

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170418004

激光光整对高硅铝合金缸套材料摩擦磨损性能的影响

李承娣, 金 梅, 徐久军, 沈 岩

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

摘 要: 切取高硅铝合金缸套试样, 并对工作面进行激光光整, 研究其对摩擦磨损性能的影响。结果表明, 激光扫描速度为 600 mm/min, 离焦量 2 mm, 功率为 1 000 W 时硅颗粒最大凸出高度为 1.243 μm , 与未处理试样相比, 摩擦因数从 0.141 降到 0.113, 降幅达 19.9%, 磨损量从 0.7 mg 降到 0.2 mg, 降幅达 71.4%; 激光光整使高硅铝合金缸套工作面上的硅颗粒凸出且边角圆化, 硅颗粒的凸出, 避免了铝基体与活塞环的直接接触, 并增大了储油润滑的效果, 减少了粘着磨损的风险, 也降低了摩擦力, 从而改善了高硅铝合金缸套材料的摩擦磨损性能。

关键词: 激光光整; 高硅铝合金缸套; 摩擦磨损; 硅颗粒; 凸出高度

中图分类号: TG176; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)05-0089-06

Effects of Laser Finishing on Wear Behavior of a High-silicon Aluminum Alloy Cylinder Liner

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

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

Abstract: The effect of laser finishing on wear behavior of high-silicon aluminum alloy samples, which were cut from a cylinder liner, was studied. The results show that: when the laser scanning speed is 600 mm/min, the laser defocus is 2 mm and the laser beam power is 1 000 W, the maximum protrusion height is 1.243 μm . The results of the wear test show that the friction coefficient can be reduced from about 0.141 to 0.113 (decline of 19.9%), and the weight loss decreases from about 0.7 mg to 0.2 mg (decline of 71.4%) compared with that of the original samples. Silicon particles are protrude above the surface with rounded edges by laser finishing. The exposed silicon particles prevent aluminum from directly contacting with the piston ring. This improves the lubrication, reduces the adhesion and decreases the friction coefficient. Therefore, the wear behavior of the high-silicon aluminum alloy cylinder liner is improved.

Keywords: laser finishing; high-silicon aluminum alloy cylinder liner; wear and friction; silicon particles; protrusion height

0 引 言

节能环保是当今社会发展的重要主题之一, 汽车作为能源消耗产品需要更加重视这一问题, 这就推动了发动机零部件逐步向轻量化、耐磨性好的方向发展。用高硅铝合金材料制备的缸套明

显要轻于其它材料的缸套, 且具有导热性好和回收率高的特性^[1-3], 但其耐磨性弱于常用的铸铁缸套。表面处理工艺是提高耐磨性的有效手段之一, 能够使缸套提高磨合期的摩擦磨损性能。其中, 化学刻蚀是一种简捷有效的方法, 用 NaOH 溶液腐蚀高硅铝合金缸套工作面, 使硅颗粒凸出

收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2017-06-20

网络出版日期: 2017-09-11 16:37; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170911.1637.006.html>

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

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (3132017009); 辽宁省自然科学基金 (20170540083); 中国博士后科学基金 (2017M611209)

Fund: Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132017009), Natural Science Foundation of Liaoning Province (20170540083) and China Postdoctoral Science Foundation (2017M611209)

引文格式: 李承娣, 金梅, 徐久军, 等. 激光光整对高硅铝合金缸套材料摩擦磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 89-94.

LI C D, JIN M, XU J J, et al. Effects of laser finishing on wear behavior of a high-silicon aluminum alloy cylinder liner[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 89-94.

承载，避免了铝与活塞环的直接接触，也避免了与铝活塞的接触风险，减少了粘着磨损从而提高摩擦磨损性能，国外温莎大学等、国内中国兵器科学院宁波分院和大连海事大学均有团队对此部分进行研究^[4-8]。但是化学刻蚀采用碱溶液，对环境有一定的污染，且硅颗粒凸出的边角较尖锐，易划伤对磨面。另有学者提出机械加工法(国外弹性砂轮磨削)对缸套工作面的硅颗粒进行整形，使其凸出且边角圆化，这种结构能够明显降低摩擦因数和磨损量^[9]，此法的缺点是机械加工过程中，铝基体表面和硅颗粒边角易产生毛刺。为了优化这种硅颗粒凸出且边角圆化的结构，采用激光对高硅铝合金进行光整处理，使工作面较为光滑无毛刺，同时改善其摩擦磨损性能。

激光光整具有快速加热和快速冷却的特点，在短时间内使材料表面发生局部熔化蒸发并迅速成型，不破坏试样的本身形状，通常用于降低材料表面粗糙度^[10-11]。而针对高硅铝合金材料铝基体镶嵌硅颗粒的特性，用激光光整处理表面使硅颗粒凸出工作面且边角圆化从而改善摩擦磨损性能。与激光熔覆、激光合金化等方法不同，对高硅铝合金缸套工作面进行激光光整不需要添加任何合金元素，即可提高摩擦磨损性能。另外，与激光熔凝也不同，激光熔凝可以使高硅铝合金表面的硅颗粒尺寸细化，提高硬度^[12-16]，以提高耐磨性，但通常采用的功率较高、激光扫描速度较慢，熔凝过程中试样变形较大。国内外学者对高硅铝合金缸套激光表面处理研究，关注的重点通常是激光熔覆和激光熔凝，而激光光整的研究鲜有报道。文中研究了一种激光光整工艺，期望使高硅铝合金缸套试样工作面的硅颗粒凸出且边角圆化，以改善其摩擦磨损性能。

1 试验材料及方法

将缸径 110 mm、壁厚 8 mm、长度 21 cm 的高硅铝合金缸套(主要成分见表 1)进行 9°等分切割，取 42 mm 长再次进行切割获得缸套试样。高硅铝合金的硬度为 135 HBS，屈服强度为 251 MPa，抗拉强度为 298 MPa。采用 CO₂ 连续横流激光器对试样进行光整处理，激光扫描速度为 600 mm/min，功率 400~1 200 W，离焦量 2 mm。

摩擦磨损试验采用对置往复式摩擦磨损试验机，对磨试样选择铬基陶瓷复合镀活塞环(CKS 环)，

镀层厚 50 μm，硬度 761 HV_{0.1}。摩擦磨损试验条件见表 2。

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	71.0	20.1	0.9	5.0	0.6	1.0

表 2 摩擦磨损试验条件
Table 2 Conditions of wear tests

Parameters	Values
Oil	RP-4652D
Fuel flow rate / (mL·min ⁻¹)	0.1
Temperature / °C	150
Reciprocating frequency / Hz	3.3
Running-in load / MPa	5
Running-in time / h	1
Stationary load / MPa	10
Stationary time / h	3

采用 DL-LPM-V 激光数控加工机；采用 Philips，XL-30TMP 型扫描电子显微镜(SEM)观察缸套试样磨损前后形貌；采用 OLYMPUS，LEXT OLS4000 激光共聚焦显微镜(LSM)观察缸套试样工作面形貌及轮廓；采用梅特勒 AL204-IC 型电子天平称重试样磨损前后质量表征其磨损量。

2 结果和分析

2.1 激光光整缸套试样工作面形貌

图 1 是高硅铝合金缸套抛光试样激光光整前后形貌。激光光整试样选取功率为 1 200 W 处理后的试样。对比图 1(a)和图 1(b)，激光光整前缸套试样工作面较为平滑，而处理后的缸套试样工作面可以观察到明显的块状凸起物，经能谱检测得知(图 1(c))，块状物为硅，说明激光光整可以使硅颗粒凸出缸套试样工作面，硅颗粒尺寸约为 40 μm。图 2 给出了处理前后的工作面形貌及轮廓。对比图 2(a)和图 2(b)，激光光整后的硅颗粒边缘处发生变化，不同于中心平台区域。处理前后硅颗粒尺寸没有变化，只使凸出工作面的边角圆化。图 2(c)中，未经过处理的缸套试样工作面硅颗粒与铝基体处在同一水平面上，而图 2(d)显示了经激光光整后的硅颗粒凸出工作面，而且轮廓较为平滑，硅颗粒边角圆化。

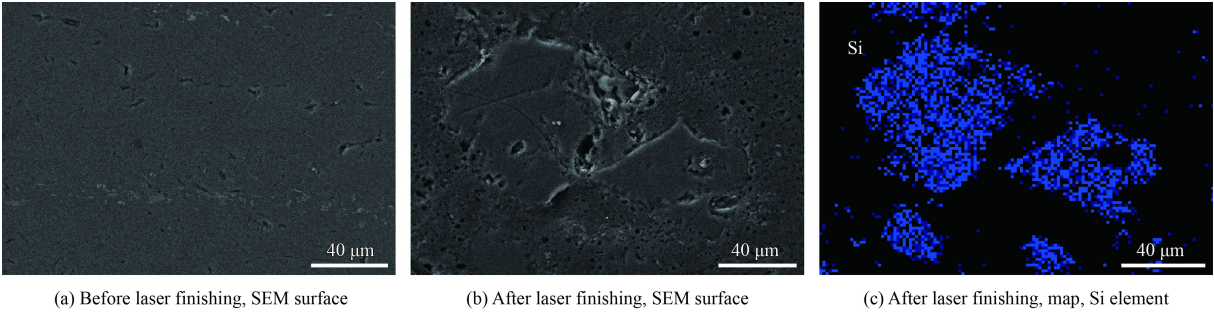


图 1 高硅铝合金缸套抛光试样激光光整前后形貌 (SEM)

Fig.1 Polished surface morphologies of high-silicon aluminum alloy cylinder liner before and after laser finishing (SEM)

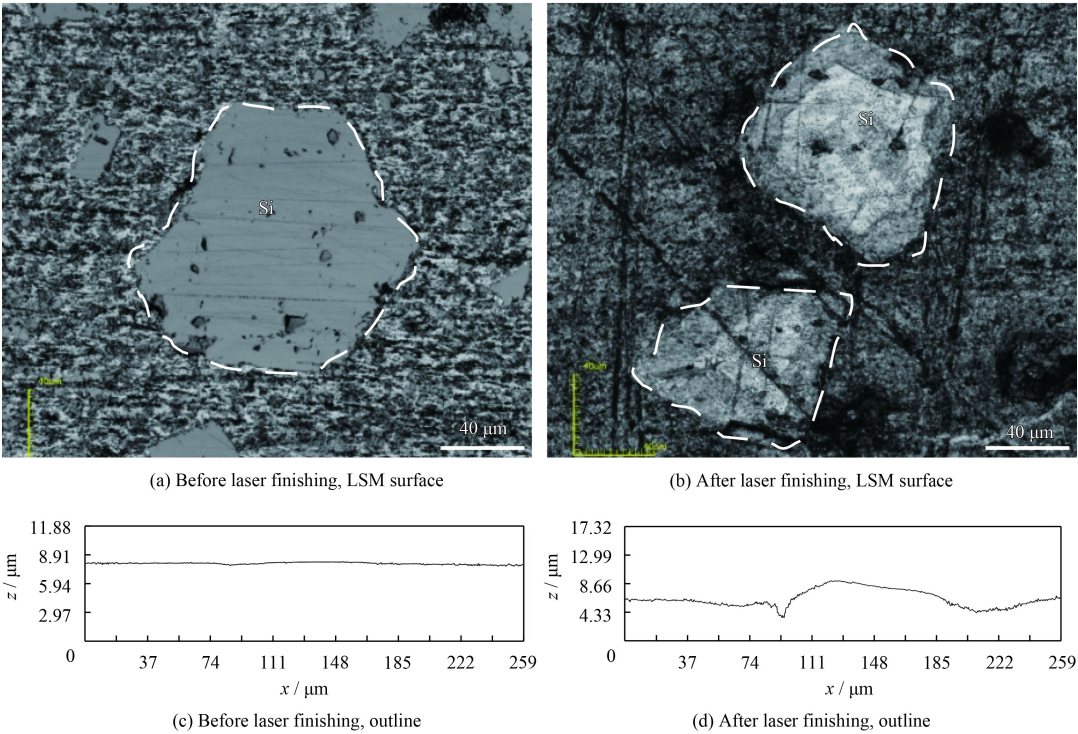


图 2 高硅铝合金缸套抛光试样激光光整前后形貌及轮廓 (LSM)

Fig.2 Polished surface morphologies and outlines of high-silicon aluminum alloy cylinder liner before and after laser finishing (LSM)

图 3 是不同激光功率下硅颗粒最大凸出高度。激光功率为 400、600、800、1 000 和 1 200 W 时, 硅颗粒凸出高度分别为 0.701、0.976、1.116、1.243 和 1.741 μm 。可见, 硅颗粒凸出工作面的高度随着激光功率的增加而增加。在相同的离焦量和扫描速度下, 加大激光功率会使试样工作面温度变高, 熔化蒸发速度变快。铝的熔点比硅的熔点低, 在激光扫描的高温下, 铝先于硅熔化, 所以加大激光功率, 硅颗粒凸出的高度也随之增加。但是功率不宜过高, 试验过程中发现超过 1 400 W 缸套试样工作面开始发生变形, 高功率下会导致试样受热严重而引起变形。

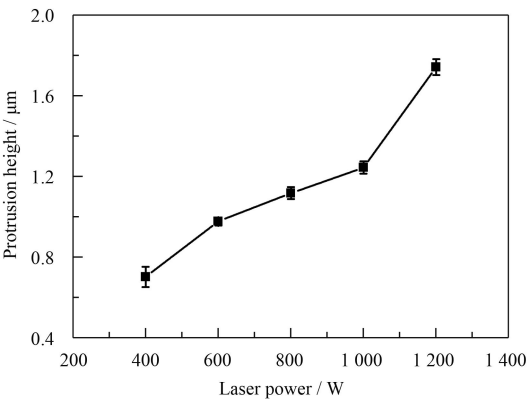


图 3 不同激光功率下硅颗粒的凸出高度

Fig.3 Protrusion height of silicon particle with different laser power

2.2 缸套试样工作面磨损前后的形貌

图4是高硅铝合金缸套试样工作面磨损前后的形貌。图4(a)是未经激光光整的缸套试样工作面的形貌,可以观察到清晰的珩磨纹,工作面没有明显凸出的硅颗粒。磨损后工作面有铝基体被碾压的痕迹,平台区域相对光滑(图4(b))。如图4(c)所示,激光光整后的缸套试样工作面可以观察到凸出的硅颗粒,与铝基体结合状态较好,

边界处自然过渡。经磨损后,工作面无太大变化,硅颗粒依然清晰可见(图4(d))。未经处理的高硅铝合金缸套试样工作面大部分被一层铝覆盖,在摩擦磨损过程中,铝因其较软且粘的特性会被反复碾压流动,甚至重新覆盖在硅颗粒上,同时会发生粘着磨损^[17]。而激光光整的缸套试样工作面硅颗粒凸出,起到承载作用,且硬度较大,磨损试验后无脱落迹象。

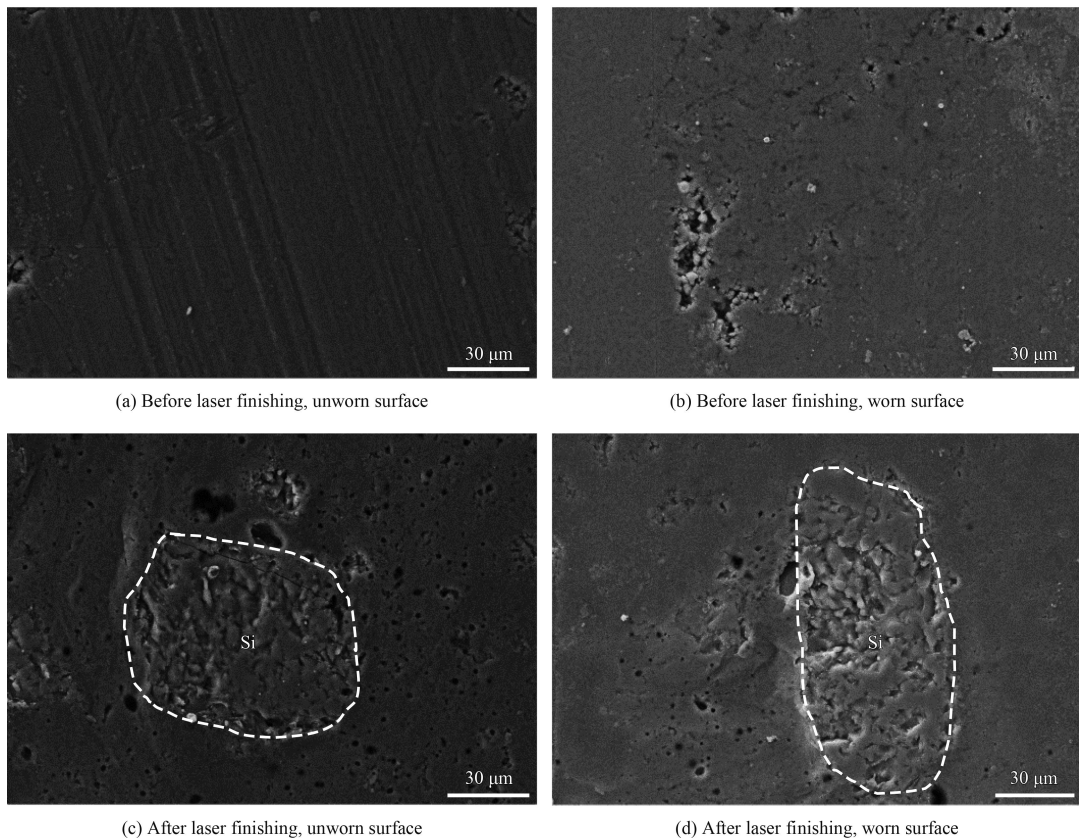


图4 高硅铝合金缸套试样工作面磨损前后形貌

Fig.4 Unworn and worn surface morphologies of high-silicon aluminum alloy cylinder liner

2.3 摩擦因数及磨损量

图5是不同激光功率光整处理下缸套试样的摩擦因数。未处理的高硅铝合金缸套试样摩擦因数为0.141;功率为400、600、800、1 000和1 200 W时,摩擦因数分别为0.139、0.132、0.123、0.113和0.126。如图所示,激光光整后的缸套试样摩擦因数均低于未处理试样。随着激光功率的增加,摩擦因数先降低后增高,其中1 000 W时,摩擦因数最低,与未处理相比较,降低了19.9%。

图6是不同激光功率光整处理下的缸套试样磨损量。未处理的高硅铝合金缸套试样磨损量为0.7 mg,功率为400、600、800、1 000和1 200 W

时,磨损量分别为0.35、0.3、0.25、0.2和0.5 mg。如图所示,激光光整后的缸套试样磨损量均低于未处理。与摩擦因数的规律相同,随着激光功率的增加,磨损量先降低后增高,其中1 000 W时,磨损量最低,与未处理相比较,降低了71.4%。

激光光整可以有效降低高硅铝合金缸套试样的摩擦因数和磨损量,是因为处理后硅凸出工作面进行承载,避免了铝基体与对摩活塞环的直接接触,凸出的硅颗粒与硅颗粒之间的区域可以储油,促进润滑效果。另外,激光高温下,硅颗粒凸出铝基体表面且同时边角熔融呈现圆化状态。这种结构改善了高硅铝合金缸套试样的摩擦磨损

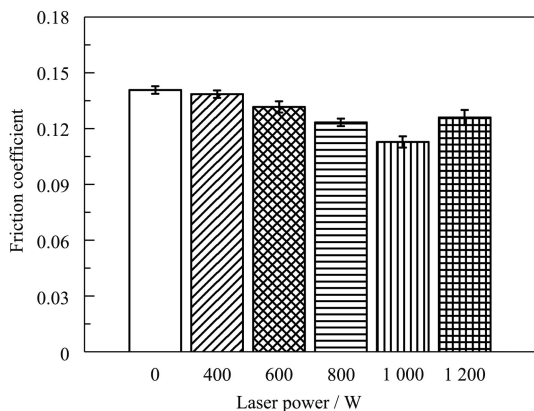


图5 不同激光功率下缸套试样的摩擦因数

Fig.5 Friction coefficient of cylinder liner samples with different laser power

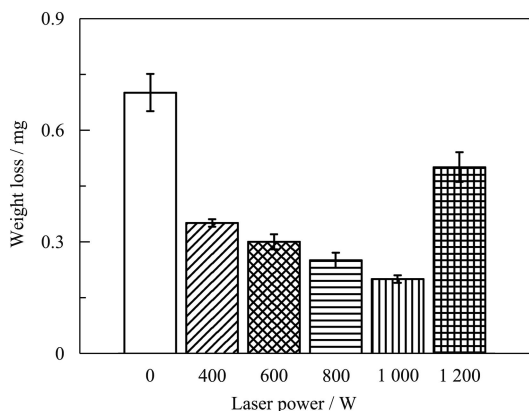


图6 不同激光功率下缸套试样的磨损量

Fig.6 Weight loss of cylinder liner samples with different laser power

性能,而且硅颗粒与基体结合较好,磨损后没有发现脱落迹象。

3 讨论

图7是高硅铝合金缸套试样激光光整及摩擦过程示意图。未经处理的缸套试样工作面有一层铝,硅颗粒不能凸出工作面。摩擦过程中,对摩的活塞环不断地往复碾压铝,使其覆盖到硅颗粒上,此时磨损状态是粘着磨损,所以摩擦因数和磨损量较大,而且磨损工作面比较光滑,硅颗粒没有完全凸出工作面(图4(b))。而激光光整的缸套试样,硅颗粒可以凸出工作面,这是因为激光的光能迅速被缸套试样工作面吸收变为热能,在短时间($10^{-7} \sim 10^{-1}$ s)内工作面温度急速上升至高温($10^3 \sim 10^9$ °C/s)^[11],高温可使工作面铝层熔化蒸发以此露出硅颗粒。硅颗粒的熔点比铝基体高,

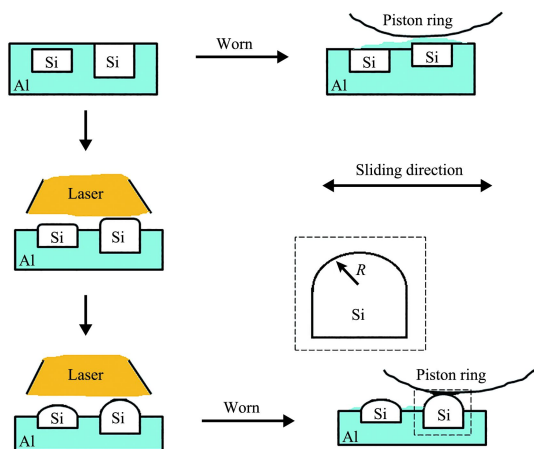


图7 高硅铝合金缸套试样激光光整及摩擦过程示意图

Fig.7 Schematic diagrams of laser finishing and friction process of high-silicon aluminum alloy cylinder liner

所以在同样的高温下,硅颗粒晚于铝基体熔化,当铝熔化蒸发到一定程度时,硅颗粒开始从凸出的边角处发生熔化,并在瞬间空气冷却过后呈现圆化状态。根据表面能最低原理,硅在受热熔化成型过程中,为了降低表面能,在表面张力的驱使下,最终呈现圆化的形态。圆角的曲率半径为 R ,相对于尖角,圆角的 R 变大,则在摩擦过程中的接触应力变小,从而导致摩擦力降低,减少摩擦因数。硬质硅颗粒凸出工作面便于提高工作面的承载力,同时避免了软金属铝与对摩活塞环的直接接触,减少粘着,硅颗粒之间的空间使储油量加大,提高润滑效果。边角圆化使接触应力变小,降低摩擦力的同时也避免划伤对摩面。激光光整可使缸套试样工作面快速加热并快速冷却,既达到了表层光整处理的目的也不破坏缸套试样整体形状,使高硅铝合金缸套试样工作面形成了硅颗粒凸出工作面且边角圆化的减摩结构,硅颗粒与铝基体结合处自然过渡,结合状态良好,无加工毛刺。这种技术能够降低高硅铝合金缸套磨合期的摩擦因数和磨损量,有效地改善了其摩擦磨损性能。

4 结论

(1) 对高硅铝合金缸套试样进行激光光整,可以得到工作面硅颗粒凸出且边角圆化的结构,能够有效降低摩擦因数及磨损量。

(2) 硅颗粒凸出承载,避免了铝与对摩活塞环的直接接触,减少了粘着磨损,其边角在激光高温下,减低表面能,呈现圆化状态,圆角的曲率

半径较大,摩擦时避免应力集中,接触应力变小,降低了摩擦力,从而改善摩擦磨损性能。

(3) 激光扫描速度为 600 mm/min,离焦距 2 mm 时,进行 400~1200 W 的激光光整,高硅铝合金缸套试样在功率为 1 000 W 时硅颗粒凸出高度为 1.243 μm 。相对于未处理,摩擦因数从 0.141 降到 0.113,降幅达 19.9%;磨损量从 0.7 mg 降到 0.2 mg,降幅达 71.4%。

参考文献

- [1] 孙廷富,郭琨,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] 胡迪.喷射成形 Al-Si 合金型船用气缸套组织性能分析与实验评价[J].热加工工艺,2015(12): 44-46.
HU D. Microstructure properties study and experimental evaluation of spray formed Al-Si alloy marine cylinder liner[J]. Hot Working Technology, 2015(12): 44-46 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [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] DAS S, PERRY T, BISWAS S K. Effect of surface etching on the lubricated sliding wear of an eutectic aluminium-silicon alloy[J]. Tribology Letters, 2006, 21(3): 193-204.
- [8] RIAHI A R, PERRY T, AIPAS A T. Scuffing resistances of Al-Si alloys: effects of etching condition, surface roughness and particle morphology[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 343: 76-81.
- [9] 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 (in Chinese).
- [10] 张海鸥,汪亮,王桂兰,等.等离子熔积高温合金件表面激光气化光整研究[J].中国机械工程,2005,16(18): 1674-1677.
ZHANG H O, WANG L, WANG G L, et al. Study on laser surface finishing for high temperature alloy parts made by plasma deposition[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(18): 1674-1677 (in Chinese).
- [11] 汪亮.等离子熔积直接成形金属原型表面激光光整关键技术[D].武汉:华中科技大学,2004.
WANG L. Surface laser finishing key technology of plasma deposition direct manufacturing metal prototype[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004 (in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] JANEZ S, ROMAN Š, JANEZ G. Influence of laser surface remelting on Al-Si alloy properties[J]. Strojniski Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 2012, 58(10): 614-620.
- [16] TOMIDA S, NAKATA K, SHIBATA S, et al. Improvement in wear resistance of hyper-eutectic Al-Si cast alloy by laser surface remelting[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, s169-170(03): 468-471.
- [17] LI C D, XU J Z, XU J J, et al. Rounded silicon edges on the surface of Al-Si alloy cylinder liner by means of mechanical grinding treatment[J]. Tribology International, 2016, 104: 204-211.