

光伏组件自动焊接设备效率优化研究

杨家鑫

江苏辉伦太阳能科技有限公司, 江苏 南京 210044

[摘要]伴随着光伏行业的持续降本增效,硅片薄片化、主栅细线化和焊带微细化已经成为主流的发展方向,但是随之而来的焊接碎片、虚焊、过焊等问题也极大地影响了自动焊接设备的综合效率。文中以某组件制造工厂的焊接工序为研究对象,对影响焊接节拍和质量的关键瓶颈进行了系统的分析,并提出了一个整体式伺服焊接灯箱、动态温控系统、电磁吸压网机构、下料传输优化等一系列的改进措施。重点论述了运动控制和热管理的协同优化方法,用实际产线验证了改进的效果。焊接节拍由原来的 2.7s 缩短到现在的 2.2s,焊接不良率由原来的 2.17%降低到现在的 0.49%,层叠返修率下降了 30%,设备稼动率提高到了 98.5%以上。研究给光伏组件焊接设备精细化控制、效率提高提供可以量化的技术途径。

[关键词]光伏组件;自动焊接;伺服控制;热管理;效率优化

DOI: 10.33142/aem.v8i6.20109

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Research on Efficiency Optimization of Automatic Welding Equipment for Photovoltaic Modules

YANG Jiaxin

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

Abstract: With the continuous cost reduction and efficiency improvement of the photovoltaic industry, silicon wafer thinning, main gate thinning, and solder strip refinement have become mainstream development directions. However, the accompanying problems such as welding fragments, virtual welding, and over welding also greatly affect the comprehensive efficiency of automatic welding equipment. The article takes the welding process of a certain component manufacturing factory as the research object, systematically analyzes the key bottlenecks that affect the welding rhythm and quality, and proposes a series of improvement measures such as an integrated servo welding light box, dynamic temperature control system, electromagnetic suction pressure network mechanism, and material feeding and transportation optimization. The collaborative optimization method of motion control and thermal management was emphasized, and the improvement effect was verified with actual production lines. The welding cycle has been shortened from 2.7 seconds to 2.2 seconds, the welding defect rate has decreased from 2.17% to 0.49%, the stacking repair rate has decreased by 30%, and the equipment utilization rate has increased to over 98.5%. Research provides quantifiable technical approaches for fine control and efficiency improvement of photovoltaic module welding equipment.

Keywords: photovoltaic modules; automatic welding; servo control; thermal management; efficiency optimization

光伏组件制造中串焊工序是把电池片和焊带用高温加压连接成串的重要工序,串焊工序的质量和效率影响着组件的电性能、可靠性和制造成本。近些年来,为了减少硅料消耗和电池片成本,电池片厚度由 0.26mm 降至 0.16mm,主栅线宽度减小到 0.08mm,焊带由 1.6mm 扁平带变成 0.28mm 圆丝。这些变化使焊接工艺窗口急剧收窄,原来的依靠气缸驱动的分体式焊接灯箱存在压针冲击大、温度场不均、光强分布不固定等问题,造成隐裂、虚焊、过焊等缺陷率居高不下,并且切线调试时间长达数小

时^[1]。目前的研究大多集中在焊接材料匹配或者单个参数的优化上,并没有对焊接设备的机械结构、运动控制以及热管理系统之间的相互影响进行系统的分析。

1 自动焊接效率构成与瓶颈分析

自动焊接设备的综合效率是由节拍时间、良品率、设备稼动率这三个方面共同决定的。节拍时间包括电池片上料定位、焊带放置、焊接压紧、加热焊接、冷却抬升和串裁切输出等子工序^[2]。焊接加热和冷却阶段所占的总节拍时间大于 60%,是提高产能的主要途径。

瓶颈分析结果为原分体式焊接灯箱存在的问题有三。第一,气缸驱动的压针机构冲击力大、不能精确控制。压针下降速度和压力的调节依靠人工反复调节,需要两个人一起花费几十分钟的时间,压针长度只有 5cm,安装后容易倾斜,造成电池片局部受压隐裂。第二,灯箱散热性能不好。原灯箱顶部只装有两台散热风扇,焊接时热量向上发散,环境温度大于 105℃,使薄电池片背面银浆提前固化或者过烧,灯箱外区域的焊带因为漏光提前化锡造成虚焊。第三,焊接灯管位置固定,不能根据焊带和主栅实际对位情况调节光强分布,漏光区和阴影区同时存在,焊接一致性差。

另外下料传输环节的皮带容易断裂、串裁切机构移动时胶布褶皱造成焊带撞击,使碎片风险增大。设备切线时需要更换多种规格的压网和归正块,一台焊接机就要换上 56 块压网,而更换和调试耗时要达到一个小时以上,造成多品种生产的设备利用率大大降低。

2 焊接工艺参数优化

2.1 工艺参数对焊接节拍的影响规律

焊接节拍主要是由加热功率、焊接压力、保压时间和冷却速度这四个因素决定的。加热功率决定着焊带表面锡层熔化的速度,但是功率过高会造成电池片温度上升过快产生热应力。焊接压力会影响焊带和主栅之间的接触热阻,压力不够会导致热传导效率低,需要增加焊接时间;压力过大会增大隐裂的风险。保压时间要保证锡层充分润湿、形成金属间化合物,但是保压时间太长会影响节拍^[3]。冷却速率影响焊点凝固质量,在自然冷却下需要将温度降低到锡层熔点以下才能提起压针。

通过原设备参数扫描得知,当焊接时间为 2.7s 时,可焊性合格率为 97.5%,但是进一步缩短焊接时间会造成虚焊率超过 5%。核心矛盾为灯箱环境温度过高、波动大,导致实际焊接温度场与设定值出现较大偏差,工艺窗口被人为地缩小到非常保守的范围之内。

2.2 基于多目标协同的工艺参数寻优

为了克服以上问题,使用了动态温控的方法。在灯箱内加装蜂窝扰流板、四个散热风扇、每个灯管基座上安装压缩空气吹气孔,使环境温度不超过 75℃。同时加装温控模块、SSR 固态继电器和电流互感器来达到焊接功率闭环调节的目的。改造前后温度差由原来的 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 降到现在的 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

在此基础上重新标定工艺参数,焊接功率减小 8%,焊接时间由原来的 2.7s 缩短到现在的 2.2s,压针压力由气缸驱动的不可调冲击力改为伺服驱动的可编程压力曲线,

初始接触阶段使用 0.5N 预压力使焊带和主栅紧密接触,然后在 0.3s 内升到 2.5N 焊接压力,最后 0.2s 线性卸载。该压力曲线既能保证热传导效率,又不会造成瞬时冲击引起的隐裂。

3 运动控制与传输系统优化

3.1 高速焊接轨迹规划与平滑控制

原设备使用气缸驱动压针框机构,压针从下方抬起接触电池片,动作行程短、速度无法控制。气缸启动时加速度峰值为 1.5g,压针接触瞬间产生的冲击能量可以造成 0.16mm 厚的电池片出现微裂纹^[4]。改进后使用伺服电机和丝杆轨道驱动灯箱整体升降,压针固定在灯箱内部,从上往下压紧电池片。伺服电机加速度曲线为 S 型加减速,最大加速度不大于 0.3g,接触速度小于 0.5mm/s。

控制精度提高得更多。气缸控制的压针高度调节最小分辨率是 0.1mm,由于压针框水平度无法保证,所以各压针压力差可达 30%以上。伺服系统编码器分辨率为 1 μm ,配合压力传感器反馈可以实现各个压针的独立压力闭环控制。调试时间由原来的两人配合 30min 以上缩短为单人 1min 内完成。

3.2 多轴同步驱动与振动抑制

焊接机由上料归正、焊带牵引、灯箱升降、压针加压、串裁切等几个运动轴组成。原设备各个轴独立控制,时序配合存在等待累积。优化之后使用了主从同步控制策略,把灯箱升降轴作为主轴,压针加压轴作为从轴,二者用电子凸轮耦合,消除了气缸动作的等待时间。实测结果表明,灯箱下降到焊接低位和压针接触电池片的时间差从原来的 0.3s 缩短到现在的 0.05s。

振动抑制上,原气缸回程时由于行程长、缓冲器容易磨损,造成末端有较大的振动,振幅为 0.2mm,对下一个循环的定位精度造成影响。伺服电机驱动之后,通过设置位置环增益和速度前馈,把到位后的残余振动控制在 0.02mm 以内,稳定时间由原来的 0.2s 缩短到现在的 0.05s。

3.3 工件传输定位的节拍提升

传输系统瓶颈在下料串裁切环节。原机构用平皮带输送焊接好的电池串,皮带受热容易拉伸变形,运行 2000h 后断裂频发。临时粘贴的胶布在串裁切机构移动时产生褶皱,翘起的胶布边缘碰到电池串造成碎片^[5]。改进方案用阶梯式滑轨、丝杆伸缩结构代替皮带,电池串固定在轨道上滑动,解决了皮带断裂、胶布褶皱的问题。同时把串裁切移动和下料传送两个动作由顺序执行改为并行执行,节省节拍 0.2s。

上料归正环节原来的影像平台需要拆卸之后再进

气缸归正块的调整，每次更换版型耗时 1h。设计出全兼容 U 形槽归正块，在平台上直接调整位置，换型时间由原来的 10min 降到 5min。该归正块可以适用 156mm 到 210mm 各种规格的电池片，没有出现任何一种规格配件更换的要求。

3.4 视觉纠偏实时性优化

焊带和主栅的对位精度影响虚焊率。圆丝焊带直径为 0.28mm，主栅线宽度为 0.08mm，允许的偏移量不能大于 0.05mm。原视觉系统拍摄焊带位置之后经过图像处理、坐标计算、伺服补偿这三个环节，总延时约为 120ms，并且由于焊带在传输过程中会滚动，因此开环控制的纠偏成功率只有 85%。

采用基于模板匹配的快速定位算法，把图像处理的时间由原来的 80ms 缩短到现在的 35ms。同时采用闭环纠偏，视觉系统检测到焊带偏移之后，焊带牵引伺服电机在牵引过程中实时调节横移位置，使焊带在到达电池片上方的时候已经校正到位。实际测试结果表明，纠偏延时由原来的 30ms 降低到现在的 45ms，对位成功率由原来的 94.8% 提高到现在的 96.5%。

4 优化集成与效率验证

4.1 系统优化方案集成

以上改进措施在一台焊接机上进行集成。硬件上拆除原来的气缸驱动的分体式灯箱和压针框，安装一体式伺服升降灯箱，灯箱长度增加 30%，可以装下四个散热风扇和蜂窝扰流板，灯管安装基座加装吹气孔和轨道调节机构。压针更换成 18cm 长的钨钢头压针，从灯箱顶部安装固定。电磁吸压网机构代替原气缸顶升机构，用于焊接前将焊带预压在电池片上。下料端拆掉平皮带，安装阶梯式丝杆滑轨。

控制软件上编写伺服电机 S 型速度曲线和电子凸轮耦合程序，设置温控 PID 参数、功率自调节逻辑以及视觉纠偏闭环算法。所有的改进模块由 PLC 统一调度，原

有人机操作界面保留，但是增加了压针压力曲线设置、温度监控曲线和故障自诊断显示的功能。

4.2 试验平台与测试方法

试验在某制造工厂前道焊接车间进行，选择三台型号相同的焊接机，其中一台做全部改进措施（优化组），一台只做工艺参数优化（参数组），一台保持原状（对照组）。每组连续工作 15 个生产日，每天统计产量、焊接不良率、层叠返修率、设备故障停机时间^[6]。环境温度控制在 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，电池片厚度 0.16mm，焊带为 0.28mm 圆锡铜带。焊接质量用 EL 检测仪检查隐裂和虚焊，用可焊性测试仪测量焊点剥离力，每个样本取 50 串做破坏性试验。

4.3 焊接效率对比分析

从节拍上来说，对照组的 2.7s 是由气缸的动作顺序和冷却等待所决定的。参数组改变温控、压力曲线，把焊接时间缩短到 2.35s，但是气缸冲击造成的隐裂率仍然较高。优化组在伺服控制以及并行动作的支持下，可以达到 2.2s 的焊接时间，并且焊接时间波动不大于 $\pm 0.05\text{s}$ 。日产能由原来的 2600 件提高到现在的 3000 件，焊接产能提高 15%。

不良率上对照组焊接不良率是 2.17%，虚焊率为 1.2%，隐裂率为 0.7%，过焊率为 0.27%。由于温度场的改善，过焊率由原来的 0.2% 下降到 0.1%，但是隐裂率仍然达到了 0.55%。优化组用伺服软着陆和压针压力闭环来控制隐裂率降到 0.15%，虚焊率降到 0.25%。层叠返修率由原来的 21.9% 下降到现在的 13.6%，下降幅度达到 37.9%，这是因为隐裂电池片在层压之后才会暴露失效，所以返修率的改善幅度比焊接不良率的直接测量值要小一些。

设备使用方面，在 15 日测试中只出现过一次由于供料异常造成的短停，气缸相关故障发生率为 0，稼动率从原来的 94.2% 提高到现在的 98.5%。切线换型时间由原来的 65min 缩短到现在的 10min，归正块调节 5min、压网更换 3min、参数调用 2min。

表 1 焊接设备优化前后关键指标对比

指标	对照组	参数组	优化组	变化率
焊接节拍 (s)	2.70	2.35	2.20	-18.5%
日产能 (件)	2600	2850	3000	+15.4%
焊接不良率 (%)	2.17	0.92	0.49	-77.4%
层叠返修率 (%)	21.9	16.8	13.6	-37.9%
设备稼动率 (%)	94.2	96.8	98.5	+4.6%
压针调试时间 (min)	30	8	1	-96.7%
切线换型时间 (min)	65	25	10	-84.6%

4.4 焊点质量一致性评估

对优化组生产的电池串做剥离力测试,焊点平均剥离力为 2.8N,标准差为 0.21N;对照组平均剥离力为 2.3N,标准差为 0.45N。优化组剥离力一致性明显提高,变异系数由原来的 19.6%降到现在的 7.5%^[7]。EL 检测结果表明改进组每串隐裂纹数平均为 0.3 条,对照组为 1.8 条。焊接断面金相观察结果表明,优化组锡层和主栅银浆金属间化合物层厚度均匀,没有局部未熔合或者过烧空洞。

根据经济效益测算可知,焊接不良率降低 77%可以使得电池片焊损减少 0.2%,每天少掉电池片 343 片,一年少掉 84.4 万元。而且产能提升所导致的年度增加收益大概有 480 万元。两项合计年增加额大于 560 万元,单台设备改造的材料成本为 8 万元(含伺服电机、灯箱加工、散热风扇、温控模块、压针等),投资回收期小于一个月。

5 结束语

光伏组件焊接设备效率的提高不能只依靠一个参数的改变,而应该从机械结构、运动控制、热管理、视觉定位等各个方面进行系统的改善。本文将气缸驱动的分体式灯箱改为伺服控制的一体式升降灯箱,并结合动态温控和压力闭环,很好地解决了薄片化趋势下隐裂和虚焊的问题。经过改进之后的焊接节拍由原来的 2.7s 缩短到现在的 2.2s,焊接不良率降低到 0.49%,设备稼动率提高到 98.5%。从研究结果可以看出,伺服化和热管理联合使用可以克服目前焊接工艺的瓶颈。后续工作会集中于焊接过程的数字化和智能化,创建焊接质量同工艺参数的联系模型,依靠机器学习达成自适应参数调节,开展设备状态预测性保养。在工厂现有的 MES 系统基础上,使焊接机同上下游设备

进行互联,利用大数据分析不断改善焊接工艺窗口,最后达到无人化智能焊接车间的目的。

[参考文献]

- [1]麻超,刘超,张向前,等.太阳能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]蒋宝,徐冬至,黄瑞生,等.基于视觉传感的焊接机器人焊缝识别跟踪技术研究现状[J].金属加工(热加工),2022(1):10-17.
 - [3]黄世恒,梁世民,屠锋,等.机器视觉技术在新能源电池线路板焊接中的应用方法[J].制造业自动化,2022,44(3):171-175.
 - [4]张永林,成会朝,杨海峰,等.800MPa 级光伏支架用钢冲击韧性影响规律及焊接性分析[J].焊接学报,2025,46(7):138-144.
 - [5]徐心刚.基于红外热成像技术的光伏发电系统组件故障诊断与维护策略研究[J].中国战略新兴产业,2026(12):46-48.
 - [6]张东杨.钢网架上部网架弦杆和腹杆节点连接方案合理化建议——烟台招远 400MW 海上光伏项目实例[J].中国战略新兴产业,2025(32):85-87.
 - [7]陆青涛.地脚螺栓埋设专用装置设计制作及在山地光伏支架基础施工中的应用[J].红水河,2025,44(1):43-46.
- 作者简介:杨家鑫(1988—),男,汉族,江苏省南京市高新技术开发区人,机械制造中级工程师,本科,华东理工大学行政管理专业毕业,研究方向为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管理工作担任技术经理。