

文章编号: 1006-9941(2005)03-0189-03

## 密闭燃烧器法测高压下推进剂燃速研究

胡松启, 李葆萱, 李逢春, 刘宏成

(西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 介绍了密闭燃烧器法测试高压下推进剂燃速特性的基本原理, 分析了影响测试精度的各因素, 并从实验上对密闭燃烧器法中的散热损失进行修正, 将测试结果标准偏差提高到 1%。密闭燃烧器法一次测试可测出全部压强下推进剂燃速, 可成为高压高燃推进剂研制的有效工具。

**关键词:** 航天材料; 固体推进剂; 密闭燃烧器法; 高压强; 热损失

**中图分类号:** TJ763; V512

**文献标识码:** A

### 1 引 言

随着新型火箭、导弹武器和高强度材料的发展, 对固体推进剂提出了高燃速及高压强下稳定工作的新要求。如动能拦截器用的脉冲发动机、反坦克弹、高装填系数的单室双推火箭发动机等, 发动机工作压强均在 10 MPa 以上, 其使用的推进剂燃速也高达  $50 \sim 250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。提高固体火箭发动机工作压强是目前世界各国为提高火箭发动机比冲而采取的重要技术途径。

但是, 高压强下固体推进剂燃速特性不同于一般工作压强下的燃速特性, 某些固体推进剂在高压下, 燃速特性出现突变现象<sup>[1,2]</sup>。高压下其燃速-压强关系出现拐点(见图 1)。

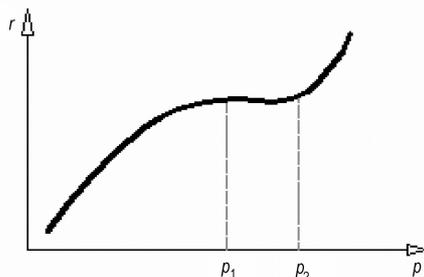


图 1 高压强下推进剂可能的燃速特性

Fig. 1 Combustion performance of solid propellant at high pressure

由图 1 可见, 随着压强  $p$  升高, 燃速  $r$  升高, 压强指数  $n$  减小; 当压强升高到一定程度( $p_1$ ), 出现平台区/麦撒区( $p_1 \sim p_2$ ), 此时随着  $p$  升高,  $r$  变化很小; 当压强从  $p_2$  处继续升高时,  $r$  急剧增大, 压强指数  $n$  接近 1。

为正确进行发动机内弹道设计, 必须知道所选用的推进剂在不同压强下的燃速特性。因此寻求一种简单、可靠、高精度的测试高压强下高燃速推进剂燃速特性的方法显得非常重要。

本文首先分析目前测试固体推进剂高压强下燃速特性的各种方法的优缺点; 然后详细分析密闭燃烧器法测试原理, 分析影响密闭燃烧器法测试精度的各种原因。

### 2 高压强下推进剂燃速测试方法选择

目前, 测试固体推进剂燃速特性的方法主要有: 靶线法、声发射法、密闭爆发器法、密闭燃烧器法。靶线法、声发射法、密闭爆发器法的测试精度目前都已达到了 2%, 是常用的三种测试方法, 但这三种方法存在如下不足: (1) 一次测试只能测出一个压强下推进剂燃速; (2) 它们可测的最大压强一般不大于 25 MPa。(3) 假如推进剂燃速特性出现突变, 使用此三种方法测试时, 测试推进剂有限点的燃速很难真实反应推进剂在较宽压强范围内燃速特性。

密闭燃烧器法通过推进剂在密闭容器中燃烧, 测试容器内压强与时间变化关系, 并根据燃烧过程动态燃烧模型, 推导出推进剂的燃速表达式, 再通过数据处理得到不同压强下的推进剂燃速特性参数。这种方法可测试的压强高达 80 MPa, 而且通过一次测试就可得出推进剂在全部压强下的燃速<sup>[3]</sup>。

考虑到高压强下固体推进剂燃速特性有可能出现拐点, 为详细、正确了解高燃速推进剂在高压强下的燃速特性(找出拐点), 我们必须测试推进剂在连续压强下的燃速。如果采用靶线法、声发射法和密闭爆发器法, 测试精度高, 但是, 需要测试的数据多, 工作量大; 而密闭燃烧器法通过一次测试就可以得出不同压强下

收稿日期: 2004-09-06; 修回日期: 2004-12-20

作者简介: 胡松启(1976-), 男, 博士后, 研究领域为固体推进剂工艺及燃烧。e-mail: pine\_hu@263.net

推进剂的燃速,操作简单,具有很大的实用性。

### 3 密闭燃烧器法分析

#### 3.1 测试原理

密闭燃烧器法的基本原理是利用压强-时间曲线换算成压强-肉厚曲线,再计算出压强-燃速曲线。

在密闭燃烧器中点燃几何尺寸、质量( $W_p$ )、燃气平均相对分子质量( $M_g$ )已知的固体推进剂试样。随着燃烧的进行,燃烧器中的燃气压强不断增加,通过压强传感器记录下  $p-t$  曲线。假定试样的燃面被同时引燃,且燃烧服从平行层燃烧规律。记录下的  $p-t$  曲线上任一时刻  $t$  所对应的  $p_t$  与及时燃烧掉推进剂量  $W_{pt}$  可表示成下列关系式:

$$p_t V_t = \left( \frac{W_{pt}}{M_g} + \frac{W_i}{M_i} \right) RT_v \quad (1)$$

式中,  $T_v$  为燃烧器中燃气实际温度;  $R$  为通用气体常数;  $W_i$  为点火药质量;  $M_i$  为点火药燃气相对分子质量;  $W_{pt}$  为  $t$  时刻燃烧消耗的推进剂质量;  $V_t$  是  $t$  时刻燃烧器的自由容积。

$$V_t = V_0 - \frac{W_{p0}}{\rho_p} + \frac{W_{pt}}{\rho_p} - (W_i \alpha_i + W_{pt} \alpha_p) \quad (2)$$

式中,  $V_0$  为燃烧器容积;  $W_{p0}$  为推进剂试样初始质量;  $\alpha_i$ 、 $\alpha_p$  分别为点火药、推进剂的余容。将(2)式代入(1)式中求得:

$$W_{pt} = \frac{\frac{W_i}{M_i} RT_v - p_t \left( V_0 - \frac{W_{p0}}{\rho_p} - W_i \alpha_i \right)}{\frac{p_t}{\rho_p} - \frac{p_t}{\alpha_i} - \frac{RT_v}{M_g}} \quad (3)$$

通过求得  $t$  时所对应的  $W_{pt}$  就可以求得  $e_t$ , 然后求出燃速:

$$r = \frac{de_t}{dt} \quad (4)$$

公式(3)中,  $p_t$  由测试曲线得到;  $V_0$ 、 $\rho_p$ 、 $M_g$ 、 $W_{p0}$ 、 $W_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\alpha_p$  均可事先测定得知; 只有  $T_v$  必须通过传热计算或者实验测量得到。

#### 3.2 测试精度影响因素分析

从密闭燃烧器法测试原理分析可知,影响密闭燃烧器法测试精度的因素主要有如下三方面:

(1) 推进剂试样尺寸的规整性。在计算试样燃面变化时,假定推进剂燃烧服从平行层燃烧规律,故燃面变化实际上是推进剂尺寸变化,因此,推进剂尺寸是否规整,关系到燃面计算的正确与否。在制作推进剂试样时,必须尽量保证试样尺寸的规整性。

(2) 因为密闭燃烧器的压强由推进剂燃烧产生的气体填充而产生,因此只要知道每千克推进剂燃烧产生多少摩尔气体,就可由压强推算出推进剂燃烧消耗的质量  $W_{pt}$ 。因此燃气平均相对分子质量  $M_g$  非常关键,它的正确性也非常重要。

(3) 密闭燃烧器容器的散热损失。虽然密闭燃烧器工作时间很短,但是因为散热损失而造成的压力损失非常大,低压下甚至达 30%<sup>[4]</sup>。因此散热损失修正是密闭燃烧器法测推进剂燃速的关键技术。

上述三个影响因素中:推进剂试样尺寸的规整性可以通过优化设计刀具来解决;推进剂不同压强下的燃气平均相对分子质量  $M_g$  是通过热力计算来获得的,提高热力计算程序的准确性可提高密闭燃烧器的测试精度;最难以解决的是密闭燃烧器工作过程中的散热损失修正。

#### 3.3 散热损失修正

目前密闭燃烧器法的散热损失修正方法主要有:

(1) 平均热损失修正方法。此方法认为推进剂试样在燃烧过程中热损失率是不变的,把总的热损失量除以试样的燃烧时间,然后平均分配到整个燃烧过程。试验表明:用这种简单的方法修正,误差很大,与实际情况相差太远。

(2) 反推式热损失修正方法。这种热损失修正方法是利用推进剂试样燃烧结束后的压强下降段的热损失来模拟相对应的压强上升段的热损失。这种方法实际计算出来的结果与理论值的误差比较大。

(3) 传热计算的热损失修正方法。此方法考虑了燃气的辐射换热及对流换热对热损的影响。这种方法理论上很完善,但是目前我们无法得到真正的理论计算模型,因此计算结果与实际值出现很大的偏差。

(4) 实验校正法。本方法是利用试验校正结果来修正密闭燃烧器散热损失的一种方法,由于修正直接来源于试验,因此能真实反映密闭燃烧器的工作状态,具有非常高的准确性。

通过大量的对比试验,本文认为前面三种散热修正方法都不是很精确,误差较大。因此提出依托于试验标定的综合测定热损失修正法,主要是对 3.1 节的  $T_v$  进行校正。

在密闭燃烧器中点燃一块已知质量的试样,测出燃烧结束时的最大压强,  $pV = W_p R_g T_v$ , 因  $p$ 、 $V$ 、 $W_p$ 、 $R_g$  已知,可求出实际的定容爆温  $T_v$ , 与理论计算(热力计算所得  $T_v$ ) 定容爆温比较,得  $T_v - T_{v0} = \Delta T_v$ 。用  $(\Delta T_v / T) \times 100\%$  表示热损失大小。因为所有实验都

是在同一密闭燃烧器中进行的,燃烧器热损失和内表面对热损失的影响可以相互抵消。

本文曾通过实验,定量地确定了推进剂药量大小、推进剂爆温、热释放率燃烧时间等因素对热损失的影响<sup>[5]</sup>,研究认为:热释放率降低、燃烧时间增加、推进剂爆温越高,则热损失越大。在大量实验研究的基础上,本文提出综合测定热损失修正法对  $T_b$  进行校正,大大提高密闭燃烧器的测试平行误差。

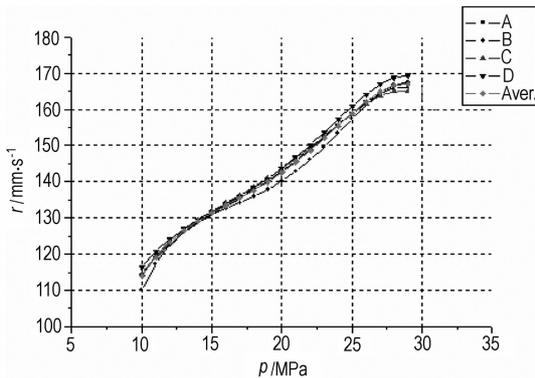


图2 推进剂样品燃速测试曲线

Fig. 2 Combustion performance of propellant sample

图2为我们用综合测定热损失修正法修正散热损失,测试的某高压高燃推进剂的燃速特性曲线。A、B、

C、D表示四次测试结果,Aver.表示四次测试的平均值,四次测试的相对标准偏差为0.3%~1%。

## 4 结论

密闭燃烧器法一次测试可测出全部压强下推进剂燃速,可用于研究推进剂在较宽范围内燃烧性能。本文于基于大量试验与理论分析,提出综合测定热损失修正法,对测试过程中热损失进行修正,将密闭燃烧器法测试的相对标准偏差降低到1%。

目前,本文正开展密闭燃烧器法测试的燃速和发动机法测试的燃速相关性研究,以期提高密闭燃烧器法测试精确度。

### 参考文献:

- [1] 鲁国林. 硝酸/高氯酸铵/丁羟推进剂高压燃烧特性[J]. 推进技术, 2003, 24(6): 571-576.
- [2] 张春泰. 少烟丁羟推进剂高压性能的实验研究[J]. 推进技术, 1995, 16(2): 50-53.
- [3] 李葆萱, 肖育民, 李逢春, 等. 密闭燃烧器在固体火箭推进剂燃速测定中的应用研究[J]. 火箭技术, 1997, (1): 9-14.
- [4] 肖育民, 李葆萱, 刘建琦. 密闭燃烧器法测推进剂燃速: 两种不同热损失修正方法的比较[J]. 火箭技术, 1997, (2): 14-17.
- [5] 刘宏成, 李葆萱, 等. 应用于密闭燃烧器法的热损失修正方法分析[A]. 第五届海内外华人航天科技研讨会[C], 2004.

## Study on Burning Rate Measurement of Propellant at High Pressure by Closed Burner Method

HU Song-qi, LI Bao-xuan, LI Feng-chun, LIU Hong-cheng

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The principle of closed burner method is introduced in this paper. The factors affecting the accuracy of measurement results are analyzed, and the heat-loss is modified based on experiments. The standard deviation of measurement results has been improved to 1% by adopting modification. The combustion rate of propellant at any pressure can be obtained by one test of closed burner method, and closed burner method will be an effective tool to study new style propellant working under high pressure.

**Key words:** aerospace material; solid propellant; closed burner method; high pressure; heat-loss