

DOI: 10.7652/xjtuxb201311009

一种考虑侧接触的微凸体弹塑性接触力学模型

朱林波¹, 庄艳¹, 洪军¹, 杨国庆^{1,2}

(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: 为了准确预测复杂机械系统装配界面的接触特性,构建了一种考虑侧接触的微凸体弹塑性接触力学模型。利用塑性流动下体积守恒的原理,解决了单对微凸体在侧接触形式下接触力学模型难以表征的问题。以微凸体接触力学模型为基础,通过引入微凸体接触点处的等效曲率半径参数,结合装配界面微凸体、装配界面压力的分布规律,将微凸体接触特性扩展到复杂机械系统的整个装配界面。与弹性-塑性接触模型在接触载荷方面的预测结果比较表明,提出的微凸体侧接触弹塑性力学模型与弹性-塑性接触模型在弹性接触载荷预测方面基本相同,但在完全塑性接触载荷预测方面存在较大差异,且两者预测结果的差距随塑性指数和载荷的增加而增加,因此所提出的模型在完全塑性接触载荷预测方面更为接近有限元分析的结果。

关键词: 装配界面;微凸体;侧接触;弹塑性模型

中图分类号: TH123 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0048-05

Elastic-Plastic Model for Contact of Two Asperities Considering Shoulder-Shoulder Contact

ZHU Linbo¹, ZHUANG Yan¹, HONG Jun¹, YANG Guoqing^{1,2}

(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: To precisely predict the contact performance of assembly interface in complex mechanical system, an elastic-plastic model considering shoulder-shoulder contact of two asperities is presented, which solves the difficulty in shoulder-shoulder contact modeling of asperity under the assumption of volume conservation in the plastic flow regime. Introducing the equivalent radius of curvature at a contact point between two asperities and considering the distributions of surface roughness and contact pressure, the prediction of contact behaviors can be spread from the asperities to the assembly interface in complicated mechanical system according to the proposed model. The numerical results of estimating contact force with the proposed model and the Elastic-Plastic Model show that both predictions for elastic contact force get coincident but obviously different for purely plastic contact force, and the difference increases with plastic degree. The prediction with the proposed model, compared with that with CEB, approaches to finite element analysis more closely.

Keywords: assembly interface; asperity; shoulder-shoulder contact; elastic-plastic model

收稿日期: 2013-03-11。 作者简介: 朱林波(1985—),男,博士生;洪军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2012AA040703);国家自然科学基金资助项目(50935006)。

网络出版时间: 2013-09-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130906.1703.003.html>

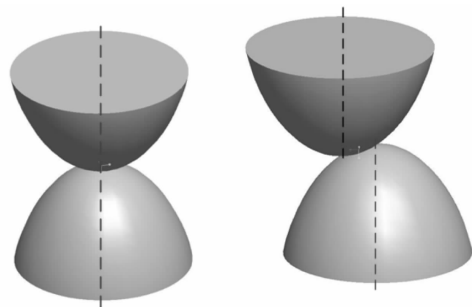
目前,装配界面微凸体接触力学模型按变形机制主要分为弹性接触模型、弹塑性接触模型及完全塑性接触模型。在弹性接触模型方面,Greenwood 等人基于形貌统计学假设和 Hertz 弹性接触理论,建立了粗糙表面的弹性接触模型(简称 GW 模型)^[1]。Sepehri 等人对 GW 模型进行了修正,修正后的模型不仅考虑了微凸体之间顶端与顶端的正接触,还考虑了发生在微凸体侧臂上的侧接触^[2]。在完全塑性接触模型方面,Chang 等人根据微凸体发生塑性变形时的体积守恒原理,建立了装配界面弹性-塑性接触模型(简称 CEB 模型)^[3],但该模型研究的是刚性光滑平面与等效粗糙表面的接触。Abdo 等人以 CEB 模型为基础,将其扩展到 2 个粗糙表面的接触,建立了考虑侧接触的界面弹性-塑性接触模型^[4-5]。在弹塑性接触模型方面,Kogut 等人采用有限元方法研究了刚性光滑平面与半球体的接触,将弹塑性变形过程中接触参数(接触载荷、接触面积等)表示为临界变形比的函数,得到球体在发生弹塑性时接触参数与半球体法向变形之间的经验公式,建立了微凸体弹塑性接触模型(简称 KE 模型)^[6],但在处理接触变形由弹性变为弹塑性以及由弹塑性变为完全塑性的过程中,此模型在临界点上的接触参数是不连续的^[7-10]。Lin 等人对 KE 模型进行了修正(简称 L-KE 模型),使接触参数在微凸体整个变形过程中均为连续^[11]。近年来,庄艳等人开展了考虑侧接触的微凸体弹塑性接触特性研究,初步构建了接触力学模型^[12-13]。

综上所述,在微凸体接触力学建模方面,由于现有研究还不够完善,因此许多学者以 GW 模型为基础,将 2 个粗糙表面的接触简化为刚性平面与等效粗糙面的接触,但与装配界面实际接触状态存在着较大的差异。Sepehri 等人对微凸体侧接触状态展开了相关研究^[2,4-5],但仅限于弹性及由 CEB 模型的塑性侧接触特性分析,缺乏对微凸体弹塑性侧接触特性的深入研究。因此,本文以不同的微凸体弹塑性接触理论为基础,通过引入接触点处的等效曲率半径,利用塑性流动下的体积守恒原理,构建了考虑侧接触的单对微凸体弹性-弹塑性-完全塑性 3 种变形机制的接触力学模型,同时结合单对微凸体接触特性的有限元分析,验证了理论模型的有效性。

1 几何模型的构建

诸多学者将 2 个粗糙表面的接触简化为一个光滑平面与一个等效粗糙表面的接触^[7-11],但在研究

单对微凸体接触时,只能考虑微凸体峰对峰完全对称的接触状态(正接触),如图 1 所示。实际粗糙表面接触时,正接触只是一种理想状态,而更多的接触应该发生在微凸体侧臂上(侧接触)^[2,4-5]。



(a) 正接触

(b) 侧接触

图 1 微凸体的接触状态

为了便于构建单对微凸体侧接触数学模型,对物理模型制订如下假设条件:①表面微凸体形状为旋转抛物体;②单对微凸体发生侧接触时在界面切向方向无滑移;③微凸体表面光滑,不考虑摩擦因素的影响。接触表面上粗糙峰的形貌不规则且无法用具体函数准确描述,一般将粗糙峰的形状简化为理想的几何外形。假设条件①将粗糙峰形状理想化为旋转抛物体,仅适用于单对微凸体的侧接触分析,此处假设与 Sepehri 等人的假设一致^[2,4-5]。假设条件②、③确定了本模型的适用对象及范围,即该模型适用于在法向受载,并且忽略对摩擦因素影响下的装配界面的特性预测。

由上述假设,对单对微凸体发生侧接触进行受力分析(见图 2),图中 C 点为 2 个微凸体轮廓线交点 A、B 点的连线中点, C₁、C₂ 点分别为 C 点所在的垂线分别与 2 个微凸体轮廓线的交点。由图 2 中单对微凸体侧接触的几何关系可得

$$\cos\theta = \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{-1/2}, \quad \beta_s = \beta_1 + \beta_2 \quad (1)$$

$$d_1 = z_1 + z_2 - d - r^2/2\beta_s \quad (2)$$

$$r_1 = \beta_1 r/\beta_s; \quad r_2 = \beta_2 r/\beta_s \quad (3)$$

微凸体在 n_1 方向的接触变形为

$$\delta = d_1 \cos\theta = \left(z_1 + z_2 - d - \frac{r^2}{2\beta_s}\right) \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{-1/2} \quad (4)$$

在图 2 中的 uo_2w 坐标系下,微凸体 1 的形状方程为

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= \frac{(u+r)^2}{2\beta_1} + (d - z_1) \\ u &\in (-r - (2z_1\beta_1)^{1/2}, -r + (2z_1\beta_1)^{1/2}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\delta_{pc}(r) = \frac{400k}{3}\delta_{ec}(r) \quad (14)$$

当微凸体发生完全塑性变形时,表面的平均接触压力等于较软材料的硬度。同时,利用塑性流动的体积守恒原理^[6],得出在侧接触状态下接触载荷 $F_p(r)$ 与接触变形之间的关系为

$$F_p(r) = 2\pi\beta(r)H\delta = 2\pi\beta H\delta \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{3/2} \quad (15)$$

2.3 弹塑性侧接触模型

KE 模型采用有限元方法研究了光滑平板与弹塑性球体的接触^[6],将微凸体的弹塑性变形分为 2 个阶段,即弹塑性变形 I 区($\delta_{ec} \leq \delta \leq 6\delta_{ec}$)和弹塑性变形 II 区($6\delta_{ec} \leq \delta \leq 110\delta_{ec}$),通过拟合仿真结果,得到弹塑性变形 I、II 区的接触载荷 F_{ep1} 、 F_{ep2} 与接触变形之间的关系为

$$F_{ep1} = 1.03F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{36/25}, \quad F_{ec} = \frac{4}{3}E\beta^{1/2}\delta_{ec}^{3/2} \quad (16)$$

$$F_{ep2} = 1.40F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{63/50} \quad (17)$$

式中: F_{ec} 为微凸体正接触时的临界弹性接触载荷。

L-KE 模型假设在弹塑性变形阶段^[11] ($\delta_{ec} \leq \delta \leq \delta_{pc}$),接触参数为 δ/δ_{ec} 的函数,且在接触参数表达式满足整个变形过程中连续条件下,对 KE 模型进行了修正,得到弹塑性变形阶段接触载荷 F_{ep} 与接触变形之间的关系为

$$F_{ep} = F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{69/50} \quad (18)$$

本文根据 KE、L-KE 模型,将微凸体正接触模型扩展为更符合实际接触状态的侧接触,推导证明了单对微凸体发生弹塑性变形时接触载荷与接触变形的关系。微凸体在侧接触状态下发生弹塑性变形时,接触点处的临界弹性接触载荷为

$$F_{ec}(r) = \frac{4}{3}E\beta(r)^{1/2}\delta_{ec}(r)^{3/2} = F_{ec} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^3 \quad (19)$$

2.3.1 KE 模型的弹塑性侧接触模型 当 $\delta_{ec}(r) \leq \delta \leq 6\delta_{ec}(r)$ 时,微凸体变形处于弹塑性变形 I 区, $F_{ep1}(r)$ 与 δ 之间的关系为

$$F_{ep1}(r) = 1.03F_{ec}(r) \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}(r)}\right)^{36/25} = 1.03F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{36/25} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{43/50} \quad (20)$$

当 $6\delta_{ec}(r) < \delta \leq 110\delta_{ec}(r)$ 时,微凸体变形处于弹塑性变形 II 区, $F_{ep2}(r)$ 与 δ 之间的关系为

$$F_{ep2} = 1.4F_{ec}(r) \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}(r)}\right)^{63/50} = 1.4F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{63/50} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{111/100} \quad (21)$$

2.3.2 L-KE 模型的弹塑性侧接触模型 当 $\delta_{ec}(r) \leq \delta \leq \delta_{pc}(r)$ 时,微凸体变形处于弹塑性变形阶段, $F_{ep}(r)$ 与 δ 之间的关系为

$$F_{ep} = F_{ec}(r) \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}(r)}\right)^{69/50} = F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{69/50} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{93/100} \quad (22)$$

2.4 接触载荷与接触变形的关系

结合 KE 模型和 L-KE 模型提出的弹性-弹塑性-完全塑性变形的接触模型,可分别得到单对微凸体侧接触时的接触力学模型 1 和模型 2。KE 模型和 L-KE 模型将装配界面微凸体接触形式简化为刚性光滑平面与半球体的接触,提出的微凸体接触弹塑性理论仅仅适用于描述微凸体正接触的变形机理,而本文提出的模型是在其正接触弹塑性接触理论基础考虑了侧接触状态,因此更符合装配界面微凸体的实际接触形式。

采用模型 1 可得接触载荷与接触变形之间的关系为

$$F = \begin{cases} \frac{4}{3}E\beta^{1/2}\delta^{3/2} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{3/4}, & \delta < \delta_{ec}(r) \\ 1.03F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{36/25} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{43/50}, & \delta_{ec}(r) \leq \delta \leq 6\delta_{ec}(r) \\ 1.4F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{63/50} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{111/100}, & 6\delta_{ec}(r) < \delta \leq 110\delta_{ec}(r) \\ 2\pi\beta H\delta \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{3/2}, & \delta > 110\delta_{ec}(r) \end{cases} \quad (23)$$

采用模型 2 可得接触载荷与接触变形之间的关系为

$$F = \begin{cases} \frac{4}{3}E\beta^{1/2}\delta^{3/2} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{3/4}, & \delta < \delta_{ec}(r) \\ F_{ec} \left(\frac{\delta}{\delta_{ec}}\right)^{69/50} \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{93/100}, & \delta_{ec}(r) \leq \delta \leq \frac{400k}{3}\delta_{ec}(r) \\ 2\pi\beta H\delta \left(1 + \frac{r^2}{\beta_s^2}\right)^{3/2}, & \delta > \frac{400k}{3}\delta_{ec}(r) \end{cases} \quad (24)$$

3 接触特性有限元分析

利用 ANSYS 软件构建单对微凸体侧接触有限元模型,将有限元分析结果与现有的侧接触模型及本文提出的 2 种解析模型进行对比分析,以此对不同的接触力学模型进行优选。

3.1 有限元分析模型的构建

单对微凸体侧接触有限元分析模型如图 3 所示,微凸体 1 及微凸体 2 均为旋转抛物体。2 个微凸体的几何尺寸相同,即 $\beta_1=\beta_2=10\text{ mm}$, $z_1=z_2=5\text{ mm}$ 。在侧接触分析中,2 个微凸体中心轴线的距离 r 分别取 2、4、6 mm。假设微凸体材料为弹性-理想塑性材料,参数设置为 $E_1=E_2=70\text{ GPa}$, $\nu_1=\nu_2=0.32$,屈服强度 $\sigma_{y1}=\sigma_{y2}=0.4\text{ GPa}$ 。

采用 SOLID185 单元对有限元分析模型进行网格划分,在非接触区域设置的单元边长为 0.8 mm,在接触区域(沿接触点法线方向上下延伸 1 mm)经过局部细化后,最小接触单元的尺寸大约为 0.05 mm,整个有限元模型单元总数为 175 680 个。在微凸体 1 基体表面施加 x 、 z 方向的位移约束,在微凸体 2 基体表面施加全约束。在微凸体 1 基体表面施加法向位移载荷,法向位移采用循环加载的方式,从 $-\delta_{ec}(r)$ 依次加载到 $-220\delta_{ec}(r)$ 。

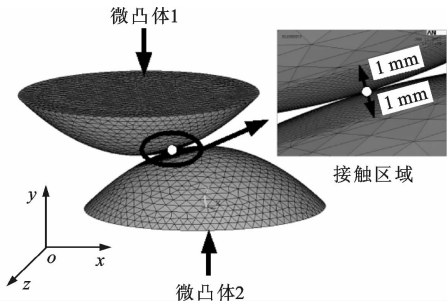


图 3 单对微凸体侧接触有限元分析模型

3.2 2 种模型的计算结果

对本文提出的 2 种解析模型、CEB 模型,以及与有限元模型在不同 d 、 r 下的接触载荷误差 E_r 进行对比分析,由图 4 可见,本文提出的 2 种侧接触解析模型的计算结果更接近有限元结果,而 CEB 模型预测结果与有限元结果的差异较大。由此可知,由于尚未考虑微凸体弹塑性变形,因此 CEB 模型预测的接触载荷不够准确。比较本文提出的 2 种解析模型与有限元模型关于接触载荷的计算误差可知,2 种解析模型的弹性接触载荷预测结果相同,完全塑性($\delta/\delta_{ec}(r)>110$)接触载荷预测结果也相同,但在弹塑性阶段的预测结果却存在一定的差异。模型 2

与模型 1 相比,在变形值达到临界弹性变形的 25~50 倍时更接近有限元分析结果,但当变形进一步增大时,模型 1 的预测结果更接近有限元分析,这一点在 r 增大时表现得更为显著。

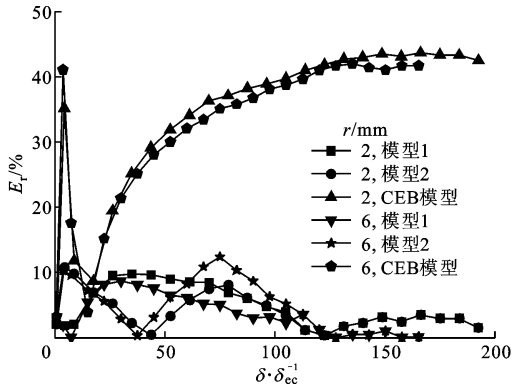


图 4 3 种解析模型与有限元模型接触载荷误差的对比曲线

本文提出的 2 种解析模型误差计算结果的算术平均值及标准偏差如表 1 所示。从表 1 可以看出,虽然在 $r=2\text{ mm}$ 时,模型 2 预测结果的平均误差比模型 1 小,但总体来说,模型 1 预测的计算结果更为稳定,且在 r 增大时模型 1 预测结果的平均误差更小。因此,选择模型 1 作为单对微凸体侧接触时的接触力学模型。

表 1 2 种模型计算结果的误差比较 %

评定指标	$r=2\text{ mm}$		$r=4\text{ mm}$		$r=6\text{ mm}$	
	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2
算术平均值	6.74	5.76	5.43	6.64	4.97	7.35
标准偏差	2.81	2.96	2.40	3.35	2.64	3.43

由于装配界面微凸体接触特性(接触刚度、接触热阻等)遵循串并联的基本关系,因此以本文提出的微凸体接触力学模型为基础,结合装配界面微凸体及装配界面压力的分布规律,可将微凸体接触特性扩展到复杂机械系统的整个装配界面。

4 结 论

(1)本文依据 KE 接触模型,构建了一种考虑侧接触的微凸体弹塑性接触力学模型。该模型通过引入微凸体接触点处的等效曲率半径参数,利用塑性流动下的体积守恒原理,解决了单对微凸体在侧接触形式下接触力学模型难以表征的问题,且此模型包含了微凸体发生弹性-弹塑性-完全塑性的 3 种变形机制。

(2)利用单对微凸体接触特性的有限元分析,对
(下转第 104 页)