

引用格式: 扈泽波, 车帅, 刘彦超. 生命周期评价在太阳能电池中的研究进展[J]. 有色设备, 2025, 39(2): 26-33.

HU Zebo, CHE Shuai, LIU Yanchao. Research progress in life cycle evaluation of solar cells[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 26-33.

生命周期评价在太阳能电池中的研究进展

扈泽波, 车帅*, 刘彦超

(沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

[摘要] 针对太阳能电池制造中的污染问题, 本文引入生命周期评价(LCA)方法, 旨在全面量化其环境影响。本文聚焦于 LCA 在太阳能电池生产中的应用, 综述了国内外对多种类型太阳能电池(包括多晶硅、单晶硅及新兴钙钛矿电池等)的 LCA 研究成果。这些研究不仅揭示了太阳能电池生产的环境成本, 也为促进绿色制造、实现可持续发展提供了科学依据。

[关键词] LCA; 晶硅太阳能电池; 钙钛矿太阳能电池; 能耗; 环境影响

[中图分类号] TM914.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0026-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.003

0 引言

在当前社会背景下, 经济与科技的快速发展伴随化石能源的大量消耗, 引发了空气污染、温室效应等显著环境问题, 对生态平衡及人类健康造成威胁^[1]。为此, 新型能源如太阳能, 因其可再生性和清洁性, 倍受关注。

光伏发电作为太阳能利用的主要方式, 在中国新能源发展中占据重要地位。据数据统计, 2023 年中国石化太阳能光伏发电量显著增长, 实现 13.2 亿 kWh, 减排效果等同于减少大量标煤消耗, 展现了光伏发电的巨大潜力^[2]。然而, 太阳能电池生产过程中的高能耗与环境污染问题值得关注。因此, 全面评估其环保性很有必要。

在此背景下, 生命周期评价(LCA)方法成为关键工具, 全面评估太阳能电池从原料开采至废弃处理的全周期环境影响, 为环保策略的制订提供科学依据。本研究将深入分析国内外 LCA 在太阳能电池领域的研究进展与实践, 为未来的研究方向与实际应用提供指导与参考。

1 生命周期评价

1.1 生命周期评价的概念

1969 年, 美国西部研究所首次将 LCA 用于可口可乐瓶分析, 奠定 LCA 研究基础^[3]。1990 年, 国际环境毒理与化学学会(SETAC)正式定义 LCA, 随后发布方法指南, 确立其环境管理地位^[4-5]。此后, LCA 广泛应用于产品设计、供应链、环保标识等领域, 助力绿色发展与可持续转型。

LCA 可定义为: 对一个产品系统从原材料的获取、产品的生产、使用直至最终废弃处理的全过程中, 全部资源输入、物质输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[6]。这一过程涵盖能源消耗、碳排放、水消耗等直接影响, 及资源消耗、土地使用等间接影响。

1.2 生命周期评价的理论框架

LCA 的理论框架主要包括 4 个核心部分: 目标与范围的确定、生命周期清单分析(LCI)、生命周期影响评价(LCIA)和结果解释, 确保了评估的全面性与系统性^[7], 如图 1 所示。

1) 目标与范围确定: 首先要确立明确的研究目标与系统边界, 选定统一的功能单位(如 1 kWh 的

[收稿日期] 2024-12-20

[第一作者] 扈泽波(1999—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要研究方向为生命周期评价和绿色低碳。

[通信作者] 车帅(1986—), 男, 辽宁沈阳人, 讲师, 主要研究方向为温室气体纳米吸附材料的研究、矿产资源及工业废渣的资源化。

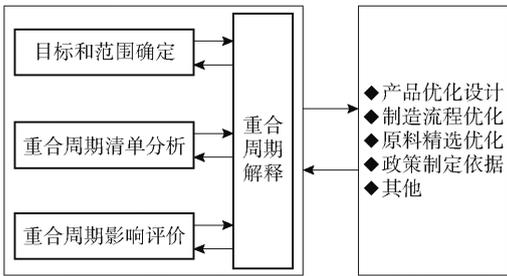


图1 IS014040 生命周期评价框架

Fig. 1 IS014040 life cycle assessment framework

电力输出、 1 m^2 的太阳能电池组件或者一个装机容量为 1 MW 的光伏电站等), 确保评估聚焦于太阳能电池产品的全生命周期。

2) 生命周期清单分析(LCI): 核心在于量化全生命周期内的资源与环境数据。通过构建模型、广泛收集数据(涵盖原材料、生产、运输、使用及废弃阶段), 并精确关联至功能单位, 为后续影响评价奠定坚实基础。

3) 生命周期影响评价(LCIA): 基于 LCI 数据, 深入评估资源利用与环境效应。通过选择影响类型、分类特征化、归一化权重分配, 最终实现排放与消耗的统一度量, 综合评估太阳能电池的环境影响, 并提炼关键结论。

4) 结果解释: 作为评估的总结, 此阶段分析数据、评估可靠性、识别不确定性, 并提出针对性的环保建议。通过编制详尽报告, 将研究成果转化为实际指导, 促进太阳能电池产品的绿色生产与可持续发展。

2 LCA 评价体系指标

2.1 LCA 在我国太阳能电池生产中的应用

生命周期评价在太阳能电池生产中的应用, 主

要体现在对产品从原材料开采、生产、使用到废弃全过程的资源消耗与环境影响等进行定量分析和评估, 如图 2 所示。

胡润青^[8]于 2009 年聚焦于屋顶多晶硅光伏系统, 通过全生命周期评价, 深入分析了能量回收期及其影响因素, 为光伏系统设计优化提供了宝贵参考。随后, 众多研究者纷纷涉足于太阳能电池的 LCA 领域。2013 年艾盼^[9]和何洋^[10]分别聚焦聚光系统和太阳能级多晶硅的环境影响, 前者通过 LCA 证明了聚光光伏技术的可行性, 后者则构建了详细的评价模型, 为管理和政策制定提供了量化依据。

近年来, 关于全生命周期评价的研究不断深入。米肇丰^[11]于 2014 年以全生命周期理论构建光伏低碳效益模型, 评估了天津 10 MW 光伏站, 显示减排效应强、补偿期短, 制造与运行阶段排放高; 敏感性分析指出光照、制造能耗显著影响低碳效益。2015 年拜景彬^[12]对光伏建筑一体化进行全生命周期分析, 以西咸航空港半球形建筑为例, 预测了 25 a 发电量, 显示 14 a 回本减碳显著, 且光伏玻璃幕墙对室内热环境影响小。同年, 李鹞^[13]构建了光伏电池板的全生命周期评估体系, 提出了细化不确定性分析的新框架。罗婧雯^[14]对 PbSe 量子点太阳能电池进行了全面评估, 虽然该技术在人体毒性上表现优异, 但重金属排放仍需关注。谢明辉团队^[15]的研究则强调了太阳能级多晶硅生产对环境和人体健康的显著影响, 并提出了技术改进建议。罗付香^[16]的研究指出, 拆解过程能耗大, 但回收或焚烧可有效减轻环境负担, 建议探索低能耗拆解技术。之后, 赵娟团队^[17]量化了多晶硅光伏组件生产阶段的环境、经济与社会影响, 为政策制定提供了科学依据。

2017 年, Zhang 等^[18]评估几种不同钙钛矿太阳

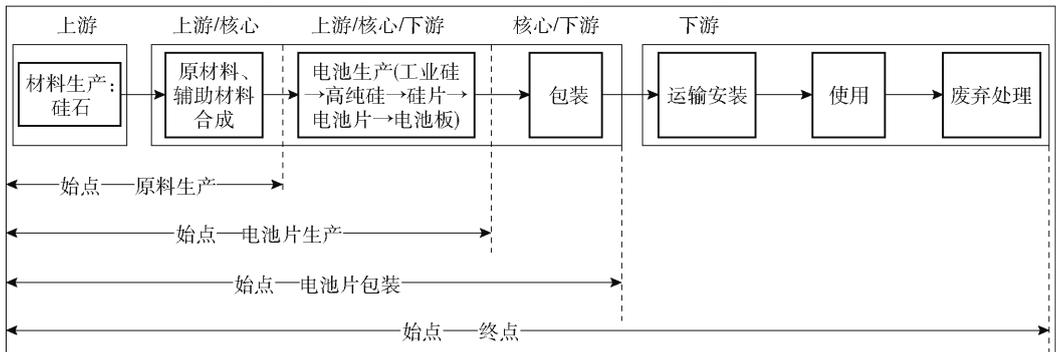


图2 太阳能电池的通用生命周期

Fig. 2 Universal life cycle of solar cells

能电池环境影响,发现 MAPbI₃ 与 FAPbI₃ 电池因有机溶剂使用造成对环境负担重;金电极的生产在钙钛矿太阳能电池系统中对环境的影响最为显著,银或铝替代金电极可减少环境影响,此外,焚烧与能量回收的处理方式优于垃圾填埋。于志强^[19]揭示了铝制品消耗对光伏系统环境影响的重要性,并强调了退役阶段材料回收的环境正面效应。2019 年中国对 p-multi-BSF 模块实施全面 LCA,发现在生产阶段对环境的影响最大,模块制造工厂与安装现场之间的长距离运输在其生命周期中不可忽视;优化模型减少总环境损害至 0.92 mPt,能量回收时间(EPBT)缩短至 0.75 a,电气性能与制造工艺改进是关键^[20]。同时,吴越齐等^[21]评估了晶体硅太阳能电池产业环境影响,从器件与工艺单元入手,收集资源消耗与排污数据,构建生命周期清单,并可视化分析,量化产业环境负荷,探讨了减排可行路径。

最新研究动态显示,杨明坤^[22]于 2021 年研究表明 CIGS 薄膜太阳能电池在国内具有良好的节能发展前景。而王姿怡^[23]于 2023 年指出,光伏系统制造阶段环境影响最大,特别是单晶硅组件生产,同时强调了回收阶段尚未达到净零负荷的问题,以及对人类健康和海洋生态系统的潜在影响。同年,庄园等^[24]的评估则揭示了晶体硅光伏组件中硅片生产的高碳足迹,并指出钙钛矿组件因产业化效率低导致的碳足迹增长这一问题,为光伏技术的未来发展指明了提升产业化效率以降低环境影响的方向。2024 年,管振忠等^[25]以山东建筑大学 1MW 光伏系统为例,分析全生命周期碳排放与回收期,评估减碳效益,及通过扩大使用规模、结合热泵供暖、余电上网及加强维护清洁措施带来的应用潜力。

2.2 LCA 在国外太阳能电池生产中的应用

2.2.1 晶硅太阳能电池

1998 年,Kato 等^[26]率先评估了单晶硅(c-Si)、多晶硅(poly-Si)和非晶硅(a-Si)光伏组件的 LCA,发现 c-Si 组件回收快且 CO₂ 排放量低,而 poly-Si 与 a-Si 在减少 EPBT 和 CO₂ 排放方面表现更佳。2012 年,Schmidt 等^[27]则聚焦于微电子芯片与硅片处理的 LCA,利用软件 Umberto 5.5 进行库存和影响评估,揭示了能源消耗与化学品生产为主要环境影响源,在太阳能电池制造的晶圆上游工艺中两者的影响尤为显著。2014 年,Andersen 等^[28]研究晶硅太阳能电池的干化学蚀刻工艺(DCEP),进行

全生命周期评估,显示其在节水、减排温室气体及降低毒性上优于湿式化学蚀刻工艺(WCEP),有望显著减少光伏系统 CO₂ 排放。

2017 年,Khaenson 等^[29]在泰国进行了多晶硅与薄膜非晶硅太阳能电池的 LCA 评估,发现多晶硅太阳能电池的整体影响高于薄膜非晶硅太阳能电池。而 2018 年,新南威尔士大学^[30]的研究则聚焦于 c-Si 太阳能模块的 EoL(使用末期)处理,强调回收材料的环境效益优于其他方案,并指出复杂回收工艺虽高效但需警惕化学回收中有毒物质的使用以及运输产生的额外环境负担。Lunardi 等^[31]于 2019 年评估串联硅基太阳能电池的环境影响,发现使用所研究的串联结构可提升电池性能,降低全球变暖等环境负担及对人类健康的负面影响,优于钝化发射器后接触(单结)技术。这些研究共同推动了晶硅太阳能电池向更环保、可持续发展的方向发展。

2.2.2 钙钛矿太阳能电池

钙钛矿太阳能电池采用钙钛矿型有机金属卤化物半导体吸光,属第三代或新概念光伏技术,具有高效光吸收与转换效率的优点,其结构如图 3 所示。

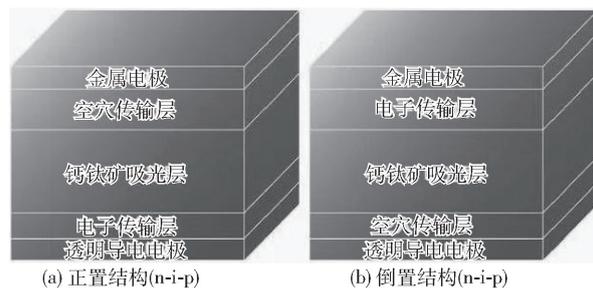


图 3 钙钛矿电池的结构

Fig. 3 Structure of perovskite cell

Espinosa 等^[32]于 2015 年研究了铅基钙钛矿太阳能电池的 LCA 与环境影响分析,指出生产能耗及甲基胺卤化物为主要环境负担,而铅毒性相对次要。2016 年 Celik 等^[33]通过对比 2 种钙钛矿结构,发现无机孔传输层结构在环境友好性上介于单晶硅与商用光伏技术之间,寿命是限制因素;无机孔传输层(HTL)结构结合溶液法虽节能,但有机前体可能引发海洋污染。2017 年,Itten 等^[34]对比了单片硅异质结有机金属钙钛矿串联电池(SHJ-PSC)与 PSC 的环境表现,指出在特定条件下 SHJ-PSC 更具优势。Lunardi 等^[35]则聚焦于钙钛矿/硅串联电池的 LCA,发现 ITO/金属网格及铝电极能减轻环境压

力,缩短能量回报时间。Alberola-Borràs 等^[36]于2018年运用LCA评估了4种PSC组装,强调沉积与衬底过程的环境影响,显示铅影响最小,并提出循环利用策略以减轻毒性。

2021年,Guerrero等^[37]利用净能源分析(NEA)方法评估n-i-p钙钛矿太阳能电池,显示其在不同太阳辐照下能量回收时间(EPBT)极短,体现高效能潜力。同年,Rao等^[38]研究单晶二氧化钛纳米棒钙钛矿电池LCA,显示其回收期短、排放量低、净能量比高,组装阶段排放显著,氟氧化锡玻璃与金层排放虽小亦需关注。2022年,Okoroafor等^[39]发现喷墨打印钙钛矿电池在全球变暖潜力(GWP)和累积能量需求(CED)上优于旋转涂层,使用绿色溶剂油墨更环保。该研究凸显了喷墨打印技术在电池制备中的环境优势。

与此同时,Rahim等^[40]对比三代太阳能电池(多晶硅、碲化镉、透明钙钛矿)的环境影响,发现钙钛矿电池对人类健康与生态系统损害最小,尽管全球变暖潜力仍存在,但较小的环境影响预示其有着广阔前景。2023年,Emma等^[41]聚焦于钙钛矿电池中金属及其他有价值材料的回收生命周期成本评估,开发出经济可行的回收方案,并证实回收过程具备经济效益,为可持续的寿命结束管理开辟了新路径。2024年,Chaosukho等^[42]通过ReCiPe 2016影响方法评估钙钛矿电池,优化电极材料,以碳代金,减少环境负担且保持高效能,为绿色转型贡献策略。同年,Kim等^[43]研究废弃了PSC在运行和回收方法中提高稳定性和减少有毒铅泄漏的方法,提出了提升稳定性和减少铅泄漏的策略,旨在构建可持续PSC产业。Bhati等^[44]对比钙钛矿电池与主流光伏技术环境影响,发现其在绿色能源领域具有潜力,尽管性能未全面领先,但在环境指标上展现优化空间。这一系列研究不仅揭示了钙钛矿太阳能电池的环境优势与潜在挑战,也为该技术的持续优化与广泛应用奠定了坚实基础。

2.2.3 其他太阳能电池

Espinosa等^[45]在2011年聚焦于无ITO柔性聚合物太阳能电池(Hiflex工艺)的LCA,评估了替代ITO电极(如Al/Cr溅射电极)的环境效益。尽管无ITO工艺简化了生产流程,降低了能耗,但高能耗的溅射过程及低效率($\approx 1\%$)导致能量回收时间(EPBT)长达10a,研究建议通过优化设计与提升效

率来缩短EPBT。同年,Espinosa团队^[46]还研究了集成聚合物太阳能电池的便携式照明系统,发现其EPBT仅为1.3~2a,展现出良好的市场应用前景。

2020年,荷兰莱顿大学团队通过LCA对纳米线太阳能电池进行了一系列研究^[47-49],他们指出高耗材与废弃物挑战,提出电镀工艺优化与无氟材料应用建议,强调实验室LCA对新技术的可持续发展导向作用及局限性。研究显示,高效GaAs/Si模块的EPBT可低于单硅模块,且基板重用可进一步优化环境表现。此外,对比了不同纳米线生长方式,指出实验室生产资源消耗与废弃物,如三氟甲烷和金等;模拟不同情景提出减负策略,建议减少金使用、优化电镀、延长晶圆寿命及采用环保蚀刻材料。Andler等^[49]评估 Cu_3AsS_4 作为单结薄膜光伏电池吸收层的LCA,与晶硅、CdTe、CIGS技术对比。结果显示 Cu_3AsS_4 的LCA与其他几种材料相当,但需优化沉积技术,设计循环BOS组件,探索高效生产。2022年,Resalati等^[50]首次评估4种新兴硫族光伏电池,研究发现,铋基电池环境影响最小,材料影响弱于电耗,吸收层影响大;无毒硫族电池环保,效率提升与材料替代对环境问题的解决很关键。

3 太阳能电池生产阶段的电能消耗与环境影响评估

本研究整合了2009—2023年间多位研究者的成果,以全面审视太阳能电池生产阶段的输入输出情况。由于研究时间跨度、评价范畴界定、功能单元设定、数据源时效性以及主观判断等因素的差异,不同研究在清单分析上呈现出一定的差异性。为统一分析维度,本研究聚焦于能耗、 CO_2 排放、大气污染物及固体废弃物4大核心指标。具体而言,图4展示了胡润青^[8]研究的北京1kW屋顶并网光伏发电系统,从工业硅起始至光伏系统安装的能耗演变趋势。图5则聚焦于何洋^[10]的研究,以1kg太阳能级多晶硅为基准,深入剖析了从开采硅石到生产电池组件各阶段的电能消耗与环境影响。李鹤^[13]的研究以 1 kW_p 为功能单元,记录了从硅石原料到最终电池板成品的整个生产链中的电能消耗及排放情况(图6)。于志强^[19]研究(本文截取至电池组件生产阶段)则针对 1 MW_p 冶金法多晶硅光伏系统,进行了生产阶段的数据综合(图7)。王姿怡^[23]的研究(同样截取至电池片生产阶段)则专注于每平方米多

晶硅电池片的输入输出清单(图8)。

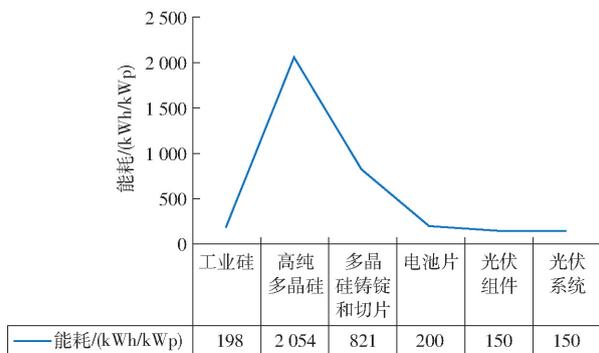


图4 光伏系统生产制造环节的能耗

Fig. 4 Energy consumption in manufacturing process of photovoltaic system

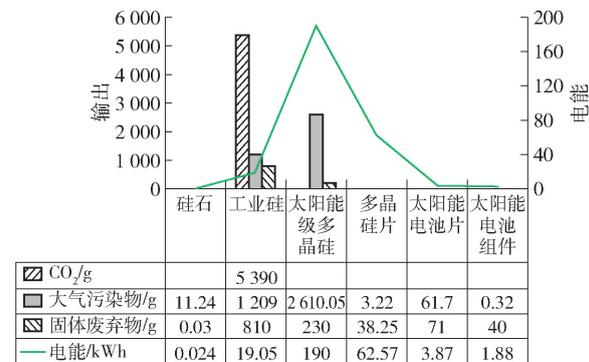


图5 1 kg 太阳能级多晶硅生命周期部分数据清单

Fig. 5 1 kg List of solar level polysilicon life cycle

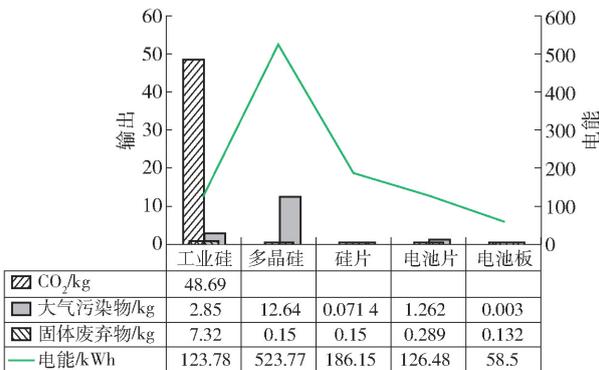


图6 1 kW_p光伏组件制造流程的部分数据清单

Fig. 6 1 List of partial data for the process of 1 kW_p photovoltaic module manufacturing

基于前文的分析框架,本研究确认了在光伏发电技术全生命周期中,即原材料开采至太阳能电池制造,是能耗与污染最为集中的阶段。因此,图7与图8的分析重点均集中在了这一关键生产环节。

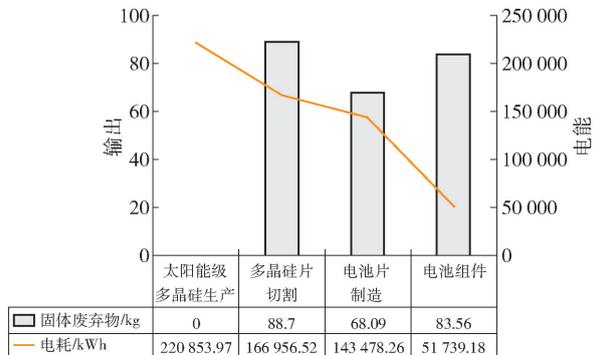


图7 1 MW_p冶金法多晶硅光伏系统生产过程的部分数据清单

Fig. 7 1 Some data list of production process of 1 MW_p metallurgical polysilicon photovoltaic system

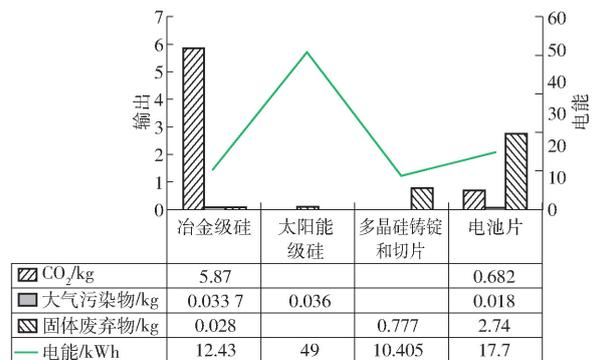


图8 生产1 m²多晶硅电池片的部分数据清单

Fig. 8 Partial data list for the production of 1 m² polysilicon cells

通过对比分析发现:在太阳能电池生产过程中,多晶硅生产环节的电能消耗最为显著,远超其他生产阶段;工业硅生产是CO₂排放的主要源头,其排放量显著高于其他环节;大气污染物主要集中在工业硅与多晶硅生产过程中;而固体废弃物的产生则贯穿整个生产流程,但具体量值因工艺路线的不同而有所差异。综上所述,工业硅至硅片的生产阶段是光伏系统全生命周期中污染与能耗最为突出的环节,亟需通过技术创新与流程优化来加强管控,以实现更加绿色、高效的生产目标。

表1为目前评价指标及其对应的环境影响类别。LCA作为一种系统化评估产品、服务或过程环境影响的方法,具有全面性和科学性的优点。然而,LCA也存在数据获取困难、边界设定主观、结果不确定性高等局限,且难以全面反映对社会和经济的影响。

表 1 LCA 在太阳能电池中的评价指标

Table 1 Current evaluation indicators of LCA in solar cells

评价指标	环境影响类别	描述
能耗	能源消耗	评估太阳能电池生产过程中各阶段的能源消耗,通常以 kWh 为单位
CO ₂ 排放	全球变暖潜力(GWP)	评估太阳能电池生命周期中产生的 CO ₂ 排放,通常以 kg CO ₂ eq 为单位
水消耗	水资源消耗	评估太阳能电池生产过程中各阶段的水资源消耗,通常以 m ³ 为单位
大气污染物	大气污染	评估太阳能电池生产过程中排放的氮氧化物(NO _x)、硫氧化物(SO _x)等大气污染物
固体废弃物	废弃物管理	评估太阳能电池生产过程中产生的固体废弃物,通常以 kg 为单位
毒性	人体毒性、生态毒性	评估太阳能电池生产过程中使用的化学物质对人体健康和生态系统的潜在毒性影响
资源消耗	资源枯竭	评估太阳能电池生产过程中对稀有金属、硅等自然资源的消耗情况
土地占用	土地使用	评估太阳能电池生产过程中对土地资源的占用情况,通常以 m ² 为单位

4 LCA 在太阳能电池应用中的不足与挑战

通过对 LCA 在国内外太阳能电池生产中的应用研究进行综述,该方法在量化环境影响、优化生产工艺及推动绿色制造方面发挥了重要作用。尽管 LCA 在该领域取得了显著进展,但仍存在若干问题与挑战。①数据标准化与可比性不足,不同研究在功能单位、系统边界和数据来源上的差异导致结果可比性较差,亟需建立统一的数据标准与评估框架。②新兴技术的 LCA 研究相对滞后,尤其是对钙钛矿电池、CIGS 薄膜电池等技术的全生命周期环境影响评估不够深入,未能全面揭示其环境成本与潜在风险。③回收体系的 LCA 研究较为欠缺,特别是对钙钛矿电池等新兴技术的回收处理研究较少,缺乏高效且经济可行的回收方案。④LCA 研究中的不确定性分析不足,数据收集与模型构建过程中的不确定性可能对结果产生较大影响,需加强相关分析以提高结果的可靠性。⑤政策支持与推广不足也是突出问题,LCA 的应用缺乏系统的政策引导与激励机制,导致企业与研究机构对其重视程度不足。我国在太阳能电池 LCA 领域虽取得一定进展,但与欧美国家相比,在数据标准化、新兴技术评估、回收体系完善、政策支持及技术创新等方面仍存在明显不足,亟需进一步优化以推动产业的绿色转型。

5 结论与展望

生命周期评价(LCA)在太阳能电池领域的应用显著体现了其量化环境足迹的不可替代性。不仅详尽分析了从原材料提取至最终废弃处理的全链条环境成本,还通过精确的数据支持,为工艺绿色化改造

和可持续发展策略提供了重要的科学依据。相较于欧美国家在 LCA 体系构建及光伏产业实践方面的先期成就,我国在 LCA 的研究与应用方面尚需加快进程,缩小差距。为此,建议从以下几个方面进行改进。

1)首要举措是强化其应用推广,构建涵盖全面数据的 LCA 平台和评估机制,促进政府、企业及学术界的协同合作,共同推动绿色转型。

2)针对 LCA 揭示的环保瓶颈,企业应增强创新能力,采用低能耗、低排放的生产技术和环保材料,优化流程设计,减少环境负担。

3)完善太阳能电池回收体系极为关键,需建立高效、经济的回收再利用机制,减少资源浪费和环境污染,促进循环经济发展。

未来,LCA 在太阳能电池领域的应用将更加深入和广泛,分析将更加细化至各个环节,提供更为精准的优化路径。随着国际标准与政策的持续推动,LCA 数据的标准化与可比性将显著增强,为构建全球统一的太阳能电池生命周期清单数据库奠定坚实基础,将引领光伏产业迈向更加绿色、可持续的未来。

[参考文献]

- [1] 郑天龙. 可再生燃料电池电催化剂的表/界面结构调控及其性能研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
- [2] 殷高峰,向炎涛. 中国石化拟新建 1 万座光伏电站促进光伏发电高质量发展[N]. 证券日报,2024 - 07 - 23 (B02).
- [3] Hauschild M Z, Rosenbaum R K, Olsen S I. Life cycle assessment[M]. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>, 2018.

- [4] 王飞儿,陈英旭. 生命周期评价研究进展[J]. 环境污染与防治,2001(5):249-252.
- [5] 杨晓艳,樊建锋,张耀霖,等. 产品碳足迹方法学的实现路径[J]. 内蒙古科技与经济,2023(15):49-52.
- [6] 侯锋,杨本晓,陈超. 色纺纱产品绿色设计的探讨[J]. 棉纺织技术,2023,51(4):64-67.
- [7] International Organization for Standardization. Environmental management life cycle assessment principles and framework: ISO14040[S]. British: International Standard, 2006.
- [8] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究[J]. 太阳能,2009(1):9-14.
- [9] 艾盼. 硅聚光太阳能电池的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [10] 何洋. 太阳能级多晶硅的生命周期评价[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [11] 米肇丰. 基于全寿命周期的并网光伏发电与风力发电低碳综合效益评估[D]. 天津:天津大学,2014.
- [12] 拜景彬. 基于全生命周期理论的光伏系统能耗分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.
- [13] 李鹞. 中国晶硅太阳能电池板的生命周期评价[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [14] 罗婧雯. PbSe量子点太阳能电池生命周期评价的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [15] 谢明辉,阮久莉,白璐,等. 太阳能级多晶硅生命周期环境影响评价[J]. 环境科学研究,2015,28(2):291-296.
- [16] 罗付香. 废旧晶硅太阳能电池板特性及LCA研究[D]. 广州:广东工业大学,2015.
- [17] 赵娟,黄蓓佳,柴径阳,等. 多晶硅光伏组件生产可持续性评价[J]. 环境科学研究,2016,29(10):1554-1559.
- [18] Zhang J, Gao X, Deng Y, et al. Comparison of life cycle environmental impacts of different perovskite solar cell systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2017,166:9-17.
- [19] 于志强. 冶金法多晶硅及其光伏系统并网发电的生命周期评价研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
- [20] Jia X, Lv F, Li P, et al. Life-cycle assessment of p-type multi-Si back surface field (BSF) solar module in China of 2019[J]. Solar Energy,2020,196:207-216.
- [21] 吴越齐,柯嘉洪,陈大柱,等. 基于LCA的晶硅太阳能电池环境影响评价[J]. 广东化工,2019,46(16):12-14.
- [22] 杨明坤. CIGS薄膜太阳能电池生命周期评价[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [23] 王姿怡. 光伏系统生命周期能效评价及应用规划研究[D]. 济南:山东大学,2023.
- [24] 庄园,温金城,卞与良,等. 晶体硅和钙钛矿光伏组件碳足迹研究[J]. 太阳能学报,2023,44(12):41-46.
- [25] 管振忠,张文馨,王崇杰,等. 校园光伏发电系统LCA分析及在低碳校园中的应用潜力——以山东建筑大学为例[J]. 建筑科学,2024,40(6):47-55,64.
- [26] Kato K, Murata A, Sakuta K. Energy pay-back time and life-cycle CO₂ emission of residential PV power system with silicon PV module[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1998, 6(2): 105-115.
- [27] Schmidt M, Hottenroth H, Schottler M, et al. Life cycle assessment of silicon wafer processing for microelectronic chips and solar cells[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17: 126-144.
- [28] Andersen O, Gilpin G, Andrae A S G. Cradle-to-gate life cycle assessment of the dry etching step in the manufacturing of photovoltaic cells[J]. AIMS Energy, 2014, 2(4): 410-423.
- [29] Khaenson W, Maneewan S, Punlek C. A comparison of the environmental impact of solar power generation using multicrystalline silicon and thin film of amorphous silicon solar cells: case study in Thailand [J]. Journal of Ecological Engineering, 2017, 18(4): 1-14.
- [30] Lunardi M M, Alvarez-Gaitan J P, Bilbao J I, et al. Comparative life cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules[J]. Applied Sciences, 2018, 8(8): 1396.
- [31] Lunardi M M, Needell R D, Bauser H, et al. Life Cycle Assessment of tandem LSC-Si devices[J]. Energy,2019,181:1-10.
- [32] Espinosa N, Serrano-Luján L, Urbina A, et al. Solution and vapour deposited lead perovskite solar cells: Ecotoxicity from a life cycle assessment perspective[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2015,137:303-310.
- [33] Celik I, Song Z, Cimaroli J A, 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.
- [34] Itten R, Stucki M. Highly efficient 3rd generation multi-junction solar cells using silicon heterojunction and perovskite tandem: prospective life cycle environmental impacts[J]. Energies,2017,10(7):841.
- [35] Lunardi M M, Ho-Baillie Y W A, Alvarez-Gaitan P J, et al. A life cycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications,2017,25(8):679-695.

- [36] Alberola-Borràs J, Vidal R, Juárez-Pérez J E, et al. Relative impacts of methylammonium lead triiodide perovskite solar cells based on life cycle assessment[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 179: 169 – 177.
- [37] Guerrero N B C, Martínez W O H, Civit B, et al. Energy performance of perovskite solar cell fabrication in Argentina. A life cycle assessment approach[J]. *Solar Energy*, 2021, 230: 645 – 653.
- [38] Rao H K R, Gemechu E, Thakur U, et al. Life cycle assessment of high-performance monocrystalline titanium dioxide nanorod-based perovskite solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111288.
- [39] Okoroafor T, Maalouf A, Oez S, et al. Life cycle assessment of inkjet printed perovskite solar cells[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 373: 133665.
- [40] Rahim Z, Farhan S M, Alireza A. Environmental and damage assessment of transparent solar cells compared with first and second generations using the LCA approach[J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, 10(12): 4640 – 4661.
- [41] Emma M, Achyuth R, Tanner O, et al. Life cycle cost assessment of material recovery from perovskite solar cells [J]. *MRS Advances*, 2023, 8(6): 317 – 322.
- [42] Chaosukho S, Meeklinhom S, Rodbuntum S, et al. Life cycle assessment of perovskite solar cells with alternative carbon electrode [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 106: 107462.
- [43] Kim J H, Han S G, Jung S H. Managing the life cycle of perovskite solar cells: addressing stability and environmental concerns from utilization to end-of-life [J]. *eScience*, 2024, 4(2): 100243.
- [44] Bhati N, Nazeeruddin K M, Maréchal F. Environmental impacts as the key objectives for perovskite solar cells optimization[J]. *Energy*, 2024, 299: 131492.
- [45] Espinosa N, García-Valverde R, Urbina A, et al. Life cycle assessment of ITO-free flexible polymer solar cells prepared by roll-to-roll coating and printing[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 97: 3 – 13.
- [46] Espinosa N, Garcia-Valverde R, Krebs C F. Life-cycle analysis of product integrated polymer solar cells[J]. *Energy & Environmental Science: EES*, 2011, 4 (5): 1547 – 1557.
- [47] Pallas G, Vijver G M, Peijnenburg M G J W, et al. Ex ante life cycle assessment of GaAs/Si nanowire-based tandem solar cells: a benchmark for industrialization[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, 25 (9): 1767 – 1782.
- [48] Pallas G, Vijver G M, Peijnenburg M G J W, et al. Life cycle assessment of emerging technologies at the lab scale: The case of nanowire-based solar cells[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 24(1): 193 – 204.
- [49] Andler J, Mathur N, Sutherland J, et al. Guiding the environmental design of a novel solar absorber through life cycle assessment by identifying anticipated hot spots[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258 (prepublsh): 120847.
- [50] Resalati S, Okoroafor T, Maalouf A, et al. Life cycle assessment of different chalcogenide thin-film solar cells [J]. *Applied Energy*, 2022, 313: 118888.

Research progress in life cycle evaluation of solar cells

HU Zebo, CHE Shuai^{*}, LIU Yanchao

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: To address the pollution problem in solar cell manufacturing, this paper introduces the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, aiming to comprehensively quantify its environmental impacts. Focusing on the application of LCA in solar cell production, this paper reviews the results of domestic and international LCA studies on various types of solar cells (including polycrystalline silicon, monocrystalline silicon and emerging perovskite cells). These studies not only reveal the environmental costs of solar cell production, but also provide a scientific basis for promoting green manufacturing and achieving sustainable development.

Keywords: LCA; crystal silicon solar cell; perovskite solar cell; energy consumption; environmental effect

