

# 双粗糙表面的微动磨损行为研究

李玲, 李港华, 吕刚, 史小辉, 阮晓光

(西安建筑科技大学 机电工程学院, 西安 710055)

**摘要:** **目的** 建立符合实际情况的粗糙表面微动磨损模型, 准确揭示连接结构的磨损机理。**方法** 利用 ABAQUS 有限元软件中的 UMESHMOTION 子程序和能量耗散模型, 建立粗糙表面的微动磨损模型, 并探究不同表面粗糙度、材料和振动频率对粗糙表面微动磨损的影响。**结果** 在外部载荷、振动频率和材料相同的情况下, 下试件表面粗糙度为  $0.2\ \mu\text{m}$  的磨损深度最小,  $0.8\ \mu\text{m}$  的磨损深度最大,  $0.5\ \mu\text{m}$  的磨损深度处于二者之间。当外部载荷、振动频率和表面粗糙度相同时, 上试件材料为 HT200 的磨损深度最小, 合金钢的磨损深度最大。当外部载荷、表面粗糙度和材料一定时, 振动频率为 1 Hz 的磨损深度最小; 频率增加到 20 Hz 时, 磨损深度达到最大; 增加到 25 Hz 时, 磨损深度呈现减小趋势。**结论** 粗糙模型的接触压力和磨损深度分布具有离散性。粗糙模型能反映磨损的实际接触面积, 使得有限元模拟的表面接触和磨损情况更加准确。表面粗糙度和材料刚性的增大, 使粗糙表面模型的磨损深度明显增大, 而振动频率增大, 使磨损量先增大、后减小, 频率为 20 Hz 时的磨损量最大。

**关键词:** 微动磨损; 粗糙表面; 表面粗糙度; 材料刚性; 振动频率

**中图分类号:** TH113; TB123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)02-0193-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.02.018

## Research on Fretting Wear Behaviour of Double Rough Surface

LI Ling, LI Gang-hua, LYU Gang, SHI Xiao-hui, RUAN Xiao-guang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**ABSTRACT:** This paper is to establish a fretting wear model of rough surface in line with the actual situation to accurately reveal the wear mechanism of the connection structure. The UMESHMOTION subroutine in the ABAQUS finite element software and the energy dissipation model are used to establish a fretting wear model of rough surfaces and to explore the effects of different surface roughness, materials and vibration frequencies on the fretting wear of rough surfaces. Under the same external load, vibration frequency and material, the wear depth of the lower specimen with a surface roughness of  $0.2\ \mu\text{m}$  is the smallest, the wear depth of  $0.8\ \mu\text{m}$  is the largest, and the wear depth of  $0.5\ \mu\text{m}$  is between the two. When the external load, vibration frequency and surface roughness are the same, the upper specimen material of HT200 has the smallest wear depth and

收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-06-09

Received: 2021-03-08; Revised: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51975449); 陕西省重点研发计划 (2021GY-309)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975449) and the Research and Development Program of Shanxi (2021GY-309)

作者简介: 李玲 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为接触力学和摩擦学。

Biography: LI Ling (1981—), Male, Doctor, Professor, Research focus: contact mechanics and tribology.

通讯作者: 吕刚 (1977—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为数字化设计与制造。

Corresponding author: LYU Gang (1977—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: digital design and manufacturing.

引文格式: 李玲, 李港华, 吕刚, 等. 双粗糙表面的微动磨损行为研究[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 193-201.

LI Ling, LI Gang-hua, LYU Gang, et al. Research on Fretting Wear Behaviour of Double Rough Surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 193-201.

the alloy steel has the largest wear depth. When the external load, surface roughness and material are certain, the wear depth is the smallest when the vibration frequency is 1 Hz; when the frequency increases to 20 Hz, the wear depth reaches the maximum; when it increases to 25 Hz, the wear depth shows a decreasing trend. The results show that the rough model has a discrete contact pressure and wear depth distribution. The rough model can reflect the actual contact area of wear, making the finite element simulation of surface contact and wear more accurate. The increase in surface roughness and material rigidity caused a significant increase in the wear depth of the rough surface model, while the increase in vibration frequency causes the wear amount to increase first and then decrease, with the maximum wear amount at a frequency of 20 Hz.

**KEY WORDS:** fretting wear; rough surface; surface roughness; material rigidity; vibration frequency

微动通常发生在一些近似紧密配合的机械连接件中,如航空发动机的叶片榫头和涡轮盘榫槽连接面之间<sup>[1]</sup>、螺栓连接的结合面之间<sup>[2]</sup>、电连接器插针和插孔之间<sup>[3]</sup>以及钢丝绳的钢丝之间<sup>[4]</sup>等接触部位都存在着微动现象。微动会造成接触表面摩擦磨损,加速裂纹的萌生、扩展,同时也会引起构件咬合、松动现象,使构件的疲劳寿命大幅度降低<sup>[5-6]</sup>。因此,研究连接结构间的微动磨损机理极为重要。

研究微动磨损的主要方法有试验和数值模拟两种。试验法存在难以对微动磨损进行定量分析、不易观察规律以及耗时费力的问题,而数值模拟技术近年得到了飞速发展。首先是 Archard<sup>[7]</sup>提出了经典的数值模型(即 Archard 模型),该模型建立了相对滑移距离的法向力功与磨损量的关系。Mccoll 等<sup>[8]</sup>基于 Archard 模型,应用有限元方法研究微动磨损,并把仿真结果与试验数据进行了比较验证。Madge 等<sup>[9]</sup>基于 ABAQUS 有限元软件中的 UMESHMOTION 子程序和 ALE 自适应网格技术,优化了微动磨损的有限元模型,使仿真结果更加准确。Tang 等<sup>[10]</sup>使用光滑柱面/平面有限元模型,提出了一种多层节点更新的方法(MLNUM),解决了比第一表面层网格更深的微动磨损的模拟问题。然而,Fouvry 等<sup>[11]</sup>发现,定量分析交变滑动状态下的磨损率,必须综合考虑摩擦系数,认为 Archard 模型具有局限性。为此,Fouvry 和 Sauger 等<sup>[12-13]</sup>提出一种基于能量耗散的磨损计算模型,通过能量磨损系数,确定了磨损体积与累积耗散能量的关系。Zhang 等<sup>[14]</sup>将能量方法应用在实际问题中,提出了一个考虑螺纹表面局部变形的有限元模型,来模拟螺栓在横向载荷下的自松动现象。Jiang 等<sup>[15]</sup>用能量耗散模型研究了光滑轮廓下微动磨损对电连接器耐久性的影响,分析了电磁感应失效的问题。实际上,表面粗糙度对连接结构的磨损有很大的影响<sup>[16-17]</sup>,但前述仿真研究都忽略了这一点。Qin 等<sup>[18]</sup>用 W-M 分形函数模拟粗糙接触表面,建立了粗糙表面的有限元模型,用来研究微动接触中的温升分布。该模型将 2 个粗糙表面等效为 1 个刚性光滑平面和 1 个等效粗糙表面。Pereira 等<sup>[19]</sup>研究了 2 个粗糙表面对微动磨损轮廓的影响,提出了一种基于有限元模型研究粗糙度对微动磨损影响的多尺度方法。该方法虽

然考虑了两个表面的粗糙度,但最终还是等效成光滑表面展开研究的。

上述基于数值模拟的微动磨损研究都是在光滑表面或一个等效粗糙表面的基础上开展的,不能真实反映粗糙表面在产生微动磨损时的状况。为揭示粗糙表面在接触时产生微动磨损的机理,本文利用 Python 语言和 ABAQUS 有限元软件,建立了 2 个粗糙表面下微动磨损的几何模型。基于能量耗散模型和 UMESHMOTION 子程序,建立了粗糙表面的有限元模型。最后通过分析表面粗糙度、不同材料属性和微动频率的变化对微动磨损特性的影响,获得一些重要研究结论,为工程中由于微动磨损而引起的失效研究提供理论依据。

## 1 微动磨损建模

### 1.1 粗糙表面的表征

要建立符合实际的微动磨损模型,首先要解决的第一个问题是如何模拟真实的粗糙表面。实际机械零件粗糙表面轮廓的局部与整体具有自相似性,所以可用分形理论来表征粗糙表面<sup>[20]</sup>。Weierstrass-Mandelbrot 函数(简称为 W-M 函数)生成的曲线具有处处连续、处处不可导的特点,被用来模拟粗糙表面<sup>[21]</sup>。其表达式见式(1)。

$$Z(x) = G^{(D-1)} \sum_{n=n_1}^{\infty} \gamma^{-(2-D)n} \cos(2\pi\gamma^n x) \quad (1)$$

式中:  $Z(x)$  表示曲线的高度;  $x$  为对应的坐标;  $G$  为特征尺度系数;  $D$  为分形维数 ( $1 < D < 2$ );  $\gamma$  为比 1 大的定值,一般取 1.5;  $n$  为空间频率系数;  $\gamma^n$  为空间频率,大小与表面波长的倒数相等 ( $\gamma^n = 1/\lambda_n$ );  $n_1$  为最低截止频率对应的序数,  $n_1$  的大小与取样长度  $L$  有关,  $\gamma^{n_1} = 1/L$ 。

当  $L=0.6 \text{ mm}$ 、 $\gamma=1.5$ 、 $G=4.35 \times 10^{-12} \text{ m}$  时,  $D$  分别取 1.52、1.57、1.67。首先,用 MATLAB 编写程序生成对应的分形曲线,如图 1 所示。然后,分别把曲线值代入式(2)中,计算出对应分形维数的表面粗糙度  $Ra$ 。当  $D$  取 1.52、1.57、1.67 时,  $Ra$  的计算结果分别为 0.8、0.5、0.2  $\mu\text{m}$ <sup>[22]</sup>。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (2)$$

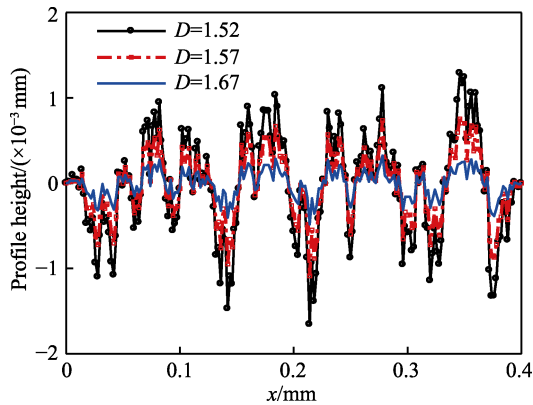


图 1 粗糙表面轮廓曲线  
Fig.1 Profile curves of rough surface

## 1.2 有限元模型的建立

把图 1 生成的分形粗糙轮廓曲线的坐标值提取出来, 并通过 Python 脚本导入到 ABAQUS 中, 拟合

出粗糙表面形貌。有限元模型的上试件为圆柱, 下试件为平面<sup>[23-24]</sup>, 如图 2a 所示。分别在上、下试件的接触中心区域引入长度为 0.4 mm 的粗糙轮廓曲线, 形成粗糙表面, 如图 2b 所示。上试件圆柱的半径  $R=6$  mm, 下试件平面的长和宽分别为 12、6 mm。

模型中使用的材料参数与文献[25]中相同, 弹性模量和泊松比分别为  $E=200$  GPa 和  $\nu=0.3$ 。边界条件为下试件平面的底部受到完全约束, 给上试件圆柱面的顶面施加法向载荷  $P$ , 使 2 个粗糙表面接触。周期性切向位移载荷  $S$  通过多点约束 (MPC) 施加在圆柱顶面, 使 2 个试件产生相对滑动。多点约束的参考点设置在上试件顶面中心, 通过 MPC 把参考点与圆柱顶面绑定在一起。对所建模型进行网格划分, 网格单元类型为四节点平面应变单元 (CPE4), 并把粗糙接触区域的网格进行细化, 细化后的网格单元尺寸大小为  $1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$ 。模型使用主从交互算法进行接触离散化, 圆柱的下表面为主表面, 平面的上表面为从表面。接触属性中, 切向设置为各向同性的库仑摩擦, 并将切向约束定义为拉格朗日乘子, 法向设置为硬接触。

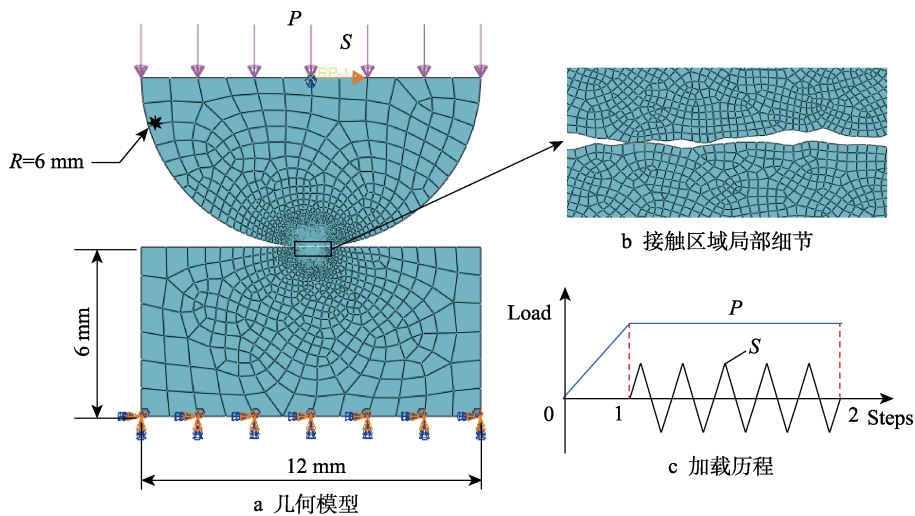


图 2 粗糙表面的有限元模型

Fig.2 Finite element model of rough surface: a) geometric model; b) local details of contact area; c) loading history

图 2c 为模型的加载历程, 横坐标为分析步, 纵坐标为载荷。模型中使用的分析步类型均为静力分析步。法向均布载荷  $P$  为 20 MPa, 在分析步 1 中完成施加, 并在后续分析步中保持不变。周期性切向位移载荷的幅值为  $3 \mu\text{m}$ , 在分析步 2 中施加, 且在一个完整的分析步中循环 5 次。

## 1.3 粗糙表面微动磨损的仿真过程

要实现微动磨损的模拟还需要一个合适的数值模型来进行磨损计算, 为了使结果更加准确, 使用了 Fouvry 等人提出的能量耗散模型。经过加速计算的位置  $x$  处的磨损深度为<sup>[26]</sup>:

$$h(x) = \Delta N \sum_1^T \alpha q(x)_i \Delta s(x)_i \quad (3)$$

式中:  $h(x)$  为磨损深度;  $\Delta N$  为加速次数;  $\alpha$  为磨损系数;  $q(x)_i$ 、 $\Delta s(x)_i$  分别为第  $i$  个增量步骤位置  $x$  处的剪切力和相对滑动距离;  $T$  为增量步数。加速次数  $\Delta N$  的作用是在保证计算精度的基础上, 减少计算时间<sup>[26]</sup>, 考虑到接触表面是粗糙表面和为了保证模型的收敛性,  $\Delta N$  取 1000<sup>[14]</sup>。磨损系数  $\alpha$  的值为  $3.33 \times 10^{-8}/\text{MPa}$ 。

粗糙表面下的微动磨损仿真过程如图 3 所示。详细步骤为: 在 MATLAB 中基于 W-M 函数生成分形曲线; 根据粗糙度计算公式, 计算粗糙度是否满足要

求,若结果为是,则进行下一步,若结果否,则调整分形维数后重复该步骤;提取曲线的坐标值,通过Python脚本把曲线坐标导入到ABAQUS中,并进行拟合,得到分形表面;把能量耗散模型编写入UMESHMOTION用户子程序;以分形表面为基础,建立粗糙表面的有限元微动模型,设置接触作用、材料属性、载荷和自适应网格等;提交作业,调用子程序计算磨损,仿真结束。

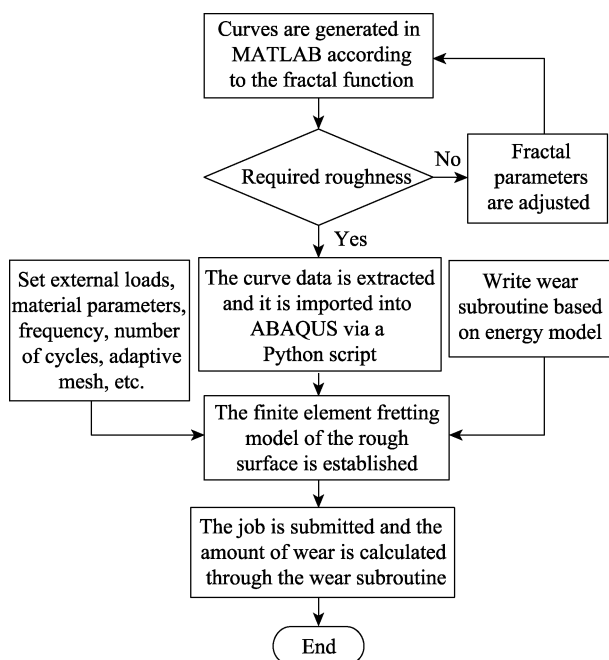


图3 粗糙表面微动磨损的仿真流程

Fig.3 Simulation process of fretting wear on rough surface

## 2 模型验证

把有限元仿真的结果与柱面/平面磨损试验结果<sup>[8]</sup>进行比较,验证模型的有效性合理性。在模型验证时,不考虑表面粗糙度,接触表面的轮廓都是光滑的。文献试验的材料为高强度合金钢,材料参数与本文模型相同。接触区域的网格尺寸为10 μm,摩擦系数为0.8,位移载荷的幅值为 $S=25\text{ }\mu\text{m}$ ,法向载荷为 $F=185\text{ N}$ ,其他参数与1.2节建立的模型一致。

在验证磨损模型前,首先应该保证未磨损模型的正确性。在法向载荷施加结束时,通过提取第一个分析步结束时的接触压力,与赫兹接触应力<sup>[10,26]</sup>分布的解析解进行比较,验证未磨损模型的正确性。在法向载荷 $F$ 的作用下,赫兹接触半宽 $a$ 为:

$$a = \sqrt{\frac{4FR}{\pi E^*}} \quad (4)$$

应力分布表达式为:

$$P(x) = P_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (5)$$

其中,  $E^* = [(1-\mu_1)/E_1 + (1-\mu_2)/E_2]^{-1}$ ,  $R = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1}$ ,  $P_0 = [FE^*/(\pi R)]^{1/2}$ 。  $E_1$  和  $E_2$  表示两种材料的弹性模量;  $\nu_1$  和  $\nu_2$  表示两种材料的泊松比;  $R_1$  和  $R_2$  表示两试样接触表面的曲率半径。对于柱面/平面接触类型的情况,只须在以上公式中取平面的曲率半径 $R_2$ 为无穷大。

有限元分析和赫兹理论接触压力的对比如图4所示。可以看出,有限元结果和理论计算基本一致。在接触区域两侧,有限元结果与Hertz模型的横坐标有微小的偏差,这是由于网格不够精细引起的。因此,有限元仿真与Hertz模型的计算结果是高度吻合的,从而验证了未磨损模型的正确性。

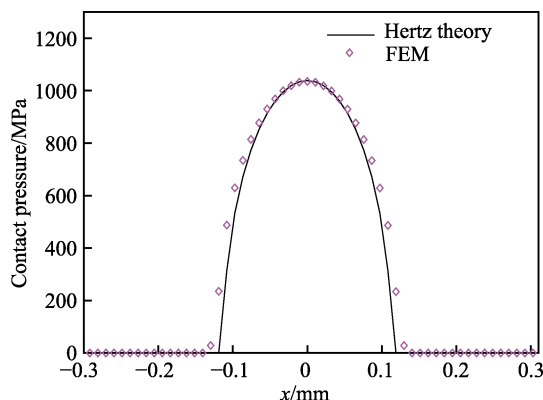


图4 有限元和Hertz模型的接触压力比较

Fig.4 Comparison of contact pressure from between finite element models and Hertz models

在磨损进行18 000个循环后,提取磨损深度与文献<sup>[8]</sup>的试验数据进行比较,如图5所示。有限元仿真的磨损宽度和最大磨损深度与试验结果基本吻合,所以微动磨损模型是可信的。粗糙模型与验证模型使用了相同的UMESHMOTION子程序和计算模型,可以说明粗糙模型的正确性。还可以发现,未考虑表面粗糙度得到的有限元结果是光滑连续的曲线,与实际试验结果有明显的差别,进一步突出了粗糙表面对微动磨损有重要影响。

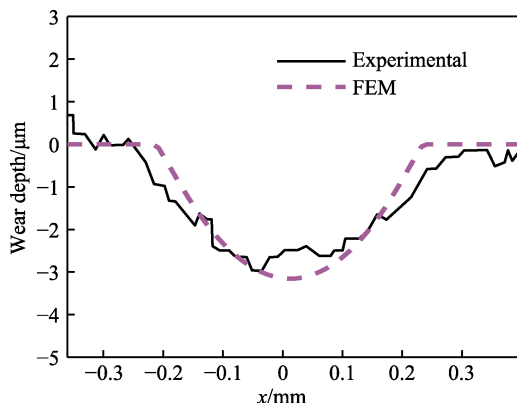


图5 磨损深度与文献<sup>[8]</sup>实验结果对比

Fig.5 Comparison of wear depth with experimental results in literature [8]

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 表面粗糙度对接触压力和磨损量的影响

当粗糙有限元模型的外部载荷、振动频率相同,

试件材料都为合金钢时, 下试件表面粗糙度  $Ra=0.2\ \mu\text{m}$ , 上试件的表面粗糙度  $Ra$  分别为  $0.2$ 、 $0.5$ 、 $0.8\ \mu\text{m}$  的情况下, 利用 1.2 节建立的有限元模型, 分析接触压力和磨损量随粗糙度变化的规律, 如图 6 和图 7 所示。

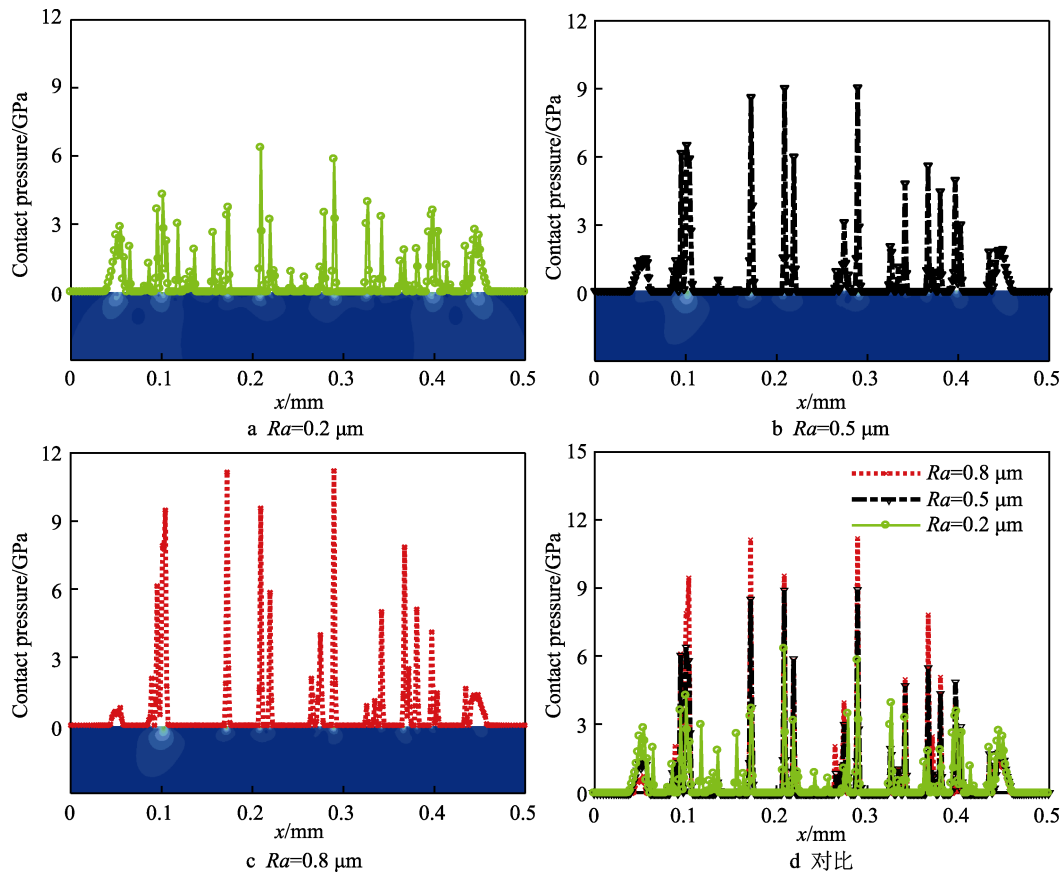


图 6 不同粗糙度下的接触压力对比

Fig.6 Comparison (d) of contact pressures under different roughness (a)–(c)

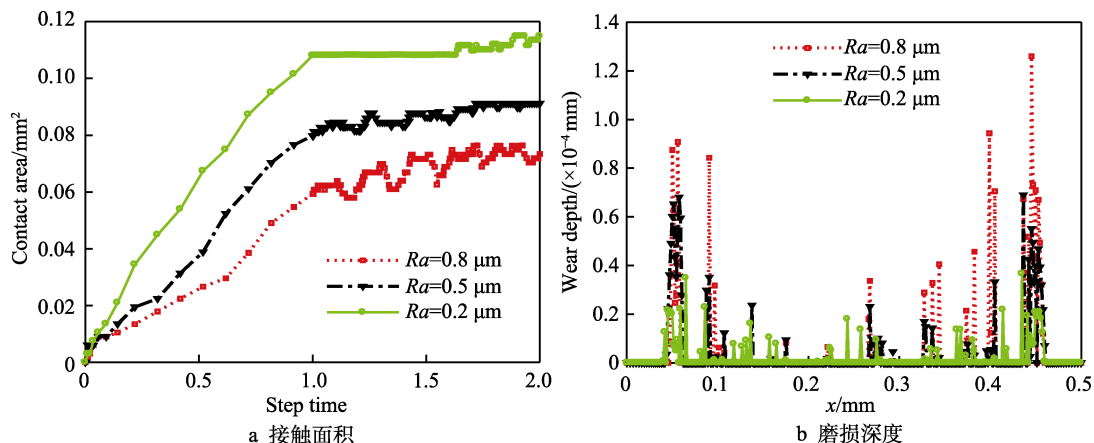


图 7 不同粗糙度下的接触面积和磨损深度

Fig.7 Contact area (a) and wear depth (b) under different roughness

图 6a—c 分别是上试件表面粗糙度变化时的接触压力和应力云图, 图 6d 为接触压力对比图。可以发现, 在不同的粗糙度下, 接触压力的大小会随着粗糙度的增加而增大; 在相同的接触长度内, 粗糙度越小,

接触压力的分布越密集。这是因为粗糙度变化时, 微凸体在水平和竖直方向上的分布就会发生改变。当粗糙度增大时, 微凸体竖直方向上的高度差增大, 使得发生接触的微凸体数量减少, 导致接触面积减小。模



型施加的法向载荷是定值,那么当接触面积减小时,接触压力就会增大。

由图 7a 可以看到,粗糙度变化对接触面积的影响非常明显,这势必会进一步影响磨损量。还可以发现,粗糙度越大,接触面积增加的速率越快。不同粗糙度下的磨损深度对比如图 7b 所示。可以看到,磨损深度的分布是离散的,且随着粗糙度的增加而增大。接触区域两边的磨损深度最大,中间较小,与相对滑移距离的分布规律一致。这是因为当粗糙度增大时,接触压力变大,而摩擦系数保持不变,则两个表面之间的摩擦力就会变大。此时,在相同的位移载荷作用下,剪切力就会变大,进而导致两表面间的相对滑移距离随着粗糙度的增加而增大。

另外,根据式(3)可知,循环次数没有改变,增量步数  $T$  就不变,粗糙度增大使剪切力增大,相对滑移距离增大。由此可以得出,磨损深度随着粗糙度的增加而增大,与仿真结果一致。因此,在实际应用中,为了减小微动磨损带来的不利影响,应在允许的条件下尽可能减小连接结构接触表面的粗糙度。

### 3.2 不同材料对接触压力和磨损量的影响

当粗糙有限元模型的外部载荷、振动频率和表面粗糙度相同时,下试件材料为合金钢,上试件材料分别合金钢、QT800-2 和 HT200 的情况下,分析接触压力、接触面积和磨损量随着材料变化的规律。3 种

材料的材料参数见表 1。

表 1 材料参数  
Tab.1 Material parameters

Material	Young's modulus $E/\text{GPa}$	Poisson $\nu$
Alloy steel	200	0.3
QT800-2	174	0.27
HT200	148	0.31

图 8a—c 分别是上试件材料为合金钢、QT800-2 和 HT200 时的接触压力和应力云图,图 8d 为接触压力的对比图。可以发现,在上试件材料不同的情况下,接触压力随着材料弹性模量的变化呈现出相同的变化趋势,即弹性模量越大,接触压力就越大。接触压力的分布位置并未发生改变,只是大小有变化。

图 9a 显示了不同材料下总实际接触面积随着时间变化的情况。在整个磨损过程中,3 种材料的总接触面积是浮动的,但整体趋势是在不断增大的。其中,HT200 的总实际接触面积最大,合金钢的总实际接触面积最小。出现上述现象是因为粗糙度没有改变,接触的部位就不会有变化。弹性模量的大小在一定程度上反映了材料的刚性,其值越大,就越不容易发生形变。因此,在相同法向载荷的作用下,材料的弹性模量越大,其形变越小,磨损时实际的接触面积就越小,接触压力就越大。

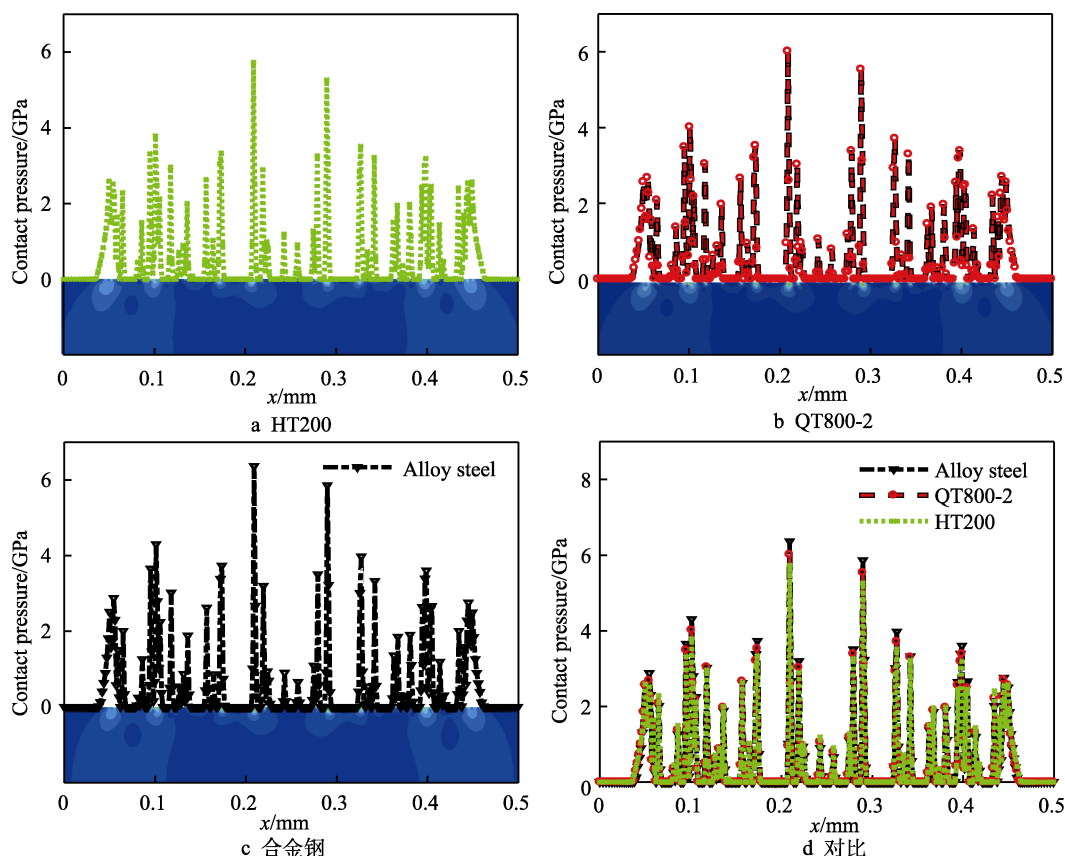


图 8 不同材料下的接触压力对比

Fig.8 Comparison of contact pressures under different materials: a) HT200; b) QT800-2; c) alloy steel; d) comparison

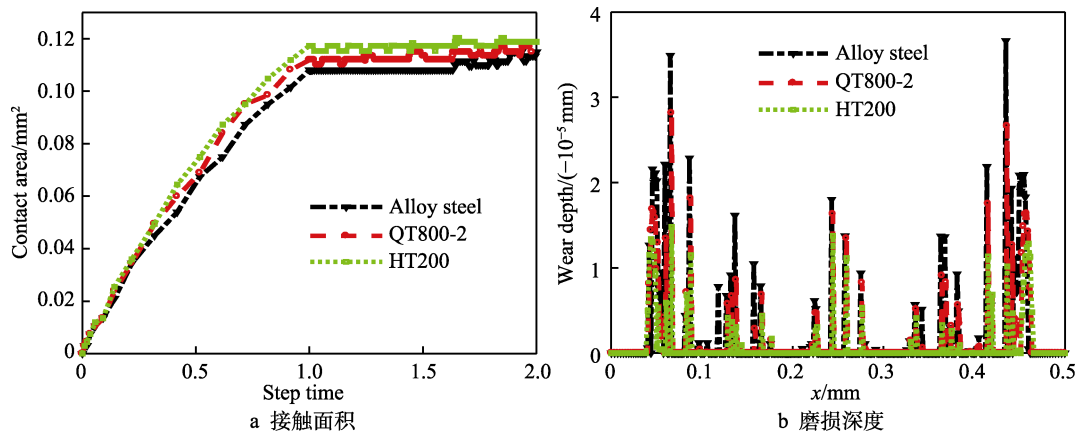


图 9 不同材料下的接触面积和磨损深度  
Fig.9 Contact area (a) and wear depth (b) under different materials

图 9b 显示了 3 种材料的磨损深度。在相同的粗糙轮廓下,磨损的分布并未发生变化,但磨损深度的大小发生了改变,合金钢的磨损深度最大,HT200 的磨损深度最小。另外可以发现,合金钢和 QT800-2 接触区域两边和中间的磨损深度差较大,HT200 则较小,表明材料的弹性模量越小,深度差就越小。出现上述现象的原因是,材料的弹性模量越小,其抵抗变形的能力就越差,在相同载荷下,接触面积就越大,从而使得两个表面间的剪切力变小。根据能耗模型可知,磨损量与剪切力和相对滑移距离成正比,剪切力的量级更大,占主导地位,所以材料的弹性模量越小,磨损深度就越小。在满足要求的前提下,选择弹性模量较小的材料可以减缓微动磨损。

### 3.3 振动频率对接触压力和磨损量的影响

振动频率是一个影响微动磨损的重要因素,为探究振动频率对微动磨损的影响,改变仿真模型的振动

频率,在同一个分析步中设置频率分别为 1、5、10、20、25 Hz。当法向载荷、表面粗糙度和摩擦系数相同时,模型在不同振动频率下的接触压力及对比如图 10 所示。

图 10a 显示了接触区域在频率为 10 Hz 下的接触压力和米塞斯应力云图,接触压力在接触区域上呈中间高、两边低的分布规律,中间的接触压力大,且较为分散,两边区域的接触压力小,但分布较连续。这是由于接触压力的大小与分布主要由模型外形和接触面轮廓决定,模型的上部是柱面,且在接触区域两边的轮廓粗糙度较小。不同频率下的接触压力对比如图 10b 所示。接触压力在不同频率下的变化不明显,主要是因为磨损量小,对接触压力的影响很小。在接触压力较大的接触部位,其受频率的影响更小。这是由于接触压力过大,接触部位会黏着,导致磨损相对较弱。在接触区域两端,接触压力受频率变化的影响较为明显,这是因为磨损主要发生在该部分。

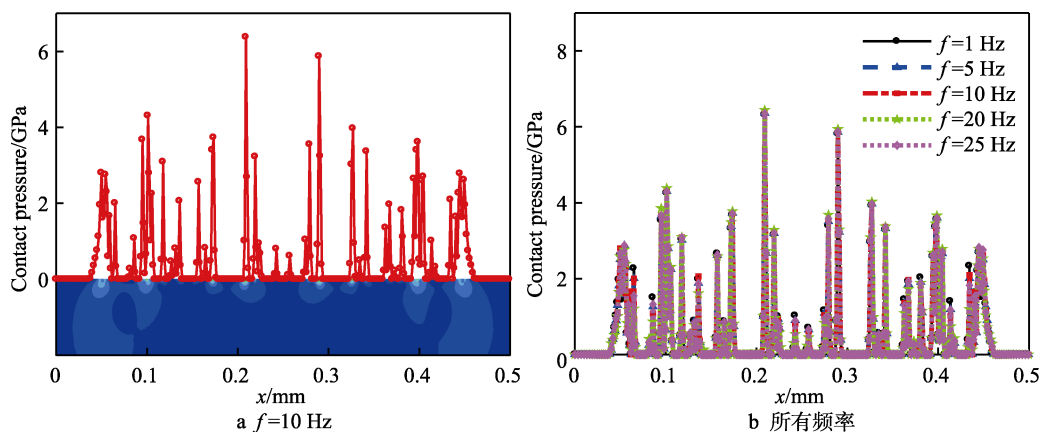


图 10  $f=10 \text{ Hz}$  时的接触压力和不同频率下的接触压力  
Fig.10 Contact pressure at  $f=10 \text{ Hz}$  (a) and contact pressures at different frequencies (b)

随着磨损的进行,接触区域的总接触面积必然会增大,如图 11a 所示。其他条件相同的情况下,20 Hz 下的接触面积增长速率最快、值最大,其次是 25 Hz,1 Hz 下的接触面积基本没有变化。这说明 20 Hz 下的

磨损最剧烈,1 Hz 下的磨损最弱,即 20 Hz 下的磨损深度最大,其次分别是 25、10、5 Hz,1 Hz 条件下最小,这与仿真结果一致,如图 11b 所示。出现上述情形的原因是,给模型施加的周期性切向位移作用在

半圆柱的顶面上,而微动磨损发生的位置在柱面最底部,再加上弹性作用,使得切向位移传递到磨损位置时有一定延迟。当频率增加到一定值时,往正向的位移还没完全传递,反向位移就已经开始作用,所以磨

损深度呈现出随着频率先增大、后减小的趋势。此外,从图 11b 还可以看出,在不同频率的条件下,磨损深度最大的地方都在接触区域两边,这与接触压力的变化规律一致。

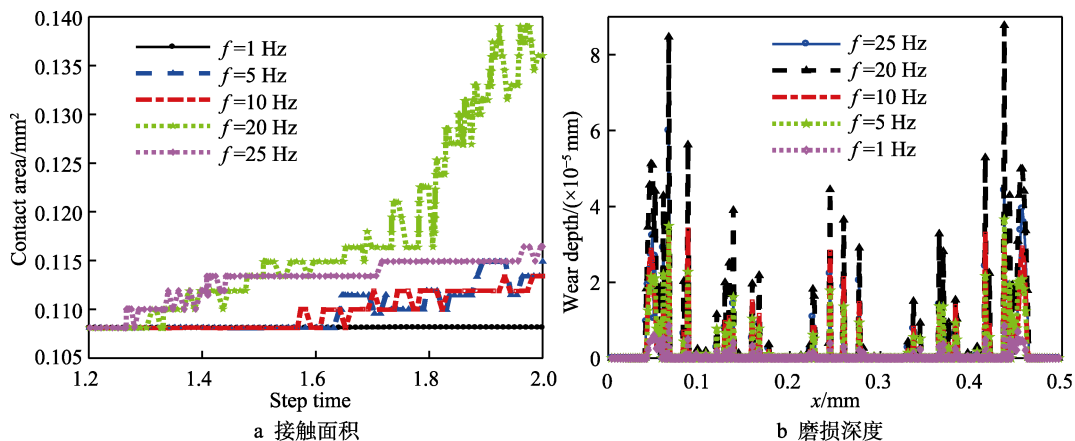


图 11 不同频率下的接触面积和磨损深度

Fig.11 (a) Contact area and (b) wear depth under different frequencies

接触区域不同位置的磨损深度随频率的变化情况如图 12 所示。可以发现,在选取的 5 个位置处,磨损深度都是随着频率先增大、后减小,在 20 Hz 时达到最大。5 个位置中, $x=0.088$  mm 时的磨损深度最大, $x=0.049$  mm 和  $x=0.456$  mm 处的磨损深度次之, $x=0.277$  mm 处的磨损深度最小。这是因为宏观上的模型是对称的,关于  $x=0.25$  mm 中心对称的部位,磨损深度应该相差不大,如位置  $x=0.049$  mm 和  $x=0.456$  mm 处。再加上磨损深度呈两边大中间小的规律分布,所以位置  $x=0.088$  mm 处的磨损深度大, $x=0.277$  mm 处的磨损深度小。

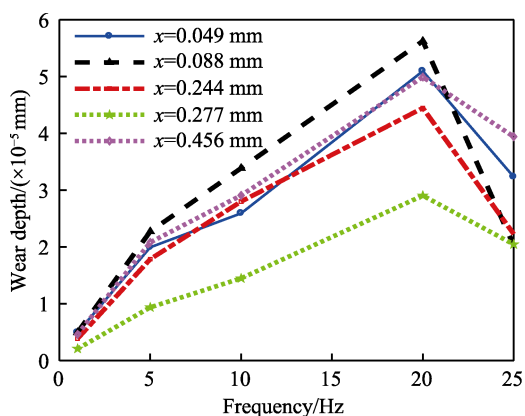


图 12 不同位置的磨损深度随频率变化的情况

Fig.12 Variation of wear depth with frequency at different positions

## 4 结论

为模拟实际机械连接结构的微动磨损,考虑了双粗糙接触表面的影响,利用分形理论表征了粗糙表面

轮廓,建立了粗糙表面有限元模型。对不同表面粗糙度、试件材料和振动频率下的微动磨损进行分析,得到以下结论:

1) 建立符合实际情况的粗糙接触模型来研究微动磨损,更好地还原了微动磨损时的接触情况,可以更加准确地反映磨损情况。粗糙接触模型的实际接触面积小,接触部位分布是离散的,磨损深度大。

2) 当试件材料相同,外部载荷和振动频率不变时,随着表面粗糙度的增大,接触压力和磨损深度明显增大,但实际接触面积明显减小,表面粗糙度对微动磨损有明显影响。

3) 当外部载荷、表面粗糙度和振动频率相同时,接触压力和磨损深度随着材料弹性模量的增大而增大,总实际接触面积随着材料弹性模量的增大而减小。

4) 当外部载荷、表面粗糙度和试件材料相同时,振动频率变化会影响微动磨损,磨损量随着频率的增大呈先增大、后减小的趋势。微动频率为 20 Hz 时,磨损量最大。

## 参考文献:

- [1] 张大义, 杨诚, 林丹, 等. 槽间垫片功用分析及减振机理试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1185-1192.  
ZHANG Da-yi, YANG Cheng, LIN Dan, et al. Functions and Experiment on Damping Mechanism of Spacer[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1185-1192.
- [2] 李玲, 蔡安江, 阮晓光, 等. 栓接结合部在动载荷下的能量耗散特性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 141-148.  
LI Ling, CAI An-jiang, RUAN Xiao-guang, et al. Energy Dissipation Characteristics of Bolted Joints under Dyna-



- mic Loading[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(13): 141-148.
- [3] 骆燕燕, 张乐, 孟凡斌, 等. 振动环境下电连接器接触性能退化机理[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(16): 1952-1957.
- LUO Yan-yan, ZHANG Le, MENG Fan-bin, et al. Contact Performance Degradation Mechanism of Electrical Connectors under Vibration Conditions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(16): 1952-1957.
- [4] ZHANG De-kun, YANG Xue-hui, CHEN Kai, et al. Fretting Fatigue Behavior of Steel Wires Contact Interface under Different Crossing Angles[J]. *Wear*, 2018, 400-401: 52-61.
- [5] 周仲荣, 罗唯力, 刘家浚. 微动摩擦学的发展现状与趋势[J]. *摩擦学学报*, 1997, 17(3): 272-280.
- ZHOU Zhong-rong, LUO Wei-li, LIU Jia-jun. Recent Development in Fretting Research[J]. *Tribology*, 1997, 17(3): 272-280.
- [6] 范娜, 王云霞, 王秋凤, 等. 载荷对 304 不锈钢微动磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(5): 555-561.
- FAN Na, WANG Yun-xia, WANG Qiu-feng, et al. Effects of Load on Fretting Wear Behaviors of 304 Stainless Steels[J]. *Tribology*, 2016, 36(5): 555-561.
- [7] ARCHARD J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 981-988.
- [8] MCCOLL I R, DING J, LEEN S B. Finite Element Simulation and Experimental Validation of Fretting Wear[J]. *Wear*, 2004, 256(11-12): 1114-1127.
- [9] MADGE J J, LEEN S B, MCCOLL I R, et al. Contact-Evolution Based Prediction of Fretting Fatigue Life: Effect of Slip Amplitude[J]. *Wear*, 2007, 262(9-10): 1159-1170.
- [10] TANG Li-chen, DING Shu-rong, XIE Yong-cheng, et al. A Multilayer Nodes Update Method in FEM Simulation of Large Depth Fretting Wear[J]. *Wear*, 2013, 301(1-2): 483-490.
- [11] FOUVRY S, LISKIEWICZ T, KAPSA P, et al. An Energy Description of Wear Mechanisms and Its Applications to Oscillating Sliding Contacts[J]. *Wear*, 2003, 255(1-6): 287-298.
- [12] FOUVRY S, KAPSA P, VINCENT L. An Elastic-Plastic Shakedown Analysis of Fretting Wear[J]. *Wear*, 2001, 247(1): 41-54.
- [13] SAUGER E, FOUVRY S, PONSONNET L, et al. Tribologically Transformed Structure in Fretting[J]. *Wear*, 2000, 245(1-2): 39-52.
- [14] ZHANG Ming-yuan, ZENG Dong-fang, LU Lian-tao, et al. Finite Element Modelling and Experimental Validation of Bolt Loosening due to Thread Wear under Transverse Cyclic Loading[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 104: 341-353.
- [15] JIANG Xiang-jun, PAN Feng-qun, SHAO Guo-qiang, et al. Prediction of Electrical Contact Endurance Subject to Micro-Slip Wear Using Friction Energy Dissipation Approach[J]. *Friction*, 2019, 7(6): 537-550.
- [16] KUBIAK K J, LISKIEWICZ T W, MATHIA T G. Surface Morphology in Engineering Applications: Influence of Roughness on Sliding and Wear in Dry Fretting[J]. *Tribology International*, 2011, 44(11): 1427-1432.
- [17] LU Wen-long, ZHANG Po, LIU Xiao-jun, et al. Influence of Surface Topography on Torsional Fretting Wear under Flat-on-Flat Contact[J]. *Tribology International*, 2017, 109: 367-372.
- [18] QIN W, JIN X, KIRK A, et al. Effects of Surface Roughness on Local Friction and Temperature Distributions in a Steel-on-Steel Fretting Contact[J]. *Tribology International*, 2018, 120: 350-357.
- [19] PEREIRA K, YUE T, WAHAB M A. Multiscale Analysis of the Effect of Roughness on Fretting Wear[J]. *Tribology International*, 2017, 110: 222-231.
- [20] 姬翠翠, 朱华. 粗糙表面分形接触模型的研究进展[J]. *润滑与密封*, 2011, 36(9): 114-119.
- JI Cui-cui, ZHU Hua. Research Progress on M-B Fractal Contact Model[J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(9): 114-119.
- [21] WANG S, KOMVOPOULOS K. A Fractal Theory of the Interfacial Temperature Distribution in the Slow Sliding Regime: Part I—Elastic Contact and Heat Transfer Analysis[J]. *Journal of Tribology*, 1994, 116(4): 812-822.
- [22] 李玲, 田海飞, 云强强, 等. 微动接触中分形粗糙表面的温升分布研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 238-244.
- LI Ling, TIAN Hai-fei, YUN Qiang-qiang, et al. Temperature Rise Distribution of Fractal Rough Surface in Fretting Contact[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(6): 238-244.
- [23] LIU J, SHEN H M, YANG Y R. Finite Element Implementation of a Varied Friction Model Applied to Torsional Fretting Wear[J]. *Wear*, 2014, 314(1-2): 220-227.
- [24] HOJJATI-TALEMI R, WAHAB M A, DE BAETS P. Finite Element Simulation of Phase Difference Effects on Fretting Fatigue Crack Nucleation Behaviour[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2014, 228(4): 470-479.
- [25] YUE Tong-yan, ABDEL WAHAB M. Finite Element Analysis of Fretting Wear under Variable Coefficient of Friction and Different Contact Regimes[J]. *Tribology International*, 2017, 107: 274-282.
- [26] LI Ling, KANG Le, MA Shi-yun, et al. Finite Element Analysis of Fretting Wear Considering Variable Coefficient of Friction[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2019, 233(5): 758-768.