

文章编号:1000-582X(2011)05-042-05

## 40Cr 表面 TiAlN/TiN 复合镀层的滑动摩擦试验分析

卢 龙<sup>1,2</sup>,任明皓<sup>3</sup>,蒋 涛<sup>3</sup>

(1. 淮海工学院 机械工程学院,江苏 连云港 222005;2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044;

3. 江苏科技大学 材料科学与工程学院,江苏 镇江 212003)

**摘 要:**采用多弧离子镀工艺在 40Cr 表面制备了 TiAlN/TiN 复合镀膜,利用 UMT-2 摩擦磨损实验机考察了 TiAlN/TiN 膜层的承载能力和摩擦学性能,通过扫描电子显微镜观察了磨损试件的表面形貌,应用 X 射线能谱仪分析了磨痕中心区元素及其含量,通过 40Cr 基体和 TiAlN/TiN 膜在摩擦系数和磨损量方面的比较来评价 TiAlN/TiN 复合膜层的摩擦学性能。结果表明:TiAlN/TiN 涂层与基体间的结合力是影响涂层承载能力的主要因素之一,TiAlN/TiN 复合镀层的摩擦学性能优于 40Cr 基体,TiAlN/TiN 复合镀层的减摩、耐磨性能优越,并能成功地抵抗磨粒磨损和粘着磨损。

**关键词:**TiAlN/TiN 涂层;承载能力;摩擦磨损性能;表面处理

**中图分类号:**TG 174.44

**文献标志码:**A

### Sliding friction test analysis of TiAlN/TiN coatings on 40Cr steel

LU Long<sup>1,2</sup>, REN Ming-hao<sup>3</sup>, JIANG Tao<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang,

Jiangsu 222005, P. R. China; 2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission,

Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. School of Material Science and Engineering,

Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, P. R. China)

**Abstract:** TiAlN/TiN duplex coating is made on the surface of 40Cr steel by means of multi-arc ion plating technology. Carrying capacity and tribological properties of TiAlN/TiN duplex coating are investigated with a UMT-2 wear tester without lubrication. The surface morphology of wear specimens are observed by scanning electron microscope(SEM). Elements of wear scar center and their content are analyzed by EDS. Tribological properties of TiAlN/TiN coating are evaluated through comparing with 40Cr in friction coefficient and wear volume. The results show that tribological properties of TiAlN/TiN duplex coating is better than 40Cr. The TiAlN/TiN films is superior in reducing friction and wear resistance, and can successfully resist abrasive wear and adhesive wear.

**Key words:** TiAlN/TiN coatings; load carrying capacity; friction and wear behavior; surface treatment

齿轮在工作中受到接触、弯曲、冲击等应力的交互作用,产生的失效形式也多种多样<sup>[1-3]</sup>。据统计,齿面失效约占传动副失效总数的 74%。随着生产

力水平的进一步提高,工业生产对齿轮副的可靠性及使用寿命提出了更高的要求,传统的处理工艺逐渐不能满足生产实际的需要。近年来,表面强化技

收稿日期:2010-12-22

基金项目:重庆大学机械传动国家重点实验室开放基金资助项目(SKLM-T-KFKT-200907)

作者简介:卢龙(1962-),男,淮海工学院副教授,博士,主要从事机械设计、摩擦学等研究,(E-mail)lulong62@163.com。

术日益成熟,具有良好耐磨性和耐蚀性的陶瓷涂层得到了广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。TiN、TiAlN膜层拥有高硬度、高耐磨性和低摩擦系数等一系列优越性能,TiAlN/TiN复合膜层结合了TiAlN、TiN的优点,取长补短,与两者相比性能更为优异<sup>[7-11]</sup>。然而将TiAlN/TiN复合膜层用于齿轮表面强化处理的研究还罕见报道<sup>[12-15]</sup>。

笔者以常用齿轮材料40Cr为研究对象,应用多弧离子镀工艺在40Cr基体表面镀制TiAlN/TiN复合膜层。通过滑动摩擦磨损试验,研究TiAlN/TiN复合膜层的承载能力,分析影响复合膜层承载能力的原因。通过与40Cr基体的对比试验,深入研究TiAlN/TiN复合膜层的摩擦学性能。为开展多元复合涂层工艺在齿轮表面处理方面的研究做出有益的贡献。

## 1 试件制备及试验方法

### 1.1 试件的制备

试件材料选择中碳合金钢40Cr,其化学成分: $w(C)$ 为0.37%~0.44%, $w(Cr)$ 为0.80%~1.10%, $w(Si)$ 为0.17%~0.37%, $w(Mn)$ 为0.50%~0.80%。淬火处理,淬火硬度44~46HRC。

试件经机械抛光,表面粗糙度 $R_a$ 达0.025 $\mu m$ 后,分别用丙酮和无水乙醇超声波清洗10 min,干燥后装入真空室内。

采用LD-800多弧离子镀膜设备镀制TiAlN/TiN膜,工艺参数如下:电弧靶材选纯度达99.99%的纯铝靶和纯度为99.6%的纯钛靶;真空室预热至200 $^{\circ}C$ ,以提高镀层和基体的结合强度,真空度为 $6.7 \times 10^{-3}$  Pa;通入氩气进行氩离子清洗3~5 min;清洗后抽真空至 $6.7 \times 10^{-3}$  Pa,进行钛轰击,在试件表面形成一层纳米级的纯钛过渡层,以提高膜层与基体的结合强度;钛轰击后,进行复合镀膜,氮气分压为 $8.0 \times 10^{-4}$  Pa,钛靶电流60 A,铝靶电流60 A,交替沉积TiN和TiAlN膜各2次。

摩擦偶件材料选择45钢,调质处理,硬度为260~280 HB,表面粗糙度 $R_a$ 为1.6 $\mu m$ 。

### 1.2 滑动干摩擦试验

为了考察TiAlN/TiN复合镀膜的承载能力及摩擦学性能,在UMT-2摩擦磨损试验机上进行X盘滑动干摩擦磨损试验。试验中X盘固定不动,试样盘转动,二者之间为滑动摩擦。实验分两步进行:首先考察TiAlN/TiN复合镀膜的承载能力,空气气氛,转速为200 r/min,载荷分别为10、30、50 N,每级载荷运行10 min;然后对40Cr基体和TiAlN/TiN复合镀层的摩擦学性能进行对比试验,空气气氛,试验转速为200 r/min,载荷选为10 N,摩擦时

间为10 min。试验中记录下各个时刻的摩擦系数,每组试验重复3次,取平均值。

### 1.3 磨痕观察及分析

考察各试件的摩擦状况,对各个试样的磨痕形貌进行SEM观察,对磨痕中心区进行EDS分析;考察试件的磨损状况,通过磨痕中心区的磨损深度和磨损失重进行。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 TiAlN/TiN复合镀膜的承载能力

载荷为10N级,试件的磨痕形貌如图1(a)所示,磨痕中心区宽度约为60 $\mu m$ ,磨痕中心区域膜层较完整,只有较少的剥落和开裂,磨粒的数量也很少。载荷为30 N级,试样的磨痕形貌如图1(b)所示,磨痕中心区宽度约为330 $\mu m$ ,磨痕中心区域出现明显的剥落和开裂现象,磨粒数量也大幅度地增加。载荷为50 N级,试样的磨痕形貌如图1(c)所示,磨痕中心区宽度约为370 $\mu m$ ,磨痕中心区域的剥落和开裂现象出现得更加普遍和明显。

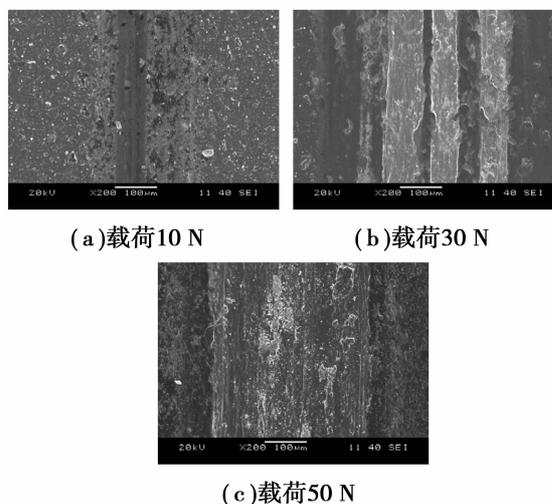
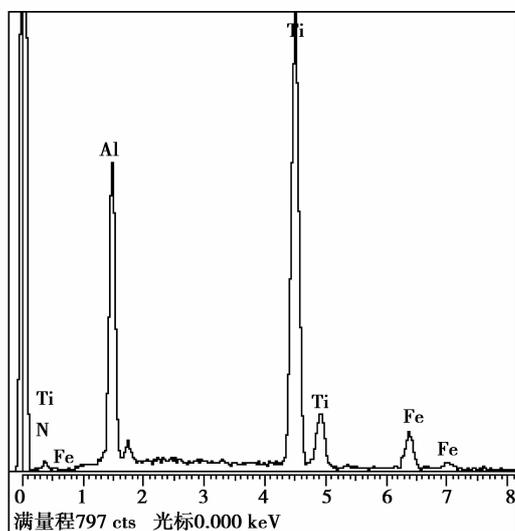
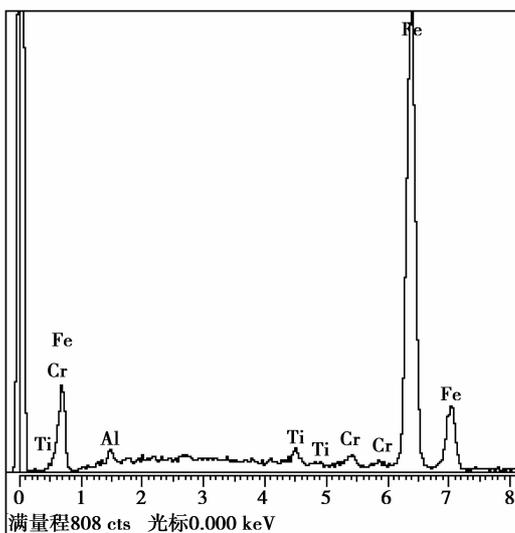


图1 载荷对TiAlN/TiN膜层磨痕表面形貌的影响

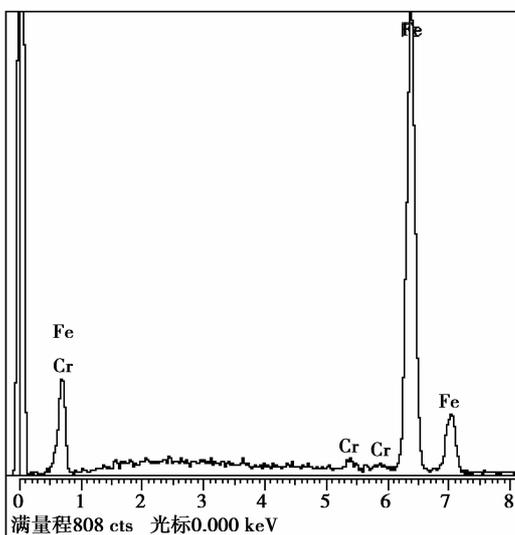
为了进一步考察不同载荷下复合膜层的存留状态,对磨痕中心区域进行EDS分析,结果如图2所示。载荷为10N级,磨痕中心区域EDS如图2(a)所示,分析区域内含大量Al、Ti元素,说明TiAlN/TiN复合膜层的存在。载荷为30N级,磨痕中心区域EDS如图2(b)所示,Fe元素含量在分析区域内占主导地位,Ti、Al元素含量较低,说明测试区域内TiAlN/TiN复合膜层已经被磨穿,露出40Cr基体,只剩下少量残余的TiAlN/TiN复合膜层。载荷为50N级,磨痕中心区域EDS如图2(c)所示,完全没有Ti、Al元素,说明TiAlN/TiN复合膜层已经完全磨穿。



(a) 载荷 10 N



(b) 载荷 30 N



(c) 载荷 50 N

图 2 载荷对 TiAlN/TiN 膜层磨痕中心区元素的影响

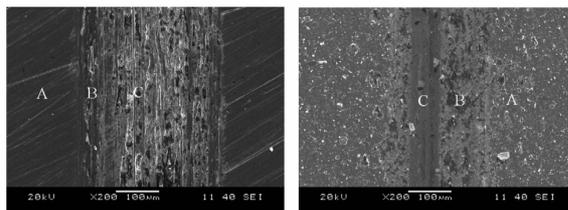
TiAlN/TiN 复合膜层的显微硬度很高,耐磨性很好,但当载荷为 30 N 和 50 N 时,却出现被“磨穿”的现象,分析认为是由于镀层与基体间的结合强度造成的。复合镀层的泊松比和热膨胀系数与基体的存在差异,在摩擦过程中,两者受热变形不一致,又硬又脆的表层因内应力过大最先破坏,同时较大的正应力加剧了这种破坏。证明提高陶瓷涂层与基体的结合力是研究复合镀层的重要内容之一。

当载荷为 10 N 时, TiAlN/TiN 复合膜层基本完好,将在这一载荷级下,研究 TiAlN/TiN 复合膜层的摩擦学性能。

## 2.2 TiAlN/TiN 层与 40Cr 基体的摩擦性能比较

### 2.2.1 磨痕形貌分析

40Cr 基体磨痕 SEM 形貌如图 3(a) 所示, C 区域表面磨痕粗糙, 产生了严重的塑性变形, 出现了很深的犁沟, B 区面积小, 呈现明显的裂纹及剥落现象, 表明发生了粘着磨损和磨粒磨损。TiAlN/TiN 复合膜层磨痕 SEM 形貌如图 3(b) 所示, C 区未观察到磨粒磨损痕迹, 存在少量片状或带状粘附层, B 区面积较大, 说明 TiAlN/TiN 膜层韧性较好不易发生脆裂。经测定, 40Cr 基体的 C 区磨痕宽度约为  $250\mu\text{m}$ , 而 TiAlN/TiN 膜层 C 区磨痕宽度约为  $60\mu\text{m}$ , 40Cr 基体的磨痕中心区宽度和面积要明显大于 TiAlN/TiN 膜层。这是由于 TiAlN/TiN 膜层具有很高的硬度, 在磨损过程中起到抗磨料磨损和粘着磨损的重要作用。



(a) 40Cr 基体

(b) TiAlN/TiN

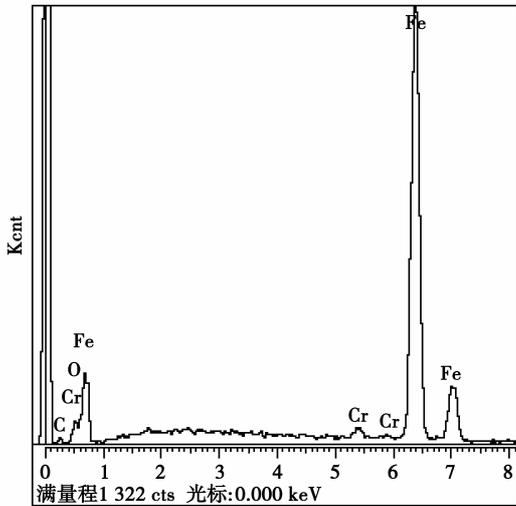
图 3 磨痕形貌 SEM 分析

### 2.2.2 磨痕中心区 EDS 分析

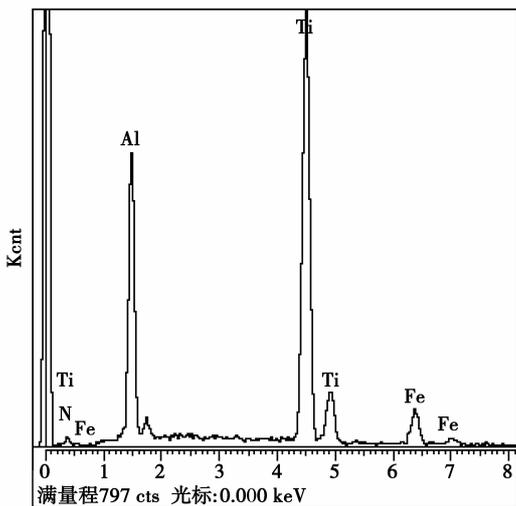
40Cr 基体和 TiAlN/TiN 复合层的磨痕中心区 EDS 能谱如图 4 所示。由图可知: 对于氧元素含量, 图 4(a) 明显高于图 4(b), 表明 40Cr 基体表面在摩擦过程中产生大量的摩擦热, 发生较剧烈的氧化反应; TiAlN/TiN 复合层在摩擦过程中未出现剧烈的氧化反应。TiAlN/TiN 复合层的热稳定性远远优于 40Cr, 具有良好的抗氧化性。

### 2.2.3 摩擦系数比较

两组对比试验中摩擦系数  $f$  随时间变化曲线如图 5 所示。由图可知, TiAlN/TiN 膜层在同等实验



(a)40Cr 基体



(b)TiAlN/TiN

图 4 磨痕中心区 EDS 分析

条件下所得出的摩擦系数要远低于 40Cr 基体,说明 TiAlN/TiN 膜层具有比 40Cr 基体更为优异的减摩性能。TiAlN/TiN 膜层的摩擦系数始终低于 40Cr 基体;TiAlN/TiN 膜层摩擦系数峰值约为 0.45,而 40Cr 基体的峰值约为 0.7,到达稳定阶段后,仍是 TiAlN/TiN 膜层摩擦系数低于 40Cr 基体,且曲线更平滑。TiAlN/TiN 膜层不但比 40Cr 基体较早进入摩擦稳定阶段,而且保持稳定阶段的时间比 40Cr 基体更长,这意味着表面镀 TiAlN/TiN 膜层的齿轮相比未镀膜齿轮能更长时间保持稳定的摩擦状态,这对减少齿轮表面磨损,增加齿轮寿命有着至关重要的作用。

由图 5 知,40Cr 和 TiAlN/TiN 层的摩擦系数随着循环次数的变化曲线均呈 5 个阶段的特征:1)跑合阶段。对基体而言,由于表面膜的保护作用,摩擦系数相对较低,而镀膜试样在该阶段摩擦系数显著降低(从基材的 0.4 降到 0.15 左右),并

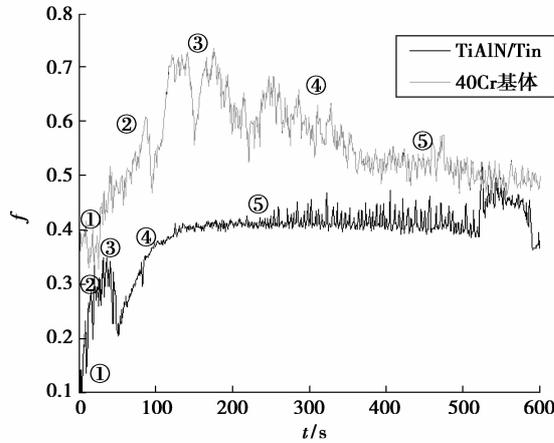


图 5 40Cr 和 TiAlN/TiN 层的摩擦系数比较

且持续的时间明显增长。2)上升阶段。摩擦系数随着两接触表面膜(污染和吸附膜)的逐渐去除,实际接触面积增大,摩擦力迅速增加,摩擦系数开始增大,同时,磨损产生了磨粒,磨粒的犁沟作用会使摩擦系数上升更快。3)峰值阶段。此时摩擦系数在磨粒和犁沟作用下达到最大值。4)下降阶段。在随后的循环中,磨粒逐渐增多,形成第三体,两接触体表面被有效分隔,摩擦系数下降。5)稳定阶段。进入摩擦表面的磨粒数和离开表面的磨粒数大致相等,达到动态平衡,摩擦系数趋于平稳。

#### 2.2.4 磨痕深度分析

在法向载荷及线速度相同的条件下,40Cr 基体的磨痕深度明显要高于 TiAlN/TiN 膜层的磨痕深度  $h$ ,如图 6 所示。表明在相同条件下,镀膜试样的抗磨损性能要明显优于未镀膜试样。由于镀膜后磨损量减小,因摩擦磨损产生的失效行为随之减少,可以直接延长零件的工作寿命。

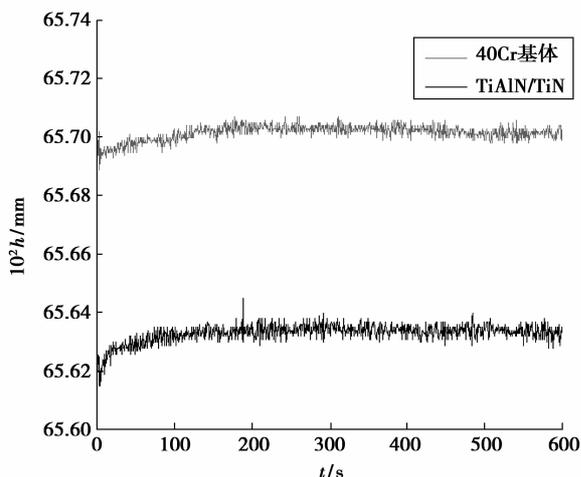


图 6 TiAlN/TiN 膜层与 40Cr 基体磨痕深度变化曲线

### 2.2.5 磨损量分析

40Cr 和 TiAlN/TiN 层的磨损量如表 1 所示。同等试验条件下, TiAlN/TiN 膜层的磨损量仅约为 40Cr 基体磨损量的三分之一。磨损量的大幅降低是由于 TiAlN/TiN 膜层和 40Cr 基体相比有着更高的硬度和较低的摩擦系数, 高硬度、低摩擦系数能更好地抵抗摩擦时的粘着磨损和磨粒磨损。

表 1 TiAlN/TiN 膜层和 40Cr 基体的磨损量对比

	40Cr 基体	TiAlN/TiN 膜层
磨损前/g	44.418 1	44.523 9
磨损后/g	44.416 5	44.523 3
磨损量/mg	1.6	0.6
相对磨损率/%	0.003 6	0.001 3

## 3 结 语

笔者用摩擦磨损实验的方法, 考察了 TiAlN/TiN 复合镀层的承载能力, 并对比研究了 TiAlN/TiN 复合镀层与 40Cr 基体的摩擦学性能, 深入分析了 TiAlN/TiN 复合镀层的磨损特性及摩擦机理。

1) TiAlN/TiN 复合镀层与基体间的结合力直接影响复合膜层的承载能力, 提高陶瓷涂层与基体的结合力是研究复合镀层的重要内容之一。

2) TiAlN/TiN 复合镀层的摩擦学性能优于 40Cr 基体。TiAlN/TiN 复合镀层的减摩、耐磨性能优越, 并能成功地抵抗磨粒磨损和粘着磨损。

3) 复合膜层与基体间存在适宜的过渡层是必要且重要的。

### 参考文献:

[1] 温诗铸, 黎明. 机械学发展战略研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[2] 樊智敏. 齿轮轮齿齿廓的研究进展[J]. 青岛科技大学学报, 2003(24): 71-74.

FAN ZHI-MIN. Research progress of the tooth profile of gears[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2003(24): 71-74.

[3] 郑江, 张保全. 现代齿轮技术的发展与我国齿轮制造面临的问题[J]. 华北工学院学报, 1997, 18(1): 50-54.

ZHENG JIANG, ZHANG BAO-QUAN. Development of modern gear technique and faced problems of national gear manufacture[J]. Journal of North China Institute of Technology, 1997, 18(1): 50-54.

[4] YILBAS B S, NIZAM S M. Wear behavior of TiN coated AISI H11 and AISI M7 twist drills prior to plasma nitriding[J]. Journal of Materials Processing

Technology, 2000, 105(9): 352-358.

[5] DINGREMONT N, BERGMANN E, COLLIGNON P. Optimization of duplex coatings built from nitriding and ion plating with continuous and discontinuous operation for construction and hot working steels[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 72(6): 163-168.

[6] MA S, XU K, HE J. Parametric effects of residual stress in pulsed d. c. plasma enhanced CVD TiN coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 142(7): 1023-1027.

[7] PODLAHA E J. Selective electrodeposition of nanoparticulates into metal matrices [J]. Nano Lett, 2001, 1(8): 413-416.

[8] STEINBACH J, FERKEL H. Nanostructured Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film prepared by DC and pulse DC electroplating [J]. Scripta Materialia, 2001, 44 (8/9): 1813-1816.

[9] CHEN W X, TU J P, GAN H Y, et al. Electroless preparation and tribological properties of Ni-P-Carbon nanotube composite coatings under lubricated condition [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 160(1): 68-73.

[10] WANG L Y, TU J P, CHEN W X, et al. Friction and wear behavior of electroless Ni-based CNT composite coatings [J]. Wear, 2003, 254(12): 1289-1293.

[11] PALDEY S, DEEVI S C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review [J]. Materials Science and Engineering, 2003, 342 (1/2): 58-79.

[12] 张津, 程晓萍. 齿轮研究中的材料及表面工程技术[J]. 材料导报, 1998, 12(3): 28-29.

ZHANG JIN, CHENG XIAO-PING. Materials and surface engineering technology applied in gear studying [J]. Materials Review, 1998, 12(3): 28-29.

[13] 陈爱智, 张永振. 耐磨涂层材料摩擦磨损特性的研究进展[J]. 洛阳工学院学报, 2001, 22(2): 12-16.

CHEN AI-ZHI, ZHANG YONG-ZHEN. The research development of the friction and wear properties of wear-resistant coating materials [J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2001, 22(2): 12-16.

[14] GOLD P W, LOOS J. Wear resistance of PVD-coating in roller bearings[J]. Wear, 2002, 25(3): 465-472.

[15] 卢龙, 蒋涛, 严铿. 基体负偏压 TiAlN/TiN 膜层组织成分及硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2009, 38(24): 78-80.

LU LONG, JIANG TAO, YAN KENG. Effects of pushed bias on microstructure and hardness of TiAlN/TiN coating [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(24): 78-80.