doi: 10.3969/j.issn.1007–9289.2010.04.010

LZ50 钢低温离子渗硫转动微动摩擦学性能研究*

王运动 [1]，罗 军 [1]，莫继良 [1]，刘家浚 [2]，朱旻昊 [1]

（1. 西南交通大学 摩擦学研究所 牵引动力国家重点实验室，成都 610031； 2. 清华大学 机械工程学院，北京 100084）

摘 要：在 LZ50 钢表面进行低温离子渗硫处理，研究了渗硫层及 LZ50 钢基体在干态不同角位移幅值下的转动微动磨损行为。在对渗硫层及 LZ50 钢基体转动微动摩擦动力学特性分析的基础上，对其转动微动损伤行为进行了分析。结果表明：渗硫层结构主要由 FeS 和 FeS_2 相组成；渗硫层及 LZ50 钢基体的转动微动运行区域强烈依赖于转动角位移幅值，呈现部分滑移和完全滑移两个微动区域，混合区未观察到，且渗硫层未改变 LZ50 钢基体的微动运行区域；在整个部分滑移区和滑移区的跑合阶段，由于渗硫层的固体润滑作用，使摩擦因数均低于 LZ50 钢基材；渗硫层可以显著降低基材的磨损，在部分滑移区损伤轻微，在滑移区的损伤机制主要表现为剥层、磨粒磨损和氧化磨损。

关键词：摩擦磨损；转动微动；低温离子渗硫；渗硫层

中图分类号：TG156; TG115.58 文献标识码：A 文章编号：1007–9289(2010)04–0044–04

Study on Rotational Fretting Tribological Properties of LZ50 Steel by Low Temperature Ion Sulphuration

WANG Yun–dong[1], LUO Jun[1], MO Ji–liang[1], LUI Jia–jun[2], ZHU Min–hao[1]

(1. Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory, Southwest JiaoTong University, Chengdu 610031; 2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Sulfide layers were prepared on the surface of LZ50 steel by low temperature ion sulphurization ion process. Rotational fretting wear tests of the sulfide layers and its LZ50 steel substrate were carried out under different rotational angular displacement amplitudes. The frictional kinetics of rotational fretting and the characteristic of wear damage behaviors for the sulfide layers and its LZ50 steel substrate were discussed in detail. The results indicated that the sulfide layers were composed of FeS and FeS_2. The rotational fretting regimes of the sulfide layers and its LZ50 steel substrate were strongly depended on the rotational angular displacement amplitudes which presented partial slip regime or slip regime, but no mixed fretting regimes. Compared to the substrate, in the whole fretting cycles of the partial slip regime and the running–in fretting cycles of the slip regime, the friction coefficients of the sulfide layers were always lower than that of the substrate due to lubricating effect coming from the sulfide layers. The damage in the partial slip regime was very slight, but in the slip regime, the damage mechanism of the sulfide layers was mainly delamination, abrasive wear and oxidation wear.

Key words: friction wear; rotational fretting; low temperature ion sulphurization; sulfide layers

0 引 言

低温离子渗硫技术是通过在炉体内的辉光放电，被离化的硫原子与被激活的铁原子在材料表面发生反应，生成硫化物（主要是 FeS），因其具有良好的固体润滑作用，常被应用在滚动轴承、缸套、铣刀、以及各种齿轮等零件表面，以达到零件表面润滑和减少摩擦磨损的效果[1-5]。转动微动是指在交变载荷作用下，紧配合接触副发生微幅转动的相对运动。作为球/平面接触模型的 4 种基本运行模式之一[6]，其现象大量存在于机械装备和器械中，如列车的轮轴配合面、各种球窝接头和阀门的配合面，以及人材植入器械中的髋关节和膝关节杵臼状配合面等[7-9]。文中通过在 LZ50 钢表面进行低温离子渗硫处理，研究渗硫层及 LZ50 钢基体的转动微动

收稿日期：2010−04−27；修回日期：2010−06−25
基金项目：*973计划项目资助(2007CB714704)；国家自然科学基金委创新研究群材料科学基金资助项目(50821063)
作者简介：王运动(1983—)，男(汉)，安徽宿州人，硕士研究生。

摩擦磨损性能，以促进低温离子渗硫技术的发展，同时也为转动微动损伤的防护提供理论指导。

1　试验方法

1.1　渗硫层的制备及表征

低温离子渗硫层的基体为 LZ50 钢(200 $HV_{0.05}$)，试件加工成 10 mm×10 mm×30 mm。低温离子渗硫工艺为：使用 LDM2–15 型等离子化学热处理设备，外接工业氮气，渗硫介质采用固体硫源，试样码放于阴极盘。抽取真空至 10 Pa 后通入氮气进行清洁换气，清洁换气后再次抽至 10 Pa，开始通电利用辉光加热，升温电流控制在 2 A 左右，当温度升到 150 ℃，控制电压在 800 V 左右，在此温度下保温 4 h，保温过程真空度控制在 30～70 Pa，保温过程结束后随炉冷却至室温，开炉取样。制备后渗硫层表面 R_a=1.1 μm，表面硬度为 60±10 $HV_{0.1}$，涂层厚度为 2 μm。

1.2　转动微动磨损试验

转动微动磨损试验在CETR UMT–2型摩擦磨损试验机上进行(图1所示)[10]。采用球/平面接触往复转动模式。渗硫层和基体试样的对磨副均为GCr15钢球（Φ40 mm，880 $HV_{0.05}$，R_a=0.02 μm)。试验参数为：转动角速度ω为0.2°/s；转动角位移幅值θ为0.125°～1°，法向载荷F_n为20 N，循环次数N为1×10^3次；试验温度为20～25 ℃，相对湿度RH为50 %±10 %。微动试验前利用X射线衍射（XRD)分析渗硫层相结构，试验后用QUAN–TA200型扫描电子显微镜(SEM)分析磨斑形貌以及用电子能谱(EDX)分析其表面化学成分。

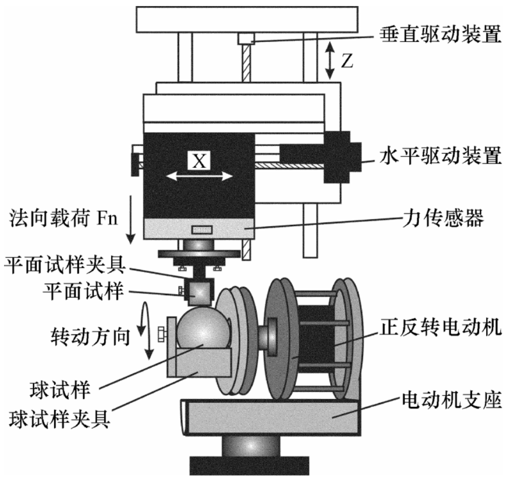


图 1 转动微动试验装置示意图

Fig.1 Schematic of the rotational fretting tester

2　试验结果及讨论

2.1　渗硫层的结构及减摩原因

图 2 为渗硫层表面 X 射线衍射谱。XRD 分析表明渗硫层主要由 FeS 和 FeS_2 组成。由 Fe–S 二元相图可知[11]，利用低温离子渗硫技术，渗硫层表面可形成 FeS，当“活性硫”饱和时还可生成 FeS_2，图中 FeS 峰较高，说明是渗层主要的硫化物相。FeS 具有密排六方结构，变形抗力小，易沿密排面滑移，塑性流变能力强，熔点高达 1100℃，因而可起到润滑减摩作用，而 FeS_2 为正交或立方结构，不具备润滑性能，故不作为固材润滑物质[2-4]。

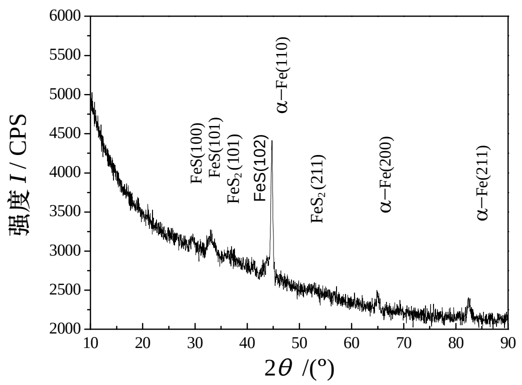


图 2 渗硫层表面 X 射线衍射谱

Fig.2 Phase structure of the sulfide layers by XRD

2.2　转动微动运行区域特性

在不同转动角位移幅值条件下，对渗硫层及LZ50钢基体进行系统的转动微动磨损试验，根据所获得的微动运行特性曲线，即摩擦力(F_t)–转动角位移幅值(θ)曲线，可以确定微动的区域特性[12]。图3为渗硫层和LZ50钢基体在不同微动区域下的

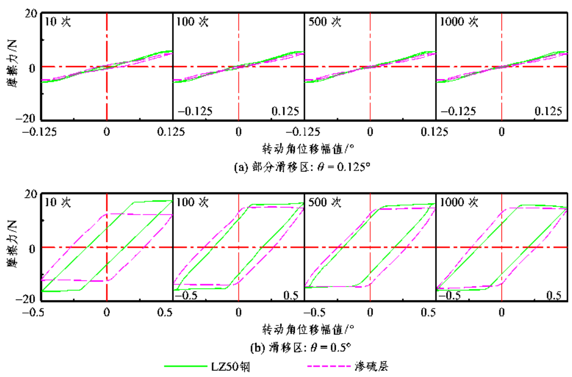


图 3 渗硫层和 LZ50 钢基体在不同微动区域下的 F_t–θ 随循环次数演变曲线

Fig.3 Evolution of the F_t–θ curves as function of the number of cycles for sulfide layer and its LZ50 steel substrate under different fretting regimes

摩擦力(F_t)–转动角位移幅值(θ)随循环次数演变曲线。在相同转动角位移幅值下，渗硫层及LZ50钢基体的F_t–θ曲线呈现出相同的形状，即部分滑移区的直线状和滑移区的平行四边形状。表1给出了渗硫层和LZ50钢基体在不同转动角位移幅值下的微动运行区域，结果表明，渗硫层和LZ50钢基体均呈现出部分滑移区和滑移区，并未见混合区，且渗硫层并未改变LZ50钢基体的微动运行区域。

表 1　不同转动角位移幅值下的微动区域分布

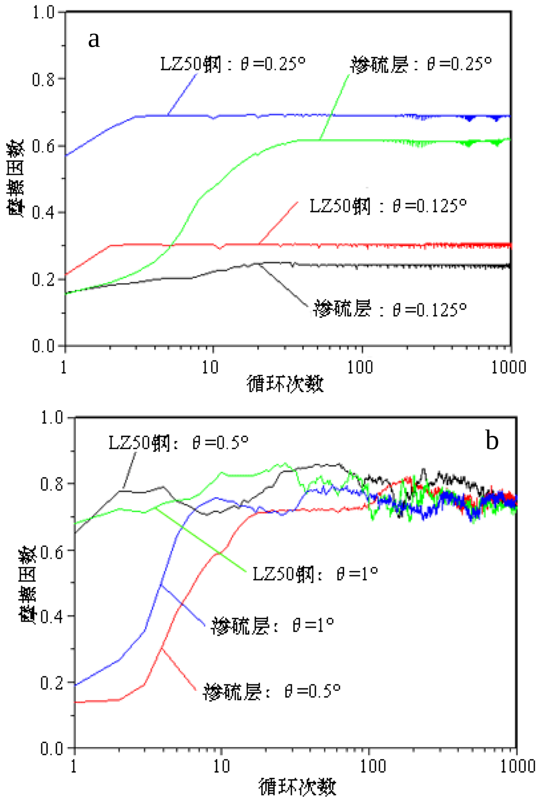
Table 1　Distribution of fretting regimes under different angular displacement amplitudes

转动角位移幅值/°	0.125	0.25	0.5	1
LZ50 钢	*P*	*P*	*S*	*S*
渗硫层	*P*	*P*	*S*	*S*

注：*P*为部分滑移区（partial slip regime）；*S*为滑移区（slip regime）

2.3　摩擦因数

在不同微动区域，不同转动角位移幅值条件下，渗硫层及LZ50钢基体摩擦因数随循环周次的变化关系曲线如图4所示。在部分滑移区渗硫层及



(a) 部分滑移区　(b) 滑移区

图 4　不同微动区域渗硫层及 LZ50 钢基体的摩擦因数对比

Fig.4 Comparisons of the coefficient of friction between the sulfide layer and its substrate in different fretting regimes

LZ50钢的摩擦因数曲线走势相同(图4(a))，均是在经历较少循环次数后达到最大值，之后保持稳定，曲线近似一条水平直线，且随着转动角位移幅值的增加，摩擦因数也随之增大，渗硫层的摩擦因数始终低于LZ50钢基体，说明渗硫层具有固体润滑效果；而在滑移区(图4(b))，摩擦因数在较长的循环次数后爬升到最大值，随后呈现起伏波动，且渗硫层的摩擦因数在跑合阶段远远低于LZ50钢基体，循环末期不同转动角位移幅值下的渗硫层与LZ50钢基体的摩擦因数趋于一致，说明在滑移区，转动角位移幅值的变化对渗硫层及LZ50钢基体的摩擦因数影响不大，这可能是滑移区的磨屑无法排出接触区，摩擦因数由三体接触控制。分析显示，在整个部分滑移区和滑移区的跑合阶段，渗硫层的摩擦因数均低于LZ50钢基体，说明渗硫层在一定工况下表现出良好的润滑减摩作用。

2.4　微动损伤分析

图5为渗硫层及LZ50钢基体在部分滑移区的磨痕形貌。可见，LZ50钢磨痕呈现出部分滑移区的典型圆环状特征，接触区域由两部分组成，即接触中

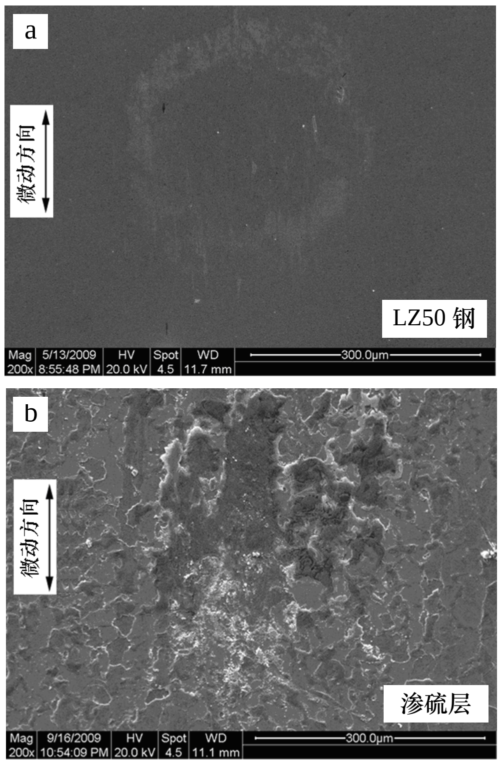


图 5　渗硫层及 LZ50 钢基体在部分滑移区的 SEM 磨痕形貌（θ=0.125°）

Fig.5　SEM morphologies of the wear scars of the sulfide layer and LZ50 steel substrate in partial slip regime (θ=0.125°)

心的黏着区，没有发现磨屑以及明显的损伤痕迹，而在接触边缘有规则的圆环状微滑区，出现轻微损伤和极少量磨屑(图5(a))；而渗硫层磨痕表面呈现碾压状态，且伴随着轻微剥落，整体损伤轻微(图5(b))。

图6为渗硫层及LZ50钢基体在滑移区的磨痕形貌。可见，LZ50钢磨损加剧，磨损颗粒散落在磨痕区域及周边，厚厚的磨屑堆积在磨痕两端，而磨痕中心有明显被碾压形成磨屑层（三体层）和犁沟（图6(a))；对比之下，渗硫层的磨损表面损伤特征相似，但由于渗硫层具有固体润滑效果，磨屑的排出相对基材更容易，磨斑形状被拉长，磨屑层的程度也弱于基材（图6(b))；同时，对渗硫层磨痕表面磨损前后进行EDX分析，磨损后硫峰较低，而氧峰较高，说明在长时间磨损过程中，接触界面发生了复杂的物理化学变化，硫化物因受热而氧化，此时渗硫层遭到破坏，摩擦因数也随之上升，渗硫层的减摩作用降低((图6(c))。根据磨痕损伤特征，滑移区的磨损机制可归纳为剥层、磨粒磨损和氧化磨损。上述分析表明，在LZ50钢表面进行低温离子渗硫处理，在一定工况下可达到表面减摩防护作用。

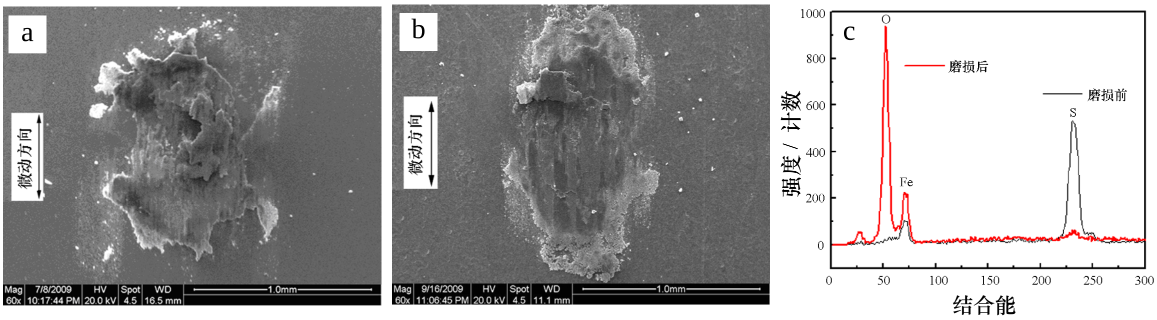


图 6　LZ50 钢基体(a)及渗硫层(b)在滑移区的 SEM 磨痕形貌: θ=0.5°和渗硫层磨痕表面磨损前后 EDX (c)

Fig.6 SEM morphologies of the wear scars of the sulfide layer (b) and LZ50 steel substrate (a) in slip regime: θ=0.5° and EDX of the sulfide layers under before and after friction wear (c)

3　结　论

（1）渗硫层结构主要由FeS和FeS_2组成，FeS起减摩作用。

（2）渗硫层及LZ50钢基体的微动运行区域强烈依赖于转动角位移幅值，呈现部分滑移区和滑移区两个微动区域，未见混合区，且渗硫层未改变基体的微动运行区域。

（3）渗硫层的摩擦因数在整个部分滑移区和滑移区的跑合阶段，均低于LZ50钢基体。

（4）渗硫层在部分滑移区损伤轻微，在滑移区有较好的排屑作用，其磨损机制主要表现为剥层、磨粒磨损和氧化磨损。

参考文献：

[1] 梁 娜，陈敬超. FeS 材料的制备、性能与应用 [J]. 润滑与密封, 2006, 10: 178-181.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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, (4): 348-353.

[5] 赵军军，张 平，韩文政，等. 低温离子渗硫工艺优化 [J]. 中国表面工程, 2001, (2): 29-32.

[6] 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.

[7] 刘 伟，何庆夏，陈善忠. 车轴修复用热喷涂层对微动损伤行为的影响 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 436-438.

[8] 王成焘，张文光，陈 铭. 摩擦学与生命质量工程前沿 [M]. 摩擦学科学与工程前沿(Ⅱ)，谢友柏主编，高等教育出版社, 2005: 74-93.

[9] Viktor Gerdun, Tomaž Sedmak, Viktor Šinkovec.et al. Failures of bearings and axles in railway freight wagons [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14: 884-894.

[10] 莫继良，朱旻昊，廖正君，周仲荣. 转动微动的模拟与试验研究 [J]. 中国机械工程, 2008.

[11] 洪班德，姚忠凯. 化学热处理 [M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社, 1981: 125-129.

[12] 周仲荣, Vincent L. 微动磨损 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

作者地址：成都市西南交通大学摩擦学研究所　610031
Tel：159 8201 3812　　E–mail：wyd200828@126.com