

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.05.016

FeNi合金镀铁缸套的摩擦磨损性能*

金梅^a, 韩晓光^b, 董文仲^c, 沈岩^a, 朱峰^b, 徐久军^b

(大连海事大学 a. 轮机工程学院, b. 船机修造工程交通行业重点实验室, c. 董氏电镀有限公司, 辽宁 大连 116026)

摘要: 采用对置往复摩擦磨损试验机, 选用CKS活塞环为配副, 以摩擦因数、磨损量、断油摩擦时间为表征参数, 以BP合金铸铁缸套为参照对象研究FeNi合金镀铁缸套的摩擦磨损性能, 探索FeNi合金镀铁缸套的磨损机制。逐级加载的磨损试验表明: FeNi合金镀铁缸套的摩擦因数较BP合金铸铁缸套增大11%~20%; 而磨损量则降低了11%; 贫油试验表明两种缸套拉缸时间均随载荷增大而缩短, 在40 MPa时FeNi合金镀铁缸套的拉缸时间较BP合金铸铁缸套延长了约6.5倍。与BP合金铸铁缸套的磨损机理为基体碾压平台在反复接触应力作用下脱落, 以及犁削/切削形式的磨粒磨损不同, FeNi合金镀铁缸套的磨损机理主要是网状裂纹周围镀铁层的疲劳剥落。

关键词: 摩擦因数; 磨损量; 贫油试验; FeNi合金; BP合金铸铁缸套; 电镀

中图分类号: TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)05-0122-07

Friction and Wear Properties of FeNi Alloy Plated Cylinder Liner

JIN Mei^a, HAN Xiao-guang^b, DONG Wen-zhong^c, SHEN Yan^a, ZHU Feng^b, XU Jiu-jun^b

(a. Marine Engineering College, b. Key Laboratory of Ship-Machinery Maintenance & Manufacture, c. Dong's Iron Plating Co., Ltd., Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning)

Abstract: The tribological characteristics of FeNi alloy plated cylinder liner were studied by using a self-developed contraposition reciprocating test rig with the CKS piston ring as counterbody, compared with that of the BP alloy cast iron cylinder liner. The friction coefficient, wear loss and cylinder scuffing time were measured separately to explore the friction and wear mechanisms of the two friction pairs. The results of the step-load experiment show that the friction coefficient of FeNi alloy plated cylinder liner increases by 11%~20% to BP alloy cast iron cylinder liner. However, the wear loss shows a contrary tendency which decreases by 11%. The starvation experiment shows that the cylinder scuffing time for the two friction pairs is shortened with increasing applied load, and the cylinder scuffing time for FeNi alloy plated cylinder liner is about 6.5 times longer than BP alloy cast iron cylinder liner at the load of 40 MPa. The wear mechanism of BP alloy cast iron cylinder liner is possibly attributed to the plastic flow layer separating from the substrate by friction force, with ploughing/cutting as the form of abrasive wear. However, the wear mechanism of FeNi alloy plated cylinder liner is mainly fatigue spalling around the mesh cracks of the plating layer.

Keywords: friction coefficient; wear loss; starvation experiment; FeNi alloy; BP alloy cast iron; cylinder liner; plating

0 引言

船舶柴油机是船舶动力系统的核心部分, 随着船用大功率柴油机强化指标的不断提高, 作为核心零部件的气缸套需承受更高的热负荷和机械负荷, 导致常用的合金铸铁气缸套内壁磨损加

剧, 异常磨损和拉缸倾向严重^[1], 还未达到正常使用寿命就提前报废, 造成资源的严重浪费。

再制造成形技术以废旧零部件为毛坯, 通过修复成型能够恢复废旧零部件的形状、尺寸, 达到甚至提升其服役性能, 是再制造工程的核心^[2-3]。

收稿日期: 2016-05-17; 修回日期: 2016-08-29; 基金项目: *国家自然科学基金(51509029); 辽宁省教育厅基金(L2015065); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132015032)

通讯作者: 徐久军(1967—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 摩擦磨损控制方法; Tel: (0411) 8672 9635; E-mail: xu.jiujun@163.com

网络出版日期: 2016-09-30 13:52; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160930.1352.012.html>

引文格式: 金梅, 韩晓光, 董文仲, 等. FeNi合金镀铁缸套的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 122-128. JIN M, HAN X G, DONG W Z, et al. Friction and wear properties of FeNi alloy plated cylinder liner[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 122-128.

目前再制造技术体系中典型的技术有很多, 其中以热喷涂技术、激光熔覆技术和电镀技术应用最为广泛^[4]。热喷涂技术因工艺灵活, 喷涂材料和涂层厚度选择范围广, 能将零件的尺寸恢复和表面功能强化结合起来, 在再制造技术领域的应用中具有很大的潜力^[5], 但热喷涂涂层与基底金属的结合力以机械嵌合为主, 耐冲击性能不高。激光熔覆技术利用高能量密度的激光束熔化填料和基体表层, 在材料表面形成稀释度极低且与基体材料成冶金结合的表面涂层, 但随着熔覆速度增大熔覆层的质量会显著降低^[6-7], 而且需多次扫描才能完成。对于大型的船用气缸套再制造, 由于活塞对缸套表面的反复冲击作用, 采用热喷涂技术制备的涂层容易脱落; 采用激光熔覆技术制备涂层熔覆效率低, 且设备造价昂贵, 维护成本高。因此发展一种合适的方法对缸套表面进行处理, 完成船用气缸套的再制造是非常必要的。

镀铁技术因其沉积快、成本低、污染小等特点, 广泛应用于机械零部件的修复^[8], 采用共沉积 Ni、Co、W 等合金元素的铁基合金镀层能有效提高镀铁层的硬度、降低应力开裂, 改善镀层的耐磨性和抗腐蚀性^[8-9]。铁基合金镀铁再制造技术已成功应用于内燃机车曲轴、船舶柴油机曲轴等大型零部件的修复, 镀层与基体为冶金结合, 结合强度高, 且再制造后的产品机械性能不低于新品^[10]。将该技术应用于气缸套内壁的修复, 既可改善涂层与基体结合力, 同时提高生产效率, 实现废旧气缸套的再制造。

文中选用铬基陶瓷复合镀活塞环(CKS活塞环)为配副, 对比相同工况下 BP 合金铸铁缸套和 FeNi 合金镀铁缸套的摩擦磨损性能和抗拉缸性能, 并分析其摩擦磨损机制, 为铁基合金镀铁再制造技术制备 FeNi 合金镀铁缸套的工程应用提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

基于无刻蚀镀铁工艺, 经交流起镀-交流过渡镀-小直流镀-大直流镀过程, 在 20Cr 缸套内壁沉积 FeNi 合金镀铁层^[8], 镀层厚度约为 676 μm , 平均硬度为 578 $\text{HV}_{0.1}$ 。BP 合金铸铁缸套内壁珩磨, 基体组织为层片状珠光体, 石墨形状为 E 型, 硬度为

168 $\text{HV}_{0.01}$ 。采用德国 OBLF 公司的 QSN750 多通道火花直读光谱仪对铸铁缸套的合金元素及含量进行定量分析, 结果如表 1 所示。

表 1 BP合金铸铁缸套各成分元素含量						
Table 1 Element content of the BP alloy cast into cylinder liner (w / %)						
Element	C	Si	Mn	S	P	B
Content	5.296	3.022	0.971	0.028	0.139	0.018

BP 合金铸铁缸套和 FeNi 合金镀铁缸套内径均为 110 mm, 壁厚 7 mm, 采用电火花线切割机沿缸套圆周方向等分 40 份, 切割成长度 43 mm 的缸套试样。CKS 活塞环镀层厚度约为 60 μm , 平均硬度为 705 $\text{HV}_{0.1}$, Al_2O_3 陶瓷颗粒镶嵌在镀铬层的网状裂纹处, 陶瓷颗粒的含量约为 2.16%。活塞环为片状闭口环, 外径 110 mm, 环高 3 mm, 采用电火花线切割机沿活塞环圆周方向等分 20 份, 切割成扇形活塞环试样。润滑介质为含抗磨极压添加剂—二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)的 RP-4652D 润滑油(型号 SAE15W-40)。

1.2 试验方法

采用对置往复摩擦磨损试验机^[11]模拟缸套-活塞环摩擦学系统的摩擦磨损行为, 活塞环试样固定不动, 缸套试样做往复运动, 如图 1 所示。

磨损试验采用阶梯加载方式进行, 试验时间为 6 h, 初始载荷为 10 MPa, 以 10 MPa/30 min 的速度加载到 60 MPa, 具体试验参数如表 2 所示。试验过程连续充分供油。在每个试验载荷的稳定阶段, 以摩擦力最大值的平均值与法向压力的商值表征摩擦因数。采用精度为 0.1 mg 的梅特勒

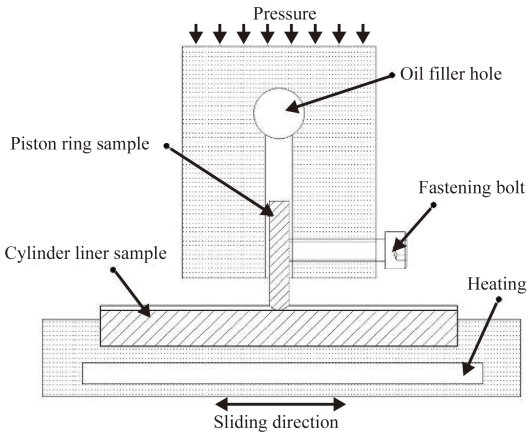


图 1 缸套-活塞环接触状态及运动示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the contact state and movement of cylinder liner-piston ring

表 2 阶梯加载磨损试验参数

Table 2 Parameters of step-load experiment

Temperature / °C	Speed / (r·min ⁻¹)	Load / MPa	Time / min
150	200	10	30
150	200	20	30
150	200	30	30
150	200	40	30
150	200	50	30
150	200	60	210

AL204-IC型电子天平测量缸套试样磨损试验前后的磨损量。每组试验重复4次，以保证试验的准确性和重复性。

采用贫油试验^[12]评价摩擦副的抗拉缸性能(拉缸是一种严重的黏着磨损)，试验依次进行低载磨合阶段、高载磨合阶段、断油摩擦阶段，磨合阶段连续充分供油(约0.1 mL/min)至高载磨合阶段结束，从停止供油至摩擦副发生拉缸的持续时间表征摩擦副的抗拉缸性能。贫油试验分别在两种载荷下进行，具体试验参数如表3所示。

表 3 贫油试验参数

Table 3 Parameters of starvation experiment

Period	Temperature / °C	Load / MPa	Time / min	Speed / (r·min ⁻¹)
Low load period	120	10	10	200
High load period	180	40 60	150	200
Fuel cut period	180	40 60	To scuffing	200

采用德国ZEISS公司的SUPRA 55 SAPPHIRE型场发射扫描电子显微镜和美国EDAX公司的超薄窗X射线能谱仪对试验前后缸套的表面形貌及成分进行观察和分析。

2 结果与分析

2.1 摩擦磨损性能

图2给出了BP合金铸铁缸套和FeNi合金镀铁缸套与CKS活塞环配对时的摩擦因数随载荷的变化规律。由图可知，随载荷由10 MPa增大到60 MPa，两配副的摩擦因数均随着载荷的增大而降低，BP合金铸铁缸套的摩擦因数由0.133减小到0.105，FeNi合金镀铁缸套的摩擦因数由0.159降低到0.117，在每个载荷条件下，FeNi合金镀铁缸套的摩擦因数均大于BP合金铸铁缸套，增大幅度为11%~20%。

图3给出了磨损试验后BP合金铸铁缸套和FeNi

合金镀铁缸套的磨损量。由图可见，FeNi合金镀铁缸套的磨损量低于BP合金铸铁缸套，平均磨损量为1.8 mg，比BP合金铸铁缸套的磨损量减少10%。而CKS活塞环在该参数条件下磨损均甚微。

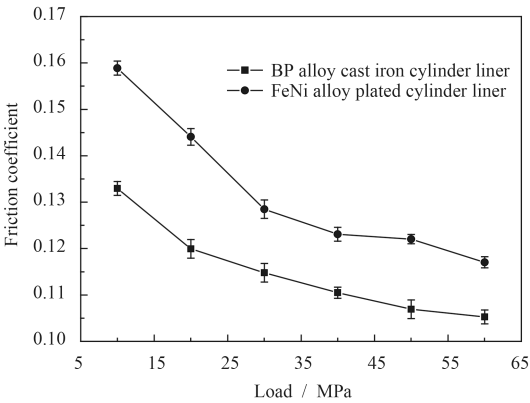


图 2 两配副摩擦因数随载荷变化

Fig. 2 Friction coefficient versus load of two friction pairs

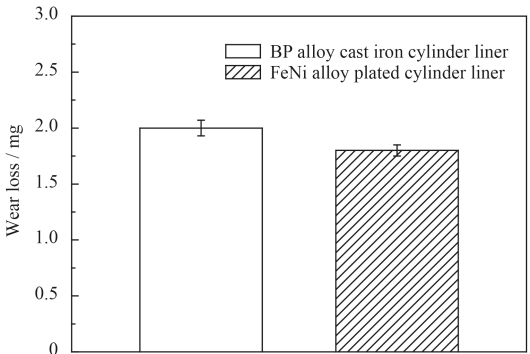


图 3 阶梯加载磨损试验后两缸套的磨损量对比图

Fig. 3 Wear loss of two cylinder liners after step-load experiment

图4给出了载荷为40 MPa的贫油试验过程中，摩擦因数随着时间的变化趋势。由图可知，两配对副在高载磨合期摩擦因数平稳，接触状态良好，停止供油后，摩擦因数均先上升，BP合金铸铁缸套-CKS活塞环配副持续较短时间后摩擦因数急剧上升(即拉缸)，而FeNi合金镀铁缸套-CKS活塞环配副摩擦因数维持在稳定阶段，持续较长时间后才急剧上升。图5给出了40 MPa和60 MPa两种载荷条件下，BP合金铸铁缸套和FeNi合金镀铁缸套与CKS活塞环配对时的断油摩擦时间。由图可知，两配副的断油摩擦时间均随载荷增加而缩短，表明缸套的抗拉缸性能随载荷增大而降低。当载荷为40 MPa时，FeNi合金镀铁缸套-CKS活塞环配副的断油摩擦时间为229 min，远远长于BP合金铸铁缸套-CKS活塞环配副的断油摩擦时间

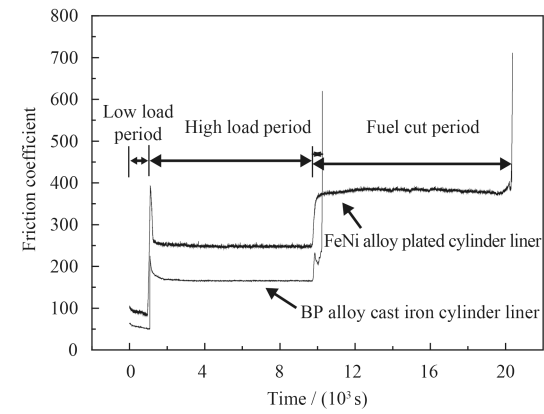


图 4 贫油试验摩擦因数随时间的变化趋势(40 MPa)

Fig. 4 Friction coefficient versus time of starvation experiment (40 MPa)

(35 min), 约为其6.5倍; 当载荷为60 MPa时, 两配副的断油摩擦时间相近, FeNi合金镀铁缸套-CKS活塞环配副的时间略长。与BP合金铸铁缸套-CKS活塞环配副相比, FeNi合金镀铁缸套-CKS活塞环配副表现出更优异的抗拉缸性能。

2.2 摩擦磨损机理

图6给出了阶梯加载磨损试验前后两种缸套的

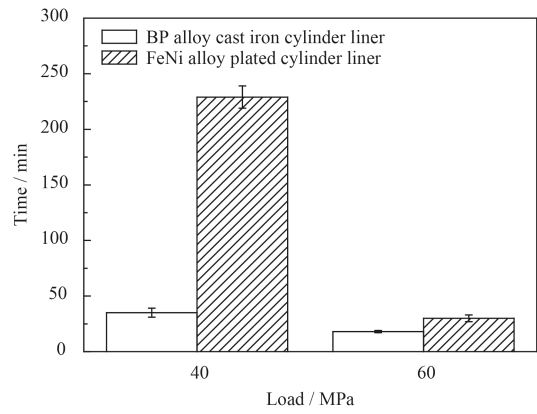


图 5 载荷为40 MPa和60 MPa时两配副断油摩擦时间

Fig. 5 Scuffing time of two friction pairs in 40 MPa and 60 MPa

表面形貌。由BP合金铸铁缸套的表面形貌可知, 磨损前, 铸铁缸套表面珩磨纹清晰, 粗珩磨纹间均匀分布着细小珩磨纹(图6(a)), 磨损后, 铸铁缸套表面珩磨纹依然可见, 表面凹坑增多(图6(b))。对缸套的磨损表面形貌局部放大可以观察到, 基体表面有平整的碾压平台, 在碾压平台边缘基体有开裂脱落迹象。沿滑动方向, 基体表面有因犁沟效应造成的轻微塑性流动, 还有因磨粒切削形

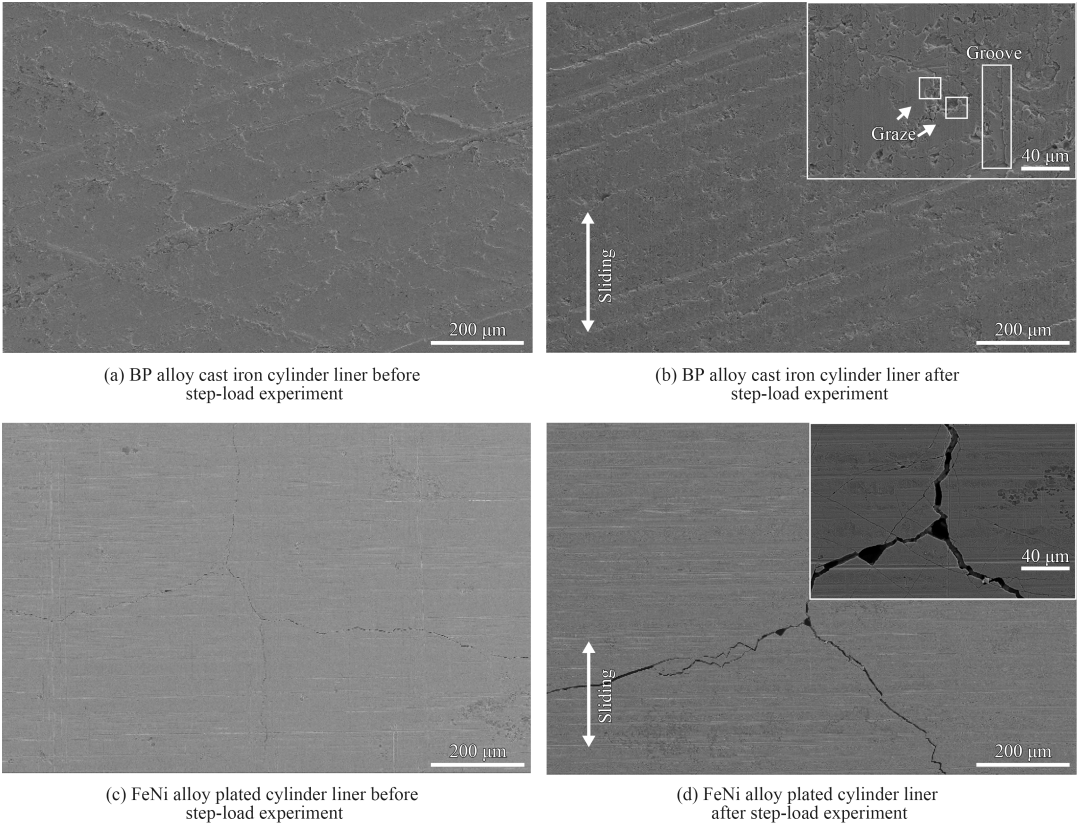


图 6 阶梯加载磨损试验前后缸套的表面形貌

Fig. 6 Surface morphologies of cylinder liners before and after step-load experiment

成的沟槽。与CKS环配对时, BP合金铸铁缸套的磨损机理是基体经挤压塑性变形后形成稳定的接触平台, 在反复的接触应力下发生脱落^[13], 以及犁削/切削形式的磨粒磨损。

由FeNi合金镀铁缸套的表面形貌可知, 磨损前, 镀铁缸套表面存在清晰的磨床加工痕迹, 表面分布着细小的网状裂纹(图6(c)), 磨损后, 镀铁缸套表面的加工痕迹依旧清晰可见, 与BP合金铸铁缸套相比, 表面磨痕不明显(图6(d))。镀铁缸套的硬度比铸铁缸套高, 强度更好, 说明FeNi合金镀铁缸套具有更优的抗磨粒磨损性能。对FeNi合金镀铁缸套的磨损表面形貌进行局部放大可以观察到, 网状裂纹周围出现许多细小的微裂纹, 以及镀层小块碎裂的迹象。

图7给出了阶梯加载磨损试验前后FeNi合金镀铁缸套的截面形貌。由图7(a)可见, 镀铁缸套磨损

前, 镀铁层分布着细长的垂直于表面的裂纹。由图7(b) 3个虚线框所示位置均可观察到, 磨损后的镀铁层出现了平行于表面的裂纹, 这些横向裂纹发源在表层垂直裂纹处(即表面的网状裂纹), 顺着滑动方向扩展, 由图右虚线框中裂纹的放大图(右上角)可观察到, 横向裂纹延伸到表面, 在表面形成微裂纹, 磨削剥落后形成凹坑(图7(c))。

综合FeNi合金镀铁缸套磨损前后表面及截面形貌的分析可知, 镀铁缸套表面的网状裂纹对镀铁层的耐磨损性能具有双重作用, 一方面这些裂纹起着储油和收集磨屑的积极作用, 另一方面这些裂纹也是镀铁层的缺陷, 在摩擦力的多次反复作用下容易引起应力集中, 发生疲劳磨损。与CKS环配对时, FeNi合金镀铁缸套的磨损机理是剥离形式的疲劳磨损, 主要发生在镀铁层表面的网状裂纹周围。

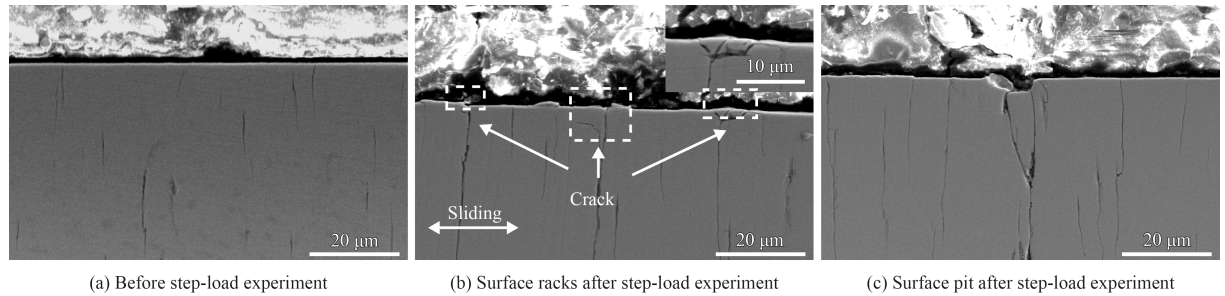


图 7 阶梯加载磨损试验前后FeNi合金镀铁缸套的截面形貌

Fig. 7 Cross section morphologies of FeNi alloy plated cylinder liner before and after step-load experiment

图8给出了两缸套表面的能谱图。由图可知, BP合金铸铁缸套表面除了本身材料的成分外, 还含有Zn、S、P等润滑油成分的元素, 这是由于润滑油中的极压添加剂ZDDP会在高温、高载或剪切力作用下分解, 与铸铁材料表面发生化学反应, 生成低剪切强度的金属硫化物(ZnS、FeS等)造成

的^[14-15]。而镀铁缸套表面则没有与润滑油生成化学反应膜。同时, 铸铁缸套的珠光体基体较易发生塑性变形, 且存在具有自润滑特性的石墨相, 剪切力低。

图9给出了FeNi合金镀铁缸套表面的XRD物相分析, 镀铁层存在铁纹石相(Fe、Ni), Ni元素的固溶

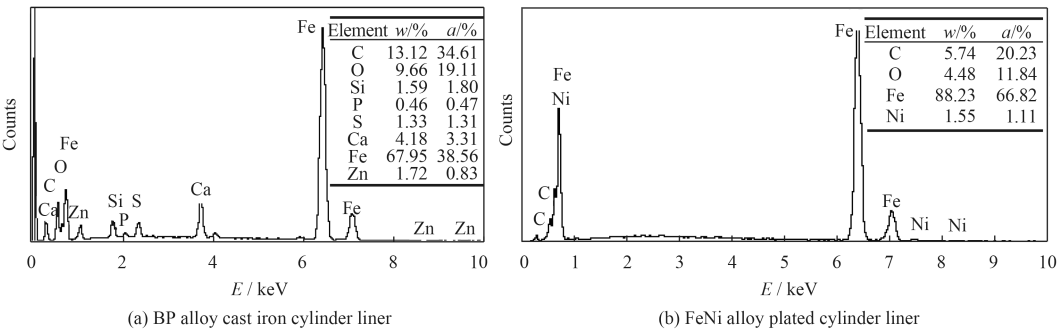


图 8 阶梯加载磨损试验后缸套表面的成分分析

Fig. 8 EDS analysis of cylinder liners surface after step-load experiment

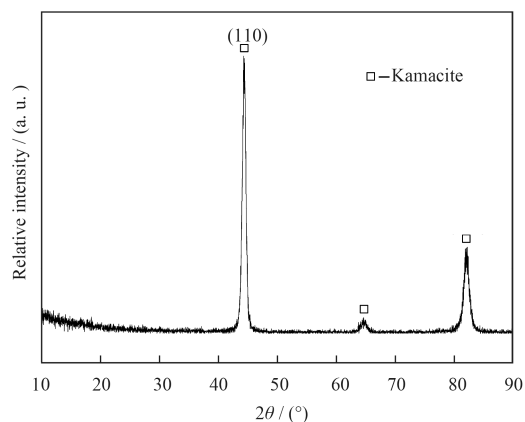


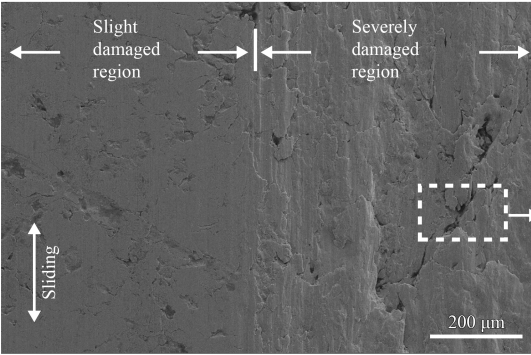
图 9 FeNi合金镀铁缸套表面的XRD图谱

Fig. 9 XRD patterns of FeNi alloy plated cylinder liner

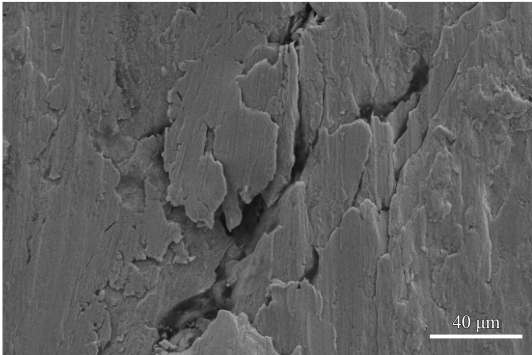
强化作用提高了镀铁层的硬度^[8], 塑性较铸铁低。基于上述两方面原因, FeNi合金镀铁缸套-CKS活塞环的摩擦因数大于BP合金铸铁缸套-CKS活塞环。

图10给出了贫油试验后(载荷为40 MPa)两种缸套的磨损表面形貌。由图可见, 两缸套的磨损表面形貌均明显分为左右两个部分, 左侧为未磨损表面, 右侧为拉缸区域。BP合金铸铁缸套的拉缸区域的表面形貌(图10(a))沿滑动方向呈现犁沟

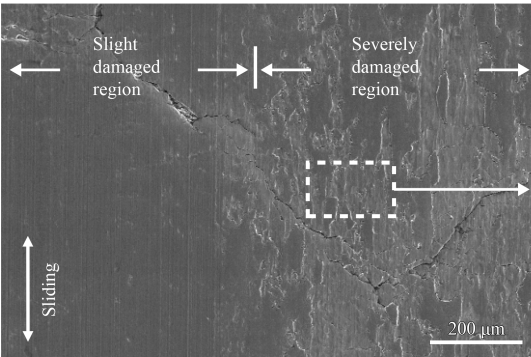
状, 珩磨纹消失。由拉缸区域局部放大图中可以观察到, 基体塑性变形剧烈, 由于深度黏着使基体材料出现撕裂、剥落的迹象, 缸套表面损伤严重。FeNi合金镀铁缸套的表面形貌(图10(c))可观察到, 拉缸区域的表面只是表层材料因黏着而局部不均匀地脱落。对拉缸区域的典型形貌特征放大后可以看见, 部分表层还保持完好, 失去表层的表面沿滑动方向发生塑性轻微流动。铸铁缸套表面的珩磨纹和镀铁缸套表面的网状裂纹都具有一定的储油功能, 随着磨损的进行, 铸铁表面因塑性变形使珩磨纹变浅变窄, 储油功能下降; 而镀铁缸套表面的网状裂纹在摩擦力的往复作用下变宽, 同时在网状裂纹周围产生细小的微裂纹增强了镀铁缸套的储油效果。塑性材料形成的黏着结点破坏发生在离表面一定深度处, 材料塑性越高, 黏着磨损越严重^[16], 合金镀铁层的塑性低于铸铁材料, 所以镀铁层比铸铁材料抵抗黏着和黏着扩展的能力强。因此, 当停止供油以后, 镀铁缸套的抗拉缸性能优于铸铁缸套, 而且发生拉缸时, 镀铁缸套表面的损伤程度较铸铁缸套小。



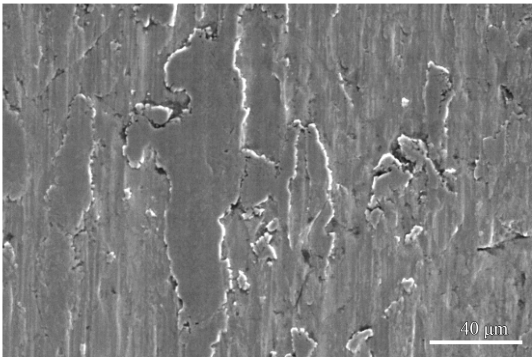
(a) BP alloy cast iron cylinder liner



(b) Magnification of the marked area in (a)



(c) FeNi alloy plated cylinder liner



(d) Magnification of the marked area in (c)

图 10 40 MPa贫油试验后缸套的表面形貌

Fig. 10 Surface morphologies of cylinder liners after starvation experiment in 40 MPa

3 结 论

(1) 与CKS活塞环配对时, FeNi合金镀铁缸套的摩擦因数较BP合金铸铁缸套增大11%~20%, 而磨损量则降低了11%; FeNi合金镀铁缸套具有更优异的抗拉缸性能。

(2) 以CKS环为配副, FeNi合金镀铁缸套的磨损机理是剥离形式的疲劳磨损, 主要发生在镀铁层表面的网状裂纹周围。而BP合金铸铁缸套的磨损则是基体经挤压塑性变形后形成稳定的接触平台, 在反复的接触应力下发生脱落, 以及犁削/切削形式的磨粒磨损。

参考文献

- [1] SPEAROT J A. Friction, wear, health, and environmental impacts—tribology in the new millennium[C]. Akeynote lecture at the STLE Annual Meeting, Nashville, Tennessee, 2000.
- [2] 徐滨士. 绿色再制造工程的发展现状和未来展望[J]. 中国工程科学, 2011, 13(1): 4-10.
XU B S. Development status and prospect of green remanufacturing engineering[J]. Engineering Science, 2011, 13(1): 4-10 (in Chinese).
- [3] 徐滨士, 董世运, 朱胜, 等. 再制造成型技术发展及展望[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 96-105.
XU B S, DONG S Y, ZHU S, et al. Prospects and developing of remanufacture forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(15): 96-105 (in Chinese).
- [4] 孙晓峰, 史佩京, 邱骥, 等. 再制造技术体系及典型技术[J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 117-124.
SUN X F, SHI P J, QIU J, et al. Technical system and typical technologies of remanufacture[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(5): 117-124 (in Chinese).
- [5] 付俊波, 周世魁. 热喷涂技术在航空发动机零部件及其维修中的应用[J]. 失效分析与预防, 2006, 1(2): 61-64.
FU J B, ZHOU S K. Application of the thermal spraying technology in aeroengine part and its service[J]. Failure Analysis and Prevention, 2006, 1(2): 61-64 (in Chinese).
- [6] 左铁钊, 陈虹. 21世纪的绿色制造-激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 106-110.
ZUO T C, CHEN H. Green manufacture in 21 century-laser manufacturing technology and application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 106-110 (in Chinese).
- [7] IGOR S. Laser cladding and laser assisted direct manufacturing[J]. Surface & Coating Technology, 2008, 202(18): 4496-

4502.

- [8] 董文仲, 阎军, 贾珊中, 等. 合金镀铁层的结合和强化机理研究[J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 1-5.
DONG W Z, YAN J, JIA S Z, et al. Research on the bonding and strengthening mechanism of iron-based alloy plated layers[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(1): 1-5 (in Chinese).
- [9] LI T R, CHANG L W, CHEN C H. Effect of electrolyte temperature on composition and phase structure of nanocrystalline Fe-Ni alloys prepared by direct current electrodeposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 207: 523-528.
- [10] 董文仲, 贾珊中, 阎军, 等. 曲轴铁基合金镀铁再制造技术工艺应用研究[J]. 柴油机, 2011, 33(2): 43-46.
DONG W Z, JIA S Z, YAN J, et al. Technological application research on remanufacturing of iron-base alloy plating iron for crankshaft[J]. Diesel Engine, 2011, 33(2): 43-46 (in Chinese).
- [11] 朱峰. 对置往复式摩擦磨损试验机研制及其试验[D]. 辽宁: 大连海事大学, 2011.
ZHU F. Development of a contraposition reciprocating test rig for tribological study and friction & wear test[D]. Liaoning: Dalian Maritime University, 2011 (in Chinese).
- [12] 金梅, 沈岩, 朱亚琼, 等. 基于贫油试验方法的镀铬缸套-喷钼活塞环抗黏着性能研究[J]. 车用发动机, 2012, 6: 43-50.
JIN M, SHEN Y, ZHU Y Q, et al. Anti-adhesion performance of chrome-plated cylinder liner and sprayed molybdenum piston ring based on starvation experiment[J]. Journal of Vehicle Engine, 2012, 6: 43-50 (in Chinese).
- [13] 王成彪, 温诗铸. 铸铁材料在边界润滑条件下形成薄片状磨屑的塑性流动机制[J]. 摩擦学学报, 1992, 3(12): 203-211.
WANG C B, WEN S Z. The mechanism of plastic flow for cast iron materials in forming flake-like debris under boundary lubrication condition[J]. Journal of Tribology, 1992, 3(12): 203-211 (in Chinese).
- [14] YIN Z F, KASRAI M, FULLER M, et al. Application of soft X-ray absorption spectroscopy in chemical characterization of antiwear films generated by ZDDP part I: the effects of physical parameters[J]. Wear, 1997, 202: 172-191.
- [15] SPIKES H. The history and mechanisms of ZDDP[J]. Tribology Letters, 2004, 17(3): 469-489.
- [16] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第四版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
WEN S Z, HUANG P. Principles of tribology (Fourth Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012 (in Chinese).