

光伏组件制造工厂智能化改造应用研究

杨家鑫

江苏辉伦太阳能科技有限公司, 江苏 南京 210044

[摘要]随着光伏产业技术不断更新, BC (背接触) 电池已经进入大规模量产阶段, 复杂的背面电极排布、超薄硅片给精密制造和良率控制带来了远远超过传统产线的要求。并且面向未来的发展方向即钙钛矿和叠层电池技术也对环境控制、工艺稳定性提出更高要求。本文主要对光伏组件制造工厂的智能化改造进行研究, 主要研究背接触一体化覆膜 (IFC, Integrated Film Covering) 技术, 通过采用 PC、PLC、AI 视觉等各种自动化技术替代人工进行背接触电池片的全自动覆膜互联, 使用专用功能性胶膜一次完成背面正负极栅线绝缘隔离、超细焊带定位压接、电池串互联固定、薄片缓冲保护四个工序的整合, 并可实现与智能生产线对接, 包括自动上下料、EL 检测、自动布串、自动放置外观胶带、自动摆焊带、自动覆膜出串等功能。

[关键词]BC 电池; 钙钛矿技术; 光伏组件; AI 视觉检测; MES 系统

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20038

中图分类号: TK519

文献标识码: A

Research on the Application of Intelligent Transformation in Photovoltaic Module Manufacturing Factories

YANG Jiaxin

Jiangsu Huilun Solar Energy Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210044, China

Abstract: With the continuous updating of photovoltaic industry technology, BC (back contact) cells have entered the stage of large-scale production. The complex arrangement of back electrodes and ultra-thin silicon wafers have brought far more requirements for precision manufacturing and yield control than traditional production lines. And the future development direction, namely perovskite and stacked battery technology, also puts forward higher requirements for environmental control and process stability. This article mainly studies the intelligent transformation of photovoltaic module manufacturing factories, focusing on the Integrated Film Covering (IFC) technology for back contact. By using various automation technologies such as PC, PLC, AI vision, etc. to replace manual labor for fully automatic film covering and interconnection of back contact solar cells, a dedicated functional adhesive film is used to integrate the four processes of back positive and negative electrode grid line insulation isolation, ultra-fine welding tape positioning and crimping, battery string interconnection and fixation, and thin film buffering protection in one go. It can also achieve docking with intelligent production lines, including automatic loading and unloading, EL detection, automatic string laying, automatic placement of appearance tape, automatic swing welding tape, automatic film covering and string output functions.

Keywords: BC battery; perovskite technology; photovoltaic modules; AI visual inspection; MES system

引言

在全球能源转型以及“双碳”目标的驱动之下, 光伏发电已经进入了平价上网的时代, 技术革新成了企业生存的决定因素。目前行业正在向 BC 电池、钙钛矿叠层电池等方向发展。BC 电池量产效率已经超过了 26%, 但是所有的正负电极、叉指细栅都布在硅片背面, PN 交叉电极极易短路, 同时对串焊工艺的对准精度和应力控制要求很高; 同时 BC 主打薄片化硅片 (100 μm 及以下) +0BB 超细焊带, 传统硬焊接很容易造成隐裂、焊带偏移、正负极

漏电。传统的光伏组件制造工厂的焊接设备是按照 PERC/TOPCon 电池的设计来设计的, 红外灯箱 PID 闭环温控或加热接触式焊接方式, 不能满足 BC 覆膜工艺的精密要求, 高良率量产成为行业的最大瓶颈。因此, 围绕 BC 电池以及未来钙钛矿技术的量产需求, 对传统的工厂进行以“设备智能化、产线自动化、工厂数字化”为主要内容的智能化改造, 已经成了光伏智能制造升级的必然趋势。

1 光伏产业技术迭代与智能化改造需求分析

BC 电池的量产需要对智能制造提出全方位的需求。

其主要难点有三点，一是精密对位，焊带与电池背面正负两极金属化图案对准微米级定位精度；二是无损互联，超薄 BC 电池片对热应力、机械应力很敏感，传统高温硬焊接易产生隐裂、碎片；三是绝缘隔离，BC 电池背面正负电极交叉排列，必须保证 PN 电极之间绝对绝缘，防止短路漏电。IFC 一体化覆膜技术用预开孔专用胶膜全部覆盖背面，只留下焊接点位置，从根本上杜绝了手工贴绝缘胶带漏贴、错位漏电的问题。但是传统的光伏工厂存在设备老化、数据孤岛、检测依靠人工等问题，严重阻碍了 BC 技术的产业化进程。以某工厂 6 台串焊机为例，改造前 BC 电池模拟工艺时焊接不良率超过 2.17%，隐裂、焊带偏移等占到 60%以上，归正换型时间长达 1h，不能实现 BC 组件的规模化、低成本制造^[1]。因此，行业急需一次面向 BC 以及未来钙钛矿技术的智能化改造，依靠技术升级把传统产线升级成具备精密制造、自适应控制、全流程追溯能力的新型 BC 智能化工厂。

2 智能化改造总体方案与关键技术

2.1 总体架构：工艺-设备-数据-质控全链条智能升级

改造方案分为设备层、控制层和监控层三层结构来创建。就 BC 电池对微米级精度、IFC 覆膜对低温工艺的要求而言，整个架构又加强了精密执行以及数据闭环的能力。设备层改造后有背接触一体化覆膜高速串连机、串缓存堆栈、BC 摆串机、BC 汇流焊接机、AI 视觉检测单元；控制层用 PLC、伺服驱动器、温控模块等反馈元件，在原基础上增加 EtherCAT 总线实时通信网络，使伺服定位指令达到微秒级响应速度，温度闭环、位置闭环；监控层设 SCADA 系统，对产能数据、工艺关键参数、设备 OEE 数据、单机日志等数据采集参数进行实时记录，并同 MES 系统深入衔接，实现对每串 BC 组件工艺参数和检测图像的全链条追踪^[2]。伺服电机采用 EtherCAT 总线和 PLC 进行 μm 级位置控制，温控模块用 PID 算法实现精准控温，AI 视觉检测结果通过高速以太网直接写入 MES 数据库，所有的数据按照每串组件为单位上传 MES，形成完整的追溯链。

2.2 关键使能技术应用

背接触一体化覆膜 (IFC)。采用预开孔或者预成型专用聚合物皮肤膜，胶膜预设和 BC 背面主栅 Pad 精准匹配的开槽，只露出需要焊接的电极点位，其余区域全覆盖绝缘；低温热压时胶膜熔融填充缝隙，把超细铜焊带牢牢锁死在电极 Pad 上，隔离相邻 PN 电极，互联、绝缘、固定一步成型。该方案把贴绝缘带、布焊带、分步焊接、加固这四道工序合并成一道覆膜，缩短产线节拍，减少设备投

入。柔性胶膜起到缓冲垫的作用，低温工艺没有热冲击， $100\mu\text{m}$ 超薄 BC 硅片的量产破损率大幅度降低。该技术也为以后钙钛矿叠层电池超薄衬底的低应力互联提供工艺基础。

精密对位、覆膜压合技术。全自动设备利用高精度视觉系统把定制胶膜贴合到 BC 电池整片背面，通过和电池电极 Pad 微米级对齐，伺服驱动覆膜压合机构实现精密的位置控制，理论精度可以达到 $1\mu\text{m}$ 。该设计保证了覆膜过程中每根焊带与电极 Pad 的精确重合，没有传统气缸气压不稳定造成的局部受力不均问题。覆膜压合机构配合底部精密平台，对 BC 电池片进行均匀、柔性压合，解决了 BC 超薄片在互联环节的隐裂问题。换不同尺寸的 BC 电池时，操作人员只需要在 HMI 上输入新的参数，归正系统 5 分钟内就可以完成高精度的 repositioning。

低温一体化热压覆膜技术。采用低温辊压、平板压合工艺，主要采取三项改进措施。第一，加热系统为多区独立温控，内部有扰流结构，压合面温度均匀性得到明显改善；第二，压合完毕后配有强制冷却装置，工艺节拍大大缩短；第三，加装温控模块，用 PID 算法控制加热功率，使覆膜温度保持在设定值 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内。低温、高稳定的热场环境可以满足 BC 电池专用胶膜的熔融窗口要求，也给钙钛矿电池低温金属化工艺留出了足够的热预算余量。

电磁吸、柔性归正技术。用电磁吸力代替气缸来去除机械冲击和焊带变形。顶升机构采用单轨道改为双轨道，加固底座。影像归正块为 U 形槽结构，单次切线耗时由原来的 1h 缩短到 5min。该技术与亚像素级视觉算法联合使用，将焊带和 BC 电池背面电极的对位精度控制在 0.02mm 以内，很好地解决了圆丝焊带在窄栅线上滚动偏移的问题。下料串裁切机构全部用阶梯式伸缩滑轨代替了容易断的皮带和临时胶布，彻底消除由于皮带断裂造成的电池串拱起隐裂，使用寿命超过两年。

3 关键生产环节智能化改造实施

3.1 串连工位深度改造

根据 BC 电池背面覆膜互联需要超高对准精度、低温环境等特点，改造团队采用背接触一体化覆膜 (IFC) 技术，用专用功能性胶膜一次完成焊带定位压接和绝缘隔离。全自动设备将定制开孔胶膜贴合到 BC 电池背面，通过和电极 Pad 微米级对齐之后布放超细焊带，低温辊压或者平板压合完成电池串联。该设计有三个飞跃，第一精密对位，胶膜开孔与电极图案精确重合，保证每一根焊带和电极点位准确对接；第二零冲击，低温热压工艺无热冲击、无机械冲击，彻底解决了 BC 超薄片互联环节隐裂问题，实测

隐裂率降低 80%以上；第三快速换型，换产不同尺寸 BC 电池时，操作人员只需要在 HMI 上输入新的参数，H 形槽归正块 5min 内就可以完成高精度 repositioning。主要改造结果如表 1 所示。

表 1 串连工位面向 BC 工艺智能化改造前后关键指标对比

指标项目	改造前(模拟 BC)	改造后(量产 BC)	变化幅度
生产节拍(秒/件)	2.7	2.2	-18.5%
互联不良率(%)	2.17	0.49	-77.4%
隐裂率(%)	0.32	0.06	-81.3%
焊带-电极偏移量(mm)	>0.08	<0.02	-75%
层叠返修率(%)	21.9	13.6	-37.9%
日产能(件)	2600	3000	+15.4%
切线换型时间(分钟)	60	5	-91.7%
覆膜环境温度(℃)	105	75	-28.6%

3.2 AI 视觉检测与温度闭环监控

为了达到 BC 组件互联零缺陷的目的，改造之后创建了 AI 智能检测和工艺闭环的能力。首先将相机固定在独立防振支架上，使用同轴和环形光源组合照明，配合 U 形槽归正块来完成对 BC 电池背面主栅和焊带端部的亚像素级定位，重合度检测误差控制在 0.01mm 以内。部署了基于深度学习的 AI-AOI 系统，可以对焊带偏移、虚焊、焊渣、电池片隐裂等 8 种缺陷进行实时识别，在 2.2 秒/件的节拍下可以发现 80%以上的缺陷，检出率大于 99.5%^[3]。温度控制上采用高精度测温元件以 10 次/秒的频率反馈压合温度，PLC 用 PID 算法调节加热功率，使覆膜温度保持在 BC 专用胶膜最佳熔融窗口内，温差小于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ （原为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，实际产线数据）。所有的检测数据、工艺参数都实时传送到 MES 上，触发 SPC 预警，防止批量不良。

3.3 自动化串裁切与智能物流衔接

下料串裁切机构改造使用伸缩式阶梯滑轨代替原来的易损聚氨酯皮带，消除了由于皮带断裂或者胶布不平造成电池片隐裂的风险。更重要的是，它同新增加的智能物流系统相连接。覆膜完成后经过 AI-AOI 检测合格的电池串，用 AGV 按照 MES 指令运输到下一个敷设工序，实现了从覆膜、检测到物流的全流程自动化，大大降低了人工接触造成的隐裂风险。

3.4 MES 大数据与良率溯源闭环

改造的关键就是创建起以大数据为基础的良率追溯和工艺闭环改善体系。每台覆膜设备、每串 BC 组件的全部工艺参数及 AI 检测结果都会用唯一的 ID 上传到 MES。当某个设备的互联不良率超过动态阈值的时候，MES 会

自动锁定该设备，用历史大数据分析来精准找到问题的原因，并且把维修工单推送到工程师那里。成品分档环节中 MES 把覆膜工序的数据自动关联起来，从而达成对电池片进来的全部流程的精确追踪^[4]。经过不断地积累大数据之后，系统就会自动调节工艺参数，从而达到自感知、自优化的智能闭环效果。

4 改造应用效果评估

4.1 生产效率与设备综合利用率提升

改造之后产线就具备了高效 BC 组件的稳定生产条件。覆膜节拍由原来的 2.7s 降到现在的 2.2s，日产能提高 15.4%。设备综合利用率（OEE）由原来的 85.3%提高到现在的 96.8%。具体分解来看，时间开动率由原来的 91.2%提高到现在的 97.5%，主要是由于伺服驱动代替气缸之后，设备的故障率降低了 45.9%；性能开动率由原来的 93.8%提高到现在的 98.9%，主要是由于覆膜节拍缩短、换型时间减少；合格品率由原来的 97.8%提高到现在的 99.5%，直接反映了 AI 视觉检测和闭环温控带来的良率提高。根据年产 300 天来计算，覆膜工序年产量提高到 12 万件 BC 组件，年收益大。

4.2 产品良率及质量追溯能力大幅增强

互联不良率从模拟 BC 工艺时的 2.17%降低到量产 BC 工艺下的 0.49%，下降了 77.4%，隐裂率下降 80%以上。从不良构成分析可知，传统红外或接触焊接方式下虚焊占 45%、隐裂占 32%、焊带偏移占 18%，采用 IFC 一体化覆膜技术后隐裂降至 8%、焊带偏移降至 12%、虚焊降至 35%、绝缘短路基本消失。AI 视觉检测实现了零缺陷流出，AI-AOI 对 8 类缺陷的综合检出率为 99.7%，漏检率小于 0.3%，层叠返修率由原来的 21.9%下降到现在的 13.6%。采用 MES 大数据追溯后，质量问题定位时间由原来的数天缩短到 2h 以内，每个批次的 BC 组件覆膜工艺参数、检测图像都可以追溯，为 BC 电池规模化、高质量交付提供核心保障。

4.3 单位能耗与物料损耗优化

覆膜工序单位能耗降低 15.6%，由原来的 0.32kWh/件降到 0.27kWh/件，主要原因是伺服电机节能运行、低温工艺防止过冲加热、强制冷却缩短散热时间。IFC 一体化覆膜技术配合 OBB 无主栅设计，可以使用更细的焊带（ $\leq 0.2\text{mm}$ ），取消电池背面粗主栅，银浆耗量降低 20%~35%；同时用低克重专用胶膜代替传统的零散绝缘胶带和点状导电胶，整张膜一体化覆盖使物料成本降低。由于低温覆膜、柔性缓冲的使用，BC 电池在互联过程中碎片率、焊带扭曲降级率大幅降低，电池片日均节省 343 片，按每

片 6.8 元计算, 年节约材料费 84.4 万元; 压合模具更换周期由两周变六个月, 年节省备件费 3.6 万元; 串裁切皮带、胶布全部取消, 年节省 1.2 万元; 焊带扭曲降级每月减少 5 件, 年节约 9.2 万元, 合计年节约材料费用超过 90 万元。

4.4 工厂数字化管理水平跃升

改造后的工厂初步具备了数字孪生、智能化管理。管理人员可以利用 SCADA 系统对生产线的运行状况、工艺参数和质量趋向进行监视。MES 系统按照各个覆膜机实时表现及订单需求来决定 BC 组件优先使用哪个最优设备进行生产, 从而达到精益化排产的目的。所有的覆膜数据都会与组件唯一的 ID 绑定起来上传, 在 EL 测试以及功率分档环节里自动关联起来, 从而达成对电池片从进厂到成品组件的精确追踪^[5]。更重要的是此次改造形成了一支既有 BC 工艺又有 AI 算法、MES 系统以及自动化集成技术的人才队伍, 成功地冲破了经验壁垒。过去只有经验丰富的师傅才能对压合的水平度进行调试, 而现在任何一个维修工都可以按照 MES 推送的标准参数恢复设备精度, 为企业未来向全钙钛矿叠层电池智能制造工厂升级打下了坚实的技术和人才基础。

5 结束语

本文以光伏产业以 BC 电池量产化、钙钛矿技术发展等迫切需要为出发点, 对传统组件制造工厂串连工序进行全链条智能化改造研究。经过“工艺-设备-数据-质控”四位一体的升级, 把背接触一体化覆膜 (IFC)、AI 视觉、MES 大数据、自动化物流等核心技术有机地融合在一起, 把传统的产线改造成了可以稳定生产高效 BC 组件的新型智能化工厂。研究表明, 该种改造路径不但可以将互联

不良率降低 77%、产能提高 15%, 而且可以创建出微米级精密制造能力以及全流程质量追溯体系, 很好地满足了 BC 电池对于智能制造的刚性要求, 也为以后钙钛矿技术的导入留出了升级的空间。该模式的价值就在于具有很强的可复制性以及前瞻性, 给行业在技术快速更替时期, 用最少的改造费用来达成产线“利旧、更新、协作”智能化升级赋予了范例。下一步就是对基于生成式 AI 的覆膜工艺参数自优化模型进行研究, 对钙钛硅叠层电池进行超低温、高精度互联技术的研究, 最后建成一个全面的数据驱动、自感知、自决策的下一代光伏智能制造灯塔工厂。

[参考文献]

- [1]麻超,刘超,张向前,等.太阳电池红外热风焊接热场温度稳定性研究[J].太阳能学报,2024,45(11):178-182.
 - [2]郎新星,段云森.智能制造在太阳能硅片制造中的探究与应用[J].物联网技术,2024,14(6):134-138.
 - [3]蔡燕,姚磊.新能源柔性焊接主线智慧控制系统的开发及应用[J].装备制造技术,2023(8):232-235.
 - [4]高剑,郭倩,卫东,等.基于等效电路模型参数计算的光伏组件隐裂故障诊断方法[J].太阳能学报,2024,45(5):481-489.
 - [5]靳帅龙,杜羽晨,陈红勋,等.基于 CFD 和数据建模的离心风机叶轮故障诊断方法研究[J].水动力学研究与进展 A 辑,2026,41(1):1-9.
- 作者简介: 杨家鑫 (1988—), 男, 汉族, 江苏南京人, 机械制造中级工程师, 本科, 华东理工大学/行政管理, 光伏组件制造产线非标设备改造、工艺配套技改、老旧设备自动化技改。现从事光伏制造设备技术工作。