

考虑基体变形的硬涂层粗糙表面法向接触刚度统计模型及实验验证

张学良, 张盛衍, 苏晓源, 陈永会, 王南山
(太原科技大学机械工程学院, 030024, 太原)

摘要: 为了更准确地预测硬涂层粗糙表面的接触刚度,建立了考虑基体变形的硬涂层粗糙表面法向接触刚度统计模型,并进行了实验验证。首先,推导建立了单个硬涂层微凸体弹性和弹塑性法向接触刚度模型,在此基础上,建立了考虑基体变形影响的硬涂层微凸体法向接触刚度模型,及考虑基体变形的硬涂层粗糙表面法向接触刚度统计模型。然后,对所建模型进行了仿真分析,研究了涂层厚度比、涂层与基体材料性能、基体表面塑性指数等对硬涂层粗糙表面法向接触刚度及接触载荷的影响规律。最后,进行了实验验证。结果表明:当考虑基体变形时,具有较厚且较硬涂层的粗糙表面,其法向接触刚度和接触载荷较大;当涂层粗糙表面的接触载荷不变时,随着基体表面塑性指数的增大,硬涂层粗糙表面的法向接触刚度随之增大;实验获取了基体材料为 45 钢、涂层材料为 TiN 的涂层粗糙表面法向接触刚度,其模型仿真计算结果较好吻合了实验数据,二者平均相对误差小于 7%,说明了所建模型的正确性。

关键词: 硬涂层;基体变形;法向接触刚度;统计模型

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603020 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0210-10

Statistical Model and Experimental Validation of Normal Contact Stiffness for Hard-Coated Rough Surfaces Considering Substrate Deformation

ZHANG Xueliang, ZHANG Shengxian, SU Xiaoyuan, CHEN Yonghui, WANG Nanshan
(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: To more accurately predict the contact stiffness of hard-coated rough surfaces, a statistical model for normal contact stiffness considering substrate deformation is established and experimentally validated. First, elastic and elastoplastic normal contact stiffness models for a single hard-coated asperity are derived and developed. Based on these, normal contact stiffness model for a hard-coated asperity accounting for substrate deformation effects is established, leading to a statistical model for normal contact stiffness of hard-coated rough surfaces incorporating substrate deformation. Next, simulation analyses are performed on the established models to investigate the effects of coating thickness ratio, material properties of the coating and substrate, and substrate surface plasticity index on the normal contact stiffness and contact load of hard-coated rough surfaces. Finally, experimental validation is conducted. The results show that when substrate deformation is considered, rough surfaces with thicker and harder coatings exhibit greater normal contact

收稿日期: 2025-06-30。 作者简介: 张学良(1964—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(202203021221151,202303021211168)。

网络出版时间: 2025-12-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251212.1441.008>

stiffness and higher contact loads. Under constant contact load, as the substrate surface plasticity index increases, the normal contact stiffness of hard-coated rough surfaces also increases. Experimental normal contact stiffness data are obtained for coated rough surfaces with a 45 steel substrate and TiN coating material. The simulation results of the model are in good agreement with the experimental data, with an average relative error of less than 7%, demonstrating the validity of the established model.

Keywords: hard coating; substrate deformation; normal contact stiffness; statistical model

表面涂层技术是最有效的表面工程技术之一,已广泛应用于改善金属切削刀具、成型工具以及机器零部件如滑动轴承、密封件和阀门等的摩擦学性能^[1-3]。硬质涂层具备耐腐蚀性、耐磨损性、抗氧化性等特点^[4]。此外,其抗冲蚀能力、耐热性、储热性能较好^[5-8]。目前,对于涂层材料、涂层厚度等的选择仍然依赖于试错法,尚缺乏科学的理论指导^[8-9]。

Bell等^[10]重点探讨了涂层表面工程系统的数值模型,进行了涂层-基体系统塑性行为的有限元分析。Cole等^[11]提出了一种涂层弹性体的二维无摩擦弹性接触数值模型,表明表面涂层的材料特性对接触行为的影响较大。Ramachandra等^[12]使用数值弹性应力模型研究了二维不连续涂层的涂层几何形状对法向接触压力分布的影响。Bhushan等^[13]给出了涂层表面的有效弹性模量和硬度的无量纲经验表达式。Chen等^[14]应用有限元分析研究了刚性平面挤压涂层球的塑性演化。Wang等^[15]提出了一种刚性球与弹性涂层固体的点接触模型,研究了涂层厚度对应力场的影响。Goltsberg等^[16]探究了涂层厚度及涂层与基体材料性能对受刚性平面挤压的涂层球塑性屈服临界接触载荷与临界接触面积等的影响。Greenwood等^[17]将两个粗糙平面相互接触简化为一刚性平面与等效粗糙表面接触。Chen等^[9]创造性地提出了一种弹塑性硬涂层粗糙表面接触统计模型,研究了硬涂层的厚度及其材料的性能与基体材料性能等对接触行为的影响。在文献^[9]的基础上,廖山钧等^[18]创新性地建立了弹性-完全塑性硬涂层粗糙表面法向接触刚度统计模型,并通过模型的仿真研究,分析了相关因素对法向接触刚度的影响规律。但文献^[9]的研究没有涉及到硬涂层基体变形的影响。

从接触问题的研究发展历程看,涂层粗糙表面接触问题研究是在一般粗糙表面接触问题研究的基础上开展起来的,可以说,在一定或很大程度上,后者是前者的基础。Yeo等^[19]考虑了基体和微凸体变形的共同影响,提出了一种改进的单个微凸体系

统弹性接触模型,进而将其拓展到粗糙表面接触,建立了考虑基体变形的粗糙表面接触统计模型。李玲等^[20]建立了考虑基体变形的含硬涂层结构的表面微观接触新模型,所研究的微凸体与基体是两种不同的材料,不同于文献^[9,16,18]中的涂层微凸体。李玲等^[21]考虑基体变形的影响,在微凸体的3个变形阶段分别引入基体弹性接触变形,建立了一种考虑基体变形且连续光滑的一般粗糙表面接触刚度模型。张伟等^[22]综合考虑基体变形和微凸体相互作用影响,建立了一般粗糙表面的法向接触刚度模型。王晶晶等^[23]耦合基体变形等,建立了更贴合实际的一般粗糙表面的法向接触刚度模型。这些关于一般粗糙表面接触问题的研究工作对进一步考虑基体变形的影响,从而建立更加准确的硬涂层粗糙表面法向接触刚度模型具有重要的参考意义。

基于上述研究工作,本文建立考虑基体变形的硬涂层粗糙表面法向接触刚度统计模型,并进行实验验证,从而为涂层粗糙表面接触刚度的更准确预测与涂层选择提供理论支持。

1 涂层粗糙表面接触模型

图1为涂层粗糙表面与光滑刚性平面接触的简化模型示意图,其等效于两涂层粗糙表面接触。图中, d 为光滑刚性平面到微凸体平均高度平面的距离, h 为光滑刚性平面到表面平均高度平面的距离, y_s 为表面平均高度平面到微凸体平均平面的距离, $y_s = h - d$, z 为微凸体从微凸体平均高度平面度量

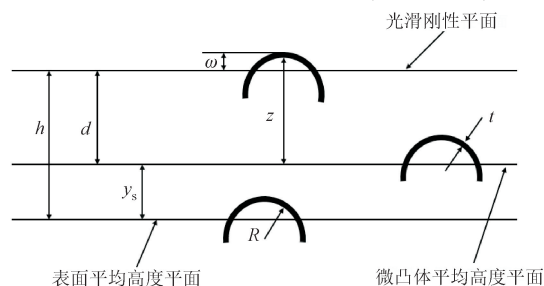


图1 涂层粗糙表面接触模型

Fig. 1 Contact model for coated rough surfaces

的高度, ω 为微凸体的干涉量, 且 $\omega = z - d$, t 为涂层的厚度, R 为基体微凸体(即基体球)的半径。

本文在文献[9]的基础上, 以硬涂层粗糙表面为研究对象, 且其涂层厚度为中大厚度(见文献[19]), 并对其做如下假设: ①涂层基体粗糙表面是各向同性的; ②涂层基体粗糙表面微凸体峰顶为半球体; ③所有微凸体峰顶的半径 R 相同, 且其高度分布服从高斯分布; ④涂层具有均匀的厚度 t , 并复制了基体表面形貌; ⑤涂层与基体完美结合。

2 单个涂层微凸体接触模型

根据上述假设, 涂层微凸体可以简化为涂层半球体(简称涂层球)。基于涂层半球体与刚性平面接触的轴对称性, 可以将其简化为 $1/4$ 球体与刚性平面的接触, 如图 2 所示, 其中 p 为法向接触载荷。由于本文研究主要建立在文献[10]的基础上, 因此其研究对象为中大厚度硬涂层粗糙表面接触问题, 相应的涂层微凸体为硬涂层微凸体, 简称为硬涂层球。

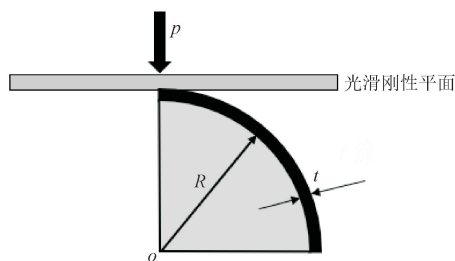


图 2 涂层球与刚性平面接触模型

Fig. 2 Contact model of coated sphere and rigid plane

随着硬涂层球干涉量 ω 的变化, 其接触变形可以分为 4 个阶段^[24]: ①当 $\omega \leq \omega_c$ 时, 其处于弹性接触变形状态, ω_c 是硬涂层球接触塑性屈服的临界接触变形; ②随着 ω 继续增加, 其接触变形进入弹塑性接触变形阶段, 并定义当 $\omega_c < \omega \leq \omega_{mp}$ 时为涂层球弹塑性接触变形第一阶段(即处于弹塑性接触变形第一状态), ω_{mp} 是硬涂层球最大平均接触压力对应的变形; ③随着 ω 继续增加, 硬涂层球进入弹塑性接触变形第二阶段, 直至塑性接触变形临界点 $\omega_3 = 450\omega_{c,co}$, 即当 $\omega_{mp} < \omega \leq \omega_3$ 时, 硬涂层球处于弹塑性接触变形第二状态; ④随着 ω 继续增加, 即 $\omega > \omega_3$ 时, 硬涂层球进入塑性接触变形状态。 ω_c 、 ω_{mp} 、 $\omega_{c,co}$ 分别如下

$$\omega_c = [1 + 3.78 (t/R)^{-1.29} (E_{co}/E_{su} - 1)^{0.811} \cdot (E_{co}/Y_{co})^{-1.3}] \omega_{c,co} \quad (1)$$

$$\omega_{mp} =$$

$$0.5 (t/R)^{1.25} (E_{co}/E_{su})^{0.75} (E_{co}/Y_{co})^{1.2} F^{-0.55} \omega_{c,co} \quad (2)$$

$$\omega_{c,co} = [0.5 C_v \pi (1 - \nu^2) (Y_{co}/E_{co})]^2 R \quad (3)$$

式中: 下标“co”代表涂层; 下标“su”代表基体; $\omega_{c,co}$ 是涂层材料制成的均匀球的临界干涉量; $C_v = 1.234 + 1.256\nu$, ν 是材料泊松比; E 表示材料的弹性模量; Y 表示材料的屈服强度; $F = E_{co}/E_{su} + (E_{co}/E_{su})(E_{su}/Y_{su})/(E_{co}/Y_{co}) - 2$ 。

硬涂层球弹性接触变形状态下的接触载荷 p_e ^[9] 和接触面积 a_e ^[25] 分别如下

$$p_e = \frac{4}{3} \frac{1}{(1 - \nu^2)} \left[\frac{0.43E_{co} + 0.57E_{su}}{(E_{co}/E_{su} - 0.1)^{1.5-a}} \right] \cdot [\sqrt{R+t} [0.64t(t/R)]^{1.5-a}] \omega^a \quad (4)$$

$$a_e = b\pi(R+t) \left[0.589 + \frac{0.88}{1.14 + E_{co}/E_{su}} \right] \omega \quad (5)$$

式中: $a = 1.12 + 0.76(0.54\sqrt{E_{co}/E_{su}})$; $b = 1.0558e^{(-0.04E_{co}/E_{su})}$ 。

硬涂层球弹塑性接触变形第一、二状态下的接触载荷 p_{ep1} 、 p_{ep2} ^[9] 分别为

$$p_{ep1} = 7.87 (1 - \nu^2)^{-0.6} C_v^{0.4} \left(\frac{E_{co}}{E_{su}} \right)^{-0.475} \cdot \left(\frac{E_{co}}{Y_{co}} \right)^{0.54} Y_{co} F^{0.265} \left(\frac{t}{R} \right)^{0.275} R^{0.7} \omega^{1.3} \quad (6)$$

$$p_{ep2} = 8.56 (1 - \nu^2)^{0.2} C_v^{1.2} \left(\frac{E_{co}}{E_{su}} \right)^{-0.175} \cdot \left(\frac{E_{co}}{Y_{co}} \right)^{0.22} Y_{co} F^{0.045} \left(\frac{t}{R} \right)^{0.775} R^{1.1} \omega^{0.9} \quad (7)$$

硬涂层球塑性接触变形状态下的接触载荷 p_p ^[19] 为

$$p_p = 9.74 \left(\frac{E_{co}}{E_{su}} \right)^{-0.25} \left(\frac{E_{co}}{Y_{co}} \right)^{0.71} \cdot \left(\frac{E_{su}}{Y_{su}} \right)^{-0.3} Y_{co} F^{-0.25} \left(\frac{t}{R} \right)^{0.7} R \omega \quad (8)$$

3 考虑基体变形的硬涂层微凸体接触模型

图 3 为考虑基体变形的硬涂层微凸体-基体系统接触模型。硬涂层微凸体承受法向载荷 p , 在垂直方向发生位移 ω (即图 1 中的干涉量), 其位移 ω 由涂层微凸体变形 ω_a 和基体变形 ω_b 两部分共同构成, 即

$$\omega_a + \omega_b = \omega = z - d \quad (9)$$

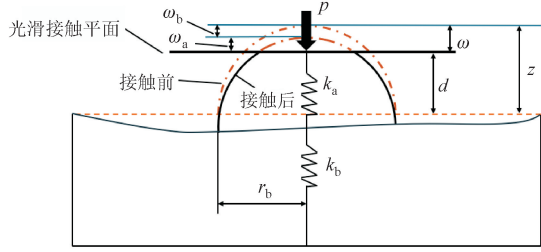


图3 涂层微凸体-基体系统接触模型

Fig. 3 Contact model of coated asperity-substrate system

当载荷 p 通过涂层微凸体传递到基体时,基体仅发生弹性变形,即当涂层微凸体发生弹性变形、弹塑性变形或塑性变形时,基体仅发生弹性变形,这是因为当基体发生塑性变形时,涂层微凸体必然处于塑性变形状态。基体发生弹性变形产生位移,在涂层微凸体与基体接触的圆形区域内,基体法向位移 u_z 与径向距离 r 的关系为^[23,26]

$$u_z(r) = \frac{\pi p_0}{4E_{su}r_b}(2r_b^2 - r^2), 0 \leq r \leq r_b \quad (10)$$

式中: p_0 为最大接触压力, $p_0 = 3p/(2\pi r_b^2)$; r_b 是接触区域半径, $r_b = \sqrt{(2R + 2t - z)z}$ 。

根据文献[20],硬涂层微凸体高度设置为微凸体高度标准差 σ_s 的3倍,即 $z = 3\sigma_s$ 。在接触中心处 $r = 0$,对应的基体变形 $\omega_b = u_z(0) = \frac{\pi p_0 r_b}{2E_{su}}$ 。

根据式(10)可以得到基体的接触刚度 k_b 为

$$k_b = \frac{dp}{d\omega_b} = \frac{4}{3}E_{su}\sqrt{3\sigma_s(2R + 2t - 3\sigma_s)} \quad (11)$$

根据涂层微凸体与其基体之间力的相互作用传递原理,有

$$p = \omega_a k_a = \omega_b k_b \quad (12)$$

式中: k_a 为涂层微凸体接触刚度。

当硬涂层微凸体处于弹性接触变形状态时,考虑基体变形影响的硬涂层微凸体弹性变形记为 ω_{ae} ,根据式(4)、(9)、(12)推导并进行无量纲化处理,两边同时除以表面轮廓高度标准差 σ ,整理得

$$\omega_{ae}^* = \omega^* / (A_1 B_1 (\omega_{ae}^*)^{a-1} + 1) \quad (13)$$

记 $\omega^* = \omega/\sigma$, $\omega_{ae}^* = \omega_{ae}/\sigma$,则 A_1 、 B_1 分别如下

$$\begin{cases} A_1 = \frac{a}{(1-\nu^2)} \frac{0.57 + 0.43E_{co}/E_{su}}{(E_{co}/E_{su} - 0.1)^{1.5-a}} \\ B_1 = \frac{(0.64t/R)^{1.5-a} (t/R)^{1.5-a} \sqrt{1+t/R}}{\sqrt{3\sigma_s(2+2t/R-3\sigma_s/R)/R}(\sigma/R)^{1-a}} \end{cases} \quad (14)$$

根据文献[26],令 $g_e(\omega^*) = \omega_{ae}^*$,使用不动点迭代法求解 ω_{ae}^* 关于 ω^* 的直接关系,可以得出如下

近似解

$$g_e(\omega^*) = \omega^* / (1 + A_1 B_1 g(\omega)^{a-1}) \quad (15)$$

$$g_{n+1} = \omega^* / (1 + A_1 B_1 g_n^{a-1}) \quad (16)$$

理论上来说, g_0 可以是任何值。为了便于计算,假设 $g_0 = \omega^* / (1 + A_1 B_1)$,那么按照上述迭代方式不断迭代,可以得出 $g_1 = \omega^* / (1 + A_1 B_1 g_0^{a-1})$, $g_2 = \omega^* / (1 + A_1 B_1 g_1^{a-1})$, $g_3 = \omega^* / (1 + A_1 B_1 g_2^{a-1})$, ..., $g_{n+1} = \omega^* / (1 + A_1 B_1 g_n^{a-1})$ 。

在上式中, $n = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$,迭代的次数越多,其结果越准确,3次迭代得到的近似解和数值解误差不超过5%,因此本文取3次迭代得到的近似解作为 ω_{ae}^* 的解,具体结果为

$$g_e(\omega^*) = \omega_{ae}^* = \omega^* / \left[1 + A_1 B_1 \left(\omega^* / \left[1 + A_1 B_1 \left(\frac{\omega^*}{1 + A_1 B_1} \right)^{a-1} \right] \right)^{a-1} \right] \quad (17)$$

类似于考虑基体变形影响的硬涂层微凸体弹性接触变形 ω_{ae}^* 的近似解获取,同理基于式(11)、(13)、(17)可求出考虑基体变形影响的硬涂层微凸体在其他3种变形状态(即弹塑性接触变形第一状态、弹塑性接触变形第二状态和塑性接触变形状态)下的无量纲接触变形 ω_{aep1}^* 、 ω_{aep2}^* 和 ω_{ap}^* ,分别为

$$\omega_{aep1}^* = \omega^* / \left[1 + A_2 B_2 \left(\omega^* / \left[1 + A_2 B_2 \left(\frac{\omega^*}{1 + A_2 B_2} \right)^{0.3} \right] \right)^{0.3} \right] \quad (18)$$

$$\omega_{aep2}^* = \omega^* / \left[1 + A_3 B_3 \left(\omega^* / \left[1 + A_3 B_3 \left(\frac{\omega^*}{1 + A_3 B_3} \right)^{-0.1} \right] \right)^{-0.1} \right] \quad (19)$$

$$\omega_{ap}^* = \omega^* / (1 + A_4 B_4) \quad (20)$$

同样,硬涂层微凸体分别在弹塑性接触变形第一状态、第二状态与塑性接触变形状态下的无量纲变形的3次迭代近似解和数值解的误差均不超过5%。

A_2 、 B_2 、 A_3 、 B_3 、 A_4 、 B_4 表达式分别如下

$$A_2 = 7.67(1-\nu^2)^{-0.6} C_\nu^{0.4} \left(\frac{E_{co}}{E_{su}} \right)^{-0.475} \left(\frac{E_{co}}{Y_{co}} \right)^{0.54} \frac{Y_{co}}{E_{su}} F^{0.265} \quad (21)$$

$$B_2 = \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{0.3} \left(\frac{t}{R} \right)^{0.275} / \sqrt{\left(2 + 2 \frac{t}{R} - 3 \frac{\sigma_s}{R} \right) 3 \frac{\sigma_s}{R}} \quad (22)$$

$$A_3 = 5.778(1-\nu^2)^{0.2} C_\nu^{1.2} \left(\frac{E_{co}}{E_{su}} \right)^{-0.175} \left(\frac{E_{co}}{Y_{co}} \right)^{0.22} F^{0.045} \frac{Y_{co}}{E_{su}} \quad (23)$$

$$B_3 = \left(\frac{t}{R}\right)^{0.775} / \left[\left(\frac{\sigma}{R}\right)^{0.1} \sqrt{\left(2 + 2\frac{t}{R} - 3\frac{\sigma_s}{R}\right) 3\frac{\sigma_s}{R}} \right] \quad (24)$$

$$A_4 = 7.305 \left(\frac{E_{co}}{E_{su}}\right)^{-0.25} \left(\frac{E_{co}}{Y_{co}}\right)^{0.71} \left(\frac{E_{su}}{Y_{su}}\right)^{-0.3} \left(\frac{E_{co}/E_{su}}{E_{co}/Y_{co}}\right) F^{-0.25} \quad (25)$$

$$B_4 = \left(\frac{t}{R}\right)^{0.7} / \sqrt{\left(2 + 2\frac{t}{R} - 3\frac{\sigma_s}{R}\right) 3\frac{\sigma_s}{R}} \quad (26)$$

4 考虑基体变形的硬涂层粗糙表面法向接触刚度统计模型

硬涂层基体表面微凸体高度分布符合高斯分布,其无量纲形式的高斯分布函数为

$$\varphi^*(z^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma}{\sigma_s} \exp\left(-0.5\left(\frac{\sigma}{\sigma_s} z^*\right)^2\right) \quad (27)$$

式中:上标“*”代表无量纲; σ_s 与表面高度标准差 σ 的关系为

$$\sigma/\sigma_s = (1 - 3.717 \times 10^{-4} \beta^{-2})^{0.5} \quad (28)$$

式中: β 是表面无量纲粗糙度参数, $\beta = \sigma\eta R$, η 是微凸体面积密度。

硬涂层微凸体的临界变形 ω_c 、 ω_{mp} 、 ω_3 的无量纲表达式依次为: $\omega_c^* = \omega_c/\sigma$, $\omega_{mp}^* = \omega_{mp}/\sigma$, $\omega_3^* = \omega_3/\sigma$ 。 $\sigma/R = [0.5\pi C_v(1-\nu^2)(Y_{su}/E_{su})]^2 \Psi_{su}^2$, Ψ_{su} 是硬涂层基体粗糙表面的塑性指数。

由于基体变形只会影响硬涂层微凸体高度方向法向位移的变化,因此考虑基体变形的硬涂层粗糙表面无量纲法向接触载荷 P^* 和无量纲法向接触刚度 K^* 分别为

$$P^* = \frac{P}{A_n Y_{su}} = \beta \left[X_1 \left(\frac{R}{\sigma}\right)^{1-a} \int_{d^*}^{d^*+\omega_c^*} (\omega_{ac}^*)^a \varphi^*(z^*) dz^* + X_2 \left(\frac{R}{\sigma}\right)^{-0.3} \int_{d^*+\omega_c^*}^{d^*+\omega_{mp}^*} (\omega_{aep1}^*)^{1.3} \varphi^*(z^*) dz^* + X_3 \left(\frac{R}{\sigma}\right)^{0.1} \int_{d^*+\omega_{mp}^*}^{d^*+\omega_3^*} (\omega_{aep2}^*)^{0.9} \varphi^*(z^*) dz^* + X_4 \int_{d^*+\omega_3^*}^{\infty} \omega_{ap}^* \varphi^*(z^*) dz^* \right] \quad (29)$$

$$K^* = \frac{\sigma K}{A_n Y_{su}} = \beta \left[Y_1 \left(\frac{R}{\sigma}\right)^{1-a} \int_{d^*}^{d^*+\omega_c^*} (\omega_{ac}^*)^{a-1} \varphi^*(z^*) dz^* + Y_2 \left(\frac{R}{\sigma}\right)^{-0.3} \int_{d^*+\omega_c^*}^{d^*+\omega_{mp}^*} (\omega_{aep1}^*)^{0.3} \varphi^*(z^*) dz^* + Y_3 \left(\frac{R}{\sigma}\right)^{0.1} \int_{d^*+\omega_{mp}^*}^{d^*+\omega_3^*} (\omega_{aep2}^*)^{-0.1} \varphi^*(z^*) dz^* \right] \quad (30)$$

式中: P 为整个粗糙表面荷载; X_i 、 Y_i 系数的表达式如下

$$X_1 = \left[4/(3-3\nu^2)(0.43E_{co}/E_{su} + 0.57)(E_{co}/E_{su} - 1)^{a-1.5} (E_{su}/Y_{su}) (1+t/R)^{0.5} [0.64(t/R)^2]^{1.5-a} \right] \quad (31)$$

$$X_2 = \left[7.78(1-\nu^2)^{-0.6} (1.234 + 1.256\nu)^{0.4} \cdot (E_{co}/E_{su})^{0.525} (E_{co}/Y_{co})^{-0.46} (E_{su}/Y_{su}) F^{0.265} (t/R)^{0.275} \right] \quad (32)$$

$$X_3 = \left[8.56(1-\nu^2)^{-0.2} (1.234 + 1.256\nu)^{1.2} \cdot (E_{co}/E_{su})^{0.825} (E_{co}/Y_{co})^{-0.78} (E_{su}/Y_{su}) F^{0.045} (t/R)^{0.775} \right] \quad (33)$$

$$X_4 = 9.74 \left(\frac{E_{co}}{E_{su}}\right)^{0.75} \left(\frac{E_{co}}{Y_{co}}\right)^{-0.29} \left(\frac{E_{su}}{Y_{su}}\right)^{0.7} F^{-0.25} \left(\frac{t}{R}\right)^{0.7} \quad (34)$$

$$Y_1 = \frac{4}{3} \frac{a}{1-\nu^2} \frac{0.43E_{co}/E_{su} + 0.57 E_{su}}{(E_{co}/E_{su} - 1)^{1.5-a}} \frac{E_{su}}{Y_{su}} \cdot \left(1 + \frac{t}{R}\right)^{0.5} \left[0.64\left(\frac{t}{R}\right)^2\right]^{1.5-a} \quad (35)$$

$$Y_2 = \left[10.231(1-\nu^2)^{-0.6} (1.234 + 1.256\nu)^{0.4} \cdot (E_{co}/E_{su})^{0.525} (E_{co}/Y_{co})^{-0.46} (E_{su}/Y_{su}) F^{0.265} (t/R)^{0.275} \right] \quad (36)$$

$$Y_3 = \left[7.704(1-\nu^2)^{-0.2} (1.234 + 1.256\nu)^{1.2} \cdot (E_{co}/E_{su})^{0.825} (E_{co}/Y_{co})^{-0.78} (E_{su}/Y_{su}) F^{0.045} (t/R)^{0.775} \right] \quad (37)$$

可见,硬涂层粗糙表面法向接触刚度与硬涂层粗糙表面的涂层和基体材料性能、涂层厚度比 t/R 、涂层基体表面塑性指数和法向接触载荷等有关,而且是复杂的非线性关系。

5 模型仿真分析与实验验证

5.1 模型仿真分析

为更直观地展示本文所建模型各因素之间的复

杂非线性关系,对所建模型进行仿真分析。根据文献[9],本文模型仿真所涉及的主要参数取值如表1所示,材料的泊松比 $\nu=0.32$,表面无量纲粗糙度参数 $\beta=0.04$,无量纲基体材料性能 $E_{\text{su}}/Y_{\text{su}}=1\,000$ 。

表1 相关无量纲参数取值

Table 1 Values of relevant dimensionless parameters

$t \cdot R^{-1}$	$E_{\text{co}} \cdot E_{\text{su}}^{-1}$	$E_{\text{co}} \cdot Y_{\text{co}}^{-1}$	Ψ_{su}
0.020	2	500	0.5
0.035	4	1 000	1.0
0.050	8.0	2 000	8.0

图4给出了不同涂层厚度比 t/R 下,基体变形对硬涂层粗糙表面接触刚度和法向接触载荷的影响, $\Psi_{\text{su}}=1.0, E_{\text{co}}/Y_{\text{co}}=1\,000, E_{\text{co}}/E_{\text{su}}=4$ 。由图4可见,在相同的表面间分离下,考虑基体变形的硬涂层粗糙表面接触刚度和法向接触载荷均小于未考虑基体变形的接触刚度和法向接触载荷,且硬涂层粗糙表面接触刚度和法向接触载荷均随着表面间分离的增大而减小。这是因为在不考虑基体变形时,所计算的微凸体变形其实是图3所描述的总变形,故此时微凸体变形偏大,大于实际变形,计算出的接触载荷和接触刚度是偏大的。

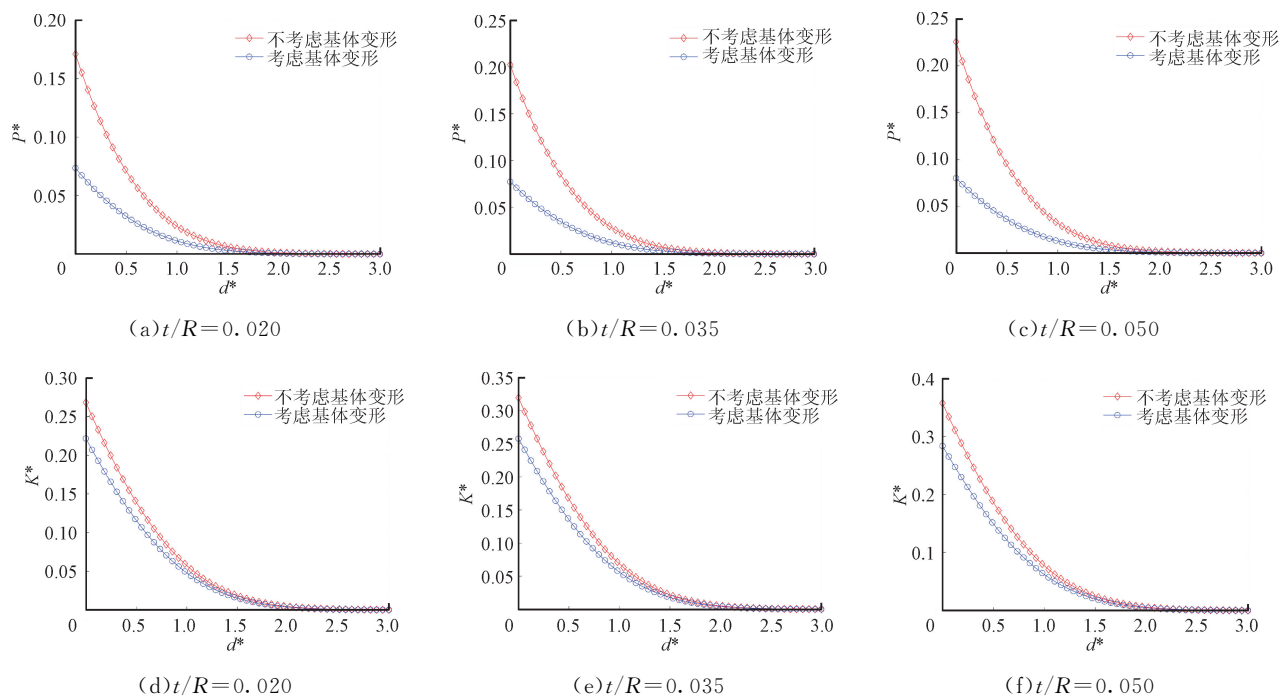
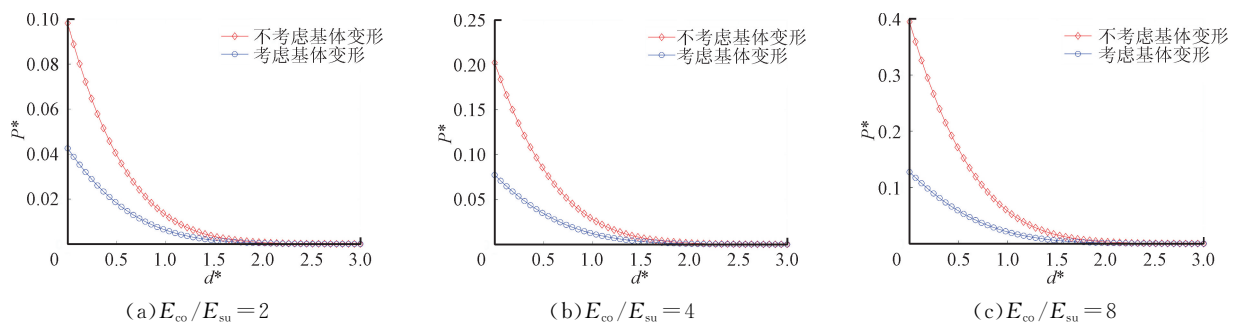


图4 不同 t/R 下基体变形对硬涂层粗糙表面无量纲接触载荷和接触刚度的影响

Fig. 4 Effects of substrate deformation on dimensionless contact load and dimensionless contact stiffness of hard-coated rough surfaces contact under different t/R values

图5给出了不同 $E_{\text{co}}/E_{\text{su}}$ 下,基体变形对硬涂层粗糙表面接触刚度和接触载荷的影响,此时 $t/R=0.035, E_{\text{co}}/Y_{\text{co}}=1\,000, \Psi_{\text{su}}=1.0$ 。图5同样表明,

考虑基体变形的硬涂层粗糙表面接触刚度和法向接触载荷均小于未考虑基体变形的接触刚度和法向接触载荷,这与上述规律一致。



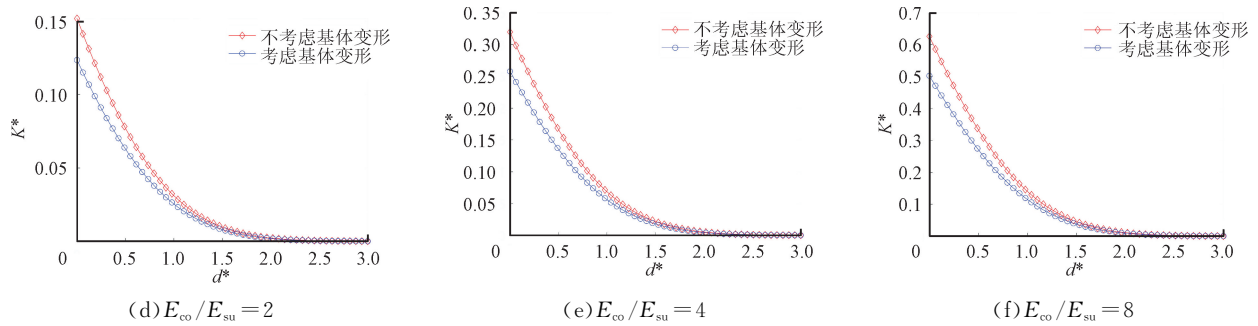


图 5 不同 E_{co}/E_{su} 下基体变形对硬涂层粗糙表面无量纲接触载荷和接触刚度的影响

Fig. 5 Effects of substrate deformation on dimensionless contact load and dimensionless contact stiffness of hard-coated rough surfaces contact under different E_{co}/E_{su} values

图 6 给出了考虑基体变形影响时 E_{co}/E_{su} 与 t/R 分别对硬涂层粗糙表面无量纲法向接触刚度的影响,其中图 6(a) 是 $t/R = 0.035$ 、 $E_{co}/Y_{co} = 1000$ 、 $\Psi_{su} = 1.0$ 情况的计算结果,图 6(b) 是 $\Psi_{su} = 1.0$ 、 $E_{co}/Y_{co} = 1000$ 、 $E_{co}/E_{su} = 4$ 情况的计算结果。由图 6(a) 可见,硬涂层粗糙表面的法向接触刚度随 E_{co}/E_{su} 的增大而增大,无涂层粗糙表面 ($E_{co}/E_{su} = 1$) 法向接触刚度最小,可见硬涂层粗糙表面的法向接触刚度大于无涂层粗糙表面法向接触刚度。由图

6(b) 可见,硬涂层粗糙表面的法向接触刚度随 t/R 的增大而增大,无涂层粗糙表面 ($t/R = 0$) 法向接触刚度最小,可见硬涂层粗糙表面的法向接触刚度大于无涂层粗糙表面法向接触刚度,与图 6(a) 一致。从图 6(b) 还可以看出,粗糙表面有无硬涂层,其法向接触刚度差别非常明显,但随着 t/R 的增大,硬涂层粗糙表面法向接触刚度增大的趋势越来越缓,这说明有无硬涂层对粗糙表面法向接触刚度影响较大,但随着涂层厚度的增大,这种影响将大大变弱。

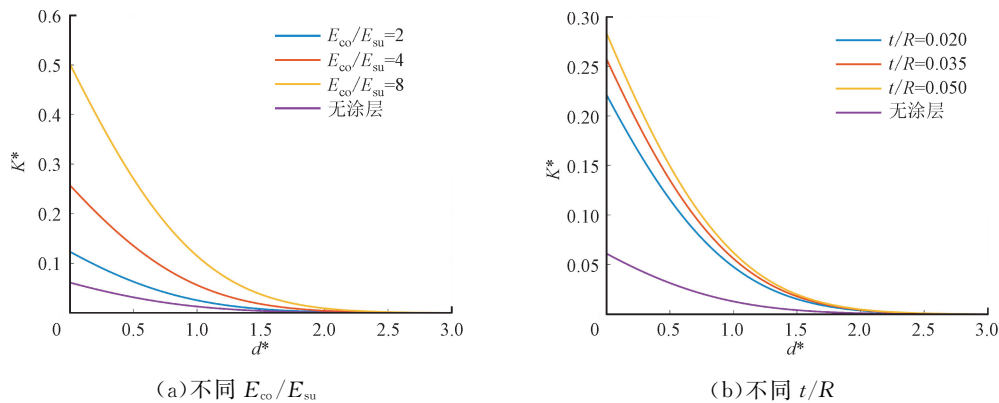


图 6 E_{co}/E_{su} 与 t/R 对硬涂层粗糙表面无量纲法向接触刚度的影响

Fig. 6 Effects of E_{co}/E_{su} and t/R on dimensionless contact stiffness of hard-coated rough surfaces contact

由上可知,图 5 和 6 所得结论与文献[18]是一致的。

图 7 给出了考虑基体变形影响的硬涂层粗糙表面法向接触刚度随接触载荷的变化规律以及 t/R 、 E_{co}/Y_{co} 、 E_{co}/E_{su} 和 Ψ_{su} 的影响。由图 7 可见,硬涂层粗糙表面法向接触刚度随接触载荷增大而非线性增大。从图 7(a) 可以看出,硬涂层粗糙表面法向接触刚度随 t/R 的增大而增大,即硬涂层越厚,法向接触刚度越大,但增大趋势越来越弱。图 7(b) 表明,硬涂层粗糙表面法向接触刚度随 E_{co}/Y_{co} 的增大而减小。

图 7(c) 说明,硬涂层粗糙表面法向接触刚度随 E_{co}/E_{su} 的增大而增大,即涂层越硬 (E_{co}/Y_{co} 较小, E_{co}/E_{su} 较大),法向接触刚度越大。图 7(d) 表明,硬涂层粗糙表面法向接触刚度随 Ψ_{su} 的增大而增大。

5.2 模型的实验验证

硬涂层粗糙表面法向接触刚度实验研究装置如图 8 所示。该装置主要由 3 部分组成:加载与卸载部分、涂层粗糙表面接触试件及其装配结构部分、检测传感器部分。加载与卸载部分用于对涂层粗糙表面接触面实施加载与卸载,主要由加卸载螺栓与推力球

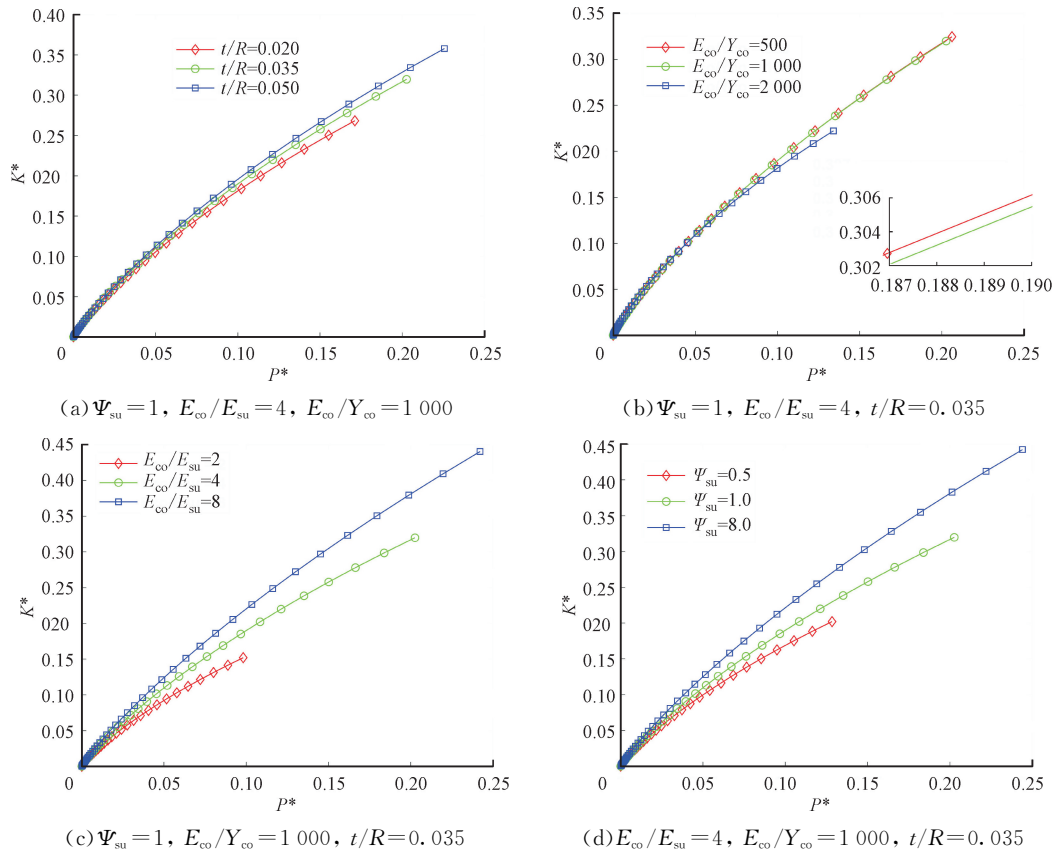
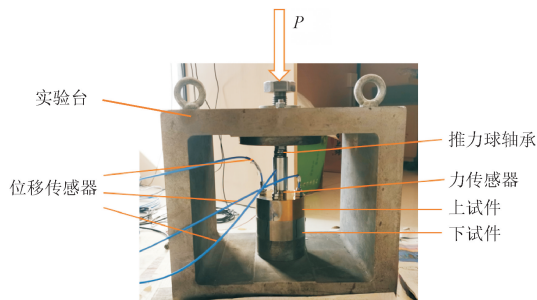
图7 硬涂层粗糙表面无量纲法向接触刚度随 P^* 、 t/R 、 E_{co}/Y_{co} 、 E_{co}/E_{su} 和 Ψ_{su} 的变化规律Fig. 7 Effects of P^* , t/R , E_{co}/Y_{co} , E_{co}/E_{su} and Ψ_{su} on dimensionless contact stiffness of hard-coated rough surfaces

图8 硬涂层粗糙表面法向接触刚度实验研究装置

Fig. 8 Experimental research setup for measuring normal contact stiffness of hard-coated rough surfaces

轴承等组成;涂层粗糙表面接触试件分上、下试件,二者之间接触形成被测接触面;加卸载螺栓与推力轴承和上、下试件及垫块等安装于半封闭的箱体空间,形成装配结构;检测传感器包括一个 FUTEK LTH300

压阻式力传感器和 3 个对称分布安装在上试件的涡流位移传感器 NTS ecX05, FUTEK LTH300 传感器的灵敏度为 2 mV/V, 量程为 0~4 448 N; NTS ecX05 传感器的灵敏度为 20 mV/ μm , 量程为 0~0.5 mm。其中, FUTEK LTH300 压阻式力传感器用于检测加卸载螺栓施加在被测接触面上的载荷大小, 3 个涡流位移传感器 NTS ecX05 用于检测接触面变形。实验研究装置配有 m+p 信号采集器与分析系统, 用于加卸载力信号、接触面变形信号数据采集、处理及分析。

在进行实验测量分析前, 先使用 SP1103M-sgk-Y 轮廓仪测量硬涂层粗糙表面接触上、下试件的被测表面轮廓, 然后处理轮廓测量数据^[27], 得到所测表面及其接触等效涂层粗糙表面的微凸体面积密度、微凸体峰顶平均曲率半径、表面轮廓高度标准差、微凸体高度分布标准差等统计参数, 结果如表 2 所示。

表2 试件基体表面轮廓统计参数

Table 2 Statistical parameters of the specimen's substrate rough surfaces

接触面	$\sigma/\mu\text{m}$	η/mm^{-2}	$R/\mu\text{m}$	$\sigma_s/\mu\text{m}$
上试件	1.867	5 384	24.079	1.839
下试件	2.293	5 917	23.804	1.904
等效粗糙表面	2.956	5 650	11.970	2.647

硬涂层粗糙表面接触上、下试件材料均为 45 钢 (即基体材料), $E_{su}=200\text{ GPa}$, $Y_{su}=355\text{ GPa}$, $\nu=0.25$ 。涂层材料为 TiN, 涂层厚度为 $t=0.5\text{ }\mu\text{m}$, $\nu=0.25$, $E_{co}=300\text{ GPa}$, $Y_{co}=1.1\text{ GPa}$, 上、下试件接触面名义接触面积 $A_n=0.006\text{ }05\text{ m}^2$ 。

实验中所测得的接触力 (P , 即前文粗糙表面载荷) 和接触变形 (y) 关系曲线如图 9 所示。实验获得的上述硬涂层粗糙表面法向接触刚度与本文所建模型计算结果的比较如图 10 所示。可以看出, 所建模型计算结果与实验数据比较接近, 平均误差不超过 7%, 而没有考虑基体变形模型的计算结果总体上较偏离实验数据的拟合结果, 说明了所建模型的正确性。

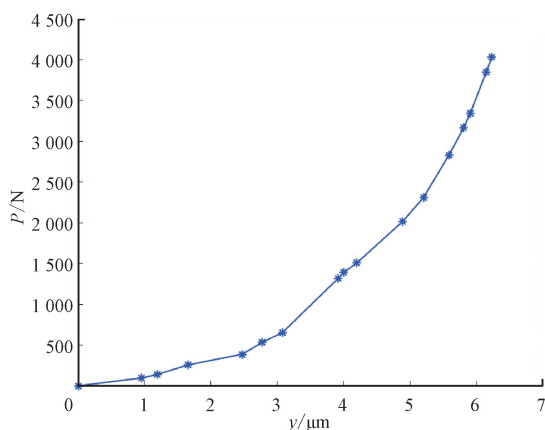


图 9 实验测量的力和变形关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between contact force and deformation measured experimentally

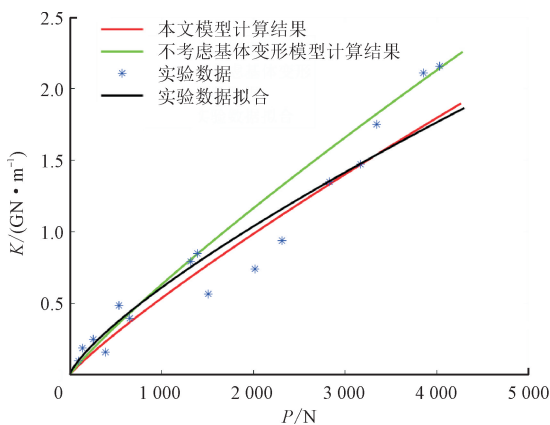


图 10 实验结果与模型计算结果对比

Fig. 10 Comparison between the experimental result and the proposed model's result

6 结 论

(1) 本文分析推导了考虑基体变形的硬涂层微凸体弹性接触变形状态下的接触刚度模型和弹塑性接触第一与第二变形状态下的接触刚度模型, 在此

基础上进一步建立了考虑基体变形的硬涂层粗糙表面法向接触刚度统计模型。

(2) 仿真分析结果表明: 考虑基体变形的硬涂层粗糙表面法向接触刚度小于未考虑基体变形的; 硬涂层粗糙表面法向接触刚度随着接触载荷的增大而增大; 有无硬涂层, 法向接触刚度差异明显, 但随着硬涂层厚度比的增大, 硬涂层粗糙表面法向接触刚度增大的趋势变缓; 涂层越硬, 硬涂层粗糙表面法向接触刚度越大; 硬涂层粗糙表面法向接触刚度随着基体塑性指数的增大而增大。

(3) 搭建了涂层粗糙表面法向接触刚度实验研究装置与测试系统, 获取了基体材料为 45 钢、涂层材料为 TiN 的涂层粗糙表面法向接触刚度, 并应用所建模型进行了计算, 计算结果与实验结果吻合较好, 证明了所建模型的正确性。

参考文献:

- [1] IIDA K, ONO K. Design consideration of contact/near-contact sliders based on a rough surface contact model [J]. Journal of Tribology, 2003, 125(3): 562-570.
- [2] HOGMARK S, JACOBSON S, LARSSON M. Design and evaluation of tribological coatings [J]. Wear, 2000, 246(1/2): 20-33.
- [3] 杜建融, 陶冠羽, 曾路, 等. TiAlSiN 纳米复合涂层的研究进展 [J]. 表面技术, 2024, 53(18): 31-54.
DU Jianrong, TAO Guanyu, ZENG Lu, et al. Research progress on TiAlSiN nanocomposite coatings [J]. Surface Technology, 2024, 53(18): 31-54.
- [4] 王恩泽, 鲍崇高, 邢建东. 涂层对氧化铝/耐热钢基复合材料磨料磨损性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(9): 945-948.
WANG Enze, BAO Chonggao, XING Jiandong. Effects of particle coatings on abrasive resistance of alumina/heat-resistant steel matrix composite at high temperature [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(9): 945-948.
- [5] 王浩, 张镭驿, 席柯楠, 等. 耐热钢表面 Cr_2O_3 涂层原子掺杂后的抗氢脆性能与阻氢机理 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(10): 189-199.
WANG Hao, ZHANG Rongyi, XI Kenan, et al. Hydrogen embrittlement resistance and hydrogen barrier mechanism of atomically doped Cr_2O_3 coatings on heat-resistant steel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(10): 189-199.
- [6] 赵新波, 屈治国, 张剑飞, 等. 膨胀石墨和碳纳米管涂层对相变材料性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(6): 63-72.

- ZHAO Xinbo, QU Zhiguo, ZHANG Jianfei, et al. Effect of expanded graphite and carbon nanotubes coating on phase change materials properties [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(6): 63-72.
- [7] 刘彦庆, 宋余九. 几种表面涂层组织和耐蚀性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1990(6): 129-130.
- LIU Yanqing, SONG Yujie. Study on microstructure and corrosion resistance of several surface coatings [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1990(6): 129-130.
- [8] HOLMBERG K, RONKAINEN H, LAUKKANEN A, et al. Friction and wear of coated surfaces: scales, modelling and simulation of tribomechanisms [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(4/7): 1034-1049.
- [9] CHEN Z, ETSION I. The elastic-plastic contact behavior of rough surfaces with hard coatings [J]. Tribology International, 2019, 134: 435-442.
- [10] BELL T, MAO K, SUN Y. Surface engineering design: modelling surface engineering systems for improved tribological performance [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108-109: 360-368.
- [11] COLE S J, SAYLES R S. A numerical model for the contact of layered elastic bodies with real rough surfaces [J]. Journal of Tribology, 1992, 114(2): 334-340.
- [12] RAMACHANDRA S, OVAERT T C. Effect of coating geometry on contact stresses in two-dimensional discontinuous coatings [J]. Journal of Tribology, 2000, 122(4): 665-671.
- [13] BHUSHAN B, VENKATESAN S. Effective mechanical properties of layered rough surfaces [J]. Thin Solid Films, 2005, 473(2): 278-295.
- [14] CHEN Zhou, GOLTSBERG R, ETSION I. Plasticity evolution in a coated sphere compressed by a rigid flat [J]. Tribology International, 2016, 98: 116-124.
- [15] WANG Tingjian, WANG Liqin, GU Le, et al. Stress analysis of elastic coated solids in point contact [J]. Tribology International, 2015, 86: 52-61.
- [16] GOLTSBERG R, ETSION I, DAVIDI G. The onset of plastic yielding in a coated sphere compressed by a rigid flat [J]. Wear, 2011, 271(11/12): 2968-2977.
- [17] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proceedings of the Royal Society of London: A Mathematical and Physical Sciences, 1966, 295(1442): 300-319.
- [18] 廖山钧, 张学良, 廉义章. 硬涂层粗糙表面接触刚度统计建模研究 [J]. 润滑与密封, 2025, 50(6): 52-59.
- LIAO Shanjun, ZHANG Xueliang, LIAN Yizhang. Research on statistical model of contact stiffness of hard-coated rough surfaces [J]. Lubrication Engineering, 2025, 50(6): 52-59.
- [19] YEO C D, KATTA R R, POLYCARPOU A A. Improved elastic contact model accounting for asperity and bulk substrate deformation [J]. Tribology Letters, 2009, 35(3): 191-203.
- [20] 李玲, 李治强, 张健, 等. 含硬涂层结构的表面微观接触新模型 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 195-201.
- LI Ling, LI Zhiqiang, ZHANG Jian, et al. A new micro-contact model for rough surface with a hard-coating [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(3): 195-201.
- [21] 李玲, 王晶晶, 史小辉, 等. 考虑基体变形的结合面连续光滑接触刚度模型 [J]. 工程力学, 2021, 38(12): 223-231.
- LI Ling, WANG Jingjing, SHI Xiaohui, et al. A continuous smooth contact stiffness model for joint surface considering substrate deformation [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 223-231.
- [22] 张伟, 张学良, 温淑花, 等. 考虑微凸体基体变形和相互作用的结合面法向接触刚度模型 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 115-121.
- ZHANG Wei, ZHANG Xueliang, WEN Shuhua, et al. A normal contact stiffness model of joint surfaces considering interaction of deformations of substrate and asperity [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 115-121.
- [23] 王晶晶, 李玲, 孙立泰, 等. 耦合基体变形与微凸体相互作用的结合面刚度模型 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 190-199.
- WANG Jingjing, LI Ling, SUN Litai, et al. Stiffness model of joint surface based on coupling of substrate deformation and asperity interaction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 190-199.
- [24] CHEN Z, GOLTSBERG R, ETSION I. A universal model for a frictionless elastic-plastic coated spherical normal contact with moderate to large coating thicknesses [J]. Tribology International, 2017, 114: 485-493.
- [25] GOLTSBERG R, ETSION I. A universal model for the load-displacement relation in an elastic coated spherical contact [J]. Wear, 2015, 322-323: 126-132.
- [26] LI Ling, WANG Jingjing, SHI Xiaohui, et al. A modified elastoplastic contact stiffness model considering continuous smooth contact characteristics and substrate deformation [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2021, 34(5): 754-765.
- [27] MCCOOL J I. Relating profile instrument measurements to the functional performance of rough surfaces [J]. Journal of Tribology, 1987, 109(2): 264-270.

(编辑 亢列梅)