

风力发电机螺栓预紧力的研究方法综述

葛金定 李京泽 乔 勋

西京学院机械工程学院 陕西西安 710123

摘要: 目前, 风能在清洁、可再生能源等领域得到迅速发展, 而螺栓联接是风力发电机中最常见的联接形式, 在其中的关键联接部位得到了广泛的应用。所以, 风力发电用螺栓联接的安全与可靠性问题也成为人们关注的焦点。但是, 在安装时或安装完毕之后, 在多种因素或长期振动荷载的共同作用下, 可能产生不同程度的预紧松弛, 造成联接失效, 严重时可能造成风机的破坏。当前, 在国内外, 有关这一方面的螺栓连接的研究还不多, 所以, 本文主要介绍了风力发电机螺栓连接及其预紧力松弛的研究方法, 最后, 提出了螺栓预紧力研究所主要存在的问题, 并对其未来研究方向进行了展望。

关键词: 风电螺栓; 预紧力松弛; 螺栓松动

近年来, 随着我国风力发电行业的快速发展, 相关的配套设备也在不断地完善中。然而, 目前我国风电机组的一些核心部件还存在着严重的依赖进口的问题。在风电机组中, 螺栓联接是一种常用的联接方式, 在塔架、主轴、叶片根部和偏心等多个关键联接部位均有大量使用。但是, 虽然科研人员在设计阶段就对风机部件的强度、疲劳寿命等进行了细致的分析与验证, 但由于风电螺栓的松动、断裂等原因导致的风机结构坍塌仍然时有发生, 如图 1 所示。瑞典一项关于风力发电机组坍塌的研究表明, 风力发电装置坍塌的主要原因是: 风电螺栓在多种因素作用下预紧力松弛, 从而造成了风力发电装置的坍塌。为此, 本文主要介绍了风力发电机螺栓连接及其预紧力松弛的研究方法, 最后, 提出了螺栓预紧力研究所主要存在的问题, 并对其未来研究方向进行了展望。



图 1 螺栓失效导致的风电事故

1. 风力发电机螺栓连接的研究

目前, 风力发电机螺栓连接的研究主要集中在静力强度和疲劳寿命分析上, 并根据计算结果判断其使用年限^{[1][2]}。Petersen 最早是通过确定螺栓的 S-N 曲线, 确定了用来校核锚杆强度的计算方法, Schmidt 等^[3]则在此基础上, 对其进行修改和改进, 得到了更符合实际情况的计算结果, 被称为 Schmidt-Neuper 算法。同时, 它也是目前风力发电机螺栓的主要设计方案, 得到了风电生产厂家及相关部门的广泛认同。

此后, 大量的文献对因螺钉联接故障而引起的风机垮塌等问题作了详细的研究。孔繁晓等^[4]采用理论推导与风电叶片叶根连接螺栓的有限元计算模型相结合的方法, 对螺栓预紧力的大小与其疲劳寿命之间的关系进行了定量, 得出了在确保螺栓预紧力的大小在一个合理的设计目标范围内时, 其值越大, 螺栓的疲劳寿命就越高的结论; 基于这一点, 彭杰等^[5]也采用理论计算与有限元模拟的方法, 对风电螺栓的静强度与疲劳寿命进行了系统的研究, 得出了预紧力过小会引起位移过大, 进而造成螺栓强度下降这一重要结论。

目前, 国内外学者在风力机螺栓的强度与寿命方面进行了大量研究, 并对风力发电机坍塌事故、螺栓失效等方面进行分析, 其中最主要的原因是螺栓的预紧力松弛。但目前国内外对风力发电机螺栓预紧力松弛、松脱机制及预测尚缺乏系统研究, 迫切需要开展预紧力松弛成因及影响因素分析, 以避免因预紧力松弛引起的连接提前失效。另外, 风力发电用螺栓在风荷载周期振动下, 螺栓难免出现松脱现象, 使螺栓的预紧力大幅降低, 甚至无法达到设计要求。

2. 螺栓连接预紧力松弛的研究

风力发电机螺栓连接破坏的一个主要原因是：预紧力松弛造成风力发电机螺栓连接破坏。这可能是长时间的荷载作用，也有可能是在预紧力施加过程中短期的预紧力松弛造成的。为此，国内外学者进行了大量的理论分析与试验研究。

张振等^[6]在进行了受迫振动试验后，利用模态参数来表征螺栓连接的动态性能，对在不同的初始预紧力等级和振动加载频率下，复合材料螺栓的预紧力松弛特征进行了研究和分析，最后发现，预紧力松弛量与振动频率呈正相关，其中50%的松弛是由于复合材料的粘弹性引起的；基于此，沈媛臻^[7]等人开展了侧向振动加载的有限元仿真试验，探讨了螺栓疲劳破坏与微动磨损的耦合效应对预紧力松弛的影响。谢元洪^[8]等人在此基础上，以弹-粘塑性理论与分形接触理论为基础，对复合材料螺栓联接的预紧松弛问题进行了深入的理论分析与试验研究，发现：预紧松弛与接触面粗糙度之间存在着显著的正相关关系。

另外，由于螺栓材料的蠕变，也会使螺栓的预紧力出现松弛，从而对机器装备的安全运行产生不利影响。材料的蠕变在不同的温度下，其表现特征也是不相同的。主要有高温蠕变 ($T > 0.6T_0$)、中温蠕变 ($0.3T_0 < T < 0.6T_0$)、室温蠕变 ($T < 0.3T_0$)^[9]，其中T表示环境温度， T_0 表示螺栓的熔点。尽管材料的蠕变多发生在高温下，但如果材料处在屈服强度或接近于屈服强度的应力条件下，同样也会发生蠕变。基于此，Neeraj等^[10]则是用试验研究获得了钛合金在常温条件下的蠕变过程机理模型，并通过实验表明这个模型够用来很好地对材料的长期蠕变进行预测。这也为后续学者研究材料蠕变对风电螺栓的预紧力松弛的影响奠定了基础。

3. 风电螺栓预紧力研究所存在的问题及展望

尽管不少学者通过各自的方法对螺栓松动进行了研究分析，但由于螺栓松动是不可避免的，因此，如何准确、精确地预测螺栓松动是一个迫切需要解决的问题。目前大多数的螺栓松脱预报都是基于试验的，这种预测方式需要海量的数据，而且还要求有一个比较复杂的试验系统。该方法耗时长，预测效果不佳。当前，在风电螺栓松弛机理和预测方面，尚未形成一套完整的方法体系。此外，由于FEM软件的不断成熟和功能的不断发展，使得FEM能够在较短时间内准确地得到螺栓在松弛过程中的受力状态、螺纹接触状态

以及预紧力的数值。因此，对风电机组中的螺栓松动现象进行仿真研究，对于进一步认识和预测风电机组螺栓预紧力松弛和松动机理具有十分重要的意义。

风力发电中螺栓的受力状况比较复杂，目前大部分的研究都没有考虑到螺栓在风力发电过程中的真实受力状况，如风荷载和极限负载等。针对螺栓预紧力松弛与松动问题，除了一些简单的外加载荷条件，还需要进一步考虑风荷载等多个因素的耦合作用，从而形成一套更为完备、更贴近工程实践的锚索预紧松弛与松动计算方法体系，最终能够实现全面掌握风电螺栓预紧力松弛情况和松动的规律，达到精准预测的目的。

参考文献

- [1] 张媛. 基于损伤力学的风力机塔筒法兰联接螺栓疲劳寿命分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2016.
- [2] 龚民. 风电叶片根部螺栓连接的受力性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [3] Schmidt H, Winterstetter T A, Kramer M. Non-linear elastic behaviour of imperfect, eccentrically tensioned l-flange ring joints with prestressed bolts as basis for fatigue design[C]. European Conference on Computational Mechanics. Germany: Munich, 1999: 76-82.
- [4] 孔繁晓, 言婷, 周海波, 等. 预紧力对风电叶片根部螺栓疲劳寿命的影响分析[J]. 风机技术, 2017, 59(6): 51-54.
- [5] 彭杰. 大型风力机叶根连接结构强度分析与疲劳寿命研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.
- [6] 张振, 肖毅, 刘彦清, 等. 基于振动疲劳试验的复合材料螺栓连接预紧力松弛特性[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1): 163-173.
- [7] 沈媛臻, 肖毅. 微动损伤对复合材料螺栓连接预紧力松弛的影响[J]. 复合材料学报, 2019 (2): 400-409
- [8] 谢元洪, 肖毅, 吕佳欣, 等. 复合材料螺栓连接松弛的弹-黏塑性分析方法[J]. 复合材料学报, 2020, 37(4): 824-836.
- [9] 王先根. 高精度机床螺栓联接与精度保持性的相关性机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [10] Neeraj T, Hou D H, Daehn G S, et al. Phenomenological and microstructural analysis of room temperature creep in titanium alloys[J]. Acta materialia, 2000, 48(6): 1225-1238.