

随机抽样在粗糙表面接触力学 行为分析中的应用

许志倩¹, 闫相祯², 杨秀娟², 秦志坚³, 丁文超³

(1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 266555, 山东青岛; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 266555, 山东青岛; 3. 江苏金石机械集团有限公司, 211600, 江苏金湖)

摘要: 为研究表面粗糙度对接触表面力学行为的影响规律,结合表面粗糙度的加工参数和随机抽样方法,对服从正态分布和预设粗糙度的表面轮廓曲线进行了模拟.根据统计得到的模拟轮廓曲线几何形态的共性特征,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,推导出平面几何压力与粗糙表面微凸体变形间的定量关系.分析结果表明:服从正态分布的轮廓高度曲线中的峰角顶点数目约为样本容量的1/3;圆锥压入平面时平均压力/材料纯剪应力的比值与其半角呈二次方关系;表面粗糙度越大,轮廓曲线的起伏越大,两接触面相互嵌合越容易;表面粗糙度越大,材料屈服强度对接触微凸体变形的影响也越明显.

关键词: 接触;粗糙表面;轮廓曲线;正态分布

中图分类号: TE931.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0102-07

Contact Behavior Analysis for Rough Surfaces with Random Sampling

XU Zhiqian¹, YAN Xiangzhen², YANG Xiujuan², QIN Zhijian³, DING Wenchao³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

3. Jiangsu Jinshi Machinery Group, Jinhu, Jiangsu 211600, China)

Abstract: The influences of surface roughness on the contact behavior are investigated. The profile curves obeying normal distribution and with preset surface roughness are simulated by the processing parameters of surface roughness and Monte Carlo random sampling. From the microgeometric characteristics of the simulated profile curves with different surface roughness, 3D contact model is constructed with the cone as asperity, and the quantitative relationships between the plane pressure and the asperity deformation are obtained. The analysis reveals that the number of peaks in simulated profile curve with normal distribution accounts for about a third of the sample size; the ratios of the plane pressure to the material pure shear stress vary quadratically with the half core angle; the asperities get higher with the increasing in surface roughness, and the two rough surfaces implant each other more easily; with the increasing surface roughness, the material yield strength impacts the asperity deformation even more apparently.

Keywords: contact; rough surface; profile curve; normal distribution

收稿日期: 2011-09-26. 作者简介: 许志倩(1982—),女,博士,讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105381); 国家“973计划”资助项目(2010CB226706); 国家科技重大专项资助项目(2008ZX05017, 2008ZX05036); 中国石油大学自主创新科研计划资助项目(11CX04037A).

网络出版时间: 2012-03-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120312.1028.001.html>

由于机加工金属接触表面状态可直接影响机械系统的性能,特别是在高承载等恶劣工况下问题更为突出,因此研究粗糙表面间的接触力学行为,是保证机械系统正常可靠运行的关键.国内外学者对有关粗糙表面接触行为的研究做了大量工作,陈国定等人^[1]采用有限元接触分析和粗糙表面形貌概率分析的方法,揭示了橡胶金属摩擦副在摩擦过程中接触载荷、实际接触面积和摩擦力之间的定量关系.张学良等人^[2]以分形理论为基础,从理论上提出了具有尺度独立性的球面与平面接触刚度的分型模型.赵永武等人^[3]依据表面微凸体变形的连续性和光滑性原理,提出了一种新的粗糙表面弹塑性接触模型,研究得到了单个微凸体在载荷逐渐增加时的变形规律. Pei 等人^[4]建立了粗糙接触表面的有限元模型, Prasanta、Kogut 等人^[5-6]对分形表面进行了有限元接触分析,刘天祥等人^[7-8]建立了考虑屈服应力温度的粗糙表面热弹塑性接触无网格法的数值计算模型,以研究摩擦力和不同热输入情况下圆柱体与弹塑性平面的接触力学特性.汪家道等人^[9]根据椭圆弹塑性接触模型,提出了流量因子影响模型,给出了几个该模型的应用计算实例.

通过对以上工作的研究发现:①以往大都基于球体与平面接触模型,接触应力和变形求解方法多采用数字仿真或有限元模拟,缺少针对锥体接触力学行为分析的解析方法;②目前,很多方案中都没有考虑表面粗糙度对接触特性的影响问题,使得理论研究无法指导实际工艺操作参数.此外,上述用于建立微接触随机模型的过程复杂,计算求解方法涉及积分等繁杂过程,因此限制了粗糙表面接触力学行为分析的简便和通用程度.

本文未采用受分辨率影响较大的粗糙表面轮廓曲线的实验室测量方法,而是采用 Monte Carlo 随机抽样方法,依据常用机加工参数模拟生成轮廓曲线高度分布数列,通过对模拟曲线特征形态值的定量计算,得到服从正态分布的粗糙面轮廓曲线的特征共性.根据该特性将粗糙表面微凸体简化为圆锥体,并建立了相应的三维粗糙平面接触力学模型,推导出平面几何压力与粗糙表面微凸体变形之间的解析量关系式,从而提供了一种计算方法比较简便的粗糙表面接触力学行为的分析方法.

1 基于 Monte Carlo 抽样的粗糙表面轮廓曲线模拟

1.1 Monte Carlo 随机正态分布抽样

实际粗糙表面的轮廓曲线是一条连续且处处不可微的复杂曲线,将其离散成许多大小不一的数值点 $Z_1, Z_2, \dots, Z_i$, 这些数值点代表曲线上等间距处的轮廓高度.为研究不同表面粗糙度下的接触表面微观形貌共性,未采用受仪器测量精度影响较大的实验室测量数据的方法,而是假设表面轮廓高度分布曲线接近于高斯分布,依据 Monte Carlo 随机正态分布抽样公式,生成服从预设表面粗糙度要求的粗糙表面轮廓曲线高度数据样本数列.表面轮廓高度的高斯分布概率密度曲线函数为

$$\Psi(z) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: Z 为粗糙表面轮廓曲线高度; σ 为轮廓平均高度的均方根.从理论上讲,高斯分布曲线的范围为 $-\infty \sim +\infty$,但实际上在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 之间已包含了分布的 99.73%.因此,以 $\pm 3\sigma$ 作为高斯分布的极限,在其以外所产生的误差可以忽略不计,从而使测量和计算得以简化.

根据 Monte Carlo 方法的解题步骤,先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,然后以 $Z_1, Z_2, \dots, Z_i$ 为随机变量,根据 Monte Carlo 随机正态分布抽样得到轮廓曲线高度的样本数列.最后,将该数列点依次用直线连接起来,即为一条高低不平的粗糙表面轮廓曲线.

Monte Carlo 随机正态分布的抽样如下

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \mu + \beta(-2\ln c_1)^{1/2} \cos 2\pi c_2 \\ x_2 &= \mu + \beta(-2\ln c_1)^{1/2} \sin 2\pi c_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: μ 为样本均值; β 为样本标准差; c_1, c_2 为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数列.

由式(2)对高斯分布的随机变量进行 Monte Carlo 抽样,但需要确定样本的均值和标准差.根据表面粗糙度参数的定义,将轮廓算术平均偏差 R_a 作为轮廓高度数列的样本均值,依据 $\pm 3\sigma$ 原则将最大峰谷距 R_y 与高斯分布的极限范围 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 对应,得到 $R_y \approx 6\sigma$,由此可以通过选定 R_y 的范围来得到样本的标准差,即 $\beta \approx R_y/6$.

1.2 Monte Carlo 抽样参数的确定及粗糙表面轮廓曲线的模拟

在机械设计手册中给出了一系列不同配合表面所选用的 R_a 值.针对密封结构的参数,将本文所研

究的 R_a 值限定在 $0.1\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 内,即高斯分布抽样均值的范围为 $0.1\sim 1.6\ \mu\text{m}$. 根据文献[10]中给出的部分加工精度等级对应的 R_y 值,并根据 1.1 节中的假设,最终确定 Motel Carlo 随机抽样的 μ 、 β 见表 1.

表 1 Monte Carlo 随机正态分布抽样的参数值			
加工精度等级	$R_a/\mu\text{m}$	$\mu/\mu\text{m}$	$\beta/\mu\text{m}$
7	1.6	1.6	1.333 33~1.566 67
8	0.8	0.8	0.783 33
9	0.4	0.4	0.4
10	0.2	0.2	0.2
11	0.1	0.1	0.1

为使抽样所得轮廓高度的样本数列值尽量符合预设表面粗糙度,在选用轮廓高度均值误差 ϵ_μ 的基础上,引入最大峰谷距误差 ϵ_y 作为检验标准

$$\epsilon_y = \frac{|(Z_{\max}(x) - Z_{\min}(x)) - R_y|}{R_y}$$
(3)

$$\epsilon_\mu = \frac{\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z(x_i) - R_a \right|}{R_a}$$
(4)

式中: $Z_{\max}(x)$ 、 $Z_{\min}(x)$ 分别为样本数列中的最大、最小值. 将 ϵ_μ 、 ϵ_y 同时作为鉴定标准,通过试算和重复抽样,将最接近预设表面粗糙度的样本数列取出,作为粗糙表面轮廓曲线的模拟高度值,详细流程如图 1 所示.

通过计算机编程抽样计算发现:当样本容量为 1 000 时,抽样次数在 30 左右可使 μ 和 β 的相对误差均小于 1%;当样本容量大于 2 000 时,达到同样精度所需的抽样次数仅为 1~2 次. 同时,考虑精度和数据的便捷性,最终选定样本容量为 1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000. 图 2 是 R_a 为 $0.1\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 、样本容量为 2 500 时,通过 Monte Carlo 抽样方法模拟获得的粗糙表面轮廓曲线,可以看出,表面粗糙度参数越大,轮廓曲线起伏就越大,表面也越粗糙.

2 粗糙表面三维接触力学模型的建立

2.1 轮廓模拟曲线微观形貌几何共性分析

从模拟轮廓曲线放大图(见图 3)中可以看到,轮廓曲线是由许多高度、角度各不相同的三角峰组成. 为了定量地描述轮廓曲线的具体形貌,对每个三角峰的顶角和高度进行如下计算. 例如,峰角 θ 是由

1、2 点的夹角 $\theta_{1,2}$ 和 2、3 点的夹角 $\theta_{2,3}$ 组成的,设点 1、2、3 的坐标分别为 $(x_1, Z(x_1))$ 、 $(x_2, Z(x_2))$ 、 $(x_3, Z(x_3))$,则单个峰角和峰高的计算公式为

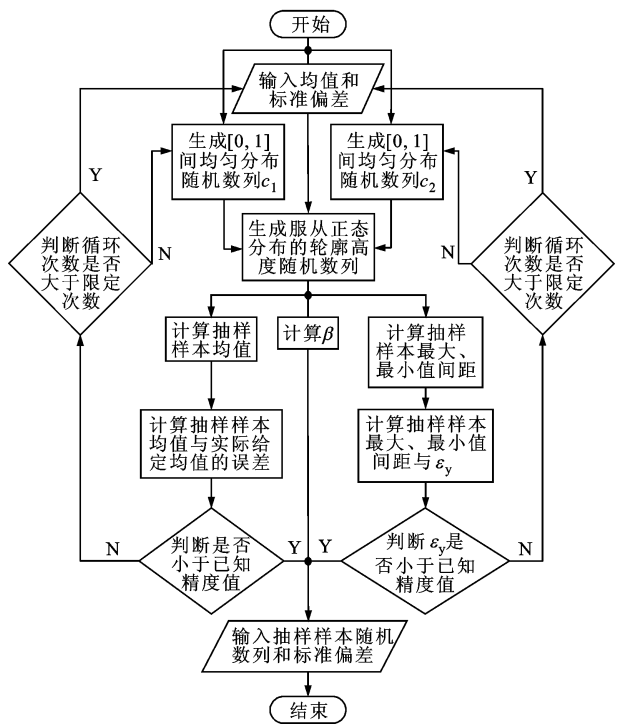


图 1 粗糙面模拟轮廓曲线高度数列值抽样流程图

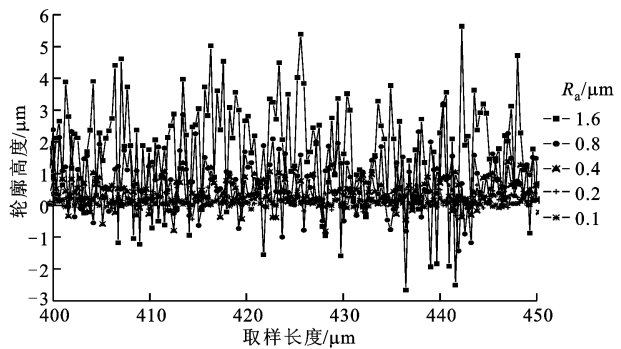
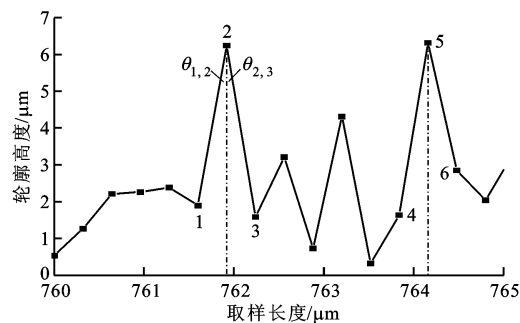


图 2 不同表面粗糙度下的轮廓表面曲线



1~6: 轮廓曲线高度的取样数据点

图 3 模拟轮廓曲线放大图

$$\theta = \theta_{1,2} + \theta_{2,3} = \arctan \left[\frac{x_2 - x_1}{Z(x_2) - Z(x_1)} \right] + \arctan \left[\frac{x_3 - x_2}{Z(x_2) - Z(x_3)} \right]$$
$$h = \frac{h_{1,2} + h_{2,3}}{2} = Z(x_2) - \frac{Z(x_1) + Z(x_3)}{2}$$

由此推广可以得到任一峰角和峰高的计算通式

$$\theta_i = \theta_{(i-1),i} + \theta_{i,(i+1)} = \arctan \left(\frac{T}{Z(x_i) - Z(x_{(i-1)})} \right) + \arctan \left(\frac{T}{Z(x_i) - Z(x_{(i+1)})} \right) \tag{5}$$
$$h_i = \frac{h_{(i-1),i} + h_{i,(i+1)}}{2} = Z(x_i) - \frac{Z(x_{(i-1)}) + Z(x_{(i+1)})}{2} \tag{6}$$

式中: T 为取样点间隔; h 为峰高; $h_{1,2}$ 、 $h_{2,3}$ 分别为 1、2 点及 2、3 点的垂向距离。

由式(5)、式(6)可以计算得到组成轮廓曲线的所有三角峰的峰角和峰高值。因三角峰数目多且峰高数值大小无固定规律,所以选用峰角和峰高的平均值

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N_P} \sum_{i=1}^{N_P} \theta_i; \quad \bar{h} = \frac{1}{N_P} \sum_{i=1}^{N_P} h_i \tag{7}$$

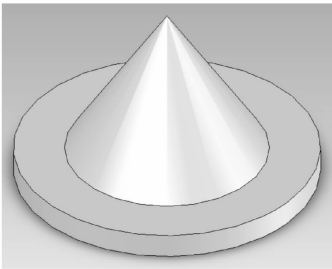
式中: $\bar{\theta}$ 为平均峰角; $\bar{h}$ 为平均峰高; N_P 为三角峰数目。此外,需要注意的是,并非每个数据点都代表一个峰角,如图 3 中的点 4,在计算时需要将其剔除。判定准则为:假设峰角顶点的高度为 $Z_{\max}$,其临近左、右 2 点的高度分别为 Z_1 、 Z_2 ,当 $Z_{\max} > Z_1$ 且 $Z_{\max} > Z_2$ 时,该点为峰角顶点,否则不予选取。表 2 为表面粗糙度下轮廓曲线 $\bar{\theta}$ 、 $\bar{h}$ 、 N_P 在样本容量 N 中所占比例的统计值。

从表 2 中可以发现模拟曲线有以下几点共性:①表面粗糙度的增大和取样点间隔的减小,使得平均峰角减小;②平均峰高随表面粗糙度的增大而增加;③在服从正态分布的轮廓高度曲线中,峰角顶点数目约为样本容量的 1/3。

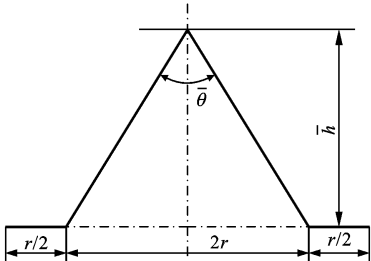
2.2 粗糙表面微凸体模型的建立

根据轮廓曲线的等腰三角峰分形模型,建立的粗糙表面微凸体的圆锥模型如图 4 所示。将复杂轮廓曲线简化为由 N_P 个等腰三角峰组成,三角峰的顶角为平均峰角,高度为平均峰高,则等腰三角峰的底边半长为

$$a = \bar{h} \tan(\bar{\theta}/2) \tag{8}$$



(a)微凸体单元三维示意图



(b)微凸体单元剖面示意图

r :圆锥底面半径

图 4 粗糙表面微凸体单元圆锥示意图

表 2 不同表面粗糙度下三角峰参数的计算结果

$R_a/\mu\text{m}$	$T/\mu\text{m}$	$\bar{\theta}/(^{\circ})$	$\bar{h}/\mu\text{m}$	N_P	$N_P \cdot N^{-1}$
0.1	0.800	161.775	0.129	339	0.339
	0.533	154.768	0.121	500	0.333
	0.400	146.854	0.122	664	0.332
	0.320	139.043	0.124	813	0.325
	0.267	132.832	0.123	980	0.327
0.2	0.800	145.541	0.256	339	0.339
	0.5330	134.160	0.237	500	0.333
	0.400	122.378	0.238	664	0.332
	0.320	111.758	0.240	813	0.325
	0.267	104.107	0.236	980	0.327
0.4	0.800	145.541	0.496	339	0.339
	0.533	134.160	0.452	500	0.333
	0.400	122.378	0.454	664	0.332
	0.320	111.758	0.457	813	0.325
	0.267	104.107	0.451	980	0.327
0.8	0.800	90.567	0.926	338	0.338
	0.533	76.695	0.842	500	0.333
	0.400	64.405	0.852	664	0.332
	0.320	54.677	0.861	813	0.325
	0.267	49.018	0.853	980	0.327
1.6	0.800	61.364	1.774	339	0.339
	0.533	50.688	1.617	500	0.333
	0.400	41.443	1.654	664	0.332
	0.320	33.953	1.680	813	0.325
	0.267	30.247	1.672	980	0.327

2.3 单个微凸体与平面接触力学模型的计算

文献[11]中给出无摩擦楔体垂直作用于固体表面时的平均压力为

$$p_m = \frac{p}{2d} = 2k(1 + \varphi), \quad k = E/2 \quad (9)$$

式中: p 为几何面积的平均接触压力; d 为接触半宽; k 为纯剪不变应力; E 为材料单向拉伸时的屈服应力; φ 为滑移线转角。

在某些情况下,按 Tresca 准则作塑性流动的材料可以建立滑移线场,用于描述其应力状态特征,这种滑移线场一定要与相应的轴对称变形的速度场一致。根据 Shield 的理论, Lockett 于 1963 年建立了半锥角超过 52.5° 的刚性无摩擦圆锥压入平板表面时的场,其平均压入力与半锥角的关系^[11]如图 5 所示。

由图 5 中可以看出:①楔体/锥体压入平面时 $p_m/2k$ 与锥体半角呈二次方关系;②三维锥体与二维楔体的 $p_m/2k$ 趋势相同且近乎平行,因此可用倍数关系将二者联系起来。当楔体压入平面时,锥体半角间的关系为

$$\frac{p_m}{2k} = 0.965\,54 + 0.008\,77\alpha + 1.039\,57 \times 10^{-4}\alpha^2 \quad (10)$$

当楔体被平面压扁时,锥体半角间的关系为

$$\frac{p_m}{2k} = 0.749\,45 + 0.020\,5\alpha \quad (11)$$

由楔体压力计算式(10)、(11)可以推导出适用于三维锥体的平均压力计算式。锥体压入平板时

$$p_m = 2.24k(0.965\,54 + 0.008\,77\alpha + 1.039\,57 \times 10^{-4}\alpha^2) \quad (12)$$

锥体被平板压扁时

$$p_m = 2.24k(0.749\,45 + 0.020\,5\alpha) \quad (13)$$

式中: α 为楔体或锥体半角。

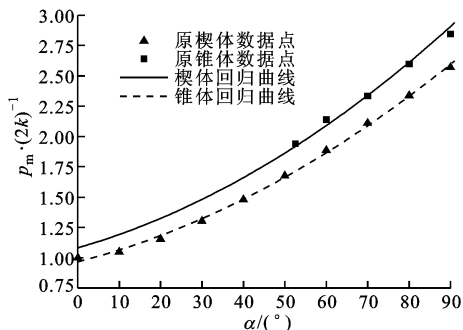


图 5 $p_m/2k$ 随锥体压入平面半锥角的变化趋势

3 不同粗糙表面的接触力学行为分析

3.1 粗糙表面接触力学模型的建立

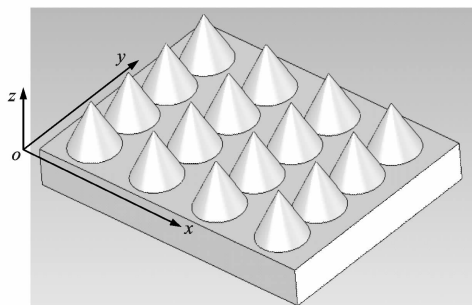
粗糙表面接触力学模型建立在以下几点假设的基础上:①表面微凸体为前面建立的具有粗糙表面轮廓模拟曲线几何共性的圆锥体,其剖面为等腰三角峰;②微凸体分布是各向同性的,且在表面接触过程中只有微凸体发生变形,但不考虑微凸体之间的相互作用。这些假设与常用的 GW、CEB 模型所做的假设基本一致。

为了符合通过分析得到的 $N_p/N=1/3$ 的规律,将圆锥体按照 x 轴方向间隔 b 、 y 轴方向紧密贴合的方式排列,从而保证了 x 、 z 剖切平面内的轮廓曲线与简化模型特征相同,如图 6 所示。

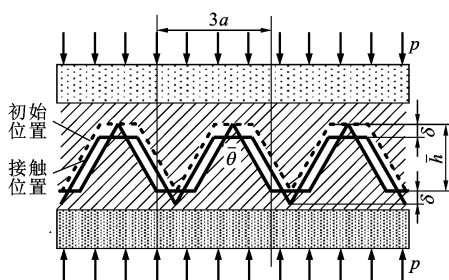
3.2 粗糙表面接触力学计算公式的推导

理论上的接触面预紧压应力计算是以几何平面为基础的,如图 6b 所示。当两粗糙表面刚刚接触时,只有圆锥尖端与平面接触,接触面积非常小,当受到垂直载荷作用时,圆锥嵌入或被压扁的距离为 δ ,此时每个圆锥相对于原来的接触面积增加了 $\pi(\delta \tan(\bar{\theta}/2))^2$ 。

为了得到接触面压应力与圆锥体压入深度的关系,需要将几何平面压力重新分配到每个微小圆锥体上。假设内、外接触面由表面粗糙微凸体层和几何基体层组成(如图 6a、b 所示),由于几何基体层受到



(a) 三维立体形貌模拟图



(b) 三维立体形貌剖面图

图 6 粗糙表面单元接触密封微观示意图

挤压变形而产生接触压力,经传递后到达微凸体层圆锥单元底部,因此通过这样的假设可以比较容易地求出每个圆锥体接触表面的平均压力为

$$p_m = \frac{pA_a}{A_p} \tag{14}$$

式中: A_a 为表观接触面积,即接触表面的宏观面积,由所选接触单元的外部尺寸决定; A_p 为粗糙表面实际接触面积,即所有圆锥体与平面接触面积的和。

如图 6 所示,该接触单元的宽为圆锥底面的直径 $2a$,长为 l ,则表观接触面积为

$$A_a = 2al \tag{15}$$

如图 6 所示,在一个接触单元里含有 2 个圆锥接触面积, N_r 个接触单元就有 $2N_r$ 个圆锥接触面积 $\pi(\delta \tan(\bar{\theta}/2))^2$ 。由 $N_p/N=1/3$ 的规律,可知长度 l 内的接触单元总数为

$$N_r = \frac{l}{3a} \tag{16}$$

$$p_m = \frac{3a^2 p}{\pi(\delta \tan(\bar{\theta}/2))^2} \tag{17}$$

用圆锥半角和屈服强度替代式(12)、式(13)中的 α 和 $2k$,再由式(17)中的 p_m 与 δ 的关系,推导出圆锥体压入时 δ 与 p 的数学关系式如下。

锥体压入平面时

$$\delta = \frac{a}{\tan(\bar{\theta}/2)} \cdot \left(\frac{3p}{1.12E(0.965\,54 + 0.008\,77(\bar{\theta}/2) + 1.039\,57 \times 10^{-4}(\bar{\theta}/2)^2)} \right)^{1/2} \tag{18}$$

锥体被压扁时

$$\delta = \frac{a}{\tan(\bar{\theta}/2)} \left(\frac{3p}{1.12E(0.749\,45 + 0.020\,5(\bar{\theta}/2))} \right)^{1/2} \tag{19}$$

由式(8)可将式(18)、式(19)分别修改为

锥体压入平面时

$$\delta = \bar{h} \left(\frac{3p}{1.12E(0.965\,54 + 0.008\,77(\bar{\theta}/2) + 1.039\,57 \times 10^{-4}(\bar{\theta}/2)^2)} \right)^{1/2} \tag{20}$$

锥体被压扁时

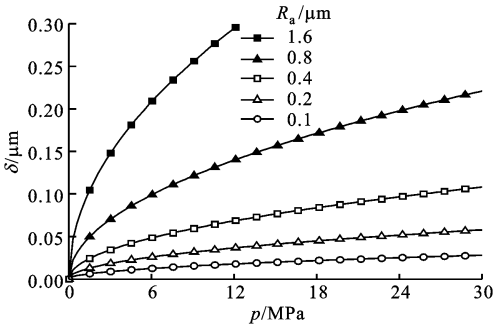
$$\delta = \bar{h} \left(\frac{3p}{1.12E(0.749\,45 + 0.020\,5(\bar{\theta}/2))} \right)^{1/2} \tag{21}$$

由式(20)、式(21)可以看出,粗糙表面相互嵌合的距离与锥体高度、圆锥顶角、材料屈服强度和几何

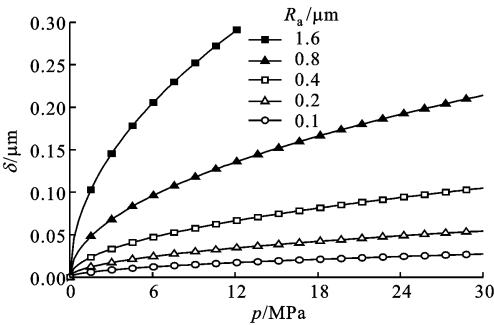
平均压力有关。

3.3 粗糙表面接触力学计算公式的推导

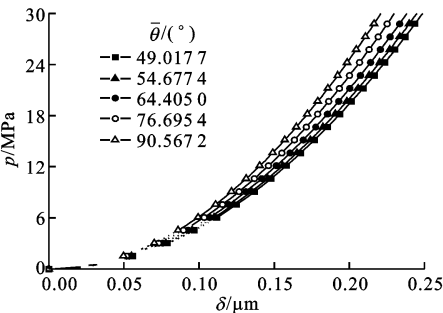
依据表 2 中的 $\bar{h}$ 、 $\bar{\theta}$ 等数据,利用式(20)、式(21)计算得到 R_a 为 $0.1 \sim 1.6\,\mu\text{m}$ 时 δ 与 p 的关系,如图 7 所示。根据计算结果得到以下规律:①锥体压入时 δ 随 p 增大呈非线性增加趋势,且表面粗糙度越大增加速率越快,如图 7a、7b 所示;②同一粗糙度下, $\bar{\theta}$ 越小, δ 相同时所需 p 也越小,如图 7c 所示;③取 δ 与 $\bar{h}/2$ 的比值等于 1 时为临界点,表面粗糙度为 $0.1\,\mu\text{m}$ 的临界点的几何平均压力远大于 $1.6\,\mu\text{m}$ 时的平均压力(见图 7d),在 $0.1 \sim 0.8\,\mu\text{m}$ 内且锥体变形相同时,锥体压入平面的预压力大于锥体被压扁所需的预压力,而当粗糙度大于 $0.8\,\mu\text{m}$ 后则相反,如图 7e 所示;④当 p 为定值时, δ 随 E 增大呈非线性减小,且表面粗糙度越大,对材料屈服强度的影响程度就越明显,如图 7f 所示。



(a) 锥体压入深度与 p 的关系



(b) 锥体被压扁距离与 p 的关系



(c) 不同 $\bar{\theta}$ 时 p 与 δ 的关系($R_a=0.8$)

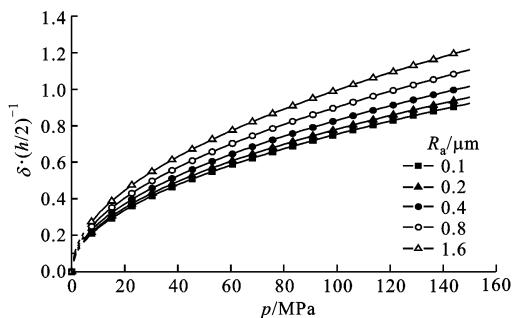
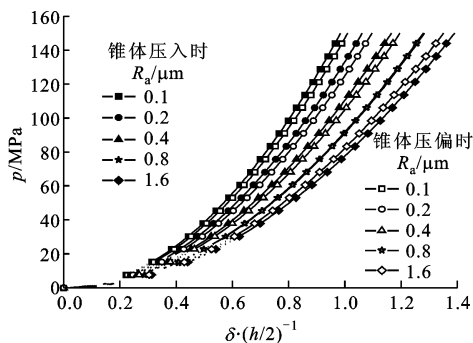
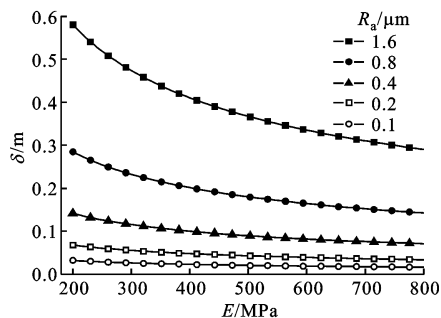
(d) $\delta \cdot (h/2)^{-1}$ 与 p 的关系(e) 锥体压入或被压扁时 p 与 $\delta \cdot (h/2)^{-1}$ 的关系(f) δ 与 E 的关系

图7 几何平均压力与锥体压入、压扁距离的关系曲线

4 结 论

本文提出的粗糙表面接触力学行为解析分析方法,与已采用的数组仿真和有限元模拟相比更为简单直观。通过 Monte Carlo 正态随机抽样方法模拟得到符合预设粗糙度的表面轮廓曲线,借助计算机编程得到正态分布曲线形态的共性:①表面粗糙度越大,轮廓曲线的峰谷距也越大,但平均峰角值越小;②服从正态分布的轮廓高度曲线中的峰角顶点数目约为样本容量的 $1/3$ 。

根据统计得到的模拟轮廓曲线几何形态的共性特征,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,推导出平面几何压力与粗糙表面微

凸体变形之间的解析量关系式。通过粗糙表面几何平均压力与微凸体变形量间的定量关系,得到表面粗糙度、材料屈服强度对粗糙表面接触力学行为的影响规律为:①表面粗糙度越大则两接触面相互嵌合越容易,表面微凸体先相互压入再挤压变形,而加工精度较高的接触面时则相反;②表面粗糙度越大,材料屈服强度对接触面变形的影响程度就越明显。

参考文献:

- [1] 陈国定,徐华,虞烈. 基于粗糙接触理论的橡胶-金属摩擦副的摩擦分析[J]. 西安交通大学学报,2002,36(3):322-324.
CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie. Friction analysis of elastomer-metal pair based on rough contact theory[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(3): 322-324.
- [2] 张学良,温淑花. 基于接触分形理论的结合面切向接触刚度分形模型[J]. 农业机械学报,2002,33(3):91-97.
ZHANG Xuiliang, WEN Shuhua. A fractal model of tangential contact stiffness of joint surfaces based on the contact fractal theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3): 91-97.
- [3] 赵永武,吕彦明,蒋建忠. 新的粗糙表面弹塑性接触模型[J]. 机械工程学报,2007,43(3):95-101.
ZHAO Yongwu, LV Yanming, JIANG Jianzhong. Mew elastic-plastic model for the contact of rough surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 95-101.
- [4] PEI L, HYUN S, MOLINARI J F. Finite element modeling of elasto-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(11): 2385-2409.
- [5] PRASANTA S, NILOY G. Finite element contact analysis of fractal surfaces[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2007, 40(14): 4245-4252.
- [6] KOGUT L, ESTION I. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 2002, 69(5): 657-663.
- [7] 刘天祥,刘更,谢琴,等. 粗糙表面热弹塑性接触问题的无网格法[J]. 机械工程学报,2009,45(1):20-26.
LIU Tianxiang, LIU Geng, XIE Qin, et al. Mesh-free method for thermal elasto-plastic contact of rough surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1): 20-26.
- [8] 张征,刘天祥,刘更,等. 粗糙表面热弹塑性接触自适应

应无网格分析 [J]. 机械工程学报, 2008, 19(20): 2486-2490.

ZHANG Zheng, LIU Tianxiang, LIU Geng, et al. Adaptive meshless analysis on thermal-elasto-plastic contact of rough surfaces [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 19(20): 2486-2490.

[9] 刘天祥,刘更. 二维接触问题的无网格伽辽金-有限元耦合方法 [J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(4): 499-503.

LIU Tianxiang, LIU Geng. On applying EFG-FE (element-free Galerkin-finite element) coupling method to solving 2-D contact problems [J]. Journal of North-western Polytechnical University, 2003, 21(4): 499-503.

[10] 汪家道,陈大融,孔宪梅. 粗糙峰微接触及其对润滑的影响 [J]. 摩擦学学报, 1999, 19(4): 362-367.

WANG Jiadao, CHEN Darong, KONG Xianmei. Asperity microcontact and its influence on partial hydrodynamic lubrication of rough surfaces [J]. Tribology, 1999, 19(4): 362-367.

[11] JOHNSON K L. 接触力学[M]. 徐秉业,罗学富,刘信声,等译. 北京:高等教育出版社,1992: 183.

(编辑 管咏梅)