

螺栓连接结构接触面刚度仿真分析

于 闯¹ 马洪杰² 孙屹博³ 高明亮¹ 赵 明⁴ 孔 风¹ 邸建财¹ 段洪亮⁵

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司检修研发部, 130062, 长春; 2. 哈尔滨地铁集团有限公司, 150081, 哈尔滨;
3. 大连交通大学机车车辆工程学院, 116028, 大连; 4. 中车长春轨道客车股份有限公司科技管理部, 130062, 长春;
5. 中车长春轨道客车股份有限公司总体研发部, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘 要 螺栓连接结构中存在很多接触面, 接触面的特性是影响结构整体特性的重要因素, 因此对螺栓连接结构接触面进行研究具有重要意义。以探究螺栓连接结构接触面刚度为目标, 通过建立带防松垫圈的螺栓连接结构, 提取特殊接触面间的接触刚度; 建立带有实际螺纹结构的螺栓连接结构有限元模型, 通过对螺母施加不同的扭矩来模拟螺栓预紧力的变化; 采用显式动力学方法对螺栓拧紧过程进行分析, 通过预紧力与变形量之间的关系计算不同预紧力下防松垫圈与被连接件这种特殊接触面之间的接触刚度, 结果表明接触刚度呈非线性变化。

关键词 螺栓连接; 扭矩; 防松垫圈; 接触刚度

中图分类号 U270.1⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.02.008

Simulation Analysis of Contact Surface Stiffness of Bolted Connection Structure

YU Chuang, MA Hongjie, SUN Yibo, GAO Mingliang, ZHAO Ming, KONG Feng, DI Jiancai, DUAN Hongliang

Abstract There are many contact surfaces existing in the bolted connection structure and the characteristics of the contact surface are important factors affecting the overall structure specifications. Therefore, it is of great significance to study the contact surface of bolted connection structure. Aiming at exploring the contact surfaces stiffness of bolted connection structure, contact stiffness between special contact surfaces were extracted by establishing a bolted connection structure with lock washer. The finite element model of bolted connection structure with the actual threaded structure was established, and the change of bolt preload was simulated by applying different torques to the nuts. The tightening process of the bolt was analyzed by the explicit dynamics method, and then the contact stiffness between special contact surfaces as between the lock washer and the connected parts was calculated under different bolt preload with the relationship between pre-tension force and deformation. The results show that the contact

stiffness varies nonlinearly.

Key words bolted connection; torque; lock washer; contact stiffness

First-author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

螺栓连接作为常用的装配连接方式之一, 具有标准统一、结构简单、承载能力强、安全可靠、便于装配维修等优点, 因此在机械工程、土木工程和电力工程等领域有着极为广泛的应用。在一个复杂的机械结构中, 各零部件的刚度以及各零部件间的接触刚度组成了机械结构的整体刚度, 而接触刚度在整体刚度中占比非常大, 是影响机械结构整体刚度的重要因素^[1]。螺栓连接结构的接触面主要包括被连接结构间的接触面、螺母以及螺栓头与被连接结构间的接触面。在实际工程问题中, 接触面作为相互接触的两零件间传递力及相互作用的面, 其接触特性对整个结构的工作可靠性存在很大的影响^[2]。因此, 研究螺栓连接结构的接触特性具有重要的理论与实际意义。

对于接触刚度的研究, 从机械结构中的结合面研究发展到针对典型螺栓连接结合面接触特性的研究。文献[3]通过试验获得了接触面在单位正压下的试验数据, 提出了获得不同接触条件下接触刚度和阻尼的方法。文献[4]为了对螺栓结合面的动态参数进行研究, 利用有限单元法和计算机编程, 采用理论与试验结合的方式对结合面的接触刚度和接触阻尼进行识别。文献[5]以动力学研究中的基本方程为依据, 根据接触面间的静位移与其所受轴向力间的关系, 从理论上推导出了接触面静刚度的求解公式。文献[6]将支撑在螺母与螺栓间的结合面进行简化, 通过给结构施加位移和压力, 推出了厚度、材质均相同的被连接件间的接触面刚度范

围。文献[7]以螺栓预紧力作为变量,采用有限元分析软件对螺栓连接结构的模态及固有频率受接触面刚度的影响规律进行了探究。文献[8]采用 Ansys Workbench 软件,从理论上对法向接触刚度的主要影响因素进行了研究,并推导出了法向接触刚度的计算公式。文献[9]根据薄层单元理论将航空发动机的螺栓连接结构进行简化建模,并通过有限元分析技术分析了薄层的材料参数对螺栓连接接触刚度的影响。

本文以带有防松垫圈的螺栓连接结构为研究对象,基于 ABAQUS 有限元分析软件,通过建立带有实际螺纹结构的螺栓连接结构有限元模型,并对螺母施加不同的扭矩,采用显式动力学方法对螺栓拧紧过程进行分析。最后,根据预紧力与变形量之间的关系计算不同预紧力下防松垫圈与被连接件这种特殊接触面之间的接触刚度。

1 施加扭矩的螺栓连接结构有限元模型的建立

螺栓连接结构有限元模型主要包括 NL10sp 型防松垫圈(以下简称“防松垫圈”)、M8 螺栓和螺母、连接板。防松垫圈、连接板通过 M8 螺栓连接,其中,防松垫圈置于连接板之间。由于螺栓和螺母受扭矩后的应力以及变形不是研究重点,所以将螺母和螺栓头的外侧面简化为圆柱形,以便于施加扭矩和边界条件。

为了计算不同预紧力下螺栓连接结构中防松垫圈的轴向变形量以及螺栓连接结构受预紧力后的应力分布,需建立螺栓连接结构模型,通过仿真螺栓的扭紧过程来实现螺栓轴向预紧力的施加。而螺栓的扭紧过程,是在扭矩的作用下通过螺纹等接触面间相互的作用实现的,所以螺栓及螺母的螺纹建模是有限元建模的重点。由于螺牙间的动态接触关系比较复杂,所以,有必要对其建立较精细的网格模型,以便于顺利建立计算过程中的接触关系。而对于其它接触关系相对简单或不存在接触关系的结构,可以采用稍粗糙的有限单元进行建模。为增加计算精度和准确性,所有部件均采用实体单元建模。对螺纹部分,则全部采用四面体单元建模。

由于螺纹连接处的接触为复杂的动态接触,所以选用 C3D10M 单元为螺栓和螺母划分网格,而连接板与防松垫圈均采用 C3D8R 单元。将螺母和螺栓、防松垫圈、连接板的网格尺寸分别设置为 0.6

mm、0.4 mm 和 1.2 mm。按照上述设置为各部件划分网格,如图 1 所示,划分完成的有限元网格模型共包含 149 590 个实体单元,203 438 个节点。

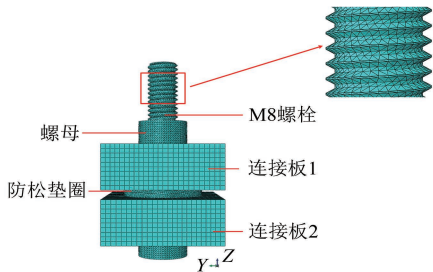


图 1 螺栓连接结构网格模型

螺栓连接结构在拧紧过程中,螺母和螺栓的螺纹间存在非常复杂的接触关系。对于此种接触关系的定义,采用接触对形式或者通用接触形式都可以实现。本文拟采用通用接触实现各零部件间的接触定义。根据实际接触关系,各接触面间的摩擦系数设置为 0.15。

2 施加扭矩的螺栓连接结构模态的计算

采用显示动态求解方法对螺栓连接结构进行分析。为了得到合适的加载时间,对该螺栓连接结构进行了模态分析。由于结构频率的提取是一个线性扰动的过程,所以在计算过程中不考虑材料的非线性性质。如图 2 所示,在 ABAQUS 软件中计算了螺栓连接结构的前六阶模态振型,各阶模态的频率和所对应的周期如表 1 所示。

表 1 螺栓连接结构振动频率和加载时间周期

模态	频率/Hz	周期/s
一阶	1 707.5	0.00 058 565 154
二阶	1 732.9	0.00 577 067 344
三阶	1 765.9	0.00 056 628 348
四阶	2 387.0	0.00 041 893 590
五阶	3 580.1	0.00 027 932 181
六阶	4 568.9	0.00 218 871 063

由表 1 的分析结果可以确定,取最小的加载时间周期应不小于 0.000 585 s。为保证计算的准确性,根据文献[10],理想的显式加载时间应该为最低模态周期的 10 倍以上,因此,将计算中扭矩加载的时间设为 0.2 s。所有设置时间均远大于最低模态周期的 10 倍,确保求解结果得到了真正的准静态。

3 不同扭矩下的有限元分析结果

根据工程手册中预紧扭矩与预紧力之间的经验公式:

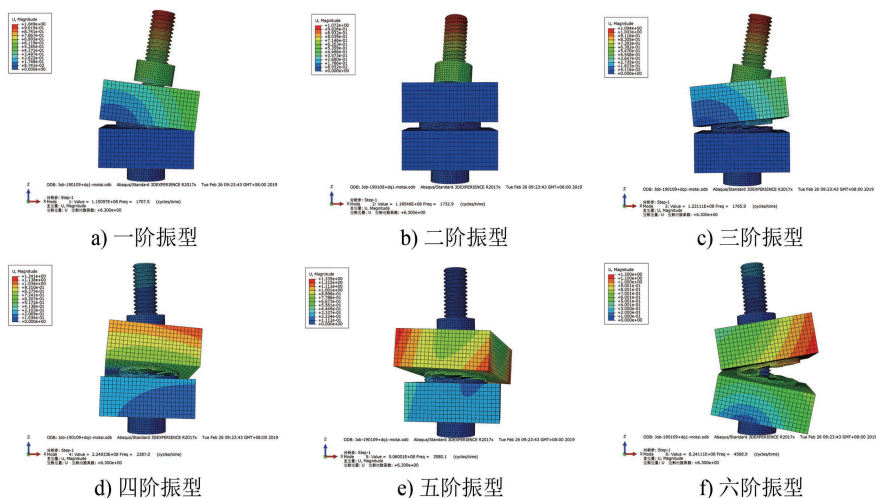


图 2 螺栓连接结构前六阶模态振型

$$M_t = kTd \quad (1)$$

可得出: $T = M_t / (kd)$

式中:

M_t ——施加的预紧扭矩;

T ——轴向力,即预紧力;

d ——螺纹的公称直径;

k ——扭矩系数,通常取 0.11~0.15。

根据文献[11],在表面精加工且有润滑的情况下, $k = 0.1$;一般加工面有润滑时 k 取值为 0.13~0.15。本文的研究分析中, k 取值为 0.13。

根据式(1)计算的螺栓预紧力分别为 1 000 N 到 9 000 N 时对应的扭矩值。基于 ABAQUS 软件仿真,将上述计算得到的扭矩载荷依次施加到螺母上,将应力、应变、位移以及螺母与连接板 1 之间的轴向接触力作为输出,仿真计算得到不同预紧力下的分析结果。

以预紧力为 9 000 N 的情况为例。当螺栓预紧力为 9 000 N 时,由式 1 计算得到对应的拧紧扭矩为 $9.36 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。9 000 N 预紧力下整个螺栓连接结构、垫圈、螺杆的 Mises 应力云图如图 3 所示。

由图 3 可见:整个结构的最大 Mises 应力为 1 017 MPa,位于螺母的螺纹根部;垫圈的最大 Mises 应力发生在小齿面的齿根处,其值为 442.9 MPa;螺栓的最大应力出现在螺纹根部编号为 13724 的节点上,其值为 961.6 MPa;。

为了了解扭矩施加过程中接触面间接触力的变化情况,提取螺母与连接板 1 之间的接触面(以下简称“面 1”)轴向接触力随时间的变化历程,如图 4 所示。由图 4 可见:随加载时间的增加,面 1

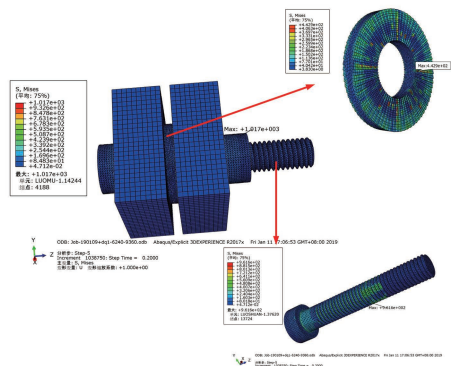


图 3 9 000 N 预紧力下螺栓连接结构、垫圈、螺杆结构的应力云图

上的轴向接触力逐渐增加;当总分析时间达到 0.05 s 时,接触力大小基本与预紧力一致,符合力的平衡条件,此后,接触力在预紧力附近呈微小波动状态。这表明:在扭矩作用下,螺栓连接结构中产生了预紧力,使各部件之间产生与预紧力相等的接触力,致使结构中的各部件产生了变形及应力。

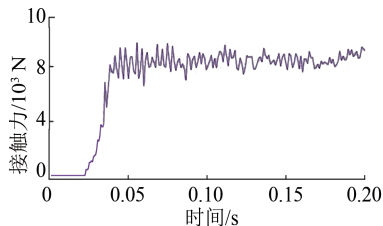


图 4 面 1 轴向接触力变化历程

更改扭矩值,重复以上操作,采用显示动力分析方法计算不同预紧力下结构的应力、应变以及位移值。提取防松垫圈在不同预紧力下的变形量以及应力变化。防松垫圈上的最大应力随预紧力的

变化情况如图 5 所示。

由图 5 可见:垫圈所受的应力随预紧力的增大而增大;当预紧力为 1 000 N 时,垫圈的最大应力为 427 MPa,位于垫圈小齿根部,而垫圈材料本身的屈服应力为 418 MPa,所以此时小垫圈上便产生了局部塑性变形。产生这种现象的原因在于,防松垫圈上的个别小齿在受到扭矩的作用时变形严重甚至产生局部塑性变形。防松垫圈的变形量随预紧力的变化曲线如图 6 所示。

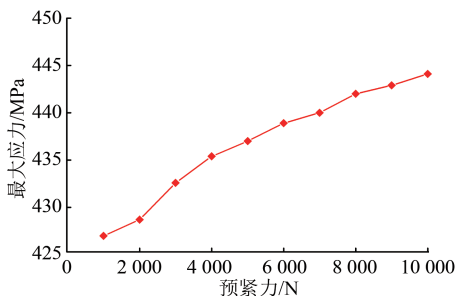


图 5 防松垫圈最大应力随预紧力变化曲线

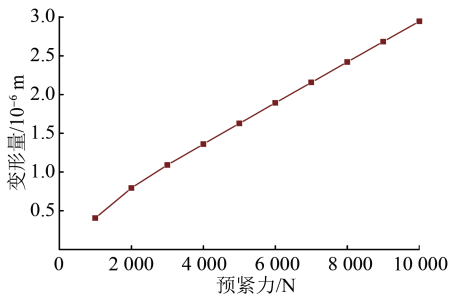


图 6 防松垫圈变形量随预紧力变化曲线

从图 6 可见,防松垫圈的变形量随螺栓预紧力的增大而增大。

根据预紧力与变形量之间的关系,通过数值计算可得到不同预紧力时防松垫圈与连接板之间的接触刚度。图 7 为防松垫圈与连接板之间的接触刚度随预紧力的变化曲线。

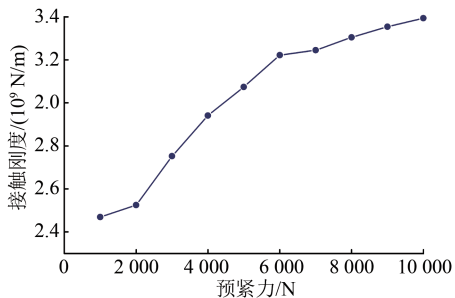


图 7 防松垫圈与连接板之间接触刚度随预紧力变化曲线

由图 7 可见:随螺栓预紧力的增大,接触面的刚度呈非线性增大;当预紧力为 2 000~9 000 N 时,接触刚度增长较快,预紧力大于 6 000 N 时,增长速度变缓。

4 结语

本文对带有防松垫圈的螺栓连接结构进行了有限元分析。为了分析螺栓拧紧过程中各部件的应力变化情况,并探究螺栓连接结构中特殊接触面的接触刚度,建立了带有实际螺纹结构的螺栓连接结构有限元模型,通过施加扭矩的方式求得了不同预紧力下螺栓连接结构的应力分布情况。进而通过数值计算进一步计算出了不同预紧力下结构的特殊接触面之间的接触刚度。结果表明:随扭矩的增大,结构所受应力也在增大;螺纹连接处的最大应力点出现在螺纹根部,防松垫圈的最大应力发生在小齿齿根;在扭矩施加过程中,接触力逐渐增大至理论计算对应的预紧力值;不同预紧力下的接触刚度呈非线性增大。

参考文献

- [1] 万俟昊天.机械结合面动态特性试验及计算方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [2] 吕文斌.螺栓联接建模及其接触刚度辨识方法的研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [3] 吉村允孝.采用结合面动态数据的计算机辅助设计来改善机床的结构刚性[J].机床,1979,13(1): 48.
- [4] 张宗兰,祝效国.机械结合面动态参数的研究[J].哈尔滨工业大学学报,1988,66(4): 79.
- [5] 赵宏林,丁庆新,曾鸣,等.机床结合部特性的理论解析及应用[J].机械工程学报,2008,44(12): 208.
- [6] SETHURMAN R, KUMAR T S. Finite element based member stiffness evaluation of axisymmetric blotted joints[J]. ASME J Mesh Des, 2009, 131(1): 1.
- [7] 艾延廷,翟学,乔永利.基于有限元法的螺栓连接结构模态参数识别[J].中国机械工程,2012,23(8): 957.
- [8] 赵丹,艾延廷,翟学,等.法向接触刚度对螺栓连接结构振动模态的影响研究[J].航空发动机,2012,38(3): 54.
- [9] 姚星宇,王建军,翟学.航空发动机螺栓连接薄层单元建模方法[J].北京航空航天大学学报,2015,41(12): 2269.
- [10] 庄茁,由小川,廖剑晖,等.基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [11] 张爽,邹建华.大型电机螺纹连接的拧紧力矩及预紧力计算[J].防爆电机,2015,50(4): 17.

(收稿日期:2019-08-25)