

DOI: 10.7652/xjtuxb201711011

圆锥微凸体在粗糙表面接触分析中的应用

田红亮, 董元发, 钟先友, 王骁鹏, 郜能, 郑金华

(三峡大学机械与动力学院, 443002, 湖北宜昌)

摘要: 为了从微观角度研究粗糙表面的法向接触特性, 构建了一种具有圆锥微凸体的有限元分析模型。对反双曲余弦应力进行定积分, 获得了作用在单个圆锥接触区域的总法向弹性接触力; 给出了圆锥顶点法向变形量与接触半径之间的拟合公式。数值模拟表明: 反双曲余弦应力在锥尖处(接触区域的中心)有一个自然对数奇点, 但作用在单个圆锥接触区域的总法向弹性接触力有边界; 单个圆锥的法向弹性接触载荷随着半顶角的增加先增大后减小; 结合部整体的法向接触载荷随着表面粗糙度的减小而增大; 当法向最大变形量明显增大时, 结合部整体的法向接触载荷随着法向最大变形量的增加仅有微小的增加; 半顶角越大, 单个圆锥的法向接触刚度也越大; 随着圆锥顶点法向变形量的增加, 单个圆锥的法向接触刚度先略微减小, 而后保持不变; 法向临界变形量较小时, 结合部整体的法向接触刚度随着法向临界变形量的增加而近似于线性增大; 表面粗糙度越小, 结合部整体的法向接触刚度增加得越明显; 法向临界变形量较大时, 结合部整体的法向接触刚度趋于不变。

关键词: 圆锥微凸体; 粗糙表面; 法向接触载荷; 法向接触刚度; 反双曲余弦

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0071-08

Application of Conical Asperity in Contact Analysis of Rough Surfaces

TIAN Hongliang, DONG Yuanfa, ZHONG Xianyou, WANG Xiaopeng, XI Neng, ZHENG Jinhua

(College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: A finite element analysis model with conical asperity is proposed to investigate the normal contact characters of rough surfaces in the micro perspective. The total normal elastic contact force acting on the single-cone contact region is obtained through definite integrate of the inverse hyperbolic cosine stress. A formula fitting the normal deformation of cone tip and the contact radius is given. Digital simulations show that although the inverse hyperbolic cosine stress has a natural logarithmic singular spot at the tip of the cone (at the center of the contact region), the total normal elastic contact force acting on the single-cone contact domain is bounded. The normal elastic contact load on single cone increases at first and then decreases with the increase of the half apex angle. The joint interface's total normal contact load increases with the decrease of the surface roughness. When the normal maximal deformation increases very evidently, the increase of the total normal contact load on joint interface is very small. The larger the half apex angle is, the larger the single-cone normal contact stiffness becomes. When the normal deformation of the cone tip increases, the single-cone normal contact stiffness slightly decreases at first and then keeps constant. When the normal critical deformation is smaller, the

收稿日期: 2017-03-27。 作者简介: 田红亮(1973—), 男, 博士, 教授; 董元发(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605255)。

网络出版时间: 2017-09-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170906.1534.016.html>

joint interface's total normal contact stiffness has an approximate linear increase with the increase of the normal critical deformation. The smaller the surface roughness is, the more evidently the joint interface's total normal contact stiffness increases. When the normal critical deformation is larger, the joint interface's whole normal contact stiffness approaches constant.

Keywords: conical asperity; rough surface; normal contact load; normal contact stiffness; inverse hyperbolic cosine

在机械加工中,因为被加工件接触表面的状态能够直接影响机械设备的性能,尤其在高空等恶劣工况下问题会更加突出,所以研究粗糙表面间的接触力学行为对确保机械设备正常、可靠运行至关重要。

许多学者已对粗糙表面的接触行为进行了大量研究。例如;Majumdar 等提出了一种微凸体半径可变的具有尺度独立性的粗糙表面弹塑性接触分形几何理论^[1];Adams 等设定半圆锥角接近于 90° , 计算了弹性圆锥与弹性半空间的接触问题^[2];Sepehri 等考虑了微凸体之间的侧接触情况,假设粗糙表面的微凸体具有回转抛物体形状,并推导了不同接触位置时微凸体的接触变形,将接触模型扩展到了 2 个粗糙表面之间的接触^[3-4],更符合实际情况;Dwyer-Joyce 等给出了圆锥载荷与压入深度之间的关系式^[5];刘伟强等为了更准确地描述粗糙结合面的微观接触特性,构建了一种椭圆抛物体形微凸体曲面弹性接触模型^[6];庄艳等假设表面微凸体形状为旋转抛物体,采用分水岭分割方法获得了粗糙表面三维微凸体的尺寸与空间分布^[7];刘会静等为了更准确地描述结合面的微观形貌及其切向滑移特性,构建了一种具有旋转抛物面的柱体滑移有限元模型^[8],并且为了从微观角度探究粗糙表面的切向滑移特性,还构建了一种具有回转抛物体形状的微凸体切向滑移有限元模型^[9];杨国庆等通过三维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^[10];许志倩等设定粗糙表面轮廓曲线的高度分布概率统计模型为高斯分布,确定了蒙特卡罗随机抽样的样本平均值与样本标准差,建立了基于圆锥与平面接触的三维粗糙表面接触力学模型,且认为分形具有尺度独立性^[11],此外,还将复杂轮廓曲线简化为由多个等腰三角峰组成,采用分形理论中的剖面位形法,通过数据拟合得到了粗糙表面轮廓曲线几何形貌特征值与分形参数间的函数关系^[12];朱林波等假设表面微凸体形状为旋转抛物体,构建了一种考虑侧接触的微凸体弹塑性接触力学模型^[13]。

通过对以上研究工作的分析发现:①大多数文献采用球体与平面接触模型,接触应力和变形的求解方法多根据数字仿真或有限元模拟,缺乏针对圆锥接触力学行为分析的解析方法;②一些方案中未计及表面粗糙度对接触特性的影响,使得理论成果不能准确预测动力学参数。微凸体模型除用球体之外,常见的模型还有圆柱体和圆锥体。球体模型接触区的压强分布为椭圆体,而圆柱体和圆锥体模型接触区的压强分布出现不定值区域,即在边缘或中心区域压强趋于无限,致使弹性变形计算困难。圆柱体模型的实际接触面积保持不变,这与粗糙表面的接触情况不符。

本文假设表面微凸体形状为圆锥体,反双曲余弦应力在锥尖处(接触区域的中心)有一个自然对数奇点,对反双曲余弦应力进行定积分,获得了作用在单个圆锥接触区域的总法向弹性接触力,建立了以圆锥微凸体为基础的两粗糙表面法向接触力学模型;基于有限元分析软件 ANSYS R15.0,对圆锥与刚性光滑平面的接触进行仿真分析,给出了圆锥顶点法向变形量与接触区域半径的拟合关系式;通过实例计算与分析,得到了表面粗糙度对粗糙表面接触力学行为的影响规律。

1 圆锥微凸体与刚性光滑平面的接触

2 个粗糙表面的接触可以等效为粗糙表面与刚性光滑平面的接触,根据粗糙表面形貌的特点,在微观状态下可以形象化地看作是一系列圆锥微凸体与刚性光滑平面的接触。当表面受到挤压时,微凸体将发生弹性或塑性变形。本文假设:①在接触过程中忽略相邻微凸体之间的相互作用;②接触由 2 个相互接触且不发生刚体运动的物体形成;③不考虑摩擦的影响和接触面介质(如润滑油等)。

圆锥微凸体与刚性光滑平面的弹性接触如图 1^[14]所示,其投影为等腰三角形。图 1 中, l' 为圆锥微接触截面积的半径, l 为圆锥实际微接触面积的半径, α 为圆锥的半顶角, r 为横坐标, δ 为圆锥顶点的法向变形量, f_c 为单个圆锥承受的法向弹性接触

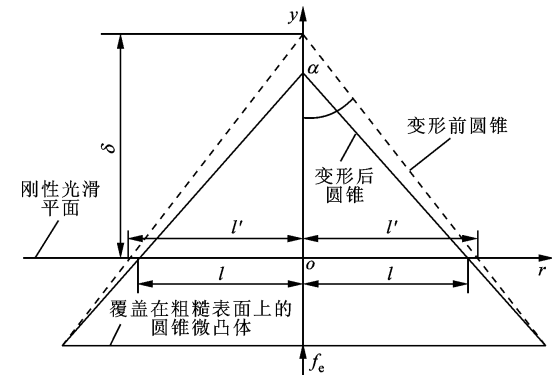
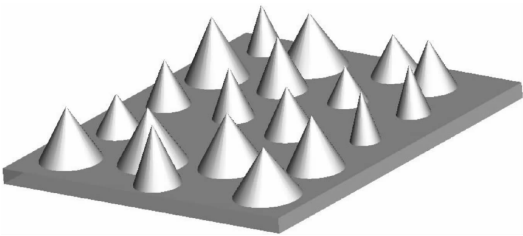


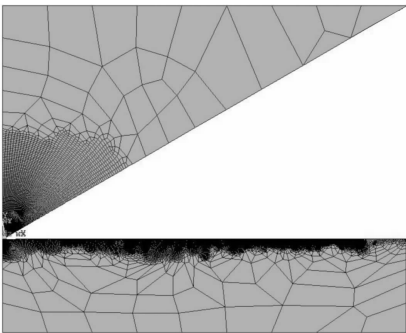
图 1 单个圆锥微凸体与刚性光滑平面的弹性接触

载荷。

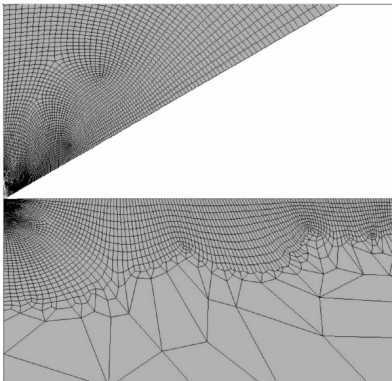
运用有限元计算软件平台 ANSYS R15.0,建立圆锥微凸体与刚性光滑平面的几何模型,根据轴对称性,取其一半并进行网格划分,如图 2 所示。以



(a)粗糙表面上的圆锥微凸体



(b)圆锥与刚性光滑平面接触的整体网格



(c)圆锥与刚性光滑平面接触的附近网格

图 2 圆锥微凸体与刚性光滑平面接触的几何模型

刚性光滑平面作为目标面,以圆锥作为接触面,根据接触向导生成接触对。在图 2b 与 2c 中,上面的物体为圆锥,下面的物体为刚性光滑平面。以圆锥微凸体顶点为坐标原点,建立空间直角坐标系,以几何模型的对称轴为 y 轴。当圆锥和刚性光滑平面刚刚接触时,只有圆锥尖端与刚性光滑平面接触,实际接触面积非常小,当受到垂直载荷作用时,圆锥被压扁的距离为 δ 。取圆锥材料的弹性模量 $E=203$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$ 。

在 ANSYS R15.0 中,通过 Export Data,以 .csv 格式导出接触半径、法向变形量、接触压强,然后将 .csv 文件另存为 .xls 文件。在 Matlab® R2009b 中,通过 File→Import Data 读 .xls 文件,并将 .xls 文件转换成 .mat 文件。在接触过程中,圆锥实际微接触区域的半径和圆锥顶点的法向变形量见表 1。

表 1 圆锥接触区域半径与顶点的法向变形量

节点序号	$l/\mu\text{m}$	$\delta/\mu\text{m}$
1	10.386 4	10.943 8
2	14.028 8	31.609 2
3	18.449 5	41.641 1
4	22.421 3	51.651 4
5	26.205 4	61.007 9
⋮	⋮	⋮
14	63.541 7	125.799 9
15	65.889 5	135.050 3
16	70.520 1	140.291 8
17	75.037 7	145.160 5
18	79.593 3	150.408 6

在接触过程中,横坐标 r 及其对应的单个圆锥微凸体与刚性光滑平面的接触压强 $p(r)$ 见表 2。

用表 1 中的数据,通过 Matlab® R2009b 中高斯-牛顿法的非线性最小二乘拟合函数 nlinfit 加载数据文件 .mat,获得拟合系数,得到圆锥顶点法向变形量与接触区域半径之间的拟合公式

$$\delta = 9.112l^{2/3}\cot\alpha - 9.112\left(1 + \frac{4\alpha}{\pi}\right)\cot\alpha,$$
$$0 \leq \delta \leq \delta_c.$$

(1)

式中: δ_c 为圆锥顶点的法向临界变形量。

用表 1 中的数据和式(1)的计算结果绘制曲线,如图 3 所示。

由式(1)得

$$l = \left(\frac{\delta \tan\alpha}{9.112} + 1 + \frac{4\alpha}{\pi}\right)^{3/2}$$

(2)

表2 圆锥微凸体与刚性平面的接触压强

节点序号	$r/\mu\text{m}$	$p(r)/\text{Pa}$
1	0.00	2 155.93
2	2.12	2 092.88
3	4.63	1 730.26
4	7.08	1 484.72
5	9.69	1 331.43
6	12.39	1 203.04
⋮	⋮	⋮
21	61.39	365.53
22	65.20	320.95
23	69.09	273.20
24	73.07	220.47
25	77.17	148.38
26	81.42	18.22

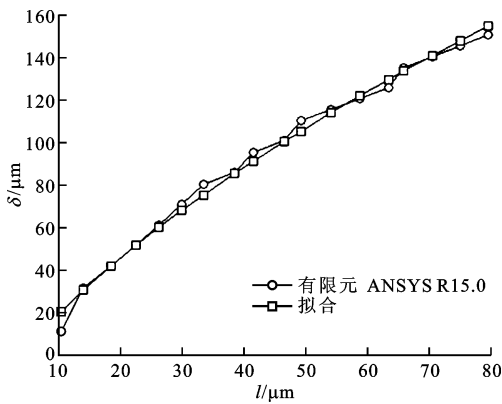


图3 法向变形量与接触区域半径的关系曲线

圆锥与刚性光滑平面接触的压强分布表达式服从反双曲余弦^[15]

$$p(r) = \frac{e\delta\sin\alpha}{\pi l(1+\cot\alpha)} \operatorname{arch} \frac{l}{r} = \frac{e\delta\sin\alpha}{\pi l(1+\cot\alpha)} \ln \left[\frac{l}{r} + \left(\frac{l^2}{r^2} - 1 \right)^{1/2} \right] \quad (3)$$

式中: arch 为反双曲余弦的主值; e 为圆锥材料的平面应变模量

$$e = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (4)$$

用表2中的数据 and 式(3)的计算结果绘制曲线, 如图4所示。

设 $l/r=x$, 根据换元法可得以下定积分

$$\int_0^l r \operatorname{arch} \frac{l}{r} dr = \int_1^{+\infty} \frac{l^2}{x^3} \ln[x + (x^2 - 1)^{1/2}] dx \quad (5)$$

采取分部积分法, 式(5)可变形为

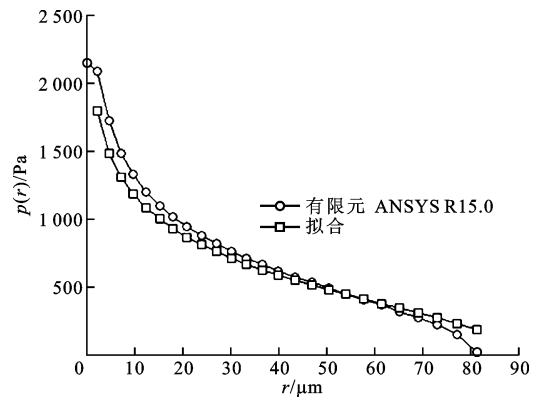


图4 接触压强与横坐标的关系曲线

$$\int_0^l r \operatorname{arch} \frac{l}{r} dr = \frac{l^2}{2} \int_1^{+\infty} \frac{dx}{x^2(x^2 - 1)^{1/2}} \quad (6)$$

设 $1/x=t$, 式(6)可简化为

$$\int_0^l r \operatorname{arch} \frac{l}{r} dr = \frac{l^2}{2} \int_0^1 \frac{t}{(1-t^2)^{1/2}} dt = \frac{l^2}{2} \quad (7)$$

神奇的是, 根据牛顿-莱布尼茨公式, 式(7)与下列定积分相等

$$\int_0^l r dr = \left(\frac{r^2}{2} \right)_0^l = \frac{l^2}{2}$$

根据式(3), 当 $r=0$ 时, 应力在锥尖处(接触区域的中心)有一个自然对数奇点。作用在单个圆锥接触区域的总法向弹性接触力

$$f_e = \int_0^l p(r) 2\pi r dr \quad (8)$$

将式(3)代入式(8), 得

$$f_e = \frac{2e\delta\sin\alpha}{l(1+\cot\alpha)} \int_0^l r \operatorname{arch} \frac{l}{r} dr \quad (9)$$

将式(7)代入式(9), 得^[16]

$$f_e = \frac{e\delta l \sin\alpha}{1+\cot\alpha}, \quad 0 \leq \delta \leq \delta_c \quad (10)$$

式中: δl 为图1中等腰三角形的面积。

当圆锥发生塑性变形时, 法向塑性平均压强

$$p_{pa}(\delta) = H_V, \quad \delta \geq \delta_c \quad (11)$$

式中: H_V 为圆锥材料的维氏硬度。圆锥的法向塑性平均压强的上限

$$p_{pa,u} = 3\sigma_y \quad (12)$$

式中: σ_y 为圆锥材料的屈服强度。

将顶部2个相对面具有规定角度 136° 的正四棱锥体金刚石压头用试验力压入试样表面, 可得其维氏硬度

$$H_V = 0.93 p_{pa,u} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13), 得

$$H_V = 2.79 \sigma_y \quad (14)$$

将式(14)代入式(11), 得

$$p_{pa} = 2.79\sigma_y \quad (15)$$

单个圆锥微凸体承受的法向塑性接触载荷

$$f_p = Ha \quad (16)$$

式中: a 为圆锥微凸体的实际微接触面积,

$$a = \pi l^2 \quad (17)$$

由式(10)和(17),可得一个圆锥微凸体承受的法向弹性平均压强

$$p_{ea}(\delta) = \frac{f_e}{a} = \frac{e\delta \sin\alpha}{\pi l(1 + \cot\alpha)} \quad (18)$$

将式(2)代入式(18)得

$$p_{ea}(\delta) = e\delta \sin\alpha / \left[\pi \left(\frac{\delta \tan\alpha}{9.112} + 1 + \left(\frac{4\alpha}{\pi} \right)^{3/2} (1 + \cot\alpha) \right) \right], \quad 0 \leq \delta \leq \delta_c \quad (19)$$

$$p_{ea}(\delta_c) = e\delta_c \sin\alpha / \left[\pi \left(\frac{\delta_c \tan\alpha}{9.112} + 1 + \left(\frac{4\alpha}{\pi} \right)^{3/2} (1 + \cot\alpha) \right) \right] \quad (20)$$

由式(11)得

$$p_{pa}(\delta_c) = H \quad (21)$$

圆锥微凸体从弹性区间向塑性区间转化时,可设施加在圆锥微凸体上的压强在临界变形量处连续,即有

$$p_{ea}(\delta_c) = p_{pa}(\delta_c) \quad (22)$$

将式(20)和(21)代入式(22),得

$$\delta_c / \left(\frac{\delta_c \tan\alpha}{9.112} + 1 + \frac{4\alpha}{\pi} \right)^{3/2} = \frac{\pi H (1 + \cot\alpha)}{e \sin\alpha} \quad (23)$$

圆锥微凸体与刚性光滑平面之间互相作用的法向接触刚度

$$k_n = \frac{df_e}{d\delta} \quad (24)$$

将式(2)代入式(10),得

$$f_e = \frac{e \sin\alpha}{1 + \cot\alpha} \left[\frac{\delta^{5/3} \tan\alpha}{9.112} + \left(1 + \frac{4\alpha}{\pi} \right) \delta^{2/3} \right]^{3/2} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24),得

$$k_n = \frac{e \sin\alpha}{1 + \cot\alpha} \left[\frac{\delta^{5/3} \tan\alpha}{9.112} + \left(1 + \frac{4\alpha}{\pi} \right) \delta^{2/3} \right]^{1/2} \cdot \left(0.274 \delta^{2/3} \tan\alpha + \frac{1 + 4\alpha/\pi}{\delta^{1/3}} \right) \quad (26)$$

2 整个结合部的接触模型

机械结合部的接触在本质上是 2 个粗糙表面的接触。圆锥顶点法向变形量的概率密度函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (27)$$

式中: σ 为法向变形量的标准差。

连续型随机变量 δ 的函数不一定是连续型的随机变量。将式(2)代入式(17),得

$$a = \pi \left(\frac{\delta \tan\alpha}{9.112} + 1 + \frac{4\alpha}{\pi} \right)^3 = g(\delta) \quad (28)$$

$$g'(\delta) = \frac{3\pi}{9.112} \left(\frac{\delta \tan\alpha}{9.112} + 1 + \frac{4\alpha}{\pi} \right)^2 \tan\alpha > 0 \quad (29)$$

$g(\delta)$ 严格单调增加,故函数 $a = g(\delta)$ 是连续型的随机变量。将式(17)代入式(1),得

$$\delta = 9.112 \left(\frac{a}{\pi} \right)^{1/3} \cot\alpha - 9.112 \left(1 + \frac{4\alpha}{\pi} \right) \cot\alpha = h(a) \quad (30)$$

$$h'(a) = \frac{9.112 \cot\alpha}{3\pi^{1/3} a^{2/3}} \quad (31)$$

从式(28)与(30)可见, $h(a)$ 是 $g(\delta)$ 的反函数。

连续型随机变量 a 的概率密度函数^[17] 为

$$n(a) = f[h(a)]h'(a) \quad (32)$$

将式(30)、(27)和(31)代入式(32),得

$$n(a) = \frac{9.112 \cot\alpha}{3\pi^{5/6} 2^{1/2} \alpha^{2/3}} \exp\left\{-\left[9.112 \left(\frac{a}{\pi} \right)^{1/3} \cot\alpha - 9.112 \left(1 + \frac{4\alpha}{\pi} \right) \cot\alpha\right]^2 / 2\sigma^2}\right\} \quad (33)$$

结合部整体的实际接触面积

$$A_r = \int_0^{a_L} a n(a) da \quad (34)$$

式中: a_L 为最大实际微接触面积。

结合部整体的法向接触载荷

$$F = \int_0^{\delta_L} f_e f(\delta) d\delta, \quad 0 \leq \delta \leq \delta_L \leq \delta_c \quad (35a)$$

$$F = \int_0^{\delta_c} f_e f(\delta) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_L} f_p f(\delta) d\delta, \quad \delta_L > \delta_c \quad (35b)$$

式中: δ_L 为圆锥顶点的法向最大变形量。

将式(10)和(27)代入式(35a),得

$$F = \int_0^{\delta_L} \frac{e \delta l \sin\alpha}{1 + \cot\alpha} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) d\delta, \quad \delta_L \leq \delta_c \quad (36a)$$

将式(10)、(27)和(16)代入式(35b),得

$$F = \int_0^{\delta_c} \frac{e \delta l \sin\alpha}{1 + \cot\alpha} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_L} H a \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) d\delta, \quad \delta_L > \delta_c \quad (36b)$$

结合部整体的法向接触刚度

$$K_n = \int_0^{\delta_c} k_n f(\delta) d\delta, \quad 0 \leq \delta \leq \delta_c \quad (37)$$

3 粗糙表面的接触力学行为分析

根据式(23),可计算出不同表面粗糙度下的法向临界变形量,结果见表 3。由表 3 中不同表面粗糙度所对应的半顶角数据可以看出,在同一表面粗糙度下,半顶角有一个范围,并且不同表面粗糙度所对应的半顶角的范围不同。因此,在一定程度上可以通过半顶角来表征表面粗糙度。由表 3 可见,表面粗糙度越大,半顶角就越小,而法向临界变形量越大(这与文献[1]中的临界面积 a_c 随着分形粗糙度 G 的增加而增大的结论是一致的)。

为了揭示结合部的特点,以粗糙表面材料灰口铸铁 HT250 为例,进行数值仿真分析。HT250 的弹性模量 $E=116\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.27$,屈服强度 $\sigma_y=240\text{ MPa}$ 。

表 3 不同表面粗糙度下法向
临界变形量的计算结果

$R_a/\mu\text{m}$	0.1	0.4	0.8	1.6
α/rad	$7\pi/18$	$\pi/3$	$\pi/6$	$\pi/9$
$\delta_c/\mu\text{m}$	8.48	12.28	26.30	36.16

3.1 表面粗糙度对法向接触载荷的影响

图 5 显示了单个圆锥体的法向弹性接触载荷的变化规律,可见法向弹性接触载荷随着接触半径的增大而增大,随着半顶角的增大先增大后减小。

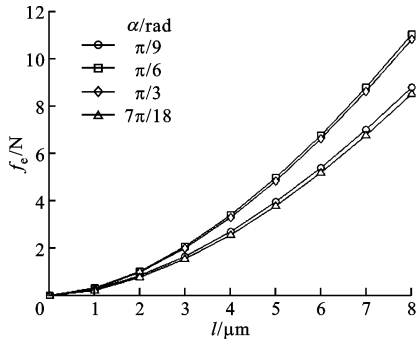
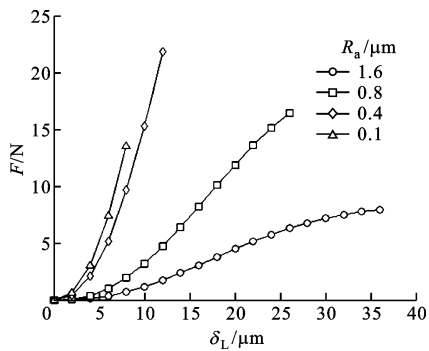


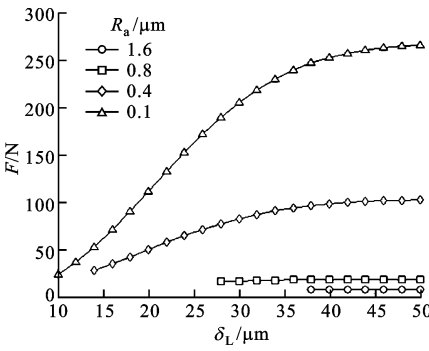
图 5 圆锥体的法向弹性接触载荷的变化规律

图 6 显示了结合部整体法向接触载荷的变化规律。图 6a~6c 皆表明,结合部整体的法向接触载荷随着表面粗糙度的减小而增大,即表面加工越精细,其承载能力更强。

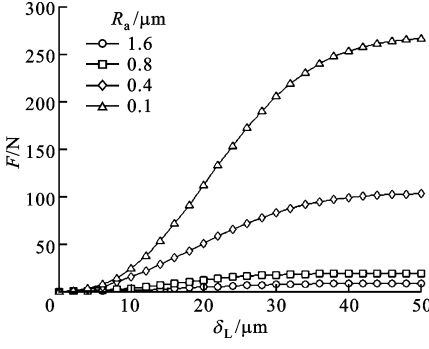
在图 6b 中,下面的 2 条曲线都接近于水平线,意味着当圆锥顶点的法向最大变形量 $\delta_L(>\delta_c)$ 达到某个值后,即使再显著增大,结合部整体的法向接触载荷也只有微小的增加。这种结合部整体法向接触载荷基本保持不变而法向最大变形量显著增加的现象,称为屈服或流动。



(a) $\delta_L < \delta_c$ (弹性变形)



(b) $\delta_L > \delta_c$ (弹性与塑性变形)



(c) $\delta_L \leq \delta_c$ (弹性变形) 或 $\delta_L > \delta_c$ (弹性与塑性变形)

图 6 结合部整体的法向接触载荷随表面粗糙度的变化

象,称为屈服或流动。为了描述弹性与塑性变形的完整过程,将图 6a 与 6b 进行拼接,形成了图 6c。

3.2 表面粗糙度对法向接触刚度的影响

图 7 表示了单个圆锥微凸体与刚性光滑平面之间互相作用的法向接触刚度的变化规律,可见:半顶角越大,单个圆锥微凸体的法向接触刚度也越大;随着圆锥顶点法向变形量的增加,单个圆锥微凸体的法向接触刚度先略微减小,而后保持稳定,但受表面粗糙度的影响很大。

图 8 显示了结合部整体法向接触刚度的变化规律。从图 8a 可见,当法向临界变形量较小时,结合部整体的法向接触刚度随着法向临界变形量的增大而增大,并且随着表面粗糙度的减小而显著增大;从

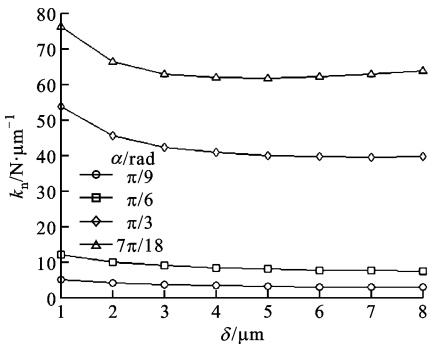
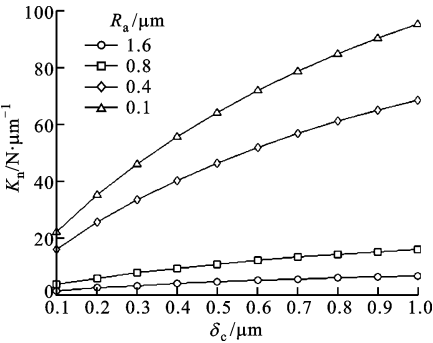
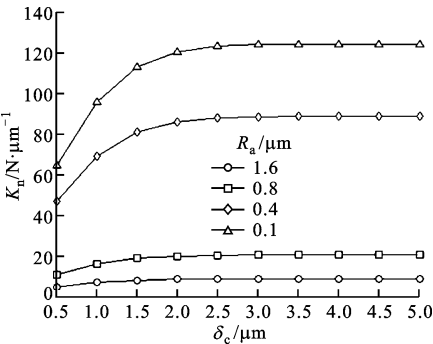


图 7 单个圆锥微凸体法向接触刚度的变化规律

图 8b 可见,当法向临界变形量较大时,结合部整体的法向接触刚度受法向临界变形量的影响很小,但受表面粗糙度的影响很大。



(a)法向临界变形量 δ_c 较小时



(b)法向临界变形量 δ_c 较大时

图 8 结合部整体法向接触刚度的变化规律

4 结 论

- (1)单个圆锥体的法向弹性接触载荷随着半顶角的增加先增大后减小。
- (2)结合部整体的法向接触载荷随着表面粗糙度的减小而增大;当法向最大变形量非常明显地增大时,结合部整体的法向接触载荷随着法向最大变形量的增大只有微小的增加。
- (3)半顶角越大,单个圆锥的法向接触刚度也越大;随着圆锥顶点法向变形量的增加,单个圆锥的法

- 向接触刚度先略微减小,而后保持不变。
- (4)当法向临界变形量较小时,结合部整体的法向接触刚度随着法向临界变形量的增大而近似于线性增加,表面粗糙度越小,结合部整体的法向接触刚度就增加得越明显。
- (5)法向临界变形量较大时,结合部整体的法向接触刚度随法向临界变形量的增加趋于不变,但随表面粗糙度的减小而显著增大。

参考文献:

[1] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. ASME Journal of Tribology, 1991, 113(1): 1-11.

[2] ADAMS G G, NOSONOVSKY M. Contact modeling: forces [J]. Elsevier Tribology International, 2000, 33 (5/6): 431-442.

[3] SEPEHRI A, FARHANG K. Closed-form equations for three dimensional elastic-plastic contact of nominally flat rough surfaces [J]. ASME Journal of Tribology, 2009, 131(4): 041402.

[4] SEPEHRI A, FARHANG K. On elastic interaction of nominally flat rough surfaces [J]. ASME Journal of Tribology, 2008, 130(1): 011014.

[5] DWYER-JOYCE R S, USHIJIMA Y, MURAKAMI Y, et al. Some experiments on the micro-indentation of digital audio tape [J]. Elsevier Tribology International, 1998, 31(9): 525-530.

[6] 刘伟强, 张进华, 洪军, 等. 椭圆抛物体形微凸体弹性接触力学模型 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49 (10): 34-40.

LIU Weiqiang, ZHANG Jinhua, HONG Jun, et al. Elastic contact model of elliptical parabolic asperity [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49 (10): 34-40.

[7] 庄艳, 李宝童, 洪军, 等. 一种结合面法向接触刚度计算模型的构建 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47 (2): 180-186.

ZHUANG Yan, LI Baotong, HONG Jun, et al. A normal contact stiffness model of the interface [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47 (2): 180-186.

[8] 刘会静, 杨国庆, 洪军, 等. 抛物柱切向滑移特性的分析 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11): 75-79.

LIU Huijing, YANG Guoqing, HONG Jun, et al. Finite element analysis for sliding characteristics between two parabolic columns [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(11): 75-79.

- [9] 刘会静, 洪军, 杨国庆, 等. 微凸体切向滑移特性 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 1114-1119.
- LIU Huijing, HONG Jun, YANG Guoqing, et al. Tangential sliding characteristics of asperities [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(6): 1114-1119.
- [10] 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.
- [11] 许志倩, 闫相祯, 杨秀娟, 等. 随机抽样在粗糙表面接触力学行为分析中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(5): 102-108, 113.
- XU Zhiqian, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan, et al. Contact behavior analysis for rough surfaces with random sampling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(5): 102-108, 113.
- [12] 许志倩, 闫相祯, 杨秀娟, 等. 基于分形理论和随机抽样的机加工表面粗糙度轮廓曲线几何形貌共性表征 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1134-1145.
- XU Zhiqian, YAN Xiangzheng, YANG Xiujuan, et al. Common characterization of the machined surface roughness profile geometric morphology based on fractal theory and random sampling [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(6): 1134-1145.
- [13] 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, 104.
- 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, 104.
- [14] JOHNSON K L. Contact mechanics [M]. 9th printing. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2004: 165, 235.
- [15] POPOV V L. Contact mechanics and friction: physical principles and applications [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2010: 63.
- [16] SNEDDON I N. The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile [J]. Elsevier International Journal of Engineering Science, 1965, 3(1): 47-57.
- [17] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 52.

本刊相关文献链接

- 黄康, 徐锐, 陈奇. 小位移旋量和响应面法相结合的齿轮公差分析模型构建方法. 2017, 51(9): 77-84. [doi: 10.7652/xjtuxb201709011]
- 侯祥颖, 方宗德. 弧齿锥齿轮的向量式有限元静态啮合分析. 2017, 51(9): 85-91. [doi: 10.7652/xjtuxb201709012]
- 方斌, 张进华, 洪军, 等. 联合载荷作用下高速角接触球轴承快速计算方法及接触角分析. 2017, 51(6): 115-121. [doi: 10.7652/xjtuxb201706019]
- 温淑花, 张学良, 陈永会, 等. 结合面切向接触等效黏性阻尼分形模型. 2017, 51(1): 1-8. [doi: 10.7652/xjtuxb201701001]
- 侯祥颖, 方宗德. 考虑边缘接触的弧齿锥齿轮有限元接触分析. 2016, 50(11): 69-74. [doi: 10.7652/xjtuxb201611011]
- 王庆朋, 张力, 杜宝程, 等. 粗糙表面确定性接触模型中峰的再定义. 2016, 50(11): 115-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201611018]
- 韩振华, 石万凯, 肖洋轶, 等. 新型复合摆线外啮合圆柱齿轮副的传动特性分析. 2016, 50(9): 10-19. [doi: 10.7652/xjtuxb201609002]
- 陈永会, 张学良, 温淑花, 等. 粗糙表面弹塑性接触连续光滑指数函数模型与法向接触刚度研究. 2016, 50(7): 58-67. [doi: 10.7652/xjtuxb201607010]
- 田红亮, 郑金华, 陈甜敏, 等. 直线运动滚动导轨副的法向接触力学模型. 2016, 50(5): 1-11. [doi: 10.7652/xjtuxb201605001]
- 朱爱斌, 何胜利, 邹超, 等. 考虑接触刚度的含间隙铰接副动态磨损分析. 2016, 50(5): 12-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201605002]
- 倪高翔, 朱才朝, 宋朝省, 等. 平行轴渐开线变厚齿轮传动的几何设计与啮合特性分析. 2016, 50(5): 57-64. [doi: 10.7652/xjtuxb201605009]
- 雷默涵, 姜歌东, 梅雪松, 等. 高速球轴承微接触弹流摩擦及生热分析. 2016, 50(4): 81-88. [doi: 10.7652/xjtuxb201604013]
- 田红亮, 余媛, 陈甜敏, 等. 考虑表面粗糙度和几何曲率的两球体接触问题. 2016, 50(3): 1-7. [doi: 10.7652/xjtuxb201603001]
- 刘雨薇, 张卫正, 叶福浩. 单个微凸体接触过程中的闪点温度研究. 2016, 50(3): 90-93. [doi: 10.7652/xjtuxb201603014]
- 王庆朋, 张力, 尚会超, 等. 考虑应变硬化的混合弹塑性接触模型. 2016, 50(2): 132-137. [doi: 10.7652/xjtuxb201602022]
- 田红亮, 陈甜敏, 郑金华, 等. 平行轴圆柱副接触分析. 2016, 50(1): 8-15. [doi: 10.7652/xjtuxb201601002]

(编辑 葛赵青)