

## 螺距和孔隙对螺栓连接自松弛的影响

王 崴, 徐 浩\*, 马 跃, 刘晓卫, 徐晓东

(空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051)

**摘要** 为了研究螺距和孔隙对螺栓连接自松弛的影响,建立了带螺纹的三维螺栓连接有限元模型,使用 Newmark 算法进行了螺栓连接横向振动瞬态求解,分析了不同螺距和孔隙对螺栓连接横向振动自松弛的影响。研究表明:在横向循环载荷作用下,粗牙螺纹的螺栓连接相比细牙螺纹的预紧力下降速度要慢、螺纹啮合面和承压面的滑移要剧烈,因此细牙螺纹较粗牙螺纹不容易发生自松弛;孔隙越大螺栓连接预紧力下降速度越快、螺纹啮合面和承压面的滑移越剧烈,因此,孔隙越大越容易发生自松弛。

**关键词** 螺栓连接;自松弛;螺距;孔隙;有限元

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.0019

**中图分类号** TB122;TH123 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0087-04

## The Effect of Thread Pitch and Clearance on Self-loosening of Bolted Joints

WANG Wei, XU Hao\*, MA Yue, LIU Xiao-wei, XU Xiao-dong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aimed at studying the effect of thread pitch and clearance on self-loosening of bolted joints, this paper builds up a three dimensional FEA model of bolted joints in which thread is taken into consideration, and the simulation of self-loosening of bolted joints under transverse vibration is conducted based on the Newmark algorithm. Then the effect of thread pitch and different clearance on self-loosening of bolted joints is analyzed. The results show that the preload of bolted joints with coarse thread pitch falls faster than the preload of bolted joints with fine thread pitch, and the slippage of bolted joints with coarse pitch is acuter than the slippage of bolted joints with fine pitch, thus the self-loosening of bolted joints with fine thread pitch is more difficult to happen; and the larger clearance of bolted joints, the more rapidly the preload falls and the acuter the slippage is. The self-loosening of bolted joints with larger clearance is easier to happen.

**Key words:** bolted joints; self-loosening; thread pitch; clearance; FEA

螺距和孔隙是螺栓连接的 2 个非常重要的几何特征,它们不但影响螺栓连接的压力分布和螺纹强度,还对螺栓连接横向振动自松弛具有重要影响。

Nassar 和 Housari<sup>[1-2]</sup>通过使用线性模型建立螺栓连接自松弛解析模型并进行实验研究发现细牙螺纹较粗牙螺纹不容易发生螺栓连接自松弛,孔隙越大

收稿日期:2013-07-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075395)

作者简介:王 崴(1974—),男,陕西西安人,副教授,博士,主要从事装备装配性能的形成和衰退机理研究。E-mail:85689437@qq.com

\* 通信作者:徐 浩(1988—),男,硕士生,主要从事装备装配性能的形成和衰退机理研究。E-mail:616846826@qq.com

引用格式:王崴,徐浩,马跃,等.螺距和孔隙对螺栓连接自松弛的影响[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(1):87-90. WANG Wei, XU Hao, MA Yue, et al. The effect of thread pitch and clearance on self-loosening of bolted joints[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 87-90.

越容易发生螺栓连接自松弛。在他们研究的基础上 Nassar 和 Yang<sup>[3-5]</sup> 使用一种更加精确的解析模型分析了螺距和孔隙对螺栓连接、沉头螺栓连接的横向振动自松弛的影响,并进行了实验验证,得到了相同的影响规律。由于螺纹具有复杂的螺旋结构,建立螺栓连接自松弛解析模型相当困难;开展螺栓连接自松弛实验研究对实验设备的要求非常高,同时实验中在动板和定板之间加入滚珠及将螺栓头固定等处理与实际不符。使用有限元方法对螺栓连接自松弛进行研究能有效地克服以上两者的缺点。使用有限元方法研究螺栓连接自松弛的代表有 Hess<sup>[6]</sup>、Izumi<sup>[7]</sup> 和 Jiang<sup>[8-9]</sup> 等。Hess 和 Izumi 等人通过建立三维有限元模型对在横向循环载荷作用下的螺栓连接自松弛进行仿真,提出了螺栓连接自松弛的 4 种情况:螺纹啮合面和承压面的局部滑移,螺纹啮合面和承压面的完全滑移,螺纹啮合面完全滑移而承压面局部滑移,以及螺纹啮合面局部滑移而承压面完全滑移。Jiang 等人在文献[8~9]中使用有限元方法研究了因螺纹根部塑性变形导致的螺栓连接自松弛。但 Hess、Izumi 和 Jiang 等人但他们的研究并没有涉及螺距和孔隙对螺栓连接自松弛的影响。为此,本文通过建立三维螺栓连接有限元模型,进行螺栓连接横向振动自松弛有限元仿真,研究螺距和孔隙对自松弛的影响。

## 1 螺栓连接横向振动有限元解法

螺栓连接在横向循环载荷作用下的动力学方程如下:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_x + M\delta_0\omega\cos(\omega t) \\ M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_y \\ M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = F_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M$  为单元的质量; $C$  为单元的阻尼; $K$  为单元的刚度; $x$ 、 $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  分别为单元沿  $x$  方向的位移、速度和加速度; $y$ 、 $\dot{y}$  和  $\ddot{y}$  分别为单元沿  $y$  方向的位移、速度和加速度; $z$ 、 $\dot{z}$  和  $\ddot{z}$  分别为单元沿  $z$  方向的位移、速度和加速度; $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$  分别为单元在没有受到横向激励时  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向力; $\delta_0$  和  $\omega$  为外界激励幅值和角频率。

将式(1)进行耦合,并用矩阵表示为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

式中: $[M]$  为单元质量矩阵; $[C]$  为单元阻尼矩阵; $[K]$  为单元的刚度矩阵; $\{F\}$  为单元所受力矩阵; $\{u\}$ 、 $\{\dot{u}\}$  和  $\{\ddot{u}\}$  为单元的位移矩阵、速度矩阵和加速度矩阵。

在  $t + \Delta t$  时刻,式(2)可以表达为:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F\} \quad (3)$$

有限元求解的目的就是为了求出  $t + \Delta t$  时刻的位移  $\{u_{n+1}\}$ 、速度  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  和加速度  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ 。为此,采用 Newmark 算法进行积分,假设在时间间隔  $\Delta t$  内位移、速度和加速度的关系为<sup>[8]</sup>:

$$\{\ddot{u}_{n+1}\} = \{\ddot{u}_n\} + [(1-\lambda)]\{\ddot{u}_n\} + \lambda\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad (4)$$

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + \{\ddot{u}_n\}\Delta t[(1/2-\alpha)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad (5)$$

式中: $\{u_n\}$ 、 $\{\dot{u}_n\}$  和  $\{\ddot{u}_n\}$  分别为  $t$  时刻的位移、速度和加速度; $\alpha$  和  $\lambda$  为 Newmark 算法的系数。

对式(3)~式(5)进行迭代就可以计算出  $\{u_{n+1}\}$ 、 $\{\dot{u}_{n+1}\}$  和  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ 。

## 2 仿真模型及方法

### 2.1 螺栓连接有限元模型

为了进行螺栓连接横向振动自松弛仿真,建立型号为 M12 带螺纹的三维螺栓连接有限元模型见图 1。模型对螺栓螺母的六角头、倒角等特征进行了简化,将螺栓头简化为直径 16.6 mm、高 7.5 mm 的圆柱,螺栓总长 64 mm;螺母简化为外径 16.6 mm 内径 12 mm 的圆柱形螺母;螺纹采用普通螺纹,牙型角  $60^\circ$ ,螺距细牙 1.5 mm(粗牙 1.75 mm)。2 块连接板为尺寸相同矩形板,中间具有直径为  $12 + \delta'$  ( $\delta'/2$  是孔隙)的圆孔。文中考察 3 种孔隙尺寸 0.5 mm(精装配)、0.75 mm(中等装配)和 1.25 mm(粗装配)对螺栓连接自松弛的影响。模型采用 SOLID45 单元进行网格划分,对影响计算误差的螺纹部分进行六面体网格划分,和螺纹相连的部分螺栓杆和螺母管进行四面体网格划分,其余部分进行映射网格划分。定义螺栓螺母的材料属性:杨氏弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为  $7.9 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,屈服极限为 640 Mpa;定义连接物的材料属性:杨氏弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为  $7.9 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,屈服极限为 235 Mpa。在螺栓头承压面、螺母承压面、连接物结合面及螺纹啮合面处建

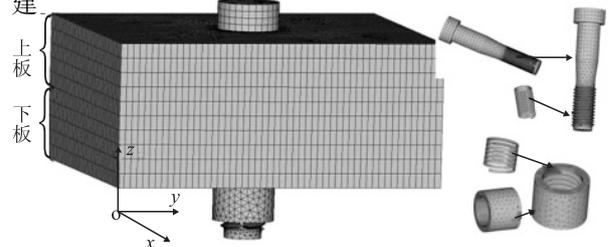


图 1 螺栓连接有限元模型

Fig.1 FEA model of bolted joints

### 2.2 螺栓连接自松弛仿真方法

对螺栓连接进行横向振动自松弛有限元仿真,首先需要 对螺栓连接进行预紧,然后对预紧后的螺栓连接模型施加横向循环载荷进行瞬态分析。本文中对螺栓连接施加的预紧力为 10.73 kN;在瞬态分析中,对下板施加随时间变化的横向位移载荷  $\delta(t) = 0.2\sin(3\ 600\ t)$ ,并设置时间步长为 0.012 5 s,在 0.325 s 后结束仿真。

## 3 结果分析

### 3.1 螺距对螺栓连接自松弛的影响

对孔隙为 0.5 mm 的不同螺距模型分别进行螺栓连接横向振动自松弛有限元仿真。在仿真结束后,提取上板下表面所有节点的 z 向合力作为螺栓连接的残余预紧力,并绘制残余预紧力随循环周期变化的曲线见图 2。由图 2 可知,细牙螺纹预紧力损失速度要稍慢一些,说明细牙螺纹的防松性能要比粗牙螺纹好。提取外界激励幅值处螺纹啮合面和螺母承压面的接触状态见图 3,由图可知,粗牙螺纹对应的滑移更加剧烈。这与不同螺距条件下预紧力损失过程相符,同时说明细牙螺纹的螺栓连接不容易发生自松弛。

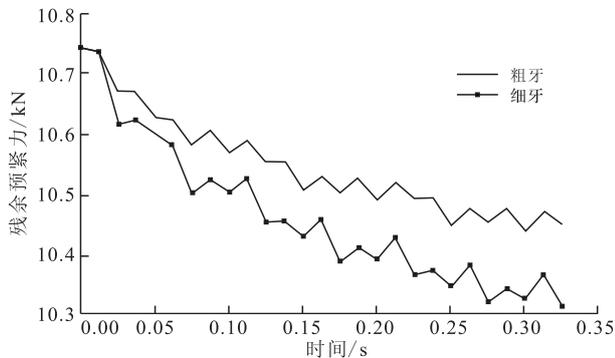


图 2 不同螺距条件下的残余预紧力变化曲线  
Fig.2 Residue preload vs cycles under different thread pitch

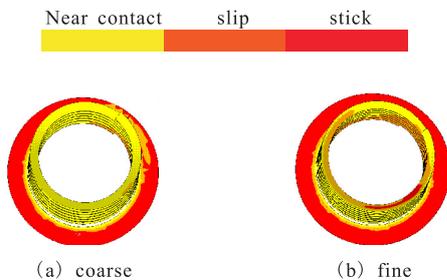


图 3 不同螺距条件下的接触状态  
Fig.3 The contact status under different thread pitch

### 3.2 孔隙对螺栓连接自松弛的影响

对螺距为 1.75 mm 的不同孔隙模型分别进行螺栓连接横向振动自松弛有限元仿真。在仿真结束后,提取残余预紧力值,绘制曲线见图 4。由图 4 可知,孔隙越大预紧力损失的速度也越大。提取外界激励幅值处的螺纹啮合面和螺母承压面的接触状态见图 5。由图 5 可知,孔隙越大滑移越剧烈,这与预紧力的损失规律相同,说明孔隙越大,螺栓连接越容易发生自松弛,这也验证了精装配的防松性能最好的逻辑。

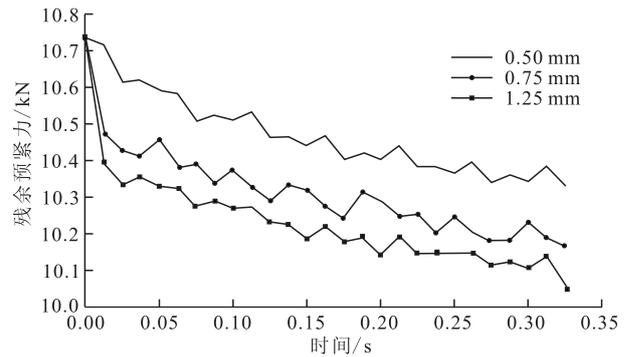


图 4 不同孔隙条件下的残余预紧力变化曲线  
Fig.4 Residue preload VS cycles under different clearances

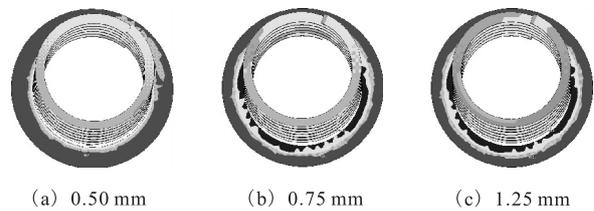


图 5 不同孔隙条件下的接触状态  
Fig.5 The contact status under different clearances

## 4 结论

通过对不同螺距和不同孔隙的螺栓连接模型进行横向振动自松弛有限元仿真研究,可以得到以下结论:

- 1) 细牙螺纹的螺栓连接相比粗牙螺纹的螺栓连接不容易发生自松弛;
- 2) 本文的有限元仿真验证了精装配在 3 种装配中的防松效果最好的逻辑;
- 3) 有限元仿真结果与文献中的研究结果相符,说明了本文建立的螺栓连接有限元模型及仿真方法的正确性,从而为进行螺栓连接自松弛有限元分析提供了一种实现途径,同时为进行其它螺栓连接有限元仿真提供了一种建模方法。

**参考文献(References):**

- [1] Nassar S A, Housari B A. Effect of thread pitch and initial tension on the self-loosening of threaded fasteners [J]. Journal of pressure vessel technology, 2006, 128(4):590-598.
- [2] Nassar S A, Housari B A. Study of the effect of hole clearance and thread fit on the self-loosening of threaded fasteners [J]. Journal of mechanical design, 2007, 129(6):586-594.
- [3] Zaki A M, Nassar S A, Yang X. Effect of thread and bearing friction coefficients on the self-loosening of preloaded countersunk-head bolts under periodic transverse excitation [J]. Journal of tribology, 2010, 132(3):031601.
- [4] Yang X, Nassar S A. Effect of thread profile angle and geometry clearance on the loosening performance of a preloaded bolt-nut system under harmonic transverse excitation [C]//ASME 2011 pressure vessels and piping conference. Baltimore, Maryland: ASME, 2011:393-404.
- [5] Zaki A M, Nassar S A, Yang X. Effect of conical angle and thread pitch on the self-loosening performance of preloaded countersunk-head bolts [J]. Journal of pressure vessel technology, 2012, 134(4):021210.
- [6] 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.
- [7] 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(4):604-615.
- [8] Jiang 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.
- [9] Jiang y, Zhang M, Lee C H. Finite element modeling of self-loosening of bolted joints [J]. Journal of mechanical design, 2006, 129(2):218-226.

**本刊相关链接文献:**

- [1] 龚小平, 刘毅静, 崔利杰. 圆柱螺旋弹簧可靠性优化设计 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(2):77-80.
- [2] 李静, 孙强, 李春旺, 等. 多轴载荷下 GH4169 合金疲劳寿命预测 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(4):85-89.
- [3] 李春旺, 解武杰, 杨尊袍, 等. 基于 UG 预处理的 ANSYS 有限元分析方法 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(5):85-89.

(编辑:徐楠楠)