

# 考虑宏微观几何形貌的螺栓连接结合面接触性能模型

朱林波<sup>1</sup>, 梁洪瑀<sup>1</sup>, 张瀚文<sup>1</sup>, 史继勋<sup>1</sup>, 洪军<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 为准确预测螺栓连接结合面的真实接触状态,提出了考虑宏微观几何形貌的螺栓连接结合面接触性能模型。通过小波分解方法,解决了实测螺栓连接结合面粗糙表面提取与重构的问题。采用两粗糙表面接触等效、数据驱动建模、宏微观变网格划分等技术,构建了考虑微观形貌与宏观几何尺寸耦合的螺栓连接结合面跨尺度模型,实现了结合面接触性能的准确计算。通过压力薄膜传感器测量被连接件结合面的压力分布,验证了计算模型的正确性,并以此为基础系统分析了被连接件厚度、螺栓预紧力以及螺栓规格尺寸对结合面接触性能的影响。计算结果表明:螺栓连接结合面真实压力分布具有非连续性,结合面压力最大值并非在被连接件孔径边缘处,而是在孔径与螺栓头外径之间;结合面真实接触面积远小于名义接触面积;结合面真实压力分布范围随着被连接件厚度、螺栓预紧力、螺栓规格尺寸的增加而增加,厚度和预紧力的影响呈现明显的非线性,螺栓尺寸的影响呈现一定的线性规律,且斜率为 0.37。研究结果可为刚度、阻尼、密封等机械装备装配性能的可靠评估提供支撑。

**关键词:** 接触性能;粗糙表面;跨尺度模型;螺栓连接

**中图分类号:** TH131 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202407014 **文章编号:** 0253-987X(2024)07-0148-12

## Contact Performance Model for Bolted Joint Interfaces Considering Macro-Micro Morphology

ZHU Linbo<sup>1</sup>, LIANG Hongyu<sup>1</sup>, ZHANG Hanwen<sup>1</sup>, SHI Jixun<sup>1</sup>, HONG Jun<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A contact performance model for bolted joint interfaces considering the macro-micro morphology has been developed to accurately predict the true contact state of bolted joint interfaces. The model solves the problem of extracting and reconstructing the measured rough surface by using the wavelet decomposition method. A cross-scale model for bolted joint interfaces that considers the coupling of micromorphology and macro geometric size is constructed using techniques such as equivalent contact between two rough surfaces, data-driven modeling, and macro-micro variable grid partitioning. This model can be used to accurately calculate the contact performance for bolted joint interfaces. The pressure distribution on the contact surface

收稿日期: 2023-11-09。 作者简介: 朱林波(1985—),男,副教授;洪军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国防基础科研计划资助项目(JCKY2020203C021);国家自然科学基金资助项目(52275510,52335011)。

网络出版时间: 2024-01-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240109.1043.002>

of bolted joints is measured with an I-Scan pressure film sensor to verify the correctness of the calculation model. Based on this, a systematic analysis is conducted on the effects of the thickness of the connected component, preload, and bolt size on the contact performance of the joint surface. The results indicate that the actual pressure distribution on the contact surface is discontinuous, and the maximum pressure lies between the bolt hole and the outer diameter of the bolt head instead of at the edge of the bolt hole of the connected component. The actual contact area of the joint surface is much smaller than the nominal contact area. In addition, as the thickness of the connected component, the preload, and the bolt size increase, the pressure distribution range on the contact surface also increases. The impact of thickness and preload is nonlinear, while the effect of bolt size follows a certain linearity with a slope of 0.37. The results can support the reliable evaluation of mechanical equipment assembly performance, including stiffness, damping, and sealing.

**Keywords:** contact performance; rough surface; cross-scale model; bolted joints

螺栓连接结合面接触压力分布、接触面积等接触性能是衡量连接质量的重要指标,直接影响复杂机械装备的装配性能与服役可靠性<sup>[1]</sup>。

在理论建模方面,Rötscher 首次提出螺栓连接结合面压力分布的概念,指出其分布范围呈截锥体<sup>[2]</sup>。Fernelund 利用近似拟合方法获得了结合面压力分布的四次表达式<sup>[3]</sup>。以此为基础,Nassar 等结合螺栓孔边缘、最大接触位置的应力边界条件,推导出了结合面压力分布的理论四次关系式,并将其应用于被连接件的刚度计算中<sup>[4-5]</sup>。Sawa 等采用弹性力学理论建立了螺栓连接结合面压力分布计算模型,得到压力分布范围<sup>[6-7]</sup>。有学者从微观角度入手,建立了微凸体力学模型,分析了结合面接触特性<sup>[8-10]</sup>。但上述理论模型计算过程复杂,且存在众多假设条件,未能考虑微观粗糙表面对接触性能的影响,难以准确描述结合面真实接触状态。

在数值计算方面,Fukuoka 等提出基于间隙单元的接触面接触特性分析方法<sup>[11-12]</sup>。Oskoue 等建立了螺栓连接的三维有限元(FE)模型,得到了不同预紧力条件下结合面的压力分布范围<sup>[13]</sup>。但上述数值模型大都将结合面简化为理想光滑平面。随着数值方法和计算能力的进步,一些研究者建立了包含粗糙表面的 FE 模型,求解了结合面接触问题。Tian 等基于变分原理提出了用于计算三维粗糙表面弹性和弹塑性接触的全数值方法<sup>[14]</sup>。Megalingam 等利用基于统计特征的粗糙表面仿真方法,建立了结合面粗糙表面接触模型,计算了接触压力分布<sup>[15-17]</sup>。Belhadjamor 等使用数值生成的非高斯表面建立了 FE 模型,研究了结合面的接触性

能与法向刚度<sup>[18]</sup>。然而,仿真表面形貌并非真实测量形貌,且现有粗糙表面的研究主要集中于局部小范围,尚未考虑微观粗糙表面与宏观接触压力的相互耦合影响。

在实验测试方面,主要包括接触式测量和非接触式测量 2 种方法。常见的接触式测量有接触式感压纸<sup>[19-20]</sup>和压力薄膜传感器<sup>[5,21]</sup>,其中压力薄膜传感器能实现接触区域、压力分布的实时测量,因其简单易行且直观,在工业领域应用较为广泛。非接触式测量方法主要有光学干涉技术<sup>[22]</sup>和超声波技术<sup>[23-24]</sup>。光学干涉技术主要通过测量被连接件的变形,间接获得螺栓连接结合面的接触状态。超声波技术根据超声波的反射率与接触面积、接触压力之间的关系,通过标定实验,测量不同条件下结合面的压力分布状态。但非接触式测量一般只能测量所遇到的第一个结合面,因此应用范围极其受限。

综上所述,在结合面接触性能理论建模方面,由于现有研究还不够完善,许多学者以理想光滑表面为基础,开展了结合面接触压力分布与接触面积计算,但与螺栓连接结合面实际接触状态存在着较大差距。一些研究者建立了考虑粗糙表面的 FE 模型,但仅限于仿真表面和微观接触分析,缺乏对宏微观跨尺度耦合接触性能的深入研究。

本文以螺栓连接结合面实测粗糙表面数据为基础,通过表面形貌重构、数据驱动建模、宏微观变网格划分等技术,构建了螺栓连接宏微观跨尺度分析模型,结合压力薄膜传感器测量技术,验证了模型的有效性,并以此为基础,分析了被连接件厚度、预紧力、螺栓规格尺寸等因素对结合面接触性能的影响

规律。

## 1 螺栓连接宏微观跨尺度建模方法

### 1.1 表面形貌提取与重构方法

为了获得准确的螺栓连接粗糙表面形貌,采用 OLYMPUS OLS4000 激光共聚焦显微镜测量被连接件表面的微观形貌,测量装置如图 1 所示。

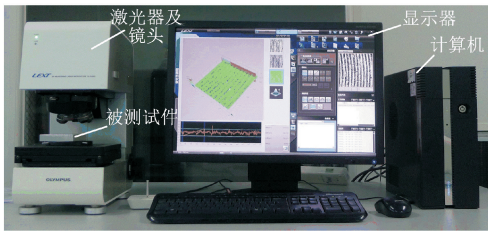


图 1 粗糙表面测量装置

Fig. 1 Measuring device of rough surface

激光共聚焦显微镜测量得到的表面数据往往将粗糙度、波纹度和形状误差 3 个尺度下的形貌信息混杂在一起,甚至还夹杂了测量噪声。因此,需要对表面测量数据进行分解与重构,滤波去噪。许多滤波方法可用于表面形貌分解,如二阶 RC 滤波器法、高斯法、样条法、形态学法和小波法等。其中,小波分解在空间频率域的特性使其具有很强的定位能力,非常适合于粗糙表面的多尺度分析<sup>[25-26]</sup>。

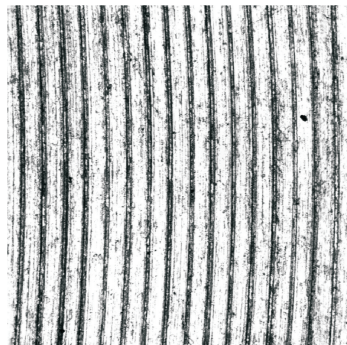
通过对比,本文采用小波多尺度分析特性进行表面离散数据的分解与重构。在此过程中,需要解决两个关键问题,一是确定小波基函数,二是确定分解尺度数。一方面,考虑到正交小波基 Biorthogonal 系中的 Bior 6.8 小波基函数在进行表面多尺度分析时不会产生相位失真,有平滑的截止特性,本文选取小波 Bior 6.8 作为结合面多尺度分解与重构的基函数;另一方面,由于小波分解幅值在尺度空间上呈指数退化,小波分解后各尺度上信号能量也具有类似指数变化规律,因此通过分析表面数据小波多尺度分解后各尺度上信息能量百分比的变化,可以确定获取粗糙表面的分解尺度<sup>[27]</sup>。本文以信号功率最大处的频率为目标,对表面轮廓信号进行小波分解,结合小波滤波的二分特性,表面分解层数计算公式可表示如下

$$N = \text{lb}(F/f_0) \tag{1}$$

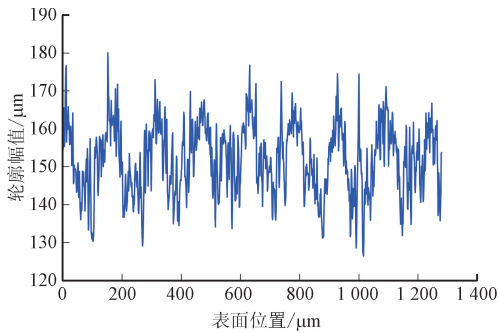
式中:  $N$  为表面分解层数;  $F$  为信号的频率范围;  $f_0$  为信号功率最大处的频率。

以车削铝件为例,利用上述方法对其表面进行

分离与重构。采用 OLYMPUS OLS4000 共聚焦显微镜 10 倍镜头观测,并获取表面微观形貌,测量范围约为  $1.28\text{ mm} \times 1.28\text{ mm}$ ,测量的车削铝件实际粗糙表面二维形貌及轮廓如图 2 所示。



(a) 二维表面形貌

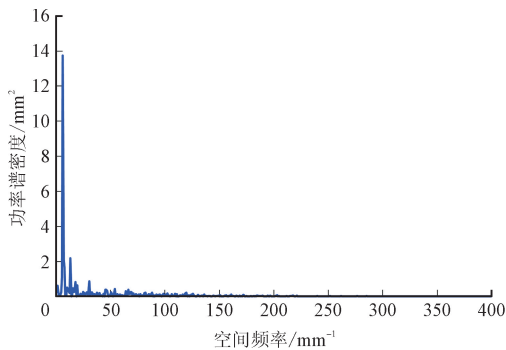


(b) 二维表面轮廓

图 2 实际粗糙表面二维形貌及轮廓

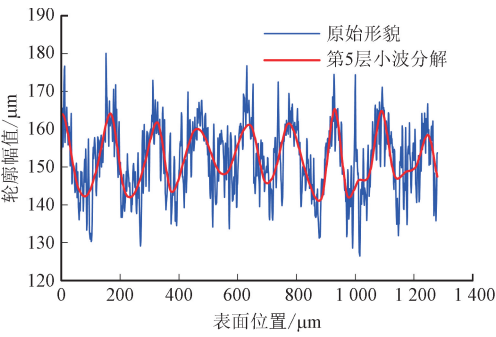
Fig. 2 Actual two-dimensional morphology and profile of rough surfaces

采用频谱分析方法得到该案例表面轮廓形貌的功率谱密度,如图 3(a)所示,信号的空间频率范围为  $0 \sim 400\text{ mm}^{-1}$ ,功率谱密度峰值点对应的空间频率为  $6.25\text{ mm}^{-1}$ ,结合式(1),确定分解层数为 5 层。取第 5 层低频信号对原始信号进行拟合,可得到该车削铝件粗糙表面小波分解后重构的几何形貌如图 3(b)所示。



(a) 功率谱密度





(b)小波分解结果

图 3 原始形貌功率谱密度及小波分解结果

Fig. 3 Power spectrum density and wavelet decomposition results of raw topography

1.2 两粗糙表面接触等效方法

螺栓被连接件在几何尺度上可分为光滑基体和粗糙表面两部分。本文首先按照被连接件的宏观几何尺寸建立其光滑基体部分模型,并以此为基础,根据被连接件粗糙表面的重构数据,在光滑基体部件叠加结合面微观几何形貌。

为了简化计算,对被连接件提出以下假设:

- (1)将上、下两个被连接件之间的接触简化为粗糙表面与光滑弹性表面的接触;
- (2)忽略表面粗糙峰的横向变形,即粗糙峰只发生法向变形。

根据以上假设,对螺栓被连接件粗糙接触表面进行简化,具体过程如图 4 所示。图中,步骤 1 所示为两个粗糙面相接触,虚线为两粗糙面最高峰所在的平面,每个粗糙峰都等效为一个具有特定长度的弹簧单元组;将两粗糙面的间隙进行合并,得到步骤 2 所示结果;若上下板满足以上假设,则模型可简化为一粗糙表面与光滑弹性平面接触,如步骤 3 所示。

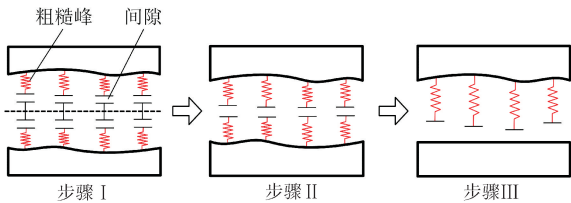


图 4 两粗糙表面接触简化流程

Fig. 4 Contact simplified processes between rough surfaces

1.3 宏微观跨尺度模型构建方法

根据两粗糙表面接触等效方法,结合螺栓被连接件表面形貌重构数据,本文以商业有限元软件 ANSYS 作为平台,利用数据驱动节点移动、变网格

划分等技术,建立考虑宏观几何尺寸与微观表面形貌的螺栓连接宏微观跨尺度仿真分析模型。考虑到螺栓连接件具有几何轴对称特性,为了降低模型计算量,提高求解效率,本文只取原构型的 1/2 截面进行分析,具体建模过程如下。

(1)重构表面形貌离散化。共聚焦显微镜最低倍的镜头采样间距为  $3.84\text{ }\mu\text{m}$ ,如果以该间距为微观网格尺寸建立被连接件粗糙表面有限元模型,其单元与节点数量将会十分巨大。因此,本文根据粗糙度大小对不同表面轮廓进行一定间距的数据离散,在保证表面形貌特征的基础上有效减少单元与节点数量,并将离散所得的表面形貌数据(包含位置与高度信息)存为 TXT 文本文件。

(2)构建螺栓连接宏观模型。依据螺栓连接件的宏观几何尺寸,利用 ANSYS APDL 语言分别建立螺栓、螺母、上被连接件基体和下被连接件的二维参数化有限元模型,采用 PLANE 182 单元进行网格划分。在宏观模型建立过程中需要注意:①在定义平面单元类型后,需在单元选项表中选择轴对称选项;②整个平面模型需建立在 X 坐标的右侧,即大于 0 的一侧;③单元表面施加压力时,直接输入整个完整模型所受到的力,无需进行换算。

(3)螺栓连接结合面变网格划分。通过单元尺寸或者数目对螺栓连接宏观结构进行网格划分。考虑到上被连接件底部需要施加粗糙表面,因此需要对上、下被连接件接触部位进行网格细化。根据网格细化的特点,上被连接件基体及其他部分网格大小确定原则为:  $E_{\text{size}} = 3^n \Delta l$ ,其中,  $n$  为基体下表面细化的次数,  $\Delta l$  为离散后表面形貌数据在 X 方向的间距。以螺栓连接件宏观网格模型为基础,在上、下被连接件之间的接触部位进行  $n$  次单元细化,其他接触部位如螺纹之间、螺母与上被连接件及螺栓头与下被连接件的接触部位也进行一定的细化,以达到在不明显增加单元数目的基础上提高计算精度的目的。

(4)建立结合面宏微观跨尺度模型。采用 ANSYS APDL 语言,读入重构后的表面轮廓 TXT 文件数据。以位置坐标为参考,利用数据驱动节点位移技术,对上被连接件基体的下表面各节点坐标进行偏移,偏移后相邻的 4 个节点组成新的 PLANE 182 单元,从而构建螺栓连接结合面微观网格模型,如图 5 所示。图中,箭头表示选择节点的顺序。以此为基础,通过 PRETS 179 单元模拟螺栓预紧力,在上、下被连接件接触面、螺纹啮合面、螺母支



承面、螺栓头支承面等结合面处施加接触单元,在对称线上设置轴对称约束,据此建立考虑微观形貌的螺栓连接跨尺度数值分析模型,如图6所示。

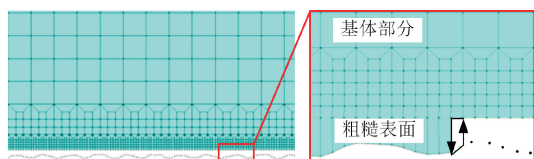


图5 考虑粗糙表面的被连接件有限元建模

Fig. 5 Finite element modeling of connected parts considering rough surfaces

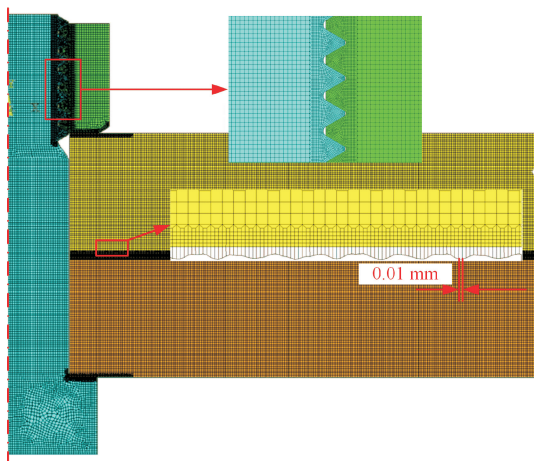


图6 螺栓连接宏微观跨尺度分析模型

Fig. 6 Macro-micro multi-scale analysis model of bolted joints

需要指出的是,为了提高计算效率,本文在建立宏微观跨尺度模型中结合面表面形貌采用了二维几何形貌,因此当零件表面存在复杂不规则的三维形貌时,本文所提模型计算结果与真实接触状态会存在一定的偏差。

## 2 螺栓连接宏微观跨尺度模型验证

以 M10×1.5 型号的螺栓连接结构为实验案例,构建螺栓连接宏微观跨尺度数值分析模型,计算结合面压力分布规律,并开展实验测试工作,验证模型的正确性。该实例中,上、下被连接件的厚度相同且均为 10 mm,粗糙度  $R_a = 0.4$ ,被连接板外径为  $d_0 = 100$  mm,装配孔隙为 0.1 mm;连接件材料均为 45 # 钢,强度等级为 8.8 级,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 355 MPa;各接触面摩擦系数均为 0.15;螺栓预紧力为  $F = 12$  kN。

### 2.1 螺栓连接验证实例宏微观建模

一方面,利用本文表面形貌处理方法,对实例被

连接件表面形貌进行测量、小波分解与重构,处理结果如图7所示。以此为基础,采用  $\Delta l = 5 \mu\text{m}$  为间距对重构形貌进行离散,并将该离散数据存储于 TXT 文本之中。另一方面,依据实例宏观几何尺寸与材料属性,利用 ANSYS APDL 语言构建螺栓连接宏观网格模型,其中上被连接件基体的网格大小  $E_{\text{size}} = 3^3 \times 5 = 135 \mu\text{m}$ ;将上被连接件基体下表面单元进行 3 次细化后得到结合面单元大小为  $5 \mu\text{m}$ ;以此为基础,导入离散数据文本,驱动结合面节点位移移动,从而建立该实例结合面的微观粗糙表面。

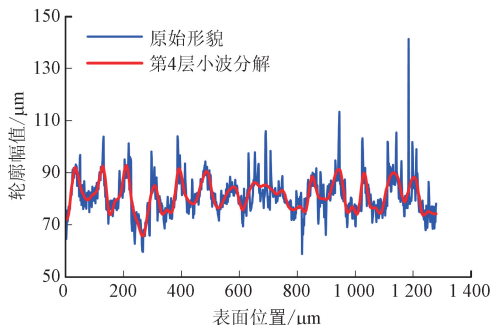


图7 被连接件粗糙表面重构实验案例

Fig. 7 Rough surface reconstruction of connected parts for experimental cases

利用 PRETS 179 单元对该实例螺栓施加 12 kN 的预紧力,其 Y 向(轴向)应力分布如图8所示。可以看出,被连接件整体压力分布呈现一定的鼓形。由于粗糙峰影响,结合面接触压力并非连续变化,在粗糙峰部位出现了应力集中现象,且两粗糙峰之间的波谷有可能并未接触,即考虑粗糙表面的结合面接触状态具有不连续性。

本文中,定义结合面粗糙峰处的 Y 向应力为微观粗糙峰接触应力。由于实验测试手段限制难以测试出粗糙峰尺度上的接触应力真实数值,因此本文选取下被连接件结合面一侧(光滑表面)沿径向的一系列节点提取其接触应力,作为结合面等效宏观接触应力,并将该值与实验测试值进行比较,发现结合面微观真实粗糙峰接触应力远大于等效宏观接触应力。

### 2.2 螺栓连接结合面压力分布对比验证

实验采用与实例相同的螺栓连接材料和规格尺寸,测试实物图如图9(a)所示。通过垫圈式力传感器测量并控制螺栓预紧力大小,采用压力薄膜传感器系统测量被连接件结合面的接触压力分布。图9(b)与图9(c)分别为实验测试结果和测量仪器。压力薄膜传感器测试区域呈现  $305^\circ$  的扇形,区域内均匀分

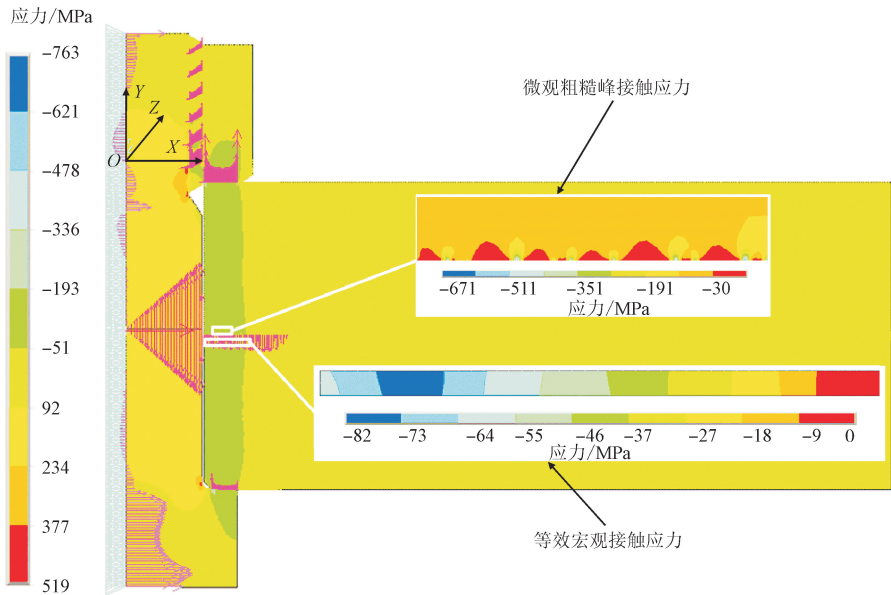
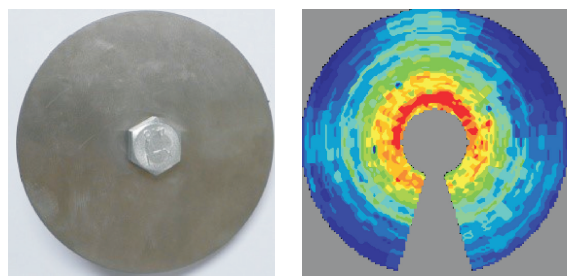


图 8 Y 向应力分布云图实验案例

Fig. 8 Y-component of stress in experimental case

布众多微小压力传感器单元,每个传感器单元的宽度为 0.25 mm,间距为 0.65 mm。一方面,由于测量仪器自身原因,每个传感器单元厚度存在一定偏差,传感器单元周向布置无法保证理想均匀;另一方面,在测试过程中,由于传感器中心与螺栓轴线难以实现理想的对心装配,因此压力薄膜测试结果沿周向呈现一定的非对称分布。为了消除以上因素对测试结果的影响,本文在处理测量数据时将同一径向尺寸周向各点测试值取平均值作为该径向尺寸下的测试结果。



(a)被连接件实物图

(b)测量结果



(c)压力薄膜传感器

图 9 被连接件结合面压力分布测量实验

Fig. 9 Measurement experiment of interface pressure distribution on connected parts

目前,螺栓连接结合面压力分布计算方法主要包括基于四次方形式的理论计算模型和基于理想光滑表面的有限元数值计算模型(理论光滑模型)。图 10 为结合面压力分布典型计算模型、本文宏微观跨尺度模型与实验测试的结果对比。

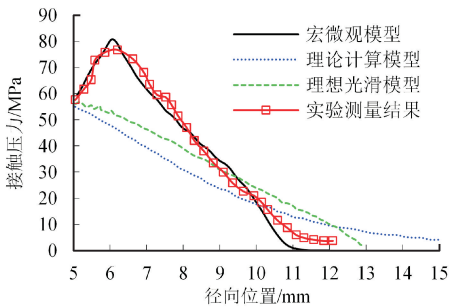


图 10 不同模型与实验测试的结果对比

Fig. 10 Comparison of different models and experimental results

由图 10 可以看出,与理论计算模型、理论光滑模型相比,宏微观跨尺度模型的压力分布计算结果与实验测试数据更为接近,验证了本文所构建的螺栓连接件宏微观跨尺度分析模型的正确性。同时发现,螺栓连接结合面接触压力沿径向呈现明显的非线性,在现有粗糙表面接触性能理论分析中,往往将接触压力假设为均匀分布,影响了计算精度,后续可将本文模型与之相结合,提高预测结果准确性。

### 3 结合面接触性能影响因素分析

以螺栓连接宏微观跨尺度模型为基础,分别分析被连接件厚度、预紧力大小、螺栓规格尺寸等因素对结合面压力分布、名义接触半径、名义接触面积与真实接触面积等接触性能的影响规律,并与光滑表面结果进行对比。各因素分析用到的粗糙表面数据均是通过测量、提取和重构后所得的形貌数据。

#### 3.1 被连接件厚度对结合面接触性能的影响

选用 M10×1.5 型号的螺栓,孔隙为 0.1 mm,预紧力  $F=9$  kN,下被连接件厚度为 10 mm,上被连接件厚度  $h_1$  为 4~14 mm,上、下被连接件材料均为 45#钢,且上被连接件表面分别为理想光滑表面和粗糙度  $R_a=0.4$  的粗糙表面。下面分别研究不同被连接件厚度对结合面宏、微观接触性能的影响。

##### 3.1.1 被连接件厚度对结合面宏观接触性能的影响

分别采用宏观有限元模型和宏微观跨尺度模型对不同厚度时上被连接件具有理想光滑表面、 $R_a=0.4$  粗糙表面的螺栓连接件进行计算。图 11 所示为不同厚度下被连接件的轴向应力分布云图。由图可见,上被连接件应力分布沿轴向呈现明显的鼓形,且被连接件厚度越厚鼓形越显著;与理想光滑表面相比,考虑粗糙表面时被连接板应力分布所呈现的鼓形更为明显。

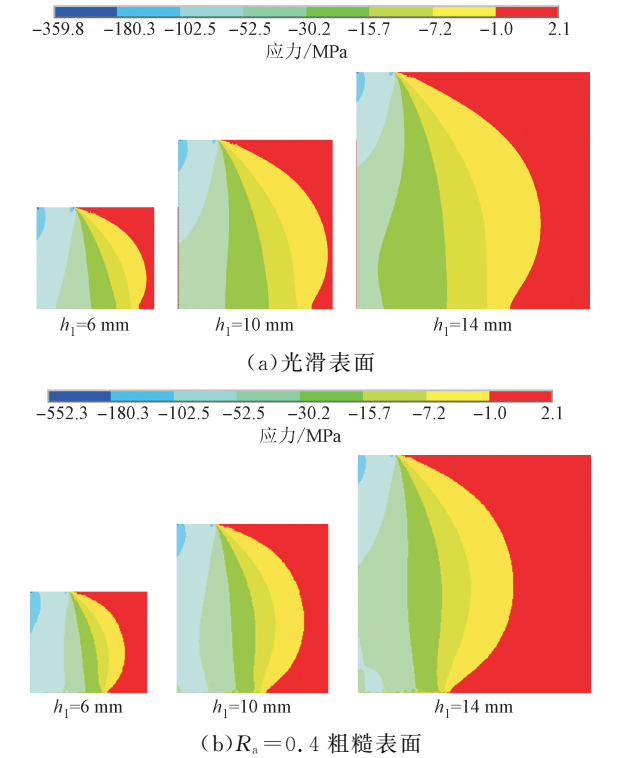


图 11 不同厚度下被连接件的轴向应力分布云图  
Fig. 11 Axial stress cloud under different thicknesses of connected parts

考虑到粗糙表面会导致被连接件结合面压力分布不连续,无法与理想光滑表面进行定量对比,因此采用宏观光滑基体部分的压力分布作为结合面宏观压力分布,以此为基础计算被连接件名义接触半径。图 12 与图 13 分别给出了结合面的宏观压力分布和名义接触半径随被连接件厚度的变化曲线。可以看出,被连接件结合面宏观压力分布范围随着板厚的增加而增加,但增加幅度逐渐减小,呈现一定的非线性。由经典的弹性力学理论可知,当被连接件较厚时可看作为半弹性空间,在集中力作用下压力分布呈现球形,当厚度较大时,压力分布范围不再增加,甚至会减小。本文中螺栓被连接件承受支承面压力,并受螺栓孔边界效应影响,使得压力分布呈现鼓形,但变化规律与集中力作用于半弹性空间基本相似。

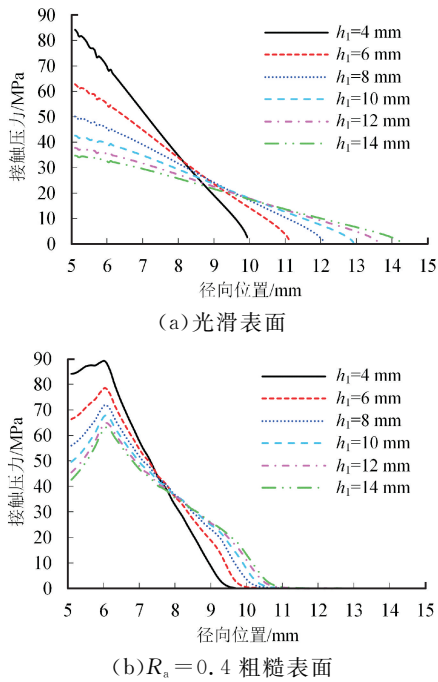


图 12 不同厚度下被连接件结合面的宏观压力分布  
Fig. 12 Macro pressure distribution on interface under different thicknesses of connected parts

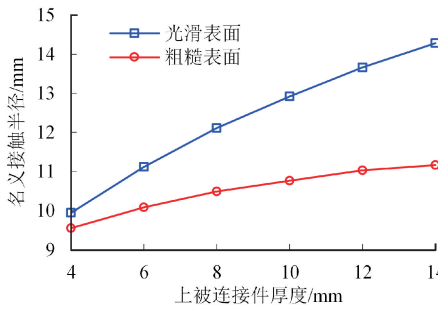


图 13 不同厚度下被连接件的名义接触半径变化  
Fig. 13 Changes of nominal contact radius under different thicknesses of connected parts



3.1.2 被连接件厚度对结合面微观接触性能的影响

事实上,当粗糙表面发生接触时,真实接触面积总是远远小于名义接触面积,同时每一个粗糙峰上的压力都远远大于理想光滑表面接触时的压力,结合面微观接触压力可通过 ANSYS 计算结果提取各接触单元的法向应力获得。

本文以螺栓连接宏微观跨尺度模型为基础,分别获得不同上被连接件厚度条件下粗糙表面微观接触压力,如图 14 所示。由图可知,粗糙表面一部分高度较高微凸峰的接触应力大于其屈服强度,表明此处材料发生了明显的塑性变形;一部分微凸峰的接触应力低于其屈服强度,表明此处材料发生了弹性变形;而一部分高度较低的微凸峰,处于波谷位置,其接触应力基本为 0,表明该处材料并未发生接触。因此,从微观角度来看,螺栓连接结合面并非完全接触,而是存在一定的间隙,也就是说结合面真实接触面积要明显小于名义接触面积。整体而言,被连接件厚度对结合面微观接触应力分布影响有限,这主要是因为被连接件厚度对粗糙峰上承受的力影响不大。

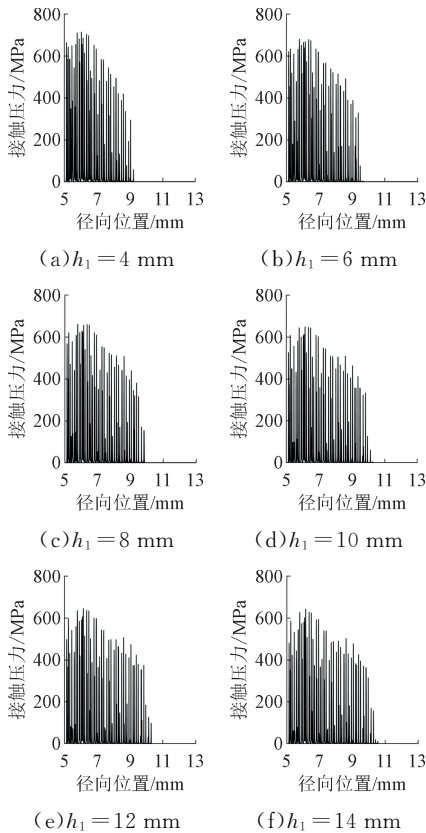


图 14 不同被连接件厚度下微观接触压力分布  
Fig. 14 Micro contact pressure distribution on rough surfaces under different thicknesses of connected parts

图 15 给出了螺栓连接结合面真实接触面积与名义接触面积的对比结果。其中,名义接触面积为理想光滑表面下结合面的接触面积,以宏观压力分布范围为依据,通过接触压力为 0 的边界确定名义接触半径,进而计算结合面名义接触面积;真实接触面积为考虑粗糙峰实际接触下结合面的接触面积,通过判断每个接触单元的接触状态,统计接触压力不为 0 的接触单元面积,所有不为 0 接触单位面积的总和即为结合面真实接触面积。从图 15 可以看出,结合面真实接触面积要远远小于名义接触面积,且名义接触面积会随着被连接件厚度的变化而变化,但真实接触面积受此影响较小。

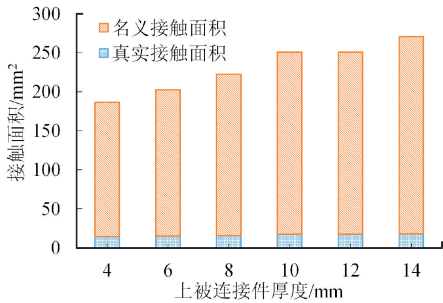


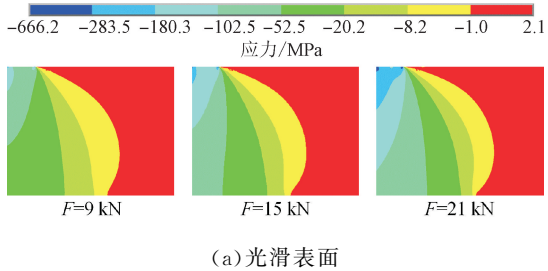
图 15 不同被连接件厚度下粗糙表面真实接触面积与名义接触面积对比  
Fig. 15 Comparison of real and nominal contact areas on rough surfaces under different thicknesses of connected parts

3.2 预紧力对结合面接触性能的影响

同样,选用 M10×1.5 型号的螺栓螺母,研究不同螺栓预紧力对结合面宏微观接触性能的影响,其中,预紧力  $F$  为 3~18 kN。

3.2.1 预紧力对结合面宏观接触性能的影响

图 16 所示为不同预紧力下,被连接件结合面的轴向应力分布云图。由图可见,与被连接件厚度影响规律相似,螺栓预紧力越大,被连接件应力分布鼓形越显著;与理想光滑表面相比,粗糙表面下被连接板应力分布所呈现的鼓形也更为明显。



(a) 光滑表面

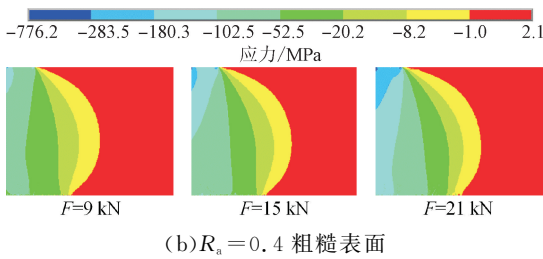


图 16 不同预紧力下被连接件的轴向应力分布云图  
Fig. 16 Axial stress cloud on connected part under different preloads

图 17 给出了结合面的宏观压力分布随预紧力大小的变化曲线。由图 17(a)可见,光滑表面下被连接件结合面压力靠近孔径处的一阶偏导均小于 0,随着预紧力的增大一阶偏导的绝对值越大,且最大接触半径不随预紧力的变化而变化;由图 17(b)可见,粗糙表面下被连接件结合面压力靠近孔径处的一阶偏导均大于 0,且随着预紧力的增大而增大,结合面压力最大值出现在孔径与螺母外缘之间,其位置不随预紧力的变化而变化。

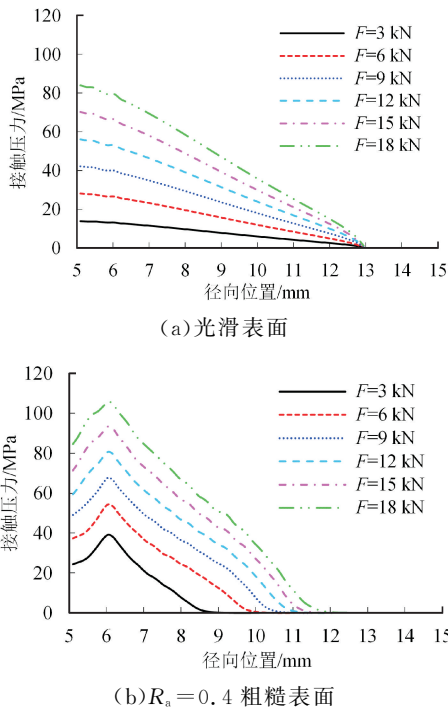


图 17 不同预紧力下结合面宏观压力分布  
Fig. 17 Macro pressure distribution on interface under different preloads

不同预紧力条件下,结合面名义接触半径的变化曲线如图 18 所示。由图可见,光滑表面的名义接触半径与预紧力无关,预紧力仅影响结合面压力大

小,不影响接触范围。然而,在考虑粗糙表面情况下,结合面的名义接触半径会随预紧力的增加而增加,影响呈现明显的非线性,且增加的幅度逐步减小,并逐渐接近光滑表面接触范围。

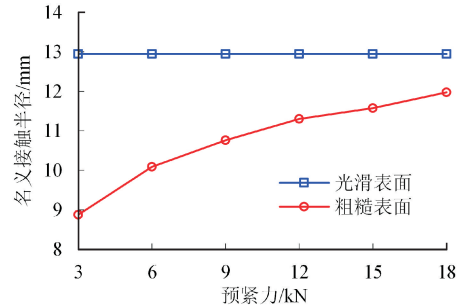


图 18 不同预紧力下名义接触半径的变化  
Fig. 18 Changes of nominal contact radius under different preloads

### 3.2.2 预紧力对结合面微观接触性能的影响

图 19 给出了不同螺栓预紧力条件下粗糙表面的微观接触压力分布。可以看出,随着预紧力的增加,粗糙峰所受的接触应力越大,结合面接触的范围也随着预紧力的增加而增加。

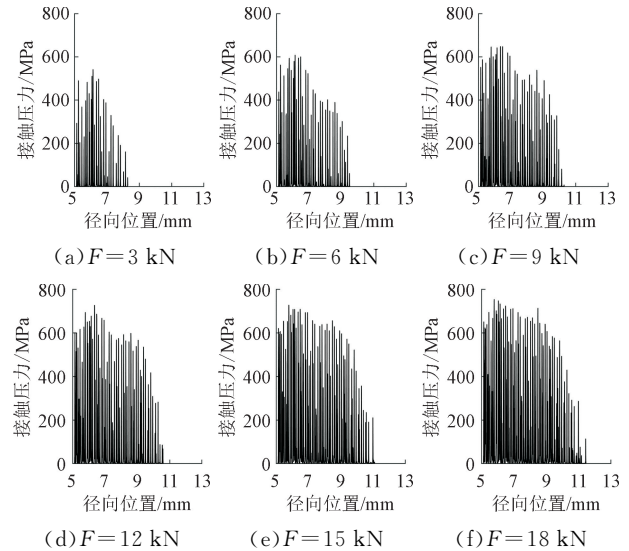


图 19 不同预紧力下粗糙表面微观接触压力分布  
Fig. 19 Micro contact pressure distribution on rough surfaces under different preloads

不同预紧力条件下,螺栓连接结合面真实接触面积与名义接触面积的对比结果如图 20 所示。可以看出,随着预紧力的增加,真实、名义接触面积均增大,真实接触面积与名义接触面积的比值随着预紧力的增加而增加,由此也可说明随着预紧力的增加,真实接触面积的增加幅度大于名义接触面积的增加幅度。

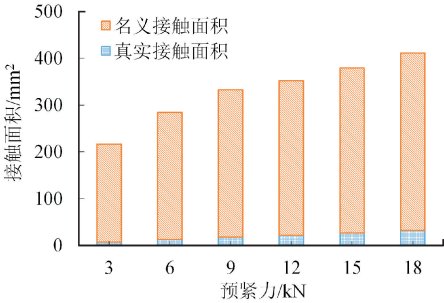


图 20 不同预紧力下粗糙表面真实接触面积与名义接触面积对比

Fig. 20 Comparison of real and nominal contact areas on rough surfaces under different preloads

3.3 螺栓规格尺寸对结合面接触性能的影响

分别选用 M6×1、M8×1.25、M10×1.5 和 M12×1.75 型号的螺栓螺母,研究不同螺栓规格尺寸对结合面宏微观接触性能的影响。

3.3.1 螺栓规格尺寸对结合面宏观接触性能的影响

不同螺栓规格尺寸下,结合面的宏观压力分布曲线如图 21 所示。可以看出,随着螺栓直径的增加,光滑表面与粗糙表面的结合面压力峰值均减小,且结合面压力分布半径均增加。

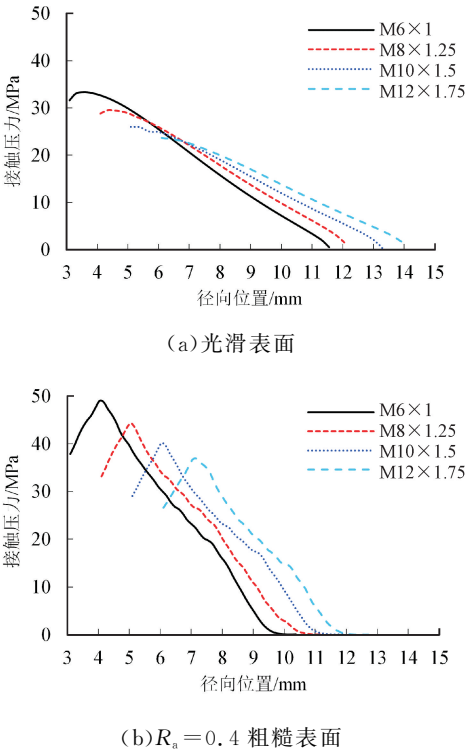


图 21 不同螺栓规格尺寸下结合面宏观压力分布

Fig. 21 Macro pressure distribution on interface under different bolt sizes

图 22 所示为被连接件结合面名义接触半径随螺栓规格尺寸的变化曲线。可以看出,随着螺栓直径的增加,被连接件的名义接触半径呈线性比例增加,但增幅均小于螺栓直径的增幅;光滑表面下名义接触半径与螺栓直径线性关系斜率为 0.43,而粗糙表面下线性关系斜率为 0.37,表明粗糙表面下名义接触半径的增幅略小于理想光滑表面。

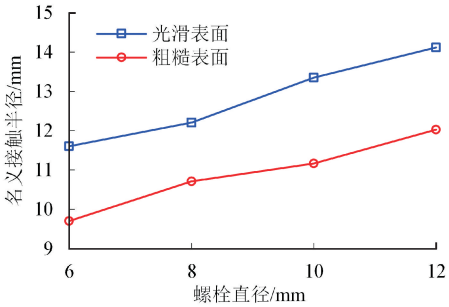


图 22 不同螺栓规格尺寸下名义接触半径的变化

Fig. 22 Changes of nominal contact radius under different bolt sizes

3.3.2 螺栓规格尺寸对结合面微观接触性能的影响

图 23 所示为螺栓连接结合面真实接触面积与名义接触面积的对比结果。可以看出,随着螺栓直径的增加,被连接板的名义接触面积明显增加,但真实接触面积增加幅度不明显,主要原因在于螺栓直径增加后,有更多范围的上下粗糙峰相互接触;随着接触范围的增加,结合面的平均接触压力减小,从而导致在此接触范围内较低的粗糙峰不再发生接触,因此真实接触面积变化不显著。

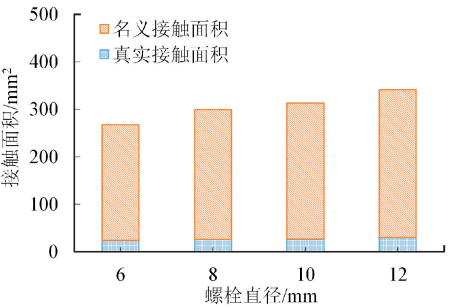


图 23 不同螺栓规格尺寸下粗糙表面真实接触面积与名义接触面积对比

Fig. 23 Comparison of real and nominal contact areas on rough surfaces under different bolt sizes

4 结 论

本文建立了考虑宏微观几何形貌的螺栓连接结



合面接触性能计算模型,通过压力薄膜传感器测量技术验证了模型的正确性。以此为基础,系统分析了被连接件厚度、预紧力、螺栓规格尺寸等因素对螺栓连接结合面接触特性的影响规律,得到如下主要结论。

(1)考虑粗糙表面的影响,螺栓连接结合面真实压力分布具有非连续性;结合面压力最大值并非在被连接件孔径边缘处,而是在孔径与螺栓头外径之间;结合面真实接触面积远小于名义接触面积,不同高度粗糙峰存在弹性、弹塑性、塑性及未接触等不同的变形机制。

(2)被连接件厚度、螺栓预紧力、螺栓规格尺寸对粗糙表面压力分布范围均有较大影响;随着被连接件厚度增加,压力分布范围呈非线性递增趋势,但增加梯度逐渐减小;随着预紧力增加,压力分布范围也单调递增,且逐渐接近光滑表面接触范围。

(3)螺栓预紧力直接影响结合面真实接触面积,而被连接件厚度和螺栓规格尺寸影响较小。

本文建立的螺栓连接结合面接触性能计算模型,可提升接触压力、接触面积等力学特征参数的计算精度,为刚度、阻尼、密封等机械装备装配性能的可靠评估提供支撑。

## 参考文献:

- [1] 王悦昶,刘莹,李鸿举.粗糙表面仿真方法综述[J].机械工程学报,2022,58(19):148-165.  
WANG Yuechang, LIU Ying, LI Hongju. A review of rough surface simulation methods [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 148-165.
- [2] RÖTSCHER F. Die Maschinenelemente; ein lehr-und handbuch für studierende, konstruktoren und ingenieure [M]. Berlin, Germany: Springer, 1929.
- [3] FERNLUND I. A method to calculate the pressure between bolted or riveted plates [M]. Göteborg: Gumpert, 1961.
- [4] NASSAR S A, ABBOUD A. An improved stiffness model for bolted joints [J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(12): 121001.
- [5] 杨国庆,王飞,洪军,等.螺栓被连接件刚度理论的计算方法[J].西安交通大学学报,2012,46(7):50-56.  
YANG Guoqing, WANG Fei, HONG Jun, et al. Theoretical analysis for bolted member stiffness [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 50-56.
- [6] SAWA T, KUMANO H, MOROHOSHI T. The contact stress in a bolted joint with a threaded bolt [J]. Experimental Mechanics, 1996, 36(1): 17-23.
- [7] CHANDRASHEKHARA K, MUTHANNA S K. Analysis of a thick plate with a circular hole resting on a smooth rigid bed and subjected to axisymmetric normal load [J]. Acta Mechanica, 1979, 33(1): 33-44.
- [8] 许刚,李卫,黄平,等.粗糙表面切向接触模型的数值分析与实验研究[J].西安交通大学学报,2022,56(2):110-117.  
XU Gang, LI Wei, HUANG Ping, et al. Numerical and experimental analysis of tangential contact model on rough surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(2): 110-117.
- [9] 朱林波,庄艳,洪军,等.一种考虑侧接触的微凸体弹塑性接触力学模型[J].西安交通大学学报,2013,47(11):48-52.  
ZHU Linbo, ZHUANG Yan, HONG Jun, et al. Elastic-plastic model for contact of two asperities considering shoulder-shoulder contact [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(11): 48-52.
- [10] 刘检华,张飞凯,丁晓宇.弹塑性粗糙表面实际接触面积演变规律研究[J].机械工程学报,2021,57(7):109-116.  
LIU Jianhua, ZHANG Feikai, DING Xiaoyu. Study on the evolution of real contact area between elastic-plastic rough surfaces [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(7): 109-116.
- [11] FUKUOKA T, TAKAKI T. Finite element simulation of bolt-up process of pipe flange connections with spiral wound gasket [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2003, 125(4): 371-378.
- [12] KIM J, YOON J C, KANG B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints [J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(5): 895-911.
- [13] OSKOEI R H, KEIKHOSRAVY M, SOUTIS C. Estimating clamping pressure distribution and stiffness in aircraft bolted joints by finite-element analysis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G Journal of Aerospace Engineering, 2009, 223(7): 863-871.
- [14] TIAN Xuefeng, BHUSHAN B. A numerical three-dimensional model for the contact of rough surfaces by variational principle [J]. Journal of Tribology, 1996, 118(1): 33-42.
- [15] MEGALINGAM A, MAYURAM M M. Effect of surface parameters on finite element method based deterministic Gaussian rough surface contact model [J].

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(12): 1358-1373.
- [16] 杨国庆,熊美华,洪军,等. 3D粗糙表面的数字化表征与接触特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11): 58-63.  
YANG Guoqing, XIONG Meihua, HONG Jun, et al. Numerical characterization and contact performances for 3D rough surfaces [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(11): 58-63.
- [17] YANG Guoqing, LI Baotong, WANG Yang, et al. Numerical simulation of 3D rough surfaces and analysis of interfacial contact characteristics [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2014, 103(4): 251-279.
- [18] BELHADJAMOR M, BELGHITH S, MEZLINI S, et al. Numerical study of normal contact stiffness: non-Gaussian roughness and elastic-plastic behavior [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(9): 1368-1380.
- [19] MANTELLI M B H, MILANEZ F H, PEREIRA E N, et al. Statistical model for pressure distribution of bolted joints [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2010, 24(2): 432-437.
- [20] WEN C Y, LIN Yusheng, LU C H. Experimental study of clamping effects on the performances of a single proton exchange membrane fuel cell and a 10-cell stack [J]. Journal of Power Sources, 2009, 192(2): 475-485.
- [21] 王宁,李宝童,洪军,等. 螺栓支承面有效半径的影响因素[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 132-136.  
WANG Ning, LI Baotong, HONG Jun, et al. Factors affecting bolt bearing surface effective radius [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(4): 132-136.
- [22] NASSAR S A, MENG Aidong. Optical monitoring of bolt tightening using 3D electronic speckle pattern interferometry [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(1): 89-95.
- [23] MARSHALL M B, LEWIS R, DWYER-JOYCE R S. Characterisation of contact pressure distribution in bolted joints [J]. Strain, 2006, 42(1): 31-43.
- [24] PAU M, BALDI A. Application of an ultrasonic technique to assess contact performance of bolted joints [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(1): 175-185.
- [25] RAJA J, MURALIKRISHNAN B, FU Shengyu. Recent advances in separation of roughness, waviness and form [J]. Precision Engineering, 2002, 26(2): 222-235.
- [26] JOSSO B, BURTON D R, LALOR M J. Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation [J]. Wear, 2002, 252(5/6): 491-500.
- [27] 王宁. 螺栓拧紧力矩预紧力关系及结合面压力分布研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.

(编辑 亢列梅 李慧敏 刘杨)