

# 活塞环-缸套摩擦磨损模拟实验方法研究

任 旻<sup>1</sup>, 张培鋈<sup>1</sup>, 孙 灼<sup>2</sup>, 韩爱民<sup>1</sup>, 翟乐恒<sup>2</sup>, 徐信夫<sup>2</sup>, 王立公<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 环境与能源工程学院; 2. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100022)

**摘 要:** 提出了一种评价活塞环-缸套摩擦磨损性能的快速模拟实验方法, 研制了往复式模拟摩擦磨损实验机, 载荷、速度等实验参数和摩擦力、总磨程等实验结果的测试装置及其计算机数据采集处理系统。实验直接采用被测的活塞环和缸套作为试样, 这不仅使模拟实验更接近实际情况而且大大减少了试样制备的工作量。以表面涂覆 Ti-TiN 耐磨涂层的 492 发动机活塞环及与其配副的缸套为试样进行了重复性实验, 结果表明: 用质量法测量的磨损量最大相对误差 < 8.5%; 摩擦力的最大相对误差 < 2%。

**关键词:** 活塞环; 缸套; 摩擦磨损; 测试技术

**中图分类号:** TK 413.33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2002)01-0062-04

## 0 引 言

改善活塞环和缸套的摩擦与磨损对延长发动机的寿命, 提高动力性、经济性、可靠性以及控制排气污染具有重要意义。因此该领域的研究近年来逐渐受到学术界的关注。人们从活塞环-缸套摩擦副的设计、润滑、材料的选取、表面加工处理等方面进行了深入的研究<sup>[1]</sup>。与此相关的活塞环的摩擦磨损的实验研究也得到了一定的发展。活塞环-缸套的耐磨性分析需要大量的对比实验, 而台架实验由于实验成本过高, 而且会引入许多干扰因素, 用模拟实验方法代替发动机台架实验是必要和经济的。

美国、德国、日本等一些国家的科研机构致力于研制一种快速有效的模拟实验机, 并取得了一定的成果。美国福特汽车公司研制的往复式模拟实验机由曲柄机构驱动, 活塞环和缸套试样均来自实际发动机。实验可以采集载荷、摩擦力、速度的数据, 还可进一步计算出摩擦系数<sup>[2]</sup>。

国内也有一些科研机构在作类似的研究。北方交通大学的徐双满等设计制造了一台往复式销-块式磨损实验机, 他们将活塞环材料制成销再与缸套相磨<sup>[3]</sup>。

由于内燃机活塞环-缸套摩擦副在上、下止点处磨损最严重, 作者提出的模拟实验方法不是完全模拟内燃机曲柄连杆机构的运动, 而是重点模拟活塞环-缸套上、下止点附近的运动。由于恶劣的工作条件, 上止点附近处于边界润滑状态, 伴随有干摩擦。实验机采用目前较为流行的模拟磨损条件的方式, 为了缩短试验周期, 在进行模拟实验时不加润滑油。采用不变的载荷和试验次数, 可以对比不同表面处理的试样的耐磨性。实验采用载荷传感器控制模拟实验中的载荷, 保证模拟磨损实验的精度要求。

## 1 模拟实验装置

### 1.1 模拟磨损实验机

为了研究活塞环-缸套的摩擦磨损性能, 并探索一种能反映活塞环-缸套摩擦磨损性能的模拟实验方法, 研制了一台往复式活塞环-缸套摩擦磨损实验机, 其结构示意图如图 1 所示。实验台由可调速的直流电机通过曲柄滑块机构将旋转运动转变为往复式运动, 直流电机的转速在 0~3 000 r/min 连续可调。曲

收稿日期: 2001-02-27。

作者简介: 任旻(1975-), 男, 研究生; 张培鋈(1942-), 男, 教授。

柄圆盘上有多个不同曲柄半径的曲柄销孔,通过使用不同的曲柄销孔,可以调整往复机构的行程,最大行程为 60 mm。实验机采用负荷压力计加载,避免了砝码加载的载荷波动对测试精度的影响。液压加载的载荷在 0~80 MPa 连续可调。实验中固定活塞环试样,使缸套试件随往复机构运动,模拟实际发动机的工作状态。

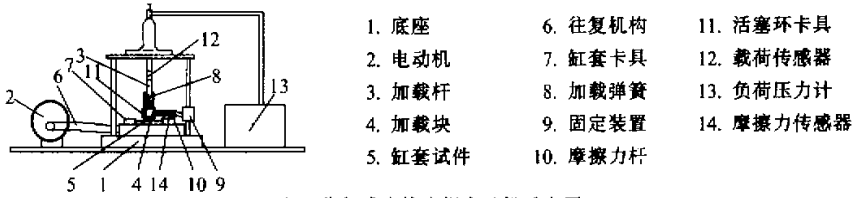


图1 往复式摩擦磨损实验机示意图

### 1.2 测试系统

测试系统由传感器、放大器、数据采集系统和数据采集处理软件组成。载荷和摩擦力的测量采用电阻传感器将力的信号转变成电信号,再经应变仪放大,通过采集系统存入数据文件。模拟磨损实验的速度和下试样往复运动的止点位置由霍尔传感器采集,霍尔传感器的数据可通过采集板传输到计算机。

载荷和摩擦力传感器为薄壁管形结构,两组应变片贴在传感器两侧表面,每组由工作片和温度补偿片组成,工作片沿轴向粘贴;温度补偿片与工作片垂直粘贴(如图2)。实验前载荷传感器和摩擦力传感器均在弹簧弹力测试仪上进行静标定。



图2 应变片粘贴示意图

实验用的上试样为活塞环,下试样为从缸套上切割的一部分见图3。上试样安装在一个特制的卡具内,该卡具能模拟活塞环在缸套中的工作形状和工作应力;下试样固定在滑动台上。模拟实验的试样不仅在材料、形状、尺寸等方面模拟被测件的零件;而且还模拟了活塞环自由弹力形成的内应力,这一点对于测试活塞环表面涂层的耐磨性很重要。

实验时上试样和活塞环卡具一起固定在加载块的环槽中,下试样装在卡具中随滑动台做往复运动。图4为活塞环卡具和加载块示意图。实验载荷由负荷液力计通过加载杆和加载弹簧施加在加载块上。

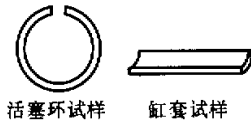


图3 上试样和下试样示意图

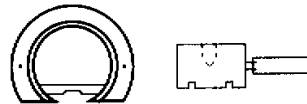


图4 活塞环卡具和加载块示意图

实验采用自行研制的数据采集卡和采集软件。应变仪的输出信号输入到数据采集卡的输入端。数据采集卡为 8 通道,可以同时采集载荷、摩擦力和实验机偏心轮转速脉冲信号。采用通用的 PCI 总线形式,可在任意一台有 ISA 插槽的微机上使用。采集软件设定每 10 ms 进行一次数据采集,保证了数据的连贯性。采集到的信号有载荷、摩擦力、偏心轮转速和往复运动的止点位置,对它们可进行实时观测。同时可将数据以 DATA 格式保存到用户指定的文件,这样既可以保存大量的数据,又可很方便地进行数据处理。数据处理软件提供了方便用户操作的界面。数据采集和处理软件不仅保证了实验的精确性和实时性,还为大量实验数据的统计处理提供了便利条件。

## 2 实验方法与结果

### 2.1 实验方法

采用干摩擦进行模拟实验,这是由于活塞环在上止点附近处于边界润滑或干摩擦状态,且主要的摩擦损失和磨损都发生在上止点附近。这种实验方法可以缩短实验所用的时间。实验时,首先要将活塞环放

入卡具中固定;然后将两个装有一样的活塞环的卡具装入加载块中;第3步需要在载荷为0时调整动态电阻应变仪平衡,以确保电压信号被正确的放大;第4步运行采集软件,这时可以看到平稳的载荷和摩擦力信号以及为0的速度曲线;第5步启动电机并根据采集到的速度值将速度调节到预定值,调节负荷压力计将载荷加到预定值,开始实验。实验的总磨程由霍尔传感器测试,同时显示在计算机显示器和监测计数器上。

实验过程中可以观察以曲线形式反映在屏幕上的实时数据,根据需要保存一定数量或全部的数据,在保存成数据文件后,再经过电子表格的处理可以再现各种信号的曲线,还可以进行相关的处理,图5为显示器上的实验数据曲线图。图中自上至下4条曲线分别为:平均速度曲线;实验载荷曲线;摩擦力曲线和上止点信号曲线。从图中可以看出,摩擦力在上止点位置时突然增大,呈现最大值,然后,随着滑动速度的增加,摩擦力开始减小,但是,由于是干摩擦条件,摩擦力并未急剧减小<sup>[1]</sup>,这一点虽然与实际工况不符,但作对比实验已经能够反映活塞环的摩擦磨损性能,而这可以大量节省时间,大大地提高了实验效率。载荷曲线基本平稳,干扰信号在允许范围内。

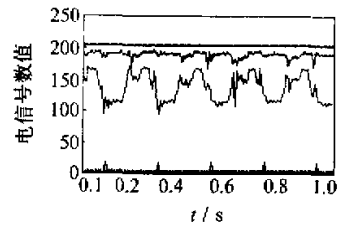


图5 显示器上的实验数据曲线图

## 2.2 实验结果

采用该实验装置和实验方法对5组活塞环和缸套进行了重复性实验。上试样采用涂有Ti-TiN耐磨涂层的492发动机活塞环<sup>[4]</sup>;下试样为492发动机缸套的一部分。实验在不加润滑油的条件下进行,下试样往复运动的平均速度为0.2 m/s,上下试样之间的载荷为30 N。每个活塞环在不同位置作4次模拟磨损实验,每次下试样往复1000次。表1是重复实验的活塞环和缸套的磨损量以及实验结果的误差值。图6为采用质量法测量得到的5组活塞环-缸套磨损量及其平均值柱形图。

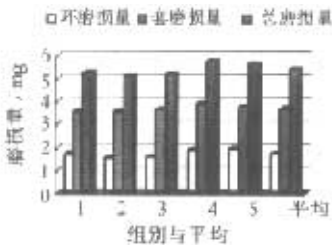


图6 5组活塞环-缸套磨损量及其平均值柱形图

表1 活塞环和缸套的磨损量的重复实验结果和误差

试样组别	环磨损量/mg	套磨损量/mg	总磨损量/mg
1	1.680	3.540	5.220
2	1.528	3.540	5.068
3	1.540	3.640	5.180
4	1.850	3.890	5.740
5	1.913	3.740	5.653
平均	1.702	3.670	5.372
平均误差	0.143	0.116	0.259
相对误差	8.43%	3.16%	4.83%

从表1可以看出,重复实验的相对误差都较小,活塞环磨损量的相对误差为8.43%;缸套磨损量的相对误差为3.16%;总磨损量的相对误差为4.83%;活塞环和缸套的绝对平均误差值分别为0.143、0.116 mg。

实验过程中保存了摩擦力的数值以便以后进行分析,这些数值可以通过软件工具如电子表格,绘出相应的摩擦力曲线,图7所示为其中的4条摩擦力曲线。

从摩擦力曲线的形状直观看来重复性比较好,排除噪声信号,摩擦力曲线最大值与最小值的差分别为59、60、58、60,说明了摩擦力的值非常接近,相对误差<2%。从磨损量和摩擦力两方面的重复性来

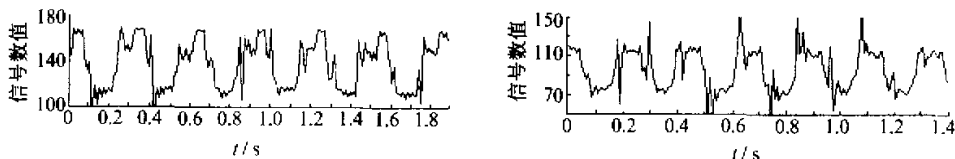


图7 用电子表格画出的摩擦力曲线

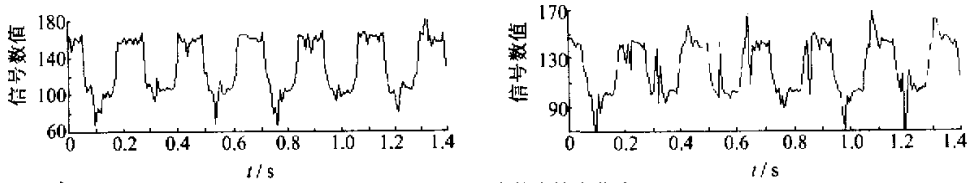


图7 用电子表格画出的摩擦力曲线

看, 实验结果都比较理想. 证明了实验机构和实验过程的稳定性较好. 每副活塞环和缸套的模拟磨损实验用时大约为 20 min, 该实验装置和实验方法已经用于评价活塞环和缸套的摩擦磨损性能的对比实验<sup>[4]</sup>, 也可以用于评价该摩擦副润滑介质及其添加剂性能的对比实验.

#### 参考文献:

- [1] TING L L. Development of a reciprocating test rig for tribological studies of piston engine moving components: part 1 rig design and piston ring friction coefficients measuring method[J]. SAE Paper 930685, 1993. 398-405.
- [2] Hideki yoshida, K K, J S. Effects of surface treatment on piston ring friction force and wear[J]. SAE Paper. 900589, 1990. 462-469.
- [3] 徐双满, 曾昭翔, 马俊林. 对钢套-活塞环材料在往复滑动中摩擦系数的实验研究[J]. 北方交通大学学报, 1998, 22(4): 102-104.
- [4] 孙灼, 张培莹, 翟乐恒, 等. 铸铁活塞环表面多弧-磁控溅射复合镀膜研究[J]. 金属热处理学报, 2000, 21(1): 6-11.

## Research on Simulation Experiment Method of Piston Ring and Cylinder Liner Friction and Wearing

REN Min<sup>1</sup>, ZHANG Pei-jun<sup>1</sup>, SUN Zhuo<sup>2</sup>, HAN Ai-min<sup>1</sup>,  
ZHAI Le-heng<sup>2</sup>, XU Xin-fu<sup>2</sup>, WANG Li-gong<sup>1</sup>

( 1. College of Environment and Energy Engineering, Beijing Polytechnic, Beijing 100022, China;

2. College of Material Science and Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China )

**Abstract:** A fast simulation experiment method is proposed that can be used to evaluate the performance of piston ring and cylinder liner friction and wearing. A reciprocating test rig for simulating friction and wearing of piston ring and cylinder, a test equipment which measures experimental parameters such as press and rate and the experimental results such as force of frictional force and friction stroke length, a computer data acquisition and analysis system are developed. The practical piston ring and liner were adopted as the experimental specimens to ensure that the simulation experiment is not only closer to actual conditions but also largely reduce the time for specimen preparation. The piston rings from 492 type engine with wear-resistant cost of Ti-TiN and their matched cylinder liners are used as the specimens for repetition experiment. The results indicate that the max relative error of wear quantity is less than 8.5% and the max relative error of frictional force is less than 2% when weight method is used for test.

**Key words:** piston ring; cylinder liner; friction and wear; test technology