

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.12.025

45 钢、TiN 和 TiAlN 的摩擦磨损特性研究^①

李 渊 明， 李 华 英， 顾 涛， 何 辉 波

西南大学 工程技术学院，重庆 400715

摘要：采用物理气相沉积法(PVD)在 45 钢基体表面沉积了 TiN 和 TiAlN 涂层. 用 3 种载荷在摩擦磨损试验机上分别对 45 钢、TiN 和 TiAlN 涂层进行了摩擦试验，用 5 种载荷分别对 3 种试样进行了磨损试验，用表面轮廓检测仪检测了 3 种试样的体积磨损，用划痕仪测量了涂层的临界载荷. 研究表明：随着载荷的增大，TiAlN 和 TiN 涂层的摩擦系数有较大的下降趋势，TiAlN、TiN 有降低摩擦系数的作用，其中 TiN 的效果更好. 45 钢、TiN 与 TiAlN 的磨损量都会随载荷的增大而增大. TiN、TiAlN 涂层比 45 钢有较显著的耐磨损的能力，TiAlN 涂层比 TiN 涂层的抗磨损能力更强. 45 钢的比磨损率趋近于线性变化，TiAlN、TiN 涂层的比磨损率趋近于非线性变化. TiN 涂层的临界载荷高于 TiAlN 涂层的临界载荷.

关 键 词：摩擦系数；比磨损率；临界载荷；磨损量

中图分类号：TG174.444 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-9868(2016)12-0156-06

现代制造业对零部件的精度、可靠性和使用寿命要求越来越高，对刀具的耐磨性能要求也更加严格. 在发达国家 70% 以上的加工硬质合金刀具都经过了表面涂层处理^[1]. 物理气相沉积技术(PVD)以其低工艺要求，对可镀性的环境要求低，可镀材料多的特点被广泛运用到机械加工行业中^[2-5]. 在切削加工中，TiN 和 TiAlN 涂层运用非常广泛，比未涂层的硬质合金刀具表现出良好的抗摩擦性能、优越的耐磨损性能和更高的表面硬度^[6]，所以其研究运用非常广泛. 近年来，TiN 和 TiAlN 涂层的耐磨性和摩擦系数研究较多，但仍有不足，特别是较大载荷条件下耐磨性研究偏少，值得继续深入研究. 本文采用 PVD 法在 45 钢基体表面沉积了 TiN 和 TiAlN 涂层，研究在不同载荷条件下的 45 钢、TiN 和 TiAlN 涂层和在同一载荷条件下的 45 钢、TiN 和 TiAlN 涂层的摩擦系数的变化趋势及其原因. 研究多种载荷条件下 3 种试样的磨损量，探讨了不同试样磨损量的变化趋势，并进行了分析对比. 对 TiN 和 TiAlN 涂层的临界载荷也进行了对比研究.

1 试验设备与材料

1.1 工件与试验设备

工件：以 45 钢为基体，其硬度为 HRC20，标准直径 Φ30 mm，厚度 3.5 mm. 采用 PVD 法在中科院研制的磁控溅射镀膜机(LD600)上对工件进行涂层沉积，分别镀上 TiAlN 和 TiN 涂层，图 1 表示 3 种试验样品，其中(a)为 TiAlN 涂层，(b)为 TiN 涂层，(c)为未涂层的 45 钢.

设备：中科院生产的高速往复摩擦磨损试验机(HSR-2M)，其主要参数见表 1；中科院生产的涂层附着

① 收稿日期：2015-07-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51405396)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2013D015).
作者简介：李渊明(1989-)，男，四川巴中人，硕士研究生，主要从事机械工程设计方面研究.
通信作者：何辉波，工学博士，副教授.

力自动划痕仪(WS-2005),其主要技术参数见表 2.

表 1 HSR-2M 主要技术指标

项 目	载荷范围/ N	往复滑动频率/ Hz	滑动长度/ mm	摩擦系数精度	传感器测量范围/ N	摩擦副直径/ mm
规格	1~10, 10~200	3~45	0.5~25	0.2%	0~200	6

表 2 WS-2005 主要技术指标

项 目	锥角	尖端半径/mm	探头材料	加载范围/N	发射方式	划痕距离/mm
规格	120°	0.2	金刚石	0~80	动载荷, 声发射	0~5

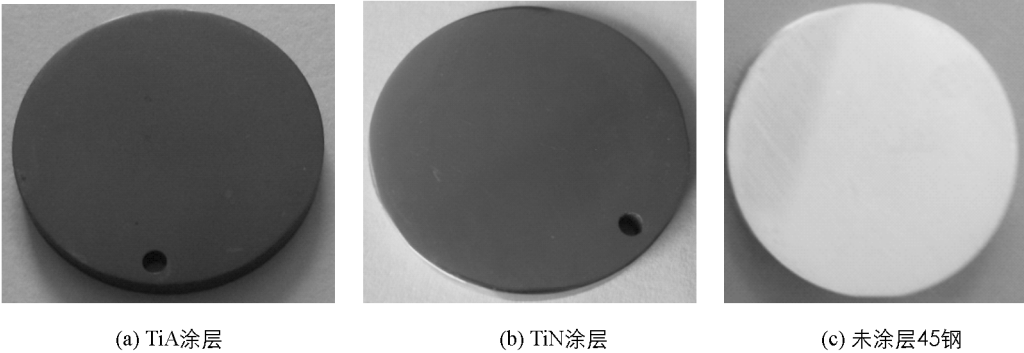


图 1 试验样品

1.2 试验方法

在高速往复摩擦磨损试验机上测量 3 种试验样品的摩擦系数,摩擦方式为往复式干摩擦,试验温度为室温. 载荷分别取 5,8,11 N, 时间 15 min, 摩擦配副为 Si₃N₄ 陶瓷球.

磨损试验也在高速往复摩擦磨损试验机上完成. 使用表面轮廓仪检测实验样品的磨损量. 工况条件: 干摩擦, 室温 15 ℃, 滑动速度为 300 r/min, 滑动时间 15 min, 载荷分别为 5,8,11,14,17 N.

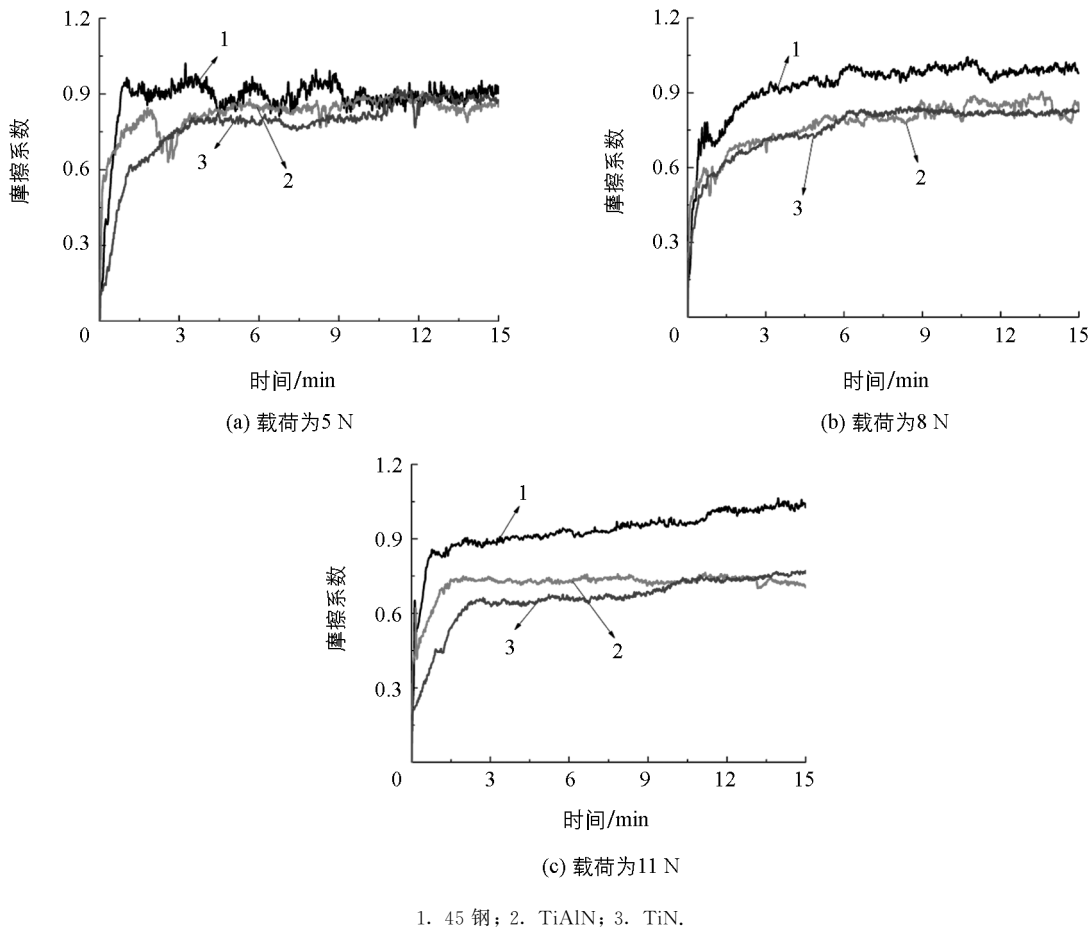
划痕试验在涂层附着力自动划痕仪上完成, 采用声发射、动载荷试验模式, 划痕距离 4 mm. 将金刚石压头在硬质涂层上以一定的速度划过, 同时逐步增加压头的压力, 当载荷达到一定值时, 涂层会被划破, 摩擦力就会突然改变, 同时产生声发射信号, 以此来判定涂层的临界载荷.

2 试验结果与分析

2.1 3 种试样在同一载荷条件下的摩擦系数比较

在 5 N 的载荷下, 45 钢、TiAlN 与 TiN 涂层的平均摩擦系数系数分别为 0.90,0.856,0.830, 如图 2(a)所示. 从图中可以看出, 45 钢的摩擦系数高于其他两种涂层的摩擦系数, 45 钢的摩擦系数初期波动较大, 这是因为初期试样表面粗糙度较大, 使 Si₃N₄ 陶瓷球面与基体表面接触不平衡, 另一方面试样表面有吸附物, 油膜等的分解, 提高了表面的粘附作用, 从而产生较大的波动. 在摩擦后期, 试样被磨出沟痕, 表面由点接触过渡到面接触, 进入到稳定阶段, 摩擦系数波动较小. 随着载荷的增大, 在 8 N 时, 平均摩擦系数分别为 0.977,0.829,0.816, 见图 2(b). 当载荷为 11 N 时, 平均摩擦系数分别为 0.964, 0.734,0.697, 如图 2(c). 从图中可以看出随着载荷的增大, TiAlN 和 TiN 的摩擦系数有较大的下降趋势. 从而可以得出 TiAlN, TiN 都有降低摩擦系数的作用, 其中 TiN 的效果更好, 原因是由于 TiN 表面硬度更高, 而 Si₃N₄ 摩擦配副也是一种硬度很高的物质, 在摩擦到一定程度时, 表面磨损严重, 发生的剪切力更大, 导致摩擦系数较高. 在 3 组载荷中, 45 钢的跑合阶段最快, 而 TiAlN 和 TiN 的跑合阶段比较缓慢, 这是因为 45 钢偏软, Si₃N₄ 陶瓷球是一种超硬物质, 遇到较软的试样会很快的除去附在试样表面的杂质形成的有机膜, 快速地增大接触面积, 达到摩擦平衡, 从而使摩擦系数较快地达到峰值. 而

TiAlN 和 TiN 表面硬度较高, 附在表面的氧化物和一些杂质会隔绝摩擦副与涂层的接触. 摩擦副会较快地以点接触到面接触, 然后逐步达到稳定阶段, 所以在初始阶段摩擦系数会以较慢的速度上升, 直到达到峰值后达到稳定.



2.2 3 种试验在不同载荷条件下的摩擦系数比较

从图 2 可以看出 45 钢在 5 N, 8 N 与 11 N 的载荷条件下, 平均摩擦系数分别为 0.90, 0.977, 0.964, 可以看出随着载荷的增大, 摩擦系数出现先上升后下降的趋势. 从图 2 得出 TiAlN 的摩擦系数分别为 0.850, 0.829, 0.734, 随着载荷的增大, 摩擦系数有明显的下降趋势. 在 5 N 和 8 N 时, TiAlN 涂层摩擦系数波动较大, 这是因为 TiAlN 排屑能力较差, 磨粒不能及时地排出涂层表面, 使摩擦副与涂层接触面发生变化, 同时影响了承载的变化, 从而加速了涂层的磨损, 所以摩擦系数波动较大^[7]. 在 11 N 时, 摩擦系数很快达到稳定状态而且数值最低. 这是因为载荷进一步增大时, 摩擦副之间产生大量磨粒, 形成滚动摩擦, 滚动摩擦阻力小于滑动摩擦, 从而使摩擦系数下降. 图 2 中 TiN 的摩擦系数分别为 0.83, 0.816, 0.697, 从图中可以看出随着载荷的不断增大, 摩擦系数下降明显. 这是因为载荷增大后, Si₃N₄ 陶瓷球与 TiN 涂层之间的接触面积增加, 加快了磨粒的形成, 一部分脱落的 TiN 涂层离开表面, 形成了滚动摩擦. 同时, 载荷的增大会加速表面微凸体的磨出, 减小了试验样品的表面粗糙度, 所以摩擦系数逐渐降低.

2.3 磨损特性

磨损量是用来衡量材料的磨损特性, 一般表示磨损量有线磨损, 体积磨损, 重量磨损, 比磨损率. 试验使用 5 组载荷分别对 3 种样品做往复磨损试验, 结果见表 3. 从表中可以看出, 在 5 N 时 TiN, TiAlN 的磨损量都为 0. 这是因为涂层磨损量非常小, 超出了设备的检测范围. 随着载荷的增加, 45 钢试样磨损变化

非常显著. 45 钢与涂层的磨损量变化趋势如图 3. 本文使用比磨损率来表示磨损量. 比磨损率, 是单位相对滑动距离和单位法向载荷下的体积磨损量^[8].

表 3 45 钢、TiN 与 TiAlN 在不同载荷下的磨损量 mm³

载荷	45 钢	TiAlN	TiN	载荷	45 钢	TiAlN	TiN
5 N	0.001 1	0	0	14 N	0.01	0.008 9	0.009 4
8 N	0.004 4	0.001 7	0.002	17 N	0.015 8	0.010 7	0.011
11 N	0.006 5	0.003	0.003 3	总计	0.037 8	0.024 3	0.025 7

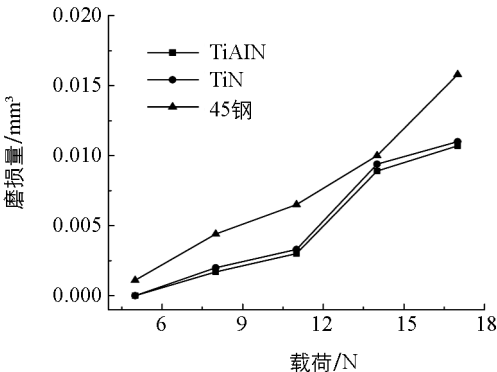


图 3 45 钢、TiN、TiAlN 的磨损量趋势

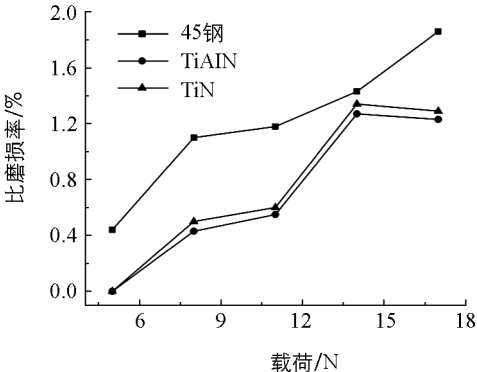


图 4 45 钢、TiN、TiAlN 的比磨损率

$$\omega = \frac{\Delta V}{WL} \tag{1}$$

其中 ω 表示比磨损率, ΔV 表示磨损体积, W 表示法向载荷, L 表示相对滑动距离. 根据上面的公式可以得出 45 钢的比磨损率分别为 0.44%, 1.1%, 1.18%, 1.43%, 1.86%; TiAlN 的比磨损率分别为 0%, 0.43%, 0.55%, 1.27%, 1.23%; TiN 的比磨损率分别为 0%, 0.5%, 0.6%, 1.34%, 1.29%, 其变化趋势如图 4. 45 钢的比磨损率随着载荷的增大而增大, 整体上符合线性变化. 而 TiAlN 和 TiN 的比磨损率随着载荷的增大而出现先增大后下降的趋势, 在 17 N 时比磨损率出现下降, 涂层载荷的比磨损率呈现非线性变化趋势, 层载荷的比磨损率呈现非线性变化趋势, 载荷的增大对磨损量的影响为非正比关系. 涂层的抗磨损性能高于 45 钢基体. 由图 5 看出在 5, 8, 11, 14, 17 N 载荷条件下 45 钢、TiAlN、TiN 涂层磨损总量分别为 0.037 8, 0.024 3, 0.025 7 mm³. TiAlN 磨损总量为 45 钢磨损总量的 64.3%, TiN 磨损总量为 45 钢磨损总量的 68%. 由图 5 可以看出两种涂层均能较大程度地减小磨损量, 而且对于抗磨损性能, TiAlN 涂层优于 TiN 涂层.

2.4 临界载荷

临界载荷的大小与涂层厚度、基体材料及溅射工艺参数有关, 其中厚度对临界载荷影响很大. 为保证涂层厚度的一致性, 本文使用的试样均在同一基体材料、同一设备、同一溅射工艺参数下沉积完成. 在 JB-1C 触针式表面粗糙度测量仪上测量涂层厚度, 经检测, 两种涂层的厚度均在 2.1~2.3 μm 之间.

检验临界载荷有多种方法, 如摩擦抛光试验, 锉刀试验, 划痕试验. 划痕试验是目前检验硬质涂层最常用也是较好的一种检验方法, 本文采用摩擦力及声发射划痕试验方法. 划痕结果如图 6 所示, 加载 60 N 的动载荷, 摩擦力曲线变化逐渐上升, 声发射信号直线保持水平. 当划针将涂层划破或者脱落时, 摩擦力将发生变化, 摩擦力曲线会产生拐点, 同时声发射信号直线变成折线, 在此拐点处的值就为临界载荷, 从图中

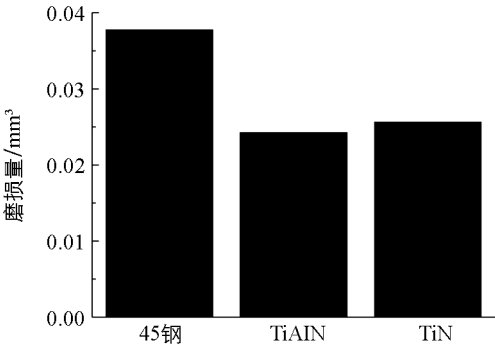
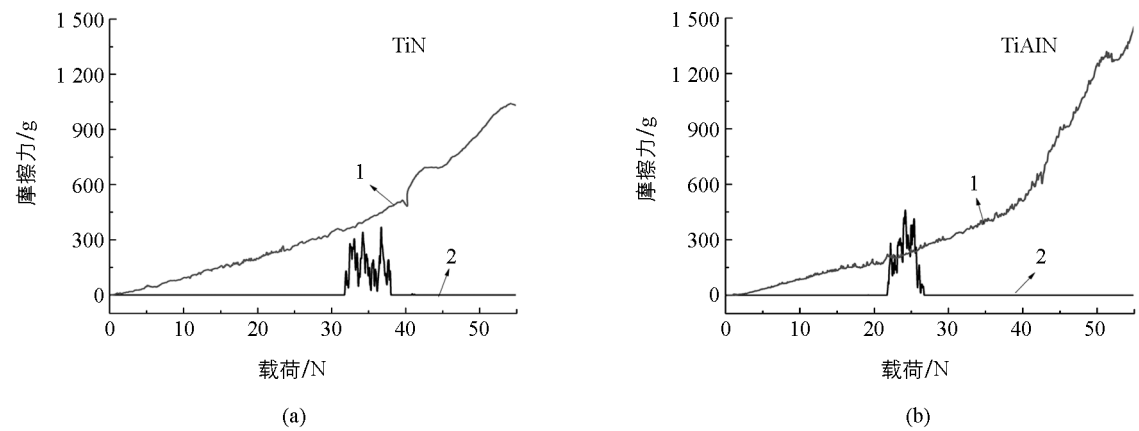


图 5 磨损总量

可以看出 TiN 和 TiAlN 在 31.85 N 处和 21.9 N 处产生较大的拐点及声发射信号, 即 TiN 和 TiAlN 的临界载荷为 31.85 N 和 21.9 N. 这是因为 TiN 涂层和 TiAlN 涂层附在基体表面, 而附在基体表面的 Ti 原子消除了基体上的残余应力, 由于 TiAlN 涂层中多了一部分 Al 原子, 这部分 Al 原子代替了原来 N 原子的位置^[9-13], 因此 TiN 涂层的临界载荷高于 TiAlN 涂层的临界载荷.



1. 摩擦力曲线; 2. 声发射信号线.
图 6 TiN、TiAlN 的临界载荷

3 结 论

- 1) 在相同载荷条件下, 45 钢的摩擦系数高于 TiAlN 和 TiN 涂层的摩擦系数. 45 钢的摩擦系数初期波动较大, 进入到稳定阶段以后, 摩擦系数波动较小.
- 2) 随着载荷的增大, TiAlN 和 TiN 涂层的摩擦系数有较大的下降趋势, TiAlN、TiN 有降低摩擦系数的作用, 其中 TiN 的效果更好.
- 3) 45 钢、TiN 与 TiAlN 的磨损量都会随载荷的增大而增大. TiN、TiAlN 涂层比 45 钢有较显著的耐磨损的能力, TiAlN 涂层比 TiN 涂层的抗磨损能力更强. 45 钢的比磨损率趋近于线性变化, TiAlN、TiN 涂层的比磨损率趋近于非线性变化.
- 4) TiN 涂层的临界载荷高于 TiAlN 涂层的临界载荷, 这是因为附在基体表面的 Ti 原子消除了基体上的残余应力, 而 TiAlN 涂层中由于多了一部分 Al 原子, 从而代替了原来 N 原子的位置.

参考文献:

[1] 陈 颖, 羊建高, 王宝健, 等. 硬质合金刀具涂层技术及展望 [J]. 硬质合金, 2009, 26(1): 54—58.

[2] 刘燕萍, 徐晋勇, 高 原, 等. 双辉渗镀 TiN 陶瓷层摩擦磨损性能研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(16): 1748—1751.

[3] 刘元富, 张谷令, 王久丽, 等. 脉冲高能量密度等离子体法制备 TiN 薄膜及其摩擦磨损性能研究 [J]. 物理学报, 2004, 53(2): 503—507.

[4] 杨 俊, 何辉波, 李华英, 等. 基于切削力和表面粗糙度的干切削参数优化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(12): 187—192.

[5] 李献杰. 不锈钢表面阴极弧制备 TiN 薄膜及抗磨/耐锡腐蚀性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[6] 叶存冬, 龙 丹, 孔德军, 等. PVD 法制备 TiN/AlTiN 涂层的摩擦与磨损性能 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 144—148.

[7] 韩文强. TiN、TiAlN 摩擦磨损特性及其涂层刀具, 齿轮的性能研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.

[8] 刘正林. 摩擦学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 108—110.

[9] BIKSA K, YAMAMOTO G, DOSBAEVA, et al. Wear Behavior of Adaptive Nano-Multilayered AlTiN/MexN PVD Coatings During Machining of Aerospace Alloys [J]. Tribology International, 2010, 43 (8): 1491—1499.

[10] 谢红梅, 聂朝胤. 不同测试条件下 TiN 薄膜的摩擦学特性研究 [J]. 真空, 2009, 46(4): 32—35.

- [11] ZHAO H, WANG X H, LIU Q L, et al. Structure and Wear Resistance of TiN and TiAlN Coatings on AZ91 Alloy Deposited by Multi-Arc Ion Plating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(2): 679–682.
- [12] 韩文强, 何辉波, 李华英, 等. TiN 涂层刀具对 20CrMo 钢干切削性能的影响及磨损机理 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 64–70.
- [13] B BHARAT BHUSHAN. 摩擦学导论 [M]. 葛世荣, 译. 北京: 机械工业出版社, 182–220.

A Study on the Friction and Wear Properties of 45 Steel, TiN and TiAlN

LI Yuan-ming, LI Hua-ying, GU Tao, HE Hui-bo

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: TiN coatings and TiAlN coatings were deposited on 45 steel substrates by Physical Vapor Deposition (PVD). Friction and wear tests were performed to evaluate performances of 45 steel, TiN and TiAlN coatings using three kinds of loads and five kinds of loads, respectively. Wear loss of 45 steel, TiN coatings and TiAlN coatings had been assessed by means of surface profile detector. The critical loads of TiN coatings and TiAlN coatings were tested by scratch-adhesion tests. Results of the investigation show that the friction coefficients of TiN coatings and TiAlN coatings have larger decreased trends with the increase of load. TiAlN and TiN have the functions of decreasing friction coefficient. And the effect of TiN is better than that of TiAlN. Wear loss of 45 steel, TiN and TiAlN increases with increasing loads. TiN coatings and TiAlN coatings have the remarkable wear resistance abilities than that of 45 steel. And TiAlN coatings have higher wear resistance performances than TiN coatings. The specific wear rate of 45 steel presents a trend of linear change. TiAlN coatings and TiN coatings approximate nonlinear change. The critical load of TiN coatings is higher than that of TiAlN coatings.

Key words: Friction coefficient; Specific wear rate; Critical load; Wear loss

责任编辑 汤振金

