

表面织构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响

刘一静, 袁明超, 王晓雷

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 为探讨表面织构对发动机活塞/缸套之间的摩擦特性的影响, 利用微细电解加工技术在真实的活塞裙部表面制作了4种不同直径, 5种不同深度的微米级表面织构; 为模拟发动机的运动状态, 研制了往复式摩擦磨损试验机, 以活塞裙部片段为上试样, 缸套片段为下试样, 分别在4种不同载荷和转速条件下, 对活塞/缸套摩擦性能进行了评价. 研究表明, 表面织构在活塞/缸套的摩擦过程中表现出了很好的减摩效果, 直径250 μm 、深度5 μm 的表面织构在载荷200 N, 转速200 r/min的条件下比没有织构的试样降低摩擦37.8%; 磨损试验表明该种表面织构也可以起到较为明显的减磨作用.

关键词: 表面织构; 活塞裙部; 摩擦; 微细电解加工

中图分类号: TH 117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1964(2009)06-0866-06

Influence of the Surface Texture on the Tribological Performances of Piston Skirt/Liner

LIU Yi-jing, YUAN Ming-chao, WANG Xiao-lei

(Jiangsu Key Laboratory of Precision & Micro-manufacturing Technology,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: In order to study the effects of surface texture on the tribological performances of piston skirt and cylinder liner, we fabricated dimple patterns with four different diameters and five different depths on the piston skirt by micro-electrolytic machining. A reciprocating tester was developed to simulate the motion state in the engine. The friction tests between the piston skirt (upper specimen) and the liner (lower specimen) were carried out on the rig. The results show that the surface texture has an obvious friction reduction effect, and the texture with the diameter of 250 μm and depth of 5 μm could reduce the friction coefficient by 37.8% on the condition of 200 N and 200 r/min. Wear tests indicates that the surface texture plays an important role in wear resistance.

Key words: surface texture; piston skirt; friction; micro-electrolytic machining

摩擦是普遍存在于人类的生产和生活中(包括生物体内^[1]),是具有重大影响和作用的一种自然现象.近年来全球日益加剧的资源、能源和环境问题使得人们的忧虑日益加剧.摩擦引起的损失包括能源,而耗能即意味着污染,这种损失还包括零部件的制造消耗^[2].

在发动机能量损耗中,消耗在摩擦上的约占48%,远高于用于巡航的17%和用于加速的35%^[3].所以,发动机各部件的减摩抗磨设计是提高效率,减小故障率重要途径.发动机消耗在摩擦上的能量中,点火器、曲轴、传动部分仅占34%,活塞裙部、活塞环和曲轴轴承就占总摩擦的66%,其

收稿日期: 2009-01-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA04Z321); 国家自然科学基金项目(50675101)

作者简介: 刘一静(1985-),女,山西省晋中市人,博士研究生,从事摩擦学方面的研究.

E-mail: liuyijing_ivy@yahoo.com.cn Tel: 025-84893599

中, 活塞裙部与缸套之间的摩擦占 25%^[3]. 活塞裙部的侧向压力是活塞产生摩擦磨损的直接原因. 如图 1 所示, 当连杆轴线与活塞轴线不同轴时, 由于活塞的与缸套之间的高速相对运动, 活塞裙部会受到强烈的摩擦, 在润滑或冷却不良的情况下, 活塞裙部表面会出现严重的摩擦磨损. 研究者们提出了很多种改善方法, 如表面镀锡, 镀铅, 喷涂二硫化钼, 喷涂石墨, 喷涂聚四氟乙烯涂层等^[4], 这些多是利用表面处理的方法改善活塞裙部的减摩抗磨特性.

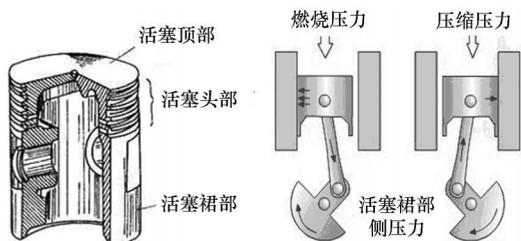


图 1 活塞的结构以及侧压力受力示意

Fig. 1 Structure of piston & lateral pressure

表面织构 (surface texture), 即在摩擦表面上加工出具有一定尺寸和排列的凹坑或微小沟槽的阵列, 已被证明是改善表面摩擦学特性的一个有效手段^[5], 已成为除表面镀层、表面改性等表面技术外的一种新的表面设计方法.

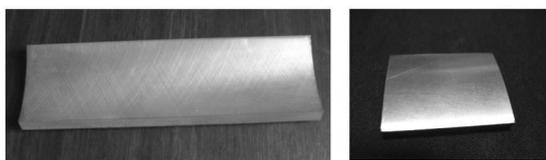
近年来, 随着加工技术的发展, 表面织构在计算机硬盘、轴承和密封、发动机系统中得到了成功的应用, 在减小摩擦、提高承载力、以及避免表面黏附和咬死等方面取得了显著的效果, 研究者们对织构的工作机理也不断有了新的发现^[6]. Hamilton (1966)^[7] 最早用表面微凸起产生的附加动压润滑效果的思想解释了表面织构在改变表面摩擦学特性方面的作用. Etison 等^[8] 运用激光加工的方法在活塞环表面加工表面织构并进行摩擦学试验, 取得降低摩擦 25% 的显著效果. 2000 年本田公司采用微小陶瓷球高速喷射的方法处理活塞裙部, 形成的平均深度为 0.6~1.8 μm 的微小凹坑, 降低发动机整体机械损失达 2.2%^[6], 表现出明显的减摩效果. 与以往的研究中多采用的平面与平面的对摩方法不同, 本研究利用自制往复式摩擦磨损试验机进行了曲面与曲面的对摩, 更加接近发动机的真实运动状态. 采用微细电解加工的方法在真实的活塞表面加工多种微米级的表面织构, 并对带有表面织构的试样进行了摩擦特性试验评价.

1 试验部分

1.1 试验样品的制备

1.1.1 普通无织构试样的制备

本研究中采用活塞厂订制的圆柱形活塞, 外径 105 mm. 试验试样是采用线切割的方法分别在活塞裙部和缸套上截取的片段. 活塞裙部试样为上试样, 厚度 3 mm, 长度 29 mm, 弧度为以活塞的圆柱中心为圆心 22.5° 的一段圆弧, 材料铝合金, $Ra=1\ 050\text{ nm}$; 缸套试样为下试样, 内径 105 mm, 厚度 6 mm, 弧度为以缸套的中心为圆心 45° 的一段圆弧, 缸套上有 45° 的珩磨条纹, 材料为铸铁, 粗糙度 $Ra=1\ 200\text{ nm}$. 试验中全部保留了真实发动机的材料和表面处理. 图 2 所示是本试验所用活塞、活塞试样和缸套试样的实物照片.



(a) 缸套试样

(b) 活塞试样

图 2 试样照片

Fig. 2 Photos of the samples

1.1.2 活塞裙部试样表面织构的设计与制备

研究中采用电解加工 (electrochemical machine, ECM) 的方法进行了表面织构的加工, 该技术利用金属在电解液中发生阳极溶解的原理去除多余材料, 将零件加工成形的制造技术^[9]. 研究采用掩膜加工的方法, 在曲面上加工出微米级别的织构. 如图 3 所示, 阳极表面绝缘层具有阵列通孔, 电解液在绝缘层表面高速通过, 阳极表面暴露于电解液部分不断被溶解, 同时, 高速流动的电解液将电解产物带出加工区域, 该加工方法无变形和飞边毛刺, 高效, 无热应力, 加工后的金相组织基本不发生变化, 阴极工具无损耗^[10].

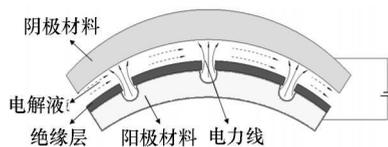


图 3 曲面上表面织构加工方法示意

Fig. 3 Fabricate surface textures on curved face

经过电解加工过后的活塞裙部试样实物照片如图 4a 所示, 该试样表面织构的直径为 300 μm, 深度 15 μm, 图 4b 是该种织构的三维形貌图, 图 4c 是该种织构的剖面图. 由图可以看出, 表面织构形状和排列规整, 可以满足试验要求.

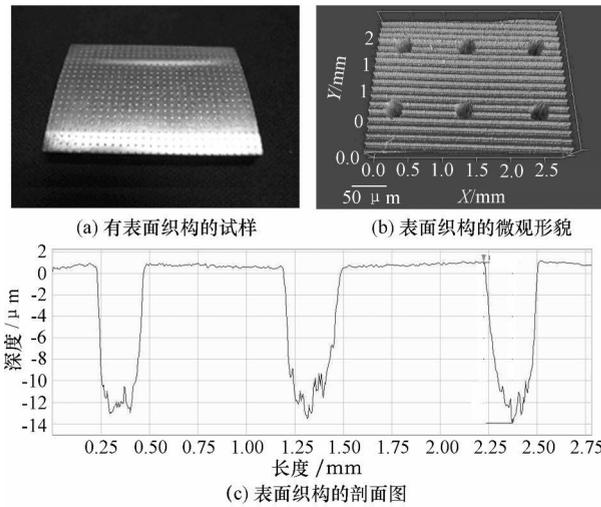


图 4 电解加工后试样实物图及表面形貌照片

Fig. 4 Photos of real object and microcosmic pattern

1.2 试验设备

1.2.1 往复式摩擦磨损试验机

为较真实地反映发动机的运动状态,本试验采用自制往复式摩擦磨损试验机,如图 5 所示.曲柄连杆机构为主要运动机构,连杆一侧连接主动件曲柄,另一侧连接固定下试样的储油槽.采用伺服电机作为动力系统,最高转速可达到 3 000 r/min,可实现该范围内的无级调速;采用杠杆原理加载,最大载荷 800 N;传感器最大采样频率 1 000 Hz.

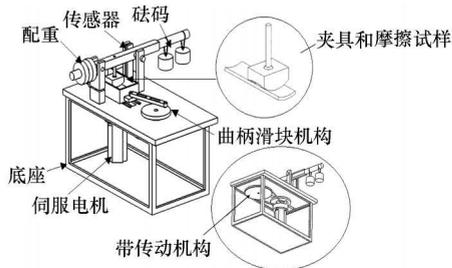


图 5 往复式摩擦磨损试验机示意

Fig. 5 Reciprocating friction test rig

1.2.2 试样的夹紧与定位

本试验中试样为曲面,因此试样夹紧与定位的关键是保证上下试样的同轴度,即运动过程保持试样的面接触而非线接触,从而保证试验数据的真实性.针对此问题,本试验采用自适应式夹具(见图 6),球形定位槽可以弥补装夹误差导致的不同轴现象,运动过程中也可有效保证上下试样面接触.



图 6 试样夹紧与自定位装置

Fig. 6 Fixture & self-adaptation design

1.3 试验方案

1.3.1 试样的预处理

试验前,上、下试样分别用丙酮和无水乙醇在超声波清洗器中清洗 10 min,再用 101A-1E 电热鼓风干燥箱 90 °C 干燥 1 h.表 1 为设计试验参数.

表 1 试验及试样的参数

Table 1 Parameter of the experiments

直径/ μm	深度/ μm	载荷/N	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
250	5	200	50
300	10	400	100
350	15	600	150
400	20	800	200
—	25	—	—

1.3.2 润滑方案

采用长城牌柴油机油作为润滑剂,牌号为 CD 15W-40,每次试验之前倒入储油槽 50 mL,开始试验后不再添加润滑剂.

1.3.3 试验步骤

在试验前对所有试样均进行充分跑合.

对无织构试样进行摩擦性能测定.本研究以无织构试件的摩擦系数作为基准线,对其摩擦系数的测定尤为重要,每种转速和载荷条件下都做 6 次试验,去掉最大和最小值,得出摩擦系数的平均值和公差带.

评价表面织构的直径对活塞裙部摩擦性能的影响.试验设计思想是在织构深度不变的条件下,改变不同的直径,这样可以较为准确的评价出直径的变化对摩擦系数的影响.

评价表面织构的深度对活塞裙部摩擦性能的影响.试验设计思想是在上步中找到的最佳直径不变的前提下,改变不同的深度,从而找到最优深度.

评价表面织构对活塞裙部抗磨性能的影响.试验设计思想是对具有最佳减摩效果的织构表面进行磨损试验,并与无织构的表面进行比较,评价其抗磨性能.

2 试验结果与讨论

2.1 摩擦行为

2.1.1 试样跑合时间及采样方法确定

本试验机数据采集系统采集的数据如图 7 所示.在曲柄连杆机构作往复运动的 2 个止点(a 点和 e 点)处,瞬时摩擦系数为 0;换向后速度逐渐增大,同时上下试样之间存在静摩擦力, b 点和 d 点处表现出较大的摩擦系数;当速度增加到最大时,摩擦副间的流体动压润滑效应较明显, c 点处的摩擦

系数较小;摩擦系数曲线相对于中线较为对称,说明往返 2 个过程中摩擦副间的摩擦学行为相似.于此,自制的摩擦试验机能充分模拟活塞 / 缸套的运动和摩擦规律.整个试验的摩擦系数曲线由多个周期的摩擦系数曲线组成,呈现出规则的波形,整体较平稳.试验数据处理:求出整个试验中波峰 b 和波谷 f 的平均值,再将这 2 个平均值的差值的 1/2 作为摩擦系数.

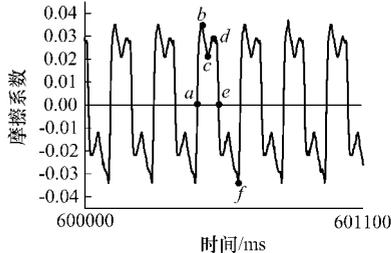


图 7 原始数据的采样曲线
Fig. 7 Curve of original data

缸套表面珩磨条纹上存在毛刺,活塞表面存在细微的不平整,在往复摩擦过程中必然有一个跑合过程.为确保试验数据的可对比性,对于跑合过程的测定是必要的.如图 8 所示为普通试样的跑合测试,摩擦系数开始较大,跑合约 10 min 后趋于平稳.其它试样测试结果也大致如此,跑合时间不超过 10 min.因此确定每个试样在每种条件下试验 15 min,其中,跑合时间 10 min,有效数据采集时间为后 5 min,采样间隔 5 ms.

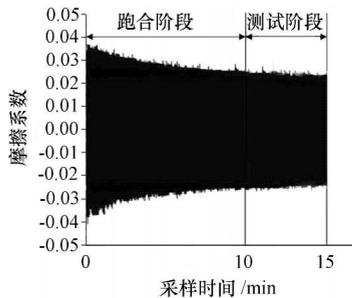


图 8 试验跑合过程

Fig. 8 Running-in process of the experiments

2 1 2 普通(无织构)活塞裙部试样摩擦性能测定

无织构试样与缸套对摩过程中,摩擦系数随着载荷和转速的改变而表现出的摩擦特性曲线如图 9 所示.可看出,在每个载荷条件下,随着转速的增加,摩擦系数都有明显的降低,即载荷越大,摩擦系数越低;在低载荷 200 N 的条件下,各个转速条件下的摩擦系数都比在载荷 400, 600, 800 N 条件下要高;在载荷 400, 600, 800 N 条件下,摩擦系数并没有随着载荷的增大而有明显的变化,即当载荷高于 400 N,摩擦系数趋于稳定.

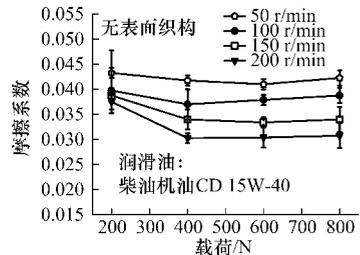


图 9 普通活塞试样摩擦系数的变化情况

Fig. 9 Friction coefficient of non-textured surface on different conditions

2 1 3 织构直径对活塞裙部试样摩擦性能的影响

在不同载荷条件下,深度为 $5 \mu\text{m}$,不同直径的表面织构,摩擦系数随转速变化的曲线如图 10 所示.总体上,摩擦系数随转速的增大呈下降趋势.200 N 载荷条件下,直径 250, 300 和 $350 \mu\text{m}$ 的织构对于降低试样摩擦系数效果明显;随着载荷的逐渐增大,带有表面织构的试样摩擦系数曲线逐步下降,在载荷 800 N 条件下,有织构的表面几乎全部呈现出明显的降低摩擦的效果.可以看出,载荷越大,表面织构所表现出的减摩特性越明显;随着转速的增加,直径 $250 \mu\text{m}$ 的表面织构在这 4 种载荷条件下都表现出了很好的减摩特性.

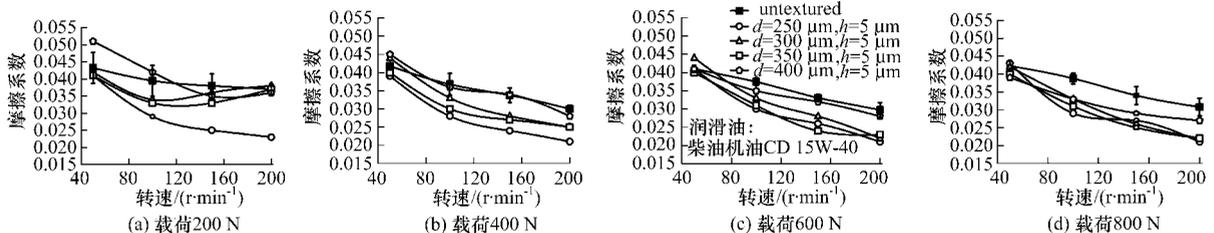


图 10 各载荷下,织构直径对试样摩擦系数的影响

Fig. 10 Effects of pit diameter on friction coefficient on the condition of different load

织构深度 $5 \mu\text{m}$ 的试样在转速 200 r/min, 载荷 600 N 条件下,摩擦系数随直径变化的曲线如图 11 所示.可以看出,有织构的试样都表现出了良好

的减摩特性,织构直径 $250 \mu\text{m}$ 的试样表现出最佳的减摩效果.其它多数条件下也表现出了类似的规律.

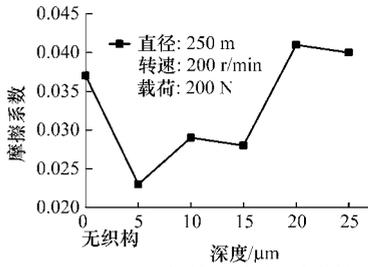


图 11 200 r/min, 600 N 条件下直径对摩擦系数的影响
Fig. 11 Effects of pit diameter on friction coefficient on the condition of 200 r/min, 600 N

2.1.4 织构深度对活塞裙部试样摩擦性能影响
不同载荷条件下, 直径 250 μm, 不同深度的表

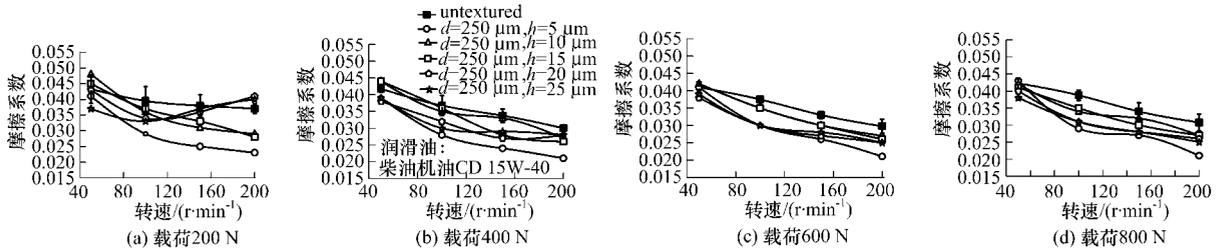


图 12 各种载荷下, 织构深度对试样摩擦系数的影响

Fig. 12 Effects of pit depth on friction coefficient on the condition of different load

织构直径 250 μm 的试样在转速 200 r/min, 载荷 200 N 条件下, 摩擦系数随深度变化的曲线如图 13 所示. 在这组表面织构参数下, 织构深度 5 μm 的试样与所有无织构的表面相比, 表现出了最佳的减摩特性, 降低了摩擦系数 37.8%.

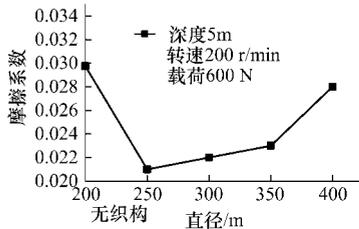


图 13 200 N, 200 r/min 条件下深度对摩擦系数影响
Fig. 13 Effects of pit depth on friction coefficient on the condition of 200 r/min, 200 N

2.1.5 表面织构对活塞裙部试样抗磨性能影响

本磨损试验采用加速磨损试验方法, 在沾油润滑条件下进行, 通过用形貌仪观测磨痕的方法来评价凹坑的抗磨性能. 试验分别选取无织构的试样和表面织构直径 250 μm, 深度 5 μm 的试样进行试验, 试验条件为转速 200 r/min, 载荷 800 N, 试验时首先在上试样表面滴少量的润滑油, 测试时间为 60 min. 图 14 左边为试样磨损前后的表面形貌图, 右边为单个加工条纹的截面图. 图 14a 为活塞裙部试样磨损前的三维形貌, 可以看出活塞裙部机加工条纹形貌规整, 每条痕迹呈平滑波峰状; 图 14b 是无织构试样磨损后三维形貌, 可以看出, 波峰磨损

严重, 加工条纹已经有较大部分被磨平, 在加工条纹边缘出现明显“锯齿”形状; 图 14c 是有织构试样磨损后三维形貌, 可以看出, 加工条纹也不可避免地发生了磨损, 但其磨损量低于无织构试样, 加工条纹还很清晰, 其边缘也还是明显的“直线”状. 由于试验条件完全相同, 出现上述现象最可能的原因就是表面织构对减少磨损起到了的作用.

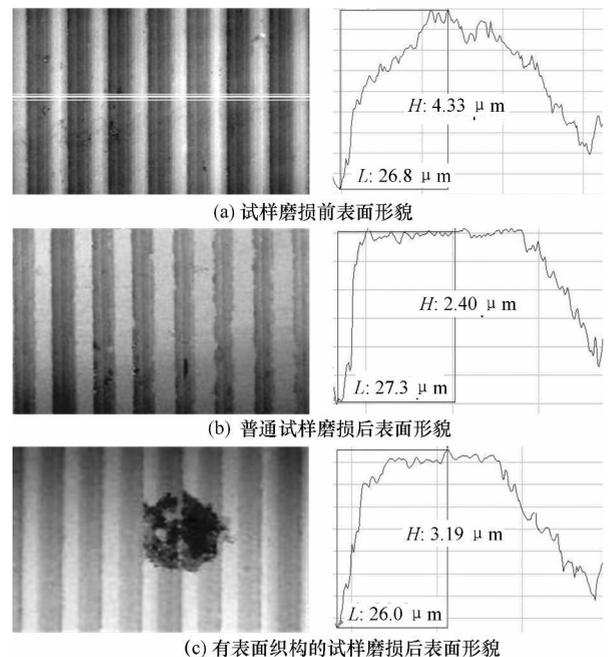


图 14 磨损前后的表面形貌
Fig. 14 Surface topography before and after wear testing

2.2 讨论

摩擦过程中,很可能是凹坑(织构)储藏的润滑油被挤压出来起到了补给润滑油的作用.当载荷为较高的800 N时挤压效果相对更明显,因此表面织构的减摩效果整体优于200,400以及600 N载荷条件.表面织构的直径以及深度是提高活塞的摩擦性能2个重要参数.由试验可知直径250 μm 织构表现出最优摩擦性能,表明油膜承载能力在这个条件下可能是最大.5 μm 深度的织构表现出最优的摩擦特性,如果深度过大,润滑油不易向上补给.

磨损过程中,由于试验条件为沾油润滑,摩擦副相对运动速度较大,无织构试样存在的润滑油较大部分被甩出,造成润滑条件的进一步恶劣,而被磨损掉的磨粒渗入到润滑油当中,这也会进一步加剧试样的磨损.而表面织构可以存贮润滑油,当加工条纹部分被部分磨损后,存储在表面织构中的润滑油也会溢出,一定程度上补给了润滑油,从而改善摩擦副间的润滑状态;另一方面,表面织构起到了容纳磨屑的作用,这就会部分改善由于磨粒造成的进一步加剧磨损.

3 结论

本研究利用微细电解加工技术在真实发动机活塞裙部制作了不同直径,不同深度的表面织构(凹坑),利用往复摩擦磨损试验机对其摩擦性能进行了评价,得出以下结论:

1) 普通活塞裙部试样,在各个载荷条件下,随着速度的增加,摩擦系数都有明显的降低,即载荷越大,摩擦系数越低;低载荷200 N条件下其摩擦系数高于其余400,600,800 N载荷.

2) 表面织构直径参数对于活塞摩擦性能有重要影响,250 μm 的表面织构在不同转速载荷条件下都表现出了很好的摩擦特性.

3) 表面织构深度参数对于活塞摩擦性能有重要影响,深度5 μm 的表面织构在各种转速载荷条件下都表现出了很好的摩擦特性.在载荷200 N,转速200 r/min的条件下,表面织构(250 μm ,5 μm)表现出了最优的减摩效果,摩擦系数较无织构表面下降了37.8%.

4) 表面织构对于活塞裙部的抗磨性能有较为明显的影响.

参考文献:

[1] 王庆良,葛世荣,张德坤. 纳米羟基磷灰石复合陶瓷

生物摩擦学行为研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 235-239.

WANG Qing-liang, GE Shi-rong, ZHANG De-kun. Study on the biotribological behaviors of nanosized hydroxyapatite composite ceramics. [J]. China University of Mining & Technology, 2006, 35(2): 235-239.

[2] 张嗣伟. 推动社会可持续发展的绿色摩擦学[J]. 润滑与密封, 2008, 33(10): 1-3.

ZHANG Si-wei. Green Tribology: A Way to propel society sustainable [J]. Lubrication Engineering, 2008 33(10): 1-3.

[3] SIMON C, TUNG M L, MCMILLAN. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future [J]. Tribology International, 2004, 1(37) 517-536.

[4] 赵士钦, 秘国芳, 马力明. 活塞表面处理技术综述[J]. 内燃机配件, 2001, 6: 18-20.

ZHAO Shi-qin, MI Guo-fang, Ma Li-ming. Overview of surface treatment on piston [J]. Internal Combustion Engine Parts, 2001, 6: 18-20.

[5] 王晓雷, 王静秋, 韩文非. 边界润滑条件下表面微织构减摩特性的研究[J]. 润滑与密封, 2007, 7: 339-342.

WANG Xiao-lei, Wang Jing-qiu, HAN Wen-fei. Effect of surface texture on friction reduction under boundary lubrication [J]. Lubrication Engineering, 2007, 7: 339-342.

[6] OGGIHARA H, KIDO T, YAMADA H, et al. Technology for reducing engine rubbing resistance by means of surface improvement [J]. Honda R & D Technical Review, 2000 12 (2): 93-98.

[7] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by micro-irregularities [J]. Journal of basic engineering, 1966, 88: 177-185.

[8] RYK G, ETSION I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction [J]. Wear, 2006, 261(7-8): 792-796.

[9] 王建国, 徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[10] 王磊, 朱荻, 曲宁松, 等. 微细群孔电解加工试验研究[J]. 微细加工技术, 2007(2): 52-56.

WANG Lei, ZHU Di, QU Ning-song, et al. Preparation of multiple micro-holes by electrochemical micromachining [J]. Micro fabrication Technology, 2007(2): 52-56.

(责任编辑 姚志昌)