

高精度固体推进剂爆热测试系统*

卢洪义, 杨兴根

(海军航空工程学院 机械工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为准确测量固体推进剂储存期间爆热值的变化, 研制了高精度的爆热测试设备。针对影响爆热测试的主要因素, 在测试系统硬件设计中采取了降低热量损失的多种措施, 并采用了悬浮式光电隔离技术; 在系统软件设计中则采用了数字滤波技术, 建立了新的热量散失校正数学模型, 并对影响测试精度的因素进行在线实时补偿。对标准物质的热值测试表明, 系统测试相对误差小于0.1%, 实现了推进剂爆热的高精度测试。

关键词: 固体推进剂; 热值; 热量测量; 测试设备; 测试程序

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)05-0083-03

High accuracy test system for solid propellant combustion heat measurement

LU Hong-yi, YANG Xing-gen

(Dept. of Mechanical Engineering, Naval Aeronautic Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to meet the high accuracy measurement for solid propellant combustion heat during storage, a high accuracy test system was designed. According to the main factors resulted in measuring error, some techniques such as light-electricity isolated technique were used in hardware system. The digital filter technique was used in the system software design. A good mathematical model was adopted to correct the heat loss, real-time compensation. The measurements for the standard heat show that the relative error of objectives' combustion heat is less than 0.1% by this test system, so the measurement with high accuracy of solid propellant combustion heat can be achieved.

Key words: Solid propellant; Calorific value; Heat quantity measurement; Test set; Checkout procedure

1 引言

对出厂后的固体火箭发动机推进剂的爆热进行定期测试, 可得到固体推进剂性能随储存时间的变化规律, 判断发动机推进剂是否偏离正常工作点, 并可为发动机延寿提供可靠的试验数据。储存期间推进剂的爆热变化非常缓慢, 年均相对变化小于0.1%^[1], 为了得到推进剂储存期不超过一年的爆热变化值, 需要高精度的测试设备。目前在煤炭、化工等行业所用的热值测试设备, 不确定度为0.2%, 不能满足对短时间内储存的推进剂爆热变化值的测量要求。此外, 要对相关型号的固体火箭发动机推进剂进行分析评定, 也需要高精度的爆热测试系统。本文根据推进剂的实验条件要求及仪器的使用环境,

针对实验误差的来源分析^[2], 从系统硬件和软件两方面考虑, 设计了高精度爆热测试设备。

2 测试系统硬件设计

爆热测试系统主要由燃烧室、恒温槽、微机测试系统三部分组成, 如图1所示。

从提高测试精度的角度来看, 硬件设计主要考虑以下两方面的因素。

(1) 热量散失

由于试验条件应与发动机的实际工作环境相似, 试验过程中燃烧室内充填 $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 的高压氮气。所以燃烧室密封设计是非常重要的, 因为一旦气体泄漏, 将会带走热量, 产生测量误差。设计时主要从燃烧室结构和加工工艺方面来解决, 并在试验时

* 收稿日期: 1999-08-24; 修订日期: 2000-01-27。

作者简介: 卢洪义(1965—), 男, 硕士, 副教授, 研究领域为导弹发动机性能测试、无损检测等。

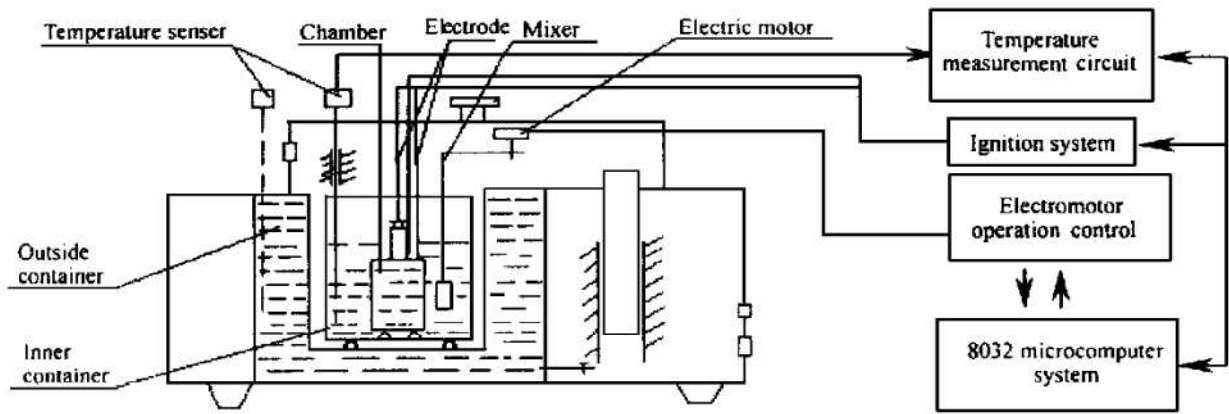


Fig. 1 Test system

做密封检查。

爆燃测试是通过测量内筒温度完成的, 而内筒与外界热量交换导致较大的热量损失, 对测量精度的影响最大。为使热量损失降到最低, 外筒设计为恒温式、双层夹套充水式结构, 外表面使用绝热材料, 使实验过程外筒水温变化只受内筒传热的影响, 而与周围环境的热量交换对测试结果所产生的误差降低到最小程度。这样通过测量外筒温度变化和软件设计, 校正内筒的热量散失。

(2) 外界干扰和系统噪声^[3]

干扰和计算机系统噪声对测试结果的影响, 主要表现形式是随机误差。硬件上消除随机误差的主要措施是: 针对部队实验环境较差的情况, 计算机系统采用防潮、抗干扰性能较好的工控机, 中央数据处理与控制单元 (CPU) 采用全悬浮式的光电隔离技术, 即 CPU 与前、后向通道信号的光电隔离, 与强电的隔离, 电源间的隔离等, 提高系统的信噪比。前向通道信号转换会产生较大噪声, 所以前向通道的设计非常重要。设计时根据系统对每一部件的性能指标要求, 对传感器、A/D 转换及与信号调理方面有关元器件的性能指标——信号增益、噪声、漂移、灵敏度、分辨率等, 进行严格的测试及老化实验, 并对元器件的非线性进行校正, 同时消除温度传感器接线电阻的影响。

3 热量校正软件设计

(1) 采用数字滤波技术

虽然在硬件设计时已采取了相应的措施, 但不能完全消除噪声的影响。为提高测试精度, 在软件设计时采用了数字滤波技术, 消除随机误差。

(2) 热量散失校正

在硬件设计时, 只是减少了热量的散失, 并未对散失的热量进行校正。因此软件上对散失的热量进行校正, 能大大提高系统测试精度。

内筒与外筒之间、外筒与环境之间始终存在热量交换。测量过程中, 系统的热平衡式为

$$Q_b = Q_n + Q_w + Q_l \quad (1)$$

式中 Q_b 为爆燃产生的热量, Q_n , Q_w , Q_l 分别为通过内筒、外筒及散失到环境的热量。

所以, 为提高推进剂爆热的测试精度, 必须对热量的散失进行校正, 即对 Q_n 和 Q_l 进行校正。对于内筒热量的计算按下式

$$Q_n = h(t_n - t_0) \quad (2)$$

式中 t_0 为点火时的内筒温度; t_n 为终点时的内筒温度; h 为内筒热容量。

从式 (2) 中可以看出, 终点时内筒温度的测量是影响测量精度的主要因素, 假定内筒无热量散失时的终点温度为 t'_n , 则 $Q_b = Q_n = h(t'_n - t_0)$ 。令 $C = t'_n - t_n$, 作为考虑热量散失时终点温度的校正值。因此热量散失校正是求出终点温度的校正值 C , 从而得到 $t'_n = C + t_n$ 。

在测试过程中, 由于点火开始后, 不同时刻的热量散失速度不同, 根据多次实验, 按照点火时和终点时的内外筒温度差 $t_0 - t_w$ 和 $t_n - t_w$, 确定内筒降温速度的经验公式

$$V_0 = K(t_0 - t_w) - A \quad (3)$$

$$V_n = K(t_n - t_w) - A \quad (4)$$

式中 V_0 为在点火时内外筒温差的影响下造成的内筒降温速度, K/min; V_n 为在终点时内外筒温差的影响下造成的内筒降温速度, K/min; k 为恒温槽的冷却常数, min^{-1} ; A 为恒温槽的综合常数, K/min; t_w 为外筒温度。

对于式 (3), (4) 中常数 A, K 的确定, 采用标定的方法, 即通过对已知标准物质的发热量测试, 准确求出 A, K 值。标定时, 点火前内筒搅拌 5 min 后, 采集一次内筒温度 (t_{n_1}) 经 10 min 后再采集一次内筒温度 (t_{n_2})。点火后, 采集外筒温度 (t_w) 和终点温度 (即内筒温度开始下降时刻 t_n)。然后继续搅拌 10 min, 采集一次内筒温度 (t_{n_3})。根据圆柱体传热及热平衡原理, 有以下联立方程

$$\frac{t_{n_1} - t_{n_2}}{10} = k \left(\frac{t_{n_1} + t_{n_2}}{2} - t_w \right) - A \quad (5)$$

$$\frac{t_n - t_{n_3}}{10} = k \left(\frac{t_n + t_{n_3}}{2} - t_w \right) - A \quad (6)$$

通过式 (5), (6) 计算机自动计算出 k 和 A 的标定值, 然后按式 (7) 计算校正值 C 。

$$C = nV_0 + \frac{V_n - V_0}{t_n - t_{n_1}} \left[\frac{t_{n_1} + t_n}{2} + \sum_i^n J_i - nt_0 \right] \quad (7)$$

式中 n 为由点火到终点的时间, min; t_i 为点火后第 i 分钟时采集的内筒温度。

(3) 点火丝热量校正

点火丝燃烧产生的热量, 应从测得的爆热值减掉。点火丝的热量 Q_s 按式 (8) 计算

$$Q_s = (m_0 - m') \times q \quad (8)$$

式中 m_0 为点火丝燃烧前质量, g; m' 为燃烧后, 点火丝剩余质量, g; q 为每克点火丝的发热量, J/g。

(4) 在线实时补偿

点火时, 电阻丝通电时产生的热量, 只能由计算机在线实时补偿, 即实时测得通电时间, 按式 (9) 计算发热量

$$Q_e = V^2 \times n / R \quad (9)$$

式中 V 为点火丝两端电压; R 为点火丝电阻; n 为点火丝通电时间。由电能转换的热量 Q_e , 从测得的爆热值减掉, 确保测量精度。

搅拌器在搅拌期间会产生相应的搅拌热, 为了准确测量爆热值, 应消除搅拌产生的影响。通过计算机在线实时补偿, 搅拌速度控制为 500 r/min, 由此每分钟产生的热量约 12 J, 实时测得搅拌时间,

测出实验过程中搅拌热, 再从测得的爆热值中减去搅拌热。

4 结果与讨论

采用该测试系统对标准物质 NH_4ClO_4 进行了测试, NH_4ClO_4 热值按公认的经验分解方程式计算, 其标准热值为 6 967 J/g, 实验结果如表 1。

Table 1 Experimental results

Quality/g	Total heat value/kJ	Heat value/ (J/g)	Relative error/ %
3.202 1	22.328	6 973	- 0.086
2.822 3	19.655	6 964	0.058
3.032 4	21.136	6 970	- 0.043

经多次实验, 系统测试的相对误差均小于 0.1%, 能够满足爆热高精度测试。为尽可能提高测量精度应适当控制推进剂药量, 测试前外筒水温高于内筒水温, 当推进剂燃烧完毕后, 使内筒水温高于外筒水温。这样, 实验过程中, 外筒向内筒传递的热量可补偿一部分由内筒向外筒传递的热量损失。爆热测试过程中, 热量交换存在于每一操作步骤中, 因此, 人为因素对测试结果有较大影响, 有时甚至达不到系统设计精度。为减少人为误差, 设计时, 大大提高了系统的自动化程度, 简化了系统标定、实验过程中的步骤, 从而确保部队使用人员对固体推进剂爆热实现高精度测试。

参 考 文 献

- [1] 刘佩进, 高 鸣, 何国强, 等. 改性双基推进剂老化燃烧性能试验研究 [J]. 推进技术, 1999, 20 (4) .
- [2] 周生国. 机械工程测试技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [3] 何力民. MCS-51 系列单片机应用系统设计系统配置与接口技术 [M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1991.

(责任编辑: 史亚红)