

# LCA 数据库专题竞赛

## 参赛报告

### 参赛小组信息：

LCA 数据集名称：湿法黑硅技术生产多晶硅电池片(kg, 156 mm×156 mm×180 μm)，企业 LCA-代表此企业及供应链水平（采用实际生产数据），中国, 2018

小组成员：李文清 张一哲

指导老师：郁昂

大学/学院：厦门大学环境与生态学院

## 一、 技术代表性分类和目标代表性定义

本小组选择【多晶硅电池片】作为 LCA 研究的目标产品。

通过查阅资料，对“多晶硅电池片 LCA”的技术代表性进行了分类分析，并最终明确定义了本研究的目标代表性。

### 1、多晶硅电池片产品的技术代表性分类分析

#### (1) 技术代表性的基本分类与单元过程划分

多晶硅电池片的制造分为 5 个固定的单元过程：工业硅工艺，多晶硅工艺，多晶硅铸锭，多晶硅切片，黑硅工艺。在各个单元过程中可采用的生产工艺存在差异，本研究选取目前市场 2016 年以来新建或者改建企业广泛采用的金刚石线切割搭载湿法黑硅技术的新型多晶硅电池片生产工艺，各过程生产工艺的选取如下表。

表 1-1 多晶硅的技术代表性基本分类与单元过程划分

单元过程	分类结果与解释
1、按基本工艺技术分类	碳热还原法—改良西门子法—DDS 定向凝固方式—金刚石线切割—干法黑硅技术 碳热还原法—改良西门子法—DDS 定向凝固法—砂浆钢线切割—干法黑硅技术

	<p>碳热还原法—改良西门子法—DDS 定向凝固方式—金刚石线切割—湿法黑硅技术</p> <p>碳热还原法—改良西门子法—DDS 定向凝固法—砂浆钢线切割—湿法黑硅技术</p> <p>碳热还原法—改良西门子法—浇铸法—金刚石线切割—干法黑硅技术</p> <p>碳热还原法—改良西门子法—浇铸法—砂浆钢线切割—干法黑硅技术</p> <p>碳热还原法—改良西门子法—浇铸法—金刚石线切割—湿法黑硅技术</p> <p>碳热还原法—改良西门子法—浇铸法—砂浆钢线切割—湿法黑硅技术</p> <p><b>本表以下分类均基于“碳热还原法—改良西门子法—DDS 定向凝固方式—金刚石线切割—湿法黑硅”工艺技术</b></p>
2 在数据调查范围中划分单元过程	从各种资料中分生产过程的数据可得性考虑，LCA 模型中可以划分 5 个单元过程：工业硅冶炼，多晶硅生产，多晶硅铸锭，多晶硅切片，黑硅工艺

## (2) 单元过程的技术代表性细分

表 1-2 湿法黑硅技术生产多晶硅片单元过程的技术代表性细分

单元过程 技术代表性细分	工业硅冶炼	多晶硅工艺	多晶硅铸锭	多晶硅切片	黑硅工艺
(1) 产品规格型号	Si 含量 98.8~99.6%	太阳能级多晶硅，纯度为 99.99%~99.9999%	截面为 156×156 mm 的硅锭	156×156 mm×180μm，单片重量约 6.5g	黑硅工艺使多晶硅光电转换效率提升 0.3-0.6 %
(2) 原辅料类型	硅石 (SiO <sub>2</sub> ≥99%，CaO≤0.16%，Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤0.15%) 洗精煤 (粒度 5~25mm, 固定碳≥55%，灰分<10%，挥发分<40%，水分≤10%，硫分<0.17%)	工业硅粉 (Si≥99%(wt)) 三氯氢硅 (SiHCl <sub>3</sub> ≥99%(wt)) 30% 工业盐酸	多晶硅料 (电子级)	硅锭 切割液 (主要成分聚丙烯苯磺酸盐) 金刚线	硅片 (金刚线切割) 40% 氢氟酸 氨水 双氧水 氢氧化钾

(3) 能耗类型	主要使用电力, 未区分	主要使用电力, 未区分	主要使用电力, 未区分	主要使用电力, 未区分	主要使用电力, 未区分
(4) 工艺设备类型	碳热还原法	改良西门子法	DSS 定向凝固	金刚线切割	湿法黑硅技术
(5) 参考数据生产规模	大型	大型	大型	大型	大型
(6) 辅助工艺设备类型	大型新型工艺通常建有余热发电	未区分	未区分	未区分	未区分

## 2、目标代表性定义

### (1) 选定技术代表性

近几年来行业普遍采用“金刚石线切割+黑硅技术+PERC”的电池片加工工艺，在提高电池效率的同时降低了成本，具有极强的市场竞争力；相比之下，原有的砂浆钢线搭载普通酸制绒的工艺也将逐渐被市场淘汰，因此本研究基于目前具有市场潜力的新型多晶硅电池片生产工艺研究生产过程，研究了其从“摇篮”到“大门”——多晶黑硅片的生命周期。

本小组从各大行业调查报告、政府环境保护部门了解到各个工艺流程中的龙头企业近3年来新建或者扩建的多晶硅片生产项目，选取了生产规模大、生产工艺成熟的企业的项目环评报告，虽然具有一定的行业代表性，但是不可作为行业平均水平。

### (2) 选定目标代表性：

本 LCA 研究的目标代表性定义为：基于改良西门子法、金刚线切割+湿法黑硅技术生产的  $156\text{ mm}\times 156\text{ mm}\times 180\text{ }\mu\text{m}$  的黑硅制绒片。数据来源于企业环评报告（报批版），均为中国 2016-2018 年代表企业（生产规模大、生产技术成熟先进）中的生产数据。

湿法黑硅技术生产多晶		目标与范围定义	生命周期模型	LCA结果	评审
模型名称: 湿法黑硅技术生产多晶硅电池片(kg, 156 mm×156 mm×180 μm), 企业LCA-代表此企业及供应链水平 (采用实际生产数据), 中国, 2018					
<b>研究目标</b>					
*产品名称:	湿法黑硅技术生产多晶硅电池片			产品类别:	
规格型号:	156 mm×156 mm×180 μm			形状与形态:	块体/硅材
*研究类型:	企业LCA-代表特定企业及供应链水平 (用于企业产品报告/工艺设备选型分析)			功能单位与基准流:	基于湿法黑硅+PERC生产1kg多晶硅电池片
<b>研究范围</b>					
*系统边界:	生命周期-生产阶段 (从资源开采到产品出厂)			实际过程范围:	工业硅工艺、多晶硅工艺、铸锭、切片、制绒
产地:	中国			*基准年:	2018
工艺设备:	湿法黑硅+PERC			生产规模:	1.2GW/年
主要原料:	硅片			主要能耗:	电
取舍规则:	<ol style="list-style-type: none"> <li>普通物料重量&lt;1%产品重量时, 以及含稀贵或高纯成分的物料重量&lt;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 5%;</li> <li>低价值废物作为原料, 如粉煤灰、矿渣、秸秆、生活垃圾等, 可忽略其上游生产数据;</li> <li>大多数情况下, 生产设备、厂房、生活设施等可以忽略;</li> <li>在选定环境影响类型范围内的已知排放数据不应忽略。</li> </ol>			数据质量评估:	CLCD方法
				项目信息:	<ol style="list-style-type: none"> <li>项目名称: “金刚线切割+湿法黑硅” 生产多晶硅电池片生命周期评估</li> <li>委托方</li> <li>委托目的</li> <li>潜在应用</li> </ol>

图 1-1 LCA 模型的目标代表性定义 (eFootprint 截图)

另外, 通过上述分析还可以注意到: 影响本次 LCA 评估的因素有各个过程的工艺流程工艺的选择, 本研究仅限于改良多晶硅工艺、金刚线切割工艺与湿法黑硅技术制绒的工艺流程生产的黑硅片。

还有一些技术因素会影响 LCA 评估数据。另外由于各个生产流程之间运输数据的不确定, 无法选取有代表性的数据, 在此忽略所有与运输有关的能耗。

## 二、 LCA 数据集文档

**数据集名称:** 湿法黑硅技术生产多晶硅电池片(kg, 156 mm×156 mm×180 μm), 企业 LCA-代表此企业及供应链水平 (采用实际生产数据), 中国, 2018

### 1、系统功能与系统边界

**系统功能与基准流:** 湿法黑硅技术生产多晶硅电池片, 1kg

**LCA 研究类型:** 企业 LCA-代表特定企业及供应链水平

**产地:** 中国

**基准年:** 2018 年

**系统边界:** 从工业硅的冶炼到湿法黑硅制绒技术 (“从摇篮到大门”)

- **实景过程**：划分为工业硅冶炼、多晶硅工艺、多晶硅铸锭、多晶硅切片、黑硅工艺；五个单元过程，包含主要生产工序、末端治理。
- **背景过程**：采用背景数据库，追溯了各种原料的上游生产过程直到资源开采为止。



图 2-1 eFootprint 树状模型示意图与链状模型示意图

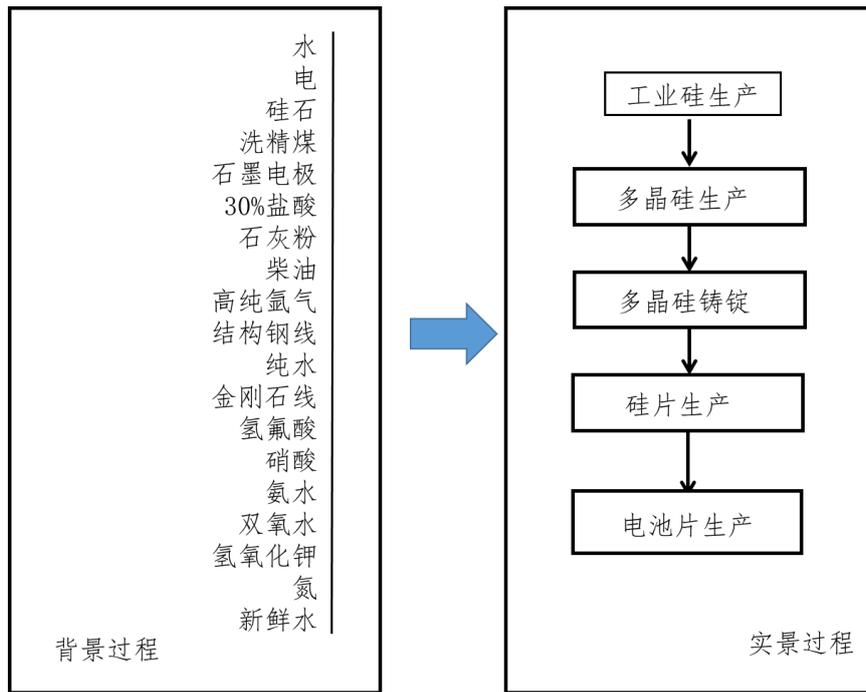


图 2-2 背景过程图

## 2、实景过程数据代表性

**产品种类与规格：**多晶片（金刚石线切割+黑硅工艺，156\*156\*180 $\mu\text{m}$ ）

**主要技术代表性：**金刚石线切割+黑硅技术生产多晶硅电池片、常规原料（矿物、化学原料）、常规能耗（电力）。

**主要数据来源：**企业生产数据、环境影响报告书（报批版）。

表 2-1 各单元过程数据来源记录表

单元过程	数据来源
工业硅工艺	新疆协鑫硅业科技有限公司年产 20 万吨工业硅项目环境影响报告书（报批版） 2018.3
改良西门子法多晶硅生产工艺	新疆协鑫新能源材料科技有限公司年产 10 万吨多晶硅项目环境影响报告书（公示版）2017.4
多晶硅铸锭	江苏拓正茂源新能源有限公司年产 5200 吨多晶硅铸锭生产线项目环境影响评价报告书 2017

---

金刚线切割多晶硅切片工艺      太仓协鑫光伏科技扩建硅片切片生产项目环境影响报告书（报批稿）2015.12

湿法黑硅技术多晶硅电池片生产工艺      阿特斯光伏电力（洛阳）有限公司  
1.2GW/年黑硅制绒硅片项目环境影响报告书（报告书）2018.4

---

实景过程工艺流程图（由于涉及具体行业生产流程，此处省略）

### 3、建模方法

**副产品：**工业硅生产过程存在副产品；工业硅中余热发电直接抵扣生产电耗

**再生循环：**再生循环水直接抵扣生产消耗

**取舍规则：**符合 CLCD 取舍规则。工业硅生产过程中的耐火材料视为零环境影响的原料，不追溯上游过程。

**缺失过程：**电子级多晶硅生产原料之一三氯氢硅无数据；硅锭生产过程碳化硅、聚乙二醇无数据；硅片切割过程中的金刚石线用碳钢数据代替；湿法刻蚀中硝酸银数据不可得。

**背景过程数据库：**主要原料均采用 CLCD-China 0.8.1

**软件工具：**采用亿科 eFootprint 系统，在线完成全部 LCA 工作，包括建模、计算分析、数据质量评估、LCA 结果发布<sup>[6,7]</sup>。

### 4、数据收集

---

过程名称 类别	工艺设备与规模	主要消耗	主要排放
工业硅冶炼	碳热还原法	硅石，洗精煤，木屑片，石墨电极，电，新水，耐火材料	工业废物，危险废物，PM10，渣滓，耐火材料，树脂，废油，NOx,SO2
多晶硅工艺	改良西门子法	工业硅粉，电，三氯氢硅，30%盐酸，石灰粉，水，柴油	炉渣，污泥，PM10，废气，HCl

---

多晶硅铸锭	DSS 定向凝固法	多晶硅料, 石英坩埚, 氮化硅, 硅溶胶, 高纯氩气, 碳化硅, 聚乙二醇, 结构钢线, 氢氧化钠, 盐酸, 砂轮片, 纯水, 新鲜水, 电	工业废物, 废钢料, 渣滓, 污泥, 包装废物, HCl, PM <sub>10</sub> , COD, 废水, 二甘醇
硅片切割	金刚线切割	硅锭, 聚乙二醇, 金刚石线, 环氧树脂, 十二/十三烷醇聚氧乙烯醚, 电, 水	COD, 废水, 废气, 危险废物, 污泥, 废钢料
黑硅工艺	湿法黑硅技术	硅片, 氢氟酸, 硝酸, 氨水, 双氧水, 氢氧化钾, 硝酸根, 氮, 水, 电	危险废物, 废水, 污泥, 包装废物, 硝酸盐, 氟化氢, COD, 氨氟化氢, NO <sub>x</sub>

## 5、生命周期影响分析

### 5.1 LCA 结果

在 eFootprint 上建模计算得到普通硅酸盐水泥的水资源消耗 WU、光化学臭氧合成 POFP、气候变化 GWP、潜在性富营养化 EP、酸化 AP、臭氧耗减潜能值 ODP、初级能源消耗 PED、可吸入无机物 RI 八项指标为例。结果如表 5-1 所示。

表 5-1 湿法黑硅技术生产多晶硅电池片的 LCA 结果 (1 kg 电池片)

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果
水资源消耗 WU	kg	881.70
光化学臭氧合成 POFP	kg NMVOC eq	0.07
气候变化 GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	173.94
潜在性富营养化 EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	0.07
酸化 AP	kg SO <sub>2</sub> eq	0.97

臭氧耗减潜能值 ODP	kg CFC-11 eq	2.588E-07
初级能源消耗 PED	MJ	2290.85
可吸入无机物 RI	kg PM <sub>2.5</sub> eq	0.28

---

## 5.2 各个 LCIA 指标在工艺流程分析

以气候变化 GWP、初级能源消耗 PED、水资源消耗 WU、酸化 AP、潜在性富营养化 EP 五个指标为例，计算 5 个过程中的各自过程贡献累计量，各个过程占百分比如下表（总表）。

过程名称	GWP (kg CO2 eq)	PED (MJ)	WU (kg)	AP (kg SO2 eq)	EP (kg PO43-eq)
多晶硅电池片 (湿法黑硅...)	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
直接贡献	0%	0%	0%	0.71%	3.36%
电	73%	44%	94%	49%	20%
水	0.00%	0.00%	0.28%	0.00%	0.00%
硅片 (金刚线切割)	14.4%	14.8%	1.1%	13.7%	15.1%
直接贡献	0%	0%	0%	0%	0.30%
水	0.01%	0.01%	0.25%	0.01%	0.02%
硅锭	1.1%	1.3%	0.8%	1.4%	1.9%
直接贡献	0%	0%	0%	0.00%	0.05%
多晶硅料	1.6%	1.7%	0.8%	1.6%	2.0%
直接贡献	0%	0%	0%	0.01%	0%
工业硅粉	0.80%	0.5%	0.5%	0.8%	1.4%
直接贡献	0%	0%	0%	0.53%	1.19%
硅石	0.01%	0.00%	0.00%	0.09%	0.15%
洗精煤	0.53%	0.41%	0.32%	0.28%	0.41%
石墨电极	0.25%	0.34%	0.09%	0.08%	0.12%
电	0.00%	0.28%	0.46%	0.39%	0.66%
新水	0.01%	0.01%	0.27%	0.01%	0.01%
电	1.00%	0.94%	0.10%	1.00%	1.11%
水	0.00%	0.00%	0.52%	0.00%	0.00%
30%盐酸	0.14%	0.13%	0.17%	0.13%	0.10%
石灰粉	0.30%	0.13%	0.03%	0.09%	0.08%
柴油	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
新鲜水	0.00%	0.00%	1.82%	0.00%	0.00%
盐酸	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
高纯氢气	0.13%	0.13%	0.38%	0.12%	0.11%
结构钢线	0.04%	0.04%	0.06%	0.03%	0.04%
纯水	0.01%	0.00%	1.75%	0.01%	0.01%
电	0.46%	0.49%	0.58%	0.17%	0.86%
电	0.21%	0.28%	0.35%	0.62%	0.8%
金刚石线	0.12%	0.12%	0.17%	0.09%	0.11%
氢氟酸	0.12%	0.12%	0.38%	0.33%	0.13%
硝酸	0.11%	0.08%	0.59%	0.26%	0.78%
氨水	0.25%	0.24%	0.61%	0.36%	0.99%
双氧水	0.19%	0.18%	0.88%	0.10%	0.10%
氢氧化钾	0.09%	0.09%	0.12%	0.07%	0.12%
氮	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%

图 5-1 多晶硅生产工艺 LCIA 各个指标贡献

通过 eFootprint 直接计算得到水泥从生料制备到水泥粉磨为止的各主要生产过程大于 1% 的累积贡献，各过程的累积贡献双饼图如图 3-1。

### 5.2.1 单个过程的贡献分析

电池片制作过程的全球暖化指标的 Pareto 图和双饼图为例，可以看出

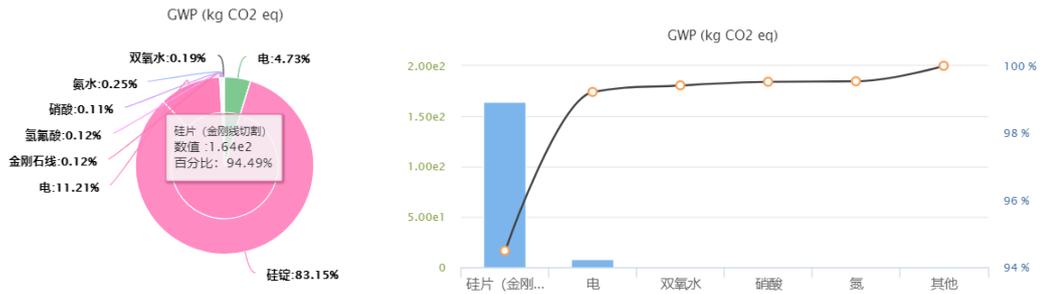


图 5-2 电池片生产 GWP 指标双饼图和 Pareto 图

从电池片制作的全球暖化指标帕累托图中可以看出大部分能量消耗来自上游生产工艺——硅片切割（占据 94.49%），而硅片切割的大部分能量消耗来自于上游硅锭生产。

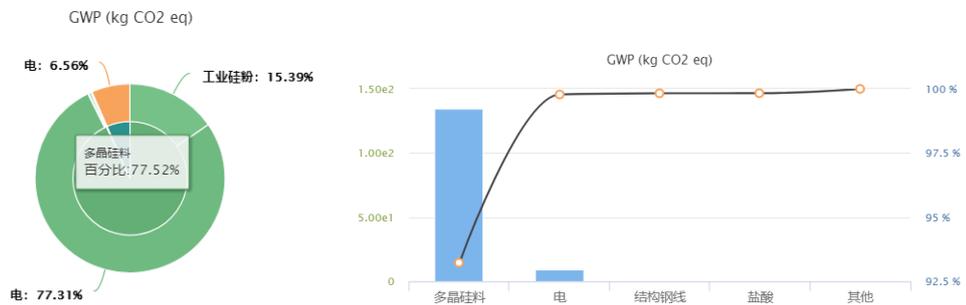


图 5-3 硅锭生产 GWP 指标双饼图和 Pareto 图

从硅锭生产过程的双饼图和帕累托图我们可以看出，上游多晶硅生产占据了 77.52% 的能量消耗，而多晶硅生产过程的能耗主要来源于电耗。

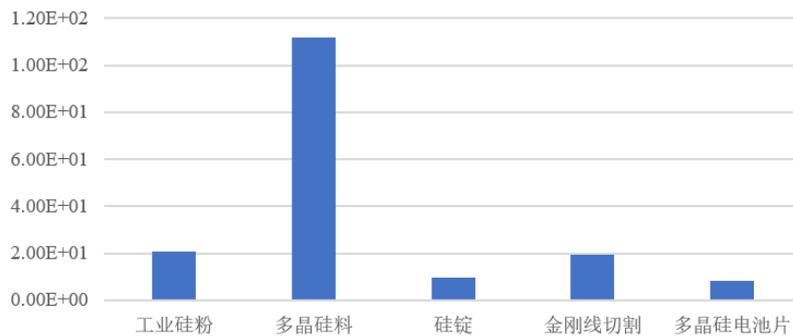


图 5-4 各工艺流程耗电量 GWP 潜能 (CO<sub>2</sub>-eq/Wp)

从单个工艺的耗电量的全球暖化指标可以明显看出多晶硅生产工艺中的耗电量远高于其他过程。

### 5.2.2 过程累积对气候变化 GWP 贡献分析

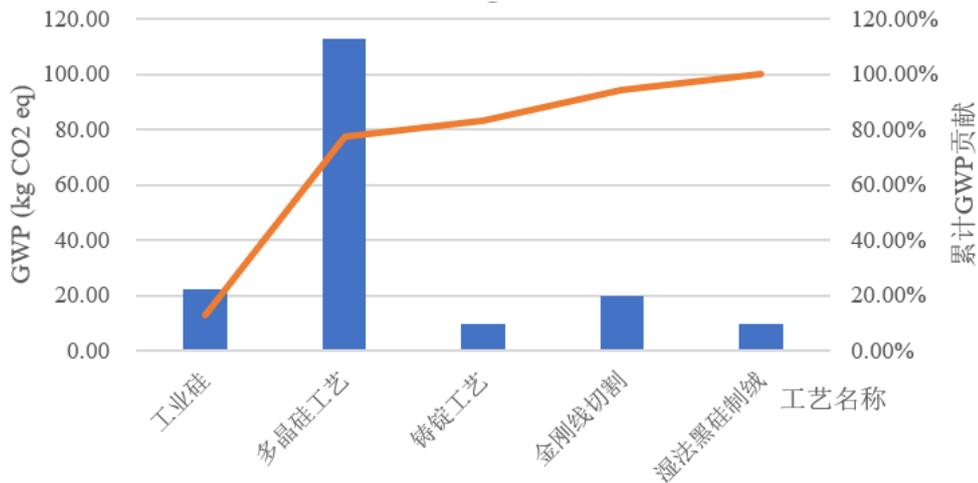


图 5-5 各工艺流程气候变化 GWP 潜能 (CO<sub>2</sub>-eq/Wp)

由图 3-2 可知，在湿法黑硅工艺中，多晶硅生产过程对在气候变化上累积贡献最大，达 112.57 kg CO<sub>2</sub> eq，占整个过程的 64.68%，主要由于该阶段电力消耗较多；其次是工业硅工艺，大约为 12.80%。湿法黑硅工艺产生 CO<sub>2</sub> 潜力最小，占有过程的 5.01%。

### 5.2.3 过程累积对水资源消耗 WU 贡献分析

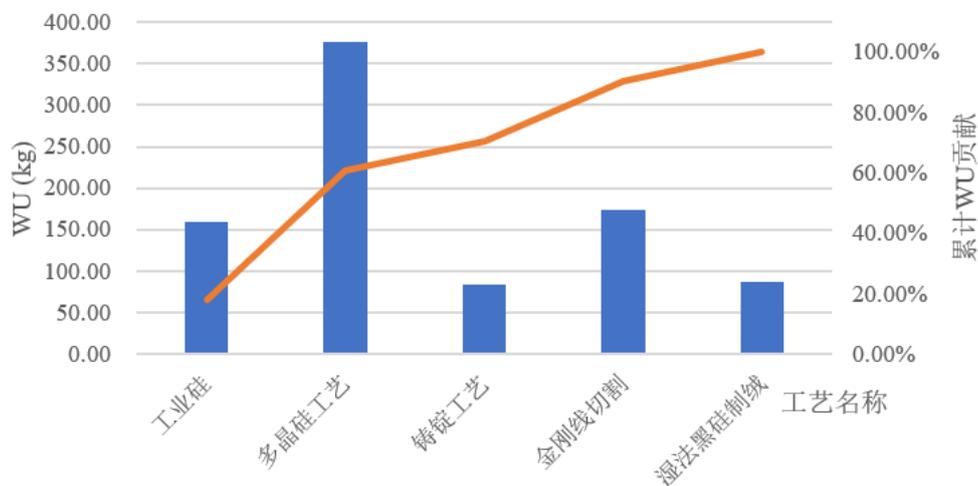


图 5-6 过程累积对水资源消耗 WU 贡献分析图

对整个多晶硅光伏电池片生产工艺中对水资源消耗 WU 的大小及贡献率分析，多晶硅生产工艺贡献最大，约 0.4 kg，占整个过程的 41.68%；其次是金刚线切割工艺，大约为 19.64%，这是由于在切割过程中需要消耗大量水资源作为切割液和清洗液。硅的铸锭工艺产生对水体消耗最少。

#### 5.4 清单数据灵敏度分析

清单数据灵敏度是指清单数据单位变化率引起的相应指标变化率。通过分析清单数据对各指标的灵敏度，并配合改进潜力评估，从而辨识最有效的改进点。表中罗列了 GWP (kg CO<sub>2</sub> eq)灵敏度>0.5%的清单数据<sup>[8]</sup>。

过程名称	清单名称	最大灵敏度
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	硅片 (金刚线切割)	PED (MJ):94.85%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氢氟酸	ADP (kg Sb eq):86.99%
多晶硅片 (金刚线切割)	硅锭	PED (MJ):83.43%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	多晶硅料	RI (kg PM2.5 eq):77.75%
电子级多晶硅	电	GWP (kg CO2 eq):64.28%
电子级多晶硅	工业硅粉	ODP (kg CFC-11 eq):21.32%
多晶硅片 (金刚线切割)	电	ODP (kg CFC-11 eq):13.74%
多晶硅片 (金刚线切割)	水	WU (kg):12.25%
工业硅	电	GWP (kg CO2 eq):12.00%
工业硅	新水	WU (kg):10.27%
工业硅	石墨电极	ODP (kg CFC-11 eq):7.24%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	电	ODP (kg CFC-11 eq):6.69%
工业硅	洗精煤	PED (MJ):5.41%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	双氧水	WU (kg):4.88%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	电	GWP (kg CO2 eq):4.73%
过程名称	清单名称	最大灵敏度
工业硅	氮氧化物 [排放到大气 (未指定类型) ]	EP (kg PO43-eq):4.19%
工业硅	二氧化硫 [排放到大气 (未指定类型, 长期) ]	POFP (kg NMVOC eq):3.25%
电子级多晶硅	水	WU (kg):2.52%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	高纯氩气	WU (kg):2.38%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	新鲜水	WU (kg):1.82%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	纯水	WU (kg):1.75%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	硝酸盐 [排放到淡水]	EP (kg PO43-eq):1.64%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	化学需氧量 [排放到淡水]	EP (kg PO43-eq):1.64%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氢氧化钾	ODP (kg CFC-11 eq):1.45%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氮氧化物 [非城区或非地面的大气排放]	EP (kg PO43-eq):1.03%
电子级多晶硅	石灰粉	RI (kg PM2.5 eq):1.01%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氨水	EP (kg PO43-eq):0.99%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	硝酸	EP (kg PO43-eq):0.78%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氨 [非城区或非地面的大气排放]	EP (kg PO43-eq):0.63%
多晶硅片 (金刚线切割)	金刚石线	ODP (kg CFC-11 eq):0.61%

过程名称	清单名称	最大灵敏度
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氨 [排放到水体 (未指定类型) ]	EP (kg PO43-eq):0.42%
多晶硅片 (金刚线切割)	化学需氧量 [排放到水体 (未指定类型) ]	EP (kg PO43-eq):0.30%
工业硅	硅石	ODP (kg CFC-11 eq):0.29%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	水	WU (kg):0.28%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	结构钢线	ODP (kg CFC-11 eq):0.26%
电子级多晶硅	柴油	ODP (kg CFC-11 eq):0.21%
电子级多晶硅	30%盐酸	ODP (kg CFC-11 eq):0.19%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氟化氢 [非城区或非地面的大气排放]	AP (kg SO2 eq):0.09%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	化学需氧量 [排放到水体 (未指定类型) ]	EP (kg PO43-eq):0.05%
多晶硅电池片 (湿法黑硅+PERC)	氨	WU (kg):0.02%
电子级多晶硅	氟化氢 [排放到大气 (未指定类型, 长期) ]	AP (kg SO2 eq):0.01%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	盐酸	ODP (kg CFC-11 eq):0.00%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	氟化氢 [排放到大气 (未指定类型, 长期) ]	AP (kg SO2 eq):0.00%
1m*156mm*156mm多晶硅锭生产	氟化氢 [高空排放 (平流层下部和对流层上部) 大气]	AP (kg SO2 eq):0.00%

图 5-7 灵敏度分析表截图

由图 5-7 可知,对 GWP 指标敏感度最大的实景清单数据是硅片切割、硅锭生产过程;背景过程数据中可以看出,改良西门子法电子级多晶硅生产中用电量影响最大,达到 64.28%。改良西门子法的原理是在 1100°C左右的高纯硅芯上用高纯氢还原高纯三氯氢硅,生成多晶硅沉积在硅芯上,在加热过程中会消耗大量的电能,因此构成 GWP 中贡献量最大的过程。

## 5.5 完整性说明

生命周期模型数据模型中上游生产数据完整,无需补充,忽略或缺失数据符合 cut-off 规则,但也存在少部分数据缺失(如碳化硅、三氯氢硅等)。

## 6、CLCD 数据质量评估

**识别重要数据:** eFootprint 计算每一项消耗或排放对各项 LCA 指标的灵敏度,然后按其最大的灵敏度排序。

- 数据质量评估结果及不确定度评估:

报告采用 CLCD 质量评估方法，在 eF 系统上完成对模型清单数据的不确定度评估。本报告研究类型为企业 LCA-代表此企业及供应链水平（采用实际生产数据），得到数据质量评估评估结果见表

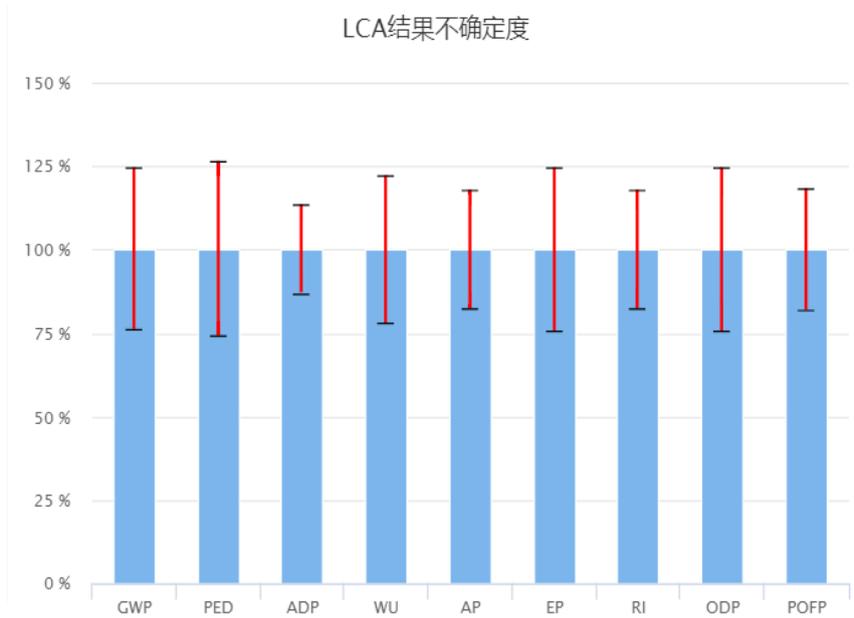


图 6-1 LCA 结果不确定度

指标名称	缩写(单位)	LCA结果	结果不确定度
气候变化	GWP(kg CO2 eq)	1.74e2	±24.21%
初级能源消耗	PED(MJ)	2.29e3	±26.14%
非生物资源消耗潜值	ADP(kg Sb eq)	8.16e-4	±13.22%
水资源消耗	WU(kg)	8.82e2	±22.14%
酸化	AP(kg SO2 eq)	9.67e-1	±17.65%
富营养化潜值	EP(kg PO43-eq)	6.73e-2	±24.32%
可吸入无机物	RI(kg PM2.5 eq)	2.75e-1	±17.80%
臭氧层消耗	ODP(kg CFC-11 eq)	2.59e-7	±24.44%
光化学臭氧合成	POFP(kg NMVOC eq)	7.14e-2	±18.14%

图 6-2 LCA 结果不确定度

## 7、结论、局限和建议

本文是在环境污染日益严重、光伏系统快速发展的背景下进行的；目前光伏生产工艺中产生了巨大的技术革新，基于新工艺的多晶硅生产过程的 LCA

评估具有极大的现实意义。使用 eFootprint 对新型工艺生产多晶硅光伏电池片的生产过程进行 LCA 的建模和分析，并且对生产过程中产生的潜在环境影响（如全球气候变化、富营养化、酸化、水资源消耗等）进行评估，对研究光伏电池生产过程中面临的问题，提出改进措施，对行业和政府相关部门做出调整具有非常重大的意义。

局限及建议：

- 1、 由于在获取数据的时候，参考的数据来源与单独企业的环评报告，并不具备行业代表性。
- 2、 对于基础物质的数据库而言，本文主要选取的是 Ecoinvent，虽然中国目前有可用的数据库 CLCD，但由于其中包含的物质数量太少，国家相关研究部门急需建立基础清单数据库。
- 3、 废弃处理阶段的建模由于缺乏实际的生产线数据，目前的研究很多是建立在假设的基础上进行分析，因此数据方面的建模需要未来的实践中进一步完善。
- 4、 由于缺乏多晶硅电池组件中其他物质的上游数据（如 TPT 背板、钢化玻璃等）因此本评估仅仅做到了多晶硅电池片生产阶段。
- 5、 eFootprint 软件建模的局限性，在服务阶段智能添加物耗数据，无法添加有价值的产品如产生的电能。
- 6、 将 LCA 评估结果对比其他生产多晶硅电池片工艺流程进行对比，为清洁生产、减少生产能耗提供参考。

## 8、数据集适用范围

- 中国市场 98%（2017 年）的太阳能级多晶硅采用改良西门子法生产，预期将在未来十年，金刚石切割有望取代砂浆切割，逐步占据多晶硅切割市场份额，并且金刚线工艺的推广也将促进黑硅工艺的发展。
- 本评价建模及数据仅适用于该生产流程改良西门子法生产多晶硅+金刚线切割+湿法黑硅技术生产多晶硅电池片工艺。其他有关多晶硅生产技术需要进行新的数据收集、建模，评估。
- 本评价参考的各个生产工艺流程为市场龙头企业生产技术成熟、生产工艺先进、并且经过环境保护部门环境影响评价验收成功的企业的的数据，能在一定

程度上该方法生产多晶硅生的生命周期。

### 参考文献

- [1] 单继周.工业硅的生产工艺条件研究进展[J]; 河南化工, 2011,3 (28): 21-24.
- [2] 秦琴.改良西门子法多晶硅生产环保处理工艺[D]
- [3] 高明霞,郭 鹏,董建明等.太阳能级多晶硅铸锭技术研究现状及发展趋势[J]; 能源与节能, 2017.1
- [4] 李鹤. 中国晶体硅太阳能电池板的生命周期评价[D]
- [5] 陈文龙,孟召标 金刚线切多晶硅片湿法黑硅技术研究进展[J]广东化工, 2017.12
- [6] 张璐,何晓雪,王洪涛. 基于生命周期节能减排评价方法的氯碱行业(烧碱)清洁生产评价指标及权重的制订[J]. 化学工程与装备, 2014(4):204-207.
- [7] 江志兰,向思静,王洪涛,等. 基于在线供应链调查的产品生命周期评价[J]. 生态学报, 2016, 36(22):7185-7191.
- [8] 黄娜,王洪涛,范辞冬,等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1529-1536.