

电弧离子镀电磁线圈电压对 TiAlN 涂层结构及性能的影响

李洪¹, 杨鸿泰², 林松盛¹, 石倩¹, 韦春贝¹, 郭朝乾¹, 苏一凡¹, 唐鹏¹

(1.广东省科学院 广东省新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广州 510651;
2.广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006)

摘 要: **目的** 揭示电弧离子镀过程中, 电磁和永磁复合磁场耦合作用下电磁线圈偏压对 TiAlN 涂层结构及性能的作用规律, 优化 TiAlN 涂层制备工艺。 **方法** 采用电弧离子镀技术在 M2 高速钢基体表面沉积高 Al 含量 Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层 (TiAl 靶, 原子数分数, Ti:Al=1:2)。改变电磁线圈电压, 研究涂层微观组织结构、表面粗糙度、硬度、膜/基结合力和耐磨性的变化规律。 **结果** 在 15~45 V 范围内, 电磁线圈电压小于 30 V 时, Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层内部致密; 线圈电压大于 30 V 时, 涂层内部变得疏松。线圈电压为 15 V 时, TiAlN 涂层表面粗糙度最小, 为 0.2 μm。随着线圈电压升高, Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层硬度增大, 线圈电压为 45 V 时, Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层硬度达到最大, 为 3866HV_{0.025}。随着线圈电压的升高, Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层膜/基结合力及耐磨性先增加后减小, 线圈电压为 15 V 时, 结合力最高, 为 95.4 N, 磨损率达到最低, 为 1.62×10⁻¹⁵ m³/(N·m)。 **结论** 在线圈电压较小时, 随着电压的升高, 作用于阴极靶材的磁场强度增加, 阴极弧斑速度加快, 每个弧光点维持时间缩短, 能量降低, 离化率升高, 溅射出的液滴数量减少, 涂层结构致密, 粗糙度降低, 硬度和耐磨性能升高; 随着线圈电压进一步升高, 磁场强度继续增大, 弧斑运动受到的磁性束缚力增大, 弧斑运动半径向靶材中心收缩, 作用于固定位置的弧光累计时间更长, 离化率降低, 液滴增多, 涂层综合性能下降。

关键词: 线圈电压; TiAlN 涂层; 力学性能; 耐磨性; 结构及性能

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)09-0273-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.032

Effect of Electromagnetic Coil Voltage on Microstructure and Properties of TiAlN Coating Prepared by Arc Ion Plating

LI Hong¹, YANG Hong-tai², LIN Song-sheng¹, SHI Qian¹, WEI Chun-bei¹,
GUO Chao-qian¹, SU Yi-fan¹, TANG Peng¹

(1.National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangdong Academy of Science, Guangzhou 510651, China; 2.School of Material and Energy & Guangdong, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal the effect of electromagnetic coil bias on the structure and properties of TiAlN coating

收稿日期: 2018-11-30; 修订日期: 2019-01-02

Received: 2018-11-30; **Revised:** 2019-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0300403-05); 广东省科技计划项目 (2017A050506037); 广东省科技厅项目 (2017A070701027); 2018 年省院项目 (2018GDASCX-0402)

Fund: Supported by the National Key Project of Research and Development Plan (2016YFB0300403-05), Guangdong Province Science and Technology Project (2017A050506037), Department of Science and Technology of Guangdong Province Project (2017A070701027), Guangdong Department of Science and Technology Project (2018GDASCX-0402)

作者简介: 李洪 (1987—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为材料表面工程。邮箱: lihong@gdinm.com

Biography: LI Hong (1987—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: surface engineering. E-mail: lihong@gdinm.com

under the coupling of electromagnetic and permanent magnetic composite magnetic field in the process of arc ion plating, and optimize the preparation process of TiAlN coating. $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coating with high Al content (Ti:Al target at%, Ti:Al=1:2) was deposited on the M2 high-speed steel substrate by arc ion plating technique. By changing the voltage of the electromagnetic coil, the microstructure, surface roughness, hardness, film/base bonding force and wear resistance of the coating were studied. When the coil voltage was less than 30 V in the range of 15 V to 45 V, the interior of the $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coating was dense. When the coil voltage was greater than 30 V, the interior of the coating became loose. When the coil voltage was 15 V, the surface roughness of the $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coating was at least 0.2 μm . With the increase of voltage, the hardness of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coating increased, and the hardness of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coating reached the maximum of 3866HV_{0.3} when the coil voltage was 45 V. As the coil voltage increased, the adhesion and wear resistance of the $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coating/base increased first and then decreased. When the coil voltage was 15 V, the binding force was 95.4 N and the wear rate reached the minimum of $1.62 \times 10^{-15} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. When the coil voltage is small, as the coil voltage increases, the strength of the magnetic field acting on the cathode target increases, the speed of the cathode arc spot increases, the time for maintaining each arc spot shortens, the energy decreases, the ionization rate increases and the number of droplets splashed decreases. Thus, the coating structure becomes dense, the roughness decreases and the hardness and wear resistance increase. As the coil voltage increases further, the magnetic field strength continues to increase, the magnetic binding force of the arc spot movement increases, the movement radius of the arc spot contracts toward the center of the target and the accumulated time of the arc at a fixed position is longer, the ionization rate decreases, the droplets increase and overall performance of the $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coating declines.

KEY WORDS: coil voltage; TiAlN coating; mechanical properties; wear resistance; structure and property

TiAlN 涂层是目前各种涂层研究中较为成熟且关注最广泛的一种硬质膜。TiAlN 涂层拥有优异的力学性能、良好的红硬性、较低的热导率以及良好的抗高温氧化性等优异性能,在工具领域得到广泛应用^[1]。在 TiAlN 涂层中,Al 含量越高,抗高温氧化性能越好,在现代干式切削条件下的使用寿命越长^[2-4]。物理气相沉积技术是制备 TiAlN 涂层的主要技术,其中通过改变电弧 TiAl 靶中合金 Al 元素的含量,即可实现不同 Al 含量的 TiAlN 涂层的制备。然而由于涂层中 Al 含量增加,低熔点的 Al 在电弧离子镀过程中更易形成大液滴沉积到涂层表面,严重影响到被涂覆工件的表面质量。因此,高性能、低粗糙度的高 Al 含量 TiAlN 涂层制备技术是国内外相关研究机构和公司研究的目标。针对这一目标,学者们从工艺优化、设备改进以及刀具设计上展开了众多研究,现已取得了丰硕成果。

在学者关于利用电弧离子镀技术制备 TiAlN 涂层的研究中,得到如下规律:随着 TiAl 靶材中 Al 含量的增加,基于电弧离子镀技术制备的 TiAlN 涂层表面液滴数量及尺寸增加;在同一 TiAl 靶材的条件下,随着靶电流的增加, TiAlN 涂层表面液滴尺寸增加;负偏压、 N_2 分压及靶电流对 TiAlN 涂层性能的影响规律是随着工艺参数数值的增加,性能先提升后降低^[5]。孙国栋等^[6]采用多弧离子镀技术制备 TiAlN 涂层,通过分析工艺参数对膜层与基体结合力的影响,定量分析了各个主要工艺参数对膜/基结合力的影响程度,同时还发现提高涂层硬度及改善其生长方式有利于

结合力的提高。Seog-Young Yoon 等人^[7]采用电弧离子镀技术制备 TiAlN 涂层,研究了工艺参数中电弧电流和反应气体分压对涂层微观结构的影响,同时还在沉积系统中添加圆柱形过滤器来改善涂层表面质量。Azar^[8]研究了脉冲和直流耦合作用下偏压对 TiAlN 涂层结构及性能的影响。此外,还有许多关于 TiAlN 涂层工艺参数的研究,比如占空比、负偏压和 N_2 流量等对耐磨性、沉积速率和抗高温氧化性的影响等^[9-13]。也有学者研究了不同涂层结构对 TiAlN 复合涂层结构及性能的影响, Y. X. Xu^[14]研究了 TiAlN/TiN 及 TiAlN/Zr 层状复合涂层的结构及性能, Liangliang Liu^[15]研究了以类金刚石薄膜(DLC)作为过渡层的 TiAlN 复合涂层的结构及性能。在众多学者围绕 TiAlN 涂层展开的研究工作中,大多数集中在工艺参数优化(偏压、弧流、炉压、温度等)对 TiAlN 涂层结构和性能的影响。

在电弧离子镀过程中,弧斑的运动特性对涂层的综合性能、液滴数量尺寸都有重要影响。弧斑的运动特性受阴极靶材周围的磁场影响很大。作用在阴极靶材表面的磁场可分为平行于靶材表面的平行磁场和垂直于靶材表面的法向磁场。平行磁场主要是使弧斑稳定,防止弧斑产生散焦作用;垂直磁场主要是加速弧斑运动速度^[16-19]。磁场对电弧离子镀涂层结构及性能影响的相关研究还相对匮乏,本文是基于电磁和永磁共驱动复合磁场技术,主要研究产生电磁场的线圈电压对高铝含量 TiAlN 涂层结构及性能的影响,并对其影响机理作进一步研究和讨论。

1 实验

1.1 涂层制备

本实验采用的基体是 M2 高速钢 (W6Mo5Cr4V2)。采用的镀膜设备为国产 AS700DTXB 型自动控制真空阴极电弧离子镀膜机, 本底真空为 5×10^{-4} Pa, 加热温度为 400 °C, 工件架既可以公转, 又可以自转, 实验中采用的工件公转速度为 3 r/min。靶材为 Cr 靶和 TiAl 靶 (TiAl 靶中 Ti 和 Al 的原子比为 33 : 67), 辅助气体为 N_2 和 Ar, 纯度均为 99.999%。实验中电磁线圈电压分别为 10、15、25、35、45 V。

工艺流程: 先进行炉内清洗, 利用离子在高负偏压下对基底轰击进行清洗, 然后镀厚度为 1 μm 左右的 Cr/CrN 过渡层, 然后再镀 $Ti_{0.33}Al_{0.67}N$ 涂层。沉积参数为: TiAl 靶电流 100 A, 负偏压 50 V, 沉积时间 90 min, N_2 气压 4.0 Pa。

1.2 涂层性能测试及表征

利用摩擦磨损试验对 TiAlN 涂层的摩擦行为进行测试, 试验参数: 对磨材料为 $\phi 4$ mm 的 Si_3N_4 , 载荷 1000 g, 线速度 0.2 m/s, 时间 120 min。利用轮廓仪对磨痕宽度和深度进行测量, 并计算涂层磨损率。利用划痕试验对膜/基结合力进行测试, 试验参数: 划痕速度 5 mm/N, 加载速度 100 N/min, 终止载荷 100 N。利用维氏硬度计对 TiAlN 涂层的显微硬度进行测量, 测试参数: 加载时间 15 s, 载荷 25 g。采用 X 射线衍射仪 (XRD, Bruker D8 Advance·德国) 对涂层物相进行分析, 采用扫描电子显微镜 (SEM, FEI Quanta 200, 美国) 对涂层表面及截面显微形貌、涂层摩擦磨损后的磨痕形貌进行观察。

1.3 电磁耦合永磁复合磁场

图 1 是实验所用电弧离子镀设备阴极靶座示意图, 永磁铁位于阴极靶材正后方, 电磁线圈位于靶材

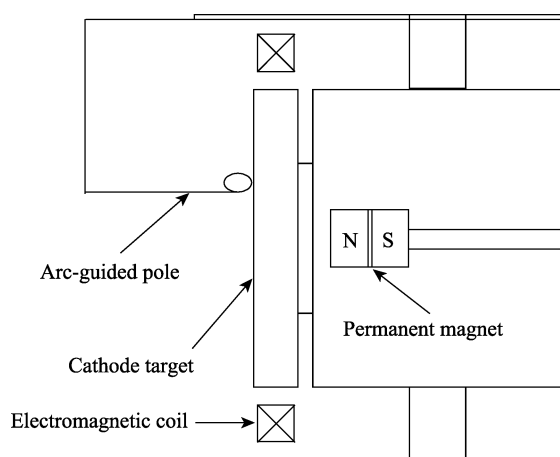


图 1 电弧离子镀靶座示意图
Fig.1 Schematic diagram of arc ion plated target

四周。图 2 是阴极靶材表面磁场分布示意图, 永磁体产生的磁场强度方向与靶面成一定角度, 可分成平行于靶面 B_T 方向和垂直于靶面 B_D 方向, 根据安培定则, 电磁线圈产生的磁场方向为垂直于靶材表面 B_E 方向。电弧离子镀过程中, 放电弧斑实际上是电子束构成的平行电流受相互排斥力而发生散焦并向外移动。此时, 平行于靶材表面的磁场可起到稳弧作用, 而垂直于靶材表面方向的磁场限制弧斑发生圆周运动。通过施加电磁线圈而产生的垂直于靶材表面的磁场, 加速了弧斑运动速度, 随着电磁线圈电压的增加, 磁场强度增加, 弧斑运动速度增加, 同时弧斑圆周运动半径减小。

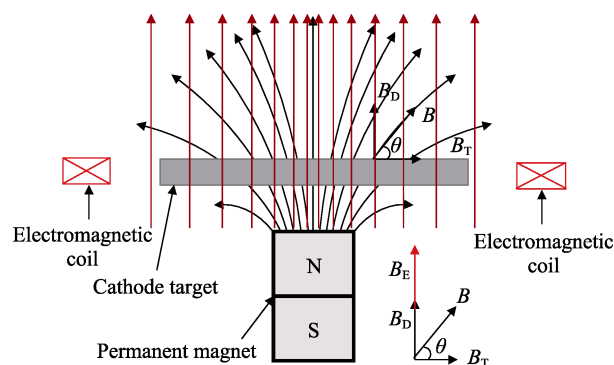


图 2 阴极靶材表面复合磁场分布示意图
Fig.2 Schematic diagram of complex magnetic field distribution on the cathode target surface

2 结果与讨论

2.1 涂层表面形貌分析

图 3 为不同线圈电压下 $Ti_{0.33}Al_{0.67}N$ 涂层的 SEM 显微形貌, 图 4 为不同线圈电压下 $Ti_{0.33}Al_{0.67}N$ 涂层粗糙度的柱状图。从图 3 中可知, 当线圈电压为 10 V 时, 涂层表面液滴较多, 尺寸较大, 粗糙度较大; 当线圈电压为 15 V 时, $Ti_{0.33}Al_{0.67}N$ 涂层表面的液滴最少, 涂层表面最光滑。当线圈电压继续增大时, 粗糙度会增大, 表面液滴会增多。在相同的镀膜工艺条件下, 线圈电压从 10 V 增大到 45 V (10、15、25、35、45 V), $Ti_{0.33}Al_{0.67}N$ 涂层厚度分别为 2.20、2.62、3.28、3.73、5.26 μm (见图 5), 可见随着线圈电压的升高, 涂层厚度增加。线圈电压增大会使阴极电弧更集中在靶材表面进行转圈运动, 提高靶材的烧蚀温度, 单位时间内靶材的离化率增大, 这都会导致沉积的薄膜厚度增加^[20]。增大线圈电压可以使阴极弧斑变得更细小且数目更多, 有利于降低涂层表面的液滴尺寸和粗糙度, 但是线圈电压过大, 沉积的涂层厚度增加, 粗糙度反而会增大。

图 6 为不同线圈电压下 $Ti_{0.33}Al_{0.67}N$ 涂层的截面形貌。镀层由基体、过渡层 Cr 层和 $Ti_{0.33}Al_{0.67}N$ 层组成, 各层之间结合良好, 没有明显的缝隙, Cr 层和

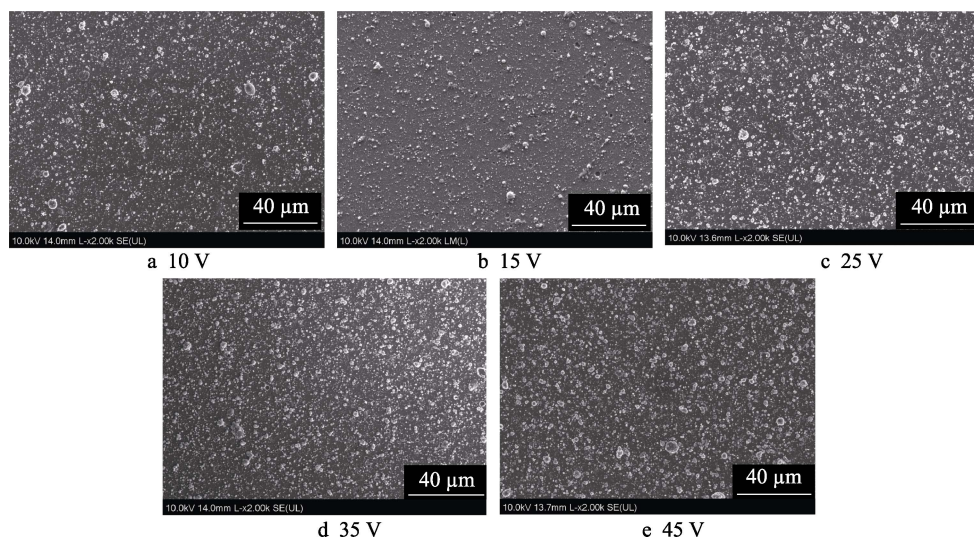


图3 不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的表面形貌
Fig.3 Surface morphology of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coatings at different coil voltage

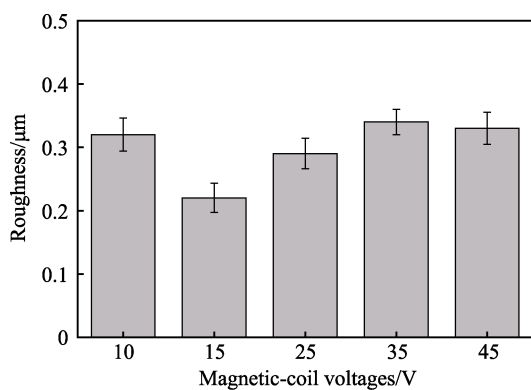


图4 不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的粗糙度
Fig.4 Roughness of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coatings at different coil voltage

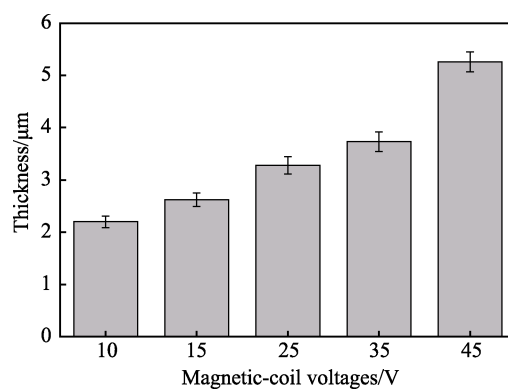


图5 不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的截面厚度
Fig.5 Cross-sectional thickness of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coatings at different coil voltage

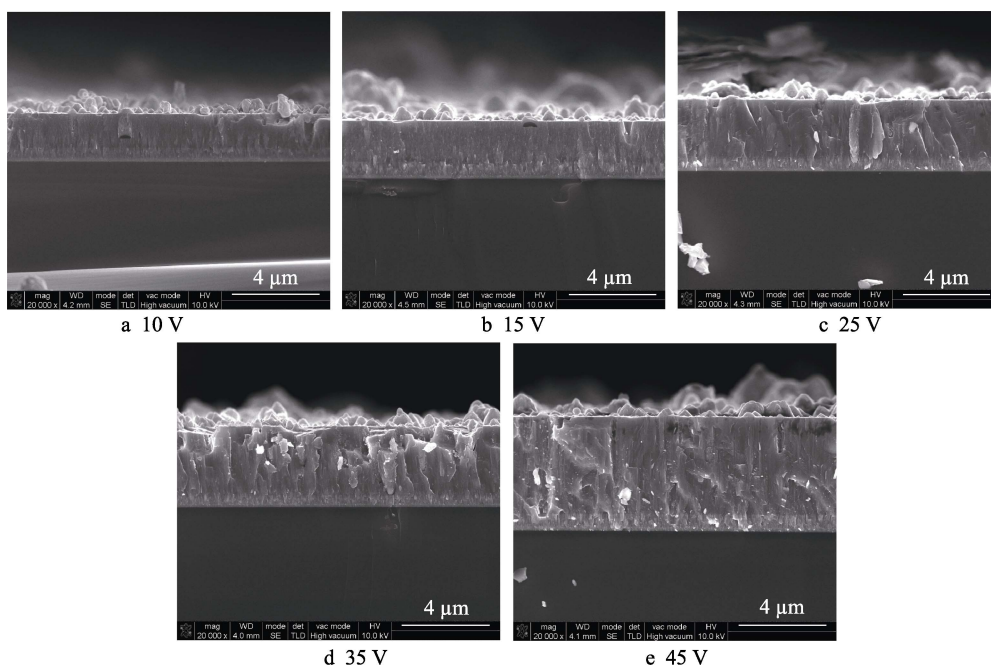


图6 不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的截面形貌
Fig.6 Cross-sectional view of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coatings at different coil voltage

Ti_{0.33}Al_{0.67}N 层呈现柱状生长。线圈电压较低时, 涂层较致密, 其中存在非柱状晶结构的生长方式, 随着线圈电压增大, 涂层沿着垂直于基体表面的方向生长, 柱状晶结构逐渐清晰, 但空隙增多, 涂层的致密度下降。

2.2 涂层力学性能分析

图 7 为不同线圈电压下 Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层的显微硬度, 随着电弧离子镀电磁线圈电压的增加, Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层的显微硬度增大。随着线圈电压的增加, 靶材周围的等离子体被加速以及约束, 靶材离化率增加, 致涂层显微硬度增加。从图 5 可知, 随着电磁线圈电压的升高, 涂层厚度增加, 相对于 M2 高速钢基体, Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层硬度远高于基体, 在压头压入过程中, 厚度越大的涂层受基体影响越小, 从而反映出硬度越高。

图 8 为不同线圈电压下 Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层的结合力, 增大线圈电压, 涂层的结合力呈现先增大后减小的趋势, 涂层的结合力受涂层结构、涂层残余应力和膜基硬度差的影响。线圈电压较低时, 靶材表面弧斑运动速度慢, 靶材离化率不高, 导致涂层硬度和厚度低, 同时涂层与基体的膜/基结合力较差; 随着线圈

电压的增大, 弧斑运动速度增加, 靶材离化率增加, 涂层厚度增加, 硬度升高, 结合力增大; 但当线圈电压过大时, 弧斑运动速度过大, 且容易呈现中心区域聚集趋势, 弧斑作用到一个位置的累计时间变长, 涂层溅射出的金属液滴增多, 涂层结构变得疏松, 脆性增加, 导致压头在滑动过程中, 容易发生崩膜现象, 涂层结合力下降^[21]。

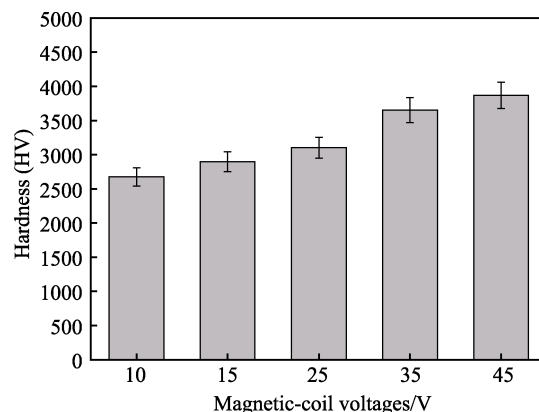


图 7 不同线圈电压下 Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层的硬度
Fig.7 Hardness of Ti_{0.33}Al_{0.67}N coatings at different coil voltage

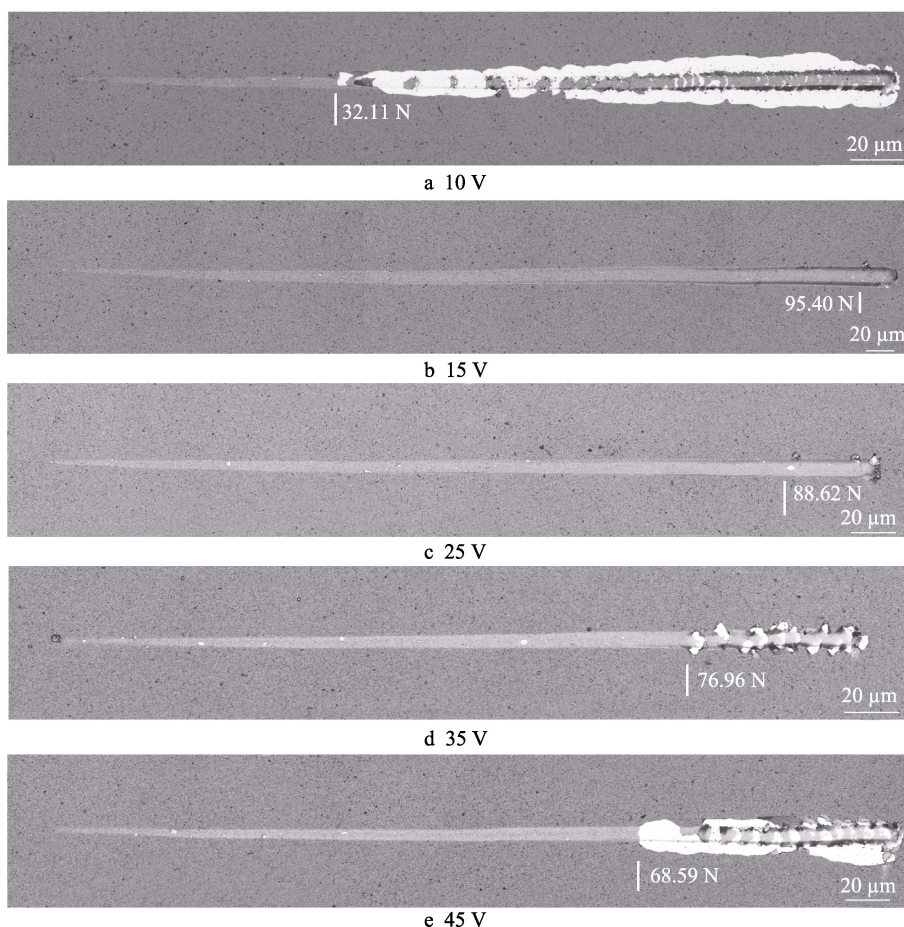


图 8 不同线圈电压下 Ti_{0.33}Al_{0.67}N 涂层的结合力
Fig.8 Adhesion of Ti_{0.33}Al_{0.67}N coatings at different coil voltage

2.3 涂层摩擦学性能分析

图 9 为不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的摩擦系数和磨损率。电磁线圈电压在 10~45 V 范围内,增大线圈电压, $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层摩擦系数先减小后增大,磨损率也与之对应,磨损率在线圈电压为 15 V 时最低。图 10 为不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的磨痕形貌,可以看出 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的磨损机制主要是粘着磨损和磨粒磨损。在摩擦磨损过程中,涂层耐磨性主要受涂层表面的光滑程度和涂层质量的影响。当线圈电压较低时,涂层结构致密,但涂层表面

粗糙度高,在与磨球发生摩擦的过程中产生大量碎屑,这些碎屑会参与磨损过程,并不断粘着到摩擦副表面,随着摩擦的进行,粘着碎屑极易与涂层发生粘黏,导致涂层发生剥落,并在磨损位置发生粘着磨损,引发大面积剥落,降低涂层的耐磨性^[22-25]。随着线圈电压的升高,涂层表面粗糙度降低,涂层致密,从而表现出优异的耐磨减摩性能。随着线圈电压进一步升高,涂层开始变得疏松,涂层粗糙度增加^[26],疏松的涂层结构在摩擦磨损过程中容易发生塌陷,同时由于大颗粒的冲击作用容易造成大面积涂层被掀开剥落,恶化了涂层的耐磨减摩性能。

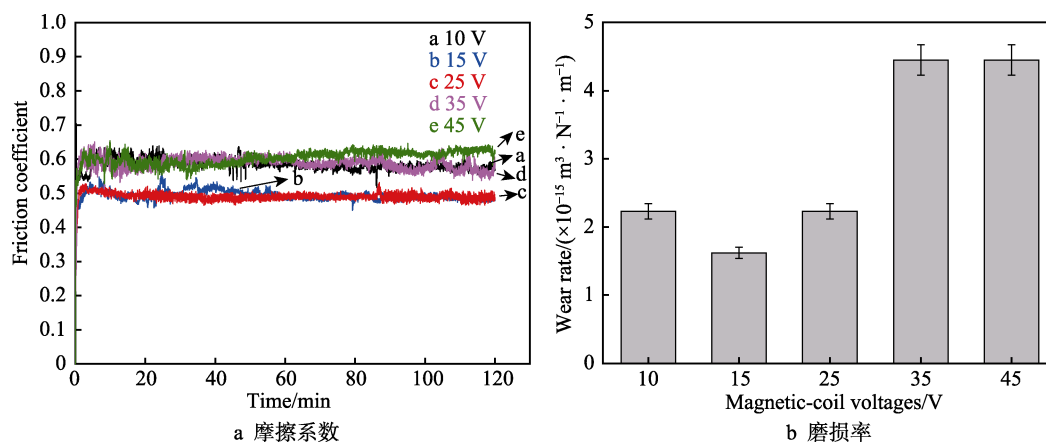


图 9 不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的摩擦系数和磨损率
Fig.9 Friction coefficient (a) and wear rate (b) of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coatings at different coil voltage

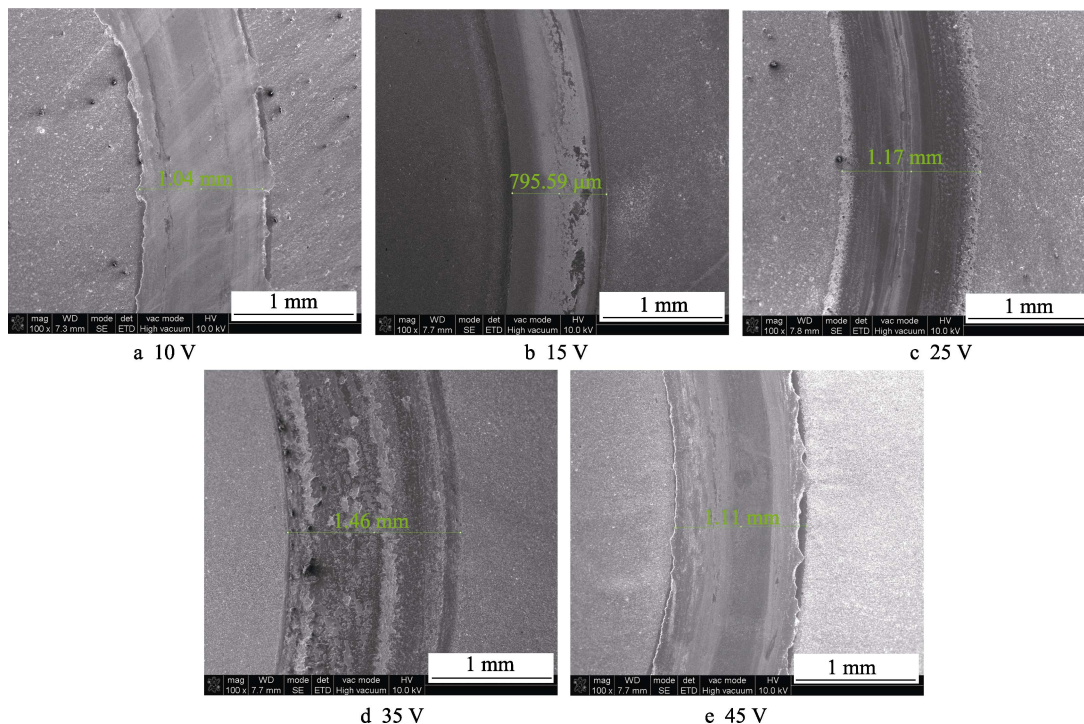


图 10 不同线圈电压下 $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的磨痕形貌
Fig.10 Cross-sectional view of $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ coatings at different coil voltage

3 结论

1) 随着电磁线圈电压的增大, $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层表面电弧液滴减小, 表面粗糙度降低; 随着线圈电压进一步增加, 涂层沉积速率增加, 更多的液滴沉积到基体表面, 粗糙度增大, 涂层结构变得疏松, 当线圈电压为 15 V 时, $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层表面液滴最少, 涂层表面最光滑。

2) 随着电磁线圈电压的增大, $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层厚度增加, 硬度随之增大。涂层的结合力呈现先增大后减小的趋势, 在线圈电压为 15 V 时, 涂层与基体的结合力最大。

3) 随着线圈电压的增大, 涂层的摩擦系数和磨损率呈现先减小后增大的变化规律, 这与沉积过程中涂层表面质量和致密度有关, 线圈电压为 15 V 时, $\text{Ti}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ 涂层的耐磨性最佳。

参考文献:

- [1] 朱慧丽, 胡涛, 彭笑. Al 含量对 TiAlN 涂层结合强度的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(3): 154-158.
ZHU Hui Li, HU Tao, PENG Xiao. Effect of Al content on adhesion strength of TiAlN coatings[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2015, 36(3): 154-158.
- [2] PALDEY S, DEEVI S C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review[J]. Materials science & engineering A, 2003, 342(1): 58-79.
- [3] 张海平, 王守仁, 郭培全. TiAlN 基薄膜的研究进展[J]. 机械工程材料, 2013, 37(4): 1-5.
ZHANG Hai-ping, WANG Shou-ren, GUO Pei-quan. Research progress of TiAlN-based thin films[J]. Materials for mechanical engineering, 2013, 37(4): 1-5.
- [4] KAMIYA S, NAGASAWA H, YAMANOE K, et al. A comparative study of the mechanical strength of chemical vapor-deposited diamond and physical vapor-deposited hard coatings[J]. Thin solid films, 2005, 473(1): 123-131.
- [5] 杜日昇. 高 Al 含量 Ti-Al-N 系硬质涂层的制备及其抗氧化性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
DU Ri-sheng. Study on fabrication and oxidation performance of TiAlN hard coating with high Al content[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [6] 孙国栋, 刘长华. 弧离子镀 TiAlN 涂层与模具钢基材的结合力优化[J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 125-127.
SUN Guo-dong, LIU Chang-hua. Optimization of adhesion strength between arc ion plating TiAlN films and die steel substrate[J]. Hot working technology, 2011, 40(2): 125-127.
- [7] YOON S Y, KIM J K, KIM K H. A comparative study on tribological behavior of TiN and TiAlN coatings prepared by arc ion plating technique[J]. Surface & coatings technology, 2002, 161(2): 237-242.
- [8] GOLNAZ T P A, DILAN E, MUSTAFA U. The role of superimposing pulse bias voltage on DC bias on the macroparticle attachment and structure of TiAlN coatings produced with CA-PVD[J]. Surface & coating technology, 2018(350): 1050-1057.
- [9] WEI Y, GONG C. Effects of pulsed bias duty ratio on microstructure and mechanical properties of TiN/TiAlN multilayer coatings[J]. Applied surface science, 2011, 257(17): 7881-7886.
- [10] 胡志杰, 李争显, 王宝云, 等. 工艺参数对 Ti 合金表面电弧离子镀 TiAlN 涂层的性能影响[J]. 热加工工艺, 2008, 37(12): 109-112.
HU Zhi-jie, LI Zheng-xian, WANG Bao-yun, et al. Effect of process parameters on properties of TiAlN arc ion coating on Ti alloy surface[J]. Hot working technology, 2008, 37(12): 109-112.
- [11] 陈锋光, 孙丽丽, 成浩, 等. 阴极电弧制备 TiAlN 薄膜工艺参数的正交分析研究[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 41-45.
CHEN Feng-guang, SUN Li-li, CHENG Hao, et al. Orthogonal analysis on deposition parameters of TiAlN thin films by cathodic vacuum arc technique[J]. China surface engineering, 2011, 24(2): 41-45.
- [12] 潘晓龙, 王少鹏, 李争显, 等. 电弧离子镀 TiAlN 涂层的热疲劳及抗氧化性能[J]. 真空科学与技术学报, 2008(S1): 60-63.
PAN Xiao-long, WANG Shao-peng, LI Zheng-xian, et al. Thermal fatigue and oxidation resistance of TiAlN coating grown by arc ion plating[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2008(S1): 60-63.
- [13] 梁启超, 王天国, 王贵强, 等. 多弧离子镀 TiAlN 薄膜的制备及其抗氧化性能[J]. 材料保护, 2017, 50(1): 1-4.
LIANG Qi-chao, WANG Tian-guo, WANG Gui-qiang, et al. Preparation of TiAlN films by multi-arc ion plating techniques and its oxidation resistance[J]. Materials protection, 2017, 50(1): 1-4.
- [14] XU Y X, CHEN Li, PEI Fei, et al. Effect of the modulation ratio on the interface structure of TiAlN/TiN and TiAlN/ZrN multilayers: First-principles and experimental investigations[J]. Acta materialia, 2017(130): 281-288.
- [15] LIU Liangliang, WU Zhongzhen, AN Xiaokai, et al. Improved interfacial adhesion between TiAlN/DLC multi-layered coatings by controlling the morphology via bias[J]. Surface & coating technology, 2017(331): 15-20.
- [16] BEILIS I I. Vacuum arc cathode spot grouping and motion in magnetic fields[J]. IEEE transactions on plasma science, 2002, 30(6): 2124-2132.
- [17] ZANELLO K K, BARINOV Y A, CHALY A M, et al. Experimental study of cathode spot motion and burning voltage of low-current vacuum arc in magnetic field[J]. IEEE transactions on plasma science, 2005, 33(5): 1553-1559.
- [18] JOHN R M, WINANS J G. Motion of arc cathode spot in a magnetic field[J]. Physical review, 1954, 94(5): 1097-1102.
- [19] 赵升升, 赵彦辉, 陈伟, 等. 轴向磁场对电弧离子镀 TiN/Cu 薄膜性能的影响[J]. 材料研究学报, 2018, 32(5): 381-387.
ZHAO Sheng-sheng, ZHAO Yan-hui, CHEN Wei, et al. Effect of axial magnetic field on property of TiN/Cu films deposited by arc ion plating[J]. Chinese journal of materials research, 2018, 32(5): 381-387.

(下转第 292 页)

- Acta biomaterialia, 2010, 6: 2335-2341.
- [2] KALIN M, VIŽINTIN J. Differences in the tribological mechanisms when using non-doped, metal doped (Ti, WC), and non-metal-doped (Si) diamond-like carbon against steel under boundary lubrication, with and without oil additives[J]. Thin solid films, 2006, 515: 2734-2747.
- [3] HAUERT R, FALUB C V, THORWARTH G, et al. Retrospective lifetime estimation of failed and explanted diamond-like carbon coated hip joint balls[J]. Acta biomaterialia, 2012, 8: 3170-3176.
- [4] WANG D Y, CHANG Y Y, CHANG C L, et al. Deposition of diamond-like carbon films containing metal elements on biomedical Ti alloys[J]. Surface & coatings technology, 2005, 200(7): 2175-2180.
- [5] LI X W, JOE M W, WANG A Y, et al. Stress reduction of diamond-like carbon by Si incorporation: A molecular dynamics study[J]. Surface and coatings technology, 2013, 228: 190-193.
- [6] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon[J]. Materials science and engineering: R: Reports, 2002, 37: 129-281.
- [7] 刘红飞, 程晓农, 徐桂芳, 等. RF 磁控溅射制备 Al_2O_3 薄膜及其介电性能研究[J]. 材料开发与应用, 2007, 22(1): 5-8.
LIU Hong-fei, CHENG Xiao-nong, XU Gui-fang, et al. Dielectric properties of alumina films prepared by RF magnetron sputtering[J]. Development and application of materials, 2007, 22(1): 5-8.
- [8] ZHU H K, MA L, LIU N, et al. Improvement in anti-corrosion property of hydrogenated diamond-like carbon film by modifying CrC interlayer[J]. Diamond and related materials, 2017, 72: 99-107.
- [9] 于翔, 王成彪, 刘阳, 等. 中频对靶磁控溅射制备含铬类金刚石薄膜[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(2): 27-30.
YU Xiang, WANG Cheng-biao, LIU Yang, et al. Investigation on Cr-doped diamond-like carbon films prepared by mid-frequency dual magnetron sputtering[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2006, 27(2): 27-30.
- [10] FERRARI A C, KLEINSORGE B, ADAMOPOULOS G, et al. Determination of bonding in amorphous carbons by electron energy loss spectroscopy, Raman scattering and X-ray reflectivity[J]. Journal of non-crystalline solids, 2000, 266: 765-768.
- [11] FERRARI A C, ROBERTSON J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon[J]. Physical review B, 2000, 61: 14095.
- [12] ROSE F, WANG N, SMITH R, et al. Complete characterization by Raman spectroscopy of the structural properties of thin hydrogenated diamond-like carbon films exposed to rapid thermal annealing[J]. J appl phys, 2014, 116(12): 3516-3528.
- [13] STALLARD J, POULAT S, TEER D G. The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester[J]. Tribology international, 2006, 39: 159-166.
- [14] 张婷, 何娟, 任瑛, 等. 类金刚石薄膜残余应力的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(1): 84-95.
ZHANG Ting, HE Juan, REN Ying, et al. Progresses and perspectives of the residual stress of diamond-like carbon thin film[J]. Materials review, 2016, 30(1): 84-95.
- [15] BULL S J. Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test[J]. Tribology international, 1997, 30(7): 491-498.
- [16] KATARIA S, KUMAR N, DASH S, et al. Evolution of deformation and friction during multimode scratch test on TiN coated D9 steel[J]. Surface and coating technology, 2010(205): 922-927.

(上接第 279 页)

- [20] 陈忠. 电磁激励多弧离子镀 AlCrN 硬质膜结构和力学性能研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2014.
CHEN Zhong. Research on structure and mechanical properties of electromagnetic excitation AlCrN hard films deposited by multi-arc ion plating[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2014.
- [21] 曾琨. 电弧离子镀 TiAlN、AlTiN 和 AlTiN/TiSiN 涂层的高温摩擦磨损行为研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
ZENG Kun. High temperature tribological behavior of the TiAlN, AlTiN and AlTiN/TiSiN coating deposited by arc ion plating[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [22] 刘爱华. PVD 氮化物涂层的高温摩擦磨损特性及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LIU Ai-hua. Friction and wear behaviors of PVD nitride coatings at elevated temperatures[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [23] 周君灵. 电弧离子镀 CrAlTiN 膜的制备与性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008.
ZHOU Jun-ling. A study on preparation and oxidation resistance property of CrAlTiN film deposited by arc ion plating[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2008.
- [24] 王成蹊. 合金化对 TiAlN 涂层结构稳定性及性能影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
WANG Cheng-xi. The effect of alloying on structural stability and properties of TiAlN coatings[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [25] 金犁. 多弧离子镀制备 $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 薄膜的工艺及其性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2006.
JIN Li. Study on the preparation and properties of $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ films deposited by the multi-arc techniques[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2006.
- [26] 金石, 黄晓兰, 赵迎. 多弧离子镀膜机阴极弧源的改进及其工艺的实验研究[J]. 真空, 1991(1): 9-15.
JIN Shi, HUANG Xiao-lan, ZHAO Ying. Experiment and study on the improvement of cathode arc source for multi-arc ion coater and its process[J]. Vacuum, 1991(1): 9-15.