

粗糙峰微接触及其对润滑的影响

汪家道, 陈大融, 孔宪梅

(清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 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。计算结果表明, 该模型与粗糙表面的实际润滑状况有较好的一致性。通过算例分析, 发现粗糙峰弹塑性变形对流量因子的影响主要决定于表面综合属性、弹性和塑性变形量。

关键词: 弹塑性变形; 部分流体润滑; 粗糙峰; 流量因子

中图分类号: TH 117

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(1999)04-0362-06

混合润滑区域中, 接触表面上的粗糙峰变形对表面间的润滑产生很大的影响, 如何计算该变形对流体润滑的影响是解决混合润滑问题的关键。由于问题的复杂性, 研究者大多倾向于对表面粗糙峰接触和部分流体润滑进行分别考察。关于粗糙峰接触的研究主要基于求数值解和建立微接触随机模型 2 种方法。对求数值解, 一些学者曾给出简单算例, 并对其存在的问题进行了研究^[1~4], 但其计算量大和收敛困难等问题仍未得到很好的解决, 特别是当同时考虑表面间的流体润滑时, 问题将变得更加复杂。微接触模型对实际形貌进行一定的简化, 它具有计算量小的优点。研究人员先后提出了 GW、PW 和 CEB 等^[5~7]微接触随机模型。这些模型都具有接触峰的变形或几何形状过于简化的缺点。1998 年 Jeng 提出了椭圆接触峰模型^[8], 视粗糙峰为椭圆双曲面体, 这更接近粗糙峰的实际情况。本文在此模型基础上, 研究表面粗糙峰弹塑性变形对平均 Reynolds 方程流量因子数值求解^[9]的影响。

1 理论

1.1 椭圆接触峰弹塑性模型

1.1.1 弹性接触

图 1 示出了单个椭圆接触峰弹性变形几何模型。设接触椭圆的长、短轴半径分别为 a 和 b ($a > b$), 定义椭圆偏心率 e 和等效曲率半径 R_m 为:

$$e^2 = 1 - (b/a)^2 \quad (1)$$

$$1/R_m = 0.5(1/R_x + 1/R_y) \quad (2)$$

式中: R_x 和 R_y 为相对主曲率半径。由 Hertz 弹性理论^[10]可推导出弹性变形 δ 所表示的接触椭圆的尺寸 a 和 b 为:

$$a = \left[\frac{E(e) R_m \delta}{K(e) (1 - e^2)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad b = \left[\frac{E(e) R_m \delta}{K(e)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

1998-12-28 收到初稿, 1999-04-12 收到修改稿/联系人汪家道

汪家道 男, 28 岁, 博士, 从事表面形貌及弹流润滑方面的研究

式中: $K(e)$ 和 $E(e)$ 分别是第一类和第二类椭圆积分^[8].

1.1.2 塑性接触

设接触峰刚发生塑性变形时的变形量即最大弹性变形为 δ_e . 据文献[8], δ_e 可表示为:

$$\delta_e = \frac{K(e)E(e)}{(\pi/2)^2} R_m \left(\frac{H}{E} \right)^2. \quad (4)$$

式中: H 为较软表面的硬度. 如图2所示, 设刚开始发生塑性变形时接触椭圆的长、短轴半径为 a_c 和 b_c ; a_u 和 b_u 为接触峰未变形椭圆截面长、短轴半径; a_i 和 b_i 为接触峰处于塑性

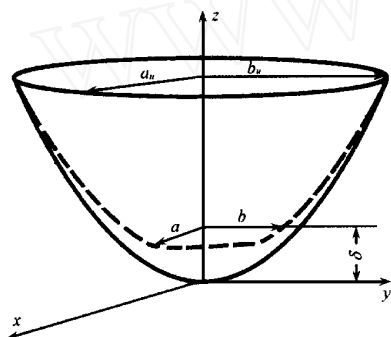


Fig 1 Geometry of elastic solids in contact

图1 弹性变形几何模型

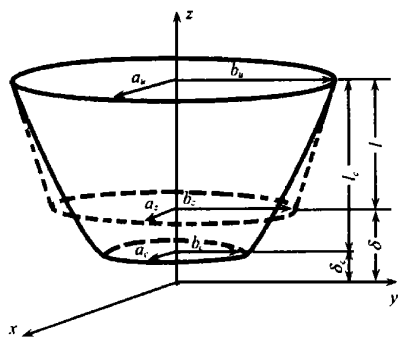


Fig 2 Geometry of plastic solids in contact

图2 塑性变形几何模型

变形量达 δ 时椭圆的长、短轴半径; $(l + \delta)$ 为接触峰峰顶到未变形处的截距. 由此可得接触峰塑性边界条件:

$$x = a_c, y = b_c, z = \delta_e \quad (5)$$

$$x = a_u, y = b_u, z = \delta_e + l_e \quad (6)$$

假设接触峰形貌能用二次方程表示^[11], 则:

$$z = \left[\frac{l}{a_u^2 - a_i^2} \right] x^2 + \left[\frac{l}{b_u^2 - b_i^2} \right] y^2. \quad (7)$$

由 Pullen 等^[6]的分析可知, 接触峰处于塑性变形时体积保持不变, 则塑性变形接触椭圆的长、短轴半径^[8]为:

$$a_i = [f_1(e)R_m\delta C]^{0.5}, b_i = [f_1(e)R_m\delta C(1 - e^2)]^{0.5}. \quad (8)$$

$$f_1(e) = \frac{E(e)e^2}{2(1 - e^2)[E(e) - K(e)(1 - e^2)]}. \quad (9)$$

$$C = \left\{ 2 - \frac{\delta_e}{\delta} [2 - f_2(e)] \right\}, f_2(e) = \frac{2[E(e) - (1 - e^2)K(e)]}{K(e)e^2}. \quad (10)$$

引入反映接触表面材料和形貌的综合性能的塑性指数^[9]:

$$\Psi = \frac{\pi/2}{[E(e)K(e)]^{0.5}} \frac{E}{H} \left(\frac{\alpha}{R_m} \right)^{0.5}. \quad (11)$$

式中: α 为粗糙峰标准偏差, E 为有效弹性模量

1.1.3 接触峰变形

如图(1和2)所示, 变形前接触峰形貌方程为:

$$z = \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y}. \quad (12)$$

变形后, 由于接触峰顶点到未变形位置处的截距相对其变形量来说要大得多, 因此变形引起的曲率变化可忽略不计, 于是变形后接触峰形貌方程为:

$$\begin{cases} z = \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + z_0, & z \geq \delta \\ z = \delta, & z < \delta \end{cases} \quad (13)$$

令变形后接触椭圆面长、短轴半径分别为 a 和 b , 则式(13)中 z_0 为:

$$z_0 = \delta - \frac{a^2}{2R_x}, \text{ 或 } z_0 = \delta - \frac{b^2}{2R_y}. \quad (14)$$

1.2 流量因子影响模型

由 Patir 等^[9]提出的平均 Reynolds 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{12\eta} \phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{h^3}{12\eta} \phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}}{\partial t}. \quad (15)$$

式中: ϕ 和 ϕ 为压力流量因子, ϕ 为剪切流量因子. 为求解流量因子, 按一定的边界条件, 取矩形微单元 $L_x \cdot L_y$, 其面积与润滑区域相比很小, 但包含足够多的粗糙峰 $\bar{p}$ 为微单元平均压力, $\bar{h}_T$ 为其平均膜厚. 求解 ϕ 时, 可设 $U_1 = U_2 = U_s$, 油膜压力满足:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h_T^3}{12\eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{h_T^3}{12\eta} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] = 0, \quad (16)$$

$$\phi = \frac{1}{L_x L_y} \left[\int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \left(\frac{h_T^3}{12\eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy \right] \cdot \frac{h_T^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}. \quad (17)$$

同理可求得 ϕ 和 ϕ

引入平均 Reynolds 方程的思路是通过流量因子来反映粗糙峰的影响, 从而使部分弹流润滑的求解成为可能. 基于此, 同样可以将接触峰弹塑性变形的影响转化为对流量因子的影响. 求解流量因子的关键是合理构造变形前后的微单元和计算油膜厚度.

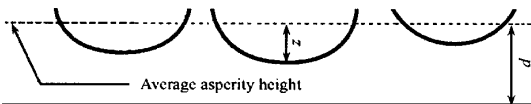


Fig 3 Schematic diagram of rough surface in contact

图 3 接触粗糙表面示意图

如图 3 所示, 平均油膜厚度为:

$$h_f = \int_{-\infty}^{\infty} (d - z) \Phi(z) dz. \quad (18)$$

式中: $\Phi(z)$ 为粗糙表面高度分布概率密度函数

计算流量因子时, 设粗糙峰峰谷处于同一平面, 如不考虑接触峰变形, 则单个粗糙峰形成的膜厚 h_s 为:

$$\begin{cases} h_s = \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} - \delta, & h_f \geq h_s \geq 0; \\ h_s = h_f, & h_s > h_f; \\ h_s = 0, & h_s < 0 \end{cases} \quad (19)$$

考虑变形时, 单个粗糙峰所形成的油膜厚度 h_d 为:

$$\begin{cases} h_d = \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + z_0 - \delta, & h_f \geq h_d \geq 0; \\ h_d = h_f, & h_d > h_f; \\ h_d = 0, & h_d < 0 \end{cases} \quad (20)$$

设表面形貌的方向参数为 λ , 则单个粗糙峰所占矩形尺寸为:

$$l_x = \left(\frac{\lambda}{\eta} \right)^{0.5}, \quad l_y = \frac{1}{(\lambda\eta)^{0.5}}. \quad (21)$$

根据求解流量因子的要求构造粗糙表面 首先在保证微单元内有足够多粗糙峰的情况下, 设沿 x 方向的粗糙峰为 n_x 个, y 方向为 n_y 个, 则微单元大小为 $n_x l_x \cdot n_y l_y$; 将微单元划分为 $n_x \cdot n_y$ 个, 则平均每个单元包含 1 个粗糙峰, 按粗糙峰高度分布概率密度函数 $\Phi(z)$ 随机生成所有单元粗糙峰高度; 以每个单元的中心为粗糙峰中点, 将式 (2) 生成的粗糙峰高度代入式 (19 和 20) 中, 计算各单元膜厚, 得到未考虑变形和考虑变形的微单元膜厚

对生成粗糙表面膜厚分别计算未考虑和考虑变形的流量因子. 设未考虑接触峰变形的流量因子为 ϕ_{n_x} , ϕ_{n_y} 和 ϕ_{n_s} , 考虑变形的为 ϕ_x , ϕ_y 和 ϕ_s . 定义流量因子影响系数为:

$$k_x = \frac{\phi_x}{\phi_{n_x}}, \quad k_y = \frac{\phi_y}{\phi_{n_y}}, \quad k_s = \frac{\phi_s}{\phi_{n_s}}. \quad (22)$$

2 计算结果与讨论

采用钢对钢表面接触算例说明接触峰弹塑性变形对部分流体润滑的影响 材料弹性模量为 $E_1 = E_2 = 2.07 \times 10^{11}$ Pa, 泊松比为 $\nu_1 = \nu_2 = 0.29$, 硬度为 1.96×10^9 Pa 定义有效当量半径 $R_e = \sqrt{R_x R_y}$, 其中, $R_e = 4.2 \times 10^{-3}$ m; 粗糙峰密度 $\eta = 6.0 \times 10^6$; 方向参数 $\lambda = R_x / R_y$; A_p 表示塑性接触面积; A_r 为真实接触面积

图 4 示出了当 $\lambda = 1.5$, $\Psi = 1.5$ 时, 流量因子影响系数与无量纲粗糙峰平面间距之间的关系. 可以看出: 随着间距的减小, 流量因子影响系数越来越偏离 1; 当间距减小到一定程度后, 其值又逐渐向 1 靠近; 在整个变化过程中, 影响系数始终小于 1. 所有影响系数中, 以剪切流量影响系数变化最大. 我们认为, 随着间距的减小, 接触峰数和变形量增加, 在间距相对较大时, 绝大多数接触峰处于弹性变形状态, 弹性变形使得真实接触面积比截面积小, 平均油膜间隙比增大, 所以弹性变形后, 流量因子将减小, 即流量影响系数小于 1; 且随着弹性变形的增加, 其值将越来越偏离 1. 当间距减小到一定程度时, 处于塑性状态的接触峰数和塑性变形程度逐渐增加, 塑性变形使接触面积相对截面积来说逐渐增加, 平均油膜间隙相对来说逐渐减小. 塑性变形引起的粗糙表面的变化与弹性变形的情况相反, 故当

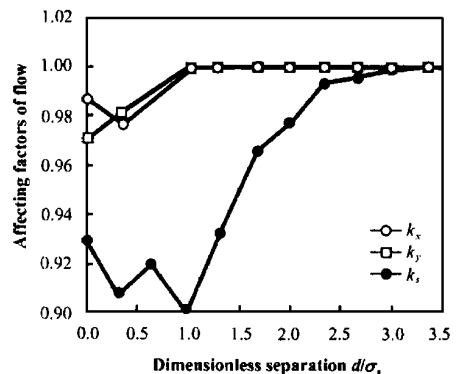


Fig 4 A affecting factors of flow versus separation

图 4 流量因子影响系数与粗糙峰平面间距的关系曲线

粗糙峰平面间距接近到某值后, 塑性变形引起的粗糙表面变化将处于主导地位, 影响系数将按弹性变化时的相反方向变化, 即逐渐趋向 1. 可见, 当间距减小到一定程度后, 影响系数有可能大于 1, 但前提是表面发生很大的塑性变形. 变形对剪切流量因子的影响大于对压力流量系数的影响, 因为剪切流量因子受相对滑动速度的影响, 它对油膜厚度的变化非常敏感

图 5 所示为不同属性表面剪切流量因子影响系数与无量纲粗糙峰平面间距的关系. 由

图 5 可以看出: 间距较大时, 塑性指数越大, 其剪切流量影响系数越偏离 1; 间距减小到一定程度后, 塑性指数越大, 其系数越接近 1。这是因为在相同无量纲平面间距下, 塑性指数较大, 其表面越粗糙, 粗糙峰对流体润滑的影响就越大, 其变形的影响也就越大。平面间距较大时, 弹性变形处于主导地位, 因此塑性指数越大其影响系数越小; 间距减小时, 塑性变形逐渐增加, 塑性指数越大的表面相对塑性变形粗糙峰数和塑性变形程度越大, 因此塑性指数大

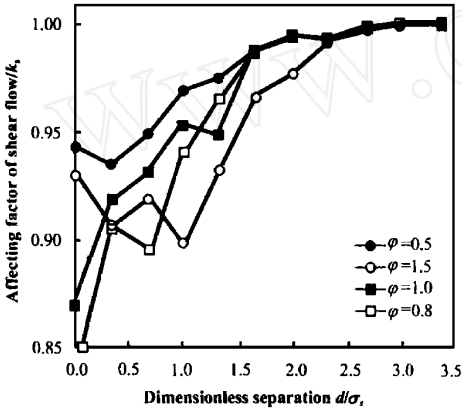


Fig 5 A affected factor of shear flow
versus separation

图 5 剪切流量因子
修正系数与粗糙峰平面间距的关系曲线

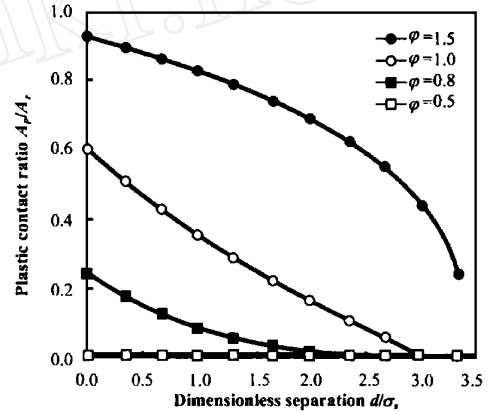


Fig 6 Plastic contact ratio versus
separation

图 6 塑性接触率
与粗糙峰平面间距的关系曲线

的表面其系数增加越快。图 6 所示为相应情况下, 塑性接触率同粗糙峰平面间距的关系, 它反映了其塑性变形程度的变化。

3 结论

所提出的接触峰弹塑性变形对部分流体润滑流量因子的影响模型, 使计算接触峰变形对流体润滑的影响成为现实。应用该模型, 得到不同属性粗糙表面及接触峰弹塑性变形对流量因子影响的数值解。通过对数值解进行分析发现, 当接触峰弹塑性变形较大时, 对流量因子有较大的影响, 同时初步探讨了粗糙表面塑性变形影响流体润滑的机理。

[参考文献]

- [1] Akyuz F A, Merwin M. Solution of Nonlinear Problems of Elastoplasticity by Finite Element Method[J]. AIAA J, 1968, 6: 1825~1831
- [2] Komvopoulos K, Choi D H. Elastic Finite Element Analysis of Multiscale Contact[J]. ASME Journal of Tribology, 1992, 114: 823~831
- [3] Ren N, Lee S C. Contact Simulation of Three-Dimensional Rough Surfaces Using Moving Grid Method[J]. ASME Journal of Tribology, 1993, 115: 597~601
- [4] Tian X F, Bhushan B. A Numerical Three-Dimensional Model for Contact of Rough Surfaces by Variational Principle[J]. ASME Journal of Tribology, 1996, 118: 38~42
- [5] Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of Nominally Flat Surfaces[J]. Proc Roy Soc (London), Series A, 1966, 295: 300~319

- [6] Pullen J, William son J B P. On the Plastic Contact of Rough Surfaces[J]. Proc Roy Soc (London), Series A, 1972, 327: 157~ 173
- [7] Chang W R, Etsion I, Bogy D B. An Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 1987, 109: 257~ 263
- [8] Jeng H H. An Elliptic Elastic-Plastic Asperity Microcontact Model for Rough Surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 1998, 120: 82~ 88
- [9] Patir N, Cheng H S. An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness of Partial Hydrodynamic Lubrication[J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1978, 100: 12~ 17
- [10] Johnson K L. Contact Mechanics[M]. London: Cambridge University Press, 1985
- [11] McCool J I. Predicting Microfracture in Ceramics via a Microcontact Model[J]. ASME Journal of Tribology, 1986, 108: 380~ 386

Asperity Microcontact and Its Influence on Partial Hydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces

WANG Jia-dao, CHEN Da-rong, KONG Xian-mei

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A model has been established to show the effect of elastic-plastic asperity deformation on the factor of flow in partial hydrodynamic lubrication (PHL) on the basis of an elliptic elastic-plastic asperity microcontact model. Some examples are calculated using this model. The results show that the larger the elastic-plastic deformation, the greater the influence on partial lubrication. The influence of elastic-plastic asperity deformation on partial hydrodynamic lubrication (PHL) is largely dependent on the comprehensive properties of the surfaces and the degree of elastic and plastic deformation.

Key words: elastic-plastic deformation; partial hydrodynamic lubrication; asperity; flow factor

Classifying number: TH117