

## AlCrN 涂层转动微动摩擦学行为\*

任元, 莫继良, 朱旻昊, 周仲荣

(西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031)

**摘要:** 在新型转动微动摩擦磨损试验装置上, 采用球/平面接触方式, 对多弧离子镀制备的 AlCrN 涂层与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球进行转动微动试验, 变化转角位移幅值, 研究了涂层的转动微动摩擦磨损行为。结果表明: AlCrN 涂层的转动微动摩擦行为明显依赖于转角位移幅值, 随着转角位移幅值的增加, 摩擦界面从部分滑移向完全滑移转变, 摩擦因数明显增大且曲线走势明显不同。AlCrN 涂层转动微动在转角位移幅值  $\theta = 0.5^\circ$  时处于部分滑移状态, 损伤极其轻微, 界面主要由弹性变形协调; 当  $\theta$  增大为  $1^\circ$ , 微动运行于完全滑移状态, 但涂层的损伤仍较轻, 为轻微的磨粒磨损和氧化磨损; 当  $\theta$  进一步增大为  $2^\circ$ , 涂层损伤明显加重, 且磨痕中心处有明显的塑性隆起的痕迹, 与同处于滑移区的较小转角位移幅值 ( $\theta = 1^\circ$ ) 的情况明显不同。因此, 转角位移幅值对 AlCrN 涂层的转动微动摩擦磨损行为有重要影响。

**关键词:** AlCrN; 转动微动; 摩擦磨损; 转角位移幅值

**中图分类号:** TG174.4; TH117.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2011)03-0033-05

### Rotational Fretting Behaviour of AlCrN Coating

REN Yuan, MO Ji-liang, ZHU Min-hao, ZHOU Zhong-rong

(Southwest Jiaotong University, Tribology Research Institute, Chengdu 610031)

**Abstract:** AlCrN coating was deposited by the multi arc ion plating technique. Rotational fretting tests of the AlCrN coating against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic ball were performed on a new-developed rotational fretting tester with ball-on-flat configuration, and the rotational fretting behaviour of the coating was investigated under different angular displacement amplitudes. The results showed that the rotational fretting friction of the AlCrN coating was largely depended on the angular displacement amplitude. With the increase of the angular displacement amplitude, the friction interface changed from the partial slip into the gross slip and the friction coefficient significantly increased with different trend. Under the angular displacement amplitude ( $\theta$ ) of  $0.5^\circ$ , the rotational fretting ran in the regime of partial slip, and the wear of the coating was slight with the friction interface coordinated by elastic deformation. With the  $\theta$  increasing to  $1^\circ$ , the fretting running state transferred to gross slip, but the wear of the coating was just mild abrasive and oxidative wear. Nevertheless, with the  $\theta$  further increasing to  $2^\circ$ , the wear of the coating was aggravated significantly. Moreover, a plastic deformation accumulation can be observed in the middle of the wear scar, which was different from the situation of  $\theta = 1^\circ$  also in the regime of gross slip. The angular displacement amplitude has great influence on the rotational fretting behaviour of the AlCrN coating.

**Key words:** AlCrN; rotational fretting; friction and wear; angular displacement amplitude

## 0 引言

物理气相沉积(简称 PVD)技术制备高 Al 含量的 AlCrN 涂层具有优越的抗高温氧化和磨粒磨损性能, 已被成功应用于刀具、轴承和活塞环等耐磨零件表面, 并成为当前 PVD 氮化物涂层最

典型的代表<sup>[1-4]</sup>。该涂层在高温氧化、切削及轴承方面的应用研究都已有报道, 但对于摩擦磨损特性方面的研究却较少, 且绝大部分集中在常规往复滑动和销/盘滑动模式下的摩擦学试验研究<sup>[4-8]</sup>。

转动微动是指在交变载荷作用下, 紧配合接触副发生微幅转动的相对运动, 其现象大量存在于机械装备和器械中, 如各种轭轴和轮轴机构、球窝接头和阀门的配合面等<sup>[9-11]</sup>。AlCrN 涂层作为耐磨涂层在转动微动模式下的应用有很大的前景, 如应用在高档主轴中表现出了优异的耐

收稿日期: 2011-01-17; 修回日期: 2011-05-02

基金项目: \* 高等学校博士学科点专项科研基金(20100184120003); 中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU09CX015); 国家自然科学基金(50821063)

作者简介: 任元(1986—), 男(汉), 浙江宁波人, 硕士生。

磨性<sup>[12]</sup>,然而目前国内外关于 AlCrN 涂层在转动微动方面的研究几乎没有。文中在新型转动微动摩擦磨损试验装置上进行了 AlCrN 涂层转动微动摩擦学特性的研究,这对该涂层的摩擦学应用具有重要指导意义。所采用基体材料为硬质合金,其具有高的硬度和耐磨性、化学稳定性好、耐热性高等优点。此外,硬质合金线膨胀系数与同属陶瓷材料的大多数耐磨涂层相对接近,在 PVD 涂层制备过程中能极大的减少热膨胀所造成的不良内应力,使涂层与基体具有更佳的结合强度,因此被广泛应用于 PVD 涂层的基础材料。

## 1 试验材料和方法

AlCrN 涂层采用多弧离子镀方法在 K40 硬质合金(硬度为 1 350 HV<sub>0.05</sub>,表面粗糙度  $R_a$  约 0.04  $\mu\text{m}$ )表面沉积,靶材选用高铝的 Al70Cr30(原子数分数/% )靶,基底偏压为 -150 ~ -50 V,基片温度约 500  $^{\circ}\text{C}$ ,沉积时间为 90 min,对应涂层厚度约 1.2  $\mu\text{m}$ 。涂层表面粗糙度  $R_a \approx 0.12 \mu\text{m}$ ,显微硬度为 HV<sub>0.05</sub>3106,纳米硬度为 32.48 GPa,弹性模量  $E \approx 568.42 \text{ GPa}$ 。转动微动摩擦试验在自制的新型转动微动摩擦磨损试验装置上进行,该装置主要基于 CETR S20HE 型超低速往复转动电机(最低转速 0.001 r/min),可实现球/平面接触,不同转动角位移幅值和法向载荷条件下的转动微动(见图 1)<sup>[11]</sup>。

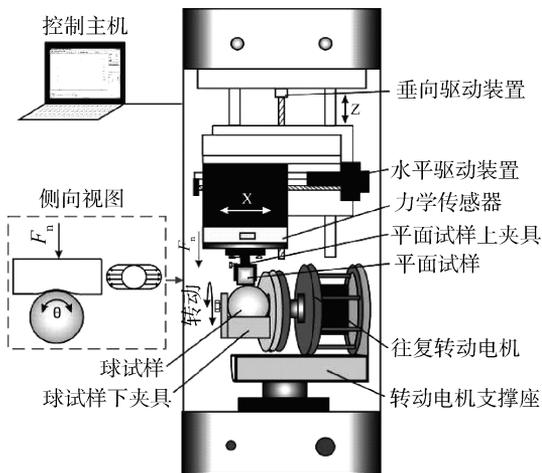


图 1 转动微动试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the rotational fretting tester

平面试样(尺寸为 10 mm × 10 mm × 20 mm)为涂层试样,对磨球为直径 40 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球(硬度为 1 800 HV<sub>0.05</sub>,表面粗糙度  $R_a$  约

0.03  $\mu\text{m}$ )。试验的主要参数:法向载荷  $F_n$  40 N;变化转角位移幅值( $\theta$ )分别为 0.5 $^{\circ}$ 、1 $^{\circ}$ 、2 $^{\circ}$ ;往复转动频率 0.5 Hz;循环次数  $N = 1\ 000$  次;试验环境条件为大气下干态(温度 20 ~ 25  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 RH 60%  $\pm$  10%)。试验后,用光学显微镜(OM)和 Quanta200 型扫描电子显微镜(SEM)观察磨痕形貌;用 NanoMap500DLS 轮廓仪沿着转动方向测绘磨痕纵向轮廓。在 SEM 下用 EDAX-7760/68ME 型电子能谱仪(EDX)分析磨损表面和磨屑的成分。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 $F_t$ - $\theta$ 曲线

前期研究表明,摩擦力( $F_t$ )-转角位移幅值( $\theta$ )曲线可用于表征转动微动的摩擦特性并确定微动的区域特性<sup>[12]</sup>。图 2 给出了 AlCrN 涂层在不同转角位移幅值下的  $F_t$ - $\theta$  曲线,可见在小转角位移幅值  $\theta = 0.5^{\circ}$  时, $F_t$ - $\theta$  曲线在经历短暂的跑合阶段后即演变为直线状,摩擦界面相对运动由弹性协调变形完成,表明界面处于部分滑移状态;当  $\theta$  增大为 1 $^{\circ}$  时, $F_t$ - $\theta$  曲线在经历短暂的跑合阶段后呈明显的平行四边形状,界面处于完全滑移状态;而在  $\theta$  增大为 2 $^{\circ}$  时, $F_t$ - $\theta$  曲线一直呈现平行四边形状,且在滑移过程中切向力有较明显的起伏,这与界面磨损状态有直接关系,表明此工况下界面的磨损状态发生了变化。因此,AlCrN 涂层转动微动界面状态明显受转角位移幅值影响,随着转角位移幅值的增大,摩擦界面从部分滑移状态向完全滑移状态转变。

### 2.2 摩擦因数

图 3 为 AlCrN 涂层在不同转角位移幅值下的摩擦因数曲线,可以看出随着转角位移幅值的增大,涂层摩擦因数明显增大。

当  $\theta = 0.5^{\circ}$  微动运行于部分滑移区时,摩擦因数在经历约 600 次循环后达到较低的稳定值;而在滑移区时( $\theta = 1^{\circ}$  和 2 $^{\circ}$ ),摩擦因数明显高于部分滑移区,摩擦因数呈逐步爬升趋势,且爬升阶段对应的循环次数随  $\theta$  的增大而减少。其中  $\theta = 2^{\circ}$  时摩擦因数在达到最大值随后呈逐渐下降趋势,并在试验后期伴随有明显较大的波动,摩擦因数的这种演变规律与往复滑动磨损一致,可

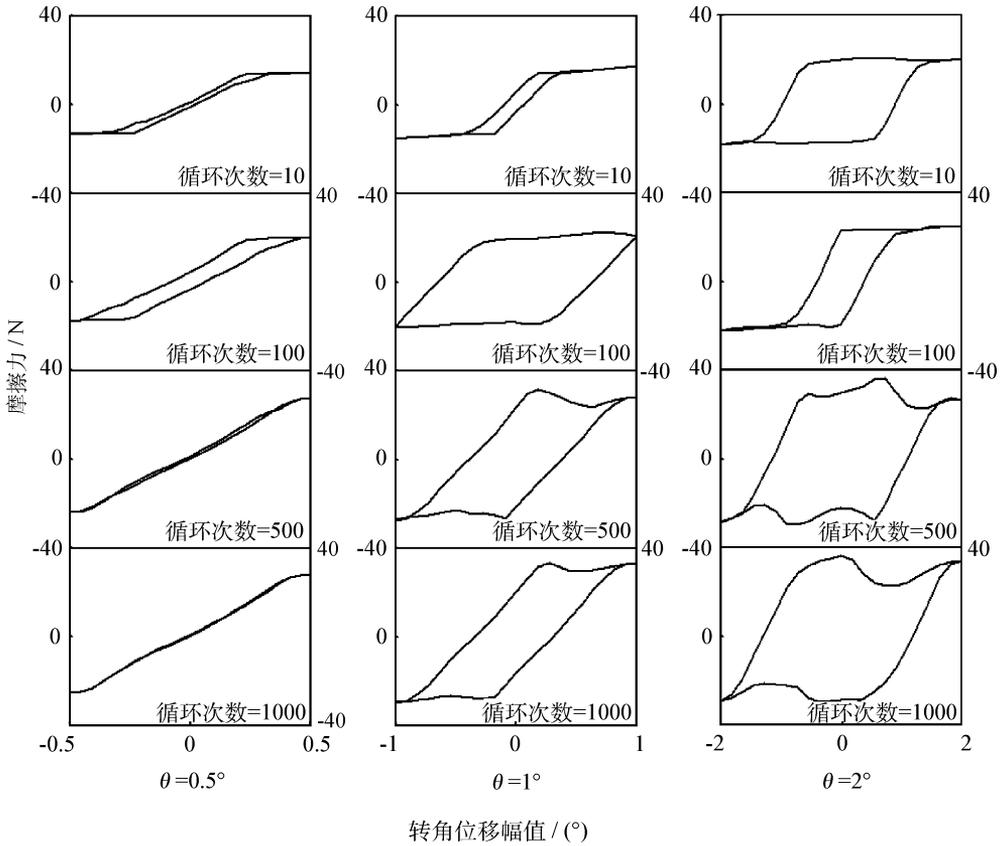


图 2 AlCrN 涂层在不同角位移幅值下的  $F_f-\theta$  曲线

Fig. 2  $F_f-\theta$  curves of AlCrN coating under different angular displacement amplitudes

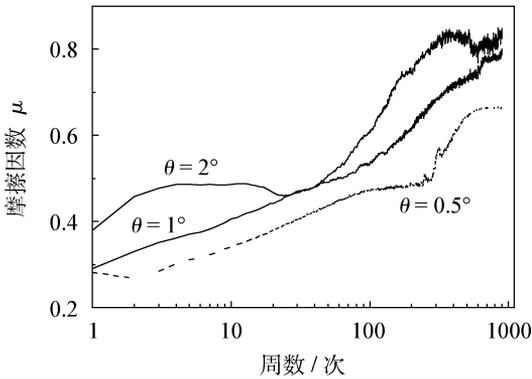


图 3 AlCrN 涂层在不同转角位移幅值下摩擦因数曲线  
Fig. 3 The friction coefficients of AlCrN coating under different angular displacement amplitudes

用第三体理论解释<sup>[9]</sup>,即初始阶段接触表面膜去除,摩擦因数较低;随着第一、第二体之间相互作用增加,摩擦因数出现明显持续上升;其后磨屑不断剥落,第三体床形成,二体接触逐渐变成三体接触,因第三体的参与承载,降低了第一、第二体之间相互作用,摩擦因数下降;另外,磨屑连续

不断地形成并被排出摩擦界面,导致摩擦因数出现明显波动。

### 2.3 微动损伤分析

考察转动微动试验后 AlCrN 涂层的磨痕形貌和轮廓,分别如图 4、图 5、图 7 所示,可以看出涂层的损伤随转角位移幅值的增大而明显加重。在  $\theta=0.5^\circ$  时,涂层磨损极其轻微,磨痕内部没有明显的滑动损伤痕迹,而磨痕轮廓表明涂层磨损深度极小,几乎无法准确测出,这是由于此参数对应的摩擦界面为部分滑移状态,界面相对运动主要由弹性协调变形完成(见图 4)。

当  $\theta$  增大为  $1^\circ$  时,对应的摩擦界面为完全滑移状态,但由于涂层硬度和耐磨性明显高于对磨球,因此涂层的损伤仍然较为轻微,磨痕深度没有明显增加,磨痕中心磨损表面光滑平整,而对磨球的损伤则较为严重,并产生较多的磨屑分布在涂层磨痕两端(见图 5)。EDX 能谱分析证实了涂层磨损表面只有微量的 O 元素存在,而磨屑中则含有较高含量的 Si 元素和 O 元素(见图 6)。

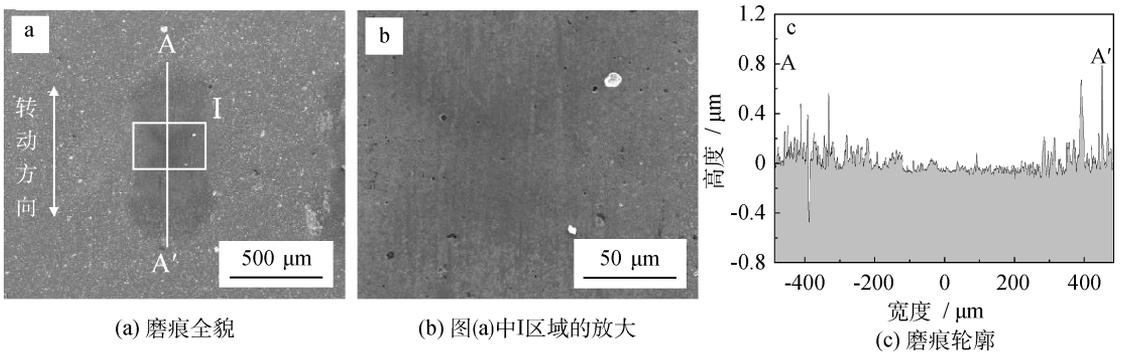


图4 AlCrN 涂层在转动角位移幅值  $\theta = 0.5^\circ$  下的磨痕形貌和轮廓

Fig. 4 Wear morphologies and profile measurement of AlCrN coating under angular displacement amplitude  $\theta = 0.5^\circ$

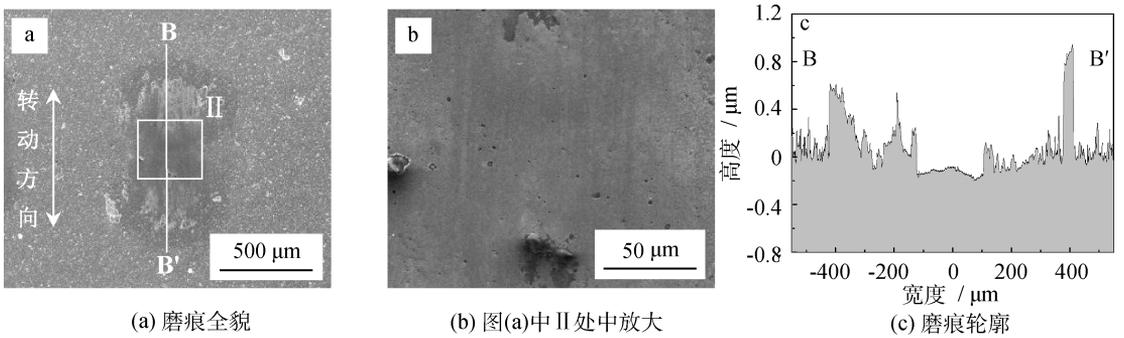


图5 AlCrN 涂层在转动角位移幅值  $\theta = 1^\circ$  下的磨痕形貌和轮廓

Fig. 5 Wear morphologies and profile measurement of AlCrN coating under angular displacement amplitude  $\theta = 1^\circ$

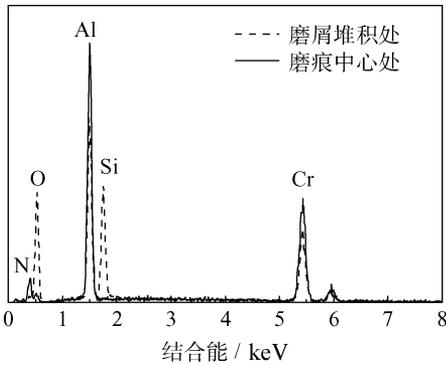


图6 AlCrN 涂层在转动角位移幅值  $\theta = 1^\circ$  下的 EDX

Fig. 6 EDX of AlCrN coating under angular displacement amplitude  $\theta = 1^\circ$

这同时也表明涂层在摩擦过程中磨屑排出通畅, 涂层损伤机理为轻微的磨粒磨损和氧化磨损。

而当  $\theta$  进一步增大为  $2^\circ$  时, 从图 7 可以看出涂层损伤明显加重, 磨痕深度明显较  $\theta = 1^\circ$  时的深。这是由于在完全滑移状态下, 大转角位移幅值下界面摩擦力明显较大, 材料损伤较重, 产生的磨屑相应较多。尽管磨屑能被较好地排出摩

擦界面, 但在此过程中已经明显的加剧了涂层的损伤。此外, 涂层的磨损存在一种抛光效应, 即经过磨损后磨痕表面粗糙度降低, 表面变得较平整的现象。这一点从磨痕内部磨损表面较为光滑, 且磨痕内轮廓粗糙度明显较小可以得到很好的证明。这与我们前期开展的 AlCrN 涂层在水平往复滑动摩擦下的磨损行为特征相似<sup>[6]</sup>, 这主要归因于涂层具有高硬度、良好的耐磨粒磨损和氧化磨损性能, 以及摩擦过程中排屑良好的特征共同作用的结果。值得注意的是, 此工况下磨痕中心处有明显的塑性隆起痕迹, 这与同处于滑移区的小转角位移幅值 ( $\theta = 1^\circ$ ) 的情况明显不同。此现象与转动微动模式下材料的特殊塑性变形行为特性有关, 即在一个转动微动循环中, 涂层随球试样在往复转动的过程中发生塑性变形, 其在两个相反方向造成的损伤在磨痕中心叠加, 随着微动的进行, 损伤不断累积并最终在接触中心呈现“隆起”的特征。这将在我们后期的研究中采用磨痕剖面和力学分析等手段进行深入探讨。

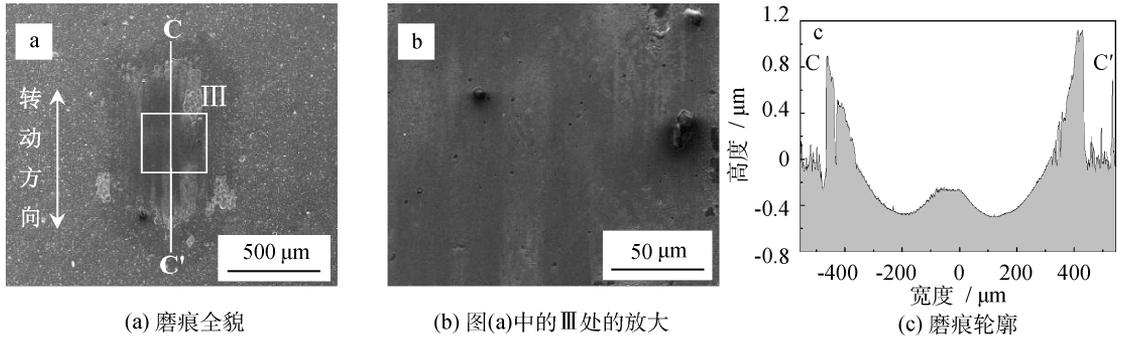


图7 AlCrN 涂层在转动角位移幅值  $\theta = 2^\circ$  下的磨痕形貌和轮廓

Fig. 7 Wear morphologies and profile measurement of AlCrN coating under angular displacement amplitude  $\theta = 2^\circ$

### 3 结论

(1) AlCrN 涂层的微动运行区域依赖于转角位移幅值,随着转角位移幅值的增加,涂层转动微动从部分滑移向完全滑移转变。

(2) AlCrN 涂层在完全滑移状态下的摩擦因数较部分滑移的高,且曲线走势存在明显差异。

(3) 转角位移幅值对 AlCrN 涂层的转动微动损伤行为有重要影响,涂层在部分滑移区内的损伤极其轻微,界面主要由弹性变形协调;在完全滑移区,当  $\theta$  为  $1^\circ$  时涂层的损伤仍较轻,为轻微的磨粒磨损和氧化磨损,当  $\theta$  增大为  $2^\circ$ ,涂层的损伤明显加重,且磨痕中心处有明显的塑性隆起的痕迹,磨损特征发生明显变化。

### 参考文献

- [1] Reiter A E, Derflinger V H, Sartory B, et al. Investigation of the properties of  $Al_{1-x}Cr_xN$  coatings prepared by cathodic arc evaporation [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7): 2114-2122.
- [2] 曾鹏, 彭神华, 胡社军, 等. AlCrN 涂层刀具研究新进展 [J]. 工具技术, 2008, 42(3): 16-18.
- [3] 蔡志海, 底月兰, 张平. 活塞环表面 CrAlN 涂层的微观组织与抗高温氧化性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 15-19.
- [4] 莫继良, 朱旻昊. AlCrN 涂层的滑动摩擦学特性研究 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(03): 12-16.
- [5] Reiter A E, Franz R. Abrasive and adhesive wear behavior of arc-evaporated  $Al_{1-x}Cr_xN$  hard coatings [J]. Tribology Letters, 2010, 37(3): 605-611.
- [6] Mo J L, Zhu M H, Lei B, et al. Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAl coatings—Deposited by physical vapor deposition [J]. Wear, 2007, 263: 1423-1429.
- [7] Vetter J, Lugscheider E, Guerreiro S S. (Cr:Al)N coatings deposited by the cathodic vacuum arc evaporation [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 98(1-3): 1233-1239.
- [8] Bobzin K, Lugscheider E, Nicke R. Wear behavior of  $Cr_{17x}Al_xN$  PVD-coatings in dry running conditions [J]. Wear, 2007, 263: 1274-1280.
- [9] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [10] Gerdun V, Sedmak T, Šinkovec V, et al. Failures of bearings and axles in railway freight wagons [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(5): 884-894.
- [11] 莫继良, 朱旻昊, 廖正君, 等. 转动微动的模拟与试验研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(3): 631-635.
- [12] Brecher C, Spachtholz G, Maes M. Superelastic (Cr, Al)N coatings for high end spindle bearings [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(5-6): 1738-1744.

作者地址: 成都市区二环路北一段 111 号 610031  
西南交通大学摩擦学研究所  
Tel: 151 9828 0760  
E-mail: 333renyuan@163.com