 1) 气候变化 (GWP)：生产 1 件铝合金轮毂排放的二氧化碳当量；
- 2) 初级能源消耗 (PED)：生产 1 件铝合金轮毂消耗的一次能源；
- 3) 水资源消耗 (WU)：生产 1 件铝合金轮毂消耗的水资源；
- 4) 酸化 (AP)：生产 1 件铝合金轮毂排放的二氧化硫当量；
- 5) 淡水富营养化 (EP)：生产 1 件铝合金轮毂排放的磷酸根当量；
- 6) 颗粒物 (PM)：生产 1 件铝合金轮毂排放的 PM2.5 当量；
- 7) 光化学臭氧合成 (POFP)：生产 1 件铝合金轮毂排放的非甲烷挥发性有机物当量。

## 4.4. LCA结果分析

### 4.4.1. 贡献分析

根据本研究系统边界的定义，生产 1 件铝合金轮毂包括 A356 铝液生产、铝合金液生产、压铸、热处理、机加工、涂装和包装等过程。铝合金轮毂生命周期各过程 LCA 结果见表 4.2 (a)- (d)。

表 4.2 (a) 1 件铝合金轮毂生命周期各过程 GWP 和 PED 指标结果

| 过程名称      | GWP                          |        | PED      |        |
|-----------|------------------------------|--------|----------|--------|
|           | 指标值 (kg CO <sub>2</sub> eq.) | 占比     | 指标值 (MJ) | 占比     |
| A356 铝液生产 | 1.98E+02                     | 83.49% | 2.34E+03 | 81.82% |
| 铝合金液生产    | 6.55E+00                     | 2.76%  | 5.05E+01 | 1.77%  |

|      |          |       |          |       |
|------|----------|-------|----------|-------|
| 压铸   | 8.46E+00 | 3.56% | 1.06E+02 | 3.72% |
| 热处理  | 5.23E+00 | 2.20% | 5.93E+01 | 2.08% |
| 机加工  | 7.63E+00 | 3.21% | 9.79E+01 | 3.43% |
| 涂装   | 9.17E+00 | 3.86% | 1.16E+02 | 4.07% |
| 包装   | 2.08E+00 | 0.88% | 8.81E+01 | 3.09% |
| 废水处理 | 7.09E-02 | 0.03% | 8.94E-01 | 0.03% |

表 4.2 (b) 1 件铝合金轮毂生命周期各过程 WU 和 AP 指标结果

| 过程名称      | WU       |        | AP                           |        |
|-----------|----------|--------|------------------------------|--------|
|           | 指标值 (kg) | 占比     | 指标值 (kg SO <sub>2</sub> eq.) | 占比     |
| A356 铝液生产 | 7.86E+02 | 84.28% | 9.58E-01                     | 85.25% |
| 铝合金液生产    | 7.65E+00 | 0.82%  | 8.43E-03                     | 0.75%  |
| 压铸        | 3.22E+01 | 3.46%  | 4.25E-02                     | 3.78%  |
| 热处理       | 1.80E+01 | 1.93%  | 2.13E-02                     | 1.89%  |
| 机加工       | 3.00E+01 | 3.21%  | 3.91E-02                     | 3.48%  |
| 涂装        | 4.55E+01 | 4.89%  | 4.22E-02                     | 3.76%  |
| 包装        | 1.29E+01 | 1.38%  | 1.18E-02                     | 1.05%  |
| 废水处理      | 3.60E-01 | 0.04%  | 3.59E-04                     | 0.03%  |

表 4.2 (c) 1 件铝合金轮毂生命周期各过程 EP 和 PM 指标结果

| 过程名称      | EP                                         |        | PM                             |        |
|-----------|--------------------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
|           | 指标值 (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.) | 占比     | 指标值 (kg PM <sub>2.5</sub> eq.) | 占比     |
| A356 铝液生产 | 7.29E-02                                   | 82.66% | 3.17E-01                       | 86.92% |

|        |          |       |          |       |
|--------|----------|-------|----------|-------|
| 铝合金液生产 | 5.83E-04 | 0.66% | 2.36E-03 | 0.65% |
| 压铸     | 2.87E-03 | 3.26% | 1.23E-02 | 3.37% |
| 热处理    | 1.44E-03 | 1.64% | 6.14E-03 | 1.68% |
| 机加工    | 2.68E-03 | 3.04% | 1.13E-02 | 3.09% |
| 涂装     | 4.42E-03 | 5.01% | 1.14E-02 | 3.11% |
| 包装     | 3.15E-03 | 3.58% | 4.19E-03 | 1.15% |
| 废水处理   | 1.33E-04 | 0.15% | 1.03E-04 | 0.03% |

表 4.2 (d) 1 件铝合金轮毂生命周期各过程 POFP 指标结果

| 过程名称      | POFP               |        |
|-----------|--------------------|--------|
|           | 指标值 (kg NMVOC eq.) | 占比     |
| A356 铝液生产 | 1.40E-01           | 81.87% |
| 铝合金液生产    | 2.65E-03           | 1.55%  |
| 压铸        | 3.16E-03           | 1.85%  |
| 热处理       | 2.00E-03           | 1.17%  |
| 机加工       | 3.09E-03           | 1.81%  |
| 涂装        | 7.68E-03           | 4.50%  |
| 包装        | 1.23E-02           | 7.22%  |
| 废水处理      | 3.67E-05           | 0.02%  |

从表 4.2 (a) – (d)可以看出，A356 铝液生产过程对 LCA 各指标的贡献都是最大的，都超过了 80%。

为了更直观展现生产铝合金轮毂生命周期各过程资源环境影响的贡献，对表 4.2 (a) – (d)作图 4.2-4.8。

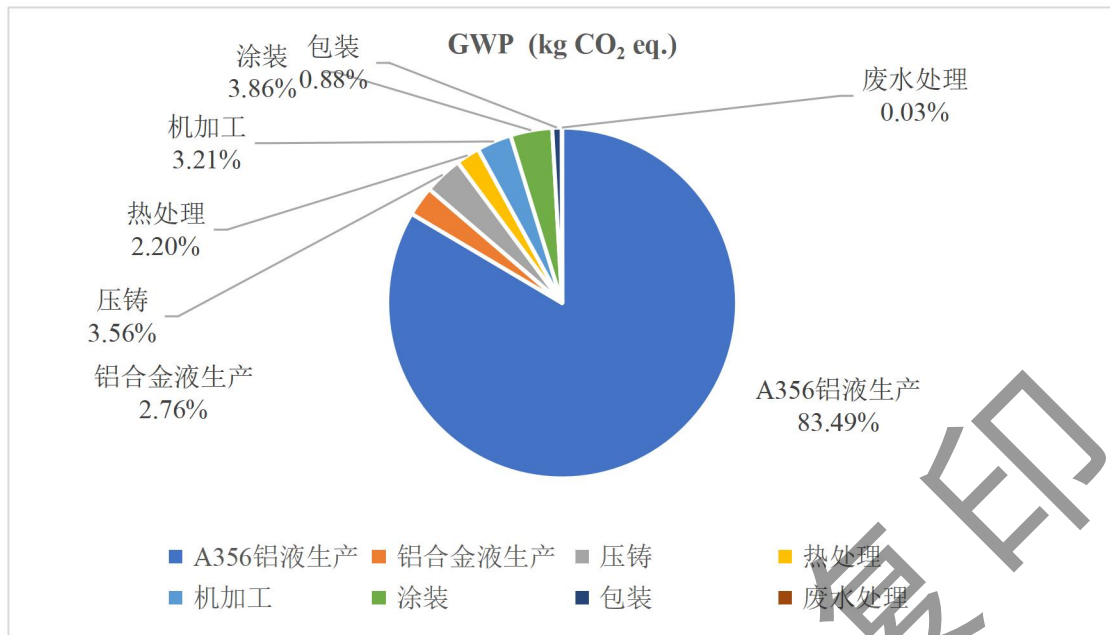


图 4.2 铝合金轮毂生命周期各过程对 GWP 指标的贡献

由图 4.2 可知，A356 铝液作为铝合金轮毂的主要原料，其生产过程对 GWP 指标的贡献达 83.49%，其次是涂装、压铸、机加工过程，对 GWP 指标的贡献分别为 3.86%、3.56%和 3.21%。

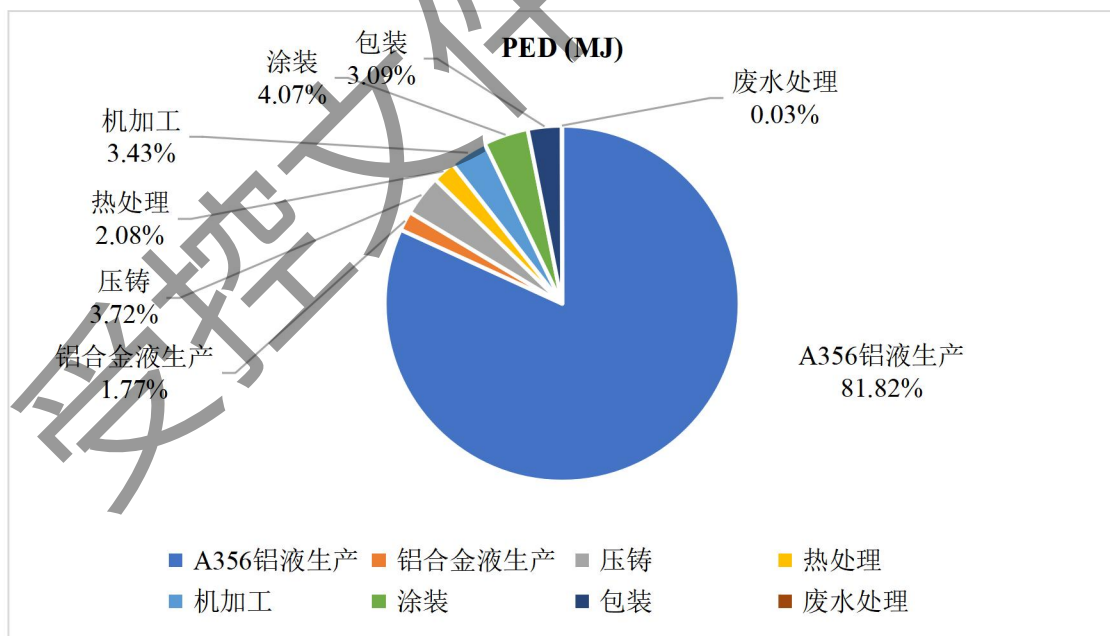


图 4.3 铝合金轮毂生命周期各过程对 PED 指标的贡献

由图 4.3 可知，A356 铝液作为铝合金轮毂的主要原料，其生产过程对 PED

指标的贡献超过了 80%，其次是涂装和压铸过程，对 PED 指标的贡献分别为 4.07%和 3.72%。

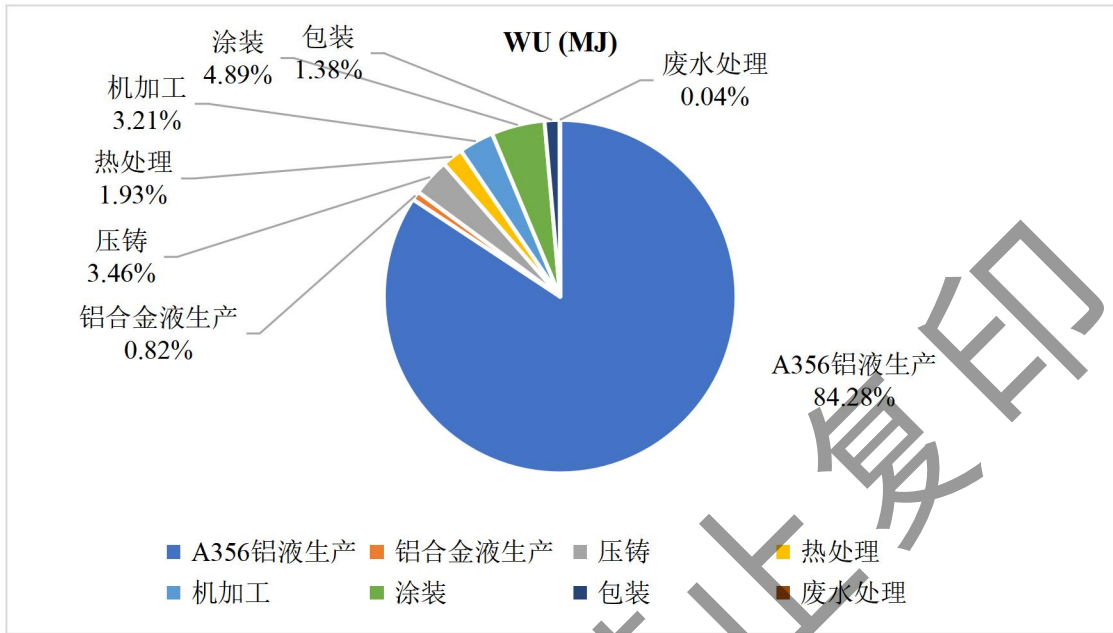


图 4.4 铝合金轮毂生命周期各过程对 WU 指标的贡献

由图 4.4 可知，A356 铝液作为铝合金轮毂的主要原料，其生产过程对 WU 指标的贡献达 84.28%%，其次是涂装和压铸过程，对 WU 指标的贡献分别为 4.89%和 3.46%。

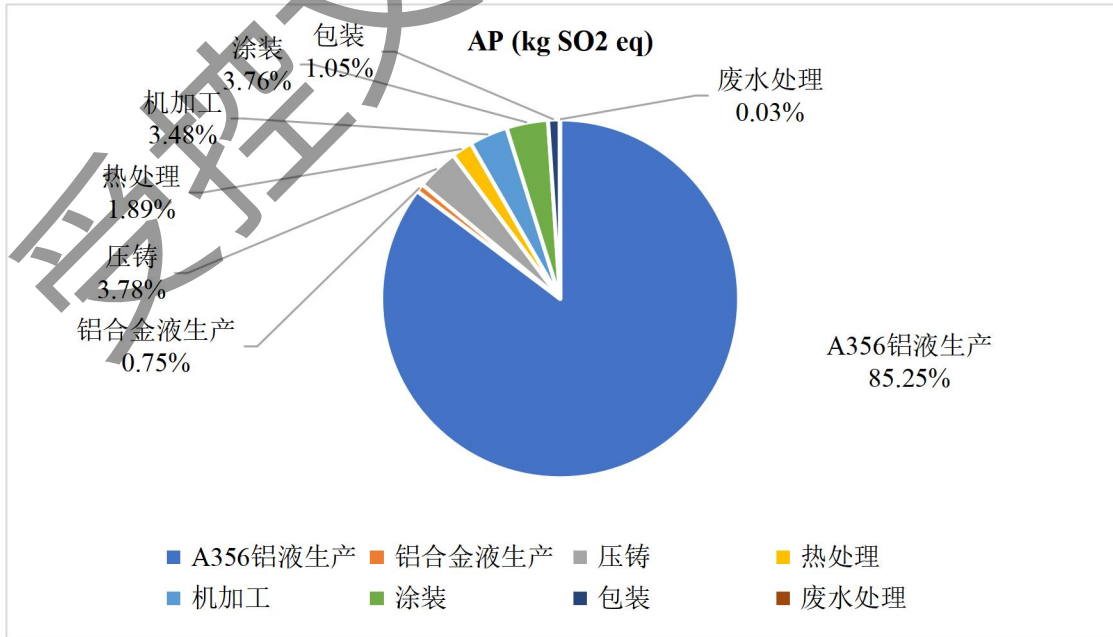




图 4.5 铝合金轮毂生命周期各过程对 AP 指标的贡献

由图 4.5 可知，A356 铝液作为铝合金轮毂的主要原料，其生产过程对 AP 指标的贡献达到了 85.25%，其次是压铸、涂装、机加工过程，对 AP 指标的贡献分别为 3.78%、3.76%和 3.48%。

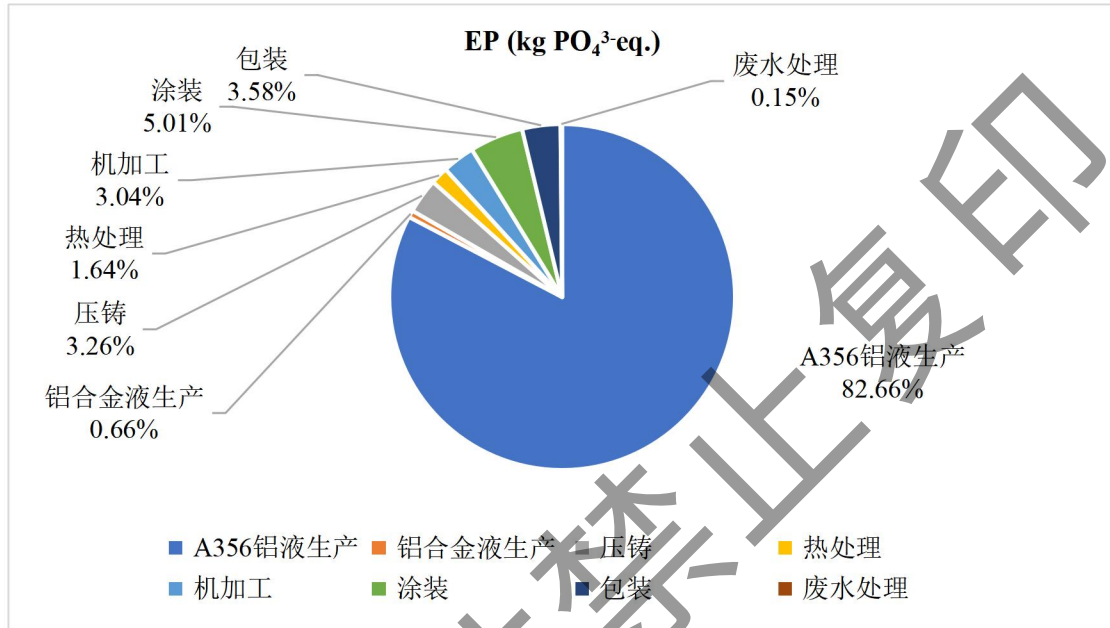


图 4.6 铝合金轮毂生命周期各过程对 EP 指标的贡献

由图 4.6 可知，A356 铝液作为铝合金轮毂的主要原料，其生产过程对 EP 指标的贡献为 82.66%，其次是涂装过程对 EP 指标的贡献为 5.01%。

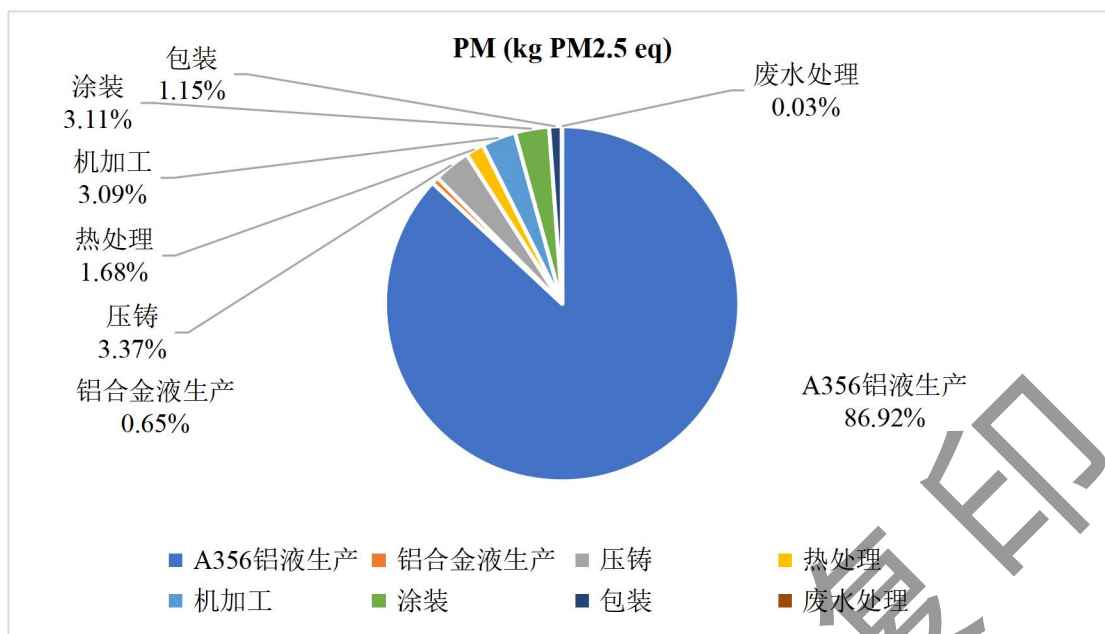


图 4.7 铝合金轮毂生命周期各过程对 PM 指标的贡献

由图 4.7 可知，A356 铝液作为铝合金轮毂的主要原料，其生产过程对 PM 指标的贡献达到了 86.92%，其次是压铸、涂装、机加工过程，对 PM 指标的贡献分别为 3.37%、3.11%和 3.09%。

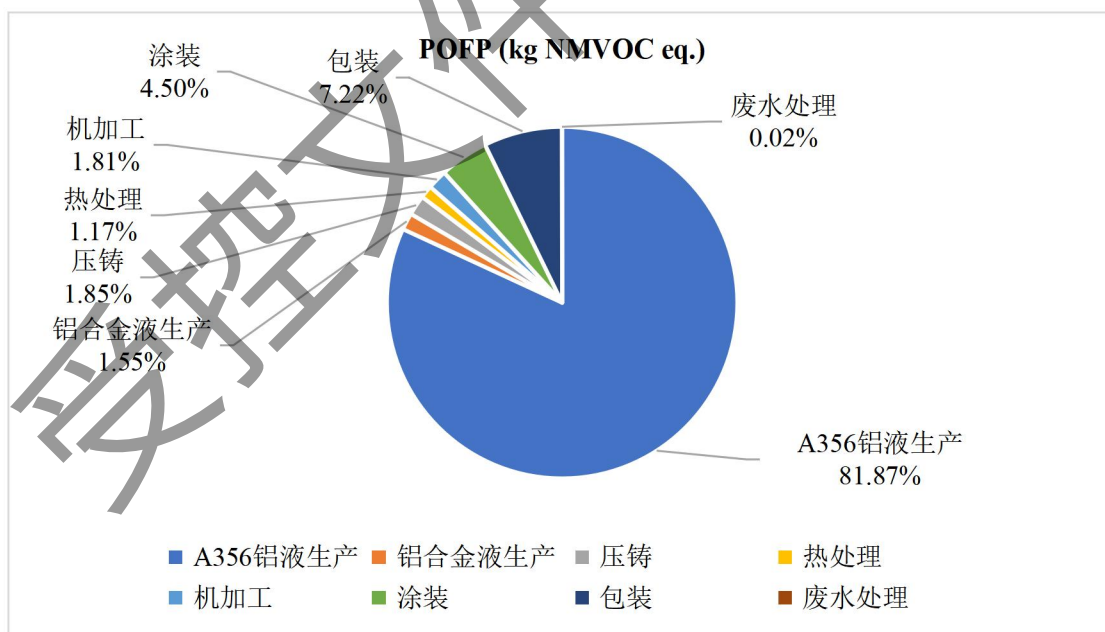


图 4.8 铝合金轮毂生命周期各过程对 POFP 指标的贡献

由图 4.8 可知，A356 铝液作为铝合金轮毂的主要原料，其生产过程对 POFP

指标的贡献为 821.87%，其次是包装过程对 POFP 指标的贡献达到了 7.22%。

4.4.2. 清单灵敏度分析

清单数据灵敏度是指清单数据单位变化率引起的相应指标变化率。通过分析清单数据对各指标的灵敏度，并配合改进潜力评估，从而辨识最有效的改进点。表中罗列了不同环境影响类型灵敏度>1.00%的清单数据。具体分析如下：

表 4.3 铝合金轮毂生命周期清单数据 GWP 灵敏度表

| 过程        | 清单名称    | GWP    |
|-----------|---------|--------|
| 包装        | 轮毂成品    | 99.09% |
| 喷透明粉      | 喷色漆产品   | 99.02% |
| 喷色漆       | 喷底漆产品   | 98.97% |
| 喷底漆       | 喷底粉产品   | 98.89% |
| 喷底粉       | 预处理产品   | 98.71% |
| 预处理       | 机加工产品   | 95.23% |
| 机加工       | 热处理产品   | 92.02% |
| 热处理       | 压铸产品    | 89.82% |
| 压铸        | 铝合金液    | 86.25% |
| 静置炉       | 铝合金液    | 83.49% |
| A356 铝液生产 | 铝锭      | 76.43% |
| A356 铝液生产 | 金属硅     | 5.21%  |
| 静置炉       | A356 铝液 | 2.76%  |
| 机加工       | 电力      | 2.51%  |
| 预处理       | 电力      | 2.30%  |
| 铝屑炉铝液     | 二氧化碳    | 1.96%  |
| 压铸        | 电力      | 1.94%  |
| 热处理       | 电力      | 1.57%  |
| 压铸        | 压缩空气    | 1.54%  |

|      |    |       |
|------|----|-------|
| 压缩空气 | 电力 | 1.54% |
|------|----|-------|

表 4.4 铝合金轮毂生命周期清单数据 PED 灵敏度表

| 过程        | 名称      | PED (MJ) |
|-----------|---------|----------|
| 包装        | 轮毂成品    | 96.88%   |
| 喷透明粉      | 喷色漆产品   | 96.75%   |
| 喷色漆       | 喷底漆产品   | 96.65%   |
| 喷底漆       | 喷底粉产品   | 96.52%   |
| 喷底粉       | 预处理产品   | 96.20%   |
| 预处理       | 机加工产品   | 92.81%   |
| 机加工       | 热处理产品   | 89.39%   |
| 热处理       | 压铸产品    | 87.31%   |
| 压铸        | 铝合金液    | 83.59%   |
| 静置炉       | A356 铝液 | 81.82%   |
| A356 铝液生产 | 铝锭      | 74.70%   |
| A356 铝液生产 | 金属硅     | 5.36%    |
| 机加工       | 电力      | 2.65%    |
| 预处理       | 电力      | 2.42%    |
| 压铸        | 电力      | 2.05%    |
| 静置炉       | 铝屑炉铝液   | 1.77%    |
| 热处理       | 电力      | 1.65%    |
| 压铸        | 压缩空气    | 1.63%    |
| 包装        | 胶合板托盘   | 1.32%    |
| 铝屑炉铝液     | 天然气     | 1.20%    |
| 包装        | 胶合板盖板   | 1.02%    |

表 4.5 铝合金轮毂生命周期清单数据 WU 灵敏度表

| 过程 | 名称 | WU (kg) |
|----|----|---------|
|----|----|---------|

|           |         |        |
|-----------|---------|--------|
| 包装        | 轮毂成品    | 98.58% |
| 喷透明粉      | 喷色漆产品   | 98.58% |
| 喷色漆       | 喷底漆产品   | 98.58% |
| 喷底漆       | 喷底粉产品   | 98.58% |
| 喷底粉       | 预处理产品   | 98.58% |
| 预处理       | 机加工产品   | 93.70% |
| 机加工       | 热处理产品   | 90.48% |
| 热处理       | 压铸产品    | 88.56% |
| 压铸        | 铝合金液    | 85.10% |
| 静置炉       | A356 铝液 | 84.28% |
| A356 铝液生产 | 铝锭      | 78.87% |
| A356 铝液生产 | 金属硅     | 3.65%  |
| 喷涂-预处理    | 自来水     | 2.39%  |
| 机加工       | 电力      | 1.94%  |
| 预处理       | 电力      | 1.78%  |
| 压铸        | 压缩空气    | 1.73%  |
| 压铸        | 电力      | 1.50%  |
| 热处理       | 电力      | 1.21%  |

表 4.6 铝合金轮毂生命周期清单数据 AP 灵敏度表

| 过程   | 名称    | AP     |
|------|-------|--------|
| 包装   | 轮毂成品  | 98.92% |
| 喷透明粉 | 喷色漆产品 | 98.81% |

|           |         |        |
|-----------|---------|--------|
| 喷色漆       | 喷底漆产品   | 98.73% |
| 喷底漆       | 喷底粉产品   | 98.62% |
| 喷底粉       | 预处理产品   | 98.35% |
| 预处理       | 机加工产品   | 95.16% |
| 机加工       | 热处理产品   | 91.68% |
| 热处理       | 压铸产品    | 89.79% |
| 压铸        | 铝合金液    | 86.00% |
| 静置炉       | A356 铝液 | 85.25% |
| A356 铝液生产 | 铝锭      | 79.50% |
| A356 铝液生产 | 金属硅     | 3.72%  |
| 机加工       | 电力      | 2.72%  |
| 预处理       | 电力      | 2.49%  |
| 压铸        | 电力      | 2.10%  |
| 热处理       | 电力      | 1.70%  |
| 压铸        | 压缩空气    | 1.67%  |

表 4.7 铝合金轮毂生命周期清单数据 EP 灵敏度表

| 过程   | 名称    | EP     |
|------|-------|--------|
| 包装   | 轮毂成品  | 96.27% |
| 喷透明粉 | 喷色漆产品 | 95.85% |
| 喷色漆  | 喷底漆产品 | 95.53% |
| 喷底漆  | 喷底粉产品 | 95.10% |
| 喷底粉  | 预处理产品 | 94.04% |

|           |           |        |
|-----------|-----------|--------|
| 预处理       | 机加工产品     | 91.26% |
| 机加工       | 热处理产品     | 88.22% |
| 热处理       | 压铸产品      | 86.58% |
| 压铸        | 铝合金液      | 83.32% |
| 静置炉       | A356 铝液   | 82.66% |
| A356 铝液生产 | 铝锭        | 73.07% |
| A356 铝液生产 | 金属硅       | 3.37%  |
| A356 铝液生产 | 铝钛合金      | 2.70%  |
| 机加工       | 电力        | 2.34%  |
| 预处理       | 电力        | 2.14%  |
| 压铸        | 电力        | 1.81%  |
| 包装        | 胶合板托盘     | 1.81%  |
| 热处理       | 电力        | 1.46%  |
| 压铸        | 压缩空气      | 1.44%  |
| A356 铝液生产 | 铝锭 - 货车运输 | 1.40%  |
| 包装        | 胶合板盖板     | 1.39%  |
| 喷底粉       | 底粉        | 1.06%  |

表 4.8 铝合金轮毂生命周期清单数据 PM 灵敏度表

| 过程   | 名称    | PM     |
|------|-------|--------|
| 包装   | 轮毂成品  | 98.82% |
| 喷透明粉 | 喷色漆产品 | 98.77% |
| 喷色漆  | 喷底漆产品 | 98.73% |

|           |         |        |
|-----------|---------|--------|
| 喷底漆       | 喷底粉产品   | 98.68% |
| 喷底粉       | 预处理产品   | 98.54% |
| 预处理       | 机加工产品   | 95.71% |
| 机加工       | 热处理产品   | 92.62% |
| 热处理       | 压铸产品    | 90.94% |
| 压铸        | 铝合金液    | 87.57% |
| 静置炉       | A356 铝液 | 86.92% |
| A356 铝液生产 | 铝锭      | 80.96% |
| A356 铝液生产 | 金属硅     | 4.53%  |
| 机加工       | 电力      | 2.42%  |
| 预处理       | 电力      | 2.22%  |
| 压铸        | 电力      | 1.88%  |
| 热处理       | 电力      | 1.51%  |
| 压铸        | 压缩空气    | 1.49%  |

表 4.9 铝合金轮毂生命周期清单数据 POFP 灵敏度表

| 过程   | 名称    | POFP   |
|------|-------|--------|
| 包装   | 轮毂成品  | 92.75% |
| 喷透明粉 | 喷色漆产品 | 92.25% |
| 喷色漆  | 喷底漆产品 | 91.87% |
| 喷底漆  | 喷底粉产品 | 91.37% |
| 喷底粉  | 预处理产品 | 90.11% |
| 预处理  | 机加工产品 | 88.25% |



|           |            |        |
|-----------|------------|--------|
| 机加工       | 热处理产品      | 86.44% |
| 热处理       | 压铸产品       | 85.27% |
| 压铸        | 铝合金液       | 83.42% |
| 静置炉       | A356 铝液    | 81.87% |
| A356 铝液生产 | 铝锭         | 59.31% |
| A356 铝液生产 | 铝锭 - 货车运输  | 8.78%  |
| A356 铝液生产 | 金属硅        | 7.32%  |
| A356 铝液生产 | 金属硅 - 货车运输 | 3.88%  |
| 包装        | 纸塑         | 2.47%  |
| 包装        | 胶合板托盘      | 2.12%  |
| 包装        | 胶合板盖板      | 1.63%  |
| 静置炉       | 铝屑炉铝液      | 1.55%  |
| 机加工       | 电力         | 1.30%  |
| 铝屑炉铝液     | 天然气        | 1.27%  |
| 喷底粉       | 底粉         | 1.26%  |
| 预处理       | 电力         | 1.19%  |
| A356 铝液生产 | 铝钛合金       | 1.14%  |
| 压铸        | 电力         | 1.01%  |

由表 4.3-4.9 可知，A356 铝液生产过程的铝锭对 7 项指标的贡献最大，除 POFP 指标外，对其他 6 项指标的贡献都超过了 73%，建议 A356 铝液生产企业在采购原料铝锭时，优先采购能耗更低、对环境更友好的供应商原料。由于铝锭的上游生产数据来自数据库，建议企业在进行生命周期数据收集时，调查实际供应商的生产数据，对于供应链的协同改进更有促进作用。

其次，是铝合金轮毂生产过程中机加工、预处理、热处理等过程的能源投入，对各 LCA 指标都有一定贡献，建议企业在工艺允许的条件下，提升能源利用率，降低对环境的影响。

对于 EP 和 POFP 指标，A356 铝液生产过程的运输也有较大贡献，建议生产企业就近采购原料，减少运输过程对环境的影响。

#### 4.5. 完整性说明

本研究中各过程忽略的物料如下表所示，总忽略物料重量不超过 5%，符合数据取舍规则要求。

表 4.10 数据缺失或忽略的物料汇总表

| 消耗名称  | 所属过程 | 上游数据来源 | 数量单位     | 重量比   | 检查结果           |
|-------|------|--------|----------|-------|----------------|
| 铝屑    | 铝合金液 | 可忽略    | 11.30kg  | 103%  | 铝屑来自机加工等过程，可忽略 |
| 阻垢剂   | 废水处理 | 可忽略    | 0.0013g  | 0.34% | 符合取舍规则         |
| 酸洗添加剂 | 预处理  | 可忽略    | 0.0001kg | 0.47% | 符合取舍规则         |

注：\* 重量比=物料重量\*数量/产品重量；

\* 总忽略物料重量比=数据缺失的重量比+符合取舍规则的重量比。

#### 4.6. 数据质量评估

利用 CLCD 数据质量评估方法评估本研究铝合金轮毂 LCA 的数据质量，具体数据质量评估结果如下：

表 4.11 铝合金轮毂数据质量评估结果

| 指标  | 单位                     | LCA 结果   | 结果不确定度 | 上下限范围(95%置信区间)       |
|-----|------------------------|----------|--------|----------------------|
| GWP | kg CO <sub>2</sub> eq. | 2.37E+02 | 7.04%  | [2.21E+02, 2.54E+02] |
| PED | MJ                     | 2.86E+03 | 8.58%  | [2.61E+03, 3.10E+03] |

|      |                                      |          |       |                      |
|------|--------------------------------------|----------|-------|----------------------|
| WU   | kg                                   | 9.32E+02 | 9.68% | [8.42E+02, 1.02E+03] |
| AP   | kg SO <sub>2</sub> eq.               | 1.12E+00 | 6.98% | [1.05E+00, 1.20E+00] |
| EP   | kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. | 8.82E-02 | 7.76% | [8.13E-02, 9.50E-02] |
| PM   | kg PM <sub>2.5</sub> eq.             | 3.65E-01 | 7.30% | [3.38E-01, 3.92E-01] |
| POFP | kg NMVOC eq.                         | 1.71E-01 | 4.14% | [1.64E-01, 1.78E-01] |

注：\*95%置信区间。

由上表可知，7 项 LCA 指标结果的不确定度都在 10%以内，不确定度较小，主要由于从 A356 铝液生产到产品包装各过程数据来自企业实际统计，数据质量较好，因此结果可信度较高。

#### 4.7. 结论与建议

本章对指定铝合金轮毂进行了生命周期评价研究，研究范围包括生产 1 件铝合金轮毂的 A356 铝液生产、铝合金液生产、压铸、热处理、机加工、涂装、包装的从摇篮到大门的生命周期过程，利用中信戴卡绿色设计平台的 LCA 模块建模并计算了 GWP、PED、WU、AP、EP、PM 和 POFP 共 7 个指标的结果，并分析了铝合金轮毂生命周期各过程对 7 个指标的贡献比例，同时还进行了清单灵敏度分析。

通过 LCA 计算分析，并结合企业实际生产工艺技术情况，提出了以下改进建议：

- 从铝合金轮毂全生命周期来看，A356 铝液生产过程对 7 项环境影响指标的贡献最大，其次是涂装、压铸、机加工过程；
- 对于 A356 铝液生产过程，其贡献主要来自于铝锭和金属硅。建议生产企业在采购原料时，优先采购能耗更低、对环境更友好的供应商原料。由于铝锭、金属硅的上游生产数据来自数据库，建议企业在进行生命周期数据收集时，调查实际供应商的生产数据，对于供应链的协同改进更有促进作用；

- 压铸、机加工、热处理等过程的能源投入，对各 LCA 指标都有一定贡献，建议企业在工艺允许的条件下，提升能源利用率，降低对环境的影响。

受控文件禁止复印

## 参考文献

- [1] ISO/TC 207/SC 5.2006. ISO14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment–Principles and framework. International Organisation for Standardisation (ISO) [S].
- [2] GB/T 24040-2008. 环境管理生命周期评价原则与框架[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2008.
- [3] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30 (6):155-160.
- [4] 雷兆武, 薛冰, 王洪涛. 清洁生产与循环经济[M].化学工业出版社,2017,9:131-132.

受控文件 禁止复印