

文章编号: 1006-9941(2011)01-0074-04

## 发射药的火焰燃烧温度计算与测定分析

廖静林<sup>1</sup>, 江劲勇<sup>1</sup>, 路桂娥<sup>1</sup>, 常文平<sup>1</sup>, 翟宏昌<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院军械技术研究所, 河北 石家庄 050003; 2. 75407 部队, 广东 湛江 524100)

**摘要:** 采用绝热火焰的定压近似算法, 对单基药 H100 和 H130、双基药 SF-3、改性双基药 171-25 和 GT 的火焰燃烧温度进行计算, 并采用比色红外测试仪测量发射药的实际温度。结果表明, H130、SF-3 试验结果与计算值比较吻合, 其最高燃烧温度为 2188 K 和 2230 K; 用于热源时, 双基药的性能优于单基药; 利用该比色测温仪无法获得改性双基药火焰燃烧温度的真实值。

**关键词:** 物理化学; 发射药; 比色测温; 火焰燃烧温度

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.017

### 1 引言

报废发射药是指因弹药报废或弹药型号退役清出的发射药<sup>[1]</sup>。报废发射药不同于其他的废弃物, 它仍具有燃烧和爆炸的特征, 而且大部分火炸药都具有毒性。另一方面, 各军事大国每年的发射药废弃量要达到数千吨, 为了处理这些危险的废弃物, 各国都花费了大量的人力、物力和财力<sup>[2]</sup>。因此, 如何合理处理报废发射药已成为国内外的一大重点研究课题。当今国际上对于大批量发射药惯用的处理方法是焚毁, 该法不仅造成了巨大的资源浪费和财富损失, 还对环境造成了严重的污染<sup>[3-5]</sup>。

报废发射药是具有高温燃能的特殊材料, 若是能充分利用其热能于焊接领域, 将为报废发射药的资源化利用开辟出一条新途径。本工作主要通过理论计算与实际测定, 研究了报废发射药在空气中的火焰燃烧温度最高值, 为报废发射药应用于焊接的热源利用探索提供支持。

### 2 发射药的火焰燃烧温度的近似算法

燃烧反应通常是在恒温恒压条件下进行的, 由文献<sup>[6-8]</sup>可知燃烧反应火焰最高温度的计算是近似地把燃烧反应看成定压下的绝热反应, 将绝热温度的计算值作为火焰的最高燃烧温度。

假定反应产物完成燃烧且组成已知, 由 298 K 反应焓的恒等条件及燃烧产物从绝热温度  $T_p$  冷却到 298 K 的焓变化, 可以用式(1)计算等压下燃烧产物的温度  $T_1$ <sup>[9]</sup>。

$$\Delta H_r = \sum n_i [H(T_0) - H(T_p)] = -\sum \Delta n_i H(T_p) \quad (1)$$

式中

$$\sum \Delta n_i H(T_p) = \sum n_i \xi_i (T_p - T_i) = (T_1 - 500) B_1 +$$

$$(T_1 - 700) 55.6 n_{\text{H}_2\text{O}} + (T_1 + \chi) (\xi n)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$$

$$B_1 = 61.1 n_{\text{CO}_2} + 37.7 n_{\text{CO}} + 37.1 n_{\text{N}_2} + 35.4 n_{\text{H}_2} +$$

$$39.3 n_{\text{O}_2} + 36.7 n_{\text{HCl}} + 35.5 n_{\text{HF}} + 56.9 n_{\text{MgO}}$$

$$\text{当 } 1000 < T_p < 2200 \text{ K, } \chi = -400 \text{ K, } \xi = 130 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{当 } 2000 < T_p < 6000 \text{ K, } \chi = 200 \text{ K, } \xi = 146 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$\xi$  为物质的焓与温度的关系系数。

### 3 发射药燃烧温度测量

#### 3.1 测量原理

测试装置系统主要由控制系统(测试系统主机、PC 工业控制计算机、视频摄像头)、红外测定系统(CIT 线性红外测温仪、火焰探测器)和测试平台三大部分组成。其测试原理见图 1。

比色红外测温是用两个不同波长的传感器来感应被测目标的红外信号, 并依据两路信号的比值来获得被测目标的温度值。

#### 3.2 样品准备、实验条件

样品: 单基药 H100、H130, 双基药 SF-3, 退役军工产品; 改性双基药 171-25 及 GT, 245 厂军工产品; 选取的发射药均为管状药。

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-06-15

作者简介: 廖静林(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事军用化工品安全技术研究。e-mail: sfw\_009@163.com

样品制备：取管状 SF-3 发射药按照图 2 所示方法，将 SF-3 包覆上铝粉或铜粉。

实验条件为：常温常压下的相对通风的房间；CIT-1MD 红外测温仪，三博中自；量程为 1000 ~ 3000 °C，波段 0.96 μm 及 1.55 μm，精度 1%，距离系数 250 : 1；采样时间 50 ms；试验温度：25 °C，测定发射药在空气中燃烧的温度与时间曲线；测试温度的最大值由燃烧过程结束后系统自动给出。

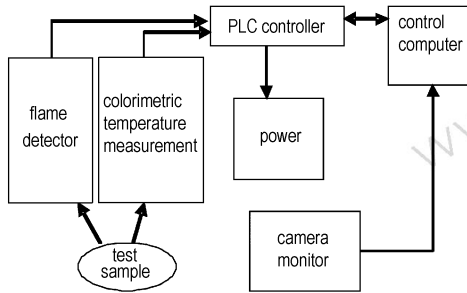


图 1 测试系统原理框架图

Fig. 1 Test system principle frame diagram

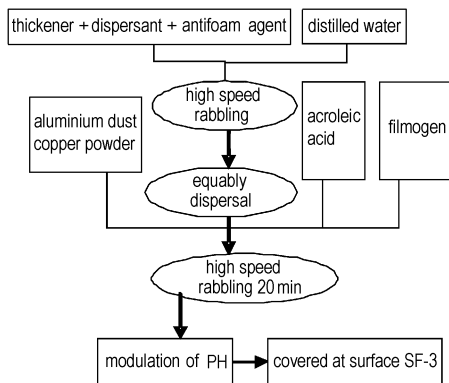


图 2 SF-3 包覆流程图

Fig. 2 Process for coating SF-3

## 4 结果与讨论

### 4.1 测试过程图谱不完整分析

整个实验过程中，红外测温图谱容易出现一些非连续测温曲线，这主要是由于测试过程中测试传感器的测试点是置于预判火焰的最大燃温区域处的；实际测试中，火焰的燃烧是不断变化的，火焰的高度极易受到自身性质及燃烧过程气体排出的影响，导致测试图谱可能出现短暂的盲点。

### 4.2 火焰燃烧温度的计算值与测试值的比较

由表 1 可知，H130、SF-3 理论温度与实测值基本相符，两者之间仍存在一定的误差，分析原因可能是发射药在空气燃烧时，一部分能量损失掉用于对环境的

加热，光路和外来光的强度也对测试结果存在干扰，仪器本身也有一定的测量误差。

表 1 发射药的最高燃烧火焰温度计算值与测试值

Table 1 The highest combustion flame temperature of propellant by calculation and measure

category	propellant	theory temperature/K	actually measure temperature/K
single-base propellant	H100	2231	1673
	H130	2266	2215
double-base propellant	SF -3	2408	2230
modified double-base propellant	171-25	3208	
	GT	3332	

### 4.3 单、双基药火焰温度的测试分析

H100、H130、SF-3 三种发射药的火焰温度曲线如图 3 所示。

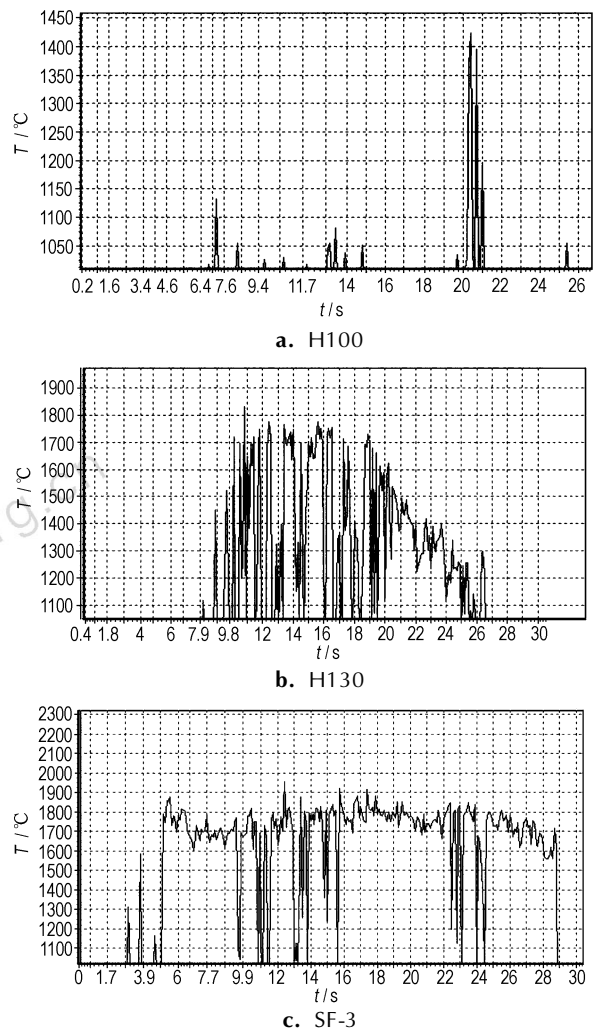


图 3 H100、H130 和 SF-3 火焰温度曲线

Fig. 3 Flame temperature curves of H100, H130 and SF-3

由图 3a 和 3b 可知, H100 与 H130 的测温曲线大不相同。H100 的测温曲线基本难以判断出它的燃烧过程, 其测试所得的火焰温度最大值也与理论计算相差较大; H130 的测温曲线能够较为显著地反映它从温度升高到火焰最高点并稳态燃烧直至燃烧趋于结束的过程, 火焰温度的最大测量值与计算接近。

在实验过程中选取的样品均为管状单孔发射药, H100 与 H130 的主要成分均为硝化纤维素, 压药工序也基本一致, 可以排除由于发射药成分及形状对于测试结果的影响。进一步分析这两种药本身的药型尺寸, H100 的外内径比、燃烧弧厚均大于 H130, 因此在同样的情况下燃烧时, H100 的燃烧面积将会大于 H130 的燃烧面积, 燃速也更快, H100 的对流传热现象将会加强, 更多的热量散失掉及用于下一部分药体的加热, 导致测得最大火焰温度降低; 同时燃速的提高也不利于发射药的充分燃烧, 燃烧过程中更容易生成非对称结构产物, 对红外产生吸收, 影响测试的精度, 导致测温系统不能准确地反映 H100 的燃烧过程。

图 3b 和 3c 的测温曲线则较为完整地反映出了整个测温过程。从温度曲线所反映的燃烧过程来看, 发射药在常温常压下, 空气中的燃烧是多阶段进行的、连续的物理化学变化的过程。图 3b 发射药 H130 在温度曲线所示范围内明显可见温度的层次递增, 升温时间较长才能达到样品的最大火焰燃烧温度区域, 且最大燃烧温度的持续时间短。图 3c 发射药 SF-3 的曲线则不像 H130 的燃烧过程那样层次分明, 样品只经过短暂的加热之后就到达完全稳定的燃烧状态, 燃烧过程中火焰均温基本保持不变, 同时 SF-3 温度曲线的平台效应显著。对比两者的测温曲线可知, 双基药燃烧能够较快地进入稳态阶段, 从燃烧到升温至火焰最高燃温用时较短; 另一方面由于双基药中各组分混合均匀度比单基药更好, 能量也优于单基药, 燃烧更为稳定。若将发射药利用于焊接的探索试验时, 双基药明显优于单基药。

#### 4.4 改性双基药火焰温度的测试及其模拟包覆药的测试分析

GT 和 171-25 的火焰温度曲线如图 4 所示。根据表 1 的数据与图 4a、图 4b 中的测温结果对比可知, CIT-1MD 红外测温仪难以正确、真实地显示 171-25 和 GT 的温度。从改性双基药品的成分进行分析, 171-25、GT 之中的主要成分均为硝化纤维素、硝化甘油, 干扰测温仪正常工作的因素可能是改性双基药中的剩余组分或比色测温仪本身引起的误差。剩余组分有中定剂、碳

黑、金属添加物、凡士林等物质; 凡士林、中定剂、碳黑等组分并不会干扰测试结果, 需分析金属添加物带来的影响。171-25、GT 与 SF-3 组分之间主要成分均为硝化纤维素、硝化甘油, 因此在 SF-3 外层包覆金属添加物来模拟金属添加物对改性药的影响过程。包覆铝粉和铜粉的 SF-3 火焰温度曲线如图 5 所示。

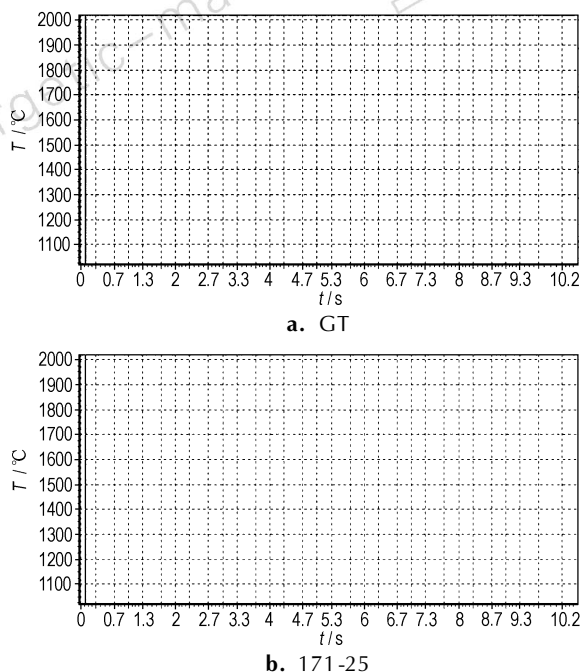


图 4 GT 和 171-25 火焰温度曲线

Fig. 4 Flame temperature curves of GT and 171-25

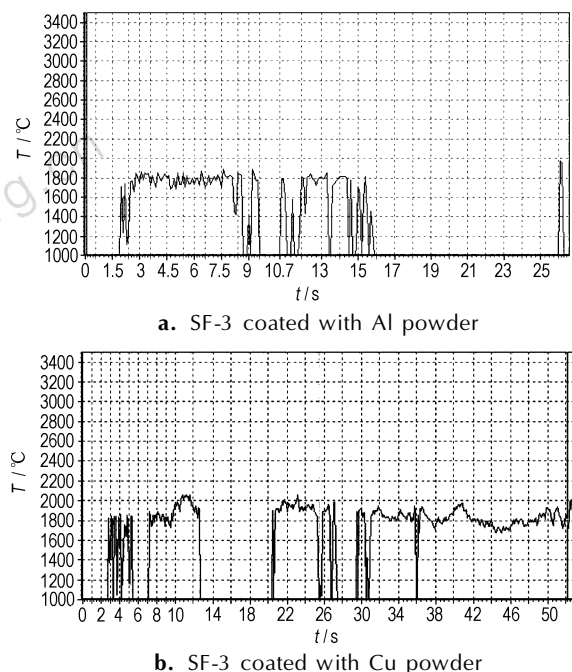


图 5 包覆铝粉和铜粉的 SF-3 温度曲线

Fig. 5 Flame temperature curves of SF-3 coated with Al and Cu powders

图5表明,少量金属添加物的存在对比色红外测温过程不产生干扰;影响测温结果的因素在于比色测温仪本身。根据文献[10],当比色测温仪随着所测物质真实温度的升高而导致测温仪选定的波长出现饱和时,测得的温度不能准确反映真实值,并且会随着测试物体真实温度的升高而降低。171-25及GT的火焰最高燃温的计算值都在3200 K以上,在发生上述选定波长饱和情况下,将影响测温结果,使所反映出的测试值急剧降低;另外,改性发射药金属添加物的加入也一定程度上影响发射药的燃烧性能,进一步影响测试结果。

## 5 结 论

(1) 采用绝热温度的近似算法,发射药H130与SF-3的火焰最高温度的计算值与红外实测值基本吻合,该方法用于计算发射药的火焰燃烧温度具有一定的高效性。

(2) 红外测温仪可以快速、准确地测量出H130和SF-3的燃烧温度最大值分别为2188 K和2230 K;测试选药时须注意样品药型尺寸的影响,选择合适的药型尺寸,利于获得较好的测试结果。

(3) 利用废弃发射药作为热源时,选择双基发射药作为热源具有更好的稳定性与价值。

(4) 比色测温法测量改性双基药的燃烧温度时,改性药自身组分并不会干扰测温工作,但该比色红外测温仪并不适用改性药的测试,仪器本身的波长饱和会影响测试结果,测试物质真实温度越高偏差值越大。

## 参考文献:

- [1] 潘仁明,王泽山,刘玉海,等. 废发射药资源化利用新途径[J]. 南京理工大学学报,1996,20(3): 205-208.  
PAN Ren-ming, WANG Ze-shan, LIU Yu-hai, et al. A study of the new method of waste gun propellants reuse-manufacturing powder explosives by use of them[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 1996, 20(3): 205-208.
- [2] 张丽华,王泽山. 过期火炸药的处理与利用研究[J]. 火炸药学报,1998(1): 47-50.  
ZHANG Li-hua, WANG Ze-shan. The state of approach to disposal and utilization of obsolete explosives and propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1998(1): 47-50.
- [3] 顾建良. 废弃含能材料的资源化利用[J]. 江苏大学学报,2004,25(2): 180-184.  
GU Jian-liang. Recycle of obsolete energetic materials as resources[J]. *Journal of Jiangsu University*, 2004, 25(2): 180-184.
- [4] 王泽山,张丽华,曹欣茂. 废弃火炸药的处理与再利用[M]. 北京: 国防工业出版社,1999.
- [5] Arthur D Little. Propellants reuse/recovery technology. Process Development Branch Aberdeen Proving Ground. AD-A206306 [R], 1988.
- [6] 鲁彦玲,张力,施冬梅,等. 废弃发射药的再利用研究[J]. 环境科学与技术,2006,29: 147-150.  
LU Yan-ling, ZHANG li, SHI Dong-mei, et al. Study on the reusing obsolete propellant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29: 147-150.
- [7] 廖雨郊,黄汉平,蔡福安. 物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994: 96.
- [8] 高志崇. 甲烷燃烧反应的火焰温度[J]. 山西大学学报(自然科学版),2004,27(1): 32-34.
- [9] 周霖. 爆炸化学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社,2005.
- [10] 白日午,宋立,王浦. 比色温度计的波长选择[J]. 冶金自动化, 2003,3: 45-47.  
BAI Ri-wu, SONG Li, WANG Pu. Wavelength selection of colorimetric thermometer[J]. *Metallurgical Industry*, 2003, 3: 45-47.

## Calculation and Measurement Analysis of Propellant Burning Temperature

LIAO Jing-lin<sup>1</sup>, JIANG Jin-yong<sup>1</sup>, LU Gui-e<sup>1</sup>, CHANG Wen-ping<sup>1</sup>, ZHAI Hong-chang<sup>2</sup>

(1. Ordnance Engineering of Technology, Ordnance Engineer College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Unit 75407, Zhanjiang 524100, China)

**Abstract:** The burning temperature of single-based (H100 and H130), SF (SF-3), modified double-based propellants (171-25 and GT) were calculated and measured at constant pressure. The difference between adiabatic flame temperature approximation calculation result and measured result was compared. The calculation results are consistent with experimental results, the maximum flame temperatures of H130 and SF-3 propellant are 2215 K, 2230 K. As the candidate of hot source, the double-based propellant is better than the single-based propellant. The colorimetric temperature measurement can not reflect the accurate temperature of modified double-based propellants.

**Key words:** physical chemistry; propellant; colorimetric temperature measurement; combustion temperature

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.017