

文章编号: 1000-8055(2023)02-0453-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210127

剪切载荷下基于接触面滑移-黏着接触状态变化的螺栓松动特性

王开平, 闫 明, 苏东海, 孙自强
(沈阳工业大学 机械工程学院, 沈阳 110870)

摘 要: 为研究螺栓松动特性, 首先建立了带升角螺纹螺栓连接结构精细有限元模型, 采用施加力矩法施加了初始预紧力, 然后进行了螺栓松动特性仿真分析, 提出了基于螺栓头接触面和螺纹接触面滑移-接触状态变化分析螺栓松动特性的方法, 最后对该方法进行了准确性验证。结果表明: 螺栓头接触面和螺纹接触面滑移-黏着接触状态变化规律能准确表征螺栓松动特性; 两接触面滑移-黏着接触状态的交替变化是造成螺栓松动的主要因素, 若始终存在黏着区域, 螺栓松动不会发生; 接触面处于滑移状态区域面积越大, 增长速率越快, 螺栓松动越容易发生; 振幅越大、偏心距离越大, 两接触面进入滑移状态的区域面积越大、速率越快, 螺栓松动越容易发生; 两接触面摩擦系数相差越大, 螺栓松动越不容易发生, 并存在一个两接触面摩擦系数匹配值范围, 使螺栓松动最容易发生。

关 键 词: 螺栓松动特性; 滑移-黏着; 接触状态; 影响因素; 仿真分析

中图分类号: V415.1

文献标志码: A

Bolt loosening characteristics based on change of slip-adhesion contact state under shear load

WANG Kaiping, YAN Ming, SU Donghai, SUN Ziqiang

(School of Mechanical Engineering,
Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to study the bolt looseness characteristics, a fine finite element model of bolt connection structure with raised angle was established, and the initial preload was applied by means of applying torque method. Then, simulation analysis of bolt looseness characteristics was carried out. Finally, the accuracy of this method was verified. The results showed that: the change law of slip adhesion contact state of bolt head contact surface and thread contact surface can accurately characterize the bolt loosening characteristics; the alternate change of slip adhesion contact state of two contact surfaces is the main factor causing bolt loosening; if there is always an adhesion area, no bolt loosening occurs; the larger area of contact surface in the sliding state indicated the faster growth rate, the faster bolt loosening and higher likeliness of loosening; the larger amplitude and the greater eccentricity distance indicated the larger area and the faster speed of two contact surfaces entering the sliding state, and the easier bolt loosening; the greater difference of friction coefficient between the two contact surfaces indicated the higher likeliness of bolt loosening.

Keywords: bolt loosening characteristics; slip-adhesion; contact state; influencing factors; finite element analysis

收稿日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705337); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802077)

作者简介: 王开平(1993—), 男, 博士生, 主要从事螺栓连接件研究。

引用格式: 王开平, 闫明, 苏东海, 等. 剪切载荷下基于接触面滑移-黏着接触状态变化的螺栓松动特性[J]. 航空动力学报, 2023, 38(2): 453-461.

WANG Kaiping, YAN Ming, SU Donghai, et al. Bolt loosening characteristics based on change of slip-adhesion contact state under shear load[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(2): 453-461.

螺栓连接结构是常见的紧固方式之一,具有构造简单、便于拆卸、紧固性能好等优点在航空航天、汽车工程等领域中广泛存在应用,是构成许多整体构件的基本单元^[1-3]。连接结构受到振动、循环载荷、冲击载荷、热载荷等外界动载荷时,会发生松动现象,引起工程事故甚至造成巨大生命财产损失,进行单螺栓连接结构松动特性相关研究具有一定意义和价值。

国内外学者为揭示螺栓松动机理对螺栓松动特性问题进行了大量相关研究, Junker^[4]研发了容克试验机并进行了大量的螺栓松动试验,得到了横向载荷更容易引起螺栓松动的结论,并进行了一系列不同影响因素对螺栓松动影响规律研究。Pai等^[5]通过有限元分析了动态横向载荷下螺栓松动行为,得到了不同载荷下的螺栓松动行为规律。巩浩等^[6]通过有限元分析和螺栓松动试验发现了应力再分布、材料塑性变形以及螺纹间相对旋转是导致预紧力衰退过程的主要原因,并通过螺栓松动试验进行了验证。Dinger^[7-8]采用螺栓松动有限元仿真和螺栓松动试验的方法研究了扭转和横向载荷混合作用下的连接结构各接触面局部滑移累积行为。Izumi等^[9-10]对螺栓松动进行了有限元仿真分析,发现局部滑移累积可以不断地导致螺栓发生旋转松动,螺纹接触面的滑移是导致螺栓松动发生的必要条件。Kasei^[11]建立了螺栓松动理论模型,模拟了各接触面的微小的滑移累积导致螺栓发生松动的过程。Nassar等^[12]从理论上建立了能够表征摩擦力矩和螺栓预紧力之间关系的非线性模型,研究了临界横向载荷值并探讨了不同影响因素对其的影响规律。Zhang等^[13]发现振动可引起螺纹接触面滑移行为并且横向载荷能使螺纹接触面压力分布呈现周期性变化。Ibrahim等^[14]提出在螺栓连接结构在振动条件下当螺栓预紧力下降到一定程度时,螺纹间相对旋转导致螺栓预紧力下降速率加快的结论。Liu等^[15-16]通过进行螺栓松动试验,提出螺栓材料发生塑性变形和螺纹接触面之间的微动磨损是螺栓松动的主要原因。杜永强等^[17]通过自主设计加工的螺栓松动试验装置,对螺纹接触面的微动磨损损伤形貌进行分析,探究了螺栓松动行为。综上,少见从接触状态变化规律中系统分析螺栓松动特性的研究,试验中无法监视接触面滑移-黏着接触状态的变化,有限元中则较容易实现,一般来说,螺栓松动可分为两个阶段,第一类为非

旋转松动期,第二类为旋转松动期,旋转松动期内各接触面发生滑移将导致内外螺纹间发生相对运动,产生螺栓回转现象,预紧力下降明显。本文建立了带螺纹升角完全弹性螺栓连接结构精确有限元模型,采用了与实际更符合的施加力矩法施加初始预紧力矩,分析了螺栓连接结构旋转松动期内不同影响因素下接触面滑移-黏着接触状态变化规律,从中得到了螺栓松动特性,并验证了基于接触状态变化规律分析螺栓松动特性方法的准确性。

1 螺栓连接结构有限元模型

1.1 连接结构有限元模型建立

本文构建了带螺纹升角螺栓连接结构精细有限元模型,螺栓连接结构由螺栓、螺母及上下平板组成,模型网格类型为 C3D8R,有限元模型如图1所示,螺纹啮合面截面有限元模型如图2所示。

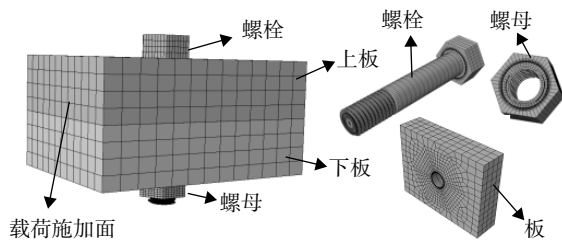


图1 单螺栓连接结构、螺栓、螺母及平板模型
Fig. 1 Single bolt connection structure, bolt, nut and flat plate model

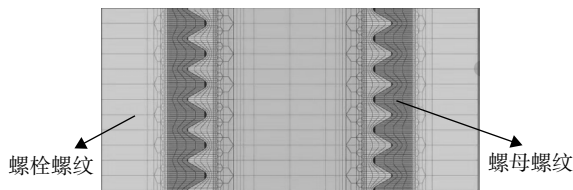


图2 螺纹接触面截面模型
Fig. 2 Section model of thread contact surface

为研究偏心距离对松动特性的影响规律,分别建立了偏心距离为 60、70、80、90、100、110、120 mm 的螺栓连接偏心结构,偏心结构如图3所示。

偏心连接结构中1面和2面之间的Z向距离定义为偏心距离,载荷施加在图3中载荷施加面上,方向垂直于施加面。

有限元模型中分别在螺栓头-上板接触面间、上板-下板接触面间、螺母-下板接触面间、螺纹啮合面间建立接触对,所有部件材料均采用完全

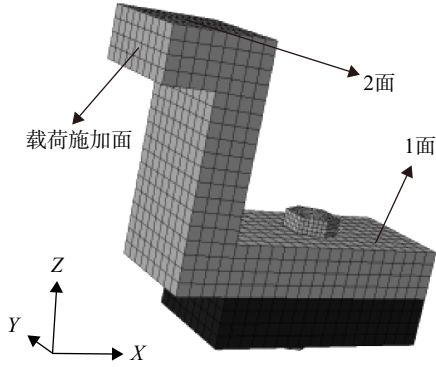


图3 螺栓连接结构偏心结构图

Fig. 3 Eccentric structure diagram of bolt connection structure

弹性材料,下板进行全约束设置,上板只保留载荷方向自由度,偏心结构约束条件类似。位移载荷施加面如图1所示,方向垂直于施加面。

1.2 螺栓连接模型的有效性验证

运用文献[18]中对螺栓连接结构模型有效性验证的方法对模型进行了有效性验证,并采用文献中提出的施加力矩法对模型施加预紧力,施加力矩法示意图如图4所示。

螺栓连接结构有限元模型应力云图如图5所示,轴力系数解析值和模拟值对比图如图6所示。

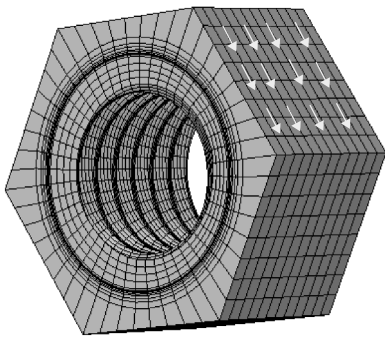


图4 施加力矩法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of torque application method

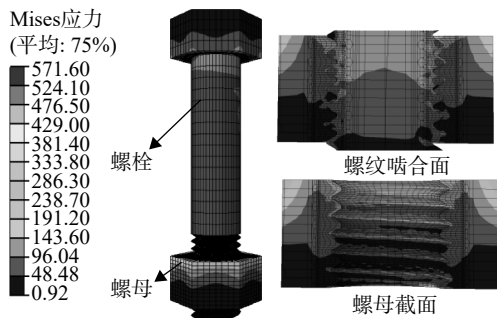


图5 螺栓、螺母、螺纹啮合面间 Mises 应力云图

Fig. 5 Intermeshing Mises stress nephogram of bolts, nuts and threads

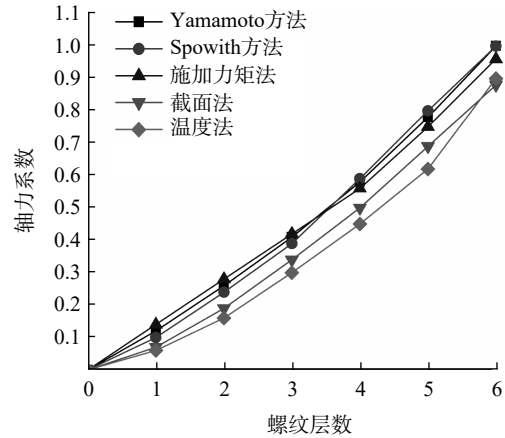


图6 螺栓连接结构中轴力系数数值解和有限元仿真值变化曲线对比

Fig. 6 Numerical solution and finite element simulation value curve of axial force coefficient in bolted structure

分析图6得到,本文中建立的螺栓连接结构模型的螺纹副承载规律和理论分析结果基本吻合,证明本文中所建模型是有效性的,并且施加力矩法为最佳施加预紧力法。

2 松动特性研究

本文主要探究螺栓松动特性,主要研究了不同影响因素对螺栓头接触面和螺纹接触面滑移-黏着接触状态变化的影响规律,进而得到螺栓松动特性。

2.1 剪切载荷位移振幅

为探究剪切位移载荷振幅对螺栓松动特性的影响规律,设置振幅分别为 0.01、0.03、0.05、0.08、0.12、0.14、0.16 mm,其他条件相同,得到剪切位移载荷振幅分别为 0.01、0.03、0.05、0.08、0.12、0.14、0.16 mm 下各接触面滑移-黏着接触状态变化图如图7所示。本文分析的接触状态均是处于第一个循环周期内的,第1、2、3、4行分别代表不同时刻的螺栓头接触面和螺纹接触面接触状态图,第1、2、3、4行如图7中所示,后文中无特殊工况不再做说明。滑移-黏着接触状态如图7中图标所示,后文中图标将不再做特殊说明。

由图7中第1行可得,随振幅增大,两接触面处于相对滑移状态的区域面积逐渐增大,振幅在 0.01~0.12 mm 区间时,螺栓头接触面处于相对滑移状态的区域面积增长较慢,振幅由 0.08 mm 变为 0.12 mm 时,处于相对滑移状态的区域面积增长较快,并且螺纹接触面变为处于完全相对滑移状态。振幅在 0.12~0.16 mm 区间时,螺栓头接触面处于相对滑移状态的区域面积增长缓慢,螺

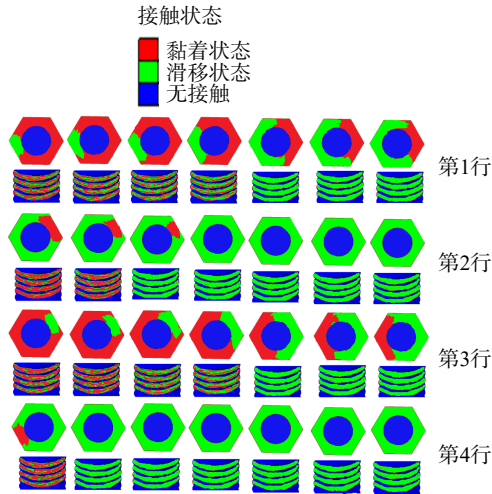


图7 不同位移载荷振幅下螺栓头接触面和螺纹接触面滑移-黏着接触状态变化图

Fig. 7 Slip-adhesion slip contact state change diagram of bolt head contact surface and thread contact surface under different displacement load amplitudes

纹接触面均完全处于相对滑移状态。由图7中第2行可得,振幅在0.01~0.05 mm区间时,螺栓头接触面仍均存在处于相对黏着状态的区域,并且面积逐渐减小,螺纹接触面均存在面积较大的处于相对黏着状态的区域,振幅在0.08~0.16 mm区间时,两接触面均完全处于相对滑移状态。由图7中第3行可得,随振幅增大,两接触面处于相对滑移状态的区域面积逐渐增大,振幅在0.01~0.12 mm区间时,螺栓头接触面处于相对滑移状态的区域面积增长较慢,振幅由0.08 mm变为0.12 mm时,处于相对滑移状态的区域面积增长较快。振幅在0.12~0.16 mm区间时,螺栓头接触面处于相对滑移状态的区域面积增长缓慢,螺纹接触面均完全处于相对滑移状态。振幅为0.01、0.03、0.05、0.08 mm时,螺纹接触面存在较大的处于相对黏着状态区域面积。由图7中第4行可得,振幅为0.01 mm时,两接触面均存在稳定的处于相对黏着状态的区域,其他振幅下两接触面均完全处于相对滑移状态。由以上分析可得,振幅为0.01 mm时,两接触面始终存在稳定的处于相对黏着状态的区域,限制了螺栓向松动的方向转动,旋转角度不变,螺栓松动不发生;振幅越大,两接触面处于相对滑移状态的区域越大,螺栓越容易向松动的方向转动,螺栓松动越容易发生;振幅在0.01~0.08 mm时,螺栓头接触面处于相对滑移状态的区域面积增长速率较小,振幅由0.08 mm变为0.12 mm时,增长速率较快,振幅在0.12~

0.16 mm区间时,增长速率较慢,综上可得,振幅越大,螺栓松动越容易发生,但各振幅下螺栓松动变化速率并不单调。

2.2 螺栓头接触面摩擦因数

为探究螺栓头接触面摩擦因数对螺栓松动特性的影响规律,设置螺栓头接触面摩擦因数为0.03、0.05、0.10、0.13、0.18、0.23、0.29,各螺栓头接触面摩擦因数下螺栓头接触面和螺纹接触面接触状态变化图如图8所示。

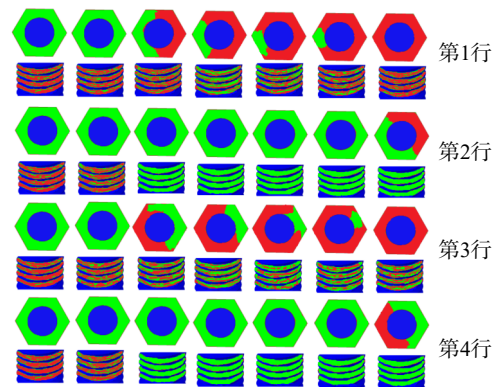


图8 不同螺栓头接触面摩擦因数下螺栓头接触面和螺纹接触面接触状态变化图

Fig. 8 Change of contact state between bolt head contact surface and thread contact surface under different friction coefficient of bolt head contact surface

由图8中第1行可得,螺栓头接触面摩擦因数越大,接触面处于相对黏着接触状态的面积不断增大,摩擦因数为0.13时,螺纹接触面处于相对滑移状态的区域面积最大。由图8中第2行可得,螺栓头接触面摩擦因数为0.03、0.05时,螺纹接触面仍几乎完全处于相对黏着状态,摩擦因数为0.29时,螺栓头接触面依旧存在面积较大的处于相对黏着状态的区域,摩擦因数为0.10、0.13、0.18、0.23时,两接触面均完全处于相对滑移状态,摩擦因数较小或较大时,两接触面一直存在处于相对黏着状态的区域。由图8中第3行可得,螺栓头接触面摩擦因数为0.03、0.05时,螺纹接触面仍几乎完全处于相对黏着状态,而螺栓头接触面较其领先穿过摩擦平衡点,在载荷由正向最大值回位到零点时再次完全处于相对滑移状态,摩擦因数为0.29时,螺栓头接触面区域完全处于相对黏着状态,摩擦因数为0.13时,螺纹接触面处于相对滑移状态的区域面积最大。由图8中第4行可得,螺栓头接触面摩擦因数为0.03、0.05时,螺纹接触面仍几乎完全处于相对黏着状态,摩擦

因数为 0.29 时, 螺栓头接触面仍存在较大面积的处于相对黏着状态的区域, 图 8 中第 1 行和第 3 行螺栓头接触面处于相对黏着状态的区域几乎对称。由以上分析可得, 螺栓头接触面摩擦因数较小时, 螺纹接触面一直存在较大的处于相对黏着状态的区域, 摩擦因数较大时, 螺栓头接触面一直存在较大的处于相对黏着状态的区域, 仅摩擦因数为 0.10、0.13、0.18、0.23 时, 两接触面没有一直处于相对黏着状态的区域。当螺栓头接触面摩擦因数较小时, 螺栓松动几乎不发生, 因为摩擦因数较小时, 螺纹接触面一直处于相对黏着状态, 限制了螺栓向松动的方向转动, 旋转角度几乎不变, 所以螺栓松动几乎不发生。随着螺栓头接触面摩擦因数不断增大, 螺纹接触面处于相对滑移接触状态的面积不断增大, 甚至出现完全相对滑移状态, 导致螺栓向松动的方向转动, 但当摩擦因数达到一定值后, 螺栓头接触面处于相对黏着状态的区域逐渐增大, 甚至出现完全相对黏着状态, 螺栓头接触面的摩擦逐渐限制了螺栓向松动的方向转动, 综上可得, 螺纹接触面摩擦因数保持不变时, 螺栓头接触面摩擦因数过大或过小时, 均会限制螺栓朝松动的方向转动, 两接触面摩擦因数相差较大时, 螺栓松动不容易发生, 相差较小时, 螺栓松动容易发生。

2.3 螺纹接触面摩擦因数

为探究螺纹接触面摩擦因数对螺栓松动特性的影响规律, 设置螺纹接触面摩擦因数为 0.03、0.05、0.10、0.15、0.18、0.23、0.29, 其他条件相同, 得到螺纹接触面摩擦因数分别为 0.03、0.05、0.10、0.15、0.18、0.23、0.29 下各接触面滑移-黏着接触状态变化图如图 9 所示。

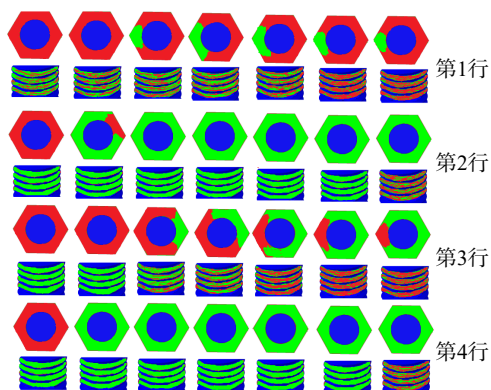


图9 各螺纹接触面摩擦因数下接触面滑移-黏着接触状态变化图

Fig. 9 Change diagram of contact surface slip-adhesion contact state under friction coefficient of each thread contact surface

由图 9 中第 1 行可得, 随着螺纹接触面摩擦因数增大, 螺纹接触面处于相对黏着状态的区域面积不断增大, 摩擦因数为 0.15 时, 螺栓头接触面处于相对滑移状态的区域面积最大。由图 9 中第 2 行可得, 螺纹接触面摩擦因数为 0.03 时, 螺栓头接触面仍几乎完全处于相对黏着状态, 摩擦因数为 0.29 时, 螺纹接触面依旧存在面积较大的处于相对黏着状态的区域, 摩擦因数较小或较大时, 两接触面一直存在处于相对黏着状态的区域。由图 9 中第 3 行可得, 螺纹接触面摩擦因数为 0.03、0.05 时, 螺栓头接触面仍几乎完全处于相对黏着状态, 而螺纹接触面较其领先穿过摩擦平衡点, 在载荷由正向最大值回位到零点时再次完全处于相对滑移状态, 摩擦因数为 0.29 时, 螺纹接触面区域完全处于相对黏着状态, 摩擦因数为 0.15 时, 螺栓头接触面处于相对滑移状态的区域面积最大。由图 9 中第 4 行可得, 螺纹接触面摩擦因数为 0.03 时, 螺栓头接触面仍存在处于相对黏着状态的区域, 螺纹接触面摩擦因数为 0.29 时, 螺纹接触面仍存在较大面积的处于相对黏着状态的区域, 其他摩擦因数下两接触面均完全处于相对滑移状态, 图 9 中第 1 行和第 3 行螺纹接触面处于相对黏着状态的区域几乎处于对称状态。由以上分析可得, 螺纹接触面摩擦因数较小时, 螺栓头接触面持续的存在相对大面积的处于相对黏着接触状态的区域, 螺纹接触面摩擦因数较大时, 螺纹接触面始终存在处于相对黏着的接触状态的接触区域。由图 10 可得, 当螺纹接触面摩擦因数较小时, 螺栓松动几乎不发生, 因为摩擦因数较小时, 螺栓头接触面一直处于相对黏着状态, 限制了螺栓向松动的方向转动, 旋转角度几乎不变, 所以螺栓松动几乎不发生。随着螺纹接触面摩擦因数增大, 螺栓接触面处于相对滑移接触状态的区域逐渐增大, 甚至出现完全相对滑移状态, 导致螺栓向松动的方向转动, 但当摩擦因数达到一定值后, 螺纹接触面处于相对黏着状态的区域逐渐增大, 甚至出现完全相对黏着状态, 螺纹接触面的摩擦逐渐限制了螺栓向松动的方向转动, 综上可得, 螺栓头接触面摩擦因数保持不变时, 螺纹接触面摩擦因数过大或过小时, 均会限制螺栓朝松动的方向转动, 两接触面摩擦因数相差较大, 螺栓松动不容易发生, 相差较小时, 螺栓松动容易发生, 和图 9 中分析结果一致, 结合图 8 中分析结果可得必存在一个两接触面摩擦因数匹配值范围, 使得螺栓松动最容易发生。

2.4 偏心距离

为探究偏心距离对螺栓松动特性的影响规律,分别分析偏心距离分别为 60、70、80、90、100、110、120 mm 的有限元模型,其他条件相同,得到偏心距离分别为 60、70、80、90、100、110、120 mm 下各接触面滑移-黏着接触状态变化图如图 10 所示。

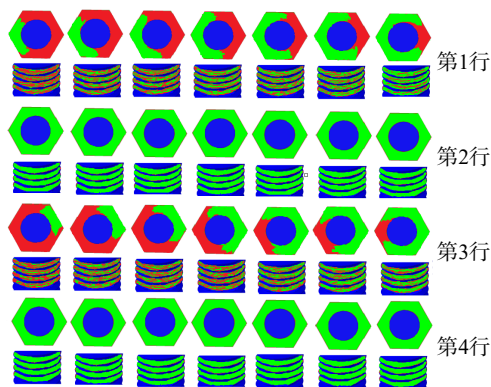


图 10 不同偏心距离下螺栓头接触面和螺纹接触面滑移-黏着接触状态变化图

Fig. 10 Slip-adhesion contact state change diagram of bolt head contact surface and thread contact surface under different eccentric distance

由图 10 中第 1 行可得,随偏心距离增大,两接触面处于相对滑移状态的区域面积逐渐增大。由图 10 中第 2 行可得,两接触面均完全处于相对滑移状态。由图 10 中第 3 行可得,随偏心距离增大,两接触面处于相对滑移状态的区域面积逐渐增大,并且和图 10 中第 1 行处于相对滑移状态的区域基本对称。由图 10 中第 4 行可得,两接触面均完全处于相对滑移状态。偏心距离越大,在加载过程中连接结构受到的偏心力矩越大,从而导致螺栓连接结构中各接触面间所承受接触压力越小,从而螺栓松动现象越容易发生。由以上分析可得,螺栓连接结构中偏心距离越大,两接触面处于相对滑移状态的区域面积越大,螺栓松动越容易发生,和文献 [17] 中结论一致。

3 准确性验证

按前文相关设置,分别分析了不同初始预紧力矩、振幅、螺栓头接触面摩擦因数、螺纹接触面摩擦因数、偏心距离下残余预紧力和初始预紧力比值变化情况以及螺栓头旋转角度变化情况,为更明显地观察松动特性,剪切位移载荷均循环 900 次。

3.1 剪切位移载荷振幅影响规律

分别进行了不同振幅 A 下的螺栓松动仿真分析,得到螺栓松动特性,不同振幅下残余预紧力和初始预紧力比值变化图如图 11 所示,不同振幅下螺栓头部旋转角度变化图如图 12 所示。

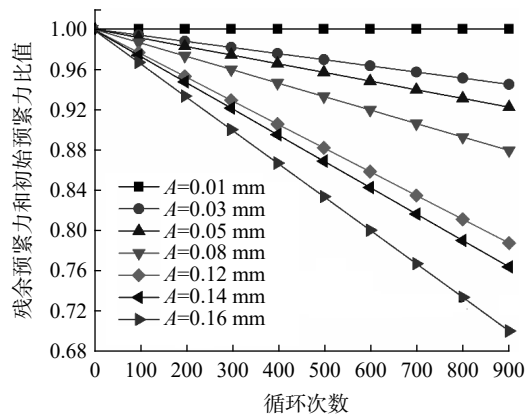


图 11 不同振幅下残余预紧力和初始预紧力比值变化图
Fig. 11 Change of ratio of residual preload to initial preload under different amplitudes

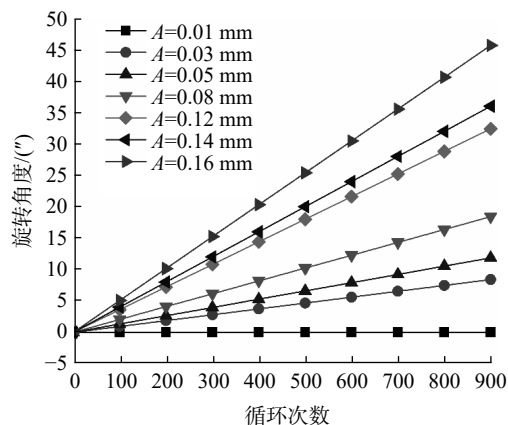


图 12 不同振幅下螺栓头部旋转角度变化图
Fig. 12 Change of bolt head rotation angle under different amplitude

由图 11、图 12 可得,剪切位移载荷振幅越大,比值越下降越快,最终所得比值越小,螺栓头旋转角度越大,说明振幅越大,螺栓松动越容易发生。各振幅下残余预紧力与初始预紧力矩比值下降速率以及螺栓头旋转角度增长速率并不是单调的,即螺栓松动变化的速率并不单调,振幅由 0.08 mm 变为 0.12 mm 时,比值减小量以旋转角度增大量明显大于其他振幅变化时,由以上分析可得不同振幅下螺栓松动特性和由滑移-黏着接触状态变化得出的螺栓松动特性基本吻合。

3.2 螺栓头接触面摩擦因数影响规律

分别进行了不同螺栓头接触面摩擦因数 u_1 下的螺栓松动仿真分析, 得到螺栓松动特性, 不同螺栓头接触面摩擦因数下残余预紧力和初始预紧力比值变化图如图 13 所示, 不同螺栓头接触面摩擦因数下螺栓头部旋转角度变化图如图 14 所示。

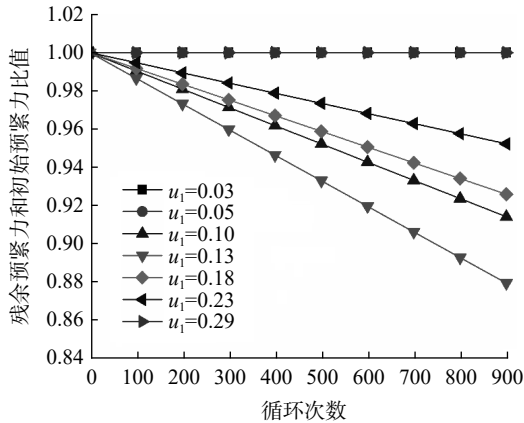


图 13 不同螺栓头接触面摩擦因数下残余预紧力和初始预紧力比值变化图

Fig. 13 Variation of ratio of residual preload to initial preload under different friction coefficient of bolt head contact surface

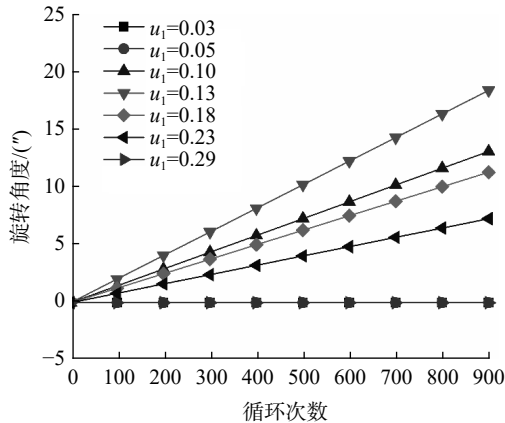


图 14 不同螺栓头接触面摩擦因数下螺栓头部旋转角度变化图

Fig. 14 Change of bolt head rotation angle under different friction coefficient of bolt head contact surface

由图 13、图 14 可得, 螺栓头接触面摩擦因数在 0.03~0.13 区间时, 摩擦因数越大, 比值下降越快, 螺栓头旋转角度增大速率越大, 摩擦因数在 0.13~0.29 区间时, 摩擦因数越大, 比值下降越慢, 旋转角度增大越慢, 摩擦因数为 0.03、0.05、0.29 时, 残余预紧力和初始预紧力比值为 1 保持

不变, 旋转角度为 0 保持不变, 螺栓松动不发生, 摩擦因数为 0.13 时, 残余预紧力和初始预紧力比值下降速率最大, 旋转角度增大速率最大, 螺栓松动最容易发生。可得当两接触面摩擦因数相差越大时, 螺栓松动越不容易发生。由以上分析可得不同螺栓头接触面摩擦因数下螺栓松动特性和由滑移-黏着接触状态变化得出的螺栓松动特性基本吻合。

3.3 螺纹接触面摩擦因数影响规律

分别进行了不同螺纹接触面摩擦因数 u_2 下的螺栓松动仿真分析, 得到螺栓松动特性, 不同螺纹接触面摩擦因数下残余预紧力和初始预紧力比值变化图如图 15 所示, 不同螺纹接触面摩擦因数下螺栓头旋转角度变化图如图 16 所示。

由图 15、图 16 可得, 螺纹接触面摩擦因数在 0.03~0.15 区间时, 摩擦因数值越大, 螺栓连接结

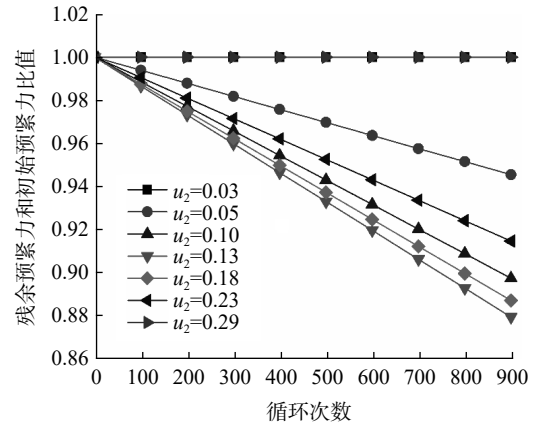


图 15 不同螺纹接触面摩擦因数下残余预紧力和初始预紧力比值变化图

Fig. 15 Variation of ratio of residual preload to initial preload under different friction coefficient of thread contact surface

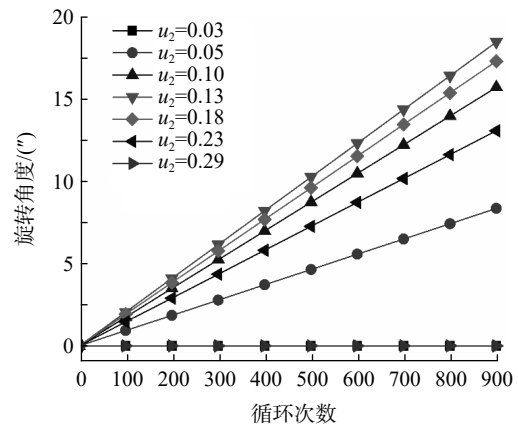


图 16 不同螺纹接触面摩擦因数下螺栓头部旋转角度变化图

Fig. 16 Change of bolt head rotation angle under different friction coefficient of thread contact surface

构中松动现象越容易发生,当螺纹接触面摩擦因数为0.03、0.29时,残余预紧力和初始预紧力比值为1保持不变,旋转角度为0保持不变,摩擦因数为0.15时,残余预紧力和初始预紧力比值下降速率最大,螺栓头旋转角度增大速率最大,螺栓松动最容易发生,可得螺纹接触面和螺栓头接触面摩擦因数相对差值越大,螺栓连接结构松动现象越难发生。由上文仔细分析可得不同螺栓头接触面摩擦因数下螺栓松动特性和由滑移-黏着接触状态变化得出的螺栓松动特性基本吻合。

3.4 偏心距离影响规律

分别进行了不同偏心距离 P 下的螺栓松动仿真分析,得到螺栓松动特性,不同偏心距离下残余预紧力和初始预紧力比值变化图如图17所示,不同偏心距离下螺栓头部旋转角度变化图如图18所示。

由图17、图18可得,偏心距离越大,残余预

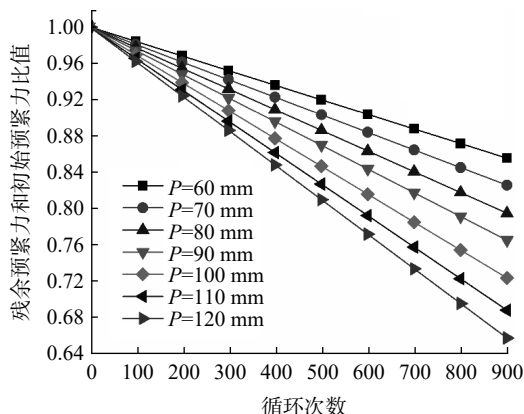


图17 不同偏心距离下残余预紧力和初始预紧力比值变化图
Fig. 17 Variation of ratio between residual preload and initial preload under different eccentricity distances

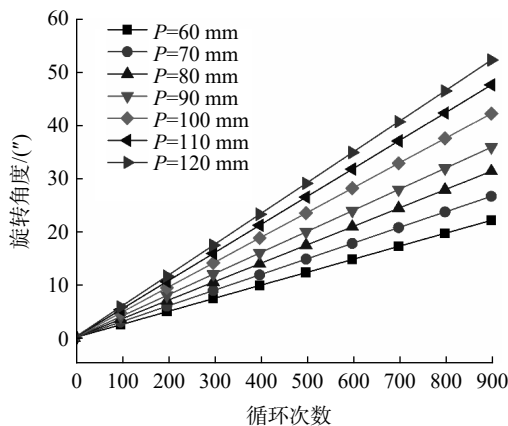


图18 不同偏心距离下螺栓头部旋转角度变化图
Fig. 18 Change of bolt head rotation angle under different eccentric distance

紧力和初始预紧力比值下降速率越大,螺栓头部旋转角度增大速率越大,螺栓松动越容易发生。由以上分析可得不同偏心距离下螺栓松动特性和由滑移-黏着接触状态变化得出的螺栓松动特性基本吻合。

4 结 论

本文建立了螺栓连接结构精细有限元模型,进行了不同影响因素下螺栓松动特性仿真分析。在本文螺栓连接结构模型松动仿真分析中主要得出以下结论:

- 1) 提出的利用螺栓头接触面和螺纹接触面滑移-黏着接触状态变化规律分析螺栓松动特性的方法是准确的。接触面处于相对滑移状态的区域面积越大,区域面积增大速率越快,则螺栓松动越容易发生,反之则越不容易发生。
- 2) 螺栓头接触面和螺纹接触面摩擦因数相近时,螺栓松动越容易发生,并且存在一个两接触面摩擦因数匹配值范围,使得螺栓松动最容易发生。
- 3) 剪切载荷振幅越大、偏心距离越大,两接触面进入相对滑移状态的速率越快,处于相对滑移状态区域的面积越大,残余预紧力和初始预紧力比值下降速率越大,螺栓头旋转角度增大速率越大,螺栓松动越容易发生;各振幅下螺栓松动的变化速率并不单调。

参考文献:

- [1] IBRAHIM R A, PETTIT C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 279(3): 857-936.
- [2] 王志, 李吉凯, 刘玉. 带止口法兰连接结构刚度特性对结构振动影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1201-1208.
WANG Zhi, LI Jikai, LIU Yu. Influence of structural stiffness characteristics on structural vibration of flanged connections with flanges [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1201-1208. (in Chinese)
- [3] 白聪儿, 宣海军, 米栋, 等. 离心压气机包容结构连接螺栓建模方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34(2): 313-320.
BAI Conger, XUAN Haijun, MI Dong, et al. Modeling method for connecting bolts of centrifugal compressor containment structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2): 313-320. (in Chinese)
- [4] JUNKER G H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration[J]. Society Automotive Engineering, 1969, 78(12): 314-335.
- [5] PAI N G, HESS D P. Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(3): 585-602.
- [6] 巩浩, 刘检华, 丁晓宇. 振动条件下螺纹预紧力衰退机理和影响因素研究[J]. 机械工程学, 2019, 55(11): 138-148.

- GONG Hao, LIU Jianhua, DING Xiaoyu. Study on the mechanism and influencing factors of preload decline for bolted joints under vibration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 138-148. (in Chinese)
- [7] DINGER G, FRIEDRICH C. Avoiding self-loosening failure of bolted joints with numerical assessment of local contact state[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(8): 2188-2200.
- [8] DINGER G. Design of multi-bolted joints to prevent self-loosening failure[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, 230(15): 2564-2578.
- [9] IZUMI S, YOKOYAMA T, IWASAKI A, et al. Three-dimensional finite element analysis of tightening and loosening mechanism of threaded fastener[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2005, 12: 604-615.
- [10] IZUMI S, KIMURA M, SAKAI S. Small loosening of bolt-nut fastener due to micro bearing-surface slip: a finite element method study[J]. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2007, 1(11): 1374-1384.
- [11] KASEI S. A study of self-loosening of bolted joints due to repetition of small amount of slippage at bearing surface[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 2007, 1(3): 358-367.
- [12] NASSAR S A, YANG X J. A mathematical model for vibration-induced loosening of preloaded threaded fasteners[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2009, 131(2): 9-21.
- [13] ZHANG M, JIANG Y, LEE C. Finite element modeling of self-loosening of bolted joints[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2007, 129(2): 218-226.
- [14] IBRAHIM R A, PETTIT C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 279(3/4/5): 857-936.
- [15] LIU Jianhua, OUYANG Huajiang, PENG Jinfang, et al. Experimental and numerical studies of bolted joints subjected to axial excitation[J]. *Wear*, 2016, 346(11): 66-77.
- [16] LIU Jianhua, OUYANG Huajiang, FENG Zhiqiang, et al. Study on self-loosening of bolted joints excited by dynamic axial load[J]. *Tribology International*, 2017, 115: 432-451.
- [17] 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, 54(14): 74-81.
- DU Yongqiang, LIU Jianhua, LIU Xuetong, et al. Research on self-loosening behavior of bolted joints under eccentric excitation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(14): 74-81. (in Chinese)
- [18] 王开平, 闫明, 孙自强, 等. 剪切载荷下航空发动机螺栓松动行为及其临界值的数值模拟研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(2): 43-54.
- WANG Kaiping, YAN Ming, SUN Ziqiang, et al. Numerical simulation study on the loosening behavior and critical value of aero-engine bolts under shear load[J]. *Propulsion Technology*, 2022, 43(2): 43-54. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)