

变形铝合金圆铸锭 生命周期评价报告

报告编号： CTISC-SW-CBN-202502011-18

制造商名称： 云南云铝润鑫铝业有限公司

云南文山铝业有限公司

云南云铝海鑫铝业有限公司

云南云铝泽鑫铝业有限公司

报告编写方： 华测认证有限公司

签发日期： 2025年5月7日

目录

| | |
|---------------------------|----|
| 1 基本信息 | 1 |
| 1.1 报告信息 | 1 |
| 1.2 客户信息 | 1 |
| 1.3 评估对象 | 1 |
| 1.4 采用的标准信息 | 1 |
| 2 生命周期评价对象及工具 | 2 |
| 2.1 评价对象概述 | 2 |
| 2.2 声明单位选择 | 2 |
| 2.3 系统边界说明 | 2 |
| 2.4 评价工具 | 3 |
| 3 生命周期清单分析 | 3 |
| 3.1 数据来源 | 3 |
| 3.2 数据质量 | 4 |
| 3.3 分配 | 5 |
| 3.4 云南云铝润鑫铝业有限公司生命周期阶段及清单 | 5 |
| 3.5 云南文山铝业生命周期阶段及清单 | 7 |
| 3.6 云南云铝海鑫铝业有限公司生命周期阶段及清单 | 9 |
| 3.7 云南云铝泽鑫铝业有限公司生命周期阶段及清单 | 11 |
| 4 生命周期影响评价 | 13 |
| 4.1 云南云铝润鑫铝业有限公司生命周期影响评价 | 13 |
| 4.2 云南文山铝业有限公司生命周期影响评价 | 17 |
| 4.3 云南云铝海鑫铝业有限公司生命周期影响评价 | 20 |
| 4.4 云南云铝泽鑫铝业有限公司生命周期影响评价 | 23 |
| 5 绿色设计改进方案 | 26 |
| 6 结论 | 27 |

7 参考文献.....28

云南铝业股份有限公司

1 基本信息

1.1 报告信息

| | |
|------|-----------|
| 编制人员 | 金婵 |
| 审核人员 | 陈绣文 |
| 发布日期 | 2025年5月7日 |

1.2 客户信息

| | |
|--------|--------------|
| 公司全称 | 云南云铝润鑫铝业有限公司 |
| | 云南文山铝业有限公司 |
| | 云南云铝海鑫铝业有限公司 |
| | 云南云铝泽鑫铝业有限公司 |
| 申请评价产品 | 变形铝合金圆铸锭 |

1.3 评估对象

本报告评估的对象为由云南云铝润鑫铝业有限公司、云南文山铝业有限公司、云南云铝海鑫铝业有限公司、云南云铝泽鑫铝业有限公司生产的产品：变形铝合金圆铸锭。鉴于上述企业同属云铝股份有限公司，且生产工艺、原材料、质量控制体系等核心技术要素层面具有一致性，因此为提升评估效率、确保评估标准的统一性和评估结果的可比性，将各公司产品的评估内容合并编制于本报告之中。

1.4 采用的标准信息

ISO 14040-Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework

ISO 14044-Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines

2 生命周期评价对象及工具

2.1 评价对象概述

本报告评估对象为云铝股份有限公司控股的云南云铝润鑫铝业有限公司、云南文山铝业有限公司、云南云铝海鑫铝业有限公司、云南云铝泽鑫铝业有限公司各子公司生产的“变形铝合金圆铸锭”。变形铝合金圆铸锭通过电解铝液对前置炉内添加的高熔点钛剂、铜剂等进行冲刷搅拌至熔炼炉。用天然气升温，根据产品牌号要求进行配料，用氮气或者氩气将精炼剂通入熔体底部进行搅拌、除气及熔体净化后取样分析。取样分析各项指标及化学成分达到要求后，经过滤板过滤后进入模盘，通过深井铸造的方式铸造成合金棒。通过剪切机剪切成一定长度的圆棒，通过喷码、堆垛、打捆、检验后入库并销售。

2.2 声明单位选择

LCA 分析中，声明单位是对产品系统中输出功能的度量。声明单位的基本作用是在进行 LCA 分析时为软件提供一个统一计量输入和输出的基准。本报告以 1 t 变形铝合金圆铸锭作为评价的声明单位。

2.3 系统边界说明

变形铝合金圆铸锭产品生命周期系统边界包括两个阶段：原材料生产与获取阶段、产品生产阶段。系统边界如图 1 所示：

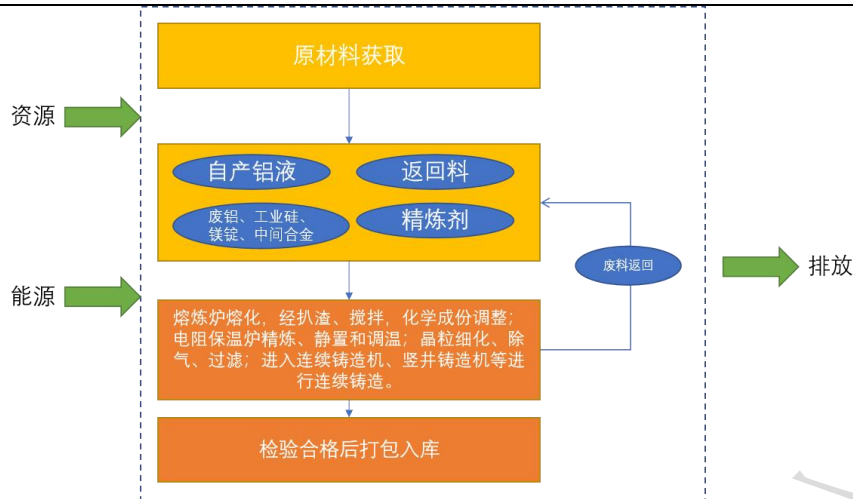


图 1 变形铝合金圆铸锭生命周期系统边界

2.4 评价工具

本报告采用 SimaPro（版本：10.1）软件进行产品生命周期环境影响评价。

3 生命周期清单分析

3.1 数据来源

本报告将以下要素纳入数据清单：

1. 原材料生产与获取
2. 产品生产

本报告的现场数据由云南云铝润鑫铝业有限公司、云南文山铝业有限公司、云南云铝海鑫铝业有限公司、云南云铝泽鑫铝业有限公司根据实际生产情况提供，主要包括生产过程的能源与水消耗、产品原材料的使用量、产品原料、运输距离等数据。

本报告的背景数据包括主要原料的生产数据、权威的电力碳足迹因子数据、不同运输类型造成的环境影响数据，本报告的背景数据来源于 Ecoinvent 3.10 数据库中适用于中国区域和全球的数据。

3.2 数据质量

本次评价过程中所输入的现场数据的时间范围为：2024年1月1日—2024年12月31日。背景数据来源于 Ecoinvent 3.10 数据库中适用于中国区域和全球的最新数据。

3.2.1 本报告未考虑的过程

一般而言，本报告应包括分析系统的所有过程和流程。如果发现个别物质流或能量流对特定过程的生态影响不重要，出于实际原因，可以将其排除在外，并报告为未考虑的过程。

本报告设定的实质性门槛是 5%，其中单个物质流或能量流的排除门槛是 1%，且总排除量不超过总体影响的 5%。就某些可能产生环境影响的过程，在出现以下情况时，对应的过程将会被排除。

- (1) 技术上无适当核算及量化方法；
- (2) 虽然量化过程可行但不符合经济效益，且生态影响占总体影响的比例小于 1%。

本报告排除的过程包括：

云南云铝润鑫铝业有限公司：

(1) 未考虑部分道路和工厂等基础设施、生产设备和生活设施的建设过程，员工通勤和差旅过程等产生的排放；

(2) 未考虑部分重量小于 0.1% 的原材料即铁剂、锰剂、钛剂、阴极铜、圆杆以及合金毛坯料（厂内循环利用）。

云南文山铝业有限公司

(1) 未考虑部分道路和工厂等基础设施、生产设备和生活设施的建设过程，员工通勤和差旅过程等产生的排放。

(2) 未考虑部分重量小于 0.1% 的原材料即产品标签、钛剂、铜剂、氧气、乙炔焊接

气体。

云南云铝海鑫铝业有限公司：

(1) 未考虑部分道路和工厂等基础设施、生产设备和生活设施的建设过程，员工通勤和差旅过程等产生的排放；

(2) 由于产品标签用量极少，因此未考虑产品出厂时标签使用情况；

(3) 由于维修过程中使用的氧气、乙炔等气体用量极少，因此未考虑该类焊接气体的使用情况。

云南云铝泽鑫铝业有限公司：

(1) 未考虑部分道路和工厂等基础设施、生产设备和生活设施的建设过程，员工通勤和差旅过程等产生的排放；

(2) 由于产品标签用量极少，因此未考虑产品出厂时标签使用情况；

(3) 由于维修过程中使用的氧气、乙炔等气体用量极少，因此未考虑该类焊接气体的使用情况。

3.3 分配

云南云铝润鑫铝业有限公司、云南文山铝业有限公司、云南云铝海鑫铝业有限公司、云南云铝泽鑫铝业有限公司生产多种产品，生产使用的原辅材料有单独计量，不涉及分配；生产过程中主要生产系统的各项能源消耗有单独计量，不涉及分配。由于公司生产的多种产品共用辅助生产系统，公辅系统的耗电量通过产品主要生产系统与全厂的用能比例进行分配。

3.4 云南云铝润鑫铝业有限公司生命周期阶段

云南云铝润鑫铝业有限公司的变形铝合金圆铸锭的生产过程包括电解铝生产和变形铝合金圆铸锭铸造。

3.4.1.1 生产阶段

铝电解的生产工艺流程图如下所示。

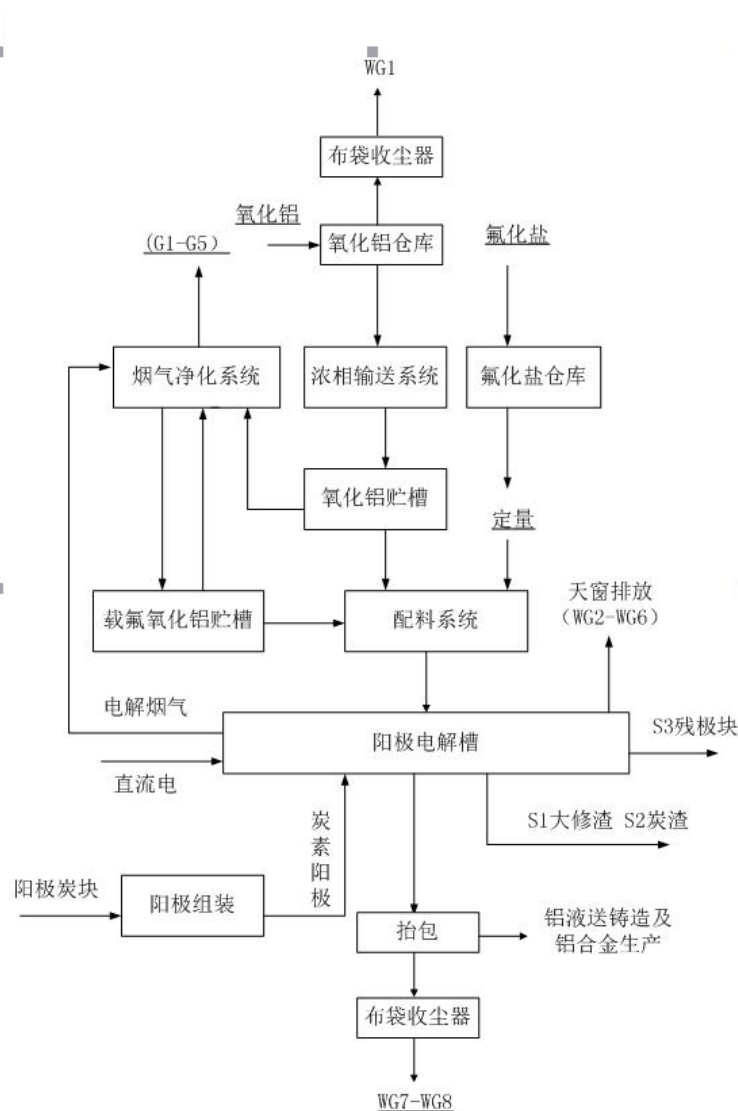


图 2 电解铝液生产工艺流程图

电解铝液生产过程中的排放主要来源于以下几个方面：①阳极作为原材料消耗会排放 CO_2 ；②随着阳极的消耗，阳极效应导致 PFCs 即四氟化碳 (CF_4) 和六氟化二碳 (C_2F_6) 的排放；③烟气脱硫使用石灰石、纯碱等碳酸盐作为脱硫剂，使用过程中碳酸盐分解所产生的二氧化碳排放；④厂内运输使用的柴油燃烧以及生产过程中使用的外购电力产生的排放；⑤生产过程中产生的各类固体废弃物的处理工序所产生的排放。电解铝液生产过程中主要使用外购电力、天然气和柴油。

3.4.2 变形铝合金圆铸锭铸造

3.4.2.1 生产阶段

变形铝合金圆铸锭铸造的生产工艺流程图如下所示。

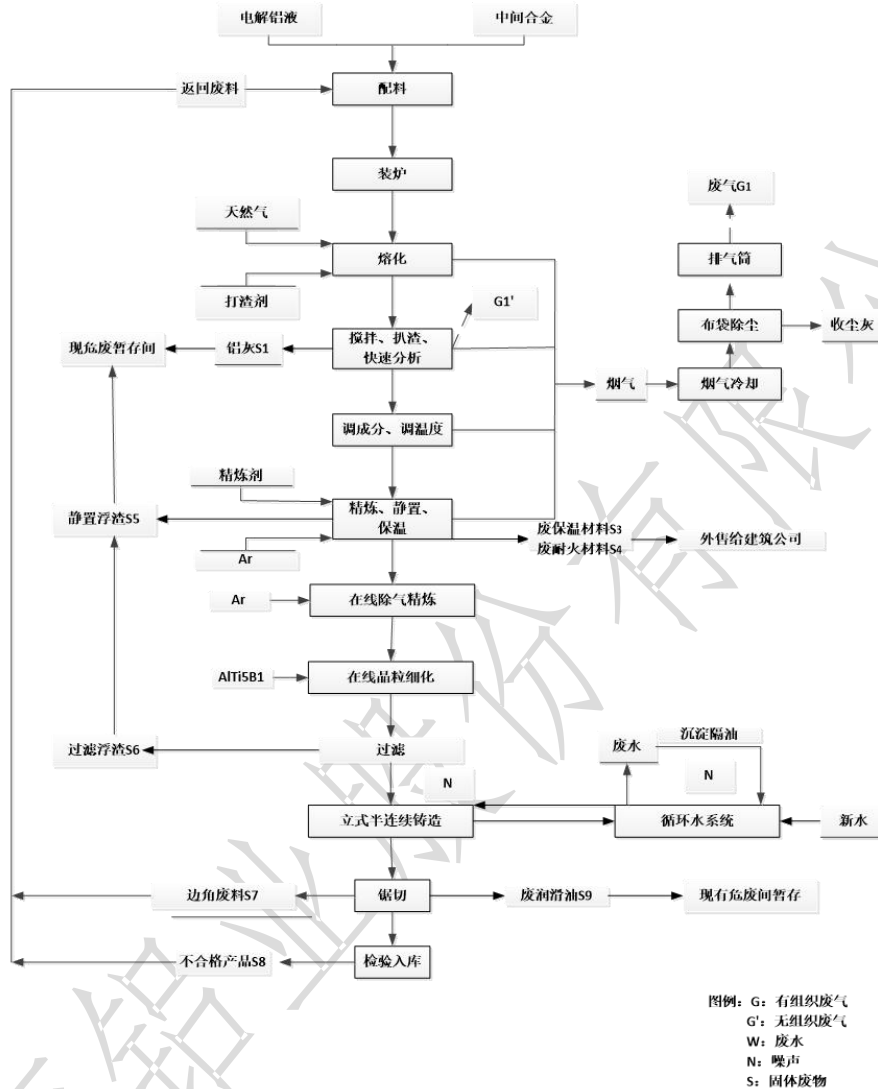


图 3 变形铝合金圆铸锭铸造生产工艺流程图

3.5 云南文山铝业生命周期阶段

云南文山铝业有限公司的变形铝合金圆铸锭的生产过程包括电解铝生产和变形铝合金圆铸锭铸造。

3.5.1 铝电解生产

3.5.1.1 生产阶段

铝电解的生产工艺流程图如下所示。

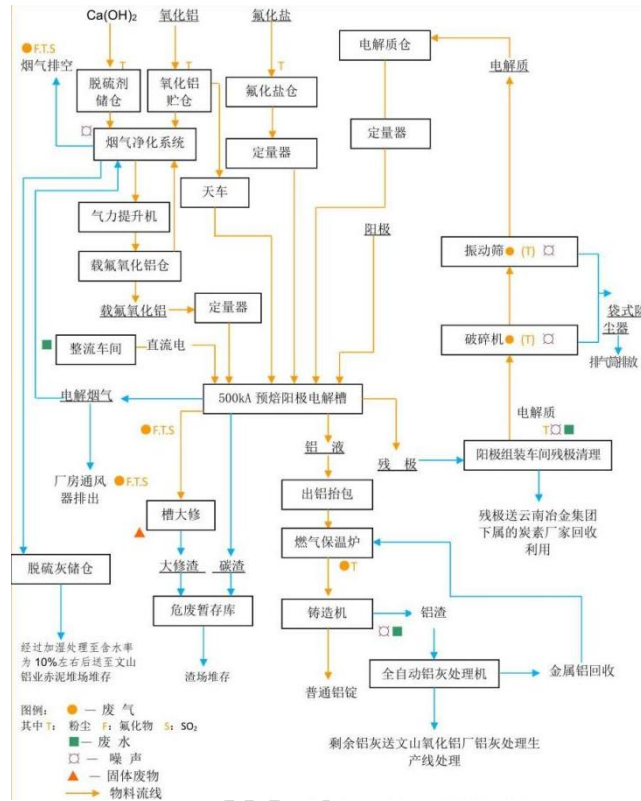


图 4 电解铝液生产工艺流程图

电解铝液生产过程包括阳极作为原材料的排放、阳极效应 PFC 排放及碳酸盐的使用释放温室气体，同时生产过程使用电力、柴油，产生工业垃圾并委外处理。

3.5.2 变形铝合金圆铸锭铸造

3.5.2.1 生产阶段

变形铝合金圆铸锭铸造的生产工艺流程图如下所示。

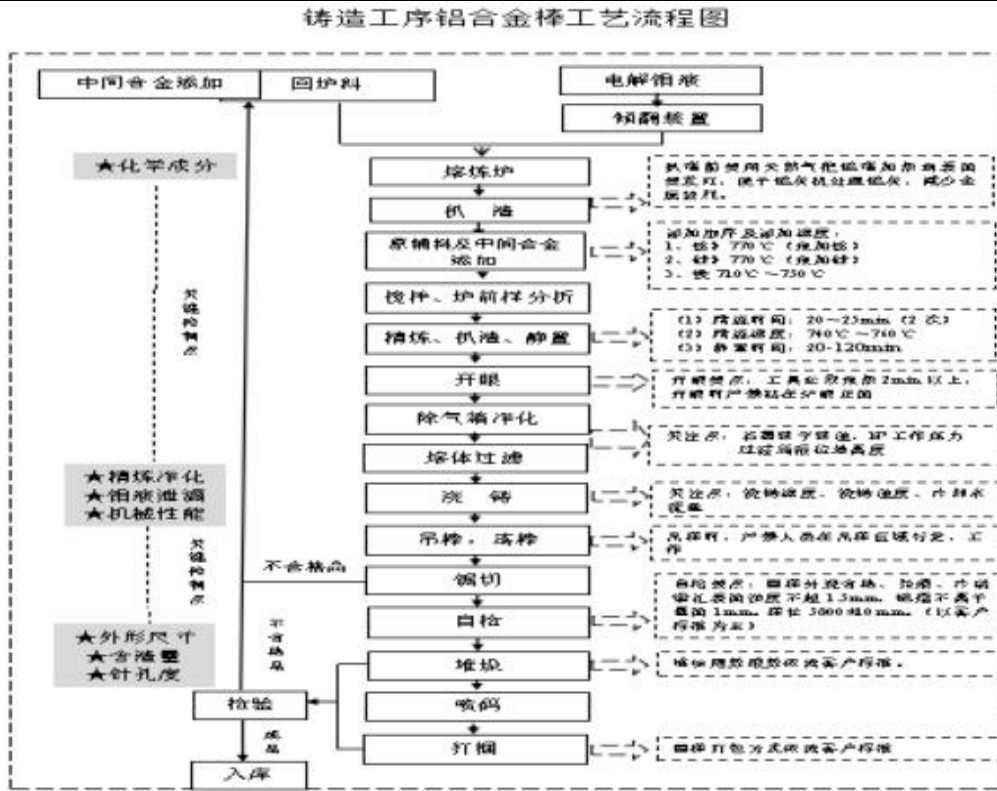


图 5 变形铝合金圆铸锭铸造生产工艺流程图

变形铝合金圆铸锭铸造的生产过程中使用电力、天然气、柴油，产生工业垃圾并委外处理。

3.6 云南云铝海鑫铝业有限公司生命周期阶段

云南云铝海鑫铝业有限公司的变形铝合金圆铸锭的生产过程包括电解铝生产和变形铝合金圆铸锭铸造。

3.6.1 铝电解生产

3.6.1.1 生产阶段

铝电解的生产工艺流程图如下所示。

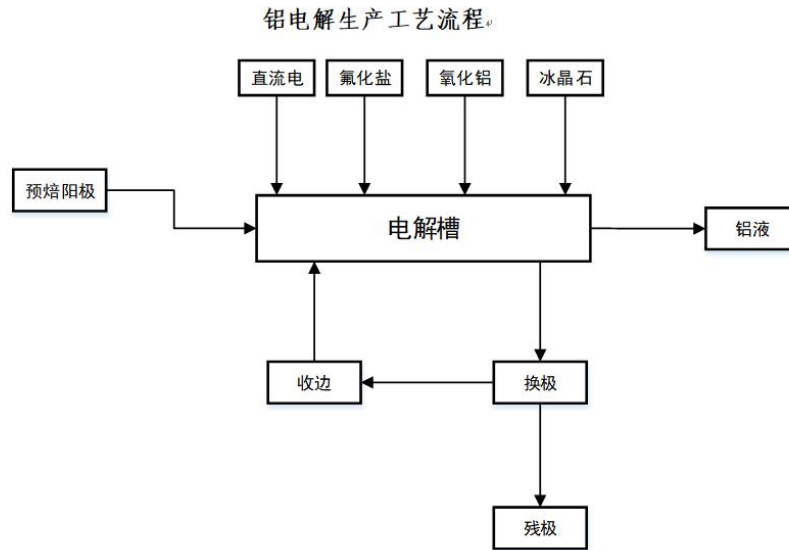


图 6 电解铝液生产工艺流程图

电解铝液生产过程中的排放主要来源于以下几个方面：①阳极作为原材料消耗会排放 CO_2 ；②随着阳极的消耗，阳极效应导致 PFCs 即四氟化碳 (CF_4) 和六氟化二碳 (C_2F_6) 的排放；③烟气脱硫使用石灰石、纯碱等碳酸盐作为脱硫剂，使用过程中碳酸盐分解所产生的二氧化碳排放；④生产过程中使用的电力和天然气产生的排放；⑤生产过程中产生的各类固体废弃物外送运输以及后续采取不同处理方式（填埋/焚烧/回收）所产生的排放，

3.6.2 变形铝合金圆铸锭铸造

3.6.2.1 生产阶段

变形铝合金圆铸锭铸造的生产工艺流程图如下所示。

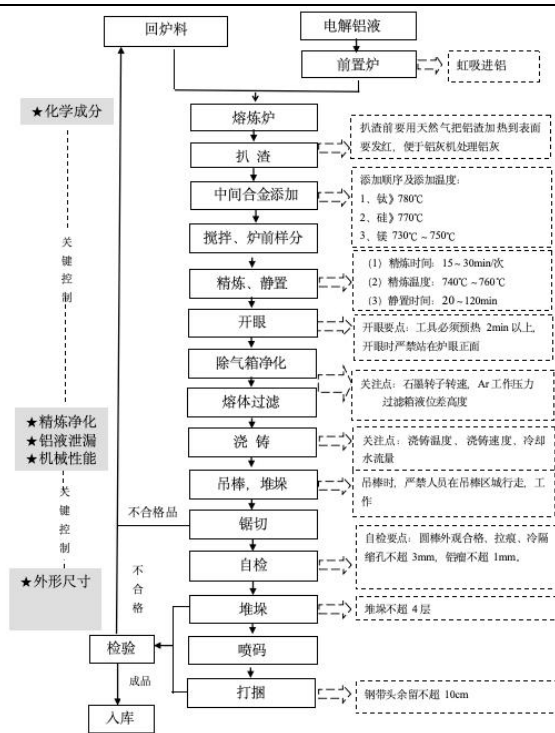


图 7 变形铝合金圆铸锭铸造生产工艺流程图

变形铝合金圆铸锭的生产过程排放主要来源于以下几个方面：①厂内运输使用的柴油燃烧产生的排放；②生产过程中使用的电力、天然气燃烧产生的排放；③生产过程中产生的各类固体废弃物外送运输以及后续采取不同处理方式（填埋/焚烧/回收）所产生的排放。

3.7 云南云铝泽鑫铝业有限公司生命周期阶段

云南云铝泽鑫铝业有限公司的变形铝合金圆铸锭的生产过程包括电解铝生产和变形铝合金圆铸锭铸造。

3.7.1 铝电解生产

3.7.1.1 生产阶段

铝电解的生产工艺流程图如下所示。

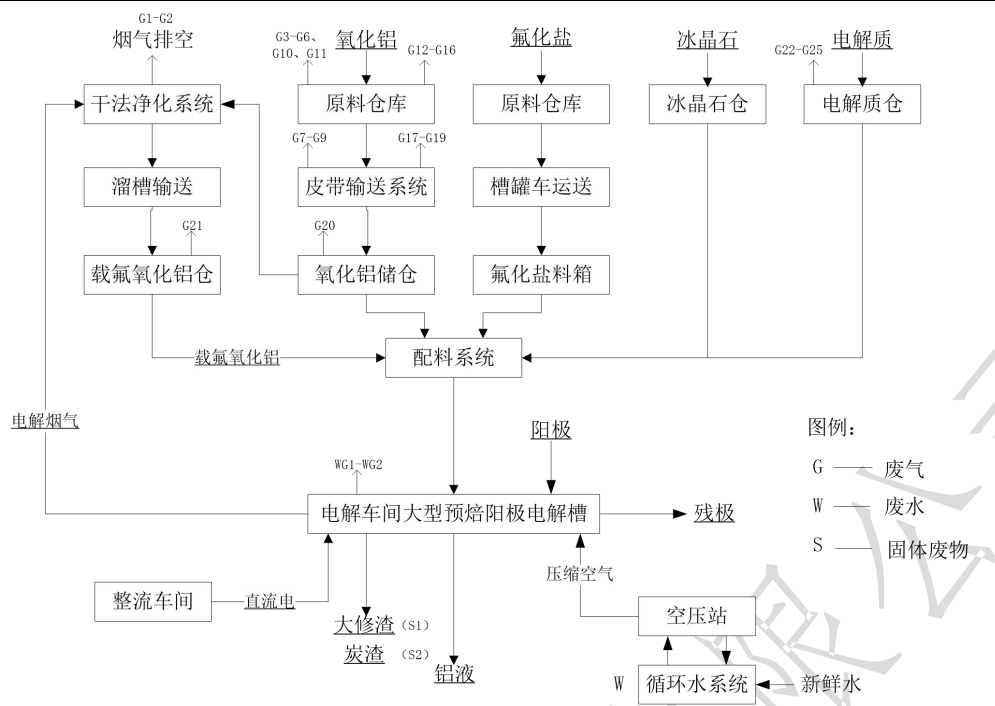


图 8 电解铝液生产工艺流程图

电解铝液生产过程中的排放主要来源于以下几个方面：①阳极作为原材料消耗会排放CO₂；②随着阳极的消耗，阳极效应导致 PFCs 即四氟化碳（CF₄）和六氟化二碳（C₂F₆）的排放；③烟气脱硫使用石灰石、纯碱等碳酸盐作为脱硫剂，使用过程中碳酸盐分解所产生的二氧化碳排放；④生产过程中使用的电力和天然气产生的排放；⑤生产过程中产生的各类固体废弃物外送运输以及后续采取不同处理方式（填埋/焚烧/回收）所产生的排放。

3.7.2 变形铝合金圆铸锭铸造

3.7.2.1 生产阶段

变形铝合金圆铸锭铸造的生产工艺流程图如下所示。

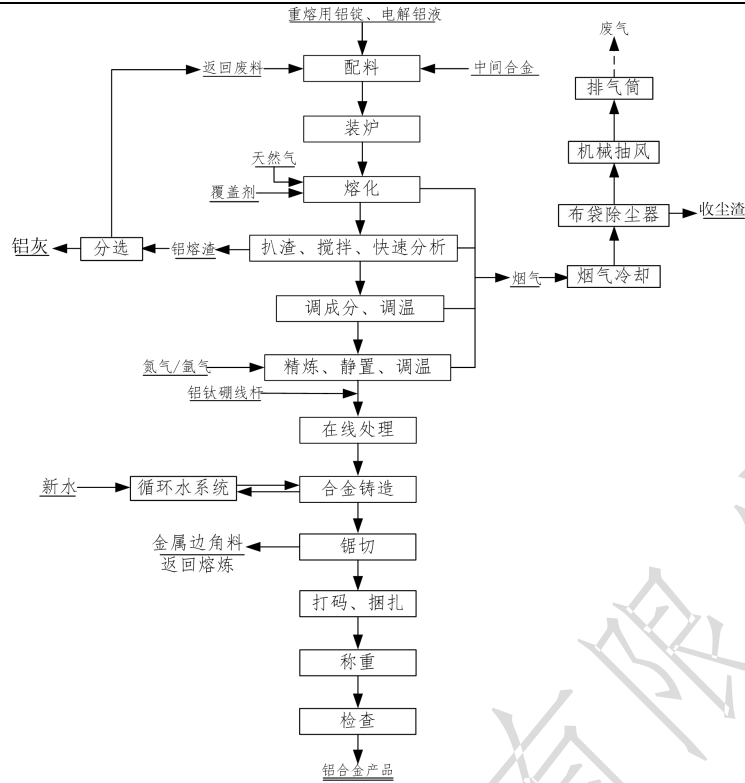


图 9 变形铝合金圆铸锭铸造生产工艺流程图

变形铝合金圆铸锭的生产过程排放主要来源于以下几个方面：①厂内运输使用的柴油燃烧产生的排放；②生产过程中使用的电力、天然气燃烧产生的排放；③生产过程中产生的各类固体废弃物外送运输以及后续采取不同处理方式（填埋/焚烧/回收）所产生的排放。

4 生命周期影响评价

4.1 云南云铝润鑫铝业有限公司生命周期影响评价

4.1.1 综合评价结果

本报告采用 SimaPro（版本：10.1）软件进行产品生命周期环境影响评价。基于上述产品生命周期输入输出分析，构建原材料生产与获取、产品生产 2 个生命周期阶段模型；采用 CML-IA baseline V3.10/World 2000 评价方法对产品全生命周期环境影响进行评价计算。由于电解和铸锭工序均在同一厂区进行，为分析各类流（物质流、能量流）输入输出更为清晰，故将电解工序与铸锭工序统一进行过程分析。对 11 种环境影响类型进行考察，

包括资源耗竭 (Abiotic depletion)、化石能源资源耗竭 (Abiotic depletion, fossil fuels)、全球变暖 (Global Warming, GW100a)、臭氧层损耗 (Ozone layer depletion, ODP)、人类毒性 (Human toxicity)、淡水生态毒性 (Fresh water aquatic ecotox)、海洋生态毒性 (Marine aquatic ecotoxicity)、陆地生态毒性 (Terrestrial ecotoxicity)、光化学氧化 (Photochemical oxidation)、酸化 (Acidification)、富营养化 (Eutrophication)。具体评价结果如表所示。声明单位为 1 t。

表 1 生命周期影响评价结果

| 影响类型 | 单位 | 总计 | 原材料生产与获取 | 产品生产 |
|----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| 海洋生态系统 | kg 1,4-DB eq | 22015939 | 11537630 | 10478310 |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 91028.99 | 48424.63 | 42604.36 |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB eq | 23181.68 | 13773.37 | 9408.30 |
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 13004.99 | 8035.14 | 4969.85 |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 6190.48 | 2910.01 | 3280.46 |
| 陆地生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 127.51 | 83.89 | 43.62 |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 44.27 | 15.70 | 28.57 |
| 富营养化 | kg PO ₄ ³⁻ eq | 12.63 | 4.56 | 8.068 |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 1.84 | 0.74 | 1.10 |
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 0.05 | 0.00 | 0.04 |
| 臭氧层损耗 | kg CFC-11 eq | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

下图展示了变形铝合金圆铸锭在产品生命周期各阶段的贡献(S1 代表原材料生产与获取阶段、S2 代表产品生产阶段)：

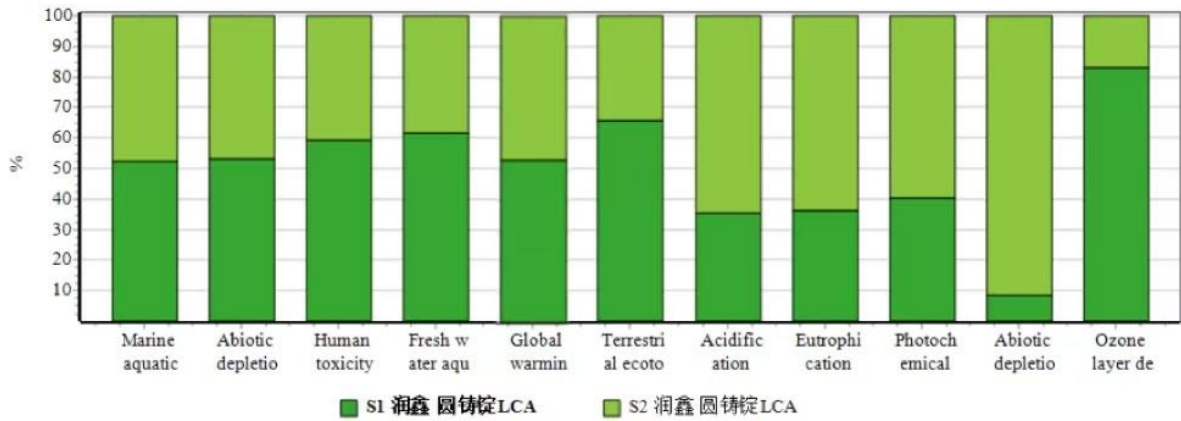


图 10 变形铝合金圆铸锭产品生命周期阶段分析

从图中可以看出，变形铝合金圆铸锭产品在臭氧层损耗、淡水生态毒性、陆地生态毒性等方面原材料生产与获取阶段贡献较大，在资源耗竭、光化学氧化、酸化、富营养化方面产品生产阶段贡献较大，其余过程（全球变暖、化石能源资源耗竭、人类毒性、海洋生态毒性）等阶段贡献差距较小。

4.1.2 敏感性分析

对 11 个评价指标的各自最大影响因素进行敏感性分析，以描述对云铝润鑫变形铝合金圆铸锭 LCA 结果的影响。调整的重点是排放水平，最小和最大范围为 ± 10%。1t 变形铝合金圆铸锭的敏感性分析结果如下。

表 2 对 1t 变形铝合金圆铸锭的敏感性分析

| 参数 | 单位 | 影响因素 | 基准线 - 年平均水平 | 最小值 | 偏差 | 最大值 | 偏差 |
|----------|-----------------------|------|-------------|------------|--------|------------|-------|
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 电力 | 0.0524 | 0.0476 | -9.16% | 0.0571 | 9.16% |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 电力 | 91028.998 | 86768.8610 | -4.68% | 95289.1338 | 4.68% |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 铝液 | 6190.48 | 5975.328 | -3.48% | 6405.612 | 3.48% |
| 臭氧层损耗 | kg CFC-11 eq | 氧化铝 | 8.99E-05 | 8.41E-05 | -6.38% | 9.56E-05 | 6.38% |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB | 电力 | 23181.684 | 22240.9378 | -4.06% | 24122.4297 | 4.06% |

| 参数 | 单位 | 影响因素 | 基准线 - 年平均水平 | 最小值 | 偏差 | 最大值 | 偏差 |
|--------|--------------------------------------|------|-------------|-------------|--------|-------------|--------|
| | eq | | | | | | |
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 氧化铝 | 13004.995 | 12280.28969 | -5.57% | 13729.70035 | 5.57% |
| 海洋生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 22015939 | 20968139.43 | -4.76% | 23063739.03 | -4.76% |
| 陆地生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 127.518 | 123.156409 | -3.42% | 131.8795984 | 3.42% |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 电力 | 1.8500 | 1.7355 | -5.99% | 1.9566 | 5.99% |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 电力 | 44.2770 | 41.4194 | -6.45% | 47.1346 | 6.45% |
| 富营养化 | kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq | 电力 | 12.6308 | 11.8240 | -6.39% | 13.4376 | 6.39% |

4.1.3 不确定性分析

本报告中 LCA 评价结果的不确定性使用 SimaPro 中的“蒙特卡罗分析”功能量化(95% 置信区间)，分析结果如表所示。

表 3 不确定性分析

| 影响类型 | 平均数 | 中值 | SD | 2.50% | 97.50% |
|----------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 资源耗竭 | 22015939.0000 | 20813904.0532 | 6528634.8699 | 13755371.2223 | 38498901.8093 |
| 化石能源资源耗竭 | 91028.9980 | 86923.8837 | 20111.7115 | 65176.1620 | 141814.5756 |
| 全球变暖 | 23181.6840 | 21849.4761 | 8370.3169 | 10819.3368 | 44691.1595 |
| 臭氧层损耗 | 13004.9950 | 11586.5105 | 5899.6225 | 6643.2375 | 28454.6178 |
| 人类毒性 | 6190.4800 | 6175.3842 | 465.4960 | 5324.3143 | 7182.3358 |
| 淡水生态毒性 | 127.5180 | 124.0780 | 591.1801 | -1027.1867 | 1317.9998 |
| 海洋生态毒性 | 44.2770 | 43.5602 | 5.1425 | 35.8487 | 56.0270 |
| 陆地生态毒性 | 12.6308 | 12.0369 | 3.2481 | 8.3403 | 20.1742 |
| 光化学氧化 | 1.8461 | 1.8240 | 0.2133 | 1.4885 | 2.3326 |
| 酸化 | 0.0524 | 0.0490 | 0.0186 | 0.0267 | 0.0981 |
| 富营养化 | 8.99E-5 | 1.0049 | 2.0097 | 4.0193 | 5.0241 |

4.2 云南文山铝业有限公司生命周期影响评价

4.2.1 综合评价结果

本报告采用 SimaPro（版本：10.1）软件进行产品生命周期环境影响评价。基于上述产品生命周期输入输出分析，构建原材料生产与获取、产品生产 2 个生命周期阶段模型；采用 CML-IA baseline V3.10/World 2000 评价方法对产品全生命周期环境影响进行评价计算。由于电解和铸锭工序均在同一厂区进行，为分析各类流（物质流、能量流）输入输出更为清晰，故将电解工序与铸锭工序统一进行过程分析。对 11 种环境影响类型进行考察，包括资源耗竭（Abiotic depletion）、化石能源资源耗竭（Abiotic depletion, fossil fuels）、全球变暖（Global Warming, GW100a）、臭氧层损耗（Ozone layer depletion, ODP）、人类毒性（Human toxicity）、淡水生态毒性（Fresh water aquatic ecotox）、海洋生态毒性（Marine aquatic ecotoxicity）、陆地生态毒性（Terrestrial ecotoxicity）、光化学氧化（Photochemical oxidation）、酸化（Acidification）、富营养化（Eutrophication）。具体评价结果如表所示。声明单位为 1 t。

表 4 生命周期影响评价结果

| 影响类型 | 单位 | 总计 | 原材料生产与获取 | 产品生产 |
|----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 0.055 | 0.003 | 0.052 |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 90722.762 | 44764.252 | 45958.510 |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 5647.453 | 2584.041 | 3063.412 |
| 臭氧层损耗 | kg CFC-11 eq | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB eq | 17311.370 | 7161.880 | 10149.490 |
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 13210.836 | 7849.979 | 5360.857 |
| 海洋生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 20880412 | 9577646 | 11302766 |

| 影响类型 | 单位 | 总计 | 原材料生产与获取 | 产品生产 |
|--------|-------------------------------------|--------|----------|--------|
| 陆地生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 89.543 | 42.487 | 47.056 |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 2.164 | 0.698 | 1.466 |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 52.999 | 15.332 | 37.667 |
| 富营养化 | kg PO ₄ eq | 13.058 | 4.355 | 8.703 |

下图展示了变形铝合金圆铸锭在产品生命周期各阶段的贡献(S1 代表原材料生产与获取阶段、S2 代表产品生产阶段)：

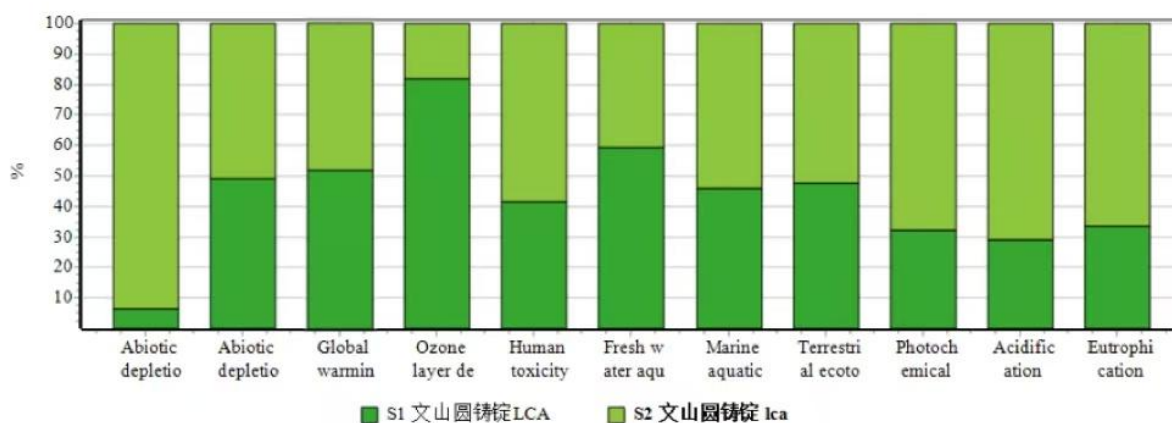


图 11 变形铝合金圆铸锭产品生命周期阶段分析

从图中可以看出，变形铝合金圆铸锭产品在臭氧层损耗、淡水生态毒性等方面原材料生产与获取阶段贡献较大，在全球变暖、资源耗竭、光化学氧化、酸化、富营养化方面产品生产阶段贡献较大。

4.2.2 敏感性分析

对 11 个评价指标的各自最大影响因素进行敏感性分析，以描述对云铝文山变形铝合金圆铸锭 LCA 结果的影响。调整的重点是排放水平，最小和最大范围为 $\pm 10\%$ 。1t 变形铝合金圆铸锭的敏感性分析结果如下。

表 5 对 1t 变形铝合金圆铸锭的敏感性分析

| 参数 | 单位 | 影响因素 | 基准线 - 年平均水平 | 最小值 | 偏差 | 最大值 | 偏差 |
|----------|-------------------------------------|------|-------------|-------------|--------|-------------|--------|
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 电力 | 0.0553 | 0.0501 | -9.36% | 0.0604 | 9.36% |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 电力 | 90722.762 | 86127.5295 | -5.07% | 95317.9965 | 5.07% |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 铝液 | 5647.453 | 5444.7578 | -3.59% | 5850.1482 | 3.59% |
| 臭氧层损耗 | kg CFC-11 eq | 氧化铝 | 8.99E-05 | 8.38E-05 | -6.74% | 9.59E-05 | 6.74% |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 17311.3700 | 16296.6262 | -5.86% | 18326.1140 | 5.86% |
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 氧化铝 | 13210.8360 | 12444.5178 | -5.80% | 13977.1536 | 5.80% |
| 海洋生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 20880412 | 19750192.94 | -5.41% | 22010629.74 | -5.41% |
| 陆地生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 89.5430 | 84.8383 | -5.25% | 94.2477 | 5.25% |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 电力 | 2.1642 | 2.0449 | -5.51% | 2.2834 | 5.51% |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 电力 | 52.9994 | 49.9171 | -5.82% | 56.0817 | 5.82% |
| 富营养化 | kg PO ₄ ³⁻ eq | 电力 | 13.0581 | 12.1878 | -6.66% | 13.9284 | 6.66% |

4.2.3 不确定性分析

本报告中 LCA 评价结果的不确定性使用 SimaPro 中的“蒙特卡罗分析”功能量化(95% 置信区间)，分析结果如表所示。

表 6 不确定性分析

| 影响类型 | 平均数 | 中值 | SD | 2.50% | 97.50% |
|----------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 资源耗竭 | 0.0553 | 0.0522 | 0.0191 | 0.0273 | 0.1048 |
| 化石能源资源耗竭 | 90722.7620 | 87121.0396 | 19132.0520 | 64757.4926 | 137738.2497 |
| 全球变暖 | 5647.4530 | 5623.4906 | 448.0805 | 4841.6552 | 6594.8342 |
| 臭氧层损耗 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0001 |
| 人类毒性 | 17311.3700 | 16752.6533 | 6311.3899 | 7191.3349 | 30920.3443 |
| 淡水生态毒性 | 13210.8360 | 12089.2405 | 5276.0129 | 6804.8148 | 27115.4979 |
| 海洋生态毒性 | 20880412.0000 | 20081719.3742 | 5614315.2796 | 13275559.0515 | 36752840.2521 |
| 陆地生态毒性 | 89.5430 | 84.8296 | 822.8582 | -1632.1452 | 1652.7952 |

| 影响类型 | 平均数 | 中值 | SD | 2.50% | 97.50% |
|-------|---------|---------|--------|---------|---------|
| 光化学氧化 | 2.1642 | 2.1418 | 0.2410 | 1.7792 | 2.6968 |
| 酸化 | 52.9994 | 52.3405 | 5.7414 | 43.7909 | 64.9673 |
| 富营养化 | 13.0581 | 12.3888 | 3.3306 | 8.6503 | 21.7757 |

4.3 云南云铝海鑫铝业有限公司生命周期影响评价

4.3.1 综合评价结果

本报告采用 SimaPro（版本：10.1）软件进行产品生命周期环境影响评价。基于上述产品生命周期输入输出分析，构建原材料生产与获取、产品生产 2 个生命周期阶段模型；采用 CML-IA baseline V3.10/World 2000 评价方法对产品全生命周期环境影响进行评价计算。由于电解和铸锭工序均在同一厂区进行，为分析各类流（物质流、能量流）输入输出更为清晰，故将电解工序与铸锭工序统一进行过程分析。对 11 种环境影响类型进行考察，包括资源耗竭（Abiotic depletion）、化石能源资源耗竭（Abiotic depletion, fossil fuels）、全球变暖（Global Warming, GW100a）、臭氧层损耗（Ozone layer depletion, ODP）、人类毒性（Human toxicity）、淡水生态毒性（Fresh water aquatic ecotox）、海洋生态毒性（Marine aquatic ecotoxicity）、陆地生态毒性（Terrestrial ecotoxicity）、光化学氧化（Photochemical oxidation）、酸化（Acidification）、富营养化（Eutrophication）。具体评价结果如表所示。声明单位为 1 t。

表 7 生命周期影响评价结果

| 影响类型 | 单位 | 总计 | 原材料生产与获取 | 产品生产 |
|----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 0.053 | 0.004 | 0.049 |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 92196.344 | 48307.032 | 43889.311 |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 6272.12 | 2982.76 | 3289.34 |
| 臭氧层损耗 | kg CFC-11 eq | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB eq | 27087.069 | 17394.044 | 9693.0259 |

| 影响类型 | 单位 | 总计 | 原材料生产与获取 | 产品生产 |
|------------------------|-------------------------------------|-----------|----------|----------|
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 13513.716 | 8396.370 | 5117.346 |
| 海洋生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 23672842 | 12882727 | 10790115 |
| 陆地生态毒性 iatgnehsidul | kg 1,4-DB eq | 151.194 | 106.245 | 44.949 |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 2.131 | 0.770 | 1.361 |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 51.436 | 16.419 | 35.017 |
| 富营养化 | kg PO ₄ ³⁻ eq | 13.076 | 4.767 | 8.309 |

下图展示了变形铝合金圆铸锭在产品生命周期各阶段的贡献(S1代表原材料生产与获取阶段、S2代表产品生产阶段)：

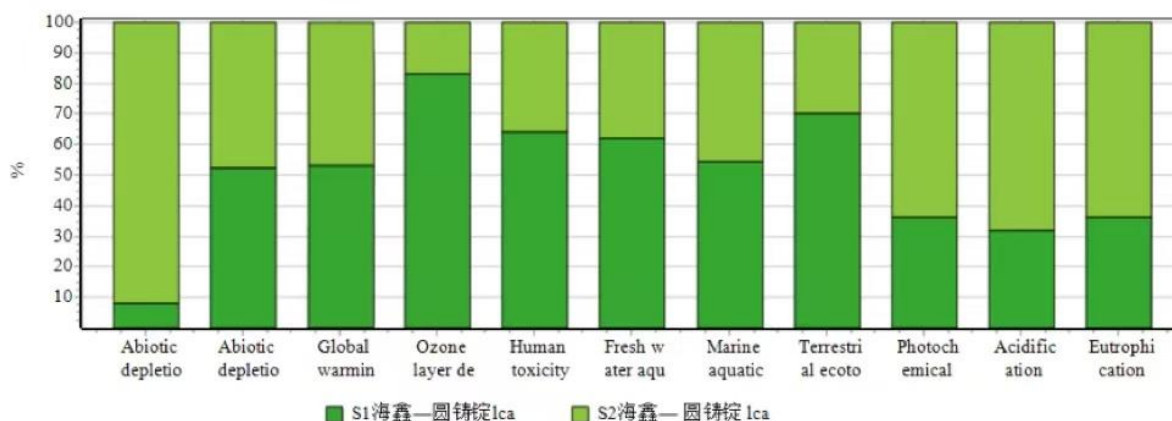


图 12 变形铝合金圆铸锭产品生命周期阶段分析

从图中可以看出，变形铝合金圆铸锭产品在臭氧层损耗、海洋生态毒性、人类毒性等方面原材料生产与获取阶段贡献较大，在资源耗竭、光化学氧化、酸化、富营养化、全球变暖方面产品生产阶段贡献较大，其余过程（化石能源资源耗竭、淡水生态毒性、陆地生态毒性）等阶段贡献差距较小。

4.3.2 敏感性分析

对 11 个评价指标的各自最大影响因素进行敏感性分析，以描述对云铝海鑫变形铝合金圆铸锭 LCA 结果的影响。调整的重点是排放水平，最小和最大范围为 $\pm 10\%$ 。1t 变形铝

合金圆铸锭的敏感性分析结果如下。

表 8 对 1t 变形铝合金圆铸锭的敏感性分析

| 参数 | 单位 | 影响因素 | 基准线 - 年平均水平 | 最小值 | 偏差 | 最大值 | 偏差 |
|----------|--------------------------------------|------|-------------|-------------|--------|-------------|--------|
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 电力 | 0.0538 | 0.0489 | -9.18% | 0.0588 | 9.18% |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 电力 | 92196.3440 | 87810.3736 | -4.76% | 96582.3138 | 4.76% |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 铝液 | 6272.12 | 6055.674 | -3.45% | 6488.526 | 3.45% |
| 臭氧层损耗 | kg CFC-11 eq | 氧化铝 | 9.15E-05 | 8.57E-05 | -6.73% | 9.72E-05 | 6.31% |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 27087.0690 | 26118.5362 | -3.58% | 28055.6027 | 3.58% |
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 氧化铝 | 13513.7160 | 12784.6878 | -5.39% | 14242.7442 | 5.39% |
| 海洋生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 23672842 | 22594093.07 | -4.56% | 24751591.47 | -4.56% |
| 陆地生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 金属镁 | 151.1940 | 146.3291 | -3.22% | 156.0590 | 3.22% |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 电力 | 2.1317 | 2.0179 | -5.34% | 2.2455 | 5.34% |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 电力 | 51.4366 | 48.4946 | -5.72% | 54.3786 | 5.72% |
| 富营养化 | kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq | 电力 | 13.0760 | 12.2454 | -6.35% | 13.9067 | 6.35% |

4.3.3 不确定性分析

本报告中 LCA 评价结果的不确定性使用 SimaPro 中的“蒙特卡罗分析”功能量化(95%置信区间)，分析结果如表所示。

表 9 不确定性分析

| 影响类型 | 平均数 | 中值 | SD | 2.50% | 97.50% |
|----------|--------------|------------|------------|------------|-------------|
| 资源耗竭 | 0.0538 | 0.0507 | 0.0185 | 0.0281 | 0.0984 |
| 化石能源资源耗竭 | 92196.3440 | 87837.1473 | 20473.8111 | 65422.6427 | 146518.9101 |
| 全球变暖 | 6272.1200 | 6230.8748 | 491.7294 | 5434.7024 | 7389.0105 |
| 臭氧层损耗 | 9.1472256E-5 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0001 |

| 影响类型 | 平均数 | 中值 | SD | 2.50% | 97.50% |
|--------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 人类毒性 | 27087.0690 | 25629.0616 | 9466.0846 | 12243.5417 | 48391.9762 |
| 淡水生态毒性 | 13513.7160 | 12438.3744 | 5160.2954 | 6972.3774 | 27437.4868 |
| 海洋生态毒性 | 23672842.0000 | 22799042.0447 | 5977961.9230 | 15056203.8033 | 37678258.0197 |
| 陆地生态毒性 | 151.1940 | 149.9287 | 717.9432 | -1273.5700 | 1590.1821 |
| 光化学氧化 | 2.1317 | 2.0982 | 0.2273 | 1.7790 | 2.6407 |
| 酸化 | 51.4366 | 50.7065 | 5.5284 | 42.9367 | 64.4512 |
| 富营养化 | 13.0760 | 12.5733 | 3.3373 | 8.5897 | 20.2046 |

4.4 云南云铝泽鑫铝业有限公司生命周期影响评价

4.4.1 综合评价结果

本报告采用 SimaPro（版本：10.1）软件进行产品生命周期环境影响评价。基于上述产品生命周期输入输出分析，构建原材料生产与获取、产品生产 2 个生命周期阶段模型；采用 CML-IA baseline V3.10/World 2000 评价方法对产品全生命周期环境影响进行评价计算。由于电解和铸锭工序均在同一厂区进行，为分析各类流（物质流、能量流）输入输出更为清晰，故将电解工序与铸锭工序统一进行过程分析。对 11 种环境影响类型进行考察，包括资源耗竭（Abiotic depletion）、化石能源资源耗竭（Abiotic depletion, fossil fuels）、全球变暖（Global Warming, GW100a）、臭氧层损耗（Ozone layer depletion, ODP）、人类毒性（Human toxicity）、淡水生态毒性（Fresh water aquatic ecotox）、海洋生态毒性（Marine aquatic ecotoxicity）、陆地生态毒性（Terrestrial ecotoxicity）、光化学氧化（Photochemical oxidation）、酸化（Acidification）、富营养化（Eutrophication）。具体评价结果如表所示。声明单位为 1 t。

表 10 生命周期影响评价结果

| 影响类型 | 单位 | 总计 | 原材料生产与获取 | 产品生产 |
|------|----|----|----------|------|
|------|----|----|----------|------|

| 影响类型 | 单位 | 总计 | 原材料生产与获取 | 产品生产 |
|---------------|-------------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 0.050692682 | 0.005024169 | 0.045668514 |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 86014.135 | 45428.047 | 40586.088 |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 5862.75 | 2802.61 | 3060.14 |
| 臭氧层耗损 | kg CFC-11 eq | 8.4434082E-5 | 7.0075562E-5 | 1.435852E-5 |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB eq | 25292.173 | 16328.281 | 8963.8915 |
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 12963.924 | 8232.5425 | 4731.3817 |
| 海洋生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 22303330 | 12326726 | 9976604.1 |
| 陆地生态毒性 tsidul | kg 1,4-DB eq | 141.14245 | 99.571583 | 41.570865 |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 2.0520192 | 0.73407524 | 1.3179439 |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 49.26185 | 15.411176 | 33.850674 |
| 富营养化 | kg PO ₄ -eq | 12.227914 | 4.5451908 | 7.6827231 |

下图展示了变形铝合金圆铸锭在产品生命周期各阶段的贡献(S1 代表原材料生产与获取阶段、S2 代表产品生产阶段)：

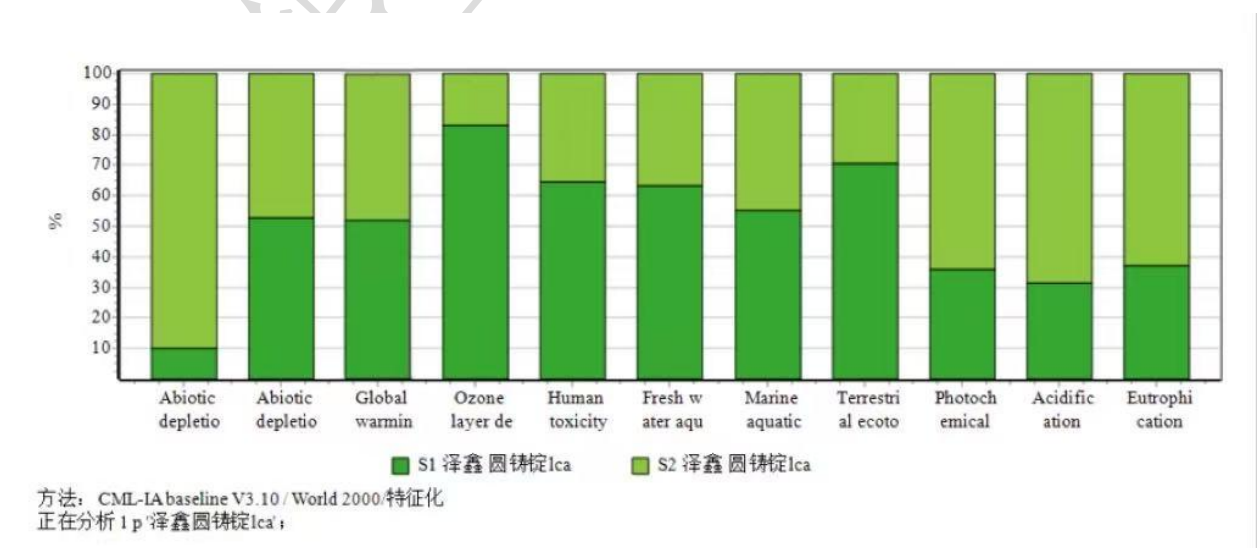


图 13 变形铝合金圆铸锭产品生命周期阶段分析

从图中可以看出，变形铝合金圆铸锭产品在臭氧层损耗、淡水生态毒性、陆地生态毒性、人类毒性、海洋生态毒性等方面原材料生产与获取阶段贡献较大，在资源耗竭、光化学氧化、酸化、富营养化方面产品生产阶段贡献较大，其余过程（全球变暖、化石能源资源耗竭）等阶段贡献差距较小。

4.4.2 敏感性分析

对 11 个评价指标的各自最大影响因素进行敏感性分析，以描述对变形铝合金圆铸锭 LCA 结果的影响。调整的重点是排放水平，最小和最大范围为±10%。1t 变形铝合金圆铸锭的敏感性分析结果如下。

表 11 对 1t 变形铝合金圆铸锭的敏感性分析

| 参数 | 单位 | 影响因素 | 基准线 - 年平均水平 | 最小值 | 偏差 | 最大值 | 偏差 |
|----------|--------------------------------------|------|-------------|---------------|--------|---------------|-------|
| 资源耗竭 | kg Sb eq | 电力 | 0.0507 | 0.0411 | -9.01% | 0.0553 | 9.01 |
| 化石能源资源耗竭 | MJ | 电力 | 86014.1350 | 81959.2084 | -4.71% | 90069.0626 | 4.71% |
| 全球变暖 | kg CO ₂ eq | 电力 | 5862.7500 | 5659.6010 | -3.44% | 6064.3390 | 3.44% |
| 臭氧层损耗 | kg CFC-11 eq | 氧化铝 | 8.44E-05 | 7.90E-05 | -6.39% | 8.98E-05 | 6.39% |
| 人类毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 25292.1730 | 24396.7421 | -3.54% | 26187.6032 | 3.54% |
| 淡水生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 氧化铝 | 12963.9240 | 12282.2461 | -5.26% | 13645.6022 | 5.26% |
| 海洋生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 电力 | 22303330 | 21306002.1700 | -4.47% | 23300657.4500 | 4.47% |
| 陆地生态毒性 | kg 1,4-DB eq | 金属镁 | 141.1425 | 136.4523 | -3.32% | 145.8326 | 3.32% |
| 光化学氧化 | kg C ₂ H ₄ eq | 电力 | 2.0520 | 1.9468 | -5.13% | 2.1572 | 5.13% |
| 酸化 | kg SO ₂ eq | 电力 | 49.2619 | 46.5419 | -5.52% | 51.9818 | 5.52% |
| 富营养化 | kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq | 电力 | 12.2279 | 11.4599 | -6.28% | 12.9959 | 6.28% |

4.4.3 不确定性分析

本报告中 LCA 评价结果的不确定性使用 SimaPro 中的“蒙特卡罗分析”功能量化（95% 置信区间），分析结果如表所示。

表 12 不确定性分析

| 影响类型 | 平均数 | 中值 | SD | 2.50% | 97.50% |
|----------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 资源耗竭 | 0.0507 | 0.0507 | 0.0003 | 0.0502 | 0.0514 |
| 化石能源资源耗竭 | 86014.1350 | 85876.0080 | 903.4671 | 84771.6909 | 88102.6689 |
| 全球变暖 | 5862.7500 | 5861.7650 | 18.2153 | 5831.2788 | 5901.9468 |
| 臭氧层损耗 | 0.0001 | 1.0015 | 2.0030 | 4.0059 | 5.0073 |
| 人类毒性 | 25292.1730 | 24083.6728 | 5053.1261 | 19195.9961 | 37687.3131 |
| 淡水生态毒性 | 12963.9240 | 12928.5638 | 215.6092 | 12667.6503 | 13484.2206 |
| 海洋生态毒性 | 22303330.0000 | 21927867.0756 | 1586703.5328 | 20421352.8725 | 26375263.1275 |
| 陆地生态毒性 | 141.1425 | 139.6470 | 86.3354 | -23.3249 | 320.7865 |
| 光化学氧化 | 2.0520 | 2.0481 | 0.0178 | 2.0295 | 2.0953 |
| 酸化 | 49.2619 | 49.2589 | 0.0941 | 49.0913 | 49.4713 |
| 富营养化 | 12.2279 | 12.1895 | 0.1880 | 11.9995 | 12.7315 |

5 绿色设计改进方案

根据 LCA 评价分析结果，原材料生产与获取阶段的氧化铝及产品生产阶段使用的外购电力是变形铝合金圆铸锭产品生命周期环境影响的最主要来源。建议采取如下措施开展绿色设计：

1. 开展绿色产品设计

在产品的设计阶段着重考虑产品属性（可回收性，可重复利用性等）并将其作为设计目标。在产品结构设计上，通过轻量化设计和优化几何形状，在保证产品性能的前提下减少原材料使用量，从源头降低氧化铝消耗带来的环境影响；积极探索可替代材料，如部分使用再生铝替代原生氧化铝生产的铝材料，利用再生铝生产能耗低的优势，降低产品整体环

境负荷。此外，设计时考虑产品的可回收性和再利用性，采用便于拆解和回收的结构设计，延长产品生命周期，减少资源浪费。

2. 优化工艺减少能源消耗

对产品生产工艺进行全面评估和技术升级，引入先进的节能型生产设备，如采用高效的熔炼炉和轧制设备，提高设备的能源转化效率，降低单位产品电力消耗。同时，优化生产流程，合理安排生产计划，避免设备空转和能源浪费，通过智能控制系统实时监测和调整生产参数，实现生产过程的精准控制和能源优化。此外，积极探索分布式能源利用，在厂区建设太阳能光伏发电系统或小型风力发电装置，将可再生能源发电优先用于产品生产阶段，减少对外购电力的依赖，从而降低因电力使用带来的环境影响。

3. 供应商绿色管理体系及能力建设

实施原材料氧化铝的绿色采购，加强对氧化铝供应商绿色生产和绿色管理要求，将绿色生产与管理能力的要求纳入企业供应商准入政策中；开展供应商绿色管理能力建设培训，提升供应商绿色管理能力。通过源头控制，在整个供应链中贯彻防止环境污染、节约能源的意识。绿色采购能够满足公众对环保产品的需求，同时又可以从整体上降低成本。主要在绿色供应商选择和管理，协同开发和采购两方面展开。

6 结论

综上所述，原材料生产与获取阶段的氧化铝及产品生产阶段使用的外购电力的消耗是造成变形铝合金圆铸锭产品在全球变暖、资源耗竭、生态毒性、酸化、富营养化等 11 个方面影响的主要来源。云南云铝润鑫铝业有限公司、云南文山铝业有限公司、云南云铝海鑫铝业有限公司、云南云铝泽鑫铝业有限公司可通过供应链管理、技术改造等方式，降低氧化铝及电力的消耗。

7 参考文献

ISO 14040 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework

ISO 14044 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines

GB/T 32161-2015 生态设计产品评价通则

绿色低碳产品评价规范电解铝产品（铝锭）

云南铝业股份有限公司