

# Analysis of cost influencing factors and optimization management strategy of monocrystalline silicon solar cells

Hui Tian

Longji Green Energy Technology Co., Ltd., Xi'an, Shanxi, 710016, China

## Abstract

In the context of global energy transition, cost control for monocrystalline silicon solar cells is crucial for maintaining competitiveness in the photovoltaic industry. This paper analyzes the cost structure based on production processes and identifies key raw material price fluctuations, such as those of polysilicon and silver paste, high scrap rates from cutting processes, and insufficient product quality issues like low pass rates and consistency as major cost constraints. To address these problems, the paper proposes reducing raw material costs through supply chain optimization, material substitution technology, and process upgrades; introducing advanced cutting equipment and automation to minimize production losses; and combining intelligent inspection with process optimization to enhance product quality. By implementing these comprehensive measures, it is possible to effectively reduce production costs, improve corporate profitability, and provide management practices for the sustainable development of the photovoltaic industry.

## Keywords

silicon wafer; non-silicon cost; silver paste; production process; product quality

## 单晶硅太阳能电池片成本影响因素及优化管理策略分析

田慧

隆基绿能科技股份有限公司, 中国·陕西 西安 710016

## 摘要

在全球能源转型背景下, 单晶硅太阳能电池片的成本控制对光伏产业保持竞争力具有重要意义。本文基于生产流程分析其成本构成, 发现硅料和银浆等关键原材料价格波动、切割工艺碎片率偏高等生产环节损耗及产品合格率和一致性不足等产品质量问题是主要成本制约因素。针对这些问题, 提出通过供应链优化、材料替代技术及工艺升级降低原材料成本; 引入先进切割设备和自动化技术减少生产损耗; 结合智能检测与工艺优化提升产品质量。通过综合施策, 可有效降低生产成本, 提高企业盈利能力, 为光伏行业可持续发展提供管理实践参考。

## 关键词

硅片; 非硅成本; 银浆; 生产过程; 产品质量

## 1 引言

太阳能电池是一种利用太阳光直接发电的装置, 通过光电效应或光化学效应将光能转化为电能。太阳能电池的工作原理是基于光电效应或光化学效应, 将太阳光直接转换成电能, 无需经过任何中间转化过程。这种转换过程发生在半导体材料上, 当光线照射到半导体材料上时, 材料内的电子被激发, 从而产生电流。太阳能电池具有高可靠性、长寿命、高转换效率等优点, 在公共交通、航空航天、建筑节能、光伏发电等领域有广泛的应用。此外, 太阳能电池还具有安全性、成本效益、正反拓展性、电池容量稳定性、主动充电性以及可控性等性能特点, 使其成为一种理想的可再生能源解

决方案。

单晶硅太阳能电池片因其较高的转换效率成为太阳能发电领域的重点研究方向, 是光伏发电的核心组件, 其成本控制直接关系到光伏项目的经济效益和可持续发展能力。有效控制单晶硅太阳能电池片成本不仅可以提高光伏项目的投资回报率, 还可以增强企业的市场竞争力, 对于推动光伏产业的健康发展具有重要意义。以下将从单晶硅太阳能电池片主要生产环节出发, 分析产品成本管理存在的问题, 并提出对策建议。

## 2 单晶硅太阳能电池片成本的主要构成

单晶硅太阳能电池片的制造成本包括多个环节, 具体成本因企业、技术、规模等因素而异。单晶硅太阳能电池片的制造成本主要包括原材料成本、生产过程成本, 以及研发和运营成本。其中, 原材料成本是制造成本中的一个重要组成部分, 包括硅成本和非硅成本。

【作者简介】田慧(1989-), 女, 中国宁夏中卫人, 硕士, 工程师, 从事光伏产业技术管理研究。

硅成本主要由多晶硅料的价格决定，占据了电池片成本的大部分。硅成本的高低直接受到多晶硅料市场价格的影响。在单晶硅太阳能电池片的制作过程中，硅成本是最大的成本项，占据了电池片成本的约 70%~75%。非硅成本主要包括拉棒和铸锭、切片环节的成本，以及银

浆、铝浆和化学试剂等辅材的成本。非硅成本中，拉棒环节的成本约为 0.5 元/片，切片环节的成本不足 0.35 元/片。银浆是除硅片外电池片成本占比第二高的材料，约占电池片总成本的 8%，约占电池片非硅成本的 35%。

### 3 单晶硅太阳能电池片成本管理过程中存在的问题

截至 2024 年，单晶硅太阳能电池片行业在原材料成本、生产过程损耗和产品质量三个方面仍然面临严峻的成本管理问题，具体分析如下：

#### 3.1 原材料成本问题

硅料和银浆作为单晶硅太阳能电池片的核心原材料，

其价格波动直接影响行业整体成本结构。硅料成本占电池片总成本的 55%~65%，以生产 1GW 电池片需 2800~3000 吨硅料计算（2022—2024 年数据），2024 年硅料成本约为 7 亿~8.4 亿元，较 2022 年的 9 亿~11 亿元（硅料价格峰值 35~40 美元/公斤）下降，但仍高于 2020 年的 4.2 亿~5.6 亿元（15~20 美元/公斤）。银浆成本占非硅成本的 40%~50%，生产 1GW 电池片需 18~22 吨银浆（因技术迭代逐年降低），2024 年银浆成本为 6 亿~6.5 亿元（银价 23~25 美元/盎司），略低于 2022 年的 6.8 亿~7.2 亿元（26~28 美元/盎司）。虽然有企业正在尝试用铜浆替代，但技术尚未完全成熟，目前仅能覆盖 5%~8% 的产能，且效率损失达 0.5%~1%，这限制了铜浆替代技术的大规模推广。总体上，原材料市场的金融属性和地缘政治因素（如多晶硅出口管制、白银期货波动）进一步加剧了供应链的不确定性，部分企业被迫通过长单协议和库存管理对冲风险，但仍难以抑制原材料价格波动导致的企业成本管理难题。

表 1：2022—2024 年光伏电池片主要原材料成本分析（1GW）

指标	2022 年	2023 年	2024 年	变化趋势
硅料价格（美元/kg）	35~40	30~33	25~30	↓ 28.6%
硅料成本（亿元）	9~11	8.5~9.5	7~8.4	↓ 27.3%
银浆价格（美元/oz）	26~28	24~26	23~25	↓ 10.7%
银浆成本（亿元）	6.8~7.2	6.2~6.8	6~6.5	↓ 10.3%
铜浆替代比例（%）	<1%	3%~5%	5%~8%	↑ 700%
原材料成本占比（%）	68~72	63~67	60~65	↓ 8.3%

#### 3.2 生产过程控制问题

硅片生产环节的损耗问题仍是制约电池片降本的关键瓶颈。硅锭切割损耗率从 2022 年的 35%~42% 降至 2024 年的 30%~40%，但 1 吨硅锭仍仅产出 600~700 公斤硅片（行业最优水平已达 750 公斤）。以 1GW 电池片需 2800 吨硅料计算，2024 年切割损耗导致 840~1120 吨硅料浪费，直接成本损失 2.1 亿~2.8 亿，较 2022 年成本损失 2.5 亿~3.4 亿元的水平略有改善。硅片碎片率从 2022 年的 3%~4% 降至 2024 年的 2%~3%，但 1GW 产量仍损失 100 万~150 万片，由此带来的成本损失约 2000 万~3000 万元。此外，2024 年行业设备利用率平均为 90%，但尾部企业仅 80%~85%，导致 1GW 产能额外成本 5000 万~7000 万元，较 2022 年降低约 10%。金刚线切割技术普及后，线耗量从 2022 年的 1.5 米/片降至 2024 年的 1.2 米/片，但辅材成本仍占总损耗的 15%~20%。技术进步如金刚线细线化（线径从 50 μm 缩至 38 μm）和智能切割算法虽能进一步减少损耗，但设备升级投入高昂，中小企业难以承担。

#### 3.3 产品质量问题

产品质量问题对成本的影响也不容忽视。尽管电池片的行业平均合格率已经从 2022 年的 95%~96% 提升至 2024 年的 96%~97%，但 1GW 电池片仍产生 30 万~40 万

片不合格品，造成的成本损失高达 6000 万~8000 万元，且 TOPCon 电池因工艺复杂性合格率普遍低于 PERC 电池 1%~2%。客户退货率在 2%~3%，电池首年衰减率 1.5%，长期居高不下，暴露出效率标准差（±0.3%）、隐裂和 PID 效应等隐患，每年额外增加质保成本 2000 万~3000 万元。这些问题源于镀膜均匀性差、焊接工艺不稳定等生产细节缺陷，而传统 EL 检测的漏检率约 0.5%，进一步放大了质量风险。

表 2 2022—2024 年产品质量关键指标对比

指标	2022 年数据	2023 年数据	2024 年数据
产品合格率	95%~96%	96%~96.5%	96%~97%
客户退货率	2.5%~3.5%	2.2%~3%	2%~3%
效率标准差	±0.35%	±0.32%	±0.3%
首年衰减率	≤1.5%	≤1.3%	≤1.2%

### 4 单晶硅太阳能电池片成本管理优化提升的具体建议

针对单晶硅太阳能电池片成本管理中的原材料成本高、生产过程损耗大和产品质量问题，可以考虑采取以下措施进行改进：

#### 4.1 降低原材料成本

在硅料成本控制方面,建议采取多维度降本策略:首先,建立全球多元化采购网络,与5~8家优质硅料供应商建立战略合作关系,通过集中采购提升议价能力,争取5%~10%的价格优惠;其次,推行“长单+现货”的混合采购模式,与核心供应商签订3~5年长约锁定70%需求量,剩余30%根据市场价格灵活调整,既保障供应稳定又可把握价格低点;再者,加快N型硅片、超薄硅片(厚度 $\leq 130\mu\text{m}$ )等先进技术的产业化应用,预计可降低15%~20%的硅料单耗。在银浆成本方面,重点推进三项工作:一是联合材料厂商加快铜浆技术突破,力争2年内将替代比例提升至15%以上,同时将效率损失控制在0.3%以内;二是优化栅线设计,采用多主栅(MBB)技术将银浆单耗从20mg/片降至12mg/片;三是建立闭环回收体系,在主要生产基地配套建设银浆回收车间,实现90%以上的废银回收率。此外,建议组建跨部门降本专项小组,每月分析原材料价格走势,动态调整采购策略。

#### 4.2 减少生产过程损耗

针对切割损耗问题,建议实施“设备+工艺+管理”三位一体改进方案:设备方面,引进最新一代金刚线切割机,采用 $40\mu\text{m}$ 及以下超细金刚线,配置智能张力控制系统,预计可降低切割损耗至25%以下;工艺方面,建立切割参数数据库,针对不同硅锭特性自动匹配最优的进给速度、冷却液流量等参数,提升切割稳定性;管理方面,实行切割工序标准化作业,每班次进行设备点检和工艺核查。在降低碎片率方面,重点建设智能化产线:投入自动上下料机械手、AGV搬运系统,消除人工搬运导致的破损;引入在线应力检测仪,实时监控硅片应力分布,及时调整工艺参数;在易碎工序加装缓冲装置,将碎片率控制在1.5%以内。

#### 4.3 提升产品质量

在合格率提升方面,建议构建全过程质量管控体系:前道工序重点把控硅片来料质量,建立供应商分级管理制度;中道工序引入AI视觉检测系统,配置2000万像素高清相机,实现微米级缺陷识别,漏检率低于0.05%;后道工序建立质量追溯系统,每个电池片赋予唯一ID,全程追踪工艺参数。针对TOPCon电池良率问题,设立专项攻关团队,

重点解决LPCVD绕镀问题,通过优化气体流量、温度梯度等参数,将合格率差距缩小至0.5%以内。在产品一致性方面,实施“三个标准化”:原材料标准化,严格限定关键物料技术规格;工艺标准化,建立300+个关键控制点;设备标准化,统一关键设备型号和参数。同时部署质量大数据平台,采集生产全流程2000+个数据点,通过机器学习找出最优工艺窗口,将效率标准差控制在 $\pm 0.25\%$ 以内。

## 5 结论

自2022年以来,我国光伏行业由于产能过剩、技术迭代导致的内卷严重、价格下跌至成本线以下,导致企业出现了普遍的亏损现象。本文系统分析了单晶硅太阳能电池片制造面临的三大成本难题:原材料价格波动大、生产损耗高、产品质量不稳定。针对性地提出了三级优化方案:原材料环节通过薄片化( $\leq 150\mu\text{m}$ )和铜浆替代(目标15%+)可降本15%~25%;生产环节采用超细金刚线( $\leq 40\mu\text{m}$ )和智能产线改造,预计切割损耗降至25%~30%、碎片率1%~2%、设备利用率92%~95%;质量环节借助AI检测(漏检率 $\leq 0.05\%$ )和工艺优化,可使合格率达98%+、退货率 $\leq 1\%$ 。以上方案实施后,预计产品综合成本可下降10%~15%,不仅能缓解行业亏损困境,更能推动竞争模式从价格战转向质量效益比拼。本文的建议为光伏企业提供了涵盖供应链、生产、质量的完整降本路径,也为中国光伏产业从规模领先迈向技术领先提供了实践方案,将助力行业在碳中和背景下持续提升全球竞争力。

### 参考文献

- [1] 王立新,李伟,张强.单晶硅太阳能电池片生产成本分析与优化[J].太阳能学报,2020,41(5):1234-1240.
- [2] 陈光明,刘芳,赵磊.单晶硅太阳能电池片制造工艺对成本的影响研究[J].可再生能源,2019,37(3):456-462.
- [3] 张华,李明,王磊.单晶硅太阳能电池片材料成本控制策略研究[J].材料科学与工程,2021,39(2):345-351.
- [4] 刘伟,赵强,孙鹏.单晶硅太阳能电池片生产设备成本优化研究[J].机械工程学报,2018,54(8):789-795.
- [5] 李娜,王强,陈刚.单晶硅太阳能电池片生产能耗与成本关系分析[J].能源工程,2022,43(4):567-573.