

铁基金属摩擦副表面自修复层分析

税国红¹, 杨屹², 吴明霞², 杨刚², 王立波², 黄渊²

(四川大学 制造科学与工程学院, 成都 610065)

摘要: **目的** 分析不同工况对表层自修复层的影响, 探究羟基硅酸镁纳米管在摩擦磨损过程中的作用机理。**方法** 以人工合成的羟基硅酸镁纳米管 $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 为自修复添加剂, 在油润滑实验条件下进行铁基金属摩擦副摩擦磨损实验。利用 SEM、EDS、激光拉曼光谱仪及显微维氏硬度计分别对自修复层厚度、自修复层元素组成、自修复层表面结构及自修复层表面显微硬度进行表征。**结果** 在转速为 1000、2000 r/min 时, 载荷为 200、300、400 N 的实验条件下, 表层均有自修复层的生成。在转速为 2000 r/min、载荷为 400 N 时, 表层自修复层的厚度最大。实验过程中, 摩擦副得到修复, 出现负磨损, 自修复层的主要元素为 C、O、Fe 等。高转速载荷工况下, 其摩擦系数相比基础油下降 0.008。自修复层为类金刚石结构, 其平均硬度值在 673HV 左右, 为基体的 1.87 倍。**结论** 羟基硅酸镁、基础油及磨屑三者共同作用, 在高速摩擦作用下合金化, 形成高硬度的类金刚石结构修复层, 能有效保护摩擦副工作面, 并延长寿命。加大实验载荷与实验转速, 能加速自修复层的形成, 实现摩擦副负磨损, 并降低摩擦系数。

关键词: 羟基硅酸镁; 摩擦磨损; 自修复; 显微硬度; 类金刚石; 摩擦系数

中图分类号: TG115.58 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)08-0139-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.020

Self-repairing Layers Analysis on the Surface of Iron-based Metal Friction Pairs

SHUI Guo-hong¹, YANG Yi², WU Ming-xia², YANG Gang², WANG Li-bo², HUANG Yuan²

(School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the effects of different working conditions on superficial self-repairing layers, and study the mechanism of action of magnesium silicate hydroxide nanotube in the process of friction and wear. With artificially synthesized magnesium silicate hydroxide nanotube $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ as a self-repairing additive, friction and wear test was applied to an iron-based metal friction pair under the condition of oil lubrication. Thickness, elemental composition, surface structure and surface microhardness of the self-repairing layer was characterized by SEM, EDS, laser Raman spectrometer and micro Vickers, respectively. The self-repairing layers were detected at the revolving speed of 1000 r/min and 2000 r/min, and the load of 200 N, 300 N and 400 N. The thickest self-repairing layer was obtained at the revolving speed of 2000 r/min and load of 400 N. Negative wear happened to repaired friction pairs during the experiment, and the self-repairing layers were mainly composed of such elements as C, O, Fe. Compared with base oil experiment, friction coefficient at high speed and load decreased by 0.008. The self-repairing layers were diamond-like structures, and average hardness of the self-repairing layers was about 673HV, which was 1.87 times that of substrate. Alloyed repair layers of high hardness diamond-like structure take shape under the com-

收稿日期: 2018-03-21; 修订日期: 2018-06-15

Received: 2018-03-21; Revised: 2018-06-15

作者简介: 税国红 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: SHUI Guo-hong (1994—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 杨屹 (1959—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为再制造工程。

Corresponding author: YANG Yi (1959—), Male, Doctor, Professor, Research focus: remanufacturing engineering.

bined action of magnesium silicate hydroxide, base oil and ablation as well as the effect of high energy friction, which can effectively protect working face of friction pair and prolong its service life. By increasing experimental load and revolving speed, the formation of self-repairing layer can be accelerated, negative wear of friction pair can be realized and friction coefficient can be reduced.

KEY WORDS: magnesium silicate hydroxide; friction and wear; self-repairing; microhardness; diamond-like; friction coefficient

从工业设备大量被人类使用时起,磨损一直是工业界的一个大难题,磨损会造成工业零件失效,由此所衍生出的钢材损耗、零件再制造、设备拆机维护、零件运输、零件储存以及由于停机而造成的生产损失等费用不容忽视。伴随着工业机械结构的不断发展,机械运转的条件日益苛刻,对机械减摩抗磨的性能要求也越来越高^[1]。前苏联时期,乌克兰某地质部门发现特定工作于某岩石层处的钻头相较于其他地域的钻头,磨损量大幅度降低,甚至出现了无磨损状态。对此处岩层进行分析检验后发现是一处蛇纹石矿物岩,它的主要成分为羟基硅酸镁,由此各国学者开始了对羟基硅酸镁的减摩抗磨研究^[2-3]。它的1:1型层状结构为摩擦副带来了优异的减摩性能^[4];它不与基础油发生反应,不改变油品的性质;它是在摩擦副工作过程中直接在线生成一层保护层,此保护层具有硬度高及粗糙度低的优点,能够降低工作面摩擦系数^[5-8]。到目前为止,关于它的作用机理主要有吸附铺展机制、表层氧化机制、微粒沉积机制、化学转移机制等,它们共同或单一地在某特定实验条件下进行作用,达到自修复的效果^[9]。从天然蛇纹石矿物中提取有效成分羟基硅酸镁来进行不同添加量实验,是大多数学者普遍采用的实验方法,在一定添加量范围内,蛇纹石微粒添加剂表现出了优异的减摩抗磨性能^[10-11],得到了很大的认可。

文中通过将自主研发水热合成的羟基硅酸镁纳米管作为自修复添加剂,在油润滑的实验条件下对金属摩擦副在摩擦磨损过程中所形成的自修复层进行一系列的分析,分析自修复层在不同试验工况下的变化,推断其作用机理。该研究有效地避免了天然蛇纹石矿物中杂质成分对实验结果的影响,清晰地表征了自修复层的厚度,并且测试了未见报道的摩擦磨损实验过程中摩擦副的质量变化,以期对现有的作用机理做出佐证,并进行延伸。

1 实验

1.1 摩擦副及试验机

实验使用的摩擦副为止推圈摩擦副,上下摩擦副材料为45#钢,其标准化学成分(质量分数计)主要为:C 0.42%~0.50%, Mn 0.50%~0.80%, Si 0.17%~0.37%, Fe 98.33%~98.91%^[12],两配对摩擦副均经过淬火并高温回火处理,硬度值在36HRC左右。如图

1所示,上摩擦副下端面为一个圆环面,内外直径分别为42、50 mm,下摩擦副内外直径分别为38、54 mm,表观接触面积为577.76 mm²。上下两摩擦副材料及热处理过程均相同,并处于相同的实验工况,两配对摩擦副的一系列分析及变化趋势均相同。所使用的摩擦磨损试验机为MVF-1C型双向立式万能摩擦磨损试验机,试验力工作范围为10~1000 N,无级变速系统范围为1~2000 r/min。

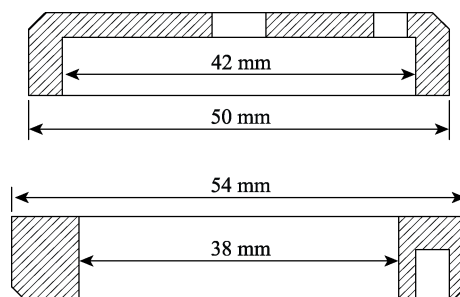


图1 摩擦副

Fig.1 Schematic diagram of friction pair

1.2 润滑油添加剂及实验用油

人工水热合成羟基硅酸镁(理想化学式为: $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)的合成方法:将4 g MgO、4 g SiO_2 及3 g Na(OH)加入到600 mL蒸馏水中,在高压反应釜中恒温280℃静态反应60 h,得到纯净的羟基硅酸镁纳米管^[13]。图2为羟基硅酸镁纳米管透射电镜图,其形状为管状结构。图3为羟基硅酸镁纳米管的XRD图,可以看出,羟基硅酸镁结晶良好,纯度高。在加入基础油之前,对羟基硅酸镁进行表面改性处理:将含有质量分数为25%油酸的羟基硅酸镁放入球磨机中,以300 r/min转速球磨8 h^[14-16]。试验中所使用的

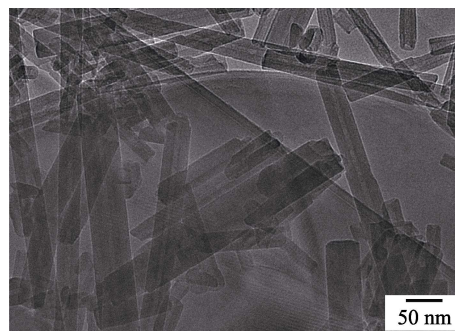


图2 羟基硅酸镁纳米管透射电镜图

Fig.2 TEM image of $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ nanotube

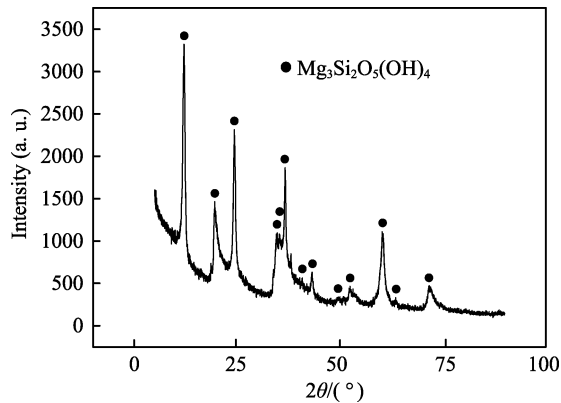


图 3 羟基硅酸镁纳米管 XRD 图
Fig.3 XRD image of $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ nanotube

基础油为 32#机械油，几乎没有或很少含有其他添加剂，可以避免基础油对实验结果的影响^[17]。最后将改性过后的羟基硅酸镁按 3 g/L（最佳成膜效果）的添加量加入到机械油中，超声分散 1 h 得到实验用油。

1.3 实验过程及参数设置

实验一共有 6 组，实验参数见表 1。实验过程中，将摩擦副放入酒精溶液中超声清洗 30 min 并干燥，利用精度为 0.1 mg 的电子分析天平测量摩擦副质量的变化。安装好摩擦副并设置完实验参数后，将超声分散后的含改性羟基硅酸镁的实验用油加入到试验机油池中，随后开始实验。实验后利用电火花线切割将上摩擦副切开，将剖面进行金相制样操作后用 5% 硝酸酒精溶液腐蚀，以便观察自修复层形貌。

表 1 试验参数
Tab.1 Experimental parameters

Experimental number	Time/h	Speed/(r·min ⁻¹)	Load/N
1	35	1000	200
2	35	1000	300
3	35	1000	400
4	35	2000	200
5	35	2000	300
6	35	2000	400

1.4 自修复层表征与分析

利用 JSM-7500F 型（日本电子株式会社、日本）扫描电子显微镜表征上摩擦副剖面自修复层形貌及元素种类含量；利用 ESJ200-4B 电子分析天平（沈阳龙腾、沈阳）表征上摩擦副在实验过程中的质量变化；利用 LabRAM HR 激光拉曼光谱仪（法国 HORIBA、法国）表征自修复层结构，激光器波长为 532 nm，波数范围为 500~2000 cm⁻¹；利用 HVS-1000 数显显微维氏硬度计（得川试验仪器，莱州）测量自修复层硬度值，加载载荷为 50 g，保载时间为 15 s；利用 Asylum-Research 原子力显微镜表征表面三维形貌，扫描范围为 50 μm×50 μm，扫描频率为 1 Hz。

2 实验结果与分析

2.1 摩擦表面自修复层扫描电镜及能谱分析

图 4 和图 5 为上摩擦副剖面自修复层 SEM 图片，可以看出，在转速为 1000 r/min 和 2000 r/min 时，在剖面均观察到了明显的自修复层^[18]。自修复层与基体形貌特征区别明显，6 组实验自修复层厚度分别为 7.5、6.1、8.4、9.5、13.3、15.5 μm。总体来说，随着实验条件的加剧，厚度呈增加趋势。经过金相制样腐蚀后，自修复层未受腐蚀液影响，而与图中基体部分腐蚀痕迹明显区别开来，显现出强于基体的耐腐蚀能力。宏观光滑的金属表面在微观状态下是由一系列不规则的凸峰凹谷组成，摩擦副的接触只发生在这些不连续的凸峰上，使得此处压强很大^[19]。凸峰由于局部大载荷作用而突然断裂产生磨屑，同时产生点状高温热源，添加剂分解产物配合基础油裂解碳及铁氧体颗粒在高温高压作用下于金属表面进行机械合金化，此结构层不断生长，最终实现表面修复作用^[20]。随着实验载荷及转速的增加，摩擦副之间的机械摩擦及化学摩擦作用都更加剧烈，用于激活磨屑、添加剂微粒及基础油等之间物质交换的能量也更充足，使得所形成的自修复层厚度增加。

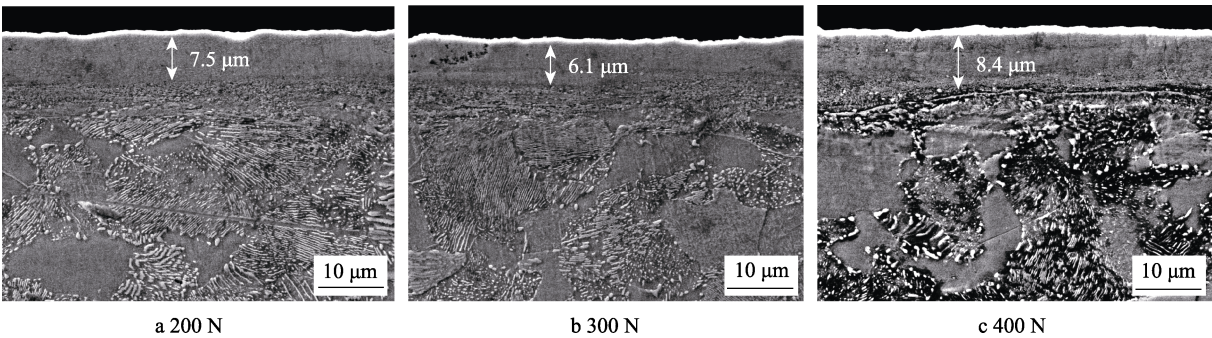


图 4 1000 r/min 及不同载荷下 45#钢摩擦副剖面形貌图
Fig.4 Sectional morphology of 45# steel friction pair at 1000 r/min and different load

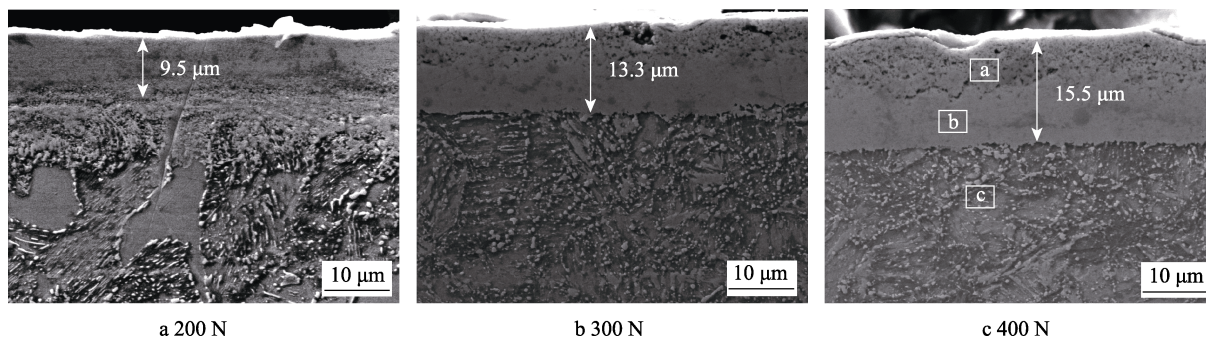


图5 2000 r/min 及不同载荷下 45[#]钢摩擦副剖面形貌图
Fig.5 Sectional morphology of 45[#] steel friction pair at 2000 r/min and different load

选择实验转速为 2000 r/min、载荷为 400 N 的第 6 组摩擦副来进行能谱分析。图 5c 中自修复层上半部分存在一些微小凹孔,因此将自修复层上下两部分均进行了能谱分析。图 6a、b、c 与图 5c 中 a、b、c 分别对应,可以看出,自修复层上下两部分元素种类及含量区别不大,均主要由大量的碳、铁及氧元素组成,同时含有少量的锰及硅元素,且自修复层 b 区域还检测到了少量的铬元素。碳元素主要来自于基础油中碳的裂解^[21],氧元素来源于羟基硅酸镁解理产生的含氧颗粒物,以及分解出的原子态氧在高能摩擦作用下形成的铁氧化物前驱物,它们是自修复层的组成物质。摩擦副接触面之间产生的磨屑经破碎、挤压及化学反应等作用后作为修复层的组分之一,经由合金化形成自修复层,所以能够检测到大量的铁元素及少量的锰和铬元素。铬元素在自修复层中呈不均匀分布,不是自修复层必需物质。由于磨屑及羟基硅酸镁中均含有硅元素,所以尚不能确定自修复层中硅元素的来源。不同学者所测试出的自修复层的元素种类与含量也不尽相同,对于羟基硅酸镁特征元素 Mg、Si 是否是自修复层必需元素,现在尚无定论^[22-24]。高温会使羟基硅酸镁脱失层间水及结构水,且脱水温度会随着应力的增加而大大降低,在高转速载荷工况下,脱水过程更易进行。这些层间水及结构水在成膜过程中由于闪温作用而汽化,使得自修复层中部分区域存在着微孔^[25]。

2.2 摩擦系数及磨损量变化分析

由于在实验过程中对摩擦副进行了拆卸称量,故摩擦系数均只测试了前 5 h。图 7 中下三角图标、方形图标、上三角图标及圆形图标曲线分别为 1000 r/min、200 N 下添加剂组(第 1 组);2000 r/min、400 N 下添加剂组(第 6 组);1000 r/min、200 N 下基础油组及 2000 r/min、400 N 下基础油组。经过 1 h 的跑合,各组均基本上达到了稳定状态。在不同工况下,基础油组摩擦系数相差不大,均稳定在 0.028 左右;而第 1 组摩擦系数却明显高于基础油组,达到了 0.04;第 6 组摩擦系数为 0.02。根据经典摩擦定律,45[#]钢作为一种金属,摩擦系数与表观接触面积及滑

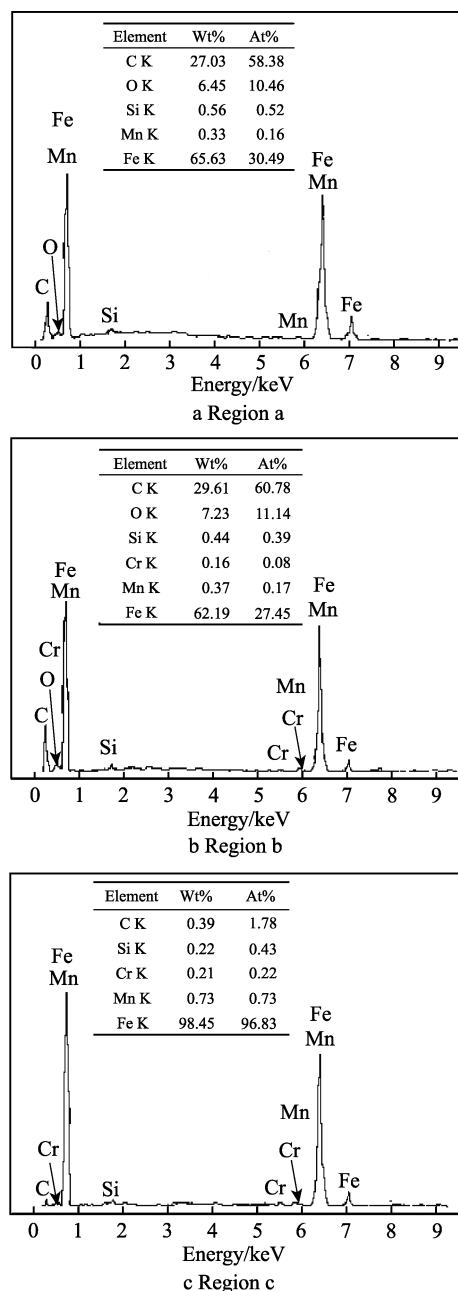


图6 2000 r/min 及 400 N 条件下 45[#]钢摩擦副
基体与自修复层能谱分析
Fig.6 Energy spectrum analysis on substrate and self-repairing
layer of 45[#] steel friction pair at 2000 r/min and 400 N

动速度无关^[26]。从实验结果来看, 加入添加剂后, 能够从低转速载荷工况下较高的摩擦系数状态转变为高转速载荷工况下较低的摩擦系数状态, 说明摩擦系数的降低一方面是得益于羟基硅酸镁优异的层状结构, 一方面也可能和表面粗糙度降低有关。从图 8 的原子力显微镜分析可以看出, 实验后表面凸峰与凹谷大大减小, 这印证了表面粗糙度的降低。摩擦系数与运行工况有关, 在初期添加剂微粒作为磨粒产生犁沟效应, 使摩擦副震动加大, 摩擦系数起伏剧烈, 大于这一时期的基础油摩擦系数。若是属于高转速载荷

工况, 能够提早进入表面修复状态, 使摩擦系数随后降低; 若是属于相反工况, 摩擦副表面会处于较长时间的磨损状态, 但是能够预测随着时间的延长, 待摩擦副整体进入修复状态后, 摩擦系数也可以进一步降低。

由图 9 及图 10 可知, 上摩擦副在实验过程中均出现了磨损, 各组在实验过程中最大磨损量分别为 58、49.3、48.7、38、37.1、16 mg, 最大磨损量逐渐降低。在实验前 10 h 左右, 磨损过程均占主导。除前两实验组外, 其余组在之后的过程中, 修复过程整体大于磨损过程。转速为 2000 r/min、载荷为 400 N 的第 6 组摩擦副最终实验后的质量大于实验前, 实现

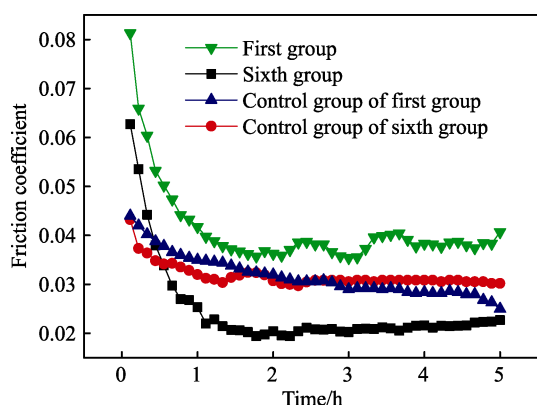


图 7 1000 r/min、200 N 及 2000 r/min、400 N 条件下添加剂与对照组的摩擦系数变化曲线

Fig.7 Friction coefficient variation curves of additive and control group at 1000 r/min, 200 N and 2000 r/min, 400 N

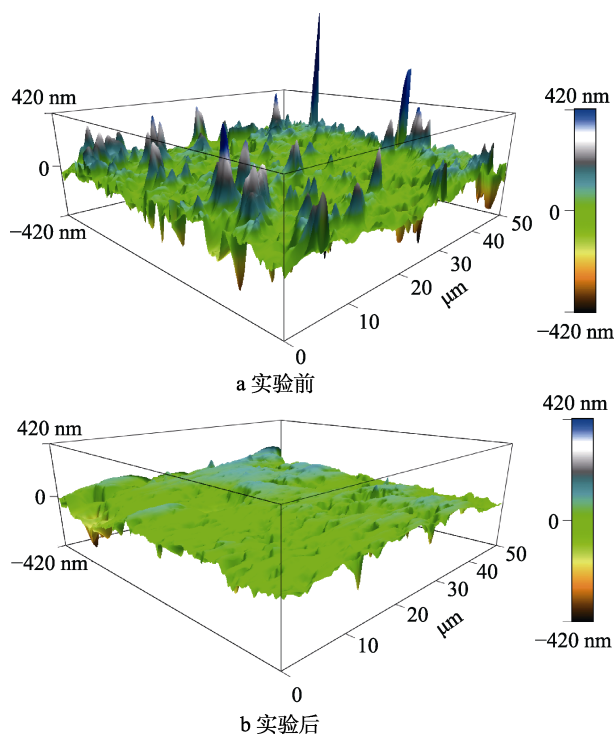


图 8 2000 r/min、400 N 及含添加剂条件下实验前后表面三维形貌

Fig.8 Surface three-dimensional morphology at 2000 r/min, 400 N under additive conditions: a) the surface before the experiment; b) the surface after the experiment

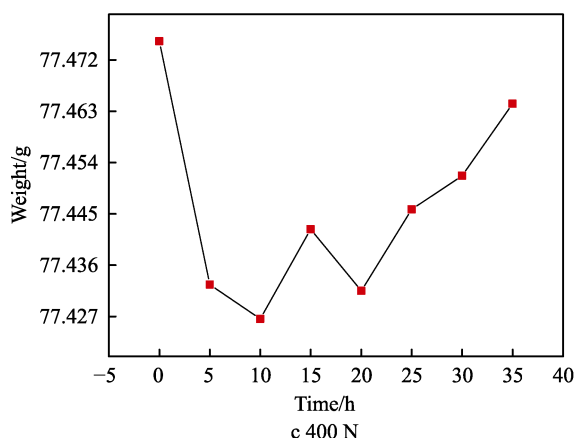
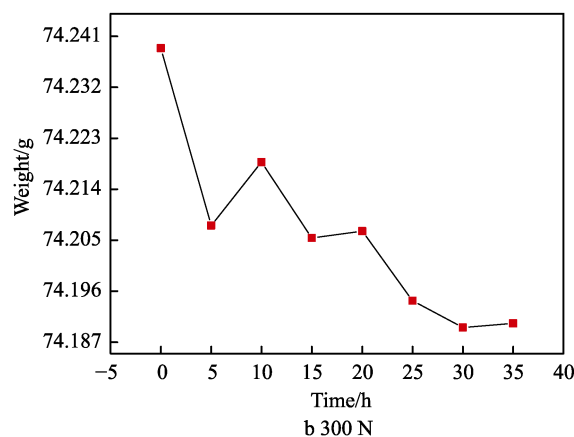
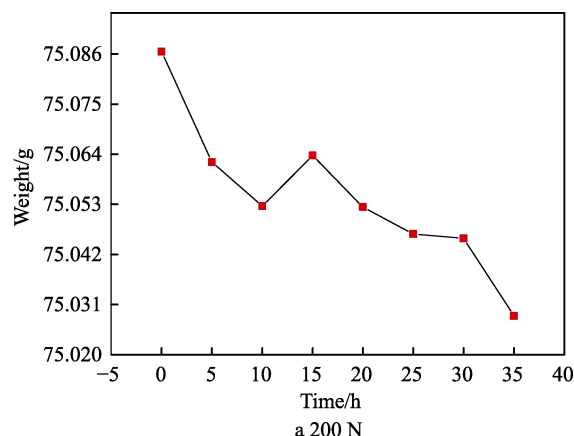


图 9 1000 r/min 及不同载荷下 45# 钢摩擦副质量变化曲线
Fig.9 Weight variation curves of 45# steel friction pair at 1000 r/min and different load

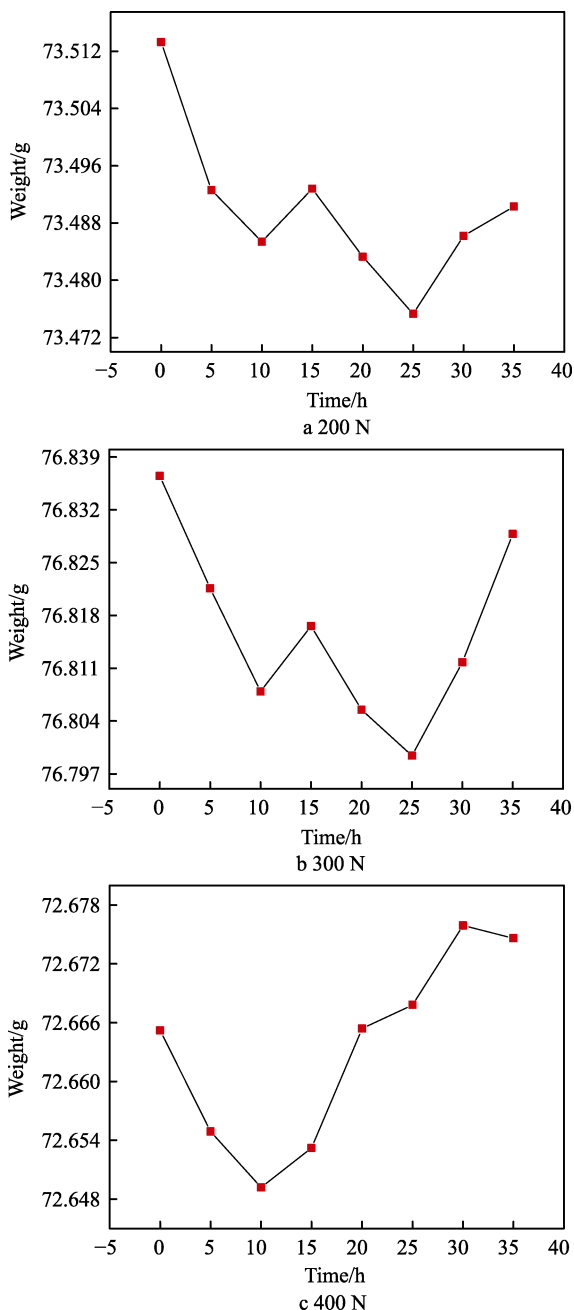


图 10 2000 r/min 及不同载荷下 45#钢摩擦副质量变化曲线
Fig.10 Weight variation curves of 45# steel friction pair at 2000 r/min and different load

了负磨损。根据羟基硅酸镁的作用机理,其在摩擦过程中产生的铁氧化物颗粒对被活性氧氧化的微凸体以及摩擦副表面凹坑进行抛光清洗,此过程导致摩擦副被磨损。经过抛光清洗后的高能金属表面通过合金化作用生成自修复层,使摩擦副质量增加。磨损与修复同时进行,增大实验载荷及转速,摩擦副修复效果也随之增强,让摩擦副更早进入宏观修复状态。

2.3 摩擦表面自修复层拉曼光谱分析及硬度测试

分别对转速 1000 r/min、载荷 200 N 的第 1 组摩擦副及转速 2000 r/min、载荷 400 N 的第 6 组摩擦副

工作表面进行拉曼光谱分析,如图 11 所示,在图谱中均出现了 3 个峰。669 cm^{-1} 峰(1 组)与 658 cm^{-1} 峰(6 组)对应 Fe_3O_4 ; 1350 cm^{-1} 峰(1 组)与 1328 cm^{-1} 峰(6 组)对应碳 sp^3 键(D 线,无序峰),接近立方晶系单晶金刚石拉曼峰 1332 cm^{-1} ; 1590 cm^{-1} 峰(1 组)与 1596 cm^{-1} 峰(6 组)对应碳 sp^2 键(G 线,有序峰),此处对应石墨单晶峰^[27]。由此可以确定,选取的第 1 组与第 6 组摩擦副在摩擦表面选定的检测区域内均发现了类金刚石结构。摩擦磨损过程中,凸峰接触应力可达 3.6 GPa 以上,瞬间高温热源温度可达 800 $^{\circ}\text{C}$ 以上。此时的动力学及热力学条件使裂解碳处于 Bundy 碳相图^[28]的金刚石动力学稳定区,碳结构将同时存在 sp^3 及 sp^2 键。随着试验的进行,随后产生能使碳达到金刚石稳定区状态的瞬间高压,将会促使碳中 sp^3 键的增加^[29]。

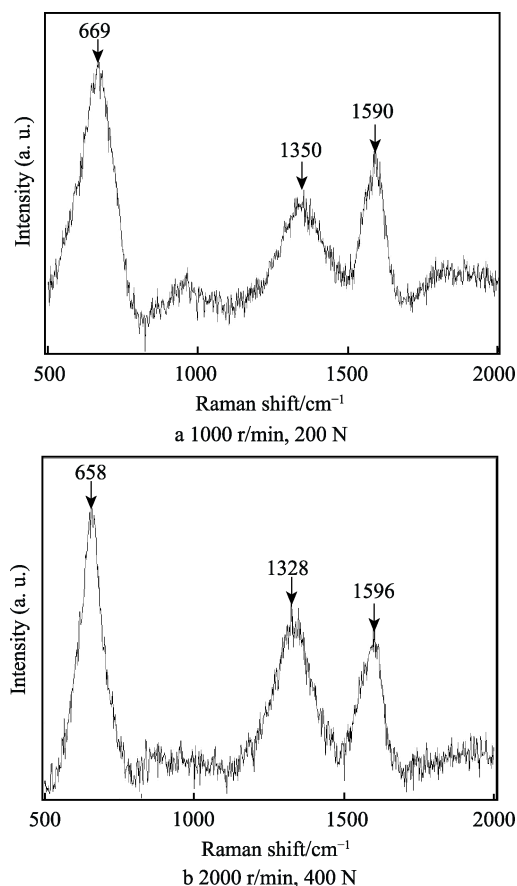


图 11 45#钢摩擦副自修复层拉曼光谱图
Fig.11 Raman spectrogram of self-repairing layer of 45# steel friction pair

图 12a 为含添加剂实验组,图 12b 为不含添加剂对照组, A 代表摩擦副基体硬度值, B 代表相应的摩擦副工作面(指摩擦副的工作表面)硬度值。可以看出,摩擦副基体硬度值均在 359.7HV 左右,含添加剂组自修复层表面硬度值平均在 673.8HV 左右,不含添加剂实验组工作面(加工硬化后的工作表面)硬度值在 495.5HV 左右。673.8HV 对应的压痕对角线长度为

11.73 μm , 对应的深度为 1.68 μm , 远小于修复层厚度, 硬度测试准确可靠。结合前面的拉曼光谱结构分析, 说明经由羟基硅酸镁处理过后, 表面自修复层为类金刚石结构, 表面生成的自修复层硬度高, 具有很高的耐磨性。

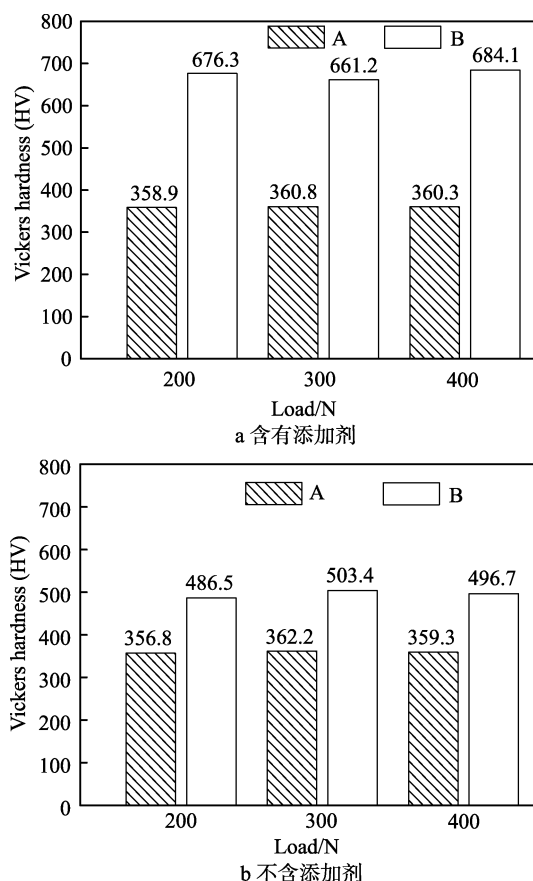


图 12 2000 r/min 转速及不同载荷下
45#钢摩擦副工作面显微维氏硬度值

Fig.12 Micro Vickers hardness of working face of 45# steel friction pair at 2000 r/min and different load: a) Containing additive; b) Containing no additive

3 结论

1) 在其他实验条件不变的情况下, 加大实验载荷和转速, 使得摩擦副之间的机械摩擦作用及化学摩擦作用更加剧烈, 形成的自修复层厚度随之增加。当修复效果大于磨损效果时, 摩擦副整体表现出质量增加的现象; 当磨损大于修复时, 摩擦副整体质量降低。

2) 自修复层的主要元素为 C、O、Fe 及少量 Mn、Si 等元素, Cr 元素不是自修复层必需元素, 其结构为类金刚石结构。到目前为止还不能确定 Mg、Si 元素是否是自修复层必需元素。

3) 添加剂的存在使摩擦系数和运行工况密切相关, 高转速载荷工况能使表面修复效果加剧, 更早进入平稳低摩擦系数状态。

4) 自修复层硬度平均值在 673.8HV 左右, 是基体值的 1.87 倍。

参考文献:

- [1] 刘谦, 徐滨士, 许一, 等. 摩擦磨损自修复润滑油添加剂研究进展[J]. 润滑与密封, 2006(2): 151-152.
LIU Qian, XU Bin-shi, XU Yi, et al. Research progress of lubricant additives of wear-self-repair[J]. Lubrication engineering, 2006(2): 151-152.
- [2] QI X W. Characterization and auto-restoration mechanism of nanoscale serpentine powder as lubricating oil additive under high temperature[J]. Tribology international, 2011, 44(7/8): 805-810.
- [3] WANG F. Research on microstructure of the auto-restoration layer of worn surface of metals[J]. Materials science and engineering, 2005, 399(1/2): 271-275.
- [4] JIN Y S, LI S H, ZHANG Z Y, et al. In Situ mechanochemical reconditioning of worn ferrous surfaces[J]. Tribology international, 2004, 37(7): 561-567.
- [5] LEONTEV L B, SHAPKIN N P, LEONTEV A L, et al. Effect of the composition of mineral and organomineral mixtures on the tribological properties of friction pairs[J]. Inorganic materials, 2013, 49(9): 894-898.
- [6] 莫易敏, 邹岚, 赵源. 磨损自补偿的摩擦学原理[J]. 润滑与密封, 1998(5): 32-34.
MO Yi-min, ZOU Lan, ZHAO Yuan. Tribological principle of wear-self-compensation[J]. Lubrication engineering, 1998(5): 32-34.
- [7] 许一, 史佩京, 徐滨士, 等. 层状硅酸盐自修复材料的摩擦学性能研究[J]. 中国表面工程, 2009, 22(3): 58-61.
XU Yi, SHI Pei-jing, XU Bin-shi, et al. Study on tribological properties of stratified silicate self-repair materials[J]. China surface engineering, 2009, 22(3): 58-61.
- [8] YU Y, GU J, KANG F, et al. Surface restoration induced by lubricant additive of natural minerals[J]. Applied surface science, 2007, 253(18): 7549-7553.
- [9] 刘晴, 常秋英, 金元生, 等. 羟基硅酸盐作为自修复润滑油添加剂的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 840-844.
LIU Qing, CHANG Qiu-ying, JING Yuan-sheng, et al. Research progress of hydroxyl silicate as self-repairing lubricating oil additive[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2011, 30(4): 840-844.
- [10] PENG W, JING L, LIAN H W, et al. Research on tribological properties of serpentine particles as lubricating oil additives[J]. Advanced materials research, 2011, 284-286: 1001-1005.
- [11] LYUBIMOV D N, DOLGOPOLOV K N, KOZAKOV A T, et al. Tribochemical aspects of interactions between high-dispersed serpentine particles and metal friction surface[J]. Journal of friction and wear, 2012, 33(2): 108-114.
- [12] 沈莲, 范群成, 王红洁, 等. 机械工程材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 74-75.
SHEN Lian, FAN Qun-cheng, WANG Hong-jie, et al. Materials for mechanical engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 74-75.
- [13] 杨龙. 高温水热法合成纤蛇纹石纳米管的实验研究[D].

- 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- YANG Long. An experimental study on the synthesis of chrysotile nanotube by high-temperature hydrothermal method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [14] 陈文刚. 硅酸盐粉体作为添加剂对金属摩擦副磨损特性影响的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- CHEN Wen-gang. Investigation on the characteristics of wear resistance using silicate particles as additive on the metal friction pairs[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2006.
- [15] 王瑞祥, 李冠男, 邢美波. 分散剂对纳米铁酸钴冷冻机油分散稳定性的影响[C]// 第十届全国电冰箱(柜)、空调器及压缩机学术交流大会论文集. 北京: 中国制冷学会小型制冷机低温生物医学专业委员会, 2011: 204-205.
- WANG Rui-xiang, LI Guan-nan, XING Mei-bo. Influence of dispersant on the dispersion stability of nano-cofe₂O₄ refrigeration oil[C]// Tenth national conference on refrigerator (cabinet) air conditioner and compressor symposium. Beijing: China Society of Refrigeration Small Chiller Cryogenic Biomedicine Specialized Committee, 2011: 204-205.
- [16] 毛大恒, 刘阳, 石琛. 超声球磨活化处理后纳米 WS₂ 颗粒在基础润滑油中的分散稳定性及机理[J]. 机械工程材料, 2013, 37(7): 54-55.
- MAO Da-heng, LIU Yang, SHI Chen. Dispersion stability and mechanism of nano-ws₂ particulates in base lubrication oil after high power ultrasound/ball-milling/surface modification treatment[J]. Materials for mechanical engineering, 2013, 37(7): 54-55.
- [17] 高亚军. 合成纳米羟基硅酸镁的摩擦学性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- GAO Ya-jun. Study on tribological properties of synthetic nanometer magnesium silicate hydroxide[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [18] 赵福燕. 微纳米蛇纹石粉体的摩擦行为及其成膜机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- ZHAO Fu-yan. Tribological properties of serpentine micro-nanoparticles and mechanism of tribofilm formation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [19] 王磊. 金属抗磨自修复剂在工程船舶柴油机上的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- WANG Lei. Application of metal self-repairing additives on marine diesel engine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [20] 杨鹤, 金元生. 羟基硅酸镁修复剂对铁基金属磨损表面的修复作用[C]// 第六届全国表面工程学术会议暨首届青年表面工程学术论坛论文集. 兰州: 中国机械工程师学会, 2006: 825-827.
- YANG He, JIN Yuan-sheng. Repair effect of magnesium hydroxysilicate on wear surface of iron based metals[C]// Symposium of the sixth national academic conference on surface engineering and the first youth academic forum on surface engineering. Lanzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2006: 825-827.
- [21] 张瑞军, 李生华, 金元生. 润滑油摩擦碳化产物的 FT-IR 及 Raman 评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(5): 648-650.
- ZHANG Rui-jun, LI Sheng-hua, JING Yuan-sheng. FT-IR and raman spectroscopic evaluation of products derived from pyrolyzed lubricant during friction and wear[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2003, 43(5): 648-650.
- [22] 张博, 徐滨士, 许一, 等. 羟基硅酸镁对球墨铸铁摩擦副耐磨性能的影响及自修复作用[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(4): 494-495.
- ZHANG Bo, XU Bin-shi, XU Yi, et al. Effect of magnesium silicate hydroxide on the friction behavior of ductile cast iron pair and the self-repairing performance[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2009, 37(4): 494-495.
- [23] 齐效文, 杨育林, 范兵利. 羟基硅酸镁粉体添加剂含量对金属表面自修复膜生成的影响及机制[J]. 润滑与密封, 2007, 32(6): 47-48.
- QI Xiao-wen, YANG Yu-lin, FAN Bing-li. Influence and mechanism of the formation of self-repair coatings with magnesium silicate hydroxide powder additives of different concentration[J]. Lubrication engineering, 2007, 32(6): 47-48.
- [24] 杨鹤, 李生华, 金元生. 修复剂羟基硅酸镁存在时钢摩擦副的摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 309-310.
- YANG He, LI Sheng-hua, JIN Yuan-sheng. Study on the friction and wear characteristics of the steel friction pair in the presence of magnesium hydroxyl silicate[J]. Tribology, 2005, 25(4): 309-310.
- [25] 陈文刚, 高玉周, 张会臣. 不同载荷对 45# 钢表面自修复膜成膜影响[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(4): 109-112.
- CHEN Wen-gang, GAO Yu-zhou, ZHANG Hui-chen. Effect of different loads on the formation of self-repairing film on the surface of 45# steel[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2007, 33(4): 109-112.
- [26] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 224-226.
- WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 224-226.
- [27] 匡同春, 刘正义. 激光拉曼光谱在 CVD 金刚石薄膜质量表征中的应用[J]. 理化检验-物理分册, 1997, 33(7): 21-23.
- KUANG Tong-chun, LIU Zheng-yi. Applications of laser raman spectroscopy in characterizing the quality of CVD diamond films[J]. Physical testing and chemical analysis part A: Physical testing, 1997, 33(7): 21-23.
- [28] BUNDY F P. Direct conversion of graphite to diamond in static pressure apparatus[J]. The journal of chemical physics, 1963, 38(3): 631-643.
- [29] 岳文. 硅酸盐矿物微粒润滑油添加剂的摩擦学性能与磨损自修复机理[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- YUE Wen. Tribological performance and wear-self-repairing mechanism of silicate particles as lubrication oil additive[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.