

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.002

表面硅颗粒整形对高硅铝合金缸套摩擦磨损性能的影响*

李承娣, 徐佳子, 沈岩, 金梅, 徐久军

(大连海事大学 船机修造工程交通行业重点实验室, 辽宁 大连 116026)

摘要: 研究了一种新型的高硅铝合金缸套表面处理技术, 采用橡胶圈+金刚石颗粒的方式研磨缸套表面, 这种表面硅颗粒整形技术可以使硅颗粒凸出表面并且边角圆化。整形处理缸套表面2 min, 可制备出凸出高度约为 1.2 μm , 边角轮廓自然圆化过渡的硅颗粒。摩擦磨损试验结果表明, 相对于未整形, 整形处理后的高硅铝合金缸套的摩擦因数可从0.14降低到0.12, 降幅约为14%; 磨损量从0.7 mg降低到0.2 mg, 降幅约为71%。未整形的硅颗粒表面覆盖一层铝, 或与缸套表面保持同一高度。当活塞环与缸套对磨时, 铝作为软金属易发生塑性流变, 被碾压覆盖到硅颗粒表面上, 发生黏着磨损, 所以摩擦因数及磨损量较大。而整形后的硅颗粒凸出缸套表面以承担载荷, 加强了表面支承载力, 而且与铝基体共同形成的凹陷处储油, 增大润滑效果, 同时其边角圆化, 避免了应力集中。所以整形技术可以有效地降低高硅铝合金缸套的摩擦因数及磨损量, 改善摩擦磨损性能。

关键词: 缸套; 边角圆化; 摩擦磨损

中图分类号: TG580.68; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)06-0008-07

Effects of Shaping Silicon Particles on Friction and Wear Properties of Al-Si Alloy Plated Cylinder Liner

LI Cheng-di, XU Jia-zi, SHEN Yan, JIN Mei, XU Jiu-jun

(Key Lab of Ship-Machinery Maintenance & Manufacture, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning)

Abstract: A new surface treatment technology about Al-Si alloy cylinder liner was studied. By grinding the surface with rubber ring and diamond particles, the silicon particles protruded above the surface and the edges were rounded. When shaping the silicon particles for 2 min, the protrusion height was 1.2 μm with rounded edges. Results of wear test show that compared with the unshaping samples, the friction coefficient of shaping samples can be reduced from about 0.14 to 0.12 (a decline of 14%), and the weight loss decreases from about 0.7 mg to 0.2 mg (a decline of 71%). Some unshaping silicon particles are covered by the aluminum layer, and some as high as the surface. When the cylinder liner wears against the piston ring, aluminum as soft metal is easy to generate plastic deformation. Then, aluminum covers above the silicon particles with adhesive wear during friction. This leads to a higher friction coefficient and weight loss. The shaping silicon particles are exposed above the surface to bear load, which strengthens the surface bearing force. The formation of the aluminum matrix can be filled with oil to increase lubrication. The rounded edges can avoid stress concentration. Therefore, shaping silicon particles can effectively reduce the friction coefficient and weight loss to improve the wear behavior.

Keywords: cylinder liner; round the edges; friction and wear

收稿日期: 2016-05-19; 修回日期: 2016-09-09; 基金项目: *国家重大基础研究发展计划(973计划)(2010); 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(3132015032)

通讯作者: 徐久军(1967—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 内燃机摩擦学; Tel: (0411) 8472 9635; E-mail: xu.jiujun@163.com

网络出版日期: 2016-12-14 15:48; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161214.1548.008.html>

引文格式: 李承娣, 徐佳子, 沈岩, 等. 表面硅颗粒整形对高硅铝合金缸套摩擦磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 8-14. LI C D, XU J Z, SHEN Y, et al. Effects of shaping silicon particles on friction and wear properties of Al-Si alloy plated cylinder liner[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 8-14.

0 引言

高硅铝合金缸套因其具有质量轻、导热性好、与铝活塞热物理相容性好、可回收率高等优点, 受到了业界学者们的关注^[1-4]。但是由于铝合金较软较黏, 耐磨性较差, 所以在这方面还需要提高, 加入变质剂细化晶粒以及固溶强化和沉淀强化等方法都能够提高材料本身的耐磨性。而表面处理工艺能够改善其在磨合期的摩擦磨损性能, 从而进一步提高缸套整体的耐磨性。在实际生产中, 缸套表面大多采用机械珩磨的方法进行处理, 这种工艺可以形成便于储油的网状珩磨纹。对于高硅铝合金缸套材料来说, 铝具有较强的延展性, 容易在加工的过程中覆盖在硅颗粒表面, 导致磨合期摩擦因数大。高硅铝合金缸套材料的理想表面结构是作为硬质相的硅颗粒凸出承载, 凹下的铝基体位置可以储油加强润滑效果, 凸出的硅颗粒边角圆化以减少应力集中。在活塞环与高硅铝合金缸套表面摩擦时, 凸出结构避免了其与软金属直接接触, 可以减少黏着而且硬质硅颗粒承载能够提高配对副的摩擦磨损性能。化学刻蚀是一种可以实现这种结构的有效方法, 有学者^[4-7]用碱腐蚀液刻蚀高硅铝合金材料表面, 得到硅颗粒凸出表面的效果, 并分析其摩擦磨损性能。但是刻蚀后暴露在表面的硅颗粒边缘尖角锋利, 易诱发拉缸。考虑到化学刻蚀过程中产生腐蚀液, 对环境造成一定污染且腐蚀时间不易控制, 也不便于在工业上的大量推广。在改造硅颗粒形状方面, 有研究发现以热处理的铸造方式可以使铝硅合金材料内部的硅颗粒尺寸细化, 并且形状圆化^[8-11], 其中, 苏州理工大学的李庆林^[8]对

高硅铝合金材料进行了热扩散处理后, 硅相细化并且球化, 但并不能够使硅颗粒呈现凸出且边角圆化的效果。这是因为在高硅铝合金材料成型过程中, 表面需要进行机械打磨等操作, 这就造成表面硅颗粒要么会被铝覆盖, 要么颗粒表面被切削成一个平面, 不能保持完整的球状, 导致表面硅颗粒不能凸出。文中通过机械加工的手段对高硅铝合金缸套表面的硅颗粒进行整形处理, 使其能够同时实现凸出表面且边角圆化, 从而提高摩擦磨损性能, 国内外在此部分的研究鲜有报道。对高硅铝合金缸套表面的硅颗粒整形需要设计符合该技术的试验机, 转速及处理时间可控, 保持缸套自身的弧面而且实现硅颗粒凸出表面且边角圆化的特征。

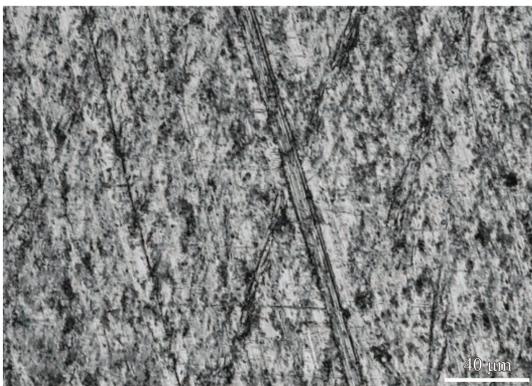
1 试验材料及方法

对缸径110 mm, 壁厚8 mm的熔炼压铸高硅铝合金缸套进行9°等分切割, 切取的缸套试样长为42 mm。缸套的抗拉强度为298 MPa, 屈服强度为251 MPa, 其硬度为135 HBS。高硅铝合金缸套的主要化学成分见表1, 激光共聚焦显微镜(LSM)观察的表面形貌见图1。图1(a)中可以看到均匀的网状珩磨纹, 但是观察不到明显的硅颗粒。图1(b)是抛光后的表面, 硅颗粒呈块状分散在表面, 大块颗粒尺寸约为30~40 μm。

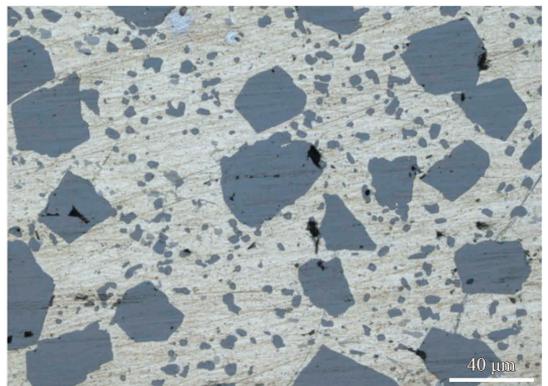
表1 高硅铝合金缸套的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of high aluminum-silicon alloy cylinder liner (w%)

Element	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Zn
Content	71	20.1	0.9	5	0.6	1.0



(a) Honing surface



(b) Polished surface

图1 高硅铝合金缸套的表面形貌(LSM)

Fig.1 Surface morphologies of Al-Si alloy cylinder liner (LSM)

为了使高硅铝合金缸套表面的硅颗粒凸出且边角圆化,研制了一种新型试验机,见图2。针对高硅铝合金材料软基体+硬质颗粒的特点,试验机选用高弹性的橡胶圈来实现去除缸套表层的铝而不破坏硅颗粒。同时在接触表面添加微纳米级尺寸($<2\ \mu\text{m}$)的金刚石颗粒,以此倒角硅颗粒的边缘。缸套试样固定在夹具中,加载螺杆从下往上施加力,使试样与橡胶圈接触。橡胶圈以100 r/min旋转同时进行0.5 Hz往复运动,施加2 N的力,对缸套进行整形处理0~4 min。

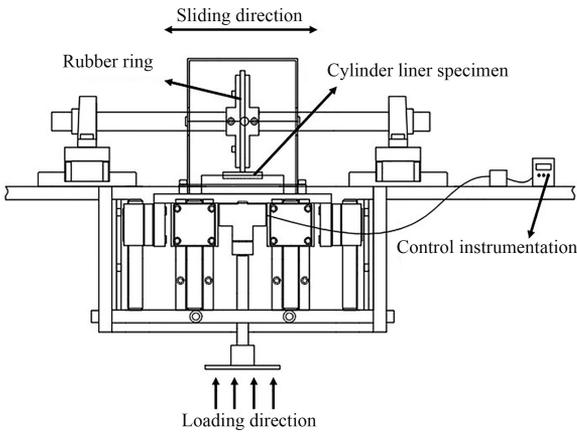


图2 表面硅颗粒整形试验机结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the test machine for shaping the silicon particles on the surface

将表面硅颗粒整形后的高硅铝合金缸套试样超声清洗后进行摩擦磨损试验。选择铬基陶瓷复合镀活塞环(CKS环)与缸套进行对磨。对外径110 mm,环高3 mm的CKS环进行沿圆周方向等分32份切割,得到活塞环试样。CKS环硬度为761 HV_{0.1},镀层厚50 μm 。将活塞环试样工作面向下,固定在对置往复摩擦磨损试验机上;缸套试样工作面向上摆放,固定在加热块上。从试验机上方进行加载,使活塞环与缸套的工作面完全接触。加热块随着连接曲轴的运转,进行往复运动,往复行程为30 mm(如图3所示)。此种方式是模拟缸套-活塞环组件在实际工况下的运动形式。

选用长城RP-4652D润滑油(15W-40 CF-4)作为润滑介质,供油量约0.1 mL/min。摩擦磨损试验参数为:加载载荷10 MPa,往复运动频率3.3 Hz,温度150 $^{\circ}\text{C}$,试验时间4 h,其中磨合时间1 h,磨合载荷5 MPa。每组试验至少重复4次。采集的摩擦因数通过选取稳定磨合期内的摩擦力最大值来计算。

采用OLYMPUS, LEXT OLS4000激光共聚焦显微镜(LSM)观察缸套磨损前后表面形貌;采用Philips, XL-30TMP型扫描电子显微镜(SEM)观察缸套剖面形貌;采用梅特勒AL204-IC型电子天平称量试样磨损前后质量差值表征其磨损量。

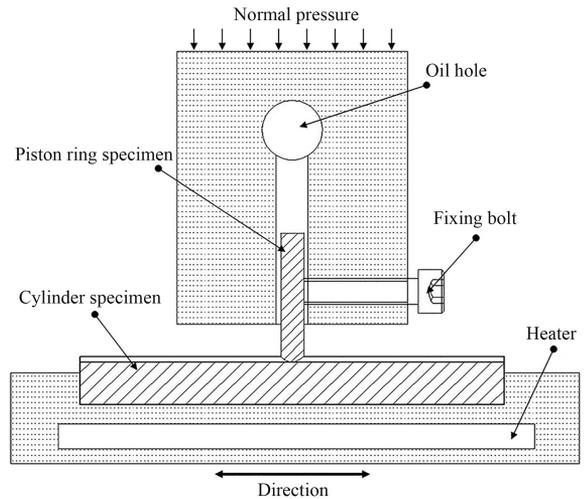


图3 摩擦磨损试验机示意图^[5]

Fig.3 Schematic diagram of the test machine for wear^[5]

2 结果和分析

2.1 磨损前缸套表面形貌

图4是磨损前的表面硅颗粒整形后高硅铝合金缸套表面形貌(以整形2 min为例)。从图中可以看出,经过表面整形后,硅颗粒边缘明显不太尖锐,与铝基体结合状态较好,没有发现大量的裂缝和脱落的痕迹。

图5给出了整形前后的硅颗粒凸出高度的轮廓。未整形的硅颗粒与基体几乎在一个平面上,并没有明显的凸出(图5(a)(c)),而整形后的硅颗粒明显凸出基体表面,通过软件测量,高度约为1.2 μm (测量值为1.243 μm),且凸出的边角圆化,轮廓呈现自然过渡的凸起(图5(b)(d))。

图6是整形处理前后高硅铝合金缸套的剖面形貌。如图6(a)所示,未整形缸套接近表面处的硅颗粒会覆盖一层铝,表面一层比较平滑。而图6(d)中,整形后缸套接近表面处的硅颗粒有凸出迹象,且凸出部分的边角圆化。

对于高硅铝合金缸套,采用文中的整形试验方法,可以有效地去除覆盖在硅颗粒上的铝,并同时获得表面硅颗粒凸出且边角圆化的效果。

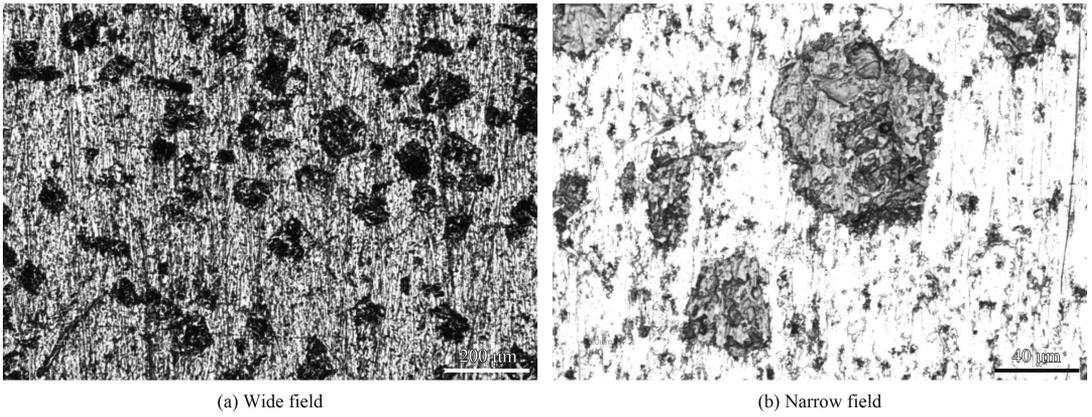


图 4 磨损前整形后的高硅铝合金缸套表面形貌(LSM)
 Fig.4 Unworn surface morphologies of shaping Al-Si alloy cylinder liner (LSM)

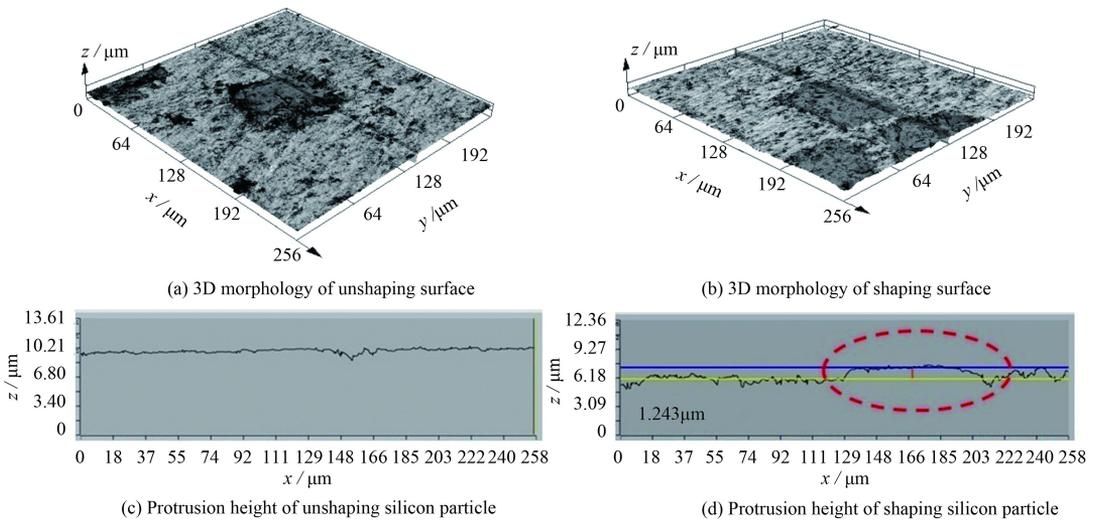


图 5 表面硅颗粒整形前后的凸出高度(LSM)
 Fig.5 Protrusion height of silicon particle before and after shaping (LSM)

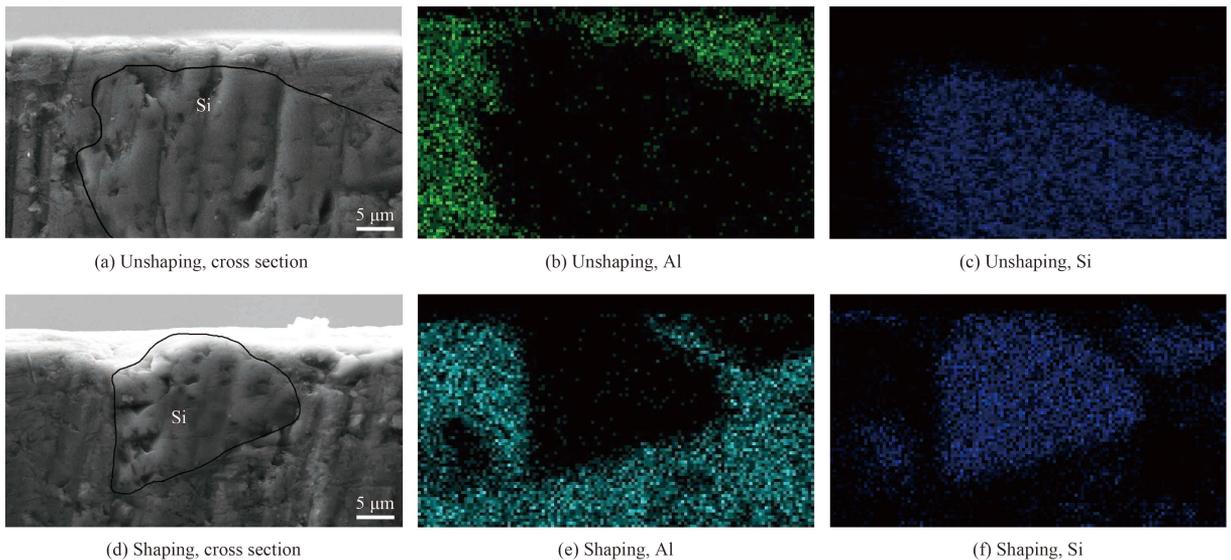
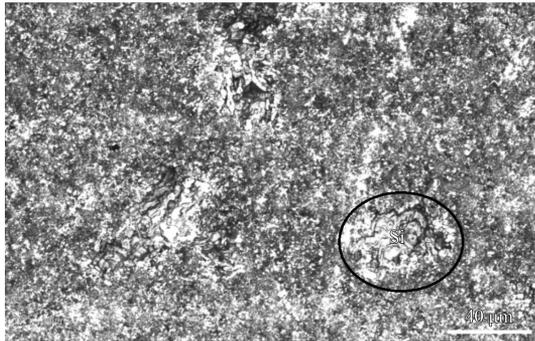


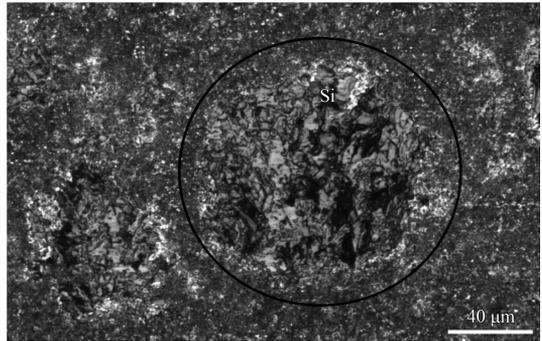
图 6 高硅铝合金缸套剖面形貌以及 Al、Si 元素分布
 Fig.6 Cross section morphologies of Al-Si alloy cylinder liner and Al, Si element distribution

2.2 磨损后缸套表面形貌

图7是磨损后高硅铝合金缸套表面形貌。图7(a)中的硅颗粒表面上依然有部分被铝覆盖,并没有完全地暴露在表面上。这是因为未整形的高硅铝合金缸套由于机加工的过程中使铝覆盖在硅颗粒



(a) Unshaping



(b) Shaping

图7 磨损后的高硅铝合金缸套表面形貌(LSM)

Fig.7 Worn surface morphologies of Al-Si alloy cylinder liner (LSM)

上较易观察到硅颗粒的存在(图7(b))。

2.3 摩擦因数及磨损量

图8为表面硅颗粒整形前后的试样摩擦因数和磨损量,图9为不同整形时间的表面形貌。从图8中可以看出,摩擦因数随着整形时间的增加而先降低后增高,其中在2 min时达到最低,说明整形处理可以降低摩擦系数,但是整形时间不宜过长,会引起摩擦因数的增加。未整形(整形时间为0 min)的摩擦因数平均值约为0.14,整形后最低的约为0.12,整形处理能够降低14%的摩擦因数。由图8磨损量曲线可以看出整形后的磨损量明显小于未整形,其中同样在2 min时达到最低,说明整形处理可以减少磨损量。未整形的磨损量约为0.7 mg,而整形后的磨损量最低约为0.2 mg,降低了71%。

从图9中可以看出,整形后硅颗粒明显地露出表面,开始作为承载相与活塞环接触,这就减轻了铝与活塞环直接接触所导致的黏着磨损现象,也降低了摩擦因数和磨损量。但是整形4 min时(图9(d)),硅颗粒与铝基体结合处开始出现缝隙,大部分硅颗粒与基体不再紧密地结合,这就导致硅颗粒在摩擦过程中容易脱落成为磨粒,造成摩擦因数的迅速增加,甚至与未整形相近。而整形4 min时的磨损量虽然有所增加,但是还低于未整形,可能是由于脱落的硅颗粒有部分被重新碾压到铝基体中,所以磨损量并没有增加太多。这说

明整形处理能够有效地降低摩擦系数和磨损量,但是整形时间不宜过长。

文中旨在探索机械法表面硅颗粒整形的工艺,仅讨论了整形时间对缸套摩擦因数和磨损量的影响,对摩擦副的摩擦学研究有一定的局限性,只宜针对改善缸套与活塞环磨合期的摩擦学性能。

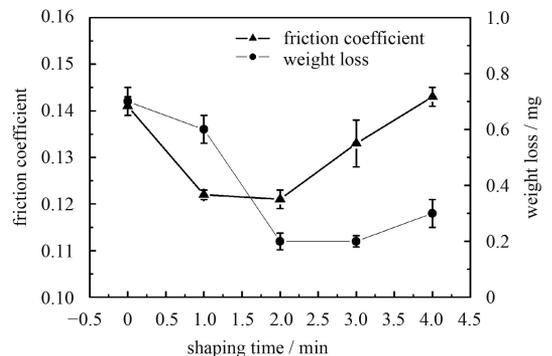


图8 摩擦因数和磨损量随时间变化曲线

Fig.8 Curves of the friction coefficient and weight loss with shaping time

3 讨论

图10是高硅铝合金缸套的摩擦过程示意图。如图10(a)(b)所示,未整形的硅颗粒表面覆盖一层铝,或与缸套表面保持同一高度。当活塞环与缸套对磨时,铝作为软金属易发生塑性流变,经过往复运动的碾压会覆盖到硅颗粒表面上。由于此

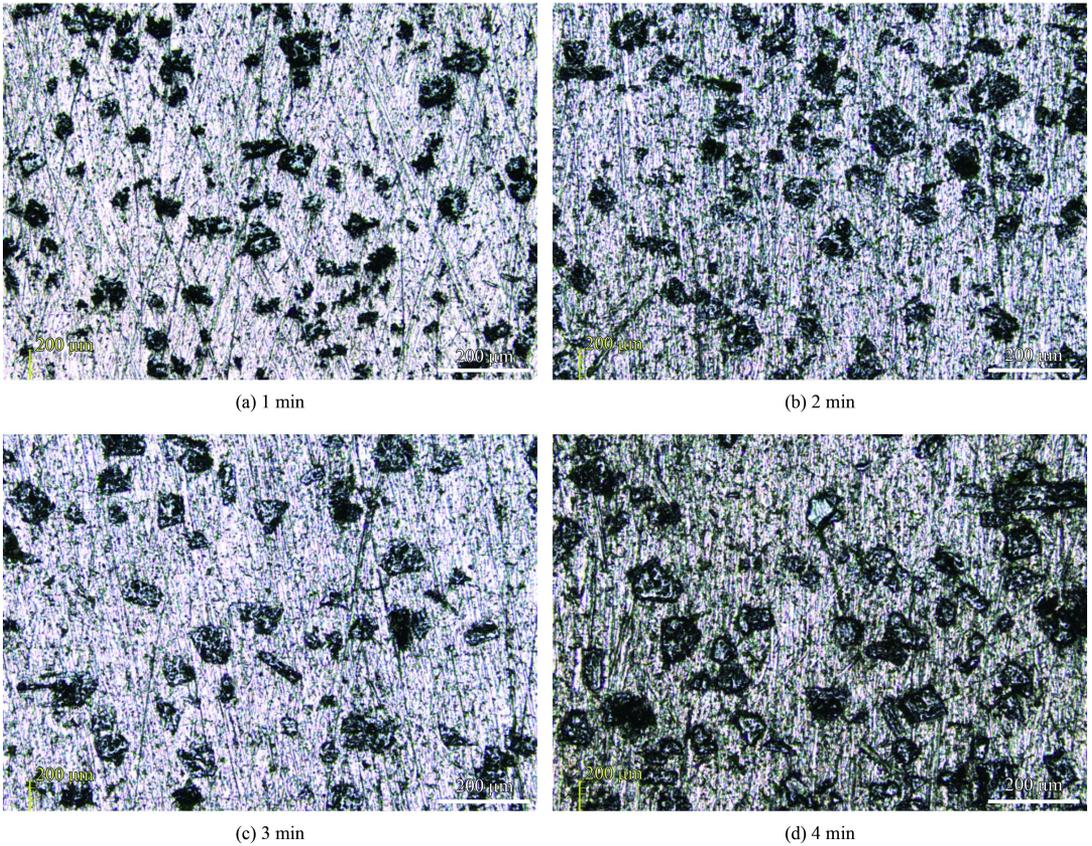


图 9 不同整形时间的表面形貌(LSM)

Fig.9 Surface morphologies of Al-Si alloy cylinder liner in different shaping time (LSM)

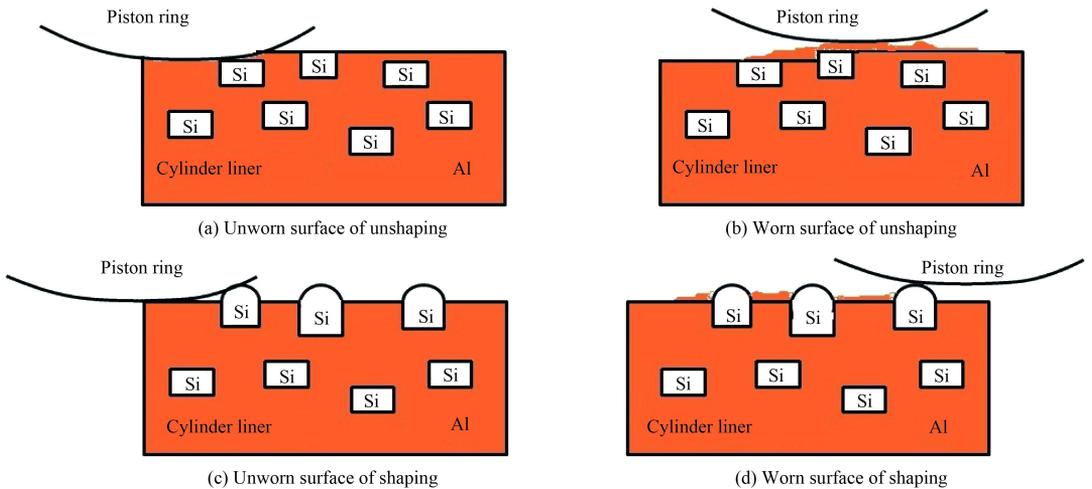


图 10 高硅铝合金缸套摩擦过程示意图

Fig.10 Schematic diagrams of the friction process of Al-Si alloy cylinder liner

时活塞环与缸套接触是金属对磨金属的状态, 且软金属铝在摩擦界面不断地被塑性碾压, 较易发生黏着磨损, 所以摩擦因数及磨损量较大。而整形后的硅颗粒凸出缸套表面一定的高度, 铝不易覆盖到硅颗粒上, 这就避免了铝与活塞环直接接触(图10(c)(d))。硬质硅颗粒凸出承担载荷, 加强

了表面支承力, 而且与铝基体共同形成的凹陷处便于储油, 增大润滑效果。凸出的硅颗粒边角圆化, 与活塞环摩擦时不易擦伤其表面, 降低了摩擦过程中受力的应力集中。所以整形处理后的高硅铝合金缸套可以有效地降低摩擦因数及磨损量, 改善了其摩擦磨损性能。

4 结 论

(1) 研究了一种新型的高硅铝合金缸套表面处理技术, 采用橡胶圈+金刚石颗粒的方式研磨缸套表面, 这种表面硅颗粒整形技术可以使硅颗粒凸出表面并且边角圆化。

(2) 整形处理缸套表面2 min, 可制备凸出高度约为 1.2 μm , 边角轮廓自然圆化过渡的硅颗粒。

(3) 摩擦磨损试验结果表明, 相对于未整形, 整形处理后的高硅铝合金缸套的摩擦因数可从 0.14降低到0.12, 降幅约为14%; 磨损量从0.7 mg降低到0.2 mg, 降幅约为71%。

参考文献

- [1] 孙廷富, 郭珉, 郭安振, 等. 高硅铝合金缸套研制[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1): 60-62.
SUN T F, GUO M, GUO A Z, et al. Development of high-silicon aluminium alloy cylinder sleeve[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1): 60-62 (in Chinese).
- [2] DWICEDI D K. Adhesive wear behaviour of cast aluminium-silicon alloys: overview[J]. Materials & Design, 2010, 31(11): 2517-2531.
- [3] 孙廷富, 郭珉, 辛海鹰, 等. 高硅铝合金缸套材料摩擦磨损性能研究[J]. 车辆与动力技术, 2007(2): 14-18.
SUN T F, GUO M, XIN H Y, et al. The friction wearing properties research of high-silicon aluminium alloy cylinder sleeve[J]. Vehicle & Power Technology, 2007(2): 14-18 (in Chinese).
- [4] 孙廷富, 洪晓露, 杨亚琛, 等. 高硅铝合金缸套材料腐蚀加工技术研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(5): 102-105.
SUN T F, HONG X L, YANG Y C, et al. Corrosion processing technology of high-silicon aluminium alloy cylinder sleeve material[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(5): 102-105 (in Chinese).
- [5] 李承娣, 沈岩, 王永彬, 等. 化学刻蚀高硅铝合金缸套的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 104-109.
LI C D, SHEN Y, WANG Y B, et al. Wear behaviour of the chemical etching high-silicon aluminium alloy cylinder liner[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(6): 104-109 (in Chinese).
- [6] SLATTERY B E, EDRISY A, PERRY T. Investigation of wear induced surface and subsurface deformation in a linerless Al-Si engine[J]. Wear, 2010, 269: 298-309.
- [7] SLATTERY B E, PERRY T, EDRISY A. Microstructural evolution of a eutectic Al-Si engine subjected to severe running conditions[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 512: 76-81.
- [8] 李庆林. 过共晶Al-20%Si合金Si相形态的演变及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
LI Q L. On the morphological evolution of Si phases and properties of hypereutectic Al-20%Si alloy[D]. Lanzhou: Journal of Lanzhou University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [9] OGRIS E, WAHLE A, LUCHINGER H, et al. On the silicon spheroidization in Al-Si alloys[J]. Journal of Light Metals, 2002, 2: 263-269.
- [10] OHMI T, KUDOH M. Control of primary silicon crystal size of semi-solid hypereutectic Al-Si alloy by slurry melt mixing process[J]. Journal of Japan Institute of Metals, 1994, 58: 1311-1317.
- [11] LI Q L, XIA T D, LAN Y F, et al. Effects of melt superheat treatment on microstructure and wear behaviour of hypereutectic Al-20%Si alloy[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(7): 835-841.

(责任编辑: 王鑫)