

摩擦学学报

TRIBOLOGY



31CrMoV9钢离子渗氮层的微动摩擦磨损特性研究

龙有红, 任岩平, 何添, 李洪洋, 彭金方, 朱旻昊

Study on Fretting Wear Behaviour of Plasma Nitriding Layer of 31CrMoV9 Steel

LONG Youhong, REN Yanping, HE Tian, LI Hongyang, PENG Jinfang, ZHU Minhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023152>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

HT250刹车盘气体渗氮耐磨性研究

Wear Resistance of the HT250 Brake Disk Treated by Gas Nitriding

摩擦学学报. 2018, 38(3): 256 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.03.002>

碳纤维切向微动磨损特性研究

Fretting Wear Damage Characteristics of Carbon Fiber

摩擦学学报. 2019, 39(3): 330 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018168>

位移幅值对690合金管/405不锈钢块切向微动磨损特性的影响

Effect of Displacement on Tangential Fretting Wear Characteristics of 690 Alloy Tube/ 405 Stainless Steel Plate

摩擦学学报. 2020, 40(6): 754 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020024>

铁路车轴过盈配合面微动损伤分析及有限元仿真

Damage Analysis and Finite Element Simulation of Fretting Wear on Press-Fitted Surface of Railway Axle

摩擦学学报. 2020, 40(4): 520 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019186>

考虑微动磨损的钢丝微动疲劳裂纹扩展寿命预测研究

Prediction of Fretting Fatigue Crack Propagation Life of Steel Wire Considering Fretting Wear

摩擦学学报. 2021, 41(5): 710 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021157>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

龙有红, 任岩平, 何添, 李洪洋, 彭金方, 朱旻昊. 31CrMoV9钢离子渗氮层的微动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(5): 633–643. LONG Youhong, REN Yanping, HE Tian, LI Hongyang, PENG Jinfang, ZHU Minhao. Study on Fretting Wear Behaviour of Plasma Nitriding Layer of 31CrMoV9 Steel[J]. Tribology, 2024, 44(5): 633–643. DOI: 10.16078/j.tribology.2023152

31CrMoV9钢离子渗氮层的微动摩擦 磨损特性研究

龙有红¹, 任岩平^{2,3}, 何添¹, 李洪洋¹, 彭金方⁴, 朱旻昊^{1,3*}

(1. 西南交通大学 机械工程学院 摩擦学研究所, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 力学与航空航天学院, 四川 成都 610031;

3. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031;

4. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 针对31CrMoV9钢基体及其渗氮层, 采用切向微动磨损试验机开展球/平面接触模式下的切向微动磨损试验. 探究了在法向载荷为20 N时, 不同位移幅值下($D=5$ 、 10 、 $50\ \mu\text{m}$)的切向微动损伤机制和损伤演变规律. 采用X射线衍射仪(XRD)对试样表层物相进行分析, 扫描电子显微镜(SEM)和白光干涉仪对试样磨损区进行形貌表征, 能谱仪(EDS)和电子探针显微分析仪(EPMA)进行化学元素分析. 结果表明: 离子渗氮处理后在基体表面形成了化合物层和扩散层, 显著提高了表面硬度. 在法向载荷 $F_n=20\ \text{N}$ 时, 随着微动位移幅值的增大, 31CrMoV9基体及其渗氮层的微动运行区均由部分滑移区逐渐向混合、完全滑移区转变, 磨损体积增大, 磨损更加严重, 稳定阶段的摩擦系数逐渐增大. 在部分滑移区和完全滑移区, 渗氮层较基体在稳定阶段的摩擦系数更小, 而在混合区基体的摩擦系数更小. 在混合区和完全滑移区时, 基体及渗氮层的损伤机制均为剥层、磨粒磨损和氧化磨损. 离子渗氮生成的化合物层能提高材料的抗微动磨损性能, 在 $D=10$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 时, 磨损率分别降低了约38.5%和70.2%. 研究结果可为轨道交通等领域结构件的选材和抗微动磨损设计提供参考.

关键词: 表面工程; 31CrMoV9; 离子渗氮; 微动磨损; 损伤机制

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2024)05-0633-11

Study on Fretting Wear Behaviour of Plasma Nitriding Layer of 31CrMoV9 Steel

LONG Youhong¹, REN Yanping^{2,3}, HE Tian¹, LI Hongyang¹, PENG Jinfang⁴, ZHU Minhao^{1,3*}

(1. Tribology Research Institute, School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University,
Sichuan Chengdu 610031, China;

2. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China;

4. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University,
Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: Fretting wear widely exists in railway transportation. Surface treatment technology has a significant effect on

Received 16 August 2023, revised 27 September 2023, accepted 27 September 2023, available online 11 April 2024.

*Corresponding author. E-mail: zhuminhao@home.swjtu.edu.cn, Tel: +86-28-87600715.

This project was supported by the National Natural Science Foundation of China (U2141212).

国家自然科学基金项目(U2141212)资助.

enhancing the safety and reliability of locomotive operation by improving the surface wear properties of its components. A compound layer was produced on the surface of 31CrMoV9 steel sample via plasma nitriding. A tangential fretting wear test was conducted on 31CrMoV9 steel and its nitrided layer utilizing a highly accurate fretting tester in ball/flat contact mode. The fretting mechanism and damage evolution of the samples were investigated at different displacement amplitudes ($D=5, 10, 50 \mu\text{m}$) with a normal load of 20 N. In order to identify the resulting phases such as ferrite phase and combination phase, X-ray diffractometer (XRD) was conducted to examine the surface layer of distinctive samples. Morphology of the worn area was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and white light interferometer. The chemical elements were analyzed by energy dispersive spectroscopy (EDS) and electron probe microanalyzer (EPMA). The results demonstrated that after plasma nitriding treatment, the nitrided sample developed a compound layer, diffusion layer and substrate in the direction of depth, resulting in a significant enhancement of the surface hardness. The near-surface hardness of nitrided layer was approximately $560.7 \text{ HV}_{0.3}$, which was an increase of 112.7% compared to the substrate's near-surface hardness of approximately $263.6 \text{ HV}_{0.3}$, and the depth of nitriding influence layer was approximately 1.5 mm. As the fretting displacement amplitude gradually increased at $F_n=20 \text{ N}$, the fretting regime of 31CrMoV9 substrate and nitrided layer changed from partial slip regime to mixed regime, slip regime, ultimately leading to an increase in the wear volume and the friction coefficient during the stabilization period. The friction coefficient of the substrate was smaller compared with the nitrided layer in the mixed regime, which was opposite to the partial slip regime and slip regime, the observed difference was attributed to the substrate sample formed a thicker debris layer than the nitrided sample in the mixed regime, which played a lubricated role. The wear mechanism of the substrate and nitrided layer were delamination, abrasive wear and oxidation wear in the mixed regime and slip regime. The compound layer generated by plasma nitriding improved the fretting wear resistance of the material, and the volume wear rate reduced by about 38.5% ($D=10 \mu\text{m}$) and 70.2% ($D=50 \mu\text{m}$). The research results provided a reference for the material selection of structural components and designing anti-fretting wear measures in the railway transportation industry and other fields.

Key words: surface engineering; 31CrMoV9; plasma nitriding; fretting wear; damage mechanism

31CrMoV9钢作为轨道交通领域关键部件潜在用钢,具有高淬透性和加工变形小的优点,是强度和韧性兼备的结构钢,适用于轴类、齿轮、变速箱齿圈以及活塞类等零件^[1-3]。但轴承、齿轮和花键等传动部件在服役过程中,配合界面在交变载荷、冲击载荷和环境振动等工况下易出现切向微动磨损甚至多模式复合微动磨损,进而影响到系统的服役可靠性^[4-5]。研究表明,恰当的表面处理能够显著提高材料的抗微动损伤性能^[6-7]。离子渗氮(Plasma nitriding, PN)作为1种重要的抗微动磨损防护技术,在辉光放电的作用下,氮气分解出的氮离子渗入零件的表层,能显著提高工件的表面硬度和耐磨性等性能^[8-9]。

Çomakli等^[10]研究了氮势对31CrMoV9钢摩擦学性能的影响,结果表明31CrMoV9钢经离子渗氮处理后耐磨性有所改善,且随氮势的减少,耐磨性更好;Dayanç等^[11]针对31CrMoV9钢凸轮轴进行不同工艺参数离子渗氮处理,在混合气体为94% $\text{H}_2+6\% \text{N}_2$ (体积分数)、处理时间为4 h时,能获得最佳硬度(775 $\text{HV}_{0.1}$)和耐磨性;Conci等^[12]研究了不同氮势对AISI D2冷作工具钢摩擦性能的影响,结果表明增加渗氮时间形成较厚的氮化物层会降低耐磨性;Emami等^[13]研究了高

温条件下31CrMoV9钢气体渗氮层的摩擦学性能,高温使摩擦界面形成光滑致密的固体保护膜,提高耐磨性,而未处理试样无法形成;郁俐等^[3]研究了31CrMoV9钢不同渗氮温度和时间下氮势分段可控渗氮工艺,高氮势和低氮势分段进行渗氮,能有效缩短渗氮时间并获得高硬度渗氮层表面;李少雨等^[14]研究了不同淬火和回火温度下31CrMoV9钢力学性能和组织的变化,最佳淬火、回火温度分别为930和600 $^{\circ}\text{C}$;王飞宇等^[15]发现随离子渗氮保温时间增加,31CrMoV9钢表面硬度增加,但出现脉状组织。目前,部分学者对离子渗氮层进行了微动磨损相关研究。Ali等^[16]研究表明离子渗氮在Ti-6Al-4V试样表面生成高硬度氮化钛,能有效降低切向摩擦系数、磨损体积和磨损率;Prakash等^[17]针对W460超高强度钢离子渗氮层、渗氮和氧化复合处理层进行微动磨损试验,结果表明离子渗氮生成的 Fe_3N 和 Fe_4N 及氧化生成的氧化铁相使磨损体积减少约50%;屈盛官等^[18]研究表明离子渗氮表面硬度是高性能钢基体的2.8倍,在油润滑条件下有更好的抗磨损性能;覃旭娟等^[19]研究结果表明AISI 304L不锈钢在450和500 $^{\circ}\text{C}$ 离子渗氮处理后在高压釜中耐微动磨损率分别比未处理试样提高29.4和3.2倍;贺继樊等^[20]研

究了35CrMo钢离子渗氮层在脂润滑下的微动磨损性能, 表面微凸体能够储存润滑脂, 磨屑散布在润滑脂中起到协同润滑的作用, 减缓表面微动损伤. 部分研究中主要关注离子渗氮对摩擦系数和磨损量的影响, 但是未对不同微动运行区的动力学响应和摩擦化学行为进行研究.

目前, 国内外主要针对31CrMoV9渗氮层的热处理工艺及滑动摩擦磨损开展研究, 对微动摩擦学行为研究较少, 亟需对其微动摩擦学性能进行试验及分析, 以支撑轨道交通等领域关键结构件的选材和为抗微动磨损设计提供参考. 因此针对31CrMoV9基体及其渗氮层开展了微动磨损行为对比研究, 并利用X射线衍射仪(XRD)分析其物相, 利用扫描电子显微镜(SEM)、白光干涉仪、能谱仪(EDS)和电子探针显微分析仪(EPMA)等设备对其磨损形貌和化学成分进行分析, 探究其损伤机理, 对比31CrMoV9基体及其渗氮层的微动磨损行为, 为31CrMoV9钢的抗微动损伤表面强化提供参考.

1 试验部分

1.1 试验材料及制备

试验选取GCr15钢球和31CrMoV9基体及其渗氮层进行球/平面接触模式试验. GCr15钢球与31CrMoV9基体材料的主要化学成分列于表1中. 使用直径为20 mm,

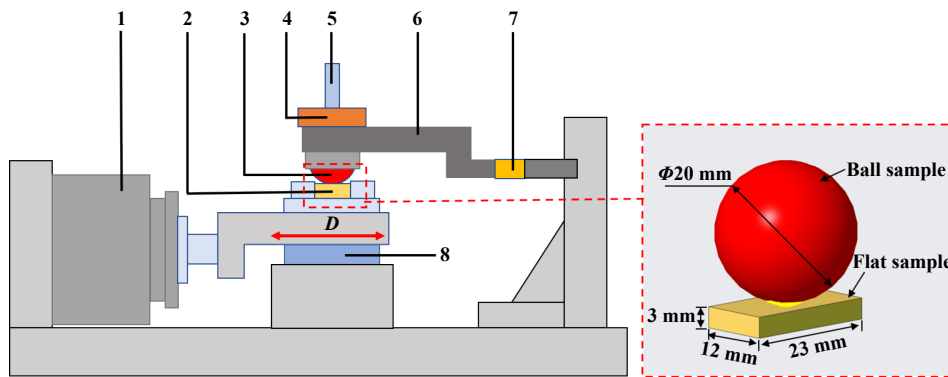
硬度为750 HV0.3, 表面粗糙度 $R_a=0.05 \mu\text{m}$ 的GCr15钢球. 31CrMoV9钢经调质处理后通过线切割将材料加工成23 mm×12 mm×3 mm的试验样品, 试样试验表面采用砂纸打磨, 然后使用抛光膏抛光至镜面($R_a=0.02 \mu\text{m}$). 离子渗氮试样尺寸与基体试样尺寸保持一致, 试样使用无水乙醇进行超声波清洗, 干燥后放入氮化炉内, 炉内气压控制在300~350 Pa, 渗氮炉升温速率约为100 °C/h, 离子渗氮分3段进行: 第1、3段温度为530 °C, 在10% N₂+90% H₂气氛下分别渗氮处理12 h. 第2段温度为550 °C, 在15% N₂+85% H₂气氛下渗氮处理96 h. 试验前, 所有试样用无水乙醇进行超声波清洗并干燥处理, 清除试样制备残留的杂质.

1.2 试验设备与方法

试验设备采用研制的高精度切向微动磨损试验机, 图1所示为试验机原理示意图. 31CrMoV9基体及其渗氮层为下试样, 固定于下试样夹具, 音圈电机为动力源, 使下试样进行往复运动; GCr15钢球为上试样, 固定于安装上试样夹具的传力臂上, 上部通过砝码加载法向载荷; 力传感器在整个微动试验的过程中, 实时采集切向摩擦力, 通过数据采集系统在控制程序界面生成摩擦力-位移曲线. 试验选取微动位移幅值(D)为5、10和50 μm , 上部施加法向载荷(F_n)为20 N, 音圈电机往复运动频率(f)为4 Hz, 微动试验循环次数(N)为 1×10^4 次, 所有微动试验均在室温(20~25 °C)下

表 1 GCr15钢和31CrMoV9钢的化学成分
Table 1 Chemical composition of GCr15 steel and 31CrMoV9 steel

Materials	Mass fraction/%							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Fe
GCr15	0.95	0.25	0.30	1.50	—	—	0.20	Bal
31CrMoV9	0.27~0.34	≤0.40	0.40~0.70	2.30~2.70	0.15~0.25	0.10~0.20	—	Bal



1-voice coil motor actuator; 2-flat sample; 3-ball sample; 4-weight; 5-weight support; 6-force arm; 7-force sensor; 8-linear guide

Fig. 1 Schematic diagram of tangential fretting wear test system

图 1 切向微动磨损试验机原理图

完成. 完成微动磨痕各项表征后, 使用丙酮和无水乙醇依次清洗试样, 干燥后测定磨痕磨损量. 为确保试验数据的准确可靠性, 在试验环境不变的条件下每组试验均重复3次.

1.3 表征与分析测试

采用X射线衍射仪(XRD, Rigaku Ultima IV, Japan)测试基体和渗氮试样表层物相, 测试靶材为铜靶, 电压和电流分别为40 kV和40 mA, 步长为 0.02° ; 显微硬度仪(KELITI-000ZB, China)测试基体和渗氮试样剖面硬度梯度, 试验力为2.94 N, 加载时间为15 s; 采用扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSM-6610LV, Japan)观察试样磨损形貌, 使用配套的能谱仪(EDS, OXFORD X-MAX50 INCA-250, Japan)分析磨痕化学元素, 加速电压为20 kV; 采用白光干涉仪(ContourGT-I, Germany)获取磨痕三维形貌并使用Vision64软件进行磨损体积测量; 采用超级电子探针(EPMA, JXA-8230, Japan)进行磨痕元素分析, 电压和电流分别为15 kV和 1×10^{-8} mA.

2 结果与讨论

2.1 离子渗氮层微观结构和硬度梯度

图2(a)所示为31CrMoV9渗氮层(31CrMoV9-PN)表面及剖面形貌的三维图和SEM照片, 由图2(a)可知, 基体试样经过离子渗氮处理后, 表面粗糙度增加, 31CrMoV9-PN粗糙度为 $0.38 \mu\text{m}$; 表面形貌照片显示离子渗氮层表面存在较均匀的微凸体. 渗氮试样剖面经镶样、抛光和腐蚀, 渗氮试样剖面的SEM照片中显示离子渗氮使基体表面生成了最大厚度约为 $10.2 \mu\text{m}$ 的化合物层, 下部为扩散层逐渐过渡到基体层. 图2(b)所示为基体和渗氮试样表面XRD衍射图, 基体试样表面均由 α -Fe相组成, 而离子渗氮试样表面由 ϵ - Fe_3N 和

γ '- Fe_4N 这两种物相组成化合物层, 未检测到 α -Fe相, 表明化合物层能覆盖基体层. 图2(c)所示为基体和渗氮层试样剖面硬度梯度, 由图2(c)可知, 基体试样剖面硬度在255.5 HV0.3~288.5 HV0.3范围内波动, 组织均匀性较好. 经过离子渗氮处理后, 在基体表面形成的化合物层和扩散层能显著提高基体材料的表层硬度, 近表层硬度为560.7 HV0.3, 相比于基体近表层硬度263.6 HV0.3, 提升了112.7%. 随着深度的增加, 硬度不断下降, 直到基体层趋于稳定, 渗氮影响层深度约为1.5 mm.

2.2 F_t - D - N 曲线分析

摩擦力-位移(F_t - D)曲线能够有效反映摩擦副接触界面在微动运行过程中动力学响应特性^[21]. 根据 F_t - D 闭环曲线随微动循环次数增加变化的过程及磨损区域的形貌, 可以将微动运行区域划分为3个区域: 部分滑移区、混合区和滑移区^[22-23]. 图3所示为基体及其渗氮层在不同位移幅值下的 F_t - D - N 曲线. 由图3可知, 当 $D=5 \mu\text{m}$ 时, 基体试样最开始曲线为椭圆形, 主要原因是有氧化膜和吸附膜存在于试样表面, 导致接触界面易发生相对滑移. 当氧化膜和吸附膜被摩擦去除后, 配副材料直接接触, 稳定后都为直线型. 而渗氮试样最开始即为直线型, 这是因为表面微凸体刺穿球试样氧化膜和吸附膜直接发生两体接触, 此参数下微动运行状态处于部分滑移区, 施加的切向位移主要由材料的弹性形变协调. 当 $D=10 \mu\text{m}$ 时, 初始阶段的闭环曲线为平行四边形形, 随着循环次数的增加, 由椭圆型向窄平行四边形形不断变化, 最终稳定为窄平行四边形形, 因此基体和渗氮试样微动运行于混合区; 当 $D=50 \mu\text{m}$ 时, 闭环曲线始终都为平行四边形, 此时微动运行状态为完全滑移区, 基体试样经过几次往复位移过后, 材料表面氧化膜和吸附膜破裂, 两配副材料

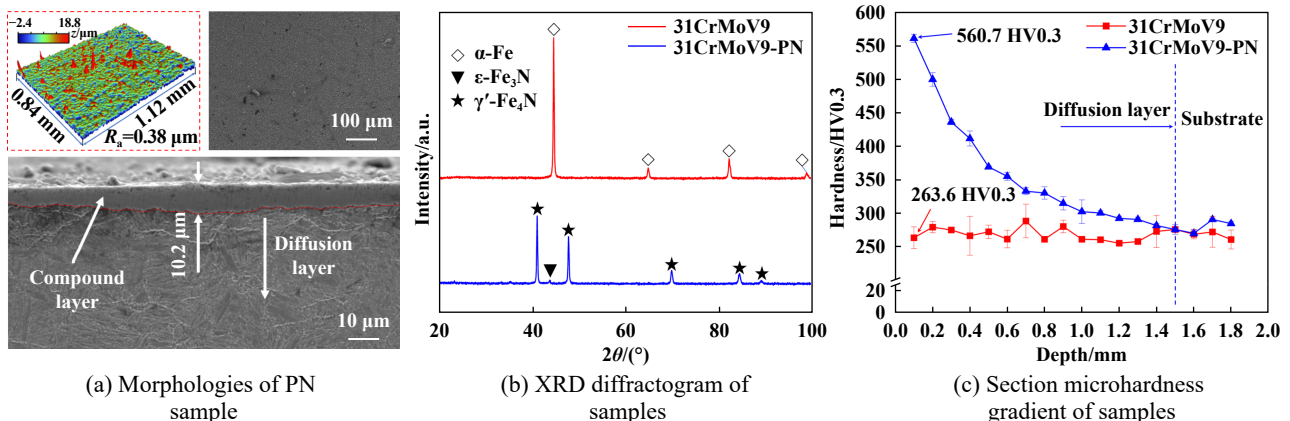


Fig. 2 Characterization of substrate and PN sample

图 2 基体和渗氮试样表征

直接接触, 接触界面发生了显著的塑性行为^[24-25]. 因此, 当法向载荷一定时, 位移幅值的变化能够改变材料的微动运行区域, 当位移幅值逐渐增大时, 基体和渗氮试样的微动运行状态变化趋势一致, 均由部分滑移区向混合区和完全滑移区转变.

2.3 摩擦系数分析

摩擦系数反映了配副材料在微动运行过程中材料表面的接触状态, 对评估微动磨损行为有重要作用^[26]. 图4所示为基体及渗氮层在不同位移条件下的摩擦系数演变曲线. 当位移幅值 $D=5 \mu\text{m}$ 时, 微动运行状态处于部分滑移区, 随着循环次数的增加, 基体试样摩擦

系数经历跑合、爬升和稳定3个阶段, 而渗氮试样摩擦系数仅经历爬升和稳定2个阶段, 且稳定阶段渗氮试样的摩擦系数稍低于基体试样, 是由于离子氮化生成的硬质颗粒起到了减摩的作用^[20], 此时形变主要由弹性形变协调, 稳定阶段的摩擦系数基本上无波动. 当位移幅值 $D=10 \mu\text{m}$ 时, 微动运行状态处于混合区, 相对于部分滑移区, 稳定阶段摩擦系数上升, 达到稳定时基体材料摩擦系数低于渗氮试样, 分别约为0.596和0.624, 可能跟生成的磨屑有关. 当位移幅值增大至 $50 \mu\text{m}$ 时, 微动运行状态处于完全滑移区, 基体试样摩擦系数经历跑合、爬升、下降和稳定4个阶段, 试验之前,

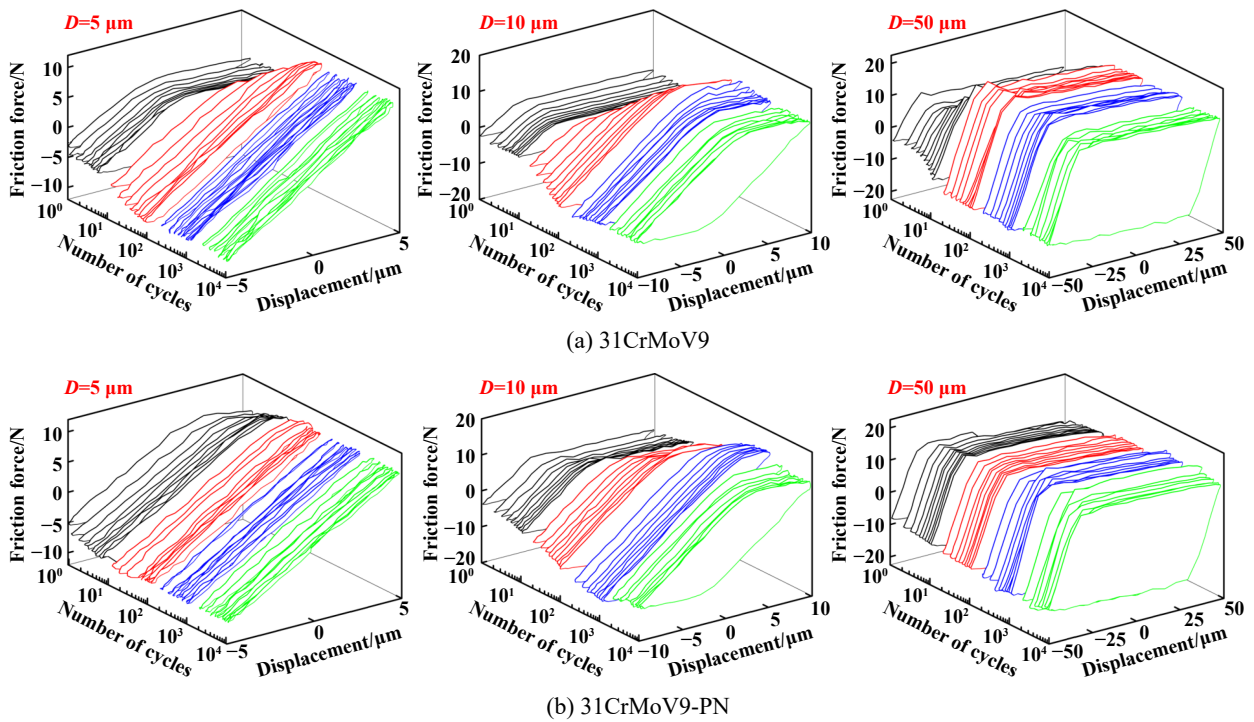


Fig. 3 F_t - D - N curves of substrate and PN sample under different displacement

图3 基体和渗氮试样不同位移幅值下的 F_t - D - N 曲线

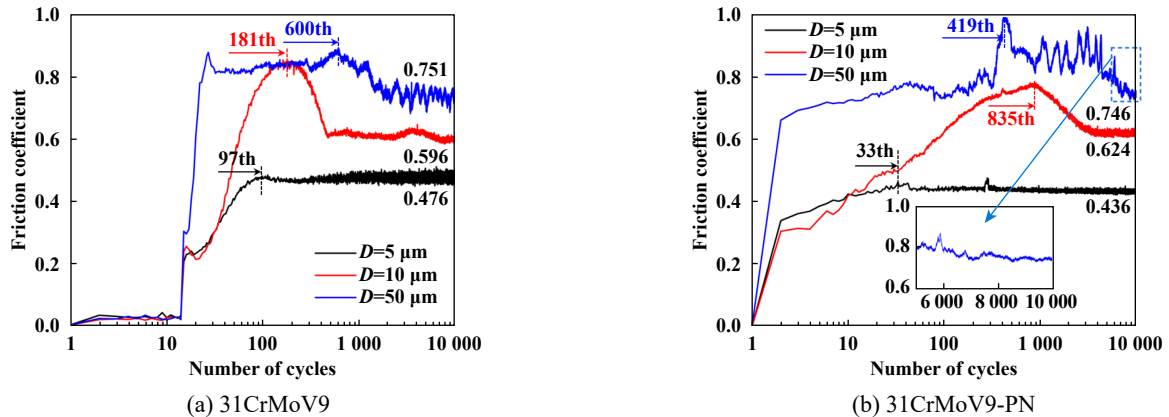


Fig. 4 Friction coefficient curve of substrate and PN sample under different displacement

图4 基体和渗氮试样不同位移幅值下的摩擦系数曲线

材料表面存在一定厚度的氧化膜和吸附膜,钢球与平面试样未直接接触,此时摩擦力小,摩擦系数低,出现跑合现象;经过少量微动循环过后,氧化膜和吸附膜被破坏,摩擦副直接接触,摩擦系数升高,出现爬升阶段;随着微动循环增加,接触界面形成了第三体磨屑,可以起到承载和润滑的作用,所以摩擦系数下降,当磨屑的产生与溢出处于1个动态平衡的状态时,摩擦系数处于稳定状态,达到稳定状态时,摩擦系数为0.751左右;而渗氮试样的摩擦系数经历爬升、下降和稳定3个阶段,首先摩擦副产生接触后,表面膜被渗氮层表面微凸体刺穿,发生两体接触,摩擦系数快速上升,直到微凸体完全被磨损脱落,摩擦系数达到最大,之后第三体磨屑不断积累使摩擦系数逐渐下降并趋于稳定,且达到稳定阶段所需循环周次较基体材料更多,稳定阶段约为0.746,由于渗氮层在磨损过程中产生的硬质磨粒使形成的剥层不断破裂,导致磨屑层和剥层不断交替出现,在下降阶段摩擦系数波动较大。

对于基体和渗氮层,随着位移幅值的增加,摩擦系数不断增大,主要原因是位移幅值增大,接触面积增大^[27-28]。

2.4 微动磨损形貌分析

图5和图6分别所示为基体和渗氮层在不同位移幅值下的三维形貌照片和二维截面轮廓图。随着微动位移逐渐增大,基体材料和渗氮层磨损的宽度和深度都有明显的增加,磨损越来越严重。当位移幅值 $D=5\ \mu\text{m}$,此时微动运行于部分滑移区,磨损轻微,基体材料的磨痕边缘存在磨屑堆积,接触区中部基本没有磨损,表明只在接触边缘发生了微滑,属于典型的部分滑移区形貌,而渗氮试样整个接触区域都有不同程度的微滑;当 $D=10\ \mu\text{m}$ 时,微动运行于混合区,磨损较轻微,磨痕中部堆积了摩擦产生的磨屑,基体试样形成的堆积层较渗氮试样更厚,这可能与基体试样在此位移幅值下摩擦系数更低有关,形成的磨屑层未排出,起到承载润滑的作用,基体试样和渗氮试样的磨损深度分别为 1.47 和 $0.91\ \mu\text{m}$;当位移幅值 $D=50\ \mu\text{m}$ 时,磨损面

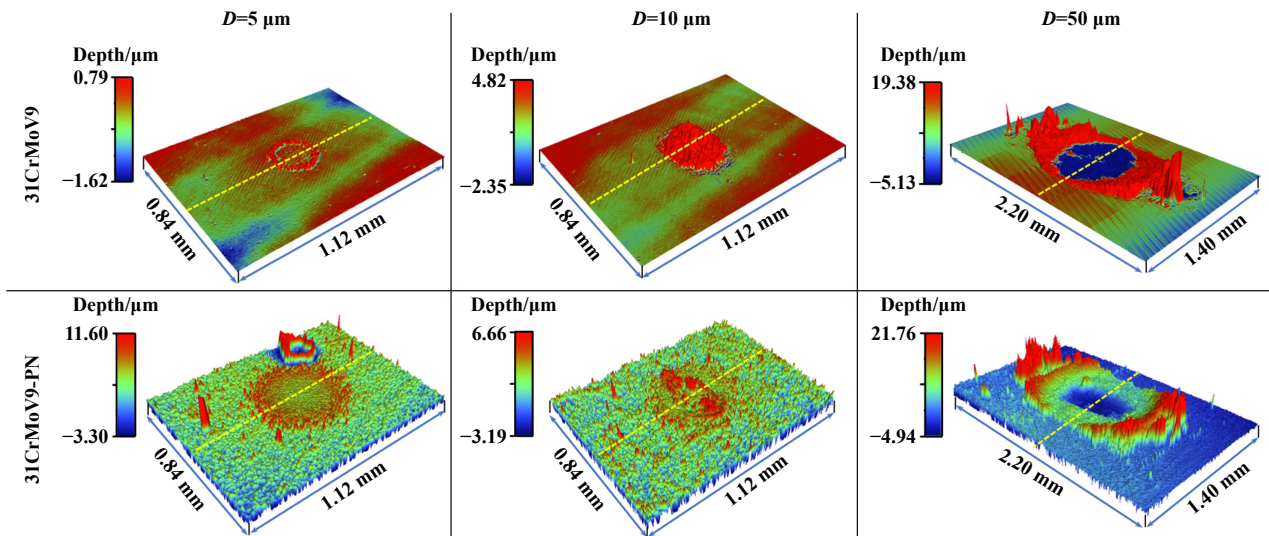


Fig. 5 Three-dimensional morphology of substrate and PN sample under different displacement

图5 基体和渗氮试样不同位移幅值下的三维形貌照片

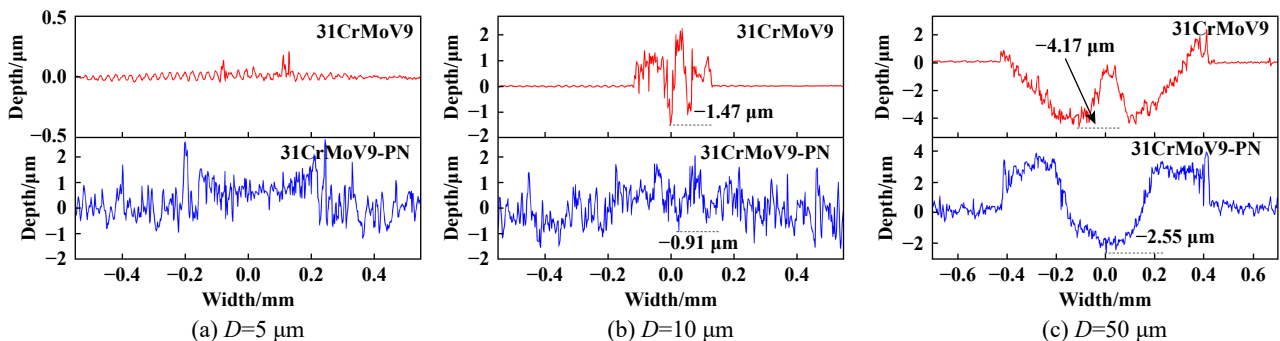


Fig. 6 Two-dimensional profile of substrate and PN sample under different displacement

图6 基体和渗氮试样不同位移幅值下的二维轮廓图

积增大, 磨痕边缘有大量磨屑堆积, 基体中部有部分磨屑堆积, 中部出现突起, 渗氮试样二维轮廓图呈现“U”型, 为完全滑移区的典型形貌, 基体和渗氮层的磨损深度分别约为4.17和2.55 μm. 在不同位移幅值下, 渗氮试样的磨损深度均低于基体试样.

2.5 磨损体积和磨损率

图7所示为基体和渗氮试样在不同位移下的磨损体积和体积磨损率, 在D=5 μm时, 材料的磨损很轻微, 难以准确测量磨损体积, 因此未采用. 由图7可以看到, 随位移幅值的增大, 每种材料的磨损体积呈增大的趋势. 渗氮层相对于基体材料有更少的磨损体积, 表面渗氮层及扩散层起到减摩的作用. 同时结合公式(1)计算磨损率, 结果显示, 在不同位移幅值下, 渗氮试样磨损率均小于基体试样, 在微动位移D为10和50 μm时, 磨损率分别降低约38.5%和70.2%. 因此, 渗氮试样的抗微动磨损性能优于基体试样.

$$V_c = \frac{V}{F_n \cdot N \cdot D} \quad (1)$$

式中, V_c 为磨损率, V 为磨损体积(mm³), F_n 为法向载荷(N), N 为试验总循环次数, D 为单次循环的总微动距离(m).

2.6 摩擦损伤机理分析

图8所示为不同位移幅值下基体和渗氮试样的扫描电镜图片. 当位移幅值D=5 μm时, 微动运行于部分滑移区, 基体试样接触区边缘出现了微滑现象, 中心

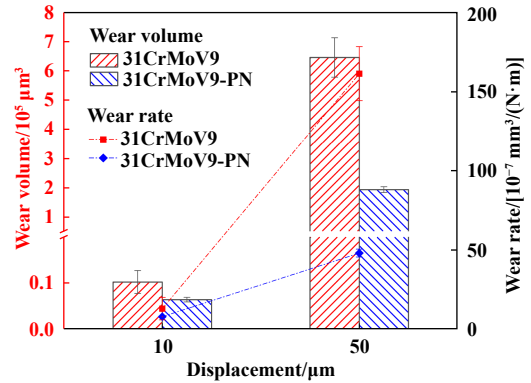


Fig. 7 Wear volume and wear rate of substrate and PN sample under different displacement

图 7 基体和渗氮试样不同位移幅值下的磨损体积和磨损率

为黏着区域, 损伤区呈环状. 渗氮试样的磨痕呈圆形, 有轻微损伤, 是由于表面微凸体分布均匀, 共同承载了法向载荷, 微凸体在交变接触应力下出现了弹塑性变形, 整个接触区出现微滑, 材料在部分滑移区均有轻微损伤. 当位移幅值D=10 μm时, 微动运行于混合区, 磨痕中未出现黏着区域, 相对于部分滑移区, 磨损更加严重. 基体试样的磨痕呈圆形, 边缘有磨屑堆积, 说明摩擦过程中有磨屑的生成与排出, 这与摩擦系数在180次循环后摩擦系数下降有关. 磨痕中部有剥层、磨屑、犁沟及微裂纹, 主要是由于接触区次表层材料

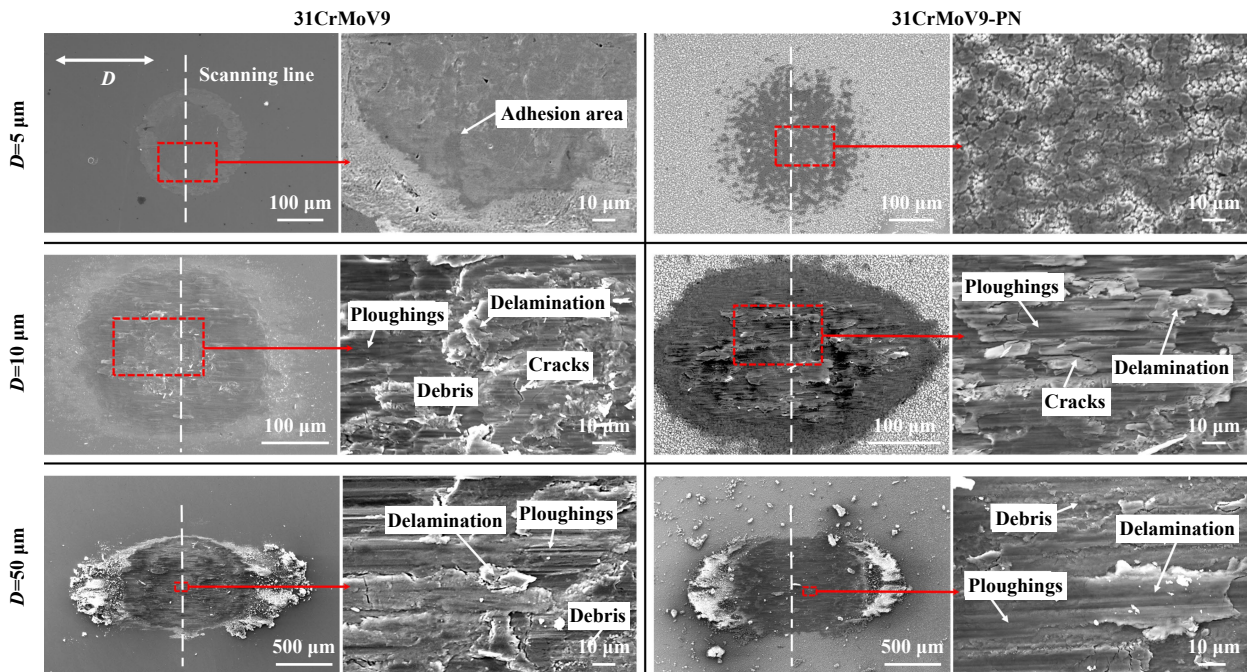


Fig. 8 SEM micrographs of wear morphology of substrate and PN sample under different displacement

图 8 基体和渗氮试样不同位移幅值下的磨损形貌的SEM照片

在切应力作用下萌生裂纹并在交变应力作用下逐渐扩展,当微裂纹贯通扩展至表面时形成剥层,犁沟是由于磨损产生的硬质磨粒造成. 渗氮试样的磨痕呈椭圆形,边缘基本没有磨屑,磨痕中部有大量疲劳磨损形成的剥层,相比于基体试样有更多的犁沟,这可能是由离子渗氮处理过后生成的硬质颗粒造成. 当位移幅值 $D=50\ \mu\text{m}$ 时,微动运行于完全滑移区,此位移幅值下,基体试样磨痕呈椭圆形,沿位移运动方向有大量粉末状磨屑堆积,而渗氮试样的磨屑呈压实状堆积在两端,基体试样相比于渗氮试样有更多的磨屑堆积,基体试样的磨痕表面有大量的犁沟和剥层,磨损量更大. 渗氮试样在水平方向切应力和垂直方向接触应力的作用下,材料出现弹塑性变形,并形成片状剥落,同时硬质氮化物颗粒和产生的硬质磨屑在微动的过程中产生犁沟^[20]. 因此,在混合区和完全滑移区基体和渗氮试样的磨损机制主要为剥层和磨粒磨损.

图9所示为不同位移幅值下基体和渗氮层试样磨痕中部的EDS谱图,由谱图及元素质量百分比(W_i)可以看出,基体材料在 $D=5\ \mu\text{m}$ 时,磨痕中部黏着区未发生氧化,是由于中部为黏着区,但渗氮试样有轻微氧化,可能与渗氮试样表层微凸体有关,磨损过程中有

少量空气进入微凸体间隙造成轻微氧化;当 $D=50\ \mu\text{m}$ 时,基体和渗氮层均发生了氧化,且渗氮层的氧化程度较基体更低. 图10所示为基体和渗氮层试样在不同微动位移幅值下磨痕的EPMA线扫描图,扫描位置如图8所示,扫描方向垂直微动方向. 由图10中元素的相对含量可以看出O和Fe元素在未磨损区无明显变化. 当 $D=5\ \mu\text{m}$ 时,基体材料在边缘微滑区出现了氧化行为,而中部未发生氧化,是由于接触副之间出现了黏着现象,而渗氮试样发生了氧化行为,越靠近磨痕中部氧化越严重;当 D 为10和 $50\ \mu\text{m}$ 时,磨痕元素含量沿线扫描方向变化较大,Fe元素含量明显减少,O元素含量明显上升,说明在磨损过程中由于摩擦活化作用,Fe易与O原子结合,形成氧化物,导致磨损区出现氧化磨损^[29]. 渗氮试样中检测到N元素的存在,N元素整体含量很低,在未磨损区和磨损区无明显变化趋势.

3 结论

本文中系统研究了31CrMoV9基体及其渗氮层的微动磨损行为,通过磨损过程动力学响应和磨痕形貌等对比分析两者抗微动磨损性能,结论如下:

a. 离子渗氮处理能在基体表面形成化合物层和

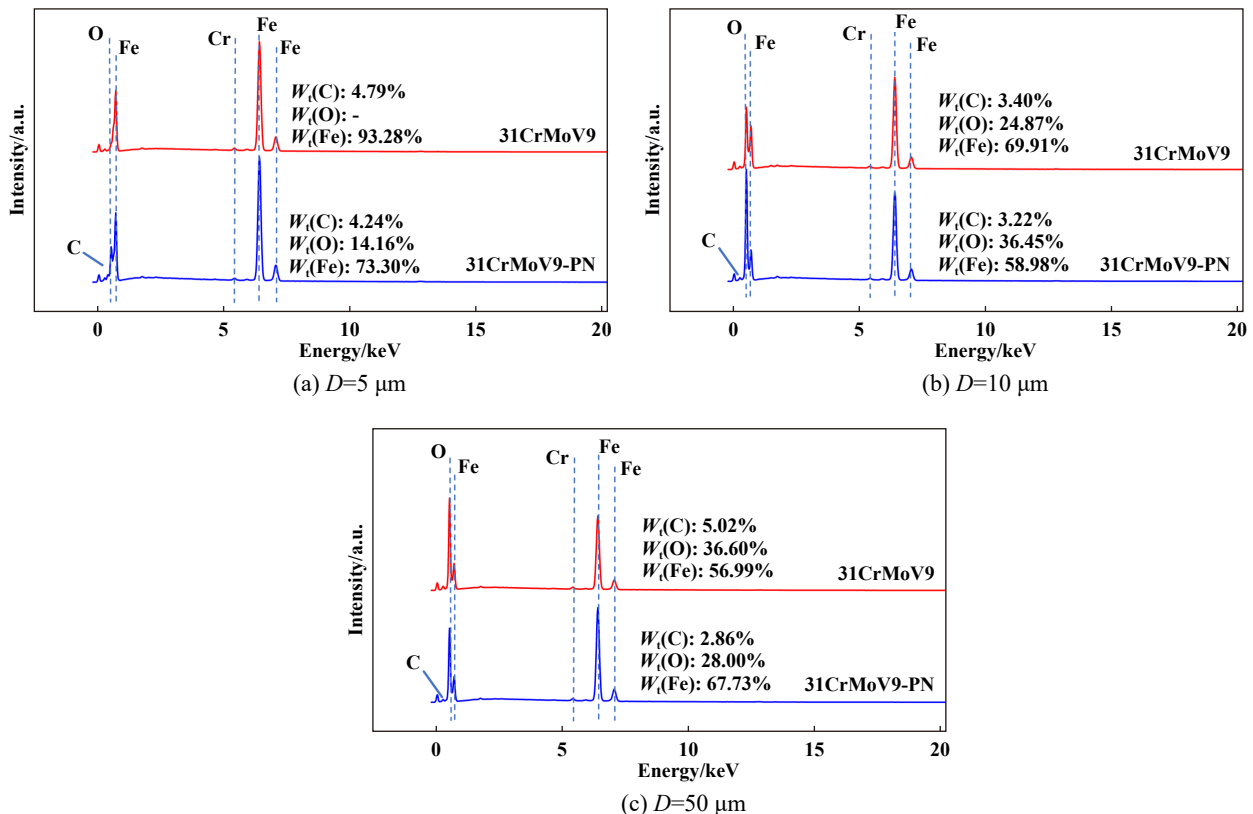


Fig. 9 EDS spectra of substrate and PN sample under different displacement

图 9 基体和渗氮试样不同位移幅值下的EDS谱图

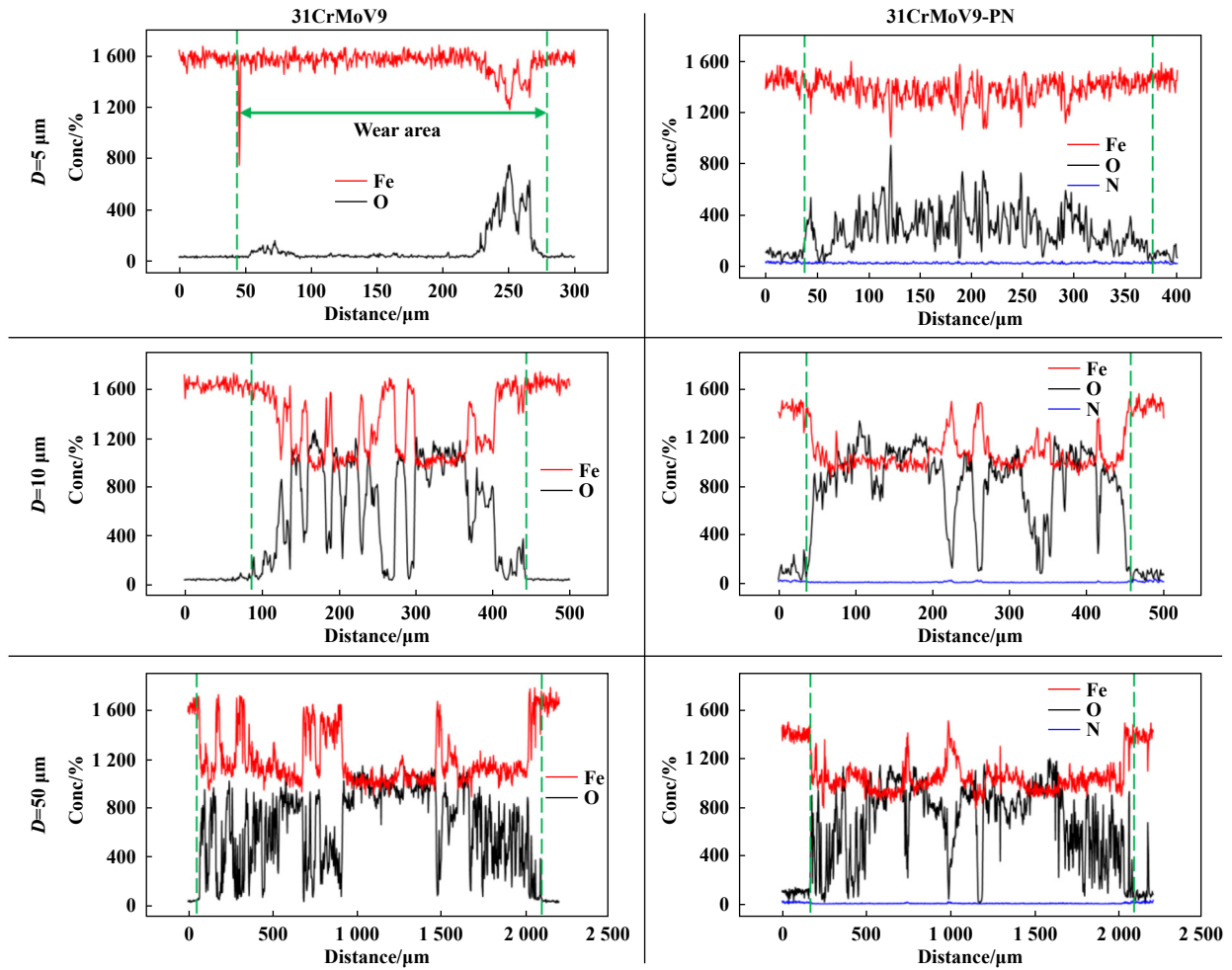


Fig. 10 EPMA line scanning of substrate and PN sample under different displacement
图 10 基体和渗氮试样不同位移幅值下的EPMA线扫描图

扩散层, 表层硬度提升112.7%。

b. 在法向载荷20 N不变的情况下, 随着位移幅值的增大, 基体及渗氮层的微动运行状态由部分滑移区逐渐向混合区和完全滑移区转变, 损伤程度更加严重。渗氮试样在部分滑移区和完全滑移区时摩擦系数更低, 而在混合区时摩擦系数高于基体试样; 离子渗氮处理使材料在混合区和完全滑移区磨损率分别降低约38.5%和70.2%, 显著提高了31CrMoV9钢抗微动损伤性能。

c. 当微动运行状态为部分滑移区时, 基体材料的接触区中部为黏着状态, 接触边缘发生了微滑, 而渗氮试样接触区均处于微滑状态。当微动运行状态为混合和完全滑移区时, 基体和渗氮试样的微动损伤机制都为剥层、磨粒磨损和氧化磨损。

参考文献

[1] Wang Yaowu, Zhang Yaqin, Wang Xiaoying. Solution-double-refinement treating of 31CrMoV9 steel[J]. Heat Treatment, 2013,

28(6): 50–52,53 (in Chinese) [王耀武, 张雅芹, 王晓颖. 31CrMoV9钢固溶双细化工艺研究[J]. 热处理, 2013, 28(6): 50–52,53]. doi: 10.3969/j.issn.1008-1690.2013.06.016.

[2] Huang Xing, Pu Rui. Research on the heat treatment process of 31CrMoV9 steel[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2010, (2): 16–17,46 (in Chinese) [黄星, 蒲锐. 31CrMoV9钢热处理工艺研究[J]. 机车车辆工艺, 2010, (2): 16–17,46]. doi: 10.14032/j.issn.1007-6034.2010.02.002.

[3] Yu Li, Tu Xiaolong, Chen Yunxiang. Study of deep nitriding process for 31CrMoV9 steel[J]. Foundry Technology, 2017, 38(3): 573–576 (in Chinese) [郁俐, 涂小龙, 陈云祥. 31CrMoV9钢深层渗氮工艺研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(3): 573–576]. doi: 10.16410/j.issn1000-8365.2017.03.023.

[4] Zhu Minhao, Cai Zhenbing, Zhou Zhongrong. Fretting wear theory[M]. Beijing: Science Press, 2021 (in Chinese) [朱旻昊, 蔡振兵, 周仲荣. 微动磨损理论[M]. 北京: 科学出版社, 2021].

[5] Tang Pan, Mi Xue, Shen Pingchuan, et al. Effect of displacement on tangential fretting wear characteristics of 690 alloy tube/405

- stainless steel plate[J]. *Tribology*, 2020, 40(6): 754–761 (in Chinese) [唐攀, 米雪, 沈平川, 等. 位移幅值对690合金管/405不锈钢块切向微动磨损特性的影响[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(6): 754–761]. doi: [10.16078/j.tribology.2020024](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020024).
- [6] Zhu Minhao, Xu Jin, Zhou Zhongrong. Alleviating fretting damages through surface engineering design[J]. *China Surface Engineering*, 2007, 20(6): 5–10 (in Chinese) [朱旻昊, 徐进, 周仲荣. 抗微动损伤的表面工程设计[J]. *中国表面工程*, 2007, 20(6): 5–10]. doi: [10.3321/j.issn:1007-9289.2007.06.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:1007-9289.2007.06.002).
- [7] Luo Jun, Zheng Jianfeng, Mo Jiliang, et al. Study on fretting wear behavior of steel modified by gas multi-element penetration at low temperature[J]. *China Surface Engineering*, 2009, 22(2): 15–19 (in Chinese) [罗军, 郑健峰, 莫继良, 等. 钢表面多元共渗改性层的微动磨损行为研究[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(2): 15–19].
- [8] Olzon-Dionysio M, Campos M, Kapp M, et al. Influences of plasma nitriding edge effect on properties of 316L stainless steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204(21-22): 3623–3628. doi: [10.1016/j.surfcoat.2010.04.034](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.034).
- [9] Liang Hongbin, Li Changsheng, Wang Pei, et al. Effect of ion nitriding temperature on the microstructure and tribological behavior of 42CrMo steel[J]. *Materials Protection*, 2019, 52(6): 39–44 (in Chinese) [梁泓彬, 李长生, 王培, 等. 离子渗氮温度对42CrMo钢组织及摩擦磨损行为的影响[J]. *材料保护*, 2019, 52(6): 39–44]. doi: [10.16577/j.cnki.42-1215/tb.2019.06.007](https://doi.org/10.16577/j.cnki.42-1215/tb.2019.06.007).
- [10] Çomaklı O, Yetim A F, Karaca B, et al. Effect of nitrogen amount on tribological behavior of plasma nitrided 31CrMoV9 steel[J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 26(7): 1850217. doi: [10.1142/S0218625X18502177](https://doi.org/10.1142/S0218625X18502177).
- [11] Dayanç A, Karaca B, Kumruoğlu L C. Improvement of tribological properties of steel camshaft by plasma nitriding[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2019, 135(4): 786–792. doi: [10.12693/APhysPolA.135.786](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.135.786).
- [12] Conci M D, Bozzi A C, Franco A R. Effect of plasma nitriding potential on tribological behaviour of AISI D2 cold-worked tool steel[J]. *Wear*, 2014, 317(1-2): 188–193. doi: [10.1016/j.wear.2014.05.012](https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.012).
- [13] Emami M, Ghasemi H M, Rassizadehghani J. High temperature tribological behaviour of 31CrMoV9 gas nitrided steel[J]. *Surface Engineering*, 2010, 26(3): 168–172. doi: [10.1179/174329409x397741](https://doi.org/10.1179/174329409x397741).
- [14] Li Shaoyu, Zhang Yang, Zhu Jianxin, et al. Research on heat treatment process of 31CrMoV9 steel[J]. *Heavy Castings and Forgings*, 2019, (2): 37–39 (in Chinese) [李少雨, 张阳, 朱建鑫, 等. 31CrMoV9热处理工艺研究[J]. *大型铸锻件*, 2019, (2): 37–39]. doi: [10.14147/j.cnki.51-1396/tg.2019.02.013](https://doi.org/10.14147/j.cnki.51-1396/tg.2019.02.013).
- [15] Wang Feiyu, Zhang Zhonghe, Zhang Erkang, et al. Ion nitriding of 31CrMoV9 steel[J]. *Heat Treatment*, 2017, 32(5): 48–51 (in Chinese) [王飞宇, 张忠和, 张尔康, 等. 31CrMoV9钢的离子渗氮[J]. *热处理*, 2017, 32(5): 48–51]. doi: [10.3969/j.issn.1008-1690.2017.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1690.2017.05.012).
- [16] Ali M M, Raman S G S, Pathak S D, et al. Influence of plasma nitriding on fretting wear behaviour of Ti–6Al–4V[J]. *Tribology International*, 2010, 43(1-2): 152–160. doi: [10.1016/j.triboint.2009.05.020](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.05.020).
- [17] Prakash N A, Bennett C J. The effect of plasma nitriding and post oxidation on fretting wear behaviour of a high strength alloy steel[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 843: 012079. doi: [10.1088/1742-6596/843/1/012079](https://doi.org/10.1088/1742-6596/843/1/012079).
- [18] Qu Shengguan, Wang Guanghong, Li Wenlong, et al. Fretting wear of a high-performance plasma nitrided steel[J]. *Tribology*, 2012, 32(5): 486–492 (in Chinese) [屈盛官, 王光宏, 李文龙, 等. 高性能渗氮钢微动磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(5): 486–492]. doi: [10.16078/j.tribology.2012.05.009](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2012.05.009).
- [19] Qin Xujuan, Lu Junqiang, Guo Xianglong, et al. Effect of plasma nitriding on wear property of AISI 304L stainless steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(1): 161–165 (in Chinese) [覃旭娟, 卢俊强, 郭相龙, 等. 离子渗氮对AISI304L不锈钢磨损性能的影响[J]. *金属热处理*, 2016, 41(1): 161–165]. doi: [10.13251/j.issn.0254-6051.2016.01.034](https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2016.01.034).
- [20] He Jifan, Ren Yanping, Bai Chongcheng, et al. Fretting wear mechanism of plasma nitride 35CrMo steel under dry and lubricated conditions[J]. *Tribology*, 2023, 43(1): 18–29 (in Chinese) [贺继樊, 任岩平, 白崇成, 等. 干态及润滑工况下离子氮化35CrMo钢微动磨损机理研究[J]. *摩擦学学报*, 2023, 43(1): 18–29]. doi: [10.16078/j.tribology.2021243](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021243).
- [21] Tang Pan, Mi Xue, Zhang Jun, et al. Evolution of wear damage in 690 alloy tube mated with 405 stainless steel plate due to fretting conditions[J]. *Tribology International*, 2021, 163: 107177. doi: [10.1016/j.triboint.2021.107177](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107177).
- [22] Zhou Z R, Nakazawa K, Zhu M H, et al. Progress in fretting maps[J]. *Tribology International*, 2006, 39(10): 1068–1073. doi: [10.1016/j.triboint.2006.02.001](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.02.001).
- [23] Zhu Minhao. Investigations on the running and damage mechanisms of radial and composite fretting[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001 (in Chinese) [朱旻昊. 径向与复合微动的运行和损伤机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001].
- [24] He Jifan, Peng Jinfang, Ren Yanping, et al. Study on improving fretting wear properties of AISI 4135 steel via diverse surface modifications under grease lubrication[J]. *Wear*, 2022, 490–491: 204210. doi: [10.1016/j.wear.2021.204210](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204210).
- [25] Wang Mengjie, Peng Jinfang, Zhuang Wenhua, et al. Fretting wear damage characteristics of carbon fiber[J]. *Tribology*, 2019, 39(3):

- 330–339 (in Chinese) [王梦婕, 彭金方, 庄文华, 等. 碳纤维切向微动磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(3): 330–339]. doi: [10.16078/j.tribology.2018168](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018168).
- [26] He Jifan, Cai Zhenbing, Ren Yanping, et al. Optimization of several surface treatment processes for alleviating fretting damage of a locking pin[J]. Friction, 2022, 10(8): 1217–1233. doi: [10.1007/s40544-021-0526-0](https://doi.org/10.1007/s40544-021-0526-0).
- [27] Mi Xue, Tang Pan, Shen Pingchuan, et al. Tangential fretting wear characteristics of 690 alloy tubes under different normal force[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 191–197 (in Chinese) [米雪, 唐攀, 沈平川, 等. 690合金管在不同法向载荷下的切向微动磨损性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 191–197]. doi: [10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.021](https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.021).
- [28] Yue T Y, Wahab M A. Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction and different contact regimes[J]. Tribology International, 2017, 107: 274–282. doi: [10.1016/j.triboint.2016.11.044](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.044).
- [29] Zhang Yusheng, Ming Hongliang, Lai Jiang, et al. Fretting wear behaviour of Zr alloy cladding tube under partial slip regime with different duration in simulated primary water of PWR[J]. Applied Surface Science, 2022, 605: 154861. doi: [10.1016/j.apsusc.2022.154861](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154861).

关于鼓励《摩擦学学报》作者汇交论文关联数据的通知

为推动论文关联数据的科学管理与开放共享, 提高论文的影响力, 《摩擦学学报》鼓励作者进行论文关联数据的汇交. 文章录用后, 作者可以在ScienceDB (Science Data Bank, 科学数据银行, <https://www.scidb.cn/>)进行数据汇交和首发.

论文关联数据提交流程意见: https://www.scidb.cn/publishing_process