

弹簧垫圈连接螺栓的防松性能试验与模拟研究

任亚宁¹ 李军阔¹ 王丽欢¹ 郜帆¹ 胡皓² 周万志²

(1. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 石家庄 050000)

(2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 211816)

摘要:【目的】针对横向振动工况下弹簧垫圈连接螺栓防松性能演化规律不明确、现行规范缺乏相关紧固转矩设计规定的问题,探究表面处理方式与紧固转矩对螺栓防松性能的影响机制,为输电铁塔螺栓连接防松设计提供参考。【方法】首先,以表面处理方式(镀锌、磷化)和紧固转矩(0.5、1.0、1.5倍标准转矩)为变量,开展横向振动试验,对比不同构造螺栓的预紧力衰减特性;其次,采用Ansys软件建立螺栓连接有限元模型,模拟振动过程中弹簧垫圈受力状态与螺纹区应力演化规律;然后,提出基于残余预紧力的防松性能定量评价方法,明确不同构造螺栓的防松效果差异;最后,完成模型有效性验证,保障研究结果的可靠性。【结果】结果表明,横向振动下螺栓预紧力衰减可划分为快速下降、缓慢下降与迅速松脱3个阶段;1.5倍标准转矩下,镀锌弹簧垫圈螺栓达到残余预紧力阈值的振动次数较镀锌平垫圈提升450%,防松效果最优;振动过程中弹簧垫圈与连接板始终保持接触,可使螺纹区受力更均匀;所提定量评价方法的分析结果显示,弹簧垫圈连接螺栓的平均防松性能为平垫圈的3倍。

关键词: 弹簧垫圈; 紧固转矩; 横向振动; 螺栓松脱; 预紧力

中图分类号: TH131.3 DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.04.010

0 引言

螺栓连接具有静载强度高、拆装便捷等优势,是输电线路工程中应用最广泛的紧固方式^{[1][2]61-69}。输电铁塔螺栓长期承受以横向剪力为主的动态风致载荷,极易引发预紧力持续衰减,进而降低节点结构刚度,极端工况下甚至会导致铁塔倒塌^[3-4]。因此,针对输电铁塔常用防松构造开展防松性能研究,对保障输电线路长期安全稳定运行具有重要工程意义。

在螺栓松脱特性方面,早期研究偏向于轴向载荷下连接螺栓的松动行为^[5]。YANG等^[6-8]研究表明,材料塑性变形是轴向交变载荷下螺栓松动的核心机制之一。JUNKER等^{[9]314-335}通过经典试验证实,动态横向载荷对螺栓松动的诱发作用远大于轴向载荷,后续相关研究均围绕横向载荷展开。随着数值仿真技术的发展,有限元模型可有效模拟接触面滑移的影响因素^[10],复现螺栓松动的全过程,螺栓头部与螺纹接触面的整体/局部滑移已被证实是螺栓松动的核心特征。ZHANG等^[11-12]通过试验与有限元模拟,将螺栓松动划分为初始松动段与后期加速段,证实提高预紧力可显著提升螺栓防松性能。赵晶等^[13]在螺栓横向振动试验中同样观测到螺栓松脱的两阶段特征。张明远等^[14]指

出,预紧力、摩擦因数、螺栓直径均与临界松动载荷成正相关关系。张鹏程^[15]通过试验证实,循环载荷下螺栓包络面积随循环次数递减。事实上,循环载荷下,高强度螺栓连接的摩擦因数处于动态变化中^[16]。傅德明^[17]分析了轴向载荷下弹簧垫圈的疲劳性能提升作用。此外,在新型防松措施方面,刘本领等^[18]通过试验与仿真证实,PA11涂层可满足自锁螺栓的锁紧力矩要求。

然而,现有研究尚未系统揭示弹簧垫圈连接螺栓的防松机制,相关规范中缺乏弹簧垫圈连接螺栓的转矩规定,不利于其在输电铁塔中的规范化应用。为此,本文针对输电塔用弹簧垫圈连接螺栓,开展横向振动试验,以平垫圈和无垫圈试件作为对比,研究不同紧固转矩及表面处理方式(镀锌、磷化)的影响。进而,建立有限元模型,分析弹簧垫圈受力状态、螺纹啮合区应力发展及预紧力变化趋势,阐释其防松机制,以期对弹簧垫圈在输电塔防松设计中的应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试验工况

为分析弹簧垫圈连接螺栓的紧固与防松性能,试验选用输电铁塔工程常用的8.8级M16螺栓,试验变量包括垫圈表面处理方式、垫圈类型与螺母紧固转

收稿日期: 2024-06-27 修回日期: 2024-10-23

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目(kj2023-024)

作者简介: 任亚宁,女,1986年生,河北沙河人,硕士,高级工程师; 主要研究方向为输电线路结构研究; E-mail: 840772394@qq.com。

周万志(通信作者),男,1996年生,江苏连云港人,博士研究生; 主要研究方向为螺栓防松研究; E-mail: 331552838@qq.com。

引用格式: 任亚宁,李军阔,王丽欢,等. 弹簧垫圈连接螺栓的防松性能试验与模拟研究[J]. 机械强度,2026,48(4):83-90.

REN Yaning, LI Junkuo, WANG Lihuan, et al. Test and simulation research on the anti-loosening performance of spring washer connecting bolts[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(4): 83-90.



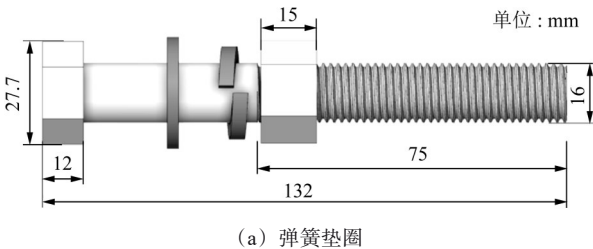
免费获取

矩,具体试验工况如表1所示。其中,镀锌无垫圈、镀锌平垫圈组作为对照组,用于明确平垫圈对螺栓防松性能的影响;镀锌平垫圈与镀锌弹簧垫圈组对比,用于评估弹簧垫圈的防松效果;镀锌弹簧垫圈与磷化弹簧垫圈组对比,用于探究表面处理方式对防松性能的影响。根据标准 GB 50233—2014^[19]中单螺母转矩的规定,本文设定 110 N·m 为标准转矩,统一用 T 表示。试验中的转矩选用 $0.5T$ 、 $1.0T$ 、 $1.5T$,以揭示紧固转矩的影响规律。

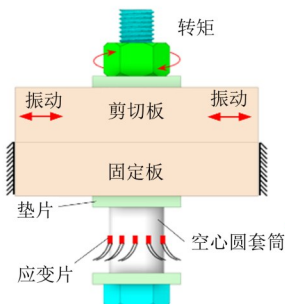
表1 试验工况
Tab. 1 Test conditions

| 编号 | 防松措施 | 转矩 | 转矩值/(N·m) | 预紧力/kN |
|----|--------|--------|-----------|--------|
| 1 | | $0.5T$ | 55 | 13.4 |
| 2 | 磷化弹簧垫圈 | $1.0T$ | 110 | 23.3 |
| 3 | | $1.5T$ | 165 | 34.3 |
| 4 | | $0.5T$ | 55 | 16.0 |
| 5 | 镀锌弹簧垫圈 | $1.0T$ | 110 | 24.5 |
| 6 | | $1.5T$ | 165 | 36.4 |
| 7 | | $0.5T$ | 55 | 11.6 |
| 8 | 镀锌平垫圈 | $1.0T$ | 110 | 23.8 |
| 9 | | $1.5T$ | 165 | 35.9 |
| 10 | | $0.5T$ | 55 | 11.2 |
| 11 | 镀锌无垫圈 | $1.0T$ | 110 | 24.3 |
| 12 | | $1.5T$ | 165 | 36.8 |

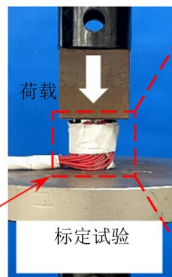
为减小离散性,每种工况设置3个重复试件,结果取其平均值作为该工况的代表预紧力。试验所用螺栓、螺母及垫圈由河北信德电力配件有限公司提供。螺栓规格为:丝扣长度 75 mm、螺栓头厚度 12 mm、总长 132 mm、螺距 2 mm。螺栓、螺母、弹簧垫圈和平垫圈的关键尺寸如图1所示。



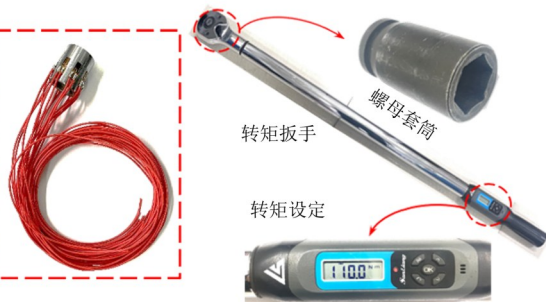
(a) 弹簧垫圈



(a) 螺栓连接



(b) 套筒标定试验



(c) 拧紧设备

图3 预紧力测试方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the preload test plan

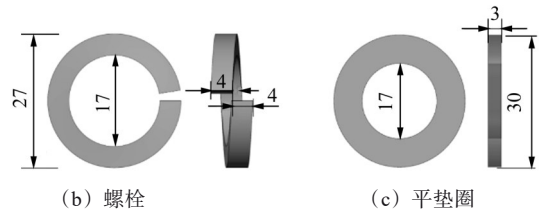


图1 螺栓及垫圈关键尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of key dimensions of bolts and washers

1.2 加载方案

根据标准 GB/T 10431—2008^[20] 和 JUNKER 等^{[9]314-335}的试验机原理,设计了横向振动试验装置,其由控制系统、动力系统、加载系统和数据采集系统组成,如图2所示。工作原理为:①电动机驱动偏心轮产生往复位移;②位移通过载荷传递系统作用于试件;③力传感器实时测量并传递横向载荷;④上剪切板产生稳定的横向振动载荷。其中,下固定板和剪切板的板厚均为 20 mm。结合输电铁塔螺栓节点的实际低频振动特性及试验装置能力,设定横向振动频率为 9 Hz,横向位移为 ± 1.2 mm。

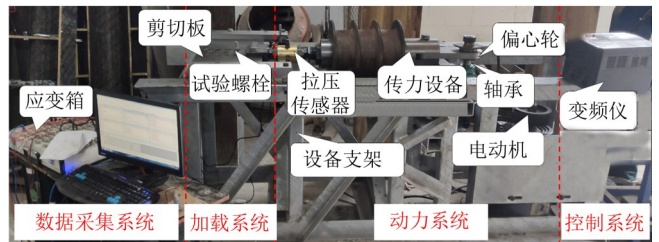


图2 横向振动试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the transverse vibration test device

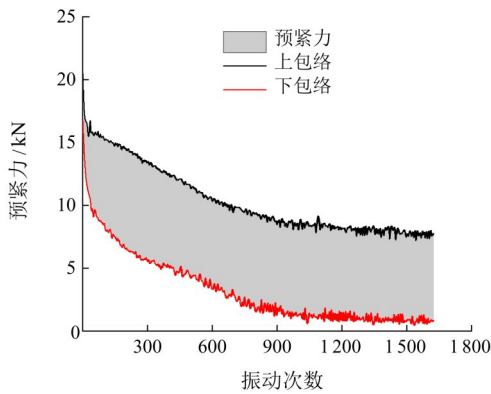
1.3 测试方案

螺栓预紧力通过粘贴在螺栓杆身的电阻应变片进行测量,测试方案如图3所示。套筒按环向每 45° 布置电阻式应变片,通过测量套筒应变变化间接测量螺杆轴向应力变化情况,测试螺栓预紧力的变化规律。同时,对预紧力套筒进行了标定,40 kN 预紧力范围内的最大误差小于 3%,可以较好地反映预紧力。此外,采用预置式数显扭力扳手施加转矩,设置 10 t 拉压传感器和 30 mm 指针位移计分别测量横向载荷及横向位移。

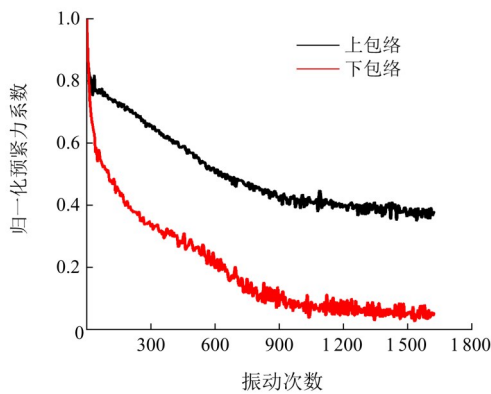
2 试验结果分析

2.1 数据处理方法

典型的螺栓连接的预紧力下降曲线如图 4(a) 所示。为便于多组数据对比,引入无量纲指标归一化预紧力系数 α (定义为残余预紧力与初始预紧力的比值), α 的下降速率代表螺栓松脱过程,螺栓的松脱特性归一化曲线如图 4(b) 所示。考虑到实际工程设计应用过程中多以最小预紧力为设计目标,本文取归一化曲线的下包络线进行对比。



(a) 螺栓预紧力曲线



(b) 归一化曲线

图 4 螺栓松脱特性归一化曲线

Fig. 4 Normalized curves of the bolt loosening characteristics

2.2 试验现象

典型连接螺栓的磨损现象如图 5 所示。除磷化垫圈连接螺栓外,镀锌垫圈连接螺栓的螺纹啮合区均出现显著的锌层磨损,螺母拆卸后残留锌渣。这是由于横向振动中螺栓反复弯曲,导致螺纹啮合面持续摩擦碰撞,致使锌层脱落。

镀锌无垫圈与镀锌平垫圈的螺母表面磨损形貌相似。对比图 5(b)、图 5(c) 可知,弹簧垫圈外径小于平垫圈,在平垫圈上压出明显凹痕,且弹簧垫圈与螺母接触面的磨损不均匀,表明其接触压力分布不均。磷化垫圈连接螺栓的磨损现象与镀锌垫圈连接螺栓

类似,但程度较轻,这主要是因为磷化层厚度较小。



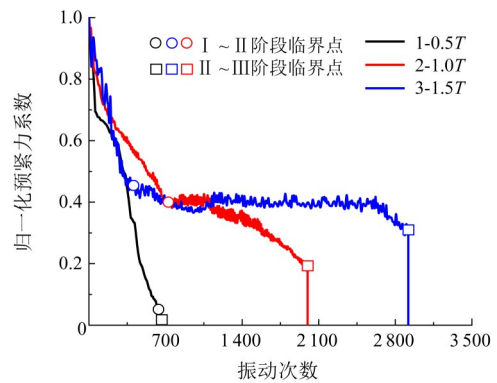
(a) 磷化弹簧垫圈 (b) 镀锌弹簧垫圈 (c) 镀锌平垫圈 (d) 无垫圈

图 5 不同垫圈螺栓磨损现象对比

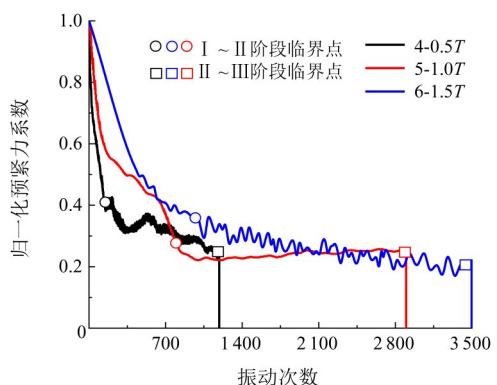
Fig. 5 Comparison of the wear phenomena of bolts with different washers

2.3 预紧力衰减阶段划分

选取 4 种典型连接螺栓的归一化曲线下包络线进行对比,根据衰减趋势将预紧力下降过程划分为 3 个阶段,如图 6 所示。每个阶段的临界点均已标注。第 I 阶段为预紧力快速下降阶段:振动初期,螺母转动较慢,但预紧力近似线性快速下降,不同防松措施在此阶段表现相似;第 II 阶段为预紧力缓慢下降阶段:持续时间长,不同措施下的衰减速率呈现波动;第 III 阶段为螺栓迅速松动阶段:螺母转动加速,预紧力急剧下降直至完全松动。



(a) 磷化弹簧垫圈



(b) 镀锌弹簧垫圈

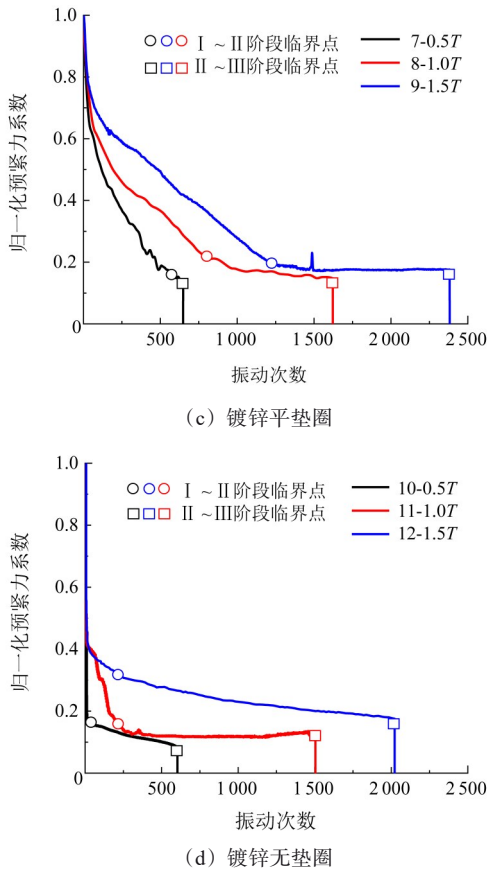


图6 不同防松措施下预紧力变化曲线

Fig. 6 Preload variation curves under different anti-loosening measures

对比图6(a)、图6(b)可知,2种表面处理的预紧力衰减趋势相似。总体而言,磷化垫圈连接螺栓的衰减速度较慢,因其接触面受力更均匀。但镀锌处理显著提高了螺栓的总振动次数,这是由于振动后期螺纹间脱落的锌层积累,增大了接触面摩擦因数,从而抑制了螺母转动。

对比图6(c)、图6(d)可知,平垫圈能减缓预紧力衰减速度,增加第I和阶段II阶段的振动次数。这归因于平垫圈通过较大的接触面积分散了接触压力。

2.4 结果对比分析

为定量评价防松性能,对残余预紧力为0.8倍初始预紧力下螺栓的振动次数进行对比分析,如图7所示。随着转矩从0.5T增加至1.5T,螺栓的振动次数显著增加。镀锌无垫圈和镀锌平垫圈下螺栓振动次数均增加了1倍,镀锌弹簧垫圈下螺栓振动次数增加了5.6倍,磷化弹簧垫圈下螺栓振动次数增加了1.77倍。当转矩为0.5T时,磷化弹簧垫圈下螺栓振动次数最高;当转矩为1.0T时,磷化弹簧垫圈、镀锌平垫圈下螺栓的振动次数较为接近;当转矩为1.5T时,镀锌平垫圈的使用使得螺栓振动次数提高了114%,但镀锌弹

簧垫圈下螺栓振动次数最高为165次。相比于镀锌平垫圈的30次,提高了450%。因此,镀锌弹簧垫圈连接螺栓具有较好的防松性能。

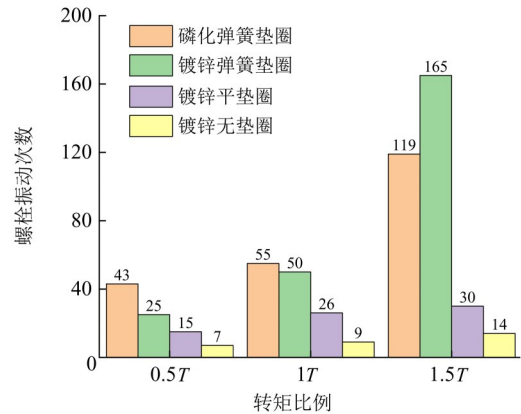


图7 不同防松措施及转矩下振动次数对比

Fig. 7 Comparison of vibration numbers under different anti-loosening measures and torques

3 有限元分析

3.1 有限元模型

3.1.1 模型建立

本文使用有限元软件Ansys对输电线路中常用的8.8级M16规格的螺栓进行非线性模拟分析,采用Solid185实体单元来模拟螺杆、弹簧垫圈、螺母和剪切板。有限元模型如图8所示,螺纹部分采用规则6面体网格划分,其余区域采用6面体与4面体混合网格以平衡精度与效率。在接触部位建立基于TARGE170和CONTA174单元的接触对,摩擦因数取0.15。

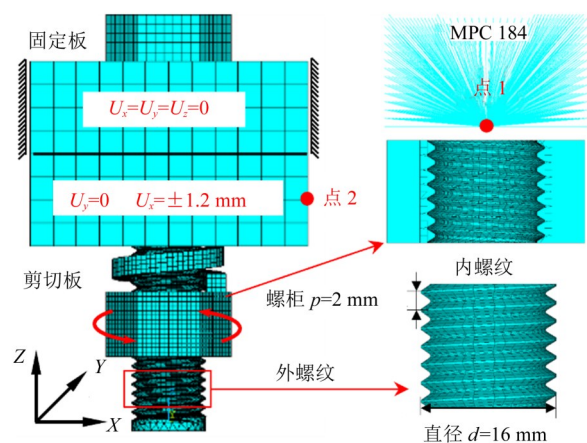


图8 弹簧垫圈连接螺栓有限元模型

Fig. 8 Finite element model of the spring washer connecting bolt

螺杆、螺母及弹簧垫圈的材料本构关系采用三折线等向强化模型,遵守von-Mises屈服准则,如图9所示。根据标准GB/T 3098.1—2010^[21],弹性模量 $E=2 \times 10^5$ MPa、泊松比 $\mu=0.3$ 、屈服应力 $\sigma_y=640$ MPa、屈服应变 $\varepsilon_y=0.003$ 、极限应力 $\sigma_u=800$ MPa、极限应变 $\varepsilon_u=$

0.3、切线模量 $E' = 0.02E$ ^{[2]61-69}。剪切板和固定板的弹性模量为 2×10^{10} MPa,泊松比为 0.1。

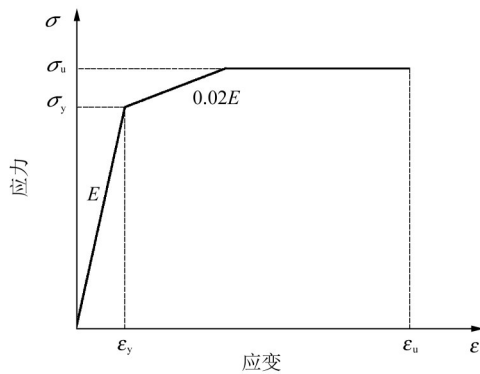


图 9 螺栓及垫圈材料本构模型

Fig. 9 Constitutive model of bolt and washer materials

3.1.2 边界条件

固定板侧面为固定约束,约束 x, y, z 方向的位移;剪切板侧面仅约束 y 方向的位移, x 方向用于施加振动载荷,螺栓顶部约束 x, y 的位移,以防止拧紧时整体转动。为模拟实际拧紧过程,在螺母上建立 MPC184 单元,通过对其施加转角来精确控制紧固转矩。加载过程分为 2 步:第 1 步,在螺母耦合点施加转角以产生预紧力;第 2 步,解除螺栓头约束,在剪切板耦合点施加幅值为 ± 1.2 mm 的横向循环载荷。

3.2 模型验证

弹簧垫圈连接螺栓的预紧力-转矩关系模拟值与试验值对比如图 10 所示。模拟中的螺栓预紧力取固定板与剪切板的中间部位。需要注意的是,有限元模型中不考虑表面处理方式,仅用于揭示普通弹簧垫圈连接螺栓的力学行为。

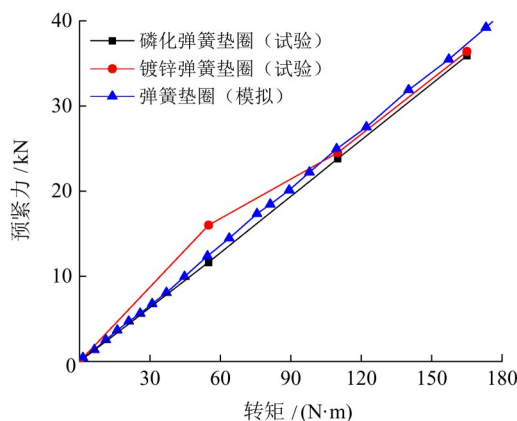


图 10 预紧力-转矩关系模型验证曲线

Fig. 10 Model validation curve of the preload-torque relation

由图 10 可知,模拟值呈良好线性关系。试验中,镀锌与磷化螺栓因转矩系数不同导致预紧力存在差异^[22]。此外,由于镀锌螺栓离散性较大,试验中的螺栓预紧力存在波动。当转矩为 $0.5T$ 时,试验值与模拟值存在一定偏差;随着转矩增大,偏差减小,这是因为弹

簧垫圈被完全压平,表面附着层的影响减弱。总体而言,该模型能较好地反映预紧力随转矩的变化趋势。

3.3 紧固阶段

3.3.1 弹簧垫圈受力

不同转矩下弹簧垫圈的等效应力、接触状态及接触压力分布如图 11 所示。在等效应力中,当转矩为 $0.5T$ 时,由于垫圈形状影响,应力分布不均匀,呈现左大右小的趋势。随着转矩增加至 $1.5T$,应力分布趋于均匀且关于开口基本对称,表明垫圈已被完全压平,变形一致。

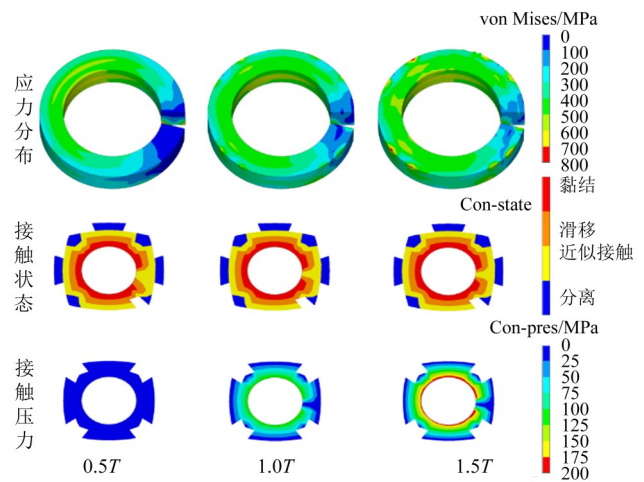


图 11 紧固阶段弹簧垫圈受力特性

Fig. 11 Mechanical characteristics of the spring washer during tightening stage

在接触状态图中,拧紧后弹簧垫圈与加载板接触区的内圈处于黏结状态,外圈处于滑动状态,且该状态与转矩大小关系不大,说明在 $0.5T$ 时垫圈已近乎压平。接触压力随转矩增加而增大,并在螺母承压面上沿径向递减,内圈接触压力与摩擦力最大。

3.3.2 螺栓受力

弹簧垫圈在螺母上紧时的螺纹区应力分布如图 12 所示。拧紧过程中,啮合螺纹应力随旋合深度增加而增大,螺母承压面处应力最大。随着紧固转矩增大,螺纹牙根应力显著上升。当转矩达到 $1.5T$ 时,螺牙根出现明显的线状高应力区,且高应力区域扩大。转矩较小时,啮合螺纹牙顶接触应力较小;转矩较大时,螺纹间出现稳定的黏着区域。这是由于从螺母承压面到自由端,螺栓预紧力及螺纹变形逐级递减,承载能力大的螺纹承担了更多载荷。

3.4 振动阶段

3.4.1 弹簧垫圈受力

不同横向位移下弹簧垫圈的应力分布、接触状态和接触压力如图 13 所示。在等效应力中,横向振动过程中,弹簧垫圈的应力分布不均匀。当横向位移为 1.2 mm 时,垫圈尖角及上侧出现应力集中;相反地,当

横向位移为-1.2 mm时,应力集中转移至左侧和下侧。这是由于螺杆弯曲导致垫圈呈单侧明显受压趋势。

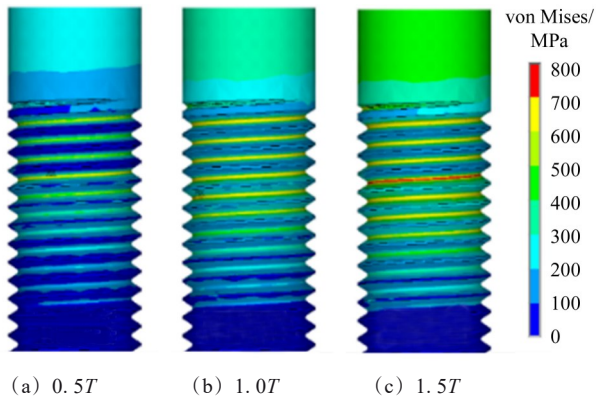


图 12 紧固阶段螺纹区应力分布云图

Fig. 12 Stress distribution contour plots of the thread area during tightening stage

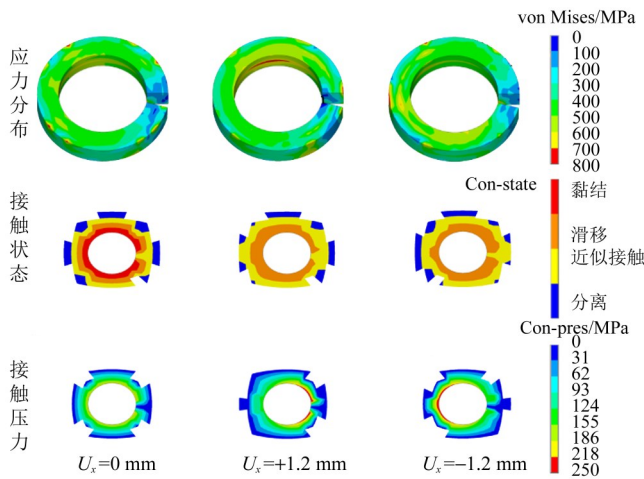


图 13 振动阶段弹簧垫圈受力特性

Fig. 13 Mechanical characteristics of the spring washer during vibration stage

图 13 接触状态图中,横向振动下弹簧垫圈的接触状态以滑移和近似接触为主。加载板移动至最大位移时,弹簧垫圈表面整体处于滑移状态,滑移区集中于位移反方向。接触压力集中在左、右两侧,表明受压位置与横向位移方向一致。在振动过程中,弹簧垫圈与加载板始终保持接触且存在压力,能有效补偿螺母接触面的间隙,使螺纹区受力均匀,从而提高防松性能。

3.4.2 螺栓受力

典型振动阶段弹簧垫圈螺杆应力分布如图 14 所示。紧固时螺杆应力分布均匀。在横向振动载荷下,螺杆剪切处应力迅速发展,螺母承压面根部出现线状高应力区。当螺杆与孔壁接触时,接触区域应力增大;剪切板与螺栓根部碰撞导致螺杆弯曲,螺栓头与固定板挤压产生应力集中。当剪切板位移达到±1.2 mm 时,螺杆应力整体呈对称分布,无螺纹段应力分布不均,螺纹段应力显著增加但分布均匀。一个振动周期结束后,螺杆应力分布不均,螺纹区右侧应力大于左

侧,这是由于螺杆受剪后螺母偏压,导致剪切区和弯矩较大处的螺纹牙根应力增加。

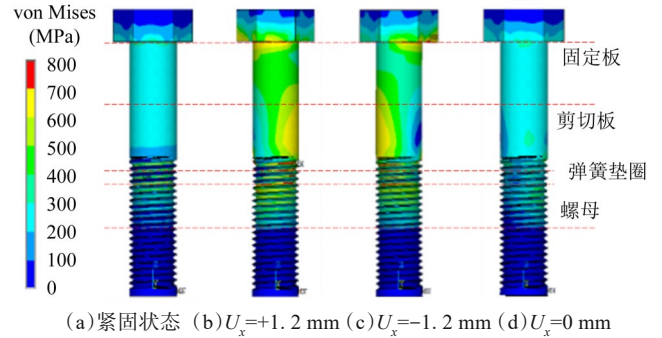


图 14 振动阶段螺杆应力分布云图

Fig. 14 Stress distribution contour plots of the bolt shank during vibration stage

3.4.3 预紧力变化

横向振动载荷下,弹簧垫圈连接螺栓的归一化预紧力系数 α 的变化曲线,如图 15 所示。当剪切板撞击螺杆时,螺母受压、螺杆受拉,预紧力出现瞬时增量,且增量随初始紧固转矩增大而增大。当转矩为 0.5T 时,增加量约为 15%;当转矩为 1.0T 时,增加量约为 20%;当转矩为 1.5T 时,增加量约为 28%。随着剪切位移减小,预紧力开始下降,剪切结束时恢复稳定。反复的横向位移使预紧力呈阶梯式下降。与试验结果一致,增加紧固转矩可有效减缓衰减趋势,显著提升防松性能。

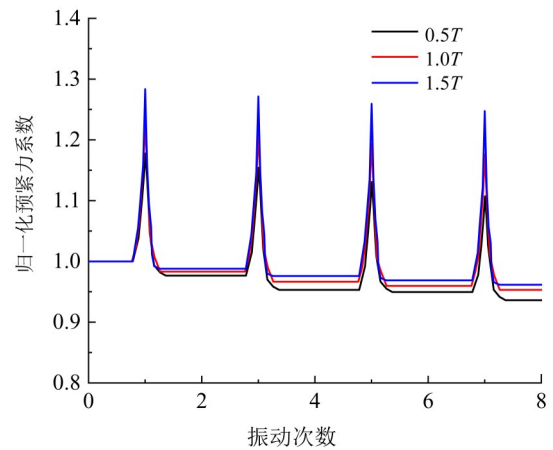


图 15 归一化预紧力系数变化曲线

Fig. 15 Variation curves of the normalized preload coefficient α

4 弹簧垫圈防松性能评价

实际工程中,多数螺栓处于未完全松动状态,仅有微小预紧力损失。因此,本文确定防松效果定量评价基准为平垫圈残余预紧力在 80% 时的螺栓振动次数。为了得到防松效果定量评价指标,将平垫圈在残余预紧力为 0.8F (0.8 倍初始预紧力) 时的螺栓振动次数计为基准 1.0,将相同转矩下弹簧垫圈试件的振动次数与该基准值相比,得到防松性能定量评价指标,如表 2 所示。由表 2 可知,随着转矩增加,振动次数评

价指标均提高。镀锌弹簧垫圈与磷化弹簧垫圈的平均评价指标均为 3.0,防松性能较好。紧固转矩为 1.5T 时,镀锌弹簧垫圈防松性能的提升效果最佳。

表 2 不同转矩下防松性能定量评价

Tab. 2 Quantitative evaluation of the anti-loosening performance under different torques

| 防松措施 | 转矩 | 0.8F 时振动次数 | 平垫圈对比 | 定量评价 |
|--------|------|------------|-------|------|
| 镀锌平垫圈 | 0.5T | 15 | 1.0 | 1.0 |
| | 1.0T | 26 | 1.0 | |
| | 1.5T | 30 | 1.0 | |
| 镀锌弹簧垫圈 | 0.5T | 25 | 1.7 | 3.0 |
| | 1.0T | 50 | 1.9 | |
| | 1.5T | 165 | 5.5 | |
| 磷化弹簧垫圈 | 0.5T | 43 | 2.9 | 3.0 |
| | 1.0T | 55 | 2.1 | |
| | 1.5T | 119 | 4.0 | |

5 结论

针对不同表面处理方法的弹簧垫圈连接螺栓,开展了连接螺栓的紧固和防松性能的横向振动试验,以及数值模拟分析,揭示了弹簧垫圈连接螺栓的防松特性。主要结论如下:

1) 横向振动条件下,弹簧垫圈连接螺栓预紧力衰减曲线分为 3 个阶段,即预紧力快速下降阶段、缓慢下降阶段及螺栓迅速松动阶段。

2) 在频率为 9 Hz,振幅为 1.2 mm 的条件下,增加紧固转矩可以显著提高初始预紧力,提高防松性能;以残余预紧力为 0.8F 的螺栓振动次数为标准,镀锌弹簧垫圈下螺栓振动次数最高,当转矩为 1.5T 时,镀锌弹簧垫圈下螺栓振动次数最高为 165 次,相比于镀锌平垫圈提高了 450%。

3) 螺母拧紧后,弹簧垫圈内圈压平贴紧,外圈处于滑移状态,接触压力沿径向递减;横向振动过程中,弹簧垫圈表面整体滑移,滑移区集中于横向载荷反方向。

4) 横向振动过程中,弹簧垫圈与连接板(加载板)始终保持接触并存在接触压力,可有效补偿螺母接触面间隙,确保螺纹区受力均匀,显著提升防松效果。

5) 提出以残余预紧力为 0.8F 的振动次数为基准的防松性能评价方法,取不同转矩下弹簧垫圈防松性能平均值,得出弹簧垫圈连接螺栓的防松指标为平垫圈的 3 倍。

参考文献(References)

[1] 钱进,陈果,寸文渊,等. 拧紧力矩作用下螺栓预紧力的高保真有限元仿真与实验验证[J]. 机械强度,2024,46(4):809-815.
QIAN Jin, CHEN Guo, CUN Wenyuan, et al. High-fidelity finite

element simulation and experimental verification of bolt preload force under tightening torque[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024,46(4):809-815. (In Chinese)

- [2] 赵卫平,常昊天,籍春雷,等. 横向振动作用下螺栓连接节点松动规律数值模拟[J]. 振动与冲击,2024,43(8):61-69.
ZHAO Weiping, CHANG Haotan, JI Chunlei, et al. Numerical simulation of loosening law of bolted joints under lateral vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43 (8) : 61-69. (In Chinese)
- [3] 陈城,许海源,王晨,等. 500 kV 输电塔线体系强风载荷倒塌分析[J]. 工业建筑,2019,49(12):36-41.
CHEN Cheng, XU Haiyuan, WANG Chen, et al. Collapse analysis of 500 kilovolts transmission tower line system under strong wind load[J]. Industrial Construction, 2019,49(12):36-41. (In Chinese)
- [4] 李文斌,陈剑平,周方,等. 强风作用下输电杆塔损伤破坏特点研究[J]. 武汉理工大学学报,2019,41(12):81-88.
LI Wenbin, CHEN Jianping, ZHOU Fang, et al. Research on damage and destruction characteristics of transmission tower subjected to strong wind [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2019,41(12):81-88. (In Chinese)
- [5] GOODIER J N, SWEENEY R J. Loosening by vibration of threaded fastenings[J]. Mechanical Engineering, 1945,67:794-800.
- [6] YANG X J, NASSAR S A, WU Z J, et al. Nonlinear behavior of preloaded bolted joints under a cyclic separating load [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134:011206.
- [7] NASSAR S A, YANG X J, GANDHAM S V T, et al. Nonlinear deformation behavior of clamped bolted joints under a separating service load [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2011, 133 (2):021001.
- [8] NASSAR S A, WU Z J, YANG X J. Achieving uniform clamp load in gasketed bolted joints using a nonlinear finite element model [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(3):031205.
- [9] JUNKER G H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration [J]. SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 1969:314-335.
- [10] PAI N G, HESS D P. Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load [J]. Engineering Failure Analysis, 2002,9(4):383-402.
- [11] ZHANG M, JIANG Y Y, LEE C H. Finite element modeling of self-loosening of bolted joints [J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(2):218-226.
- [12] 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.
- [13] 赵晶,徐啸. 法兰螺栓横向微动磨损试验研究[J]. 机械强度, 2020,42(4):831-836.
ZHAO Jing, XU Xiao. Experimental study on lateral fretting wear of flange bolts [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42 (4) : 831-836. (In Chinese)
- [14] 张明远,鲁连涛,唐明明,等. 横向载荷作用下螺栓临界松动载荷数值计算方法研究[J]. 机械工程学报,2018,54(5):173-178.
ZHANG Mingyuan, LU Liantao, TANG Mingming, et al. Research on numerical calculation method of critical load for bolt loosening under transverse loading [J]. Journal of Mechanical Engineering,

- 2018, 54(5):173-178. (In Chinese)
- [15] 张鹏程. 横向循环载荷下螺栓松动行为的试验研究与机制分析[D]. 杭州:浙江工业大学, 2018:31-34.
ZHANG Pengcheng. Experimental investigation on self-loosening mechanism for bolted joints under the transverse loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018: 31-34. (In Chinese)
- [16] 刘学春, 杜胜权, 陈学森, 等. 循环载荷下高强度螺栓连接摩擦因数试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(23):82-89.
LIU Xuechun, DU Shengquan, CHEN Xuesen, et al. Experimental study on friction coefficient of high-strength bolt connections under cyclic loads [J]. Building Structure, 2021, 51(23): 82-89. (In Chinese)
- [17] 傅德明. 弹簧垫圈的功能与防松[J]. 机械工程, 1990, 1(4):32-34.
FU Deming. Function and anti-loosening of spring washer [J]. China Mechanical Engineering, 1990, 1(4):32-34. (In Chinese)
- [18] 刘本领, 吴保全, 张涛, 等. 涂层对自锁螺栓锁紧力矩影响仿真及试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(1):244-249.
LIU Benling, WU Baoquan, ZHANG Tao, et al. Simulation and experiment study on the effect of coating on locking torque of self-locking bolts [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(1): 244-249. (In Chinese)
- [19] 能源行业电网设计标准化技术委员会. 架空输电线路杆塔结构设计技术规程:DL/T 5486—2020[S]. 北京:中国电力出版社, 2020:71-72.
Technical Committee for Standardization of Power Grid Design in the Energy Industry. Code for design of steel supporting structures of overhead transmission line: DL/T 5486—2020 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2020:71-72. (In Chinese)
- [20] 全国紧固件标准化技术委员会. 紧固件横向振动试验方法:GB/T 10431—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008:1-4.
National Technical Committee on Fastener Standardization. Transverse vibration testing method for fasteners: GB/T 10431—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-4. (In Chinese)
- [21] 全国紧固件标准化技术委员会. 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱:GB/T 3098. 1—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010:6-7.
National Technical Committee on Fastener Standardization. Mechanical properties of fasteners—Bolts, screws and studs: GB/T 3098. 1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 6-7. (In Chinese)
- [22] 杨俊芬, 李宝琪, 战宇皓, 等. 普通螺栓镀锌前后抗拉承载力及扭矩系数测试[J]. 建筑结构, 2020, 50(11):85-89.
YANG Junfen, LI Baoqi, ZHAN Yuhao, et al. Testing of tensile bearing capacity and torque coefficient of plain bolts before and after galvanizing [J]. Building Structure, 2020, 50(11): 85-89. (In Chinese)

Test and simulation research on the anti-loosening performance of spring washer connecting bolts

REN Yaning¹ LI Junkuo¹ WANG Lihuan¹ GAO Fan¹ HU Hao² ZHOU Wanzhi²

(1. State Grid Hebei Economic Research Institute, Shijiazhuang 050000, China)

(2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the unclear evolution law of anti-loosening performance of spring washer connecting bolts under transverse vibration and the lack of relevant tightening torque design provisions in current specifications, the influence mechanism of surface treatment methods and tightening torque on the anti-loosening performance of bolts is investigated to provide reference for the anti-loosening design of transmission tower bolt connections. [Methods] Firstly, transverse vibration tests were carried out with surface treatment methods (galvanizing, phosphating) and tightening torque (0.5, 1.0, 1.5 times the standard torque) as variables to compare the preload attenuation characteristics of bolts with different structures. Secondly, a finite element model of bolted connection was established by Ansys software to simulate the stress state of the spring washer and the stress evolution law of the thread area during vibration. Then, a quantitative evaluation method of anti-loosening performance based on residual preload was proposed to clarify the difference of anti-loosening effect of bolts with different structures. Finally, the validity of the model was verified to ensure the reliability of the research results. [Results] The results show that the preload attenuation of bolts under transverse vibration can be divided into three stages: rapid decline, slow decline and rapid loosening. Under 1.5 times the standard torque, the vibration cycles of the galvanized spring washer bolt reaching the residual preload threshold are 450% higher than those of the galvanized flat washer bolt, showing the optimal anti-loosening effect. The spring washer remains in contact with the connecting plate during vibration, which makes the stress distribution in the thread area more uniform. The proposed quantitative evaluation method shows that the average anti-loosening performance of bolts with spring washers is three times that of bolts with flat washers.

Key words: Spring washer; Tightening torque; Transverse vibration; Bolt loosening; Preload

Corresponding author: ZHOU Wanzhi, E-mail: 331552838@qq.com

Fund: State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Technology Project (kj2023-024)

Received: 2024-06-27 Revised: 2024-10-23

(编辑:李凯阳)