

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.005

风电高强螺栓的松动与疲劳性能研究进展

厉旭旺¹, 范焕¹, 黎相昊¹, 黄成彦¹, 魏煜锋¹, 孙宝茹²

(1. 明阳智慧能源集团股份公司, 广东 中山 528437; 2. 燕山大学 材料科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066099)

摘要: 风电螺栓的性能变化贯穿其生命周期, 失效诱因较多。基于高强螺栓在风电行业中的应用概况、标准和发展趋势, 结合建筑钢结构、铁塔等领域高强螺栓的研究, 阐述高强螺栓综合性能的影响因素; 重点归纳不同载荷下螺栓松动、疲劳的竞争失效关系和实验研究方法; 指出对不同载荷螺栓性能影响研究的不足; 明确当前研究数据不足以支撑其精准, 并从应用角度建议对相关风电螺栓设计标准进行细化, 对新一代高强螺栓的研发应用提出展望。

关键词: 风电高强螺栓; 载荷影响; 松动与疲劳; 行业应用

中图分类号: TM315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0026-11

Experimental Research Progress on Loosening and Fatigue Properties of High Strength Bolts in Wind Power

LI Xuwang¹, FAN Huan¹, LI Xianghao¹, HUANG Chengyan¹, WEI Yufeng¹, SUN Baoru²

(1. Mingyang Smart Energy Co., Ltd., Zhongshan 528437, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066099, China)

Abstract: The performance of wind power bolts changes throughout their life cycle, with many causes of failure. This paper introduces the applications, standards and development trends of high-strength bolts in wind power industry, and expounds the influencing factors of the comprehensive performance of high-strength bolts by combining with the research of high-strength bolts in the fields of building steel structures and iron towers, etc. The competitive failure relationship of bolts under different loads and the experimental research methods are summarized. The deficiencies of the research on the effects of different loads on bolt performance are referred. The design standards of wind power bolts are suggested to be refined from the application point of view, and the development and application prospects of new generation high-strength bolts are put forward.

Keywords: wind power high-strength bolts; load impact; looseness and fatigue; industry applications

0 引言

风力发电机作为转化风能的关键设备, 需借助紧固件进行可靠连接。高强螺栓因安装维护便捷、结构适用性强、柔性与刚度平衡可靠而被广泛应用于风电行业。风机单机容量速增对螺栓紧固件的性能要求更高, 其规格也逐渐提升。螺栓连接会降低整体结构刚度^[1]。常见的失效类型主要有: 松动、疲劳断裂、锈蚀等, 其中螺栓松动和疲劳为风力发电机中的主要失效类型。

风力发电机的塔筒、叶根、发电机与齿轮箱等关键部件连接固定时所采用的螺栓尺寸规格大、强韧性指标优异, 检测时对试验机的要求很高, 且疲劳寿命多在 5×10^6 次以上, 测试周期长, 能源消耗大。因而当前多以数值模拟来研究螺栓预紧

力、加载频率、尺寸等对性能的影响^[2-6], 实体试验研究较少^[7], 这也限制了高强螺栓的精准应用。本文围绕高强螺栓松动、疲劳性能的影响因素, 梳理分析了当前实验研究结论, 提出了相关参考标准的不足, 为风电螺栓紧固件的高可靠性工程应用提供帮助。

1 风电螺栓的性能标准

螺栓的等级代表其综合性能优劣, 一般称 8.8 级以上为高强螺栓 (抗拉强度不小于 800 ~ 830 MPa, 屈服强度为抗拉强度的 80%)。依据 ISO 898-1 和 DNV GL 的标准^[8], 仅 8.8 ~ 10.9 级范围的高强螺栓可用于紧固风电部件, 12.9 级及以上螺栓因其强韧性调配失衡更易发生疲劳、开裂而被禁用。GB/T 3098.1、GB/T 3098.8 和

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11935004); 内蒙古自治区揭榜挂帅项目 (2022JBGS0045)

第一作者简介: 厉旭旺 (1996—), 男, 河南开封人, 助理工程师, 硕士, 研究方向为风力发电机关键部件材料和智能装备制造等, lixuwang@mywind.com.cn。

GB/T 3098.23《紧固件力学性能》对紧固件的规格及性能明确规定:10.9级风电螺栓多用中低碳合金钢,辅以热处理改性、热滚压一次成型以达到性能要求;屈服/抗拉强度不小于940/1040 MPa,延伸率不小于9%,低温冲击功 A_{kv2} 不小于27 J(夏氏V型缺口, -20℃,部分低温型螺栓要求-40℃时27 J),但标准并未注明紧固件的耐腐蚀性、耐疲劳性及超温工作性能,也未规定M72螺栓的载荷指标。此类性能标准多参考供需双方的内部协议或团体标准T/ZZB 0327-2018《海上风电用高强度螺栓连接副》,导致紧固件行业的生产工艺、质量可靠性存在一定偏差,故应考虑建立全面的螺栓性能标准及工艺规范。

当前风电行业各类应用多通过提升螺栓直径来保证连接强度可靠性,但受限于部件设计及螺栓疲劳性能要求,螺栓直径不能无限加大,需开发新型材料、优化工艺的新型螺栓,以满足基本力学性能和使用可靠性的要求。当前以新型材料的拓展应用和抗疲劳型12.9级超高强度螺栓的研发最具开发前景。

2 螺栓性能的影响因素

结合风电螺栓的完整生命周期,其性能影响因素分为材料属性、生产工艺、结构设计、安装配合、后期运维、应用工况。其影响因素的关联状态如图1所示。

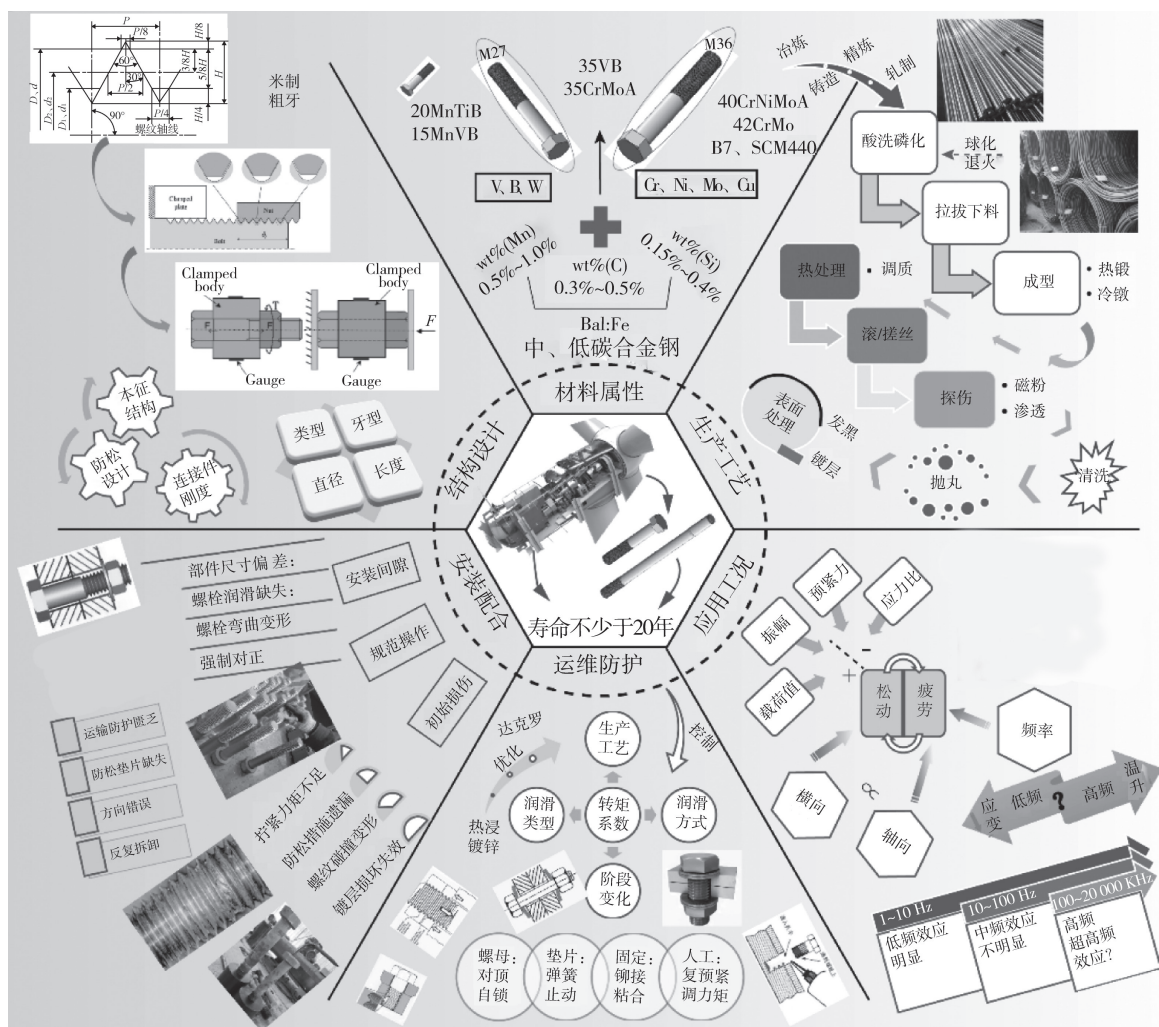


图1 风电高强螺栓性能影响因素图

2.1 材料属性

风电高强螺栓多采用中低碳合金钢(硼钢、锰钢、铬钢,碳含量为0.3%~0.5%)制造,后续辅以淬火、回火工艺调质改性。材料的种类随螺栓的规格而变化,为平衡性能质量和生产成本,一般可

按性能及材料洁净度分为超洁净螺栓钢、非调质钢、超高强度螺栓钢3类^[9]。材料的淬透性是关键影响因素,小尺寸螺栓采用低淬透性合金钢即可,如M24以下的螺栓多用20MnTiB钢,M27~M33螺栓多用35VB、35CrMoA钢;M36以上大尺

寸螺栓多采用高淬透性、综合性能更为优异的40CrNiMoA、42CrMo、B7(美国 ASTM A193)、SCM440(日本 JIS G4053)等钢种,其中对螺栓冲击韧性有要求时优先选用40CrNiMoA,螺母材料要求同上^[10-11]。

当前风电行业中大规格螺栓广泛应用42CrMo钢材^[12],制造工艺成熟稳定,生产成本和周期可控。尽可能净化母材,提升冶金质量,可以有效保障螺栓性能。

2.2 生产工艺

风电高强螺栓的质量控制要求严格,生产工艺根据原材料及生产效率分为两种:1)热轧盘条—球化退火—酸洗磷化—拉拔—下料—冷镦成型—热处理(调质)—螺纹加工(小尺寸搓丝,大尺寸滚丝)—探伤—清洗—抛丸—表面处理(发黑、热镀锌);2)热轧棒材—酸洗磷化—拉拔—下料—热锻成型—机加工(整形)—热处理(调质)—螺纹加工(搓、滚丝)—探伤—清洗—抛丸—表面处理(发黑、热镀锌)^[13]。当前M36规格以下螺栓倾向于冷镦工艺成型,材料利用率和生产效率更高,但加工前应进行球化退火处理,以改善塑性、保障冷镦成型性。部分风电螺栓产品在热处理后需校直才能符合GB/T 3103.1标准中B级产品的尺寸精度要求与直线度要求。

风电高强螺栓生产要求在热处理后滚丝,且螺纹加工应以一次性滚压成型代替车削加工以保证螺纹表层合适的表面残余压应力,同时减小因机械加工引入的裂纹和破碎尖角,规避滚丝后热处理所引发的表面残余压应力消散,最大化提升材料的综合疲劳性能。

风电螺栓防腐要求以机组应用环境而区分:1)内陆型机组,紧固件盐雾试验不少于720h基体无红锈;2)海上型机组,紧固件试验大于1000h基体无红锈^[14]。故螺栓多采用热镀锌或达克罗处理以实现防锈防腐而延长寿命,不同表面处理的温度跨度较大(70℃~500℃),会导致表面残余应力消散,恶化疲劳寿命,因而需优化螺栓的表面处理工艺。螺栓热浸镀锌处理温度较高(450℃~480℃),处理后的钝化层中易存在结晶水而不耐高温;而达克罗是锌铬涂层,成膜温度约280℃^[15],膜层致密,水分少,具备阴极保护和壁垒效应,更耐蚀,耐高温,但耐磨性、大气环境耐腐蚀性差,故应结合工况选用。

螺栓的性能指标须满足国标要求和整机厂商

的内部使用标准,但不同生产商的材料成分、工艺参数不完全相同,螺栓的综合性能和使用可靠性有差异。风机中所涉及到的螺栓数量、种类较多,单一供应商无法满足大批量应用,整机厂商可能同时使用多种工艺的螺栓,产品相同工况下的适用性梯度差就会随时间延续而体现为“质量”差异,造成停机事故和经济损失。因而严格规范,统一固定牌号的螺栓生产工艺,设定严格环境适用性具有极其重要意义。

2.3 结构设计

螺栓自身和被连接件的结构设计会影响螺栓的使用性能。风电行业中常用的螺栓类型主要有六角头螺栓、双头螺柱、地脚螺栓等。当前对螺栓本身结构参数的研究较多,螺栓尺寸^[16]、螺纹长度及牙型^[17]对螺栓寿命的影响显著^[18],因而国家对螺栓紧固件的尺寸、螺纹长度及牙型等有严格标准。另有研究证实了危险部位强化可增强螺栓使用寿命,如圆角部位滚压强化处理^[19-21]、螺纹分级滚压成型等,而设计人员更倾向于改善被连接件结构来优化连接可靠性,如采取提升被连接件刚度^[22]、缩小螺杆直径以降低螺栓刚度^[23]等措施。

2.4 安装配合

风电螺栓的安装间隙、安装规范性和产品完整性直接影响螺栓使用寿命。据华电院所做的风电螺栓金属监督检查反馈^[24],风电螺栓安装过程中存在因安装间隙不足而强制安装、拆卸的现象,同时安装工程师对螺栓的设计结构了解不足,存在不规范安装操作(如运输防护缺失、垫片缺失、螺栓方向错误、反复拆卸等),会导致螺栓的表面镀层破损^[25]甚至螺纹异常形变,也存在拧紧力矩不足、防松措施未做等现象,均会直接导致螺栓的前期松动,失效分析报告指出此类缺陷会诱发螺栓锈蚀和疲劳失效^[26-27]。因而部件设计尺寸和安装孔位预留应参考供应商生产经验并合理调整,做好运输、安装过程中的防护和监管,从而避免风电螺栓前期的“无效寿命损失”。

2.5 应用工况

风电螺栓应用工况包含螺栓工作时所处的环境温度和载荷状态。

1) 工作温度

风电螺栓工作温度区-45℃~55℃,最高温度不超70℃,适度温升有益于螺栓稳定工作,故螺栓仅需满足低温性能指标(-40℃或-60℃)^[28]。

2) 载荷状态

载荷状态指螺栓承受的复杂载荷,体现为预紧力、极限应力、载荷方向、振幅、加载频率等,如图2所示。风电螺栓承受循环交变载荷是螺栓松动和疲劳的直接原因,导致综合疲劳性能下降^[29-30]。

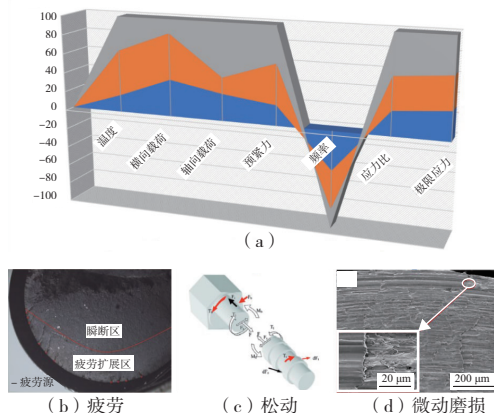


图2 载荷对螺栓性能的影响示意图

极限应力和平均应力对螺栓松动和疲劳的影响趋势相同。国内外的科研单位陆续对 M39 及以下尺寸规格、不同强度等级的高强螺栓分别进行了变幅极限应力和平均应力的疲劳性能实验研究,得出一致结论为样品所承受的外循环应力越大,材料内部受力状态越复杂,材料变形、接触面微动趋势加剧,在材料基体中易产生更多不可逆交互滑移位错,这将会增大螺栓松动和疲劳失效的风险^[31-32],和当前风电螺栓的应用现状基本一致。但目前对 M42 以上大尺寸高强螺栓的松动和疲劳性能研究数据较少(受限于设备能力和实验成本限制),设计人员多倾向于按照国外 GL 标准中的数据进行理论疲劳强度推算分析来设计取值,而螺栓在实际工程应用中承受的应力状态是更为复杂的弯扭、拉拉复合交变载荷,同时伴随有阶段性的温度、冲击载荷和不同程度的腐蚀环境,与标准中所限定的单一固定载荷有较大偏差,故拟合出的疲劳性能数据并不能代表实际工况下的螺栓性能。因而当前叶根、塔筒等关键部位连接螺栓所承受的极限载荷及应力状态变化情况在经过系统级仿真分析评估后,应适当选取典型的多级复合应力疲劳寿命测试进行实验验证,最终综合评定可靠性连接所应采用的螺栓规格。

a) 松动

① 载荷形式

螺栓松动主要受横向载荷影响,当前有 3 种理论多归因于螺纹接触面的微动状态变化。①预

紧力损失:预应力损失导致螺纹磨损^[33-35];②接触面微动磨损:振动冲击导致微动磨损^[36];③能量耗散理论:螺栓预紧储存的相对能量释放而致螺栓反转松动^[37]。而轴向载荷对松动的直接影响较小,多体现在螺纹变形和磨损而致预紧力的阶段性波动下降^[38-39]。

② 预紧力

预紧力和外加应力的平衡关系决定了材料内部的应力状态。预紧力可以增加连接部位刚度,当外加应力小于预应力时,高强螺栓中的力几乎恒定,螺栓在外力超限开始出现周期性交变应力^[40]。预紧力下降是螺栓松动的直接体现,研究人员建模分析了预紧力、接触面摩擦因数的影响^[41],JIANG 等^[42]研究证明螺栓松动分为材料松动期和结构松动期 2 阶段(速率不同),如图 3 所示。材料松动期螺栓与螺母间的相对运动非常小,是材料塑性变形引起螺栓预紧力下降;结构松动期是因螺栓与螺母间的相对转动而导致预紧力明显下降。实际工程应用中螺栓的预紧力会受到人为操作因素和紧固属性的影响:a 预紧设备的准确度和运维人员的操作规范性决定了螺栓预紧力的准确程度,该项为关键因素,需通过严苛的安装运维工序和现场检测以保障有效安装;b 螺栓紧固过程中邻近螺栓之间的弹性交互作用和垫片蠕变松弛^[43]会导致对初始预紧力产生消减效应,主要与螺栓的材料及尺寸属性、垫片材料及尺寸属性、装配位置、拧紧方式、连接整体刚度等因素有关,研究表明采用三道次交叉预紧方式可有效减少初始预紧力的损失。

预紧力过高或过低均会导致螺栓出现早期松动,当前测试人员多采用中空的轮辐式传感器搭配动态应变采集系统来实现对螺栓轴向预紧力的实时动态监测,但轮辐式传感器为满足刚度和精度 1% 的测试需要,不同承载能力下的设计厚度偏差较大(400 kN 约 $\phi 100 \times 25$ mm, 900 kN 约 $\phi 100 \times 60$ mm)。大规格螺栓的对应用空间及螺栓的有效工作长度有影响,限制了风电行业中 10.9 级 M36 规格以上螺栓预紧力的研究应用。目前行业中并没有对螺栓松动各项指标的明确判定标准,但参考 M24 以下小规格螺栓的松动研究结论,研究人员认为监测到的实际预紧力下降 10%~20% 时即可认定螺栓出现了松动失效,多会伴随出现以下特征:防松标记线出现相对滑移,紧固结构在预拉力作用下出现间隙;螺牙表面涂层出现相对磨损(严重时基体材料裸露),螺牙表面微观形貌

呈现圆周滑移磨损痕迹且伴随有局部材料脱落等。

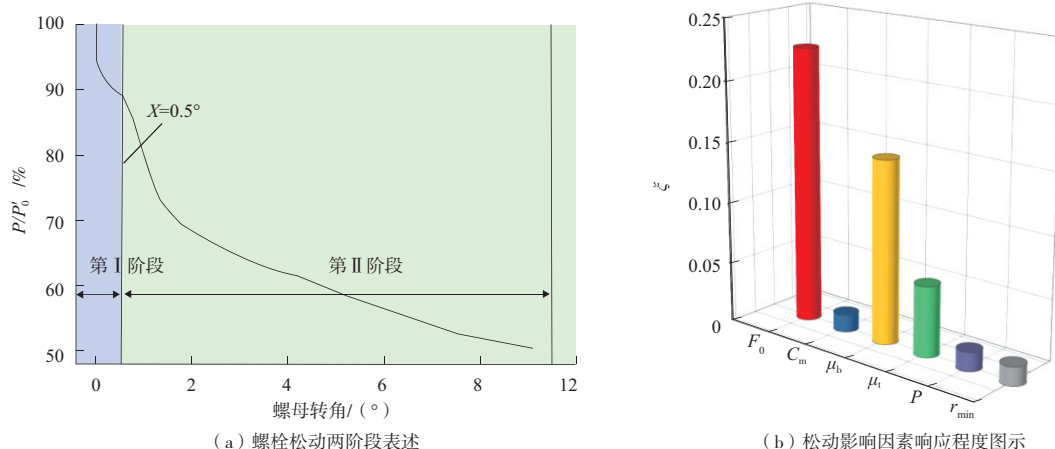


图3 材料与结构松动期图

风电行业当前高频采用的 10.9 级 M36~M45 高强螺栓一般设计预紧力多为其标准屈服强度的 70%~80% (折算强度为 658~752 MPa), 实际由工程运维人员现场采用扭矩扳手或液压拉伸器进行安装预紧, 并加防松垫圈、双螺母等措施保证有效预紧, 涂抹防松标记以便及时检测和维护松动的螺栓。

③加载频率、振幅

研究人员多采用 JUNKER 横向振动试验机研究螺栓松动现象^[44-46], 且国内外标准的适用性明确^[47], 横向载荷致松结论已被证实。部分研究人员也尝试使用电液伺服疲劳试验机进行横向载荷松动测试研究。

研究人员评估横向载荷加载频率对松动的影响为两点: a 基本无影响; b 低频更易致松。姜世霖等^[48]证明螺栓松动与振动频率、加载频次的低关联性, 确定振幅或应力幅是造成螺栓松动失效的主因, 指出不同预紧力损失时的位移-寿命曲线 ($D-N$ 曲线) 和疲劳寿命曲线 ($S-N$) 具有同样的

双直线特性、高低周拐点; HOUSARI 等^[49]通过研究螺距、预紧力、孔间隙、摩擦力、横向激励等因素对松动的影响后指出, 同等载荷幅值下, 载荷频率对螺栓的受力影响较小, 但考虑到频率作用周期范围内的滑动时间, 螺栓在同样的循环次数下预紧力下降会有区别, 低频率测试可能会使螺栓更容易松动 (类似于低频测试时的材料应变释放降低疲劳寿命机制)。同样 YANG 等^[50]通过验证载荷频率 (低频)、振幅的贡献, 指出螺栓的疲劳和松动是先松动后疲劳的协同竞争失效过程 (图 4), 通过实验提出螺栓松动和疲劳失效存在临界值 R (横向载荷/轴向载荷)。 R 较小 (临界值 0.075) 时螺栓易疲劳失效, R 较大时螺栓表现为松动失效, 可根据实际 R 的值来预测组合载荷下螺栓的失效模式, 如图 5 所示。其又研究了联合激励下松动和疲劳的竞争失效关系及其影响因素, 提出了一种准确预测螺栓失效类型的准则, 建立了一种考虑各种影响因素的松动和疲劳竞争失效预测方法。

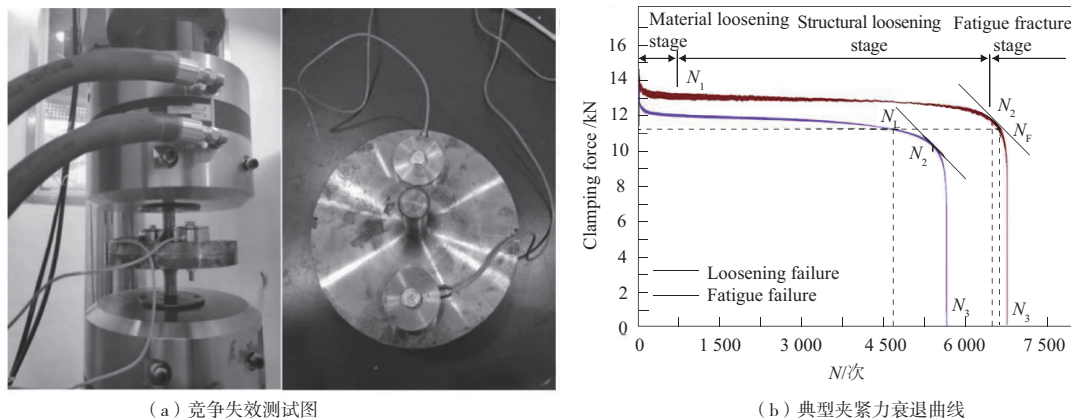


图4 协同竞争失效过程图

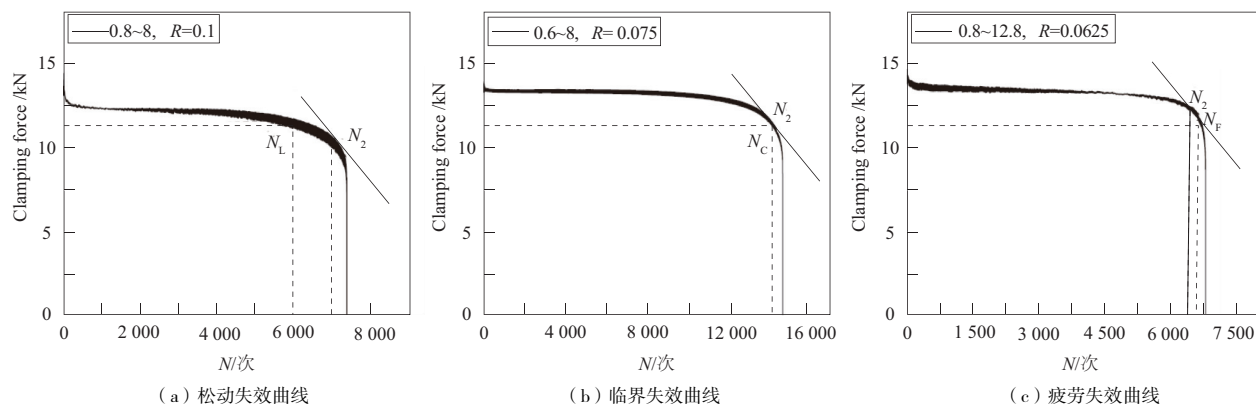


图5 螺栓夹紧力衰退曲线对应的不同失效模式

预紧力、横向载荷、极限应力、振幅是螺栓松动的正相关因素,测试频率对松动的影响较小,但结论不一。当前研究采用仪器的作动频率较低(不大于 50 Hz),研究中仅指出 5 Hz、10 Hz、30 Hz 的频率变化对松动无明显影响,但风电齿轮箱、发电机局部振动频率要远高于此范畴,故高频率(100 Hz)、超高频(1 000 Hz)范围内的影响结果有待重点探究。大型螺栓的防松门槛及松动曲线目前研究相对较少,有待深入探索,保障风电螺栓达到 20~25 年设计寿命。

b) 疲劳

研究人员指出螺栓的疲劳失效部位多为圆角位置(15%)、螺栓 1 阶螺纹位置(20%)、螺栓螺母实际接触的第 1—第 3 阶螺纹位置(65%),且应力顺次下降^[51],如图 6 所示。风电高强螺栓规格多在 8.8~10.9 级 M36 规格以上(M36~M72),因而当前研究人员在对此类超大规格螺栓进行性能研究时,很少直接采用超大吨位试验机对完整螺栓做动态疲劳测试,更倾向于依据研究内容采取

措施降低螺栓的有效承载面积以平衡设备能力,如螺栓比例试样(材料性能研究)、螺栓螺纹区内部中空^[52](螺纹疲劳寿命研究)、螺栓局部取样加工^[53](综合性能研究)等,如图 7 所示。螺栓取样参考行业标准 NB/T 31082《风电机组塔架用高强度螺栓连接副》。对螺栓紧固件的二次加工会破坏螺栓的表面状态,不代表其实际性能,仅适用于实验探索性研究。

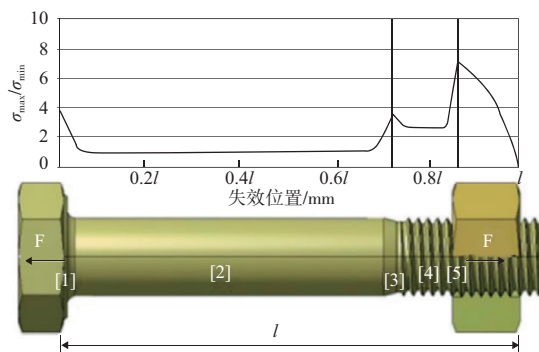
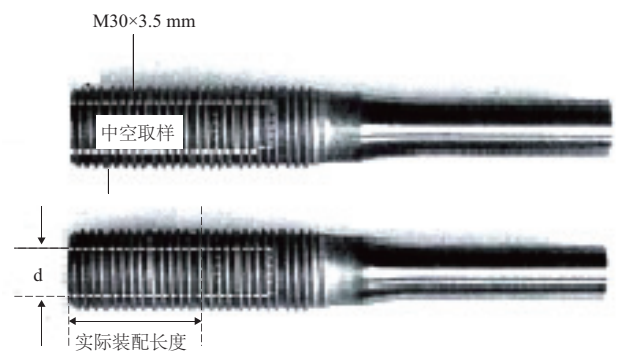
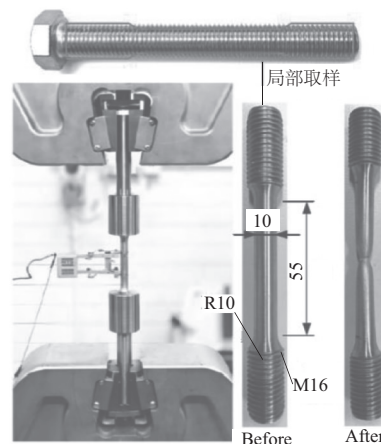


图6 螺栓失效位置及应力比关系图



(a) 螺纹中空试样



(b) 螺栓局部取样加工图

图7 螺栓疲劳测试取样方法图

①载荷形式

高强螺栓轴向载荷和弯曲载荷是造成疲劳失效的主要因素,多数研究通过改装夹具实现轴向载荷的加载。调质钢材料在对称载荷下的疲劳强度和其屈服强度存在约比关系:弯曲载荷($0.44\sigma_b$)大于轴向拉压($0.41\sigma_b$)大于扭转载荷($0.34\sigma_b$)。已有研究验证了载荷的影响^[54],也证实正弦加载下螺栓的疲劳寿命,弯曲载荷大于轴向、弯曲复合载荷大于轴向拉压,且脉冲循环的疲劳寿命有所提高。

②预紧力

螺栓的预紧力起到优先承载工作外加载荷、稳定螺栓内部工作应力的作用,SCHAUMANN 等指出^[55]螺栓的预紧力应至少设定为屈服强度的70%,后续研究人员也陆续验证70%~80%预紧力的适用性^[56]。研究人员归纳了不同预紧力对螺栓疲劳性能的影响^[57-58],指出预紧力不足会破坏结构的连续性(降低结构刚度),过度预紧也易造成螺栓发生早期微动磨损、局部材料失效而恶化疲劳寿命。螺栓预紧力的施加有效性受拧紧速度、拧紧次序、邻近效应、重复拧紧等多因素影响,ZHENG 等^[59]研究表明拧紧速度的阶段性提升有利于提升螺栓的有效预紧力、减小转矩系数(但达到提升上限后影响几乎不变),且顺序拧紧方式较星形交叉拧紧方式的预紧力衰减较为明显,且重复拧紧能有效降低后续预紧力的衰减;另有研究指出不同螺栓的预紧力受温度、摩擦等环境影响的效果不同^[60],螺栓整体的抗蠕变性能与其屈服强度呈正相关、与温度呈负相关关系,同时接触面间的摩擦因数越低时载荷分布趋向均匀,因而强度越高、使用温度相对较低、摩擦因数越小,就越

有利于抑制螺栓的预紧力松弛效应。螺栓预紧力也会在拧紧后的短时间内出现与工艺方法相关的不同程度衰减,罗忠等^[61]通过螺栓转子实验台和残余预紧力实验系统研究 M24 螺栓在转子系统中预紧力的变化规律后,证明了螺栓预紧力在约前10s内的高额衰减效应,并且提出采用星形拧紧、增大目标预紧力的方法可有限抑制螺栓的初始预紧力衰减。

风电塔筒螺栓、发电机与齿轮箱连接螺栓、叶根螺栓、轴承紧固螺栓的工作状态接近转子系统,故结合当前研究结论,风电装备的螺栓应严格控制材料类别、热处理工艺及表面涂层状态,在提升材料抗蠕变性能、抗腐蚀性能的同时改善表面摩擦力,保障材料性能可靠性。同时预紧工艺应采取星形、交叉大力矩预紧(当前风机安装多受限于场地、人员、装备水平等因素而倾向于采用顺序紧固),且安装完成后应以同次序交叉2次预紧的方式来保证关键部位螺栓连接的有效紧固。

③加载频率

高强螺栓加载频率对疲劳寿命的影响颇有争议,国标 GB/T 13682《螺纹紧固件轴向载荷疲劳试验方法》中要求测试频率为4.2~250 Hz(与DIN 969标准建议的频率相同,但后者温度限制为50℃)。目前常用的疲劳试验机按作动频率的高低而被分为:超高频(超声疲劳)疲劳机、高频疲劳机(电磁谐振)、中低频疲劳试验机(电液伺服)、低频疲劳试验机(气动式)^[62],如图8所示。高载荷能力的电液伺服疲劳试验机(灵活变频)、电磁谐振式高频疲劳试验机(随机共振频率)更适用于风电螺栓疲劳测试。

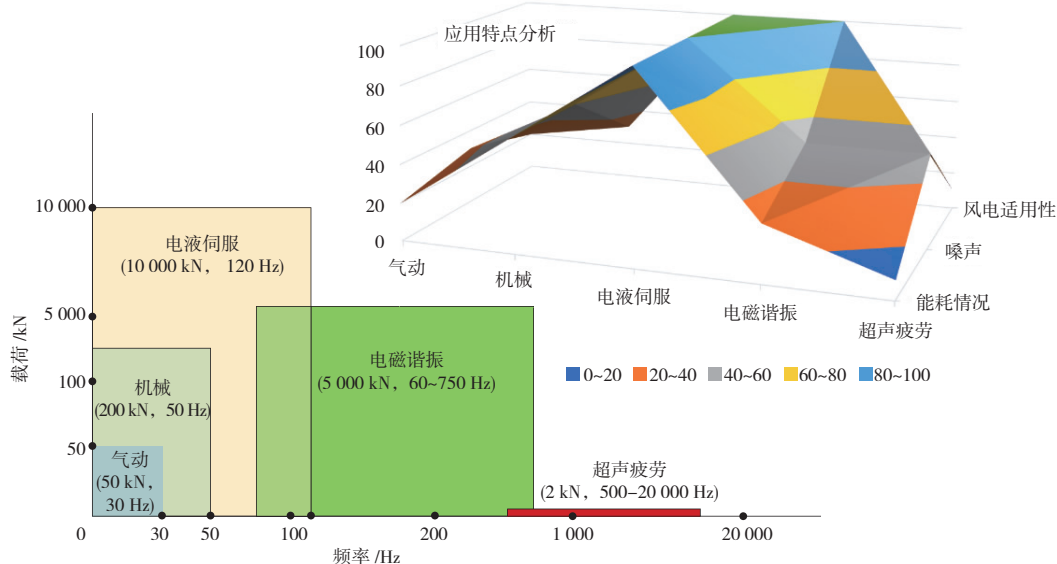


图8 各类疲劳试验机使用频率及适用性示意图

风电螺栓的疲劳寿命一般为 5×10^6 次(高规格为 5×10^7 次),受测试载荷(1 000 kN)的影响,电液伺服和电磁谐振高频疲劳试验机的频率分别为 20 Hz、60 Hz,单根螺栓测试时间分别需 2.9 d、0.97 d,完整 S-N 曲线或疲劳极限评估至少需 14 件样品,测试时间周期长、能量资源消耗大,故研究人员试图通过加快测试频率来实现高性价比的疲劳寿命研究,频率对螺栓疲劳寿命的影响就成为了关键^[63]。

加载频率对材料疲劳寿命的作用体现在两方面:温升(高频、超高频)和应变速度(低频、超低频)。林辉、王桂全等^[64-65]对高强螺栓进行不同频率的测试和仿真分析,发现 10 Hz 以下的频率改变几乎不影响疲劳寿命;高强钢筋、合金钢制抽油杆等部件的测试也证实了 70 Hz 以下部件的疲劳寿命不变;然而有研究证实虽 100~500 Hz 频率变化几乎不影响高强螺栓的疲劳寿命,但 1~5 Hz 超低频时疲劳寿命会因整体应变的有效拓展而呈现不同程度降低,这和部分材料的低频疲劳寿命研究结论保持一致。

童乐为等^[66]对钢结构材料进行频率效应探索后发现,焊接结构件的疲劳寿命会随着频率的增加而显著降低,这可能归结于焊接件的抵抗应变能力差、温升效应相对较为明显;另有研究^[67-68]验证了该实验的结论。中科院力学所的胡远培等^[69]全面揭示不同频率下应变率、温度对疲劳寿命的影响,指出低强度材料的应变速率对疲劳寿命起正向作用(应变强化),高强度材料的应变效应会转化为温升从而恶化材料的疲劳性能(温度弱化)。有研究指出,严格控制样品温度时,1 000 Hz 以下测试对材料的疲劳寿命影响很小^[70],但高频疲劳测试中的温升几乎不可避免。材料超高周疲劳(VHCF)时夹杂物和缺陷对强度的恶化效应会被放大^[71],更易出现与中低频疲劳不同的内部起裂失效。

温升和应变速率是频率影响疲劳寿命的关键,不同阶段的频率加载影响机制不同,存在加载应变强化和温升恶化的竞争关系。不同材料的强度、组织结构各异,如高强材料的抵抗应变能力较强、体心立方金属的位错阻力对温度变化非常敏感、钢材内部组织结构的异化特性、材料内部缺陷和夹杂物状态等,都会导致材料的频率影响效应差异。

风电高强螺栓在机组中应用时的频率较低,国内第三方检测单位多推荐采用低频测试以体现

螺栓的实际工作性能(应用案例),如中钢国检(6~10 Hz)、中机检测(6~10 Hz)、定西高强(10 Hz)等。也有部分单位(上海申光、济南中船、北京机械总院)等考虑利用超大吨位电磁谐振高频疲劳试验机(60~120 Hz)进行螺栓疲劳测试。因而大规格螺栓疲劳寿命的测试数据会有一定差异,建议大批量测试、统计分析高低频疲劳测试数据规律,建立科学的计算模型,保证不同测试的数据统一性。

④ 振幅、应力比

疲劳测试中,最大应力 $\sigma_{\max}$ 和最小应力 $\sigma_{\min}$ 差值的一半为应力幅 $\Delta\sigma$, $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ 为应力比 R 。当平均载荷固定,轴向加载的应力比增大时,极限应力接近,应力幅无限缩小,故应力幅和应力比呈负相关关系;应力比固定时,应力幅和极限应力对疲劳寿命的影响趋势保持一致^[72]。研究人员采用控制变量法研究应力幅和应力比对螺栓疲劳寿命的影响,发现应力比增大,螺栓单位时间内承受应变量增大,疲劳寿命显著降低^[73],其余同类型疲劳测试也是如此^[74]。

2.6 运维防护

风电螺栓常用达克罗防腐,但其涂层较薄,易在运输、安装时受损,因而需涂抹润滑剂来实现装配拆卸顺畅、均匀应力、防腐防锈等功能。国家标准 GB/T 1231《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》中规定螺栓扭矩系数取值为 0.11~0.15,但其会因生产控制工艺、润滑剂的种类及涂抹方式不同而有所差异,扭矩系数的变化影响紧固效果,应关注螺栓不同阶段的扭矩系数变化,以保证紧固、检修加固时的稳定性^[75]。螺栓在安装后因振动、过载会产生松动,需加强螺栓轴向应力实时监测,采取合适防松措施^[76],如双螺母、自锁螺母,并及时进行 2 次拧紧、更换受损螺栓等。智能化的检测、维护机械系统也是今后风电螺栓行业应用的热点。

3 结语

风电高强螺栓疲劳寿命的影响因素较多,改善原材料的洁净度、合理评估载荷状态以优化结构设计,正确装配和维护是保障螺栓可靠应用的根本措施。当前已有的研究方法针对单一因素对疲劳性能的影响机制研究较多,但仍有以下不足之处待探索,可作为风电螺栓研究新方向:1) 风电螺栓多因子载荷耦合状态下的松动与疲劳性能演

变规律的研究较少,个别研究所得结论差异性较大,无法形成有效参考;2)大型风电螺栓仿真分析数据资源丰富,但实际本体的测试研究数据量严重不足,多种规格风电螺栓的精细化、智能化应用需要大量测试数据和研究结论的数据支撑;3)风电螺栓实际工作过程中的轴向应力变化规律研究相对匮乏,无法为工程应用中螺栓的松动及疲劳失效、寿命预测提供数据参考;4)M36以上大规格高强螺栓的松动与疲劳竞争失效机制的研究分析较少,且超大规格、超高强度螺栓的生产工艺、研发设计、性能检测等行业标准不够精确,无法为设计生产提供性能指标参考;5)有待开发新牌号材料和新生产工艺来提升螺栓的综合性能以满足抗疲劳型12.9级及以上超高强度螺栓的使用要求。

参考文献:

- [1] 刘胜祥,宋晓萍,曾毅,等. 随机载荷作用下的风力机高强度螺栓疲劳特性分析[J]. 太阳能学报,2013,34(2):201-206.
- [2] SAMANTARAYS K, MITTAL S K, MAHAPATRA P, et al. Assessing the flexion behavior of bolted rail joints using finite element analysis [J]. Engineering Failure Analysis,2019,104:1002-1013.
- [3] SCHAUMANN P, EICHSTÄDT R. Fatigue assessment of high-strength bolts with very large diameters in substructures for offshore wind turbines [C]//The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA: ISOPE, 2015.
- [4] EICHSTADT R. Fatigue assessment of large-size bolting assemblies for wind turbine support structures [D]. Hannover:Gottfried Wilhelm Leib-niz Universitat, 2019.
- [5] REDONDO R, MEHMANPARAST A. Numerical analysis of stress distribution in offshore wind turbine M72 bolted connections[J]. Metals,2020,10(5):689.
- [6] MUGHRABI H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime[J]. International Journal of Fatigue,2006,28(11):1501-1508.
- [7] 翟彬,刘勇,商文念,等.8.8级M24高强螺栓的常幅疲劳性能试验研究[J]. 工业建筑,2020,50(9):122-127.
- [8] WANG S S, NEJAD A R, MOAN T. On initial design and modelling of a 10 MW medium speed drivetrain for offshore wind turbines [J]. Journal of Physics: Conference Series,2019,1356(1):012024.
- [9] 吕超然. 大尺寸风电螺栓用42CrMo钢淬透性及其力学性能的研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2020.
- [10] 王利军,孔维涛,阮士朋,等.10.9级M36风电螺栓用钢的低温冲击性能研究现状[J]. 机械工程材料,2021,45(4):1-7.
- [11] 钟盛钢,张先鸣. 风电用与钢结构用高强度紧固件的差异[J]. 金属制品,2009,35(6):62-65.
- [12] 庄攀,彭德榜,陈玲,等. 浅析风电叶片高强度螺栓的选材与热处理工艺[J]. 热加工工艺,2019,48(12):175-177.
- [13] 房奇,陈涛,王伟. 高强螺栓疲劳性能研究现状[J]. 结构工程师,2020,36(4):218-225.
- [14] 应华冬. 风电机组桨叶螺栓断裂失效分析及优化[D]. 杭州:浙江大学,2022.
- [15] OECHSNER M, BEYER J, SIMONSEN F, et al. Experimental and analytical assessment of the fatigue strength of bolts with large dimensions under consideration of boundary layer effects [C]//Dusseldorf, Germany: Proceedings of the METEC & European Steel Technology and Application Days, 2015.
- [16] GRIZA S, DA SILVA M E G, DOS SANTOS S V, et al. The effect of bolt length in the fatigue strength of M24×3 bolt studs[J]. Engineering Failure Analysis,2013,34:397-406.
- [17] NODA N A, CHEN X, SANO Y, et al. Effect of pitch difference between the bolt-nut connections upon the anti-loosening performance and fatigue life [J]. Materials & Design,2016,96:476-489.
- [18] KORIN I, PEREZ IPIÑA J. Experimental evaluation of fatigue life and fatigue crack growth in a tension bolt-nut threaded connection [J]. International Journal of Fatigue,2011,33(2):166-175.
- [19] 夏春和. 螺栓圆角滚压强化工艺方法[J]. 机械管理开发,2022,37(9):56-58.
- [20] 袁武华,邓建伟,申庆援,等. 圆角滚压对螺栓残余应力分布及疲劳寿命的影响[J]. 锻压技术,2023,48(1):108-114.
- [21] 赵庆云,程思锐,黄宏. 1240 MPa级Ti-38644高锁螺栓的拉伸疲劳增寿机理[J]. 材料研究学报,2019,33(10):735-741.
- [22] 陈俞廷,王慧. 风机变桨轴承螺栓的疲劳性能研究[J]. 电机技术,2020(2):31-36.
- [23] KANG J, LIU H P, FU D Y. Fatigue life and strength analysis of a main shaft-to-hub bolted connection in a wind turbine[J]. Energies,2018,12(1):7.
- [24] 王文涛,高扬,王巍麟. 新建风电机组高强螺栓金属监督检查发现的问题及对策[J]. 山西电力,2022(3):23-25.
- [25] PESSOAD F, KIRCHHOFF G, ZIMMERMANN M. Influence of loading frequency and role of surface micro-defects on fatigue behavior of metastable austenitic stainless steel AISI 304 [J]. International Journal of Fatigue,2017,103:48-59.
- [26] 赵全育,梁嘉俊,陈旭鹏,等. 42CrMo钢六角头螺栓热镀锌裂纹分析[J]. 金属热处理,2023,48(1):

- 257-260.
- [27] 陈庆伟,谢丹,马辉,等. 腐蚀后 M24 高强度螺栓疲劳性能试验[J]. 科学技术与工程,2022,22(30):13417-13423.
- [28] 张先鸣. 高强度螺栓低温冲击性能的研究[C]//2015 金属制品行业技术信息交流会论文集. 青岛:全国金属制品信息网,2015:148-152.
- [29] BENHADDOU T, CHIROL C, DAIDIE A, et al. Pre-tensioning effect on fatigue life of bolted shear joints[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 36:36-43.
- [30] MÍNGUEZ J M, VOGWELL J. Effect of torque tightening on the fatigue strength of bolted joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(8):1410-1421.
- [31] 李瑞,马恒,周相海,等. 平均应力对 6.8 级螺栓材料的高周疲劳行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2019,40(4):62-67.
- [32] 刘丹,张继亮,刘勇,等. 应力比对高强螺栓常幅疲劳性能影响分析[J]. 中国科技论文,2021,16(10):1068-1073,1079.
- [33] JUNKER H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States;SAE International,1969:314-335.
- [34] YANG L, YANG B, YANG G W, et al. Analysis of competitive failure life of bolt loosening and fatigue[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129:105697.
- [35] BADRKHANI AJAEI B, SOYOZ S. Effects of preload deficiency on fatigue demands of wind turbine tower bolts[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 166:105933.
- [36] JIANG X J, ZHU Y S, HONG J, et al. Investigation into the loosening mechanism of bolt in curvic coupling subjected to transverse loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32:360-373.
- [37] YAMAMOTO A, KASEI S. Investigations on the self-loosening of threaded fasteners under transverse vibration[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1977, 43:1069-1074.
- [38] LIU J H, OUYANG H J, FENG Z Q, et al. Self-loosening of bolted L-stub connections under a cyclic separating load[J]. Wear, 2019(426/427):662-675.
- [39] 于泽通,刘建华,张朝前,等. 轴向交变载荷作用下螺栓联接结构的松动试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015,35(6):732-736.
- [40] NOVOSELAC S, KOZAK D, ERGIC T, et al. Fatigue damage assessment of bolted joint under different preload forces and variable amplitude eccentric forces for high reliability[C]//Fracture at all Scales. Cham: Springer, 2017:239-268.
- [41] 王永和. 风力发电机螺栓预紧力松弛及预测方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2022.
- [42] JIANG Y Y, ZHANG M, PARK T W, et al. An experimental study of self-loosening of bolted joints[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(5):925-931.
- [43] ZHU L B, BOUZID A H, HONG J. Numerical and experimental study of elastic interaction in bolted flange joints[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2017, 139(2):021211.
- [44] ECCLES W, SHERRINGTON I, ARNELL R D. Towards an understanding of the loosening characteristics of prevailing torque nuts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(2):483-495.
- [45] JIANG Y Y, ZHANG M, LEE C H. A study of early stage self-loosening of bolted joints[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(3):518-526.
- [46] NASSAR S A, HOUSARI B A. Study of the effect of hole clearance and thread fit on the self-loosening of threaded fasteners[C]//Design Engineering and Computers and Information in Engineering, Parts A and B. Chicago, Illinois, USA:ASME/EDC, 2006.
- [47] 周思琪,张建军. 常见紧固件横向振动试验方法[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(1):84-85, 94.
- [48] 姜世霖,阳光武,肖守讷,等. 螺栓松动寿命特性试验研究[J]. 机械强度, 2019, 41(5):1060-1065.
- [49] HOUSARI B A, NASSAR S A. Effect of thread and bearing friction coefficients on the vibration-induced loosening of threaded fasteners[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2007, 129(4):484-494.
- [50] YANG L, YANG B, YANG G W, et al. Research on factors affecting competitive failure between loosening and fatigue of bolt under combined excitation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189:107110.
- [51] LOCHAN S, MEHMANPARAST A, WINTLE J. A review of fatigue performance of bolted connections in offshore wind turbines[J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 17:276-283.
- [52] 杨阳. 风电连接螺栓疲劳性能及其失效分析[D]. 大连:大连海事大学,2015.
- [53] WANG J, UY B, LI D X, et al. Fatigue behaviour of stainless steel bolts in tension and shear under constant-amplitude loading[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133:105401.
- [54] SCHAUMANN P, MARTEN F. Fatigue resistance of high strength bolts with large diameters[C]//Proceedings of the International Symposium for Steel Structures. Seoul, Korea: ISSS, 2009.
- [55] SCHAUMANN P, EICHSTÄDT R. Fatigue strength of preloaded hot-dip galvanized bolt assemblies with very

- large diameters [M]//Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. Taylor & Francis Group, Boca Raton: CRC Press, 2016: 578-583.
- [56] BARTSCH H, HOFFMEISTER B, FELDMANN M. Investigations on the fatigue behavior of end plate connections with prestressed bolts [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 19: 395-404.
- [57] 乔乔, 李晓秀, 周江伟, 等. 螺栓连接预紧力对结构疲劳性能的影响[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(3): 166-172.
- [58] AJAEI B B, SOYOZ S. Effects of preload deficiency on fatigue demands of wind turbine tower bolts[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 166: 105933.
- [59] ZHENG M P, LIU Z F, YAN X, et al. Initial losing behavior of pre-tightening force for threaded fastener during repeated tightening [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134: 106021.
- [60] 黄华, 王永和, 魏泰, 等. 摩擦和常温蠕变对风电螺栓预紧力松弛的敏感性分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 289-296.
- [61] 罗忠, 石宝龙, 张小霞, 等. 拧紧工艺的螺栓连接结构预紧力变化规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 215-222.
- [62] 马磊. 压电式高频微小载荷疲劳试验机研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [63] LI J K, LIU Y J, WANG Q Y, et al. Effect of temperature and loading frequency on the fatigue behavior of Ti-17 [J]. Key Engineering Materials, 2015, 664: 131-139.
- [64] 林辉, 徐升桥. 加载频率对高强钢筋疲劳试验的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(2): 89-93.
- [65] 王桂全. 高低频率对钢制抽油杆条件疲劳强度的影响及其确定方法[J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(8): 42-44.
- [66] 童乐为, 袁一鑫, 牛立超, 等. 荷载频率对结构钢及其焊接节点疲劳寿命的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 1-7.
- [67] MILOŠEVIĆ I, RENHART P, WINTER G, et al. Validation of a new high frequency testing technique in the VHCF regime - Fatigue properties of a 42CrMoS4 and X5CrNiCuNb16-4 steel [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 112: 198-205.
- [68] 衣鸿飞, 鲁连涛, 张继旺, 等. 加载频率对钢铁材料超长寿命疲劳性能的影响[J]. 机械, 2011, 38(9): 69-72.
- [69] 胡远培, 洪友士. 加载频率对高强钢超高周疲劳行为的影响[C]//第三届中国超高周疲劳学术会议摘要集. 成都: [出版者不详], 2016: 34.
- [70] SCHNEIDER N, BÖDECKER J, BERGER C, et al. Frequency effect and influence of testing technique on the fatigue behaviour of quenched and tempered steel and aluminium alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 93: 224-231.
- [71] BERCHTOLD M, KLOPFER I. Fatigue testing at 1 000 Hz testing frequency [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 18: 532-537.
- [72] 杨旭, 王亚兵, 雷宏刚. 不同应力幅下高强螺栓的疲劳破坏特征研究[J]. 太原理工大学学报, 2016, 47(2): 239-243.
- [73] 焦晋峰, 贾朋朋, 刘勇, 等. 临界应力比下 M24 高强螺栓的常幅疲劳性能试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(6): 749-755.
- [74] LIU Y Z, CHEN J, ZHANG X F, et al. Fatigue behaviour of blind bolts under tensile cyclic loads [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 16-27.
- [75] MEHMANPARAST A, LOTFIAN S, VIPIN S P. A review of challenges and opportunities associated with bolted flange connections in the offshore wind industry [J]. Metals, 2020, 10(6): 732.
- [76] 周震. 螺栓防松方法在风电领域中的应用[J]. 科技传播, 2011, 3(17): 132-133.

收稿日期: 2023-08-14

(上接第 25 页)

- [10] 王玲玲, 王坤杰, 张小龙, 等. 高温氧化及颗粒冲蚀对 C/C-SiC 复合材料使用性能的影响[J]. 航空材料学报, 2022, 42(4): 75-82.
- [11] 陈伟华, 王丽燕, 张晗翌, 等. 高温空气下 C/SiC 复合材料力学性能测试[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(6): 26-32, 48.
- [12] 孙佳佳, 赵飞, 刘显刚, 等. SiC 及其复合材料氧化行为研究进展[J]. 耐火材料, 2020, 54(6): 469-476.
- [13] 王振剑. 氧化环境下陶瓷基复合材料力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [14] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 航空制造技术, 2003, 46(1): 24-32.
- [15] 杨成鹏, 矫桂琼, 王波, 等. 2D-C/SiC 复合材料的氧化损伤及刚度模型[J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 175-181.

收稿日期: 2023-10-11