

山东创新精密科技有限公司铝合金 型材生命周期评价

目 录

| | |
|--|-----------|
| 1. 企业及产品介绍 | 5 |
| 2. 目标与范围的定义 | 6 |
| 2.1 研究目的..... | 6 |
| 2.2 研究范围..... | 6 |
| 2.2.1 功能单位..... | 6 |
| 2.2.2 系统边界..... | 6 |
| 2.2.3 分配原则..... | 9 |
| 2.2.4 取舍原则..... | 9 |
| 2.2.5 影响类型和评价方法..... | 9 |
| 2.2.6 软件和数据库..... | 10 |
| 2.2.7 数据质量要求..... | 10 |
| 3. 生命周期清单分析 | 12 |
| 3.1 前景数据..... | 12 |
| 3.2 背景数据和数据质量..... | 12 |
| 4. 生命周期影响评价 | 16 |
| 4.1 中点结果..... | 16 |
| 4.2 对环境造成影响的主要阶段..... | 16 |
| 4.2 对环境造成影响的主要单元过程..... | 17 |
| 4.2.1 铝水生产阶段..... | 17 |
| 4.2.2 铝棒生产阶段..... | 18 |
| 4.2.2 铝压延阶段..... | 18 |
| 5. LCA 结果解释 | 19 |
| 5.2.1 完整性..... | 19 |
| 5.2.2 敏感性分析..... | 20 |
| 5.2.3 不确定性分析..... | 20 |
| 5.2.4 一致性..... | 22 |
| 6. 结论、限制和建议 | 23 |
| 6.1 结论..... | 23 |
| 6.2 限制..... | 23 |
| 6.3 建议..... | 23 |
| 附录 | 25 |
| 表 S1 铝水生产阶段的中点环境影响（所有数据均基于功能单元） | 25 |
| 表 S2 铝棒生产阶段的中点环境影响（所有数据均基于功能单元） | 25 |
| 表 S3 铝合金型材生产阶段的中点环境影响（所有数据均基于功能单元） | 26 |

| 简称 | 全称 |
|---------------------|--|
| IPCC | International panel on climate change(联合国政府间气候变化专门委员会) |
| CFP | Product carbon footprint(产品碳足迹) |
| HFC | Hydrofluoro Carbon(氢氟碳化物) |
| PFC | Perfluoro Carbon (全氟碳化物) |
| CO ₂ eq. | Carbon Dioxide Equivalent(二氧化碳当量) |
| LCA | Life cycle assessment(生命周期评价) |
| BSI | British Standards Institution(英国标准协会) |
| WBCSD | World Business Council for Sustainable Development(世界企业可持续发展理事会) |
| ISO | International Organization for Standardization(国际标准组织) |
| PEF | Product Environment Footprint(产品环境足迹) |
| GWP | Global Warming Potential(全球暖化潜值) |
| ELCD | European Life Cycle Database(欧洲生命周期参考数据库) |
| USLCI | United States Life Cycle Inventory(美国生命周期清单数据库) |

1. 企业及产品介绍

山东创新精密科技有限公司隶属于国内最大的铝合金生产企业山东创新集团，于 2012 年投资兴建，是山东省重点建设项目，公司位于山东省邹平县经济技术开发区会仙四路东首，注册资金壹亿元，公司主要经营高强度高韧合金材料生产技术的研发，铝合金精密材料的加工、铝合金型材及铝合金制品表面处理等业务，产品种类齐全，涉及轨道交通、电子工业、汽车轻量化、建筑等用铝领域，生产高精密、大截面、高强度、高韧性的高端铝挤压产品，年综合产能达到 20 万吨。

公司引进德国西马克及意大利涅利等公司的大型挤压设备 35 台（套），配置了国际领先的挤压辅助和检测设备 257 台（套），生产装机水平跻身国内领先行列。公司重视人才建设引进高端人才，并与中南大学等知名高校院所建立协作关系，不断增强科技创新能力，注重自主知识产权开发，公司积极推行信息化和精细化管理。

在今后发展道路上，公司秉承“争当行业领军、打造百年企业”的目标，发挥集团公司资源、规模、技术、人才、品牌优势，狠抓产品品质，信守合作承诺，与广大新老客商携手共进共赢。

2. 目标与范围的定义

2.1 研究目的

本研究的目的是根据 ISO 14040:2006, ISO 14044:2006 和 ISO 14025 标准,评估生产一吨铝合金型材产品的环境影响。本报告也可以为第三方产品环保声明提供详细的信息和数据支持,为产品设计者和购买者提供可靠的产品环境影响信息。

数据资料也可用于下列用途:三型环境声明 (EPD)、产品回收应用、类似产品对标、绿色产品评估、绿色采购和供应链决策、分析具体指标,如碳足迹或不可再生资源消耗等。

2.2 研究范围

本项目生命周期评价核算依据国际标准如下:

- ISO14040:2006 环境管理生命周期评价原则与框架
- ISO14044:2006 环境管理生命周期评价要求与指南

按照 ISO14040:2006、ISO14044:2006 标准的要求,研究范围需要明确评估对象的功能单位、系统边界、分配原则、取舍原则、相关假设、影响评价方法和数据质量要求等。在下列章节中分别予以说明。

2.2.1 功能单位

为方便系统中输入/输出的量化,以及后续企业披露产品的环境信息,或将本研究结果与其他产品的环境影响做对比,本研究声明单位定义为:生产 1 吨铝合金型材产品。

2.2.2 系统边界

本次研究的系统边界为“摇篮”到“大门”,即原材料获取阶段,生产阶段,由于研究对象为中间产品,所以不包含使用阶段和废弃处置阶段,(1 吨铝合金型材生命周期的系统边界如图 1 所示),其中铝压延阶段涉及到的工艺环节如下:

- (1) 模具加工:模具是决定型材尺寸、形状和表面质量的重要工具,使用前

放在模具炉内加热及保温，加热温度 440-480 摄氏度。保温 4 小时，连续加热时间不能超过 24 小时。

(2) 挤压前铸锭加热：成品铸锭或长铸棒在工频感应加热炉中进行梯度加热。

(3) 挤压：加热到一定温度的铸锭，送入挤压筒中进行挤压。挤压方法根据产品合金、品种、规格、用途而定。

(4) 淬火：软铝合金 T5/T6 状态可在挤压机上进行在线水、雾、气冷却淬火；硬铝合金在立式淬火炉中进行离线淬火。

(5) 拉伸矫直：挤压产品经过在线冷却淬火后，被随动热锯切成长倍尺，然后被牵引机拉走，并被横向运输到冷床冷却到室温，再被横向运输到拉伸矫直机上，按工艺要求进行拉伸矫直。离线淬火产品，淬火后在独立的拉伸矫直机上进行拉矫，拉矫率为 1%-3%。

(6) 定尺锯切和平台检验：被拉伸直的产品，横向运输到定尺锯的前辊道，切去头尾的夹头部分，在按尺寸要求进行切割成产品。然后送平台进行外观，几何尺寸和形位精度检验。

(7) 辊矫、压力矫和局部矫直精整：对形位精度不合格者分别进行矫正。

(8) 退火：为提高塑性进行工序退火；为获得产品一定性能而进行成品退火。

(9) 人工时效：将上部产品送入时效炉进行时效处理，以达到最终的强度要求

(10) 验收、包装、交货和发运。

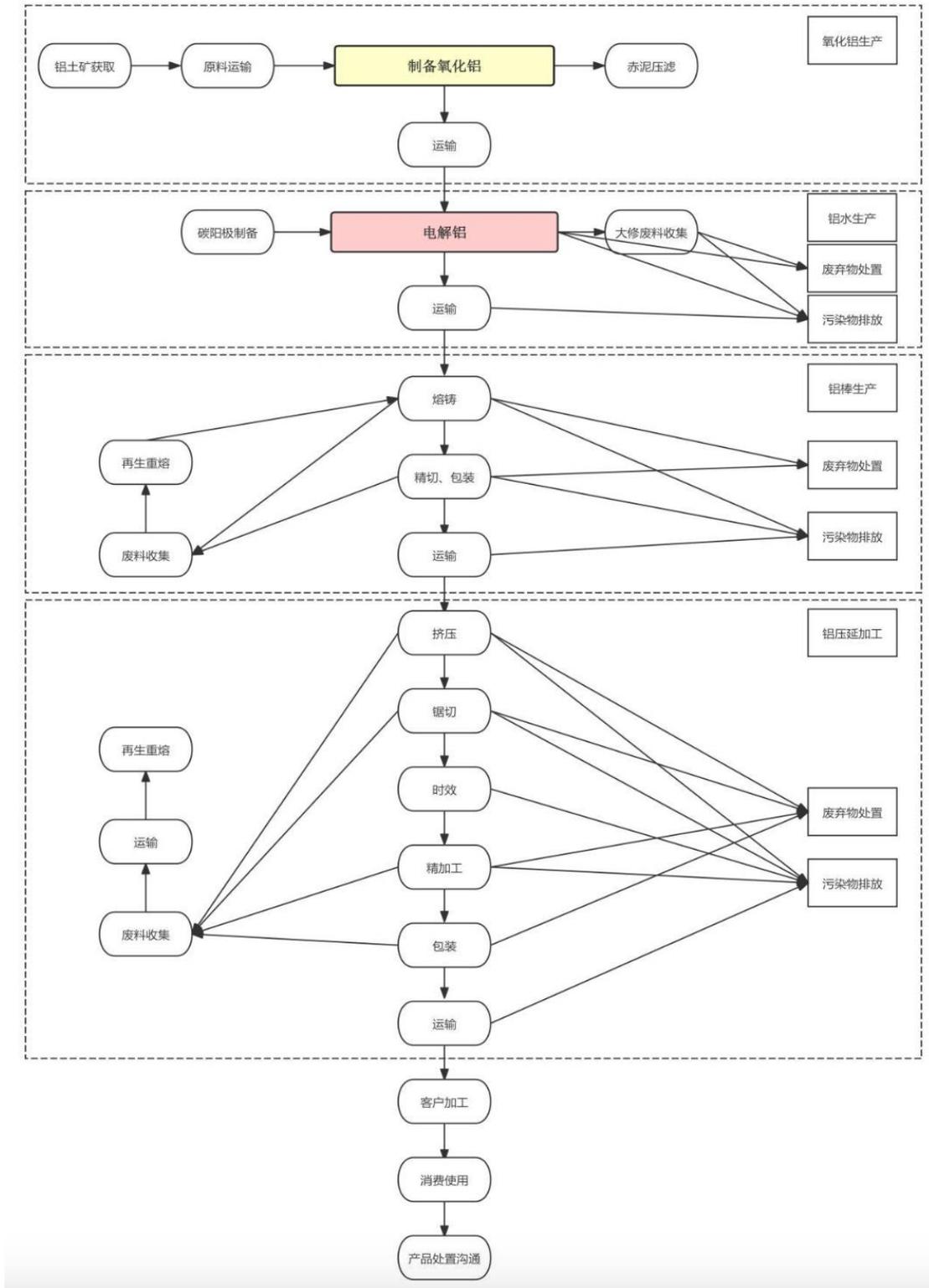


图 1 系统边界

2.2.3 分配原则

许多流程通常不只有一个功能或输出，流程的环境负荷需要分配到不同的功能和输出中，当前有不同的方式来完成分配，主要有 a.避免分配；b.以物理因果关系为基准分配环境负荷；c.使用社会经济学分配基准；

产品在生产过程中有残极碳块和余热等副产物产出，选用分配方式 a：避免分配。通过扩大系统边界，间接减少了产品阳极碳块和水电的消耗，进而减少环境影响。

2.2.4 取舍原则

根据对国内外各类产品 LCA 研究的调研分析，并参考欧盟发布的产品环境足迹(Product Environment Footprint, PEF)指南中对取舍准则的要求，基本的取舍原则有：

1、基于产品投入的比例：舍去质量或能量投入小于 1%的产品/能量投入，但总的舍去产品投入比例不超过 5%。但是，对于质量虽小，但生命周期环境影响大的物质，则不可以舍弃，例如黄金、白银；

2、基于环境影响的比重：以类似投入估算，排除实际影响较小的原料。对于任何类别影响，如果相同影响在一个过程/活动的总和 $<1\%$ ，则此过程可从系统边界中舍去；

3、基于数据库估算：对于原料消耗等难以直接测量的环境影响，可以先从现有的数据库中选用类似原料的数据进行估算。如果估算结果显示其环境影响较小，则可以选择忽略；如果影响显著，则需要进一步收集相关数据。

4、如果是原料消耗，其环境影响必须收集其生产过程的数据，然后才能计算判断，这是很耗时间的办法。实际操作中，一般先从可得的数据库中选用一个类忽略，如果有明显影响，就应该收集相应的生产数据。只有在差异很大和比较粗略的情况下，可以直接忽略重量很小的原料。

2.2.5 影响类型和评价方法

本研究采用 CML2001 - Aug. 2016 特征化模型对环境影响的特征值进行了计算，涉及到非生物资源消耗、酸化潜势、全球变暖潜势等 11 种环境影响类别，

具体如表 1 所示。

表 1 本研究的中点影响类别

| 环境影响类别 | 英文简写 | 环境影响单位 |
|------------|-------|------------------------|
| 非生物资源消耗，元素 | ADPe | kg Sb eq. |
| 非生物资源消耗，化石 | ADPf | MJ |
| 酸化潜势 | AP | kg SO ₂ eq. |
| 富营养化潜势 | EP | kg Phosphate eq. |
| 淡水水生生态毒性潜势 | FAETP | kg DCB eq. |
| 全球变暖潜势 | GWP | kg CO ₂ eq |
| 人体毒性潜势 | HTP | kg DCB eq. |
| 海洋水生生态毒性潜势 | MAETP | kg DCB eq. |
| 臭氧层消耗潜势 | ODP | kg R11 eq. |
| 光化学臭氧生成潜势 | POCP | kg Ethene eq. |
| 陆地生态毒性潜势 | TETP | kg DCB eq. |

2.2.6 软件 and 数据库

本研究使用 Gabi 软件及 Gabi professional 版内置数据库进行 LCA 建模和结果计算。

2.2.7 数据质量要求

为满足数据质量要求，在本研究中主要考虑了以下几个方面：

- 1、准确性：数据应尽可能接近真实值，避免偏差和错误。
- 2、完整性：涵盖产品或过程的所有相关阶段和环境影响类别，包括所有的重要输入和输出，以及它们之间相互的作用。
- 3、一致性：在不同的研究之间保持方法和假设的一致性，确保数据的收集和解释遵循相同的标准和程序。
- 4、透明性：提供足够的信息和数据来源说明，以便其他人能够理解和验证结果，纪律所有假设、限制条件和不确定性因素。

5、可重复性：研究方法应详细记录，以便其他、研究人员能够重复该研究并获得相似结果，使用标准量的方法和工具来提高研究的可重复性。

6、时效性：使用最新的数据和技术来反应当前环境和状况和技术水平，定期更新 LCA 以反映新的信息变化。

7、代表性:选择具有代表性的样本和数据点来反映整体情况，考虑不同地理区域、生产技术和市场条件的影响。

8、不确定分析：对数据的不确定性进行量化分析，以了解其对最终结果的影响程度，提供关于不确定性的讨论和建议，已帮助决者理解结果的可靠性。

9、合规性：遵守相关法规和标准，如 ISO14040 系列标准等，确保 LCA 框架，方法和报告格式符合行业最佳实践和国际认可的标准。

3. 生命周期清单分析

本研究的生命周期数据包括前景数据和背景数据。

前景数据:由山东创新精密科技有限公司生产部门和体系管理部门的工作人员收集提供。

背景数据:来自 Gabi professional 数据库。这些数据属于从“摇篮”到“大门”类别。

3.1 前景数据

前景数据由公司员工收集并提供。前景数据通过现场调查按照“大门到大门”的方法收集，数据收集者通过物料平衡检查对数据进行审核。报告人向数据收集人员证实了这些数据。

原材料消耗量由收集人员提供，并依据功能单元进行计算。根据公司统计数据收集用电量、用水量、柴油消耗量等。

能源输出：电力、天然气由车间统计进行统计汇总财务最终数据以财务为准

辅助性输入：化学添加剂。催化剂等在生产统计数据，由实验室车间统计进行汇总

3.2 背景数据和数据质量

背景数据主要来源于 Gabi professional 数据库，其中，电力、水、柴油运输、填埋处置等使用的是代表中国地区的因子数据。其余缺乏本地因子清单物质采用欧洲等其他区域的因子数据替代。

表 2 氧化铝生命周期清单及背景数据（生产 1 吨氧化铝）

| 类别 | 物质 | 单位 | 用量 | 背景数据 |
|------|------|-----|-------|--|
| 资源消耗 | 铝土矿 | t | 2.75 | RER: Bauxite Sphera |
| | 石灰石 | t | 0.013 | RER: Limestone, gravel (grain size 16/32) (EN15804 A1-A3) Sphera |
| | 氢氧化钠 | t | 0.07 | RER: Sodium hydroxide mix (50%) Sphera |
| 能源消耗 | 电 | kWh | 188 | CN shandong: electricity grid mix 2021 |

| | | | | |
|----|------|----------------|----------|---|
| | 天然气 | kg | 5.95 | RER: natural gas mix sphera |
| | 蒸汽 | MJ | 4040.715 | RER: Process steam from hard coal 90% Sphera |
| | 水 | m ³ | 0.7 | CN: Tap water from surface water Sphera |
| | 煤 | t | 0.145 | RER: Hard coal mix Sphera |
| 废气 | 二氧化硫 | kg | 0.013 | Sulphur dioxide [Inorganic emissions to air] |
| | 颗粒物 | kg | 0.0017 | Dust (> PM10) [Particles to air] |
| 废渣 | 赤泥 | kg | 1200 | CN: Construction rubble on inert matter landfill Sphera |

表 3 铝水生命周期清单及背景数据（生产 1 吨铝水）

| 类别 | 物质 | 单位 | 用量 | 背景数据 |
|------|-------|----------------|-------|--|
| 资源消耗 | 氧化铝 | t | 1.91 | 连接上一环节结果 |
| | 氟化铝 | t | 0.016 | - |
| | 阳极 | t | 0.479 | CN: Anode production 2015 IAI |
| 能源消耗 | 电 | kWh | 13418 | CN shandong: electricity grid mix 2021 |
| | 水 | m ³ | 2.5 | CN: Tap water from surface water Sphera |
| | 柴油 | kg | 2.63 | CN: Diesel mix at filling station Sphera |
| 废气 | 二氧化硫 | kg | 1.42 | Sulphur dioxide [Inorganic emissions to air] |
| | 颗粒物 | kg | 0.094 | Dust (> PM10) [Particles to air] |
| 废水 | 废水 | t | 0.843 | Cooling water to lake [Other emissions to fresh water] |
| | COD | kg | 0.023 | COD, Chemical Oxygen Demand [ecoinvent long-term to fresh water] |
| 废渣 | 废阳极炭块 | kg | 69.7 | CN: Construction rubble on inert matter landfill Sphera |
| | 炭渣 | kg | 7 | |
| | 大修渣 | kg | 14.6 | |

表 4 铝棒生命周期清单及背景数据（生产 1 吨铝型材）

| 类别 | 物质 | 单位 | 用量 | 背景数据 |
|------|----|----|------|----------|
| 资源消耗 | 铝水 | t | 0.57 | 连接上一环节结果 |

| | | | | |
|------|--------|-----|--------|---|
| | 102 铝锭 | t | 0.035 | RER: Aluminium ingot mix Sphera |
| | 铝锭 | t | 0.20 | |
| | 废型材 | t | 0.18 | RNA: Recycled aluminum ingot (100% recycled content) AA <p-agg> |
| | 废铝屑 | kg | 6.61 | |
| | 再生铝水 | kg | 82.1 | |
| | 重熔棒 | kg | 61.5 | |
| | 工业硅 | kg | 4.96 | GLO: Silicon mix (99%) Sphera |
| | 镁锭 | kg | 6.61 | CN: Magnesium Sphera |
| 能源消耗 | 电力-光伏 | kWh | 7.301 | |
| | 电力-外购 | kWh | 113.89 | CN shandong: electricity grid mix 2021 |
| | 天然气 | kg | 65.33 | RER: natural gas mix sphera |
| 辅助材料 | 打包带 | kg | 1.62 | Asia: Steel finished cold rolled coil worldsteel |
| 废气 | 颗粒物 | kg | 0.019 | Dust (> PM10) [Particles to air] |
| | 二氧化硫 | kg | 0.025 | Sulphur dioxide [Inorganic emissions to air] |
| | 氮氧化物 | kg | 0.095 | Nitrogen dioxide [Inorganic emissions to air] |
| 废渣 | 铝灰 | kg | 7.27 | CN: Construction rubble on inert matter landfill Sphera |
| | 除尘灰 | kg | 3.84 | |

表 5 铝压延生命周期清单及背景数据（生产 1 吨铝型材）

| 类别 | 物质 | 单位 | 用量 | 背景数据 |
|------|-----------|-----|--------|---|
| 资源消耗 | 铝棒 | t | 1.08 | 连接上一环节结果 |
| | 锻打钢料 | t | 0.85 | RER: Steel forged component (EN15804 A1-A3) Sphera <p-agg> |
| | 除铝剂 | kg | 3.18 | DE: Calcium hydroxide (Ca(OH) ₂ ; dry; slaked lime) (EN15804 A1-A3) Sphera |
| 能源消耗 | 电力-光伏 | kWh | 7.301 | |
| | 电力-外购 | kWh | 113.89 | CN shandong: electricity grid mix 2021 |
| | 天然气 | kg | 65.33 | RER: natural gas mix sphera |
| 废水 | 生活污水和工业废水 | t | 0.17 | Cooling water to lake [Other emissions to fresh water] |

| | | | | |
|----|-------|----|-------|--|
| 废气 | 氮氧化物 | kg | 0.058 | Nitrogen dioxide [Inorganic emissions to air] |
| | 颗粒物 | kg | 0.022 | Dust (> PM10) [Particles to air] |
| | 氮氧化物 | kg | 0.095 | Nitrogen dioxide [Inorganic emissions to air] |
| 废渣 | 水处理污泥 | kg | 5.33 | RER: Incineration domestic waste (EN15804 D) Sphera |

4. 生命周期影响评价

4.1 中点结果

生命周期中点影响结果如表 6 所示。由表 6 可知，生产 1 吨铝合金型材产生的全球变暖潜势为 11702.8kg CO₂ eq。其他环境影响类别也可据此推断。

表 6 生产 1 吨铝合金型材的中点环境影响

| 影响类别 | 单位 | 特征化值 |
|-------------|------------------------|----------|
| 非生物资源消耗（元素） | kg Sb eq. | 3.69E+03 |
| 非生物资源消耗（化石） | MJ | 150325 |
| 酸化潜势 | kg SO ₂ eq. | 51.43 |
| 富营养化潜势 | kg Phosphate eq. | 3.41 |
| 淡水水生生态毒性潜势 | kg DCB eq. | 21.13 |
| 全球变暖潜势 | kg CO ₂ eq | 11702.8 |
| 人体毒性潜势 | kg DCB eq. | 7024.39 |
| 海洋水生生态毒性潜势 | kg DCB eq. | 5.41E+06 |
| 臭氧层消耗潜势 | kg R11 eq. | 1.24E-07 |
| 光化学臭氧生成潜势 | kg Ethene eq. | 2.97 |
| 陆地生态毒性潜势 | kg DCB eq. | 9.42 |

4.2 对环境造成影响的主要阶段

铝型材合金生产过程中不同阶段对环境的影响贡献图 2 所示，为便于绘图展示，图表对纵坐标的数值按图示进行了放缩。对于全球变暖潜势，影响程度从高到依次为：铝水生产阶段、铝压延阶段、铝棒生产阶段、氧化铝生产阶段和运输过程，占比分别为 56.8%、26.1%、25.2%、8.0%和 0.8%。其他环境影响中，非生物资源消耗（化石）、酸化潜势、富营养化潜势、臭氧层消耗潜势和光化学臭氧生产潜势的铝水生产阶段同样占比最高；铝棒生产阶段在人体毒性潜势、海洋水生生态毒性潜势陆地生态毒性潜势这 3 类环境影响中占比最大。

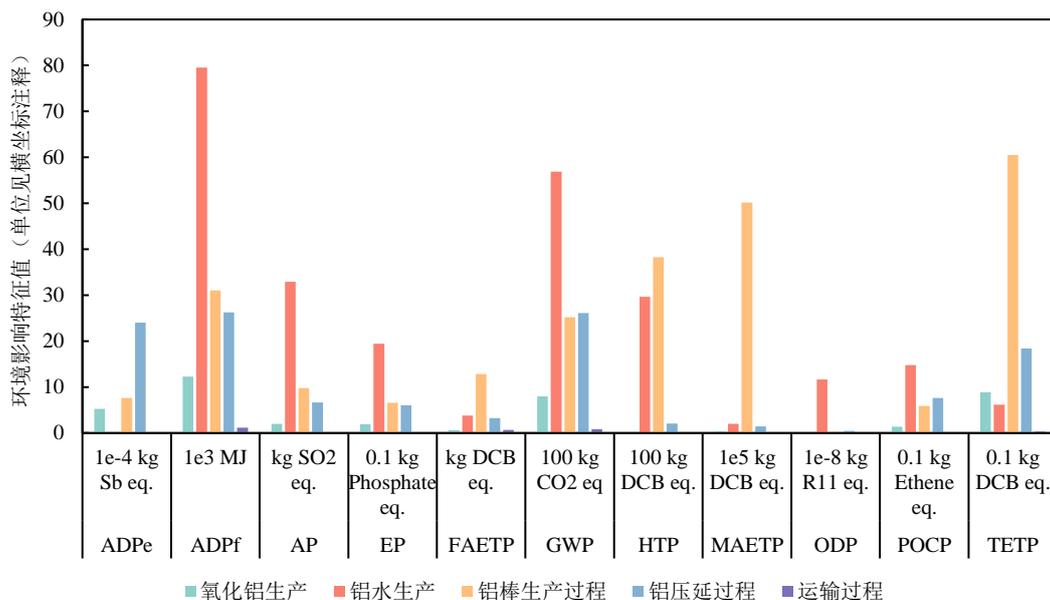


图 2 不同过程对不同类别的环境影响的贡献

4.2 对环境造成影响的主要单元过程

4.2.1 铝水生产阶段

铝水生产阶段（注：氧化铝作为铝水生产的主要原材料投入，此处将氧化铝生产阶段的环境影响纳入）电力投入对全球变暖潜势贡献最大，占比达到 81%。各单元过程的环境负荷贡献见图 3 和附录表 S1。

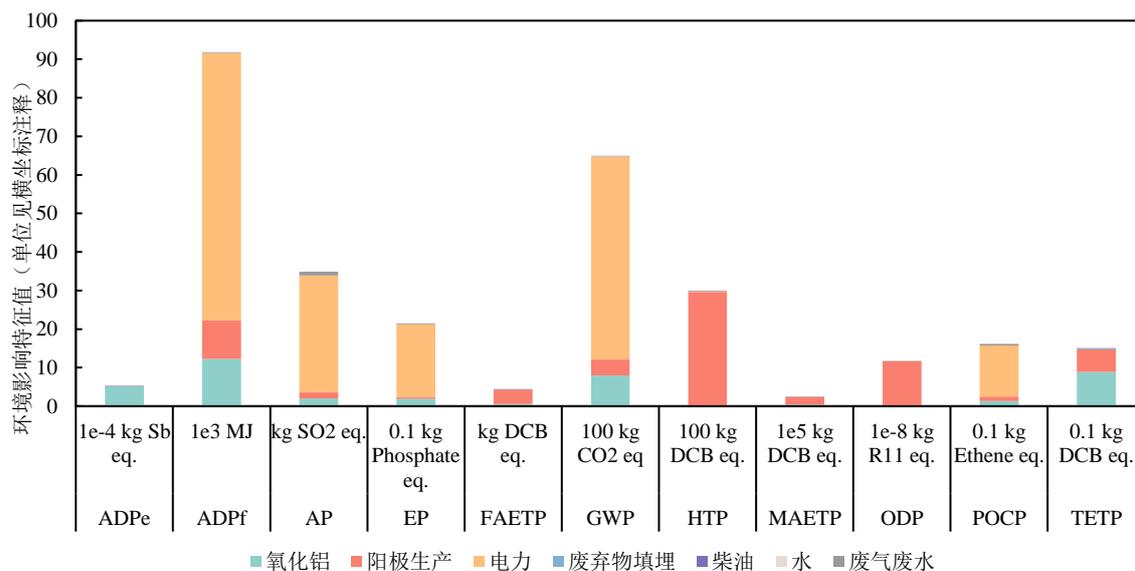


图 3 铝水生产阶段单元过程贡献

4.2.2 铝棒生产阶段

铝棒生产阶段中，除上游铝水生产外（GWP 约为 6484 kg CO₂ eq），铝锭在全球变暖潜势的影响占比最大，GWP 约为 1978 kg CO₂ eq。各单元过程的环境负荷贡献见图 4 和附录表 S2。

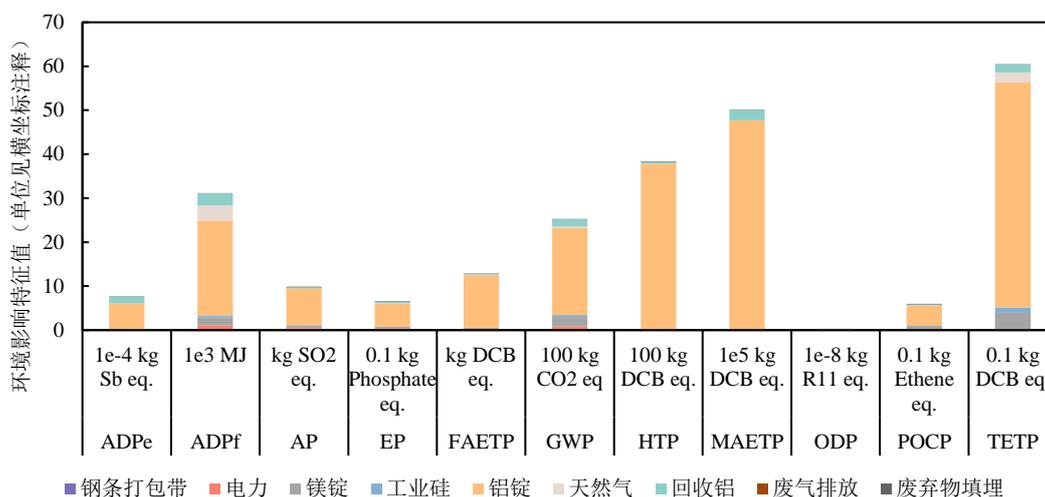


图 4 铝棒生产阶段单元过程贡献

4.2.2 铝压延阶段

铝压延阶段，除上游铝棒投入外（GWP 约为 9007 kg CO₂ eq），锻打钢料在全球变暖潜势的影响占比最大，GWP 约为 1897 kg CO₂ eq。各单元过程的环境负荷贡献见图 5 和附录表 S3。

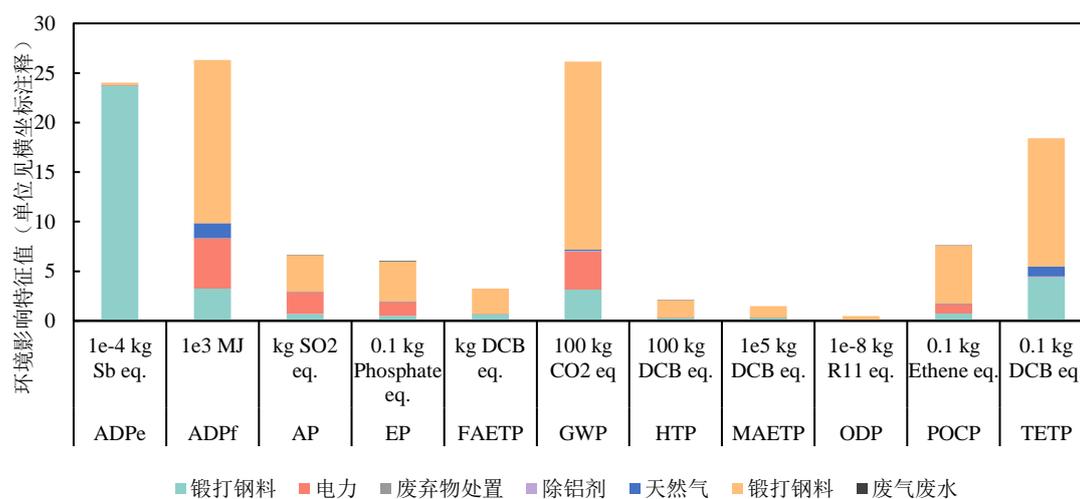


图 5 铝压延阶段单元过程贡献

5. LCA 结果解释

根据 ISO 14044: 2006 对生命周期解释的要求, 这个阶段主要包括: 主要问题的识别、完整性、灵敏度和一致性检查, 最后是结论、局限性和建议。

本研究采用 CML2001 - Aug. 2016 特征化模型方法, 对山东创新精密公司生产的铝合金型材的环境影响进行了分析, 包括 11 个影响类别: 非生物资源消耗, 元素、非生物资源消耗, 化石、酸化潜势、富营养化潜势、淡水水生生态毒性潜势、全球变暖潜势、人体毒性潜势、海洋水生生态毒性潜势、臭氧层消耗潜势、光化学臭氧生成潜势、陆地生态毒性潜势。图 2、图 3、图 4、图 5 显示了铝合金型材生产中各阶段环境影响占比和各阶段中主要单元过程造成的环境影响。

将各生产阶段从后向前拆分, 铝压延阶段造成环境影响的主要单元过程是铝棒, 其次为锻打钢料; 铝棒生产中, 铝锭和铝水为造成环境影响的主要单元过程; 铝水生产中, 电力投入在 GWP、ADPf、AP、EP、POCP 几类环境影响均中占到最主要贡献。预计增加废铝型材等回收铝使用、减少原生铝水、铝锭的使用、增加电解铝阶段可再生能源电力使用, 可能会显著的减少环境影响。

5.2.1 完整性

按照 ISO14044:2006 的要求, 实施了“从摇篮到大门”的完整性检查, 包括: 产品生命周期过程的完整性(从摇篮到大门);

—— 本研究界定的系统边界为“从摇篮到大门”。系统边界包括原材料阶段、产品制造阶段。研究的前景数据包括材料消耗和运输, 背景数据被设定为“从摇篮到大门”。生命周期模型和分析方法符合目标和范围定义中的系统边界。

是否包括产品的原材料和能量投入;

—— 根据表 3, 所收集的前景数据包括生产该产品所需的原材料、能源数据、材料的运输数据。原始数据的收集已经完成。

获得了重要的输出和固体废物数据。

—— 根据表 3, 本研究收集了大气污染物的数据。

此外, 固体废物可重复利用。由于缺乏数据, 本研究假设所有固体废弃物填埋处理。

根据完整性检查结果, 本研究的生命周期环境影响分析与确定的研究目标一

致，原始和辅料数据的收集完整。

5.2.2 敏感性分析

灵敏度分析的定义是通过确定 ISO 14044: 2006 对数据、分配方法、参数的计算的不确定性对最终结果和结论的影响来评估其可靠性，主要分析如下：前景数据引起的敏感性分析如表 7 所示。生产过程中减少 10% 的氧化铝、阳极碳块、铝水、铝锭、电力输入，可分别使全球变暖潜势减少 0.68%、0.35%、5.48%、1.69%、4.95%。其他环境影响同样由表可知。

表 7 主要贡献者的灵敏度分析

| | 氧化铝 | 阳极碳块 | 铝水 | 铝锭 | 电力 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 变化程度 | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% |
| 非生物资源消耗，元素 | 0.27% | 0.03% | 0.30% | 0.68% | 0.00% |
| 非生物资源消耗，化石 | 0% | -10% | -10% | 0% | 0.00% |
| 酸化潜势 | -0.39% | -0.29% | -6.79% | -1.63% | -6.59% |
| 富营养化潜势 | -0.57% | -0.14% | -6.27% | -1.53% | -6.20% |
| 淡水水生生态毒性潜势 | -0.28% | -1.76% | -2.08% | -5.62% | -0.01% |
| 全球变暖潜势 | -0.68% | -0.35% | -5.48% | -1.69% | -4.95% |
| 人体毒性潜势 | -0.03% | -4.19% | -4.25% | -5.35% | -0.04% |
| 海洋水生生态毒性潜势 | -0.08% | -0.37% | -0.45% | -8.79% | 0.00% |
| 臭氧层消耗潜势 | -0.04% | -9.37% | -9.42% | -0.13% | 0.00% |
| 光化学臭氧生成潜势 | -0.46% | -0.38% | -5.44% | -1.55% | -4.98% |
| 陆地生态毒性潜势 | -0.94% | -0.62% | -1.59% | -5.42% | 0.00% |

5.2.3 不确定性分析

参数的变化会带来环境影响的不确定性，为了评估参数变化对结果的不确定性，采用蒙特卡罗模拟方法，假设参数变化符合正态分布，进行 200 次模拟，确定了环境影响的范围。其中，考虑到电力由可再生能源发电和整体电网电力组成，实际生产过程中使用的电网电力数量波动范围可能较大，故电力参数的分布标准差设置为较大的 10%；铝棒生产阶段，考虑到废铝型材等回收铝材料的投入，输

入的原生铝水、铝锭参数分布标准差取较大为 5%；氧化铝、阳极、锻打钢料参数分布标准差设置为 2%，得到不确定性具体结果与详细分布如表 8 和图 6 所示，其中图 6 的 y 轴表示“每个环境影响类别位于此不确定性的随机参数组合的数量”，x 轴表示每个环境影响类别的不确定性百分比。由表 8 可知，考虑参数不确定性，全球变暖潜势 10%-90%分位数的范围区间为 [11871.5, 12690.2] kg CO₂ eq，平均值为 11871.5 kg CO₂ eq。其他环境影响类别的不确定性下的分布同样由表可知。

表 8 不确定性分析

| 影响类别 | 单位 | 均值 | 10%分位数 | 90%分位数 |
|------------|------------------------|----------|----------|----------|
| 非生物资源消耗，元素 | kg Sb eq. | 8.59E-05 | 8.34E-05 | 8.84E-05 |
| 非生物资源消耗，化石 | MJ | 0.16 | 0.15 | 0.17 |
| 酸化潜势 | kg SO ₂ eq. | 51.5 | 46.99 | 56.16 |
| 富营养化潜势 | kg Phosphate eq. | 3.41 | 3.13 | 3.7 |
| 淡水水生生态毒性潜势 | kg DCB eq. | 21.15 | 20.3 | 22.01 |
| 全球变暖潜势 | kg CO ₂ eq | 11871.5 | 11066.9 | 12690.2 |
| 人体毒性潜势 | kg DCB eq. | 7030.24 | 6721.72 | 7346.76 |
| 海洋水生生态毒性潜势 | kg DCB eq. | 5.41E+06 | 5.10E+06 | 5.72E+06 |
| 臭氧层消耗潜势 | kg R11 eq. | 1.24E-07 | 1.16E-07 | 1.31E-07 |
| 光化学臭氧生成潜势 | kg Ethene eq. | 2.97 | 2.77 | 3.18 |
| 陆地生态毒性潜势 | kg DCB eq. | 9.43 | 9.07 | 9.77 |

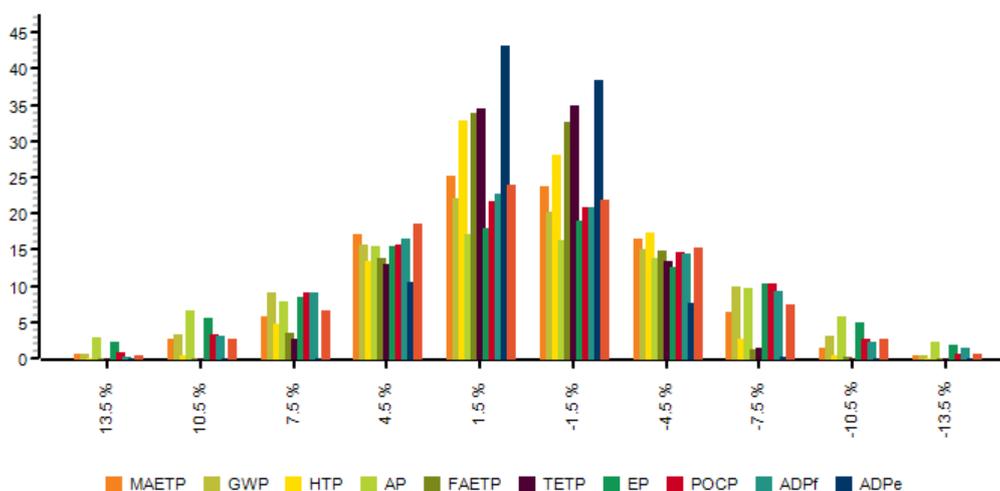


图 6 不确定性结果分布

5.2.4 一致性

按照 ISO14044:2006 标准的要求，应从以下几个方面进行一致性检查：

在目标和范围一致性上，根据表 2 提供的前景和背景数据，分析所用数据与研究的目标和范围一致。

区域和时间差异一致性上，在地理分布上，根据产品原材料来源调查，产品消费的主要原材料集中在中国，但由于数据库限制，研究对于电力、水、柴油运输、填埋处置等因子使用的数据集为中国地区，其余大多来自全球平均水平和欧洲平均水平，在地域代表性和实际代表性上存在着差异。在时间表示上，大部分数据集为 2023 年更新的平均数据，基本可以代表实际生产水平。

分配规则和系统边界上，背景数据的选取以 Gabi professional 数据集中类型为 agg（摇篮到门）的数据，部分采用 p-agg（部分摇篮到门）、u-so（仅生产工艺）类型的数据均对工艺内投入的物料和能源进行了追溯，整体分配和系统边界符合一致性要求。

评价模型上，本研究使用的影响评价模型为 CML2001 – Aug. 2016，它是一种适用于全球评价的广泛应用的科学模型。

6. 结论、限制和建议

6.1 结论

采用生命周期评价方法,对山东创新精密科技有限公司生产铝合金型材的生命周期环境影响进行了评价。功能单元为山东创新精密科技有限公司生产的 1 吨铝合金型材产品。产品的系统边界设置为“从摇篮到大门”。利用 CML2001 – Aug. 2016 特征化方法,从 11 个环境影响类别对生命周期评价进行了评价。

特征化结果表明,生产 1 吨铝合金型材产生的全球变暖潜势为 11702.8kg CO₂ eq, 其中,铝水生产阶段占比最显著,为 56.8%,细分到各阶段单元过程上,含铝原材料如铝水、铝棒、铝锭和生产消耗电力是环境影响的主要来源。灵敏度分析也表明了,生产过程中减少 10 %的铝水、铝锭、电力输入,可分别使全球变暖潜势减少 5.48%、1.69%、4.95%,对结果影响较大。同时分析中还考虑了输入变化引起的不确定性,对输入参数进行合理假设并进行蒙特卡洛分析,以表示结果的范围。

6.2 限制

本研究的主要局限性是:

系统边界:产品的使用和废弃阶段通常是 LCA 研究中要考虑的一个过程。本研究定义的系统边界为“从摇篮到大门”的生命周期阶段,不包括生命周期的使用和废弃阶段。铝锭的再利用是资源回收的必然过程,其再生过程也会产生一定的环境影响。由于数据不足,本研究假设固体废弃物的处置方式为填埋,需要增加研究数据。

数据完整性和准确性:数据集的代表性与实际情况有所不同,这也是未来研究需要改进的地方。由于数据的可获得性,部分背景数据采用全球其他地区数据而不是中国本地数据进行计算,可能会高估或低估环境影响。

6.3 建议

在本研究中,前景数据由山东创新精密科技有限公司的工作人员提供,数据

质量可靠。电力属性包括可再生能源发电与电网供电，可以保障数据的准确性。为了使研究数据更加准确，为企业、产品设计人员和第三方认证机构提供更加可靠、准确的数据信息，在今后的研究中有必要提高二手数据集的质量。产品的使用和寿命终点不包括在系统边界内，这在未来的研究中需要考虑。

当其他 LCA 研究需要本研究的 LCI 数据或生命周期结果时，研究者应联系山东创新精密科技有限公司，以确保数据和结果的正确使用。

附录

表 S1 铝水生产阶段的中点环境影响（所有数据均基于功能单元）

| 影响类别 | 单位 | Total | 氧化铝 | 阳极生产 | 电力 | 废弃物填埋 | 柴油 | 水 | 废气废水 |
|-------|------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ADPe | kg Sb eq. | 5.34E-04 | 5.2E-04 | 8.8E-06 | 0.0E+00 | 2.2E-07 | 3.9E-08 | 2.5E-07 | 0.0E+00 |
| ADPf | MJ | 9.18E+04 | 1.2E+04 | 1.0E+04 | 6.9E+04 | 1.0E+01 | 7.4E+01 | 3.4E+00 | 0.0E+00 |
| AP | kg SO ₂ eq. | 3.49E+01 | 2.0E+00 | 1.5E+00 | 3.0E+01 | 4.8E-03 | 3.1E-03 | 5.7E-04 | 9.8E-01 |
| EP | kg Phosphate eq. | 2.14E+00 | 1.9E-01 | 4.9E-02 | 1.9E+00 | 6.3E-04 | 3.2E-04 | 1.8E-04 | 2.9E-04 |
| FAETP | kg DCB eq. | 4.39E+00 | 5.9E-01 | 3.7E+00 | 1.7E-02 | 5.1E-03 | 4.1E-02 | 2.2E-03 | 0.0E+00 |
| GWP | kg CO ₂ eq. | 6.48E+03 | 8.0E+02 | 4.1E+02 | 5.3E+03 | 2.6E+00 | 6.5E-01 | 2.5E-01 | 0.0E+00 |
| HTP | kg DCB eq. | 2.99E+03 | 2.0E+01 | 2.9E+03 | 2.6E+01 | 4.0E-02 | 1.2E-01 | 1.9E-02 | 1.2E-01 |
| MAETP | kg DCB eq. | 2.41E+05 | 4.2E+04 | 2.0E+05 | 4.3E+01 | 1.6E+02 | 8.8E+01 | 1.6E+01 | 0.0E+00 |
| ODP | kg R11 eq. | 1.17E-07 | 5.4E-10 | 1.2E-07 | 3.1E-11 | 2.4E-12 | 3.7E-13 | 1.1E-12 | 0.0E+00 |
| POCP | kg Ethene eq. | 1.62E+00 | 1.4E-01 | 1.1E-01 | 1.3E+00 | 7.0E-04 | 4.5E-04 | 5.4E-05 | 3.9E-02 |
| TETP | kg DCB eq. | 1.50E+00 | 8.9E-01 | 5.9E-01 | 2.4E-03 | 2.0E-02 | 2.0E-03 | 2.1E-03 | 0.0E+00 |

表 S2 铝棒生产阶段的中点环境影响（所有数据均基于功能单元）

| 影响类别 | 单位 | Total | 钢条打包带 | 电力 | 镁锭 | 工业硅 | 铝锭 | 天然气 | 回收铝 | 废气排放 | 废弃物填埋 |
|-------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ADPe | kg Sb eq. | 7.6E-04 | 3.8E-06 | 0.0E+00 | 8.2E-06 | 2.6E-06 | 5.9E-04 | 2.8E-06 | 1.5E-04 | 0.0E+00 | 4.8E-08 |
| ADPf | MJ | 3.1E+04 | 5.0E+01 | 1.0E+03 | 1.8E+03 | 4.4E+02 | 2.2E+04 | 3.4E+03 | 2.7E+03 | 0.0E+00 | 4.3E+00 |
| AP | kg SO2 eq. | 9.8E+00 | 1.0E-02 | 4.5E-01 | 4.7E-01 | 1.3E-01 | 8.4E+00 | 4.6E-02 | 2.6E-01 | 7.5E-02 | 1.1E-03 |
| EP | kg Phosphate eq. | 6.6E-01 | 7.2E-04 | 2.8E-02 | 4.3E-02 | 1.3E-02 | 5.2E-01 | 8.3E-03 | 3.1E-02 | 1.2E-02 | 1.5E-04 |
| FAETP | kg DCB eq. | 1.3E+01 | 3.0E-03 | 2.5E-04 | 5.0E-01 | 1.0E-01 | 1.2E+01 | 5.7E-02 | 3.1E-01 | 0.0E+00 | 2.2E-03 |
| GWP | kg CO2 eq | 2.5E+03 | 4.3E+00 | 7.8E+01 | 2.2E+02 | 4.0E+01 | 2.0E+03 | 3.1E+01 | 1.7E+02 | 0.0E+00 | 7.0E-01 |
| HTP | kg DCB eq. | 3.8E+03 | 1.7E-01 | 3.9E-01 | 2.2E+01 | 3.3E+00 | 3.8E+03 | 2.1E+00 | 3.9E+01 | 1.3E-01 | 1.2E-02 |
| MAETP | kg DCB eq. | 5.0E+06 | 2.7E+02 | 6.3E-01 | 1.7E+04 | 5.3E+03 | 4.7E+06 | 1.1E+03 | 2.4E+05 | 0.0E+00 | 3.7E+01 |
| ODP | kg R11 eq. | 2.3E-09 | 4.5E-15 | 4.6E-13 | 5.6E-10 | 1.8E-10 | 1.6E-09 | 8.6E-12 | 1.3E-13 | 0.0E+00 | 5.2E-13 |
| POCP | kg Ethene eq. | 5.9E-01 | 1.7E-03 | 2.0E-02 | 5.2E-02 | 2.0E-02 | 4.6E-01 | 8.7E-03 | 2.3E-02 | 3.7E-03 | 1.5E-04 |
| TETP | kg DCB eq. | 6.0E+00 | 3.3E-04 | 3.6E-05 | 4.0E-01 | 1.2E-01 | 5.1E+00 | 2.3E-01 | 1.9E-01 | 0.0E+00 | 4.3E-03 |

表 S3 铝合金型材生产阶段的中点环境影响（所有数据均基于功能单元）

| 影响类别 | 单位 | Total | 锻打钢料 | 电力 | 废弃物处置 | 除铝剂 | 天然气 | 锻打钢料 | 废气废水 |
|------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ADPe | kg Sb eq. | 2.4E-03 | 2.4E-03 | 0.0E+00 | 3.0E-07 | 4.4E-08 | 1.2E-06 | 2.7E-05 | 0.0E+00 |

| | | | | | | | | | |
|-------|---------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| ADPf | MJ | 2.6E+04 | 3.3E+03 | 5.1E+03 | 2.4E+01 | 1.3E+01 | 1.5E+03 | 1.6E+04 | 0.0E+00 |
| AP | kg SO2 eq. | 6.6E+00 | 6.9E-01 | 2.2E+00 | 3.2E-03 | 6.3E-04 | 2.0E-02 | 3.7E+00 | 2.9E-02 |
| EP | kg Phosphate eq. | 6.0E-01 | 5.0E-02 | 1.4E-01 | 4.0E-04 | 1.4E-04 | 3.6E-03 | 4.0E-01 | 7.5E-03 |
| FAETP | kg DCB eq. | 3.3E+00 | 6.3E-01 | 1.2E-03 | 3.8E-03 | 8.0E-04 | 2.5E-02 | 2.6E+00 | 0.0E+00 |
| GWP | kg CO2 eq | 2.6E+03 | 3.2E+02 | 3.8E+02 | 1.9E+00 | 3.0E+00 | 1.3E+01 | 1.9E+03 | 0.0E+00 |
| HTP | kg DCB eq. | 2.1E+02 | 3.0E+01 | 1.9E+00 | 7.5E-02 | 1.3E-02 | 9.2E-01 | 1.8E+02 | 8.7E-02 |
| MAETP | kg DCB eq. | 1.5E+05 | 3.1E+04 | 3.1E+00 | 1.9E+02 | 2.7E+01 | 4.8E+02 | 1.2E+05 | 0.0E+00 |
| ODP | kg R11 eq. | 4.9E-09 | 4.6E-13 | 2.3E-12 | 2.9E-11 | 4.2E-12 | 3.8E-12 | 4.9E-09 | 0.0E+00 |
| POCP | kg Ethene eq. | 7.6E-01 | 7.4E-02 | 9.7E-02 | 2.4E-04 | -2.9E-06 | 3.8E-03 | 5.8E-01 | 1.6E-03 |
| TETP | kg DCB eq. | 1.8E+00 | 4.4E-01 | 1.8E-04 | 1.6E-03 | 8.1E-03 | 1.0E-01 | 1.3E+00 | 0.0E+00 |