

45 钢的黏结型激光微织构表面摩擦学性能及固体润滑机理分析

Analysis of Tribological Property and Mechanism of Solid Lubrication on 45 Steel Bond-type Laser Micro-textured Surface

华希俊,王 蓉,周 万,刘 凯,符永宏,纪敬虎
(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

HUA Xi-jun, WANG Rong, ZHOU Wan,

LIU Kai, FU Yong-hong, JI Jing-hu

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

摘要: 采用二极管泵浦声光调 Q Nd:YAG 激光器在 45 钢表面进行织构化处理,对填充不同质量分数聚酰亚胺(PI)的 MoS₂ 复合固体润滑剂织构试样在销-盘线接触摩擦磨损试验机上进行了不同工况下的滚动摩擦性能实验。利用扫描电子显微镜观察和分析材料磨损形貌和元素分布。结果表明:填充黏结型 MoS₂ 复合固体润滑剂织构表面的摩擦因数均随着载荷和转速的增大而减小,其中 MoS₂+20%(质量分数)PI 复合润滑剂具有最佳的减摩性能。在线接触滚动过程中,存在氧化磨损、磨粒磨损和黏着磨损。高速重载能促进转移膜在对偶面形成,显示出良好的减摩性能。

关键词: 激光织构;复合固体润滑剂;线接触;滚动摩擦

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.09.007

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)09-0039-07

Abstract: Q switched diode-pumped solid-state Nd:YAG laser was adopted to carry out texture processing on the surface of 45 steel. Rolling friction property test of textured samples filled with MoS₂ composite solid lubricant containing different mass fractions of PI was examined by a pin-plate line contact friction and wear tester under different working conditions. Wear morphologies and elements distribution were observed and analyzed by SEM. The results indicate that the friction coefficient of textured surface which is filled with bond-type MoS₂ solid lubricant decreases as the load and speed increase, and the composite lubricant containing MoS₂ plus 20%(mass fraction) PI has the best anti-friction property. The textured surfaces exist oxidation wear, abrasive wear and adhesive wear in the condition of line contact rolling. High speed and heavy load can promote transfer films forming on the counterpart face, and show good anti-friction performance.

Key words: laser texture; composite solid lubricant; line contact; rolling friction

激光表面织构化技术^[1]以其加工速度快,对环境无污染以及优良的表面织构控制能力等优点而得到广泛关注,目前的研究主要集中在织构化表面的流体介质润滑方面^[2],而对其固体润滑的研究起步较晚,在许多特殊工况(如高温、重载、真空等)场合,固体润滑具有不可替代的作用^[3]。如今,一些国内外的学者对织构表面的固体润滑也作了一些初步的研究。在国外,Guleryuz 等^[4]研究了 TiN 涂层织构表面的摩擦和润滑机理。Luster 等^[5]通过溅射在织构表面沉积 VN 薄膜,结果表明:织构表面涂覆 VN

涂层改善了其摩擦润滑性能。Rapoport 等^[6,7]将 MoS₂ 颗粒分别涂覆在钢基材表面和激光织构面 CdZnSe 薄膜表面,结果表明:激光织构面 CdZnSe+MoS₂ 薄膜的摩擦和磨损特性明显优于同等条件下钢基材表面的摩擦和磨损特性。在国内,朱鹏等^[8]用热模压成型法制备了 MoS₂ 改性聚酰亚胺材料,研究其摩擦磨损性能,结果表明:载荷的增大有利于减小摩擦因数。邓建新等^[9]在硬质合金表面加工出微凹槽,并在造型表面填充 MoS₂,结果表明:MoS₂ 润滑的织构表面的摩擦因数比无润滑织构表面的摩擦

因数降低 20%~25%。

以往的激光织构表面固体润滑摩擦特性的研究主要是采用单一二硫化钼或石墨等作为润滑剂^[10],而对黏结型复合固体润滑剂的摩擦特性研究较少。聚酰亚胺(PI)是 20 世纪 50 年代发展起来的一类高分子材料,具有良好的力学性能、耐高温性能,尤其作为一种减摩耐磨胶黏固化物被广泛应用于航空航天、医疗器械等领域^[11]。MoS₂ 因具有典型的六方晶系层状结构(层间硫原子结合力极弱),显著的力学各向异性,在外力作用下,表现出更佳的成膜性,被广泛用作固体润滑剂^[12]。目前在胶黏固化物特性及其物理性能、固体润滑剂种类及其含量对摩擦润滑性能的影响方面已开展了较多研究工作^[13-16]。

本工作基于激光表面织构化技术在 45 钢表面加工出微凹腔形貌,以 MoS₂ 为固体润滑组元,以聚酰亚胺为黏结剂,考察其在线接触滚动状态下的摩擦磨损性能,获得复合固体润滑剂最佳配比,并探讨其润滑机理。

1 实验

1.1 润滑剂

采用 MoS₂ 作为固体润滑剂,纯度 99.5%,颗粒尺寸为 0.5 μ m;采用 SKPI-MS10 型聚酰亚胺粉末作为胶黏固化物。

1.2 试样加工与制备

选用 45 钢作为试样基材,经抛光处理后表面粗糙度 R_a 达到 0.1 μ m。激光织构设备采用本课题组自主研发的二极管泵浦 Nd:YAG 激光微加工设备,利用“单脉冲同点间隔多次”加工工艺在基材表面加工出微织构。加工参数如下:激光重复频率 1600Hz,电流 18A,脉冲重复次数 10 次,织构密度 27.7%。织构后的表面经抛光、超声清洗后,利用 WYKO-NT1100 表面形貌三维测量仪对微凹腔的加工形貌进行观测。图 1 所示为单个凹腔显微形貌图,凹腔直径 71 μ m 左右,凹腔深度 15 μ m 左右。图 2 所示为试样激光微织构表面形貌图,由图 2 可知,凹腔均匀分布于试样表面。

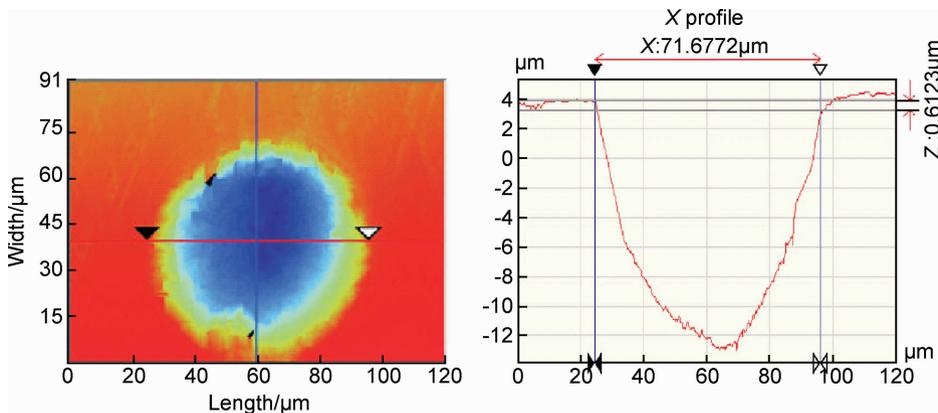


图 1 单个凹腔形貌

Fig. 1 The morphology of single cavity

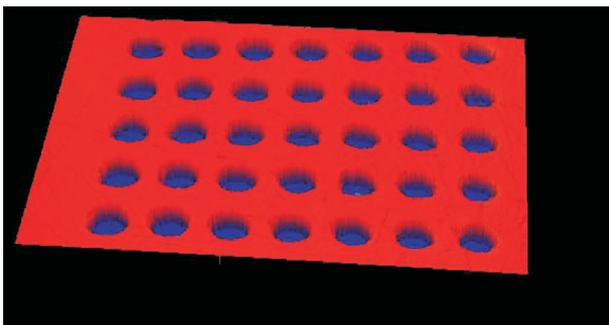


图 2 微织构表面形貌图

Fig. 2 The morphology of micro-textured surface

粉料均匀涂覆于试样表面,利用热压成型工艺制备试样毛坯。再将制备好的试样毛坯经 02# 金相纸研磨、抛光,加工成摩擦磨损试样。

1.3 实验设备与方法

采用 MMW-1A 万能摩擦磨损试验机对试样的摩擦磨损性能进行评价。实验装置如图 3 所示,上试样装在试验机主轴上,下试样固定在工作台上,采用销子圆柱面与上下试样织构面线接触的方式。实验时,载荷 100~500N,转速 100~500r/min,温度 10 $^{\circ}$ C,湿度 55%。

采用电子热场发射扫描电镜 JSM-7001F (Thermal Field Emission SEM) 对试样进行表面形貌观测和 X 射线能谱分析(EDS)。

按不同质量比将 MoS₂ 和 PI 均匀混合,并将复合

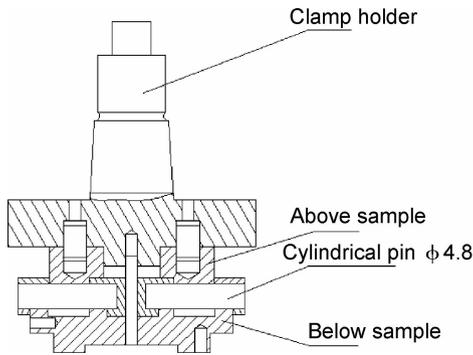


图 3 实验装置装配图

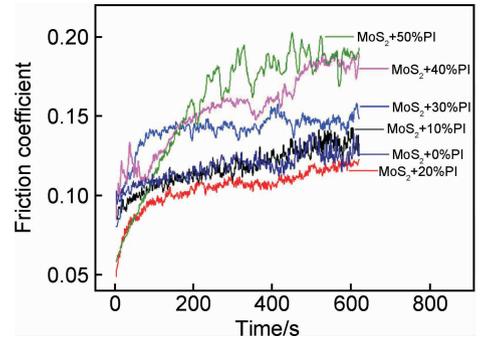
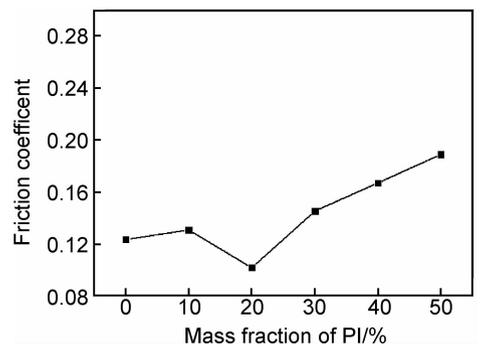
Fig. 3 Assembly drawing of experimental device

2 结果与分析

2.1 PI 质量分数对织构表面摩擦磨损性能的影响

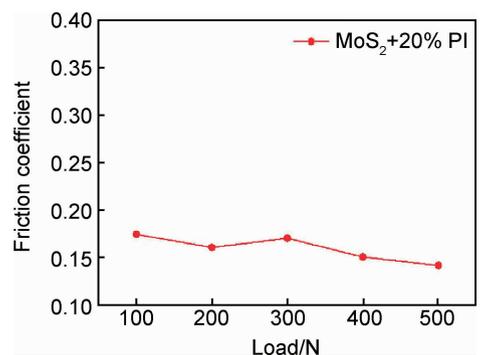
图 4 为填充了不同质量分数 PI 的复合固体润滑剂的织构表面摩擦因数，由图 4 可知，尽管织构表面的 PI 含量不同，但其摩擦因数变化趋势大体一致，均呈现先快速上升后逐渐趋于稳定的规律。在实验初始阶段，摩擦因数上升较快，随着实验的进行，对磨面的微凸体与微孔中的复合润滑剂接触，由于润滑剂硬度低，对磨面的挤压和摩擦热的共同作用使其析出微凹腔，从而在织构表面形成自润滑膜，在对偶表面形成转移膜。机械应力和热应力的共同作用使得摩擦副之间形成自润滑膜的生成、破损、脱落与再生的循环过程，当磨损进入稳定阶段时，摩擦因数也随之保持稳定。图 5 为织构表面摩擦因数随 PI 质量分数的变化曲线，由图 5 可知，不同质量分数的 PI 对织构表面摩擦因数的影响是不同的。当 PI 质量分数较低时，随着 PI 质量分数的增加织构表面的摩擦因数有所减小，但当 PI 含量超过 20% (质量分数，下同) 后，随着 PI 质量分数的增加表面摩擦因数反而增大了。这主要是因为 PI 质量分数较低时 (小于 10%)， MoS_2 颗粒分散不均匀，部分 MoS_2 颗粒之间会出现彼此相连而无聚合物黏结现象，结合不好的 MoS_2 颗粒在摩擦过程中极易脱落，膜的耐磨性差，缺陷多，在循环应力作用下，润滑膜的不均匀导致了摩擦因数的升高；PI 质量分数较高时 (大于 20%)， MoS_2 在黏结剂中的分布呈高度弥散状态，复合膜与对偶面对磨时，PI 在摩擦接触区所占的面积相当大，润滑膜的摩擦性能主要取决于 PI 的性质，润滑作用不明显，摩擦因数相对较大。且摩擦热会增加润滑膜的黏性，局部熔融而发生剧烈磨损，摩擦因数产生较大的波动。而当复合润滑剂含 20% PI 时，对偶件表面形成的转移膜较致密， MoS_2 颗粒在润滑膜中分布也较均匀，与对偶件表面的结合力较强，在摩擦

过程中不易从对偶件表面脱落，从而提高了复合润滑剂的减摩效果，因此 $\text{MoS}_2 + 20\% \text{PI}$ 复合润滑剂在微织构表面表现出较佳的减摩性能。

图 4 不同复合润滑剂织构表面的摩擦因数变化曲线
(载荷:200N;转速:100r/min)Fig. 4 The friction coefficient change curves of the textured surface with different composite lubricants
(load:200N;rotating speed:100r/min)图 5 织构表面摩擦因数随 PI 质量分数的变化曲线
Fig. 5 The curve of friction coefficient of the textured surface with different mass fraction of PI

2.2 不同载荷对黏结型结构表面摩擦因数的影响

图 6 为 100r/min 的转速条件下，载荷对填充了 20% PI 的复合润滑剂织构表面摩擦因数的影响。结

图 6 织构表面摩擦因数随载荷的变化曲线
Fig. 6 The curve of friction coefficient of the textured surface under various loads

果表明:随着载荷的增大,织构面的摩擦因数呈减小趋势,这说明PI复合固体润滑剂在较高载荷下减摩性能更显著。这主要是因为随着载荷的增大,更多的固体润滑剂被挤出,而形成的固体润滑转移膜也更加致密;另外,由赫兹弹性接触区的半宽公式可知,载荷增大则接触区半宽增大,滚动摩擦副实际接触区域也随之增大,从而润滑膜对金属表面的吸附增强,使其能更好地实现润滑性能。

2.3 不同转速对黏结型结构表面摩擦因数的影响

图7为100N的载荷条件下,转速对填充了20%PI的复合固体润滑剂织构表面摩擦因数的影响。结果表明:随着转速的增大,织构面的摩擦因数呈减小趋势。这是因为一方面,圆柱销的滚动速度随着转速的增大而加快了,这使得微凹坑内复合固体润滑剂更快地被挤出,固体润滑膜的转移更频繁,从而可以更快地修补试样表面破损的润滑转移薄膜,使减摩效果更好;另一方面,转速的增加对滚动摩擦副表面有一定的升温效果,由二硫化钼的性质决定,复合固体润滑剂温度的上升也会使得织构表面的摩擦因数有所减小;再

者,转速的增加也使得固体润滑剂具有更好的晶粒取向,从而更易成膜。

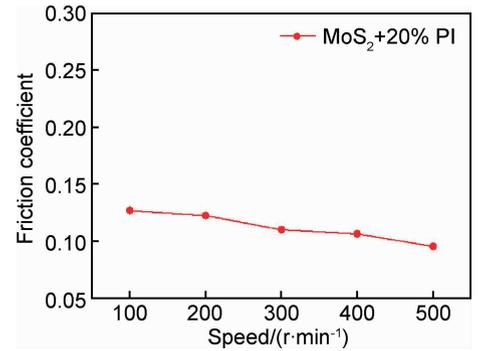


图7 织构表面摩擦因数随转速的变化曲线
Fig.7 The curve of friction coefficient of the textured surface at various speeds

2.4 试样表面磨痕分析

观察织构表面磨损形貌,发现当PI质量分数为20%时,由于MoS₂颗粒分布均匀,形成的润滑膜致密,织构表面几乎没有磨损,如图8(c)所示。当PI质

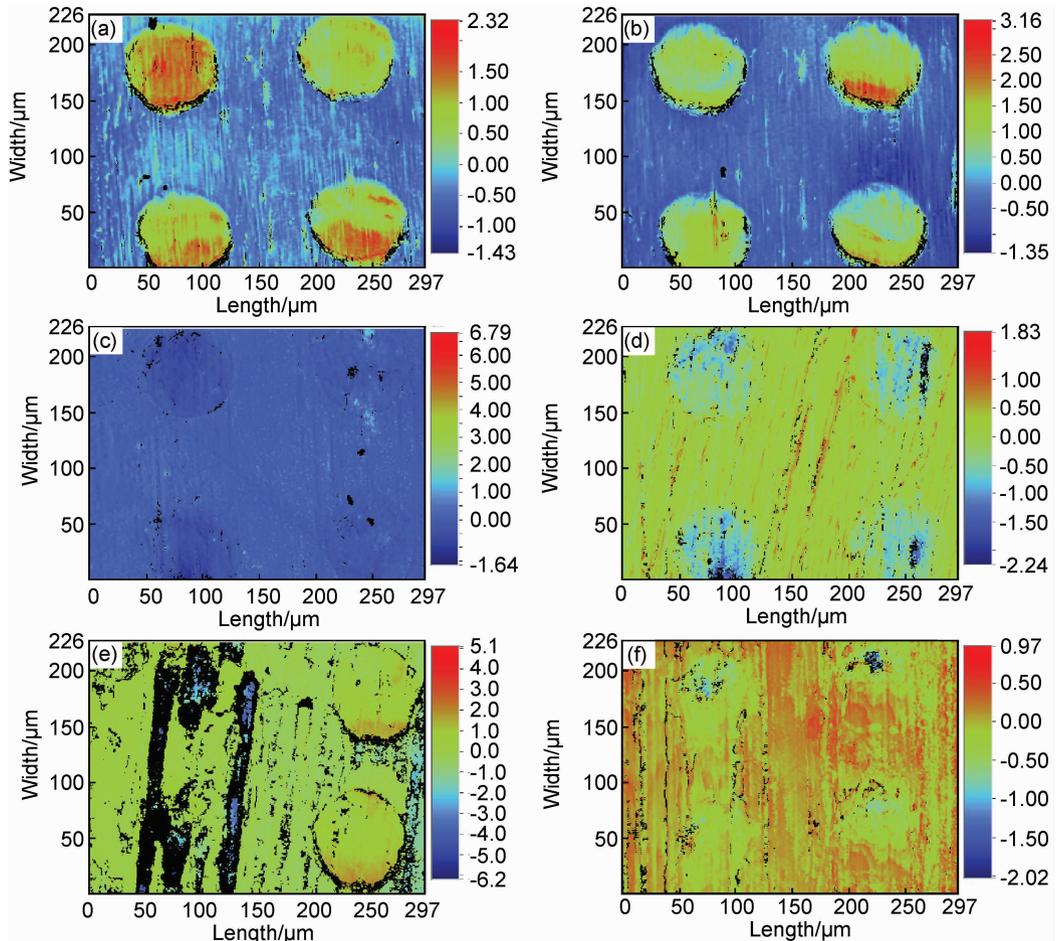


图8 织构表面的磨痕形貌 (a)MoS₂+0%PI;(b)MoS₂+10%PI;

(c)MoS₂+20%PI;(d)MoS₂+30%PI;(e)MoS₂+40%PI;(f)MoS₂+50%PI

Fig.8 The morphology of grinding marks for the textured surfaces (a)MoS₂+0%PI;

(b)MoS₂+10%PI;(c)MoS₂+20%PI;(d)MoS₂+30%PI;(e)MoS₂+40%PI;(f)MoS₂+50%PI

量分数分别为 0%, 10%, 30% 时, 试样表面虽然有微小的凹凸, 但总体比较平整, 主要是轻微的磨粒磨损, 如图 8(a), (b), (d) 所示。当 PI 质量分数为 40% 时, 织构表面润滑效果较差, 有沟槽产生, 这是由于表面的微凸体、脱落的磨屑以及磨粒对试样表面犁沟、切削所导致, 如图 8(e) 所示。当 PI 质量分数高达 50% 时, 作为一种不良导热体, 由于摩擦热来不及导出, 使接触点温度瞬间达到极高值, 导致试样表面发生塑性流变和局部软化, 如图 8(f) 所示, 出现黏着磨损。

2.5 试样表面显微组织分析

图 9 为填充 $\text{MoS}_2 + 20\% \text{PI}$ 复合固体润滑剂的下试样显微组织照片。可以看出, 磨损表面比较光滑, 形

成了较为完整的润滑膜, 仅存在微细磨痕, 这说明复合固体润滑剂成膜性好, 具有良好的减摩性能。复合固体润滑剂中的两相分别为 PI (灰色) 和 MoS_2 (白色), PI 相呈片状连续分布, MoS_2 以小片状分散其中, 起到润滑作用, 如图 10 所示。另外, 由于复合固体润滑剂与基材 45 钢两者的化学性质不相溶、物理力学性能差别较大, 在成型与烧结过程中, 压缩变形、弹性恢复、扩散烧结等不能协调一致, 使得填充到凹腔中的复合固体润滑剂与凹腔内壁之间存在微隙, 在机械摩擦力的反复作用下, 产生一定的分离界面, 类似于微裂纹, 但微隙的存在不影响微腔中复合润滑剂对表面润滑膜的及时补充。

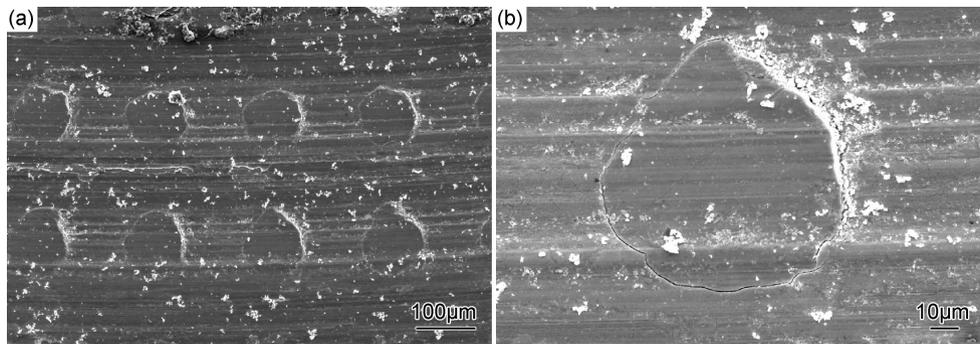


图 9 填充 $\text{MoS}_2 + 20\% \text{PI}$ 复合固体润滑剂的下试样显微组织照片 (a)凹腔织构表面;(b)单个织构表面
Fig. 9 Microstructure photographs of the below sample filled with MoS_2 and 20% PI composite solid lubricant
(a)the textured surfaces;(b)a single cavity surface

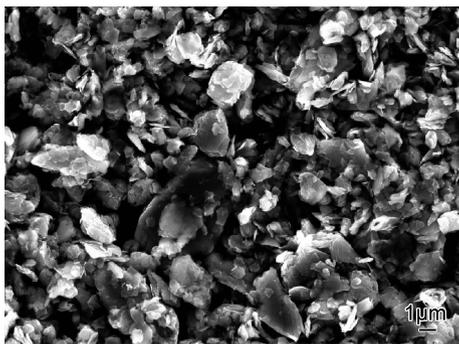


图 10 复合固体润滑剂的显微组织照片
Fig. 10 Microstructure photograph of composite solid lubricant

由图 9(b)可知, 在摩擦磨损过程中, 润滑作用是由于分散在复合固体润滑剂中的 MoS_2 向润滑膜表面迁移而产生的, 并且随着比较稳固的润滑膜与对偶件的相对运动, 摩擦表面的部分犁沟逐渐变得光滑, 形成光滑带。此外, 由于载荷分布不均, MoS_2 向转移膜表面迁移后, 在磨削过程中摩擦副上受载高的区域逐渐变得光滑, 并且随着对磨时间的延长,

MoS_2 向表面的迁移量增加, 光滑的区域逐渐呈现金属般光泽。

对凹腔填充表面进行能谱分析, 如图 11 所示, 表面成分中有少量 O, Fe 元素存在。这可能是由于在摩擦过程中存在氧化磨损, 有少部分二硫化钼被氧化生成三氧化钼, 表面铁元素也产生一定的氧化。图 12 是凹腔之间表面的能谱分析, 表面成分中含有 Mo, S 元素, 这说明凹腔中的复合固体润滑剂已经发生了转移, 并形成了较致密的润滑膜。

3 结论

(1) 填充 PI 含量为 20% 的 MoS_2 复合固体润滑剂时, 织构表面具有较佳的减摩润滑效果。

(2) 填充复合固体润滑剂的织构表面, 在线接触滚动条件下, 摩擦因数随着载荷和转速的增加而减小, 由此表明, 高速重载工况更有利于转移膜的形成。

(3) 填充复合固体润滑剂的织构表面, 在线接触滚动条件下, 能够形成均匀致密的润滑转移膜, 并存在氧化磨损、磨粒磨损和黏着磨损。

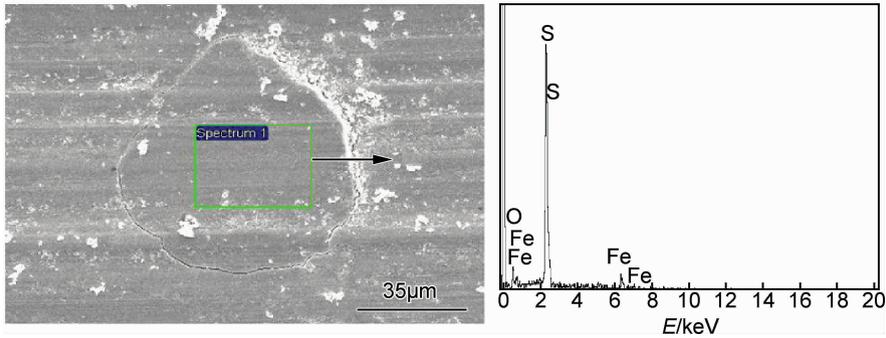


图 11 凹腔表面的 EDS 图谱

Fig. 11 EDS spectra of the cavity surface

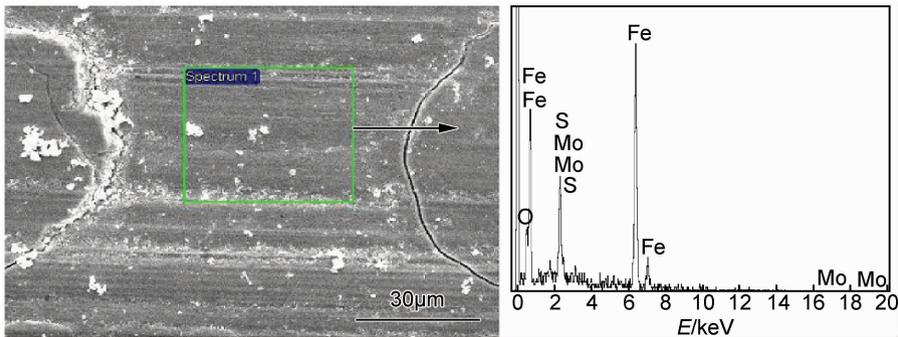


图 12 凹腔间表面的 EDS 图谱

Fig. 12 EDS spectra of the surface between cavities

参考文献

- [1] NEVES D, DINIZ A E, De LIMA M S F. Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 179(1-3): 139-145.
- [2] 符永宏, 季伟, 张华伟, 等. 表面规则微凹腔半径对活塞环润滑性能的影响[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2010, 31(6): 621-624.
FU Yong-hong, JI Wei, ZHANG Hua-wei, et al. Influence of surface regular micro-pore radius on lubrication performance of piston ring[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(6): 621-624.
- [3] 华希俊, 刘明, 杜志华, 等. 织构化表面固体润滑性能试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2014, 35(1): 91-95.
HUA Xi-jun, LIU Ming, DU Zhi-hua, et al. Property experiments of solid lubrication of laser texturing surface[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2014, 35(1): 91-95.
- [4] GULERYUZ C G, KRZANOWSKI J E. Mechanisms of self-lubrication in patterned TiN coatings containing solid lubricant microreservoirs[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(15): 2392-2399.
- [5] LUSTER B, STONE D, SINGH D P, et al. Textured VN coatings with Ag₃VO₄ solid lubricant reservoirs[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(7): 1932-1935.
- [6] RAPOPORT L, MOSHKOVICH A, PERFILYEV V, et al. Wear life and adhesion of solid lubricant films on laser-textured steel surfaces[J]. Wear, 2009, 267(5): 1203-1207.
- [7] RAPOPORT L, MOSHKOVICH A, PERFILYEV V, et al. Friction and wear of MoS₂ films on laser textured steel surfaces [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(14): 3332-3340.
- [8] 朱鹏, 陈震霖, 王筱, 等. 二硫化钼改性热塑性聚酰亚胺材料稳定摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2006, (1): 35-37.
ZHU Peng, CHEN Zhen-lin, WANG Xiao, et al. Tribology performance during stable stage of molybdenum disulfide reinforced thermoplastic polyimide[J]. Lubrication Engineering, 2006, (1): 35-37.
- [9] WU Z, DENG J X, ZHANG H, et al. Tribological behavior of textured cemented carbide filled with solid lubricants in dry sliding with titanium alloys[J]. Wear, 2012, 292-293: 135-143.
- [10] 赵文杰, 王立平, 薛群基. 织构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 621-631.
ZHAO Wen-jie, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface[J]. Tribology, 2011, 31(6): 621-631.
- [11] 王文广. 塑料材料的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [12] BHARAT B. Modern Tribology Handbook: Chapter 22[M]. London: CRC Press, 2001.
- [13] BASAVARAJAPPA S, ELLANGO VAN S. Dry sliding wear characteristics of glass-epoxy composite filled with silicon carbide and graphite particles[J]. Wear, 2012, 296(1-2): 491-496.
- [14] 王月梅, 周惠娣, 陈建敏, 等. 含二硫化钼、石墨和三氧化二锑的

水性环氧树脂黏结固体润滑涂层的摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(6): 577-583.

WANG Yue-mei, ZHOU Hui-di, CHEN Jian-min, et al. Preparation and friction and wear behavior of waterborne epoxy resin-based bonded solid lubricant coatings[J]. Tribology, 2010, 30(6): 577-583.

[15] 徐进, 朱昊, 刘捍卫, 等. 湿度、温度及润滑油对粘结 MoS₂ 固体润滑涂层微动磨损寿命的影响[J]. 机械工程材料, 2003, 27(9): 21-23.

XU Jin, ZHU Hao, LIU Han-wei, et al. Influence of relative humidity, temperature, oil lubrication on the fretting wear life of bonded solid lubricant coating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(9): 21-23.

[16] 罗军, 王运动, 蔡振兵, 等. 粘结 MoS₂ 固体润滑涂层的转动微动磨损特性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 100-105.

LUO Jun, WANG Yun-dong, CAI Zhen-bing, et al. Rotational fretting wear characteristics of bonded molybdenum disulfide solid lubrication coating[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 100-105.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375211, 51305168); 国家重大科技成果转化项目(2060403); 镇江市工业科技支撑项目(GY2012039)

收稿日期: 2014-05-08; 修订日期: 2015-03-26

通讯作者: 华希俊(1966-), 男, 教授, 工学博士, 主要从事激光表面改性及摩擦学设计、固体润滑等方面的研究, 联系地址: 江苏省镇江市京口区学府路 301 号江苏大学机械工程学院(212013), E-mail: xjhua@ujs.edu.cn

中国(深圳)国际无人系统技术成果交易展览会将于深圳举行

11 月 17 日-20 日, 中国(深圳)国际无人系统技术成果交易展览会将于深圳大运中心举办。

本届展览会将作为深圳高交会分会场, 与高交会共享组织架构、客户资源、媒体支持、专家支持、服务支持, 是中国国际化的专业无人系统展览。展览会计划邀请境内外参展商 110 家以上, 参会客商 5 万人次以上。展会拥有静态展 10000m², 室外飞行展演场地 15000m²。同时展览会也是中国境内具有正规飞行表演临时空域报批手续的专业展览会, 届时会举办精彩的无人机飞行表演及飞行比赛。

展览的承办单位——高博特广告有限公司拥有 10 年的无人机展览深厚资历和 6 次成功的无人机展览经验, 其品牌展览“尖兵之翼——中国无人机大会暨展览会”是国内规模较大的专业无人机展览会。我们有理由期待, 此次无人系统展览必将再创辉煌!

