

# 活塞环表面织构化镀层的摩擦性能研究

万轶<sup>1</sup>, 李建亮<sup>2</sup>, 熊党生<sup>2</sup>

(1.南京航空航天大学金城学院 机电工程系, 南京 211156;

2.南京理工大学 材料科学与工程学院, 南京 210094)

**摘要:** **目的** 以缸套/活塞环为试验对象, 研究激光织构化与固体润滑镀层的协同减摩作用。**方法** 采用脉冲激光在活塞环表面进行微孔化处理, 利用电脉冲沉积法在微孔内制备具有不同 MoS<sub>2</sub> 微粒浓度的 Ni-MoS<sub>2</sub> 复合镀层, 通过往复摩擦试验研究织构化表面沉积固体润滑剂对活塞环-缸套的影响机制。**结果** 镀液中 MoS<sub>2</sub> 微粒浓度对镀层的硬度和摩擦学性能影响较大, 相同电流密度下, 电镀液中 MoS<sub>2</sub> 微粒的质量浓度为 5 g/L 时的镀层硬度最高, 该浓度下 Ni-MoS<sub>2</sub> 复合镀层在干摩擦下具有最佳的摩擦系数和最低的磨损率。织构化复合镀层可以显著改善接触面间的摩擦性能, 相比未织构化摩擦副, 摩擦系数降低约 0.2, 磨损率下降 50%。**结论** 干摩擦条件下, 表面织构可以有效地储存摩擦副之间的固体润滑剂和磨粒, 在接触表面形成连续润滑膜, 减少磨粒磨损。

**关键词:** 活塞环; 表面织构化; 协同润滑作用; 摩擦学性能

**中图分类号:** TG117; TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0195-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.028

## Tribological Property of Textured-coating on Piston Ring Surface

WAN Yi<sup>1</sup>, LI Jian-liang<sup>2</sup>, XIONG Dang-sheng<sup>2</sup>

(1.Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nanhang Jincheng College, Nanjing 211156, China;

2.School of Material Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study synergistic antifriction effects of laser-texturing and solid lubrication coating with cylinder/piston ring as test object. Microporous treatment was performed on piston ring surface with pulse laser. MoS<sub>2</sub> composite coatings with different concentration of MoS<sub>2</sub> particle were deposited in the micropores in the method of electric pulse deposition. Reciprocating friction test was performed to study how textured surface deposition of solid lubricant affected piston ring-cylinder liner. Concentration of MoS<sub>2</sub> particles in the plating solution had a great influence on hardness and tribological property of the coatings. Provided that current density was the same, hardness of the coatings was the maximum, and the composite coatings had the optimum friction coefficient and the lowest wear rate under dry friction when mass concentration of MoS<sub>2</sub> particles was 5 g/L in the plating solution. Textured composite coatings could significantly improve tribological property between contact surfaces. Compared with the non-textured friction pair, friction coefficient of the textured composite coatings decreased by nearly 0.2, and wear rate decreased by 50%. Surface texturing can effectively store solid lubricant and abrasive

收稿日期: 2018-01-11; 修订日期: 2018-02-25

Received: 2018-01-11; Revised: 2018-02-25

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (16KJB460014, BK20151487); 国家自然科学基金项目 (51101087)

Fund: Supported by the Jiangsu Natural Science Foundation of China (16KJB460014, BK20151487) and the National Natural Science Foundation of China(51101087)

作者简介: 万轶 (1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事金属材料表面改性研究。

Biography: WAN Yi(1982—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: surface modification of metallic materials.

grains between friction pair, generate continuous lubricating film on the contact surface and reduce abrasive wear.

**KEY WORDS:** piston ring; surface texturing; synergistic lubrication; tribological property

发动机中的缸套/活塞环摩擦副常在少油/贫油润滑状态下工作,在高温、高压和冲击载荷的环境中,容易发生较大磨损而导致机器报废<sup>[1-2]</sup>。活塞环具有导热、导向、密封和调节机油等作用,对发动机动力性、排放性和经济性起决定作用。因此,要求汽缸/活塞环摩擦副具有良好的综合抗磨润滑性能。

国内外学者在减摩和耐磨材料、表面镀层、润滑油和添加剂等方面已取得了巨大进展。大量的研究表明,适当的表面形貌和镀层可以提高机械零件的耐磨性<sup>[3-5]</sup>。表面织构化技术(Surface Texturing)是近年来改善机械表面摩擦性能的一种常用方法,最早应用于端面密封、轴承和缸套的衬底等<sup>[6-9]</sup>,利用织构化产生的具有优化几何形状和表面密度的固体润滑剂存储效应改善其流体动压润滑效果。Etsion 等<sup>[10-12]</sup>利用织构化技术在密封环表面加工了不同深度的微孔,提高了油润滑条件下密封钢环表面的油膜刚度,得到了最优化的微孔深度。Joshi 等<sup>[13]</sup>在陶瓷盘表面进行了激光织构化处理,研究了微孔对流体润滑向混合润滑转变时临界载荷的影响,适当的微孔密度下可以获得最大的临界载荷值。华希俊等<sup>[14]</sup>在微凹坑织构的 45 钢表面,采用热压法向其填入复合固体润滑剂,将激光织构与淬火技术有效融合,表面硬度提高至 835HV,摩擦系数减小约 50%。镀层表面的织构化处理是在硬质镀层和激光织构相结合的基础上发展起来的,可实现自适应镀层设计及摩擦自适应行为<sup>[15]</sup>。有研究者利用激光在纳米 TiC/DLC 硬质镀层表面切割出沟槽,通过溅射沉积 MoS<sub>2</sub> 对沟槽进行填充,提高了承载能力,并形成连续的润滑剂补充,获得了干/湿环境下的长寿命、低摩擦以及干/湿交替环境时的摩擦学适应性<sup>[16-17]</sup>。

文中在织构化活塞环表面电脉冲沉积 Ni-MoS<sub>2</sub> 镀层,制备了具有规则排列的织构阵列。利用 Ni 作为硬质支撑基底及 MoS<sub>2</sub> 的自润滑性来降低活塞环-缸套的摩擦损失,以期提高发动机的使用效率和寿命。

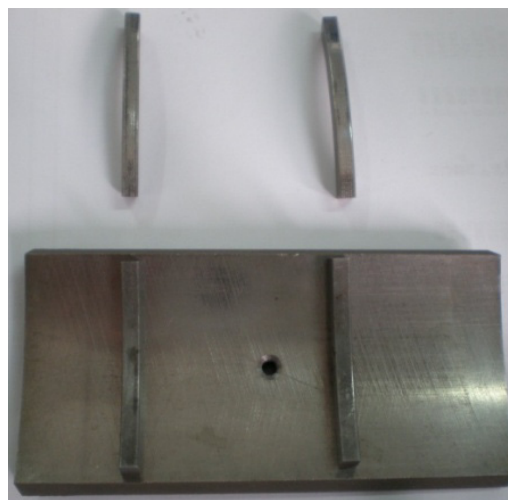
## 1 试验方法及设备

### 1.1 试验材料

选用南京飞燕活塞环厂生产的 6113 活塞环作为摩擦配副的上试样,大柴 6113 缸套作为下试样。活塞环外形为非正圆形开口圆环,材料为合金铸铁,缸套材料为球墨铸铁。图 1 为活塞环和缸套的实物图。



a 整体



b 片段

图 1 活塞环/缸套实物

Fig.1 Pictures of piston ring/cylinder liner

### 1.2 激光表面织构化

将活塞环进行砂纸打磨、抛光、除油、清洗,用手持式 RA200 型粗糙度仪测量打磨后的表面粗糙度,使其数值低于 1  $\mu\text{m}$ 。采用 Nd:YAG 脉冲激光器对活塞环表面进行织构化处理。波长为 1064 nm,晶体 Nd:YAG 偏光,脉冲宽度为 100 ns,脉冲频率为 20 Hz,最大单脉冲能量为 50 MJ,每个点加工 20 脉冲,形成具有一定规律的微孔型织构阵列。利用 Axiover 40 MAT 金相显微镜、CCI 白光干涉表面形貌仪和 Camscan MX2600 扫描电子显微镜观察织构阵列的形貌特征。该试验活塞环的加工面为圆拱形,厚度约 3 mm,外径约 115 mm,内径约 112 mm。将激光束位置固定,活塞环转动,利用步进电机控制活塞环的角位移和线位移,激光束作用在活塞环表面形成规则的微孔阵列。图 2 为激光加工活塞环示意图。

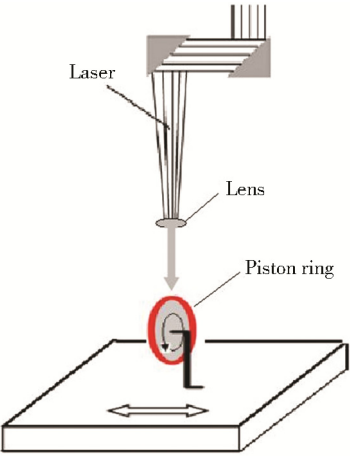


图 2 激光加工活塞环  
Fig.2 Process of laser machining piston ring

1.3 镀层的制备和检测

织构化活塞环试样经过打磨→除油→水洗→脱脂→水洗→稀酸活化的预处理，采用 SMC-30S 型双脉冲电源进行电镀处理，电镀液成分及工艺参数见表 1。利用扫描电子显微镜和 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪对镀层进行观察和组织分析。采用 HVS-1000 型显微硬度计测得镀层的显微硬度，加载载荷 100 g，加载时间 10 s，表面任意选取 3 个点，取其平均值作为镀层显微硬度值。

表 1 电镀液成分及工艺参数  
Tab.1 Composition and technological parameters of electroplating solution

镀液组分	质量浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	工艺参数	数值
NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	150	pH	4~6
NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	30	温度/℃	40~60
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	25	电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> )	2.5~6
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12.5	搅拌速度/(r·min <sup>-1</sup> )	200~400
CTAB	0.5		
MoS <sub>2</sub> 微粒	2~10		

1.4 摩擦磨损试验

利用自主设计的往复式摩擦磨损试验机进行性能测试。图 3 为活塞环/缸套的安装图，上试样活塞环通过夹具装夹定位，并保持静止，加载系统向其施加载荷。通过伺服电机运转带动曲柄滑块机构，将下试样缸套与滑块相连形成往复直线运动。通过传感器测得活塞环与缸套间的摩擦力，经过计算机处理后获得摩擦系数值。摩擦试验结束后，将活塞环试样放入丙酮溶液中超声清洗 10 min，烘干，利用精度为 0.1 mg 的 TG328 型分析天平测得活塞环试样在试验后的磨损量。对比不同摩擦副在相同条件下的磨损率，并利用金相显微镜以及扫描电子显微镜对磨损表

面形貌进行观察，研究其磨损机理。

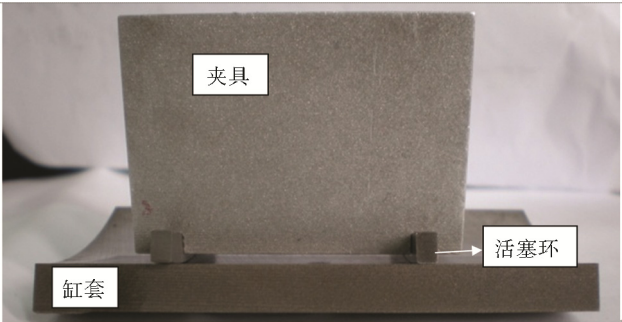


图 3 活塞环/缸套的安装图  
Fig.3 Installation diagram of piston ring/cylinder liner

2 试验结果与分析

2.1 微孔型织构阵列形貌

图 4 为活塞环表面微孔型阵列形貌图。图 4a 为活塞环表面微孔型织构阵列，图 4b 为织构阵列的尺寸轮廓图。由图 4 可知，织构化活塞环的表面较光滑，经过表面抛光后基本去除了激光熔融金属时形成的溅射物，织构阵列沿着活塞环外形呈拱形排列，横向和纵向间距约为 400 μm，微孔直径约为 100~150 μm，深度约为 20~30 μm。

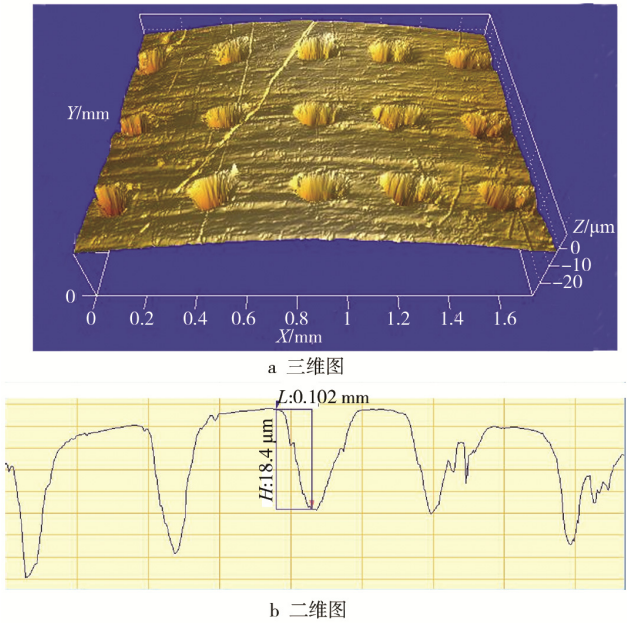


图 4 活塞环表面的织构阵列形貌  
Fig.4 Morphology of texture array on piston surface

2.2 镀层形貌及表征

图 5 为 Ni-MoS<sub>2</sub> 镀层的显微形貌图。试验条件：MoS<sub>2</sub> 微粒的质量浓度为 5 g/L，电流密度为 1.8868 A/dm<sup>2</sup>。图 5a 为镀层的表面形貌，可以看出，镀层表面致密，晶粒大小较均匀，但有少量划痕，应该是活



塞环经打磨抛光后留下的痕迹。图 5b 为镀层的截面形貌, 镀层厚度约为 40  $\mu\text{m}$ , 与基体之间存在着明显的分界线, 且不存在过渡区域。这说明镀层与基体间的结合不是依靠沉积金属与基体发生反应, 而是依靠沉积金属在基体表面形核长大。电镀前对基体金属的前表面处理越好, 越有利于电镀沉积层的生长。图 6 为 Ni-MoS<sub>2</sub> 复合镀层的 XRD 图, 经查阅资料得知, 图中两个强衍射峰分别为 Ni (111)和 Ni (200), 说明镀层中 Ni 的含量较高。其余三个弱衍射峰为复合镀层中的 MoS<sub>2</sub>, 说明镀层中 MoS<sub>2</sub> 含量较低。

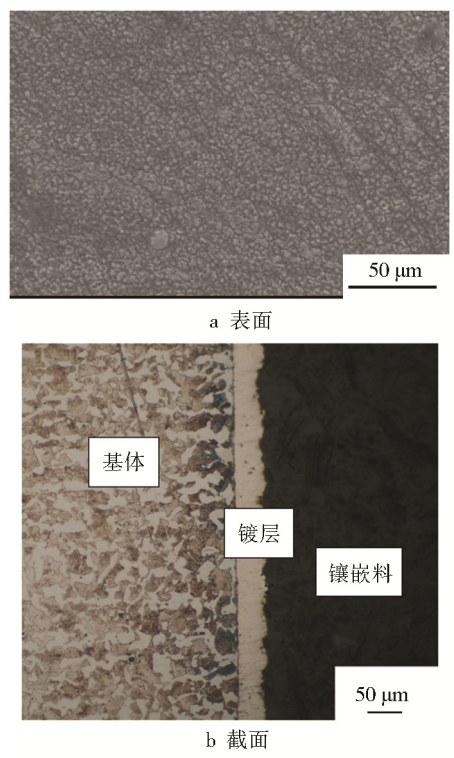


图 5 复合镀层的显微形貌  
Fig.5 Microscopic morphology of composite coatings

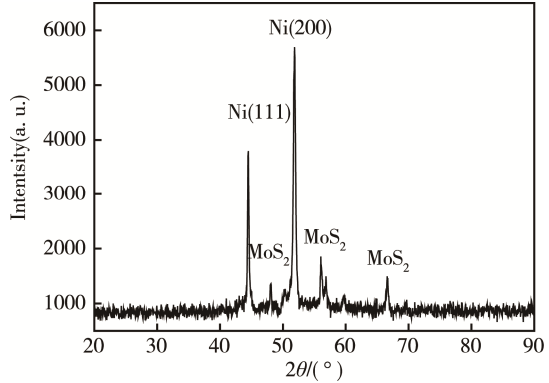


图 6 复合镀层的 X 射线衍射图谱  
Fig.6 X-ray diffraction pattern of composite coatings

不同工艺参数所得复合镀层的硬度见表 2。可以看出, 相同电流密度下, 电镀液中 MoS<sub>2</sub> 微粒质量浓度为 5 g/L 时的镀层硬度略高于其余两种浓度。其原因是微粒浓度越高, 镀层中 MoS<sub>2</sub> 含量越多, 使得镀

层硬度下降。随着电流密度增大, 沉积的金属 Ni 更加致密, 使镀层硬度上升。当电流密度高于一定值时, 随着沉积速度的加快, 镀层上沉积的 MoS<sub>2</sub> 微粒增多, 使镀层硬度下降。

表 2 镀层的显微硬度  
Tab.2 Microhardness of coatings

样品	工艺参数		显微硬度HV <sub>0.1</sub>
	微粒质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> )	
1	3	1.8868	217.43
2	3	2.5157	314.15
3	3	3.1786	234.5
4	5	1.8868	319.45
5	5	2.5157	482.8
6	5	3.1786	286
7	7	1.8868	297.95
8	7	2.5157	414.15
9	7	3.1786	269.85

2.3 摩擦性能

2.3.1 MoS<sub>2</sub> 微粒浓度

图 7 为相同电流密度、不同 MoS<sub>2</sub> 微粒浓度下形成的镀层摩擦系数和磨损率随滑行距离的变化曲线, 条件: 载荷为 50 N, 滑动速度为 0.4 m/s, 干摩擦。

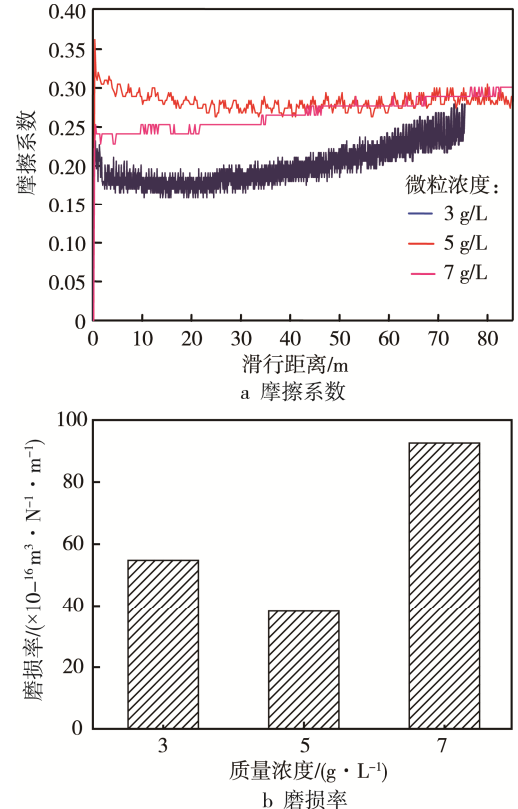


图 7 不同微粒浓度对镀层摩擦学性能的影响  
Fig.7 Effects of different concentrations of particle on tribological property of coatings

随着电镀液中  $\text{MoS}_2$  微粒浓度的增大, 镀层中沉积的  $\text{MoS}_2$  含量增多。微粒质量浓度为 3 g/L 的镀层表面更光滑, 起始摩擦系数较低, 但随着摩擦过程中润滑膜的转移和脱落, 摩擦系数的波动值较大, 且呈上升趋势。从镀层的磨损率来看, 微粒质量浓度为 5 g/L 的镀层具有较高的硬度, 磨损过程中抵抗磨粒磨损和犁沟的能力要优于其余两种, 显示出最低的磨损率, 而电镀层与基体的结合能力有限, 导致磨损后期,  $\text{MoS}_2$  微粒浓度越高, 从基体表面脱落的镀层越多。当微粒质量浓度为 7 g/L 时, 磨损率最大。

### 2.3.2 织构化

图 8 为干摩擦、载荷 100 N、滑动速度 0.4 m/s 的条件下, 织构化与未织构化复合镀层 ( $\text{MoS}_2$  微粒质量浓度为 3 g/L) 的摩擦系数随滑动距离的变化曲线。由图 8 可知, 在织构和复合镀层的协同作用下, 摩擦系数降低了 0.2, 并保持在稳定的波动范围内, 且磨损率下降了近 50%。微孔的存在可以作为固体润滑剂的储存器, 在摩擦过程中, 二硫化钼不断地从微孔中带出, 起到减摩润滑的作用。在摩擦试验的后期 (250 m 以上), 两种摩擦配副的摩擦系数都有明显的上升趋势。

在外加载荷作用下, 两个接触固体间会产生塑性变形。在摩擦过程的初期, 接触应力使材料表面局部

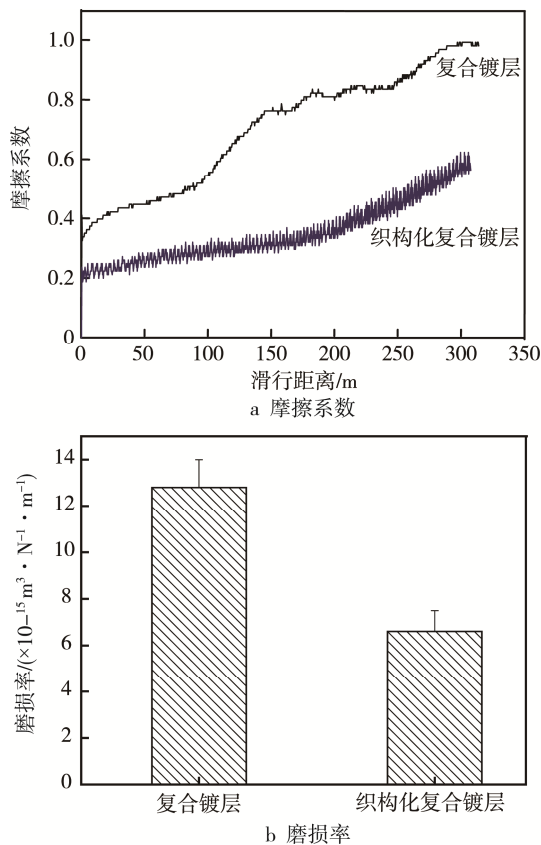


图 8 织构化复合镀层与未织构化镀层的摩擦性能对比  
Fig.8 Tribological property comparison of textured composite coatings with non-textured ones

粗糙度变小, 摩擦系数减小。由于  $\text{MoS}_2$  属于层状结构, 在较高载荷的作用下, 受剪切力的作用, 更多亚表层的  $\text{MoS}_2$  被挤压到摩擦表面, 更容易发挥润滑作用。此外, 微孔可以起到存储润滑剂的作用, 使复合镀层中的  $\text{MoS}_2$  不易被挤出接触面, 持续地为接触表面提供固体润滑剂, 从而降低摩擦系数, 延长使用寿命。在摩擦过程的后期, 接触表面发生塑性流动<sup>[18]</sup>, 相对滑动强化了表层之间的相互渗透, 因此产生剧烈粘着, 摩擦系数升高, 金属直接接触产生粘着磨屑, 并随摩擦副的转动不断地划伤其他表面, 最终导致失效。

### 2.4 摩擦磨损机理

图 9 为干摩擦、载荷 100 N、滑动速度为 0.4 m/s 的条件下, 未织构化镀层与织构化复合镀层的活塞环分别与缸套对磨后的磨痕形貌。从图中可以看出明显的犁沟和划痕存在, 产生的大量黑色物质是对磨时在摩擦接触面形成的硫化物润滑膜, 此润滑膜在常温下具有良好的稳定性及减摩性。在摩擦后期, 由于温度升高形成金属氧化物, 聚集形成润滑膜, 即釉质层<sup>[3]</sup>。高温下, 釉质层具有减摩耐磨作用, 可改善对磨材料的摩擦磨损性能。在往复运动过程中, 活塞环和缸套表面的微凸体互相接触, 可将  $\text{MoS}_2$  带出微孔, 在摩擦面形成连续转移膜, 降低磨痕深度, 如图 9a 所示。未经织构化的摩擦副表面, 在干摩擦下的磨粒磨损较严重, 犁沟密且深, 犁沟之间还有金属的粘连, 如图 9b 所示。

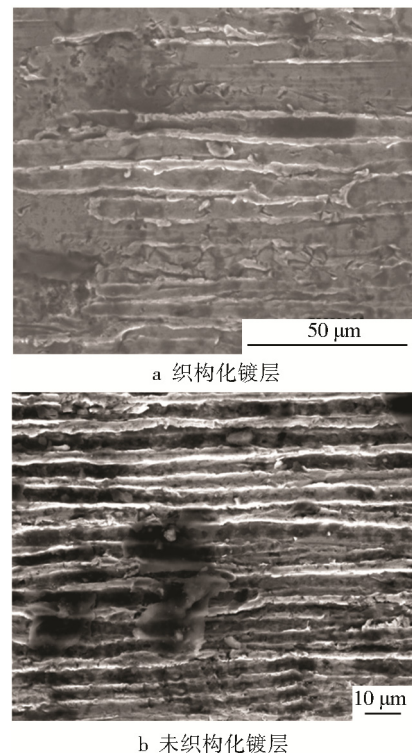


图 9 活塞环与缸套对磨后的磨痕形貌  
Fig.9 Wear scar morphology after grinding of piston ring and cylinder liner

图 10 为活塞环表面单个微孔的磨损形貌及能谱分析图。对微孔内部进行元素分析后可知,微孔内主要有 Fe、C、O、Ni、Mo 等元素。该试验采用的活塞环和缸套均为铸铁,主要含有 Fe、C、O、Si 几种元素,说明微孔内部仍保留了少量的固体润滑剂。在循环应力的作用下,镀层将产生塑性变形及微观裂纹,并沿着切应力方向以纯剪切方式扩展,最终形成磨屑<sup>[5]</sup>。摩擦过程中,镀层中的 Ni 和 MoS<sub>2</sub> 从活塞环表面磨损、脱落至微孔,微孔起到了收集磨屑的作用。摩擦过程中,镀层中 Ni 的硬度和强度都大于基体铸铁,与软质 MoS<sub>2</sub> 共同作用,形成了硬基体和软质点的配合,对固体润滑剂起到了支撑作用。MoS<sub>2</sub> 转移膜沿着滑动方向铺展,与微孔排列方向一致,可与其他微孔内的 MoS<sub>2</sub> 连接成润滑膜,延长摩擦副的使用寿命。

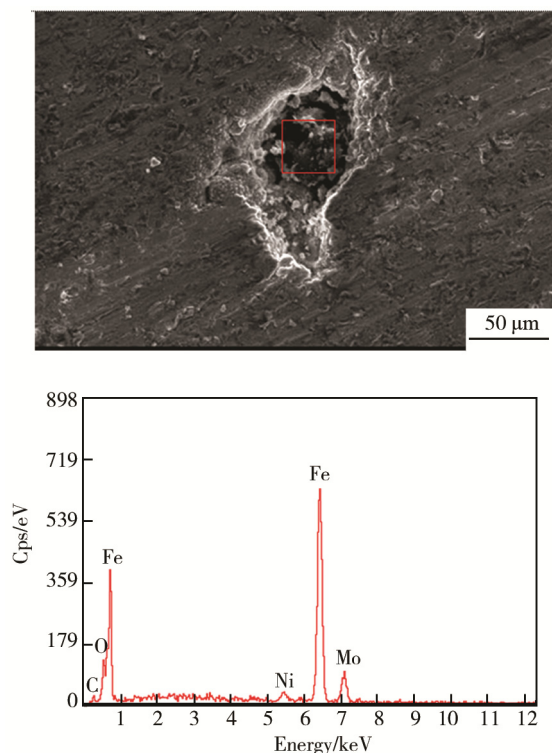


图 10 单个微孔的磨损形貌及能谱分析图

Fig.10 Worn morphology and EDS view of a single micropore

### 3 结论

1) 利用脉冲激光对活塞环表面进行织构化处理,形成了具有规则排列的微孔型结构阵列,微孔直径约为 100~150 μm,深度约为 40 μm,织构阵列的横向和纵向间距约为 400 μm。

2) 在活塞环表面进行复合电镀 Ni-MoS<sub>2</sub>,镀液中 MoS<sub>2</sub> 微粒浓度对镀层的硬度和摩擦学性能影响较大。其中,MoS<sub>2</sub> 微粒质量浓度 5 g/L 的复合镀层在干摩擦下具有最佳的摩擦系数和最低的磨损率。

3) 将织构化与复合电镀相结合,在干摩擦条件下可降低摩擦系数约 0.2,减少磨损率约 50%。表面织构可以有效地储存摩擦副表面间的固体润滑剂和磨粒,并在接触表面形成连续润滑膜,减少了磨粒磨损。

### 参考文献:

- [1] 朱峰,王增全,王建平,等.合金铸铁缸套与 PVD (CrN)活塞环配对时缸套磨损机理[J].内燃机学报,2014,32(5): 474-479.  
ZHU Feng, WANG Zeng-quan, WANG Jian-ping, et al. Wear Mechanism of Alloy Cast Iron Cylinder Liner Coupled with PVD(CrN) Piston Ring[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(5): 474-479.
- [2] 徐佳子,李承娣,朱峰,等.陶瓷颗粒含量对 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合镀活塞环摩擦磨损性能的影响[J].中国表面工程,2016,29(1): 80-86.  
XU Jia-zi, LI Cheng-di, ZHU Feng, et al. Ceramic Particles Content on Friction and Wear Behavior of Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Piston Rings by Composite Plating[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 80-86.
- [3] 刘强,林乃明,邹娟娟,等.改善钢铁材料摩擦学行为的表面织构研究现状[J].表面技术,2016,45(5): 41-50.  
LIU Qiang, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. Recent Developments in Improving Tribological Behaviors of Iron and Steel via Surface Texturing[J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 41-50.
- [4] SUEDE M K, PONS D, LAVROFF J. Design Features for Bobbin Friction Stir Welding Tools[J]. Materials and Design, 2014, 54: 632-643.
- [5] GANFRA J, KROHN H, MIRANDA R M. Friction Surfacing—A Review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 1062-1093.
- [6] 华希俊,孙建国,张培耘,等.激光微织构固体润滑表面高温摩擦学性能研究[J].表面技术,2016,45(6): 112-118.  
HUA Xi-jun, SUN Jian-guo, ZHANG Pei-yun, et al. Tribological Properties of the Laser Micro-texture Surface Filled with Solid Lubricant at Elevated Temperature[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 112-118.
- [7] WIESLWA G, WALDEMAR K, PAWEL P. Improving Tribological Behaviour of Piston Ring-cylinder Liner Frictional Pair by Liner Surface Texturing[J]. Tribology International, 2013, 61: 102-108.
- [8] 万轶,李建亮,熊党生.滑动速度对织构化表面润滑状态的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(12): 4442-4447.  
WAN Yi, LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng. Influence of Sliding Velocity on Lubrication State of Surface Texturing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(12): 4442-4447.
- [9] FELDMAN Y, KLIFERMAN Y, ETSION I. The Validity of the Reynolds Equation in Modeling Hydrostatic



- Effects in Gas Lubricated Textured Parallel Surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 2006, 128: 345-350.
- [10] SHINKARENKO A, KLIGERMAN Y, ETSION I. The Effect of Surface Texturing in Soft Elasto-hydrodynamic Lubrication[J]. Tribology International, 2009, 42(2): 284-292.
- [11] CHUN X, XIANG H M, YOU B X. Effects of Surface Rexturing on Ring/Liner Friction under Starved Lubrication[J]. Tribology International, 2016, 94: 591-605.
- [12] VLADescu S C, OLVER A V, PEGG I G. Combined Friction and Wear Reduction in a Reciprocating Contact through Laser Surface Texturing[J]. Wear, 2016, 358-359: 51-61.
- [13] JOSHI B, TRIPATHI K, GYAWALI G. The Effect of Laser Surface Texturing on the Tribological Performance of Different Sialon Ceramic Phases[J]. Materials International, 2016, 26(4): 415-421.
- [14] 华希俊, 刘凯, 周万, 等. 45<sup>#</sup>钢表面激光织构淬火减摩抗磨复合处理技术研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 86-91.
- HUA Xi-jun, LIU Kai, ZHOU Wan, et al. Research of Antifriction and Wear Resistance Composite Technology by Laser-texturing and Quenching on 45<sup>#</sup> Steel Surface[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 86-91.
- [15] WAN Y, XIONG D S, LI J L. Cooperative Effect of Surface Alloying and Laser Texturing on Tribological Performance of Lubricated Surfaces[J]. J Cent South Univ Technol, 2010, 17: 906-910.
- [16] 张俊彦. 薄膜/镀层的摩擦学设计及其研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 387-396.
- ZHANG Jun-yan. Design and Research Advances of Tribological Films and Coating[J]. Tribology, 2006, 26(4): 387-396.
- [17] HU J, XU H B. Friction and Wear Behavior Analysis of the Stainless Steel Surface Fabricated by Laser Texturing under Water[J]. Tribology International, 2016, 102: 371-377.
- [18] DONNET C, ERDEMIR A. Historical Developments and New Trends in Tribological and Solid Lubricant Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 180-181: 76-84.