

# 风电塔筒制作过程中的质量检验与控制

杨 龙

(中国水利水电夹江水工机械有限公司, 四川 乐山 614100)

**摘要** 陆上风电塔筒的制作质量直接关系到风电整机长期运行安全,是塔架设备制造公司的管控核心。本文以陆上风电塔筒制作全流程为研究对象,深入分析风电塔筒制作质量控制要点,聚焦原材料、设备、人员三大核心影响因素,并系统阐述下料成型、焊接、防腐工序的精准检验技术,在此基础上提出设备精度闭环管控、工艺参数数字化管控、全流程质量追溯管控三类实操方法,旨在为塔架制造公司优化质量管控体系、提升产品稳定性、降低生产损耗提供技术参考,筑牢陆上风电设备运行的结构基础。

**关键词** 风电塔筒制作;质量检验与控制;无损检测;工艺数字化

**中图分类号**:TK8

**文献标志码**:A

**DOI**:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.028

## 0 引言

在陆上风电产业稳步发展进程中,塔筒作为核心承重部件,其结构强度和制作精度对整机服役寿命及运行稳定性起着决定作用。为破解塔筒制作各环节的质量难点,明确质量控制的核心逻辑,本研究聚焦原材料、设备、人员等影响因素,对各工序检验技术与管控措施进行细化,从而构建全流程技术管控体系,旨在对塔架制造公司提升批量生产质量的一致性、降低返工成本有所裨益,为陆上风电设备制造的质量升级提供实操路径。

## 1 风电塔筒制作过程中的质量控制要点

风电塔筒属于典型的大型钢结构部件,其制作质量的关键之处在于在全工序中贯穿设计精度和结构稳定性,质量控制要点的实质是对各环节技术风险做出前置预判以及进行精准把控。从结构承载的核心需求角度出发,质量控制需要围绕工序之间的关联性构建系统性逻辑,既不将单一工序质量孤立起来看待,也不忽略细节偏差给整体性能带来的连锁影响。质量控制要点表现为全流程的连贯性管控,下料、成型、焊接、防腐各环节并非独立存在,前道工序的质量状况直接对后道工序的实施基础和最终效果起到决定性作用,需要将尺寸精度和结构完整性作为核心主线,使各环节质量标准实现统一衔接。

## 2 影响风电塔筒制作质量的核心因素

### 2.1 原材料品质与适配性

原材料作为风电塔筒制作的物质基础,其品质是结构强度的核心保障,而适配性则决定加工环节的技

术兼容性,二者共同构成质量管控的前置性要素。从材质本质来看,品质直接关联塔筒承载能力的底线,适配性则影响技术参数的落地效果,缺一不可。

品质的核心内涵体现为材质的均匀性与力学性能的稳定性,材质纯度不足或力学指标波动,会直接导致塔筒结构存在潜在开裂、变形风险,无法承受长期复合载荷作用。适配性并非单纯的规格匹配,更强调原材料特性与加工工艺的内在契合度,不同材质的物理化学属性,对后续加工环节的技术适配边界形成天然约束,而原材料自身的状态一致性则会通过加工环节的传导效应放大对最终质量的影响,而适配性不足则会打破加工流程的技术平衡,引发连锁性质量偏差。二者并非孤立存在,品质为适配性提供基础支撑,而适配性则让品质优势充分转化为产品质量,共同构成塔筒制作质量的源头性影响因子。

### 2.2 设备精度与运维对塔架制作的影响

相较于原材料的基础作用,设备精度是塔架制造公司将设计参数转化为实体塔架产品的核心依托,而设备运维工作的核心价值在于保障设备精度的稳定输出,避免因设备状态异常影响塔架制作质量,二者共同构成塔架加工环节的硬件核心影响因素。

对塔架制作而言,设备运维的核心目标是维持加工精度稳定性,而非单纯的设备日常保养,重点在于防控设备长期运行中出现的磨损、老化及参数漂移问题。设备精度的实现依赖各部件的协同运作,任一环节的精度缺失都会形成短板效应,而针对性的运维工作则是通过对核心加工设备全生命周期的动态管控,

**作者简介**:杨龙(1995-),男,本科,助理工程师,研究方向:新能源风电塔筒制作。

有效延缓精度衰减速度, 维持塔架加工质量的一致性, 二者形成互补支撑关系, 共同保障塔架制作的硬件基础可靠性。

### 2.3 人员技能与操作规范性

在硬件因素之外, 人员技能与操作规范性是衔接设备、工艺与原材料的核心人文因素, 直接影响技术落地的精准度, 人员技能决定对加工技术的掌控能力, 操作规范性则规避人为失误对质量的破坏。

人员技能体现为对设备操作、工艺原理及质量风险的认知与掌控能力, 其水平差异会导致相同设备、工艺条件下的质量输出差异, 这是加工质量波动的重要人为诱因。操作规范性则聚焦流程执行的一致性, 核心在于遵循技术逻辑, 规避主观随意性, 违规操作往往会直接引发显性或隐性质量缺陷, 且这类缺陷具有较强的随机性与隐蔽性。技能是规范性操作的基础, 只有具备扎实技能才能精准把握操作边界, 规范性则是技能价值最大化的保障, 避免技能优势因操作失范而抵消。二者相辅相成共同构成人为因素对塔筒制作质量的核心影响, 其管控效果直接决定硬件优势与工艺设计能否转化为合格产品。

## 3 风电塔筒制作过程中的质量检验技术

### 3.1 下料与成型工序精准检测技术

下料与成型工序的质量精度直接决定塔筒后续工序的适配性, 其精准检测技术的核心是通过量化验证设计参数落地效果, 从源头阻断尺寸与形状偏差的传导, 为焊接工序筑牢基础, 这类检测需兼顾宏观尺寸与微观形态, 依托成熟检测手段实现全维度管控<sup>[1]</sup>。

下料工序检测以尺寸精准度与切口质量为核心, 核心依托激光测距仪与高精度游标卡尺构建双重检测体系。激光测距仪凭借  $\pm 0.05$  mm 的测量精度, 对板材长度、宽度等宏观尺寸进行全点位核验, 确保偏差控制在设计阈值  $\pm 0.5$  mm 内, 这一精度标准经行业长期实证, 可有效避免后续成型对接间隙超标, 而成型工序检测则在于聚焦筒节形状精度与曲率一致性。圆度仪作为核心设备, 通过环绕筒节至少 8 个截面的多点测量生成圆度偏差数据, 确保偏差  $\leq$  直径的 0.2%, 这一指标能避免塔筒运行中出现局部应力集中。对接精度检测采用塞尺与经纬仪协同作业, 塞尺精准测量对接间隙, 控制在 2 ~ 4 mm 的合理范围, 经纬仪则校准筒节直线度, 确保每米偏差  $\leq 1$  mm, 防止对接错边量超过板厚的 10%。除此之外, 曲率样板的贴合检测在于验证卷制弧度, 确保与设计曲线的贴合度  $\geq 98\%$ , 避免因曲率波动导致焊接间隙不均。整套检测技术形成“尺寸—形状—适配性”的全维度覆盖, 通过可量化

的实证数据, 精准把控下料与成型工序的质量底线, 为后续工序顺畅推进提供保障。

### 3.2 焊接工序无损检测技术

焊接焊缝是塔筒结构强度的核心承载区, 其内部与表面缺陷的隐蔽性决定了无损检测技术的不可或缺性, 这项技术以非破坏性为核心优势, 通过多手段协同实现缺陷的精准识别与量化, 保障焊缝符合长期承载需求, 检测逻辑需覆盖不同类型缺陷并弥补单一的技术盲区。

超声波探伤仪是焊缝内部缺陷检测的主力设备, 采用 2 ~ 5 MHz 频段探头, 检测灵敏度  $\geq 90\%$ , 可精准识别气孔、夹渣等体积型缺陷及未焊透、裂纹等线性缺陷, 对面积  $\geq 5$  mm<sup>2</sup> 的缺陷实现精准定位与量化, 作为补充手段, 射线检测技术针对性解决超声波检测盲区问题, 依托 X 射线穿透性成像, 检测灵敏度可达 0.1 mm, 对焊缝根部未焊透、微小裂纹等缺陷的识别准确率显著优于单一超声波检测, 尤其适用于塔筒环缝、纵缝等关键焊缝的二次核验, 与此同时磁粉检测技术聚焦焊缝表面及近表面缺陷, 可识别宽度  $\geq 0.2$  mm、深度  $\geq 0.1$  mm 的表面裂纹, 通过磁痕聚集效应实现可视化识别, 检测覆盖率达 95% 以上, 能有效排查焊接接头等应力集中区域的隐性表面缺陷。三类技术协同形成“内部 + 表面、主力 + 补充”的检测体系, 既遵循焊缝缺陷的分布规律, 又通过经实证的精度数据, 确保焊缝无致命缺陷, 保障塔筒结构承载的稳定性, 最终避免因焊缝失效引发的安全风险。

### 3.3 防腐工序全流程检测技术

防腐工序的防护效果直接决定塔筒陆地服役寿命, 全流程检测技术的核心是覆盖表面处理至涂层固化的全链条, 通过量化指标验证防护性能, 抵御潮湿、风沙等环境侵蚀<sup>[2]</sup>。检测需聚焦各环节关键指标, 确保防护层与钢材的稳固结合。

防腐工序全流程检测技术的核心在于表面处理环节的检测, 该环节直接决定涂层附着牢度, 采用对比样板法与粗糙度仪协同进行检测, 通过对比 Sa2.5 级标准样板确保钢材表面油污、氧化皮等杂质清除率  $\geq 95\%$ , 仅残留附着牢固的极少量锈迹, 这一除锈等级经长期实证, 可使涂层附着力提升 40% 以上。表面粗糙度通过粗糙度仪量化, 控制 Ra 值在 40 ~ 80  $\mu$ m, 该区间既能为涂层提供充足附着点, 又可避免粗糙度超标导致涂层局部厚度不均。进一步来看涂层施工环节的过程检测则是聚焦于厚度的均匀性, 湿膜测厚仪实时采集数据, 根据设计厚度 80 ~ 120  $\mu$ m/道调整喷涂参数, 确保湿膜厚度偏差  $\leq \pm 10$   $\mu$ m, 避免局部过厚引发固

化不充分或过薄导致防护不足。涂层固化后干膜测厚仪采用网格布点法检测,每平方米布点不少于5个,确保平均厚度符合设计要求,单点偏差 $\leq \pm 5 \mu\text{m}$ ,合格率需达到100%,同时附着力与针孔缺陷检测是最终验证手段,划格法检测中,涂层经划格、胶带撕扯后无整片脱落,边角翘起 $\leq 1$ 级,符合行业附着标准,而电火花检测仪采用的是5~15 kV电压检测,可识别直径 $\geq 0.05 \text{ mm}$ 的针孔缺陷,这类缺陷若漏检会加速局部腐蚀。全流程检测通过量化实证数据构建防护性能的闭环验证,确保塔筒在陆地复杂环境下的服役寿命 $\geq 20$ 年。

## 4 风电塔筒制作质量的控制措施

### 4.1 设备精度闭环管控措施

对塔架设备制造公司而言,设备精度闭环管控是锁定加工质量底线的核心手段,其核心逻辑并非单一校准行为,而是构建“预判—管控—反馈—优化”的全周期体系,以设备精度稳定性支撑塔筒制作各工序的质量输出<sup>[3]</sup>。塔架制造公司需按设备重要性实施分级管控,将数控下料机、卷板机等核心加工设备与辅助设备区分管控,核心设备直接决定塔筒尺寸精度与成型质量,需建立动态校准机制,实时跟踪精度衰减曲线,而非依赖固定周期校准,精准匹配设备运行损耗规律。塔架公司需配备专业校准团队,结合生产间隙开展精度检测,在设备精度接近临界值前提前安排校准,避免生产中断与质量返工,同时塔架制造公司还需强化精度数据与生产批次的关联管理,将每次校准结果、运行偏差数据同步至生产系统,与对应批次塔筒加工质量绑定,通过数据复盘优化校准周期与参数设置。

### 4.2 工艺参数数字化管控措施

塔架制造公司规模化生产场景下,工艺参数数字化管控的核心价值在于消解人为干预的不确定性,通过数据驱动实现工艺执行的标准化,以参数精准度保障批量塔筒产品的质量一致性。塔架制造公司需搭建专属工艺参数数字化平台,将下料、焊接、防腐等各工序设备与平台联网,实现切割速度、焊接电流、喷涂流量等关键参数的实时采集与集中管控,打破工序间参数信息壁垒,确保参数调整的联动性<sup>[4]</sup>。塔架公司可基于过往生产数据构建分类参数数据库,按塔筒规格、原材料特性存储最优参数组合,在新批次生产时直接调用并微调,缩短工艺调试周期,减少试错损耗。平台需设置动态预警阈值,当参数超出合理范围时自动联动设备停机并报警,规避人为监控滞后导致的质量缺陷,同时塔架公司还可依托数据追溯功能,复盘参数波动与质量问题的关联关系,针对不同加工

场景优化参数配比让工艺参数随生产经验积累持续迭代。这种数字化管控既契合塔架公司规模化生产需求,又通过参数精准把控提升产品质量稳定性并降低因参数偏差引发的返工成本,从而实现质量与效率的平衡。

### 4.3 全流程质量追溯管控措施

全流程质量追溯并非单纯的责任界定工具,其核心是通过全链条数据关联,实现质量问题的精准溯源与管控优化,为持续提升产品质量提供数据支撑,贴合塔架公司全周期质量管控需求<sup>[5]</sup>。塔架制造公司需为每批次塔筒分配唯一追溯编码,作为质量数据关联的核心载体,实现原材料信息、加工设备参数、各工序检测结果、操作人员信息的精准绑定,确保全流程数据可查可追。在生产过程中,操作人员需实时录入关键质量数据,杜绝数据断层或造假,保障追溯信息的完整性与真实性。当出现质量问题时塔架公司则需通过追溯编码快速定位问题发生工序、对应设备及责任人,精准分析成因,避免盲目排查全流程,提升问题解决效率,同时塔架公司还需将追溯数据与质量改进体系联动,汇总高频质量问题的共性规律,针对性优化管控措施并形成“追溯—分析—改进—优化”的良性循环。这一措施既满足塔架公司对产品质量的全周期把控需求,又通过数据支撑实现质量持续提升,增强产品市场竞争力与品牌公信力,契合了塔架制造公司的长期发展诉求。

## 5 结束语

陆上风电塔筒制作质量管控需贯穿全工序,核心在于平衡各影响因素、优化检验技术与落实管控措施。本研究明确了原材料、设备、人员的核心影响作用,并细化了各工序检验标准。在未来的风电塔筒制作中,塔架制造公司还需深耕技术创新并推进检测设备智能化、工艺管控数字化升级,最终实现质量与效率的协同提升。

## 参考文献:

- [1] 胡赢,陈旺明,李怿炳,等.风电塔筒高强钢焊接过程与质量控制[J].工程设计与设计,2025(24):240-242.
- [2] 石登钊.陆上钢制风电塔筒制作工艺及质量控制研究[J].装备制造技术,2025(11):167-170.
- [3] 胡学锋.风电塔筒制作中的关键质量控制点探究[J].中国战略性新兴产业,2025(26):85-87.
- [4] 香东远.风电塔筒制作过程中的质量检验与控制研究[J].机械管理开发,2023,38(03):65-67.
- [5] 陆伟大.风电塔筒制造技术及质量控制探讨[J].中国设备工程,2021(04):189-191.