

生命周期评价报告

申请单位： 无锡戴卡轮毂制造有限公司

生产单位： 无锡戴卡轮毂制造有限公司

产品信息： 00619C73 铝合金轮毂

报告机构： 江苏五湖联技术服务有限公司

2025年4月28日

报告摘要表

公司基本信息			
企业名称	无锡戴卡轮毂制造有限公司		
企业地址	江苏省无锡市惠山工业转型集聚区北惠路 109 号		
统一社会信用代码	91320200743935595C	企业性质	有限责任公司
企业法人代表		联系人	
联系人电话		电子邮件	
产品信息			
系统边界	“摇篮到坟墓”		
产品名称、型号及规格尺寸	铝合金轮毂， 型号为 00619C73， 单个重量为 12.66kg		
功能单位	1 件铝合金轮毂		
生命周期评价报告信息			
报告编制依据	ISO 14040: 2006《环境管理 生命周期评价 原则与框架》 ISO 14044:2006《环境管理.产品生命周期评价.要求和导则》 GB/T 24040-2008 《环境管理 生命周期评价 原则与框架》 GB/T 24044-2008 《环境管理 生命周期评价 要求与指南》		
报告数据覆盖周期	2024 年01 月01 日~2024 年12 月31 日		
评价结果符合 ISO 14040: 2006 《环境管理生命周期评价原则与框架》、ISO 14044:2006 《环境管理.产品生命周期评价.要求和导则》、GB/T 24040—2008 《环境管理 生命周期评价 原则与框架》、GB/T 24044—2008 《环境管理 生命周期评价 要求与指南》的相关要求。			

目录

1. 生命周期评价概述.....	错误！未定义书签。
1.1. 生命周期评价介绍.....	错误！未定义书签。
1.2. 本报告标准依据.....	错误！未定义书签。
2. 企业与产品基本情况.....	错误！未定义书签。
2.1.企业概况.....	错误！未定义书签。
2.2. 产品概述.....	7
2.3.范围定义.....	7
3. 数据收集.....	11
3.1. A356 铝液生产.....	11
3.2. 铝合金液生产.....	12
3.3. 压铸过程.....	14
3.4. 热处理过程.....	15
3.5. 机加工过程.....	16
3.6. 涂装过程.....	17
3.7. 包装过程.....	19
3.8. 污水处理过程.....	20
3.9. 空压站过程.....	21
3.10. 背景数据来源.....	22
4. 生命周期评价结果.....	24
4.1. 建立 LCA 模型.....	24
4.2. LCA 计算方法.....	24

4.3. LCA 计算结果	25
4.4. LCA 结果分析	26
4.4.1. 贡献分析	26
4.4.2. 清单灵敏度分析	33
4.5. 完整性说明	40
4.6. 数据质量评估	40
4.7. 结论与建议	41
参考文献	错误！未定义书签。

1. 生命周期评价概述

1.1. 生命周期评价介绍

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）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。生命周期评价作为产业生态学的主要理论基础和分析方法，从 20 世纪 60 年代末以来，经过 50 多年的发展，已被广泛应用于企业和政府管理部门。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。

国际标准化组织将生命周期评价定义为对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价（ISO 14040:2006）。如图 1 所示 ISO 14040 规定 LCA 的技术框架为4 个阶段：目的和范围的确定、清单分析、影响评价，以及每个阶段都要开展的结果解释。

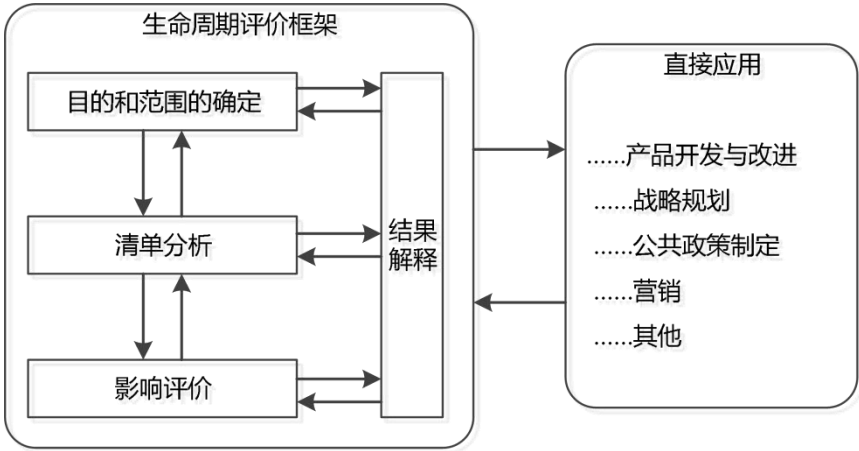


图1 ISO 14040 标准 LCA 的技术框架

国内外很多行业都开展了产品 LCA 评价，用于行业内企业的对标和改进、行业外部的交流，并为行业政策制定提供参考依据。

1.2. 本报告标准依据

本报告中生命周期评价依据 ISO 14040: 2006《环境管理生命周期评价原则

与框架》、ISO 14044:2006《环境管理 产品生命周期评价 要求和导则》、GB/T 24040—2008《环境管理 生命周期评价 原则与框架》、GB/T 24044—2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》评价并编制。

2. 企业与产品基本情况

2.1. 企业概况

无锡戴卡轮毂制造有限公司成立于2002年12月，是由中信集团下属公司无锡戴卡股份有限公司和江苏锦绣铝业有限公司合资组建的混合型经济企业，位于无锡惠山经济技术开发区，公司起步发展于民营企业，成长壮大于混合所有制企业，转型崛起于国民共进新的模式。作为无锡戴卡在华东门户工厂，目前总资产18亿元，占地318亩，职工人数1150人，主要产品为轻量化铝合金轮毂、铝铸件等新能源汽车关键零部件，产品供应特斯拉、上汽集团(大众、乘用车、通用等)以及自主品牌(吉利、比亚迪、长安等)

2.2. 产品信息

产品类型	产品
产品名称	铝合金轮毂
产品尺寸及型号	单件重量为 12.66kg/ 00619C73
产品应用方向	汽车关键零件
主要原材料	铝锭、涂料等
主要消耗能源	电、天然气
主要污染物	铝渣、铝灰、SO ₂ 、NO _x 等

2.3. 范围定义

2.3.1. 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：

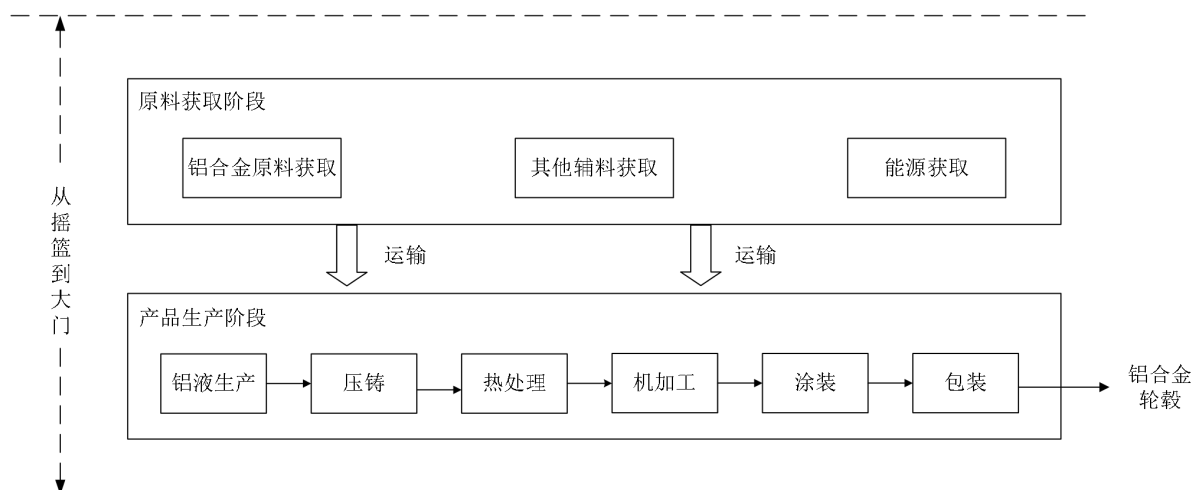


图 2.1 铝合金轮毂生命周期系统边界图

2.3.2. 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。

2.3.3. 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 ₂ eq.	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ 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 ₂ eq.	二氧化硫、三氧化硫、氮氧化物...
淡水富营养化	kg PO ₄ ³⁻ eq.	磷、磷酸、磷酸盐...
颗粒物	kg PM _{2.5} eq.	颗粒 (PM _{2.5})、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。

2.3.4. 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。

2.3.5. 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, 建立了无锡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：无锡安冶金属工业有限公司

产地：中国·江苏·无锡

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	21.67	kWh	CLCD-China-ECER 0.8.1	——
能耗	天然气	84.06	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 (km)	运输类型
精炼剂	1.5kg	徐州-汉久	安冶	859	货车运输（10t）-汽油
金属硅	72.5kg	新疆乌鲁木齐-合盛	安冶	3083	货车运输（10t）-汽油
铝锆合金	3.3kg	保定-四通	安冶	404	货车运输（8t）-汽油
铝锭	917.5kg	内蒙古锡林郭勒-鸿骏	安冶	806	货车运输（18t）-汽油
镁锭	3.5kg	包头-执友	安冶	946	货车运输（10t）-汽油
铝钛合金	12kg	保定-四通	安冶	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：无锡戴卡

产地：中国·江苏·无锡

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	0.09	m ³	CLCD-China-ECER 0.8.1	熔炼主要燃料
能耗	电力	0.02	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	0.5	kg	实际调查数据	原料

消耗	A356 铝液	0.5	kg	实际调查数据	原料
能耗	天然气	0.003	m ³	CLCD-China-ECER 0.8.1	熔炼主要燃料

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：无锡戴卡

产地：中国·江苏·无锡

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	13.39	kg	实景过程数据	原料
能耗	电力	0.132	kWh	CLCD-China-ECER 0.8.1	——
能耗	压缩空气	12.69	m ³	实景过程数据	——
消耗	自来水	0.0003	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：无锡戴卡

产地：中国·江苏·无锡

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	4.24	kg	CLCD-China-ECER 0.8.1	——
消耗	电力	0.508	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：无锡戴卡

产地：中国·江苏·无锡

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	4.6	m3	实景过程数据	——
能耗	电力	2.68	kWh	CLCD-China-ECER 0.8.1	——
能耗	自来水	2.63	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：无锡戴卡

产地：中国·江苏·无锡

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 涂装过程清单数据表

类型	清单名称	数量	单位	上游数据来源	用途/排放原因
产品	成品	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	1.7	kWh	CLCD-China-ECER 0.8.1	——
能耗	压缩空气	2.69	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	0.62	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：无锡戴卡

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：无锡戴卡

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	0.035	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：无锡戴卡

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	0.11	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
铝锶合金	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) 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。

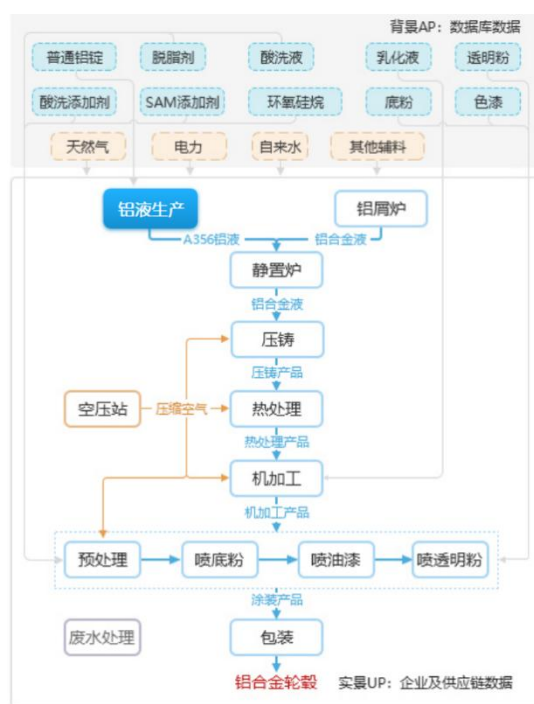


图 4.1 绿色设计平台上建立的铝合金轮毂的 LCA 模型示意图

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、CO₂ 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。^[5]

(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）。^[5]

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 ₂ eq.	2.15E+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 ₂ eq.	1.12E+00
淡水富营养化	EP	kg PO ₄ ³⁻ 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 ₂ 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 ₂ 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 ₄ ³⁻ eq.)	占比	指标值 (kg PM _{2.5} 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。

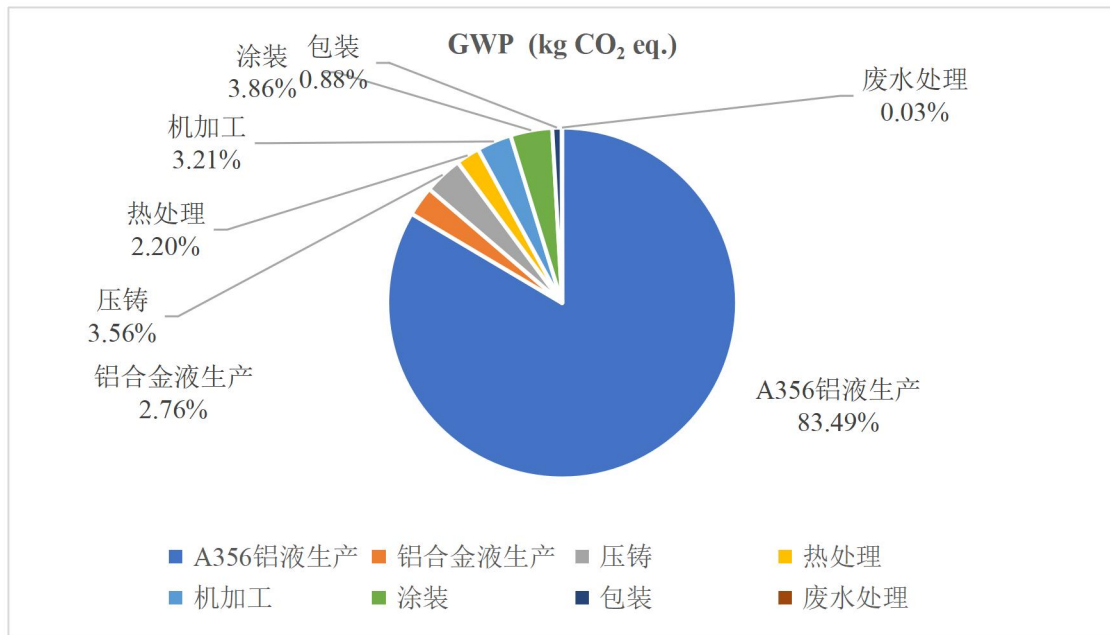


图 4.2 铝合金轮毂生命周期各过程对 GWP 指标的贡献

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%。

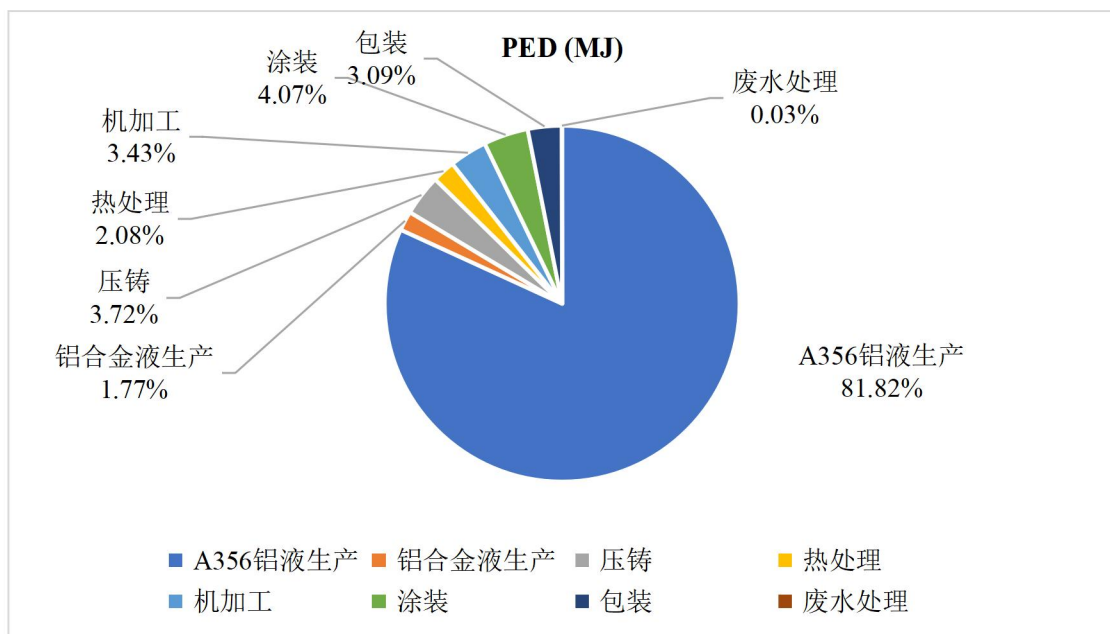


图 4.3 铝合金轮毂生命周期各过程对 PED 指标的贡献

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%。

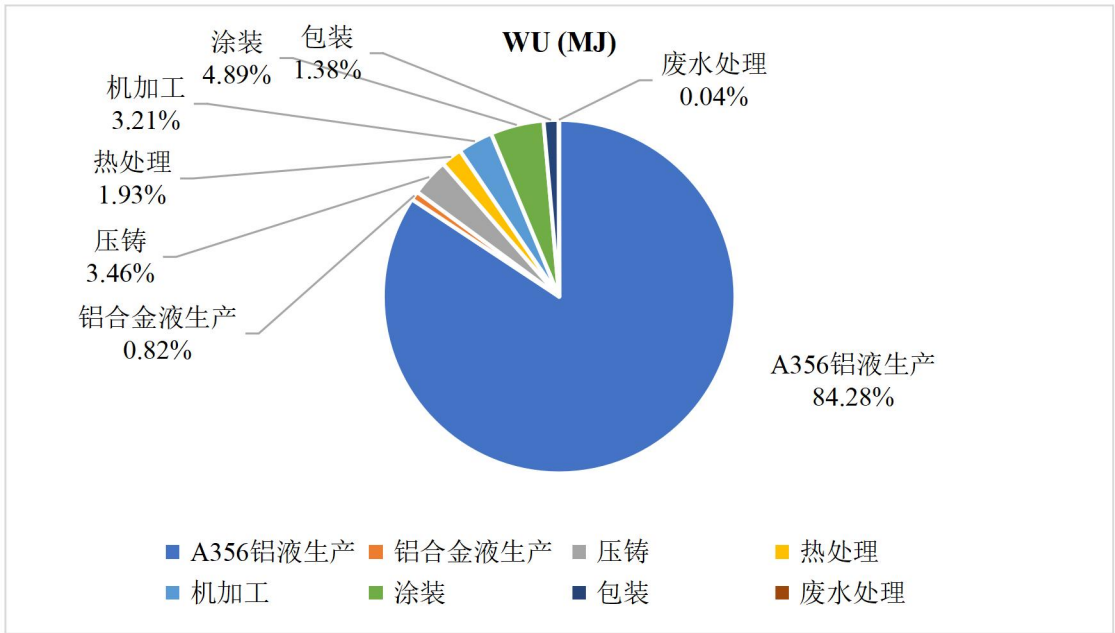


图 4.4 铝合金轮毂生命周期各过程对 WU 指标的贡献

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%。

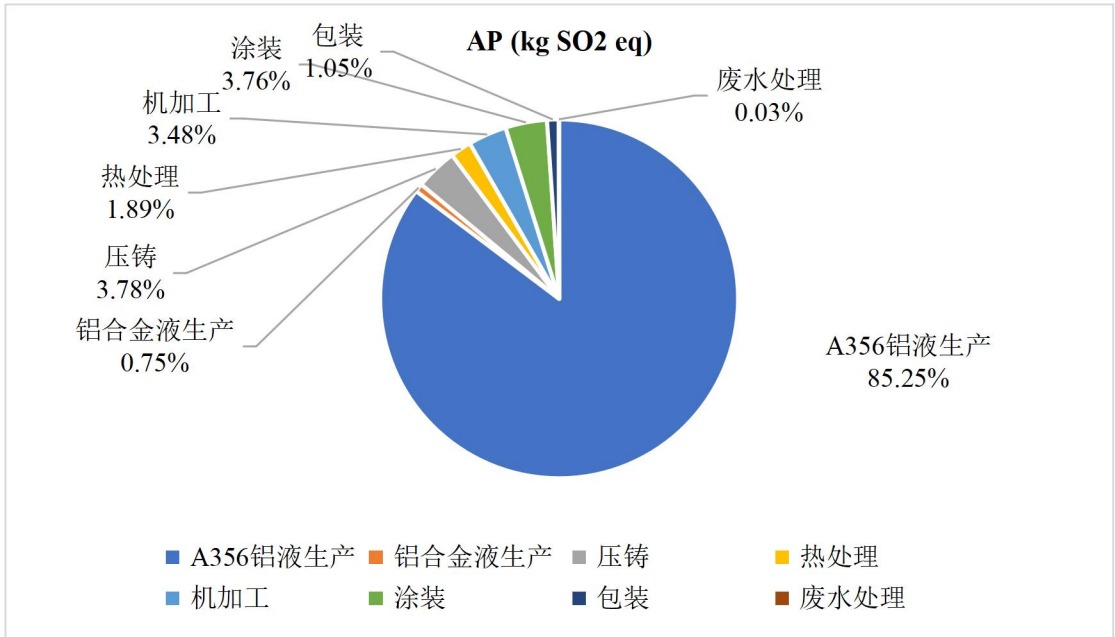


图 4.5 铝合金轮毂生命周期各过程对 AP 指标的贡献

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%。

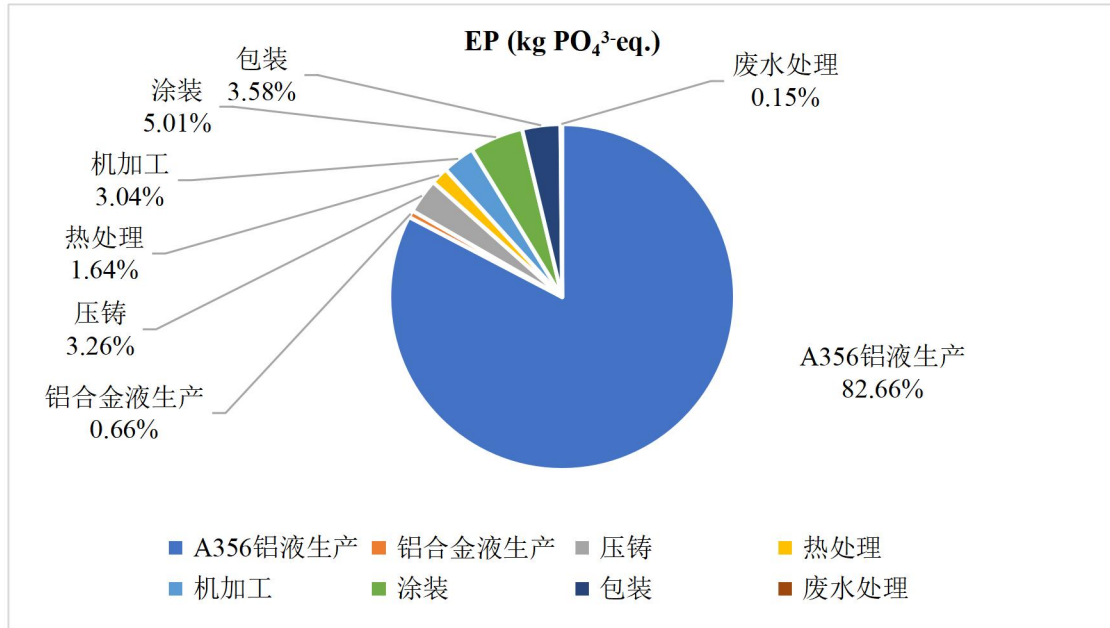


图 4.6 铝合金轮毂生命周期各过程对 EP 指标的贡献

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%。

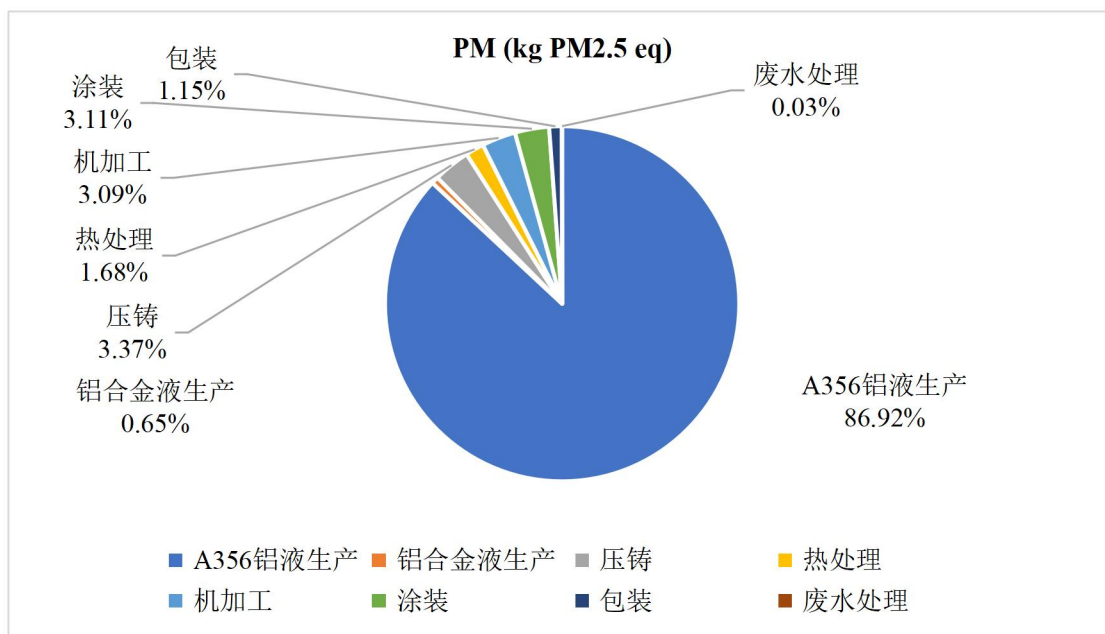


图 4.7 铝合金轮毂生命周期各过程对 PM 指标的贡献

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%。

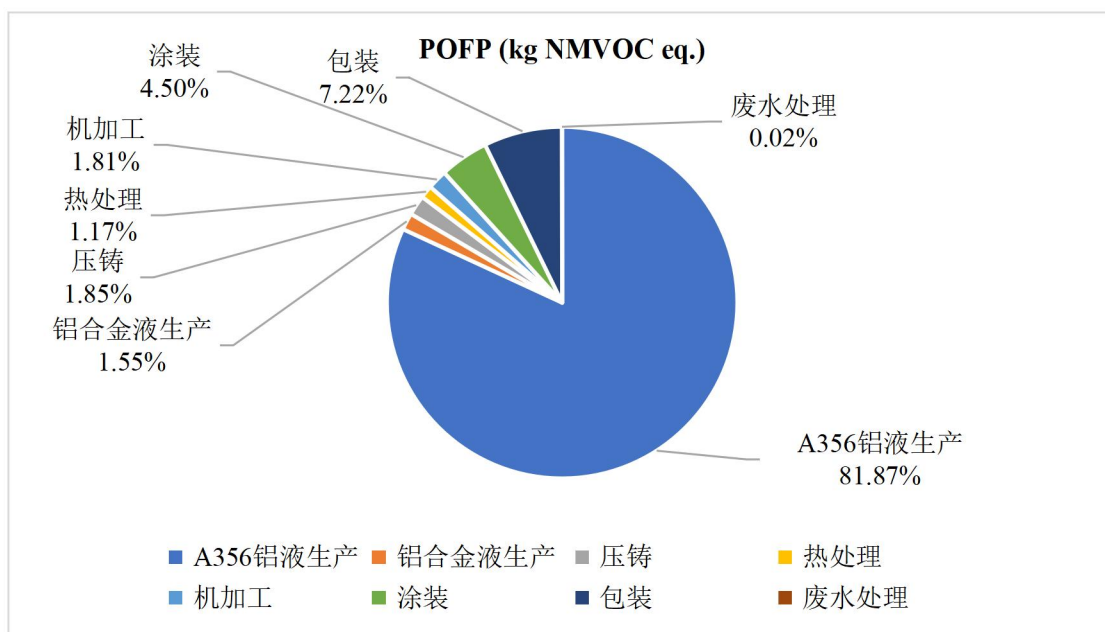


图 4.8 铝合金轮毂生命周期各过程对 POFP 指标的贡献

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 ₂ 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 ₂ eq.	1.12E+00	6.98%	[1.05E+00, 1.20E+00]
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.	8.82E-02	7.76%	[8.13E-02, 9.50E-02]
PM	kg PM _{2.5} 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，利用无锡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。