

# 晶体硅和钙钛矿光伏组件碳足迹研究

庄园<sup>1</sup>, 温金城<sup>2</sup>, 卞与良<sup>1</sup>, 茅笑笑<sup>1</sup>, 李马杰<sup>1</sup>, 叶晓军<sup>1</sup>

(1. 华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237; 2. 复旦大学材料科学系, 上海 200433)

**摘要:** 全球的光伏技术及其市场在清洁能源运用的不断增进下呈现快速发展趋势。为评估光伏组件在生产和制造环节对环境的影响, 利用 GaBi 软件以及生命周期评估(LCA)的方法进行研究和评估, 主要评估对象包含晶体硅光伏组件, 这些组件采用不同电池, 包括发射极背钝化(PEC)太阳电池、隧穿氧化层钝化接触(TOPCon)太阳电池和异质结(HJT)太阳电池, 以及新型钙钛矿太阳电池(PSCs)。计算发现现有4种光伏组件的典型碳足迹分别为469.25、474.24、427.98和500.55 kg CO<sub>2</sub>/kW。对于晶体硅太阳电池, 硅片生产所引起的碳足迹份额最大, 占比达到50%以上。对于钙钛矿太阳电池, 其光伏组件由于现阶段产业化效率较低, 碳足迹较大。

**关键词:** 碳足迹; 光伏组件; 晶体硅; 钙钛矿; 生命周期

**中图分类号:** TM914.4

**文献标志码:** A

## 0 引言

光伏发电作为一种新能源发电技术, 因其绿色清洁的特征而受到社会的普遍认可。为降低度电成本, 实现平价上网, 满足全球能源转型需求, 太阳电池技术和市场一直在快速发展。目前以发射极钝化和背部接触电池(passivated emitter and rear cell, PERC)、具有本征非晶层的异质结(heterojunction with intrinsic thin-layer, HJT)太阳电池和隧穿氧化层钝化接触(tunnel oxide passivated contact, TOPCon)太阳电池等为代表的单晶硅太阳电池<sup>[1-3]</sup>受到广泛关注, 这些技术当前占据了90%以上的市场份额。同时, 新型钙钛矿太阳电池(perovskite solar cells, PSCs)也正处于商业验证阶段<sup>[4]</sup>。随着中国“双碳”目标的提出, 亟需建立合理的评价标准和认证体系, 推动光伏产业健康发展。因此, 对于光伏产业的碳足迹情况以及其对环境的影响需进行进一步研究和考察。

国内外对光伏技术的环境影响已有初步研究<sup>[5-6]</sup>, 采用生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法对大规模应用的PERC组件的环境影响进行了评估, 但并未涉及新一代的TOPCon和HJT电池技术。本文基于生命周期评价方法, 分析硅片和组件的碳足迹, 同时对包括钙钛矿太阳电池在内的不同技术路线的碳排放进行量化计算, 分析硅片厚度和电池效率对组件碳排放的影响, 明确了不同太阳电池技术路线的碳减排潜力。

## 1 碳足迹研究方法

### 1.1 碳足迹概念

碳足迹最初的概念是作为“生态足迹”的一个子集被 Wackernagel 和 Rees 提出<sup>[7]</sup>, 它是指在人的一生中所消耗资源理论上需要的土地面积。随着全球变暖问题在世界环境议程中的突出地位, 碳足迹概念的使用也变得尤为频繁。现如今碳足迹的概念可视为一种混合的概念, 即全球变暖潜力指标(global warming potential, GWP), 用于描述产品制造过程中的碳排放。

碳排放主要分为直接与间接两类, 直接是指在一个完整流程中, 通过直接方式产生的二氧化碳排放。例如, 在燃烧汽油的工业锅炉中, 燃烧过程中释放的二氧化碳是直接排放。另一方面, 在电加热锅炉时不会观察到直接排放, 但锅炉中使用的电力是在火力发电厂中产生的, 那么在锅炉中消耗的电力, 其产生和传输过程释放的二氧化碳的量被称为隐含排放或间接排放。

碳足迹数值计算时可大致采用两种方法, 一种是过程分析法, 即通过生命周期评价, 分析产品每个生产过程, 对全过程输入和输出数据建模。另外一种投入产出法, 主要是结合投入产出的模型对一个系统的各个部门进行经济性分析。本文对不同太阳电池技术路线碳足迹模型研究时采用的是生命周期评价方法。

### 1.2 生命周期评价方法

生命周期评估是一种将材料流和能量流进行结构化以

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 沪农科推字(2021)第3-4号

通信作者: 叶晓军(1977—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事光伏材料和器件方面的研究。yexiaojun@ecust.edu.cn

及量化的方法,包括商品和服务生命周期中引起的相关排放。生命周期思维要求从全过程的角度系统全面地量化分析。LCA 的结果也并非一成不变,其意义就是分析各类问题,不断以新方案代替旧方案,不断促进产品的进步。在生命周期评价当中,既要分析生产加工过程中产生的碳排放,还要分析原料的上游生产过程中的碳排放。

研究采用德国 Sphera 公司的 Gabi 软件进行碳足迹的模型分析。Gabi 软件对产品或系统的每个要素都从生命周期的角度进行建模,并对产品的生命周期效应进行量化。

产品清单数据的采集要求是数据模型必须完整,同时数据采集时有 cut-off 取舍法则,当某一原料对结果的影响不大甚至远小于 1%时,无需调查该工艺原料的上游生产工艺,中间流在取舍法则下反复追溯,最终建立完整的数据模型。

清单数据主要收集单元生产过程的输入流(input)以及输出流(output),且收集到的数据要换算成与基准流相对应的数值。LCA 可分为企业 LCA 以及行业或典型技术的 LCA,对于企业 LCA,所有能耗、物料都有详细生产记录,且企业为控制成本,所有数据一般都已折算成单位产品的各项物料和能耗,因此建立清单数据时无需进行额外的换算过程。而对于行业 LCA 或典型技术的 LCA,数据来源主要依靠行业统计年鉴、产业报告以及一些标准推荐值等,并结合已有文献资料从而完善数据清单。

还有部分数据主要来自于国内外的一些 LCA 数据库,如 CLCD、Ecoinvent、ELCD 等,一些清单物质和清单数据列表能够在这些数据库中完整体现,但国内外实际情况的差异也需在使用过程当中加以考虑。

## 2 光伏组件碳足迹计算

### 2.1 系统边界

在实际情况中,生命周期的边界往往会受到一些限制,可简单分为从“摇篮”到“坟墓”、从“摇篮”到“大门”、从“摇篮”到“摇篮”,“摇篮”代表产品诞生,“大门”代表产品出厂,“坟墓”代表产品最终废弃后的处理<sup>[8]</sup>。每个界限的侧重点不同,如果从原料的开采、加工、制造、使用、维护以及最终废弃处理都需重视的产品,那么界限就是摇篮到坟墓;如果不重视产品的使用和废弃阶段,只重视它的制造阶段,那么界限就是从摇篮到大门;在某些情况下,可回收废弃后的产品,边界是从摇篮到摇篮,如果回收完整的产品,但不管是何种情况,都需要从原料的开采阶段也就是“摇篮”开始进行评估。

从“摇篮”到“大门”是本文采用的系统边界,具体是指这一生命周期的原材料硅石开采、工业硅冶炼、多晶硅提纯、单晶硅片制备、电池片制备、组件制备等,系统边界如图 1 所示。但由于研究的系统边界仅选取到太阳能电池生产这一环节,并未涵盖太阳能电池的安装以及废弃处理阶段,因此在本文的研究中并未考虑到太阳能电池具体寿命问题对于碳足迹的影响。

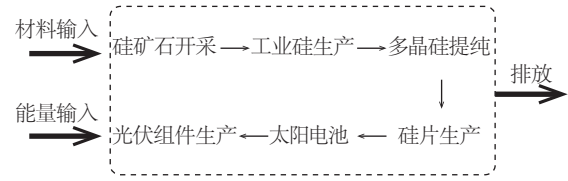


图1 光伏组件评价系统边界

Fig. 1 Boundary of photovoltaic module evaluation system

### 2.2 硅片及组件辅材的碳足迹

#### 2.2.1 单晶硅片碳足迹

计算单晶硅片碳足迹时,以 1 kg 单晶硅片为功能单元,将工业上的单晶硅片制备分为工业硅生产、提纯多晶硅、用直拉法制备单晶硅以及生产硅片等多个过程。

由工业硅生产数据以及文献数据<sup>[9]</sup>,得到生产 1 kg 工业硅的清单数据如表 1 所示。以国家标准综合能耗计算通则<sup>[10]</sup>为标准,0.1229 kgce/kWh 是电的折标煤系数,其中碳还原剂一项能耗折算成耗电量为 15.87 kWh,即用表 1 工业硅清单数据建立 LCA 数据流,生产 1 kg 工业硅的耗电量为 28.37 kWh。由 Gabi 软件分析,得出生产 1 kg 工业硅的碳排放为 35.46 kg CO<sub>2</sub>。

表1 生产单晶硅片的清单数据

Table 1 List information for mono-crystalline silicon wafers

原材料 (1 kg)	输入		输出	
	物质	数量	物质	数量
工业硅	硅石	2.64 kg	CO <sub>2</sub>	5.27 kg
	工业硅生产电耗	12.50 kWh	CO	0.21 kg
	碳质还原剂能耗	1.95 kgce	粉尘	0.16 kg
			固体废弃物	4.04 kg
多晶硅	工业硅	1.09 kg	HCl	1.35 g
	综合电耗	77.58 kWh	NO <sub>x</sub>	0.21 kg
	氯气	1.20 kg	HF	0.10 g
	氢气	0.12 kg		
单晶硅片	工业用水	263.00 kg		
	高纯多晶硅	1.07 kg	氟化物	28.38 g
	电耗	26.00 kWh	碳化硅	1.30 kg
	氟化氢	14.05 g		
	硝酸	12.70 g		
	碳化硅	2.38 kg		
	水	17.78 g		

由《中国光伏产业发展路线图(2021年版)》确立多晶硅提纯和 1 kg 单晶硅片生产过程的清单数据,此清单数据以生产 1 kg 高纯多晶硅作为功能单元,见表 1。利用 Gabi 软件分

析表 1 数据,建立多晶硅提纯及硅片生产工艺的 LCA 数据流,计算出多晶硅提纯生产工艺碳足迹为 122.84 kg CO<sub>2</sub>/kg,单晶硅片生产碳足迹为 158.38 kg CO<sub>2</sub>/kg。

### 2.2.2 组件辅材碳足迹

光伏组件生产过程的多个工序均在同一车间完成,因此未区分工序单独收集数据。生产过程中的部分辅材(如助焊剂、胶带、焊锡丝等)和包装材料中的缠绕膜因用量极小,不计算重量,因此这部分的上游过程被忽略。1 kW PERC 光伏组件生产过程的清单数据见表 2。由 Ecoinvent 数据库、CLCD 数据库以及文献可得到上述物质的上游数据,从而得以上几种物质的碳排放因子。

表 2 1 kW PERC 光伏组件清单数据和碳排放因子

Table 2 List of data and carbon emission factors for 1 kW PERC photovoltaic modules

物质	数量/ kg	碳排放因子/ (kg CO <sub>2</sub> /kg)	上游数据来源
钢化玻璃	49.36	1.48	文献[11]
聚乙烯(PE)薄膜	5.51	2.24	Ecoinvent 3.1
铝边框(AlMg <sub>3</sub> )	4.92	7.95	Ecoinvent 3.1
汇流条	0.45	2.41	Ecoinvent 3.1

通过碳足迹模型计算生产的光伏组件碳足迹:

$$C = \sum_{i=1}^n W_i \times W_i' \quad (1)$$

式中:  $W_i$  ——生产过程中第  $i$  类物质的用量, kg;  $W_i'$  ——第  $i$  类物质的碳排放因子, kg CO<sub>2</sub>/kg。

将表 2 数据代入式(1),计算得出 1 kW PERC 光伏组件生产的碳足迹为 125.59 kg CO<sub>2</sub>/kW。

## 2.3 晶体硅电池的碳足迹

### 2.3.1 用不同技术路线制备晶体硅太阳电池的碳足迹

查阅 PERC、HJT 和 TOPCon 等太阳能电池片生产方面的文献,调研厂家相关数据,以生产 1 kW (AM1.5, 1000 W/m<sup>2</sup>) 太阳能电池的量建立相关太阳能电池生产的清单数据。

#### 1) PERC 光伏组件碳足迹

PERC 太阳能电池的数据清单见表 3,假设 PERC 太阳能电池的效率为 23%,硅片厚度 170.00 μm。将表 3 中的数据输入到 GaBi 软件,建立 LCA 数据流。计算出生产 1 kW 的 PERC 太阳能电池片的碳足迹为 343.66 kg CO<sub>2</sub>,其中硅片的碳足迹为 277.17 kg CO<sub>2</sub>,结合 2.2 节计算出 1 kW PERC 光伏组件辅材的碳足迹,得到 PERC 光伏组件的碳足迹为 469.25 kg CO<sub>2</sub>/kW。

#### 2) HJT 光伏组件的碳足迹

计算 1 kWh HJT 太阳能电池的硅片碳足迹时,假设 1 kW 太阳能电池的硅片碳足迹与效率成反比,与硅片的厚度成正比,因此使用 PERC 太阳能电池与 HJT 太阳能电池效率的比值以及硅片厚度的比值进行换算。前面计算出 PERC 太阳能电池单晶硅片的碳足迹为 277.17 kg CO<sub>2</sub>,目前工业上 PERC 太阳能电池的效率约为 23%,硅片的厚度约为 170 μm, HJT 太阳能电池的效率约

表 3 1 kW PERC 太阳能电池生产清单数据

Table 3 List information for 1 kW PERC solar cells

输入		输出	
物质	数量	物质	数量
单晶硅片	1.75 kg	Cl <sub>2</sub>	0.0691 g
电耗	34.00 kWh	HF	0.023 g
银浆	0.07 kg	NO <sub>x</sub>	38 g
HCl	0.20 kg		
HF	0.95 kg		
HNO <sub>3</sub>	0.11 kg		
NaOH	0.197 kg		
水	262 kg		

为 24%,硅片的厚度约为 150 μm。因此估算出 HJT 电池硅片的碳足迹为 234.37 kg CO<sub>2</sub>/kW。

HJT 生产流程数据表经过研究和数据收集,如表 4 所示。利用 PECVD 技术沉积非晶硅薄膜,利用磁控溅射制备透明导电层(transparent conductive oxides, TCO)。查阅报告获得磁控溅射设备的规格参数<sup>[12]</sup>,如每小时的沉积面积、靶材利用率、用水量、平均功耗等。利用这些信息,计算 HJT 太阳能电池加工的能源和水消耗量。由设备的规格参数(平均沉积速率为 90.6 m<sup>2</sup>/h,平均功耗为 564.6 kWh),计算出每平方米电池的能耗为 6.3 kWh。用于冷却的水的量为 547.2 L/m<sup>2</sup>。假设正反面的 TCO 层总厚度为 80 nm。使用 GaBi 软件计算得到 HJT 电池清洗制绒、PECVD 沉积、TCO 沉积和丝网印刷各阶段的碳足迹分别为 3.59、28.36、27.10 和 14.20 kg CO<sub>2</sub>/kW<sub>p</sub>。

HTJ 光伏组件辅材方面的碳足迹类比其他硅片的碳足迹,组件辅材碳足迹与电池的效率成反比,计算出 HJT 电池的组件辅材碳足迹为 120.36 kg CO<sub>2</sub>/kW。将上述各部分计算出来的碳足迹进行加和,得出 HJT 光伏组件的碳足迹为 427.98 kg CO<sub>2</sub>/kW<sub>p</sub>。

表 4 1 kW HJT 太阳能电池生产工艺清单数据

Table 4 List information for 1 kW HJT solar cells

工艺	物质	数量	工艺	物质	数量
	电耗	0.64 kWh		电耗	26.36 kWh
	HF	0.38 kg	非晶	氢	9.68 g
清洗	NaOH	0.624 kg	硅层	氧	0.624 g
制绒	NH <sub>3</sub>	0.044 kg		冷却水量	1576 kg
	压缩空气	1 m <sup>3</sup>		电耗	2.096 kWh
	去离子水	133.6 kg	丝网	低温银浆	31.24 g
	电耗	25.2 kWh	印刷	压缩空气	4.384 m <sup>3</sup>
TCO 层	冷却水量	2047 kg			

#### 3) TOPCon 光伏组件的碳足迹

TOPCon 太阳能电池是在 PERC 电池生产的基础上增加沉

积超薄 SiO<sub>2</sub>层和掺杂的 n<sup>+</sup>型多晶硅层以及高温退火的工序,因此 TOPCon 太阳电池的碳足迹分析可近似在上文中已计算的 PERC 太阳电池碳足迹的基础上,增加沉积以及高温退火这两道工序的碳足迹。

#### ① 超薄 SiO<sub>2</sub>层和 n<sup>+</sup>型多晶硅层的沉积

根据调查, TOPCon 太阳电池的超薄 SiO<sub>2</sub>层厚度约为 2 nm, n<sup>+</sup>型多晶硅层厚度约为 90 nm。由于薄膜层很薄,碳排放主要是设备运行产生,因此假设 TOPCon 太阳电池沉积薄膜的碳排放和异质结中沉积非晶硅薄膜工艺的碳排放类似,将 TOPCon 太阳电池的超薄 SiO<sub>2</sub>层和 n<sup>+</sup>型多晶硅层沉积环节的碳足迹近似为 28.36 kgCO<sub>2</sub>/kW,实际生产中,根据沉积多晶硅薄膜的工艺不同,碳排放也不同。

#### ② 高温退火

掺磷多晶硅(n-poly-Si)需在 TOPCon 电池中采用高温晶化退火工艺制备,对于掺磷的多晶硅层,假设其退火温度为 800~900 °C,退火时间约为 30 min。根据捷佳伟创公司退火设备的规格参数得到工作的功率、温度范围、退火速率等数据,计算出 1 kW TOPCon 太阳电池的电力消耗为 6.83 kWh,中国 2020 年电网平均碳排放因子为 0.5839 kg CO<sub>2</sub>/kWh,得出 TOPCon 太阳电池高温退火工序的碳足迹为 3.99 kg CO<sub>2</sub>/kW。

假设 TOPCon 电池效率为 24%,硅片厚度为 165 μm,则硅片的碳足迹为 257.81 kg CO<sub>2</sub>/kW,与 PERC 相同工艺的碳足迹为 63.72 kg CO<sub>2</sub>/kW,其余组件辅材为 120.36 kg CO<sub>2</sub>/kW。将上述各部分计算出来的碳足迹进行加和,得出 TOPCon 光伏组件的碳足迹为 474.24 kg CO<sub>2</sub>/kW。

#### 2.3.2 晶体硅光伏组件碳足迹发展趋势

随着太阳电池产业的技术进展,未来硅片衬底会逐渐减薄,薄片化有利于降低硅耗和硅片成本,同时太阳电池的效率也会逐渐提升。PERC、TOPCon 和 HJT 三种太阳电池硅片厚度和效率变化趋势的预测见图 2,相应组件的碳排放计算结果变化趋势见图 3,计算中假设组件辅材和工艺等的单位

碳足迹不变。2022—2030 年,3 种晶硅太阳电池的碳足迹都逐步降低。TOPCon 组件碳足迹初期略高于 PERC 组件,但随着技术进步,2025 年后 TOPCon 组件的碳足迹将开始低于 PERC 电池。HJT 组件碳足迹是 3 种电池技术中最低的,到 2030 年可降低到 337 kg CO<sub>2</sub>/kW。

3 种光伏组件中,硅片生产环节的碳足迹占比较高。到 2030 年,PERC、TOPCon 和 HJT 组件中硅片碳足迹的占比依个较高。由此可见,对于晶硅太阳电池,碳足迹总量约一半是由硅片制造及其供应链带来的,硅片生产过程的能耗降低是降低晶硅太阳电池的碳足迹的重中之重。

太阳电池的组件辅材主要起到对于电池片的保护作用,提高电池片的机械性能,但同时太阳电池的组件辅材也占据了电池生产过程中碳足迹总量的一大部分。组件中主要的碳足迹来源是钢化玻璃以及铝边框,这两者的碳足迹又占了组件的绝大部分。以 PERC 太阳电池为例,PERC 光伏组件生产阶段的碳足迹为 125.59 kg CO<sub>2</sub>/kW,在组件碳足迹总量中所占比例为 26.76%,其中钢化玻璃比重为 58.17%,铝边框为 31.14%。

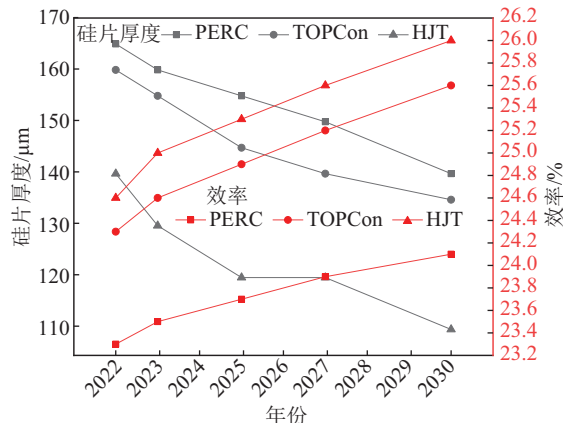


图2 2022~2030年硅片厚度和电池效率变化趋势

Fig. 2 Change trend of silicon wafer thickness and solar cell efficiency from 2022 to 2030

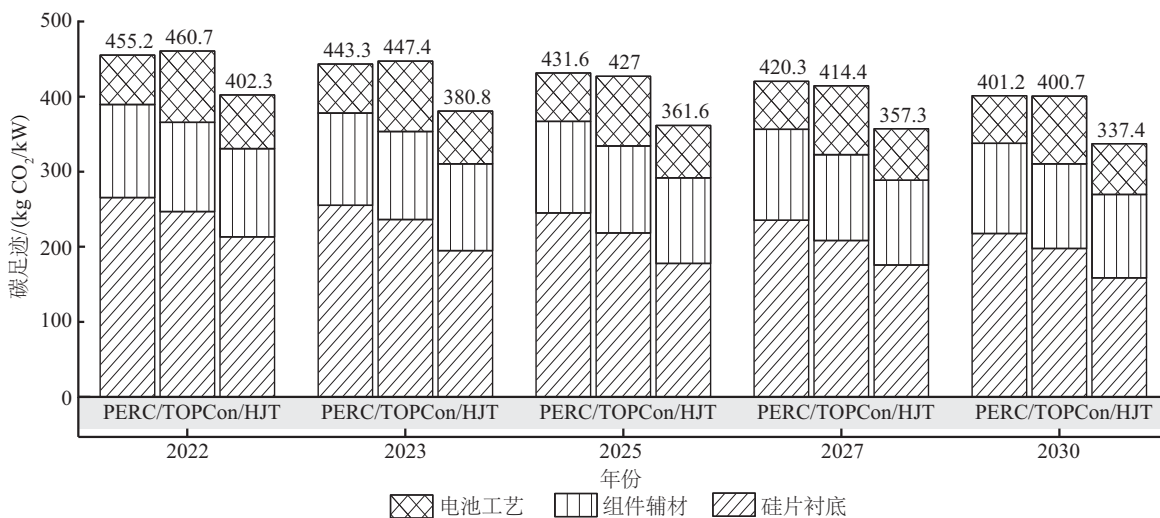


图3 PERC、TOPCon 和 HJT 光伏组件的碳足迹变化趋势

Fig. 3 Carbon footprint trends of PERC, TOPCon and HJT photovoltaic modules

## 2.4 钙钛矿光伏组件的碳足迹

钙钛矿太阳能电池(PSCs)的主要吸光材料为钙钛矿结构材料,具有效率高、制造成本低等优异性能。钙钛矿太阳能电池也是未来产业化的重点发展方向,通过与晶体硅太阳能电池如HJT的叠层,进一步提高光电转换效率。

表5汇总了生产1 m<sup>2</sup>钙钛矿电池的数据表<sup>[13]</sup>,根据数据进行LCA建模分析,假设太阳辐照度为1000 W/m<sup>2</sup>,钙钛矿太阳能电池转换效率为12%<sup>[14]</sup>,计算出生产1 m<sup>2</sup>钙钛矿太阳能电池的碳足迹为28.9 kg CO<sub>2</sub>/kW。

表5 1 m<sup>2</sup>钙钛矿电池生产清单数据  
Table 5 List data for production 1 m<sup>2</sup> PSCs

物质	数量	物质	数量
电耗	23.4 kWh	钢	7.50 g
水	731 kg	酚醛树脂	0.0927 g
铜	0.103 kg	银	9.38 g
铅	2.34 g	锡	12.90 g
环氧树脂	0.0927 g		

换算出钙钛矿电池片的碳足迹为160.56 kg CO<sub>2</sub>/kW<sub>p</sub>。钙钛矿电池的组件碳足迹采用和上文计算晶硅电池的组件碳足迹的方法,根据效率的比值做近似换算,得出钙钛矿光伏组件辅材的碳足迹为339.99 kgCO<sub>2</sub>/kW。

综上所述,结合计算出来钙钛矿电池的电池片碳足迹与组件碳足迹,得出钙钛矿电池总的碳足迹为500.55 kgCO<sub>2</sub>/kW。

上述分析中选取的光伏组件效率为12%,假设进一步提升组件效率到13%、14%、15%、16%、17%、18%,分析计算钙钛矿光伏组件碳足迹的情况,如图4所示。

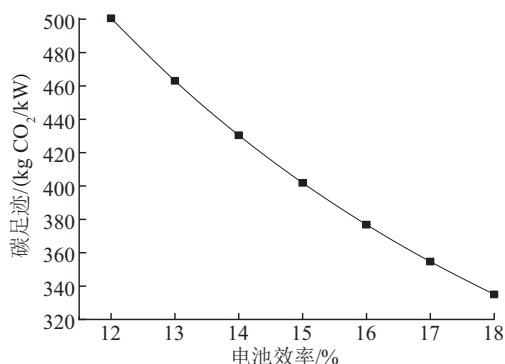


图4 不同效率钙钛矿组件的碳足迹

Fig. 4 PSCs modules' carbon footprint with various efficiencies

当太阳能电池效率为18%<sup>[15]</sup>时,钙钛矿太阳能电池的碳足迹为334.99 kgCO<sub>2</sub>/kW,远低于晶硅太阳能电池,这是由于硅片制备及其产业链生产过程中碳足迹较高,而钙钛矿电池属于薄膜型电池。但是钙钛矿电池目前工业生产仍处于初期阶段,通过LCA建模分析,当其效率在约13%时将持平于现有

晶硅组件的碳足迹,当其太阳能电池效率不高于12%时,其碳足迹将远高于晶硅组件。本文是以生产1 kW光伏组件作为本次研究的功能单元,且未把太阳能电池的寿命等因素考虑在内。实际上,目前晶硅太阳能电池的寿命在25~30 a,而钙钛矿太阳能电池有着不稳定、易氧化、易水解、不耐高温等缺陷,使用寿命还达不到要求,这些问题也都制约着钙钛矿太阳能电池的发展。考虑到硅片生产阶段产生较多的碳排放,想要继续降低晶硅太阳能电池的碳足迹,国家应大力投入科研,加快技术进步,争取研发出可代替改良西门子法的多晶硅制备方法,从而更高效、更低碳地制备硅片。对于钙钛矿太阳能电池来说,要想在工业上进一步挖掘减排潜力,使之成为下一代主流太阳能电池技术,就应该在实验室方面着手进行钙钛矿太阳能电池结构优化、提高寿命以及钙钛矿太阳能电池的稳定性等方面的研究,使产业化性能得到提升。

## 3 结论

通过LCA的方法,利用Gabi软件建模分析,计算出使用PERC、TOPCon和HJT 3种晶体硅太阳能电池和钙钛矿太阳能电池的光伏组件的碳足迹,以生产1 kW光伏组件为功能单位,同时计算出由于效率提高和硅片厚度降低导致的碳足迹趋势。获得以下结论:

1)对于晶体硅太阳能电池,硅片生产环节的碳足迹占比最高,其次是太阳能电池的组件辅材,主要是钢化玻璃和铝边框,综上,降低晶体硅太阳能电池整个生命周期的碳足迹可从改善硅片的制造技术来降低碳足迹,钢化玻璃和铝边框同理。

2)钙钛矿太阳能电池技术尚处于实验和量产验证阶段,降低碳足迹可通过研究来提高效率、寿命和稳定性,从而达到降低整个生命周期的碳足迹的目的。

本文所列举的太阳能电池是当前光伏技术发展过程中最具代表性的几种电池,也诠释了光伏技术未来产业化发展的方向,对发展符合“双碳”目标的光伏产业具有一定的指导意义。

### [参考文献]

- [1] BLAKERS A W, WANG A H, MILNE A M, et al. 22.8% efficient silicon solar cell [J]. Applied physics letters, 1989, 55(13): 1363-1365.
- [2] PEIBST R, RÖMER U, LARIONOVA Y, et al. Working principle of carrier selective poly- Si/c- Si junctions: is tunnelling the whole story [J]. Solar energy materials and solar cells, 2016, 158: 60-67.
- [3] ADACHI D, HERNÁNDEZ J L, YAMAMOTO K. Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25.1% efficiency [J]. Applied physics letters, 2015, 107(23): 233506.
- [4] CELIK I, SONG Z N, CIMAROLI A J, et al. Life Cycle

- Assessment (LCA) of perovskite PV cells projected from lab to fab[J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2016, 156: 157-169.
- [5] JIA X J, ZHOU C L, TANG Y H, et al. Life cycle assessment on PERC solar modules [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2021, 227: 111112.
- [6] FTTHENAKIS V, LECCISI E. Updated sustainability status of crystalline silicon-based photovoltaic systems: life-cycle energy and environmental impact reduction trends [J]. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 2021, 29: 1068-1077.
- [7] COSTANZA R. The dynamics of the ecological footprint concept [J]. *Ecological economics*, 2000, 32 (3): 341-345.
- [8] 孙晓慧. 纺织产品碳足迹评价方法及指标 [J]. *中国纤检*, 2021(8): 120-122.  
SUN X H. Exploration of carbon footprint assessment and implement on textiles [J]. *China fiber inspection*, 2021 (8): 120-122.
- [9] 梁佳. 建筑并网光伏系统生命周期环境影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 31-33.  
LIANG J. Environmental effects investigating for the grid-connected BAPV [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 31-33.
- [10] GB/T 2589—2008, 综合能耗计算通则[S].
- GB/T 2589—2008, General principles for calculation of the comprehensive energy consumption[S].
- [11] 俞海勇, 曾杰, 赵敏. 典型装饰装修材料生命周期能耗和碳排放量 [J]. *建筑科学*, 2014, 30(4): 21-25.  
YU H Y, ZENG J, ZHAO M. Life-cycle energy consumption and carbon emission of typical decoration materials [J]. *Building science*, 2014, 30(4): 21-25.
- [12] PHOTON Europe GmbH. Market survey on deposition equipment for transparent conductive oxide layers [J]. *Photon international*, 2011: 160-175.
- [13] FRISCHKNECHT R, ITTEN R, SINHA P, et al. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems [J]. *International energy agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12*, 2015, 4: 20.
- [14] 林淙. 纤纳光电 $\alpha$ 组件通过全球首个IEC稳定性全体系认证 [RB/OL]. <https://finance.eastmoney.com/a2/202301062606980523.html>, 2023-01-06.  
LIN C. Fiber-optic  $\alpha$  The module has passed the world's first IEC stability system certification [RB/OL]. <https://finance.eastmoney.com/a2/202301062606980523.html>, 2023-01-06.
- [15] DU M Y, ZHAO S, DUAN L J, et al. Surface redox engineering of vacuum-deposited NiO<sub>x</sub> for top-performance perovskite solar cells and modules [J]. *Joule*, 2022, 6 (8): 1931-1943.

## STUDY ON CARBON FOOTPRINT OF CRYSTALLINE SILICON AND PEROVSKITE PHOTOVOLTAIC MODULES

Zhuang Yuan<sup>1</sup>, Wen Jincheng<sup>2</sup>, Bian Yuliang<sup>1</sup>, Mao Xiaoxiao<sup>1</sup>, Li Majie<sup>1</sup>, Ye Xiaojun<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Photovoltaic technologies have shown a rapid development trend due to promote global clean energy applications. To evaluate the environment impact of solar cell during production and manufacturing process, crystalline silicon solar cell industry technology including passivated emitter and rear cell (PERC), tunnel oxide passivated contact (TOPCon) solar cell and heterojunction (HJT) solar cell, and also the emerging perovskite solar cell (PSCs), were estimated with the GaBi software and the life cycle assessment (LCA) approach. As the calculation results, typical carbon footprints of the four types of photovoltaic modules are 469.25, 474.24, 427.98 and 500.55 kg CO<sub>2</sub>/kW respectively. For crystalline silicon photovoltaic module, the carbon footprint caused by silicon wafer production is more than 50%. Currently PSCs module has a large carbon footprint due to its low industrialization efficiency.

**Keywords:** carbon footprint; photovoltaic modules; crystalline silicon; perovskite; life cycle