

粗糙表面弹塑性加卸载多级接触模型^{*}

李万钟¹, 徐颖强¹, 孙 戡¹, 段辰宸², 侯 悦¹

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072; 2. 南车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏 常州 213011)

摘 要: 真实工程表面在微观尺度上都是粗糙的, 它们之间的接触实际上是表面微凸体的接触, 粗糙表面间的接触行为对接触部件的真实承载能力、摩擦磨损等性能都有重要影响, 研究工程表面间的真实接触行为是摩擦学研究的主要内容之一。采用最小均方误差法得到表面轮廓抛物线拟合曲线, 在最大限度近似原始表面轮廓的同时, 该方法能够更好地适用于微凸体弹塑性接触加卸载模型。通过单个微凸体上的支承载荷将总体级别模型和微凸体级别模型相联系, 建立粗糙表面多级接触加卸载模型。以柱面与平面接触为算例, 将接触区域视为与圆柱母线平行的离散线条集合, 得到微凸体法向变形量和粗糙表面真实接触面积, 该模型可用于分析粗糙表面弹塑性加卸载的真实接触行为。

关键词: 线接触; 粗糙表面; 多级接触; 加卸载; 弹塑性

中图分类号: TH117.1; O344

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)04-0039-08

Multilevel Contact Model of Elastic-Plastic Loading and Unloading on Rough Surfaces

LI Wan-zhong¹, XU Ying-qiang¹, SUN Jian¹, DUAN Chen-chen², HOU Yue¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072; 2. CSR Qishuyan Institute Co. Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu)

Abstract: Real engineering surfaces are rough at microscopic level and the contact between two rough surfaces is actually the asperities contact. The contact behavior of rough surfaces plays a vital role for the real carrying capacity, friction and wear of contact parts. The research of the real contact behavior between engineering surfaces is one of tribological main contents. Parabolic approximation curves of the rough profile obtained by the least mean squares approach can preferably approximate original surface profile preferably. Meanwhile, it can be suitable for asperity contact loading and unloading model better. By means of single asperity supporting load, the global is connected with the asperity level model, and a multilevel contact model of rough surfaces is established. Taking contact between the cylinder and flat surface for instance, the contact zone is treated as a summation of discrete lines paralleled to the cylindrical generatrix, and asperity interference and real contact area of the rough surfaces are obtained. This model is suitable for researching real contact behavior of elastic-plastic loading and unloading between rough surfaces.

Keywords: line contact; rough surface; multilevel contact; loading-unloading; elastic-plastic

0 引 言

真实金属材料表面在微观尺度下都是粗糙的, 两表面间的接触实际是表面微凸体离散点的接触。这些微凸体之间的相互作用对轴承、齿

轮、离合器、轮轨、机械密封、硬盘驱动器以及生物医学移植物的摩擦学性能至关重要^[1]。接触表面的真实接触面积、法向变形量等都与表面粗糙度有关, 真实接触面积远小于表观面积, 直接

收稿日期: 2015-03-06; **修回日期:** 2015-06-16; **基金项目:** * 国家自然科学基金(50875214, 10672134, 11072196); 西北工业大学博士论文创新基金(CX201420)

通讯作者: 李万钟(1985—), 男(汉), 博士生; **研究方向:** 机械设计及理论; **Tel:** (029) 8849 3928; **E-mail:** imposing@yeah.net

网络出版日期: 2015-06-23 17:10; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150623.1710.007.html>

引文格式: 李万钟, 徐颖强, 孙戡, 等. 粗糙表面弹塑性加卸载多级接触模型[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 39-46. Li W Z, Xu Y Q, Sun J, et al. Multilevel contact model of elastic-plastic loading and unloading on rough surfaces[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 39-46.

影响着摩擦部件的承载能力以及摩擦、磨损、传热、导电等性能^[2-3]。

经典赫兹接触理论适用于两个理想光滑曲面之间的接触分析,由于该理论没有考虑表面粗糙度,对于粗糙表面而言,真实接触面积、压力分布和法向变形量与赫兹理论得到的结果有所偏离。对此,大量文献研究了考虑表面粗糙度的接触模型,兹已成为国内外摩擦学研究的热点内容^[4-5]。

Greenwood、Williamson 和 Tripp^[6-7]采用概率统计分析方法建立了粗糙表面与光滑平面法向接触的力学模型(GW 模型),并指出服从高斯分布的两个粗糙表面的接触模型可以简化为一个等效粗糙表面与光滑平面的接触模型,但是该模型受到表面微凸体发生赫兹弹性接触假定的局限^[4]。Chang 等^[8]针对 GW 模型的缺陷,基于体积守恒原理建立了粗糙表面微凸体的弹塑性接触模型(CEB)模型,然而该模型仅考虑了微凸体的完全弹性变形和完全塑性变形两种状态,未给出两者之间的过渡状态,造成真实接触面积、法向变形量在弹塑性临界点处不连续。对此,Zhao 等^[9]建立了考虑弹性、弹塑性和完全塑性 3 种状态的接触模型(ZMC 模型),利用插值的方法建立了真实接触面积、法向变形量与载荷的表达式,但平均接触压力的变化在临界点处不光滑。

Kogut 和 Etsion 等^[10]利用有限单元法建立接触模型(KE 模型)对单个微凸体与刚性平面的接触问题进行研究,通过曲线拟合得到了接触载荷、真实接触面积与法向变形量之间的经验公式。Wang 等^[11]根据总体级别与微凸体级别下单个微凸体上的支撑载荷相等,将两个级别下的接触模型联系起来,提出一种粗糙表面多级接触模型。然而,对于考虑表面微凸体的线接触问题,例如铁路轮轨线接触、齿轮副线接触和圆柱滚子轴承中滚子与内表面的线接触,目前还没有广泛的研究。

文中首先利用 Ciulli^[12]提出的最小均方误差法,对粗糙表面轮廓进行抛物线拟合,根据 Wang^[11]和 Etsion^[13]的研究成果,通过微凸体支撑载荷将总体级别和微凸体级别下的接触模型联系起来,得到粗糙表面多级接触模型,并对其进行改进,使其应用于线接触,可准确预测线接触时粗糙表面的真实接触面积、接触区域法向变

形量等,这对于从微观尺度研究线接触副的粗糙表面接触行为、真实承载能力、微凸体塑性变形的演化及其摩擦磨损性能有重要意义。

1 粗糙表面形貌参数表征

GW 模型考虑到材料接触的对称性,将两个随机表面微凸体接触等效为粗糙表面同刚性光滑平面间接接触。该模型基于如下假设:表面微凸体各向同性,表面微凸体的峰顶为球形,所有微凸体具有相同的曲率半径,微凸体高度服从 Gauss 分布,微凸体发生纯弹性变形,微凸体的变形相互独立互不影响,微凸体以下材料的变形可忽略。GW 模型是粗糙表面接触模型的基础,之后的模型大多由此扩展和改进。

图 1 为 GW 模型粗糙表面与理想光滑平面接触示意图。其中, d 为刚性光滑平面与微凸体高度平均线的距离; h 为刚性光滑平面与表面高度平均线的距离; y_s 为微凸体高度平均线与表面高度平均线的距离; z 为粗糙表面轮廓高度; δ 为微凸体接触法向变形量; β 为微凸体峰顶半径。

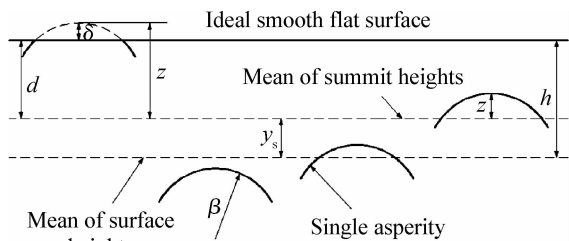


图 1 GW 模型粗糙表面与理想光滑平面的接触

Fig. 1 Contact of the rough surface with the ideal smooth flat surface for the GW model

该模型的等效弹性模量为:

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (1)$$

该模型的等效粗糙度均方值为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2)$$

式中: $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, \sigma_1, \sigma_2$ 分别为两接触材料的弹性模量、泊松比以及表面粗糙度的均方值。

服从 Gauss 分布的微凸体高度概率密度分布函数为^[14]:

$$\phi(z) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

光学轮廓仪测得的粗糙表面形貌受到分辨率的影响,得到的微凸体峰顶半径 β 过小,不能够很好地直接用于大多数粗糙表面接触模型。Ciulli^[12]提出一种最小均方误差法,对粗糙表面轮廓进行抛物线近似拟合,结果见图2。

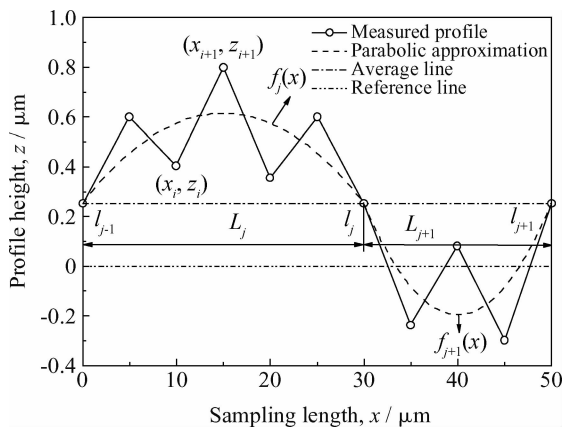


图2 最小均方误差法拟合轮廓曲线

Fig. 2 Profilogram fitted by least mean squares approach

轮廓测量曲线与微凸体高度平均线相交于 $l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_n$,将整个测量采样长度 L 分为 n 段,提取粗糙表面轮廓峰顶和峰谷的坐标 $(x_1, z_1), (x_2, z_2), \dots, (x_i, z_i), \dots, (x_m, z_m)$,求出每一段的最小均方误差 Er 与抛物线方程系数 q ,从而得到连续的抛物线拟合曲线。

$$Er_j = \sum_{i=1}^N [(z_i - m) - q_j(x_i - l_{j-1})(x_i - l_j)]^2 \quad (4)$$

其中, m 为轮廓高度均值:

$$m = \frac{1}{L} \int_0^L z dx, L = \sum_{j=1}^n L_j \quad (5)$$

令 $\frac{\partial Er}{\partial q} = 0$,有

$$q_j = \frac{\sum_{i=1}^N (z_i - m)(x_i - l_{j-1})(x_i - l_j)}{\sum_{i=1}^N [(x_i - l_{j-1})(x_i - l_j)]^2} \quad (6)$$

带入抛物线方程

$$f_j(x) = q_j(x - l_{j-1})(x - l_j) + m \quad (7)$$

得到第 j 段抛物线的拟合曲线。另外,抛物线曲率半径计算公式为

$$\beta = \frac{[1 + f'(x)]^{\frac{3}{2}}}{|f''(x)|} \quad (8)$$

$f'(x) = 0$ 时求得顶点处曲率半径

$$\beta = \frac{1}{2|q|} \quad (9)$$

2 粗糙表面加卸载多级接触模型

2.1 多级接触模型的提出

Wang等人^[11]提出一种粗糙表面多级接触模型,该模型采用总体级别和微凸体级别描述粗糙表面轮廓(见图3)。根据总体级别与微凸体级别下单个微凸体上的支承载荷相等,将两个级别下的接触模型联系起来。总体级别下,参与接触的微凸体接触面积等于微凸体底面面积,接触压力在其上平均分布,由此得到单个微凸体上的支承载荷;微凸体级别下,接触发生在微凸体的顶端,考虑单个微凸体的弹塑性变形,采用Kogut和Etsion提出的接触模型(KE模型)^[10]来分析真实接触面积、接触载荷与法向变形量的关系。在总体级别下建立的接触模型称为单级模型;同时考虑总体级别和微凸体级别,并将两个级别下的接触模型相联系,由此建立的接触模型称为多级模型。

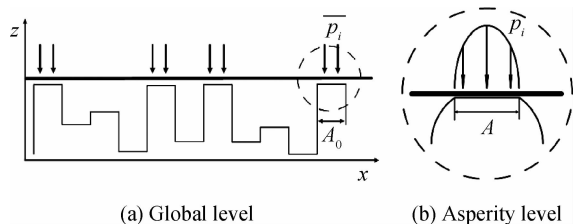


图3 多级接触模型示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the multilevel contact model

在该模型中,对于第 i 个微凸体,总体级别下的支承载荷 f_i^g 与微凸体级别下支承载荷 f_i^a 相等,即:

$$f_i^g = f_i^a \quad (10)$$

$$f_i^g = \bar{p}_i A_0, f_i^a = \int_{A_0} p_i dA \quad (11)$$

式中:上标 g 和 a 分别表示总体级别和微凸体级别; $\bar{p}_i$ 为总体级别下第 i 个微凸体上的平均压力; A_0 为总体级别下第 i 个微凸体底面面积; A 为单个微凸体真实接触面积; p_i 为微凸体级别下第 i 个微凸体上的接触压力;对其关于接触面积微元 dA 积分,得到整个微凸体上的载荷。

2.2 微凸体级别下加卸载接触模型

KE 模型将微凸体的变形分为完全弹性变形、弹塑性变形和完全塑性变形 3 个阶段:

完全弹性变形阶段($\delta \leq \delta_c$):

$$\begin{cases} \frac{f}{f_c} = \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{3/2} \\ \frac{A}{A_c} = \frac{\delta}{\delta_c} \end{cases} \quad (12)$$

弹塑性变形第一阶段($\delta_c < \delta \leq 6\delta_c$):

$$\begin{cases} \frac{f}{f_c} = 1.03 \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{1.425} \\ \frac{A}{A_c} = 0.93 \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{1.136} \end{cases} \quad (13)$$

弹塑性变形第二阶段($6\delta_c < \delta \leq 110\delta_c$):

$$\begin{cases} \frac{f}{f_c} = 1.4 \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{1.263} \\ \frac{A}{A_c} = 0.94 \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right)^{1.146} \end{cases} \quad (14)$$

完全塑性变形阶段($\delta > 110\delta_c$):

$$\begin{cases} \frac{f}{f_c} = \frac{3}{K} \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right) \\ \frac{A}{A_c} = 2 \left(\frac{\delta}{\delta_c}\right) \end{cases} \quad (15)$$

其中, δ 为微凸体接触法向变形量; δ_c , f_c , A_c 分别为微凸体出现塑性变形临界点处的法向变形量、支承载荷和真实接触面积。其中,

$$\delta_c = \beta \left(\frac{\pi K H}{2 E^*} \right)^2 \quad (16)$$

$$f_c = \frac{4}{3} E^* \delta_c^{3/2} \beta^{1/2} \quad (17)$$

$$A_c = \pi \beta \delta_c \quad (18)$$

式中: K 为出现塑性变形时最大接触压力和硬度的比例因数,与较软材料的泊松比 ν 有关, $K = 0.454 + 0.41\nu$; H 为较软材料的硬度,其值为该材料屈服强度的 2.8 倍。

在卸载过程中,发生完全弹性变形和弹塑性变形的微凸体法向变形量 δ 逐渐减小。完全卸载后,支承载荷、接触半径、真实接触面积均恢复为零。然而,发生弹塑性变形和完全塑性变形的微凸体形貌不能完全恢复,存在残余法向变形量。

残余法向变形量 δ_{res} 与最大法向变形量 δ_{max}

有关,Kadin 等^[15]通过试验得到计算 δ_{res} 的经验公式:

微凸体完全弹性变形($\delta_{\text{max}} \leq \delta_c$):

$$\frac{\delta_{\text{res}}}{\delta_{\text{max}}} = 0 \quad (19)$$

微凸体弹塑性变形($\delta_c < \delta_{\text{max}} \leq 110\delta_c$):

$$\frac{\delta_{\text{res}}}{\delta_{\text{max}}} = \left[1 - \left(\frac{\delta_{\text{max}}}{\delta_c} \right)^{-0.28} \right] \left[1 - \left(\frac{\delta_{\text{max}}}{\delta_c} \right)^{-0.69} \right] \quad (20)$$

微凸体完全塑性变形($\delta_{\text{max}} > 110\delta_c$):

$$\frac{\delta_{\text{res}}}{\delta_{\text{max}}} = 1 \quad (21)$$

2.3 多级模型应用于线接触

根据赫兹理论和 GW 模型,两个考虑粗糙度的随机曲面线接触模型可等效为一个理想光滑柱面与一个平面粗糙表面间的线接触,等效曲率半径(R)为:

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (22)$$

式中, R_1 和 R_2 分别为两接触表面的曲率半径。采用微积分的思想,将接触宽度为 $2a$ 的线接触区域视作与柱面母线方向(y 轴)平行的离散线条的集合(见图 4),且每一个离散线条上微凸体高度符合 Gauss 分布。与 GW 模型不同之处在于,在接触宽度方向(x 轴)上,改进后的模型中刚性光滑平面与微凸体高度平均线的距离沿接触宽度方向变化,接触宽度中心位置取得最小值,之后向两边逐渐增大,这与等效半径 R 有关。通过求解每一个离散线条上的真实接触面积和载荷,对其积分,得到线接触真实总接触面积和总接触载荷。

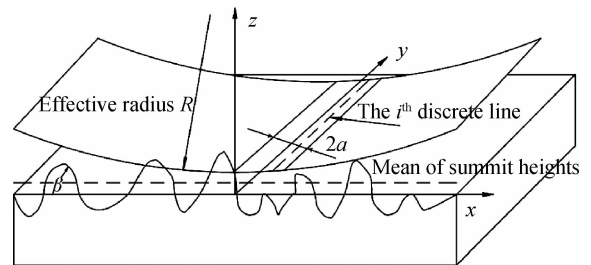


图 4 改进的 GW 模型应用于线接触的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the modified GW model applied to the line contact

根据赫兹理论得到线接触表面压力分布函数为:

$$p(x) = p_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{23}$$

式中: x 为沿接触宽度方向的空间坐标分量; a 为赫兹理论接触半宽; p_0 为赫兹理论最大接触压力; $p(x)$ 为沿接触宽度 x 方向上的接触压力分布。

得到线接触表面压力分布后,根据总体级别下的接触模型求出每个微凸体上的支承载荷,由此,再利用微凸体级别的接触模型计算每个微凸体的真实接触面积和法向变形量。在加载过程中,每一个离散线条上的微凸体接触面积和载荷与微凸体高度概率密度分布函数有关,有

$$A_i = \eta A_n \int_d^\infty A(z-d)\psi(z)dz \tag{24}$$

$$F_i = \eta A_n \int_d^\infty f(z-d)\psi(z)dz \tag{25}$$

式中: A_i, F_i 为第 i 个离散线条上微凸体真实接触面积和支承载荷; A_n 为由赫兹理论得到的每一个离散线条表观面积; $A(z-d)$ 为与微凸体高度密度分布函数有关的单个微凸体真实接触面积; $f(z-d)$ 为与微凸体高度密度分布函数有关的单个微凸体支撑载荷; η 为微凸体密度。

对接触宽度方向上的离散线条进行积分运算,得到线接触真实总接触面积和总接触载荷,即

$$A_{\text{总}} = \int_{-a}^a A_i dx, F_{\text{总}} = \int_{-a}^a F_i dx \tag{26}$$

3 模型的试验验证

铁路轮轨线接触、齿轮副线接触和圆柱滚子轴承中滚子与内表面的线接触等都可等效为柱面与平面间的接触。将航空齿轮材料 12Cr2Ni4A 合金结构钢作为平面试件,这种合金钢是一种优良的渗碳钢,具有高的淬透性,主要用于制造各种齿轮、轴、销子和活塞等渗碳件。圆柱试件材料 CrWMn 是制作模具最常用的高碳合金工具钢(见图 5),相关材料性能指标与几何尺寸见表 1^[16-17]。

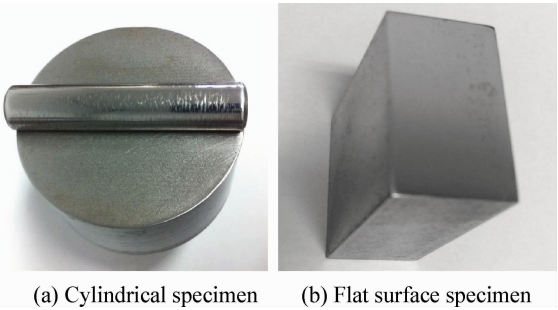


图 5 线接触试样
Fig. 5 Line contact specimens

表 1 接触材料表面表征参数与力学性能
Table 1 Mechanical and surface properties of the contacting materials

Material	Yield strength, S_y / MPa	Elastic modulus, E /GPa	ν	Hardness ($H=2.8S_y$)/ MPa	R_a / μm	σ / μm	Bulk curvature radius, R /mm	Contact length, l /mm	Size/ mm^3
12Cr2Ni4A	910	209	0.3	2 548	0.24	0.31	∞	12	$24 \times 12 \times 24$
CrWMn	2 668	209	0.3	7 470.4	0.63	0.79	5	12	$\Phi 10 \times 12$

接触表面抛光后用 2 000 号砂纸打磨,利用 WYKO NT1100 光学轮廓仪测量平面试样三维表面形貌(见图 6),并利用最小均方误差法,对粗糙表面接触宽度方向上的轮廓进行抛物线拟合,结果见图 7。从图 7 中可以看出,利用最小均方误差法得到的表面轮廓拟合曲线很好地规避了原始粗糙表面微凸体峰顶半径过小和峰顶过尖的问题,对表面轮廓的拟合度很高,适用于微凸体级别下弹塑性加卸载接触模型的计算和验证。

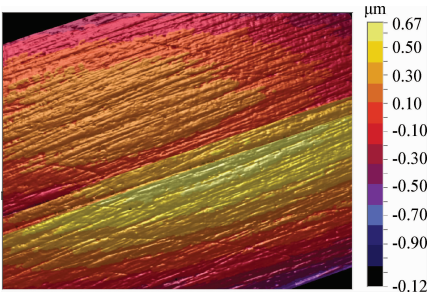


图 6 平面试样的三维表面形貌
Fig. 6 Three - dimensional surface morphology of the flat surface specimen

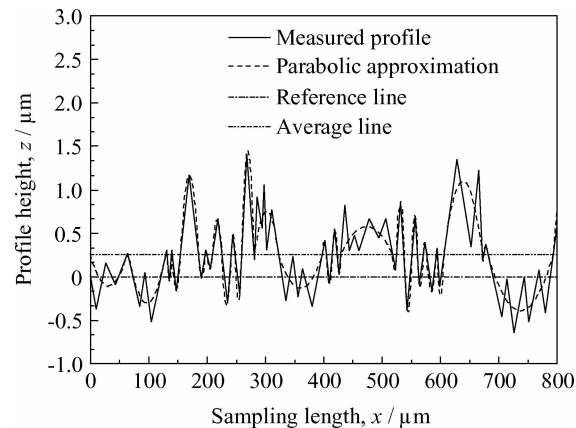


图 7 平面试件表面轮廓测量曲线与抛物线拟合曲线
Fig. 7 Measured profile and parabolic approximation of the flat surface specimen

应用英国 Instron 公司的 Instron5848 型微型材料试验机进行接触加载试验,加载试验装置示意图见图 8。试验载荷 $F=1\ 200\ \text{N}$,单位长度载荷 $P=100\ \text{N/m}$,属于赫兹理论中的弹性变形范围,因此基体发生完全弹性变形,卸载后变形恢复,不会对微凸体的残余法向变形量产生叠加。考虑到加载过程中圆柱两端存在的边缘效应,建立平面接触模型,利用 ABAQUS 有限元分析软件计算接触压力沿接触宽度方向的分布。为取得精确结果,对有限元模型接触区域进行网格细化。根据赫兹理论与有限元软件得到接触压力沿接触宽度方向的分布,分别见图 9 和图 10。显然在线接触加载过程中,接触压力最大值发生在接触宽度中心处 ($x=0$),之后向两边逐步减小,直至接触宽度边缘处 ($x=\pm a$),接触压力变为零。

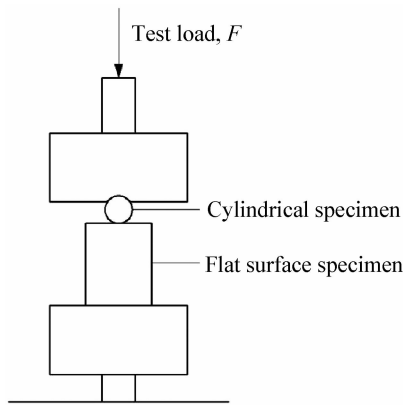


图 8 加载试验装置示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the load test device

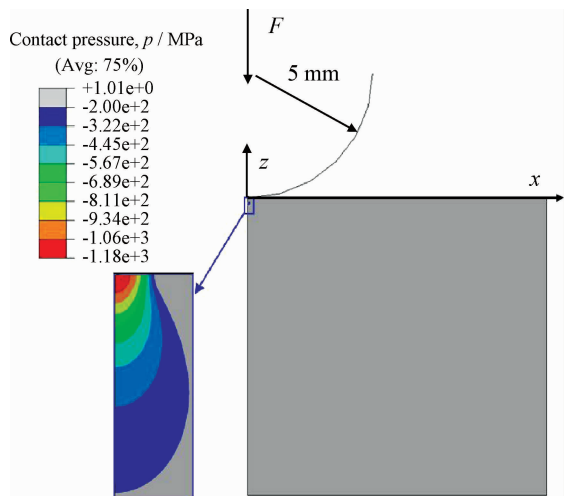


图 9 有限元模型接触压力的分布结果
Fig. 9 Contact pressure distribution results of the finite element model

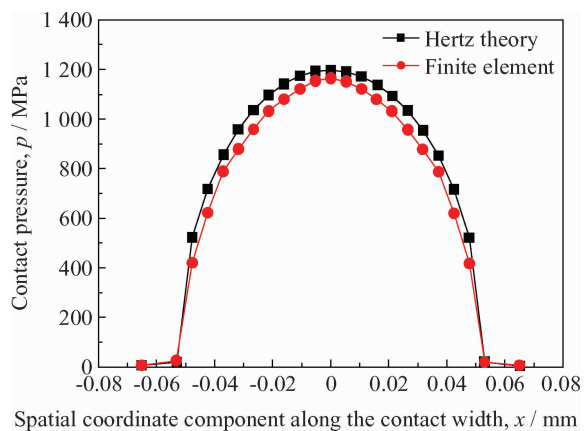


图 10 接触压力沿接触宽度方向的分布
Fig. 10 Contact pressure distribution along the contact width direction

不同级别模型下总载荷与接触面积的关系曲线如图 11 所示,可以看出:赫兹理论得到的表观接触面积明显大于单级模型和多级模型,高估了材料表面的接触承载能力。在初始加载阶段,接触主要发生在微凸体顶端,对于单个微凸体,计算接触面积时单级模型采用参与接触的微凸体底面面积 A_0 ,而多级模型采用微凸体顶端的真实接触面积 A ,因此单级模型得到的接触面积大于多级模型;随着总载荷的增加,参与接触的微凸体从弹性变形到弹塑性变形再到完全塑性变形转变,单个微凸体顶端的接触面积 A 逐渐趋近微凸体底面面积 A_0 ,因此单级模型和多级模型得到的总接触面积逐渐趋同。

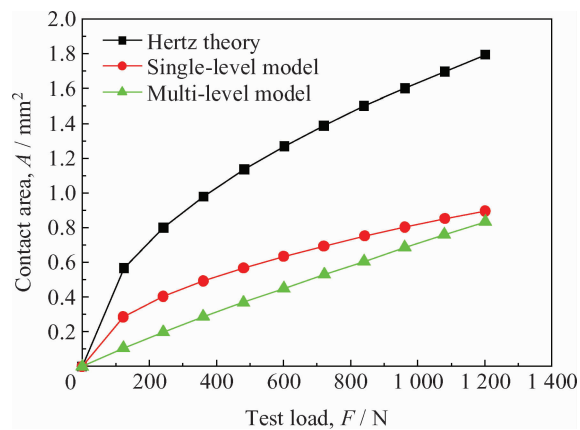


图 11 不同级别模型下总载荷与接触面积的关系
Fig. 11 Relationships between the total load and contact area under different level models

基体与微凸体在接触宽度方向上的法向变形量的变化关系见图 12。对照接触压力沿接触宽度方向的分布图(图 10)可以看出:在接触宽度的中心位置,基体的变形大于微凸体变形,值得注意的是基体发生完全弹性变形,卸载后变形恢复,而大多数微凸体在此位置多发生弹塑性变形甚至是完全塑性变形,卸载后存在残余变形,不能忽略;在接触宽度的两侧边缘处,基体的法向变形量小于微凸体的法向变形量,说明当载荷较小时,微凸体变形比基体变形敏感。

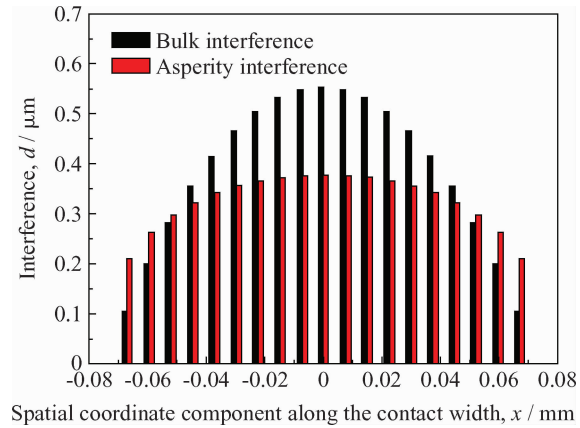


图 12 接触宽度方向上的法向变形量
Fig. 12 Interference along the contact width direction

卸载后,基体变形完全恢复,不存在残余法向变形量,因此不会对微凸体的残余法向变形量产生叠加的影响。结合公式(19)(20)(21),对线接触中每一个离散线条上微凸体出现的残余法向变形量取均值,得到接触宽度方向上最大法向变形量与残余法向变形量的关系见图 13。可以

看出:取均值得到的残余法向变形量由接触宽度的中心向两侧边缘处逐渐减小;即使是在接触边缘,微凸体上也存在轻微的残余法向变形量。

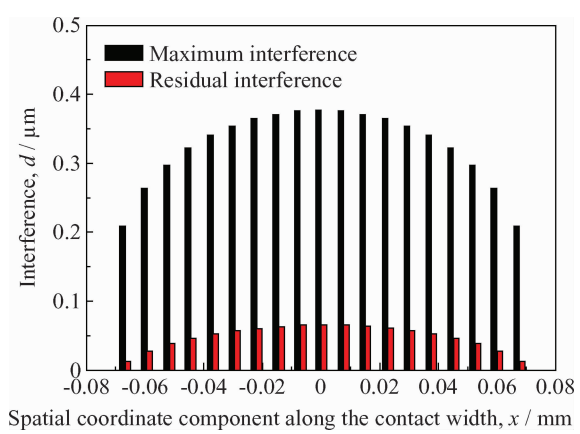


图 13 卸载后的残余法向变形量
Fig. 13 Residual interference after complete unloading

卸载后用硬度显微计观察平面试样表面的线接触位置,见图 14。从图中可以看出:存在明显的压痕,粗糙表面上的微凸体发生了不可恢复的塑性变形,与模型得到的结果一致。

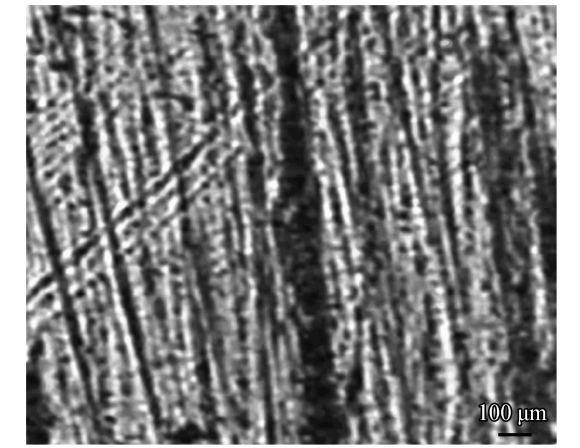


图 14 卸载后平面试样接触表面的压痕形貌
Fig. 14 Surface indentation morphology of the flat surface specimen after complete unloading

4 结 论

(1) 通过单个微凸体上的支承载荷将总体级别模型和微凸体级别模型相联系,提出一种粗糙表面弹塑性加卸载多级接触模型。将接触区域视为沿接触宽度方向分布的离散线条集合,可用来分析弹塑性接触副的真实接触面积和法向变形量等加卸载接触行为。

(2) 根据光学轮廓仪测得的粗糙表面三维形貌与轮廓曲线,提取轮廓峰顶和峰谷的坐标,采用最小均方误差法得到表面轮廓抛物线拟合曲线,在最大限度近似原始表面轮廓的同时,更好地适用于微凸体弹塑性加卸载接触模型。

(3) 多级模型同时考虑总体级别和微凸体级别下的接触,比单级模型更加趋近真实接触情况,得到的结果与试验结果一致,说明文中采用的多级模型以及对接触区域离散再积分的方法简便可行,这对于从微观尺度研究粗糙表面的真实接触行为以及表面微凸体弹塑性变形造成的形貌演化具有实际的指导意义。

参考文献

- [1] Beheshti A, Khonsari M M. Asperity micro-contact models as applied to the deformation of rough line contact [J]. *Tribology International*, 2012, 52(8): 61-74.
- [2] 魏龙, 顾伯勤, 冯飞, 等. 粗糙表面接触模型的研究进展 [J]. *润滑与密封*, 2009, 34(7): 112-117.
Wei L, Gu B Q, Feng F, et al. Progress of study on contact models of rough surfaces [J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(7): 112-117 (in Chinese).
- [3] 胡兆稳, 刘焜, 王伟, 等. 粗糙表面接触模型的研究现状和展望 [J]. *低温与超导*, 2011, 39(12): 71-74.
Hu Z W, Liu K, Wang W, et al. Review and prospect of contact models of rough surfaces [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2011, 39(12): 71-74 (in Chinese).
- [4] 徐超, 王东. 一种改进的粗糙表面法向弹塑性接触解析模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(11): 115-121.
Xu C, Wang D. An improved analytical model for normal elastic-plastic contact of rough surfaces [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(11): 115-121 (in Chinese).
- [5] 何联格, 左正兴, 向建华. 考虑微凸体弹塑性过渡变形机制的结面法向接触刚度分形模型 [J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(1): 116-121.
He L G, Zuo Z X, Xiang J H. Normal contact stiffness fractal model considering asperity elastic-plastic transitional deformation mechanism of joints [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2015, 49(1): 116-121 (in Chinese).
- [6] Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series-A*, 1966, 295(1442): 300-319.
- [7] Greenwood J A, Tripp J H. Elastic contact of rough spheres [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1967, 34(1): 153-159.
- [8] Chang W R, Etsion I, Bogy D B. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1987, 109(2): 257-263.
- [9] Zhao Y W, Maietta D M, Chang L. An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow [J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2000, 122(1): 86-93.
- [10] Kogut L, Etsion I. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat [J]. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 2002, 69(5): 657-662.
- [11] Wang F S, Block J M, Chen W W, et al. A multilevel model for elastic-plastic contact between a sphere and a flat rough surface [J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2009, 131(2): 021409.
- [12] Ciulli E, Ferreira L A, Pugliese G, et al. Rough contacts between actual engineering surfaces. Part I: Simple models for roughness description [J]. *Wear*, 2008, 264(5): 1105-15.
- [13] Etsion I, Kligerman Y, Kadin Y. Unloading of an elastic-plastic loaded spherical contact [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(13): 3716-29.
- [14] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第3版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
Wen S Z, Huang P. Principles of tribology (Third edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008 (in Chinese).
- [15] Kadin Y, Kligerman Y, Etsion I. Unloading an elastic-plastic contact of rough surfaces [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, 54(12): 2652-74.
- [16] 徐颖强, 吕国志. 航空齿轮接触疲劳裂纹萌生寿命预测方法的研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2003, 21(4): 473-476.
Xu Y Q, Lv G Z. On calculation methods for predicting contact fatigue crack initiation life of aero-gear tooth [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, 21(4): 473-476 (in Chinese).
- [17] 刘先兰, 张文玉. 冷作模具钢的选择及应用 [J]. *锻压技术*, 2007, 32(6): 13-17.
Liu X L, Zhang W Y. Selection and application of cold working die steel [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2007, 32(6): 13-17 (in Chinese).

(责任编辑: 黄艳斐)