

182 mm 单晶硅片碳足迹报告

目 录

缩略词	3
摘要	4
1. 产品碳足迹介绍	5
2. 企业及产品介绍	6
3. 目标与范围定义	7
3.1 研究目的	7
3.2 研究范围	7
3.2.1 功能单位	8
3.2.2 系统边界	8
3.2.3 分配原则	9
3.2.4 取舍原则	9
3.2.5 相关假设和限制	9
3.2.6 影响类型和评价方法	10
3.2.7 软件和数据库	10
3.2.8 数据质量要求	11
4. 生命周期清单分析	13
4.1 前景数据	13
4.2 背景数据和数据质量	14
5. 影响评价	18
5.1 碳足迹贡献分析	18
5.2 生命周期阶段贡献分析	19
5.3 单元过程贡献分析	20
6. 结果解释	21
6.2 完整性、敏感性、不确定性和一致性检查	21
6.2.1 完整性检查	21
6.2.2 敏感性分析	22
6.2.3 不确定性分析	22
6.2.4 一致性	22
7. 结论	23

缩略词

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)

摘要

本研究的目的是按照国际标准组织(ISO)规定的生命周期评价(LCA)方法,计算得到高景太阳能科技有限公司生产的 182mm 单晶硅片的碳足迹值。

为了满足碳足迹第三方认证以及与各相关方沟通的需求,本研究的功能单位(声明单位)定义为: 1 吨 182mm 单晶硅片。研究的系统边界定义为“摇篮”到“大门”,其中涵盖了主要原材料(多晶硅原料、高纯石英、混酸)的生产过程,以及产品现场生产阶段。研究得到: 1 吨 182mm 单晶硅片的碳足迹值为 107167.79 kg CO₂ eq.,其中硅片原材料获取阶段的碳排放为 103365.35 kg CO₂ eq. (96.45%),硅片生产阶段的碳排放为 3802.44 kg CO₂ eq. (3.55%)。1 吨硅棒的碳足迹为 99432.72 kg CO₂ eq.,其中硅棒原材料获取阶段的碳排放为 74882.24 kg CO₂ eq. (75.31%),硅棒生产阶段的碳排放为 24550.49 kg CO₂ eq. (24.69%)

研究采用 Simapro 软件实现了产品的生命周期建模、计算和结果分析,以保证数据和计算结果的可溯性和可再现性。研究过程中,为了保证数据质量,实景数据来源于高景太阳能科技有限公司的现场收集,背景数据来源于 Ecoinvent3.7、ELCD。这 2 个数据库是国际上公认和广泛采用的生命周期数据库。

1. 产品碳足迹介绍

近年来，“碳足迹”这个术语越来越广泛地在全世界范围内所使用。碳足迹通常在三个层面实施，即项目层面、组织层面、产品层面。产品碳足迹(Product Carbon Footprint, CFP)是指衡量某个产品在其生命周期各阶段的温室气体排放量总和，即从原材料开采、产品生产(或服务提供)、分销、使用到最终处置/再生利用等多个阶段的各种温室气体排放的累加。温室气体包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFC)和全氟化碳(PFC)等。碳足迹的计算结果为产品生命周期各种温室气体排放量的加权之和，用二氧化碳当量(CO₂ eq.)表示，单位为 kg CO₂ eq.或者 g CO₂ eq.。权重因子(也叫特征化因子，即各种温室气体的二氧化碳当量值)通常采用联合国政府间气候变化专家委员会(IPCC)提供的值，目前这套因子被全球范围广泛使用。

在“低碳社会”、“低碳经济”受到广泛关注的今天，越来越多的企业通过产品碳足迹调查，帮助企业发现减少产品温室气体排放、实现节能减排的途径，同时也是一种促进绿色消费的重要手段，从而支持可持续的生产与消费。低碳产品对消费者有更强的吸引力，企业可以将产品碳足迹作为长期战略的组成部分，并以此与市场上同类产品形成区别，从而提高产品和企业的竞争力。此外，通过对产品碳足迹的评估和针对性的改进，可以提高企业和供应链在原材料使用和产品生产上的效率，这也有利于企业成本的降低。

产品碳足迹计算只包含一个完整生命周期评价(LCA)的温室气体的部分。基于 LCA 的评价方法，国际上已建立起多种碳足迹评估指南和要求，用于产品碳足迹认证。碳足迹国际标准 ISO14067:2018 于 2018 年正式发布；此外，世界企业可持续发展协会(WBCSD)与世界资源研究院(WRI)于 2012 年发布了《温室气体核算体系：企业核算与报告标准(修订版)》，该标准包含两项指南：产品生命周期计算与报告(Product life cycle accounting and reporting)，以及企业价值链(范畴三)计算与报告(Corporate-level value chain (scope 3) accounting and reporting)。各项国际标准的陆续发布，目的是建立一个一致的、国际间认可的测量产品碳足迹的评估标准。而且，越来越多的产品碳足迹评估项目在韩国、日本、德国、法国等国家陆续开展；一些大型的国际零售商已经采取了针对供应链的减碳行动，目的是履行企业将可持续消费理念广泛传播的社会责任。总之，产品碳足迹已经

成为一个行之有效的定量指标，用于衡量企业的绩效、管理水平和产品对气候变化的影响大小。

2. 企业及产品介绍

广东高景太阳能科技有限公司成立于 2019 年 7 月 3 日，由业内资深团队、IDG 创业投资基金及珠海华发集团共同创立，总投资 170 亿元，主要开展大尺寸硅棒和硅片的研发、制造及销售一体化业务。公司总部位于珠海横琴自贸区，下设珠海金湾 50GW 大尺寸单晶硅片生产基地（广东金湾高景太阳能科技有限公司）、青海西宁 50GW 单晶拉棒生产基地（青海高景太阳能科技有限公司），销售办公室位于江苏苏州。

高景太阳能在大尺寸硅片研发制造方面掌握多项核心技术，运用数字化与智能化制造平台，为客户提供 210mm（P&N 型）和 210mm（P&N 型）高效大尺寸硅片产品。以“高起点、高标准、高速度”谋划建设，高景太阳能积极协同上下游产业链，与供应商、客户互惠共赢发展，致力于成为全球光伏硅片领域的标杆企业。高景太阳能研发团队研发解决大部分同类企业在 210MM 等大尺寸硅片上，普遍存在的单晶炉、切片机及其它配套设备匹配度等问题，掌握核心专利技术。

青海西宁热场配套系业内唯一一家大尺寸热场，能够对大尺寸硅片设备的匹配提出更高要求。并将对产品全生命周期各环节提供有利保障。同时，在拉速方面也领先于行业龙头企业，成为保证产品质量及性能的重要因素。

珠海金湾采用直径为 40um 的金刚石线进行切割，切割过程中，金刚石线加速度达 5m/s^2 - 9m/s^2 ，运行速度达 800m/min - 2000m/min 。采用此细线化的方法进行硅片切割，得到的硅片表面粗糙度和损伤层厚度低，硅片的 TTV 均值低，硅片性能好；而且切割过程中，硅材料损失少，出片率高，同样大小的硅材料切割时间更短，从而有效降低成本。

3. 目标与范围定义

3.1 研究目的

本研究的目的是按照 ISO14040:2006、ISO14044:2006、ISO14067:2018 标准的要求，评估高景太阳能科技有限公司的 182mm 单晶硅片产品的碳足迹。为第三方碳足迹认证提供详细的信息和数据支持，为企业自身的产品设计、物料采购、生产管控等提供可靠的碳排放信息，也为企业建立碳中和品牌，践行国家“绿色制造”战略，申报绿色工厂和绿色产品等做好准备。

研究的结果将为认证方、企业、产品设计师、采购商及消费者的有效沟通提供合适的方式。研究结果的潜在沟通对象面向的群体有：第三方认证机构，高景太阳能科技有限公司的管理人员、产品设计师，产品的采购商和消费者，以及企业的外部利益相关者，如原材料供应商，政府部门和环境非政府组织等。

研究获得的数据信息还可用于以下目的：

- 产品生态设计/绿色设计
- 同类产品对标
- 绿色采购和供应链决策
- 申报绿色工厂

3.2 研究范围

本项目碳足迹核算依据国际标准如下：

- ISO14067:2018 温室气体-产品碳足迹-量化与交流的要求与指南
- 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 ISO14067:2018、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。

3.2.1 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碳足迹信息，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：1吨182mm单晶硅片。

3.2.2 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。

本次产品碳足迹分析分为两个阶段。第一个阶段为青海工厂生产的单晶硅棒，硅棒的主要原材料为多晶硅原料（SiO₂的含量占比99.9999%；硼、磷、碳含量<2.1ppba，金属含量<30ppba），由上游供应商提供，辅料主要为混酸（氢氟酸、硝酸和盐酸），生产过程能源消耗以电力和水为主，产出物主要为182mm硅棒，硅泥和废石英，硅泥和废石英分别由不同的供应商进行回收利用，其他的废弃物质量占比很小，可以忽略不计。

第二个阶段为珠海工厂进行切片。182mm单晶硅棒运输到珠海工厂，进行切片、清洗、检测，然后包装出库，该过程中主要消耗，清洗剂，液碱和混酸等化学药剂，金刚线的用量较少，且大部分进行回收利用，所以不考虑金刚线的环境负荷。生产过程中的能源消耗为电力和水，产出物为硅片，由第三方公司进行回收利用。

1吨182mm单晶硅片的生命周期的系统边界如图1所示。

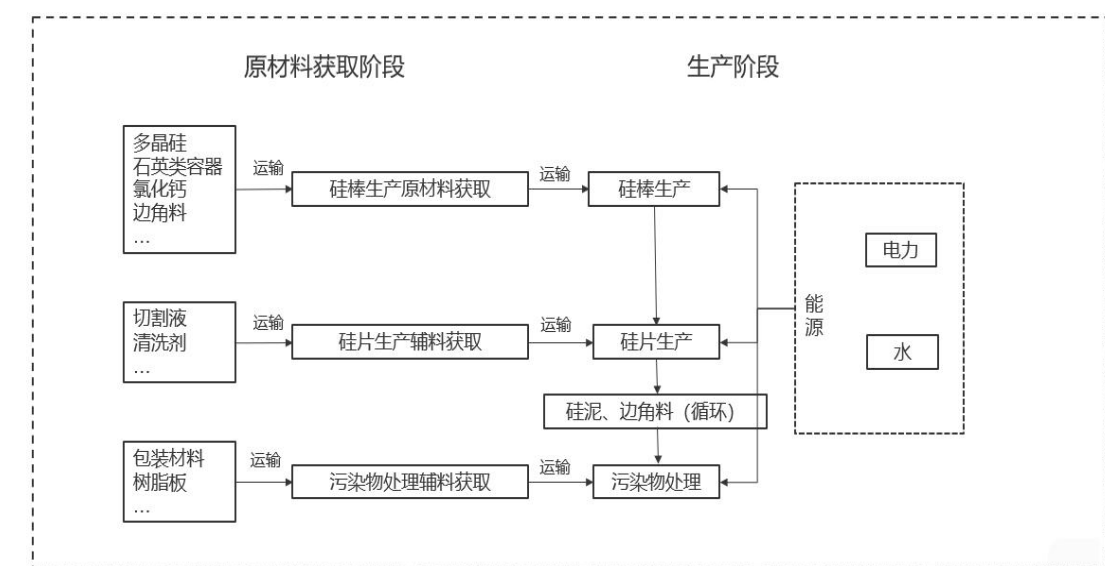


图1 系统边界

3.2.3 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.扩大系统边界；c.以物理因果关系为基准分配环境负荷；d.使用社会经济学分配基准；

产品生产过程中由副产品硅泥和废石英产出，以物理关系为分配原则。1t 硅棒的生产过程中，会产出 47.7kg 的硅泥和 44.2kg 的废石英。所以硅棒、硅泥和废石英的环境负荷分配比例分别为：91.58%，4.37%和 4.05%。1 吨 182mm 单晶硅片的生产过程中，会产出 191.12kg 的硅泥，硅片和硅泥的分配比例为 92.90% 和 7.1%。

3.2.4 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 3%。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、忽略生产资料与基础设施。

本研究舍去了金刚线和乳酸生产过程中的环境影响，金刚线的用量为 3.155kg，占总产品质量的 0.26%，满足取舍要求。乳酸的用量为 5.383kg，占产品总重量的 0.44%，满足取舍准则的要求。

3.2.5 相关假设和限制

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。

本次研究并为采用相关假设。

3.2.6 影响类型和评价方法

基于研究目标的定义，本研究选择对产品生命周期的全球变暖潜值(Global Warming Potential, GWP)进行分析，因为 GWP 是用来量化产品“碳足迹”的环境影响指标。

碳足迹量化评价方法的选用考虑方法符合 ISO14067:2018、ISO14040:2006、ISO14044:2006 标准的要求，并考虑方法的科学性、特征化因子的可获得性以及方法的适用性，表 1 展示了环境影响及评价模型。

表 1 环境影响类型及评价模型

环境影响类型	评价模型	贡献物质	影响类型参数	方法来源	影响类型特点
全球变暖潜值 (Global Warming Potential,GWP)	伯尔尼模型 -100 年内的 全球变暖潜 值	CO ₂ 、CH ₄ 、 CFC 等	kg CO ₂ eq.	IPCC, 2013	全球性影 响类型

全球变暖潜值(GWP)：IPCC 五次评估报告(2013 年)提出的方法来计算产品生命周期的 GWP 值，IPCC(2013)方法中涵盖了多种特征化物质，包括二氧化碳(CO₂)，甲烷(CH₄)，氧化亚氮(N₂O)，四氟化碳(CF₄)，六氟乙烷(C₂F₆)，六氟化硫(SF₆)，氢氟碳化物(HFC)和哈龙等。该方法基于 100 年时间范围内其他温室气体与二氧化碳相比得到的相对辐射影响值，即特征化因子，此因子用来将其他温室气体的排放量转化为 CO₂ 当量(CO₂ eq.)。例如，1kg 甲烷在 100 年内对全球变暖的影响相当于 28kg 二氧化碳排放对全球变暖的影响，因此以二氧化碳当量(CO₂ eq.)为基础，甲烷的特征化因子就是 28 kgCO₂ eq.。

3.2.7 软件和数据库

在研究中，Simapro9.1 软件被用来建立产品的生命周期模型，计算碳足迹结果。Simapro 是由荷兰 Pre Consultant 公司研发的专业 LCA 软件，支持全生命周期过程分析，其中内置了瑞士的 Ecoinvent 数据库、欧洲生命周期参考数据库(ELCD)以及 Agri-footprint、USLCI 等多个数据库。本研究中，使用了 Ecoinvent、

ELCD 数据库中的数据集。

Ecoinvent 数据库由瑞士生命周期研究中心开发，包括西欧、瑞士、中国等地区的数据，该数据库包含 10000 条以上的产品和服务数据集，涉及化工、能源、运输、建材、电子、纸浆和纸张，废物处理和农业活动等。<http://www.Ecoinvent.org>

欧洲生命周期参考数据库(ELCD)由欧盟研究总署开发，其核心数据库包含超过 300 个数据集，其清单数据来自欧盟行业协会和其他来源的原材料、能源、运输、废物管理数据。<http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetCategories.vm>

3.2.8 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

为了准确的评估数据质量，在 SimaPro 中使用所谓的系谱矩阵（最初由 Weidema（1996）开发）来估计几何标准偏差。每个数据点根据六个标准加上基本不确定因素（取决于数据类型）进行评估。使用以下等式计算 95%置信区间或平方几何标准偏差：

$$U^2 = \sum_{n=1}^6 U_n^2$$

因子 U_1^2 至 U_6^2 是指（1）可靠性、（2）完整性、（3）、时间相关性（4）、地理相关性、（5）技术相关性、（6）样本大小的得分（见表 2）。

表 2 数据质量（不确定度）得分表

分数	1	2	3	4	5
U1 可靠	检验数据 基于测量	检验数据部 分基于假设 或者未证实	未证实数据部 分基于合格的 评估	合格的评估 （像工业专 家）；数据来	不合格评 估

性		数据基于测量		源理论信息 (化学计量、焓等)	
	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
U2 完整性	代表性数据来自所考虑市场的所有相关站点, 一定时期内平稳波动	代表性数据来自所考虑市场的>50%相关站点, 一定时期内平稳波动	代表性数据来自所考虑市场的<<50%相关站点, 或者更短时期内>50%站点	代表性数据来自所考虑市场的一个站点或者更短时间内的一些站点	代表性未知, 或者数据数据来源于更短时间的少量站点
	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
U3 时间相关性	与参考年份相差少于3年	与参考年份相差少于6年	与参考年份相差少于10年	与参考年份相差少于15年	数据年龄未知, 或与参考年份相差大于15年
	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
U4 地域相关性	数据来源于正在研究的区域	平均数据来源于包括正在研究区域以内的更大区域	数据来源比正在研究更小的区域或者相似区域	数据来源于有相似生产状况的区域	数据来源于未知区域或者明显不同的区域
	1.00	1.01	1.02	1.05	1.10
U5 技术相关性	数据来源于正在研究二点企业, 流程和材料(例如	数据来源于相同技术, 不同企业的流程和材料	数据来源与同一技术的相关流程或者材料, 或者正在研究的流程和材料	数据来源于不同技术的相关流程和材料, 或者数据来源于实验室规模	数据来源于实验室规模不同的技术的相关的相

性	相同的技 术)		但是不同技术	的流程和相同 技术	关流程和 材料
		1.05	1.20	1.50	2.00
U6 样 本 大 小	>100, 连续 测量, 购买 产品的平 衡	>20	>10, 环保报告 中的汇总图	>=3	未知
	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20

为了满足上述要求,并确保计算结果的可靠性,在研究过程中实景数据首选来自生产商和供应商直接提供的数据。背景数据大部分选择来自 Ecoinvent 数据库,少量来自 ELCD 数据库,这些数据库中的数据是经严格审查,并广泛应用于国际上的 LCA 研究。

4. 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:由高景太阳能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 Ecoinvent 和 ELCD 数据库。这些数据属于“从摇篮到大门”类别。

4.1 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“门到门”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。

本研究收集的数据是生产现场 6 个月的统计数据。数据时间为 2021 年 11 月至 2022 年 4 月。数据代表了 182mm 单晶硅片的平均生产水平。

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、蒸汽消耗量等。各工序的输入和输出根据功能单元进行计算。

4.2 背景数据和数据质量

背景数据大多来自 Eco-invent 3.7，如果可能的话，使用的是中国本地数据。数据质量从 6 个方面进行评估，评估准则见 3.2.7

表 3 硅棒原材料获取阶段数据

材料名称	材质	数据	单位
高纯石英	SiO ₂ 占 99.9%,CaCl ₂ 占 0.1%	70.010	kg
多晶硅原料	SiO ₂ 的含量占比 99.9999%; 硼、磷、碳含量<2.1ppba, 金属含量<30ppba	1030.960	kg
氢氟酸	HF	51.933	kg
硝酸	HNO ₃	96.172	kg
盐酸	HCL	0.577	kg
包材	杂木; 纸; PVC	2.308	kg
运输	陆运	2227.600	tkm

表 4 硅棒生产阶段数据

类别	名称	描述	数据	单位
输入	电力	青海低压电	25040.000	kWh
	水	自来水	114.700	t
输出	硅棒	210 方棒	1000.000	kg
	废石英	回收	44.248	kg
	废托盘	回收	0.770	kg
	废酸	废弃	46.172	kg
	硅泥	回收	47.711	kg

表 5 硅片原材料获取阶段数据

材料名称	材质	数据	单位
单晶硅棒	硅棒	1111.104	kg
清洗剂	30% NaOH,70%水	33.086	kg
氢氧化钠	NaOH	0.928	kg
双氧水	H ₂ O ₂	16.564	kg
柠檬酸	柠檬酸	0.108	kg
切割液	切割液	23.769	kg
树脂版	ABS	25.260	kg
运输	陆运	3125.33	Tkm

表 6 单晶硅片生产阶段数据

类别	名称	描述	数据	单位
输入	电力	珠海低压电	3802.150	kWh
	水	自来水	45.500	t
输出	硅泥	回收	191.119	kg
	硅片	182mm	1000.000	kg

注：以上为工厂换算单位产品后的实际生产数据，在影响评价环节，建模清单为实际生产数据×对应的环境负荷分配系数（见章节 3.2.3 分配原则）

表 7 背景数据和数据质量

背景数据				数据质量					
名称	数据来源	系统边界	排放系数 kg CO ₂ eq.	可靠度 U1	完整性 U2	时间相关性 U3	地域相关性 U3	技术相关性 U5	样本大小 U6
高纯石英	Ecoinvent	摇篮到大门	10.9	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	RoW (2)	技术平均(2)	(1)
多晶硅原料	Ecoinvent	摇篮到大门	77.9	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2018 (1)	RoW (2)	技术平均(2)	(1)
氢氟酸	Ecoinvent	摇篮到大门	1.29	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2018 (1)	GLO (2)	技术平均(2)	(1)
硝酸	Ecoinvent	摇篮到大门	2.96	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2018 (1)	RoW (2)	技术平均(2)	(1)
盐酸	Ecoinvent	摇篮到大门	0.114	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	GLO (2)	技术平均(2)	(1)
包材	Ecoinvent	摇篮到大门	0.683	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	GLO (2)	技术平均(2)	(1)
氢氧化钠	Ecoinvent	摇篮到大门	1.31	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	GLO (2)	技术平均(2)	(1)
树脂板	Ecoinvent	摇篮到大门	6.36	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	GLO (2)	技术平均(2)	(1)
双氧水	Ecoinvent	摇篮到大门	1.49	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2018 (1)	RoW (2)	技术平均(2)	(1)
清洗液	Ecoinvent	摇篮到大门	0.683	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	GLO (2)	技术平均(2)	(1)
运输	Ecoinvent	摇篮到大门	0.172	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2018 (1)	RoW (2)	技术平均(2)	(1)
电力	Ecoinvent	摇篮到大门	1.07	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	CN (1)	技术平均(2)	(1)
水	Ecoinvent	摇篮到大门	0.000804	测量值 (1)	所有相关站点 (1)	2019 (1)	GLO (2)	技术平均(2)	(1)

5. 影响评价

5.1 碳足迹贡献分析

研究采用 SimaPro 9.1 软件进行碳足迹计算，分析得出 1t 182mm 的单晶硅片的碳足迹值为 107167.79 kg CO₂ eq.，硅片原材料获取阶段的碳足迹值为 103365.35 kg CO₂ eq.，硅片生产阶段的碳足迹值为 3802.4393 kg CO₂ eq.。1t 硅棒的碳足迹为 99432.7 kg CO₂ eq.，硅棒原材料获取阶段的碳足迹为 74882.24 kg CO₂ eq.，硅棒生产阶段的碳足迹为 24550.49 kg CO₂ eq.，碳足迹贡献情况见表 8 和表 9。

表 8 单晶硅棒碳足迹贡献

阶段	材料名称	GWP	贡献	单位
硅棒原材料获取阶段	高纯石英	700.60	0.70%	kg CO ₂ eq.
	多晶硅原料	73507.60	73.93%	kg CO ₂ eq.
	氢氟酸	61.24	0.06%	kg CO ₂ eq.
	硝酸	260.28	0.26%	kg CO ₂ eq.
	盐酸	0.06	0.00%	kg CO ₂ eq.
	包材	1.44	0.00%	kg CO ₂ eq.
	运输	351.01	0.35%	kg CO ₂ eq.
硅棒生产阶段	电力	24466.06	24.61%	kg CO ₂ eq.
	水	84.43	0.08%	kg CO ₂ eq.
合计		99432.72	100%	kg CO ₂ eq.

表 9 182mm 单晶硅片碳足迹贡献

阶段	材料名称	GWP	贡献	单位
硅片原材料获取阶段	单晶硅棒	102633.80	95.77%	kg CO ₂ eq.
	清洗液	15.75	0.01%	kg CO ₂ eq.
	氢氧化钠	1.13	0.00%	kg CO ₂ eq.
	双氧水	22.89	0.02%	kg CO ₂ eq.
	柠檬酸	0.78	0.00%	kg CO ₂ eq.

	切割液	42.26	0.04%	kg CO ₂ eq.
	树脂板	149.19	0.14%	kg CO ₂ eq.
	运输	499.56	0.47%	kg CO ₂ eq.
硅片生产阶段	电力	3768.47	3.52%	kg CO ₂ eq.
	水	33.97	0.03%	kg CO ₂ eq.
合计		107167.79	100.00%	kg CO ₂ eq.

5.2 生命周期阶段贡献分析

根据表 6 中的数据，按照产品各生命周期阶段，对各阶段的碳足迹贡献做图分析，见图 2 和图 3。

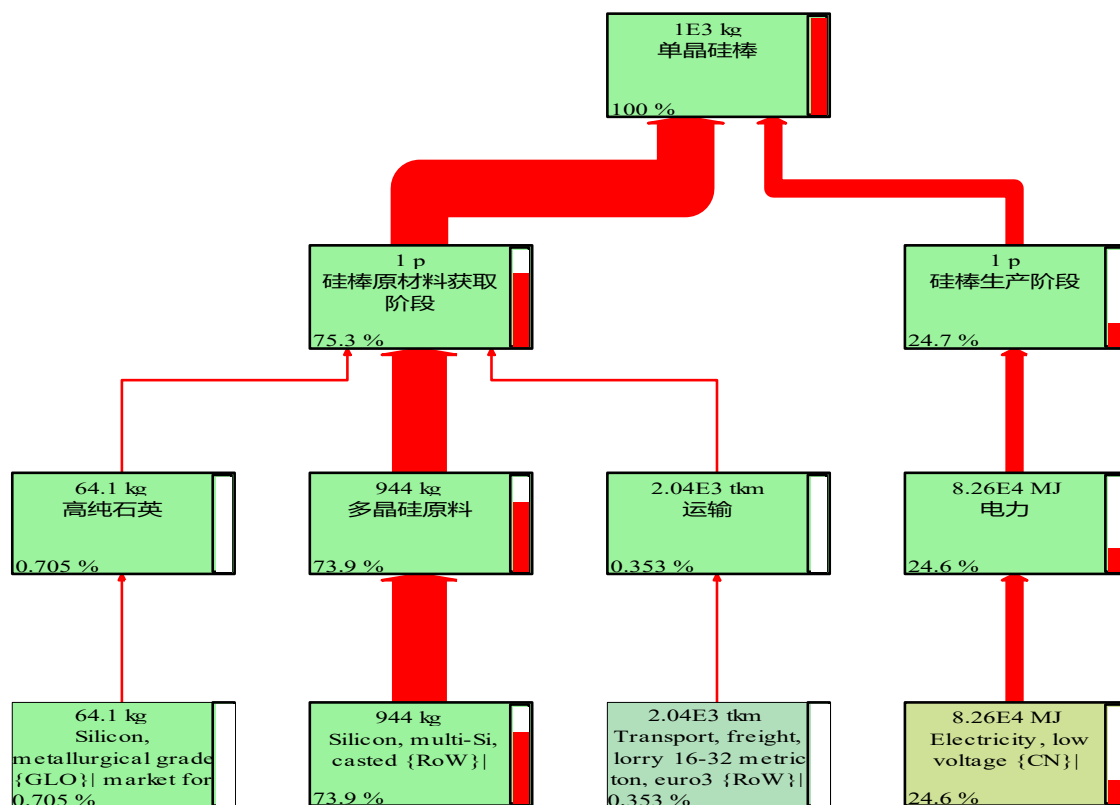


图 3 单晶硅棒碳足迹

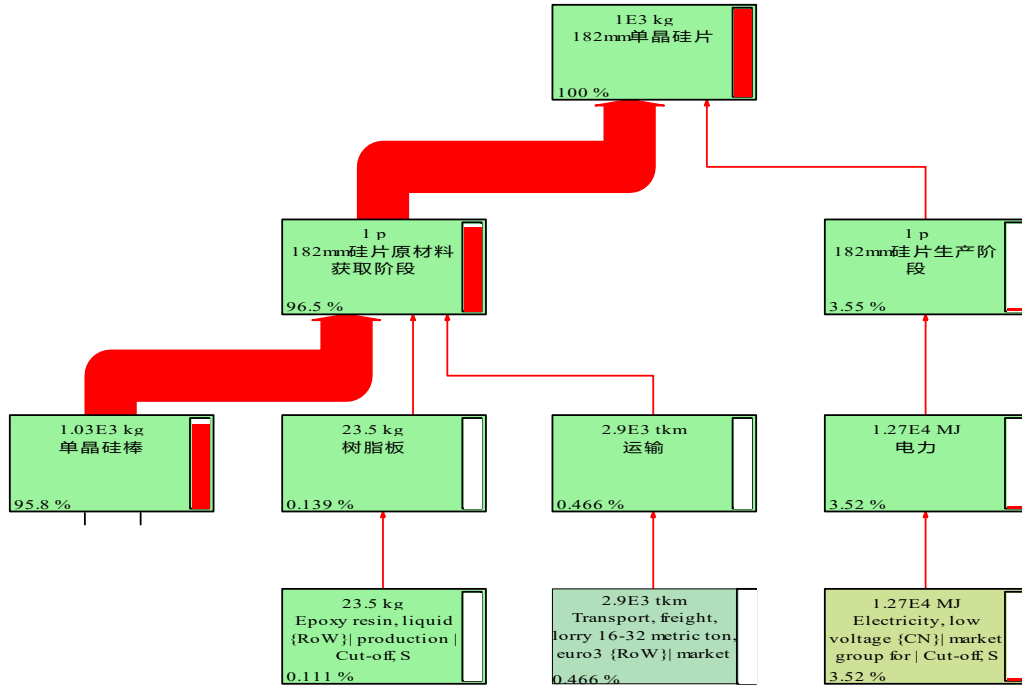


图 4 182mm 单晶硅片碳足迹

单晶硅棒原材料获取阶段的 GWP 为 74882.24 kg CO₂ eq.，占硅棒总碳排放的 75.31%，生产阶段的碳排放为 24550.49 kg CO₂ eq.，占硅棒碳排放的 24.69%。硅片的碳排放主要来自硅片的原材料获取，碳排放为 103365.35 kg CO₂ eq.，占比为 96.45%，硅片生产阶段的碳排放仅占 3.55%。

5.3 单元过程贡献分析

在单晶硅棒的生产过程中，多晶硅原料是最大的碳排放源，占单晶硅棒碳排放的 73.93%，GWP 为 73507.6 kg CO₂ eq.，其次是硅棒生产阶段的电力，碳排放为 24466.06 kg CO₂ eq.，占产品碳排放的 24.61%，高纯石英的碳排放为 700.60 kg CO₂ eq.，占比为 0.7%。

在 182mm 单晶硅片的生产过程中，单晶硅棒是最大的碳排放源，碳排放为 92748.04 kg CO₂ eq.，占硅片碳排放的 95.77%，其次是切片过程中的电力，碳排放为 3768.47 kg CO₂ eq.，占产品碳排放的 3.52%，其他材料的环境影响占比很小。

6. 结果解释

根据ISO14040:2006、ISO14044:2006、ISO14067:2018对生命周期结果解释的要求，该阶段主要包括的内容有：对重大问题的识别，进行完整性、敏感性、不确定性和一致性检查，最后提出结论、局限性和建议。

影响评价章节对 182mm 单晶硅片的碳足迹做了贡献分析，章节 5.2 和 5.3 从生命周期阶段和单元过程分析了产品的碳排放，对主要问题分析如下：

按照生命周期阶段贡献结果来看，硅棒环境负荷主要来自多晶硅原料的生产和电力的消耗，下游的碳排放主要来自分切阶段的电力消耗。

生产阶段是改进潜力最大的一个阶段，工厂可通过相关节能减排措施，降低能耗，进而减少碳排放，也可以使用清洁电力，如风电和光伏，降低电力的碳排放系数，进而减少碳排放

原材料阶段重点关注的是多晶硅原料的获取，企业可督促上游供应商使用清洁电力或者可回收料，进而减少碳排放。

6.2 完整性、敏感性、不确定性和一致性检查

6.2.1 完整性检查

按照 ISO14067:2018 的要求，实施了全生命周期的完整性检查，包括：

产品生命周期过程的完整性(摇篮到大门)；

—— 本研究界定的系统边界为摇篮到大门。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、4、5、6，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。

在生产过程中有副产品硅泥和废石英，已经根据物理关系进行分配。

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。

6.2.2 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。本次研究没有做假设, 所以不涉及敏感性分析。

6.2.3 不确定性分析

数据质量会带来环境影响的不确定性, 为了评估数据质量对结果的不确定性, 采用蒙特卡罗模拟方法确定了环境影响的范围。数据质量的评估准则和相关得分见 3.2.7 和表 5。结果如表 11 所示。在 95% 的置信区间内, 产品的碳排放为 9103281.37 -111354.77 kg CO₂ eq.

表 11 不确定性分析

影响类别	单位	平均值	中间值	2.50%	97.50%
温室效应	kg CO ₂ eq.	107201.00	107243.46	103281.37	111354.77

6.2.4 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?

参考表 3、4、5、6、7 的前景和背景数据。

b)区域和/或时间差异(如果有的话)是否一直适用?

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, 但研究使用的数据集大多来自全球平均水平; 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 2021 年 11 月-2022 年 4 月的平均数据, 基本可以代表实际生产水平。

c)分配规则和系统边界一直应用于所有产品系统吗?

本研究产品系统只产出一种产品, 不涉及环境影响的分配; 实景数据涵盖产品生产阶段, 使用阶段和废弃处置阶段, 背景数据的系统边界为“从摇篮到大门”, 与定义的系统边界一致。

d)影响评估的要素是否一直被应用?

本研究中所应用的影响评价模式有 IPCC2013 评价模式, 方法的选用主要

考虑符合国际标准 ISO14044:2006、ISO14067:2018 的要求。

7. 结论

本研究获得了 1 吨 182mm 单晶硅片的碳足迹值，研究获得的碳足迹值代表高景太阳能科技有限公司 2021-2022 年实际生产水平，结果可用于产品的碳足迹认证，产品绿色设计，或用于同类产品的碳足迹比较。

分析得出，1 吨 182mm 单晶硅片生命周期的碳足迹值为 107167.79 kg CO₂ eq.。

对产品碳足迹构成分析表明：产品生命周期内最主要的碳足迹贡献来自于原材料获取阶段 103365.35 kg CO₂ eq.，生产阶段的碳足迹贡献 3802.4393 kg CO₂eq.，贡献分析发现大部分的环境影响来自于多晶硅原料，产品生命周期内消耗电力较多。

本研究按照 ISO14040:2006、ISO14044:2006、ISO14067:2018 的要求来执行，检查了研究的完整性、敏感性、一致性，确保提供的数据对企业、第三方机构、其他环境管理机构以及公众而言具较为可靠地评价结论。