

45 钢表面制备 V 形凹槽及其摩擦学特性 *

纪敬虎, 符永宏, 华希俊, 符 昊, 康正阳

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 采用声光调 Q 固体 Nd:YAG 激光器在 45 钢试样表面制备了 V 形凹槽织构, 利用 UMT-2 的销盘式摩擦方式考察了 V 形凹槽的几何参数对表面摩擦性能的影响。结果表明: 45 钢表面制备的 V 形凹槽织构, 在油润滑条件下能有效减小表面的摩擦因数; 特别是在载荷较低、速度较大的工况下, 织构面的平均摩擦因数最大可比未织构面减小 64%。在试验范围内, 平均摩擦因数普遍随着 V 形凹槽角度的增加而减小, 随着边长的增大而减小, 存在最优的横向和纵向槽间距使得平均摩擦因数达到最小。

关键词: 表面织构; V 形凹槽; 摩擦性能; 激光; 45 钢

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2014)04-0107-05

Tribological Properties of 45 Steel Surface with V-grooves

Ji Jing-hu, Fu Yong-hong, Hua Xi-jun, Fu Hao, Kang Zheng-yang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu)

Abstract: V-grooves were produced on 45 steel with a Q switched solid-state Nd:YAG laser, then the tribological behaviors were evaluated by a UMT-2 apparatus with pin-on-disk mode. The results show that the regular V-grooves can be produced on the steel surfaces by laser. The friction coefficient of steel surfaces can be significantly reduced by the laser-induced V-grooves with oil lubrication. Laser textured specimens exhibit a lower and stable friction coefficient compared with untextured specimens. The maximum friction coefficient reduction of 64% can be feasible with textured specimens especially under high-speed and light-load conditions. In the present experiment, the average friction coefficient decreases with increasing angle and side length of V-grooves. Besides, the optimum values of transverse spacing and longitudinal spacing to minimize the average friction coefficient were obtained.

Key words: surface texture; V-groove; tribological property; laser; 45 steel

0 引 言

近年来, 表面织构化技术由于能够有效改善材料表面的摩擦学性能已得到国内外学者的广泛关注^[1]。表面织构的形状和几何参数是决定摩擦副的摩擦学行为及润滑性能的关键因素^[2], 在特定的工况条件下, 通过对表面织构的主动优化设计可以得到优异润滑减摩效果^[3]。表面织构的形状主要有微凹坑和微凹槽两种形式。在初期, 由于微凹坑织构易于加工、便于进行数值模拟, 人们

对微凹坑织构的几何形状、面积密度、深度和分布规律等几何参数对摩擦副表面摩擦学性能的影响进行了大量的理论和试验研究^[2-5]。结果表明, 通过优化微凹坑织构的几何参数可以使织构化表面获得最优的摩擦学性能。随着加工技术的进步和数值分析方法的改进, 人们开展了微凹槽织构的几何参数对摩擦学性能的理论及试验研究^[6-7]。结果表明, 微凹槽织构可以使摩擦表面产生动压润滑、提高承载能力, 减小摩擦因数。微凹槽的宽度、间

收稿日期: 2014-05-04; **修回日期:** 2014-06-22; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51175233, 51305168, 51375211); 江苏省自然科学基金(BK20130524); 江苏大学高层次人才启动基金(13JDG090)

作者简介: 纪敬虎(1982—), 男(汉), 江苏邳州人, 讲师, 博士; **研究方向:** 摩擦学、激光微加工技术

网络出版日期: 2014-07-02 16:44; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140702.1644.009.html>

引文格式: 纪敬虎, 符永宏, 华希俊, 等. 45 钢表面制备 V 形凹槽及其摩擦学特性 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 107-111.

距、深度及其与运动方向的夹角均对摩擦学性能有重要影响。由于结构化表面的几何形貌参数对其摩擦学性能的影响是复杂的,且微结构对润滑减摩性能的影响机理也因其几何形状的不同而存在差异。因此,在同等的条件下不同类型表面结构的润滑减摩效果是不同的。

为了研究微结构的几何形状对摩擦学性能的影响,Costa 等^[8]采用线-面接触摩擦副的往复运动方式对圆形微凹坑、直线形微凹槽和 V 形微凹槽对流体动压润滑性能的影响进行了试验研究。结果表明,V 形微凹槽结构所产生的流体动压润滑效果最佳。然而,Costa 等在试验中所采用的 V 形微凹槽几何参数单一,并未进行系统的研究。为此,文中利用激光结构化技术在 45 钢表面制备了 V 形微凹槽结构,探讨了不同工况条件下,V 形微凹槽的角度、边长、纵向间距和横向间距对 45 钢表面摩擦学性能的影响,进一步优化了 V 形微凹槽结构的几何参数,以期为揭示表面结构的润滑减摩机理提供试验依据。

1 材料和方法

1.1 试样制备

试样材料采用 45 钢,其尺寸为 30 mm×20 mm×8 mm,表面经淬火处理后硬度为 50HRC,其表面经 61 μm(240 目)、25 μm(500 目)、18 μm(800 目)、11 μm(1200 目)和 9 μm(1500 目)砂纸和金相砂纸 w10 打磨后粗糙度 Ra 约为 0.1 μm。以 V 形凹槽表面结构为研究对象,在试样表面制备出具有均匀矩阵排列的 V 形凹槽。V 形凹槽的特征参数如图 1 所示, w_v 表示宽度, l_v 表示边长, h_v 表示深度, θ_v 表示角度, s_1 表示横向槽间距, s_2 表示纵向槽间距。

采用声光调 Q 的脉冲 Nd:YAG 激光器加工

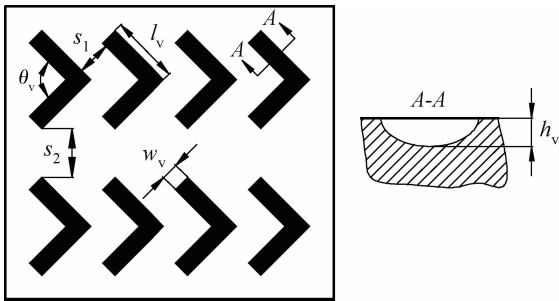


图 1 V 形凹槽几何参数示意图

Fig. 1 Geometric parameters of the V-grooves

系统,激光器波长为 532 nm,平均输出功率为 7 W,重复频率为 2 000 Hz,扫描速度为 10 mm/s,泵浦电流为 16 A。加工完成后对试样在抛光机上做抛光处理以去除凹槽边缘形成的熔渣,非结构化区域表面的粗糙度 Ra 约为 0.1 μm。V 形凹槽表面结构的尺寸及分布见表 1 中。部分结构化试样表面的光学显微照片如图 2 所示。

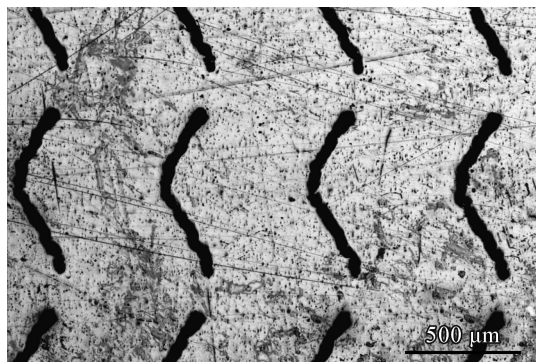
表 1 V 形凹槽结构的几何参数特征

Table 1 Features of the surface textured sample with V-pattern grooves

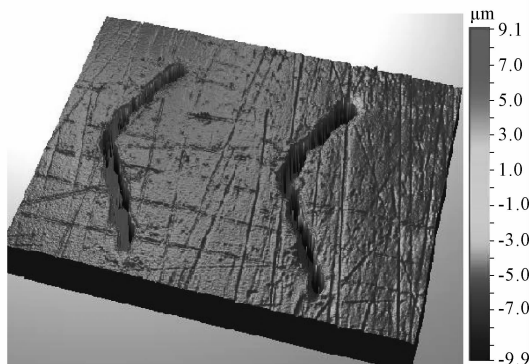
No.	Width $w_v/\mu\text{m}$	Length $l_v/\mu\text{m}$	Depth $h_v/\mu\text{m}$	Spacing $s_1/\mu\text{m}$	Spacing $s_2/\mu\text{m}$	Angle $\theta_v/(\text{^\circ})$
T ₁	40	300	10	360	100	60
T ₂	40	300	10	360	100	90
T ₃	40	300	10	360	100	120
T ₄	40	300	10	360	100	150
T ₅	40	200	10	360	100	90
T ₆	40	400	10	360	100	90
T ₇	40	300	10	160	100	90
T ₈	40	300	10	260	100	90
T ₉	40	300	10	460	100	90
T ₁₀	40	300	10	560	100	90
T ₁₁	40	300	10	360	0	90
T ₁₂	40	300	10	360	200	90
T ₁₃	40	300	10	360	300	90

1.2 摩擦性能

摩擦试验是在 UMT-2 型多功能摩擦学试验机上进行的,通过改变不同的传感器,试验的载荷加载量可以在 0.1~20 000 g 之间变化。采用往复运动方式的销-盘摩擦试验,上试样固定不动,下试样做往复运动,行程为 20 mm。上试样为 Φ 5 mm×20 mm 的 GCr15 钢圆柱销,硬度 HRC64,下试样为普通试样和激光表面结构化试样。试验前将销试样固定在 UMT-2 摩擦试验机的上试样夹具上,将 61 μm(240 目)、25 μm(500 目)、18 μm(800 目)、11 μm(1200 目)和 9 μm(1500 目)和金相砂纸 w10 分别固定在下工作台上,在平均速度为 0.06 m/s、载荷为 10 N 的条件下运转 1 min,获得销试样表面粗糙度为 0.1 μm 左右,从而尽可能保证销-盘试验的面面接触。



(a) Two-dimensional plan



(b) Three-dimensional micrograph

图2 织构化试样 T3 表面的光学显微形貌

Fig. 2 OM morphologies of the textured surface

试验前对上下试样均匀丙酮进行超声波清洗,试验在室温下进行,采用 30 号机械润滑油,室温下其运动黏度约为 $98 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (所有试验均在添加润滑油的条件下完成)。

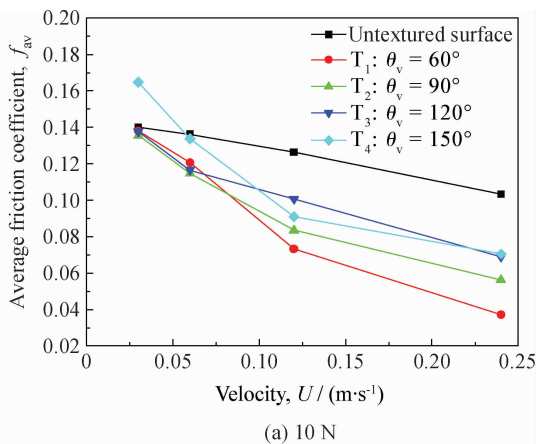
在试验之前,各个试样都要在载荷为 10 N,平均速度为 0.06 m/s 的工况下跑合 5 min,待摩擦因数稳定后再进行试验。试验中采用的载荷为 10 N 和 20 N,平均速度为 0.03 、 0.06 、 0.12 和 0.24 m/s ,取每组工况参数下摩擦因数的平均值来评价 V 形凹槽的摩擦学性能。

2 结果及分析

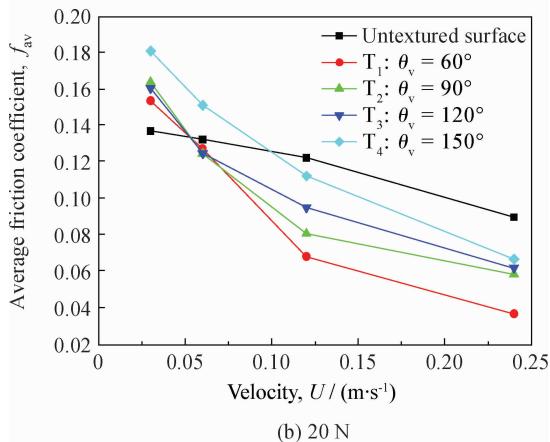
2.1 凹槽角度对摩擦因数的影响

图 3 给出了 10 N 和 20 N 载荷下,具有不同 V 形凹槽角度的织构面与未织构面平均摩擦因数随速度的变化曲线。从图中可以看出,在 10 N 的载荷下,V 形凹槽角度较小的织构面具有较小的摩擦因数。当速度在 $0.03 \sim 0.06 \text{ m/s}$ 的范围内,角度对平均摩擦因数的影响较小;随着速度的增大,角度对平均摩擦因数的影响逐渐增大;

当速度大于 0.12 m/s 时,角度为 60° 的织构面较其他表面具有较低的摩擦因数,与未织构面相比,平均摩擦因数最大能够减小 64%。在 20 N 载荷下,角度对平均摩擦因数的影响与在 10 N 载荷下基本一致,但是织构面的减摩效果相对减弱。在试验范围内,特别是在速度较大的情况下,织构面的平均摩擦因数基本上随着 V 形凹槽角度的增加而增大。



(a) 10 N



(b) 20 N

图3 不同载荷下 V 形凹槽角度对平均摩擦因数的影响
Fig. 3 Effects of the V-groove angle on the average friction coefficient under different loads

从图中还可以看出,对于未织构表面,平均摩擦因数随着速度的增大而缓慢减小,这说明摩擦表面处于混合润滑状态,流体动压润滑效应随着速度的增大而增强。对于织构面,平均摩擦因数随着速度的增大而减小的速率要大于未织构面。在较低的速度下,织构面的润滑减摩效果并不明显,甚至出现了增加摩擦的显现,特别是在载荷较大的情况下。这主要是因为,在较低的速度下,V 形凹槽所形成的流体动压润滑效应较弱,摩擦副表面间主要处于边界润滑状态,载荷

主要由表面的微凸体相互接触承载。随着速度的增大,织构面的润滑减摩效果越来越明显,在速度较大的情况下,织构面的平均摩擦因数均低于未织构面。这主要是因为,在较高的速度下,V形凹槽所产生较强流体动压润滑效应,形成了润滑油膜,载荷主要由润滑油膜承载。

2.2 凹槽边长对摩擦因数的影响

图 4 给出了 10 N 及 20 N 载荷下,具有不同 V 形凹槽边长的织构面与未织构面摩擦因数的随速度的变化曲线。从图中可以看出,对于织构面,在 V 形凹槽的其他几何参数相同的条件下,边长为 400 μm 的织构面较其他织构面一般具有较低的平均摩擦因数。相对于未织构面,织构面的平均摩擦因数最大能够减小 50%。从图中还可以看出,在试验所研究范围内,织构面的摩擦因数基本上都是随着 V 形凹槽边长的增大而减小。

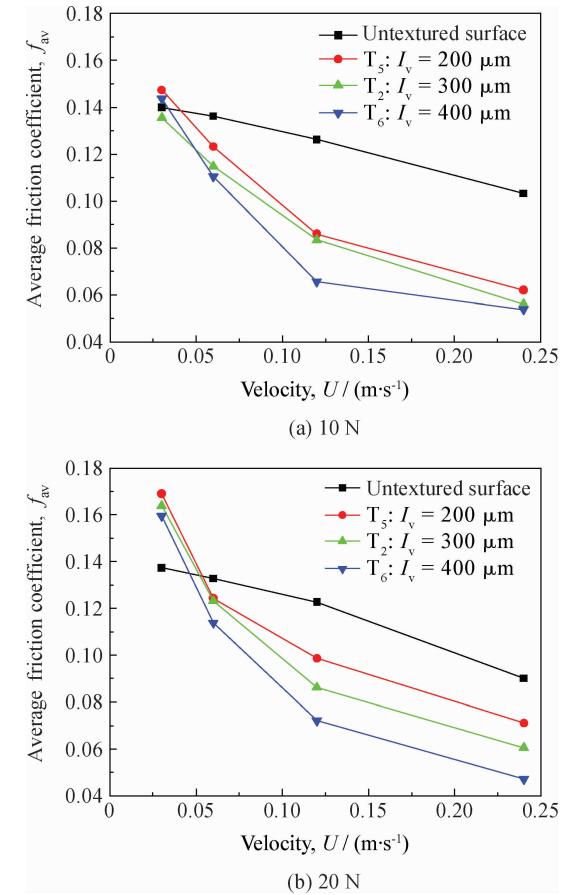


图 4 不同载荷下 V 形凹槽边长对摩擦因数的影响
Fig. 4 Effects of the V-groove length on the average friction coefficient under different loads

2.3 横向槽间距对摩擦因数的影响

图 5 给出了 10 N 及 20 N 载荷下,具有不同

的横向槽间距的织构面与未织构面摩擦因数随速度的变化曲线。可以看出,在 10 N 载荷下,随着速度的增大,平均摩擦因数逐渐减小,且横向槽间距对平均摩擦因数的影响逐渐增大;当速度大于 0.06 m/s 时,平均摩擦因数最小的横向槽间距为 460 μm,与未织构面相比,平均摩擦因数最大能够减小 60%。当载荷为 20 N 时,横向槽间距对平均摩擦因数的影响相对减小,当速度在 0.06 ~ 0.24 m/s 时,最优的横向槽间距为 360 μm,与未织构面相比,平均摩擦因数最大能够减小 36%。由以上结果可以看出,存在一最优的横向槽间距使得平均摩擦因数达到最小,且在不同的载荷和速度下,最优的横向槽间距是不同的。

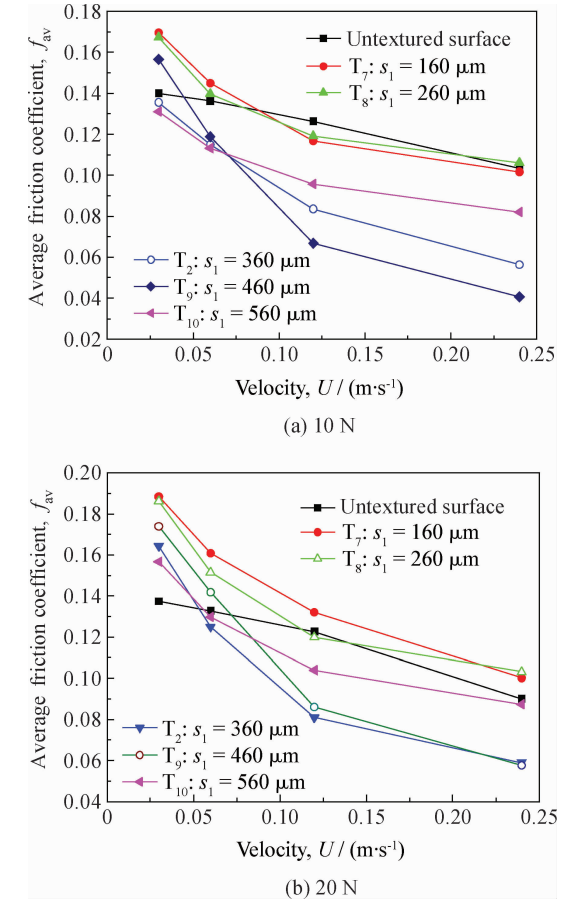


图 5 不同载荷下横向槽间距对摩擦因数的影响
Fig. 5 Effects of the transverse spacing on the average friction coefficient under different loads

2.4 纵向槽间距对摩擦因数的影响

图 6 给出了 10 N 及 20 N 载荷下,具有不同的纵向槽间距的织构面与未织构面摩擦因数随速度的变化曲线。从图中可以看出,平均摩擦因数随着纵向槽间距的增大,呈现先减小而后增大

的趋势。这表明,存在一个最优的纵向槽间距,可以使 V 形凹槽表面织构达到最佳的润滑减摩效果。相对于未织构面,在 10 N 载荷下,织构面平均摩擦因数最大可以减小 45%;在 20 N 载荷下,织构面平均摩擦因数最大可以减小 38%。从图中还可以看出,纵向槽间距为 0 的织构面的摩擦因数始终大于其他织构面,特别是在较高的载荷下,织构面相对于未织构面普遍具有较高的摩擦因数。这与主要是因为当纵向槽间距为 0 时,在垂直于运动方向上凹槽是相互贯通的,润滑油由于载荷的挤压作用而被挤压出摩擦副表面,发生侧漏现象,从而很难在摩擦表面形成润滑油膜。

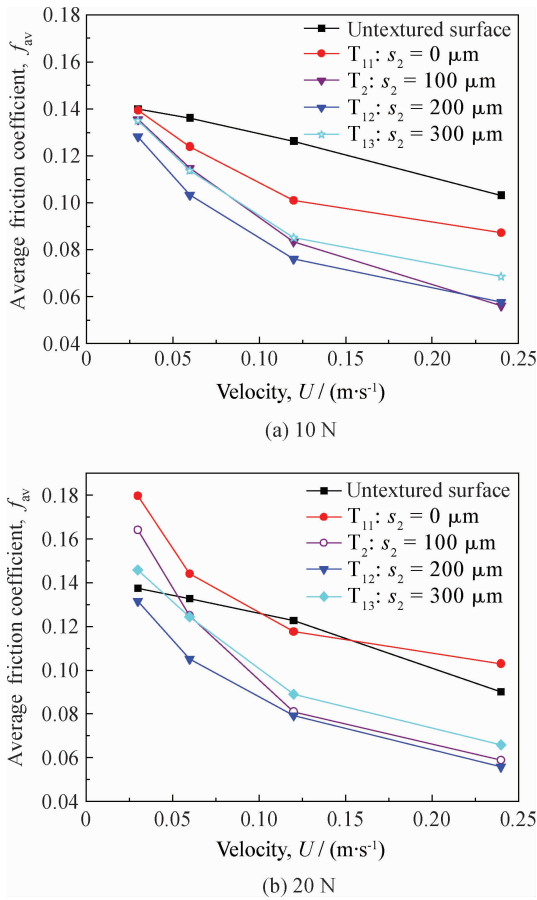


图 6 不同载荷下纵向槽间距对摩擦因数的影响
Fig. 6 Effects of the longitudinal spacing on the average friction coefficient under different loads

3 结 论

在 UMT-2 摩擦磨损试验机上,采用销-盘式摩擦方式研究了不同载荷和速度条件下 V 形凹槽表面织构的几何参数对 45 钢表面摩擦性能

的影响。试验结果表明:

(1) 在 45 钢表面采用激光微加工方式制备 V 形凹槽织构,能减小表面的摩擦因数,特别是在载荷较低、速度较大的工况下,V 形凹槽的润滑减摩效果显著,织构面的平均摩擦因数最大可比未织构面减小 64%。

(2) 对于织构面,在 V 形凹槽的其他几何参数相同的情况下,平均摩擦因数普遍随着 V 形凹槽角度的增加而减小,随边长的增大而减小,存在最优的横向槽间距使平均摩擦因数达到最小。

(3) 对于织构面,在 V 形凹槽的其他几何参数相同的情况下,存在最优的纵向间距使得平均摩擦因数达到最小。当纵向槽间距为 0 时,织构面普遍具有较大的平均摩擦因数,这主要是由于载荷的挤压作用导致的侧漏现象,从而很难在摩擦表面产生润滑油膜。

参考文献

[1] 赵文杰,王立平,薛群基. 织构化提高表面摩擦学性能的研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 622-631.

[2] Yu H W, Wang X L, Zhou F. Geometrical shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces [J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 123-130.

[3] Wang X L, Adachi K, Otsuka K, et al. Optimiaztion of the surface texture for silicon carbide sliding in water [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(3): 1282-6.

[4] Wan Y, Xiong D. The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1): 96-100.

[5] 马晨波,朱华,张文谦,等. 往复条件下表面的摩擦学性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2011, 31(1): 50-55.

[6] Yuan S, Huang W, Wang X. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces [J]. Tribology International, 2011, 44(9): 1047-54.

[7] Fu Y, Ji J, Bi Q. Hydrodynamic lubrication of conformal contacting surfaces with parabolic grooves [J]. ASME Journal of Tribology, 2012, 134: 011701.

[8] Costa H L, Hutchings I M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions [J]. Tribology International, 2007, 40(8): 1227-38.

作者地址: 江苏省镇江市学府路 301 号 212013
江苏大学机械工程学院
Tel: (0511) 8878 0056
E-mail: jijinghu@ujs.edu.cn