

双粗糙面滑动摩擦过程应力与应变分析*

赖联锋 高诚辉 黄健萌

(福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350108)

【摘要】建立了具有分形特征的二维双粗糙表面滑动接触模型,考虑材料的弹塑性变形及滑动过程中损伤失效,运用有限元方法动态探讨相嵌微凸体在滑动过程中应力与应变的变化情况。结果显示不同位置的等效塑性应变沿深度的变化规律不同,最大等效塑性应变变量发生在摩擦次表层的某一深度处;随着塑性应变的增大,导致材料表层下微观裂纹的萌生,在外载荷持续作用下,表面一定深度处存在着一交错的剪切应力区,这一应力区阻止了裂纹沿深度方向扩展,但却促使了裂纹沿平行于摩擦表面方向的延伸裂纹扩展乃至发生断裂。

关键词: 双粗糙分形表面 滑动接触模型 损伤失效 等效塑性应变 剪切应力

中图分类号: TH117.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)12-0278-05

Stress and Strain Analysis in Sliding Contact with Two Fractal Surfaces

Lai Lianfeng Gao Chenghui Huang Jianmeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract

A 2-D sliding model of micro-scale was established between two rough surfaces exhibiting fractal behavior, and the stress and strain was discussed by using the finite element analysis. A pair of asperities was analyzed take into account elastic-plastic material properties with material failure. The transient stress/strain distribution of the rough solid was presented. The numerical results showed that the equivalent plastic strain versus different depth which at different locations showed different laws. Failure began beneath the surface at the region of highest plastic strain. A shear stress zone exited at a certain depth from the contact surface in the rear of the contact asperity. This shear stress zone on the one hand prevented the crack from extending along the depth direction, on the other hand, prompted the crack along an extension of the parallel to the direction of the friction surface crack growth and leads to final fracture.

Key words Two fractal surfaces, Sliding model, Material failure, Equivalent plastic strain, Shear stress

引言

粗糙表面表征和接触力学并不是摩擦学特有的问题,不过它们与摩擦、磨损现象的关系密切,是理解摩擦和磨损现象首先需要解决的问题,因而成为摩擦学研究中的一个专门领域^[1]。许多学者已对

双粗糙面的静态接触进行了研究^[2~6],但大都未考虑粗糙体的弹塑性变形。摩擦是一动态过程,建立2个粗糙表面间滑动接触模型有利于更深入地理解摩擦磨损机制。

关于双粗糙表面的研究,国内外学者已经进行了部分工作,如陈国安等^[7]对一对二维微凸体进行

收稿日期: 2012-06-24 修回日期: 2012-07-18

* 国家自然科学基金资助项目(51175085)、福建省自然科学基金资助项目(2011J01299、2012J01206)和福州大学科技发展基金资助项目(2010-XQ-13)

作者简介: 赖联锋,博士生,主要从事有限元计算、摩擦学研究, E-mail: llf2531@yahoo.com.cn

通讯作者: 高诚辉,教授,博士生导师,主要从事摩擦学、表面工程、数字化设计研究, E-mail: gch@fzu.edu.cn

接触力学和运动学分析。Faulkner 等^[8]、Gong 等^[9]、Raghvendra 等^[10] 及 Jackson^[11] 等运用有限元法对两球体间滑动过程进行了分析研究。以往的粗糙表面滑动摩擦接触研究已取得一定进展,但接触处的干涉量都比较小均未考虑到严重变形与磨损,而且模型较简单,多为球体或圆柱体。本文以工程粗糙表面细观区间内的微凸体为主要研究对象,考虑滑动过程中材料的弹塑性变形及磨损,建立具有分形特征的二维双粗糙表面滑动接触模型,与 ABAQUS 非线性有限元多物理场相结合,数值模拟和分析滑动过程相嵌微凸体的应力/应变。

1 滑动接触模型建立

1.1 粗糙表面及其接触建模

在摩擦学中,粗糙表面的轮廓曲线可以用 Weierstrass - Mandelbrot (简称 W - M) 函数^[12~13] 实现随机粗糙表面的数字表征,本文以 W - M 函数生成轮廓线表示为 $z_1(x)$ 和 $z_2(x)$,将两轮廓线作为粗糙体 A 和 B 的粗糙表面,并建立坐标系进行装配,以下表面轮廓的算术平均中线为横坐标轴(x 轴),两粗糙表面轮廓算术平均中线的垂直距离用 $h(x)$ 表示,如图 1 所示。两个粗糙表面上分布着大量形状各异、尺寸不同的微凸体。有关分形粗糙表面的生成见文献[14~16]。

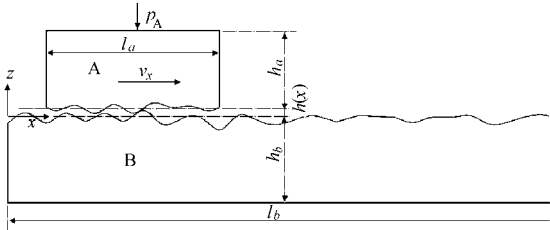


图 1 微凸体滑动接触模型

Fig. 1 Model of 2-D with fractal surface

1.2 接触状态受力分析

由于两表面微凸体顶点之间不一定恰好对齐,因此一般成对微凸体的接触发生在其肩部位置而非顶点位置,以一对微凸体的接触分析为基础,继而扩展到整个接触表面,如图 2 所示。分析过程作如下假设:①材料为各向同性。②未考虑温度的影响。③要使两相互干涉的微凸体发生相对滑移,微凸体必须变形,使其位移场和滑动方向一致。

粗糙体 B 固定不动,粗糙体 A 受到 z 方向的载荷 p_A ,并以某一速度 v_x 相对与粗糙体 B 沿 x 方向移动(图 1),考虑到滑动过程 z 方向产生的移动,接触过程中对于接触状态的判断可用方程表示为

$$\begin{aligned} u_{iA} + u_{iB} &= (\delta - h(x)) \cos \theta_{ix} \quad (\text{接触,接触域}) \\ u_{iA} + u_{iB} &> (\delta - h(x)) \cos \theta_{ix} \quad (\text{分离,接触域外}) \end{aligned}$$

式中 u_{iA} 、 u_{iB} ——微凸体接触对 i 接触时法向位移
 δ ——两粗糙体的刚体位移
 θ_{ix} ——微凸体接触对 i 的接触面与滑移方向的夹角,即接触角

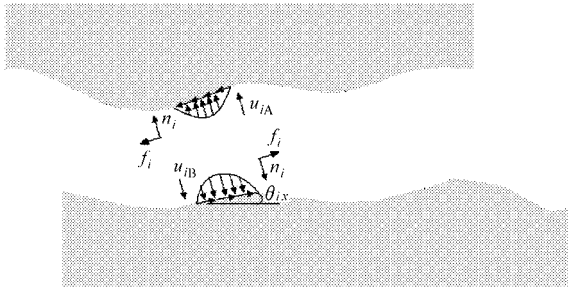


图 2 微凸体接触对 i 接触面上的受力分析

Fig. 2 Contact force distributions

图 2 表示微凸体接触时接触面上的接触受力分析。文献[17]对接触区域进行了受力分析,在接触区域内有垂直于接触面的变形阻力 n_i ,又有平行于接触面的摩擦阻力 f_i ,得出整个接触表面的所有接触区 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的 z 方向和 x 方向的作用力为

$$F_z = \sum \int_{A_i} (f_i \cos \theta_{ix} - n_i \sin \theta_{ix}) dx \quad (1)$$

$$F_x = \sum \int_{A_i} (f_i \sin \theta_{ix} + n_i \cos \theta_{ix}) dx \quad (2)$$

根据 Johnson 提出的接触力学理论^[18],可得出由载荷 F_z 和 F_x 所产生的下粗糙体 B 内任意一点(x, z)的应力分量。在滑动过程中,随着接触区域的不断变化,使微凸体接触对的受力情况发生变化,继而引起物体接触处及内部的应力分量的变化,接触区域的变形程度也随之发生变化,或弹性变形,或塑性变形,或磨损失效。

1.3 失效准则应用

双粗糙表面在滑动接触时,摩擦副表面上的微凸体相互交嵌,要实现两粗糙体的连续相对滑动,在滑动过程中要考虑材料的损伤失效。

选用 Johnson - Cook 断裂准则^[19] 进行失效判断。其初始准则是模型假设在损伤开始时等效塑性应变为

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot (1 + d_5 T^*) \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \eta &= -p/q \\ T^* &= (T - T_r) / (T_m - T_r) \end{aligned}$$

式中 $d_1 \sim d_5$ ——材料失效参数

$\dot{\varepsilon}^{pl}$ ——等效塑性应变速率
 ε_0 ——参考应变速率
 T^* ——无量纲温度
 η ——三轴应力度
 p ——静水应力

q ——等效 Mises 应力
 T_r ——参考温度(室温)
 T_m ——材料的融化温度

损伤演化定义损伤初始之后的材料行为,它描述了当满足损伤初始准则后,材料刚度退化的速率。基于标量损伤方法的损伤变量为

$$D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl}, T^*)} \tag{4}$$

当损伤变量 $D = 1$ 时,材料点完全失效,即发生断裂。

2 仿真分析

2.1 材料参数

选用钛合金为分析材料,其密度 ρ 为 $4\,420\text{ kg/m}^3$,弹性模量 E 为 115 GPa ,泊松比 γ 为 0.31 ^[20]。考虑粗糙体的弹塑性变形及损伤失效,采用 DCS-200 型微机控制电子万能实验机对钛合金材料进行实验,图 3 为材料具有累积损伤的应力-应变曲线。

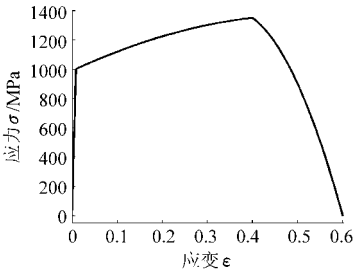


图 3 粗糙体 A、B 具有累积损伤的应力-应变曲线
Fig.3 True stress-strain curves with accumulated damage

由于未考虑温度及应变率的影响,式(3)可简化为

$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta) \tag{5}$$

根据文献[21]取各材料参数 $d_1 = 0.242$ 、 $d_2 = 0.183$ 和 $d_3 = 0.452$ 。

2.2 分析与讨论

分析过程中粗糙体 A 上表面施加的载荷 $p_A = 60\text{ MPa}$,相对滑动速度 $v_x = 10\text{ m/s}$ 。运用有限元方法对双粗糙表面的滑动过程进行模拟分析。由于粗糙表面相互作用的变化过程非常快速,为了详细观察滑动过程相嵌微凸体间的摩擦过程,所以选取某一微凸体接触对的滑动过程进行分析。

2.2.1 滑动过程的应变分析

塑性变形是产生裂纹以及断裂的基本条件,所以对微凸体的等效塑性应变变量进行分析研究。图 4 为滑动过程中不同位置的等效塑性应变云图。

图 4 显示了一相嵌微凸体接触对的滑动过程。从图可以看出,在仿真过程中,破坏发生时等效塑性

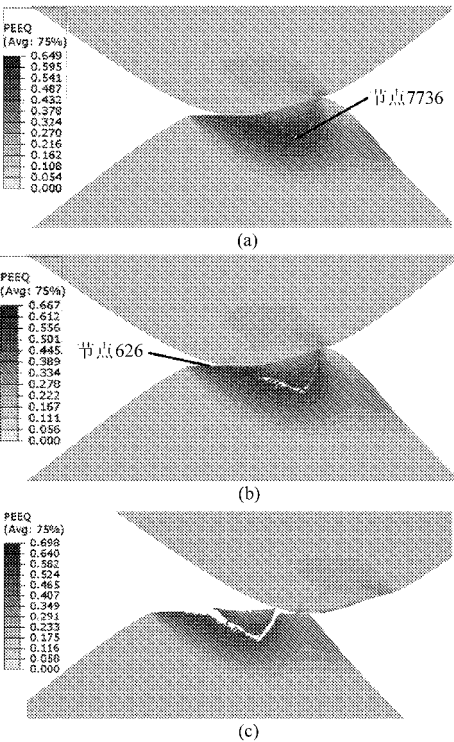


图 4 微凸体接触滑动过程的模拟
Fig.4 Simulation of asperities sliding process

应变达到 0.6,即完全失效时刻等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 。在滑动的初始阶段,微凸体相互间刚接触,等效塑性应变比较小,都小于材料的屈服极限,属于弹性变形阶段;当等效应力达到 $1\,000\text{ MPa}$ 时,微凸体开始发生塑性变形,这时等效应力和等效应变呈一定的非线性关系并逐渐增大;当达到完全塑性变形时等效应力为 $1\,350\text{ MPa}$,这时对应的等效应变为 0.4 ,达到损伤的起始点;滑动继续进行,损伤演化准则得以满足,节点的等效塑性应变不断增大,达到完全失效等效塑性应变 0.6 时,节点完全失效,材料表层的塑性变形导致在材料表层中的夹杂或微观缺陷周围萌生微孔或裂纹源,如图 4a 所示;随着滑动的继续进行,其余节点的塑形变形量逐渐增大,损伤逐步扩展与连接,如图 4b 所示;最终形成磨屑,图 4c 为形成磨屑脱落的状态。

2.2.2 塑性应变随深度的分布

从滑动过程的模拟可以看出裂纹产生的初始位置在表面下某一深度,塑性变形沿深度的变化规律早为摩擦学界所注意,因为它对摩擦表面的力学行为是一个明显的标记,对磨屑的形成和磨屑的尺寸有直接的影响。所以本文以粗糙体 B 裂纹产生过程的节点 7736(距离接触表面约 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 处)以及微凸体相接触时的初始接触节点 626 处(图 4)的等效塑性应变变量沿深度的变化规律进行分析(以接触表面节点为 0,表面以下深度为负值表示)。图 5 显示了节点的塑性应变变量在滑动过程中沿深度变化的规

律(X_r 表示微凸体 A 的滑动距离)。

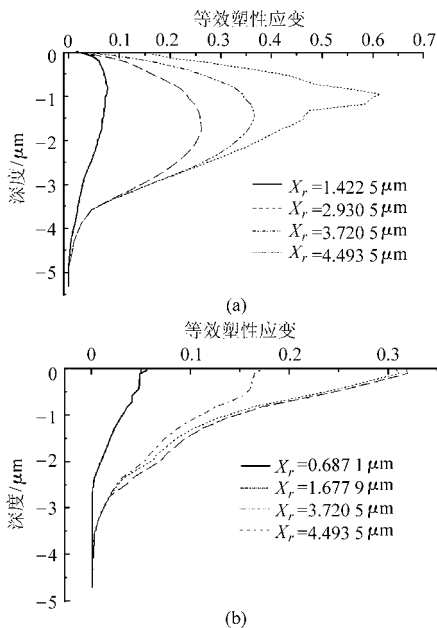


图 5 等效塑性应变随深度的变化曲线
Fig. 5 Equivalent plastic strain vs different depths
(a) 节点 7736 (b) 节点 626

图 5a 表示通过节点 7736(在微凸体的中后部)的塑性应变沿深度的变化曲线,从图可看出在微凸体相嵌的滑动过程中,塑性变形随着深度的增加先增大后减小,在微凸体中部偏后的某一次表层中(其深度约 $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$)塑性变形达最大。图 5b 表示通过节点 626(在微凸体的初始接触表面)的塑性应变沿深度的变化曲线,从图可看出摩擦表面上的塑性变形程度最严重,随着与表面距离的增加,塑性变形程度逐渐下降。这与文献[22]中通过实验得到的塑性变形沿深度的分布规律是一致的。

从图 4、5 还可看出:在滑动的过程中,微凸体 B 产生损伤破坏的初始位置在微凸体中后部分的某一次表层中,然后沿着最大等效塑性应变的损伤节点往表面慢慢延伸直至完全脱落磨屑。这是因为:在初始滑动时刻,接触表面上相互间的应力处于较小值,相应的塑性变形量也比较小,且大多处于接触表面上,随着滑动的不断进行,相嵌微凸体间不断挤压,使得塑性应变不断增大,在某一表层上不断累积直至达到损伤起始值。在微凸体的等效塑性应变图 4a 可以看出,在次表层上的最大等效塑性应变与粗糙表面间形成一个塑性应变等值区,随着初始破坏点的产生,裂纹沿着塑性应变在不同深度逐渐向表面慢慢延展。

2.2.3 剪切应力随深度的变化分析

当两个表面接触并发生相对位移时,接触凸点附近的应力分布极其复杂,其大小及分布对摩擦与磨损有很大影响,特别是剪切应力对裂纹的产生和

扩展有很大关系。从塑性变形随深度变化曲线可以观察到在裂纹形成时,节点 7736 为初始失效节点,所以本文选取通过节点 7736 的剪切应力随深度的变化进行分析。图 6 表示在节点失效前两个时刻剪切应力随深度的变化曲线。

从图 6 可以看出在微凸体接触表面下的初始距离为负值的剪切应力,随着深度的增加,在距离表面约 $1.0 \mu\text{m}$ 左右,剪切应力转换为正值,在这一深度附近存在着一交错的剪切应力区,而这一深度正是初始损伤破坏产生的位置。这是因为在外载作用下,微凸体 B 接触区域发生弹塑性变形,接触凸点被压平,材料向后堆积膨胀,使得接触区域表面初始距离表现为负值的剪切应力,而亚表层是初始裂纹产生的位置。裂纹的产生及扩展需要剪切塑性变形,所以这一深度上下存在着很明显的交错剪切应力的作用。在裂纹扩展过程中,随着粗糙表面的滑动,裂纹逐渐往表面移动。

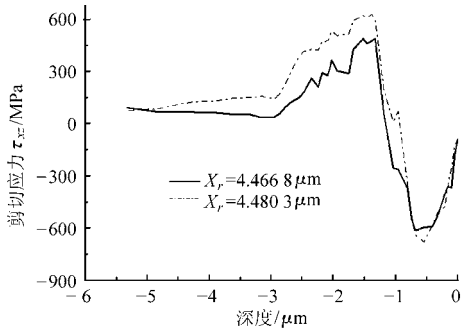


图 6 通过节点 7736 剪切应力随深度的变化
Fig. 6 Stress vs different depths through node 7736

这一结果说明在接触凸点后距表面一定深度处存在着一交错的剪切应力区,这一应力区阻止了裂纹沿深度方向扩展,却促使了裂纹沿平行于摩擦表面方向的延伸。这样,当两粗糙面接触时,微凸体每滑过一段距离,裂纹经受一次循环载荷,就在同样深度向前扩展一个微小的距离,当裂纹扩展到一定的临界尺寸时,在一些薄弱处转向表面,在切应力作用下,裂纹与表面之间的材料将以薄片的形式剥落下来。这与徐楠朴提出的剥层磨损理论^[23]认为磨损过程主要是次表面变形、裂纹形核和扩展 3 个过程也是非常吻合的,这也表明了本文模拟滑动过程的合理性。

3 结论

(1) 等效塑性应变沿深度的变化在不同的位置呈现出两种规律,其一是塑性应变随着深度的增加先增大后减小,在微凸体的某一次表层中塑性应变达到最大;另一种是在表面处塑性应变最大,随着深度的增加塑性应变逐渐减小。

(2) 材料损伤失效的起始发生在微凸体表面下某一深度,对于机械系统中进行准确的失效分析具有重要意义。

(3) 接触凸点后距表面一定深度处存在着交错剪切应力区,这一应力区阻止了裂纹沿深度方向扩展,但却促使了裂纹沿平行于摩擦表面方向的延伸。

参 考 文 献

- 1 周仲荣. 摩擦学发展前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 2 Lisowski Z, Stolarski T. An analysis of contact between a pair of surface asperities during sliding[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1981, 48(3): 493 ~ 499.
- 3 Xie Y, Williams J A. The prediction of friction and wear when a soft surface slides against a harder rough surface[J]. Wear, 1996, 196(1 ~ 2): 21 ~ 34.
- 4 Jamari J, Rooij M B, Schipper D J. Plastic deterministic contact of rough surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 2007, 129(4): 957 ~ 962.
- 5 Kogut L, Etsion I. A static friction model for elastic-plastic contacting rough surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 2004, 126(1): 34 ~ 40.
- 6 Yang J, Komvopoulos K. A mechanics approach to static friction of elastic-plastic fractal surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 2005, 127(2): 315 ~ 324.
- 7 陈国安, 葛世荣, 刘金龙. 滑动摩擦力分形预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 492 ~ 495.
Chen Guoan, Ge Shirong, Liu Jinlong. Fractal prediction model of sliding friction force [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 492 ~ 495. (in Chinese)
- 8 Faulkner A, Arnell R D. Development of a finite element model to simulate the sliding interaction between two, three-dimensional, elasto-plastic, hemispherical asperities[J]. Wear, 2000, 242(1): 114 ~ 122.
- 9 Gong Z Q, Komvopoulos K. Effect of surface patterning on contact deformation of elastic-plastic layered media[J]. ASME Journal of Tribology, 2003, 125(1): 16 ~ 25.
- 10 Raghvendra V, Itzhak G. A finite element study of the deformations, forces, stress formations, and energy losses in sliding cylindrical contacts[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2007, 42(7): 914 ~ 927.
- 11 Jackson R L, Duvvuru R S, Meghani H, et al. An analysis of elasto-plastic sliding spherical asperity interaction[J]. Wear, 2007, 262(1 ~ 2): 210 ~ 219.
- 12 Prasanta S, Niloy G. Finite element contact analysis of fractal surfaces[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(14): 4 245 ~ 4 252.
- 13 Yan W, Komvopoulos K. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(7): 3 617 ~ 3 624.
- 14 Gao C H, Huang J M, Lin X Z, et al. Stress analysis of thermal fatigue fracture of brake disks based on thermomechanical coupling[J]. ASME Journal of Tribology, 2007, 129(3): 536 ~ 543.
- 15 黄健萌, 高诚辉. 粗糙面变形特性对摩擦温度与接触压力的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 202 ~ 207.
Huang Jianmeng, Gao Chenghui. Influence of deformation characteristic of rough surface on frictional temperature and contact pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 202 ~ 207. (in Chinese)
- 16 黄健萌, 高诚辉. 弹塑性粗糙体/刚体平面滑动摩擦过程热力耦合分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 87 ~ 92.
Huang Jianmeng, Gao Chenghui. Thermo-mechanical research on frictional sliding between elasto-plastic rough solid and rigid flat [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 87 ~ 92. (in Chinese)
- 17 葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 18 Johnson K L. Contacts mechanics[M]. 徐秉业, 罗学富, 刘信声, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- 19 Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31 ~ 48.
- 20 机械工程材料性能数据手册编委会. 机械工程材料数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- 21 Peirs J, Verleysen P, van Paepegem W, et al. Determining the stress-strain behavior at large strains from high strain rate tensile and shear experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(5): 406 ~ 415.
- 22 邵荷生, 曲敬信, 许小禄, 等. 摩擦与磨损[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- 23 Suh N P. The delamination theory of wear[J]. Wear, 1973, 25(1): 111 ~ 124.