

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.017



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 风电塔筒环法兰连接结构型高强铆钉的疲劳特性

樊轲<sup>1</sup>, 戴靠山<sup>1</sup>, 衡俊霖<sup>2</sup>, 王睿<sup>3</sup>, 廖光明<sup>1</sup>

(1. 四川大学 土木工程系, 成都 610065; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518000;  
3. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 结构型高强铆钉具有预紧力稳定、防松性能优异、抗疲劳和抗延迟断裂能力强等优点, 有望取代目前风电塔筒环法兰连接采用的高强螺栓, 但其在法兰中的疲劳性能尚待相关研究检验。针对采用结构型高强铆钉的环法兰连接, 开展对照性模型疲劳试验和精细化数值分析, 探究其疲劳特性与劣化机理。基于环法兰荷载传递特征, 在静载拉伸试验的基础上, 开展 12 件模型试件的疲劳试验, 包含高强螺栓和高强铆钉试件各 6 件; 结合基于局部应变的 SWT 疲劳评价方法, 开展精细化多尺度有限元分析。结果表明: 两类试件的疲劳失效均易见于第一扣螺纹处; 在 200 万次加载循环下, 高强铆钉试件的平均等效疲劳强度为 68.9 MPa, 较高强螺栓的 52.1 MPa 提高约 32.2%; 由于高强铆钉与套环间的螺纹更加平缓且内、外螺纹间接触面积更大, 更能有效降低螺纹根部应力集中, 提升抗疲劳性能。对采用结构型高强铆钉的环法兰连接进行疲劳验算时, 铆钉疲劳强度等级可取为 FAT 56, 配合指数常数  $m=3$ 。

**关键词:** 风电塔筒; 环法兰连接; 结构型高强铆钉; 高强螺栓; 疲劳性能; 模型试验; 数值分析

**中图分类号:** TU391    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-6717(2025)02-0151-11

## Fatigue feature of structural high-strength rivets in ring flange connections of wind turbine towers

FAN Ke<sup>1</sup>, DAI Kaoshan<sup>1</sup>, HENG Junlin<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>3</sup>, LIAO Guangming<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518052, Guangdong, P. R. China; 3. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** The structural high-strength (HS) rivet demonstrated advantages including preload stability and excellent resistance to loosening, fatigue and delayed fracture. Thus, the HS rivet has become a promising alternative to the HS bolt currently used in the ring-flange connection of wind turbine towers. However, relevant studies are still lacked and required on the fatigue performance of HS rivets in ring-flange connections. In the work, comparative model fatigue tests and refined numerical analysis were conducted on the ring-flange connection with HS rivets, in order to investigate its fatigue feature and deterioration mechanism. Firstly, based

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51878426, 52208182); 科技部重点研发计划(2022YFE0113600); 德阳揭榜挂帅项目(2021JBZ002)

作者简介: 樊轲(1999-), 男, 主要从事风电连接的疲劳性能研究, E-mail: 1056229776@qq.com

衡俊霖(通信作者), 博士, 副研究员, E-mail: j.heng@szu.edu.cn

Received: 2022-11-15

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 51878426, 52208182); MOST Key Research and Development Plan (No. 2022YFE0113600); Research Program of Deyang Science and Technology Office (No. 2021JBZ002)

**Author brief:** FAN Ke (1999-), main research interest: fatigue performance of wind power connection, E-mail: 1056229776@qq.com.  
HENG Junlin (corresponding author), PhD, research associate professor, E-mail: j.heng@szu.edu.cn.

on the load transfer feature of ring flange connections, model fatigue tests of twelve specimens were conducted after the static tensile test. The tested twelve specimens included six with HS rivets and six with HS bolts. Further, multi-scale finite element analysis was performed with refined models, in accordance with the local strain-based SWT fatigue evaluation approach. According to the result, the first engaged thread of rivets/bolts is prone to fatigue failure in both the two types of specimens. Under the 2 million loading cycles, the equivalent fatigue strength of HS rivet specimens shows a mean value of 68.9 MPa, which increases by 32.2% compared with the value (52.1 MPa) of HS bolt specimens. The stress concentration at the root of the threads could be effectively mitigated due to the flattened thread and the increased contact area of inner-outer threads between the sleeve ring and HS rivet. Consequently, the fatigue performance of HS rivets is enhanced. As above, this study suggested that in the fatigue check of ring-flange connections with structural HS rivets, the fatigue strength of HS rivets could be determined as FAT 56, in accordance with the power constant of  $m = 3$ .

**Keywords:** wind turbine tower; ring flange connection; structural high-strength rivet; high-strength bolt; fatigue performance; model test; numerical analysis

风力发电作为一种重要清洁能源,具有技术成熟、风险小、成本低且规模效益显著的特点<sup>[1]</sup>,随着2030年“碳达峰”、2060年“碳中和”战略目标的提出<sup>[2]</sup>,风力发电得到广泛关注和普遍应用<sup>[3-4]</sup>。为提高和稳定产能,风电机组渐趋大型化,导致运营荷载和叶轮尺寸显著提升<sup>[5]</sup>,其下部支撑塔筒高度和截面也随之增长。特别地,塔筒环法兰连接具有偏心受力特征,机组运行产生的交变荷载将不同程度地传递至法兰连接螺栓处,诱发其松弛和疲劳失效<sup>[6-7]</sup>。随着在役风机的数目和服役年限持续增长,法兰连接螺栓的长期劣化问题日益突出,已经出现一系列由于连接螺栓松弛、疲劳等造成的安全事故工程案例<sup>[8-9]</sup>。

通常,高强度螺栓的初始预紧力存在较大不确定性,且在机组运营过程中极易出现松弛,需要人工定期检查和维护,无法适应未来深远海风电技术发展<sup>[10]</sup>。Seidel等<sup>[11]</sup>研究了法兰受载与螺栓应力之间的关系,建立了两者之间的传递关系曲线,指出法兰受到的循环荷载会传递到连接螺栓处而导致疲劳破坏。翟伟廉等<sup>[12]</sup>对不同法兰螺栓松动损伤条件下的输电塔结构等效简化建模分析,发现法兰螺栓松动会引起法兰节点的刚度折减。陈凯<sup>[13]</sup>建立了简化的等效风电塔整体模型,研究螺栓松动对塔顶位移和法兰间隙宽度及塔筒动力特性的影响规律。此外,由于内外螺纹之间配合公差的存在,高强螺栓连接结构螺栓和螺母配合位置存在间隙,腐蚀物质易从螺纹间隙处进入螺纹处,引发氢致延迟断裂<sup>[14-15]</sup>。风电塔筒工作场地偏远、服役环境恶劣,其高强螺栓连接所面临的松弛、疲劳、延迟断裂等问题突出,相应的行业痛点亟待解决。

作为一种新型连接形式,结构型高强度铆钉

(简称“高强铆钉”)具有更好的轴力一致性、优异的防松性能以及更强的抗疲劳性能<sup>[16]</sup>。高强铆钉连接采用径向挤压套环的安装方式,消除了铆钉和套环之间的间隙,在腐蚀环境下,外界的腐蚀物质无法进入铆钉和套环配合部位,大大降低了连接结构发生氢致延迟断裂的概率<sup>[17]</sup>。现阶段,高强铆钉已成功应用于航空航天<sup>[18-20]</sup>、铁道车辆<sup>[21]</sup>、桥梁<sup>[22]</sup>等特种领域。张天雄等<sup>[23]</sup>对高强度不锈钢短尾高强铆钉进行了材料单轴拉伸试验、单钉预紧力测量试验,结果表明,高强铆钉预紧力更高且松弛幅度极小。王永岩等<sup>[24]</sup>对机车用高强铆钉紧固件进行疲劳试验研究,建立了该类紧固件的疲劳强度模型。王中兴<sup>[25]</sup>对高强铆钉连接的铝合金T型件进行拉伸试验,分析了其极限承载力与变形能力,揭示了高强铆钉在不同荷载组合作用下的破坏模式。张钦等<sup>[26]</sup>进行了单钉试验对比和多钉连接的节点疲劳性能对比试验,结果表明,在相同受力情况下,高强铆钉的疲劳性能明显优于高强螺栓。

综上可知,随着风电建设的持续推进,其支撑塔筒环法兰连接中高强螺栓存在的易松弛、疲劳和延迟断裂等劣化问题日益凸显,阻碍了风电技术进一步发展。作为传统高强螺栓的有力升级替代品,高强铆钉能够从机理层面有效克服松弛和延迟断裂问题,其有效性已在高铁列车、高层建筑和桥梁等领域得到初步验证,但在风电领域尚缺乏相关试验研究以及支撑其进一步工程应用。基于此,笔者针对采用结构型高强铆钉的风电塔筒环法兰连接,在静载拉伸试验的基础上,开展对照性模型疲劳试验和精细化数值分析,探究其疲劳特性与劣化机理,提出相关工程建议。

# 1 试验概况

## 1.1 试件设计

为尽可能以最小试验成本真实模拟连接螺栓处的边界条件,依据某特大型风电塔筒设计方法,参考相关法兰试验模型设计<sup>[27-29]</sup>,结合环法兰受力特征<sup>[30-31]</sup>,以螺栓为中心,将其环向分割为宽100 mm的受力节段,设计如图1所示的1:2缩尺模型试件。其中,法兰材质为Q345D钢,采用机械加工一体成型,其根部倒角半径为5 mm。连接螺栓选择M20规格,等级为10.9级,杆长为110 mm。栓孔采用铣削加工成型,其尺寸满足《紧固件螺栓和螺钉通孔》(GB 5277—85)<sup>[32]</sup>的中等装配精度要求,直径为22 mm。同时,根据疲劳试验机端头与试件的连接方式,如图2(a)所示,设计了如图2(b)所示的填板作为工装,其材质为同等级的Q345D钢,板厚40 mm,末端由机械加工形成36 mm直径的细压螺纹段(螺距1 mm),以便于与疲劳试验机作动器直接相连。

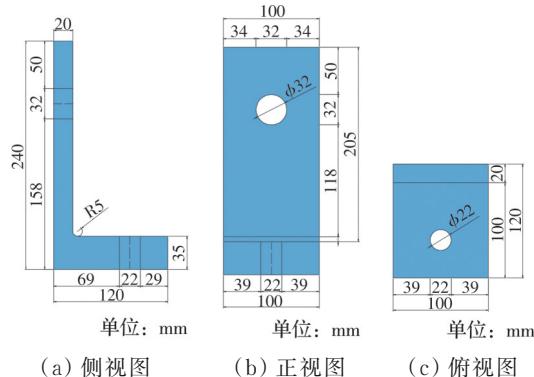


图1 环法兰模型试件尺寸

Fig. 1 Configuration of model specimens for ring flanges

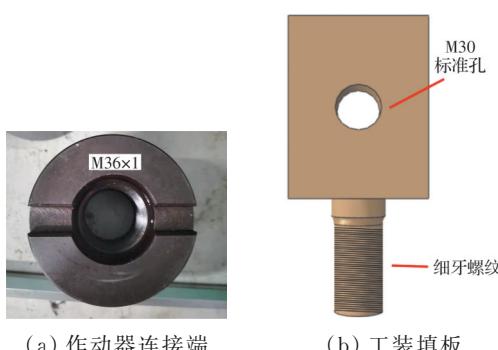


图2 模型试件固定工装

Fig. 2 Fix clamping for model specimens

## 1.2 材性试验

试验采用的高强螺栓为10.9级M20钢结构用大六角头螺栓,高强铆钉采用与高强螺栓同规格等级。为检验高强螺栓材料与高强铆钉的静力性能,选用本次试验的同批次试件,根据《金属材料拉

伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[33]</sup>,测得其基本力学性能,如表1所示。在疲劳试验前,对每个高强度螺栓和高强铆钉试件进行详细的表观检查,确保螺纹处无肉眼可见的初始缺陷。

表1 高强螺栓与高强铆钉的基本力学性能实测值

Table 1 Mechanical properties of high strength bolt material and high-strength Rivet

试件	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	屈服强度 $R_p 0.2/\text{MPa}$	伸长率 $A_t/\%$	断面收缩率 $Z/\%$	弹性模量 $E/\text{GPa}$
高强螺栓	1 133	987	15	55.1	206
高强铆钉	1 180	1 080	14	59.8	210

## 1.3 试验方案

由于环法兰在螺栓预紧力作用下的偏心受力特性,筒壁荷载 $Z_s$ 与螺栓力 $F_t$ 间存在较强的非线性关联,通常可采用“传递函数”(Load Transfer Function, LTF)<sup>[34]</sup>表征。通过该传递函数,可实现依据塔筒荷载测算螺栓荷载,从而确定疲劳应力幅。为提高加载效率,试验采用长春仟邦QBG-300疲劳试验机进行高频加载(约100 Hz)。由于难以通过常规应变测量方法直接测量试件应力幅,因此,在正式开展模型疲劳试验前,对模型试件开展拉伸试验和数值仿真模拟,以建立有效的 $Z_s$ - $F_t$ 传递函数关系,实现基于作动器加载力的疲劳应力幅推导。

模型试验加载如图3所示。根据某实际5 MW风机塔筒技术设计方案,选取20 m/s额定风速下的对应换算法兰力,为提高加载效率,在浮动调整的基础上等效放大法兰力,确定试验采用的法兰加载上下限,方案如表2所示。对于采用高强螺栓的常规环法兰模型,考虑到已有大量相关疲劳试验结果和较为成熟的设计验算曲线<sup>[35-37]</sup>,仅固定单个应力幅进行加载测试。同时,如前述分析,采用新型高强铆钉的环法兰相关研究尚未开展,故依据传递函数选取不同荷载上、下限进行测试,以期初步建立其设计疲劳验算曲线。



图3 模型试件加载

Fig. 3 Loading of model specimens

表 2 模型疲劳试验加载方案

Table 2 Loading prototype of model fatigue tests

试件编号	最大法兰力/kN	最小法兰力/kN
HS-1~ HS-6	65	50
HR-1	60	40
HR-2	75	60
HR-3	80	65
HR-4	85	70
HR-5	90	75
HR-6	95	80

#### 1.4 量测方案

高强螺栓设计预紧力取 155 kN, 装配预紧力取设计值的 1.1 倍<sup>[38]</sup>, 即 170 kN。根据出厂报告, 高强螺栓扭矩系数为 0.2, 相应地可确定其施拧扭矩为 680 N·m。高强铆钉保持与高强螺栓试件一致的设计和装配预紧力, 采用厂商提供的便携式液压铆钉枪直接进行张拉。在通过铆枪卡爪拉拔钉杆张拉至设计预拉力后, 通过其前端夹紧机构挤压套环, 实现钉杆环状独立螺纹与套环间的密贴装配。

静载试验中, 在法兰背面安装应变片监测法兰受力, 同时, 利用压力环传感器实时测量螺栓内力变化, 如图 4 所示。静载每 10 kN 为一级, 直到螺栓应力达到其屈服强度的 80%。为准确测量螺栓力, 在栓杆或钉杆距栓/钉头 20 mm 处径向打磨出凹槽, 将深度控制在 1 mm 以内, 在打磨处进行充分磨光抛光, 从而尽最大可能避免加工造成的初始缺陷, 将应变片轴向对称粘贴其中<sup>[39]</sup>, 如图 5 所示。此外, 对于用于疲劳加载测试的模型试件, 试验中未进行打磨和应变片安装, 以避免额外加工引起的潜在初始缺陷, 实现对螺栓预紧力和静载响应更有效的监测与校核。

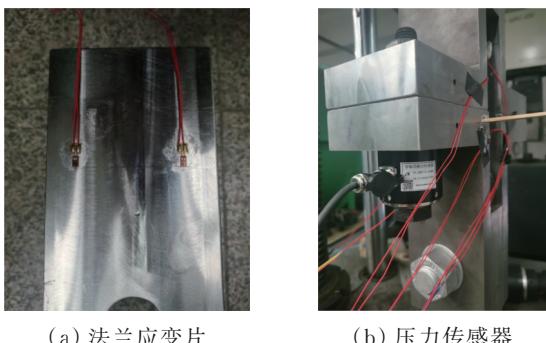


图 4 静载量测方案

Fig. 4 Instrument scheme of static test

在静力拉伸试验加载过程中, 通过安装电子式千分位移计, 如图 6 所示, 对上、下法兰根部处相对位移进行连续监测, 实时记录每一级荷载下的法兰根部位移。



图 5 螺栓应变片布设

Fig. 5 Deployment of strain gauge on bolts



图 6 试验位移计布置

Fig. 6 Deployment of test displacement meter

## 2 试验结果分析

### 2.1 断口形貌分析

针对试验中高强螺栓与高强铆钉的疲劳破坏断口形貌, 从宏观和细观层面进行分析, 探究法兰连接中高强螺栓与高强铆钉的疲劳破坏特征。

高强螺栓宏观失效模式如图 7 所示。除试件 HS-4 在螺纹终止线处发生疲劳断裂外, 其余 5 个试件均在螺栓与螺母相接触的第一扣螺纹根部发生疲劳断裂。同时可看出, 由于螺栓同时承受弯曲和轴向荷载, 破坏的试验螺栓杆整体呈现轻微弯曲, 且裂纹萌生于弯曲受拉侧。类似地, 高强铆钉宏观失效模式如图 8 所示。其中, 除试件 HR-6 在钉头底部发生疲劳开裂外, 其余试件中疲劳裂纹均源于套环与铆钉相接触的第一扣螺纹处。

高强螺栓宏观断面如图 9 所示。可以看出, 其断面可大致分为 3 部分: 疲劳裂纹源、裂纹扩展区和瞬断区。所有试件中疲劳裂纹均萌生于螺纹的根



(a) 断裂位置 1

(b) 断裂位置 2

图 7 高强螺栓疲劳破坏位置

Fig. 7 Fatigue failure location in high-strength bolt

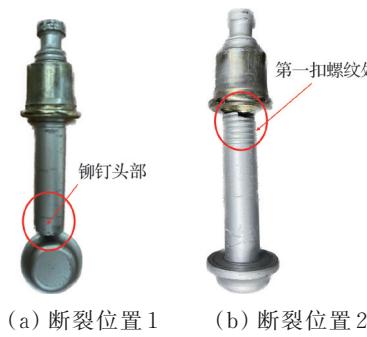


图8 高强铆钉疲劳破坏位置

Fig. 8 Fatigue failure location in high-strength rivet

部表面,且存在两个或多个裂纹源。疲劳裂纹由中心逐步向螺栓内侧扩展,其扩展区的断面总体较光滑、颜色较明亮,占断口面积一半左右。当裂纹扩至约50%直径处时,螺栓骤然断裂,瞬断区有明显的剪切唇特征,且断口较锋利。高强铆钉宏观断面如图10所示,相比高强螺栓试件,高强铆钉试件的断裂韧性有所提高,没有出现像高强螺栓那样的多个裂纹萌生点,破坏断面整体更为平整光滑,裂纹扩展区的面积相比高强螺栓更大,裂纹的扩展面倾

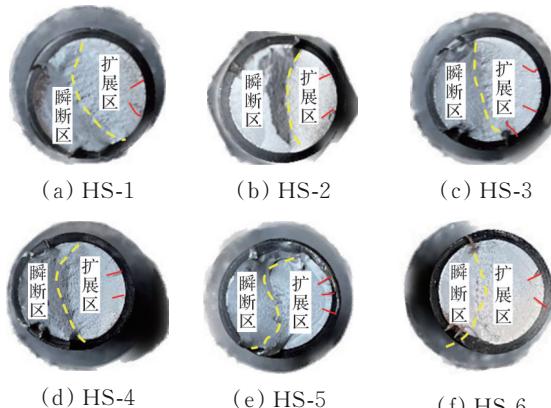


图9 高强螺栓疲劳破坏宏观断口形貌

Fig. 9 Fractography of high-strength bolts



图10 高强铆钉疲劳破坏宏观断口形貌

Fig. 10 Fractography of high-strength rivet

斜角度较小,基本和螺纹在同一平面,瞬断区高度相对较低,约为一个螺距高度,瞬断区面积相对较小。

## 2.2 传递函数与法兰根部位移

利用静载拉伸试验获得各组试件的法兰根部位移,如图11所示。随着法兰力的增长,法兰根部位移呈非线性增长,当法兰力达到80 kN时,法兰根部位移约0.7 mm,连接螺栓应力约达到屈服强度的80%。总体上,高强螺栓的根部位移与高强铆钉的根部位移区间接近,但高强铆钉位移略低。如前述分析,高强铆钉与套环间采用挤压一体成型,有效消除了两者间装配间隙,从而略微降低了其静载拉伸试验中所产生的拉伸变形量。虽然两类试件的法兰根部位移略有差异,但其所处区间的重叠程度较高,表明两种模型法兰的结构刚度一致性较强,传递函数较为接近。

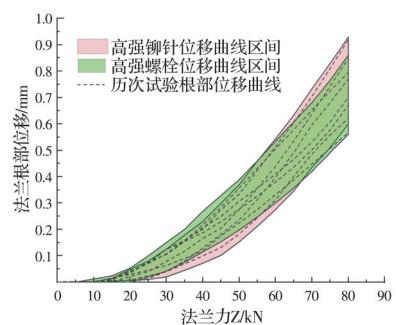


图11 模型法兰根部位移

Fig. 11 Root displacement of flange model

进一步地,采用有限元分析系统ABAQUS建立模型试件的3D有限元模型,如图12所示,模型采用空间三维缩减积分实体单元C3D8R来模拟,选取4 mm全局网格尺寸,试件下侧填板与试验机工装相连,故有限元模型采取固定约束,同时限制位移与转角。试件上侧填板固定在试验机作动头,模型通过设置参考点对其顶面施加集中力,以模拟试验机拉力。此外,在正式加载前,通过初始应变法对

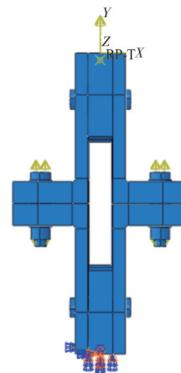


图12 试件的3D有限元模型图

Fig. 12 3D Finite element model of specimens

螺栓施加预紧荷载。螺栓材料属性采用表1数据,钢材和高强螺栓的本构关系模型采用双折线模型,满足Mises屈服准则,泊松比取0.3。

通过静载试验测量两组传递函数,同时与有限元预测值进行对比分析,如图13所示。可以看出,由于试件加工与装配的一致性较好,两次实测传递函数离散性相对缓和,且以有限元预测值为中心小幅波动,表明有限元精细仿真在传递函数预测中的有效性。因此,为解决模型疲劳中螺栓应力幅难以直接量测的问题,采用有限元预测值,依据作动器加载力直接重构螺栓荷载。

### 2.3 疲劳试验结果

共测试12个模型试件,包含高强螺栓法兰模型和高强铆钉法兰模型各6件。当试件中单侧螺栓或

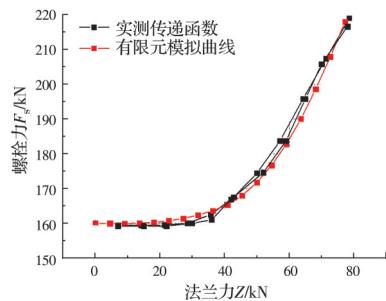


图13 传递函数实测值与有限元预测值对比

Fig. 13 Comparison between measured load transfer function and prediction by finite element methods

铆钉出现疲劳断裂时,即认为试件失效而终止试验,此时的荷载循环次数即认为是疲劳寿命。表3、表4分别给出了高强螺栓和高强铆钉试件的疲劳模型试验结果和相关统计分析值。

表3 高强螺栓模型疲劳试验结果

Table 3 Fatigue test results of high-strength bolt models

试件编号	最大螺栓力/kN	最小螺栓力/kN	试验应力幅/MPa	试验寿命/万次	等效疲劳强度/MPa	等效疲劳强度统计值/MPa
HS-1	191.5	170.3	86.5	68.7	60.6	平均值 $\mu = 52.1$
HS-2	191.5	170.3	86.5	50.6	50.7	标准差 $\sigma = 6.71$
HS-3	191.5	170.3	86.5	66.4	59.9	特征值 $\mu - 2\sigma = 38.7$
HS-4	191.5	170.3	86.5	26.0	43.8	
HS-5	191.5	170.3	86.5	28.0	44.9	变异系数 $\frac{\sigma}{\mu} = 0.17$
HS-6	191.5	170.3	86.5	36.0	48.8	

表4 高强铆钉模型疲劳试验结果

Table 4 Fatigue test results of high-strength rivet models

试件编号	最大螺栓力/kN	最小螺栓力/kN	试验应力幅/MPa	试验寿命/万次	等效疲劳强度/MPa	等效疲劳强度统计值/MPa
HR-1	180.5	159.9	80.8	105.0	65.18	平均值 $\mu = 68.9$
HR-2	205.8	180.5	992.0	85.0	74.58	标准差 $\sigma = 4.85$
HR-3	214.6	187.8	105.1	73.0	75.11	特征值 $\mu - 2\sigma = 59.2$
HR-4	225.1	195.9	114.5	47.5	70.91	
HR-5	236.6	205.8	120.8	28.6	63.17	变异系数 $\frac{\sigma}{\mu} = 0.07$
HR-6	248.8	214.5	134.5	22.0	66.44	

为直观对比见,依据S-N曲线的对数准则,以200万次循环为基准进行等效疲劳强度换算,如式(1)所示。

$$\Delta\sigma_{eqv} = \sqrt[m]{\Delta\sigma_R^m \cdot \frac{N_R}{N_{eqv}}} \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma_{eqv}$ 为200万次等效疲劳强度,简称为等效疲劳强度; $\Delta\sigma_R$ 和 $N_R$ 分别为实际加载应力幅和对应荷载循环次数; $m$ 为S-N曲线的指数常数,取 $m=3$ ; $N_{eqv}$ 为等效循环次数,取 $N_{eqv}=2 \times 10^6$ 。

可以看出,高强螺栓在200万次的平均等效疲劳强度为52.1 MPa,而高强铆钉的相应疲劳强度为68.9 MPa,提高约32.2%。同时,两类试件的疲劳寿命均存在一定离散性,且高强铆钉试件的离散性相对较小。以等效疲劳强度的变异系数计,高强铆

钉为0.07,较高强螺栓的0.13,显著降低约46.2%。

进一步地,采用 $\mu - 2\sigma$ 的统计特征值(对应正态分布下的单侧97.7%存活率)作为疲劳强度下限指标进行分析,可知:高强铆钉的疲劳强度下限值为59.2 MPa,较高强螺栓的38.7 MPa,约提高53.0%,有效地保障了其在工程应用中的可靠性。

### 3 疲劳劣化机理分析

#### 3.1 局部应变的SWT疲劳评价方法

由于螺纹处存在,应力集中在试验加载中,法兰连接螺栓或铆钉虽整体处于弹性状态,其缺口处的局部应力极易超过屈服极限,进入塑性状态。因此,进行疲劳寿命预测时应考虑螺栓螺纹根部缺口区域的弹塑性应力-应变。根据基于局部应变场特

征的SWT(循环弹塑性有限元)理论<sup>[40-42]</sup>,构件疲劳寿命取决于应力集中处最大局部应力 $\sigma_{\max}$ 与应变幅 $\epsilon_a$ 两者的乘积,即疲劳寿命由 $\sigma_{\max} \cdot \epsilon_a$ 控制。

对于材料的弹塑性受力特征,其应力-应变关系可采用如式(2)所示循环应变幅-应力幅曲线<sup>[43]</sup>描述。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2)$$

式中: $K'$ 为循环强度系数; $n'$ 为循环应变硬化指数。

依据对光滑试件的材料试验<sup>[44]</sup>,可得到应力-寿命曲线与应变寿命曲线,如式(3)、式(4)所示。

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_f'}{E} (2N)^b + \epsilon_f' (2N)^c \quad (3)$$

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N)^b \quad (4)$$

整合式(3)、式(4),可得式(5)。

$$\sigma_{\max} \epsilon_a = \frac{\epsilon_f'^2}{E} (2N)^{2b} + \epsilon_f' \sigma_f' (2N)^{b+c} \quad (5)$$

对于试验所用的高强螺栓和高强铆钉,采用文献[45]材料试验数据推导,结果如表5所示。

表5 螺栓/铆钉循环应力应变的材性参数

Table 5 Material property of cyclic strain-stress in bolt and rivet

材料	疲劳强度	疲劳延性	疲劳强度	疲劳延	弹性模量
	系数 $\sigma_f'$	系数 $\epsilon_f'$	指数 $b$	性指数 $c$	$E/\text{GPa}$
40CrMo <sub>4</sub>	1 166	0.351 9	-0.057	-0.642	210

### 3.2 精细化有限元模型建立

为进一步揭示两类模型试件的疲劳劣化机理,采用通用有限元分析系统ABAQUS,对两类试件建立精细化2D轴对称有限元模型,如图14所示,高强螺栓与高强铆钉均采用CAX4R网格单元,在螺栓螺母接触和铆钉与套环接触部分的局部网格进行适应性精细化。法兰单元顶面采用轴对称固定约束。同时,通过在螺栓顶面施加轴对称均匀荷载,模拟螺栓预紧力与受载状况。高强螺栓和高强铆钉有限元各部分尺寸均按照实际图纸进行建模。在本构关系方面,两类模型试件均采用多线性随动强化模型模拟,具体参数由表1及表5的试验结果确定。

此外,各构件间装配采用“面-面”接触模拟,包括内外螺纹、套环/螺母与法兰,套环/螺母与垫片、垫片与法兰等。建立的有限元模型同时考虑内、外螺纹间的法向行为硬接触与切向行为罚接触。其中,螺纹间切向罚接触的摩擦系数对有限元预测值具有显著影响。参考相关SWT局部应力法分析文献[46],罚接触的摩擦系数取0.1。为保证模拟精度与效率,对螺纹处局部网格采取3个等差尺寸

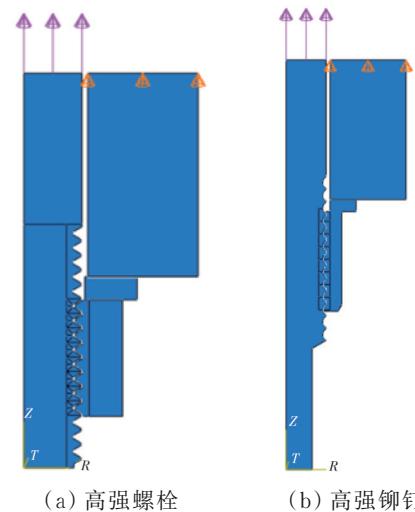


Fig. 14 2D axisymmetric finite element model  
图14 2D轴对称有限元模型图

Fig. 14 2D axisymmetric finite element model

(0.05、0.10、0.15 mm)进行网格无关性检验,结果如图15、图16所示。可以看出,高强螺栓的3次局部最大应力分别为1 022.1、997.6、967.5 MPa,而高强铆钉的3次局部最大应力分别为821.3、803.6、787.5 MPa。总体上,两级网格间最大应力相对偏差均小于5%,表明当前网格下尺寸具有较好收敛性。

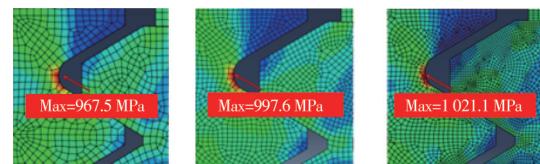


图15 高强螺栓网格无关性检查  
(从左至右分别为0.05、0.10、0.15 mm)

Fig. 15 Mesh insensitive test of high-strength bolts  
(left to right: 0.05, 0.10, 0.15 mm)

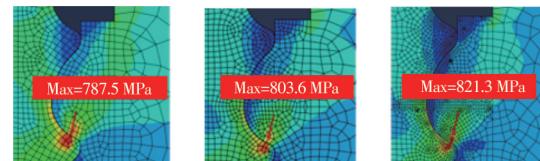


图16 高强铆钉网格无关性检查  
(从左至右分别为0.05、0.10、0.15 mm)

Fig. 16 Mesh insensitive test of high-strength rivets  
(left to right: 0.05, 0.10, 0.15 mm)

### 3.3 疲劳失效模式分析

根据有限元数值求解,高强螺栓和高强铆钉试件的局部应力分布(最大应力)分别如图17、图18所示。可以看出,两类试件的最大应力均出现在第1扣螺纹根部,表明该处最易疲劳开裂,与试验结果吻合。其中,高强螺栓的最大应力为1 022 MPa,较

高强铆钉的 821 MPa、约高 24.5%，其应力集中现象更为显著。同时可以看出，由于高强铆钉采用独立环状螺纹和套环挤压成型等两项新技术，其螺纹较高强螺栓更加平缓，且内、外螺纹接触更密贴、面积更大，能有效降低螺纹根部应力集中，进而从构造细节层面提高其疲劳抗力。

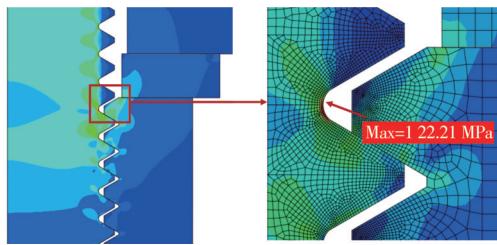


图 17 高强螺栓局部最大应力图

Fig. 17 Local maximum stress of high-strength bolts

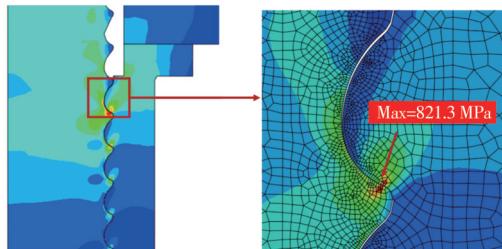


图 18 高强铆钉局部最大应力图

Fig. 18 Local maximum stress of high-strength rivets

## 4 结果与讨论

工程设计中，通常采用一定存活率下的应力幅-寿命曲线（也称为 S-N 或 P-S-N 曲线）验算构件在给定载荷下的疲劳寿命<sup>[47]</sup>，如式(6)所示。

$$N \cdot (\Delta\sigma)^m = C \quad (6)$$

式中： $\Delta\sigma$  为应力幅； $m$  为与材料有关的疲劳常数； $C$  为与试验有关的常数。

对式(6)两边取对数，则可以得到双对数形式的 S-N 曲线

$$\lg N = -m \lg (\Delta\sigma) + \lg C \quad (7)$$

进一步地，考虑 97.7% 存活率，可以得到

$$\lg N = -m \lg (\Delta\sigma) + \lg C - 2s \quad (8)$$

式中： $s$  为  $\lg C$  的样本标准差。

采用 SWT 局部应变法，考虑不同应力幅水平，求解疲劳寿命  $N$ ，依据式(7)进行数据拟合，可得到如式(9)、式(10)所示的数值 S-N 曲线。

高强螺栓的数值 S-N 曲线公式为

$$\lg N = -2.89 \lg (\Delta\sigma) + 11.05 \quad (9)$$

高强铆钉的数值 S-N 曲线公式为

$$\lg N = -2.85 \lg (\Delta\sigma) + 11.32 \quad (10)$$

同样地，基于表 3、表 4 所示试验数据，偏安全地对式(7)取  $m=3$ ，可得：

高强螺栓实测拟合 S-N 曲线

$$\lg N = -3 \lg (\Delta\sigma) + 11.44 \quad (11)$$

高强铆钉实测拟合 S-N 曲线

$$\lg N = -3 \lg (\Delta\sigma) + 11.81 \quad (12)$$

进一步地，考虑试验数据离散性，依据式(8)拟合，可得 97.7% 存活率下的 P-S-N 曲线。

高强螺栓 97.7% 存活率下的 P-S-N 曲线公式为

$$\lg N = -3 \lg (\Delta\sigma) + 11.1 \quad (13)$$

将等效疲劳寿命  $N=2 \times 10^6$  次代入式(13)中，可得到对应高强铆钉的等效疲劳强度为 39.78 MPa（即疲劳强度等级）。

高强铆钉 97.7% 存活率下的 P-S-N 曲线公式为

$$\lg N = -3 \lg (\Delta\sigma) + 11.63 \quad (14)$$

将等效疲劳寿命  $N=2 \times 10^6$  次代入式(14)中，可得到对应高强铆钉的等效疲劳强度为 59.75 MPa。

拟合结果分别如图 19、图 20 所示。

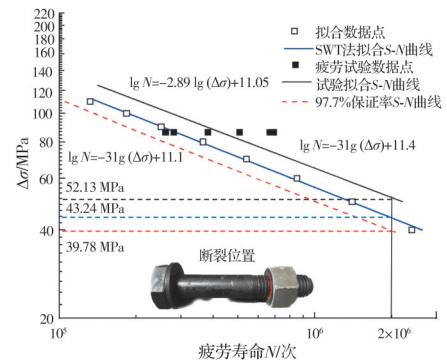


图 19 高强螺栓 S-N 疲劳寿命预测与实测结果

Fig. 19 Predicted and measured S-N result of high-strength bolts

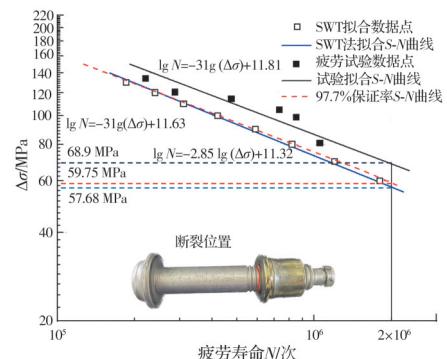


图 20 高强铆钉 S-N 疲劳寿命预测与实测结果

Fig. 20 Predicted and measured S-N result of high-strength rivets

结果表明，SWT 方法预测值较实测值更为保守，其拟合曲线与考虑存活率的设计曲线较为接近，两者趋势一致性较好，且绝大部分实测数据点位于 SWT 预测曲线上方，表明该方法可偏安全地应用于法兰疲劳寿命预测。综合上述预测与实测结果，参照欧规 EC part 1-9<sup>[48]</sup>与《钢结构设计标准》

(GB 50017—2017)<sup>[49]</sup>偏安全地向下取整,建议:对采用高强度铆钉的风电塔筒环法兰进行疲劳设计时,可偏安全地在97.7%存活率下采用FAT 56验算曲线,配合指数常数 $m=3$ 。

## 5 结论

针对采用新型高强铆钉的风电塔筒环法兰,系统地开展静力拉伸试验、模型疲劳试验和精细化数值分析,得到以下主要结论:

1)以200万次荷载循环计,高强铆钉的等效疲劳强度平均值为68.9 MPa,较同组高强螺栓提高32.2%;其实测疲劳强度变异系数约0.07,较同组高强螺栓降低46.2%。

2)两类试件呈现较一致的疲劳失效模式:除1个高强螺栓试件出现螺纹终止线开裂、1个高强铆钉试件顶帽底部疲劳外,其余10个试件中疲劳裂纹均萌生于第一扣螺纹根部。

3)高强铆钉的螺纹牙型更缓和且与套环间的内、外螺纹接触更紧密,有效地缓解了螺纹根部应力集中问题,从而显著提升了疲劳抗力。

4)综合模型试验数据与数值分析结果建议,对采用高强度铆钉的风电塔筒环法兰,可偏安全地采用FAT 56疲劳设计验算曲线,配合指数常数 $m=3$ 。

针对风电塔筒环法兰中传统高强螺栓的失效隐患,就新型结构型高强铆钉的应用进行探索,初步提出可供设计参考的疲劳验算曲线。为对比起见,两类试件均采用相同设计和装配预紧力。后续研究中,可考虑充分利用高强铆钉预紧力的稳健性特征,合理提高设计预紧力,结合节段模型试验,更详细地模拟实际边界条件,开展更深入的探索。

## 参考文献

- [1] 戴靠山,王英,黄益超,等.风力发电塔结构抗风抗震、健康监测和振动控制研究综述[J].特种结构,2015,32(3): 91-100.
- DAI K S, WANG Y, HUANG Y C, et al. Summarization of wind and earthquake resistances, structural health monitoring and vibration control of wind turbine towers [J]. Special Structures, 2015, 32(3): 91-100. (in Chinese)
- [2] 葛晨,乔继红.提振全球气候治理雄心的中国担当[N].新华每日电讯,2020-12-13(2).
- GE C, QIAO J H, China's role in boosting global climate governance ambitions [N]. Xinhua Daily Telegraph, 2020-12-13(2). (in Chinese)
- [3] LANTZ E, ROBERTS O, NUNEMAKER J, et al. Increasing wind turbine tower heights: Opportunities and challenges: NREL/TP-5000-73629 [R/OL]. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73629.pdf>.
- [4] GOLLUB P, JENSEN J F, GIESE D, et al. Flanged foundation connection of the Offshore Wind Farm Amrumbank West-Concept, approval, design, tests and installation [J]. Stahlbau, 2014, 83(8): 522-528.
- [5] REDONDO R, MEHMANPARAST A. Numerical analysis of stress distribution in offshore wind turbine M72 bolted connections [J]. Metals, 2020, 10(5): 689.
- [6] 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.
- [7] YU Z L, SUN P W, WANG D. Fatigue life prediction for flange connecting bolts of wind turbine tower [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2020, 25(4): 526-530.
- [8] 史文超,丁宝平,程茜,等.风电机组塔架高强螺栓应用中存在的问题的分析[J].风能产业,2013(9): 66-74.
- SHI W C, DING B P, CHENG Q, et al. Analysis of problems existing in the application of high strength bolts for wind turbine tower [J]. Wind Energy Industry, 2013 (9): 66-74. (in Chinese)
- [9] 周舟,杨理诚,梁勇,等.大型风力机基础法兰高强度螺栓断裂失效分析[J].太阳能学报,2016,37(9): 2230-2235.
- ZHOU Z, YANG L C, LIANG Y, et al. Fracture analysis on high-strength flange-bolts used in wind turbine foundation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37 (9): 2230-2235. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] SEIDEL M, SCHAUMANN P. Ermittlung der ermüdungsbeanspruchung von schrauben exzentrisch belasteter flanschverbindungen [J]. Stahlbau, 2001, 70(7): 474-486.
- [12] 瞿伟廉,秦文科,郭佳凡.高耸塔架结构节点联结螺栓松动等效模型研究[J].武汉理工大学学报,2007,29(1): 139-141.
- QU W L, QIN W K, GUO J F. Research on equivalent model of high-rising tower structures on the bolted looseness [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 139-141. (in Chinese)
- [13] 陈凯.风电塔法兰螺栓松动对结构振动影响数值分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2019.
- CHEN K. Numerical analysis of the effect of flange bolt loosening on structural vibration of wind turbine tower [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese)

- [14] 孙永伟. 高强度螺栓用钢的氢扩散动力学及氢致延迟断裂控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.  
SUN Y W. Study on the kinetics of hydrogen diffusion and control technology of hydrogen-induced delayed fracture of high strength bolt steels [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [15] ADEDIPE O, BRENNAN F, KOLIOS A. Review of corrosion fatigue in offshore structures: Present status and challenges in the offshore wind sector [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 61: 141-154.
- [16] 林子倩, 卜宜都, 杨璐. 不锈钢连接节点研究现状与展望[C]//第二十二届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 徐州, 2022: 141-146.  
LIN Z Q, BU Y D, YANG L. A review of research on stainless steel connections and joints [C]//Proceedings of the 22nd National Symposium on Modern Structural Engineering, Xuzhou, 2022: 141-146. (in Chinese)
- [17] 贾云龙, 张钦, 左世斌, 等. 海上风电装备用环槽铆钉连接结构防腐性能研究[J]. 风能, 2022(6): 74-78.  
JIA Y L, ZHANG Q, ZUO S B, et al. Study on anticorrosion performance of ring groove rivet connection structure for offshore wind power equipment [J]. Wind Energy, 2022(6): 74-78. (in Chinese)
- [18] MARIAM M, AFENDI M, ABDUL MAJID M S, et al. Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fibre reinforced composites fabricated with different joining methods [J]. Composite Structures, 2018, 200: 647-658.
- [19] ZHU P H, ZHANG Q L, LUO X Q, et al. Experimental and numerical studies on ductile-fracture-controlled ultimate resistance of bars in aluminum alloy gusset joints under monotonic tensile loading [J]. Engineering Structures, 2020, 204: 109834.
- [20] SMITH S O, POTTER C G, LEWIS G. Lockbolt qualification testing for wing panel assemblies [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2000.
- [21] 杨树森, 张光明, 刘煜. 拉铆钉及其在铁道车辆中的应用[J]. 铁道车辆, 2006, 44(12): 11-13, 49.  
YANG S S, ZHANG G M, LIU Y. The pulling rivets and their application in rolling stock [J]. Rolling Stock, 2006, 44(12): 11-13, 49. (in Chinese)
- [22] 易志宏, 刘浪, 田波, 等. 桥梁用高强度环槽铆钉抗剪承载力和疲劳特性试验研究[J]. 四川建筑, 2021, 41(5): 166-169.  
YI Z H, LIU L, TIAN B, et al. Experimental study on shear capacity and fatigue characteristics of high strength ring-groove rivets for bridges [J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(5): 166-169. (in Chinese)
- [23] 张天雄, 王元清, 陈志华, 等. 高强度不锈钢短尾环槽铆钉力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(Sup1): 151-158.  
ZHANG T X, WANG Y Q, CHEN Z H, et al. Experimental study on the mechanical properties of high strength stainless steel short tail swage-locking pins [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(Sup1): 151-158. (in Chinese)
- [24] 王永岩, 张向峰, 闫蕾蕾, 等. 机车车辆 Huck 铆钉接头疲劳试验分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(2): 63-67.  
WANG Y Y, ZHANG X F, YAN L L, et al. Fatigue test analysis of huck rivet joint for locomotive and rolling stock [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2017, 30(2): 63-67. (in Chinese)
- [25] 王中兴. 铝合金结构环槽铆钉连接及梁柱节点受力机理与设计方法[D]. 清华大学, 2020.  
WANG Z X. Mechanism and design of swage-locking pinned connections and beam-to-column joints in aluminum alloy structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. (in Chinese)
- [26] 张钦, 贾云龙. 风电机组用新型紧固连接技术疲劳性能试验研究[J]. 东方汽轮机, 2020(4): 55-58.  
ZHANG Q, JIA Y L. Experimental study on fatigue performance of new fastening technology for wind turbine [J]. Dongfang Turbine, 2020(4): 55-58. (in Chinese)
- [27] MADSEN C A, KRAGH-POULSEN J C, THAGE K J, et al. Analytical and numerical investigation of bolted steel ring flange connection for offshore wind monopile foundations [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 276: 012034.
- [28] ALONSO-MARTINEZ M, ADAM J M, ALVAREZ-RABANAL F P, et al. Wind turbine tower collapse due to flange failure: FEM and DOE analyses [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 932-949.
- [29] 徐祉康, 易伟同, 祝磊. 风力发电机组钢塔筒 M64 螺栓连接法兰受拉承载性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(Sup1): 1522-1527.  
XU Z K, YI W T, ZHU L. Experimental study on tensile bearing capacity of M64 bolted flange of wind turbine tower [J]. Building Structure, 2021, 51(Sup1): 1522-1527. (in Chinese)
- [30] TOBINAGA I, ISHIHARA T. A study of action point correction factor for L-type flanges of wind turbine towers [J]. Wind Energy, 2018, 21(9): 801-806.
- [31] 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.
- [32] 紧固件 螺栓和螺钉通孔: GB 5277—85 [S]. 北京: 国家标准局, 1985.

- Fasteners--Clearance holes for bolts and screws: GB 5277—85 [S]. Beijing: National Bureau of Standards, 1985.
- [33] 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials- Tensile testing- Part 1: Method of test at room temperature : GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [34] WEIJTJENS W, STANG A, DEVRIENDT C, et al. Bolted ring flanges in offshore-wind support structures-In situ validation of load-transfer behaviour [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176: 106361.
- [35] VAN LONG H, JEAN-PIERRE J, JEAN-FRANÇOIS D. Behaviour of bolted flange joints in tubular structures under monotonic, repeated and fatigue loadings I: Experimental tests [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85: 1-11.
- [36] PAVLOVIĆ M, HEISTERMANN C, VELJKOVIĆ M, et al. Connections in towers for wind converters, part I: Evaluation of down-scaled experiments [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 115: 445-457.
- [37] JI X D, ZOU T, BAI X, et al. Fatigue assessment of flange connections in offshore wind turbines under the initial flatness divergence [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1127957.
- [38] 张天雄, 王元清, 陈志华, 等. 不锈钢高强度螺栓机械性能与施拧方法试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(7): 98-105, 97.  
ZHANG T X, WANG Y Q, CHEN Z H, et al. Experimental research on mechanical properties and tightening methods of stainless steel high-strength bolts [J]. Industrial Construction, 2022, 52(7): 98-105, 97. (in Chinese)
- [39] 焦晋峰, 刘展翔, 刘丹, 等. 预紧力缺失对8.8级M24高强度螺栓常幅疲劳性能影响分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(1): 35-44.  
JIAO J F, LIU Z X, LIU D, et al. Analysis of the influence of the pre-tension loss on the constant-amplitude fatigue performance of grade 8.8 M24 high-strength bolts [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2022, 54(1): 35-44. (in Chinese)
- [40] 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. OnePetro, 2015.
- [41] SMITH K N S, WATSON P, TOPPER T H. Stress-strain function for the fatigue of metals [J]. Journal of Materials, 1970, 5(4): 767-778.
- [42] BRANCO R, COSTA J D, BORREGO L P, et al. Comparison of different one-parameter damage laws and local stress-strain approaches in multiaxial fatigue life assessment of notched components [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 151: 106405.
- [43] SCHAUMANN P, EICHSTÄDT R, STANG A. Advanced performance assessment methods for high-strength bolts in ring-flange connections [J]. Stahlbau, 2018, 87(5): 446-455.
- [44] DOWLING N E. Local strain approach to fatigue [M]// Comprehensive Structural Integrity. Amsterdam: Elsevier, 2003: 77-94.
- [45] LANG K H, KORN M, ROHM T. Very high cycle fatigue resistance of the low alloyed steel 42CrMo<sub>4</sub> in medium- and high-strength quenched and tempered condition [J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 1133-1142.
- [46] SCHNEIDER R, WUTTKE U, BERGER C. Fatigue analysis of threaded connections using the local strain approach [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 2357-2366.
- [47] 杨新华, 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.  
YANG X H, CHEN C Y. Fatigue and fracture [M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2018. (in Chinese)
- [48] Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-9: Fatigue: CEN/TC250: EN 1993-1-9 [S]. Brussels, 2005.
- [49] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Code for design of steel structure: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)

(编辑 胡玲)