

3D 粗糙表面的数字化表征与接触特性分析

杨国庆^{1,2}, 熊美华², 洪军¹, 刘会静¹, 王飞¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 湖南科技大学机械工程学院, 411201, 湖南湘潭)

摘要: 为了研究粗糙表面的复杂接触力学行为,提出了一种关于微观两粗糙表面接触的有限元分析方法.通过3D粗糙表面的数字化表征方法,获得了具有不同统计特征的高斯或非高斯粗糙表面,在此基础上,通过自下而上的三维建模与六面体网格划分,构建了两粗糙表面接触的精细有限元分析模型.在不同法向载荷的作用下,分析了微观结合面的变形、接触压力、真实接触面积等接触特征及其加载卸载特性,揭示了结合面的力学行为规律,为微观粗糙表面的性能预测提供了一种有效的途径.

关键词: 粗糙表面;数字化表征;接触特性

中图分类号: TH123 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)11-0058-06

Numerical Characterization and Contact Performances for 3D Rough Surfaces

YANG Guoqing^{1,2}, XIONG Meihua², HONG Jun¹, LIU Huijing¹, WANG Fei¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: A finite element analysis for simulating the contact performance between two micro-rough surfaces is proposed. The numerical characterization of Gaussian or non-Gaussian rough surfaces is introduced to lay the foundation of this analysis. Then bottom up solid modeling and hexahedral meshing lead to an accurate finite element model. The normal deformation, nominal contact pressure, real contact area, contact pressure distribution of the interface under different normal loads are discussed and their loading/unloading characteristics are investigated to reveal the mechanical behavior laws, which provides a new approach to predict or evaluate the performances of micro-rough interfaces.

Keywords: rough surfaces; numerical characterization; contact performances

粗糙表面的接触面积、接触压力分布等接触特性,会直接影响接触刚度、接触热阻、配合精度与密封等结合面的性能.目前,学者们在微观粗糙表面的法向静接触研究中提出了许多理论解析模型,如GW模型、CEB模型、MB模型^[1-3]等,这些模型均依赖于一定的假设条件,如所有的微凸体都具有相同的峰顶曲率半径、其变形相互独立、微凸体之间的接

触全部是峰对峰正接触等.文献[4-7]虽考虑了粗糙表面接触时微凸体间的相互作用,但同样对粗糙表面的接触进行了等效与简化,如将粗糙表面的接触简化成刚性光滑表面与等效粗糙表面的接触,将微凸体的侧接触全部转化为正接触,将微凸体等效成球体、椭球体等形状,因此仍有很大的局限性.

由于大量的假设条件与简化限制了理论解析模

型的应用范围,同时影响了粗糙表面接触分析的准确性,因此采用有限元仿真分析来解决上述问题是一种更有效的方法.文献[8-9]利用分形几何模拟的三维粗糙表面,将粗糙表面的接触等效成粗糙表面与刚性平面的接触,并进行了相关的有限元分析.但是,分形理论能否准确模拟工程实际表面仍存在争议,且现有的有限元仿真一般将粗糙表面的接触等效成为刚性光滑平面与粗糙表面的接触,因此不能真实地反映接触的状态.随着表面形貌检测技术与信号分析处理技术的发展,为 3D 粗糙表面形貌的测量与数字化建模清除了障碍,并有学者采用有限元法研究了测量表面与光滑表面的弹塑性接触问题^[10].相对于表面形貌的测量方法,粗糙表面的数字化模拟不受测量设备、试件、操作者等的影响,可以快速、准确地获得满足给定统计特征的粗糙表面^[11-14].

本文通过对粗糙表面形貌的数字化模拟,获得了满足一定统计特征(自相关函数、标准偏差、偏斜度与峰度)的接触表面的形貌数据,在此基础上,构建了两粗糙表面接触的有限元分析模型,并对粗糙表面法向静接触中的接触特性进行了分析.

1 粗糙表面的数字化表征

为了分析不同粗糙表面的接触情况,通过数字化模拟获得了满足一定统计特征的高斯、非高斯粗糙表面,并分别采用一定离散间距(取 $\Delta x = \Delta y = 1 \mu\text{m}$)的高度序列 $z_1(m, n)$ 、 $z_2(m, n)$ (m, n 分别表示 x, y 方向离散点的数目)进行表征.

1.1 高斯粗糙表面的数字化表征

高斯粗糙表面的数字化表征包括白噪声序列的生成及其滤波,并生成具有一定的标准偏差值 σ ,以及偏斜度、峰度值分别为 0、3 的 z_1 ,具体步骤如下.

步骤 1 利用白噪声发生器产生白噪声序列 $\eta(m, n)$,并进行傅里叶变换,获得相应的傅里叶序列.

$$A(k+1, l+1) = \sum_{r=0}^{m-1} \sum_{s=0}^{n-1} \eta(r+1, s+1) \cdot \exp[-2\pi i(kr/m + ls/n)] \quad (1)$$

$k=0, 1, 2, \dots, m-1; l=0, 1, 2, \dots, n-1$

步骤 2 给定自相关函数

$$f(x, y) = \sigma^2 \exp[-2.3((x/L_x)^2 + (y/L_y)^2)^{1/2}] \quad (2)$$

式中: L_x, L_y 分别为 x, y 方向的自相关长度.

步骤 3 采用离散间距 $\Delta x = \Delta y = 1 \mu\text{m}$ 对 $f(x, y)$ 进行离散,从而获得相应的自相关函数序列

$$\left. \begin{aligned} R(i+1, j+1) &= f(i, j) \\ R(0.5m+2+i, j+1) &= f(0.5m-i, j+1) \\ R(i+1, 0.5n+j+2) &= f(i+1, 0.5n-j) \\ R(0.5m+i+2, 0.5n+j+2) &= \\ &= f(0.5m-i, 0.5n-j) \\ i &= 0, 1, 2, \dots, (m/2)-1 \\ j &= 0, 1, 2, \dots, (n/2)-1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

步骤 4 对 $R(m, n)$ 进行傅里叶变换,获得相应的功率谱密度

$$P(1+k, 1+l) = \left| \sum_{r=0}^{m-1} \sum_{s=0}^{n-1} R(r+1, s+1) \cdot \exp[-2\pi i(kr/m + ls/n)] \right| \quad (4)$$

步骤 5 由于白噪声的功率谱密度为常数 C ,假设 $C=1$,则可以获得相应的传递函数

$$H(m, n) = \frac{P^{1/2}}{C^{1/2}} = P^{1/2} \quad (5)$$

步骤 6 利用频域点乘 $(A \cdot H)$,采用反傅里叶变换的方法获得高斯表面的初始高度序列

$$z_0(k+1, l+1) = \frac{1}{mn} \sum_{r=0}^{m-1} \sum_{s=0}^{n-1} [(A \cdot H) \exp[2\pi i(kr/m + ls/n)]] \quad (6)$$

步骤 7 根据给定的 σ, z_0 的实际标准偏差 σ_r ,求得白噪声功率谱密度的常数实际值为 $C = [\sigma_r/\sigma]^2$,从而可以得到符合给定标准偏差等要求的高斯高度序列 $z_1 = z_0 \sigma/\sigma_r$. 分别取 $m=n=256, L_x=L_y=3 \mu\text{m}, \sigma=1.6 \mu\text{m}$,由步骤 1~步骤 7,获得的高斯粗糙表面如图 1 所示. 同理,若取 $L_x=2 \mu\text{m}, L_y=100 \mu\text{m}$,获得的各向异性高斯粗糙表面呈现出明显的表面纹理,如图 2 所示.

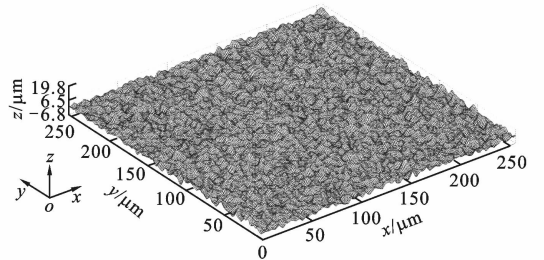


图 1 各向同性高斯表面

1.2 非高斯粗糙表面的数字化表征

高斯表面是非高斯表面的特例,实际上工程粗糙表面大部分为非高斯面.本文将利用偏斜度 S_k 、峰度 K_u 等统计参数,以高斯高度序列为基础,结合非高斯转化来实现非高斯粗糙表面的数字化表征,

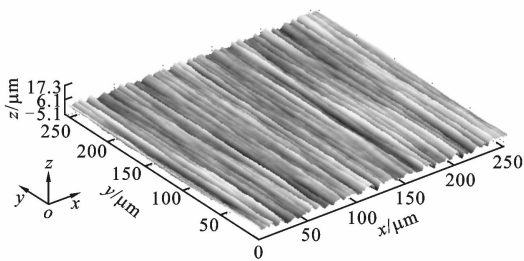


图2 各向异性高斯表面

具体步骤如下。

步骤1~步骤7与高斯粗糙表面的数字化表征步骤相同。

步骤8 采用 Pearson 或 Johnson 非高斯变换系统对 z_1 进行非高斯变换,生成非高斯高度序列 z_2 ,并通过其高度方向的比例调节来满足给定的标准偏差值。

步骤9 如果 z_2 的 S_k 、 K_u 不满足精度要求,则采用新的白噪声序列,重复高斯高度序列的模拟及其非高斯转换,直到满足精度要求,从而完成非高斯粗糙表面的数字化模拟。

分别取 $m = n = 128$ 、 $L_x = L_y = 5 \mu\text{m}$ 、 $\sigma = 1.6 \mu\text{m}$ 、 $S_k = -1$ 、 $K_u = 4.5$,根据步骤1~步骤9获得的各向同性非高斯粗糙表面如图3所示。同理,若取 $m = n = 256$ 、 $L_x = 2 \mu\text{m}$ 、 $L_y = 100 \mu\text{m}$ 、 $\sigma = 1.6 \mu\text{m}$ 、 $S_k = 0.5$ 、 $K_u = 3.5$,获得的各向异性非高斯粗糙表面呈现出明显的表面纹理,如图4所示。

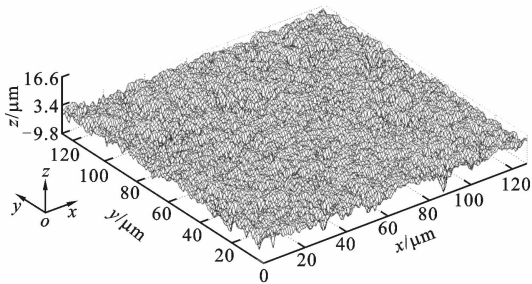


图3 各向同性非高斯表面

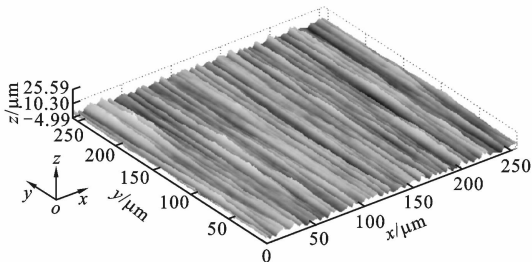


图4 各向异性非高斯表面

通过粗糙表面的数字化表征,获得了不同统计

特征的高斯或非高斯高度序列($z_1(m, n)$ 或 $z_2(m, n)$),将其保存成 txt 格式的数组文件,可方便有限元软件直接调用,以完成粗糙表面接触模型的几何建模。

2 两粗糙表面接触的有限元模型构建

2.1 几何模型构建

采用自下而上的实体建模方法(从点到线、线到面、面到体)构建了2组高斯粗糙表面(点数均为 128×128 ,水平间距为 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$)。每组上、下粗糙表面的标准偏差分别为 σ_1 、 σ_2 ,且有 $\sigma_1 = \sigma_2$ 。2组粗糙表面的高度标准偏差分别为 $1.6 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 。本文以第1组粗糙表面为例,对几何建模、网格划分等有限元模型进行了分析。

由 z_1 相应的 txt 文件,结合水平间距,通过 ANSYS 命令直接生成三维点云模型,如图5a所示。连接 x 、 y 方向相邻的点,生成粗糙的接触表面模型,如图5b所示。在此基础上,构建了两粗糙表面接触体模型(见图5c)。

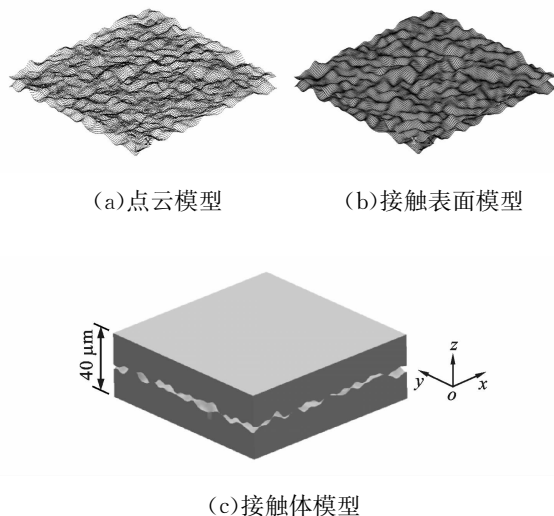


图5 两粗糙表面接触的几何模型

2.2 材料参数的定义

材料参数直接影响连接基体与结合面的变形特性。本文粗糙表面接触的上、下连接体均采用铝合金材料,其弹性模量为 71 GPa ,泊松比为 0.33 ,相应的应力应变数据来源于文献[15]。

2.3 网格划分及其边界条件的定义

网格划分的质量与数量会直接影响求解的效率与精度,本文粗糙表面接触的连接体采用 Solid45 单元,粗糙表面接触对采用 conta173、targe170 单元,同时对网格的形状、数量进行了控制。如图6所

示,粗糙表面接触的上、下连接体均生成了高质量的六面体网格单元,在连接体的厚度方向,根据厚度的大小划分了 4 层网格单元,其中每层网格单元的数量为 127×127 ,体网格总数为 12.9 万。若将粗糙表面的点数增加到 256×256 ,同样对每个连接体采用 4 层网格单元,则体网格总数约为 52 万。

在有限元模型中施加边界条件会影响模型的收敛速度与求解效率,因此将粗糙表面的下接触基体的下表面固定,在相应粗糙表面的上接触基体的上表面施加 z 方向的位移 d ,来调节法向接触载荷的大小,并限制 $x=0\text{ mm}$ 、 $y=0\text{ mm}$ 时相应平面的法向位移,以完成了粗糙表面接触有限元模型的构建。

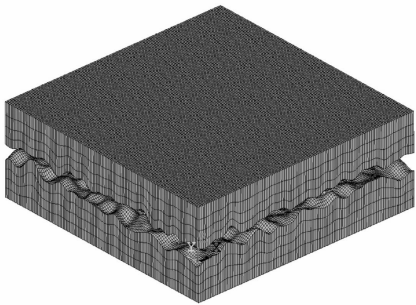


图 6 六面体网格模型

3 分析与讨论

3.1 微凸体的受力与变形特征

利用所构建的有限元模型,分析了 2 组高斯粗糙表面在静态法向接触中微凸体的受力与变形特征。根据每组接触对应上连接基体上表面的法向位移,可以通过有限元的后处理来获得相应的法向载荷 F ,结合名义接触面积 $A_0=0.127\text{ mm} \times 0.127\text{ mm}$,可以获得等效法向载荷(用名义接触压力 P_0 表示, $P_0=F/A_0$)。其中,第 1 组粗糙表面($\sigma_1=\sigma_2=1.6\text{ }\mu\text{m}$)的接触模型在不同 P_0 作用下,对应结合面微凸体的等效应力 σ_e 与弹塑性变形的情况如图 7 所示。图中用黑白颜色直接反映了等效应力的大小及塑性变形区域的分布,即使在较小的 P_0 作用下,也有少数微凸体发生了明显的塑性变形,且随着法向载荷的增大,发生塑性变形的区域也不断增大。在所建立的有限元模型中,由于上、下连接体的总厚度很小,因此基体弹性变形量可以忽略,结合面的法向变形量约等于上基体上表面所施加的法向位移量。

如图 8 所示, P_0 随 d 的增大而呈非线性增大,当 $d=2\sigma'$ (σ' 为两接触粗糙表面的等效标准偏差, $\sigma'=(\sigma_1^2+\sigma_2^2)^{1/2}$) 时,第 1、2 组结合面的法向名义接

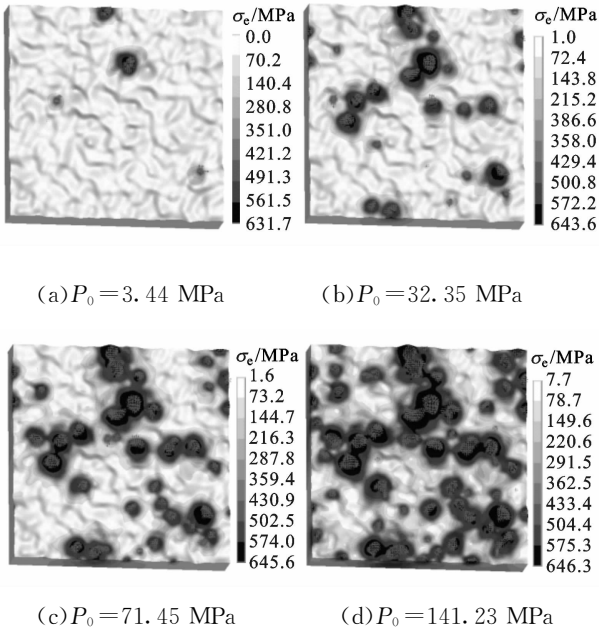


图 7 微凸体在不同 P_0 时相应的等效应力与塑性变形

触压力分别为 180、135 MPa。随着 d 的增大, $d-P_0$ 曲线的斜率不断增大,从而反映出结合面法向接触刚度的非线性增大,直至整体塑性屈服。在 P_0 相同时,第 1 组结合面的载荷-变形曲线具有较小的斜率,验证了结合面表面粗糙度与法向接触刚度的关系,即结合面的表面越粗糙,法向接触刚度越小。

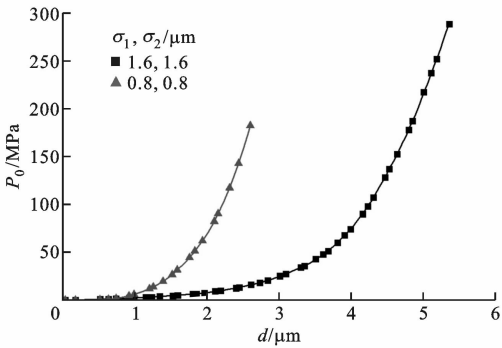


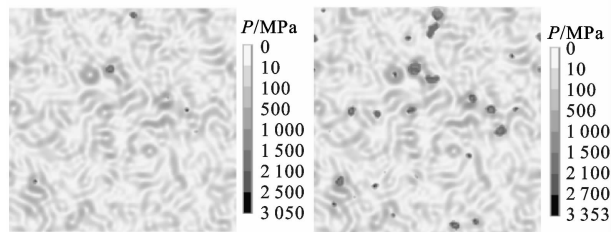
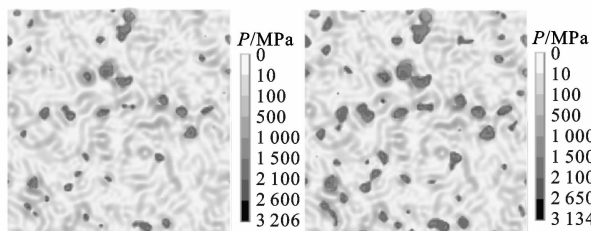
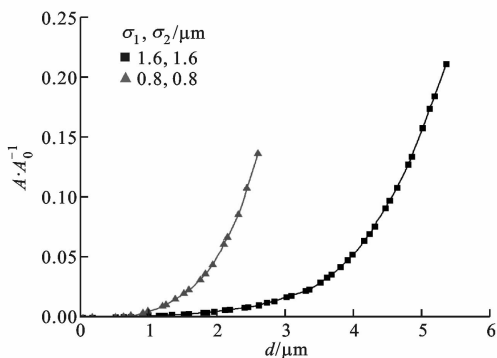
图 8 2 组粗糙表面接触时相应的 $d-P_0$ 曲线

3.2 结合面的接触压力与真实接触面积

利用本文构建的有限元模型,同样可以获得结合面的接触压力与真实接触面积随载荷的变化规律。在不同名义法向载荷作用下,第 1 组粗糙表面接触对应的结合面的接触压力与接触区域的变化规律如图 9 所示。由图 9 可以看出:即使在较小的法向名义载荷($P_0=3.44\text{ MPa}$)下,最大接触压力也高达 3 GPa;随着法向名义载荷的增大,最大接触压力变化较小,真实接触面积 A 不断增大。

如图 10 所示,通过对 A/A_0 与 d 进一步分析,

可以看出 A/A_0 随 d 的增大而呈非线性增大,与图8中 P_0 的变化规律相似。当 $d \leq 0.7\sigma'$ 时,实际接触面积不到名义接触面积的1%;当 d 接近 $2\sigma'$ 时,实际接触面积占名义接触面积的10%左右。

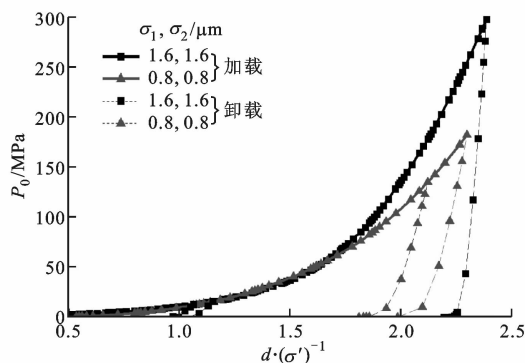
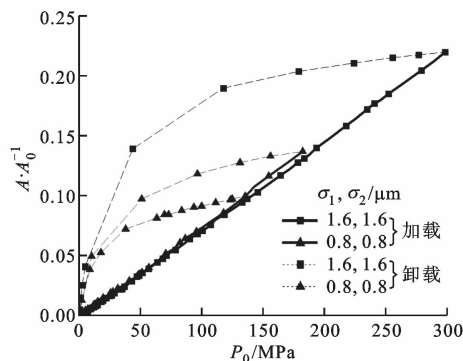
(a) $P_0 = 3.44$ MPa(b) $P_0 = 32.35$ MPa(c) $P_0 = 71.45$ MPa(d) $P_0 = 141.23$ MPa图9 不同 P_0 下的结合面接触压力与接触区域图10 2组粗糙表面接触时相应的 d/A_0 曲线

3.3 加载卸载特征

在分析微观结合面初次加载的基础上,对结合面接触特征的加载卸载特性进行了分析。 P_0 、 A/A_0 的加载卸载特性分别如图11、图12所示。

由图11可知,当 $d/\sigma' \leq 1.7$ 时,两加载曲线基本重合,随着 d/σ' 的增大,表面越粗糙, P_0 的变化越大。从曲线的斜率变化来看,卸载曲线的斜率明显高于相应加载曲线的斜率,即通过卸载加载可以明显提高结合面的法向接触刚度。进一步的研究发现,微观结合面表现出与文献[16]中的缠绕式密封垫片相类似的加载卸载特性。因此,可以采用一定厚度的垫片单元来模拟微观结合面的法向应力、应变等力学

行为,从而实现微观与宏观的跨尺度耦合。

图11 2组粗糙表面接触时对应的 $d/\sigma' - P_0$ 曲线图12 2组粗糙表面接触时对应的 $P_0 - A/A_0$ 曲线

如图12所示,在加载过程中, A/A_0 与 P_0 呈近似线性关系,且在 P_0 相同时,粗糙的结合面 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 1.6 \mu\text{m}$) 具有较小的 A/A_0 。在卸载过程中, A/A_0 的变化表现出明显的非线性特性,同一粗糙结合面所对应的 A/A_0 的加载卸载特性与文献[9]相似。

4 结论

本文利用3D粗糙表面的数字化表征方法,获得了微观粗糙表面的形貌数据。在此基础上构建了两粗糙表面接触的有限元模型,分析总结了结合面的变形、接触压力分布、实际接触面积及其加载卸载特征。

(1)提出的粗糙表面数字化表征方法,能够快速获得满足一定统计特征的3D粗糙表面,从而为粗糙表面接触力学行为的数值模拟提供丰富的形貌数据。

(2)采用合理的几何建模、网格划分技术,构建了粗糙表面接触的有限元模型,为研究两粗糙表面的接触力学行为提供了可行的途径。

(3)通过两粗糙表面接触的有限元分析,揭示了

结合面的变形规律,并与缠绕式密封垫片进行了对比,发现微观结合面表现出相似的加载卸载特性,归一化实际接触面积在加载过程中与名义接触压力呈近似线性关系,而在卸载过程中表现出明显的非线性特性。

参考文献:

- [1] GREENWOOD J A, WILLIAMS J B. Contact of nominally flat surfaces [J]. P Roy Soc Lond: A Mat, 1966,295(1442):300-319.
 - [2] CHANG W R, ETSION I, BOGY D B. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. ASME J Tribol, 1987,109(2):257-263.
 - [3] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. ASME J Tribol, 1991, 113(1): 1-11.
 - [4] ZHAO Yongwu, CHANG L. A model of asperity interactions in elastic-plastic contact of rough surfaces [J]. ASME J Tribol, 2001, 123(4): 857-864.
 - [5] GAO Y F, BOWER A F, KIM K S, et al. The behavior of an elastic-perfectly plastic sinusoidal surface under contact loading [J]. Wear, 2006,261(2):145-154.
 - [6] CIAVARELLA M, GREENWOOD J A, PAGGI M. Inclusion of “interaction” in the Greenwood and Williamson contact theory [J]. Wear, 2008, 265(5/6): 729-734.
 - [7] BUCZKOWSKI R, KLEIBER M. Statistical models of rough surfaces for finite element 3D-contact analysis [J]. Arch Comput Method: E, 2009,16(4):399-424.
 - [8] SAHOO P, GHOSH N. Finite element contact analysis of fractal surfaces [J]. J Phys: D Appl Phys, 2007, 40(14): 4245-4252.
 - [9] PEI L, HYUN S, MOLINARI J F, et al. Finite element modeling of elasto-plastic contact between rough surfaces [J]. J Mech Phys Solids, 2005,53(11): 2385-2409.
 - [10] 王霄,梁春,刘会霞,等.车削真实粗糙表面的弹塑性接触有限元分析[J],润滑与密封,2008,33(12):72-74.
- WANG Xiao, LIANG Chun, LIU Huixia, et al. Finite element analysis based on elasto-plastic contact of real turning rough surface [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(12): 72-74.

- [11] WU J J. Simulation of rough surfaces with FFT [J]. Tribol Int, 2000,33(1):47-58.
- [12] 田爱玲,孙钊,于洵,等.非高斯随机粗糙表面的数字模拟[J].系统仿真学报,2009,21(10):2840-2842.
- TIAN Ailing, SUN Zhao, YU Xun, et al. Numerical simulation of non-Gaussian random roughness surface [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(10): 2840-2842.
- [13] WU J J. Simulation of non-Gaussian surfaces with FFT [J]. Tribol Int, 2004,37(4): 339-346.
- [14] BAKOLAS V. Numerical generation of arbitrarily oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces [J]. Wear, 2003, 254(5/6): 546-554.
- [15] 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.
- [16] KRISHNA M M, SHUNMUGAM M S, PRASAD N S. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis [J]. Int J Pres Ves Pip, 2007, 84(6): 349-357.

[本刊相关文献链接]

- 刘意,刘恒,易均,等.切向接触刚度测量方法的理论改进.2012,46(1):66-69.
- 王宁,李宝童,洪军,等.螺栓支承面有效半径的影响因素.2012,46(4):132-136.
- 李学伟,赵万华,卢秉恒.轨迹误差建模的多轴联动机床轮廓误差补偿技术.2012,46(3):47-52.
- 李辉光,刘恒,虞烈.粗糙机械结合面的接触刚度研究.2011,45(6):69-74.
- 陈光胜,梅雪松,陶涛.一种四轴联动机床转台运动误差的快速检测及分离方法.2011,45(9):6-10.
- 刘显军,洪军,朱永生,等.多支承轴系轴承受力与刚度的有限元迭代计算方法.2010,44(11):41-45.
- 刘海涛,赵万华.基于结合面的机床振动分析及优化设计.2010,44(1):96-99.
- 尤晋闽,陈天宁.结合面法向动态参数的分形模型.2009,43(9):91-94.
- 李蕊,周丽.面向缩聚模型的结构损伤识别研究.2011,45(9):101-107.

(编辑 管咏梅)