

文章编号: 1006-9941(2013)01-0097-06

定容燃烧器法热损失率不确定度分析

胡松启¹, 刘凯¹, 王鹏飞¹, 徐秋丽¹, 周宴星²

(1. 西北工业大学燃烧流动和热结构国家级重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 二炮驻河西公司军事代表室, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 定容燃烧器法是一种测试高压下固体推进剂燃速特性的方法。定容燃烧器法工作过程中散热损失是影响燃速测试精度的主要因素。推导了热损失率计算方程, 分析了各因素对热损失率的影响; 建立了热损失率测试结果的不确定度评定方法, 并对测试结果进行了不确定度评定。研究表明, 推进剂试样燃面、燃气定容比热、燃气压强、燃气温度是影响热损失率不确定度的主要因素, 其中燃面是影响热损失率不确定度的最大因素; 后续实验中必须提高推进剂试样尺寸加工精度, 减小推进剂试样燃面误差。

关键词: 物理化学; 高压燃速; 定容燃烧器法; 热损失率; 测量不确定度; 燃面

中图分类号: TJ55; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.021

1 引言

定容燃烧器法是一种可测试 15 ~ 60 MPa 所有压强点下固体推进剂燃速的方法^[1-2]。定容燃烧器法工作过程中燃气与燃烧器壳体之间存在传热过程, 造成热损失, 使燃气温度远低于推进剂的定容燃烧温度。由于热损失的存在, 使实际测得的压强比理论压强低(低约 30%), 为获得燃气的实际温度需进行热损失修正^[3]。找出各因素对热损失影响规律对发展高精度的热损失修正技术具有重要的指导意义^[3-4]。Price^[5]主要考虑了高温燃气对流、导热和热辐射产生的热损失对燃速测试结果的影响。Glick^[1]等人考虑了燃气湍流模型下的对流, 高温粒子对壁面辐射的热损失。JANNAF 美国燃烧委员会组织推进剂燃速测试组, 把点火问题, 对壁面热损失, 型面误差, 火焰扩展等方面各项误差因素列为专题讨论, 以便确定其对测试结果的影响。西北工业大学^[2-4,6]主要从推进剂试样的尺寸、燃气平均分子量、推进剂试样热量大小、爆温、热释放率等方面对影响定容燃烧器法热损失因素进行研究。

评定各因素对测量不确定度的影响可以为提高测试精度提供理论支持^[7]。庞维强等^[8]利用不确定度原理分析了含镁铝富燃推进剂燃烧的均匀性与稳定性, 认为含镁铝富燃推进剂燃速具有良好的均匀性与

稳定性; 李纲等^[9]采用不确定度评定了地面直联冲压实验设备对某型号固冲发动机补燃室二次燃烧效率的影响, 确定了不同燃气发生器喷嘴结构、空气进气角度、进气头部距离和补燃室长度对二次燃烧产生的影响。通过对定容燃烧器法热损失率不确定度进行评定, 可以得到各因素的标准不确定度分量分布, 确定其对热损失率的影响, 为实验方案的改进提供参考。

本文推导了定容燃烧器法热损失率不确定度方程; 分析了各因素对热损失率的影响, 给出各因素标准不确定度分量分布, 给出定容燃烧器法热损失率不确定度。

2 热损失率不确定度方程推导

2.1 不确定度原理

测量不确定度是指对测量结果变化的不肯定, 用以表示被测量值的分散性。一个完整的测量结果应包含被测量的估计和分散性测试两部分。测量结果标准不确定度分为 A 类和 B 类两种评定方法^[7]。

A 类标准不确定度是通过实验数据统计得出的, 当实验为 n 次重复测量时, 通过贝塞尔法得到^[7]

$$u(x_i) = S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

当实验测量次数较少时, (一般认为 $n = 4 \sim 9$ 为

收稿日期: 2012-04-07; 修回日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(项目号: 50706040)

作者简介: 胡松启(1976-), 男, 副教授, 主要从事固体推进剂及燃烧研究。e-mail: pinecore@nwpu.edu.cn

宜), 输入量接近正态分布时, 单次结果 x_i 的实验标准差 S 为^[7]:

$$S = R/C \quad (2)$$

B 类标准不确定度的信息来自于以往的检测数据。对已知信息表明被测量 X_i 之测量值 x_i 分散区间的半宽度为 a , 且 x_i 落在 $x_i - a$ 至 $x_i + a$ 区间的概率为 100%。对其分布的估计可得出标准不确定度 $u(x_i)$ 为^[7]:

$$u(x_i) = a/k \quad (3)$$

为了计算方便, 近似认为所有 x_i 都是互相独立的, 因此可得出合成标准不确定度为^[7]:

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)} \quad (4)$$

其中, $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$, 为灵敏度系数, 它反映了合成量 y 随输入量的 x_i 变化而变化。

2.2 热损失率不确定度方程推导

定容燃烧器法工作过程中 t 时刻燃烧器内燃气能量方程为:

$$\overline{C_{v1}}(M_{pt} + M_i)(T_t - T_0) = \overline{C_{v2}}(M_{pt} + M_i)(T_v - T_0) - Q_{et} \quad (5)$$

t 时刻燃烧器内燃气状态方程为:

$$p_t \left(V_0 - \frac{M_{p0}}{\rho_p} + \frac{M_{pt}}{\rho_p} \right) = (M_{pt} + M_i) k_p R T_t \quad (6)$$

t 时刻推进剂样品质量变化方程为:

$$\frac{dM_{pt}}{dt} = \rho_p a P_t^n S_t \quad (7)$$

其中, M_i 为点火药的质量, g; M_{p0} 为推进剂试样的初始质量, g; M_{pt} 为在 t 时刻已烧去的推进剂试样的质量, g; T_t 为实际燃烧温度, K; T_v 为定容爆温, K; $\overline{C_{v1}}$ 为温度从 T_0 到 T_t 平均定容比热, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; $\overline{C_{v2}}$ 为温度从 T_0 到 T_v 平均定容比热, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; k_p 为推进剂与点火药的单位质量摩尔数, $mol \cdot kg^{-1}$; p_t 为燃烧器内 t 时刻测得的燃烧压强, Pa; V_0 为定容燃烧器初始容积, m^3 ; ρ_p 为推进剂的密度, $kg \cdot m^{-3}$; S_t 为推进剂燃面, m^2 , 此时假设为圆柱试样端面燃烧。

公式(5)两边对时间求导得:

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{[\overline{C_{v2}}(T_v - T_0) - \overline{C_{v1}}(T_t - T_0)] \frac{dM_{pt}}{dt} - \frac{dQ_{et}}{dt}}{\overline{C_{v1}}(M_{pt} + M_i)} \quad (8)$$

公式(6)两边对时间求导得:

$$\frac{dP_t}{dt} \left(V_0 - \frac{M_{p0}}{\rho_p} + \frac{M_{pt}}{\rho_p} \right) + \frac{P_t}{\rho_p} \frac{dM_{pt}}{dt} = k_p \frac{dM_{pt}}{dt} R T_t + (M_{pt} + M_i) k_p R \frac{dT_t}{dt} \quad (9)$$

把式(7)、(8)代入式(9)并整理得:

$$\frac{dQ_{et}}{dt} = a p_t^n \overline{C_{v2}} T_v \rho_p S_t - \frac{a p_t^n p_t S_t \overline{C_{v1}}}{R k_p} - \frac{d p_t}{dt} V_t \overline{C_{v1}} \quad (10)$$

其中, k_p 和 T_v 可通过推进剂热力计算得到, 对于该文研究应用的固体推进剂, k_p 和 T_v 和压强 p_t 函数关系分别为

$$k_p = 36.3 - 0.06 p_t + 0.002 p_t^2,$$

$$T_v = 3333.7 + 11.6 p_t - 0.3 p_t^2$$

试样燃面方程为

$$S_t = \frac{1}{2} \pi (D - 2e_t)^2 + \pi (D - 2e_t) (h - 2e_t)$$

由式(10)可以看出, 影响热损失率 $\frac{dQ_{et}}{dt}$ 的输入量为: $\overline{C_{v1}}$ 、 $\overline{C_{v2}}$ 、 T_t 、 p_t 、 ρ_p 、 S_t 、 k_p 、 V_t 。各输入量的取值状态均为型面尺寸为 $D=22$ mm, $h=9$ mm 的圆柱体试样完全燃尽时所测得的数值:

$$p_t = 30.31 \text{ MPa},$$

$$\overline{C_{v1}} \approx \overline{C_{v2}} = 2.32 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$V_t \approx V_0 = 0.16 \times 10^{-3} \text{ m}^3,$$

$$\rho_p = 1.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \quad R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$a = 20.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, \quad n = 0.45, \quad \pi = 3.14,$$

$$D = 22 \text{ mm}, \quad h = 9 \text{ mm}, \quad e_t = h/2 = 4.5 \text{ mm},$$

$$k_p = 36.32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad T_v = 3409.7 \text{ K}$$

3 热损失率的测量不确定度评定

在热损失率的数学模型中, T_v 为定容爆温, a , R , π 和 n 为常数, 本文不考虑这些参数对热损失率不确定度的影响。

3.1 输入量的不确定度 $u(x_i)$ 及自由度 ν

3.1.1 试样直径与高度的不确定度及自由度

由合成不确定度可知, 试样直径 D 和高度 h 引入的不确定度分别为:

$$u_c(D) = \sqrt{u_1^2(D) + u_2^2(D) + u_3^2(D)} = 10.923 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$u_c(h) = \sqrt{u_1^2(h) + u_2^2(h) + u_3^2(h)} = 9.243 \times 10^{-6} \text{ m}$$

可推出 $u_c(D)$ 和 $u_c(h)$ 的有效自由度:

$$\nu_{\text{Deff}} = \frac{u_c^4(D)}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4(D)}{\nu_i}} = 21.43$$

$$\nu_{\text{heff}} = \frac{u_c^4(h)}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4(h)}{\nu_i}} = 15.82$$

其中, $u_1(D) = 6.4 \times 10^{-6} \text{ m}$, $u_1(h) = 2.6 \times 10^{-6} \text{ m}$

为制作时由切药刀引入的不确定度分量,自由度为 $\nu_{D1} = \nu_{h1} = 8$; $u_2(D) = 8.67 \times 10^{-6} \text{ m}$, $u_2(h) = 8.67 \times 10^{-6} \text{ m}$ 为游标卡尺测量时引入的不确定度分量,自由度为 $\nu_{D2} = \nu_{h2} = 12.5$; $u_3(D) = 1.785 \times 10^{-6} \text{ m}$, $u_3(h) = 1.870 \times 10^{-6} \text{ m}$ 为重复测量是引入的不确定度分量,自由度为 $\nu_{D3} = \nu_{h3} = 4$ 。

3.1.2 肉厚的不确定度及自由度

对于肉厚 $e, e_{t, \max} = h/2$, 则 e_t 的合成不确定度为:

$$u_c(e_t) = \sqrt{u_1^2(e_t) + u_2^2(e_t) + u_3^2(e_t)} = 9.457 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\nu_{e, \text{eff}} = \frac{u_c^4(e_t)}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4(e_t)}{\nu_i}} = 17.4$$

其中,由切药刀和游标卡尺所引入的关于 e_t 的不确定度为 $u_1(e_t) = u_1(h)$, $u_2(e_t) = u_2(h)$, $\nu_{e1} = 8$, $\nu_{e2} = 12.5$; 重复性测量引入的 e_t 的不确定度为:

$$u_3(e_t) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i - \bar{h}}{2}\right)^2} = 2.739 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\nu_{e3} = n - 1 = 4$$

3.1.3 定容比热值的不确定度及自由度

实验用推进剂为复合推进剂,该推进剂燃气的平均定容比热值的变化半宽度为 $0.01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1[7]}$,符合均匀分布 ($k = \sqrt{3}$)。

则:平均定容比热 $\overline{C_{v1}}$ 引入的不确定度为:

$$u(\overline{C_{v1}}) = \frac{0.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

在实验测试中认为 $\overline{C_{v1}} \approx \overline{C_{v2}}$, 则

$$u(\overline{C_{v2}}) = \frac{0.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$u(\overline{C_{v1}})$, $u(\overline{C_{v2}})$ 的相对标准不确定度都为 $10\%^{[5]}$, 则可得出自由度为:

$$\nu_{\overline{C_{v1}}} = \nu_{\overline{C_{v2}}} = \frac{1}{2 \left[\frac{u[u(x)]}{u(x)} \right]^2} = \frac{1}{2 \times (40\%)^2} = 50$$

3.1.4 测试压强的不确定度及自由度

测试压强 p_t 的传感器的最大量程为 100 MPa , 测试误差为 5% 且服从矩形分布, 则 p_t 引入的不确定度: $u(p_t) = 0.0025 \text{ MPa}/\sqrt{3} = 0.0014 \text{ MPa}$ 。

$u(p_t)$ 的相对标准不确定度为 $10\%^{[5]}$, 可求得自由度为: $\nu_{p_t} = \frac{1}{2 \left[\frac{u[u(p_t)]}{u(p_t)} \right]^2} = \frac{1}{2 \times (10\%)^2} = 50$

3.1.5 试样密度的不确定度及自由度

已知试样密度的误差极限为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 计算

出参数 ρ_p 对应的不确定度分量:

$$u(\rho_p) = \frac{0.01/2}{\sqrt{3}} = 2.9 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$u(\rho_p)$ 的相对标准不确定度为 $10\%^{[5]}$, 可以求得自由度为:

$$\nu_{\rho_p} = \frac{1}{2 \left[\frac{u[u(x)]}{u(x)} \right]^2} = \frac{1}{2 \times (10\%)^2} = 50$$

3.1.6 燃面的不确定度及自由度

推进剂试样为圆柱形, 燃面 S_t 为试样直径 D , 高度 h 与肉厚 e_t 的函数。燃面 S_t 的不确定度可由直径 D , 高度 h 与肉厚 e_t 的不确定度合成得到。试样燃面 S_t 关于 D 的不确定度为 $u_D(S_t)$, S_t 关于 h 的不确定度为 $u_h(S_t)$, S_t 关于 e_t 的不确定度为 $u_{e_t}(S_t)$ 。

则 S_t 的不确定度为:

$$u_c(S_t) = \sqrt{u_D^2(S_t) + u_h^2(S_t) + u_{e_t}^2(S_t)}$$

代入数据得:

$$u_D(S_t) = \sqrt{[\pi D + \pi(h - 4e_t)]^2 u^2(D)} = 0.45 \times 10^{-6} \text{ m}^2;$$

$$\nu_{\text{Def}} = \frac{u_c^4(D)}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4(D)}{\nu_i}} = 21.43$$

$$u_h(S_t) = \sqrt{c_1^2 u^2(h)} = \sqrt{[\pi(D - 2e_t)]^2 u^2(h)} = 0.38 \times 10^{-6} \text{ m}^2;$$

$$\nu_{\text{heff}} = \frac{u_c^4(h)}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4(h)}{\nu_i}} = 15.8$$

$$u_{e_t}(S_t) = \sqrt{[12\pi e_t - \pi(2h + 4D)]^2 u^2(e_t)} = 0.04 \times 10^{-6} \text{ m}^2;$$

$$\nu_{e, \text{eff}} = \frac{u_c^4(e_t)}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4(e_t)}{\nu_i}} = 17.4$$

则 S_t 的合成不确定度 $u(S_t)$:

$$u_c(S_t) = \sqrt{u_D^2(S_t) + u_h^2(S_t) + u_{e_t}^2(S_t)} = 0.59 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\nu_{S, \text{eff}} = \frac{u_c^4(S_t)}{\sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4(S_t)}{\nu_i}} = 37.5$$

3.1.7 推进剂试样的定容燃烧温度的不确定度及自由度

T_v 与 p_t 是非线性函数, 因为 T_v 远大于 $u(T_v)$, 经化简得:

$$u(T_v) = \sqrt{(11.6 - 2 \times 0.3 \times 30.31)^2 \times 0.0014^2} = 9.2 \times 10^{-3} \text{ K}$$

$u(T_v)$ 的相对标准不确定度为 $10\%^{[5]}$, 可以求得自由度为:

$$\nu_{T_v} = \frac{1}{2 \left[\frac{u[u(T_v)]}{u(T_v)} \right]^2} = \frac{1}{2 \times (10\%)^2} = 50$$

3.1.8 燃烧器的自由容积的不确定度及自由度

V_0 为燃烧器的自由容积, 采用无水乙醇对其进行标定。在相同的条件下, 自由容积重复测量 5 次的值:

因而重复性引入的不确定度, 用贝塞尔公式计算得到 A 类标准不确定度为:

$$u(V_0) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V_{0i} - V_0)^2} = 0.1022 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{自由度为: } \nu_{V_0} = n - 1 = 4$$

在简化模型中认为 $V_0 \approx V_t$, 则其标准不确定度为:

$$u(V_t) \approx u(V_0) = 0.1022 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{自由度为: } \nu_{V_t} = n - 1 = 4$$

3.1.9 单位质量摩尔数的不确定度及自由度

k_p 与 p_t 是非线性函数, 可得:

$$u^2(k_p) = (-0.06 + 2 \times 0.002 p_t)^2 u^2(p_t) + \frac{1}{2} (2 \times 0.002)^2 u^4(p_t)$$

因为 p_t 远大于 $u(p_t)$, 因此近似得到

$$u^2(k_p) = (-0.06 + 2 \times 0.002 p_t)^2 u^2(p_t)$$

则, k_p 的不确定度为

$$u(k_p) = (-0.06 + 2 \times 0.02 \times p_t) u(p_t) = 0.86 \times 10^{-4} \text{ kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

估计 $u(k_p)$ 的相对标准不确定度为 50%^[5], 则

$$\nu_{k_p} = \frac{1}{2 \left[\frac{u[u(k_p)]}{u(k_p)} \right]^2} = \frac{1}{2 \times (50\%)^2} = 2$$

3.2 输入量的灵敏系数和标准不确定度分量

各参数灵敏系数和标准不确定度分别如下:

$\overline{C_{v1}}$ 对应的灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial \overline{C_{v1}}} = -\frac{20.5 p_t^{0.45} p_t S_t}{k_p R} - \frac{dp_t}{dt} V_t \overline{C_{v1}} \approx 0.0026 \text{ (kg} \cdot \text{K)} \cdot \text{s}^{-1}$$

$\overline{C_{v2}}$ 对应的灵敏系数:

$$c_2 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial \overline{C_{v2}}} = 20.5 p_t^{0.45} T_v \rho_p S_t \approx 13.47 \text{ (kg} \cdot \text{K)} \cdot \text{s}^{-1}$$

p_t 对应的灵敏系数:

$$c_3 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial p_t} = 9.2 p_t^{-0.55} \overline{C_{v2}} T_v \rho_p S_t - \frac{29.7 p_t^{0.45} S_t \overline{C_{v1}}}{k_p R} -$$

$$\frac{d^2 p_t}{dt^2} V_t \overline{C_{v1}} \approx 4.36 \text{ kJ} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

ρ_p 对应的灵敏系数:

$$c_4 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial \rho_p} = 20.5 p_t^{0.45} \overline{C_{v2}} T_v S_t \approx 202.90 \text{ (kJ} \cdot \text{m}^3) \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

S_t 对应的灵敏系数:

$$c_5 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial S_t} \approx 1089649.803 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

T_v 对应的灵敏系数:

$$c_6 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial T_v} = 20.5 p_t^{0.45} \overline{C_{v2}} \rho_p S_t \approx 0.092 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

V_t 对应的灵敏系数:

$$c_7 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial V_t} = -\frac{dp_t}{dt} \overline{C_{v1}}}{8.314 k_p} \approx 0.069 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$

k_p 对应的灵敏系数:

$$c_8 = \frac{\partial \frac{dQ_{et}}{dt}}{\partial k_p} = \frac{20.5 p_t^{0.45} p_t S_t \overline{C_{v1}}}{8.314 k_p^2} + \frac{dp_t}{dt} V_t \overline{C_{v1}}}{8.314 k_p^2} \approx 0.0005 \text{ (kJ} \cdot \text{mg)} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

各标准不确定分量 $u_i(y)$ 为:

$$u_1(y) = c_1 u(\overline{C_{v1}}) = 15.08 \times 10^{-6} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_2(y) = c_2 u(\overline{C_{v2}}) = 78.13 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_3(y) = c_3 u(p_t) = 6.10 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_4(y) = c_4 u(\rho_p) = 588 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_5(y) = c_5 u(S_t) = 642.89 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_6(y) = c_6 u(T_v) = 0.85 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_7(y) = c_7 u(V_t) = 0.007 \times 10^{-6} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_8(y) = c_8 u(k_p) = 0.04 \times 10^{-6} \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

从不确定度分量的大小可以看出, 推进剂试样燃面、燃气定容比热、燃气压强、燃气温度是影响热损失率不确定度的主要因素。

3.3 热损失率不确定度分析

把已知数据代入式(10)中, 可计算出热损失:

$$\frac{dQ_{et}}{dt} \approx 108.57 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

热损失率合成标准不确定度为:

$$u_c\left(\frac{dQ_{et}}{dt}\right) = \sqrt{c_1^2 u^2(\overline{C_{v1}}) + c_2^2 u^2(\overline{C_{v2}}) + \dots + c_8^2 u^2(k_p)}$$

$$\approx 0.62 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

$u_c(\frac{dQ_{et}}{dt})$ 的有效自由度为:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^8 \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^8 \frac{c_i^4 u_i^4(x)}{\nu_i}} = 18.6$$

在测量系统中,取置信概率为 95%,即包含因子 $k=2$,则总的不确定度为:

$$U_{95} = k u_c(\frac{dQ_{et}}{dt}) = 1.24 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1} (k=2)$$

扩展不确定度报告表示形式为:

$$\frac{dQ_{et}}{dt} = 108.57 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$U_{95} = 1.24 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$v_{\text{eff}} = 18.6$$

通过计算各个不确定度分量的大小可以得到,推进剂试样燃面、推进剂密度、燃气定容比热、燃气压强和燃气温度是影响热损失率不确定度的最主要因素,其中推进剂的燃面 S_f 对热损失率的影响最大。

推进剂密度 ρ_p 与温度在 T_0 到 T_v 范围内燃烧产物的定容比热的平均值 $\overline{C_{v2}}$ 为 B 类标准不确定度, B 类标准不确定度的信息来自于以往的检测数据,故 ρ_p 与 $\overline{C_{v2}}$ 的不确定度很难改变。在对质量相同、燃面变化规律不同试样的定容燃烧器法对比实验^[5]中,实验采用同种推进剂的圆柱体试样,试样的直径大于厚度,则推进剂试样燃烧的时间就等于试样厚度燃烧的时间。试样具体设计尺寸见表 1。

表 1 试样型面尺寸

Table 1 Specimen size

No.	M/g	D/mm	h/mm
1	6	18	13.4
2	6	20	10.8
3	6	22	9.0

Note: M is mass, D is diameter, h is thickness.

将各推进剂试样放置于定容燃烧器内点火燃烧,测试燃烧时间和最高压强,热损失量和热损失率计算结果见表 2。

在质量相同的情况下,燃面随时间变化规律的不同决定了试样的燃烧时间、升压速率和热释放率的不同。燃面越大,燃烧时间越短,升压速率越快,热释放率越大,热损失越小,热损失率越小;同时燃烧时间越短,燃气与定容燃烧器壁面热传导的时间越短,实验中

定容燃烧器内燃气的理论温度值与实测温度值的差值越小,热损失就减少。因此需加强对燃面 S_f 的研究,通过改进燃面结构减小燃面 S_f 对热损失率的影响将是后续研究的重点。

表 2 参数的计算结果

Table 2 Calculated results of the parameters

No.	t/s	$\Delta Q/\text{kJ}$	$\eta/\%$
1	0.39	16.39	42.0
2	0.36	14.91	41.4
3	0.33	11.84	35.9

Note: t is combustion time, ΔQ is heat loss, η is heat loss rate.

4 结论

(1) 推导了热损失率不确定度方程,获得影响热损失率 $\frac{dQ_{et}}{dt}$ 具体因素。

(2) 根据不确定度原理推导出定容比热值,测量压强,试样密度,燃面,试样定容燃烧温度,燃烧器容积和推进剂单位质量摩尔数的标准不确定度。

(3) 对各参数标准不确定度分量及热损失率合成标准不确定度进行了详细计算,认为推进剂试样燃面、推进剂密度、燃气定容比热、燃气压强和燃气温度对损失率不确定度的影响较大,是影响不确定度的主要因素。

(4) 燃面 S_f 是影响热损失率的最重要的因素。对于质量相同、燃面不同的推进剂试样,燃面越大,燃烧时间越短,热损失率越小。通过改进燃面较小其对热损失率的影响是后续研究重点。

参考文献:

[1] Glick R, Haun D. An improved closed burner method [R]. AIAA-90-1970.

[2] 刘宏成,李葆萱,李逢春. 定容燃烧器法散热损失影响因素实验研究[J]. 弹箭与制导学报,2006: 866-868.
LIU Hong-cheng, LI Bao-xuan, LI Feng-chun. Experimental study of the influence of factors on closed burner heat loss [J]. *Dan-jian yuzhidaoxuebao*, 2006: 866-868.

[3] 胡松启,李葆萱,李逢春,等. 密闭燃烧器法测高压下推进剂燃速研究[J]. 含能材料,2005,13(3): 190-191.
HU Song-qi, LI Bao-xuan, LI Feng-chun, et al. Study on burning rate measurement of propellant at high pressure by closed burner method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 190-191.

[4] HU Song-qi, LI Bao-xuan, LIU Hong-cheng, et al. The influence of some factors on constant volume burner [C] // Proceeding of the 2009 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Kunming, China. 2009: 411-414.

[5] Price C, Juhasz. A versatile user-oriented closed bomb date re-

- duction program(CBRED)[R]. BRL Report, No. 2018, 1977.
- [6] 徐秋丽. 定容燃烧器法热损失研究[D]. 西北工业大学硕士论文, 2011: 43-61.
- XU Qiu-li. Study on heat loss of constant volume burner method [D]. Master's Thesis of Northwestern Polytechnical University, 2011: 43-61.
- [7] 倪育才. 使用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社.
- [8] 庞维强, 胥会祥, 王国强, 等. 含镁铝富燃料推进剂低压燃速规律研究[J]. 理论与实践, 2008, 28(6): 16-19.
- PANG Wei-Qiang, XU Hui-Xiang, WANG Guo-qiang, et al. Study of burning rate in low pressure Mg/Al fuel-rich propellant [J]. *Theory and Practice*, 2008, 28(6): 16-19.
- [9] 李纲, 何国强, 孙振华, 等. 固冲发动机补燃室二次燃烧实验研究[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(5): 400-403.
- LI Gang, HE Guo-qiang, SUN Zhen-hua, et al. Experimental investigation on secondary combustion in solid rocket ramjet [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2007, 30(5): 400-403.

Uncertainty Analysis of Heat Loss Rate by Constant Volume Burner Method

HU Song-qi¹, LIU Kai¹, WANG Peng-fei¹, XU Qiu-li¹, ZHOU Yan-xing²

(1. National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-structure, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Military Representative Office of PLA Second Artillery Forces Stationed in Hexi Chemical and Machinery Company, Huhehot 010010, China)

Abstract: The constant volume burner is a kind of test method to measure the burning rate of solid propellant under high pressure. Heat loss of the constant volume burner is one of the most important factors affecting the test accuracy of burning rate. Heat loss rate equation was derived to study the various factors on the rate of heat loss. The assessment method of the uncertainty of heat loss rate has been established, and the uncertainty also has been obtained. According to the study, it was known that the sample propellant burning surface, the gas constant volume specific heat, gas pressure, gas temperature are main factors of the uncertainty of the heat loss rate, and burning surface is the most important factor. The precision of propellant sample size should be increased to reduce the deviation of propellant burning surface of the sample.

Key words: physical chemistry; burning rate at high pressure; constant volume burner method; heat loss rate; measurement uncertainty; burning surface

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.021