

40Cr 钢表面渗氮及制备 CrN 涂层在 重载低速下的摩擦学性能

王永光¹, 陈瑶¹, 陆小龙¹, 章华²

(1.苏州大学 机电工程学院&苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215021;

2.无锡市江南橡塑机械有限公司, 江苏 宜兴 214200)

摘要: **目的** 提高 40Cr 齿轮在重载低速下的摩擦学性能。**方法** 采用离子渗氮和电弧离子蒸发镀 (AED) 技术在 40Cr 钢基体上制备了渗氮层和 CrN 涂层。用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、能谱仪和往复式摩擦磨损试验机, 研究了经两种表面处理后 40Cr 钢的物相组成、形貌和摩擦学性能。**结果** 渗氮样品表面化合物层厚度约 10 μm , 硬度约为 558HV。CrN 涂层表面厚度约为 4 μm , 涂层硬度约为 1341HV。在 60 N 载荷的条件下, 渗氮处理后 40Cr 钢的磨损率为 $104.17 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 其磨损机理主要为轻微的粘着磨损和磨粒磨损; 制备 CrN 涂层后 40Cr 钢的磨损率为 $17.36 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 其磨损机理主要为轻微的磨粒磨损。**结论** 在 20~60 N 法向载荷下, 制备 CrN 涂层后, 40Cr 钢均表现出最优异的耐磨减摩性能。

关键词: 40Cr 钢; 齿轮; CrN 涂层; 重载; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.44; TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0071-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.012

Tribological Properties of Plasma Nitriding and CrN Coating on 40Cr Steel with High Load at Low Speed

WANG Yong-guang¹, CHEN Yao¹, LU Xiao-long¹, ZHANG Hua²

(1.School of Mechanical and Electric Engineering & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215021, China; 2.Wuxi Jiangnan Rubber Plastics Machinery Co. Ltd, Yixing 214200, China)

ABSTRACT: The work aims to improve tribological properties of 40Cr gear with high load at low speed. Nitrided layer and CrN coating were prepared on 40Cr steel substrate by plasma nitriding and arc-evaporation deposition (AED). Phase composition, morphology and tribological properties of 40Cr steel receiving different surface treatments were investigated with X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrum (EDS) and reciprocating friction and wear tester. Thickness and microhardness of the nitrided layer was 10 μm and 558HV, respectively. The thickness and microhardness of the CrN coating was 4 μm and 1341HV, respectively. Wear rate of the 40Cr steel was $104.17 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ under the load of 60 N, and the wear mechanism was mainly slight adhesive wear and abrasive wear; the wear rate of the CrN

收稿日期: 2017-08-07; 修订日期: 2017-12-20

Received: 2017-08-07; **Revised:** 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51775360, 51005102); 中国博士后基金 (2015M571801); 江苏省博士后基金 (1402121C); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金 (SKLTKF10B04); 教育部留学回国启动基金 (20111139)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775360, 51005102); the Chinese Postdoctoral Science Foundation (2015M571801); the Postdoctoral Science Foundation of Jiangsu Province (1402121C); the State Key Laboratory of Tribology Tsinghua University (SKLTKF10B04); the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education (20111139)

作者简介: 王永光 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事摩擦学与表面工程。

Biography: WANG Yong-guang (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: tribology and surface engineering.

coating on 40Cr steel was $17.36 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ under the load of 60 N, and the wear mechanism was mainly slight abrasive wear. The 40Cr steel exhibits the best anti-wear and anti-friction properties under the normal load of 20~60 N after CrN coating is prepared.

KEY WORDS: 40Cr steel; gear; CrN coating; high load; friction and wear

齿轮是现代机械制造装备中的关键部件之一,而齿轮的性能直接制约着传动系统的使用寿命和生产安全性。40Cr 钢由于其良好的综合力学性能,成为一种常用的齿轮材料。随着汽车、船舶、航天和航空等领域的飞速发展,对齿轮副使用性能提出了越来越苛刻的要求^[1]。齿轮在传动啮合时的主要损伤形式包括轮齿断裂、齿面接触疲劳点蚀、齿面胶合磨损、齿面磨粒磨损和齿面塑性流动,其中绝大部分齿轮传动副的失效是由于齿轮表面失效导致^[2-3]。齿轮在重载低速下的磨损是橡胶挤出机失效的主要原因。为提高齿轮传动副的可靠性和延长其使用寿命,采用表面处理技术强化齿轮的表面性能成为一种有效途径^[4]。

目前,常用的齿轮表面强化处理技术主要包括渗碳、渗氮、化学气相沉积(CVD)、低温粒子注入法(PS II)、激光淬火和激光熔覆等^[4-7]。其中,等离子渗氮处理的工艺和设备简单,能够提升钢材的硬度、耐磨性及耐腐蚀性^[8]。物理气相沉积(PVD)技术制备涂层的工艺处理温度可控制在 500 °C 以下,陶瓷涂层厚度可达 8~10 μm ,具有硬度高、耐磨性、耐腐蚀性和抗高温氧化性好等优点,使得其在齿轮表面强化处理中得以应用^[9-11]。邹家生等^[12]采用 PVD 技术在 40Cr 钢齿轮表面沉积的 TiN 涂层提高了齿轮的耐磨性能。随着工业化应用的推广,TiN 薄膜因孔隙率较高、与钢基体等的结合力较弱(15~35 N)和薄膜厚度较薄(<3 μm)等不足,其发展受到了限制。大量研究表明^[13-14],相比于 TiN 涂层而言,CrN 的硬度略低(~2000HV),但仍然具有超高的硬度。更重要的是,CrN 涂层薄膜的内应力较低,厚度可达到近 10 μm ,这有益于提高材料的摩擦磨损性能。

莫继良等^[15]对比研究了采用两种不同 PVD 技术制备的 CrN 涂层在低载(5、10 N)、低速(8 mm/s)、往复滑动条件下的摩擦磨损行为,结果表明,对比多弧离子镀技术制备的 CrN 涂层,磁过滤阴极真空弧源(AED)制备的 CrN 涂层更光滑、致密和连续,有较高的硬度和较优越的耐磨性能。但是,对于其在重载低速条件下耐磨机理的相关文献报道较少。因此,作者采用等离子渗氮和 AED 两种技术对常用齿轮材料 40Cr 钢表面进行强化处理,并对比研究渗氮后样品、CrN 涂层和基体在不同法向载荷作用下的摩擦学性能,为重载低速条件下离子渗氮和 AED 技术在齿轮上的应用提供理论及试验参考。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

选用 40Cr 钢作为基体材料,由无锡市江南橡塑机械有限公司提供。利用 DK77100 线切割机床加工出 3 mm×33.4 mm×25.6 mm 的试样,并依次碱液清洗、蒸馏水洗、酒精和脱水剂清洗后烘干备用。采用电弧离子蒸发镀(AED, Hauzer 850)在 40Cr 基体上制备 CrN 涂层,炉体为阳极,工件为阴极。借助离子氮化的方法在 40Cr 基体上进行渗氮处理。样品处理由艾恩士公司提供。

1.2 试验方法

采用 Pert-Pro MPD 多功能 X 射线衍射仪(XRD)分析涂层的物相组成,用自带 EDS 能谱仪的 ZEISS 扫描电子显微镜(SEM)观察涂层的形貌。采用 HXD-1000TMC 型显微硬度计测试涂层表面硬度,法向载荷为 50 g,加载时间为 15 s,取 5 次测量的平均值。采用仪器化微米划入仪器(MCT,瑞士 CSM 公司)对渗氮和 CrN 涂层表面进行恒定载荷划入试验,采用半径为 20 μm 的球头划针,变载荷为 0~15 N,划入长度为 800 μm ,划入速率为 500 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

摩擦磨损试验在 MFT-5000 万能摩擦磨损试验机上进行,试样为 $\phi 40 \text{ mm}$ 的圆盘。试验选用线性往复模块,对磨小球为 $\phi 8 \text{ mm}$ 的 Si_3N_4 小球。利用有限元分析软件对齿轮啮合应力进行分析得出,在考虑安全系数为 2.0 的情况下,满足齿轮重载低速条件下摩擦磨损的试验工作参数为:法向载荷 20、30、40、50、60 N,位移幅值 10 mm,频率 2 Hz,相对滑动速度 40 mm/s,时间 300 s。磨损率计算公式为:

$$W=V/(LS) \quad (1)$$

式中: W 为磨损率(mm^3/Nm); V 为磨损体积(mm^3); L 为加载力(N); S 为滑动位移(m)。

2 结果与讨论

2.1 渗氮层和涂层的组织与形貌

由图 1 可见,离子渗氮表面主要由 Fe_3N 和 Fe_4N 组成,基体在渗氮过程中的组织变化为 $\text{FeN} \rightarrow \text{Fe}_2\text{N} \rightarrow \text{Fe}_3\text{N} \rightarrow \text{Fe}_4\text{N}$ ^[16],AED 涂层主要由硬质相 CrN 组成。

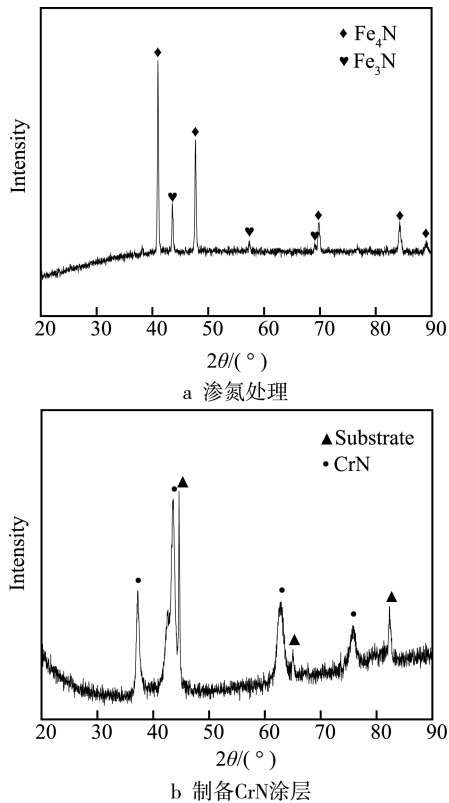


图 1 不同工艺表面处理后 40Cr 钢的 XRD 谱

Fig.1 XRD spectrum of 40Cr steel receiving different surface treatment: (a) nitriding treatment, (b) preparing CrN coating

从图 2 和图 3 可以看出,相较于 CrN 涂层,渗氮层的表面较粗糙,并出现团聚形成的氮化物颗粒。从图 2b 可知,渗氮表面化合物层的厚度约为 10 μm,EDS 分析渗氮表面化合物层主要包含 Fe、C、N 元素,渗氮层表面的显微硬度约为 558HV。

CrN 涂层表面致密、光滑、连续,并弥散分布一些较小的颗粒状物质。Shan Lei 等^[17]研究发现,涂层表面弥散分布不规则凸起的颗粒状物质的原因是,涂层内部出现明显垂直于基体方向的柱状结构 CrN 颗粒。从图 3b 可以看出, CrN 涂层与基体结合良好,涂层厚度约为 4 μm。EDS 分析可知涂层主要包含 Cr 和 N 元素,这与图 1 中的 XRD 分析结果一致。测试涂层表面显微硬度,其显微硬度约为 1341HV。

通过声发射信号的变化判定涂层与基体的结合强度。研究发现:在 0~15 N 线性增加的变载荷划入条件下,裂纹较少,当载荷为 9 N 时,声发射信号最强烈, CrN 涂层与基体开始出现剥离。渗氮层未出现强烈的声发射信号。

2.2 摩擦磨损性能

由图 4 可以看出, CrN 涂层的摩擦因数明显低于基体和渗氮层的摩擦因数, CrN 涂层自身具有更高的抵抗粘着磨损的能力,涂层表面发生塑性变形的现象减轻,从而导致摩擦因数低于基体摩擦因数。朱

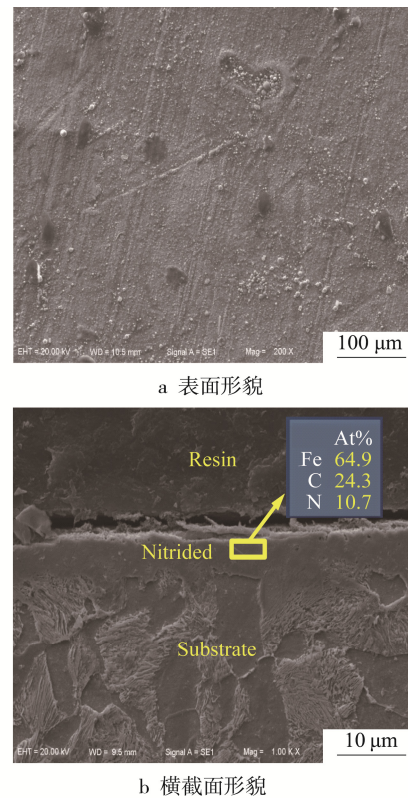


图 2 渗氮层的表面形貌与横截面形貌

Fig.2 Surface morphology and cross-sectional morphology of nitrided layer (a) surface morphology, (b) cross-section morphology

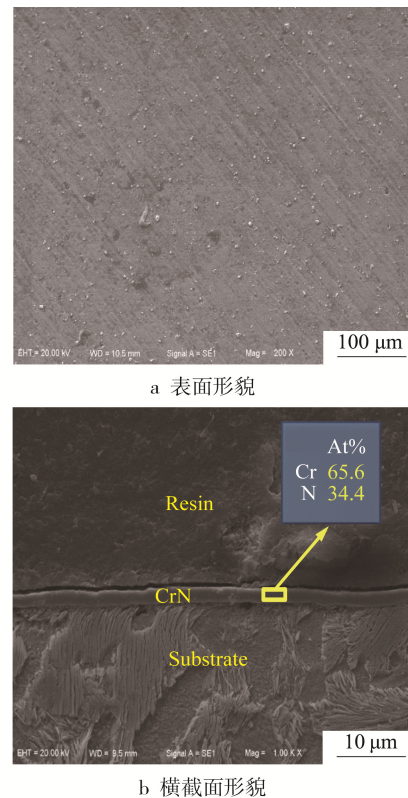


图 3 CrN 涂层的表面形貌和横截面形貌

Fig.3 Surface morphology and cross-sectional morphology of CrN coating: (a) surface morphology, (b) cross-sectional morphology

峰等^[18]在活塞环表面通过 PVD 制备 CrN 涂层,发现由于 CrN 涂层自身高抗粘着磨损性能及高硬度,导致其摩擦因数较低,且摩擦因数下降至进入平稳的时间更短。

从图 5 和图 6 可见,当法向载荷从 20 N 提高到

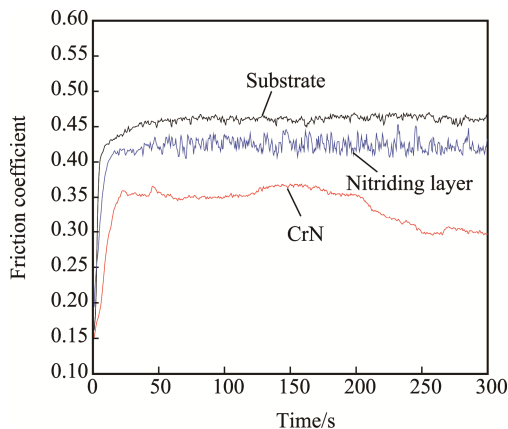


图 4 基体、渗氮层及 CrN 涂层在 40 N 法向载荷下的摩擦因数随时间的变化

Fig.4 Friction coefficient curves of substrate, nitrided layer and CrN coating under normal load of 40 N as a function of time

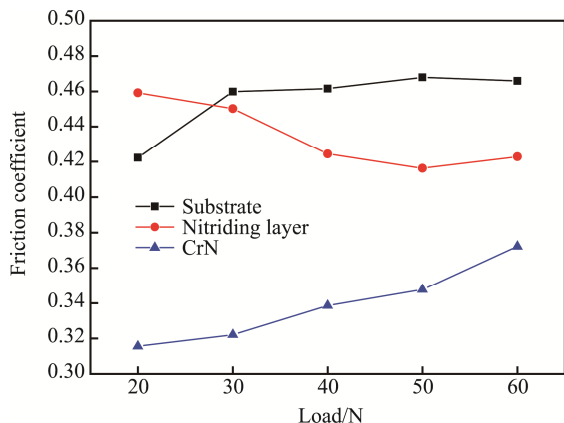


图 5 不同法向载荷下基体、渗氮层及 CrN 涂层的摩擦因数
Fig.5 Friction coefficients of substrate, nitrided layer and CrN coating under different normal load

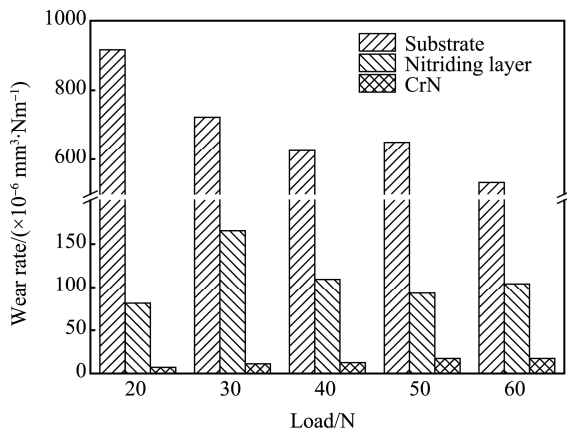


图 6 不同法向载荷下基体、渗氮层及 CrN 涂层的磨损率
Fig.6 Wear rates of substrate, nitrided layer and CrN coating under different normal load

30 N 时,基体摩擦因数上升。之后随着载荷继续增加至 60 N,基体摩擦因数没有发生明显改变。渗氮层的摩擦因数在 20~40 N 之间降低,随着载荷继续增加,摩擦因数不再发生明显变化。法向载荷为 20~60 N 时,CrN 涂层的摩擦因数随着载荷的增大而略微上升。基体的磨损率随着载荷的增大而降低,渗氮层的磨损率在载荷为 30 N 时最高。CrN 涂层的磨损率随着载荷的增大而略有上升。CrN 涂层的摩擦因数和磨损率均明显低于基体和渗氮层。

2.3 磨损机理

在 60 N 载荷下,基体、渗氮层 CrN 和涂层的磨损表面如图 7 所示。从图 7a、b、c 可以看出,磨损轨迹依次变浅,CrN 涂层表面基本没有明显的磨损轨迹。从图 7d 可知,基体磨损表面有明显的塑性变形和剥落现象,磨损表面出现轻微的犁沟。其主要原因是随着载荷的增大,在高接触压力下,摩擦副表面微凸体的断裂、基体表面发生塑性变形和摩擦接触区的微观滑移以及硬质颗粒的磨削,导致基体表面开始出现犁沟。对图 7d 的磨损表面 A 区域进行 EDS 分析,结果如图 8a 所示,基体表面主要由 Fe、O 和 C 元素组成,其中 O 元素的原子数分数达到 33.5%,说明基体氧化磨损较严重。基体的磨损机理为粘着磨损、氧化磨损和磨粒磨损。

从图 7e 可以看出,对比基体,渗氮层磨损表面的塑性变形倾向明显减轻,表面只有轻微的犁沟以及剥落。对图 7e 中的 B 区域进行 EDS 分析(图 8b)发现,磨损表面的 O 元素含量显著低于基体磨损表面的 O 元素含量。渗氮处理后的样品表面产生 Fe_3N 和 Fe_4N 硬质物相,样品硬度高于基体硬度(270HV),渗氮处理后,样品的耐磨性能上升。渗氮后样品的磨损机理主要为轻微的粘着磨损和磨粒磨损。

从图 7f 可以看出,磨损表面极其轻微,依旧能看出 CrN 涂层由于制备原因导致的表面出现的划痕。涂层磨损表面没有出现塑性变形和犁沟。对图 7f 的磨损表面 C 区域进行 EDS 分析(图 8c),其主要元素为 Cr 和 N 元素。AED 技术制备的样品表面主要为致密连续的 CrN 涂层,其较高的硬度、较优越的耐磨性能和抗氧化性能,使其在重载低速下摩擦磨损过程中仍然能够保持较低的摩擦因数(0.37)和较优异的耐磨性能($17.36 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$),涂层表面氧化磨损极其轻微。CrN 涂层的主要磨损机理为轻微的磨粒磨损。

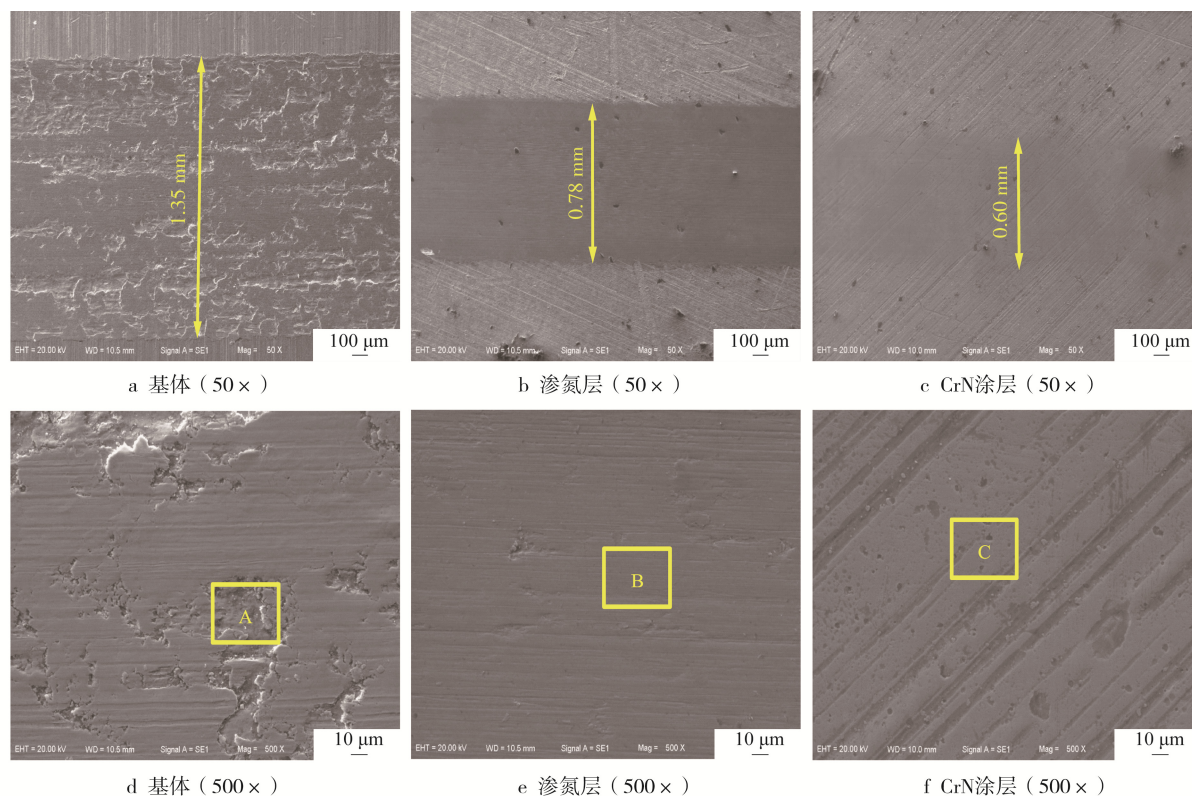


图 7 60 N 法向载荷下基体、渗氮层及 CrN 涂层不同倍率下磨损表面 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphology of worn surfaces of substrate, nitrided layer and CrN coating under normal load of 60 N: (a, d) substrate, (b, e) nitrided layer, (c, f) CrN coating

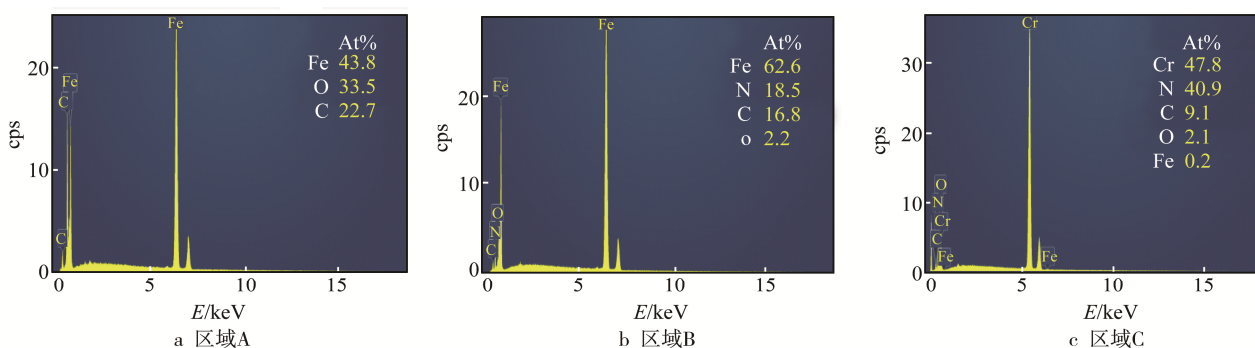


图 8 图 7 不同区域 EDS 分析结果

Fig.8 EDS analysis results of different regions in Fig.7: (a) region A, (b) region B, (c) region C

3 结论

1) 采用等离子渗氮和 AED 两种技术对 40Cr 钢表面进行强化处理, 渗氮样品表面化合物层厚度约 10 μm, 硬度约为 558HV。CrN 涂层表面致密、光滑、连续, 涂层厚度约为 4 μm, 涂层硬度约为 1341HV。

2) 在 60 N 法向载荷下, 40Cr 钢的摩擦因数为 0.47, 磨损率为 $533.33 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 其磨损机理为粘着磨损、氧化磨损和磨粒磨损。渗氮处理后, 样品的摩擦因数为 0.42, 磨损率为 $104.17 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 其磨损机理主要为轻微的粘着磨损和磨粒磨损。CrN 涂层的摩擦因数为 0.37, 磨损率为 17.36×10^{-6}

$\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 其磨损机理主要为轻微的磨粒磨损。

3) 在 20~60 N 载荷条件下, AED 制备的 CrN 涂层均表现出最优的耐磨减摩性能, 而渗氮样品在 30~60 N 之间表现出比基体更好的耐磨减摩性能。

参考文献:

- [1] LU L, XU F, JIANG T, et al. Characteristic Evaluation of Friction and Wear in the CN and TiN Coated Gear [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2010, 11(1): 107-111.
- [2] BELFIORE N P, IANNIELLO F, NATALI S, et al. The Development of a Feasible Method for the Tribological

- Characterization of Gear Teeth Surface Treatments[J]. Tribology International, 2006, 39(8): 789-795.
- [3] 钱文富, 曹兴进, 卢龙, 等. 表面处理和涂层技术在齿轮上的应用初探[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(2): 1-4.
QIAN Wen-fu, CAO Xing-jin, LU long, et al. Surface Treatment and Coating Technologies on Gears[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005, 28(2): 1-4.
- [4] GUAN X, WANG Y, ZHANG G, et al. A Novel Duplex PDMS/CrN Coating with Superior Corrosion Resistance for Marine Applications[J]. RSC Advances, 2016, 6(90): 87003-87012.
- [5] WILKINSON C M R, OLVER A V. The Durability of Gear and Disc Specimens—Part I: The Effect of Some Novel Materials and Surface Treatments[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(42): 503-510.
- [6] TERAUCHI Y, NADANO H, KOHNO M, et al. Scoring Resistance of TiC- and TiN-coated Gears[J]. Tribology International, 1987, 20(5): 248-254.
- [7] GUAN X, WANG Y, XUE Q, et al. Toward High Load Bearing Capacity and Corrosion Resistance Cr/Cr₂N Nano-multilayer Coatings against Seawater Attack[J]. Surface & Coating Technology, 2015, 282: 78-85.
- [8] 韩立影, 王亚男, 苗露, 等. 离子渗氮温度对不锈钢组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2008, 33(9): 41-45.
HAN Li-ying, WANG Ya-nan, MIAO Lu, et al. Influence of Ion Nitriding Temperature on Microstructure and Properties of Stainless Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(9): 41-45.
- [9] MURAKAWA M, KOMORI T, TAKEUCHI S, et al. Performance of a Rotating Gear Pair Coated with an Amorphous Carbon Film under a Loss-of-lubrication Condition[J]. Surface & Coatings Technology, 1999, 120: 646-652.
- [10] BAYÓN R, IGARTUA A, FERNÁNDEZ X, et al. Corrosion-wear Behavior of PVD Cr/CrN Multilayer Coatings for Gear Applications[J]. Tribology International, 2009, 42(4): 591-599.
- [11] CAIAZZO F C, SISTI V, TRASATTI S. Multilayer Coatings Based on CrN/Cr for Molds of Plastics[J]. La Metallurgia Italiana, 2014, 106(6): 3-8.
- [12] 邹家生, 许峰, 卢龙. 齿轮表面改性技术研究现状[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2009, 23(2): 113-116.
ZOU Jia-sheng, XU Feng, LU Long. The Status Quo of Gear Surface Modification Technology[J]. Journal Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 23(2): 113-116.
- [13] NISHIMOTO A, NII H, NARITA R, et al. Simultaneous Duplex Process of TiN Coating and Nitriding by Active Screen Plasma Nitriding[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228(9): S558-S562.
- [14] 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): 2116-2124.
- [15] 莫继良, 朱旻昊. 物理气相沉积法制备的 CrN 涂层的摩擦学性能[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(2): 280-284.
MO Ji-liang, ZHU Min-hao. Tribological Properties of CrN Coatings Prepared by Physical Vapor Deposition [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(2): 280-284.
- [16] 罗顺, 林义民, 唐维学, 等. 离子渗氮对 H13 钢高温摩擦磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(4): 169-171.
LUO Shun, LIN Yi-ming, TANG Wei-xue, et al. Effects of Plasma Nitriding on Wear Resistance of H13 Steel at High-temperature[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(4): 169-171.
- [17] SHAN L, ZHANG Y R, WANG Y X, et al. Corrosion and Wear Behaviors of PVD CrN and CrSiN Coatings in Seawater[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(1): 175-184.
- [18] 朱峰, 王增全, 王建平, 等. 合金铸铁缸套与 PVD(CrN)活塞环配对时缸套磨损机理[J]. 内燃机学报, 2014, 32(5): 474-479.
ZHU Feng, WANG Zeng-quan, WANG Jian-ping, et al. Wear Mechanism of Alloy Cast Iron Cylinder Liner Coupled with PVD(CrN) Piston Ring[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(5): 474-479.