

太阳能组件自动焊接质量的优化研究

马玉英¹ 陈建国^{2,3} 肖君彦⁴ 任现坤²

1. 山东工程职业技术大学 山东 济南 250200

2. 山东力诺光伏高科技有限公司 山东 济南 250103

3. 山东力诺阳光电力科技有限公司 山东 济南 250103

4. 山东省产品质量检验研究院 山东 济南 250102

摘要: 随着全球对清洁能源需求的迅猛增长, 太阳能作为一种可持续、无污染的能源形式, 其产业规模不断扩大。太阳能组件作为光伏发电系统的核心部件, 自动焊接质量直接关乎组件的性能、可靠性及使用寿命。本文深入剖析太阳能组件自动焊接过程中的质量影响因素, 通过详细阐述优化焊接设备、精准调控工艺参数、合理选用焊料与助焊剂、严格筛选电池片及强化环境管理等策略, 结合实际案例分析优化措施的实施效果, 旨在为提升太阳能组件自动焊接质量、推动太阳能产业高效发展提供坚实的理论支撑与实践指导。

关键词: 太阳能组件; 自动焊接; 质量优化; 清洁能源

引言: 在应对全球气候变化、实现能源转型的大背景下, 太阳能光伏发电凭借其清洁、可再生、分布广泛等优势, 成为能源领域的研究热点与发展重点。太阳能组件作为将太阳光能转化为电能的关键载体, 其制造工艺的优劣, 尤其是自动焊接质量, 对组件的光电转换效率、功率输出稳定性以及长期耐久性起着决定性作用。近年来, 随着太阳能产业的高速发展, 对组件质量和生产效率提出了更高要求, 深入探究太阳能组件自动焊接质量的优化路径, 不仅有助于提升单个组件的性能, 更是保障整个光伏发电系统可靠运行、降低度电成本的关键举措, 具有极其重要的现实意义。

1 太阳能组件自动焊接质量的影响因素

1.1 焊接设备精度

1.1.1 机械结构稳定性。自动焊接设备的机械臂、工作台等部件在长期高强度作业下, 若结构设计不合理或材料强度不足, 容易出现磨损、变形, 导致焊接头定位不准确, 焊点位置偏差增大。例如, 频繁的往复运动可能使机械臂关节处的连接件松动, 造成焊接路径偏离预设轨迹, 使相邻电池片间的焊点无法精准对齐, 影响电流传输的连续性, 降低组件功率输出。

1.1.2 焊接参数控制系统误差。设备内置的焊接参数

基金项目: 山东省高等学校智慧城市“时空物联网应用”新技术研发中心、2023年度济南市市校融合战略发展工程项目(项目编号: JNSX2023108);

2021年度山东工程职业技术大学校内科研基金立项项目“晶体硅太阳能电池视觉检测系统开发”(项目编号SDGCZ2101)。

控制系统负责精确调控焊接电流、电压、时间等关键参数。若该系统存在传感器精度低、算法不完善等问题, 会造成实际输出参数与设定值不符。如焊接电流过大或过小, 可能分别导致焊料过度熔化飞溅或焊接不牢, 引发虚焊、脱焊等缺陷, 严重威胁组件电气连接的可靠性^[1]。

1.2 焊接工艺参数

1.2.1 焊接温度。焊接温度是影响焊料熔化与凝固过程的核心因素。温度过高, 焊料过度流淌, 不仅浪费材料, 还可能侵蚀电池片表面的电极材料, 降低电池片转换效率; 温度过低, 焊料不能充分熔化, 无法形成良好的金属间结合, 导致焊点强度不足, 在后续组件封装、运输或使用过程中, 焊点易开裂, 使组件失效。

1.2.2 焊接时间。焊接时间与焊接温度相互关联, 共同决定焊料的熔化状态及焊点成型质量。时间过短, 焊料来不及均匀铺展, 易形成虚焊; 时间过长, 除增加生产成本外, 还会使电池片长时间受热, 产生热应力, 可能引发电池片隐裂, 降低组件机械性能与电学性能。

1.2.3 焊接压力。适当的焊接压力有助于焊料在电极表面均匀分布, 排出焊接界面的空气与杂质, 形成致密焊点。压力过大, 可能压碎电池片脆弱部位, 如硅片边缘或电极涂层; 压力过小, 则无法保证焊料与电极充分接触, 同样造成虚焊隐患, 影响组件长期稳定性。

1.3 焊料与助焊剂特性

1.3.1 焊料成分与熔点。不同成分的焊料具有各异的熔点、流动性及机械性能。含铅焊料熔点相对较低、流动性好, 但因环保问题逐渐受限; 无铅焊料虽环保但熔点较高, 对焊接工艺要求更为严苛。若选用的焊料熔点

与焊接设备、工艺参数不匹配,将难以实现优质焊接效果,如在常规焊接温度下,高熔点无铅焊料无法充分熔化,无法保障焊点质量。

1.3.2 助焊剂活性与残留物。助焊剂在焊接过程中起到去除金属表面氧化膜、降低焊料表面张力、促进焊料润湿铺展的作用。活性过强的助焊剂虽能有效清除氧化膜,但焊接后残留腐蚀性物质,可能侵蚀电池片与焊点,缩短组件寿命;活性不足则无法彻底清洁焊接界面,阻碍焊料与电极良好结合,增加虚焊风险^[2]。

1.4 电池片质量

1.4.1 电极完整性。电池片电极的质量是确保其性能稳定的关键。电极的厚度、平整度以及附着力等特性,都与焊接质量息息相关。如果电极的厚度不均匀,那么在焊接过程中,较薄的部位容易过热并熔化,而较厚的部位则难以被焊料充分浸润,从而影响焊接的牢固性和导电性。电极表面的平整度同样重要,不平整的电极表面会导致焊料分布不均,进而形成局部虚焊,降低焊接的可靠性。此外,电极的附着力也是关键因素之一,如果附着力差,焊接过程中可能会出现电极脱落的现象,这将直接导致组件断路,使电池片完全丧失发电功能。

1.4.2 硅片缺陷。硅片作为电池片的核心组成部分,其质量直接影响到电池片的整体性能。硅片内部可能存在的裂纹、杂质以及晶格缺陷等问题,都会在焊接过程中受到热应力的影响而进一步恶化。例如,硅片内部的隐裂在焊接后可能会扩展为明显的裂纹,这不仅会降低电池片的光电转换效率,甚至可能使电池片在应力作用下破碎,从而大幅提高组件的废品率。因此,在电池片生产过程中,必须严格控制硅片的质量,确保其内部无缺陷,以提高电池片的整体性能和可靠性。

1.5 焊接环境控制

1.5.1 温度与湿度。过高的环境温度会加速焊料氧化,降低其活性,同时影响焊接设备的电子元件性能,导致参数漂移;湿度过大,水分易在电池片表面凝结,与助焊剂反应生成腐蚀性物质,侵蚀焊点与电池片,且在焊接高温下,水汽化膨胀可能引发焊点气孔,削弱焊点强度。

1.5.2 灰尘与杂质。焊接车间空气中悬浮的灰尘、金属碎屑等杂质,一旦附着在电池片或焊接部位,会夹杂在焊料与电极之间,阻碍良好的金属间结合,形成虚焊、夹杂等缺陷,严重影响组件质量。

2 太阳能组件自动焊接质量的优化策略

2.1 优化焊接设备

2.1.1 提升机械结构可靠性。选用高强度、耐磨蚀的

材料制造焊接设备的关键部件,如采用航空铝合金制造机械臂,增强其刚性与稳定性;优化机械结构设计,增加关键连接部位的紧固措施,定期进行设备精度校准,利用高精度激光测量仪检测焊接头位置偏差,及时调整机械系统,确保焊点定位精度控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内,保障焊接轨迹的精准性。

2.1.2 升级焊接参数控制系统。引入高精度传感器,如采用分辨率达 0.1A 的电流传感器、 0.1V 的电压传感器,实时精确采集焊接参数;结合先进的智能控制算法,如模糊PID控制算法,依据实时参数反馈动态调整输出,将焊接电流、电压的控制精度分别提升至 $\pm 1\text{A}$ 、 $\pm 0.5\text{V}$,确保实际焊接参数与设定值高度吻合,实现精准焊接控制^[3]。

2.2 精准调控焊接工艺参数

2.2.1 建立焊接工艺参数数据库。收集不同型号电池片、焊料、助焊剂以及焊接设备组合下的最佳焊接工艺参数,通过大量实验测试与实际生产数据积累,构建涵盖焊接温度、时间、压力等参数的数据库。利用数据分析软件,如SPSS,对数据进行深度挖掘,建立参数间的关联模型,为不同生产条件下的焊接工艺参数优化提供数据支撑。

2.2.2 实时监测与自适应调整。在焊接过程中,安装温度、压力等多传感器在线监测系统,实时采集焊点处的实际焊接参数。当监测到参数偏离预设范围时,控制系统自动触发自适应调整机制,依据预先设定的调整策略,如采用基于神经网络的预测控制算法,动态优化后续焊点的焊接参数,确保整个焊接过程始终处于最佳状态,有效降低虚焊、过焊等缺陷率。

2.3 合理选用焊料与助焊剂

2.3.1 适配焊料选择。综合考虑环保要求、焊接工艺兼容性与组件性能需求,筛选合适的焊料。对于追求高效率、高可靠性的高端太阳能组件,优先选用低熔点、高浸润性的新型无铅焊料,如Sn-Ag-Cu系合金,并根据焊料特性优化焊接温度、时间等参数,确保焊料在焊接过程中充分熔化、均匀铺展,形成高质量焊点,同时满足RoHS等环保法规要求。

2.3.2 优化助焊剂配方。研发定制化助焊剂,依据电池片材料、焊料成分及焊接工艺特点,精确调配助焊剂活性成分。在保证有效去除氧化膜的前提下,降低助焊剂腐蚀性,减少残留物。例如,添加适量缓蚀剂,抑制焊接后残留物对电池片的腐蚀;采用高沸点溶剂,减少焊接过程中的挥发损失,确保助焊剂在整个焊接周期内持续发挥作用,提高焊点质量与组件稳定性。

2.4 严格筛选电池片

2.4.1 强化入厂检测。建立严格的电池片入厂检验标准与流程,采用高精度光学检测设备、电性能测试仪器,对电池片的电极完整性、硅片质量进行全面检测。如利用X射线衍射仪检测硅片内部晶格缺陷,通过原子力显微镜测量电极表面粗糙度,严格剔除电极厚度偏差超过 $\pm 5\mu\text{m}$ 、硅片存在裂纹或杂质浓度超标的电池片,从源头上保障焊接原材料质量^[4]。

2.4.2 电池片预处理优化。在焊接前,对电池片进行适当预处理,针对电极表面轻微氧化问题,采用温和的化学清洗方法,如使用低浓度有机酸溶液浸泡,去除氧化层,同时避免对电极材料造成损伤;对于电极平整度不足的电池片,通过机械研磨或抛光进行修复,确保电极表面粗糙度Ra控制在0.1-0.3 μm 范围内,为高质量焊接创造良好条件。

2.5 强化焊接环境管理

2.5.1 环境温湿度调控。在焊接车间安装精密空调系统,将环境温度控制在22-25 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度维持在40%-60%。空调系统配备空气净化功能,过滤空气中的灰尘、水汽,同时利用除湿机在高湿度天气下进一步降低湿度,减少温湿度对焊料、电池片及焊接设备的不利影响,保障焊接质量稳定性。

2.5.2 洁净车间建设。打造洁净焊接车间,采用无尘净化技术,通过空气过滤器、风淋室等设备,将车间内空气尘埃粒子数控制在每立方米不超过10万颗,有效降低灰尘、杂质对焊接过程的干扰。定期对车间进行清洁维护,确保地面、设备表面无积尘,为太阳能组件自动焊接营造优良环境^[5]。

3 实际案例分析

3.1 案例一:某大型太阳能组件制造企业优化实践

某知名太阳能组件生产商,原自动焊接工艺废品率高达5%,主要问题包括虚焊、焊点外观不良以及部分电池片因焊接热应力受损。通过实施上述优化策略:对焊接设备进行全面升级,更换高精度机械臂与先进参数控制系统,使焊点定位精度提升至 $\pm 0.08\text{mm}$,焊接参数控制精度显著提高;依据积累的数据优化焊接工艺参数,建立实时监测与自适应调整机制,虚焊率降低70%;选用适

配的无铅焊料与定制助焊剂,减少残留物腐蚀;加强电池片入厂检测与预处理,废品率降低至1.5%以下。经优化后,组件光电转换效率平均提升0.8%,功率输出稳定性增强,产品竞争力大幅提升,在市场上赢得良好口碑。

3.2 案例二:新兴太阳能企业的质量提升之路

一家初创太阳能组件企业,在初期生产中面临焊接质量不稳定、组件成品率低等困境。借鉴行业先进经验,该企业从设备优化、工艺改进、原材料管控到环境建设多管齐下:引入高精度焊接设备,定期校准机械结构;与科研机构合作,精准调控焊接温度、时间与压力,降低热应力对电池片的影响;严格筛选焊料与助焊剂供应商,确保原材料质量;打造恒温恒湿洁净车间,有效隔绝灰尘杂质。经过6个月的持续改进,组件焊接质量显著提升,成品率从最初的80%攀升至95%,迅速打开市场,为企业后续发展奠定坚实基础。

结论:太阳能组件自动焊接质量的优化是一个系统工程,涉及焊接设备、工艺参数、原材料、电池片以及环境等诸多要素。通过深入剖析影响因素,针对性地采取优化焊接设备、精准调控工艺参数、合理选用焊料与助焊剂、严格筛选电池片及强化环境管理等策略,结合实际案例验证了这些措施的有效性,能显著提升太阳能组件自动焊接质量,进而提高组件性能、可靠性与使用寿命。在全球太阳能产业蓬勃发展的浪潮下,持续推动焊接质量优化,将为太阳能发电的广泛应用注入强大动力,助力人类迈向绿色能源新时代。

参考文献

- [1]张峰,李华.基于机器视觉的太阳能组件自动焊接质量检测方法研究[J].太阳能学报,2024(06):82-85.
- [2]刘悦,陈杰.智能算法优化太阳能组件自动焊接工艺参数策略[J].电力电子技术,2024(05):62-65.
- [3]王强,赵刚.新型焊料在太阳能组件自动焊接中的应用及性能评估[J].焊接技术,2024(04):45-48.
- [4]孙晓琳.环境因素对太阳能组件自动焊接质量的影响机制及控制措施[J].新能源进展,2024(03):55-58.
- [5]周浩,吴迪.太阳能组件自动焊接设备关键部件可靠性提升研究[J].机电工程,2024(02):68-71.