

## 表面摩擦与润滑

## 氮化钛/氧化钛复相陶瓷涂层的干滑动摩擦磨损性能

夏铭, 王泽华, 周泽华, 胡亚群, 邵佳, 盛欢

(河海大学 力学与材料学院, 南京 210098)

**摘要:** 目的 研究等离子喷涂 TiN/TiO 复相陶瓷涂层的微观组织结构、显微硬度及干滑动摩擦磨损行为和机理。方法 采用等离子喷涂技术,在 45# 钢表面制备 TiN/TiO 复相陶瓷涂层。分析涂层的相组成,测试涂层的硬度。通过磨损试验研究 TiN/TiO 复相陶瓷涂层的磨损行为,并观察涂层的磨损形貌,测试磨损表面的成分组成,探讨 TiN/TiO 复相陶瓷涂层的磨损机理。结果 TiN/TiO 复相陶瓷涂层均匀致密,平均厚度为 350  $\mu\text{m}$ ,具有明显的层状结构,孔隙率为 4.3%,显微硬度为 1444HV0.1。在载荷 30 ~ 50 N、转速 370 ~ 1102 r/min 的范围内,TiN/TiO 复相涂层与 GCr15 对磨的摩擦系数为 0.0963 ~ 0.2778,磨损量为 1.32 ~ 6.8 mg。随着载荷的增加,摩擦系数下降;随着载荷和转速的增加,磨损量增加。结论 等离子喷涂制备的 TiN/TiO 复相涂层组织致密,显微硬度高,在低速低载荷时表现出较好的耐磨性,但随着载荷和转速的增加,耐磨性降低。涂层的磨损机制主要为磨粒磨损和粘着磨损。

**关键词:** 等离子喷涂; 氮化钛/氧化钛; 复相陶瓷涂层; 摩擦性能; 磨损机制

**中图分类号:** TG174.442

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2015)11-0052-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.009

## Dry Sliding Wear and Friction Performance of TiN/TiO Composite Ceramic Coating

XIA Ming, WANG Ze-hua, ZHOU Ze-hua, HU Ya-qun, SHAO Jia, SHENG Huan

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the microstructure, microhardness as well as dry sliding wear and friction behavior and mechanism of plasma sprayed TiN/TiO composite ceramic coating under different conditions. **Methods** TiN/TiO ceramic coating was prepared on 45# steel by reactive plasma spraying technology. Phase composition of the coating was analyzed using X-ray diffraction (XRD) and the microhardness was measured by a hardness tester. The wear and friction behavior of TiN/TiO composite ceramic coating was studied through wear and friction tests, the wear and friction morphology was observed, the composition of the wear sur-

收稿日期: 2015-07-24; 修订日期: 2015-08-24

Received: 2015-07-24; Revised: 2015-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(51379070); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13-02)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51379070) and Postgraduates Research and Innovation Projects (CXZZ13-02)

作者简介: 夏铭(1990—),女,江苏人,硕士研究生,主要从事等离子喷涂技术、TiN 涂层耐磨性能的研究。

Biography: XIA Ming (1990—), Female, from Jiangsu, Master graduate student, Research focus: plasma-sprayed technology and wear resistance of TiN coatings.

通讯作者: 王泽华(1960—),男,江苏人,教授,主要从事金属材料表面防护技术的研究。

Corresponding author: WANG Ze-hua(1960—), Male, from Jiangsu, Professor, Research focus: surface protection of materials.

face was tested, and the wear mechanism of TiN/TiO composite ceramic coating was discussed. **Results** The coating was even and dense with obvious layered structure and an average thickness of 350  $\mu\text{m}$ . The porosity of the coating was 4.3% and the hardness was 1444HV0.1. Under the conditions of rotational speed at 370 to 1102 r/min and load at 30 to 50 N, the friction coefficient ranged from 0.0963 to 0.2778 and the wear mass loss was from 1.32 to 6.8 mg. Besides, the friction coefficient decreased with increasing load while the wear mass loss of the coated samples had an increasing trend with the increasing load and rotational speed.

**Conclusion** The coating prepared by plasma spraying was dense with high microhardness. When the load and rotational speed were low, it had excellent wear resistance. However, the wear resistance decreased with increasing load and rotational speed. The main wear mechanisms of the coating were abrasive wear and adhesive wear.

**KEY WORDS:** plasma spraying; TiN/TiO; composite ceramic coating; friction property; wear mechanism

磨损是机械零部件失效的主要形式之一,不仅影响零部件的使用寿命<sup>[1]</sup>,还将增加能耗,产生噪音和振动。TiN 复相涂层硬度高,化学性能稳定,耐磨性好,可以有效保护基体<sup>[2]</sup>,引起了国内外许多学者的研究和关注<sup>[3]</sup>,被广泛应用于机械、装饰、航空航天、化工等行业。国内外部分学者将 TiN 复相涂层应用到材料表面,以提高材料的性能。例如,应峰等<sup>[4]</sup>采用双层辉光离子渗技术在钛合金表面原位合成摩擦学性能良好的 TiN 渗镀层。苗建旺等<sup>[5]</sup>通过化学气相沉积在 K3 镍基高温合金基体上制备了耐磨性能良好的 TiN 复相薄膜。Serban 等<sup>[6]</sup>利用等离子喷涂技术在 45# 钢上制备了具有耐海水腐蚀性能的 TiN 复相涂层。目前,制备 TiN 复相陶瓷涂层的常用方法是气相沉积和等离子喷涂。气相沉积法制备的涂层比较薄,制备速率低,成本昂贵,不适合工业大量生产,在大型工件上操作也不方便<sup>[7]</sup>;而等离子喷涂沉积速度快,工艺稳定,生产效率高,适用范围广<sup>[8-10]</sup>,广泛用于制备复相涂层。

文中利用等离子喷涂技术,在低碳钢表面制备以 TiN 为主相的 TiN/TiO 复相涂层,主要研究涂层在干摩擦条件下的磨损行为,并探讨了涂层的磨损机制,拟为 TiN/TiO 涂层在磨损领域的应用提供试验依据。

## 1 试验

### 1.1 等离子喷涂 TiN/TiO 复相涂层

选用粒度-300 目的纯钛粉为原料,其化学成分(以质量分数计)为:Ti 99.6%,Fe 0.027%,O 0.30%,Si 0.014%,Cl 0.022%,C 0.008%,N 0.015%,H 0.019%。如图 1 所示,钛粉呈形状不规则的块状,颗粒平均尺寸为 20~40  $\mu\text{m}$ 。如图 2 所示,钛粉相结构为密排六方的  $\alpha$ -Ti。

采用 3710 型等离子喷涂系统(美国 PRAXAIR 公

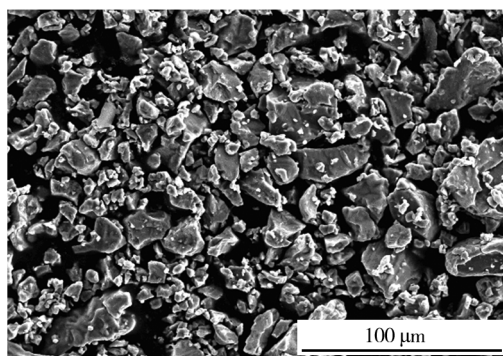


图 1 钛粉形貌

Fig. 1 SEM micrograph of Ti powder

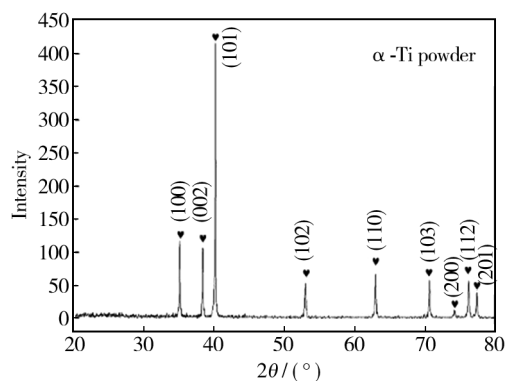


图 2 钛粉 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectrum of Ti powder

司)在 45# 钢基体表面喷涂 TiN/TiO 复相涂层,喷涂前对基体表面进行喷砂预处理。喷涂采用的主气和载气分别为 Ar 和  $\text{N}_2$ ,辅气为 He,喷涂角度为 90°,喷涂工艺参数为:Ar 60.5 L/min,  $\text{N}_2$  6.62 L/min, He 16.5 L/min,电流 745 A,电压 46 V,送粉速率 22 g/min,喷涂距离 140 mm,走枪速率 150 mm/s,走枪步长 3.2 mm。

### 1.2 组织及性能测试

采用 Hitachi S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)观察涂层的组织和表面形貌,并通过图像分析软件

TD2000, 基于灰度法测定涂层的孔隙率。采用 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪分析涂层的相结构。采用 HXD-1000TC 显微硬度计测定涂层的显微硬度, 测试载荷为 100 g, 保持时间为 15 s。

采用 MPX-2000 销盘式磨损试验机进行磨损试验, 其原理见图 3, 销试样尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ , 在销端面喷涂 TiN/TiO 复相涂层。对磨材料为尺寸  $\phi 45 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的 GCr15, 其表面粗糙度  $R_a$  约为  $0.8 \mu\text{m}$ , 硬度为 62HRC。为保证摩擦副的平行度, 磨损试验前依次用 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 目砂纸对涂层表面进行预磨处理。磨损试验参数为: 载荷 20, 30, 40, 50 N, 转速 370, 549, 1102 r/min, 磨损时间 40 min。试验过程中, 销和盘产生的摩擦力矩由试验机上的传感器测出, 并通过仪表显示器直接读取。每隔 10 min, 通过电子分析天平测得磨损量 (误差为 0.1 mg), 以此表征涂层材料的耐磨性能。磨损试验完成后, 采用 HoribaEX-250 能谱仪确定磨痕处的成分。

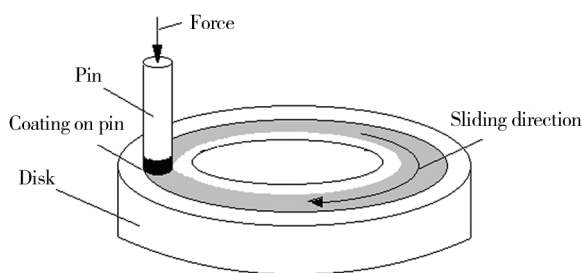


图3 销盘式摩擦磨损试验示意

Fig. 3 A schematic of the pin-on-disk wear test apparatus

## 2 结果与分析

### 2.1 涂层组织及结构

如图 4 所示, TiN/TiO 复相涂层由扁平粒子交错堆叠而成, 层状结构明显, 无明显缺陷, 厚度约  $350 \mu\text{m}$ , 涂层与基体呈现出凹凸不平的锯齿咬合, 说明涂层与基体间为机械结合。基于灰度法测得的涂层孔隙率为 4.3%。在喷涂过程中, 被等离子弧迅速加热的喷涂粉末呈熔融状态或半熔融状态, 铺展在基体表面后, 铺展的熔滴之间不可避免地会存在孔隙。另外, 熔融粒子或半熔融粒子在冷却过程中发生收缩, 从而粒子内部或粒子之间形成孔隙<sup>[11]</sup>。

由图 5 可知, TiN/TiO 复相涂层由 TiN, TiN<sub>0.3</sub>, Ti<sub>2</sub>N, TiO<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti<sub>2</sub>O 相组成。TiN, TiN<sub>0.3</sub> 和 Ti<sub>2</sub>N 相的存在表明 TiN 涂层中 Ti 和 N 主要以 Ti-N 化合物的

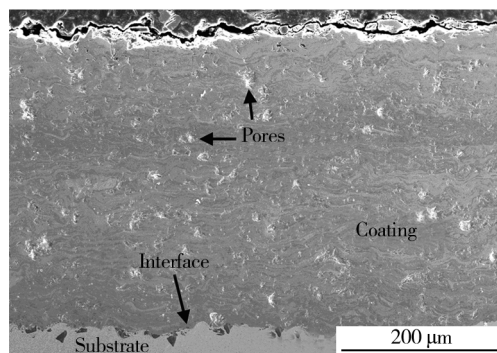


图4 TiN/TiO 涂层截面形貌

Fig. 4 SEM micrograph of the TiN/TiO coating

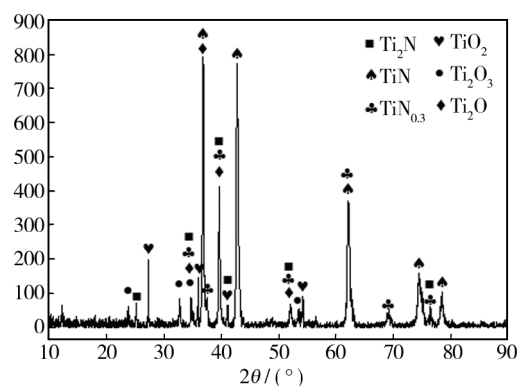
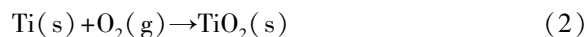
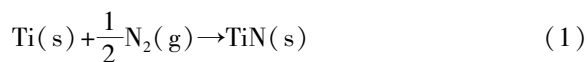


图5 TiN/TiO 涂层 XRD 图谱

Fig. 5 XRD spectrum of the TiN/TiO coating

形式存在, 化合物的具体形式取决于喷涂工艺和反应体系。

等离子焰流温度很高, 通入的  $\text{N}_2$  大部分被分解成 N 原子, 并有一部分电离成 N 离子。Ti 粉在进入电离气氛的瞬间会被熔化, 高温 Ti 粒子与 N 原子和 N 离子充分接触, 发生氮化反应<sup>[12]</sup>:



随着离火焰中心距离的增加, 火焰温度降低。文献[13]指出, 距枪口 100 mm 处的等离子焰流温度已经降到 2000 K 以下。本研究采用的喷涂距离为 140 mm, 因此根据公式(3)分析 2000 K 时涂层反应过程。

$$\Delta_r G = \Delta_r G^\ominus + RT \ln (p_B/p^\ominus)^{v_B} \quad (3)$$

(3) 式中:  $\Delta_r G^\ominus$  为 2000 K 时的反应式标准吉布斯自由能;  $p_B$  为气体 B 在组分中的分压 (本研究中主要是  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ , 均看作理想气体);  $v_B$  为化学反应计量数, 产物为正, 反应物为负。2000 K 温度下, 各物质的吉布斯自由能见表 1<sup>[14]</sup>。经计算, 反应式(1)和(2)的吉布斯自由能分别为 -136.97, -557.21 kJ, 均是负

值。从热力学角度能够判断,大气环境中的氮化反应和氧化反应能够自发进行,并且从自由能的数值可知,Ti 与  $O_2$  更容易发生反应<sup>[15]</sup>。由于本研究使用的载气为  $N_2$ ,等离子体焰流中 N 离子的浓度很高,熔融的 Ti 必然会与 N 离子发生氮化反应,因此形成了氮化钛。另外,TiN 在高温下不稳定,600 ℃时会发生氧化,700 ℃时会发生严重氧化,所以先形成的 TiN 会发生氧化,形成的 Ti 氧化物伴随喷涂颗粒一起喷射到试样表面形成复相涂层<sup>[16]</sup>,这与涂层的 XRD 分析结果一致。

表 1 反应式中各物质的热力学数据 ( $T=2000\text{ K}$ )

Tab.1 Thermodynamic data of substance in reaction at 2000 K

物质	$G/kJ$	物质	$G/kJ$	$\Delta_r G^\ominus/kJ$
Ti	-125.07	TiO <sub>2</sub>	-1186.05	-583.16
N <sub>2</sub>	-447.83	TiN	-498.93	-149.945
O <sub>2</sub>	-477.82			

2.2 涂层的显微硬度

图 6 为 TiN/TiO 涂层至基体的显微硬度分布曲线。从图 6 可见,涂层硬度值在 1274~1675HV0.1 之间,平均硬度为 1444HV0.1,约为 45# 钢基体硬度 (283HV0.1) 的 5 倍。

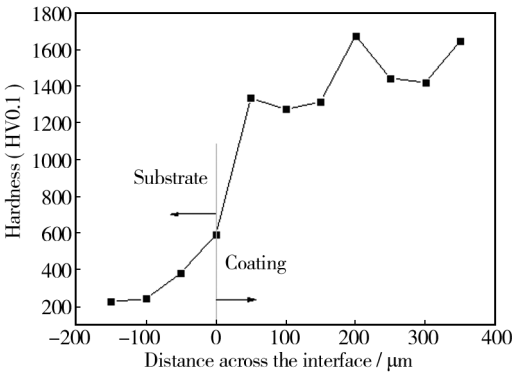


图 6 TiN/TiO 涂层试样截面硬度分布  
Fig.6 Hardness distribution of TiN/TiO coating

涂层具有高硬度与涂层材料本身的物相和喷涂工艺有关。喷涂过程中发生合成反应生成的 TiN,  $TiN_{0.3}$  和  $Ti_2N$  陶瓷相具有高的硬度。涂层截面硬度发生波动主要是三方面原因造成的:1) 涂层为非均质结构,各相分布不均匀,贫氮的  $TiN_{0.3}$  相削弱了离子键和共价键,硬度低于 TiN<sup>[17]</sup>;2) 涂层中孔隙、微裂纹等缺陷存在部位的硬度较低;3) 氧化钛的硬度较氮化钛

低,氧化钛多的区域硬度低。

2.3 涂层的摩擦磨损性能

图 7 是 TiN/TiO 涂层在干摩擦条件下进入稳定摩擦磨损状态后,摩擦系数与载荷、转速的关系曲线。由图 7a 可知,在试验速度范围内,转速对摩擦系数的影响不明显。由图 7b 可知,载荷对摩擦系数具有显著影响,随着载荷的增加,摩擦系数降低。造成这种现象可能有三种原因:1) 载荷增加促使摩擦表面之间磨合,微凸体被碾压平整,表面粗糙度降低,摩擦阻力变小,摩擦系数下降;2) 随着载荷的增加,动能增大,涂层表面温度升高,摩擦副的塑变抗力降低,微凸体之间的相互阻碍作用减小,摩擦系数降低;3) 涂层在试验过程中脱落的磨屑一部分残留在磨痕中,在摩擦副的反复碾磨下,磨屑变小并压实在磨痕上,涂层表面变得光滑,摩擦副之间的摩擦阻力减小,摩擦系数降低。

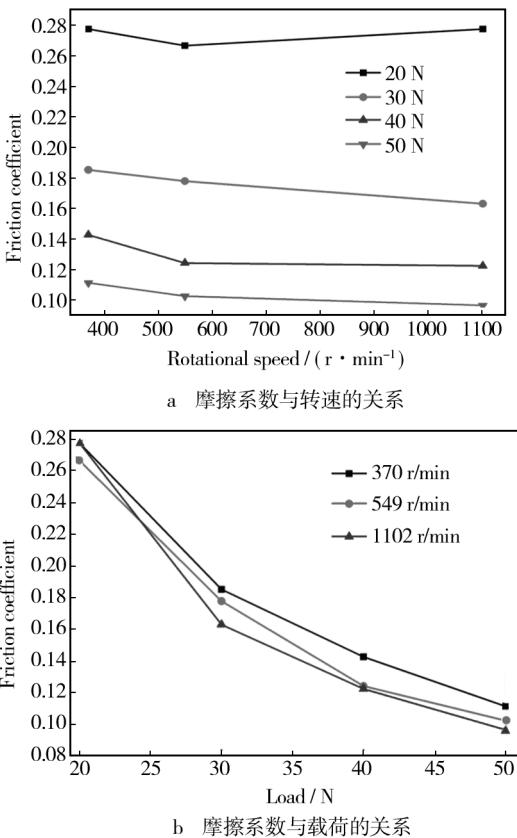
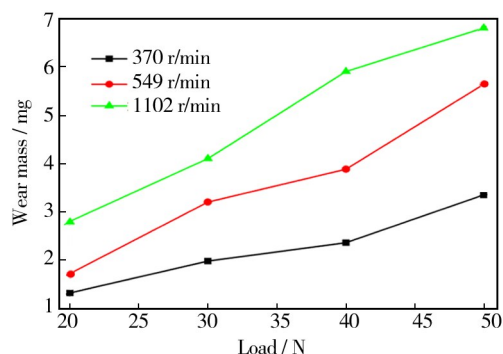


图 7 TiN/TiO 涂层与 GCr15 对磨时的摩擦系数  
Fig.7 Friction coefficient of TiN/TiO coating and GCr15

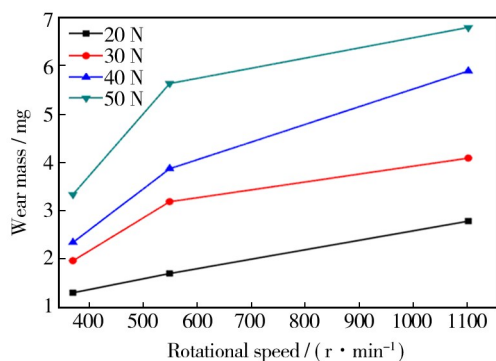
图 8 为 TiN/TiO 涂层在不同转速与载荷下的磨损量变化情况。由图 8a 可以看出,涂层的磨损量随着载荷增加近似呈线性增大。这是因为:涂层硬度

大,耐磨性好,能够承受低载的摩擦作用,磨损量小;随着载荷的增加,涂层与对磨盘 GCr15 接触更为紧密,磨损面积更大,摩擦表面破坏严重;另外,载荷的增加还会引起涂层内部微裂纹的扩展,诱发涂层发生片状剥落,磨损量增加。

由图 8b 可以看出,涂层磨损量随着转速的增加而增大,载荷越大,磨损量随转速增加得越明显。转速增加时,单位时间内摩擦表面承受载荷的循环次数增加,摩擦产生的热量也增加,摩擦副来不及向周围散热,接触中心温度快速升高,因此试样表层蠕变软化,发生粘着磨损,磨损量增加。当转速为 549 r/min 时,载荷为 30, 40, 50 N 的磨损量曲线出现拐点,说明此时磨损机制发生了变化。转速增加至 1102 r/min 时,磨损量增加的趋势变缓,以 50 N 载荷下最为明显。这可能是因为高转速下产生的摩擦热能够诱发摩擦副表面发生氧化,生成的氧化膜起到了润滑减磨作用;此外,高载荷将磨屑、氧化膜压平,表面变得平整,粗糙度降低;这两方面的共同作用抑制了磨损的加剧,使得磨损量增幅减小。



a 磨损量与载荷的关系



b 磨损量与转速的关系

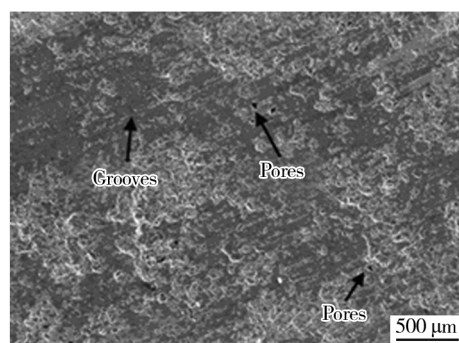
图 8 TiN/TiO 涂层在不同载荷和转速下的磨损量

Fig. 8 Wear mass of TiN/TiO coating under different loads and rotational speeds

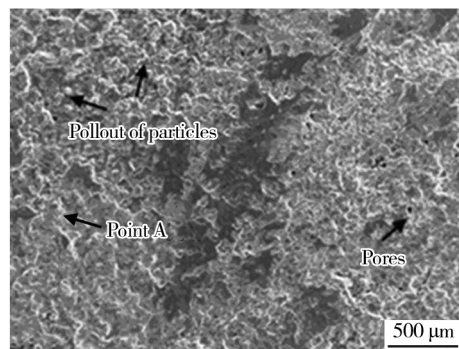
图 9 为不同转速(载荷 40 N)下的磨损形貌,图 10 为图 9b 中 A 点的 EDS 分析结果。由图 9 可见,涂

层的磨损随着转速的增大而加剧。转速为 370 r/min 时,涂层表面相对光滑,存在少量因颗粒脱落形成的剥离坑,剥离坑小而浅,并且有犁沟状磨痕,这是摩擦副表面的微凸体滑动或剥落造成的。微凸体在摩擦副反复作用下,发生脆断、剥落,形成坚硬的磨粒。磨粒在材料表面受到力的作用,垂直分力使磨粒压入材料表面,平行分力使磨粒在涂层表面产生微切削,形成犁沟<sup>[18]</sup>。

当转速增加到 1102 r/min 时,如图 9b 所示,涂层磨损表面凹凸不平,剥离坑的尺寸和深度都增大。随



a 370 r/min



b 1102 r/min

图 9 不同转速下 TiN/TiO 涂层的磨损形貌

Fig. 9 Worn surfaces of TiN /TiO coating at different rotational speeds

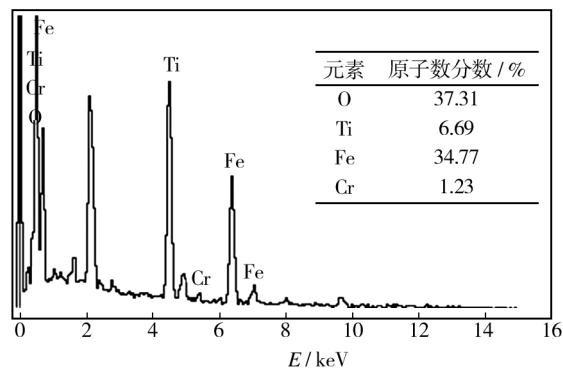


图 10 图 9b 中 A 点的 EDS 图谱

Fig. 10 EDS pattern of point A in Fig. 9b

着转速的增大,涂层受到的应力增加,作为脆性相的TiN容易产生裂纹,并沿着涂层本身的缺陷处或TiN相和TiO相的交界处不断扩展,不同方向的裂纹相互交错,形成网状,最终导致涂层剥落<sup>[19]</sup>。此外,剥落的磨粒存在于涂层与对磨盘之间,不仅使得两体磨损变为三体磨损<sup>[20]</sup>,还会造成切应力增加<sup>[21]</sup>。磨粒嵌入复相涂层,留下较深的凹坑,加剧了涂层破坏。EDS分析表明,A点处主要由37.31% O+34.77% Fe+26.69% Ti+1.23% Cr(以原子数分数计)组成,没有检测到N。由于转速高,涂层表面单位时间内摩擦的次数多,表面温度上升很快,GCr15盘表面发生了氧化,生成的氧化铁薄膜转移到涂层表面,因此磨损机制为粘着磨损。

图11为不同载荷(转速549 r/min)下的磨损形貌。

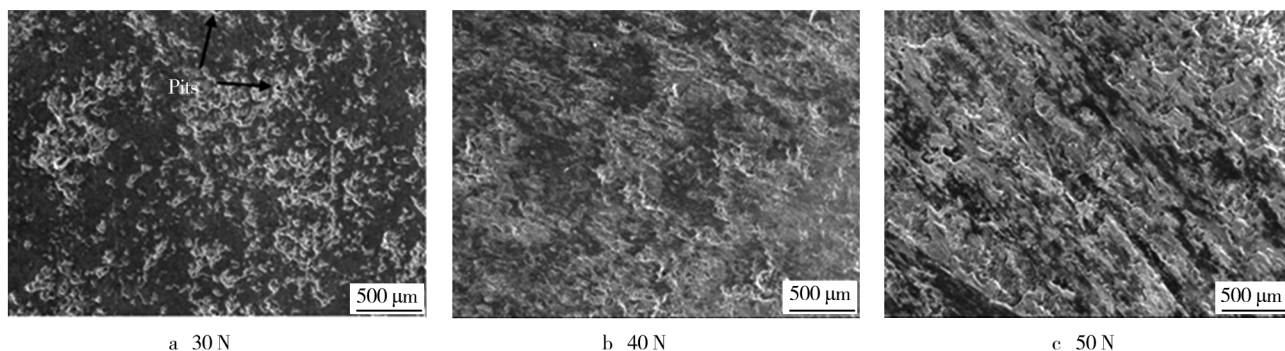


图11 不同载荷下TiN/TiO涂层的磨损形貌

Fig. 11 Worn surfaces of TiN/TiO coating at different loads

### 3 结论

1) 利用等离子喷涂技术成功制备了TiN/TiO复合涂层。涂层致密,具有典型的层状结构,厚度约为350 μm,孔隙率约为4.3%,平均硬度为1444HV0.1。

2) 干摩擦条件下,在转速370~1102 r/min、载荷30~50 N的范围内,TiN/TiO复合涂层与GCr15对磨时的摩擦系数为0.0963~0.2778。随着载荷的增加,摩擦系数呈降低趋势。磨损量则随着载荷和转速的增加而增加。

3) 在载荷为40 N的条件下,当转速为370 r/min时,TiN/TiO涂层的磨损机制主要是磨粒磨损;当转速为1102 r/min时,TiN/TiO涂层的磨损机制主要是粘着磨损。涂层在低速低载时,表现出优异的耐磨性能,随着转速和载荷的增加,涂层的耐磨性下降。

### 参考文献

[1] 穆媛,陈华达,顾文华. 飞机起落架常见故障及原因分析

貌。当载荷为30 N时,如图11a所示,磨损表面有较浅的疲劳麻坑,但整体较光滑。这是因为载荷较低,脱落的磨粒仅在表面形成凹坑,不会产生切削作用,反而会如同细小的抛光剂<sup>[22]</sup>,使摩擦表面变得光滑。当载荷为40 N时,如图11b所示,涂层表面有两种颜色,凸起的黑色部分比较致密,没有明显的犁沟,有轻微的起皮现象,但由于载荷不大,涂层受到的垂直分力较小,起皮的涂层未完全脱落。当载荷为50 N时,如图11c所示,能够看到涂层起皮现象严重,甚至出现剥落。载荷较大时,涂层内部的薄弱界面会发生断裂,导致层与层之间发生分离。涂层分离剥落的碎片在磨损过程中受到高载荷的作用,不断被碾压、破碎,形成坚硬的磨粒,造成切应力增加,涂层起皮加速,最终剥落<sup>[23]</sup>。

[J]. 装备环境工程,2013,10(4):98—101.

MU Yuan, CHEN Hua-da, GU Wen-hua. Common Failure and Reason Analysis of Aircraft Landing Gear[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 98—101.

[2] 王成磊,高原,卜根涛,等. 工艺参数对等离子合成TiN层相结构的影响[J]. 表面技术,2010,39(2):47—60.

WANG Cheng-lei, GAO Yuan, BU Gen-tao, et al. Effects of Process Parameters on the Phase Structure of TiN Layer by Plasma Synthesizing[J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 47—60.

[3] 胡芳友,崔爱永,回丽,等. 钛基梯度功能涂层磨损和腐蚀行为研究[J]. 功能材料,2012,43(1):36—41.

HU Fang-you, CUI Ai-yong, HUI Li, et al. Wear and Corrosion Behavior of Ti-matrix Functional Gradient Layer[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(1): 36—41.

[4] 应峰,缪强,黄俊,等. 钛合金表面原位合成TiN渗镀层摩擦性能研究[J]. 金属热处理,2009,34(9):29—31.

YING Feng, MIAO Qiang, HUANG Jun, et al. Tribological Property of TiN Diffusion Coating in-situ Synthesised on Titanium Alloy Surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2009,

- 34(9):29—31.
- [5] 苗建旺,王超,周春根. 化学气相沉积 TiN 薄膜及其耐磨性能[J]. 航空学报,2008,29(6):1687—1691.  
MIAO Jian-wang, WANG Chao, ZHOU Chun-gen. Preparation and Wear-resistance Properties of TiN Films by CVD [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2008,29(6):1687—1691.
- [6] SERBAN V, ROSU R, BUCUR A, et al. Deposition of Titanium Nitride Layers by Electric Arc-reactive Plasma Spraying Method [J]. Applied Surface Science, 2013, 265: 245—249.
- [7] 李扬,马静,孟凡曼. 反应喷涂制备 Ti-B-C-N 涂层的研究进展[J]. 河北科技大学学报,2014,35(3):261—265.  
LI Yang, MA Jing, MENG Fan-man. Research Development of Reactive Spraying in Preparing Ti-B-C-N Ceramic Coating[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(3):261—265.
- [8] 王刚,焦孟旺,李贺,等. 热喷涂新技术在发动机减摩性能方面的应用和研究[J]. 表面技术,2014,43(1):103—108.  
WANG Gang, JIAO Meng-wang, LI He, et al. Application and Research of New Thermal Spraying Technology in Engine Friction-reduction Performance [J]. Surface Technology, 2014, 43(1):103—108.
- [9] 张燕,张行,刘朝辉,等. 热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J]. 装备环境工程,2013,10(3):59—62.  
ZHANG Yan, ZHANG Hang, LIU Zhao-hui, et al. Development Status of Thermal Spray Technology and Thermal Spray Materials [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3):59—62.
- [10] 刘世念,苏伟,魏增福,等. 热喷涂防腐涂层在大气环境中的应用[J]. 装备环境工程,2013,10(6):72—76.  
LIU Shi-nian, SU Wei, WEI Zeng-fu, et al. Application of Corrosion Resistant Coating of Thermal Spraying in the Atmospheric Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):72—76.
- [11] 贺毅,马东林,金山,等. 特征喷涂参数对等离子喷涂纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13 $\text{TiO}_2$  涂层微观结构及耐磨性能的影响[J]. 表面技术,2015,44(5):31—37.  
HE Yi, MA Dong-lin, JIN Yu-shan, et al. Influence of CPSP on Microstructure and Wear Property of Nanostructure  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13 $\text{TiO}_2$  Coating Deposited by Plasma Spraying [J]. Surface Technology, 2015, 44(5):31—37.
- [12] 陈海龙,杨晖. 反应等离子喷涂 TiN 的反应进程及涂层形成机理研究[J]. 材料热处理技术,2009,38(20):104—106.  
CHEN Hai-long, YANG Hui. Study on Reacting Course and Forming Mechanism of TiN Coatings Prepared by Reactive Plasma Spraying [J]. Material and Heat Treatment, 2009, 38(20):104—106.
- [13] 杨洪伟,栾伟玲,涂善东. 等离子喷涂技术的新进展[J]. 表面技术,2005,34(6):7—10.  
YANG Hong-wei, LUAN Wei-ling, TU Shan-dong. Recent Development on Plasma Spray Technology [J]. Surface Technology, 2005, 34(6):7—10.
- [14] 叶大伦,胡建华. 实用无机物热力学数据手册 [M]. 北京:冶金工业出版社,2002.  
YE Da-lun, HU Jian-hua. Practical Inorganic Thermodynamic Data Manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [15] YAO Yi-hong, WANG Ze-hua, ZHOU Ze-hua, et al. Study on Reactive Atmospheric Plasma-sprayed in situ Titanium Compound Composite Coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, 22(4):509—517.
- [16] 谢灿强,陈康华,王社权,等. TiN/TiCN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /TiN CVD 多层涂层硬质合金的氧化行为[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2011,16(1):26—31.  
XIE Can-qiang, CHEN Kang-hua, WANG She-quan, et al. Oxidation Behavior of TiN/TiCN/( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/TiN Multilayer Coated Cemented Carbide [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(1):26—31.
- [17] 姚焱红. 气相反应等离子喷涂 TiN 涂层及性能研究 [D]. 南京:河海大学,2012.  
YAO Yi-hong. Study on Reactive Atmospheric Plasma Sprayed Titanium Compound Composite Coating [D]. Nanjing: Hohai University, 2012.
- [18] 王永林. TiN 涂层摩擦磨损性能及机理研究 [D]. 无锡:江南大学,2012.  
WANG Yong-lin. The Research on the Friction and Wear Properties of TiN Coating and Its Mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [19] 王林磊,梁秀兵,陈永雄,等. Fe 基非晶纳米晶电弧喷涂层的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报,2011,31(6):610—615.  
WANG Lin-lei, LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong, et al. Tribology Properties of Fe-based Amorphous and Nanocrystalline Coatings Prepared by Automatic Arc Spraying Process [J]. Tribology, 2011, 31(6):610—615.
- [20] VERA E E, VITE M, LEWIS R, et al. A Study of the Wear Performance of TiN, CrN and WC/C Coatings on Different Steel Substrates [J]. Wear, 2011, 271(9/10):2116—2124.
- [21] MA Guo-jia, WANG Li-liang, GAO Hao-xiang, et al. The Friction Coefficient Evolution of a TiN Coated Contact during Sliding Wear [J]. Applied Surface Science, 2015, 345(1):109—115.

- Path Prediction[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005, 28(1/2): 3—12.
- [7] DUBOURG M C, LAMACQ V. A Predictive Rolling Contact Fatigue Crack Growth Model: Onset of Branching, Direction, and Growth-role of Dry and Lubricated Conditions on Crack Patterns[J]. *Journal of Tribology*, 2002, 124(4): 680—688.
- [8] HOURLIER F, PINEAU A. Propagation of Fatigue Cracks under Polymodal Loading[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1982, 5(4): 287—302.
- [9] BAIETTO M C, PIERRES E, GRAVOUIL A, et al. Fretting Fatigue Crack Growth Simulation based on a Combined Experimental and XFEM Strategy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 47(1): 31—43.
- [10] TROLLÉ B, BAIETTO M C, GRAVOUIL A, et al. 2D Fatigue Crack Propagation in Rails Taking into Account Actual Plastic Stresses[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 123(1): 163—181.
- [11] BROUZOU LIS J, EKH M. Crack Propagation in Rails under Rolling Contact Fatigue Loading Conditions Based on Material Forces[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 45(3): 98—105.
- [12] BAIETTO M C, PIERRES E, GRAVOUIL A. A Multi-model X-FEM Strategy Dedicated to Frictional Crack Growth under Cyclic Fretting Fatigue Loadings[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2010, 47(10): 1405—1423.
- [13] ALEGRE J M, CUESTA I I. Some Aspects about the Crack Growth FEM Simulations under Mixed-mode Loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(7): 1090—1095.
- [14] 高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- GAO Zhen-tong, XIONG Jun-jiang. *Fatigue Reliability Analysis*[M]. Beijing: Beijing Aeronautics and Astronautics University Press, 2000.
- [15] 周小林, 向延念, 陈秀方. U71Mn 50 kg/m 普通碳素钢钢轨疲劳裂纹扩展速率试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(3): 86—90.
- ZHOU Xiao-lin, XIANG Yan-nian, CHEN Xiu-fang. Test and Study of Fatigue Fracture Propagation of U71Mn 50 kg/m Ordinary Carbon Steel Rail[J]. *China Railway Science*, 2004, 25(3): 86—90.
- [16] 曹世豪, 江晓禹, 文良华. 轴重和摩擦力对轮轨接触疲劳的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(6): 10—14.
- CAO Shi-hao, JIANG Xiao-yu, WEN Liang-hua. Influence of Axle Load and Friction on the Fatigue of Wheel/Rail Contact[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(6): 10—14.
- [17] 曹世豪, 李煦, 文良华, 等. 钢轨表面裂纹扩展方向研究[J]. *表面技术*, 2014, 43(3): 37—42.
- CAO Shi-hao, LI Xu, WEN Liang-hua, et al. Influence of Axle Load and Friction on the Fatigue of Wheel/Rail Contact[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(3): 37—42.
- [18] 陈朝阳, 张银华, 刘庆丰, 等. 朔黄铁路曲线股热处理钢轨剥离损伤成因分析[J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(4): 28—34.
- CHEN Chao-yang, ZHANG Yin-hua, LIU Qing-feng, et al. Analysis the Damage of Heat Treated Rail on Shuohuang Railway under the Curve[J]. *China Railway Science*, 2008, 29(4): 28—34.
- [19] 酆正能, 张纪奎. 工程断裂力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- LI Zheng-neng, ZHANG Ji-kui. *Engineering Fracture Mechanics*[M]. Beijing: Beijing Aeronautics and Astronautics University Press, 2012.
- [20] 郭火明, 王文健, 刘腾飞, 等. 重载铁路钢轨损伤行为分析[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(2): 269—270.
- GUO Huo-ming, WANG Wen-jian, LIU Teng-fei, et al. Analysis of Damage Behavior of Heavy-haul Railway Rails[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(2): 269—270.

(上接第 58 页)

- [22] 刘芳, 周科朝, 李志友. 11Mo4Cr2V/42CrMo 系统摩擦副材料磨损行为的研究[J]. *摩擦学报*, 2011, 31(2): 124—130.
- LIU Fang, ZHOU Ke-chao, LI Zhi-you. Wear Behavior of 11Mo4Cr2V/42CrMo Frictional Pair[J]. *Tribology*, 2011, 31(2): 124—130.
- [23] 田伟红, 郭杨阳, 李轩鹏, 等. Ti13Nb13Zr 合金离子氮化层的摩擦磨损性能研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(5): 58—61.
- TIAN Wei-hong, GUO Yang-yang, LI Xuan-peng, et al. Study on Friction and Wear Property of Plasma Nitride Layer on Ti13Nb13Zr Alloy[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(5): 58—61.