

内蒙古创源金属公司 环境生命周期评价报告

2024 年 12 月 18 日

内蒙古创源金属有限公司

目 录

1. 企业及产品介绍	1
1.1 公司简介	1
1.2 产品介绍	1
2. 目标与范围的定义	2
2.1 研究目的	2
2.2 研究范围	2
2.2.1 功能单位	2
2.2.2 系统边界	3
2.2.3 分配原则	4
2.2.4 取舍原则	5
2.2.5 相关假设	5
2.2.7 软件和数据库	6
2.2.8 数据质量要求	7
3. 生命周期清单分析	8
3.1 前景数据	8
3.2 背景数据	9
4. 生命周期影响评价	11
4.1 中点结果	11
4.2 环境影响分析	12
4.2.1 主要环境影响及改进建议	12
4.2.2 生命周期影响分析	13
5. LCA 结果解释	15

5.1 完整性	15
5.2.2 敏感性分析	16
5.2.3 不确定性分析	17
5.2.4 一致性	19
6. 结论、限制和建议	21
6.1 结论	21
6.2 限制	21
6.3 建议	22
附录	23

简称	全称
IPCC	Internation 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

1.1 公司简介

内蒙古创源金属有限公司绿色低碳铝基新材料产业园是山东创新集团于 2012 年在霍林郭勒市投资建设集“风-光-火、煤-电-铝-铝加”一体化的大型绿色低碳铝产业园区。

园区规划总投资 298.6 亿元，一期已完成投资 202 亿元，建成年产 80 万吨电解铝及配套 6 台 330MW 火电机组、2023 年企业实现总产值 122 亿元，利税 13 亿元，解决就业岗位 3000 个。

1.2 产品介绍

本公司现产品为采用氧化铝-冰晶石熔盐电解法生产的、符合 GB/T 1196 规定的重铸用铝锭或原铝液。铝锭锭形不做统一的规定，但应适合于包装、运输和贮存的需要。铝锭锭重为 $15\text{ kg} \pm 2\text{ kg}$ 、 $20\text{ kg} \pm 2\text{ kg}$ 、 $25\text{ kg} \pm 2\text{ kg}$ ，或由供需双方协商，并在订货单（或合同）中注明。原铝液由不同规格的真空抬包车运送到铝合金铸造、加工单位。

铝锭按照国家标准“重熔用铝锭按化学成分分为 8 个牌号，分别是“A199.85、A199.80、A199.70、A199.60、A199.50、A199.00、A199.7E、A199.6E”（注：A1 之后的数字是铝含量）。原铝液的温度、夹渣等要求见 YS/T 1004。

铝锭或原铝液进入工业应用之后主要用于两大类：铸造铝合金和变形铝合金。铸造铝及铝合金是以铸造方法生产铝的铸件；变形铝及铝合金是以压力加工方法生产铝的加工产品：板、带、箔、管、棒、型、线和锻件。

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, 评估内蒙古创源金属有限公司生产的铝锭或原铝液的环境影响。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。

研究结果将为产品的生产者、设计者、购买者和认证者之间的有效沟通提供适当的参考。本研究结果的潜在交流群体为: 内蒙古创源金属有限公司内部管理人员、第三方认证机构、产品设计人员、绿色产品标准开发商、产品购买者, 以及公司外部利益相关者, 如原材料供应商、企业、当地政府和环保非政府组织。

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的国际标准如下:

- 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: 符合 GB/T 1196 规定的 1 吨铸造铝锭或原铝液。其原辅材料研究声明单位定义为符合 GB/T

24483 规定的 1 吨铝土矿、符合 GB/T 24487 规定的 1 吨氧化铝、符合 YS/T 285 规定的 1 吨预焙阳极。

2.2.2 系统边界

本次研究的系统边界为“摇篮”到“大门”，即从铝土矿资源的开采到电解铝产品的产出，包括铝土矿采选、氧化铝生产、预焙阳极生产、铝电解生产和铝液铸锭等工序，还包括辅助材料和能源（燃料、电力）的生产、运输等上游环节。电解铝产品的生命周期系统边界见图 1，即从辅助材料和能源获取到电解铝产品离开生产商厂门为止。

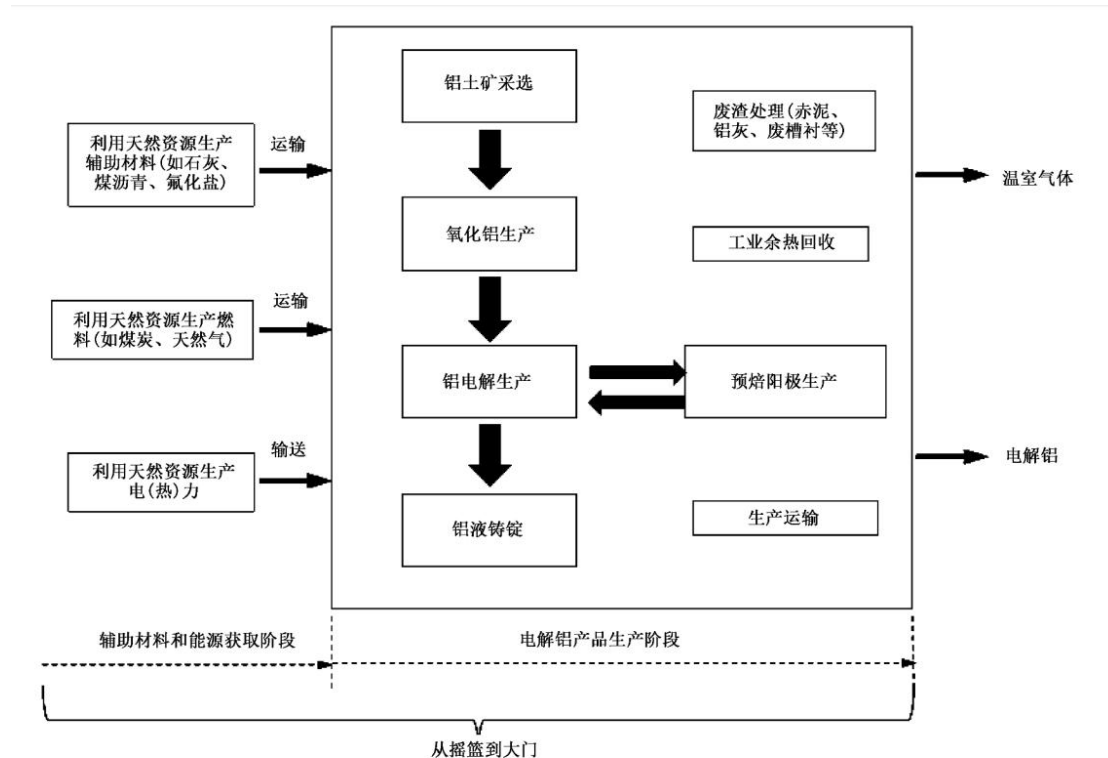


图 1 电解铝产品生命周期系统边界

铝电解生产采用氧化铝-冰晶石熔盐电解法，其工艺流程见图 2。铝电解生产从氧化铝、预焙阳极等原料进入工厂开始，到铝液离开工厂终止，包括以下过程：

- a) 氧化铝、预焙阳极运输；
- b) 阳极组装；

- c) 整流供电；
- d) 铝电解生产相关过程，包括：
 - 1)氧化铝、氟化盐、壳面料储运；
 - 2)电解槽生产；
 - 3)铝液吸出；
 - 4)烟气净化、脱硫；
 - 5)压缩空气生产；
 - 6)电解槽筑炉大修；
- e) 余热回收利用；
- f) 燃料、辅助材料生产与运输相关过程；
- g) 燃料及电（热）力等能源消耗相关过程。

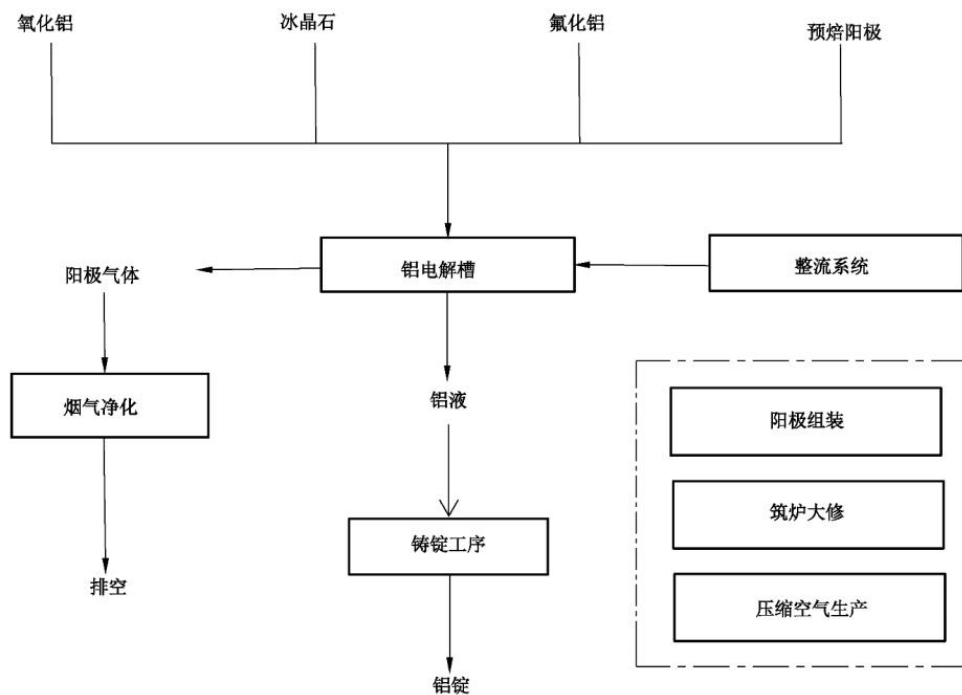


图 2 铝电解生产与铸锭工艺流程图

2.2.3 分配原则

许多流程通常不只一个功能或输出，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阳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、《温室气体产品碳足迹量化方法与要求 电解铝》（GB/T 44905-2024）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；但所有舍弃的合计值，不应超过环境影响总量的 5%。
- 3、忽略道路与厂房等基础设施、生产设备、厂区内人员及生活设施的消耗和排放。

2.2.5 相关假设

在生命周期评价过程中，会出现数据缺失或情景多样化的情况，生命周期评价执行者需要明确相关假设和限制。

- 1、功能单位假设：所有数据收集和影响评估都围绕一个衡量标准展开，即：每吨重铸铝锭或原铝液。
- 2、数据质量假设：设定所需数据的年份为 2023 年、地理范围在内蒙古自治区通辽市霍林郭勒市，数据误差不超过 1%，本报告所提供的前景数据均为实测数据。

3、影响类别选择假设：酸化、全球变暖潜力（GWP100）、淡水水生生态毒性（FAETP）、海洋水生生态毒性（MAETP）、陆地生态毒性（TETP）、非生物性消耗潜力（ADP）：化石燃料、富营养化、人类毒性（HTP）、非生物性消耗潜力（ADP）、臭氧层破坏（ODP）、光化学氧化作用。

2.2.7 软件和数据库

本报告背景数据来自 openLCA 软件和 ecoinvent 3.9.1 数据库。这些数据属于从“摇篮”到“大门”类别。

2.2.8 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：

- 数据完整性：依据取舍原则
- 数据代表性：生产商、技术、地域以及时间的代表性
- 模型一致性：采用的方法和系统边界一致性的程度

采用 3 年内本公司或供应商同一地区经测量或核查的完整数据，数据质量的特征应包括定量和定性两个角度。

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。

3.1 前景数据

以一个自然年为数据收集周期。其特点是年度数据符合组织常规的运营管理，涵盖生产波动的变化因素。

前景数据由内蒙古创源金属有限公司会同集团公司生产部门和体系管理部门的工作人员收集提供。

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。

表 1 氧化铝生命周期清单（山东创源新材料）

类别	物质	用量（每吨氧化铝产品）		排放因子	
		数值	单位	数值	单位
资源消耗	铝土矿	2.75	t	2.996	kg CO ₂ eq /t
	石灰石	0.013	t	5.926	kg CO ₂ eq /t
	氢氧化钠	0.070	t	392.887	kg CO ₂ eq /t
能源消耗	电	188	kWh	0.641	kg CO ₂ eq /kWh
	天然气	8.3	m ³	0.473	kg CO ₂ eq /kg
	蒸汽	1.50	t	0.115	kg CO ₂ eq /MJ
	水	0.7	m ³	0.000	kg CO ₂ eq /kg
	柴油	0	kg	0.804	kg CO ₂ eq /kg
	煤	145	kg	0.251	kg CO ₂ eq /kg
废气排放	二氧化硫	0.013	kg	—	—
	颗粒物	0.0017	kg	—	—
	四氟代甲	0	kg	—	—
	乙烷	0	kg	—	—
	化学需氧	0	g	—	—
固体废弃	赤泥	1.2	t	0.049	kg CO ₂ eq /kg

表 2 电解铝生命周期清单（内蒙古创源金属）

类别	物质	用量（每吨铝水）		排放因子	
		数值	单位	数值	单位
资源消耗	氧化铝	1.913	t/t AL	连接上一环节结果	
	氟化铝	0.016	t/t AL	1.316	kg CO ₂ eq/kg
	阳极炭块	0.479	t/t AL	0.777	kg CO ₂ eq/kg
	石灰石	28.05	kg/t AL	0.003	kg CO ₂ eq/kg
能源消耗	外购火电	2073	kWh/t AL	0.685	kg CO ₂ eq/kWh
	自发电	10797	kWh/t AL	0.869	kg CO ₂ eq/kWh
	绿电（风）	548	kWh/t AL	0.023	kgCO ₂ eq/kWh
	水	2.5	t/t AL	0.0001	kgCO ₂ eq/kg
	柴油	3.098	L/t AL	0.804	kgCO ₂ eq/kg
废气排放	SO ₂	1.423	kg/t AL	=	=
	氟化物	0.006	kg/t AL	=	=
	颗粒物	0.094	kg/t AL	=	=
	二氧化碳	1.59	t/t AL	1	kgCO ₂ eq/kg
废水	废水	0.843	t/t AL	0.0001	kgCO ₂ eq/kg
	悬浮物	5.00	mg/L	=	=
	COD	28.00	mg/L	=	=
固体废弃物	废阳极炭	0.0697	t/t AL	0.0284	kgCO ₂ eq/kg
	碳渣	0.0070	t/t AL	0.0284	kgCO ₂ eq/kg
	大修渣	0.0146	t/t AL	0.0284	kgCO ₂ eq/kg

3.2 背景数据

背景数据大多来自 openLCA 软件和 ecoinvent 3.9.1 数据库，如果可能的话，使用的是中国本地同类数据。电力排放因子中，外购火电的排放因子来源于生态

环境部：关于发布 2022 年电力二氧化碳排放因子的公告中内蒙古省级电力平均二氧化碳排放因子 0.6849 kg CO₂/kWh；自发火电排放因子来源于工厂实测值，为 0.869 kg CO₂/kWh；绿电（风电）排放因子来源于 Ecoinvent 3.9.1 数据库中 1-3MW 陆上风电因子，为 0.023 kg CO₂/kWh。这些数据属于从“摇篮”到“大门”类别。

4. 生命周期影响评价

4.1 中点结果

本次生命周期评价（LCA）分析基于重熔用铝锭生产的功能单元，旨在评估生产过程中的环境影响。数据来源于 openLCA 软件和 ecoinvent 3.9.1 数据库。这些工具和数据库为本次 LCA 分析提供了详细的生命周期影响数据和相应的分类信息。

openLCA 是一款开源的生命周期评估（LCA）软件，广泛用于环境影响评估、碳足迹计算和生态效益分析。该软件支持多种 LCA 方法，并具有强大的数据管理功能，使得用户可以进行详细的生命周期环境影响分析。openLCA 不仅支持用户自定义的生命周期清单（LCI），还可以方便地与不同的 LCA 数据库进行对接，帮助研究人员更高效地进行综合评估。

ecoinvent 3.9.1 是当前最为广泛使用的 LCA 数据库之一，提供了大量的全球环境影响数据，涵盖了多种生产过程、产品和服务的生命周期信息。该数据库包含了详尽的原材料生产、能源消耗、废物排放等数据，是进行生命周期分析的关键工具之一。ecoinvent 数据库基于全球范围内的实际数据，确保了 LCA 结果的准确性和代表性。

ecoinvent - CML v4.8 2016 是一种生命周期影响评估方法（LCIA），由荷兰莱顿大学的 CML（Centre of Environmental Science）研究团队开发，作为生命周期评估（LCA）的一部分用于衡量不同过程和产品对环境的影响。这一版本，发布于 2016 年，包含了多个环境影响类别，例如全球变暖、酸化、富营养化等，通过对每个生命周期阶段的影响进行量化，并最终计算出总的环境影响。1 吨重熔用铝锭产品对环境的具体影响如下表所示。

表 5 重熔用铝锭的中点环境影响（所有数据均基于功能单元）

影响类别	单位	数量
酸化	kg SO ₂ -Eq	86.86

全球变暖潜力 (GWP100)	kg CO ₂ -Eq	<u>14180.43</u>
淡水水生生态毒性 (FAETP)	kg 1,4-DCB-Eq	13673.13
海洋水生生态毒性 (MAETP)	kg 1,4-DCB-Eq	35949137.8 0
陆地生态毒性 (TETP)	kg 1,4-DCB-Eq	41.60
非生物性消耗潜力 (ADP): 化石燃料	MJ	188590.75
富营养化	kg PO ₄ -Eq	23.45
人类毒性 (HTP)	kg 1,4-DCB-Eq	34015.09
非生物性消耗潜力 (ADP)	kg Sb-Eq	0.01
臭氧层破坏 (ODP)	kg CFC-11-Eq	0.00
光化学氧化作用	kg ethylene-Eq	4.84

4.2 环境影响分析

4.2.1 主要环境影响及改进建议

根据重熔用铝锭生命周期评估 (LCA) 的结果, 我们可以清晰地看到该过程对环境的多方面影响。首先, 全球变暖潜力 (GWP100) 较高, 达到了 **14180.43 kg CO₂-Eq**, 显示出重熔铝锭生产过程中的温室气体排放量。这表明, 铝锭生产对气候变化的影响主要来自于高能耗的冶炼过程, 尤其是电力消耗。降低能源消耗, 尤其是减少化石燃料的使用, 能够有效减轻这一影响。

此外, 生态毒性也是铝锭生产的主要环境问题。特别是海洋水生生态毒性 (MAETP) 表现突出, 表明生产过程中可能排放大量有毒物质, 严重影响海洋生态系统。淡水水生生态毒性 (FAETP) 证明了该过程对水生生态环境的潜在危害。这些毒性物质的排放主要来源于冶炼和其他处理过程, 对生态系统造成了长

期且深远的影响。改善废水处理技术和减少有害物质的排放，是减少生态毒性的关键措施。

从资源消耗的角度来看，非生物性消耗潜力（ADP）反映了该生产过程对化石燃料的依赖。这种高能源消耗不仅加剧了全球变暖的潜力，也导致了不可再生资源的过度消耗。因此，提升能效和增加可再生能源的使用将有助于缓解资源消耗带来的环境压力。

尽管如此，臭氧层破坏（ODP）的潜力为零，表明在铝锭生产过程中并未对臭氧层造成显著影响。此项结果表明，该生产过程对臭氧层的负面影响相对较小。

为了减少重熔铝锭生产对环境的影响，以下几个方面可以作为优化方向：1. 减少温室气体排放：通过优化生产工艺和转向低碳能源，如太阳能、风能等，能够有效降低全球变暖潜力。2. 减少生态毒性：改进废水和废气处理系统，使用更加环保的材料和技术，以降低水生生态系统的毒性影响，尤其是在海洋和淡水环境中。3. 提高资源利用效率：通过提高能源效率，减少化石燃料的使用，采用更多的可再生能源，将有助于降低非生物性资源消耗潜力。4. 加强废物回收和循环利用：提升生产过程中的废物管理和资源回收利用，尤其是在稀有金属和废气处理方面，可以减少对环境的负担。

总体来看，重熔用铝锭的生产过程中的环境影响，主要是在温室气体排放和生态毒性方面。通过技术创新和改进生产工艺，能够有效降低这些环境影响，推动铝行业向更加可持续的发展方向迈进。

4.2.2 生命周期影响分析

氧化铝生产的主要环境影响

能源消耗和温室气体排放：氧化铝生产过程虽然涉及大量的能源消耗，尤其是电力，但其环境影响相对较低，全球变暖潜力（GWP）为 1376.96kg CO₂-Eq，远低于电解铝生产的影响。这主要是因为氧化铝生产主要依赖电力而非直接的碳排放过程，但仍需大量能源以支持铝土矿的高温处理。

资源消耗：氧化铝的生产需要大量的原料，尤其是铝土矿（Bauxite），这对生态资源产生一定压力。铝土矿开采的生态负担相对较小，但该环节会对土壤、

空气质量以及水体造成影响。氧化铝的生产也伴随大量废弃物排放，特别是赤泥的处理，这会影响生态系统。

酸化和生态毒性：氧化铝生产过程中的酸化潜力为 8.71 kg SO₂-Eq，虽然低于电解铝生产，但仍然在酸化、生态毒性等方面对环境产生了不小的压力。尤其是赤泥和其他废弃物的管理。

电解铝生产的主要环境影响

全球变暖潜力：电解铝生产的全球变暖潜力显著高于氧化铝生产，达到了 **12803.47** kg CO₂-Eq。这是由于电解铝过程需要高强度的电力供应，而如果电力来源以化石能源为主，这将直接导致大量的二氧化碳排放。

能源消耗：电解铝生产对能源的需求非常高，特别是电力的消耗。在 LCA 中，电力的消耗占据了电解铝生产的环境影响的主导地位。与氧化铝生产相比，电解铝生产的电力消耗不仅导致大量温室气体排放，也使得其他环境影响（如生态毒性、臭氧层破坏等）大幅提升。

生态毒性和酸化：电解铝的电力消耗和直接排放（如氟化物和其他有毒气体）造成的生态毒性极大，特别是在水生生态毒性和陆地生态毒性方面。电解过程中产生的废气排放、氟化物等化学物质不仅会对生态环境造成压力，还会影响当地社区的健康。

重点关注的工艺环节

首先，碳阳极的生产过程需要大量能源，特别是煤炭和天然气，这不仅导致温室气体排放，还加剧了全球变暖潜力（GWP）。其次，碳阳极在电解过程中与氧化物反应生成二氧化碳（CO₂），直接贡献了温室气体排放。此外，碳阳极的消耗还会产生废弃物，这些废料可能在处理不当的情况下造成酸化和生态毒性影响。因此，减少碳阳极的使用或采用更环保的阳极材料（如低 CO₂ 排放阳极）以及提高阳极的回收率，是减少铝生产环境负担的重要方向。

电解铝生产过程中，除去高能源需求外，直接排放的有害气体（如氟化物、SO₂ 等）是造成生态毒性和酸化的重要因素。氟化物在铝电解过程中产生，并被释放到空气中或排放到废水中。氟化物的高浓度排放不仅会导致土壤和水体的污染，还可能对周围的生物和人类健康造成长期影响。针对这一问题，研究和开发新的电解技术，如减少有害气体排放的绿色电解铝生产工艺，显得尤为重要。

氧化铝生产中的原料使用 氧化铝生产依赖于铝土矿（Bauxite）作为主要原料，其开采和使用的环境负担不可忽视。铝土矿开采不仅消耗大量的矿物资源，还会造成土地退化、生态破坏和水资源污染。尤其是铝土矿的废料——赤泥，其处理过程会产生大量的酸化物质和污染物，进而影响周围环境。因此，如何优化铝土矿开采过程、减少废弃物的产生，或采用更加环保的废料处理技术（如赤泥的资源化利用），成为减轻氧化铝生产环境影响的关键。

电力消耗的来源 电解铝生产中的电力消耗是其最大的环境影响来源，尤其是在电力主要来自化石燃料时，温室气体排放将极为严重。因此，电力来源的转型（例如，采用可再生能源如风能、太阳能等替代传统的煤炭电力）将是降低电解铝生产环境负担的有效途径。此外，采用更高效的电解工艺，如使用更节能的电解槽或优化电力管理系统，也能有效减少能耗和环境影响。

从 LCA 结果来看，电解铝生产由于其高能源消耗和直接的有害排放，尤其是温室气体和生态毒性方面，表现出较高的环境负担。而氧化铝生产尽管能源消耗较高，但相较于电解铝生产，其全球变暖潜力和资源消耗相对较低。然而，氧化铝生产过程中的铝土矿使用和赤泥处理等问题仍然值得关注。因此，未来的优化工作应聚焦于电解铝过程中的排放控制和能源结构转型，以及氧化铝生产中的废料处理和原料使用效率。

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。

5.1 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

根据对重熔用铝锭生产过程的 LCA 灵敏度分析，我们可以明确不同投入物对环境影响的敏感性，尤其是电力消耗和碳阳极的变化。

首先，电力消耗在多个环境影响类别中表现出较高的敏感性。减少 10% 的电力消耗会显著降低全球变暖潜力（GWP100）、酸化、海洋水生生态毒性（MAETP）等主要影响类别。例如，电力消耗减少 10% 可使全球变暖潜力降低 7.7%，酸化潜力减少 8.3%。这些变化表明，电力消耗的优化，尤其是转向低碳或清洁能源，将在减缓温室气体排放、减少空气污染和水生生态毒性方面发挥重要作用。因此，电力管理是降低重熔铝锭生产环境影响的关键因素之一。

其次，碳阳极消耗对环境影响的敏感性较低。尽管减少 10% 的碳阳极消耗可以在全球变暖潜力、光化学氧化作用、酸化等方面有所改善，但其对整体环境负担的影响相较于电力消耗较小。例如，减少碳阳极消耗对全球变暖潜力的影响仅为 0.3%。这表明，碳阳极的生产和使用过程对温室气体排放和生态毒性有所贡献，但其影响幅度不如电力消耗。

此外，其他影响类别的分析结果也进一步验证了电力消耗的主导地位。在非生物性消耗潜力（ADP）和富营养化等类别中，减少电力消耗能够有效降低资源消耗和水体污染，相比之下，碳阳极的减少对这些类别的影响较小。

综上所述，本次敏感性分析表明，优化电力使用，特别是转向低碳或可再生电力，能够显著减少重熔用铝锭生产过程的环境影响，而减少碳阳极消耗虽然对某些环境影响有积极作用，但总体贡献较小。因此，重点应放在提升电力效率和减少碳阳极使用对环境影响的减缓效果。

表 6 主要贡献者的灵敏度分析

影响类别	碳阳极 10%	电力 10%
酸化	0.5%	8.3%
全球变暖潜力（GWP100）	0.3%	<u>7.7%</u>
淡水水生生态毒性（FAETP）	0.1%	2.6%
海洋水生生态毒性（MAETP）	0.2%	6.6%
陆地生态毒性（TETP）	0.5%	8.0%
非生物性消耗潜力（ADP）：化石燃料	0.9%	7.5%
富营养化	0.1%	6.4%
人类毒性（HTP）	4.4%	3.9%
非生物性消耗潜力（ADP）	0.5%	5.0%
臭氧层破坏（ODP）	1.0%	1.5%
光化学氧化作用	0.5%	8.2%

5.2.3 不确定性分析

LCA 结果的不确定性分析（重熔用铝锭）

在本次重熔用铝锭的生命周期评估（LCA）中，主要的不确定性来源集中在几个关键环节，尤其是电解铝生产过程。这些不确定性主要体现在数据的准确性、投入物的生产工艺、能源使用以及废弃物处理等方面，具体分析如下：

1. 电力来源的变化

电力是电解铝生产中的关键投入物，电力的来源（如高压电力或低压电力）对 LCA 结果的不确定性具有重要影响。特别是在氧化铝生产阶段，高压电力的使用对酸化、全球变暖潜力及海洋水生生态毒性等环境影响类别具有显著贡献。例如，氧化铝生产中高压电力的消耗量大，若电力来源发生变化（如转向可再生能源），则可能大幅减少这些环境影响。因此，电力来源的变化是 LCA 结果中主要的不确定性因素之一。

2. 铝电解预焙阳极的影响

铝电解预焙阳极的生产过程也对多个环境影响类别产生较大影响，尤其是在全球变暖潜力和光化学氧化作用等方面。电解预焙阳极的生产不仅涉及原料的开采和加工，还与碳排放密切相关。在电解铝生产中，阳极消耗的变化对环境的影响具有较大敏感性，因此阳极的生产工艺和其在电解铝中的使用量的不确定性，也会对最终 LCA 结果产生影响。

3. 原材料供应链的变化

铝土矿、硬煤及石灰石等原材料的供应链过程也是 LCA 不确定性的主要来源。不同来源的原材料、运输方式、加工工艺等均会影响环境负荷。例如，铝土矿消化过程中的赤泥和硬煤的使用会在富营养化、非生物性消耗潜力等类别上产生较大影响，而这些环节的生产效率、污染控制措施等因素的不确定性，可能会导致结果的显著变化。

4. 废弃物处理和处置的影响

废阳极炭块的处理及铝土矿消化过程中赤泥的处置也对环境影响产生一定贡献，特别是在人类毒性和生态毒性方面。废弃物的处理方式（如填埋、回收或焚烧）和处理过程中的技术差异，会直接影响这些类别的环境负荷。由于废弃物管理方法的多样性和不确定性，这一环节对 LCA 结果的贡献也具有较大波动性。

5. 数据质量与假设的影响

LCA 分析中使用的数据，包括原材料的排放系数、生产效率、能源消耗等，都存在一定程度的不确定性。例如，碳阳极的生产和使用数据、高压电力的排放因子等，均可能存在不同的数据来源和计算方法差异。不同的假设条件（如能源转型政策、生产技术的进步等）也可能影响最终的 LCA 结果。因此，在对 LCA 进行敏感性分析时，数据的质量和假设的合理性必须被充分考虑，以确保结果的可靠性。

重熔用铝锭生产的 LCA 结果中的不确定性主要来源于电解铝过程，尤其是电力消耗、电解工艺效率以及原材料供应链等环节。这些环节的变化会显著影响最终的环境影响评估，因此，尤其需要关注电力来源、铝电解预焙阳极的生产过程以及废弃物处理方法对环境影响的潜在影响。此外，确保数据的准确性、透明性以及假设情景的细致分析，将有助于提高 LCA 结果的可靠性和可信度。

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：

a) 在产品系统生命周期和不同产品系统之间的数据质量差异是否与研究的目标和范围一致？

本研究中使用了来自多个不同数据库和数据集的数据，包括来自 ecoinvent 3.9.1 数据库的数据（例如氢氧化钠生产、电力生产、碳阳极材料等），构建了区域性生产活动获取的数据（氧化铝生产及电解铝生产）。

b) 区域和/或时间差异（如果有的话）是否一直适用？

区域差异：本研究中的数据源来自不同地区，主要集中在中国（氧化铝生产过程使用的高压电力为 CN-CHUANGYUAN，电解铝过程使用的高压电力为 CN-NM）。部分数据集则基于全球（GLO）平均水平。

由于中国的能源结构与其他地区（如欧洲或全球平均水平）不同，使用全球平均数据可能无法准确反映中国本地实际生产过程的环境影响。特别是，中国以煤电为主，导致高温煤电生产和排放相关的环境影响较大，而全球数据可能低估了这一点。大部分使用的数据集为 2021 年的平均数据，这基本能代表当前的生产水平，并将电力数据更新到中国官方发布最新数据。

c) 分配规则和系统边界一直应用于所有产品系统吗？

本研究采用了从摇篮到大门的生命周期评价系统边界，涵盖了重熔用铝锭生产的所有主要阶段。所有相关的输入（如能源、原材料）和输出（如排放、废物）都被纳入分析。

研究使用的背景数据集遵循了特定的分配规则。例如，ecoinvent 3.9.1 数据库中的分配规则考虑了生产过程的物质和能量流动，并采用了“切断法”处理多产品系统的交叉影响。

在选择分配规则时，本研究保持一致性，确保所有生命周期阶段采用相同的规则 and 标准来处理多产品系统，特别是在涉及共享能源和原材料的过程中。本研究采用了一致的分配规则和系统边界，确保了所有产品系统在生命周期评价中的统一性和可比性。

d) 影响评估的要素是否一直被应用？

本研究使用的影响评估模型为 CML 4.8，这一模型广泛应用于全球范围的生命周期影响评估，符合国际标准，并被广泛认可为适用于评估全球范围内的环境影响。其适用性在本研究中没有受到地理位置或产品系统差异的限制。

本研究涉及的影响类别包括全球变暖潜力（GWP）、酸化、富营养化、生态毒性（淡水、海洋、陆地）、化石燃料消耗潜力等。这些影响类别是 CML 4.8 模型中标准的评估类别，确保了影响评估要素的一致应用。覆盖了所有相关的环境影响类别，确保了影响评估的一致性。

6. 结论、限制和建议

6.1 结论

采用生命周期评价方法,对内蒙古创源金属有限公司生产的 1 吨重熔用铝锭的生命周期环境影响进行了评价。功能单元为内蒙古创源金属有限公司生产的 1 吨重熔用铝锭。产品的系统边界设置为“从摇篮到大门”。利用生命周期模型和分析特征化方法,从多个角度对生命周期评价进行了评价。

特征化结果表明,电解铝生产对气候、能源、健康等方面的影响巨大,灵敏度分析也强调了电解铝过程电力消耗增减会导致这些环境影响指标的显著变化。综上所述,可以得出以下结论:

一是可在产品设计阶段指导决策,优化材料选择、生产工艺和包装,以减少对环境的负面影响。

二是评估整个供应链中的环境热点,有助于选择环保供应商,降低运输成本,减少资源浪费,从而提高整体供应链的可持续性。

三是优化能源结构,一方面提高电流效率,节能降耗;另一方面推行清洁能源(如太阳能、风能等)替代传统煤电,将有效降低这些环境影响。

四是降低物耗,降低阳极炭块净耗、降低脱硫石灰石粉消耗、降低柴油消耗。

五是提高废弃物排放及回收过程管理,通过优化工艺流程,增加环保设施,可以减少废弃物排放或达标排放;以及优化阳极炭块尺寸达到减少碳阳极消耗,可以降低整个产品生命周期对环境的影响。

六是本着节约资源、保护环境的生产原则,提高产品的成品率至关重要,减少废料回收处置的能源消耗,也可以有效降低对环境的影响。

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，采用全球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，前景数据由内蒙古创源金属有限公司的工作人员提供，数据质量可靠。电力属性为火电，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 LCA 数据或生命周期结果时，研究者应联系内蒙古创源金属有限公司，以确保数据和结果的正确使用。

附录

表 S1 各生产过程的中点环境影响（所有数据均基于功能单元）

影响	酸化	淡水水生生态毒性	海洋水生生态毒性	陆地生态毒性 (TETP)	化石燃料消耗潜力	富营养化	人类毒性 (HTP)	非生物性消耗潜力	臭氧层破坏 (ODP)	光化学氧化作用
单位	kg SO ₂ -Eq	kg 1,4-DCB-Eq	kg 1,4-DCB-Eq	kg 1,4-DCB-Eq	MJ	kg PO ₄ -Eq	kg 1,4-DCB-Eq	kg Sb-Eq	kg CFC-11-Eq	kg ethylene-Eq
氧化铝生产	4.06E-02						3.25E-03			1.63E-03
电解铝生产	1.71E+00						1.37E-01			6.83E-02
铝硫酸盐, 粉末	1.48E-01	3.32E+01	4.82E+04	2.63E-01	1.29E+02	3.12E-02	5.91E+01	6.52E-04	2.30E-07	7.03E-03
铝电解预焙阳极	4.27E+00	7.85E+01	6.83E+05	2.06E+00	1.72E+04	2.73E-01	1.48E+04	3.20E-04	1.48E-05	2.55E-01
硬煤	6.05E-01	9.76E+01	2.51E+05	6.86E-01	8.38E+03	4.80E-01	5.50E+02	3.73E-05	1.51E-07	6.56E-02
破碎、清洗石灰石	1.37E-03	2.99E-02	6.30E+01	3.16E-04	1.29E+00	3.51E-04	9.93E-02	2.58E-07	1.21E-09	9.41E-05
铝土矿	2.22E+00	2.64E+01	5.74E+04	9.86E-01	1.86E+03	2.99E-01	1.09E+02	2.10E-04	1.80E-06	1.13E-01
高压电力（ 电 解铝 ）	7.20E+01	3.58E+03	2.39E+07	3.31E+01	1.42E+05	1.50E+01	1.34E+04	3.15E-03	2.31E-05	3.96E+00

高压电力（ 氧化铝生产 ）	1.93E+00	9.59E+01	6.40E+05	8.88E-01	3.80E+03	4.03E-01	3.59E+02	8.43E-05	6.20E-07	1.06E-01
低压天然气	2.18E-02	2.24E+00	3.35E+03	3.62E-02	6.51E+02	4.79E-03	3.73E+00	1.73E-05	9.89E-07	3.15E-03
化学工业蒸汽	2.97E+00	1.10E+02	4.13E+05	1.79E+00	1.22E+04	5.49E-01	3.31E+02	2.55E-04	1.04E-05	1.93E-01
中和剂，氢氧化钠等效	8.04E-01	1.10E+02	2.88E+05	1.60E+00	1.86E+03	3.32E-01	2.44E+02	1.57E-03	1.00E-04	4.59E-02
水	4.03E-03	3.48E-01	1.38E+03	3.30E-03	1.05E+01	1.42E-03	8.00E-01	1.17E-06	1.29E-08	2.28E-04
铝土矿消化过程中的赤泥	1.26E-01	9.52E+03	9.68E+06	9.30E-02	6.60E+02	3.28E+00	4.11E+03	4.00E-05	6.04E-07	1.39E-02
废阳极炭块处理	4.47E-02	1.92E+01	2.04E+04	3.47E-02	1.15E+02	2.76E+00	1.22E+01	1.93E-05	9.24E-08	3.82E-03

表 S2 氧化铝生产过程全球增温潜势

类别	物质	用量（每吨氧化铝产品）		排放因子			结果（kg CO ₂ eq/t Al）
		数值	单位	数值	单位	来源	
资源消耗	铝土矿	2.75	t	2.996	kg CO ₂ eq /t	RER: Bauxite Sphera	8.239
	石灰石	0.013	t	5.926	kg CO ₂ eq /t	RER: Limestone, gravel (grain size 16/32) (EN15804 A1-A3) Sphera	0.077
	氢氧化钠	0.070	t	392.887	kg CO ₂ eq /t	RER: Sodium hydroxide mix (50%) Sphera	27.502
能源消耗	电	188	kWh	0.641	kg CO ₂ eq /kWh	生态环境部：关于发布 2022 年	120.508

						电力二氧化碳排放因子的公告 (山东)	
	天然气	8.3	m3	0.473	kg CO ₂ eq /kg	RER: natural gas mix spha	2.816
	蒸汽	1.50	t	0.115	kg CO ₂ eq /MJ	RER: Process steam from hard coal 90% Spha	464.807
	水	0.7	m3	0.000	kg CO ₂ eq /kg	CN: Tap water from surface water Spha	0.071
	柴油	0	kg	0.804	kg CO ₂ eq /kg	Ecoinvent 3.9.1 数据库: market for diesel diesel Cutoff, S - RoW	0.000
	煤	145	kg	0.251	kg CO ₂ eq /kg	RER: Hard coal mix Spha	36.400
废气排放	二氧化硫	0.013	kg	-	-		
	颗粒物	0.0017	kg	-	-		
	四氟代甲烷	0	kg	-	-		
	乙烷	0	kg	-	-		
	化学需氧量	0	g	-	-		
固体废弃物	赤泥	1.2	t	0.049 kg/ kg	kg CO ₂ eq /kg	CN: Construction rubble on inert matter landfill Spha	59.372

表 S3 电解铝生产过程全球增温潜势

类别	物质	用量 (每吨铝水)		排放因子			结果 (kg CO ₂ eq/t Al)
		数值	单位	数值	单位	来源	
资源消耗	氧化铝	1.913	t/t AL	连接上一环节结果			1376.96
	氟化铝	0.016	t/t AL	1.316	kg CO ₂ eq/kg	Ecoinvent 3.9.1 数据库: aluminium	21.053

						fluoride production aluminium fluoride Cutoff, S-RoW	
	阳极炭块	0.479	t/t AL	0.777	kg CO ₂ eq/kg	Ecoinvent 3.9.1 数据库: anode production, prebake, for aluminium electrolysis anode, prebake, for aluminium electrolysis Cutoff, S-CN	372.384
	石灰石	28.05	kg/t AL	0.003	kg CO ₂ eq/kg	Ecoinvent 3.9.1 数据库: limestone production, crushed, for mill limestone, crushed, for mill Cutoff, S-RoW	0.084
能源消耗	外购火电	2073	kWh/t AL	0.685	kg CO ₂ eq/kWh	生态环境部: 关于发布 2022 年电力二氧化碳排放因子的公告 (内蒙古)	1419.798
	自发电火电用褐煤	10797	kWh/t AL	0.869	kg CO ₂ eq/kWh	实测值	9382.490
	绿电 (风电)	548	kWh/t AL	0.023	kgCO ₂ eq/kWh	Ecoinvent 3.9.1 数据库: electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, S - CN-NM	12.623
	水	2.5	t/t AL	0.0001	kgCO ₂ eq/kg	CN: Tap water from surface water Sphera	0.252
	柴油	3.098	L/t AL	0.804	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent 3.9.1 数据库: market for diesel diesel Cutoff, S - RoW	2.116
废气排放	SO ₂	1.423	kg/t AL	-	-	Sulphur dioxide [Inorganic emissions to air]	0.000
	氟化物	0.006	kg/t AL	-	-		0.000
	颗粒物	0.094	kg/t AL	-	-		0.000

	二氧化碳	1.59	t/t AL	1	kgCO ₂ eq/kg	Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	1590.000
废水	废水	0.843	t/t AL	0.0001	kgCO ₂ eq/kg	Cooling water to lake [Other emissions to fresh water]	0.072
	悬浮物	5.00	mg/L	-	-		0.000
	COD	28.00	mg/L	-	-		0.000
固体废弃物	废阳极炭块	0.0697	t/t AL	0.0284	kgCO ₂ eq/kg	CN: Construction rubble on inert matter landfill Sphera	2.598
	碳渣	0.0070	t/t AL	0.0284	kgCO ₂ eq/kg		
	大修渣	0.0146	t/t AL	0.0284	kgCO ₂ eq/kg		