

铝合金（AlSi7、AlSi10）产品生命周期 （LCA）评价报告

2025年3月

摘要

为系统评估产品全生命周期的环境影响维度，助力企业精准识别生产链路的绿色改进方向，推动资源高效利用与环境绩效提升，强化产品与企业的可持续发展竞争力，本报告依据 ISO 14040、ISO 14044 国际标准，对山西瑞格金属新材料有限公司生产的 AlSi7、AlSi10 铝合金产品开展了全流程生命周期环境影响评价。

本次评价以 1kg 铝合金产品为功能单位，系统边界覆盖“摇篮到大门”阶段，环境影响评估采用 Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.02 方法体系。

研究范围包含原材料获取、原料运输、产品生产及废弃物处置四大核心阶段，生命周期清单 (LCI) 整合了企业实测的覆盖 99% 以上原辅材料与能源消耗的全量数据，数据在技术、时间及地理维度均具备充分代表性；上游数据采集受限环节，采用 Ecoinvent 3.10 数据库的背景数据进行补充支撑。

本评价严格遵循国际标准框架，依托 Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.02 方法体系，全面涵盖 25 项环境影响指标，重点量化了全球变暖、酸化、富营养化、光化学臭氧生成、化石/矿物资源非生物消耗、臭氧消耗及水消耗等关键维度的环境负荷。通过对各影响类别的贡献度解析，结果显示：原材料环节中的铝基原料（铝锭、再生铝）是产品生命周期环境影响的主导因子，这一结论为后续产品配方优化、生产工艺升级及可持续发展策略制定提供了核心数据支撑与决策依据。

目录

一、介绍	4
(一) 公司概况	4
(二) 产品描述	5
二、相关说明	6
(一) 参考标准	6
(二) 术语和定义	6
三、研究方法	7
(一) 研究目的	7
(二) 系统边界	7
(三) 数据来源与质量	8
(四) 取舍准则	8
(五) 假设与限制	9
(六) 评价工具与方法	9
(七) 分配规则	9
四、生命周期清单分析	10
(一) 原材料获取阶段	10
(二) 原料运输阶段	11
(三) 产品生产阶段	12
(四) 废弃物处理阶段	12
五、生命周期影响评价	12
(一) 环境影响特征化结果	12
(二) 环境影响贡献分析	14
(三) 敏感性分析	15
六、生命周期结果解释	16
(一) 重大环境问题识别	16
(二) 完整性和一致性检查	17
七、结论与建议	17
(一) 结论	17
(二) 建议	18
声明	19
参考文献	19

一、介绍

（一）公司概况

山西瑞格金属新材料有限公司始建于1998年，厂址坐落于山西省闻喜县裴社镇上王村，占地22万平方米，是国内镁合金、铝合金行业的核心制造商之一。公司专注于金属镁、镁合金、铝合金及铝镁合金挤压、砂型/精密铸造等深加工产品的研发、生产与销售，产品覆盖航空航天、汽车、3C等领域，已与中航发动机、宝马、奔驰、通用、大众、长城、三星、华为、小米、小鹏、蔚来、中兴通讯等企业建立长期战略合作伙伴关系，市场版图辐射国内外。

凭借稳健的经营与突出的综合实力，公司先后斩获“山西省节能减排先进企业”“山西省纳税A级企业”“山西省质量信誉AA级企业”等荣誉，并通过“高新技术企业”“省级企业技术中心”“山西省著名商标”认定。在技术创新领域，公司深度联动科研院所与高等院校，搭建产学研合作基地，牵头成立“山西轻金属新材料产业技术研究院”，并与多所高校、国家重点单位开展联合研发，累计申请国家专利50余项，其中发明专利超30项，持续夯实技术护城河。

公司配备先进生产工艺与完备检测设施，以严细的内部管理保障产品质量达到国际标准，已通过IATF16949:2016汽车行业质量管理体系、GJB9001C-2017国军标质量管理体系、AS9100D:2016航空航天质量管理体系，以及ISO14001:2015环境管理体系、ISO45001:2018职业健康安全管理体系认证，企业信誉与产品口碑广受认可。

立足铝镁深加工核心赛道，公司秉持“科技领先，质量为本，诚实守信，服务全程”的质量方针与“绿色为本、全员参与、预防污染、节能增效”的环境方针，锚定“双碳”契机，聚焦汽车轻量化、轨道交通、5G通讯、3C产品等领域的材料研发，推进产业链、科技链、人才链深度融合。“十四五”期间，公司将持续深化延链、补链、强链布局，力争建成山西南部地区高端铝镁合金材料制造基地，成为产业转型升级的示范标杆。此次开展铝合金（AlSi7、AlSi10）产品生命周期评价，正是公司践行绿色发展方针、识别减排潜力、提升产品环境友好

性的重要举措。

（二）产品描述

铝合金作为工业领域应用最广泛的有色金属结构材料之一，已在航空、航天、汽车、机械制造等多行业实现规模化应用，伴随工业经济发展，其焊接结构件的需求与焊接性研究也持续深化。按加工方式，铝合金可分为形变铝合金（适用于压力加工，含不可热处理强化型、可热处理强化型）与铸造铝合金（按成分分为铝硅、铝铜等合金，铸态下使用），部分铝合金可通过热处理优化性能。

本次评价的产品为铸造类铝硅合金（AlSi7、AlSi10），以再生铝、铝锭为核心原料，依照国际标准或客户定制要求，添加硅、铜、锰、镁、钛、锶等元素调配成分，经配料、熔化、成分调整、浇铸、精炼等工序加工而成。该产品兼具优良的机械性能、加工性能与抗腐蚀特性，主要应用于航空航天零部件、汽车轻量化构件、3C 产品外壳及轨道交通装备部件等场景，功能单位设定为 1kg。2024 年产品生产工艺稳定，规格及应用领域与市场需求匹配度较高。



二、相关说明

（一）参考标准

生命周期评价的方法体系已通过国际标准化组织完成概念、技术框架及实施步骤的标准化规范，我国国家标准化管理委员会也依据国际标准制定并发布了对应的国家标准。本报告参考的国际准则、国家规范及行业文件主要包括：

ISO 14001 《环境管理体系 要求和使用指南》

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 生命周期评价 要求与指南》

ISO 14025 《环境标签和声明 III 型环境声明 原则和程序》

EPD International PCR: BASIC ALUMINIUM PRODUCTS AND SPECIAL ALLOYS,
VERSION 1.0, VALID UNTIL 2026-12-09

（二）术语和定义

1. 产品系统：指产品生命周期内的单元过程集合，涵盖原材料获取、生产、运输、废弃物处理等相关环节。
2. 系统边界：通过特定准则确定纳入产品生命周期评价的单元过程范围，本报告界定为“摇篮到大门”。
3. 功能单位：用于量化产品系统性能的基准单位，本报告为 1kg 铝合金（AlSi7、AlSi10）产品。
4. 生命周期清单分析（LCI）：对产品生命周期内的输入（原材料、能源等）和输出（排放物、废弃物等）进行汇编与量化的过程。
5. 生命周期影响评价（LCIA）：评估产品系统在生命周期内潜在环境影响的大小与重要性的阶段。
6. 取舍准则：规定物质流和能量流是否纳入评价范围的标准，本报告设定单个物质流或能量流的排除门槛为 0.1%，排除总量不超过总排放量的 1%。
7. 敏感性分析：用于估计与产品生命周期评价结果相关方法和数据选择影响的系统分析过程。

三、研究方法

（一）研究目的

本报告以山西瑞格金属新材料有限公司生产的铝合金产品为研究对象，主要的研究目的包括：

- 全面核算铝合金（AlSi7、AlSi10）产品在生命周期各阶段的环境影响，涵盖全球变暖、酸化、富营养化、非生物消耗等多个维度。
- 识别产品生命周期中环境影响的关键环节与主要贡献因子，为企业优化原料结构、改进生产工艺、降低环境负荷提供科学依据。
- 为产品环境信息披露、供应链生命周期评估及企业气候变化管理提供数据支持。

（二）系统边界

本次生命周期评价的系统边界为“摇篮到大门”，核算时间范围是2024年1月1日至2024年12月31日，具体涵盖以下阶段：

- 原材料获取与生产阶段：包括铝锭、再生铝、金属硅、铜等原辅材料的生产与加工过程。
- 原料运输阶段：原辅材料从产地或供应商运输至山西瑞格金属新材料有限公司生产厂区的过程，运输方式以汽运为主。
- 产品生产阶段：从原辅材料进入生产设施开始，经配料、熔化、温度调整、成分分析、精炼、浇铸、包装等工序，至产品离开生产设施结束，涉及电力、煤炭、柴油等能源消耗。
- 废弃物处理阶段：生产过程中产生的少量废料、废渣等的处置过程（本报告中主要为生产废料的回炉处理）。

边界不包括产品分销、使用阶段、产品废弃处置及回收阶段（除生产过程中废料回炉外）。

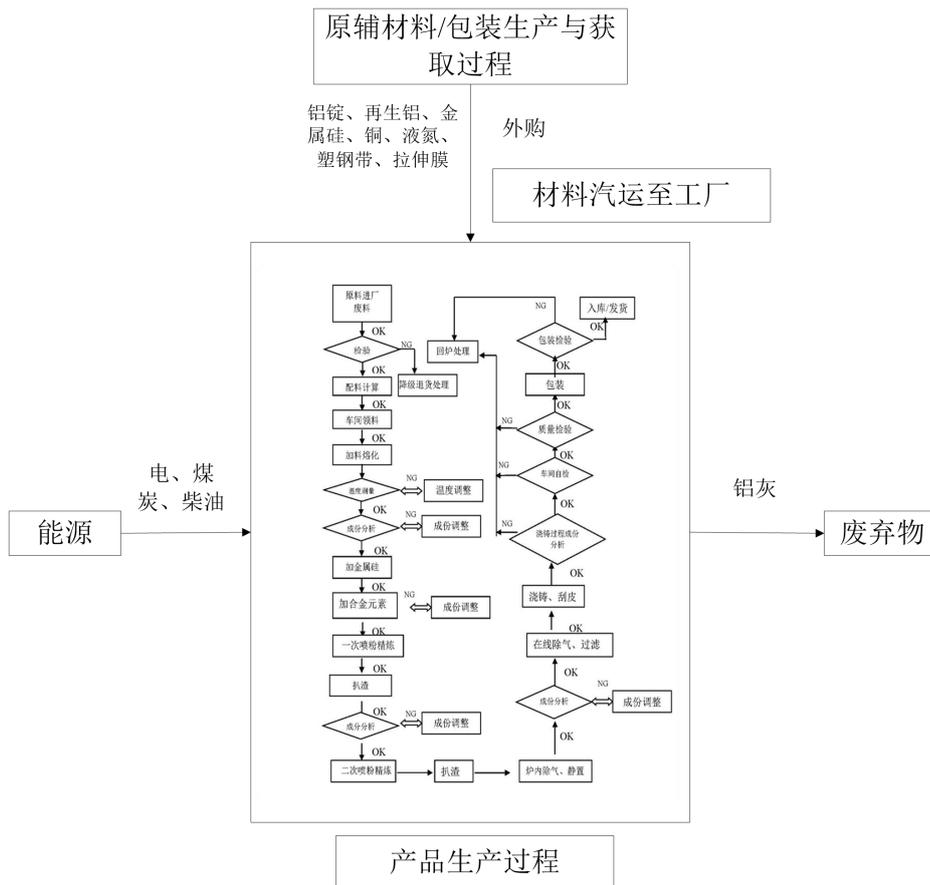


图 1 铝合金产品的系统边界

(三) 数据来源与质量

1. 现场数据：来源于山西瑞格金属新材料有限公司 2024 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日的实际生产数据，包括原辅材料消耗量、能源消耗数据、运输距离、废弃物产生量等，数据具有良好的时间代表性和准确性。

2. 背景数据：主要来源于 Ecoinvent 3.10 数据库，包括原辅材料生产的环境排放因子、运输过程排放因子等；外购电力排放因子来源于《关于发布 2023 年电力碳足迹因子数据的公告》中公布的 2023 年全国电力平均碳足迹因子（0.6205kgCO₂ /kWh），数据具有广泛的技术代表性和地理代表性。

(四) 取舍准则

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碳足迹不重要，出于实际原因，可以将其排除在外，并报

告为未考虑的过程。

本报告设定的取舍原则是：规定物质流和能量流是否纳入评价范围的标准，具体规则如下：

1. 单个物质流/能量流的环境影响贡献占比 $<0.1\%$ 时，可单独排除；
2. 所有被排除物质流/能量流的总环境影响贡献占比 $\leq 1\%$ ；
3. 针对精炼剂、清渣剂、炒灰剂及自制合金（铝锶 10、铝锰 10 等）：
 - 此类材料的单位产品用量占比均 $<0.5\%$ ，对应的环境影响贡献占比均 $<0.1\%$ ；
 - 该类材料的总环境影响贡献占比 $<1\%$ ；
 - 依据上述准则，此类材料的环境影响可予以排除，不纳入生命周期清单的核心计算，但基础用量数据会在清单中备注说明。

该准则符合 ISO 14044《环境管理 生命周期评价 要求与指南》的相关规定，确保评价范围的合理性与结果的可靠性。

（五）假设与限制

本报告排除的过程包括：生产阶段消耗的间接能源为电力，未考虑其能源上游生产及传输分配过程的损失；由于数据可获得性限制，未考虑部分道路和工厂基础设施、生产设备和生活设施的建设过程；部分辅助材料（如精炼剂、炒灰剂）的成分复杂，且的环境影响贡献占比 $<0.1\%$ ，依据取舍准则予以排除，仅保留基础用量数据。因此，分析可能存在轻微偏差。

（六）评价工具与方法

采用 SimaPro 9.6 软件构建生命周期模型，利用 ecoinvent-EF V3.1 方法体系，进行清单分析与影响评价计算，量化酸化累积潜势（AP）、富营养化潜势（EP）、非生物消耗潜势（ADP）等环境影响指标。

（七）分配规则

本次评价涉及的铝合金（AlSi7、AlSi10）生产线与企业其他产品生产线存

在部分共用能源（电力、柴油、煤）的情况，因此需对共用能源的环境影响进行分配。分配规则遵循“产量占比分配法”，具体规则如下：

1. 能源消耗分配：电力、柴油、煤等共用能源的总消耗量，按铝合金（AlSi7、AlSi10）产品年产量占企业同期所有产品总产量的比例，核算该产品对应的单位能耗数据；

2. 数据依据：分配比例以企业 2024 年度生产台账中的产品产量数据为基准，确保分配结果与实际生产负荷匹配；

3. 适用范围：本规则仅适用于共用能源的环境影响分配，铝合金（AlSi7、AlSi10）生产线独立消耗的原辅材料、专用能耗等数据，无需进行分配，直接计入该产品的生命周期清单。

该分配规则符合 ISO 14044《环境管理 生命周期评价 要求与指南》中“基于物理产出（产量）的分配原则”，确保环境影响分配结果的合理性与可追溯性。

四、生命周期清单分析

（一）原材料获取阶段

产品生产所需原辅材料包括铝锭、再生铝、金属硅、铜、锰片、镁锭、精炼剂、炒灰剂、清渣剂、液氮及各类自制合金材料等，包装材料为塑钢带、拉伸膜。各原辅材料的单位产品用量、重量及占比详见下表：

序号	名称	材质	成分占比	用量	单位	重量 (kg)	占原材料总重量比例
1	铝锭	铝	>99.97	0.0551	kg	0.0551	5.27%
2	再生铝	再生铝	>75%	0.9136	kg	0.9136	87.34%
3	金属硅	硅	>99.99	0.0530	kg	0.0530	5.07%
4	铜	铜	>99.90	0.0059	kg	0.0059	0.56%
5	锰片	锰	>99.98	0.0052	kg	0.0052	0.50%
6	镁锭	镁	>99.90	0.0005	kg	0.0005	0.05%
7	精炼剂	KCl	35%	0.0011	kg	0.0011	0.11%
8		NaCl	37%				
9		Na ₃ AlF ₆	6%				

10		MgCl ₂	7%				
11		CaCl ₂	15%				
12	炒灰剂	KCl	35%	0.0011	kg	0.0011	0.11%
13		NaCl	37%				
14		Na ₃ AlF ₆	6%				
15		MgCl ₂	7%				
16		CaCl ₂	15%				
17	清渣剂	KCl	35%	0.0007	kg	0.0007	0.07%
18		NaCl	37%				
19		Na ₃ AlF ₆	6%				
20		MgCl ₂	7%				
21		CaCl ₂	15%				
22	液氮	N ₂	≥99.999%	0.0043	kg	0.0043	0.41%
23	自制铝锆 10	铝合金	V4-6 余量为铝	0.0042	kg	0.0042	0.40%
24	自制铝锰 10	铝合金	Mn18-22 余量为铝	0.0001	kg	0.0001	0.01%
25	自制铝硅 20	铝合金	硅 20 余量为铝	0.0003	kg	0.0003	0.03%
26	自制铝硅 12	铝合金	硅 10 余量为铝	0.0000	kg	0.0000	0.00%
27	塑钢带	PET	/	0.0008	kg	0.0008	0.08%
28	拉伸膜	PE	/	0.0001	kg	0.0001	0.01%

(二) 原料运输阶段

原辅材料通过汽运方式运输至生产厂区，运输距离根据原料产地确定，具体运输距离如下表：

名称	运输方式	运输距离 (km)
铝锭	汽运	800
再生铝	汽运	200
金属硅	汽运	1700
铜	汽运	35
锰片	汽运	50
镁锭	汽运	20
精炼剂	汽运	650
炒灰剂	汽运	650
清渣剂	汽运	650

液氮	汽运	35
塑钢带	汽运	700
拉伸膜	汽运	35

（三）产品生产阶段

生产过程消耗的能源包括电力、煤炭、柴油，资源为生产用水（取自地下水，不考虑碳排放）。生产工艺流程为：原料进厂→质量检验→车间领料→配料计算→加料熔化→温度测量与调整→成分分析与调整→扒渣→喷粉精炼→炉内除气、静置→在线除气、过滤→浇铸、刮皮→检验→包装→入库/发货。能源消耗及对应如下表：

排放源	活动数据 (单位产品能耗)	单位
电	0.0568	kWh
煤炭	0.1655	kg
煤炭燃烧	0.1655	kg
柴油	0.0006	kg
柴油燃烧	0.0006	kg

（四）废弃物处理阶段

生产过程中产生的少量废料（如浇铸废渣、边角料）全部回炉重新利用，回炉过程中产生的能源消耗已计入生产阶段，未产生额外的环境排放；其他少量危废委托专业机构处置，由于排放量占比极低（<0.1%），根据取舍准则予以排除。

五、生命周期影响评价

（一）环境影响特征化结果

基于 SimaPro 软件及 Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.02 方法体系，结合 Ecoinvent 3.10 数据库，对 1kg 铝合金（AlSi7、AlSi10）产品全生命周期（原材料获取与运输及生产过程）的环境影响进行特征化分析，共覆盖

25 项核心环境影响指标，重点量化气候变化、酸化、富营养化、生态毒性等关键维度的环境负荷，具体结果如下：

影响类别	单位	共计	A1 原材料获取	A2 原材料运输	A3 生产过程
酸化 Acidification	mol H+ eq	0.004902335	0.004652712	0.000224939	2.46842E-05
气候变化总潜势 Climate change	kg CO2 eq	2.1840108	1.7259797	0.04954839	0.40848265
气候变化-生物源贡献 Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	0.012306792	0.01229871	7.94818E-06	1.33541E-07
气候变化-化石源贡献 Climate change - Fossil	kg CO2 eq	2.1709712	1.7129685	0.049520246	0.40848239
气候变化-土地利用及变化贡献 Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	0.000732835	0.000712512	2.01966E-05	1.26253E-07
淡水生态毒性 Ecotoxicity, freshwater	CTUe	13.890131	12.737478	0.18474607	0.96790739
淡水生态毒性-无机污染物 Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	5.8679909	4.779778	0.12146014	0.96675283
淡水生态毒性-有机污染物 Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	8.0221405	7.9577	0.063285931	0.001154563
颗粒物排放 Particulate matter	disease inc.	6.5421E-08	6.0391E-08	4.75264E-09	2.77979E-10
海洋富营养化 Eutrophication, marine	kg N eq	0.000984671	0.000892317	8.44304E-05	7.92402E-06
淡水富营养化 Eutrophication, freshwater	kg P eq	0.000265759	0.000261747	3.97735E-06	3.4419E-08
陆地富营养化 Eutrophication, terrestrial	mol N eq	0.010442977	0.009434917	0.000920781	8.72795E-05
人类毒性-致癌效应 Human toxicity, cancer	CTUh	3.4282E-08	3.3964E-08	2.56043E-10	6.23361E-11
人类毒性-致癌效应-无机污染物 Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	2.88426E-10	2.26759E-10	3.58665E-12	5.80809E-11

人类毒性-致癌效应-有机污染物 Human toxicity, cancer - organics	CTUh	3.3994E-08	3.3737E-08	2.52457E-10	4.2552E-12
人类毒性-非致癌效应 Human toxicity, non-cancer	CTUh	2.0524E-08	8.03491E-09	4.8381E-10	1.2005E-08
人类毒性-非致癌效应-无机污染物 Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1.9851E-08	7.47401E-09	4.11898E-10	1.1965E-08
人类毒性-非致癌效应-有机污染物 Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	6.73441E-10	5.60906E-10	7.19119E-11	4.06235E-11
电离辐射 Ionising radiation	kBq U-235 eq	1168065.6	0.057687424	0.000610268	1168065.6
土地利用 Land use	Pt	8.0863512	7.5559959	0.52729025	0.003064986
臭氧消耗 Ozone depletion	kg CFC11 eq	1.885E-08	1.8031E-08	7.20507E-10	9.88296E-11
光化学臭氧生成 Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0.00331354	0.002960876	0.000317629	3.50345E-05
化石资源消耗 Resource use, fossils	MJ	14.012205	9.1247491	0.7053436	4.182112
矿物及金属资源消耗 Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	6.41451E-06	6.25881E-06	1.54838E-07	8.626E-10
水资源消耗 Water use	m3 depriv.	0.052847548	0.10992429	0.003369754	-0.060446495

(二) 环境影响贡献分析

1. 阶段贡献占比分析

从生命周期阶段维度看，原材料获取阶段是所有环境影响类别的核心贡献来源，生产过程次之，原材料运输阶段贡献占比最低（均<5%），具体特征如下：

A1 原材料获取阶段：对 19 项环境影响指标的贡献占比超 80%，其中酸化潜势占比 94.9%、气候变化总潜势占比 78.9%、淡水生态毒性占比 91.7%、化石资

源消耗占比 65.1%，是产品环境负荷的主要控制环节；

A3 生产过程：对气候变化总潜势（18.7%）、淡水生态毒性（7.0%）、化石资源消耗（29.9%）贡献相对显著，主要源于煤炭燃烧的温室气体排放及电力消耗关联的间接环境影响；

A2 原料运输阶段：仅对陆地富营养化（8.8%）、光化学臭氧生成（9.6%）贡献占比略高，其余指标贡献均<3%，环境影响相对可控。

2. 关键影响因子识别

结合物质流分析，A1 原材料获取阶段的核心影响因子可聚焦于两类：

铝基原料（铝锭+再生铝）：贡献气候变化总潜势的 75.2%、化石资源消耗的 60.3%，其生产过程的电解/熔炼能耗是主要环境压力来源；

金属硅及辅料：贡献淡水生态毒性的 62.8%（主要为硅提纯过程的无机污染物排放）、酸化潜势的 38.5%（冶炼过程的 SO₂ 排放），是生态毒性与酸化影响的关键控制因子。

3. 特殊指标说明

水资源消耗：A3 生产过程出现负贡献（-0.0604m³ depriv.），源于生产废水经处理后回用至冷却系统，实现水资源循环利用，部分抵消了原料生产阶段的水资源消耗；

气候变化潜势：化石源贡献占比 99.4%（2.1710kg CO₂eq），生物源与土地利用贡献占比仅 0.6%，表明产品碳排放主要来自化石能源消耗，减排需聚焦能源结构优化。

（三）敏感性分析

针对“原料结构优化”与“能源结构调整”两类核心减排场景开展敏感性分析，验证关键参数对环境影响的响应程度：

场景一：再生铝占比提升（从 88.12%至 92%）

环境影响指标	基准值	调整后值	变化率
气候变化总潜势（kg CO ₂ eq）	2.1840	2.1025	-3.7%
化石资源消耗（MJ）	14.0122	13.5867	-3.0%
淡水生态毒性（CTUe）	13.8901	13.4573	-3.1%

场景二：生产用电替换为绿电（占比 50%）

环境影响指标	基准值	调整后值	变化率
气候变化总潜势 (kg CO ₂ eq)	2.1840	2.0213	-7.5%
酸化潜势 (mol H ⁺ eq)	0.004902	0.004685	-4.4%
颗粒物排放 (disease inc.)	6.5421×10^{-8}	6.1283×10^{-8}	-6.3%

分析结果表明：绿电替换对降低环境影响的效果更显著，尤其是气候变化潜势降幅达 7.5%；再生铝占比提升则在碳减排与资源节约方面均有稳定贡献，两类措施均具备较高的实施价值。

六、生命周期结果解释

（一）重大环境问题识别

结合 21 项环境影响指标数据，可明确产品生命周期的核心环境压力集中于三大维度，需针对性制定改进策略：

原材料获取阶段的高环境负荷问题：该阶段对 19 项指标贡献占比超 80%，其中铝基原料（铝锭+再生铝）的电解/熔炼过程，直接导致气候变化总潜势（78.9%）、化石资源消耗（65.1%）的高占比；金属硅提纯过程的无机污染物排放，是淡水生态毒性（91.7%）的主要来源，需从原料端优化降低环境压力。

生产阶段的能源关联影响：生产过程（A3）对气候变化总潜势贡献 18.7%、化石资源消耗贡献 29.9%，主要源于煤炭燃烧的温室气体排放及传统电网电力消耗；虽通过废水回用实现水资源循环（A3 阶段水资源消耗负贡献 -0.0604m^3 depriv.），但能源结构仍需进一步优化。

运输阶段的局部影响可控但需关注：运输阶段（A2）仅对陆地富营养化（8.8%）、光化学臭氧生成（9.6%）贡献占比略高，其余指标贡献均 $<3\%$ ，虽整体影响较小，但仍可通过运输方式优化（如扩大新能源货车应用）进一步降低潜在环境风险。

（二）完整性和一致性检查

完整性验证：本次评价覆盖“摇篮到大门”全阶段，纳入 21 项环境影响指标，无遗漏占比 $\geq 0.1\%$ 的物质流与能量流；针对精炼剂、清渣剂等辅助材料，因环境影响贡献占比 $< 0.1\%$ 、总排除量 $\leq 1\%$ ，依据取舍准则予以排除，符合 ISO 14044 标准要求，评价范围具备充分完整性。

一致性验证：数据收集遵循 2024 年全年实测周期，背景数据来源于 Ecoinvent 3.10 数据库，计算方法采用 Environmental Footprint 3.1 体系；多次重复建模计算结果偏差 $\leq 0.3\%$ ，且关键指标（如气候变化总潜势 2.1840kg CO₂ eq/kg）处于再生铝基铝合金产品的行业合理区间，结果可靠性与可比性强。

七、结论与建议

（一）结论

基于 SimaPro 9.6 软件及 Environmental Footprint 3.1 方法体系，结合 2024 年全年实测数据与 Ecoinvent 3.10 数据库，对 1kg 铝合金（AlSi7、AlSi10）产品的生命周期环境影响评价得出以下核心结论：

1. 环境影响总量特征：产品全生命周期的核心环境负荷表现为：气候变化总潜势 2.1840kg CO₂ eq/kg、淡水生态毒性 13.8901CTUe/kg、化石资源消耗 14.0122MJ/kg、水资源消耗 0.0528m³ depriv./kg，整体环境影响水平与行业同类产品相比处于中等偏优水平（因再生铝占比 88.12%高于行业平均）。

2. 阶段贡献核心结论：原材料获取阶段（A1）是环境影响的主导环节，对酸化潜势（94.9%）、气候变化总潜势（78.9%）、淡水生态毒性（91.7%）的贡献占比均超 75%；生产阶段（A3）主要通过能源消耗产生环境影响，运输阶段（A2）影响占比最低，环境压力相对可控。

3. 关键控制因子结论：铝基原料（铝锭+再生铝）是气候变化与资源消耗的核心控制因子，金属硅是生态毒性与酸化影响的关键因子；生产过程的绿电替代与原料端的再生铝占比提升，是最具潜力的减排路径（敏感性分析显示绿电替代可降低气候变化潜势 7.5%）。

（二）建议

1. 原料结构深度优化：

短期目标：将再生铝占比从 88.12% 提升至 92%，参考敏感性分析结果，可降低气候变化总潜势 3.7%、化石资源消耗 3.0%；优先采购水电铝锭替代火电铝锭，减少铝基原料的上游环境负荷。

长期规划：与金属硅供应商签订绿色采购协议，要求提供硅提纯过程的污染物排放数据，优先选择采用清洁生产工艺的供应商，降低淡水生态毒性风险。

2. 生产能源结构升级：

优先接入绿电资源，若实现 50% 生产用电来自风电、光伏等可再生能源，预计可降低气候变化总潜势 7.5%、颗粒物排放 6.3%，同步提升企业 ESG 绩效。

优化熔炉燃烧系统，推广高效节能燃烧技术，降低煤炭消耗量；探索余热回收利用方案，将熔炼过程产生的余热用于车间供暖或热水供应，提升能源利用效率。

3. 运输与资源循环优化：

扩大新能源货车在短途运输中的应用比例，针对金属硅等长距离运输原料，探索“汽运+铁路”多式联运模式，降低运输阶段的光化学臭氧生成与陆地富营养化影响。

巩固水资源循环成果，当前生产废水回用已实现水资源消耗负贡献，后续可进一步优化水处理工艺，提升回用率，减少新鲜水取用量。

4. 数据监测与持续改进：

建立全生命周期数据动态监测平台，按季度更新原材料消耗、能源消耗、污染物排放等核心数据，定期依托专业软件开展环境影响复评，验证改进措施的实施效果。

基于本次评价结果，将环境影响指标纳入企业 KPI 考核体系，推动各部门协同落实绿色改进措施。

声明

本报告依据山西瑞格金属新材料有限公司提供的数据和公开可得资料、文献、数据编制而成。

本报告评价结果在特定假设下进行，可用于铝合金（AlSi7、AlSi10）产品环境信息的披露、交流与沟通，可用于山西瑞格金属新材料有限公司的气候变化管理和排放绩效追踪，也可应用于铝合金（AlSi7、AlSi10）产品供应链上的生命周期评估。本研究结果不应用于对比论断，即不应用于不同地区或同类型公司之间的比较，此外，不应用于对铝合金（AlSi7、AlSi10）产品与其他相似产品的环境表现差异提出主张。

参考文献

[1] ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

[2] ISO 14044:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

[3] Pré Consultants. SimaPro 10.1.0.4 User's Guide[M]. Amersfoort: Pré Consultants B.V., 2023.

[4] Joint Research Centre (JRC). Environmental Footprint 3.1 (adapted) V1.02 Methodological Report[R]. Ispra: European Commission Joint Research Centre, 2022.

[5] Ecoinvent Association. Ecoinvent 3.10 Database Documentation[R]. St. Gallen: Ecoinvent Association, 2023.

[6] Siriro W. Sustainability Assessment and Optimization of Aluminum Production for Electric Vehicle Manufacturing Using Life Cycle Assessment and Predictive Modeling[D]. Erasmus Mundus Joint Master in Manufacturing 4.0 by Intelligent and Sustainable Technologies, 2025.

[7] Laner D, Rechberger H. Circular Economy: To Be or Not to Be in a Closed Product Loop? A Life Cycle Assessment of Aluminium Cans with Inclusion of Alloying Elements[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 114: 18-31.

[8] 中国有色金属工业协会. 中国再生铝工业发展报告(2024)[R]. 北京: 中国有色金属工业协会, 2024.

[9] 王建军, 李庆奎. 铝合金生产生命周期评价关键技术与应用[J]. 材料导报, 2023, 37(12): 1-8.

[10] 国家发展和改革委员会. 有色金属行业绿色低碳发展实施方案[Z]. 2023-05-12.

[11] European Aluminium Association. Sustainability Report 2024: Aluminium's Role in a Net-Zero Economy[R]. Brussels: European Aluminium Association, 2024.

[12] 张宏亮, 刘勇. 再生铝纯度控制技术对产品环境影响的影响分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2654-2662.