

绿色铝
在云铝

铝锭 LCA 报告

宁波希耐科环保科技有限公司 编制



目 录

一、项目背景	1
二、研究目的与研究范围	3
2.1 研究目的	3
2.2 研究范围	3
2.2.1 方法学参照	3
2.2.2 功能单位	3
2.2.3 系统边界	3
2.3 指标选择	4
2.3.1 环境影响指标	4
2.3.2 清单指标	5
三、数据收集处理原则	6
3.1 数据取舍原则	6
3.2 分配原则	7
3.2.1 一般原则	7
3.2.2 分配方法	7
3.3 数据质量要求	8
四、软件和数据库	10
五、数据收集和整理	12
5.1 铝土矿开采	12
5.2 氧化铝生产	13



5.3 阳极碳块生产	16
5.4 电解铝液生产	18
5.5 重熔用铝锭生产	19
六、生命周期评价模型	23
七、生命周期评价结果与分析	23
八、生命周期解释	26
九、结论	28



一、项目背景

《中国气候变化蓝皮书（2022）》显示，当前全球变暖趋势仍在持续。2021 年，中国地表平均气温、沿海海平面等多项气候变化指标打破观测纪录，气候变化成为全球面临的重大环境挑战，积极应对气候变化已成为全人类的共识。2016 年，我国签署《巴黎协定》，努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5°C 之内；2017 年起，中国启动全国碳排放交易市场；2020 年，习近平主席提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”。在双碳工作的稳妥推进下，各行业、各领域迎来了新一轮的产业革命和能源革命。

铝工业是材料产业的重要组成部分，是发展国民经济与提高人民生活水平的基础工业。作为有色行业最大的二氧化碳排放源，降低铝工业的碳排放对于我国实现碳达峰、碳中和意义重大。2021 年，国际铝业协会发布了《2050 年全球铝行业温室气体减排路径》报告，提出了将铝行业的温室气体排放总量减少到 2.5 亿吨 CO₂ 当量的目标；2022 年，国际铝业协会提出“使 1.5°C 的净零铝成为可能”的倡议，从电力脱碳、再生铝技术、铝产业转型升级、不同地区铝脱碳模式互动等方面，为铝行业制定了未来十年脱碳的转型战略。

云南铝业股份有限公司（以下简称“云铝股份”）作为国内水电铝领先企业，始终坚定不移地走绿色低碳发展之路。在国家政策的鼎力支持下，云铝股份依托云南省得天独厚的资源环境，大力发展水电铝，优化能源供给结构，成功打造水电铝著名品牌，树立了绿色企业形象。

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）是对一个产品系统（或者服务）的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价，通过追溯产品上游原材料的获取、产品的生产制造、使用以及废弃处置，评估产品在这些过程中的资源消耗和环境效



益等。通过 LCA 的应用能够比较客观地对产品的绿色发展水平进行评估，并在此基础上进行改进。

本报告基于生命周期评价的思想和方法论，对铝锭产品开展生命周期评价工作，旨在分析铝锭产品的潜在环境影响，通过细化各类环境影响指标结果，找出对于 LCA 结果的敏感性因素，并有针对性地改进，从而降低对于环境的潜在影响。

开展生命周期评价工作，对铝工业实现“双碳”目标大有裨益。对企业而言，将减排工作聚焦于局部、末端，局限于产业内部、供需内部，容易遇到技术瓶颈，开展生命周期评价，企业可以从产业整个流程探索节能环保新模式，找到新的方向和思路。对行业而言，开展生命周期评价相关工作，可以为行业全产业链的绿色化驱动提供宝贵的实践经验。为下游客户了解水电铝产品提供数据和技术支持，促进供应链协同减排。云铝股份不断探索创新铝工业领域的绿色生产新模式、新业态，助力企业可持续发展，积极应对碳达峰、碳中和挑战，开拓铝行业碳达峰碳中和新路径。



二、研究目的与研究范围

2.1 研究目的

通过对铝锭产品整个生产系统中各个工序进行生命周期评价，量化分析生产铝锭产品的潜在环境影响，并针对敏感性因素提出改进措施和解决方案。

2.2 研究范围

本报告中，铝锭的 LCA 研究范围是从摇篮到大门，即铝土矿开采、氧化铝生产、阳极碳块生产、铝锭生产，划分为两个阶段，即原物料阶段和制造阶段。

2.2.1 方法学参照

本项目的研究严格参照 ISO14044-2006 标准。该标准规定了 LCA 的要求并提供了指导方针。包括目标和范围的定义、生命周期清单分析(LCI)、生命周期影响评估(LCIA)、生命周期解释等，这些内容将在本报告中进行说明。

2.2.2 功能单位

本项目研究的功能单位是：云铝股份 2022 年所生产的 1kg 铝锭产品。

2.2.3 系统边界

本项目的研究边界为从摇篮到大门，以 2022 年云铝股份的生产工艺路线为参照。研究边界包含铝土矿开采、氧化铝生产、阳极碳块生产、铝锭生产以及原辅料的运输阶段，不包括产品下游的运输阶段、使用阶段和寿命终止阶段。划分为两个阶段，即原物料阶段和制造阶段。



系统边界图如图 2-1 所示：

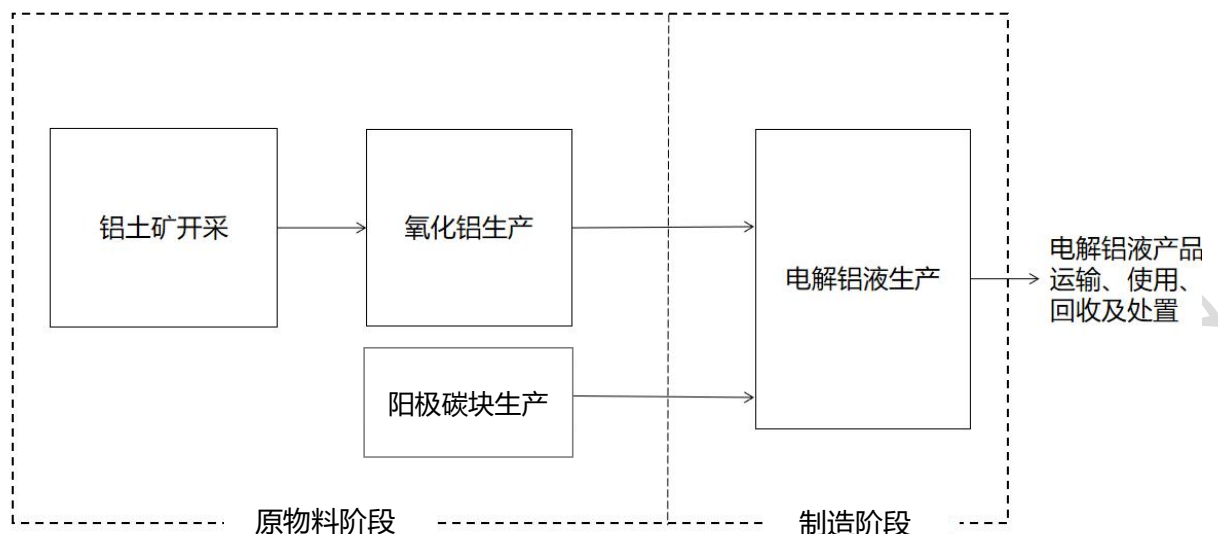


图 2-1 系统边界

2.3 指标选择

2.3.1 环境影响指标

生命周期影响评估 (LCIA) 旨在了解和评估产品系统在整个产品生命周期中潜在环境影响的程度和重要性。

CML 2001- Aug. 2016 评价方法是目前被选用最多最新的一种环境评价方法。该方法由荷兰莱顿大学研发，可以定量评估特征化和归一化值，是一种基于传统生命周期的清单化分析特征化和归一化的方法。该方法采用中点分析减少了假设的数量和模型的复杂性，易于操作。本报告选择了 CML 2001- Aug. 2016 评价方法中的三个环境影响指标，因为有助于这些类别的 LCI 数据的可用性和质量往往很高；其次，这些类别的影响评估方法虽然仍在不断发展，但与其他评价方法相比更加成熟；第三，这三种环境影响指标在大多数金属和其他材料和产品的 LCA 中很常见。



表 2-1 环境影响指标

名称	英文名称	描述	单位
酸化潜势	Acidification Potential (AP)	AP 是一种区域化的影响类型，指由酸性气体排放引起生态环境破坏以及人体健康危害。	kg SO ₂ e
富营养化潜势	Eutrophication Potential (EP)	EP 是指对水体的污染表现。农业中磷和氮等营养物质含量过多，燃烧过程和工业废水的排放，导致水质富营养化污染。	kg PO ₄ ³⁻ e
全球增温潜势	Global Warming Potential (GWP 100 years)	GWP 是一种物质产生温室效应的一个指数。二氧化碳(CO ₂)、甲烷(CH ₄)、氧化亚氮(N ₂ O)、全氟化碳(PFCs) 等是地球大气中主要的温室气体。	kg CO ₂ e

2.3.2 清单指标

此外还选取了四个生命周期清单指标，这些指标是环境概况的重要组成部分，在 LCA 中普遍被报告。

表 2-2 清单指标

名称	英文名称	描述	单位
一次能源消耗	Primary energy demand	PED 指从自然界开采，直接被使用的能源，是自然资源（如煤炭、原油、阳光、铀等）中所蕴含的未经人为转化或转换的能源。	MJ
二氧化碳	Carbon dioxide	CO ₂ 是温室气体的主要贡献气体。	kg
二氧化硫	Sulphur dioxide	SO ₂ 是酸性气体，产生酸雨的主要原因。	kg
PM2.5	Dust (PM 2.5)	PM 2.5 是测控空气污染程度的指数，指大气中直径小于或等于 2.5 微米的颗粒物。	kg



三、数据收集处理原则

本报告的数据收集和处理严格按照 ISO14040 和 ISO14044 中的相关规定，均遵循数据取舍原则和分配原则。

3.1 数据取舍原则

在对产品能源资源消耗以及环境排放进行系统分析的过程中，为保证结果的有效性，在不影响生命周期评价主要结果的情况下，可以适当地降低数据收集的难度，忽略一些质量占比小、数据收集较为困难且对于 LCA 结果贡献度小的物料数据。

取舍原则如下：

- ① 普通物料重量 $<1\%$ 产品重量时，以及含稀贵或高纯成分的物料重量 $<0.1\%$ 产品重量时，可忽略该物料的上游生产数据，总共忽略的物料重量不超过产品重量的 5%。
- ② 低价值原料，可忽略其上游生产数据。
- ③ 大多数情况下，生产设备、厂房、生活设施等可以忽略。
- ④ 原则上在选定环境影响类型范围内的已知排放数据不应忽略。但在环境排放数据不可得或缺失的情况下，可忽略，但应在报告中解释说明。

在预焙阳极炭块生产工序，忽略了原物料阶段中的生碎（自产）以及制造阶段的后勤（割草机）、公务车所使用的汽油、扫地车所使用的柴油。生碎属于废弃物资源，属于低价值原料，通过充分利用生碎，可以节约原料和降低生产成本，生碎的质量约占预焙阳极炭块产品质量的 2%，对于铝锭的总工艺来说影响较小，因此选择忽略不计。在氧化铝生产工序中，辅料的质量很小，絮凝剂和脱水剂分别占氧化铝产品质量的 $0.03\%<1\%$ 和 $0.01\%<1\%$ ，由于供应商无法提供生产数据、碳排放值或具体成分及配比，缺少背景因子，选择忽略絮凝剂和脱水剂，大大降低了数据收集的难度以及建模的复杂性。考虑了原材料购买到生产地之间的运输方式和运输距离，针对厂内运输，因部分数



据无法收集，故对其进行舍弃。

3.2 分配原则

若生命周期过程是一个包含多种产品产出的多产品系统，需要采用分配方法对系统内的能源投入、物料投入等进行分配，从而得到主、副产品各自对应的生命周期评价结果。在实际生产过程中产生了中间产物，例如煤灰渣、收尘粉，在项目中忽略，中间产物既可以作为能源使用，也可以当作原料回收再利用，应避免分配。必须分配时，要尽量反映出系统输入和输出间的物理关系。如果不能按照物理关系分配，则可以根据社会价值和经济价值来进行分配。当收集的数据不足或缺失时，我们可以通过模型产生的预测值或通过经验或逻辑推理得到的特殊值来代替。

3.2.1 一般原则

输入和输出应按照明确规定的程序分配给不同的产品，应与分配程序一起进行记录 and 解释。

单元进程分配的输入和输出之和应等于分配前单元过程的输入和输出。

3.2.2 分配方法

a) 步骤 1：应尽可能避免分配

1) 将要分配的单元过程划分为两个或多个子过程，并收集与这些子过程相关的输入和输出数据

2) 扩展产品系统，以包括与副产品相关的附加功能。

b) 步骤 2：在无法避免分配的情况下，系统的输入和输出应该在不同的产品或功能之间划分，以反映它们之间潜在的物理关系；它们应反映由系统所提供的产品或功能的数量变化对于输入和输出改变。



c)步骤 3: 如果物理关系不能单独建立或用作分配的基础, 则应在产品和功能之间以反映它们之间其他关系的方式分配投入。例如, 输入和输出数据可能在副产品之间按产品的经济价值的比例进行分配。

若输出有一部分副产品和废弃物, 在这种情况下, 有必要确定副产品和废弃物之间的比例, 因为输入和输出应只分配给副产品部分。

本研究中生产出铝锭产品的同时, 产生了残极、炭渣等, 属于产品的闭环生产环节, 不进行分配, 该系统没有可用于销售的副产品的产生, 属于单一产品的生命周期评价, 避免了分配。

3.3 数据质量要求

数据的质量是生命周期评价结果是否可靠的关键因素, 本研究的数据分两类, 实景数据和背景数据。实景数据来源于实地调研, 通常是由供应商提供实际生产数据, 背景数据来源于 Managed LCA Content(MLC) 2023.1。

输入数据的质量依赖于数据来源、分析者对所研究的产品和过程的认识程度、所作的假设以及计算和校验程序。

本项目的数据主要来源为企业的采购数据台账、物料消耗台账、能源月报、季度检测报告、2022 年水电风汽统计报表、2022 年综合能耗及工艺能耗统计表等, 数据经过各方人员的反复校验。生产工艺中投入的外购原辅料的生产, 外购能源的生产及运输等数据由 LCA for Experts (GaBi) 10 软件提供, 属于背景数据, 将在数据溯源表中具体说明。



表 3-1 数据质量表

名称	说明
时间覆盖范围	2022 年度，即 2022 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日
地理覆盖范围	云南省
技术覆盖范围	采用霍尔-埃鲁冰晶石-氧化铝熔盐电解法
完整性	充足的样本、合适的期间。铝锭产品生命周期模型包含所有主要过程，反映产品生产实际情况。
代表性	代表了云铝股份的 2022 年铝锭的生产水平
一致性	研究方法已统一应用于铝锭的各个组成部分
数据来源	企业的采购数据台账、物料消耗台账、能源月报、季度检测报告、2022 年水电风汽统计报表、2022 年综合能耗及工艺能耗统计表等；Managed LCA Content(MLC) 2023.1 数据库
信息的不确定性	数据、模型、假设等

四、软件和数据库

本报告采用生命周期评价软件 LCA for Experts (也称 GaBi) , 它是以工业数据为基础、针对物质流分析和生命周期评价的专业应用软件。其以强大的功能、人性化的界面和模拟分析等优点 (参见下图 4-1 和图 4-2) , 较多地应用于建筑、汽车、农业、产品等领域, 从而衡量评估研究对象的环境影响潜势, 为了更好地处理生命周期评价中的循环分配问题, 特别采用了模块化模型方法, 自动计算不同分配方法的敏感度。

其数据库 Managed LCA Content(MLC) 2023.1 包括 17000 多种不同的能源与材料流程, 也提供 400 种的工业流程, 归纳在十种基本流程中, 如工业制造、物流、采矿、动力设备、服务、维修等。

该软件的主要特色包括:

- 1) 涉及领域广泛的最新综合数据库, 尤其是率先在世界上发布了电子类产品的环境负荷数据集。对环境影响方面的数据, 比如地球变暖潜能、臭氧层消耗潜能等影响效果分类问题, 采用了 ISO (国际标准化组织)、SETAC (环境毒理学与化学学会)、WMO (国际气象组织)、IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会) 等倡议的最新解析方法。
- 2) LCA for Experts (GaBi) 还提供了根据生命周期评价各项目阶段来进行系统评价或分步评价的手法, 支持用户根据 ISO 14040 和 ISO 14044 的准则输入所需评估项目的目的和范围, 用户可以自己定义所评估项目、采集数据和解析结果。
- 3) 软件的图形界面具有透明性和灵活性, 可以以线的粗细来表示质量、能量或成本大小, 另外一个有用的功能是采用模型化, 它可以将研究对象各过程单元进行模块化展示, 并按照类别将这些模块单元进行分组处理。
- 4) 此外, 软件和相应的数据库相互独立。目前已有众多企事业单位将 LCA for Experts

(GaBi) 软件应用于数据管理和环境影响评价的案例研究。

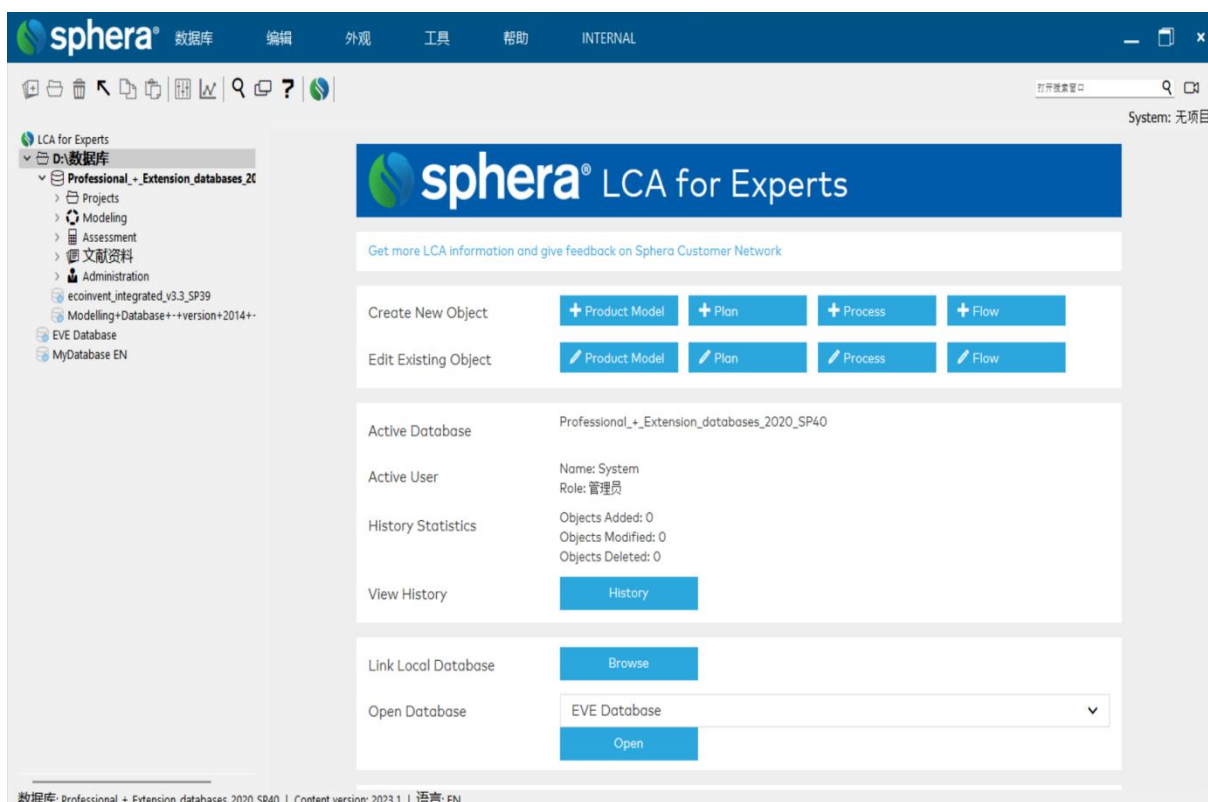


图 4-1 LCA for Experts (GaBi) 软件主界面

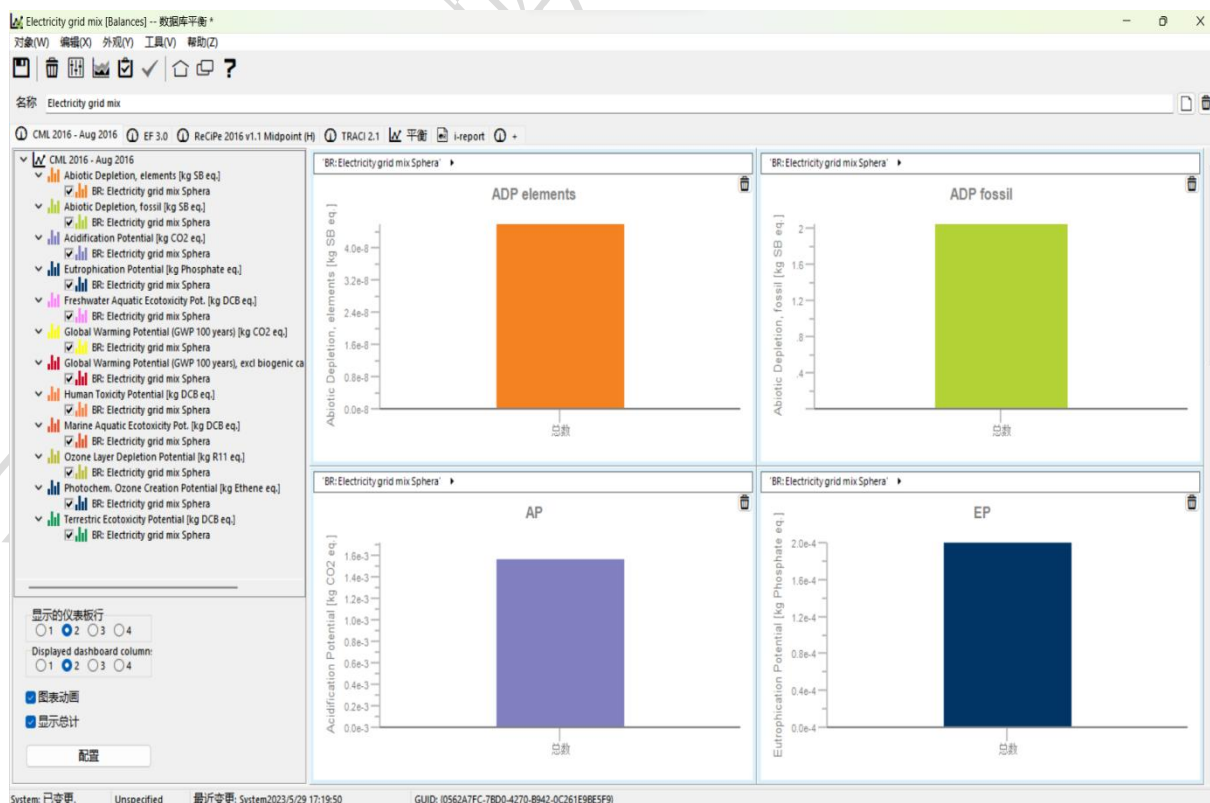


图 4-2 LCA for Experts (GaBi) 软件计算分析图

五、数据收集和整理

本项目中各工艺路线的数据包括一级数据和二级数据。

一级数据：对工艺上下游单位进行访厂，制作数据收集表格，由工艺负责单位进行收集填写。

二级数据：即背景数据，由最新的权威数据库 Managed LCA Content(MLC) 2023.1 提供各项生命周期清单数据，是专业领域工程计算数据，来源于国内外行业协会的数据集，整合了行业资源、科学知识、技术文献和内部专利信息。

表 5-1 各工序数据来源

名称	一级数据数据来源	二级数据（背景数据）来源
铝土矿开采	云南文山铝业有限公司	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
氧化铝生产	云南文山铝业有限公司	
阳极碳块生产	云南源鑫炭素建水本部	
铝液生产	云南铝业股份有限公司	
铝锭生产	云南铝业股份有限公司	

5.1 铝土矿开采

铝土矿主要来源于云铝的矿区，即西畴铝土矿和砚山铝土矿。铝土矿生产工艺可划分为四个工序，分别为原矿开采、洗碎、尾矿输送和复垦，西畴铝土矿和砚山铝土矿生产均划分为以上四个工艺。

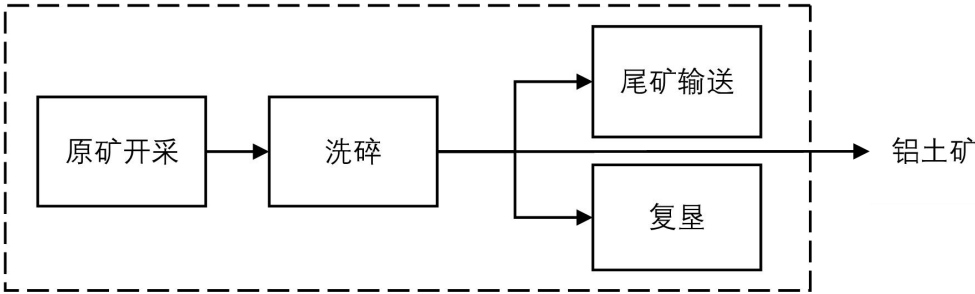


图 5-1 铝土矿开采的工艺流程图

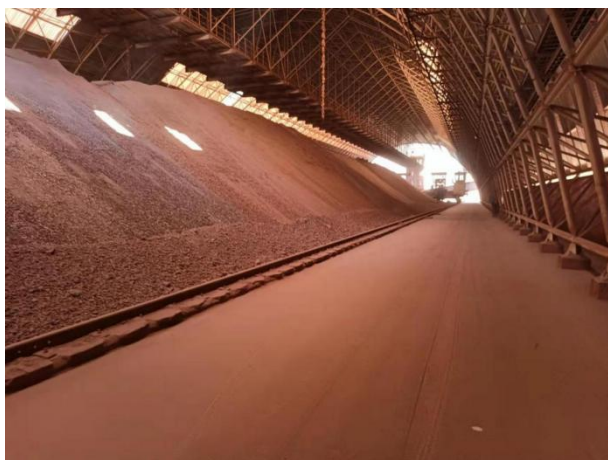


图 5-2 西畴铝土矿



图 5-3 砚山铝土矿

5.2 氧化铝生产

氧化铝来源于云铝文山。云铝文山使用拜耳法生产氧化铝，生产过程可划分为十四道工序：破碎、湿磨、溶出、赤泥分离洗涤、赤泥压滤、蒸发、碱液调配、排盐苛化、粗液精制、晶种分解、氢氧化铝过滤和洗涤、氢氧化铝焙烧、燃气制备、热电联产。

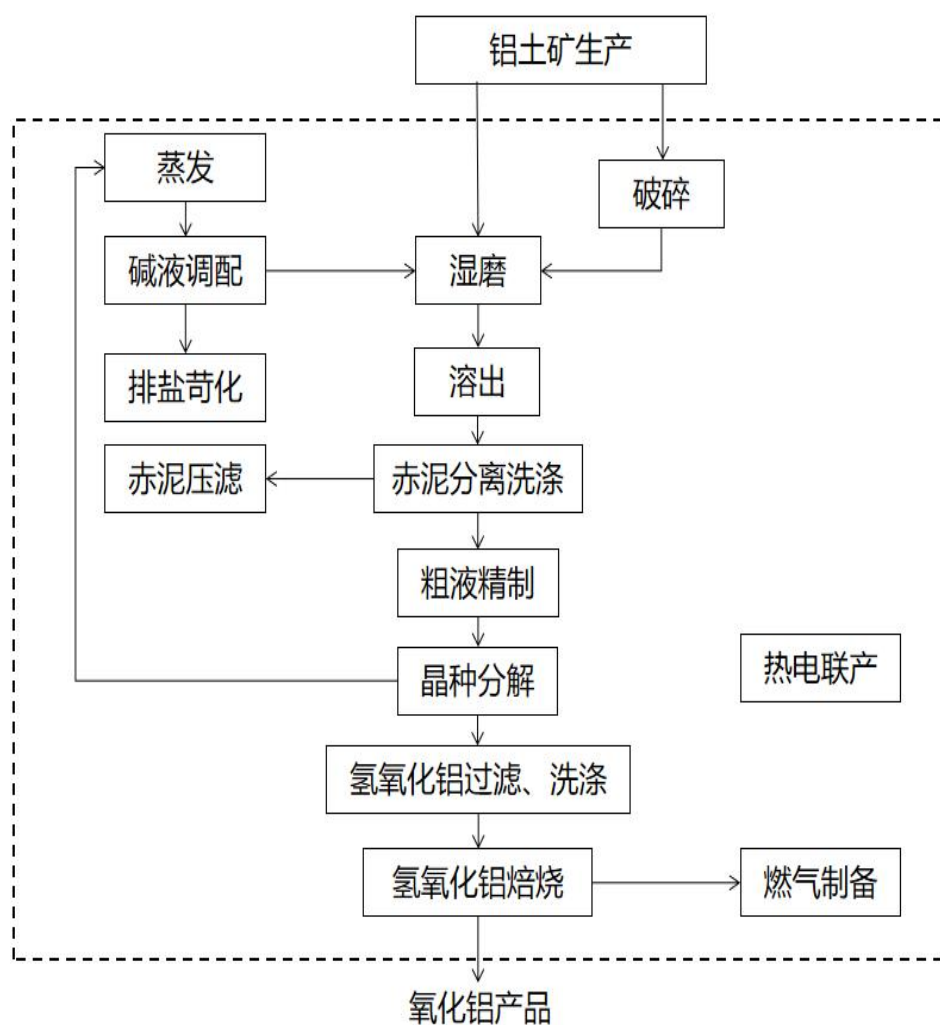


图 5-4 氧化铝生产的工艺流程图



图 5-5 冶金级氧化铝产品



图 5-6 氧化铝成品

表 5-2 氧化铝生产的数据溯源表

类别	名称	背景数据来源
原料	铝土矿	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
	碱	
	石灰	
	氨水	
	盐酸	
	盐酸（分析纯）	
	硝酸钠	
	絮凝剂	忽略
	脱水剂	
	脱硫剂	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
设备耗材	润滑脂	
	润滑油	
包材	包装袋	
能源	电力	云铝股份
燃料	煤气	Ecoinvent
	蒸汽	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
	LNG	
	燃料油	
	柴油	
资源	水	
其他	蒸汽回水	云铝股份
	燃料燃烧排放	计算值

5.3 阳极碳块生产

阳极碳块来源于云南源鑫炭素建水本部。阳极碳块的生产过程划分为五个工序：煅烧、成型、焙烧、脱硫、热电，首先将外购石油焦用天然气煅烧，以去除挥发份和水分，然后将改质沥青熔化、去除水分，再将上两种备料按一定比例混合后，混捏得到合格糊料，通过振动使其成型，再对成型的糊料进行焙烧，最后经过组装得到阳极碳块。

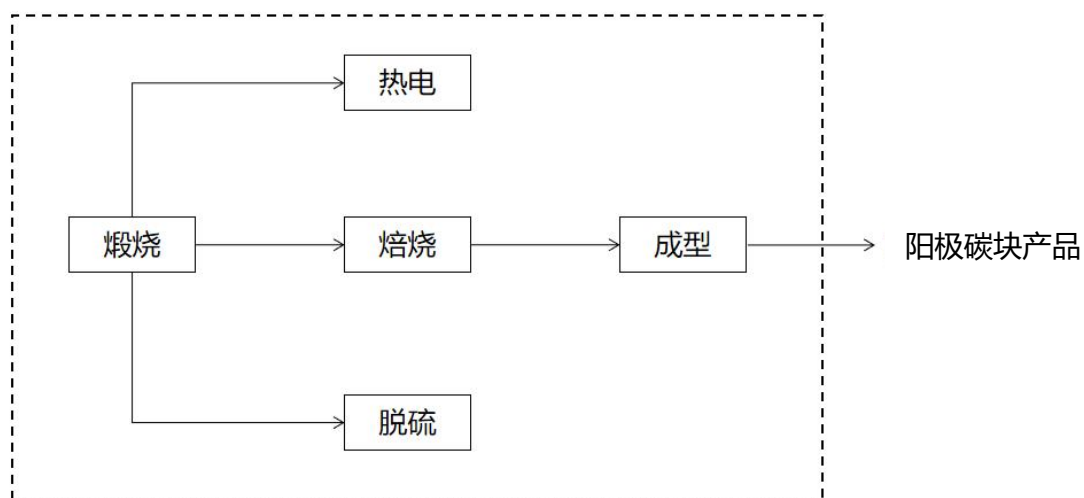


图 5-7 阳极碳块生产的工艺流程图



图 5-8 阳极碳块煅烧现场图



图 5-9 阳极碳块产品

表 5-3 阳极碳块（建水）生产的数据溯源表

类别	名称	背景数据来源
原料	石油焦	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
	沥青	
	残阳极	云铝溢鑫、云铝海鑫、云铝股份
	生碎（自产）	云铝源鑫（建水）
	氨水	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
设备耗材	耐火泥	
	钢纤维浇注料	
	抗磨液压油	
	锂基脂	
	齿轮油	
	汽轮机油	
包材	吨袋（PP 新材）	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
	硫酸铵袋（PP 新材）	
能源	电力	云铝源鑫
燃料	天然气	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
能源	压缩空气	
燃料	柴油	
	汽油	
资源	水	
其他	COD	云铝源鑫（建水）
	BOD	云铝源鑫（建水）
	CO ₂	云铝源鑫（建水）
	燃料燃烧排放	计算值

5.4 电解铝液生产

电解铝液生产工序主要采用霍尔 - 埃鲁铝电解法和预焙槽技术，可分为阳极组装和电解生产两个工艺。

具体生产工艺流程为：以氧化铝为原料，冰晶石—氟化铝为电解质，将氧化铝、冰晶石、氟化铝及其他氟化盐等原辅料按配比分别加入电解槽内，通入直流电，在高温条件下氧化铝溶于氟化盐溶剂中，在两极发生电化学反应，氧化铝不断分解，液态金属铝在阴极上析出。

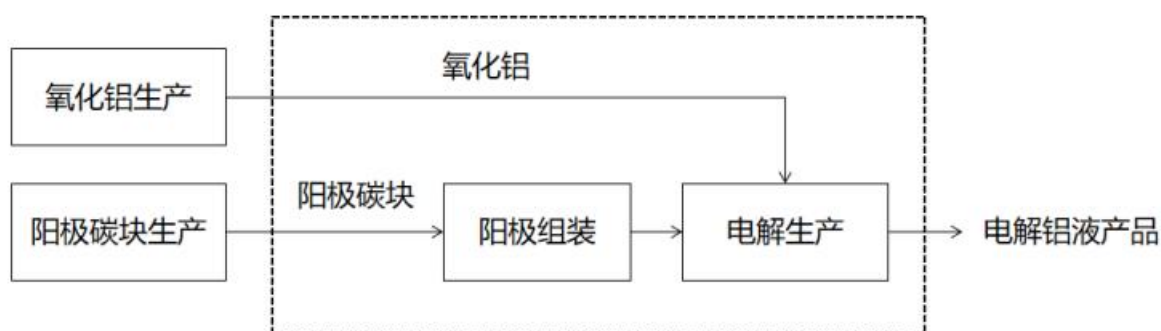


图 5-10 铝锭生产的工艺流程图

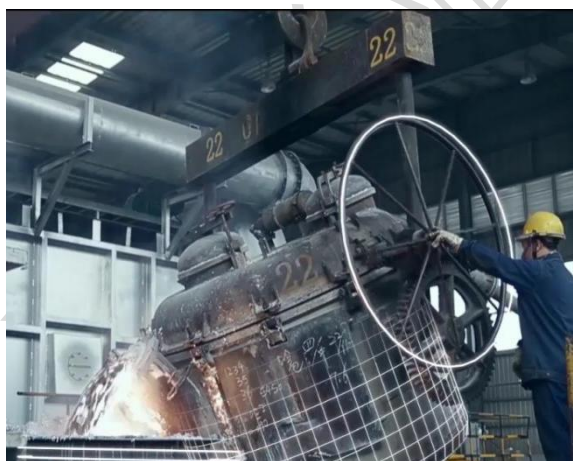


图 5-11 铝液生产现场图



图 5-12 铝锭产品

表 5-4 电解铝液生产的数据溯源表

类别	名称	背景数据来源
原辅料	氧化铝	云铝股份
	阳极碳块（净耗）	云铝源鑫（建水）
	氟化铝	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
	硅铁+磷铁	
	生铁	
	锰铁	
能源	电	云铝股份
	压缩空气	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
资源	新水	
燃料	柴油	
其他	BOD	云铝股份
	燃料燃烧排放	计算值
	能源作为原材料用途的排放	计算值，炭阳极消耗所导致的二氧化碳排放
	工业生产过程排放	计算值，阳极效应所导致的全氟化碳排放

5.5 重熔用铝锭生产

铝液及辅料重熔加工成铝锭，具体生产工艺流程如下图：

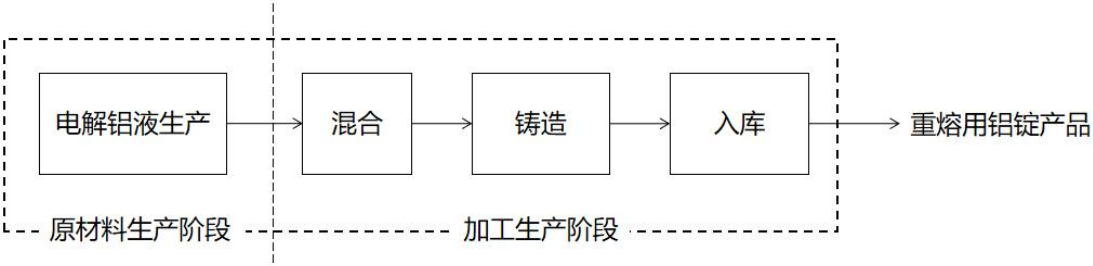


图 5-13 重熔用铝锭生产工艺流程图

表 5-6 重熔用铝锭生产的数据溯源表

类别	名称	背景数据来源
原料	铝液	云铝文山
	停槽抠槽铝块	
	回收废铝线	忽略
	清渣剂	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
	润滑油	
	镀锌钢带	
	塑钢带	
能源	电	云铝文山
	压缩空气	Managed LCA Content(MLC) 2023.1
燃料	天然气	
资源	新水	
其他	BOD	云铝文山
	燃料燃烧排放	计算值

注：数据收集和整理中涉及计算值的内容参考《中国电解铝生产企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》，具体如下：

（一）燃料燃烧排放

燃料燃烧导致的二氧化碳排放量是企业核算和报告年度内各种燃料燃烧产生的二氧化碳排放量的加总：

$$E_{\text{燃烧}} = \sum_i^n (AD_i \times EF_i)$$

$$AD_i = NCV_i \times FC_i$$

$$EF_i = CC_i \times OF_i \times \frac{44}{12}$$

$E_{\text{燃烧}}$ 为核算和报告年度内化石燃料燃烧产生的 CO_2 排放量，单位为吨二氧化碳 (tCO_2) ；

AD_i 为核算和报告年度内第 i 种化石燃料的活动水平，单位为百万千焦 (GJ) ；

EF_i 为第 i 种化石燃料的二氧化碳排放因子，单位为 tCO_2/GJ ；

i 为化石燃料类型代号。

NCV_i 是核算和报告年度内第 i 种燃料的平均低位发热量；对固体或液体燃料，单位为百万千焦/吨 (GJ/t) ；对气体燃料，单位为百万千焦/万立方米 (GJ/万 Nm^3) ；

FC_i 是核算和报告年度内第 i 种燃料的净消耗量，采用企业计量数据，相关计量器具应符合《GB17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则》要求；对固体或液体燃料，单位为吨 (t) ；对气体燃料，单位为万立方米 (万 Nm^3) ；

EF_i 为第 i 种燃料的二氧化碳排放因子，单位为吨二氧化碳 / 百万千焦 (tCO_2/GJ) ；

CC_i 为第 i 种燃料的单位热值含碳量，单位为吨碳/百万千焦 (tC/GJ)；

OF_i 为第 i 种化石燃料的碳氧化率，单位为%。

(二) 能源作为原材料用途的排放：

能源作为原材料用途（炭阳极消耗）的二氧化碳排放量：

$$E_{\text{原材料}} = EF_{\text{炭阳极}} \times P$$

$$EF_{\text{炭阳极}} = NC_{\text{炭阳极}} \times (1 - S_{\text{炭阳极}} - A_{\text{炭阳极}}) \times 44/12$$

式中：

$E_{\text{原材料}}$ 为核算和报告年度内，炭阳极消耗导致的二氧化碳排放量，单位为吨二氧

化 (tCO₂) ;

EF_{炭阳极}为炭阳极消耗的二氧化碳排放因子, 单位为吨二氧化碳 / 吨铝 (tCO₂ / t-Al) ;

P 为活动水平, 即核算和报告年度内的原铝产量, 单位为吨 (t) ;

NC_{炭阳极}为核算和报告年度内的吨铝炭阳极净耗, 单位为吨碳 / 吨铝 (tC/t-Al) , 可采用中国有色金属工业协会的推荐值 0.42tC/t-Al; 具备条件的企业可以按月称重检测, 取年度平均值;

S_{炭阳极}为核算和报告年度内的炭阳极平均含硫量, 单位为%, 可采用中国有色金属工业协会的推荐值 2%; 具备条件的企业可以按照《YS/T63.20-2006 铝用炭素材料检方法第 20 部分: 硫分的测定》, 对每个批次的炭阳极进行抽样检测, 取年度平均值;

A_{炭阳极}为核算和报告年度内的炭阳极平均灰分含量, 单位为%, 可采用中国有色金属工业协会的推荐值 0.4%; 具备条件的企业可以按照《YS/T63.19-2006 铝用炭素材料检测方法第 19 部分: 灰分含量的测定》, 对每个批次的炭阳极进行抽样检测, 取年度平均值。

(三) 工业生产过程排放

电解铝企业工业生产过程排放量是其阳极效应排放量与煅烧石灰石排放量之和:

$$E_{\text{过程}} = E_{\text{PFCs}} + E_{\text{石灰}}$$

$$E_{\text{PFCs}} = (6500 \times EF_{\text{CF}_4} + 9200 \times EF_{\text{C}_2\text{F}_6}) \times P / 1000$$

$$E_{\text{石灰}} = L \times EF_{\text{石灰}}$$

式中:

E_{过程}为核算和报告年度内的工业生产过程排放量, 单位为吨二氧化碳当量(tCO_{2e}) ;

E_{PFCs}为核算和报告年度内的阳极效应全氟化碳排放量, 单位为吨二氧化碳当量(tCO_{2e}) ;

E_{石灰}为核算和报告年度内的煅烧石灰石排放量, 单位为吨二氧化碳 (tCO₂) 。

6500 为 CF_4 的 GWP 值；

EF_{CF_4} 为阳极效应的 CF_4 排放因子，单位为公斤 CF_4 / 吨铝 ($\text{kg CF}_4/\text{t-Al}$) ；

9200 为 C_2F_6 的 GWP 值；

$\text{EF}_{\text{C}_2\text{F}_6}$ 为阳极效应的 C_2F_6 排放因子，单位为公斤 C_2F_6 / 吨铝 ($\text{kg C}_2\text{F}_6/\text{t-Al}$) ；

P 为阳极效应的活动水平，即核算和报告年度内的原铝产量，单位为吨 (t) 。

阳极效应的排放因子与电解槽的技术类型密切相关。目前我国电解铝生产主要采用点式下料预焙槽技术 (PFPB)，属于国际先进技术，中国有色金属工业协会推荐的排放因子数值为 $0.034\text{kg CF}_4/\text{t-Al}$ 和 $0.0034\text{kg C}_2\text{F}_6/\text{t-Al}$ 。具备条件的企业可采用国际通用的斜率法经验公式测算本企业的阳极效应排放因子。

$E_{\text{石灰}}$ 为石灰石煅烧分解所导致的二氧化碳排放量，单位为吨二氧化碳 (tCO_2) ；

L 为核算和报告年度内的石灰石原料消耗量，单位为吨 (t) ；

$\text{EF}_{\text{石灰}}$ 为煅烧石灰石的二氧化碳排放因子，单位为吨二氧化碳 / 吨石灰石 ($\text{tCO}_2 / \text{t 石灰石}$) 。

受核查企业无石灰石消耗，故无石灰石煅烧分解所导致的二氧化碳排放量，故

$$E_{\text{过程}} = E_{\text{PFCs}} = (6500 \times \text{EF}_{\text{CF}_4} + 9200 \times \text{EF}_{\text{C}_2\text{F}_6}) \times P / 1000$$

六、生命周期评价模型

通过生命周期评价专业软件 LCA for Experts (GaBi) 10 软件，对收集的铝锭产品的生产数据进行生命周期评价建模。

七、生命周期评价结果与分析

通过对铝锭产品生产工艺的了解和数据的采集，对整体数据质量的检查和整理，在 LCA for Experts (GaBi) 软件中建立模型，计算得出 2022 年云铝股份生产 1kg 铝锭产品的 LCA 结果。

云铝股份 2022 年生产 1kg 铝锭产品，其生命周期评价结果如下：

表 7-1 云铝股份铝锭 LCA 结果

名称	铝土矿开采	氧化铝生产	阳极碳块生产	铝液生产	铝锭生产	合计
酸化潜势 (kg SO ₂ e)	7.07E-04	5.98E-03	1.10E-03	1.10E-03	2.76E-05	8.92E-03
富营养化潜势 (kg PO ₄ ³⁻ e)	1.61E-04	4.93E-04	9.12E-05	7.30E-05	4.72E-06	8.23E-04
全球增温潜势 (kg CO ₂ e)	1.60E-01	2.35E+00	3.10E-01	1.94E+00	9.82E-02	4.86E+00
一次能源消耗 (MJ)	2.27E+00	2.44E+01	1.61E+01	6.01E+01	3.51E-01	1.03E+02
二氧化碳 (kg)	1.48E-01	2.22E+00	2.62E-01	1.92E+00	9.71E-02	4.64E+00
二氧化硫 (kg)	8.55E-05	3.53E-03	6.65E-04	6.96E-04	8.34E-06	4.98E-03
PM2.5 (kg)	7.14E-06	8.15E-04	3.76E-05	1.21E-04	8.04E-07	9.82E-04

表 7-2 云铝股份铝锭 LCA 结果占比

名称	铝土矿开采	氧化铝生产	阳极碳块生产	铝液生产	铝锭生产	合计
酸化潜势 (kg SO ₂ e)	7.93%	67.08%	12.34%	12.34%	0.31%	100%
富营养化潜势 (kg PO ₄ ³⁻ e)	19.56%	59.91%	11.08%	8.87%	0.57%	100%
全球增温潜势 (kg CO ₂ e)	3.29%	48.37%	6.38%	39.93%	2.02%	100%

一次能源消耗 (MJ)	2.20%	23.64%	15.60%	58.22%	0.34%	100%
二氧化碳 (kg)	3.18%	47.77%	5.64%	41.32%	2.09%	100%
二氧化硫 (kg)	1.72%	70.81%	13.34%	13.96%	0.17%	100%
PM2.5 (kg)	0.73%	83.03%	3.83%	12.33%	0.08%	100%

酸化潜势、富营养化潜势、全球增温潜势、一次性能源消耗、二氧化碳、二氧化硫、PM2.5 七个环境影响指标的结果如下：

(1) 酸化潜势 (AP)：1kg 铝锭产品的酸化潜势结果为 $8.92\text{E-}03\text{kg SO}_2\text{e}$ ，氧化铝生产对于结果的贡献最大，为 $5.98\text{E-}03\text{kg SO}_2\text{e}$ 。

(2) 富营养化潜势 (EP)：1kg 铝锭产品的富营养化潜势结果为 $8.23\text{E-}04\text{kg PO}_4^{3-}\text{e}$ ，氧化铝生产对于结果的贡献最大，为 $4.93\text{E-}04\text{kg PO}_4^{3-}\text{e}$ 。

(3) 全球增温潜势 (GWP)：1kg 铝锭产品的全球增温潜势结果为 $4.86\text{E}+00\text{kg CO}_2\text{e}$ ，氧化铝生产对于结果的贡献最大，为 $2.39\text{E}+00\text{kg CO}_2\text{e}$ ，铝液次之，为 $1.94\text{E}+00\text{kg CO}_2\text{e}$ 。

(4) 一次能源消耗 (PED)：1kg 铝锭产品的一次能源消耗为 $1.03\text{E}+02\text{MJ}$ ，铝锭生产对于结果的贡献最大，为 $6.01\text{E}+01\text{MJ}$ 。

(5) 二氧化碳：1kg 铝锭产品的二氧化碳排放为 $4.64\text{E}+00\text{kg}$ ，氧化铝生产和铝液生产对于结果的贡献较大，分别为 $2.22\text{E}+00\text{kg}$ 和 $1.92\text{E}+00\text{kg}$ 。

(6) 二氧化硫：1kg 铝锭产品的二氧化硫排放为 $4.98\text{E-}03\text{kg}$ ，氧化铝生产对于结果的贡献最大，为 $3.53\text{E-}03\text{kg}$ 。

(7) PM2.5：1kg 铝锭产品的 PM2.5 排放为 $9.82\text{E-}04\text{kg}$ ，氧化铝生产对于结果的

贡献最大，为 $8.15\text{E-}04\text{kg}$ 。

氧化铝生产、铝液生产对于酸化潜势、富营养化潜势、全球增温潜、二氧化碳、二氧化硫、PM2.5 的结果的贡献十分显著。

八、生命周期解释

(1) 完整性

本研究中，铝锭产品生命周期评价模型包含铝土矿开采、氧化铝生产、阳极碳块生产、铝锭生产以及原辅料的运输阶段，不包括产品下游的运输阶段、使用阶段和寿命终止阶段。符合目标和范围的定义，满足建模完整性的要求。

本研究所使用的背景数据库来源于 Managed LCA Content(MLC) 2023.1，包含 17000 个方案和流程数据，包含了主要能源、基础原材料、化学品的开采、制造和运输过程，满足背景数据库完整性的要求。

(2) 一致性

本研究中，生命周期各阶段的主要原辅料消耗、能源消耗均采用企业调研数据，环境排放数据选用企业环境监测数据，所有实景数据均采用一致的统计标准，即按照单元过程产出进行统计。所有背景数据采用一致的统计标准，在开发过程中通过文档记录，确保了数据收集过程的流程化和一致性。

(3) 不确定性

本次铝锭产品生命周期评价的实景数据来源于企业调研数据，调研数据为 2022 年度的生产数据。背景数据来源于 Managed LCA Content(MLC) 2023.1，代表了国内外具有一定规模企业的一般生产水平，且经过数据质量认证。本报告遵循数据取舍原则，在选定系统边界和环境影响指标的基础上，忽略部分重量较小且对于本研究的环境影响结果影响较小的因素，从而简化数据收集和评价过程，例如，在预焙阳极炭块生产工序，

忽略了原物料阶段中的生碎（自产）以及制造阶段的后勤（割草机）、公务车所使用的汽油、扫地车所使用的柴油。生碎属于废弃物资源，属于低价值原料，通过充分利用生碎，可以节约原料和降低生产成本，生碎的质量约占预焙阳极炭块产品质量的 2%，对于铝锭的总工艺来说影响较小，因此选择忽略不计。在氧化铝生产工序中，辅料的质量很小，絮凝剂和脱水剂分别占氧化铝产品质量的 $0.03\% < 1\%$ 和 $0.01\% < 1\%$ ，由于供应商无法提供生产数据、碳排放值或具体成分及配比，缺少背景因子，选择忽略絮凝剂和脱水剂，大大降低了数据收集的难度以及建模的复杂性。考虑了原材料购买到生产地之间的运输方式和运输距离，针对厂内运输，因部分数据无法收集，故对其进行舍弃。

（4）敏感性分析

通过 LCA for Experts (GaBi) 软件建立铝锭产品的生命周期评价模型并进行计算分析后可知，电力、生产过程直接排放、蒸汽、煤气、石灰等是生命周期评价过程中的敏感性因素，对于环境影响指标全球增温潜势有重大贡献，需要针对以上材料和能源进行重点分析和改进。

九、结论

通过对云铝股份 2022 年生产 1kg 铝锭产品建立生命周期模型,量化评估酸化潜势、富营养化潜势、全球增温潜势、一次性能源消耗、二氧化碳、二氧化硫、PM2.5 七个环境影响指标,结果如下:

表 9-1 云铝股份铝锭 LCA 结果

名称	单位	LCA 结果
酸化潜势	kg SO ₂ e	8.92E-03
富营养化潜势	kg PO ₄ ³⁻ e	8.23E-04
全球增温潜势	kg CO ₂ e	4.86E+00
一次能源消耗	MJ	1.03E+02
二氧化碳	kg	4.64E+00
二氧化硫	kg	4.98E-03
PM2.5	kg	9.82E-04

本报告的评价结果仅适用于铝锭产品的生命周期环境影响研究,代表了 2022 年云铝股份生产 1kg 铝锭的水平,行业内其他企业的 LCA 数据可能与本报告有一定的偏差。

根据安泰科的数据,中国吨铝碳排放量约为 16 吨,云铝股份通过采购绿色电力,大大降低了碳排放,减少了大约 11.16t CO₂ e/t.Al。

在铝锭的 LCA 结果中,氧化铝生产、铝锭生产对于生命周期评价结果的贡献度较大。在全球增温潜势结果中,电力、生产过程直接排放、石灰、碱、石油焦等因素对于 GWP 的贡献较大,因此可以针对这些因素进行优化。

一、能源结构优化调整。电力间接排放是铝业全生命周期排放的主要环节,可以扩

大清洁能源使用比例，实现煤电铝向水电铝、核电铝、风光铝转移。目前云铝股份因地制宜，选用低碳化的火电+部分绿电的“混合型”能源结构，企业绿色用电比例达 98.8%，碳排放已经相对较低。还可以利用厂（矿）区发展分布式电源和微电网，推进电解铝直接使用光电、风电、氢能等清洁能源。推动新技术的应用，让分布式光伏发电直流接入电解槽，实现铝电解槽直接使用新能源电力。

二、节能降碳，提高能源利用效率。淘汰高耗能、高排放、低效益的生产工艺、设备和技术。更换更加高效的蒸汽锅炉，提高蒸汽转换率，从而降低对燃料的消耗。通过降低热联产设备的热量传递过程中的能量损失，提高余热回收利用率。

三、供应链协同减排。例如开发高质量阳极、惰性电解阳极产品。提升阳极产品密度、增加残极的回收，延长产品使用寿命，减少原材料消耗，进而减少上游原材料生产所导致的排放。

四、污染防治，无废冶炼。购买低硫煤、低硫炭等低硫燃料，应用高炉煤气精脱硫技术。加强污染防治，促进生态修复、碳汇林业、固废资源化综合利用等新兴产业，协同推进降碳、减污、扩绿。例如提高赤泥综合利用水平，推进赤泥在提铁、水泥、陶瓷、建材及塑料等方面规范化应用。推进电解铝三废（废渣、大修渣、碳渣）等固废资源的综合利用，实现全产业链无废冶炼。

五、新技术的推广与应用。碳捕集封存与利用技术、负碳排放技术已经实现商业化的运作，可以大规模部署新技术，减少直接排放。

绿色铝
在云铝



奋力打造千亿级中铝铝产业西南基地



云南铝业股份有限公司
YUNNAN ALUMINIUM CO., LTD.