

激光网格化淬火表面渗硫/纳米微粒复合层的摩擦学性能研究

乔玉林^{1,2*}, 臧艳¹, 赵玉强¹, 崔庆生¹

(1. 装甲兵工程学院 装备再制造国防科技重点实验室, 北京 100072;

2. 装甲兵工程学院 机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072)

摘要: 利用 MFT-R4000 摩擦磨损试验机考察了激光网格化淬火表面渗硫复合层(简称 SLD 层)和激光网格化淬火表面渗硫/纳米微粒复合层(简称 NLD 层)在不同试验载荷时的减摩抗磨性能,利用 SEM 和 XPS 分析了不同试验条件下磨损表面形貌和所含元素及其化学价态。结果表明: NLD 层不仅在重载荷下的减摩性能比 SLD 层的优异,其在干摩擦条件下的摩擦系数仅为 0.075 左右,而且在较低试验载荷下具有很长的使用寿命。磨损表面元素分析发现 S 元素以硫化物和硫酸盐形式存在,但没有发现 Si 元素,这表明磨损表面形成了主要由硫化物、硫酸盐和氧化物组成的摩擦化学反应膜,而 $n\text{-SiO}_2$ 颗粒在摩擦表面可能起到了“微纳滚珠”的作用。

关键词: 网格化激光淬火; 渗硫层; 固体润滑; 摩擦磨损; 纳米 SiO_2

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2014)02-0173-07

Tribological Properties of Laser Gridding Quenched Sulfuration/Nanoparticles Compound Layer

QIAO Yu-lin^{1,2*}, ZANG Yan¹, ZHAO Yu-qiang¹, CUI Qing-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Remanufacturing Academy of Armored Force Engineering Beijing 100072, China

2. National Engineering Research Center for Mechanical

Product Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering Beijing 100072, China)

Abstract: Tribological behaviors under various loads of laser gridding quenched Sulfuration layer (SLD layer) and laser gridding quenched Sulfuration/ Nanoparticles compound Layer (NLD layer) were investigated by using a MFT-R4000 machine. The worn surface morphology, elements and chemical valence states were analyzed by scanning electron microscopy and X-ray photoelectron spectrometer. The results show that the NLD layer, which had friction coefficient of 0.075 under dry friction condition, showed better friction-reduction property than SLD layer under heavy load, and longer service lifetime under light load. A tribo-chemical reaction film was composed of sulfide, sulfate and oxide was observed. The $n\text{-SiO}_2$ particles may served as micro/nano rolling-ball on friction surface.

Key words: laser gridding quenching, sulfuration layer, solid lubrication, friction and wear, nano- SiO_2

由于硫化亚铁(FeS)的晶体结构为六方密排层状结构,且易于沿晶格的密排面进行滑移,剪切强度

低,加之在制备过程中易于获得有利于储存润滑油的多孔结构,使其耐磨寿命延长,摩擦系数降低。低

Received 26 June 2013, revised 25 November 2013, accepted 9 December 2013, available online 28 March 2014.

* Corresponding author. E-mail: qiaoyulin1010@sina.com, Tel: +86-10-66719218.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (5105397) and the Natural Science Foundation of Beijing (3122031).

国家自然科学基金项目(5105397)和北京自然科学基金(3122031)资助。

温离子渗硫技术制备硫化亚铁(FeS)固体润滑涂层是近年来发展的新方法,具有操作温度低,不影响零件原有硬度、尺寸精度和表面粗糙度,不产生氧化,工艺参数易于控制,成本低等诸多优点,已广泛应用于精密机械、武器装备等领域的机械零部件的润滑^[1-3]。但由于硫化亚铁(FeS)固体润滑涂层硬度低,在摩擦过程中难以抵抗摩擦对偶的坚硬微凸体的犁削破坏,使得渗硫层失去支撑,被碾压剥落,从而丧失固体润滑作用。因此,单纯硫化亚铁(FeS)固体润滑涂层的耐磨寿命有限^[4-6]。激光淬火、离子氮碳共渗等表面强化技术可以获得高硬度的耐磨改性表面,但其减摩性能不够理想。将激光淬火强化表面与离子渗硫固体润滑层复合,可获得具有良好减摩抗磨性能的复合涂层,但其使用寿命仍然有待进一步提高^[7-8]。纳米微粒作为润滑油添加剂在高温、高承载能力及环境友好等方面显示出的优异特性引人关注^[9-10],如纳米铜、纳米金刚石等无机单质纳米颗粒、MoS₂类层状无机物、纳米硼酸盐等纳米微粒均显示出优异的摩擦学性能^[11-12],而且在含纳米微粒油润滑下合金铸铁表面渗硫层显示出较为优异的摩擦学性能^[13-14]。但上述研究成果往往是在各自分离状态下或两两复合下获得的,将激光淬火强化表面、渗硫层、纳米微粒和润滑油复合的固体润滑层的研究鲜有报道。本文作者通过激光表面淬火工艺在CrMoCu表面进行激光网格化淬火后,利用低温离子渗硫在激光网格化淬火表面制备了具有微纳孔结构的FeS固体润滑层,并利用真空浸渍法制备了激光网格化淬火表面渗硫/纳米微粒复合层,考察了在干摩擦条件下复合表面的摩擦学性能,初步探讨了其减摩抗磨机理。

1 实验部分

1.1 试验材料

激光网格化淬火所采用的材料为经过580℃去应力退火处理的CrMoCu合金铸铁,制备复合层所用纳米n-SiO₂微粒的直径为20~40nm,润滑油为液体石蜡。

试验所用摩擦副上试样为φ6mm的GCr15圆球,硬度为HV770;下试样为φ25.4mm×6mm的圆块。

1.2 试验方法

CrMoCu铸铁表面激光网格化淬火是在Laser2000型激光加工系统上进行的。激光淬火工艺参数为输出功率400W、扫描速度35~40mm/s、光

斑直径1.5mm。网格化形状为菱形,淬火层的厚度约0.50mm左右。低温离子渗硫层是在高频脉冲等离子渗硫设备上制备的。渗硫工艺参数为温度230℃、时间2h,硫蒸气是由分析纯S粉末升华所得。激光网格化淬火表面渗硫/纳米微粒复合层的制备方法如下:将CrMoCu铸铁表面激光网格化淬火处理后的试样进行低温离子渗硫处理,获得具有一定微纳孔结构的激光网格化淬火渗硫复合层(简称SLD层,下同)。SLD层主要由FeS固体润滑相以及少量FeS₂和α-Fe相组成,表面呈微纳米多孔状(如图1所示)。SLD层的纳米硬度为0.62GPa,在SLD层与基体之间存在厚度大约为600~800nm的

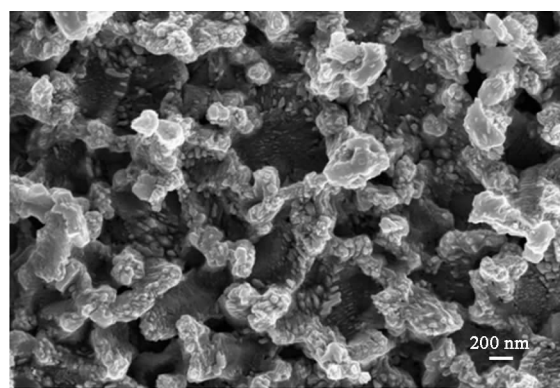


Fig. 1 SEM micrograph of micro-nano-hole FeS solid lubrication composite layer

图1 微纳孔FeS固体润滑复合层SEM形貌照片

扩散区^[15]。然后将SLD层置于真空装置内,抽真空至0.06Pa后,加入按一定比例配制的含纳米微粒的润滑剂,使润滑剂进入试样表面渗硫层的微纳孔中,30min后取出,并将复合层表面润滑油擦洗干净,即可获得激光网格化淬火表面渗硫/纳米微粒复合层(简称NLD层,下同)。

摩擦磨损试验是在MFT-R4000往复摩擦磨损试验仪上进行的。试验参数如下:室温,大气环境,干摩擦,频率为5Hz时,恒定载荷分别为6、12和18N,变载荷分别为10、20、40和60N,磨程10mm,摩擦系数由随机软件实时记录。

磨损试样在丙酮内超声清洗5min后,取出干燥后进行:①表面形貌分析。表面形貌分析采用荷兰PHILIPS公司生产的Quanta 200型环境扫描电子显微镜(SEM);②XPS分析。磨痕表面的XPS分析采用PHI Quantera SXM型X射线光电子能谱仪。试验条件:采用单色器,选用Al阳极靶,能量分辨率0.5eV,灵敏度3M CPS,角度45°,分析室真空度

6.7×10^{-8} Pa.

2 结果与讨论

2.1 网格化激光淬火渗硫固体润滑复合层的摩擦学性能研究

图2给出了3种不同处理表面的摩擦系数随载荷的变化曲线.由图2(a)和(b)可以看出:CrMoCu铸铁表面和网格化激光淬火表面在磨损初期阶段的摩擦系数相对磨损稳定阶段的摩擦系数要小一些,其主要原因是试验初期摩擦表面上存在氧化膜和吸附膜,摩擦副之间互相滑动时的剪切阻力变小,并避免或减轻了金属间的直接接触,因而使其摩擦系数

相对变小;当CrMoCu铸铁表面和激光淬火表面分别经过10和6min的摩擦试验后,磨损进入稳定阶段,摩擦系数保持在0.55~0.70之间,但CrMoCu铸铁表面和网格化激光淬火表面在不同载荷下的摩擦系数显示出较大差异.如在载荷为6N时网格化激光淬火表面的摩擦系数比CrMoCu铸铁表面的降低约19.0%,而载荷为18N时网格化激光淬火表面的摩擦系数比其在6和12N时均高.这是因为在较高载荷下,激光网格化淬火表面磨损轻微,而未激光网格化淬火表面磨损严重,出现了明显的“摩擦微台阶”效应,从而使摩擦发生在以淬火网格为筋的构架上,产生台阶阻力,致使摩擦系数升高,比相

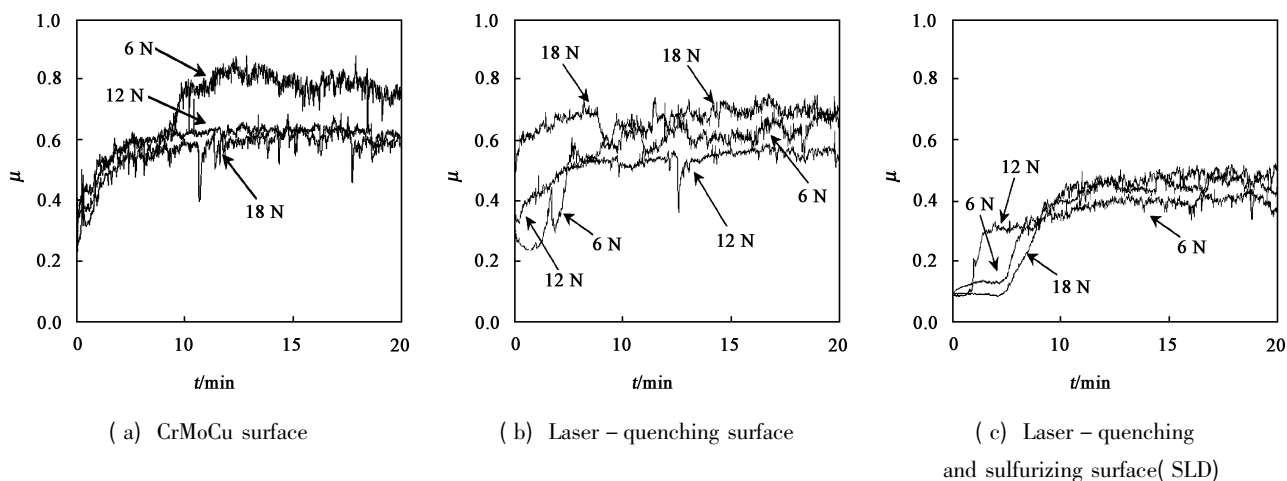


Fig.2 Variation of the friction coefficient of different surfaces with sliding time and load(5 Hz)

图2 不同处理表面的摩擦系数随时间及载荷的变化曲线(5 Hz)

同条件下CrMoCu铸铁表面的摩擦系数略高.

由图2(c)可见,在不同试验载荷下,SLD层在试验初期均会出现一个低摩擦系数阶段,其摩擦系数大约在0.10~0.15之间,之后摩擦系数迅速增大,并进入磨损稳定阶段,其摩擦系数上下波动比较平稳,并保持在0.40~0.45之间.这主要是由于试验初期,硫化亚铁(FeS)固体润滑渗硫层未遭到破坏,其固体润滑作用使摩擦副之间具有较低的摩擦系数.随着摩擦时间的延长,硬度低的FeS固体润滑渗硫层难以抵抗对摩件坚硬微凸体对它的犁削破坏,渗硫层被碾压剥落,逐渐丧失其固体润滑作用,因此摩擦系数逐渐升高,但与CrMoCu铸铁表面和激光网格化淬火表面比较[见图2(a~b)],SLD层在磨损稳定阶段的摩擦系数均较低,大约降低30%左右.这是因为尽管硬度低的FeS固体润滑渗硫层大部分被破坏,但磨损表面仍然保留部分大小不一的FeS固体润渗硫层,在摩擦副之间起到固体润滑

作用,因此,摩擦系数显著降低^[16].另外,激光网格化淬火不仅对FeS固体润渗硫层起到了很好的支撑作用,而且会因为激光淬火网格表面硬度高,在摩擦过程中在磨损表面产生“摩擦微台阶”,这些“摩擦微台阶”也能起到阻拦硫化物留在摩擦表面.因此,SLD层在磨损稳定阶段的摩擦系数不仅较稳定,而且保持较低值.

表1给出了3种不同处理表面在不同试验载荷下的磨损损失重量.可以看出,在相同试验条件下,各

表1 3种不同处理表面的磨损损失重量随载荷的变化情况

Sample	Weight loss/mg		
	Load 6 N	Load 12 N	Load 18 N
CrMoCu	5.0	10.2	30.4
Laser treated	3.0	6.5	17.2
Duplex	4.5	7.1	15.4

表面的质量磨损量都随着载荷的增加而增大。CrMoCu 合金铸铁经激光网格化淬火处理后的磨损量明显小于未处理的磨损量,如载荷为 18 N 时激光淬火表面的磨损量较 CrMoCu 铸铁的降低 43.0%。

2.2 激光网格化淬火表面渗硫/纳米微粒复合层的摩擦学性能研究

图 3 给出了变载荷条件下 NSL 和 SLD 两种复合层的摩擦系数与试验时间的关系曲线。由图 3 可见,在试验载荷不大于 40 N 时,NSL 和 SLD 两种复合层的摩擦系数都比较低,大约在 0.08~0.09 上下波动,但当试验载荷为 60 N 时,SLD 复合层的摩擦系数开始时比较小,大约 0.09~0.10 之间,当摩擦试验 30 min 后,摩擦系数突然增大,出现卡咬现象,

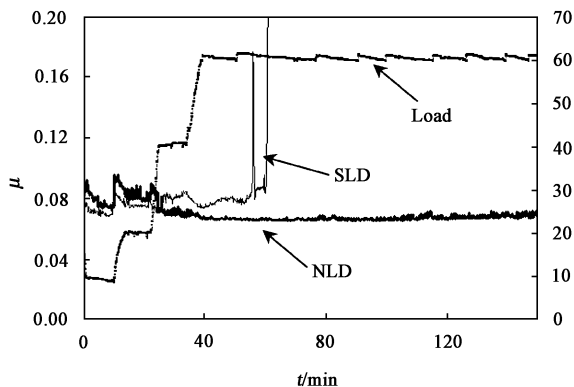


Fig. 3 Friction coefficients of two solid lubricating surfaces with sliding time under variational load

图 3 变载荷条件下两种固体润滑层的摩擦因数与试验时间的关系

说明 SLD 复合层遭到破坏,完全不起润滑作用。NSL 复合层在试验载荷为 60 N 时,在试验范围内摩擦系数上下波动非常小,摩擦系数在 0.075 左右。上述试验结果也说明 SLD 复合层作为一种固体润滑涂层,不适宜在高载荷工况下长时间服役,而 NSL 复合层由于微纳孔内储存了微量润滑油和纳米添加剂,使其结合了固体润滑、纳米润滑和油润滑的特征,显示出 NSL 复合层在较高试验载荷下不仅具有优异的减摩性能,而且具有较长的使用寿命。

图 4 是 NSL 复合层在试验载荷为 18 N 时摩擦系数与试验时间的变化关系。由图 4 可见:在试验载荷下,NSL 复合层在较低试验载荷下表现出优异的减摩性能。试验时间在 1 500 min 内,摩擦系数维持在 0.065~0.080 之间;之后摩擦系数一直在 0.10 上下波动,直到试验时间大于 4 000 min 后,摩擦系数突然增大,摩擦副之间发生咬卡现象,显示 NSL

复合层失去润滑作用。上述试验表明 NSL 复合层具有摩擦系数低,使用寿命长的特点。

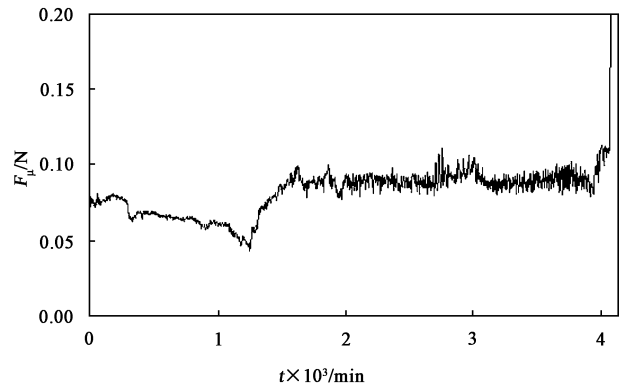


Fig. 4 Friction coefficient of NSL surfaces with sliding time at 15 N

图 4 NSL 层在 18 N 下的摩擦因数与时间的关系

2.3 磨损表面形貌分析

图 5 给出了频率 10 Hz、载荷 12 N 条件下摩擦磨损试验后磨痕的表面形貌照片。由图 5 观察可见, CrMoCu 铸铁磨损表面有较深的犁沟和划痕,并伴随着较为严重的黏着剥落,如图 5(a) 所示。经过激光网格化淬火处理后,淬火表面的硬度较高,磨损较轻,未见明显划痕;未淬火表面的硬度较低,磨损严重,产生了明显的“摩擦微台阶”,如图 5(b) 所示。SLD 层的磨损表面处的渗硫层虽已遭到破坏,但没有明显的黏着现象发生,显示仍有部分硫化物在起着减摩润滑作用。而且复合表面淬火区域磨痕较窄,“摩擦微台阶”明显降低,如图 5(c) 所示。NSL 层的磨损表面比其他几种表面的磨痕更窄,磨痕表面光滑,未见明显的犁沟和划痕,FeS 固体润渗硫层没有被破坏。

图 6 所示为 NSL 复合层经过 4 000 min 试验后磨痕表面元素的 XPS 图谱。XPS 分析发现,磨损表面存在 Fe、O、C、S 等 4 种元素,但没有发现 Si 元素,这说明 FeS 固体润滑层的微纳孔内储存的 $n\text{-SiO}_2$ 在摩擦过程中没有与摩擦表面发生化学反应,生成含 SiO_2 的摩擦化学反应膜,也没有含 SiO_2 的吸附膜存在。经过分峰处理后可知,磨痕表面出现了位于 529.9 eV 附近的 $\text{O}1s$ 峰,位于 708.5 eV 附近的 $\text{Fe}2p$ 峰,他们应归属于 Fe_3O_4 中 O、Fe 元素。磨损表面的 S 元素在电子结合能位于 162.4 与 163.6 eV 处出现 2 个谱峰,应分别归属于 FeS 和 FeS_2 中的元素 S,且归属于 FeS 的 $\text{S}2p$ 的 XPS 谱峰峰值较高,这说明在磨损表面主要含 FeS 和 FeS_2 ,但 FeS 含量较

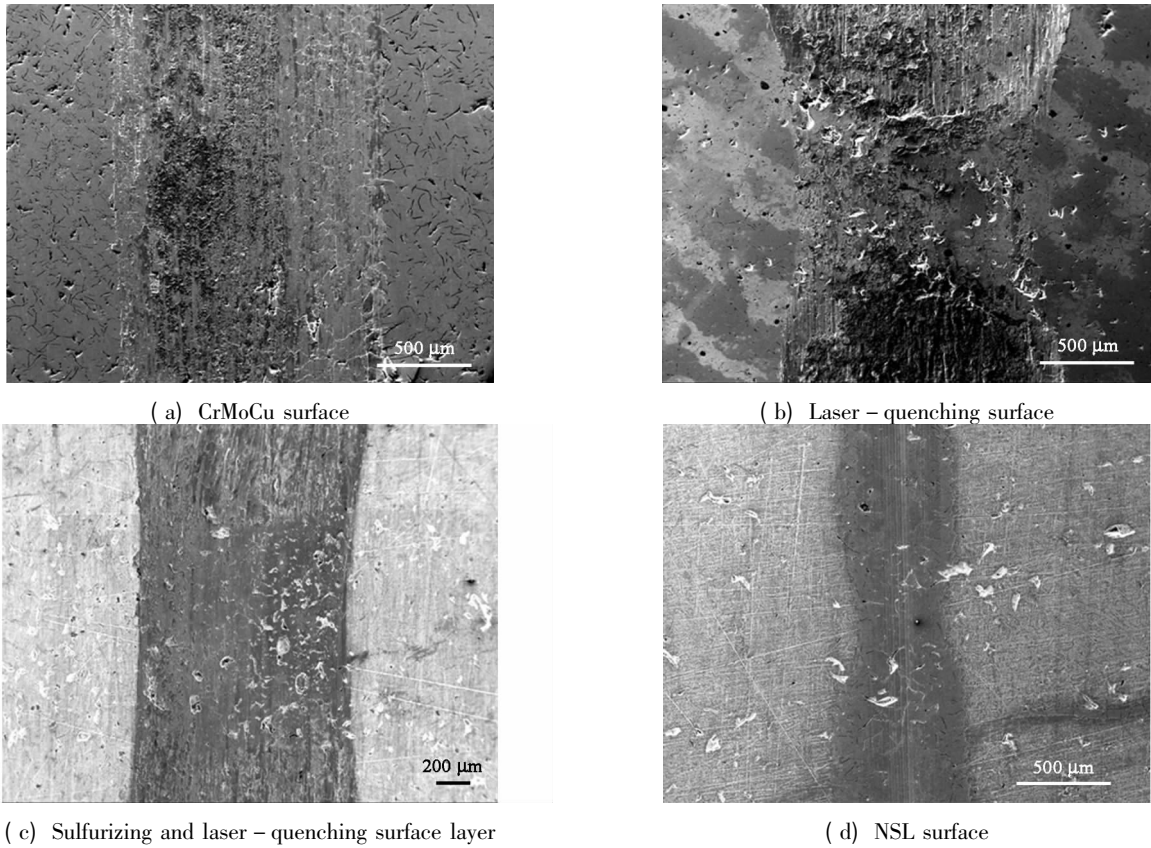


Fig.5 SEM micrographs of the different wear surfaces under frequency 10 Hz

图 5 在频率为 10 Hz 下不同磨损表面的磨痕形貌照片

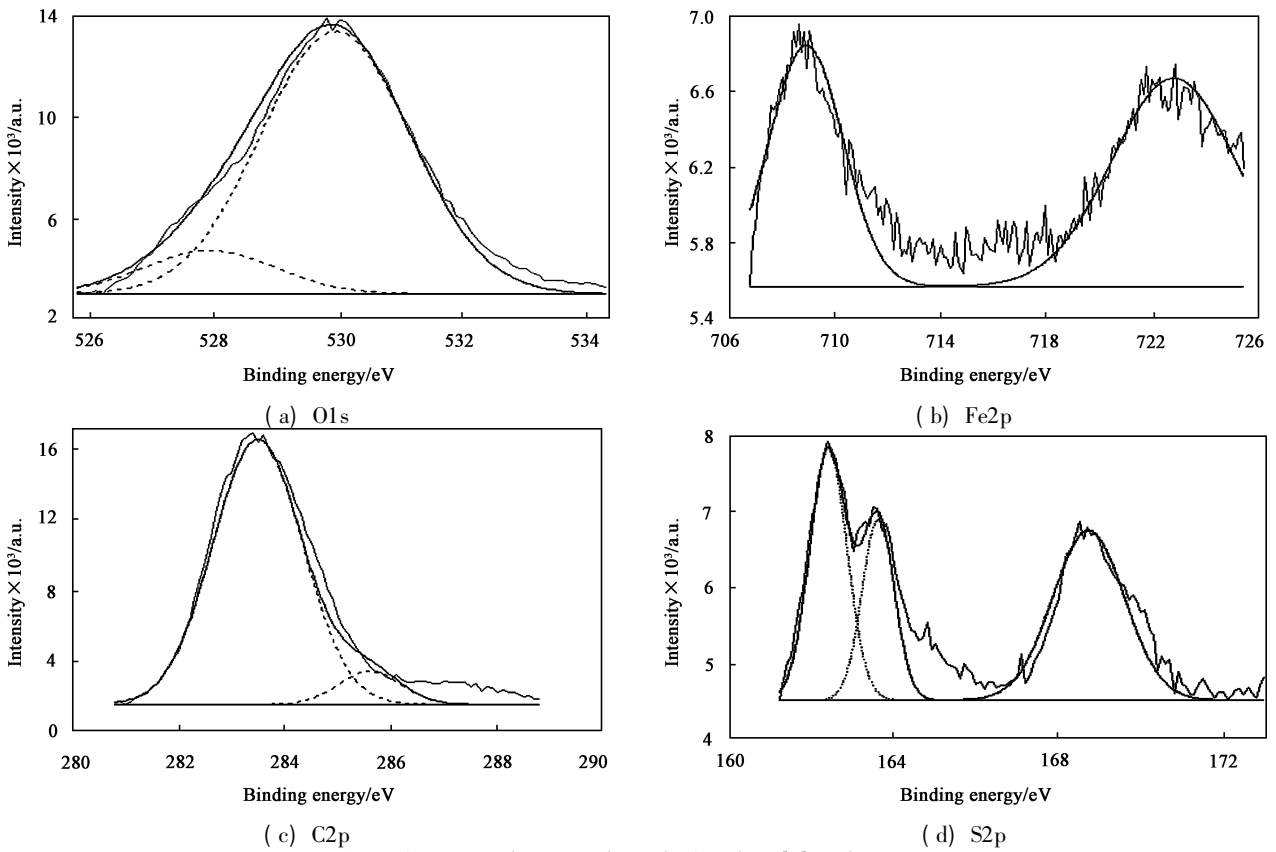


Fig.6 XPS spectra of worn surface of NSL after sliding for 4 000 min

图 6 NSL 层经 4 000min 试验后磨损表面元素的 XPS 图谱

高.同时,在168.5~168.7之间也有强峰存在,应归属于 SO_4^{2-} 中的硫元素.从以上分析可知,经4 000 min试验后,磨痕表面含有较多铁的氧化物和硫化物,但没有发现Si元素.

2.4 NSL层减摩耐磨作用过程及机理分析

与SLD层比较,NSL层不论在较低载荷(20 N)还是在较高载荷(60 N)下均显示出优异的减摩性能、抗磨性能和长寿命特征.这是因为SLD层是由CrMoCu铸铁表面经网格化激光淬火处理后,再进行渗硫复合处理,这样在SLD层的次表层有较硬的激光相变硬化层,能明显抵抗摩擦过程中的塑性变形,为表层硬度较低的FeS固体润渗硫层提供有效的支撑^[17];而在摩擦过程中产生的“摩擦微台阶”能阻止硫化物被带出摩擦表面,因而SLD层的磨损表面的磨痕宽度比CrMoCu铸铁表面和网格化激光淬火表面的磨痕宽度明显变窄,磨损表面变得更为光滑,“摩擦微台阶”效应明显降低.而NSL层中FeS固体润渗硫层因具有微纳孔结构,在真空浸渍过程中,润滑油和 $n\text{-SiO}_2$ 颗粒预置于渗硫层微纳孔结构内,在较低试验载荷作用下,对磨钢球相对于测试试样进行往复运动时,在正压力作用下,渗硫层微纳孔内吸附的润滑油溢出,使摩擦副之间处于油润滑的状态,因此摩擦系数比较小^[18].在较高试验载荷作用下,渗硫层微纳孔结构内溢出的润滑油在摩擦表面或者形成油膜很薄,或者难以形成连续的油膜,因此摩擦副间处于边界润滑状态.但由于渗硫层微纳孔结构内存储的 $n\text{-SiO}_2$ 颗粒在较高试验载荷作用下, $n\text{-SiO}_2$ 颗粒从渗硫层的微纳孔中溢出,起到纳米润滑作用.但磨损表面的XPS分析中没有发现存在Si元素,显示 $n\text{-SiO}_2$ 颗粒并未与摩擦表面发生化学反应,而是可能在摩擦副之间起到“微纳滚珠”作用^[14,19].另外,磨损表面的XPS分析发现,磨损表面存在FeS和 FeS_2 ,这说明在摩擦试验后期,尽管FeS固体润渗硫层遭到破坏,但摩擦表面残留的硫化物仍然起着一定的固体润滑作用,加之在摩擦过程中生成的氧化物和硫酸盐等摩擦化学反应膜,使NSL层具有优异的减摩、抗磨性能以及较长的使用寿命.

3 结论

a. 不同试验载荷下,SLD层在试验初期均会出现一个摩擦系数在0.10~0.15之间的低摩擦系数阶段,之后进入摩擦系数在0.40~0.45之间的磨损稳定阶段,比CrMoCu铸铁表面和网格化激光淬

火表面在磨损稳定阶段的摩擦系数大约降低30%左右.

b. NSL层在试验载荷范围内摩擦系数上下波动非常小,摩擦系数在0.075左右,而且在较低试验载荷时,NSL复合层摩擦系数很低,使用寿命较长.

c. NSL层磨损表面元素分析发现S元素以硫化物和硫酸盐形式存在,但磨损表面没有发现Si元素,这表明磨损表面形成了主要由硫化物、硫酸盐和氧化物组成的摩擦化学反应膜,而 $n\text{-SiO}_2$ 颗粒在摩擦表面可能起到“微纳滚珠”作用.

参考文献:

- [1] Kang J J, Li G L, Wang H D, *et al.* Development of research on the layered solid lubrication films [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, 4(32): 15-18 (in Chinese) [康嘉杰, 李国禄, 王海斗, 等. 层状固体润滑薄膜的研究进展[J]. *金属热处理*, 2007, 4(32): 15-18].
- [2] Zhang N, Zhuang D M, Wang Y J, *et al.* Study on tribological properties of low temperature ion sulphuration layer [J]. *Tribology*, 1999, 19(4): 348-353 (in Chinese) [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].
- [3] Wang H D, Xu B S, Liu J J, *et al.* Study on the tribological properties of FeS solid lubrication films prepared by two-step method [J]. *Tribology*, 2005, 25(4): 303-307 (in Chinese) [王海斗, 徐滨士, 刘家浚, 等. 两步法制备固体润滑FeS薄膜的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2005, 25(4): 303-307].
- [4] Lee I, Park I. Solid lubrication coating of FeS layer on the surface of SKD 61 steel produced by plasma sulfinitriding [J]. *Surface Coating Technology*, 2006, 200: 3 540-3 543.
- [5] Li X, Ma S N, Liu J Y. Study on tribological performance of ion sulphurized layer on CrMoCu alloy cast iron [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(3): 156-158 (in Chinese) [李新, 马世宁, 刘吉延. CrMoCu合金铸铁离子渗硫层的摩擦学性能研究[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(3): 156-158].
- [6] Hu C H, Ma S N, Qiao Y L, *et al.* Study on friction reduction process and composition of ion sulphurized layer on 45 steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, 30(4): 134-138 (in Chinese) [胡春华, 马世宁, 乔玉林, 等. 45钢表面离子渗硫层组成与减摩过程的研究[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(4): 134-138].
- [7] Chen R, Zhang S K, Wu X C. Tribological behaviors of surface-modified layers on Cr12MoV steel by plasma nitriding and composite ion sulfurization [J]. *Tribology*, 2004, 24(1): 87-89 (in Chinese) [陈锐, 张双科, 吴晓春. Cr12MoV钢离子渗氮和硫、碳、氮复合共渗层摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(1): 87-89].
- [8] Qiao Y L, Zhao Y Q, Zang Y, *et al.* Study on microstructure

- and tribological properties of CrMoCu alloy cast iron by laser quenching[J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(9): 8-13 (in Chinese) [乔玉林, 赵玉强, 减艳, 等. 激光淬火 CrMoCu 合金铸铁组织及摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(9): 8-13].
- [9] Qiao Y L, Xu B S. Friction and wear of nanoparticles in lubricants - present status and development trends [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2005, 24(3): 256-259 (in Chinese) [乔玉林, 徐滨士. 纳米微粒作为润滑油添加剂的现状与发展趋势[J]. *化工进展*, 2005, 24(3): 256-259].
- [10] Wei X P, Shi Y G, Fu M, et al. Progress in research of nanoparticles additive of lubricant [J]. *Lubrication Engineering*, 2008, 33(11): 107-109 (in Chinese) [魏小平, 史永刚, 傅敏, 等. 纳米润滑油添加剂研究进展[J]. *润滑与密封*, 2008, 33(11): 107-109].
- [11] L Cizaire, B Vacher, T LeMogne. Mechanisms of ultra low by hollow inorganic fullerene like MoS₂ nanoparticles [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, (160): 282-287.
- [12] S Tarasov, A Kolubaev. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil [J]. *Wear*, 2002, (252): 63-69.
- [13] Hu C H, Qiao Y L, Ma S N, et al. Friction and wear of sulphurized layer of CrMoCu alloy cast iron with lubrication of sulphur-containing additive [J]. *Tribology*, 2006, 26(6): 530-534 (in Chinese) [胡春华, 乔玉林, 马世宁, 等. 含硫添加剂润滑下 CrMoCu 合金铸铁渗硫层的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(6): 530-534].
- [14] Hu C H, Yang C Y, Liu Q C, et al. Tribological performances of FeS solid lubrication duplex layer under liquid paraffin oil with n-Al₂O₃/n-Fe₃O₄ lubricant [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(11): 120-125 (in Chinese) [胡春华, 杨春燕, 刘庆存, 等. 含纳米 n-Al₂O₃/n-Fe₃O₄ 的 FeS 固体润滑复合层的摩擦学性能[J]. *材料热处理学报*, 2011, 32(11): 120-125].
- [15] Yulin Qiao, Yan Zang, Shanlin Yang, et al. Microstructure analysis of FeS layer as solid lubrication composite coating produced by low-temperature ion sulfurization [J]. *Advanced Materials Research*, (291-294): 84-87.
- [16] Qiao Y L, Zhao Y Q, Liu X T. Effect of sulfurizing layer on tribological properties of netted laser-quenching surface [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2010, 24(5): 73-77 (in Chinese) [乔玉林, 赵玉强, 刘晓亭. 渗硫层对网格化激光淬火表面摩擦磨损性能的影响[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2010, 24(5): 73-77].
- [17] Zhao Yu-qiang, Zang Yang, Qiao Yu-lin, et al. Study on tribological properties of n-SiO₂/FeS solid lubricant compound coating [J]. *Materials Science Forum*, 2011, (694): 914-918.
- [18] Qiao Y L, Hu C H, Zhao Y Q. Tribological properties of nano-Al₂O₃/FeS solid lubricant composite coatings under a continuous loading at elevated temperature [J]. *Tribology*, 2010, 30(6): 537-534 (in Chinese) [乔玉林, 胡春华, 赵玉强, 等. 连续加载条件下纳米 Al₂O₃/FeS 固体润滑复合涂层的摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(6): 537-534].
- [19] Hu C H, Ma S N, Qiao Y L. Tribological performances of FeS solid lubrication duplex layer under the lubrication of liquid paraffin oil with nano-SiO₂ [J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(7): 46-50 (in Chinese) [胡春华, 马世宁, 乔玉林. 含纳米 SiO₂ 液体石蜡润滑下 FeS 固体润滑复合层的摩擦学性能[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(7): 46-50].