

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.007

天然气发动机活塞稳态温度存储式测量系统*

张志勇¹ 黄荣华¹ 王兆文¹ 程伟²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; 2. 东风汽车商用车研发中心, 武汉 430056)

【摘要】 设计了一套存储式活塞稳态温度测量装置,系统测试精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$;对EQD180N-20型天然气发动机外特性1000、1500、2100 r/min 3个转速点进行了活塞稳定工况温度测量,同时进行了发动机转速从1000 r/min缓慢上升到2100 r/min的活塞温升试验。表明系统工作稳定可靠,提高了活塞温度测量效率,分析了EQD180N-20型发动机活塞温度热负荷,活塞轴向的平均温度梯度达 $23^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

关键词: 发动机 活塞 稳态温度 存储式测量

中图分类号: TK437 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0033-04

Steady-state Temperature Measurement on the CNG Engine Piston

Zhang Zhiyong¹ Huang Ronghua¹ Wang Zhaowen¹ Cheng Wei²

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Engine Department of Dongfeng Commercial Vehicle Technical Center, Wuhan 430056, China)

Abstract

A set of steady temperature measurement device was developed. A high accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$ could be obtained by the system as long as the error was calibrated. The piston temperature was measured at the engine speeds of 1000 r/min, 1500 r/min and 2100 r/min on the external characteristics of the engine of EQD180N-20, respectively. The piston temperature variation test was performed from 1000 r/min to 2100 r/min simultaneously. The results show that the proposed system is stable and reliable. On the external characteristics, the temperature of each feature point increased firstly and then declined slightly as the engine speed increased, and a maximum value was observed at 1500 r/min; on the stable working condition, the highest temperature appeared in the piston top surface with a value of 264°C , The first piston ring slot temperature is about 215°C .

Key words Engine, Piston, Steady-state temperature, Memory measurement

引言

目前常用活塞稳态温度测量的方法有硬度塞法、易熔合金法,这两种方法不存在信号引出问题,但只能通过硬度值间接测量出活塞在运行过程中经历的最高温度值,在测量过程中人为因素不容忽视,测量精度有限;一次温度试验只能测量一个工况,效率低;热电偶可以测量温度的变化,而其信号的连续引出相当困难,只有借助传输机构^[1~2]才能实现,但这种测量机构不仅复杂,而且使用时容易发生连杆

或导线破坏现象,可靠性不高。本文设计一套存储式活塞温度测量系统,利用热电偶作为测温传感器,利用芯片存储热电偶的温度信号。待试验结束后,从芯片中读取温度信号。利用设计的这套存储式活塞稳态温度测量装置,测量EQD180N-20型天然气发动机外特性3个稳态工况下活塞的温度。

1 测试系统设计

1.1 热电偶埋设深度

发动机在运转时,燃烧室零部件的表面温度随

收稿日期: 2011-01-18 修回日期: 2011-04-14

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA11A121)

作者简介: 张志勇,博士生,主要从事内燃机测试技术研究,E-mail: abozzy@163.com

通讯作者: 黄荣华,教授,主要从事内燃机燃烧与排放控制、流动与增压技术研究,E-mail: rhhuang@mail.hust.edu.cn

工况的变化而变化,但在稳定工况下随循环过程周期性变化,同时活塞表面的温度变化随深度的增加急剧衰减^[3],然而在距活塞表面 2~3 mm 处,温度几乎恒定不变。为了满足热电偶埋设可靠性,通常热电偶测点应埋设在距离表面 1 mm 左右,同一稳定工况下热电偶测量活塞温度波动非常小,近似认为恒定不变。内燃机每秒几十个工作循环,燃气温度 t_g 和热交换系数 h_g 的变化周期很短,温度波动随深度增加衰减很快,加上受热零件的热量传递的滞后性,使 t_g 、 h_g 的变化对活塞内部温度分布的影响不大。

根据热频加热理论,在计算时,近似假定气缸内一个循环中燃气温度按余弦函数规律变化,即

$$\Delta t_g(0, \tau) = \Delta t_{g\max} \cos(2\pi f\tau) \quad (1)$$

式中 $\Delta t_g(0, \tau)$ ——与受热零件表面直接接触的燃气在 τ 时刻温度与其平均温度之差, K

$\Delta t_{g\max}$ ——燃气温度波动的最大振幅, K

f ——燃气波动的频率

燃气与零件表面的热阻使零件表面的温度波动振幅小于燃气的温度波动振幅。设振幅因子为 η , 零件表面温度波动滞后燃气温度相位角为 φ , 则

$$\Delta t(0, \tau) = \eta \Delta t_{g\max} \cos\left(2\pi f\tau - \sqrt{\frac{\pi f}{a}}x - \varphi\right) e^{-\sqrt{\frac{\pi f}{a}}x} \quad (2)$$

式中 $a = 6.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\varphi = 44.4$, $\eta = 0.00145$ 。

一般认为 $\Delta t(0, \tau)_x / \Delta t_{g\max} = 1/1000$, 当距离零件壁面 x 深度处其温度波动振幅最大值是 $\cos\left(2\pi f\tau - \sqrt{\frac{\pi f}{a}}x - \varphi\right) = 1$ 时, 温度波动可忽略不计。根据这两个条件估计出 EQD180-20 型发动机运行时活塞 3 个工况点最大温度衰减深度如表 1 所示。

表 1 活塞温度衰减深度

Tab.1 Depth of piston temperature attenuation

转速 /r·min ⁻¹	燃气温度波动 频率 f/Hz	最大温度衰减 深度 x/mm
2 100	17.5	1.2
1 500	12.5	1.6
1 000	8.3	1.7

1.2 EQD180N-20 型发动机性能参数

试验用发动机是 EQD180N-20 型天然气发动机,其型式为:四冲程、六缸直列、增压+空空中冷、点燃式发动机;缸径×冲程:105 mm×120 mm;最大扭矩:580 N·m;最大扭矩转速:1 400~1 600 r/min。

1.3 测量系统原理与结构

热电偶测量信号和环境温度的补偿信号连接在

巡弋开关中,巡弋开关电路按 2 s 间隔,依次将电压信号记录到电压记录仪中,其测试原理如图 1 所示。

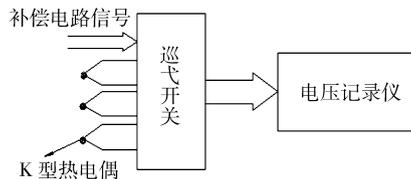


图 1 存储式活塞温度测量原理示意图

Fig.1 Principle of temperature measurement using recorder

选用 EQD180N-20 型发动机第 5 缸活塞作为测试对象,试验取 5 个特征点,分别是:燃烧室中心处为测点 1,底面倒角处为测点 2,活塞顶面倒角处为测点 3,第一环槽底面处为测点 4,第二环槽底面处为测点 5,如图 2 所示。K 型热电偶封装成闷头,闷头外径为 3 mm,内径 1.8 mm,带有一定锥度。埋设在闷头内的热电偶导线先用玻璃纤维绝缘,使用高温导热绝缘胶与闷头封装,闷头外部的热电偶导线使用玻璃纤维绝缘,绝缘层的外面包高温耐油塑料套管,套管的最大使用温度 260℃,短时耐高温达 320℃。如果热电偶的测温触点埋设较深,热电偶温度测量结果与实际活塞表面温度相差较大,根据上述理论计算,常常折中处理^[5-8],选取堵头顶端的距离 δ 为:燃烧室内 $\delta_1 = 1.2 \text{ mm}$, $\delta_2 = 1.2 \text{ mm}$; 活塞顶面 $\delta_3 = 0.4 \text{ mm}$, 环槽内 $\delta_4 = 0.6 \text{ mm}$, $\delta_5 = 0.6 \text{ mm}$ 。如图 2 所示。

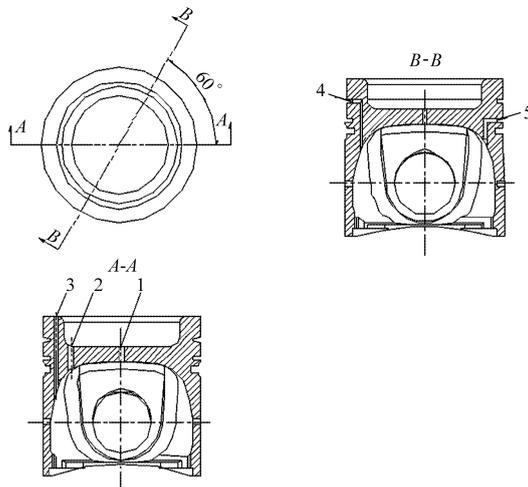


图 2 测点布置示意图

Fig.2 Positions of measured points

1. 测点 1 2. 测点 2 3. 测点 3 4. 测点 4 5. 测点 5

2 测量系统关键性能测试

2.1 整个系统有效工作时间测试

整个测量系统中有两个工作模块:巡弋开关和记录仪。组成巡弋开关芯片工作电压不低于 2.5 V,这就要求巡弋开关干路电压不低于 3.0 V。巡弋开

关有效工作时间就是电路电压降低到 3.0 V 的时间。在恒温箱 120℃ 环境下, 巡弋开关的有效工作时间为 33 h, 如图 3 所示。

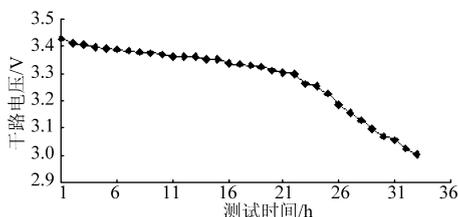


图 3 巡弋开关的有效工作时间

Fig. 3 Operational use time of cruise switch

电压记录仪有 3.2 万组数据存储空间, 按照 2 s 为记录频率, 有效工作时间为 18 h。完全满足发动机活塞温度测量试验所需的 2 h 要求。

2.2 系统误差测试

衡量整套试验系统性能的指标是系统误差恒定, 若系统误差在高温下波动不大, 说明整套系统性能是可靠的。分别在 75、120、150℃ 环境下, 以电位差计模拟热电偶的输出, 每个点测试时间为 2.5 h, 每 0.5 h 测试系统误差一次, 对整套系统进行了误差测试。结果显示系统绝对误差随着环境温度的升高而降低, 相对误差随着电位差计输出值的增高而下降, 3 个温度测试点上, 绝对误差在 1 mV 左右, 如果消除误差 1 mV, 测试精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ (± 0.04 mV)。整个系统在高温下 (大于 75℃) 工作稳定可靠, 误差测试结果如图 4 所示。

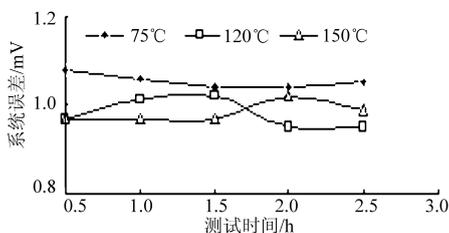


图 4 系统误差标定

Fig. 4 Calibration of system error

3 活塞温度测量结果与分析

选择 EQD180N-20 型发动机外特性 3 个转速点 1 000、1 500、2 100 r/min 进行了稳定工况活塞温度测量。每个工况点稳定 3 min 后开始记录数据, 试验进行 10 min, 各测点不同工况下平均温度如图 5 所示。

由图可知, 在外特性 3 个工况点上 5 个测量点的温度在 1 500 r/min 时均是最高。这是因为该转速下发动机输出扭矩最大为 580 N·m, 发动机输出大扭矩时转速低, 润滑油的压力低, 而该发动机活塞是裙部喷油冷却, 势必导致润滑油强制冷却效果差。同时, 活塞的机械负荷大, 润滑又不充分, 活塞

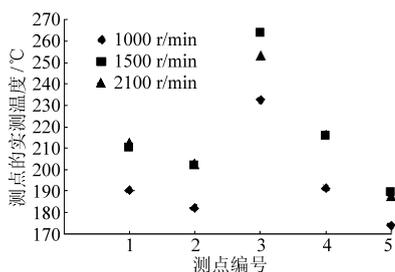


图 5 不同工况下各点温度

Fig. 5 Temperatures of measured points on different work conditions

环与缸壁的摩擦生热加剧了活塞热负荷。同一工况下, 处在燃烧室侧壁中下部的第一环槽测点 (测点 4) 的温度比燃烧室底面中心测点 (测点 1) 的温度高, 这是因为燃烧室底面有强制冷却的润滑油可以带走燃烧室底面的热量; 燃烧室顶面倒角处 (测点 3) 的温度最高, 而第二环槽测点 (测点 5) 的温度最低, 是因为第一环槽导致燃烧室侧面有面积突变, 燃烧室顶面的热量传输有截流而不能及时带走, 测点在顶面倒角处, 局部有热量集中, 它的温度在每个工况下均是最高, 而第二环槽的位置距离燃烧室比较远, 在下止点附近还有强制冷却的润滑油冲淋, 所以温度最低。

根据热频加热的理论, 在一定深度, 温度波动剧烈程度随着加热频率增加而减小。在稳定工况下温度波动最小应该在发动机转速 2 100 r/min 时燃烧室内的 3 个点 (测点编号 1、2、3), 但由于热电偶埋设深度的影响, 稳态工况下活塞的温度波动不大, 测试结果也反映这种情况。稳定工况 2 100 r/min 时的实测 3 点温度如图 6 所示。

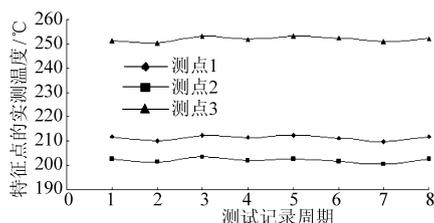


图 6 2 100 r/min 转速活塞稳定工况下燃烧室各点实测温度

Fig. 6 Temperature curves of the points in combustion chamber at 2 100 r/min

发动机暖机 30 min 后, 节气门开到最大, 调节发动机扭矩, 由 1 000 r/min 缓慢上升到 2 100 r/min 时, 对 EQD180N-20 型发动机活塞进行温升试验, 如图 7 所示。从 1 000 r/min 到 1 300 r/min 时, 发动机各测点温度上升最为剧烈, 到 1 600 r/min 时达到最高值。发动机转速从 1 600 r/min 到 2 100 r/min 时, 测点 1、3 温度呈先降低后上升趋势, 测点 2、4 温度呈下降趋势。测点 5 温度在发动机转速到

1 300 r/min后,基本保持不变。

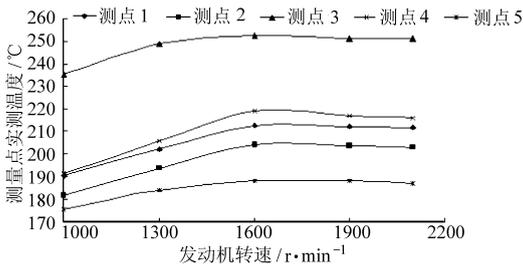


图7 燃烧室测点温度随发动机转速的变化曲线

Fig. 7 Effect of engine speed

图8为发动机不同转速下活塞径向和轴向的温差变化。试验用活塞是盆型燃烧室的组成部分,燃烧室底面是平整面,燃烧室底面厚度仅10 mm,活塞的内腔正对着喷油强制冷却油注,燃烧室底面热量易被润滑油带走,故在发动机不同转速下温差均较小,测点1与测点2在活塞径向方向上的距离为30.5 mm,温差在10℃之内,可见,强制冷却很好地改善了活塞燃烧室底面径向温度分布;活塞轴向温差比径向温差大得多。测点3和测点4在活塞轴向方向上的距离仅14 mm,但温差达到32℃,说明活塞顶面温度的热量不能及时被带走,存在烧顶的危险。

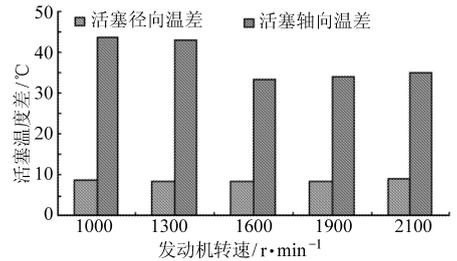


图8 活塞径向、轴向温差

Fig. 8 Temperature difference at axial and radial directions

4 结论

(1) 在整个试验过程中,存储式活塞温度测量方法性能稳定可靠,黑匣子隔温措施有效地保护了电子元器件在高温下的性能。

(2) EQD180N-20型发动机活塞在最大扭矩工况下,活塞的整体温度合理,最高温度是活塞顶面倒角处的264℃。第一环槽的温度比较高,在1 500 r/min、2 100 r/min都到达了210℃以上,几乎达到普通润滑油的结焦温度。

(3) EQD180N-20型发动机活塞径向温度梯度小,燃烧室侧壁在轴向方向温度梯度大,其热负荷严重。

参 考 文 献

- 1 Woschn G. A universally application equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine [C]. SAE Paper 670931, 1967.
- 2 Naoya Kato, Michiyasu Moritsugu, Takashi Shimura, et al. Piston temperature measuring technology using electro magnetic induction [C]. SAE Paper 2001-01-2027, 2001.
- 3 陆瑞松. 内燃机的传热与热负荷 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- 4 Kazama Toshiharu, Sasaki Hayato, Narita Yukihiro. Simultaneous temperature measurements of bearing and seal parts of a swash plate type axial piston pump-effects of piston clearance and fluid property [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 203 ~ 206.
- 5 Mizuno Hideaki, Ashida Koichi, Teraji Atsushi, et al. Transient analysis of the piston temperature with consideration of in-cylinder phenomena using engine measurement and heat transfer simulation coupled with three-dimensional combustion simulation [J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(1): 83 ~ 90.
- 6 陆晓军. 发动机活塞温度的非接触互感式测量方法 [J]. 农业机械学报, 1998, 29(1): 125 ~ 129.
Lu Xiaojun. A study of non-contact mutual-inductive measurement of the temperature field in engine piston [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(1): 125 ~ 129. (in Chinese)
- 7 吴慧斌, 马小峰, 程尔昌, 等. 6110/125Z 柴油机活塞温度场测量及降温措施 [J]. 内燃机工程, 2002, 23(5): 59 ~ 61.
Wu Huibin, Ma Xiaofeng, Cheng Erchang, et al. The piston temperature field measurement and how to reduce the temperature in a 6110/125Z model diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2002, 23(5): 59 ~ 61. (in Chinese)

(上接第5页)

- 7 宗长富, 陈国迎, 梁赫奇, 等. 基于模型预测控制的汽车底盘协调控制策略 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 1 ~ 7.
Zong Changfu, Chen Guoying, Liang Heqi, et al. Vehicle chassis coordination control strategy based on model predictive control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 1 ~ 7. (in Chinese)
- 8 丁海涛, 郭孔辉, 陈虹. 汽车稳定性控制中横摆力矩决策的LQR方法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(3): 597 ~ 601.
Ding Haitao, Guo Konghui, Chen Hong. LQR method for vehicle yaw moment decision in vehicle stability control [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(3): 597 ~ 601. (in Chinese)