

振动工况下螺栓连接自松弛机理研究

王 巍, 徐 浩, 马 跃, 刘海平

(空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051)

摘 要: 为研究振动工况下螺栓连接自松弛机理, 利用 ANSYS 参数化语言建立考虑螺纹的三维螺栓连接有限元模型, 用降温法加载预紧力, 进行螺栓连接横向振动瞬态分析; 研究横向激励幅值、初始预紧力、螺纹啮合面、螺栓头及螺母承压面以及连接物之间结合面的摩擦因数等对螺栓连接自松弛影响。结果表明, 横向振动时完全滑移先发生于螺纹啮合面处; 横向激励幅值越小、初始预紧力越大、螺纹啮合面及螺栓头、螺母承压面摩擦因数越大, 螺栓连接自松弛越不易发生; 激励幅值一定时连接物间结合面摩擦因数对自松弛无影响, 但摩擦因数越大, 发生横向振动所需剪切载荷越大。研究结果对理解螺栓连接自松弛、指导防松设计具有重要意义。

关键词: 螺栓连接; 振动; 瞬态分析; 预紧力; 摩擦因数

中图分类号: TB122; TH123

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.22.036

Self-loosening mechanism of bolted joints under vibration

WANG Wei, XU Hao, MA Yue, LIU Hai-ping

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

Abstract: Aiming at analyzing the self-loosening mechanism of bolted joints under vibration, a three dimensional FEA model of bolted joints, taking thread into consideration, was built by using the software ANSYS. Applying the preload on the bolted joints by the method of dropping temperature, the FE transient analysis on bolted joints under transverse cyclic excitation was conducted. The effects of transverse cyclic excitation's amplitude, initial preload, thread, bearing friction coefficients, and joints' surface friction coefficient on self-loosening were investigated. The results show that the complete thread slip occurs prior to the complete bearing surface slip under transverse vibration. The smaller the excitation amplitude is, the greater the initial preload is, and the bigger the thread and bearing friction coefficients are, the more difficult the occurrence of self-loosening will be. The joints' surface friction coefficient has little relationship to self-loosening, however, the larger joints' surface friction coefficient makes the needed shearing force, which induces the transversal vibration, larger. These are of great significance for understanding of fasteners' self-loosening and anti-loosening designing of bolted joints'.

Key words: bolted joints; vibration; transient analysis; preload; friction coefficient

振动时螺栓连接因受外界循环剪切载荷作用发生的自松弛仅次于疲劳失效^[1], 导致泄漏、受力不均造成疲劳断裂、降低整机动态性能等不良后果, 甚至造成安全事故。因此研究振动的螺栓连接自松弛具有重要意义。

对螺栓连接自松弛及防松已有研究。Junker^[2]设计琼克尔试验机并研究螺栓连接在横向循环载荷作用下的自松弛行为, 发现此时螺栓连接更易发生自松弛。Hess 等^[3]通过试验及有限元仿真研究横向剪切载荷作

用下螺栓连接自松弛, 提出自松弛具有四阶段, 即螺纹啮合面及承压面部分滑移阶段、螺纹啮合面完全滑移及承压面部分滑移阶段、螺纹啮合面部分滑移及承压面完全滑移阶段、螺纹啮合面及承压面完全滑移阶段。Nassar 等^[4-6]用线性模型研究螺纹倾角、预紧力、孔隙与螺纹配合、螺纹面与承压面摩擦因数等对螺栓连接横向振动自松弛影响。Nassar 等^[1,7-11]提出更精确的解析模型解释螺栓连接自松弛现象, 并进行实验研究, 校核解析模型。以上诸多研究的理论、实验模型均以琼克尔试验机为基础, 忽略连接物间结合面摩擦, 与实际不符。Jiang 等^[12-14]设计出新型自松弛实验装置, 结合有限元仿真研究螺栓连接自松弛, 认为自松弛可分两阶段, 即因短暂、剧烈的螺纹牙材料塑性滞后效应所

致第一阶段松弛与因螺母回转引发夹紧力损失的第二阶段松弛,并考虑连接物结合面摩擦因数,但有限元仿真中未考虑螺纹螺旋效应,忽略螺母回转导致的螺栓连接自松弛。王丹生等^[15]基于压电导纳对钢架结构进行螺栓连接松弛检测实验研究。结果表明,该方法能较好识别螺栓连接松弛,但未分析钢架结构螺栓连接发生松弛原因。杨广雪等^[16]研究新型防松螺母防松机理时用三维有限元方法研究附加弯矩、初始预紧力及防松螺母对横向循环载荷作用下螺栓连接松弛影响。

本文在以上研究基础上建立螺栓连接三维有限元模型,用降温法对螺栓施加预紧力进行横向振动瞬态仿真,研究激励幅值、初始预紧力、螺纹啮合面与承压面摩擦因数、结合面摩擦因数等对螺栓连接自松弛影响规律。

1 螺栓连接自松弛仿真方法研究

1.1 螺栓连接参数化有限元建模

用有限元方法研究螺栓连接在横向振动条件下因螺母回转导致的自松弛。有限元模型须考虑螺纹的螺旋效应,即建立带螺纹的三维螺栓连接有限元模型。用 ANSYS 参数化语言编程建立螺栓连接有限元模型,见图 1(a)。其中,螺栓由螺杆、螺纹组成,通过体粘接命令 VGLUE 粘接为一体后划分网格获得;螺母建模与螺栓相似,螺栓、螺母有限元模型见图 1(b)。模型几何尺寸为:螺栓公称直径 $D = 12 \text{ mm}$,螺栓头直径 $D_1 = 16.6 \text{ mm}$,螺栓头高 $K_w = 7.5 \text{ mm}$,螺母高 $H = 13 \text{ mm}$,螺距 $p = 1.75 \text{ mm}$,螺栓长 $L = 64 \text{ mm}$,连接板 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (两板尺寸相同),孔隙 $\delta'/2 = 0.5 \text{ mm}$,螺纹轮廓角 60° 。螺栓材料选高强度钢,弹性模量 $E_1 = 210 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu_1 = 0.3$,密度 $\rho_1 = 7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,屈服极限 640 MPa ;连接板材料选 Q235 钢,弹性模量 $E_2 = 210 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu_2 = 0.3$,密度 $\rho_2 = 7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,屈服极限 235 MPa 。

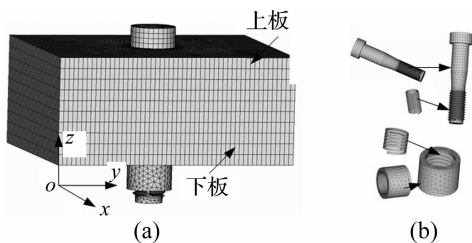


图 1 螺栓连接三维有限元模型

Fig. 1 Three dimensional FEA model of bolted joints

1.2 接触对建立及约束施加

1.2.1 接触对建立

本文研究考虑各接触面间滑移,故用 TARGE170 作为目标单元、能模拟滑移的 CONTA173 作为接触单

元在螺纹啮合面、螺栓头承压面、螺母承压面及连接物结合面建立接触对,并定义接触单元关键字 KEYOPT(2) = 0 选增广拉格朗日算法为接触算法,定义关键字 KEYOPT(5) = 1 实现自动闭合间隙。在建立接触对同时用定义材料摩擦因数方法定义螺纹啮合面、螺栓头承压面、螺母承压面及连接物结合面的摩擦因数分别为 μ_1, μ_2, μ_3 。各结合面摩擦因数取值见文献 [6, 17], 具体为石蜡润滑 (0.05)、MoS₂ 油脂润滑 (0.1)、机械润滑油润滑 (0.17) 及干摩擦 (0.2)。

1.2.2 约束施加

对诸如机床等固定电动机处螺栓连接受循环载荷作用导致某连接物沿单一方向运动的实际工程,将模型中上板固定,使下板具有某一方向自由度。因此,对上板上表面所有节点全约束,上板与坐标面 XOZ 平行的两表面所有节点进行 Y 向位移约束,上板与坐标面 YOZ 平行的两表面所有节点进行 X 向位移约束;下板与坐标面 XOZ 平行的两表面所有节点进行 Y 向位移约束。

1.3 螺栓连接预紧

考虑预紧力单元不能承受剪切载荷,无法在横向振动瞬态分析中应用^[18],因此采用降温法施加螺栓连接预紧力。降温法通过设置螺栓材料的热膨胀系数降低螺栓预紧部分温度,使螺栓收缩,但连接物已约束螺栓变形使螺栓内部产生拉力,达到模拟螺栓预紧力作用,可有效模拟螺栓连接的受力情况。施加预紧力所需温度差为

$$\Delta t = \frac{F}{\alpha l} \left(\frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_m} \right) \quad (1)$$

式中: F 为预紧力大小; α 为螺栓材料热膨胀系数; l 为螺栓预紧部分长度; C_b 为螺栓刚度; C_m 为连接物刚度。

利用静态求解器,用 TREF 命令设置基准温度、用 BFV 命令按式 (1) 对螺栓施加温度载荷进行预紧力施加。求解后进入后处理器,选螺母螺纹单元模型,查看等效应力云图,见图 2。由图 2 看出,啮合螺纹第一圈应力最大,其后各圈应力依次递减,符合螺栓连接应力分布。

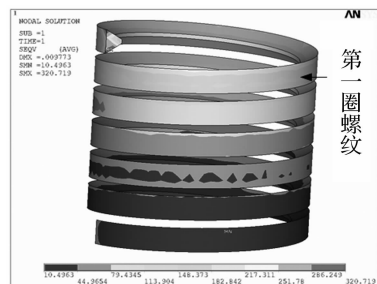


图 2 预紧后螺母螺纹应力云图

Fig. 2 The stress nephogram of nut thread after preloaded

1.4 螺栓连接横向振动瞬态分析

进行螺栓连接自松弛有限元分析,对螺栓连接预紧后需施加横向激励 δ_x 进行瞬态分析。 δ_x 计算式为

$$\delta_x = \delta_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: $\delta_0 \leq \delta'/2$ 为激励幅值; ω 为角频率。

利用图1螺栓连接有限元模型,设置各结合面摩擦因数为 $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.1$,施加预紧力 $F = 10\ 730\ \text{N}$ 进行静态分析。求解后进入瞬态分析求解器,对下板与坐标面 YOZ 平行侧表面所有节点施加 X 向位移载荷 $\delta_x = 0.2 \sin(3\ 600t)$,时间步长 $t = 0.012\ 5\ \text{s}$,进行完全瞬态分析,在 $t = 0.325\ \text{s}$ 时结束仿真。

2 螺栓连接自松弛机理分析

2.1 螺栓连接自松弛过程分析

仿真结束后提取用于施加位移载荷所有节点 X 向合力为剪力,绘制剪切载荷随板横向位移变化曲线亦称剪切载荷滞回曲线,见图3。图中纵坐标跨度大小可衡量螺栓连接剪切刚度,跨度越大,剪切刚度越大。

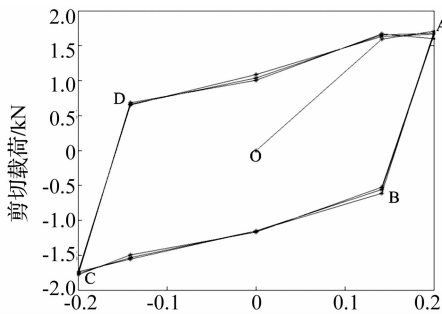


图3 剪切载荷与下板横向位移间关系

Fig.3 The relationship between shearing load and transverse displacement

图4为A、B、C、D点螺纹啮合面、螺母承压面的接触状态。由图4看出,A、C点螺纹啮合面发生完全滑移,

螺母承压面发生部分滑移,滑移位置恰好对应,可使螺母承压面在一个循环内实现滑移;B、D点亦发生部分滑移;说明在激励幅值处滑移最严重,螺纹啮合面完全滑移先于螺母承压面,即螺栓连接的松弛最先发生在螺纹啮合面。A、C点承压面部分滑移位置呈对称性,可实现一个循环内的螺母滑移。

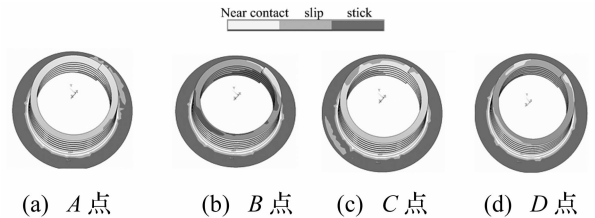


图4 螺纹啮合面及螺母承压面接触状态

Fig.4 The contact status of thread and nut bearing surface

提取上板下表面所有节点 Z 向合力为残余预紧力,其随时间变化曲线见图5。由图5可知,一个周期内预紧力下降量较小。结合图4知,局部滑移能造成螺栓连接松弛。

2.2 振动幅值对自松弛影响

为考察横向振动幅值对螺栓连接自松弛影响,仿真中仅修改参数 δ_0 为0.02、0.1、0.2、0.3、0.4,进行不同幅值对比实验。横向振动幅值不同时螺栓连接预紧力变化见图6。由图6看出,幅值为0.02、0.1时预紧力变化曲线几乎与坐标轴平行,此时预紧力损失较小可忽略;幅值为0.2、0.3、0.4时预紧力损失明显,表明螺栓连接并非仅受横向振动影响发生自松弛,而在横向振动幅值达到一定值后才发生自松弛。对比幅值0.2、0.3、0.4时残余预紧力变化知,横向振动幅值越大预紧力损失越快。横向振动幅值不同时剪切载荷滞回曲线见图7。由图7看出,振幅越大所需剪切载荷越大。

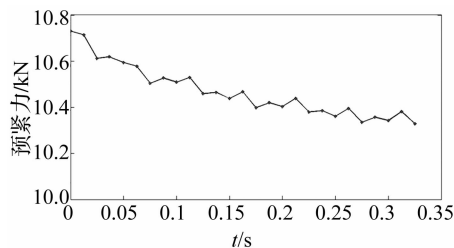


图5 残余预紧力随时间变化曲线

Fig.5 Residue preload VS time

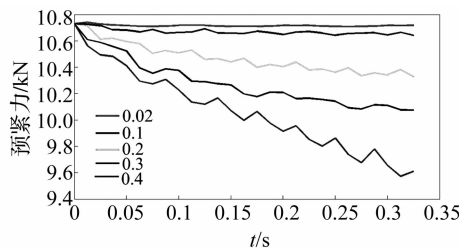


图6 振幅不同时残余预紧力变化曲线

Fig.6 Residue preload VS time under different amplitudes

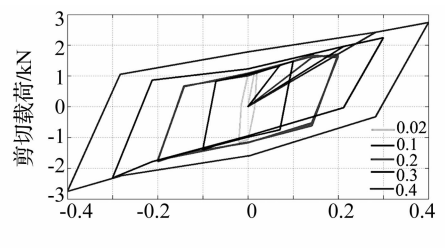


图7 振幅不同时剪切载荷滞回曲线

Fig.7 Shearing load hysteretic curves under different amplitudes

2.3 初始预紧力大小对自松弛影响

为考察初始预紧力大小对螺栓连接自松弛影响,仿真中仅在静态分析时进行不同大小预紧,设初始预紧力分别为3 kN、10.73 kN、21.32 kN、29.93 kN 进行

不同初始预紧力对比仿真。初始预紧力不同时损失预紧力百分比变化曲线见图8。由图8看出,初始预紧力越大横向振动时螺栓连接预紧力损失百分比越小,越不易发生自松弛。初始预紧力不同时剪切载荷滞回曲

线见图 9。由图 9 可知,初始预紧力越大剪切载荷滞回曲线纵坐标跨度越大,达到一定振幅所需剪切载荷越

大,说明螺栓连接预紧力越大横向刚度越大,越不易发生自松弛。

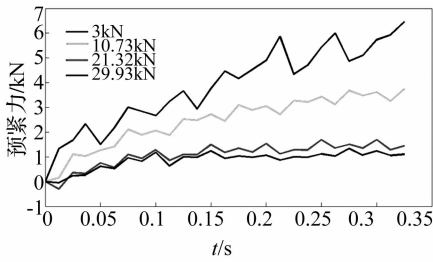


图 8 不同初始预紧力时损失百分比变化曲线

Fig. 8 Curves of losing preload percents under different initial preloads

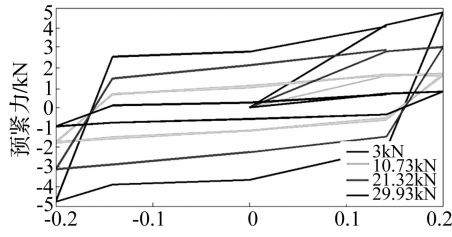


图 9 不同初始预紧力时剪切载荷滞回曲线

Fig. 9 Shearing load hysteretic curves under different initial preloads

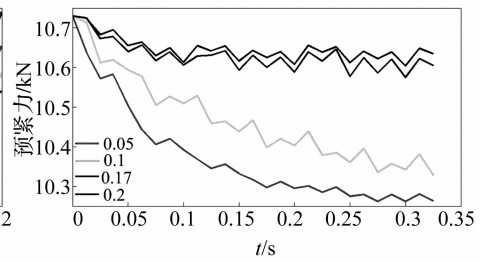


图 10 不同 μ_1 时残余预紧力变化曲线

Fig. 10 Residue preload VS time under different μ_1

2.4 摩擦因数对自松弛影响

2.4.1 摩擦因数 μ_1 对螺栓连接自松弛影响

为考察螺纹啮合面摩擦因数对螺栓连接自松弛影响,仅修改参数 μ_1 为 0.05、0.1、0.17、0.2 进行不同螺纹啮合面摩擦因数的对比仿真。不同螺纹啮合面摩擦因数时残余预紧力随时间变化曲线见图 10。由图 10 看出, μ_1 为 0.17、0.2 时预紧力下降速度不明显,但 μ_1 为 0.05、0.1 时预紧力下降速度非常明显,螺纹啮合面摩擦因数越大摩擦力越大,螺栓连接越难发生自松弛。不同螺纹啮合面摩擦因数时剪切载荷滞回曲线见图 11。由图 11 看出, μ_1 越大剪切载荷亦越大,但差距不明显,说明螺纹摩擦因数对螺栓连接的横向刚度影响较小。

2.4.2 摩擦因数 μ_2 对螺栓连接自松弛影响

为考察螺头承压面和螺母承压面摩擦因数 μ_2 对螺栓连接自松弛的影响,仅修改参数 μ_2 为 0.05、0.1、0.17、0.2 进行不同摩擦因数 μ_2 的对比仿真。不同摩擦因数 μ_2 时残余预紧力变化曲线见图 12。由图 12 看

出, μ_2 为 0.1、0.17、0.2 时 μ_2 越小预紧力损失越大; μ_2 为 0.05 时预紧力变化却不符合该规律。与其他仿真结果相悖,但不能说明模型或求解出错,而因本文有限元仿真中螺栓头、螺母自由度均未限制,不同于其他仿真。不限制螺栓头或螺母自由度、承压面摩擦因数非常小时,下板横向运动所致相对滑移非常小,故螺栓连接自松弛速度非常小。不同摩擦因数 μ_2 的剪切载荷滞回曲线见图 13。由图 13 看出,摩擦因数 μ_2 、 μ_1 均对螺栓连接横向刚度影响较小。

2.4.3 摩擦因数 μ_3 对螺栓连接自松弛影响

修改参数 μ_2 为 0.05、0.1、0.17、0.2 进行不同摩擦因数 μ_3 的对比仿真。不同摩擦因数 μ_3 的残余预紧力变化曲线见图 14。由图 14 看出,不同的 μ_3 对应预紧力变化大致相同,即横向振幅一定时 μ_3 对螺栓连接自松弛影响较小。不同摩擦因数 μ_3 的横向剪切载荷滞回曲线见图 15。由图 15 可知, μ_3 越大剪切载荷滞回曲线纵坐标跨度越大。说明结合面摩擦因数越大螺栓连接横向刚度越大,螺栓连接越不易发生自松弛。

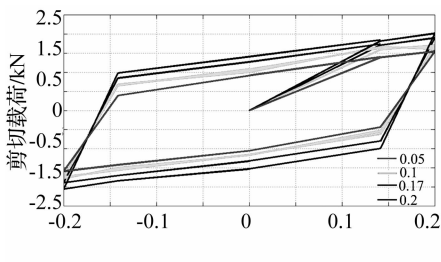


图 11 不同 μ_1 时剪切载荷滞回曲线
Fig. 11 Shearing load hysteretic curves under different μ_1

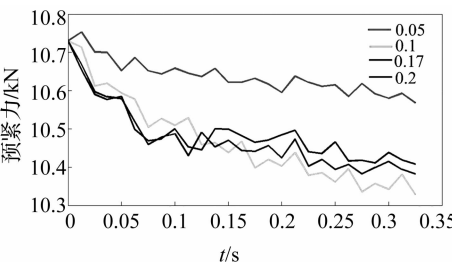


图 12 不同 μ_2 时残余预紧力变化曲线
Fig. 12 Residue preload vs. time under different μ_2

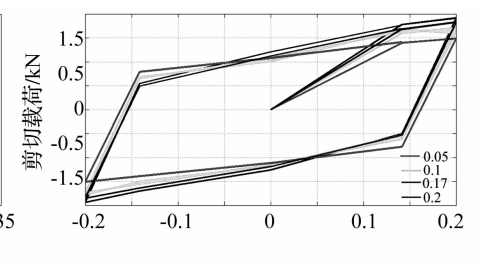
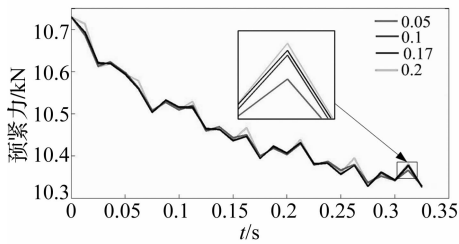
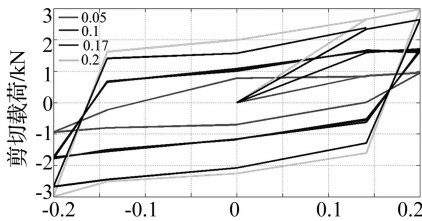


图 13 不同 μ_2 时剪切载荷滞回曲线
Fig. 13 Shearing load hysteretic curves under different μ_2

图14 不同 μ_3 时残余预紧力变化曲线Fig. 14 Residue preload vs. time under different μ_3 图15 不同 μ_3 时剪切载荷滞回曲线Fig. 15 Shearing load hysteretic curves under different μ_3

3 结论

本文用有限元方法对受横向振动的螺栓连接自松弛进行仿真,重点研究横向振幅、初始预紧力、螺纹啮合面摩擦因数、螺栓头与螺母承压面摩擦因数及连接物结合面摩擦因数对螺栓连接自松弛影响,结果如下:

(1) 螺纹啮合面或承压面局部滑移可导致预紧力损失,螺纹啮合面完全滑移先于承压面。

(2) 振幅越大螺栓连接越易发生自松弛;初始预紧力越大其损失百分比越小,螺栓连接越不易发生自松弛;螺纹啮合面及承压面摩擦因数越大螺栓连接越不易发生自松弛;连接物结合面摩擦因数对相同振幅的自松弛影响不大,对螺栓连接横向刚度影响较大。

(3) 螺栓连接防松设计时应优先考虑改变螺纹啮合面摩擦状态及承压面摩擦状态;在不影响螺栓连接强度情况下应尽量施加最大初始预紧力;在不影响螺栓连接压力分布及连接密封等性能影响前提下应尽量增大连接结合面摩擦。

参考文献

[1] Yang X, Nassar S N, Wu Z. Criterion for preventing self-loosening of preloaded cap screws under transverse cyclic excitation[J]. Journal of Vibration and Acoustics, ASME, 2011, 133(8): 1-11.

[2] Junker G H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration[J]. SAE Trans., 1969, 78: 314-335.

[3] 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: 383-402.

[4] 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, ASME, 2006, 128(11): 590-598.

- [5] 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, ASME, 2007, 129(6): 586-594.
- [6] Housari B A, Nassar S A. Effect of thread and bearing friction coefficients on the vibration-induced loosening of threaded fasteners[J]. Journal of Vibration and Acoustics, ASME, 2007, 129(8): 484-494.
- [7] Nassar S A, Yang X. A mathematical model for vibration induced loosening of preloaded threaded fasteners[J]. Journal of Vibration and Acoustics, ASME, 2009, 131(4): 1-13.
- [8] Yang X, Nassar S A. Vibration-induced loosening performance of preloaded threaded fasteners [C]. Proceedings of PVP, ASME, 2010.
- [9] 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]. Proceedings of PVP, ASME, 2011.
- [10] Yang X, Nassar S A. Analytical and experimental investigation of self-loosening of preloaded cap screw fasteners [J]. Journal of Vibration and Acoustics, ASME, 2011, 133(6): 1-8.
- [11] 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): 1-8.
- [12] Jiang Y, Zhang M, Lee C H. A study of early stage self-loosening of bolted joints [J]. Journal of Mechanical Design, ASME, 2003, 125(9): 518-526.
- [13] Jiang Y, Zhang M, Park T W, et al. An experimental study of self-loosening of bolted joints [J]. Journal of Mechanical Design, ASME, 2004, 126(9): 925-931.
- [14] Jiang Y, Zhang M, Lee C H. Finite element modeling of self-loosening of bolted joints [J]. Journal of Mechanical Design, ASME, 2007, 129(2): 218-226.
- [15] 王丹生,朱宏平,鲁晶晶,等.基于压电导纳的钢框架螺栓松动检测试验研究[J].振动与冲击, 2007, 26(10): 157-160.
- WANG Dan-sheng, ZHU Hong-ping, LU Jing-jing, et al. Experimental study on detecting loosened bolts of a steel frame based on piezoelectric admittance [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(10): 157-160.
- [16] 杨广雪,谢基龙,谢云叶.基于有限元的一种新型螺母的防松机理研究[J].工程力学, 2010, 27(12): 224-228.
- YANG Guang-xue, XIE Ji-long, XIE Yun-ye. Study on mechanism of anti-loosening of a new type of nut based on FEM [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 224-228.
- [17] 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.
- [18] 晶晶,吴新跃,郑建华.螺栓联结预应力施加方法改进研究[J].海军工程大学学报, 2010, 22(2): 20-24.
- JIN Jing, WU Xing-yue, ZHENG Jian-hua. Bolt joint prestress load adding method based on transient analysis [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(2): 20-24.