

活塞与活塞环表面稀土自润滑摩擦学改性研究

于旭东¹, 杨俊伟¹, 王成焘¹, 黄震¹, TH IEDE Kai-uw e², 张文光¹

(1. 上海交通大学 机械工程学院, 上海 200030; 2 上海大众汽车公司 试验科, 上海 200230)

摘要: 采用稀土自润滑表面处理技术对桑塔纳 JV 汽油发动机活塞与活塞环表面进行处理, 并对原机进行活塞与汽缸、活塞环端口的超小间隙改造(配缸间隙- $5 \sim 2 \mu\text{m}$, 活塞环开口 $150 \mu\text{m}$), 通过台架试验对超小间隙发动机抗拉缸性能和摩擦功耗进行了考察; 通过原子力显微镜对活塞表面的微观形貌和摩擦力进行了测试。结果表明: 经稀土自润滑处理后活塞与活塞环表面产生大量孔穴和大量直径为 $60 \sim 120 \text{nm}$ 的球形聚集物, 该特征表面明显增强了活塞与活塞环的抗拉缸性能, 降低了自润滑表面的摩擦力, 起到了良好的摩擦学改性作用。

关键词: 发动机; 活塞与活塞环; 超小间隙; 稀土自润滑处理; 摩擦学表面改性

中图分类号: O 614 612

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)05-0364-04

20 世纪 90 年代以来, 以摩擦化学为主的边界润滑和固体润滑在活塞和轴承等传统机械产品的摩擦学设计中日益受到重视, 许多易磨损部件开始采用摩擦学性能优异的自润滑功能表面, 其中稀土固体润滑为研究热点之一^[1~4]。本文作者以桑塔纳 JV 汽油发动机为研究对象, 通过缩小原机活塞与汽缸配隙、活塞环开口间隙以改变活塞与活塞环系统的摩擦学条件, 同时对活塞与活塞环表面进行稀土自润滑处理, 以实现活塞和活塞环的表面改性。

1 实验部分

1.1 工艺过程

活塞与活塞环表面稀土自润滑处理工艺过程分为机外初始膜生成和机内自润滑反应膜生成 2 个阶段。机外初始膜是在装配前在摩擦副表面形成的功能膜。根据活塞与活塞环的材料不同, 先将由 35% La、35% Ce、有机醇、稀土盐、硅酸钠、氢氧化钠、表面活性剂等组成(以质量分数计)的不同催化剂组分配以少量基础油调匀, 然后以基础油浸润活塞与活塞环, 基础油油温维持在 $150 \sim 250$ 之间; 将上述配方各组份均匀倒入基础油中, 并采用威肯内啮合齿轮泵对基础油液进行颗粒细化和循环脱气, 处理时间为 $6 \sim 12 \text{h}$; 处理后将基础油处理液回收待用。

将已进行初始膜处理的活塞与活塞环装机, 并将基础油处理液注入油箱, 经过 3h 磨合, 活塞与活

塞环的机外初始生成膜, 在处理液参与下同缸套表面发生摩擦化学反应, 生成了以稀土化合物为主的反应膜。

1.2 试样及试验装置

试验用活塞由上海科本施密特活塞有限公司提供, 材料为 Si-Cu-Mg 过共晶铝硅合金。活塞环由上海汇众汽车配件公司提供, 材料为球墨铸铁。活塞与活塞环按如下 3 组规范进行加工处理: 第一组为稀土自润滑处理活塞与活塞环, 配缸间隙- $5 \sim 2 \mu\text{m}$, 活塞环开口 $150 \mu\text{m}$; 第二组为未经稀土热化学处理的活塞与活塞环, 但其活塞与活塞环的尺寸与第一组相同; 第三组为未经稀土自润滑处理的原机活塞与活塞环, 配缸间隙 $30 \sim 50 \mu\text{m}$, 活塞环开口 $300 \mu\text{m}$ 。3 组活塞与活塞环对应发动机的配缸间隙、活塞环开口间隙和缸压数据分别见表 1、表 2 和表 3。

发动机由上海大众再生发动机厂提供, 为桑塔纳 JV 1.8L 四行程、斜置向右 45° 化油器式发动机, 缸径 \times 行程 $\phi 81 \text{mm} \times 86.4 \text{mm}$, 排量 1.78L , 额定转速 5000r/min , 功率 65kW , 最大扭矩 $142 \text{N} \cdot \text{m}$ (3300r/min)。在森克台架上进行发动机试验。

1.3 抗拉缸性能测试

考察不同活塞与活塞环样品的抗拉缸性能, 测试程序为全负荷最大功率转速下运行 1h 、全负荷最大扭矩转速下运行 1h 、全负荷 1.05 倍额定转速下运行 1h , 然后重复循环共 7 次。

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金资助项目(00-638K); 上海市科委创新种子资金资助项目(0111H1139)。

收稿日期: 2001-12-25; 修回日期: 2002-03-12/联系人于旭东, E-mail: yuxudongtoy@263.net

作者简介: 于旭东, 男, 1970 年生, 博士后, 副教授, 主要从事内燃机活塞组摩擦学设计理论与试验研究。

表 1 3 组活塞与活塞环对应发动机的配缸间隙

Table 1 Clearance of piston to cylinder bore

Clearance/mm	Cylinders			
	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4
Group 1	- 0.005	- 0.010	- 0.010	- 0.010
Group 2	0.002	0.006	0.001	- 0.001
Group 3	0.030~ 0.050	0.030~ 0.050	0.030~ 0.050	0.030~ 0.050

表 2 3 组活塞与活塞环对应发动机的活塞环开口间隙

Table 2 Clearance of gap of ring ends

Clearance/mm	Cylinders			
	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4
Group 1	0.15	0.18	0.15	0.20
Group 2	0.16	0.18	0.19	0.16
Group 3	0.30	0.30	0.30	0.30

表 3 3 组活塞与活塞环对应发动机的缸压

Table 3 Cylinder pressure

$p/10^5\text{Pa}$	Cylinders			
	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4
Group 1	11.3	11.6	11.7	11.6
Group 2	-	-	-	-
Group 3	10.3	10.4	10.5	10.4

1.4 摩擦功耗试验

摩擦功耗试验考察超小间隙发动机和原机发动机的摩擦功耗, 采用灭缸法进行测试, 测定工况为额定转速 5 200 r/min。

1.5 表面测试

通过原子力显微镜 (Multimode Nanoscope IIIa 和 Nanoscope E) 对台架试验后的活塞裙部摩擦副表面进行微观测试, 测试样品为裙部中凸点附近线切割切片。测试时, 着重对不同试验条件下样品的微观形貌和摩擦力进行比较。测试样品分 4 类: 未经处理及台架运行试验, 以下简称未处理未运行样品; 经稀土自润滑处理但未经台架运行试验 (即机外初始膜样品), 以下简称处理未运行样品; 经稀土自润滑处理并进行台架试验 (即机内自润滑反应膜样品), 以下简称处理运行样品; 未经处理但在原机装配条件下进行台架试验, 以下简称未处理运行样品。

2 结果与分析

2.1 抗拉缸性能

原机装配和经稀土自润滑处理的超小间隙发动机在抗拉缸试验中未发生拉缸现象, 而未经稀土自润滑处理的超小间隙发动机在发动机启动后不久就发

生拉缸现象。解体检测发现, 未经自润滑处理的发动机其各缸均发生不同程度的粘着磨损, 经自润滑处理的发动机则处于完好状态。

由于活塞环的开口间隙和活塞配缸间隙较原机缩小, 此时活塞与活塞环的润滑主要以固体润滑和边界润滑为主, 活塞与活塞环处的摩擦条件较原机严重恶化, 可见稀土自润滑处理明显增强了活塞与活塞环表面的抗拉缸性能。

2.2 摩擦功耗

摩擦功耗试验结果表明: 原机装配的发动机摩擦功耗为 44.1%, 稀土自润滑处理超小配缸间隙发动机摩擦功耗为 45.8%。可以看出稀土自润滑超小间隙装配发动机摩擦功耗稍高于原机装配的发动机, 对发动机正常工作无明显不利影响。

2.3 表面分析

在原子力显微镜下观察处理未运行样品表面形貌, 发现存在大量孔穴和团聚物 [图 1(a)]; 处理运行样品表面除有大量孔穴外还产生大量直径为 60~120 nm 的球形聚集物 [如图 1(b) 所示]; 未处理运行样品表面有明显的微观摩擦痕迹, 无孔穴和球形聚集物产生。

上述测试结果表明, 发动机运行后活塞表面的结

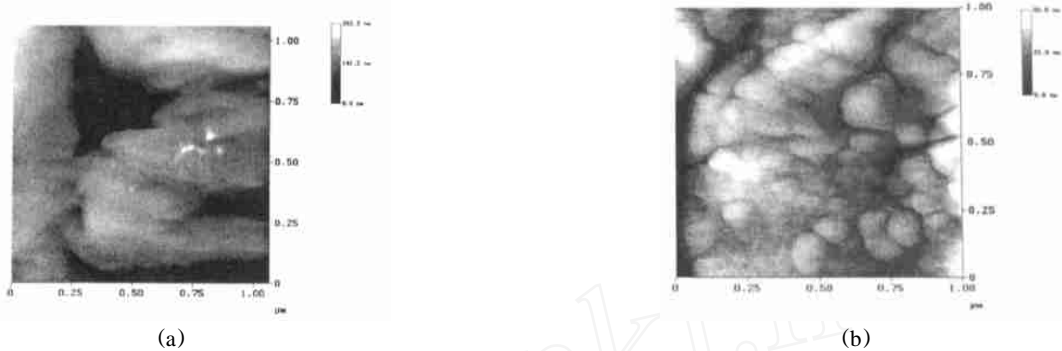


Fig 1 Surface pattern of RE self-lubricated samples

图 1 处理未运行样品表面

构发生了变化,从抗拉缸试验结果可以推断稀土自润滑表面具有良好的抗拉缸性能。这是因为表面存在大量孔穴并起到储油作用,当活塞受到挤压变形时,孔穴内的磨合处理液被挤出而起到润滑作用,并参与摩擦化学反应;纳米球形聚集物在摩擦副界面上形成微观滚动效应,纳米球间的低结合力有效抑制了拉缸、拉毛。

我们对样品进行了表面摩擦力测试,发现处理运行样品表面形貌与摩擦力形貌之间的关系同其它样品的不同。图 2 所示为 0~500 nm 小范围内表面形貌

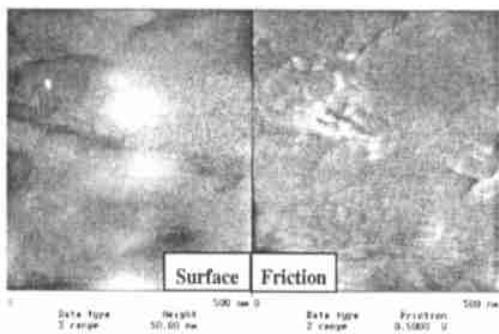


Fig 2 Comparison of surface pattern and its friction force determined with AFM

图 2 表面形貌与摩擦力形貌测试结果对比

与摩擦力形貌的测试结果,图中左侧为表面形貌,右侧为摩擦力形貌。可以看出,纳米球形聚集物区域对应的摩擦力比其它区域的小得多,而且与形貌-摩擦力相对应,这说明纳米球形聚集物的生成有利于减小摩擦副表面的摩擦力。

3 结论

a 抗拉缸、摩擦功耗台架试验和表面原子力显微镜测试结果表明,稀土自润滑处理对活塞与活塞环表面具有摩擦改性作用,其特有的大量孔穴和纳米球形聚集物功能表面可以提高活塞与活塞环的抗拉缸能力。

b 样品的表面形貌-摩擦力形貌测试结果表明,纳米球形聚集物区域对应的摩擦力比其它区域的小得多,呈现很好的形貌-摩擦力一致性,这说明纳米球形聚集物的生成有利于减小摩擦副表面的摩擦力。

参考文献:

- [1] Chen B S (陈波水), Dong J X (董俊修), Ye Y (叶毅), *et al*. Tribo-Pemutation Catalyzation of Rare Earth Elements and Macro-Mechanisms (稀土元素的摩擦催渗作用及宏观催渗机制) [J]. Chinese Journal of Materials Research (材料与研究报告), 1996, 10 (6): 613-616
- [2] Liang Q (梁起), Zhang ZH J (张治军), Xue Q J (薛群基), *et al*. Tribological Properties of LaF₃ Nanoparticle (LaF₃ 纳米微粒的摩擦学行为研究) [J]. Chinese Rare Earths (稀土), 1999, 20 (2): 32-35
- [3] Zhang Zefu, Liu Weimin, Xue Qunji. Friction and wear behaviors of the complexes of rare earth hexadecylate as grease additive [J]. Wear, 1998, 215: 40-45
- [4] Zhang R J (张瑞军), Li S H (李生华), Jin Y S (金元生), *et al*. Effect of MoDTC and MoDTP on tribological behavior of cylinder liner/piston ring (二烷基二硫代甲酸钼和二烷基二硫代磷酸钼对缸套/活塞环摩擦学行为的影响) [J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21(3): 191-195

Tribological Surface Modification of Piston and Rings by Rare Earth Self-lubrication Process

YU Xu-dong¹, YANG JUN-wei¹, WANG Cheng-tao¹, HUANG Zhen¹,
THIEDE Kai-wei Thiede², ZHANG Wen-guang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030;

2. Shanghai Volkswagen Automotive Company Ltd., Shanghai 200230, China)

Abstract: The surfaces of piston and rings of SANTAN JV gasoline engine were tribologically modified by means of rare earth self-lubrication, and the clearances of the piston skirt to cylinder and ring gaps were modified to $5\sim 2\ \mu\text{m}$ and $150\ \mu\text{m}$, respectively. The anti-scuffing performance and friction-induced power loss of the modified engine with an ultra-small clearance were examined by means of bench tests. The morphology and friction force of the modified piston skirt were investigated with an atomic force microscope. As the results, a large number of cavities and accumulated nano-spheres were generated on the surface of the piston after rare-earth-self-lubrication process, which was beneficial to improving the anti-scuffing performance and reducing the friction-induced power loss of the engine. Thus the surface modification of the piston and rings by means of rare earths self-lubrication could find promising application in the tribological surface modification of piston and rings.

Key words: engine; piston and rings; minimum clearance; rare earth self-lubrication; tribological surface modification

Author: YU Xu-dong, male, born in 1970, Ph. D., Associate professor, Email: yuxudongtoy@263.net