

横向载荷作用下螺栓连接松动过程研究^{*}

胡 阳^{1,2}, 姜 东^{1,3}, 王旻睿^{1,2}, 曹芝腑¹, 费庆国¹
(1. 东南大学空天机械动力学研究所 南京, 211189) (2. 东南大学工程力学系 南京, 211189)
(3. 南京林业大学机械电子工程学院 南京, 210037)

摘要 针对横向载荷作用下的螺栓连接松动过程开展研究, 给出了面向螺栓松动仿真的建模方法, 分析了循环往复载荷作用下接触状态与残余预紧力的变化规律, 并研究了载荷作用位置、幅值和频率对螺栓连接松动的影响。分析结果表明: 在横向循环载荷作用下, 残余预紧力出现交替的上升与下降; 螺纹接触面先于螺头承压面进入滑移状态; 横向载荷作用在上板或下板对松动没有影响; 载荷幅值是影响松动的主要因素, 载荷幅值越大松动越容易发生, 而加载频率对松动影响较小。本研究分析结果与 Junker 试验结果一致性良好, 可推广到复杂载荷条件下的应用。

关键词 螺栓连接; 松动; 螺纹; 横向载荷
中图分类号 TH131.3; TB122

引 言

螺栓是最常见的连接方式之一, 被广泛应用于航空航天、汽车等工程领域, 正常工作状态下的螺栓连接能可靠地完成被连接结构之间的载荷传递。螺栓预紧力的显著下降是连接失效的关键指标, 动态载荷作用下, 连接预紧力会出现松弛, 导致结构动态特性的时变^[1]。松动初期预紧力下降幅度较小, 但随着松动的进行, 残余预紧力会迅速下降, 导致螺栓连接松动失效。因此, 松动过程分析对预测螺栓连接失效具有重要意义。松动过程涉及诸多因素, 机理十分复杂。影响松动速率的主要因素有螺栓预紧力、工作载荷、温度变化、连接形式与尺寸、材料性能以及结合面状态等。松动检测是螺栓松动问题的重要方法之一。屈文忠等^[2]提出了一种基于亚谐波共振分析的螺栓松动识别方法, 通过提取响应谱中的亚谐波成分有效地识别螺栓松动。张健奎等^[3]提出了以声发射相对当量能量指标进行螺栓连接状态的辨识。吴冠男等^[4]对结构施加高频具有混沌特征的超声波信号激励, 提取平均吸引子局部方差比 ALAVR 作为松动指标。陆飞等^[5]提出将二次谐波振幅与基频振幅的比值作为表征结构松动状态的判据。然而, 松动检测只能判断特定结构在服役过程

中的连接状态, 属于事后检测, 难以在设计阶段给出较直接的参考意见。

螺栓松动问题研究方法主要有试验研究、理论分析和数值仿真。在试验方面, Junker^[6]利用其设计的试验装置证明了横向载荷是引起松动的主要载荷形式, 发现螺纹处或螺头下方的接触处发生滑动, 松动现象就会发生, 将松动的原因归结为剪切载荷引起被紧固件之间的相对错动, 进而导致周向摩擦力的减小, 最终产生松动。Ouyang 等^[7]将摩擦力矩的 Jenkins 单元用于拟合试验的滞回曲线。王旻睿等^[8]开展了常/高温条件复合材料搭接板的随机振动试验研究, 以固有频率为评判量, 比较了高温振动环境下不同连接形式的防松效果。闵昌万等^[9]建立了一种在高温条件下通过动力学试验获取结构连接刚度的技术途径。目前, 针对侧向载荷引起螺栓松动的试验装置大多是基于 Junker 试验机改进而来。文献[10-13]分别研究了轴向和横向载荷下螺纹的微动磨损。利用压力传感器和转角测量装置可以监测螺栓预紧力和螺栓转动角度的变化, 但受限于试验技术和仪器, 还难以对被连接结构接触面以及螺纹接触面的受力和接触状态进行直接监测。理论模型常基于较强的假设, Nassar 等^[14]通过划分扇区计算侧向载荷迫使螺栓弯曲产生螺杆截面的弯矩扭矩, 再计算螺纹处接触压力及摩擦力, 利用刚体动

^{*} 国家自然科学基金资助项目(11602112, 11572086); 江苏省杰出青年科学基金资助项目(BK20170022)
收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-05-09

力学计算转动的速度和加速度,积分得到松动历程,但该数学模型基于线性假设建立,且忽略螺纹配合的影响,即未考虑接触压力的复杂分布及接触面积的变化,因此理论与试验结果只有一定的相关性,但并不是非常吻合。

有限元仿真因其能显示接触面上的受力及接触状态,对于研究松动过程意义重大,成为目前条件下研究松动过程的最佳选择。从最初的无螺纹光杆模型,到传统的轴对称模型,再到考虑螺纹升角的精细模型^[15],有限元模型逐步接近实际情况,对仿真结果的研究也从应力分布研究逐步到松动过程的模拟。建立螺纹升角这一特殊的几何参数是准确模拟松动现象的先决条件,但因计算量大、不易收敛等问题,始终制约着有限元分析在螺栓松动研究中的应用。张明远等^[16]计算得出了引起螺栓松动的横向载荷临界值。Segalman^[17]以四参数 Iwan 模型模拟搭接结构的力学特性。姜东等^[18-19]以薄层单元模拟搭接界面,识别螺栓连接结构接触面力学性能,该等效模型能较准确地模拟正常工作状态的接触刚度,但无法表征连接结构松动后的力学特性。有限元模型通常基于实际结构进行一定的简化,但根据 Junker 试验简化的有限元模型,或是类似于螺钉连接,在被连接件上加工出内螺纹而无螺母^[20];或是忽略被紧固件之间的摩擦,只建一块板并固定螺母^[21]和螺头^[22]之一。这几种简化模型终究与单搭接这一基本结构在边界条件上有所差别,即仅一板端面固定,一板端面受载,螺头和螺母均无约束。

笔者基于考虑螺纹升角的有限元模型,通过数值仿真开展了横向载荷作用下螺栓连接结构松动过程的研究,分析松动过程中接触状态与残余预紧力的变化规律,探究了横向载荷作用位置、幅值及频率对螺栓连接结构松动的影响。

1 横向载荷下的螺栓连接松动

1.1 Junker 试验与螺栓松动

图 1(a)为典型螺栓松动试验装置,根据典型的试验松动曲线^[23]将松动过程分为两个阶段,如图 1(b)所示。第 1 阶段主要因变形引起预紧力下降,而没有发生螺栓的旋出;第 2 阶段则由于螺栓的旋出,预紧力出现明显下降。当预紧力较小或搭接板相对滑动较大时,松动会起始于第 2 阶段。

在第 2 阶段,螺纹这一独特的几何形状是松动的重要原因,螺纹副和承压面产生滑移是螺栓旋出

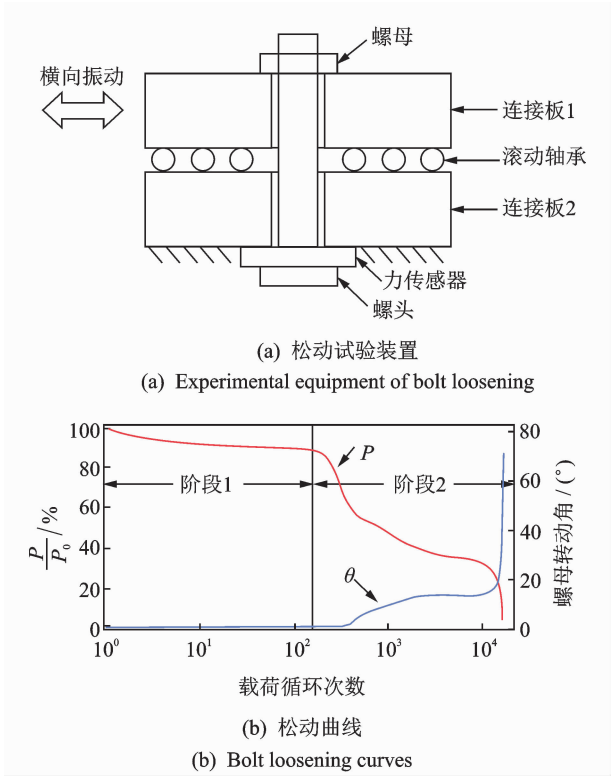


图 1 典型螺栓松动试验

Fig. 1 Typical bolt loosening experiment

现象发生的必要条件。现对结构整体受力以及承压面和螺纹的受力作简单分析,为方便叙述,将螺栓轴线方向称为轴向,螺栓横截面内指向轴线方向称为径向,横截面内沿圆周切向称为切向。

螺栓整体受剪切载荷的作用,螺杆发生弯曲变形从而产生剪切力 F_s 。螺头承压面除剪切力外,还受到摩擦力以及由于螺旋角从螺纹处传递而来的松动力矩。若将承压面等分为若干个扇形区域,如图 2 所示,近似认为 F_s 等分,每个扇区为 dF_s ,方向沿载荷方向。将松动力矩转换为扇区上的力偶,力偶大小为 dF_l ,方向沿切向。摩擦力在每个扇区上最大值为 dF_b ,方向与 dF_s 和 dF_l 合力方向相反。

对于不同位置扇区,由于 dF_s 和 dF_l 夹角的不同,受力情况不尽相同。取 3 个典型位置 α, β 和 γ 扇区,在 α 扇区处, dF_s 和 dF_l 方向相同,随着载荷的增大,二者合力首先超过静摩擦力,此时 α 扇区进入滑移状态。载荷继续增大,滑移区由 α 逐渐向两侧扩展,整体绕最难进入滑移状态的 β 转动。若 β 也进入滑移区,则承压面发生完全滑移,否则发生部分滑移。当载荷改变方向, α 和 β 位置互换,从而绕 α, β 两区来回摆动使螺栓逐渐旋出。

对于螺纹,受到垂直于螺纹表面的接触力 F_n 和螺纹间摩擦力 F_l 作用,二者沿轴向、径向和切向

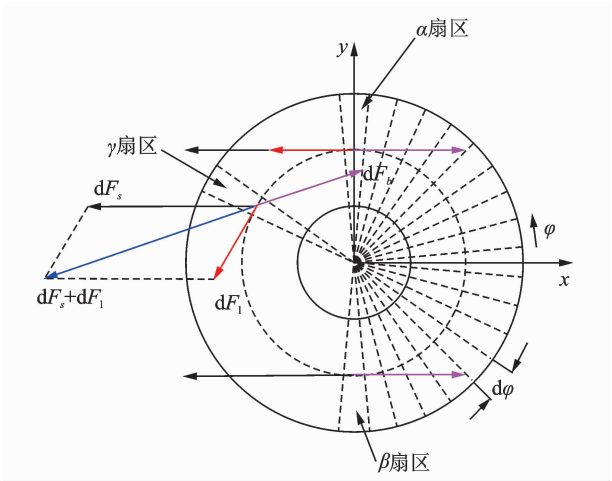


图 2 螺栓承压面受力分析

Fig. 2 Load distribution of the bolt head bearing surface

3 个方向分解,沿轴向和径向的分力不产生绕杆轴的力矩,沿切向的分力产生扭矩。二者扭矩之和的方向若与拧紧方向相同则产生紧固效果,若相反则产生松动力矩 T_l ,并沿螺杆传递到螺母。

Yamamoto^[24]基于静力分析得到了施加在螺母上的拧紧力矩与拧松力矩。李海江等^[25]认为拧紧力矩与拧松力矩的差值是螺栓连接松动的原因。

拧紧力矩 T_f 为克服螺纹副的摩擦力矩和克服螺母支承面摩擦的力矩之和

$$T_f = \frac{1}{2} F_f \left(\frac{1.15\mu_s + \tan\beta}{1 - 1.15\mu_s \tan\beta} d_p + \mu_w d_w \right) \quad (1)$$

拧松力矩 T_l 类似地得到

$$T_l = \frac{1}{2} F_f \left(\frac{1.15\mu_s - \tan\beta}{1 + 1.15\mu_s \tan\beta} d_p + \mu_w d_w \right) \quad (2)$$

其中: F_f 为螺栓中产生的预紧力; d_p 为外螺纹的有效直径; β 为螺纹升角; μ_s 为螺纹副的摩擦因数; μ_w 为支承面摩擦因数; d_w 为螺纹支承面摩擦力矩的等效直径。

1.2 横向载荷影响因素

施加载荷为正弦强制位移, $\delta = \delta_0 \sin(2\pi ft)$, 其中: δ_0 为载荷幅值; f 为载荷频率。需对载荷作用位置、幅值及频率做分析讨论。

横向载荷作用在上板或下板的区别在于:作用在上板时,上板运动带动螺头运动,同时靠近螺头部分产生一定的弯曲变形;作用在下板时,下板运动带动螺母运动,而螺母通过螺纹接触面带动螺杆运动,靠近螺母部分产生一定的弯曲变形。

分析可知,横向载荷幅值较大时会导致承压面出现滑移区,幅值的大小关系着滑移区是否出现和

出现程度。若将承压面出现滑移区时的幅值作为临界值,可将其分为两段讨论:幅值较小,未达到临界值,螺栓仅受到循环弯曲;幅值超过临界值,出现滑移区并伴随可能的松动现象。Junker^[6]的试验结果表明,松动速率与载荷频率无关。

2 面向螺栓松动仿真的建模方法

2.1 螺纹建模

螺纹通过简化为轴对称模型,可用来研究其应力分布,其优点是分析耗时短,但轴对称模型因为建模时未能考虑螺纹升角而难以模拟连接结构的松动现象。另外,可将螺纹部分进行独立建模并划分网格,然后绑定于光滑螺杆。这种建模方法可以考虑螺纹升角,但采用绑定的方式使得螺栓偏于刚硬,进而影响结果的准确性。笔者基于 Fukuoka 等^[15]提出的螺纹几何全六面体网格划分方法,参考其网格的设置,精确地构造出螺纹的几何形状,在其网格设置的基础上开展进一步的有限元分析。

螺杆螺纹的轮廓线分为螺纹牙底(A-B),螺纹牙侧面(B-C)和螺纹牙顶(C-D),如图 3 所示。这一方法的核心是:考虑具有相同横断面、仅横断面旋转不同角度的升角螺纹,利用轮廓线方程表示螺纹横断面。在此基础上,将一个螺距内的横断面划分为 n 层网格,再将单个横断面进行平移旋转,要求首尾横断面网格的投影重合,即保证网格数一致。每次旋转角度为 $360/n$ 的整数倍,当 n 取值越大时,螺纹网格越精细。

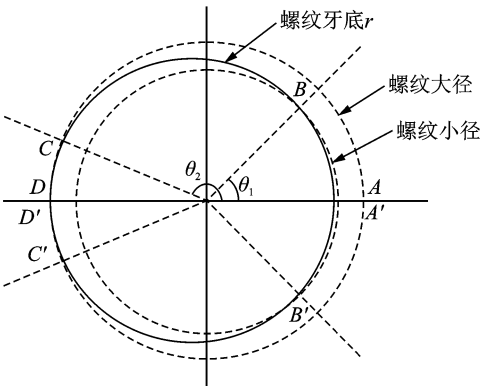


图 3 外螺纹横截面轮廓线

Fig. 3 Profile of the cross section of external thread

外螺纹的轮廓线方程是根据 ISO 724(一般用途米制螺纹)中螺纹牙型参数,用 Fukuoka 等^[15]的方法从标准牙型推导而来,和实际螺纹尺寸一致。

方程具体为

$$r=\begin{cases} \frac{d}{2}-\frac{7}{8}H+2\rho-\sqrt{\rho^2-\frac{P^2}{4\pi^2}\theta^2} & (0\leqslant\theta\leqslant\theta_1) \\ \frac{H}{\pi}\theta+\frac{d}{2}-\frac{7}{8}H & (\theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2) \\ \frac{d}{2} & (\theta_2\leqslant\theta\leqslant\pi) \end{cases} \quad (3)$$

其中： $\theta_1=\pi/4$ ； $\theta_2=7\pi/8$ ； $\rho\leqslant 3^{1/2}P/12$ ； $H=3^{1/2}P/2$ ； d 为外螺纹的公称直径； P 为外螺纹螺距； ρ 为外螺纹牙底圆半径。

按照以上方法，利用规律曲线按照轮廓线方程建立螺纹处横断面形状曲线，再利用有限元软件将其等角度分为 n 份，进行 2D 建模。通过旋转模拟出实际螺纹形状，并将这 $n+1$ 个横断面进行映射，生成一个螺距内的 3D 有限元模型。通过复制生成整个螺纹，而后建立阶梯圆柱模型，压缩重合节点使其成为一体。螺母上的内螺纹按照相同方法建立，从而建立如图 4 所示的有限元模型。螺栓为 M10，螺杆长为 58 mm，板厚为 20 mm，螺距为 1.5 mm，螺纹段为 15 mm，孔间隙为 1 mm。

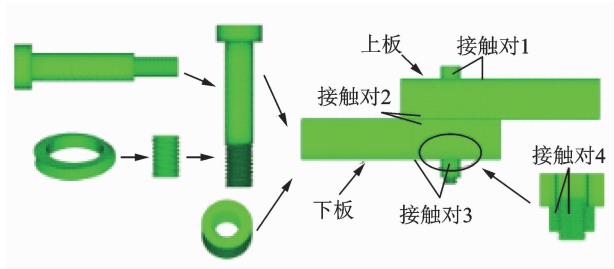


图 4 螺栓连接结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of bolted joint structure

2.2 接触有限元建模

Gong 等^[22] 比较了 4 种预紧力加载方式，指出预紧力单元可以较好地兼顾计算的精度与成本。笔者采用螺栓载荷施加预紧力，螺栓载荷是 ABAQUS

中用以模拟紧固件预紧力的一种方法，其具体做法是先选取螺栓内部横截面作为预紧截面，通过在预紧截面施加预张力，再将施加力改为固定在当前长度，使螺栓预紧力以初始条件的形式加到模型上参与后续的计算。具体步骤如下：①对螺头及螺母约束刚体位移，施加一个较小的力使接触关系稳定；②撤去额外约束，并施加预紧力到目标值；③将预紧力调整为固定在当前长度。前 3 步用以施加预紧力，加载从第 4 步开始。

在螺纹牙底处由于局部应力集中会产生塑性变形，引起预紧力缓慢下降。Gong 等^[22] 发现材料的塑性仅在最初的几个载荷周期引起更大的预紧力下降，而对之后的周期影响很小，即在材料松动期塑性变形引起的棘轮效应安定后，材料的塑性便对松动速率影响不大。故可建立弹性模型，不考虑塑性的影响，弹性模量 $E=210\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。

共建立 4 处摩擦接触对，均采用有限滑移，分别是螺头下表面与上板上表面、上下板之间、下板下表面与螺母上表面以及螺杆外螺纹与螺母内螺纹。除内外螺纹处摩擦因数取 0.15 外，其余处均取 0.10。切向设置为罚摩擦，法向设置为硬接触。载荷为正弦强制位移 $\delta=\delta_0\sin(2\pi ft)$ ，其中： δ_0 为载荷幅值； f 为载荷频率。

3 螺栓连接松动过程及影响因素分析

3.1 松动过程分析

取载荷幅值为 0.20 mm，施加在下板端面。对一个周期内不同时刻螺纹接触面和螺头承压面接触状态进行分析。

图 5 所示为单个周期内螺纹接触面和螺头承压面接触状态变化的分析结果，其中：红色表示粘结；绿色表示滑移。螺纹处首先出现局部滑移，随着载

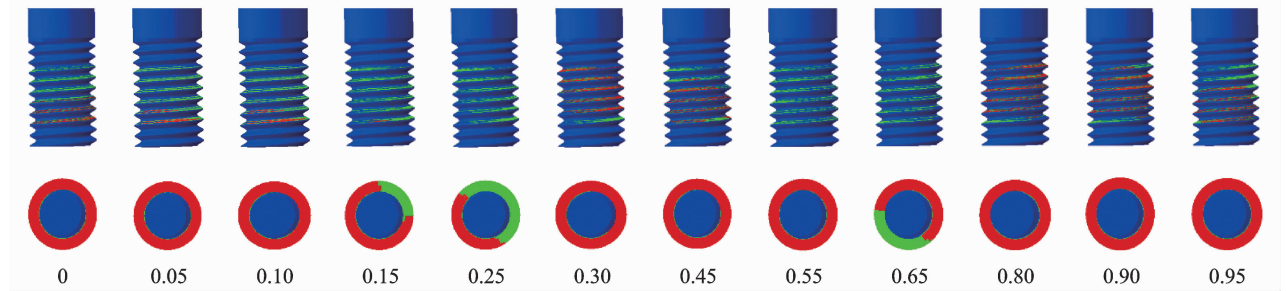


图 5 单个周期内螺纹接触面和螺头承压面接触状态变化(单位:s)

Fig. 5 Different contact status of thread and bolt head bearing surface during one cycle (unit:s)

荷的增大,滑移区逐渐扩展(0.05 s,0.10 s,0.15 s)至完全滑移(0.25 s)。螺头处的滑移区出现稍晚,逐渐扩展(0.15 s,0.25 s)但未达到完全滑移。载荷达到幅值后开始减小,螺纹处和螺头处立刻停止滑移(0.30 s),在载荷逐渐减小的过程中,螺纹处再次出现局部滑移(0.45 s)。在反向加载过程中,螺纹处首先进入完全滑移状态(0.55 s),螺头处于局部滑移状态(0.65 s)。当载荷反向达到幅值后开始减小,螺纹处立刻停止滑移(0.80 s),同样在载荷逐渐减小的过程中,螺纹处已经再次出现局部滑移(0.95 s)。

为了分析连接剪切刚度在循环载荷作用下的变化规律,通过提取横向位移和剪切载荷分析结果,得到图 6 所示的剪切滞回曲线,取正向加载至幅值(B-C 段),再逐渐减少到零(C-D,D-E)进行分析。

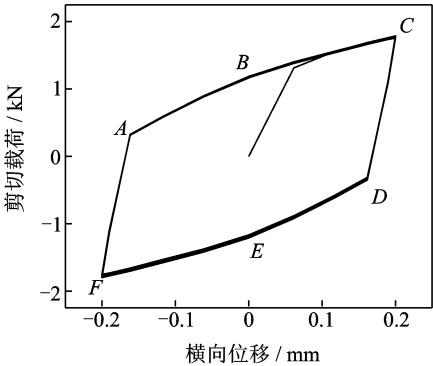


图 6 剪切载荷滞回曲线
Fig. 6 Shearing load hysteretic curve

B-C 段螺纹完全滑移,螺头由无滑移到局部滑移,因此斜率最小,剪切刚度最小;C-D 段螺纹无滑移,螺头无滑移,斜率最大,剪切刚度最大;D-E 段螺纹局部滑移,螺头无滑移,斜率略大于 B-C 段。B-C 段的斜率与 D-E 段相差较小,说明螺头处的滑移状态对螺栓连接结构的剪切刚度虽有影响,但影响较小;C-D 段斜率明显大于其余两段,说明螺纹处的滑移状态对螺栓连接结构的剪切刚度影响较大。

如图 7 所示,预紧力在整个松动过程中呈下降趋势,这是因为螺纹副的摩擦力一部分用来抵抗横向载荷的作用,螺纹副达不到无横向载荷时的摩擦自锁条件,进而螺纹副产生相对运动,即螺栓发生旋出,导致预紧力下降。在一个周期内发生交替的上升与下降,这说明螺栓在一个振动周期中发生交替的拧紧与拧松。比较式(2)和式(3)可知,对于相同的连接结构,在预紧力相同时,拧紧力矩总是大于拧松力矩。因此,当横向载荷作用产生的松动力矩大

于拧紧力矩时,拧松值必大于拧紧值,从而导致完成一个周期后螺栓略微旋出并伴随着预紧力的下降。

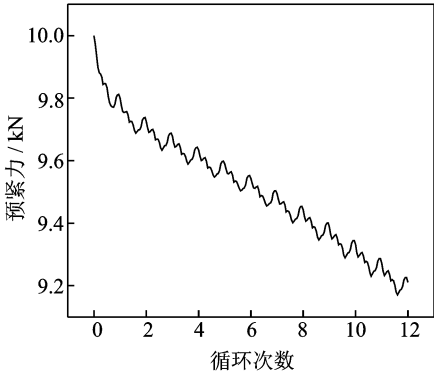
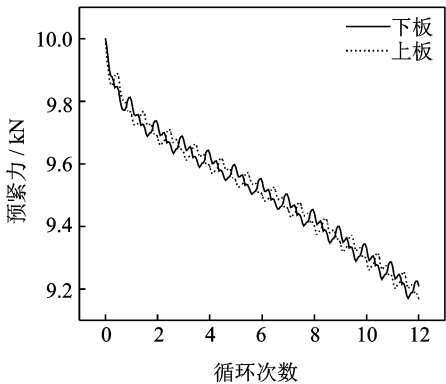


图 7 残余预紧力曲线
Fig. 7 Residual preload curve

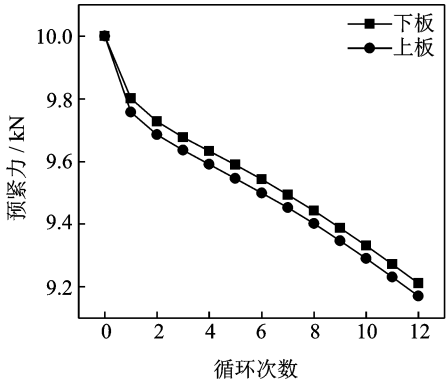
3.2 作用位置的影响

分为上板固定、下板加载和下板固定、上板加载两种加载方式,载荷幅值取 0.20 mm。

图 8(a)所示为整个循环过程中预紧力的变化过程,仿真分析中,施加于上下板的均为横向循环载荷。



(a) 循环过程
(a) Full processes of cycles



(b) 循环周期点
(b) Cycle points

图 8 载荷作用位置不同时残余预紧力曲线
Fig. 8 Residue preload curves at different loading positions

针对上板,施加先拉后压的循环载荷;反之,下板施加先压后拉的循环载荷。根据分析,下板在一个周期内先拧松后拧紧,上板则先拧紧后拧松。图 8(b)为每个循环周期点上的残余预紧力变化曲线,可以看出,相同周期数下二者在预紧力下降幅度上相差一个稳定值。由此可知,载荷施加于上板和下板上,虽然传力方向不同,但预紧力的下降速率一致。

3.3 幅值的影响

载荷幅值分别取 0.05,0.10,0.15,0.20 mm。如图 9 所示,随着载荷幅值的增加,预紧力下降幅度变大。当幅值较小时,预紧力下降速率逐渐放缓;当幅值较大时,下降速率逐渐稳定在常值。

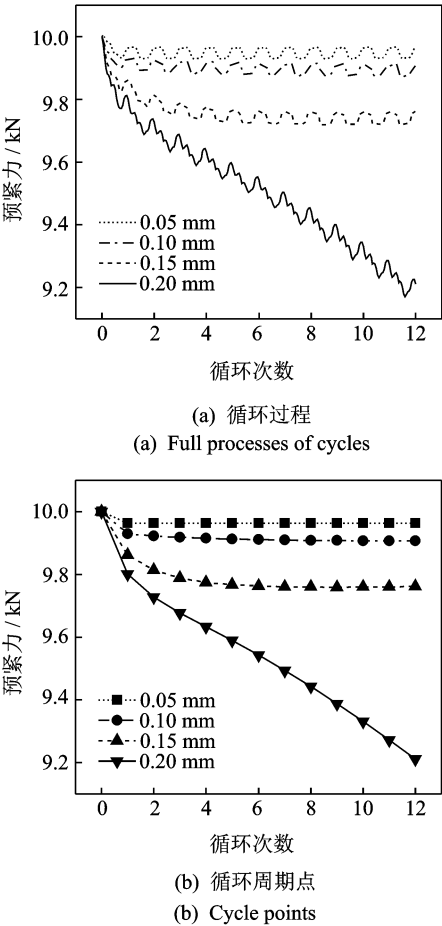


图 9 幅值不同时残余预紧力曲线

Fig. 9 Residual preload curves at different loading magnitude

图 10 所示为剪切载荷滞回曲线随幅值的变化关系。幅值较小如 0.05 和 0.10 mm 时,预紧力下降幅度较小,从剪切载荷滞回曲线可以看出,在 A-B-C 段斜率几乎没有变化;而当幅值逐渐增大时,明

显出现 A-B 段和 B-C 段的分界,且幅值越大分界越明显;C-D 段是达到幅值后载荷刚开始减小,螺纹和承压面都处于无滑移状态,此时的剪切刚度近似为连接结构正常状态的剪切刚度。

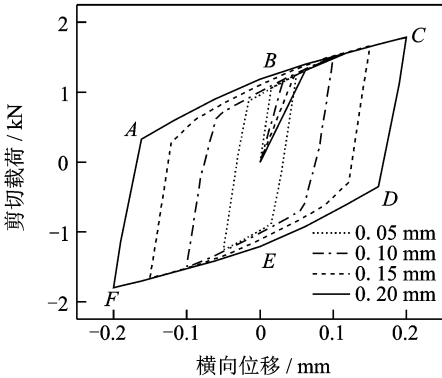


图 10 幅值不同时剪切载荷滞回曲线

Fig. 10 Shearing load hysteretic curves at different amplitudes

3.4 频率的影响

载荷频率分别取 1,5,10 Hz,与准静态结果进行比较。由图 11 可见,准静态情况下预紧力下降速率比动态略快,这是因为 ABAQUS 隐式求解器中的准静态过程忽略了惯性力对阻碍运动状态变化的影响。频率 1,5,10 Hz 之间的区别很小,由此可以认为较低的频率变化对于松动过程影响较小。

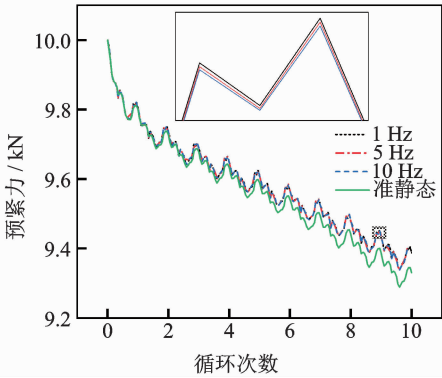


图 11 频率不同时残余预紧力曲线

Fig. 11 Residual preload curves at different loading frequencies

4 结 论

1) 在横向循环载荷作用下,残余预紧力出现交替的上升与下降。螺纹接触面先于承压面进入滑移

状态,且螺纹接触面的滑移状态是影响剪切刚度的主要因素。

2) 载荷的作用位置对于螺栓连接松动影响不大。载荷的幅值大小是影响松动的主要因素,载荷幅值越大松动越容易发生,因此限制上下板相对位移的大小是防止松动的有效手段。加载频率对松动影响较小,准确模拟了 Junker 试验结果。

参 考 文 献

- [1] IBRAHIM R, PETTIT C. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 279(3/4/5): 857-936.
- [2] 屈文忠,张梦阳,周俊宇,等. 螺栓松动损伤的亚谐波共振识别方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(2): 279-283.
QU Wenzhong, ZHANG Mengyang, ZHOU Junyu, et al. Using sub-harmonic resonance to detect bolted joint looseness[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(2):279-283. (in Chinese)
- [3] 张健奎,王宁,卢萍,等. 辨识振动环境中两点螺栓连接状态的 REE 声发射指标[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(8):179-182.
ZHANG Jiankui, WANG Ning, LU Ping, et al. AE REE index to identify connecting state of a 2-bolt connected structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(8):179-182. (in Chinese)
- [4] 吴冠男,徐超. 基于混沌超声波激励的螺栓连接松动检测研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(9):208-213.
WU Guannan, XU Chao. Bolt looseness detection based on chaos ultrasonic excitation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(9):208-213. (in Chinese)
- [5] 陆飞,曹芝腑,姜东,等. 基于非线性动响应的夹持松动特性研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(4):712-718.
LU Fei, CAO Zhifu, JIANG Dong, et al. Study on the characteristic of clamped looseness based on non-linear dynamic response[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(4):712-718. (in Chinese)
- [6] JUNKER G H. Criteria for self-loosening of fasteners under vibration[J]. *Sae Transaction*, 1969, 44(10): 14-16.
- [7] OUYANG H J, OLDFIELD M J, MOTTERSHEAD J E. Experimental and theoretical studies of a bolted joint excited by a torsional dynamic load [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, 48(12): 1447-1455.
- [8] 王旻睿,谭志勇,何顶顶,等. 高温环境复合材料螺栓连接振动的防松试验[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(6):1169-1175.
WANG Minrui, TAN Zhiyong, HE Dingding, et al. Anti-loosening experiment of composite bolted structures under high temperature and vibration circumstance[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(6):1169-1175. (in Chinese)
- [9] 闵昌万,谭志勇,费庆国. 复合材料热结构螺栓连接刚度试验分析方法研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(6):876-880.
MIN Changwan, TAN Zhiyong, FEI Qingguo. Experimental analysis on connection stiffness of bolt for thermal structures of composite material[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(6):876-880. (in Chinese)
- [10] LIU J H, OUYANG H J, PENG J F, et al. Experimental and numerical studies of bolted joints subjected to axial excitation[J]. *Wear*, 2016, 346/347:66-77.
- [11] LIU J H, OUYANG H J, FENG Z Q, et al. Study on self-loosening of bolted joints excited by dynamic axial load[J]. *Tribology International*, 2017, 115:432-451.
- [12] 杜永强,刘建华,刘学通,等. 偏心载荷作用下螺栓连接结构的松动行为研究 [J]. *机械工程学报*, 2018(14):74-81.
DU Yongqiang, LIU Jianhua, LIU Xuotong, et al. Research on self-loosening behavior of bolted joints under eccentric excitation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018(14):74-81. (in Chinese)
- [13] ZHANG M Y, LU L T, WANG W J, et al. The roles of thread wear on self-loosening behavior of bolted joints under transverse cyclic loading[J]. *Wear*, 2018, 394/395:30-39.
- [14] NASSAR S A, HOUSARI B A. Self-loosening of threaded fasteners due to cyclic transverse loads[C]// *ASME 2005 Pressure Vessels and Piping Conference*. Denver, Colorado, USA: ASME Pressure Vessels and Piping Division (Publication), 2005:169-187.
- [15] FUKUOKA T, NOMURA M. Proposition of helical thread modeling with accurate geometry and finite element analysis[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*, 2008, 130(1): 1-6.

[16] 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)

[17] SEGALMAN D J. A four-parameter Iwan model for lap-type joints [J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 72(5): 752-760.

[18] 姜东,吴邵庆,史勤丰,等. 基于各向同性本构关系薄层单元的螺栓连接参数识别[J]. 振动与冲击, 2014, 33(22):35-40.
JIANG Dong, WU Shaoqing, SHI Qinfeng, et al. Parameter identification of bolted-joint based on the model with thin-layer elements with isotropic constitutive relationship [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(22):35-40. (in Chinese)

[19] 姜东,吴邵庆,史勤丰,等. 基于薄层单元的螺栓连接结构接触面不确定性参数识别[J]. 工程力学, 2015, 32(4):220-227.
JIANG Dong, WU Shaoqing, SHI Qinfeng, et al. Contact interface parameter identification of bolted joint structure with uncertainty using thin layer element method [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(4):220-227. (in Chinese)

[20] HOU S Y, LIAO R D. Numerical simulation of self-loosening of bolted joints under cyclic transverse loads [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 487: 488-493.

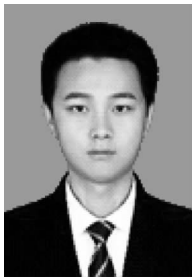
[21] PAI N G, HESS D P. Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load[J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(4):383-402.

[22] GONG H, LIU J H. Some factors affecting the loosening failure of bolted joints under vibration using finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2018 232(21): 3942-3953.

[23] JIANG Y Y, ZHANG M. A study of early stage self-loosening of bolted joints [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125: 518-526.

[24] YAMAMOTO A. The theory and computation of threads connection[M]. Tokyo: Yokendo, 1980:80-92.

[25] 李海江,田煜,孟永钢,等. 横向振动作用下螺纹联接松动过程的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016(2):171-175.
LI Haijiang, TIAN Yu, MENG Yonggang, et al. Experimental study of the loosening of threaded fasteners with transverse vibration[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2016(2):171-175. (in Chinese)



第一作者简介:胡阳,男,1995 年 2 月生,硕士生。主要研究方向为连接结构动力学。
E-mail:hu@seu.edu.cn

通信作者简介:费庆国,男,1977 年 1 月生,教授、博士生导师。主要研究方向为空天机械动力学。
E-mail:qgfei@seu.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 30 元,全年 180 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn

