

车轴钢表面渗氮/渗硫复合层的扭动微动磨损研究

Torsional Fretting Wear of Sulfurized-nitrided Layers Prepared on Axle Steel

顾和根¹, 蔡振兵¹, 岳文², 彭金方¹, 朱旻昊¹

(1 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 成都 610031;

2 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100086)

GU He-gen¹, CAI Zhen-bing¹, YUE Wen², PENG Jin-fang¹, ZHU Min-hao¹

(1 Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2 School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

摘要: 通过对 LZ50 车轴钢表面进行渗氮/渗硫复合处理, 在其表面形成渗氮/渗硫复合层。在对复合层进行表征的基础上, 研究了复合层和基体在干态不同角位移幅值下的扭动微动磨损行为。结果表明: 渗氮/渗硫复合层由 $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$, $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, FeS 和 FeS_2 相组成; 复合层改变了 LZ50 钢的扭动微动运行区域, 使得混合区减小, 滑移区向小角位移方向移动; 由于高硬度的渗氮层支撑和渗硫层润滑作用, 复合层的摩擦扭矩在部分滑移区和滑移区低于 LZ50 钢; 与 LZ50 钢相比, 复合层的磨损程度明显降低, 在部分滑移区损伤轻微, 在混合区和滑移区, 复合层的损伤主要表现为剥层, 磨粒磨损和氧化磨损。

关键词: 摩擦磨损; 微动磨损; 扭动微动; 渗氮/渗硫复合处理

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.07.013

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)07-0066-07

Abstract: The sulfurized-nitrided layers were prepared on the surface of LZ50 steel by sulfurized-nitrided duplex processes. Base on the characterizations of the sulfurized-nitrided layers, the torsional fretting wear tests of the sulfurized-nitrided layers and LZ50 steel were carried out in dry condition under different torsional angular displacement amplitudes. The results indicated the sulfurized-nitrided layers were composed of $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$, $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, FeS and FeS_2 phases. The fretting regimes of the sulfurized-nitrided layers were changed, i. e. the range of the mixed fretting regime was diminished, and the slip regime shifted to the direction of smaller angular displacement amplitude. The friction torques of the sulfurized-nitrided layers were lower than that of the substrate in the partial slip and slip regimes due to the support of the hard nitrided layer and the lubricating of the sulfide layer. Comparing with the substrate, the wear of material reduced greatly for the sulfurized-nitrided layers. The damage in the partial slip regime was slight, but in the mixed and slip regimes the damage mechanisms of the modified layer were mainly delamination, abrasive wear and oxidative wear.

Key words: friction and wear; fretting wear; torsional fretting; sulfurized-nitrided duplex processes

扭动微动是指在交变载荷下接触副接触界面发生微幅扭动的相对运动^[1-3]。作为微动磨损相对运动的一种基本模式, 普遍存在于机械装备中, 如机车的轮轴配合面、汽车悬挂架球窝关节及机车转向架的心盘等, 已成为导致部件失效的主要原因^[2-7]。而表面工程技术是减缓微动损伤的重要措施之一^[8-10]。对于接触

界面而言, 理想摩擦表面结构依次为较软的润滑层作为最外层, 较硬的次表层支撑着表面。在离子渗氮层上进行低温离子渗硫处理得到渗氮/渗硫复合层可以有效地提高机械零件的摩擦学性能^[11-13]。本工作通过在 LZ50 钢表面进行离子渗氮和离子渗硫复合处理, 研究渗氮/渗硫复合层的扭动微动磨损性, 为指导

车轴钢表面工程的抗微动损伤提供了理论支持和工程指导。

1 实验方法

1.1 渗氮/渗硫复合层的制备

基体材料选用铁路上 LZ50 车轴钢(主要成分为 0.55% C, 0.15%~0.35% Si, 0.60%~0.90% Mn,

≤0.03% P, ≤0.30% Cr, ≤0.30% Ni, 质量分数), 其硬度 HV_{50g} = 250, 屈服强度 σ_s = 375MPa, 抗拉强度 σ_b = 630MPa, 将其加工成 10mm×10mm×30mm 尺寸试样, 待测试表面(10mm×30mm)打磨抛光至 R_a = 0.04μm, 用丙酮超声波清洗、干燥后备用。

渗氮/渗硫复合处理工艺: 使用 LDM2-25 型等离子渗氮炉对试样表面依次进行等离子渗氮、渗硫处理。处理工艺如表 1 所示。

表 1 离子渗氮/渗硫处理工艺
Table 1 Heat treatment process of the sulfide-nitrided layers

Treatment process	Voltage/V	Air supply	Furnace pressure/Pa	Furnace temperature/℃	Soaking time/h
Ion nitriding	700	NH ₃	670	520	4
Ion sulphurizing	1000	Sulfur powder	13	230	4

1.2 扭动微动磨损实验

扭动微动实验在扭动微动试验机上进行^[2]。采用球/平面接触方式。平面试样为渗氮/渗硫复合层和基体材料, 对磨副为 GCr15 钢球(φ40mm, 880HV_{50g}, R_a = 0.02μm)。实验主要参数: 扭动角速度为 0.2(°)/s, 角位移幅值分别为 0.1°, 0.25°, 0.5°, 1°, 2.5°, 10°, 法向载荷 F_n 为 20N, 循环次数为 10³ 次, 实验温度为 (25±5)℃, 相对湿度为 50%~60%。采用轮廓仪(NanoMap-Dual Mode 3D Profilometer)测量复合层表面粗糙度, 维氏硬度仪(Akashi MVK-H21)测量复

合层硬度, X 射线衍射仪(PAN-alytical)小角衍射分析复合层相结构, 光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(QUAN-TA200 和 KYKY2800)和电子能谱(EDX)分析复合层及磨痕表面形貌和化学成分。

2 实验结果及讨论

2.1 渗氮/渗硫复合层的结构

图 1(a)所示, LZ50 钢经渗氮/渗硫复合处理后的表面呈孔状的疏松结构, 3D 形貌(图 1(b))显示表面

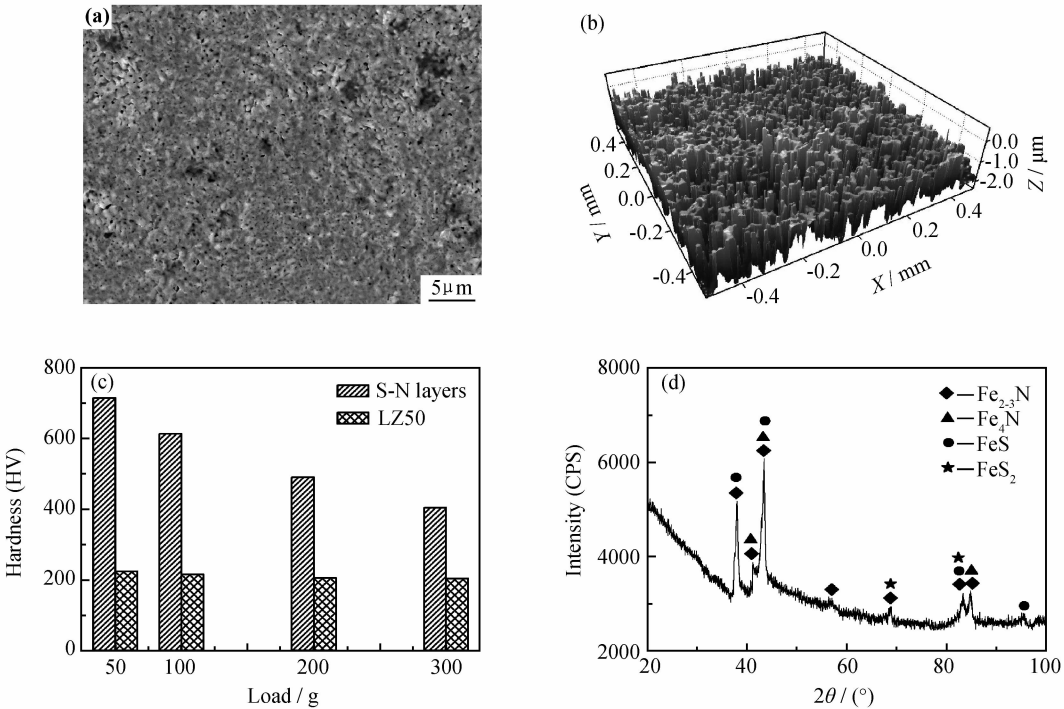


图 1 渗氮/渗硫复合层表面形貌特征 (a)SEM;(b)3D 形貌;(c)硬度;(d)XRD
Fig. 1 Surface morphology of sulfide-nitrided layers (a)SEM;(b) 3D-profile;(c)hardness;(d) XRD

表面粗糙度显著增加。复合层表面的硬度得到了显著的提高,约为 715HV_{50g},由于基体效应,复合层的硬度随着显微硬度仪加载的载荷增加而逐渐减小(图 1(c)),表明基体效应增加增大。由图 1(d)XRD 薄膜衍射检测结果表明渗氮/渗硫复合层主要由 ϵ -Fe₂₋₃N、 γ' -Fe₄N、FeS 和 FeS₂ 组成,其中 ϵ -Fe₂₋₃N 和 γ' -Fe₄N 相硬度较高,这也是复合层硬度显著提高的原因;FeS 为密排六方结构,易沿着密排面滑移,有良好的减摩作用;另外,“活性硫”饱和时还生成少量的 FeS₂,为

正交或立方结构,不具有减摩效果,不起固体润滑作用^[14-16]。由图 2(a)所示的渗氮/渗硫复合层剖面的 SEM 形貌可见复合层的厚度约为 15 μ m;同时对复合层剖面进行硫元素的纵向线扫描(见图 2(b))发现渗硫层的厚度很薄,这是由于样品在渗氮处理过程中,氮离子轰击样品表面,沿着晶界扩散,氮离子包围了铁原子形成铁氮化合物,裸露的铁原子较少,因此低温离子渗硫形成的渗硫层较薄。

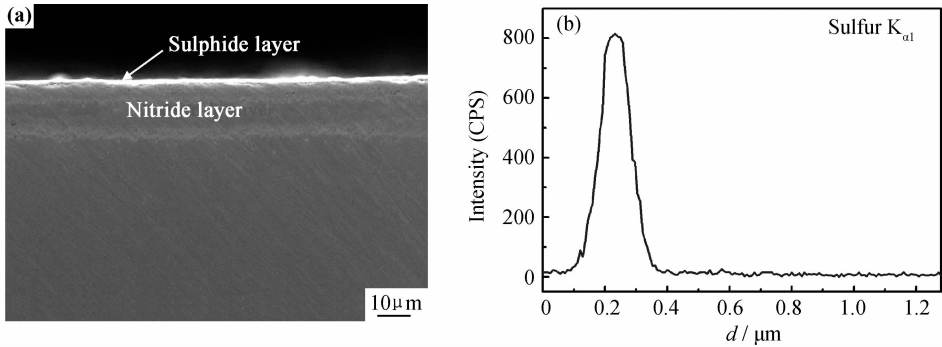


图 2 渗氮/渗硫复合层的剖面形貌(a)及 S 元素能谱结果(b)
Fig. 2 SEM morphology (a) and S elemental spectroscopy result (b) of the cross-section of sulfide-nitrided layers

2.2 扭动微动运行特性

图 3 为渗氮/渗硫复合层和 LZ50 钢基体在不同

角位移幅值下随循环次数的 $T-\theta$ 曲线。可见,当角位移幅值为 $\theta=0.1^\circ$ 时,复合层和 LZ50 钢的 $T-\theta$ 曲线

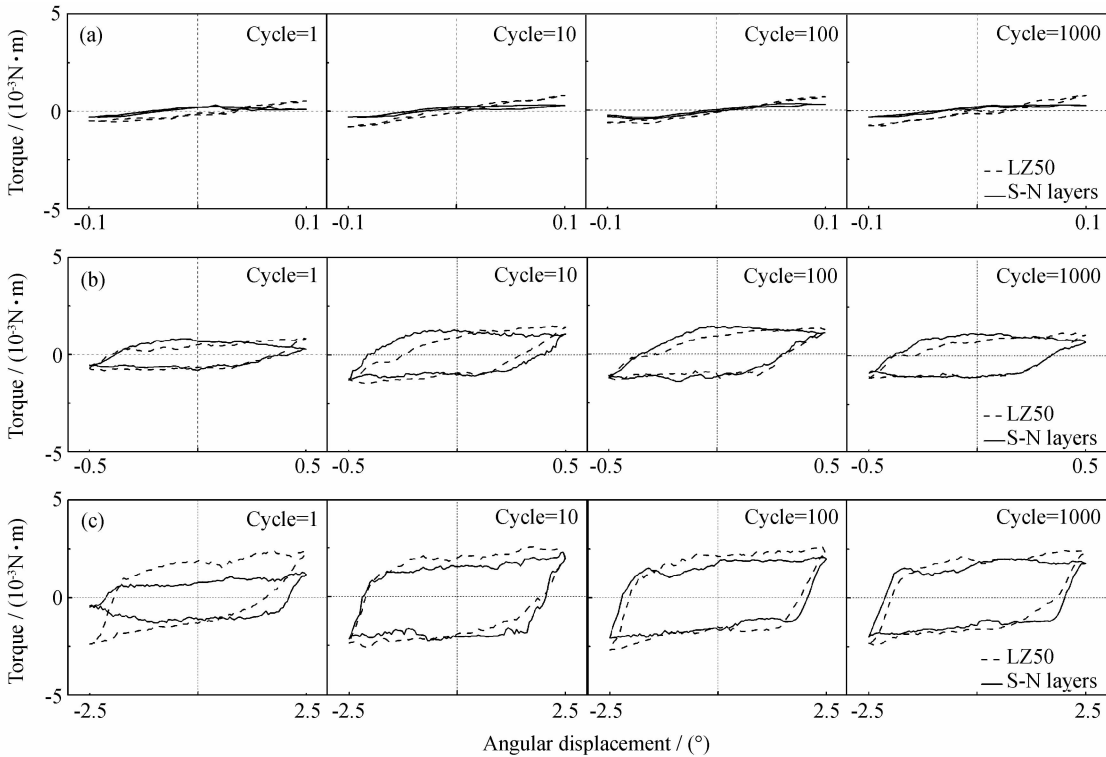


图 3 渗氮/渗硫复合层和 LZ50 钢在不同角位移幅值下的 $T-\theta$ 曲线演变 (a) $\theta=0.1^\circ$; (b) $\theta=0.5^\circ$; (c) $\theta=2.5^\circ$

Fig. 3 $T-\theta$ curves of sulfide-nitrided layers and LZ50 steel under different angular displacement (a) $\theta=0.1^\circ$; (b) $\theta=0.5^\circ$; (c) $\theta=2.5^\circ$

都始终为直线型,且扭矩较小,摩擦界面由接触界面的弹性变形来协调,此时微动都处于部分滑移状态。当角位移幅值 θ 增大到 0.5° 时,复合层和 LZ50 钢的 $T-\theta$ 曲线呈平行四边形,接触界面处于完全滑移状态。当角位移幅值进一步增大到 2.5° 时,复合层和 LZ50 钢的 $T-\theta$ 曲线从始至终为平行四边形,此时扭动微动处于完全滑移状态。复合层和 LZ50 钢的 $T-\theta$ 曲线的形态没有差别,但复合层的摩擦扭矩值都低于基体材料,这是复合层的表面材料降低了界面的摩擦,使得复合层具有明显的减摩特性。

利用 $T-\theta$ 曲线的形状和磨痕形貌的演变过程来判

断扭动微动运行区域^[3]。当 $\theta=0.25^\circ$ 时,复合层和 LZ50 钢磨痕的黏着区随着循环次数的增加逐渐减少,此时复合层已进入混合区(如图 4(a));当 $\theta=1^\circ$ 时,复合层在 100 次循环时损伤就覆盖了整个区域(图 4(b)所示)。而 LZ50 钢在 $\theta=2.5^\circ$ 时损伤才运行于滑移区。表 2 给出了复合层和 LZ50 钢在不同角位移幅值下的扭动微动运行区域。两者相比,复合层的混合区明显减小了,复合层降低了基体材料裂纹损伤的倾向,同时,滑移区向小角位移幅值方向移动,这是由于复合层中的渗硫层具有很好的润滑效果,有利于接触界面发生相对滑动。

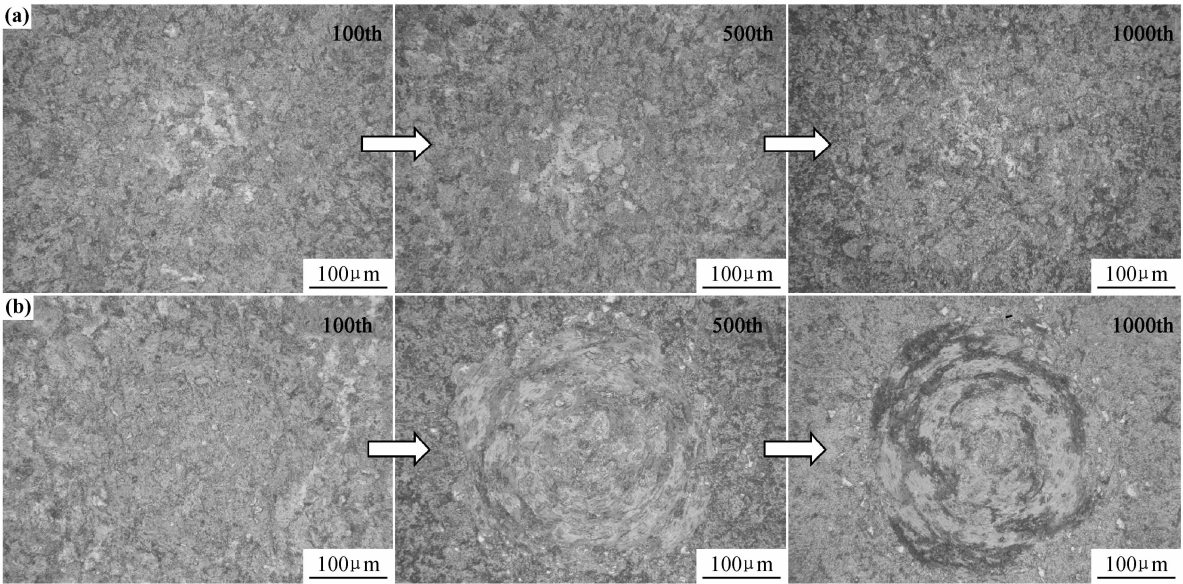


图 4 渗氮/渗硫复合层扭动微动混合区及滑移区损伤演变 (a)混合区; $\theta=0.25^\circ$;(b)滑移区; $\theta=1^\circ$
Fig. 4 Torsional fretting damage evolution of sulfide-nitrided layers in mixed fretting regime and slip regime(a) mixed fretting regime; $\theta=0.25^\circ$;(b) slip regime; $\theta=1^\circ$

表 2 不同角位移幅值下的运行区域分布

Table 2 The running regime under different angular displacement

Angular displacement amplitude/($^\circ$)	0.1	0.25	0.5	1	2.5	10
LZ50	P	M	M	M	S	S
Sulfide-nitrided layers	P	M	M	S	S	S

Note:P-partial slip regime;M-mixed fretting regime;S-slip regime

2.3 摩擦扭矩时变曲线

图 5 为渗氮/渗硫复合层和 LZ50 钢基材在 $F_n=20\text{N}$ 时,不同角位移幅值条件下的摩擦扭矩随循环周次的变化曲线。当扭动微动运行于部分滑移区时($\theta=0.1^\circ$),复合层扭矩从始至终维持在一个较低的水平;而基材的扭矩经历跑合期和上升期后达到稳定,且整个循环过程中渗氮/渗硫复合层的扭矩明显低于 LZ50 钢的扭矩。当微动运行于混合区($\theta=0.5^\circ$)时,渗氮/渗硫复合层的扭矩经过短暂的跑合后,呈上升趋势,在

100 次循环时达到最大,此后进入缓慢下降趋势;而基材的扭矩经过短暂的上升达到峰值,而后进入缓慢下降阶段,在 700 次循环后呈现上升趋势。在滑移区($\theta=2.5^\circ$)时,渗氮/渗硫复合层和 LZ50 钢都经过初始的上升阶段后达到峰值而后进入稳定阶段,且渗氮/渗硫复合层的扭矩明显低于 LZ50 钢。可见,在部分滑移区和滑移区,渗氮/渗硫复合层的扭矩始终明显低于基材的扭矩,这是由于经过复合处理,LZ50 车轴钢表面形成了渗氮/渗硫复合层,其中渗硫层中的 FeS 为

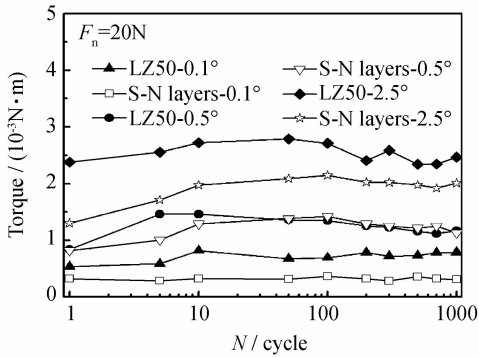


图 5 渗氮/渗硫复合层和基体的扭矩对比

Fig. 5 Comparison of the friction torque between sulfide-nitrided layers and LZ50 steel

密排六方结构,变形抗力小,易沿 $\{0001\}$ 密排面滑移,剪切强度较低,塑性流变较强,具有良好的减摩作用,

而渗氮层的硬度较高,对渗硫层起到了很好的支撑作用;而在混合区,复合层的扭矩在 10 次循环比 LZ50 钢的扭矩小,而后基本没明显变化,这有可能由于两者的接触界面状态不同造成的,LZ50 钢发生明显的磨损,产生的磨屑形成第三体起到了润滑作用,使得扭矩达到峰值后呈缓慢下降趋势;而渗氮/渗硫复合层磨损轻微,仅有粗糙峰去除,未形成有效的第三体(磨屑层)。

2.4 微动损伤分析

图 6 为 LZ50 钢和复合层在不同微动区的磨痕 OM 形貌。可见,LZ50 钢呈现圆环状的磨损,磨痕中心黏着,在接触边缘有圆环状的微动环,损伤轻微(图 6(a));而渗氮/渗硫复合层损伤轻微,仅有粗糙峰的碾压痕迹,复合层基本形貌依然存在(图 6(b))。

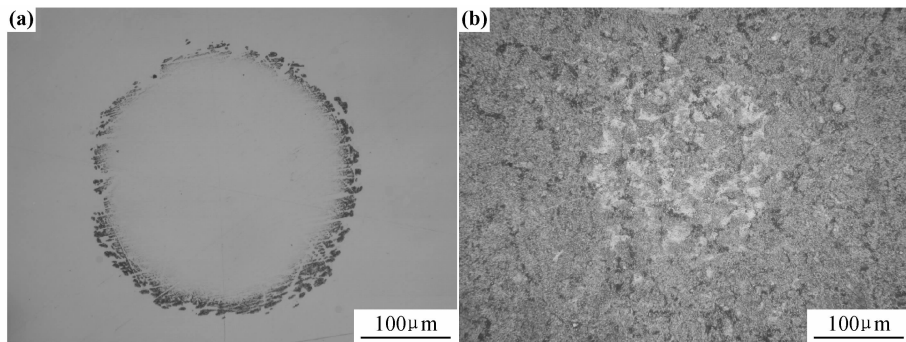


图 6 LZ50 钢和复合层在不同微动区的磨痕 OM 形貌 (a)LZ50 钢($\theta=0.1^\circ$);(b)渗氮/渗硫复合层($\theta=0.1^\circ$)

Fig. 6 OM morphologies of the wear scars of LZ50 steel and sulfide-nitrided layers in different fretting regime

(a)LZ50 steel($\theta=0.1^\circ$);(b) sulfide-nitrided layers ($\theta=0.1^\circ$)

在混合区,LZ50 钢中心黏着区几乎没有损伤,外侧圆环状的微滑区发生明显的塑性流动,材料表面有明显的犁沟痕迹,材料剥落形成剥落坑,磨屑覆盖在损伤区,磨损较严重(图 7(a))。而复合层由于表面 FeS 固体润滑层的作用,相对滑动基本覆盖整个接触区,一些区域发生了轻微的塑性流动,局部区域仅有碾压痕迹,接触界面的相对滑动去除的粗糙峰形成了磨屑散落在凹坑,渗硫层和磨屑起着双重润滑作用,使得复合层的损伤比 LZ50 钢轻微(图 7(b)),磨痕深度明显比 LZ50 钢浅(图 7(c))。EDX 显示复合层磨痕表面较磨损前氧峰显著升高,这说明氧化磨损是其失效的重要机制(图 8(a))。

在滑移区,LZ50 钢微滑区外侧由于相对滑移量较大,损伤较中心区域严重。接触区出现磨粒磨损的犁沟,外侧材料剥落产生大量的磨屑在接触区堆积压实成片状磨屑层(图 7(d))。而对于复合层(图 7(e))损伤机制类似于 LZ50 钢,但由于高硬度的渗氮层的支撑,损伤面积小于 LZ50 钢,复合层相对较低区

域仍保持复合层的原始形状,相对较高区域形成塑性流动层,在切向力的反复作用下,材料剥落碾压形成片状磨屑层(第三体)阻碍了复合层的进一步磨损,这表明复合层有更好的抗磨损性能(图 7(f));同时,对复合层接触区表面磨损前后进行 EDX(图 8(b))分析,结果表明:磨损后,接触区的硫峰和铁峰降低,氧峰升高,这说明在磨损过程中,损伤表面发生了剧烈的氧化反应。但此时的摩擦扭矩仍低于 LZ50 钢,这可能由于摩擦热使 FeS 分解形成活性硫原子,这些硫原子扩散进入基体形成新的 FeS 固体润滑剂,进一步起到了减摩作用^[8]。综上所述,复合层在滑移区的损伤机制为剥层,磨粒磨损和氧化磨损。

3 结论

(1)通过对 LZ50 车轴钢表面进行渗氮/渗硫复合处理,在车轴钢表面形成了渗氮层和渗硫层,其中渗氮层主要由 Fe_3N 和 Fe_4N 组成,厚度约为 $15\mu\text{m}$;渗硫层

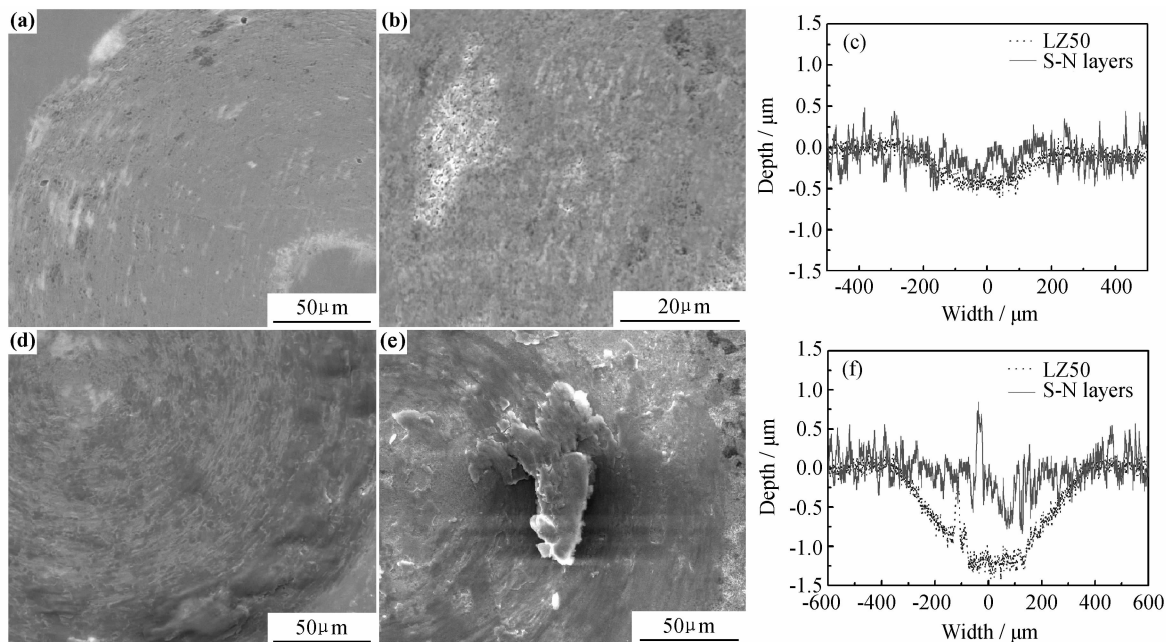


图 7 LZ50 钢和复合层在混合区和滑移区的磨痕形貌和磨痕轮廓

(a)LZ50 钢($\theta=0.5^\circ$);(b)渗氮/渗硫复合层($\theta=0.5^\circ$);(c)磨痕轮廓($\theta=0.5^\circ$);

(d)LZ50 钢($\theta=2.5^\circ$);(e)渗氮/渗硫复合层($\theta=2.5^\circ$);(f)磨痕轮廓($\theta=2.5^\circ$)

Fig. 7 SEM morphologies and 2D-profile of the wear scars of LZ50 steel and sulfide-nitrided layers in mixed fretting and slip regime

(a)LZ50 steel($\theta=0.5^\circ$);(b)sulfide-nitrided layers($\theta=0.5^\circ$);(c)2D-profile($\theta=0.5^\circ$);

(d)LZ50 steel($\theta=2.5^\circ$);(e)sulfide-nitrided layers($\theta=2.5^\circ$);(f)2D-profile($\theta=2.5^\circ$)

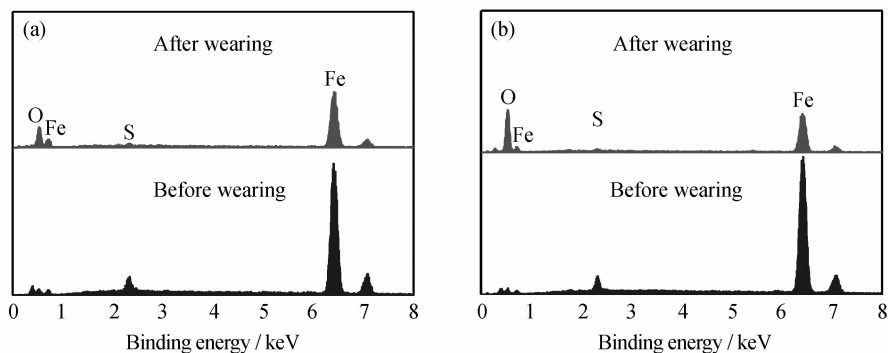


图 8 渗氮/渗硫复合层磨痕的 EDX 能谱 (a)混合区($\theta=0.5^\circ$);(b)滑移区;($\theta=2.5^\circ$)

Fig. 8 EDX of the wear scars of sulfide-nitrided layers (a)mixed fretting regime ($\theta=0.5^\circ$);(b)slip regime ($\theta=2.5^\circ$)

主要由 FeS 和 FeS₂ 组成,厚度较薄。

(2)渗氮/渗硫复合层改变了扭动微动运行区域,使混合区减少,滑移区向小位移幅值方向移动,摩擦扭矩较 LZ50 钢基体低。

(3)渗氮/渗硫复合层在部分滑移区损伤轻微,在混合区和滑移区磨损机制主要为剥层、磨粒磨损和氧化磨损,复合层具有良好的润滑减摩和抗磨作用。

参考文献

[1] 周仲荣,朱旻昊.复合微动磨损[M].上海:上海交通大学出版社,2004.
[2] CAI Z B, ZHU M H, ZHOU Z R. An experimental study tor-

sional fretting behaviors of LZ50 steel [J]. Tribology International, 2010, 43: 361—369.

[3] CAI Z B, ZHU M H, SHEN H M, et al. Torsional fretting wear behaviour of 7075 aluminium alloy in various relative humidity environments[J]. Wear, 2009, 267: 330—339
[4] 蔡振兵,朱旻昊,俞佳,等.扭动微动的模拟与试验研究[J].摩擦学学报, 2008, 28(1): 18—22.
CAI Z B, ZHU M H, YU J, et al. Experimental investigation and simulation of torsional fretting mode [J]. Tribology, 2008, 28(1): 18—22.
[5] 蔡振兵,高姗姗,何莉萍,等.聚甲基丙烯酸甲酯的扭动微动摩擦学特性研究[J].四川大学学报:工程科学版, 2009, 41(1): 96—100.

- CAI Z B, GAO S S, HE L P, et al. Torsional fretting characteristics of ploy methyl methacrylate[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(1): 96-100.
- [6] 蔡振兵, 朱旻昊, 张强, 等. 钢-钢接触的扭动微动磨损氧化行为研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 86-90.
- CAI Z B, ZHU M H, ZHANG Q, et al. Oxidation behaviors of steel-to-steel contact under torsional fretting wear[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 86-90.
- [7] 蔡振兵. 扭动微动磨损机理研究[D]. 成都: 西南交通大学博士学位论文, 2009.
- [8] ZHU M H, ZHOU Z R. An investigation of molybdenum disulfide bonded solid lubricant coatings in fretting conditions [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 141(2-3): 240-245.
- [9] 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.
- ZHU M H, XU J, ZHOU Z R. Alleviating fretting damages through surface engineering design [J]. China Surface Engineering, 2007, 20(6): 5-10.
- [10] 徐桂珍, 刘家浚, 周仲荣. 表面改性技术在微动摩擦学领域中的应用[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(6): 185-190.
- XU G Z, LIU J J, ZHOU Z R. Application of surface modification technology in fretting tribology[J]. Tribology, 1998, 18(6): 185-190.
- [11] YUE W, GAO X C, LIU Y D, et al. Tribological properties of sulfurized-nitrided layer prepared by a two-step method [J]. Vacuum, 2011, 85: 1011-1016.
- [12] ZHANG N, ZHUANG D M, LIU J J. Tribological behaviors of steel surfaces treated with ion sulphurization duplex processes [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 3173-3177.
- [13] 江志华, 佟小军, 孙枫, 等. 复合化学热处理 13Cr4Mo4Ni4VA 钢摩擦磨损性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(4): 39-44.
- JIANG Zhi-hua, TONG Xiao-jun, SUN Feng, et al. Investigation of sliding wear characteristics of vacuum-carburized, duplex-hardened and plasma-sulfurized 13Cr4Mo4Ni4VA steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(4): 39-44.
- [14] 王海斗, 庄大明, 王昆林, 等. 低温离子渗硫层的干摩擦学性能对比研究[J]. 材料热处理学报, 2002, 23(4): 30-34.
- WANG H D, ZHUANG D M, WANG K L, et al. A comparative study on wear-resistance of ion sulfide layers of different steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2002, 23(4): 30-34.
- [15] 张宁, 庄大明, 王燕华, 等. 低温离子渗硫层的结构和减摩性能[J]. 材料研究学报, 2000, 14(1): 61-65.
- ZHANG N, ZHUANG D M, WANG Y H, et al. Structure and friction-reducing property of low temperature ion sulphurization layer [J]. Chinese Journal of Material Research, 2000, 14(1): 61-65.
- [16] 张宁, 庄大明, 王燕华, 等. 低温离子渗硫层的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(4): 348-353.
- ZHANG N, ZHUANG D M, WANG Y H, et al. A study on the tribological properties of sulfide layer produced by ion sulphurization[J]. Tribology, 1999, 19(4): 348-353.
-
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51025519, 51005192); 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1178)
- 收稿日期:**2012-04-14; **修订日期:**2012-12-26
- 作者简介:**顾和根(1986—), 男, 硕士, 现从事高速铁路材料摩擦学行为研究, 联系地址: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: guhegen@126.com
- 通讯作者:**朱旻昊(1988—), 男, 教授, 博导, 主要从事表面工程及摩擦学研究, 联系地址: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: zhuminhao@swjtu.cn
-
- *****
- (上接第 65 页)
- [15] 王薇, 张琦, 黄子勋. 发动机封严涂层的研究进展[J]. 航空制造工程, 1996, (11): 3-4.
- WANG Wei, ZHANG Qi, HUANG Zi-xun, Development progress of engine abradable seal coatings[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1996, (11): 3-4.
- [16] 王磊, 马江虹, 史凤岭. 高温封严涂层的研究进展[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008, (增刊 1): 10-12.
- WANG Lei, MA Jiang-hong, SHI Feng-ling, Research progresses of high-temperature seal coating [J]. Nonferrous Metal (Smelt part), 2008, (S1): 10-12.
- [17] 杨晓剑, 田晔, 黄新春, 等. 火焰喷涂镍/石墨可磨耗封严涂层的研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008, (增刊 1): 92-94.
- YANG Xiao-jian, TIAN Ye, HUANG Xin-chun, et al. The study of Ni/C abradable seal coatings by flame spraying[J]. Nonferrous Metal Smelt part, 2008, (S1): 92-94.
- [18] XU Cun-guan, DU Ling-zhong, YANG Bin, et al. The effect of Al content on the galvanic corrosion behaviour of coupled Ni/graphite and Ni-Al coatings[J]. Corrosion Science, 2011, 53(6): 2066-2074.
- [19] 许存官, 杜令忠, 张伟刚 等. Ni/石墨封严涂层的盐雾腐蚀研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(4): 53-58.
- XU Cun-guan, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang, et al. Salt spray corrosion of Ni/Graphite abradable sealing coatings[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(4): 53-58.
- [20] 王璐. 热喷涂技术在先进航空发动机上的应用及前景展望[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008, (增刊 1): 7-9.
- WANG Lu. Application and prospect of thermal spray technology in advanced aero engines[J]. Nonferrous Metal (Smelt part), 2008, (S1): 7-9.
- [21] GOWARD G W. Progress in coatings for gas turbine airfoils[J]. Surface and Coating Technology, 1998, 108-109: 73-79.
-
- 收稿日期:**2012-02-15; **修订日期:**2012-11-26
- 作者简介:**孙杰(1971—), 男, 教授, 博士, 从事腐蚀科学与防护新技术研究、耐热耐磨特种涂层研究等, 联系地址: 沈阳市浑南新区南屏中路 6 号, 沈阳理工大学环境与化工学院(110159), E-mail: jiersun2000@yahoo.com.cn
-