

# 风电机组塔筒连接螺栓的断裂原因分析与预紧力控制

曾 鹏

华电新能源集团股份有限公司湖南分公司 湖南 长沙 410000

**【摘要】**：风电机组塔筒连接螺栓为关键承载部件，运行可靠性影响机组安全稳定。本文分析螺栓断裂主要诱因，涵盖自身质量缺陷、外部载荷异常及预紧力控制不当，探讨预紧工艺参数、螺栓与连接件匹配性、施工操作规范性对预紧力的影响机制，提出优化预紧工艺设备、强化螺栓质量管控、规范施工操作的控制策略。预紧力控制不当是螺栓断裂核心因素，科学管控工艺、质量与施工环节，可降低螺栓断裂风险，为风电机组塔筒螺栓安全运行提供技术支撑。

**【关键词】**：风电机组；塔筒螺栓；预紧力；断裂原因；控制策略

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.041

## 引言

风电产业向高功率、大型化、深远海发展，风电机组塔筒连接螺栓承受载荷愈发复杂，螺栓断裂引发倒塔、停机等事故，影响风电项目安全运营与经济效益。塔筒连接螺栓是法兰连接核心部件，传递机组载荷、固定塔筒结构，性能稳定性与预紧力控制精度密切相关。螺栓断裂已成为制约风电机组长周期安全运行的突出瓶颈，系统分析断裂原因，探究预紧力影响因素及控制方法，对提升机组可靠性、降低安全隐患有重要工程实践意义。

## 1 风电机组塔筒连接螺栓断裂的主要原因

### 1.1 螺栓自身质量缺陷

塔筒连接螺栓多采用 42CrMoA 钢，制造与热处理缺陷是断裂内在诱因。2MW 机组 M36 螺栓服役 4 年批量断裂，检测显示螺纹牙底脱碳层超标，表层硬度低 15% 以上，回火索氏体不足 90%，微裂纹引发疲劳断裂。断裂源附近无脱碳现象，有锌镍渗镀层加深现象存在，按照送检方告知的加工流程，推断出螺栓头部和杆部交接处在调质后，锌镍渗镀前有裂纹存在<sup>[1]</sup>。河北某风电场倒塔事故中，12 颗断裂螺栓存在热镀锌打件遗留裂纹。海上风电场 M56 螺栓调试时批量断裂，六角头根部圆弧半径不足 0.8mm，应力集中系数超设计值 1.3 倍，裂纹扩展速率提升 3 倍以上。

### 1.2 外部载荷作用异常

塔筒法兰螺栓承受风致弯扭、振动冲击与基础沉降复合载荷，易加速疲劳失效。日本太鼓山风电场机组阵风切变，法兰面弯矩波动达设计值 1.8 倍，螺栓应力幅超阈值，疲劳寿命骤降。瑞典 Lemnhult 风电场倒塔，100 颗 M64 螺栓因湍流风载承受非对称载荷，单颗受力超均值 40%。国内某山地风电场地基沉降，法兰倾斜 0.3°，螺栓附加弯矩激增，断裂位置集中，断口疲劳辉纹密度达正常区域 2.5 倍。

### 1.3 预紧力控制不当

预紧力不足或分布不均是螺栓断裂核心诱因。瑞典 Lemnhult 倒塔事故，扭矩工具未校准、雨天施工致预紧力仅达设计值 65%，法兰微滑移使螺栓承受交变载荷，应力幅扩大 2 倍。6.25MW 机组 12 根锚栓预紧力最大偏差 28%，服役 6 个月出现裂纹。从断口的宏观形貌分析裂纹走向，发现裂纹源位于螺栓根部的外表面<sup>[2]</sup>。国内某风电场 30% 螺栓预紧力不足，运行 1 年法兰间隙超标，螺栓断裂率较合格机组高 8 倍，形成连锁失效模式。

## 2 风电机组塔筒连接螺栓预紧力的影响因素

### 2.1 预紧工艺参数偏差

预紧工艺参数直接决定预紧力转化效率与一致性，微小偏差即导致大幅偏离。扭矩系数 K 受螺纹摩擦、表面润滑、温度影响显著，未润滑螺栓 K 值波动 0.12-0.18，施加相同扭矩时预紧力偏差超 30%。扭矩-转角法应用中，初始贴合扭矩不足，前 30° 转角无有效预紧力，某风场未设置预紧扭矩，转角偏差 ±15°，预紧力合格率从 95% 降至 78%。液压拉伸工艺里，拉伸力不足、保压时间短于 30s、螺母未锁紧即卸压，均引发回弹损耗，某项目拉伸保压仅 15s，预紧力损失达 15% 以上。M36 以上大规格螺栓单次拧紧未复拧，无法补偿弹性变形，预紧力均匀性差，相邻螺栓差值超设计值 20%，难以满足法兰面均匀压紧需求。

### 2.2 螺栓与连接件匹配性

螺栓与塔筒法兰、垫片的刚度匹配及接触状态，直接影响预紧力分布与传递效率。法兰面平面度超差 0.5mm/m，局部区域螺栓预紧力无法有效传递，结合面出现间隙，受力螺栓数量减少 30%，单颗载荷过载。螺栓与法兰刚度比失衡，螺栓刚度过大时，外载下应力增量占比超 60%，疲劳风险激增；非标薄型垫片压缩变形量大，预紧力松弛速率提升 2 倍，运行 3 个月衰减超 10%。螺纹副配合精度不足，螺距偏差超 ±0.001mm，预紧力转化效率下降，M30 螺栓螺距偏大 0.05mm，

相同转角下预紧力超标 12%，存在过载隐患。

### 2.3 施工操作规范性

人工操作与现场管控漏洞是预紧力失控的主要人为因素。施工人员未培训即上岗，常出现超拧、欠拧、漏拧，某风电场 10%螺栓终拧扭矩偏差超±10%，超拧螺栓发生屈服损伤，欠拧螺栓预紧力不足。雨天施工未防护，螺纹混入泥沙、水分，摩擦系数骤降，相同扭矩下预紧力波动超 25%，瑞典 Lemnhult 事故中，雨天施工直接造成预紧力不足。未按要求分阶段预紧，一次性施加终拧扭矩，法兰变形不均，局部螺栓预紧力损失，施工后未按 10%比例抽检，不合格螺栓未复检复拧，留下失效隐患（见图 1）。

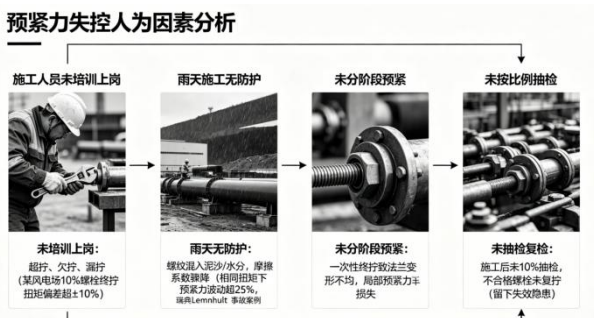


图 1 施工操作规范性

## 3 风电机组塔筒连接螺栓预紧力的控制策略

### 3.1 优化预紧工艺与设备

采用高精度预紧工艺与校准设备，从源头保证预紧力精准可控。大规模塔筒螺栓优先选用液压拉伸法，按设计值 105% 设定拉伸力，保压 45s 以上，卸压前锁紧螺母，补偿回弹损失，某项目应用后预紧力偏差控制在±5%内。扭矩-转角法需严格遵循流程，先施加 30%终拧扭矩完成预紧贴合，再旋转设计角度终拧，M36 螺栓贴合扭矩设为 800N·m，有效消除间隙误差，预紧力合格率提升至 98%以上。扭矩扳手、液压拉伸器每 3 个月校准 1 次，扭矩工具误差控制在±3%内，拉伸设备压力传感器每季度检定，杜绝设备偏差引发的预紧力失控。

### 参考文献:

- [1] 张德美,梁晓东,张焰.某塔筒螺栓断裂原因分析[J].金属热处理,2025,50(02):312-315.
- [2] 王一帆,赵飞,程平.风电塔筒用螺栓断裂失效分析[J].现代制造技术与装备,2022,58(08):9-12+17.
- [3] 刘帅.某风电塔筒连接螺栓失效分析[J].电站系统工程,2025,41(01):14-18.

### 3.2 强化螺栓质量管控

全流程管控螺栓质量，消除先天缺陷对预紧力与强度的影响。原材料选用正规厂家 42CrMoA 锻件，入厂复验化学成分、力学性能，非金属夹杂物控制在 GB/T 10561 标准 A 级以内。严控热处理工艺，调质后金相组织为回火索氏体，占比≥90%，表面无脱碳，硬度控制在 32-39HRC，杜绝硬度不均、组织异常批次入场。螺纹加工采用滚压工艺，根部圆弧半径≥1mm，降低应力集中，表面处理优选达克罗，涂层厚度均匀 5-8 μm，保证摩擦系数稳定在 0.10-0.14，安装前逐件磁粉、渗透检测，剔除裂纹、折叠缺陷产品。

### 3.3 规范施工与安装操作

标准化安装流程，可减少人为与环境干扰。加强对施工人员的培训和交底，确保正确使用安装工具并熟练掌握螺栓安装技术要求，如初拧/复拧/终拧顺序、力矩值要求等<sup>[3]</sup>。施工前对人员专项培训，考核合格方可上岗，明确分阶段拧紧、复拧要求，禁止超拧欠拧。安装需在无雨、无沙尘环境下进行，螺纹涂抹专用润滑脂，保证摩擦系数稳定，雨天停止作业并防护已装螺栓。法兰对接前检查平面度，超差部位打磨修整，确保贴合间隙≤0.3mm/m。采用对角均匀拧紧工艺，分 3 次施加扭矩，间隔 15min 复拧，补偿变形损失。终拧后 24h 内按 10%比例抽检，单颗不合格则扩大抽检至 20%，仍不合格需全法兰复拧，超拧螺栓强制更换。

## 4 结语

风电机组塔筒连接螺栓断裂，是自身质量、外部载荷、预紧力控制等多因素协同作用的结果，预紧力控制不当是引发螺栓疲劳断裂的核心诱因。预紧力精准控制，离不开科学预紧工艺、可靠螺栓质量与规范施工操作，三者缺一不可。优化预紧工艺与设备、强化螺栓全流程质量管控、规范现场安装操作，可有效解决预紧力偏差、分布不均等问题，大幅降低螺栓断裂风险。未来结合风电场实际工况，持续完善预紧力控制技术，推动螺栓运维智能化，能为风电机组安全稳定运行提供更全面保障。