

# 燃机端面齿微动磨损分析及数值仿真

蒋翔俊, 张优云, 袁淑霞

(西安交通大学 现代设计与轴承转子系统教育部重点实验室, 710049 西安, j.97011311@stu.xjtu.edu.cn)

**摘要:** 运用 Archard 磨损定律以及接触力学理论, 研究了燃机端面齿楔形接触面在不同交变载荷力作用下接触面接触压力、接触宽度、间隙量、滑移量等接触特征参数随磨损过程的变化发展规律. 结果表明, 接触齿面的磨损是由于接触面间反复的相对滑动、磨损导致了接触面几何形貌以及接触压力的改变, 这些因素又反过来影响磨损过程. 各参数具有时间依赖性, 并且之间存在不可分割的关系. 将计算结果与试验结果进行比较, 证明该计算模型具有有效性和合理性.

**关键词:** 端面齿接触; 磨损模型; 磨损规律; 磨损失效

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)03-0075-05

## An investigation and simulation of fretting wear of curvic in a gas turbine engine

JIANG Xiang-jun, ZHANG You-yun, YUAN Shu-xia

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China, j.97011311@stu.xjtu.edu.cn)

**Abstract:** Archard's wear law and the contact mechanics method are used to evaluate the evolution of contact characteristics including contact pressure, contact width, gap and slip functions under conditions of different tangential force within slip zones of curvic attachments of a gas turbine with wedge-side surface in fretting. It can be concluded that the repeated slip occurring near the edges of contact generates wear that changes the contact geometry and contact stresses. Thus, the change of contact geometry and redistribution of the contact pressure in turn influences the wear rate in the slip zones. All functions in the wear contact problem are time-dependent and inter-connected. The results, compared to the experimental ones, show that the present model is valid and reasonable.

**Key words:** curvic attachments; wear model; wear law; wear failure

端面齿是燃气轮机以及航空涡轮发动机连接和传扭的重要零部件. 端面齿接触面磨损主要分为2种情况, 一种情况为部分滑移, 而另一种就是接触面的整体滑移. 相对来说, 接触面部分滑移磨损比整体滑移磨损的情况更为复杂, 也更易导致齿面失效, 因此, 本文主要讨论接触面部分滑移的磨损. 由于磨损, 在接触部件接触区内的外形出现了变化, 从而接触面压力和接触面的宽度重新分

布. 磨损率和接触压力以及两接触面的相对滑动速度存在关联, 接触压力的重新分布又反过来影响磨损率<sup>[1-2]</sup>. 文献[3-7]考虑了由于磨损导致接触面外形变化的磨损接触问题. 文献[8-9]结合商用有限元软件, 对磨损过程进行模拟仿真, 并且将预测结果与实验结果进行了对比分析. 然而以上文献都没有对端齿楔形类接触面的磨损进行过探讨.

本文在结合接触力学以及摩擦磨损理论的基础上, 建立了端面齿磨损规律的力学模型, 分析了端面齿接触面在交变剪切力作用下各接触特征参数随磨损过程的变化发展规律.

收稿日期: 2009-09-05.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB707706).

作者简介: 蒋翔俊(1979—), 男, 博士研究生;

张优云(1947—), 女, 教授, 博士生导师.

### 1 磨损分析的力学模型

端面齿接触面边缘最易发生磨损. 为了对关键区域更好地进行磨损分析, 建立等效图如图 1 (a) 所示, 其中压力  $P$  恒定, 剪切力  $Q$  做周期摆动. 依据接触压力的不同分布分为  $\alpha, \beta, \gamma$  3 个区域. 部分滑移满足条件:

$$|Q| < \mu P.$$

$\mu$  为摩擦因数, 文献[10-11]表明, 磨损率和接触压力以及相对滑移速度成正比. 表达式如下:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = K_w p(x, t) \left| \frac{\partial s(x, t)}{\partial t} \right|.$$

其中,  $K_w$  为磨损系数,  $p(x, t)$  表示压力,  $V(x, t)$  为滑移速度,  $s(x, t)$  为瞬时时间  $t$  时  $x$  坐标点的位移量, 可由如下方程表示:

$$s(x, t) = \begin{cases} 0, & |x| < b^*(t); \\ (u_{x1} - u_{x2}) - \delta_x, & b^*(t) \leq |x| \leq b(t). \end{cases}$$

其中:  $u_{x1}$  和  $u_{x2}$  表示接触表面在  $x$  坐标点的剪切位移;  $\delta_x$  表示接触体在  $x$  坐标点的相对位移;  $b^*(t)$  表示瞬时  $t$  时粘连区域的尺寸宽度;  $b(t)$  表示瞬时  $t$  时接触区域的尺寸宽度.

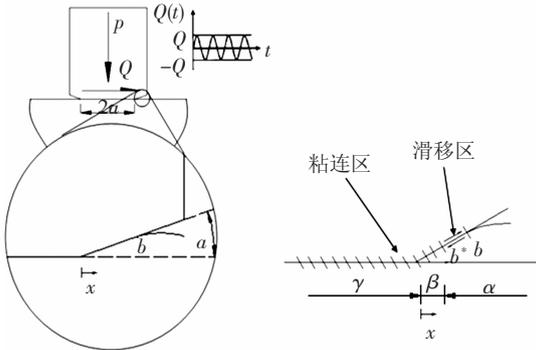


图1 端面齿等效力学模型图

假设  $\Delta w(x, N)$  表示 2 个接触体在第  $N$  次循环的磨损量. 所以  $N$  次循环后总的磨损量为

$$w(x, N) = \sum_{n=1}^N \Delta w(x, n).$$

其中:

$$\Delta w(x, N) \approx K_w [p(x, N-1) |s_{N-1}(x, b^*)| + p(x, N) |s_N(x, b^*)|], \quad |x| > b^*, \quad (1)$$

$$s_N(x, b^*) = \frac{2}{\pi E^*} \int_{-b(N)}^{b(N)} \left( \frac{1}{x-x'} - \frac{1}{b^*-x'} \right) q(x', b^*) dx';$$

$$q(x, N) = \begin{cases} \mu p(x, N) - q^*(x), & 0 \leq x \leq b^*; \\ \mu p(x, N), & b^* \leq x \leq b(N), \end{cases} \quad (2)$$

$b^*$  表示粘连区域的尺寸宽度.

如图 1(b) 所示, 楔形接触面接触外形可表示如下:

$$f(x) = \begin{cases} (x-a)\tan\alpha, & a \leq x \leq b(N); \\ 0, & -a \leq x \leq a; \\ -(x+a)\tan\alpha, & -b(N) \leq x \leq -a. \end{cases} \quad (3)$$

对于弹性半平面的二维接触问题, 可得

$$u'_i(x, N) = \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)E^*} q(x, N) - \frac{1}{\pi E^*} \int_{-b(N)}^{b(N)} \frac{p(s, N)}{x-s} ds, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$u_{z1}, u_{z2}$  表示由于 2 个接触体变形导致的接触表面的法向位移.

其中,  $E^* = E/2(1-\nu^2)$ . 接触宽度  $b(N)$  可由

$$p(b(N), N) = 0 \quad (5)$$

求得. 接触压力  $p(x, N)$  满足等式

$$\int_{-b(N)}^{b(N)} p(x, N) dx = P, \quad (6)$$

由式(2)~(5)可得

$$\frac{2}{\pi E^*} \int_{-b(N)}^{b(N)} \left( \frac{1}{x-x'} - \frac{1}{b(N)-x} \right) p(x', N) dx' = w(x, N) + f(x), \quad (7)$$

由(1)、(7)可得

$$\frac{2}{\pi E^*} \int_{-b(N)}^{b(N)} \left( \frac{1}{x-x'} - \frac{1}{b(N)-x'} \right) p(x', N) dx' = (K_w [p(x, N-1) |s_{N-1}(x, b^*)| + p(x, N) |s_N(x, b^*)|])' + f'(x). \quad (8)$$

### 2 结果及分析

#### 2.1 仿真分析

令  $a = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $P = 1.5 \times 10^{11} \text{ N/m}$ ,  $\mu = 0.4$ ,  $E = 2.05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,  $\nu = 0.3$ , 剪切力分别取  $Q = 0.134 \mu P$  和  $Q = 0.3 \mu P$  两种情况进行讨论. 依据材料性质及工况环境, 取磨损常数  $K_w = 2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ .

为了便于观察计算结果, 将坐标原点沿  $x$  坐标移至  $x = a$ . 由文献[12], 接触面初始压力及剪切应力表达式为

$$p(x, 0) = -K_L \ln \left| \frac{\sqrt{1-x/b_0} - 1}{\sqrt{1-x/b_0} + 1} \right|,$$

$$q(x, 0) = -\mu K_L \left( \ln \left| \frac{\sqrt{1-x/b_0} - 1}{\sqrt{1-x/b_0} + 1} \right| - \right.$$

$$\left. H(x+b^*) \ln \left| \frac{\sqrt{1-x/b^*} - 1}{\sqrt{1-x/b^*} + 1} \right| \right),$$

$$H(x+b^*) = 0, \quad |x| > b^*;$$

$$H(x+b^*) = 1, \quad |x| < b^*.$$

其中,  $K_L = \frac{P}{\int_{-b_0}^{b_0} \ln \left| \frac{\sqrt{1-x/b_0} - 1}{\sqrt{1-x/b_0} + 1} \right| dx}$ ,

初始接触宽度  $b_0$  以及粘连宽度  $b^*$  可表示为

$$b_0 = \left( \frac{AP}{2\alpha \sqrt{2a}} \right)^2, \quad \frac{b^*}{b_0} = \left( 1 - \frac{Q}{\mu P} \right)^2,$$

其中  $A = 3/(4E^*)$ 。

如图1所示令

$$\begin{cases} P_\alpha(0) = \int_{b^*}^{b_0} p(x,0) dx, & b^* < x \leq b; \\ P_\beta(0) = \int_0^{b^*} p(x,0) dx, & 0 < x \leq b^*; \\ P_\gamma(0) = \int_{-a}^0 p(x,0) dx, & -a < x \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

由于压力  $P$  保持不变, 因此由式(6)得

$$P_\alpha(0) + P_\beta(0) + P_\gamma(0) = P/2, \quad (10)$$

$$P_\alpha(N) + P_\beta(N) + P_\gamma(N) = P/2. \quad (11)$$

由式(8)可知,

$$\frac{2}{\pi E^*} \int_{-b^*}^{b(N)} \left( \frac{1}{x-x'} - \frac{1}{b(N)-x'} \right) p(x',N) dx' =$$

$$(K_w [p(x,N-1) | s_{N-1}(x,b^*) | + p(x,N) | s_N(x,b^*) | ])' + f'(x), \quad b^* < |x| < b(N), \quad (12)$$

由于磨损过程当中粘连区接触面几何形貌保持不变, 令

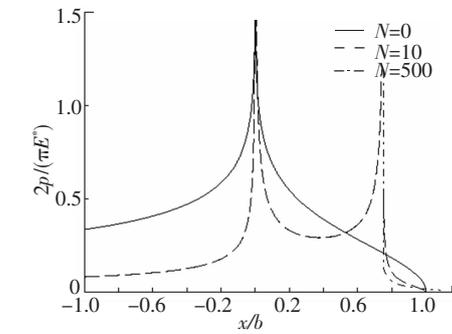
$$k_1 = P_\beta(0)/(P_\beta(0) + P_\gamma(0)), \quad (13)$$

因此, 由式(9) - (13)可得

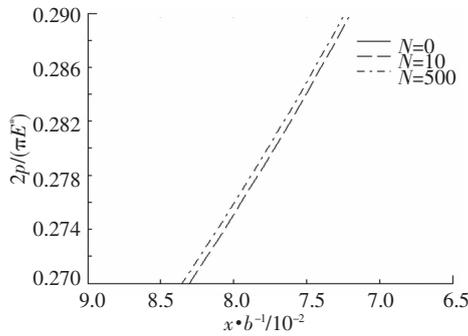
$$\begin{cases} P_\alpha(N) = \int_{b^*}^{b(N)} p(x,N) dx, \\ P_\beta(N) \approx P_\beta(0) + k_1(P/2 - P_\alpha(N)), \\ P_\gamma(N) \approx P_\gamma(0) + (1 - k_1)(P/2 - P_\alpha(N)). \end{cases} \quad (14)$$

将(14)式联立式(6)、(8)、(11)得整体  $p(x,N)$  分布。

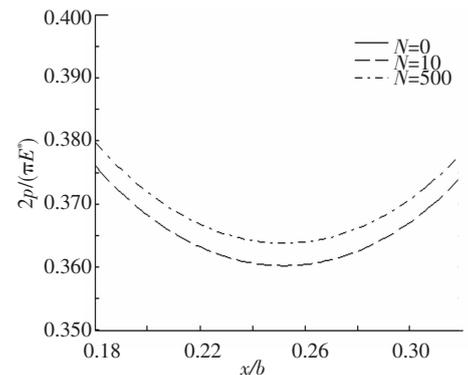
当  $Q = 0.134 \mu P$  时,  $b^*/b = 0.75$ ;  $Q = 0.3 \mu P$  时,  $b^*/b = 0.50$ 。由图2~4可以发现, 在



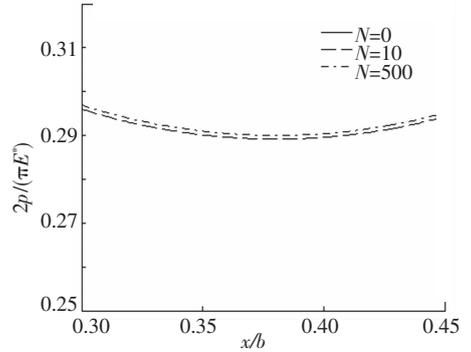
(a)  $Q = 0.134 \mu P$  时接触压力变化趋势



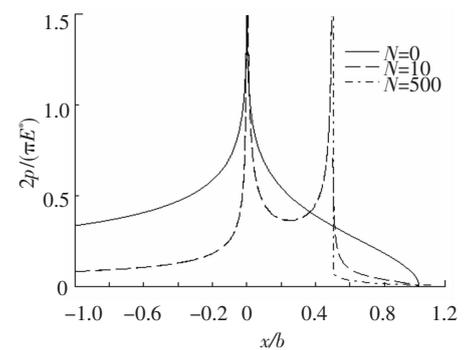
(b) 图2(a)的局部放大图



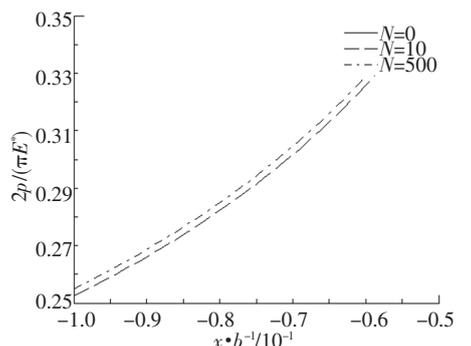
(c) 图2(d)的局部放大图



(d) 图2(a)的局部放大图



(e)  $Q = 0.3 \mu P$  时接触压力变化趋势



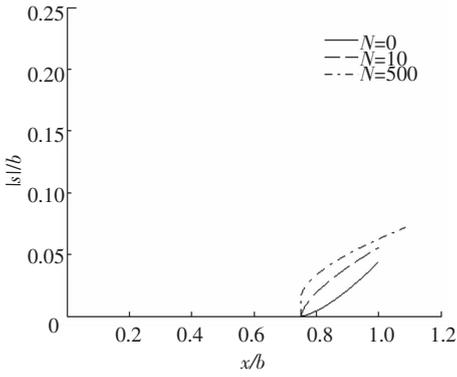
(f) 图2(d)的局部放大图

图2 接触压力随磨损过程的变化趋势

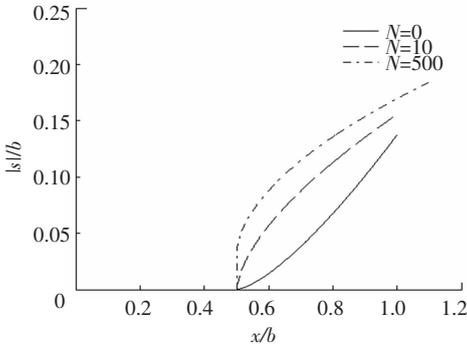
特征却仍旧保持相似的特点. 比如粘连区并未随着磨损的进行而发生变化, 在粘连区和滑移区相连处出现大的应力峰值, 滑移区的位移量以及滑移宽度逐渐增加, 磨损量逐渐增加等.

### 2.2 有效性分析

在交变的剪切力  $Q$  的作用下, 接触面的滑移区出现了磨损. 图 5(a) 所示是部分滑移环境下的一个磨损试验结论<sup>[11]</sup>. 磨损盘样本是具有端部为圆弧形倒角的平面的冲压体, 其外形图如图 5(a) 虚线所示. 样本在压力  $P = 1.2 \times 10^6$  N/m 和交变剪切力  $Q = 3.7 \times 10^6$  N/m 作用 86 500 循环后接触面表面出现磨损现象. 可以发现由于磨损, 在样本接触区的端部滑移区附近出现了凹陷, 而在中间为粘连接触状态的区域没有出现明显的磨损, 由文献[12-14]的分析可以发现相同的实验结果. 本文涉及的端齿楔形接触面仿真分析如图 5(b) 所示, 可以看出, 在接触面的滑移区域出现了较大的凹陷, 而在粘连区并未发生磨损现象. 为了简化计算, 本文的力学模型采用了较大的压力值 ( $P = 1.5 \times 10^{10}$  N/m), 使得模型在少数量的磨损次数后就出现了相对较大的磨损量. 由于模型所采用的压力值较大, 因此在接触面边缘的应力奇异点处接触应力可能会超过材料的屈服极

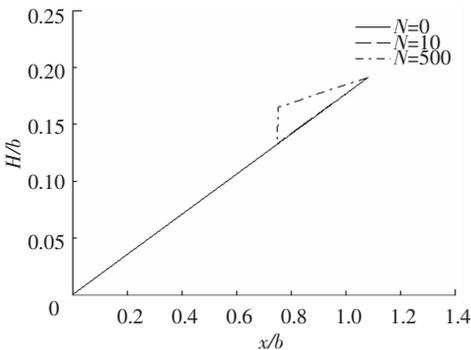


(a)  $Q = 0.134 \mu P$  时位移函数变化趋势

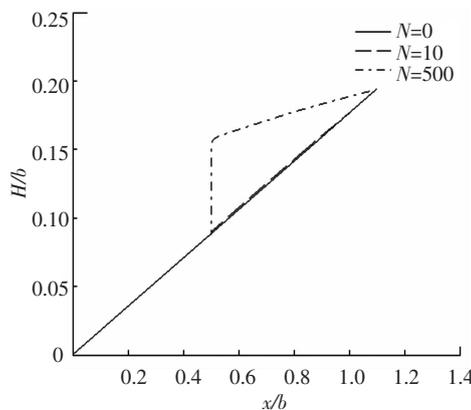


(b)  $Q = 0.300 \mu P$  时位移函数变化趋势

图3 接触面位移函数随着磨损过程的变化趋势



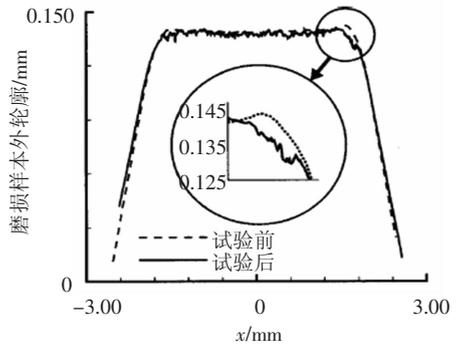
(a)  $Q = 0.134 \mu P$  时间隙量变化趋势



(b)  $Q = 0.300 \mu P$  时间隙量变化趋势

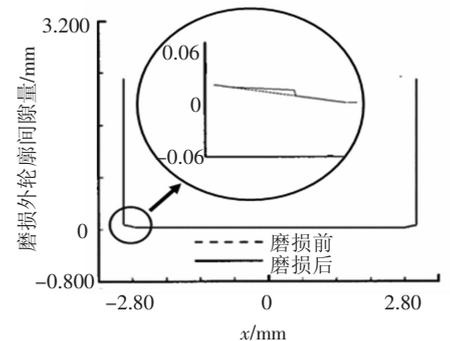
图4 接触面间隙量随着磨损过程的变化趋势

剪切力  $Q$  增大的情况下, 滑移区增大, 粘连区减小, 滑移区位移量增大. 同时, 滑移区接触压力逐渐减小, 粘连区接触压力逐渐增大. 虽然由于剪切力  $Q$  的增加使得磨损对接触面整体的应力变化影响更大, 但是由于磨损导致的应力、位移等接触



外载荷  $P = 1.2 \times 10^6$  N/m,  $Q = 3.7 \times 10^5$  N/m

(a) 部分滑移接触磨损样本在磨损试验中 86 500 循环载荷后的外轮廓



外载荷  $P = 1.5 \times 10^{10}$  N/m,  $Q = 0.5 \mu P$  N/m

(b) 部分滑移接触磨损仿真 500 循环载荷后的外轮廓

图5 仿真结果与试验结果对比

限,然而本文基于接触力学方法所做的仿真在磨损过程中并不考虑塑性变形的影响,因此,这种方法即能够大大节省计算成本又能够保证计算结果的有效性.如图5(a)、5(b)实线所示可以发现由于磨损,在接触面的滑移区都出现了不同程度的凹陷,而在粘连区并未发生明显的磨损现象,在接触面粘连区与滑移区的交界处附近磨损情况最为严重.与文献[8][15]的分析结果相似,由于磨损,使得接触面滑移区的接触压力降低,滑移量增加,接触面的接触宽度逐渐增加.

### 3 结 论

1)本文基于接触力学以及摩擦磨损理论,建立了端面齿磨损规律的力学模型,分析了端面齿摩擦磨损的规律.

2)端面齿的磨损主要出现在接触面边缘的滑移区域,与试验结论相吻合.

3)在磨损过程当中,不同的交变剪切力决定了接触面的滑移区和粘连区大小,在不同的交变剪切力作用下,接触面的接触压力、接触宽度、间隙量,滑移量等接触特征参数的量级都发生变化,然而磨损规律仍旧保持不变.

4)端齿楔形接触面的磨损损伤使接触面几何外形发生变化,并继而影响接触表面的初始接触应力,然而接触应力的变化对接触表面裂纹的成核以及孵化有重要的影响,因此,对于端齿磨损对接触面裂纹孵化以及扩展最终导致端齿失效的影响需要在将来进一步研究.

### 参考文献:

[1] RABINOWICZ E. The determination of the compatibility of metals through static friction tests [J]. ASLE Trans, 1971, 14: 198 - 205.

[2] STOWERS I F, RABINOWICZ E. The mechanism of fretting wear[J]. ASME J of Tribol, 1973, 95: 65 - 70.

[3] KOROVCHINSKY M V. Local contact of elastic bodies with wear of their surface [C]//Contact Interaction of Solid Bodies and Calculation of Friction Forces and

Wear. Moscow: Nauka, 1971: 130 - 140.

- [4] GALIN L A. Contact problems of the theory of elasticity in the presence of wear[J]. J Appl Math Mech, 1976, 40(6): 981 - 986.
- [5] GALIN L A, GORYACHEVA I G. Axisymmetric contact problem of the theory of elasticity in the presence of wear[J]. J Appl Math Mech, 1977, 41(5): 826 - 831.
- [6] GORYACHEVA I G. Wear contact problem for the ring inserted into cylinder[J]. J Appl Math Mech, 1980, 44(2): 363 - 367.
- [7] GORYACHEVA I G. Contact mechanics in tribology [M]. Boston, MA: Kluwer Academic, 1998.
- [8] JOHANSSON L. Numerical simulation of contact pressure evolution in fretting [J]. J Tribol, 1994, 116: 247 - 254.
- [9] DING J, LEEN S B, MCCOLL I R. The effect of slip regime on fretting wear-induced stress evolution[J]. Int J Fatigue, 2004, 26: 521 - 531.
- [10] RABINOWICZ E. The determination of the compatibility of metals through static friction tests [J]. ASLE Trans, 1971, 14: 198 - 205.
- [11] STOWERS I F, RABINOWICZ E. The mechanism of fretting wear[J]. Journal of Tribology (Transactions of the ASME), 1973, 95: 65 - 70.
- [12] CHURCHMAN C M, SACKFIELD A, HILLS D A. A semi-infinite chamfered contact solution and its application to almost complete contacts[J]. International journal of solids and structures, 2006, 43: 22 - 23.
- [13] SZOLWINSKI M P, FARRIS T N. Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024 - T351 aluminum alloy[J]. Wear, 1998, 221: 24 - 36.
- [14] SZLOWINSKI M P, HARISH G, FARRIS T N. In-situ measurement of near-surface fretting contact temperatures in an aluminum alloy[J]. ASME J Tribol, 1999, 121: 11 - 19.
- [15] GORYACHEVA I G, RAJEEV P T, FARRIS T N. Wear in partial slip contact[J]. Journal of Tribology (Transactions of the ASME), 2001, 123, 44: 848 - 856.

(编辑 杨波)