

# 横向振动下的螺栓连接松动分析

陈华隆<sup>a</sup>, 孙戩<sup>a,b</sup>, 张守京<sup>a,b</sup>

(西安工程大学 a. 机电工程学院; b. 西安市现代智能纺织装备重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对螺栓连接结构受横向载荷时的松动问题, 建立横向载荷作用下的螺栓连接平板结构有限元模型, 并考虑螺栓材料塑性影响, 分别探究平板在横向载荷作用下螺栓的初始预紧力、载荷的幅值及频率对螺栓松动的影响。结果表明: 初始螺栓预紧力增大, 则振动过程中螺栓预紧力下降速度降低, 对螺栓防松有利; 载荷振幅是影响螺栓松动的主要因素, 载荷振幅由 0.2 mm 增大至 0.3 mm 时, 螺栓预紧力减小了 40%; 载荷频率对预紧力下降影响不明显。仿真结论与实验结果规律具有较好的一致性, 从而验证了分析模型的有效性。

**关键词:** 螺栓连接; 松动; 螺纹; 横向载荷; 材料塑性

**中图分类号:** TH131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)02-0048-03

## Analysis on Bolt Connection Looseness under Transverse Vibration

CHEN Hualong<sup>a</sup>, SUN Jian<sup>a,b</sup>, ZHANG Shoujing<sup>a,b</sup>

(a. School of Mechanical and Electrical Engineering; b. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** With the aim at the looseness of transmission tower bolted structure under transverse load, a finite element model of bolted plate structure under transverse load is established, and in consideration of the plastic influence of bolt material, the effects of bolt initial preload, load amplitude and frequency on bolt looseness under the influence of transverse load are explored. The results show that when the initial bolt pretightening force increases, the decreasing speed of the bolt pretightening force decreases during the vibration process, which is beneficial to the bolt loosening prevention. As the load amplitude, being the main factor affecting the bolt loosening, increases from 0.2 mm to 0.3 mm, the bolt preload is reduced by 40%, and the load frequency has no obvious effect on the decrease of the preload. The simulation results are in good agreement with the experimental ones, and the effectiveness of the analysis model is verified.

**Keywords:** bolted connection; looseness; thread; transverse load; material plasticity

## 0 引言

螺栓连接结构作为一种连接稳定性高、成本低的紧固手段, 广泛应用于车辆、管道、航空航天结构中。然而, 在复杂的工作环境下, 螺栓连接结构受到振动载荷作用时会发生松动, 进而可能引发结构解体等重大安全事故<sup>[1]</sup>, 因此研究螺栓连接结构松动问题具有重要意义。横向载荷相比轴向载荷更易引起螺栓连接的松动, JUNKER G H<sup>[2]</sup>最先发表了这一观点, 且其研制的松动试验机至今还在使用。赵晶等<sup>[3]</sup>研究表明螺纹面之间的微动磨损是预紧力下降的主要原因。JIANG Y Y 等<sup>[4]</sup>提出螺栓与螺母的相对转动是松动的主要原因, 对此, 于泽通等<sup>[5]</sup>进行了振动试验, 得出发生在螺栓与螺母啮合面的塑性变形会引起松动, 因此, 研究螺栓连接结构松动的过程中, 螺栓材料塑性是需要考虑的。江文强等<sup>[6]</sup>利用有限元仿真分析研究了摩擦因数对螺栓连接松动过程的影响, 结果显示螺母与连接板摩擦因数的提升会加速螺栓松动。张明远等<sup>[7]</sup>研究得出增大螺栓直径以及牙型角有利于防松; 胡阳等<sup>[8]</sup>研

究了横向载荷作用在上板或下板对松动的影响, 得出虽然载荷作用位置不同, 但预紧力下降速率一致。CHEN J W 等<sup>[9]</sup>的研究发现当载荷施加到螺栓的光杆部分时, 预紧力会迅速减小, 载荷位置与螺栓之间的距离对松动的变化没有影响; LIU Z F 等<sup>[10]</sup>的研究表明增加拧紧力矩和摩擦因数可以防止初始松动行为的发生。以上对螺栓松动影响因素的研究主要针对螺栓连接的结构参数和材料参数, 而针对实际载荷的特征参数对螺栓松动的影响规律的研究还相对较少。

本文基于数值仿真方法, 建立考虑螺纹升角和材料塑性的精细有限元模型, 探究在横向振动载荷作用下, 螺栓的初始预紧力、载荷的幅值及频率对螺栓连接结构松动的影响规律。

## 1 螺栓松动仿真分析模型

### 1.1 螺纹连接结构几何模型

螺栓连接结构中螺纹部分的建模主要有以下三种方

**基金项目:** 西安市现代智能纺织装备重点实验室建设项目(2019220614SYS021CG043)

**第一作者简介:** 陈华隆(1997—), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 研究方向为螺栓连接结构动力学。

法<sup>[11]</sup>;第一种是将螺纹结构简化为轴对称模型,这种方法计算量小,但不能生成螺纹升角,无法模拟螺栓连接结构的松动;第二种方法是将螺纹与螺杆分开建模后将螺纹与螺杆绑定,这种建模方法可以兼顾六面体网格与螺纹升角;第三种是通过映射复制的方法生成螺纹,精度高但计算耗时长。综合考虑分析目的和效率,采用第二种方法建立考虑螺纹升角的螺栓连接结构有限元模型。对螺纹部分划分了较为精细的网格,采用的网格类型为 C3D8R,模型网格总数为 40 821,节点总数为 51 305。有限元模型如图 1 所示。

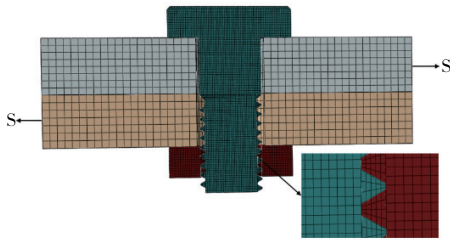


图 1 螺栓松动分析有限元模型

螺栓连接结构由螺栓、螺母、上连接板、下连接板 4 部分组成。具体尺寸如下:螺栓以 M10×1.5 为基本尺寸,螺栓公称直径  $D = 10 \text{ mm}$ ,螺距为  $1.5 \text{ mm}$ ,螺栓总长度  $l = 30 \text{ mm}$ ,螺纹长度  $b = 14.7 \text{ mm}$ ,螺栓头直径  $D_b = 20 \text{ mm}$ ,螺栓头高度  $k = 5 \text{ mm}$ ;螺母高度  $H = 5 \text{ mm}$ ,螺母直径  $D_n = 20 \text{ mm}$ ,螺距  $p = 1.5 \text{ mm}$ ;上连接板尺寸为  $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ ;下连接板尺寸为  $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm}$ 。

## 1.2 材料属性和接触设置

螺栓、螺母采用同一材料,其泊松比  $\mu$  为 0.3,弹性模量  $E$  为 210 GPa,塑性参数如图 2 所示,为了提高计算效率,将连接板简化为刚体,不考虑其自身变形。

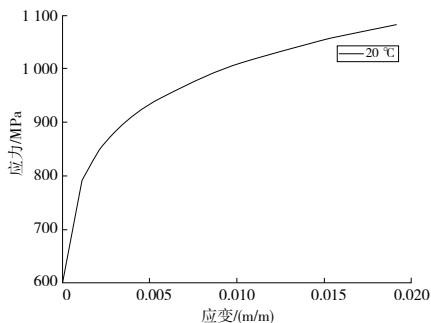


图 2 螺栓材料真实应力-应变曲线

考虑到运动过程中的惯性,选择的计算方式为隐式动力学模块<sup>[12]</sup>。建立 5 对接触对,分别是螺栓头、螺母与连接板之间的接触,上、下连接板之间的接触,螺栓与螺母的螺纹之间的接触及螺杆与孔壁之间的接触,并考虑接触面之间的摩擦系数为 0.2。

## 1.3 载荷及约束设置

结合螺栓连接结构的实际工作状态,分析过程分为两个阶段,第一个阶段将初始预紧力加载在螺栓杆上,第二个阶段对连接板施加横向位移载荷。

预紧力的施加通过螺栓载荷施加预紧力<sup>[13]</sup>,选取螺栓杆内一垂直于螺栓轴线的截面作为初始预紧力的加载面,在该加载面上施加预紧力。上连接板的右侧面和下连接板的左侧面分别施加方向相反的横向位移载荷<sup>[14]</sup>,载荷为正弦位移  $\delta = \delta_0 \sin(2\pi ft)$ ,其中: $\delta_0$  为载荷幅值; $f$  为载荷振动频率。

## 2 横向振动下螺栓连接松动分析

### 2.1 螺栓初始预紧力的影响

螺栓预紧力起到压紧被连接件的作用,螺栓预紧力决定了螺栓螺母啮合面所能承受的最大摩擦力,即决定了螺母在载荷作用下是否会与螺栓发生相对转动,考察初始预紧力对螺栓松动的影响,结合 M10 螺栓工作特点,分别取初始预紧力为 7 500 N、8 000 N、9 000 N 和 10 000 N,横向载荷幅值为 0.1 mm,振动频率为 1 Hz,振动次数为 15 次,螺纹部分的 Mises 等效应力结果如图 3 所示,其中应力较高的区域主要分布在螺栓与螺母的啮合段。连接板横向振动过程中螺栓预紧力随振动时间的变化曲线如图 4 所示。

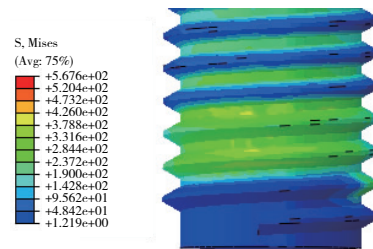


图 3 啮合面应力状态

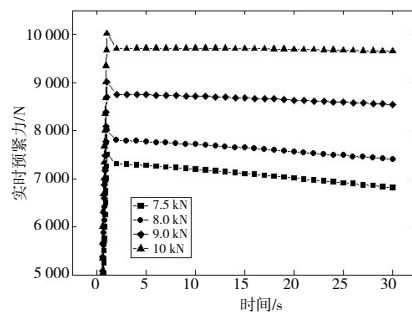


图 4 初始预紧力不同时预紧力演化曲线

由图 4 可知,在初始预紧结束及横向振动开始阶段螺栓预紧力有略微下降趋势,随后变化缓慢,主要原因是预紧时螺栓所储存的变形能在预紧结束后得到释放,螺栓预紧力随之下降。总体上,在初始预紧力由 7 500 N 增大到 10 000 N 的过程中,螺栓预紧力的下降速度在放缓。因此增大初始预紧力可以提高螺栓结构的稳定性,对防松有利,但是,一味地增大初始预紧力可能会使螺栓进入屈服状态甚至引起疲劳断裂等问题,此时可考虑适当增大螺栓的尺寸。

### 2.2 载荷振幅的影响

为分析连接平板所承载的振幅对螺栓松动的影响,

进一步比较了4种不同横向载荷幅值作用下螺栓预紧力的演化规律,其中振动频率为1 Hz,初始预紧力为7 500 N,载荷幅值分别设置为0.075 mm、0.1 mm、0.2 mm和0.3 mm。预紧力随载荷振幅变化规律如图5所示。

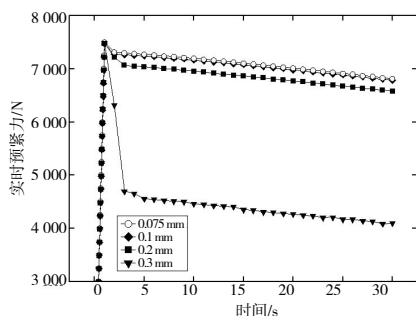


图5 载荷振幅不同时预紧力演化曲线

由图5可见,当载荷振幅增大时,螺栓预紧力的下降幅度会增大,位移载荷幅值由0.075 mm增大到0.2 mm的过程中,单次循环预紧力下降值逐渐增大但相差不大,但当位移载荷幅值由0.2 mm增大至0.3 mm时,其单次循环预紧力下降了3 000 N,此时螺栓连接结构已经失去了连接被连接件的作用,因此,在螺栓连接设计初期,便应预估结构所能承受的最大横向载荷,以避免材料发生过大的塑性变形。

### 2.3 振动频率的影响

根据JUNKER G H的理论,在横向载荷的作用下,螺栓连接结构的松动与惯性力有关,那么载荷的振动频率就很可能是影响螺栓松动的因素之一。因此本文对比分析了振动频率分别为1 Hz、5 Hz、10 Hz和20 Hz时螺栓松动的演化规律,计算时长 $T$ 与振动次数 $n$ 以及振动频率 $f$ 的关系如式(1)所示。

$$T = n \times \frac{1}{f} \quad (1)$$

在上述不同振动频率下,振动次数均为15次,得到所需的计算时长分别为15 s、3 s、1.5 s和0.75 s。振幅设置为0.1 mm,初始预紧力7 500 N。不同频率振动过程中,预紧力随时间变化曲线如图6所示。

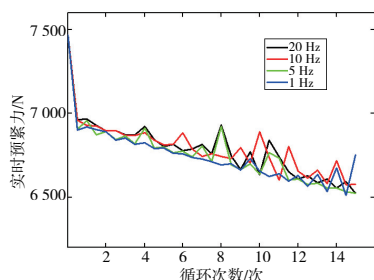


图6 不同振动频率对螺栓松动的影响

由图6可知,当振动频率为1 Hz时,预紧力曲线波动较缓,当振动频率从1 Hz升高到20 Hz的过程中,预紧力曲线波动逐渐变大,但整体曲线偏差并不大,即改变振动频率并不会明显改变螺栓预紧力的下降值,在相同振动次数下,振动频率对预紧力下降比例影响不明显,与JUNKER G H试

验的结论一致(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

## 3 结语

本文以受横向简谐振动作用下的螺栓连接平板结构为研究对象,建立考虑螺纹升角和螺栓材料塑性的螺栓连接结构有限元模型,分别探究初始预紧力、载荷振幅及振动频率对螺栓松动的影响,主要研究结论如下:

1) 在横向振动载荷作用下,随着初始预紧力的增大,螺栓预紧力变化曲线斜率逐渐变缓,松动逐渐变缓,说明增大初始预紧力对防松有益;

2) 横向载荷振幅越大,螺栓预紧力下降得越快,当载荷振幅达到0.3 mm时,螺栓预紧力的下降显著,因此在螺栓连接设计初期,应预估螺栓结构的承载能力;

3) 横向载荷频率对螺栓的受力状况影响不明显,螺栓预紧力的变化较小。

### 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, 2005, 279(3/4/5): 857-936.
- [2] JUNKER G H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration[J]. SAE Transactions, 1969, 78: 314-335.
- [3] 赵晶,孙铭雷,徐啸,等. 轴向交变载荷对螺栓预紧力、变形及磨损的影响[J]. 机械设计与制造,
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 江文强,墨泽. 横向载荷作用下螺栓连接松动过程仿真研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 385-390.
- [7] 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.
- [8] 胡阳,姜东,王旻睿,等. 横向载荷作用下螺栓连接松动过程研究[J]. 振动·测试与诊断, 2020, 40(6): 1091-1098, 1230.
- [9] CHEN J W, WANG H H, YU Y B, et al. Loosening of bolted connections under transverse loading in timber structures[J]. Forests, 2020, 11(8): 816.
- [10] LIU Z F, WANG B E, LI Y, et al. Analysis of self-loosening behavior of high strength bolts based on accurate thread modeling[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105541.
- [11] 刘艳,周克栋,赫雷. 基于VDI2230标准的某风力机关键连接件强度分析[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 197-200.
- [12] 李志彬,陈岩,孙伟程,等. 横向振动下螺栓连接失效及影响因素研究[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(4): 24-30.
- [13] GONG H, LIU J H. Some factors affecting the loosening failure of bolted joints under vibration using finite element analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(21): 3942-3953.
- [14] 中国机械工业联合会. GB/T 10431—2008 紧固件横向振动试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.

收稿日期:2022-06-01