

文章编号: 1006-9941(2012)03-0324-05

助燃条件下硼粉燃烧热测试不确定度分析

张勤林¹, 楼旭俊¹, 余天兴¹, 赵新鹏², 王英红²

(1. 中国人民解放军海军 91515 部队, 海南 三亚 572016; 2. 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)

摘要: 为提高硼粉燃烧热值测试的准确性, 确定助燃条件下影响硼粉燃烧热值测量不确定度的主要因素, 依据硼粉的点火、燃烧特性以及助燃条件下硼粉热值测试原理, 采用直接评定法分析了影响硼粉燃烧热值测试的不确定度, 进行了硼粉的燃烧热值测试。计算了各因素对硼粉燃烧热测试值不确定度的影响程度。结果表明: 影响硼粉燃烧热测试不确定度的主要因素是量热体系的温升、助燃剂的热值、参与燃烧的硼粉的质量, 降低系统热容量的不确定度可提高硼粉燃烧热值测量的准确度。助燃条件下测试硼粉燃烧热值的相对不确定度仅为 0.95%。

关键词: 物理化学; 硼粉; 燃烧热; 助燃剂; 不确定度

中图分类号: TJ55; V512; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.03.013

1 前言

硼因其高的体积热值和质量热值成为固体冲压火箭发动机高能富燃料推进剂的首选金属添加剂^[1]。硼粉的实测燃烧热值表征了硼粉的能量性能, 通过对实测燃烧热值与理论燃烧热值的比较, 可以表征硼粉试样中单质硼的纯度。硼粉的能量性能和单质硼的纯度都是含硼富燃料推进剂配方设计时必须考虑的关键参数, 也是对不同厂家、不同批次生产的硼粉进行质量评估的重要因素。因此, 准确测试硼粉的燃烧热值对于含硼富燃料推进剂的配方设计和能量预估具有重要意义。

普通燃料燃烧热值测试的经典方法——氧弹量热法, 其原理是基于燃料试样的完全燃烧和充分放热。硼因其特殊的物理化学性质(高熔点、高沸点、高燃点、低燃烧效率等), 在燃烧热测试时不能达到完全燃烧和充分放热, 实测燃烧热值远低于其理论燃烧热值。目前国内均无关于硼粉燃烧热值测试的标准装置的相关报道。随着含硼富燃料推进剂应用性能研究的深入开展, 胥会祥等^[2]对含硼富燃料推进剂的燃烧热进行了测试, 尽管非硼成分对硼粉起到了一定的助燃作用, 硼粉的燃烧效率仍然较低, 保守估算硼粉燃烧效率只有 84%; 高东磊等^[3]用氧弹量热计对不同包覆及团聚硼颗粒的燃

烧热进行了测试, 但结果与理论燃烧热值相差较大, 低于 15%~48%; 潘匡志等^[1]通过添加助燃推进剂提高氧弹中的环境温度, 使测得 90% 总硼含量硼粉的热值由 31 MJ·kg⁻¹ 提高到 41 MJ·kg⁻¹, 减小了测试误差。但与理论值仍有差距, 数据的重现性也不够好, 且没有对测量法的准确度做出评判。

笔者所在实验室^[4]在经典燃烧热测试方法的基础上, 采用助燃剂助燃硼粉, 为硼粉在氧弹内点火和充分燃烧提供足够高的温度和足够长的高温持续时间, 提高了硼粉在氧弹内的燃烧效率, 使得硼粉的实测燃烧热值达到了 50 MJ·kg⁻¹。

但在实验中发现, 助燃条件下的氧弹式量热法测试硼粉燃烧热时, 不确定因素增多, 测试结果的重现性不高。为此, 本文依据硼粉的点火和燃烧特性, 结合燃烧热测试的实验原理, 按 JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》技术规范的要求, 采用直接评定法分析了硼粉燃烧热值测试过程中的不确定度, 为提高助燃条件下硼粉燃烧热测试的准确性和重现性提供依据。

2 研究方法

(1) 评定依据: JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》。

(2) 测量方法: GJB770B-2005 方法 701.2《爆热和燃烧热恒温法》、GB/T213-2003《煤的发热量测试方法》, 并结合文献[5]中助燃条件下硼粉燃烧热值测试方法。

收稿日期: 2011-11-07; 修回日期: 2011-12-29

基金项目: 武器装备预研基金资助(No. 9140C520203119140)

作者简介: 张勤林(1981-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事硼粉及含硼推进剂的燃烧研究。e-mail: blackmeet@163.com

(3) 标定标准: GR3500 型氧弹式量热计检验合格证明书。

(4) 被测对象: 新打开包装的由丹东化工厂生产的 95 级无定形硼粉。

(5) 环境条件: 根据 GR3500 型氧弹量热计使用说明和 GJB770B-2005 方法 701.2 中的规定, 在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $<80\%$ 的单独实验室中进行。

(6) 测量过程^[4]: 将硼粉和助燃推进剂按照一定的比例混合制作成具有一定几何形状的试样药条, 将其置于 GR3500 氧弹式量热计内筒的氧弹中, 以电点火丝引燃, 其燃烧放出的热量使得以内筒为主体的量热系统具有一定的温升, 用温度传感器测试并记录这种温升的变化数值, 再按照测试原理编译的程序计算出硼粉试样的燃烧热值。

3 建立数学模型

依据 GJB770B-2005 方法 701.2, 并参考文献[1,4], 得知助燃条件下测试硼粉燃烧热值的基本原理为: 将含有一定比例硼粉的待测试样药条在充有过量氧气的氧弹内用电点火丝引燃, 试样药条燃烧放出的热量使得热容量已知的量热系统产生温升, 根据能量守恒原理, 扣除点火丝和助燃剂提供的热量, 其余使系统产生升温的热量均由硼粉燃烧所提供, 从而根据能量守恒原理计算出硼粉的燃烧热值。其原理如公式(1):

$$Q_1 = \frac{E \times \Delta T - q_1 - m_2 Q_2}{m_1} \quad (1)$$

其中, Q_1 表示硼粉的燃烧热值, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$; Q_2 表示助燃剂的燃烧热值, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$; m_1 表示硼粉的质量, g ; m_2 表示助燃剂的质量, g ; ΔT 表示量热系统温度的升高量, $^\circ\text{C}$; E 表示量热系统的热容量, $\text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; q_1 表示点火系统的放热量, J 。

硼粉燃烧热值测试前, 采用行业爆热标准物质 90 方片药标定出量热系统的热容量 E 。原理为: 将一定质量的 90 方片药在氧弹中用电点火丝引燃, 燃烧放出的热量使得量热系统产生温升, 根据能量守恒定律, 90 方片药燃烧放出的热量和点火系统放出的热量就等于量热系统产生温升所需的总热量。计算系统热容量的原理公式:

$$E = \frac{Q_c m_c + q_1}{\Delta T} \quad (2)$$

式中, Q_c 表示标准物质 90 方片药的燃烧热值, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$; m_c 表示标准物质 90 方片药的质量, g ; q_1 表示点火丝和棉线的发热量, J ; ΔT 表示量热系统的温升值, $^\circ\text{C}$ 。

采用直接评定法^[6], 根据测试方法原理所建立的输出量与输入量之间的函数关系即不确定度评定的数学模型即为式(1)、式(2)。

4 硼粉热值测量不确定度评定

4.1 测量不确定度来源分析

根据式(1)分析, 硼粉燃烧热值测试结果的不确定度来源主要有: ① 量热系统热容量引入的不确定度; ② 内筒温升测量偏差引入的不确定度; ③ 点火系统放热量引入的不确定度; ④ 助燃剂称量引入的不确定度; ⑤ 助燃剂热值引入的不确定度; ⑥ 硼粉质量称量引入的不确定度。

4.2 系统热容量引入的不确定度分量

① 本实验采用标称热值为 $(4885 \pm 15) \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 90 方片药进行系统热容的标定。根据式(2), 受各输入参数不确定度影响, 根据不确定度传播定律^[7]系统热容量的合并标准不确定 $u_1(E)$ 为:

$$u_1^2(E) = c_{Q_c}^2 \times u^2(Q_c) + c_{m_c}^2 \times u^2(m_c) + c_{q_1}^2 \times u^2(q_1) + c_{\Delta T}^2 \times u^2(\Delta T) \quad (3)$$

其中, c_{Q_c} 表示所用标准物质 90 方片药热值不确定度的影响因子, $u(Q_c)$ 为标准物质 90 方片药热值不确定度, c_{m_c} 表示所用标准物质 90 方片药质量不确定度的影响因子, $u(m_c)$ 为标准物质 90 方片药质量不确定度, $c(q_1)$ 表示点火丝热值不确定度影响因子, $u(q_1)$ 为点火丝热值不确定度, $c(\Delta T)$ 表示量热系统温升不确定度的影响因子, $u(\Delta T)$ 为量热系统温升不确定度。

式(3)中传播因子可根据式(2)求偏导数得到, 结果如下:

$$c_{Q_c} = \frac{\partial E}{\partial Q_c} = \frac{m_c}{\Delta T}, \quad c_{m_c} = \frac{\partial E}{\partial m_c} = \frac{Q_c}{\Delta T},$$

$$c_{q_1} = \frac{\partial E}{\partial q_1} = \frac{1}{\Delta T}, \quad c_{\Delta T} = \frac{\partial E}{\partial \Delta T} = -\frac{Q_c m_c + q_1}{\Delta T^2}$$

当 $m_c = 5.03770 \text{g}$, $q_1 = (144.9 \pm 2.8) \text{J}$, $E = 15294.45 \text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $\Delta T = 1.6185^\circ\text{C}$, $Q_c = 4885 \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 代入式(3)计算得: $u_1(E) = 48.04 \text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

② 内筒水质量偏差引入的 B 类不确定度分量 $u_2(E)$ 。

由于内筒水的称量是采用分辨力为 1g 的电子数字显示天平, 故其不确定度分量为:

$$u_2(E) = C \cdot \Delta m_{\text{水}} = 4.2 \times 1 = 4.2 \text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

其中, C 为水的比热, $\Delta m_{\text{水}}$ 为内筒水量误差。

③ 热容量测量结果的重复性引入的不确定度分量 $u_3(E)$ 。

表 1 中列出了相同条件下, 连续 5 次系统热容标定的结果数据。在相同实验条件下测量结果的重复性引入的不确定度, 按 A 类不确定度方法评估, 其值为 $u_3(E)$ 。通过贝塞尔法求出实验标准差 S , 即 $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$, 测量结果取 5 次实验观测值的平均值 \bar{x} 时, A 类标准不确定度是 $u(\bar{x}) = S/\sqrt{n}$ 。

表 1 系统热容量标定数据

Table 1 Calibration data of the calorific capacity of the calorimetric system

					$J \cdot ^\circ C^{-1}$	
1	2	3	4	5	sample average \bar{x}	standard deviation S
15384	15495	15568	15507	15485	15488	66.47

由表 1 可得, $u(\bar{x}) = 29.7$, 即 $u_3(E) = 29.7 J \cdot ^\circ C^{-1}$ 。

由于产生不确定度 $u_1(E)$, $u_2(E)$, $u_3(E)$ 的各因素彼此独立也不相关, 故系统的热容 E 的合并不确定度 $u(E) = \sqrt{u_1^2(E) + u_2^2(E) + u_3^2(E)}$ 。代入不确定度 $u_1(E)$, $u_2(E)$, $u_3(E)$ 的数值计算得: $u(E) = 56.6 J \cdot ^\circ C^{-1}$ 。

4.3 内筒温度测量偏差引入的不确定度分量 $u(\Delta T)$

本实验采用的测温系统为南京桑力电子设备厂生产的 SWC-IIID 型精密数字温度温差仪, 其配套的是铂铑合金热电偶, 根据其技术鉴定证书得知内筒温升测量的允许偏差为 $\pm 0.002 ^\circ C$, 符合均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 其 B 类不确定度为 $u(\Delta T) = 0.003/\sqrt{3} = 0.0012 ^\circ C$ 。

4.4 点火丝热值偏差引入的不确定度分量 $u(q_1)$

本实验采用的点火丝是镍镉合金点火丝, 根据其技术说明书得知点火丝热值误差范围为 $(144.9 \pm 2.8) J$, 符合均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 其 B 类不确定度为 $u(q_1) = 2.8/\sqrt{3} = 1.62 J$ 。

4.5 助燃剂称量引入的不确定度分量 $u(m_2)$

助燃剂质量的称量采用上海恒平科学仪器有限公司的高精度数显式 FA1004 型电子分析天平, 根据其校准证书得知称量允许误差为 $\pm 0.1 mg$, 符合均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 其 B 类不确定度为 $u(m_2) = 0.1/\sqrt{3} = 0.06 mg$ 。

4.6 助燃剂热值引入的不确定度分量 $u(Q_2)$

助燃剂选用某火箭推进剂测试标准药, 该药是热值稳定且接近零氧平衡的某双基固体推进剂, 易点火, 燃烧时几乎不消耗氧弹内氧气, 燃烧后产物为气态, 成本低廉。其标称热值 $Q_2 = (11220 \pm 60.63) J \cdot g^{-1}$, 且经过实验验证其可信度达到 99%, 故其 B 类不确定度为 $u(Q_2) = 60.63/\sqrt{3} = 35 J \cdot g^{-1}$ 。

4.7 硼粉称量引入的不确定度分量 $u(m_1)$

硼粉的称量仍然采用 FA1004 型电子分析天平, 其称量允许误差为 $\pm 0.1 mg$, 符合均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 其 B 类不确定度为 $u(m_1) = 0.10/\sqrt{3} = 0.06 mg$ 。

4.8 硼粉燃烧热值测试结果的不确定度

根据式(1), 硼粉的热值 Q_1 作为被测量值, 其不确定度取决于热容量 E 、系统的温升 ΔT 、点火丝和棉线的发热量 q_1 、助燃剂的热值 Q_2 、硼粉的质量 m_1 和助燃剂质量 m_2 的不确定度。 ΔT 与 m_1 , m_2 , Q_2 直接线性相关, 故有线性相关系数^[3]: $\rho_{\Delta T, m_1} = 1, \rho_{\Delta T, m_2} = 1, \rho_{\Delta T, Q_2} = 1$ 。

按照间接测量的标准不确定度传播定律^[6], 硼粉燃烧热测试值不确定度的平方, $u^2(Q_1)$, 为各输入量标准不确定度的平方的合并不确定度。即如式(4)所示:

$$u^2(Q_1) = c_E^2 \cdot u^2(E) + c_{\Delta T}^2 \cdot u^2(\Delta T) + c_{q_1}^2 \cdot u^2(q_1) + c_{m_2}^2 \cdot u^2(m_2) + c_{Q_2}^2 \cdot u^2(Q_2) + c_{m_1}^2 \cdot u^2(m_1) + 2(c_{\Delta T} \cdot c_{m_1} \cdot u(\Delta T) \cdot u(m_1) + c_{m_2} \cdot c_{\Delta T} \cdot u(\Delta T) + c_{Q_2} \cdot c_{\Delta T} \cdot u(Q_2) \cdot u(\Delta T)) \quad (4)$$

式(4)中传播因子可根据式(1)求偏导数得到, 结果如下:

$$c_E = \frac{\partial Q_1}{\partial E} = \frac{\Delta T}{m_1}, \quad c_{\Delta T} = \frac{\partial Q_1}{\partial \Delta T} = \frac{E}{m_1},$$

$$c_{q_1} = \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} = -\frac{1}{m_1}, \quad c_{m_2} = \frac{\partial Q_1}{\partial m_2} = -\frac{Q_2}{m_1},$$

$$c_{Q_2} = \frac{\partial Q_1}{\partial Q_2} = -\frac{m_2}{m_1},$$

$$c_{m_1} = \frac{\partial Q_1}{\partial m_1} = -\frac{E \times \Delta T - q_1 - m_2 Q_2}{m_1^2}$$

硼粉热值实验的记录参数为: 助燃剂热值 $Q_2 = 11222 J \cdot g^{-1}$, 助燃剂质量 $m_2 = 2.0762 g$, 系统热容量 $E = 15488 J \cdot K^{-1}$, 硼粉的质量 $m_1 = 0.3469 g$, 系统的温升值 $\Delta T = 2.65 ^\circ C$, 点火丝及棉线的总放热量 $q_1 = 144.9 J$ 。

将其数据代入公式(1), 可得: $Q_1 = 50732.3 J \cdot g^{-1}$ 。计算硼粉热值测试不确定度的各分量^[8]如下:

(1) 系统热容量 E 引起的不确定度分量为

$$u_{E, rel} = \frac{|c_E| \cdot u(E)}{Q_1} \times 100\% = 0.852\%;$$

(2) 助燃剂热值 Q_2 引起的不确定度分量为

$$u_{Q_2, rel} = \frac{|c_{Q_2}| \cdot u(Q_2)}{Q_1} \times 100\% = 0.413\%;$$

(3) 系统的温升 ΔT 引起的不确定度分量为

$$u_{\Delta T, \text{rel}} = \frac{|c_{\Delta T}| \cdot u(\Delta T)}{Q_1} \times 100\% = 0.106\% ;$$

(4) 点火丝和棉线的总放热量 q_1 引起的不确定度分量为

$$u_{q_1, \text{rel}} = \frac{|c_{q_1}| \cdot u(q_1)}{Q_1} \times 100\% = 0.009\% ;$$

(5) 硼粉的质量 m_1 引起的不确定度分量为

$$u_{m_1, \text{rel}} = \frac{|c_{m_1}| \cdot u(m_1)}{Q_1} \times 100\% = 0.063\% ;$$

(6) 助燃剂质量 m_2 引起的不确定度分量为

$$u_{m_2, \text{rel}} = \frac{|c_{m_2}| \cdot u(m_2)}{Q_1} \times 100\% = 0.004\% ;$$

(7) 系统的温升 ΔT 和硼粉的质量 m_1 共同引起的不确定度分量为

$$u_{\Delta T, m_1, \text{rel}} = \frac{2|c_{\Delta T}| \cdot |c_{m_1}| \cdot u(\Delta T) \cdot u(m_1)}{Q_1} \times 100\% = 1.13\% ;$$

(8) 系统的温升 ΔT 和助燃剂的热值 Q_2 共同引起的不确定度分量为

$$u_{\Delta T, Q_2, \text{rel}} = \frac{2|c_{\Delta T}| \cdot |c_{Q_2}| \cdot u(\Delta T) \cdot u(Q_2)}{Q_1} \times 100\% = 7.39\% ;$$

(9) 系统的温升 ΔT 和助燃剂质量 m_2 共同引起的不确定度分量为

$$u_{\Delta T, m_2, \text{rel}} = \frac{2|c_{\Delta T}| \cdot |c_{m_2}| \cdot u(\Delta T) \cdot u(m_2)}{Q_1} \times 100\% = 0.068\% .$$

将各记录数据代入式(4)计算可得: $u(Q_1) = 483 \text{ J}$ 。

其相对不确定度 $u_{\text{rel}}(Q_1) = \frac{483}{50732.3} \times 100\% = 0.95\%$,

取包含因子 $k = 2$, 则有相对扩展不确定度: $U = k \cdot u_{\text{rel}}(Q_1) = 1.9\%$ 。

以上分析计算的各因素及其硼粉燃烧热测试值的不确定度数据见表 2。

表 2 各因素及其测试结果的不确定度

Table 2 The uncertain factors and their uncertainty degree of measurement results

uncertain factor	uncertainty degree $u(x)$	relative uncertainty degree $u_{\text{rel}}(x) / \%$
$E / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	56.6	0.852
$\Delta T / \text{g}^{-1}$	0.0012	0.106
q_1 / J	1.62	0.009
m_2 / mg	0.06	0.004
$Q_2 / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	35	0.413
m_1 / mg	0.06	0.063
$\Delta T - m_1$	-	1.13
$\Delta T - Q_2$	-	7.39
$\Delta T - m_2$	-	0.068
Q_1 / J	483	0.95

5 分析与结论

(1) 由表 2 可以看出, 在助燃条件下测试硼粉燃烧热值, 硼粉燃烧热测试结果的绝对不确定度数值较大(483 J), 但相对不确定度却比较小(0.95%)。

(2) 从表 2 还可以看出, 系统的温升 ΔT 和助燃剂的热值 Q_2 共同引起的不确定度分量对硼粉燃烧热测试值的不确定度影响最大, 相对不确定度高达 7.39%; 系统的温升 ΔT 和硼粉的质量 m_1 共同引起的不确定度分量对硼粉燃烧热测试值的不确定度影响次之, 相对不确定度也达到 1.13%。可见在助燃条件下影响硼粉燃烧热测试值准确性的主要因素是系统的温升 ΔT 、助燃剂的热值 Q_2 、硼粉的质量 m_1 三个因素。

(3) 多次实验经验可知量热系统的温升 ΔT 值调整在 2 ~ 3 °C 范围内, 测试结果的准确性最高; 助燃剂热值 Q_2 的稳定性是对硼粉燃烧热值测试结果影响较大但目前还有待解决的一个难题; 尽管助燃条件下硼粉的不完全燃烧问题基本解决, 但是存在因为实验操作过程中的偶然因素导致较小程度的不完全燃烧, 从而影响到实际参与燃烧放热的硼粉的质量 m_1 的不确定度, 故助燃条件下测试硼粉燃烧热值的方法在组织燃烧、实验操作上还有待进一步优化。

(4) 从表 2 中还可以看出, 系统热容 E 的不确定度也对硼粉热值测试结果的不确定度影响较大, 相对不确定度达到了 0.852%。可见通过提高测量手段的精确度和改进测量方法来降低系统热容的不确定度是提高硼粉热值测量精度的有效手段。

由以上测试结果可见, 在助燃剂条件下测量硼粉的燃烧热是一种有效的办法, 其在含硼推进剂研制领域以及高纯度硼粉质量水平评价中有较高的工程使用价值。

参考文献:

- [1] 潘匡志, 王英红, 陈超, 等. 硼粉燃烧热的测量[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1589-1592.
PAN Kuang-zhi, WANG Ying-hong, CHEN Chao, et al. Measurement of combustion heat of boron[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(5): 1589-1592.
- [2] 胥会祥, 赵凤起. 高纯硼粉的特性及其在富燃料推进剂中的应用研究[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(4): 368-373.
XU Hui-xiang, ZHAO Feng-qi. Characteristics of high purity boron powder and its application in boron-based fuel-rich propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(4): 368-373.
- [3] 高东磊, 张炜, 朱慧, 等. 包覆及团聚对硼燃烧的影响[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 378-381.
GAO Dong-lei, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. Effect of coating and agglomerating on combustion of boron[J]. *Chinese Journal*

- of *Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*), 2007, 15 (4): 378 - 381.
- [4] 张勤林, 王英红, 李葆萱, 等. 硼提高硼粉在氧弹中燃烧效率的研究[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(2): 220 - 224.
ZHANG Qin-lin, WANG Ying-hong, LI Bao-xuan, et al. Study on improving combustion efficiency of boron powders in oxygen bomb[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2011, 34 (2): 220 - 224.
- [5] 王英红, 张勤林, 李葆萱. 硼粉燃烧热值的测量方法: 中国, 201010535657. X[P]. 2011. 04. 06.
WANG Ying-hong, ZHANG Qin-lin, LI Bao-xuan. Measurement method of boron powders' combustion heat value: China, 201010535657. X[P]. 2011. 04. 06.
- [6] 王承忠. 测量不确定度直接评定法和综合评定法的几个典型实例[J]. 理化检验-物理分册, 2006, 42(5): 210 - 215.
WANG Cheng-zhong. The direct assessment method of measurement uncertainty and comprehensive assessment method of a few typical examples[J]. *PTCA (PART: A PHYS. TEST)*, 2006, 42 (5): 210 - 215.
- [7] 沙定国. 误差分析与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003: 137 - 139.
- [8] 孙志华, 张晓宏, 王宏, 等. 贫氧推进剂热值标准装置不确定度评定[J]. 计测技术, 2010, 30(6): 42 - 44.
SUN Zhi-hua, ZHANG Xiao-hong, WANG Hong, et al. Evaluation of uncertainty of fuel-rich propellant combustion heat standard equipment[J]. *Jicejishu*, 2010, 30 (6): 42 - 44.

Uncertainty Analysis of Combustion Heat Test for Boron Powder Under Combustion-supporting Condition

ZHANG Qin-Lin¹, LOU Xu-jun¹, YU Tian-xing¹, ZHAO Xin-peng², WANG Ying-hong²

(1. *The Navy 91515 Unit of PLA, Sanya 572016, China*; 2. *National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-Structure, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

Abstract: In order to improve the accuracy of the test for boron powders combustion heat and determine the main factors affecting the uncertainty of boron powders combustion heat test under the combustion-supporting condition, the direct assessment method was adopted to analyze the uncertainty based on boron powders ignition and combustion characteristics as well as the principle of boron powders combustion heat test under the combustion-supporting condition. The impact degree of various factors on uncertainty of boron powders combustion heat value testing were calculated. Results show that the main factors affecting the uncertainty for boron powders combustion heat test are the temperature rise of the calorimetric system, the calorific value of combustion-supporting agent, and the mass of boron powders involved in the combustion. Reducing the uncertainty of calorific capacity of the calorimetric system, can increase the accuracy of measurement for boron powders combustion heat value. The relative uncertainty of boron powders combustion heat value test using combustion-supporting agent is only 0.95%.

Key words: physical chemistry; boron powder; combustion heat; combustion-supporting agent; uncertainty

CLC number: TJ55; V512; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.03.013