

温度对 HMX 基 PBX 炸药热膨胀系数和热导率的影响

韦兴文, 周筱雨, 王 培, 涂小珍, 王 翕

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 用热膨胀仪和闪光导热仪研究了温度对 HMX 基 PBX 的热膨胀系数和热导率的影响。结果表明, 在低于 330 K 时, HMX 基 PBX 的线膨胀系数约为 $5.34 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; 在 330~350 K, 线膨胀系数迅速增大到 $13.47 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, 随着黏结剂软化, 线膨胀系数随之减小到 $8.04 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。在 293~373 K, HMX 基 PBX 的比热容从 $0.978 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 线性增长到 $1.254 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 但在 343 K 附近黏结剂融化存在异常偏大值; HMX 基 PBX 的热扩散率从 $0.256 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 下降至 $0.179 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 通过比热和热扩散率实验数据计算获得的热导率从 $0.462 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 下降至 $0.406 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。基于分子晶体传热理论模型建立了比热和导热系数的温度关系函数, HMX 基 PBX 的导热机制符合两相串联模型。

关键词: 物理化学; 高聚物黏结炸药; 线膨胀系数; 比热; 导热系数

中图分类号: TJ55; O642

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2012)03-0033-05

Influence of Temperature on Thermal Expansion Coefficient and Thermal Conductivity of HMX Based Polymer Bonded Explosive

WEI Xing-wen, ZHOU Xiao-yu, WANG Pei, TU Xiao-zhen, WANG Xi

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: The effect of temperature on thermal expansion and thermal conductivity of the HMX based polymer bonded explosive (PBX) were investigated by a thermal expansion analyzer and a flash thermal conductivity analyzer. The results show that coefficient of thermal expansion of HMX based PBX is about $5.34 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ below 330K, which rapidly reaches to $13.47 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ at temperature ranging from 330K to 350K, and decreases to $8.04 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ above 350K. The specific heat capacity increases monotonically as temperature increasing, which ranging from $0.978 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ to $1.254 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ between 293K and 373K. But it is abnormal big at temperature about 343K as a result of the molten of the binder. The thermal diffusivity is $0.256 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ at 293K and decreases to $0.179 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ at 373K. The thermal conductivity is $0.462 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ at 293K, decreasing to $0.406 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ at 373K. The thermal conductivity and specific heat capacity variation with the temperature are established based on heat transfer theory of molecular crystal, and the thermal conductivities of HMX based PBX calculated from the two-phase vertical system model are in good agreement with the experiment.

Key words: physical chemistry; polymer bonded explosive; coefficient of thermal expansion; specific heat; thermal conductivity

引 言

HMX 具有良好的力学性能和安全性, 一般与黏结剂混合成形使用, 其热物理性能由各组分和工

艺过程决定^[1]。由于各组分热物理性能的差异, 以及组分之间的相互作用界面影响, HMX 基 PBX 的热物理参数更为复杂。在 PBX 配方中, 通过选取线膨胀系数相近的组分来保证不同温度下均有较好的力学性能^[2], 或利用较高玻璃化温度的黏结剂抑

收稿日期: 2011-12-28; 修回日期: 2012-05-04

基金项目: 化工材料研究所创新基金(626010947)

作者简介: 韦兴文(1977-), 男, 硕士研究生, 从事炸药及高分子材料老化研究。

制 PBX 的不可逆长大,从而获得较小的线膨胀系数^[3]。但在贮存、运输和使用过程,在热应力的作用下,PBX 中炸药晶体与黏结剂之间的黏结界面可能脱粘而造成 PBX 热物理参数的改变^[4-5]。热物理性能参数既是 PBX 的基本热力学性质,也是评价炸药耐高温能力及环境适应性的特征参数^[6-7]。因此,不同温度下的热物理性能不仅是建立 PBX 本构方程的基础,对 PBX 的热稳定性、环境适应性和安全性评估也有重要意义^[8-9]。

本研究通过实验研究温度对 HMX 基 PBX 线膨胀系数和热导率的影响规律,并分析了高聚物黏结炸药的导热机制,为高聚物黏结炸药的配方设计和工程应用提供参考。

1 实 验

1.1 材料与仪器

HMX 基 PBX 由 HMX(自制)炸药晶体和三元乙丙共聚物黏结剂组成,将其压制成 $\Phi 60\text{mm} \times 60\text{mm}$ 药柱,然后再加工成小药柱,密度约为 $1.850\text{g}/\text{cm}^3$ 。从加工成型的小药柱中随机选取 3 发样品进行热膨胀系数测试,并按测试先后顺序编号为样品 1~样品 3。

德国耐驰 DIL 402 C 型热膨胀仪,测量范围: $500 \sim 5000\mu\text{m}$;德国耐驰 LFA 447 NanoflashTM 闪光导热仪。

1.2 测试方法

用激光闪光法测定热扩散率和比热,测试温度: $293 \sim 373\text{K}$,每 10K 测量一个点;在 $333 \sim 358\text{K}$,每 5K 测量一个点。热导率通过下式计算:

$$\lambda = \rho \alpha C_p \quad (1)$$

式中: λ 为热导率; ρ 为密度; α 为热扩散率; C_p 为定压比热。

用顶杆热膨胀法测试热膨胀系数,测试温度: $243 \sim 373\text{K}$,升温速率为 $1\text{K}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 温度对线膨胀系数的影响

在自由膨胀条件下 HMX 基 PBX 升温过程中线性膨胀量与温度之间的关系如图 1 所示。

由图 1 可见,3 发样品测试结果的重复性很好,第 1 发和第 3 发测试结果几乎一致。当温度低于 330K 或高于 350K 时,线性膨胀量随温度升高而线性增大;在 $330 \sim 350\text{K}$,线性膨胀量增长量明显增

大,分析认为是黏结剂流态转变($T_i \approx 330\text{K}$)使得炸药晶体颗粒间黏合力下降所致,如图 2。

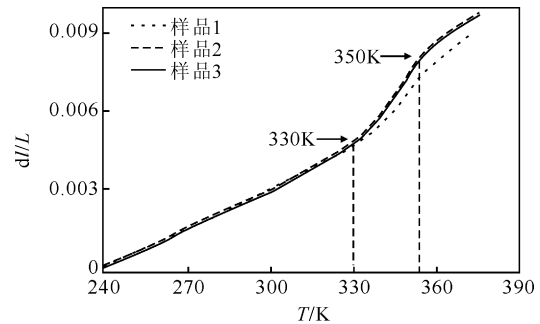
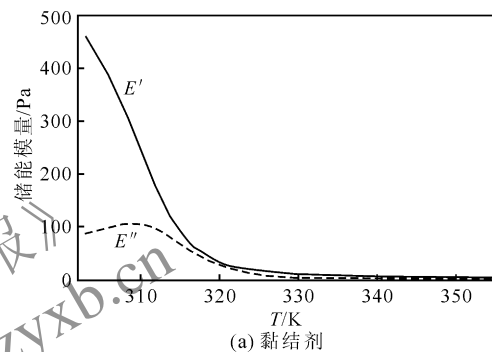
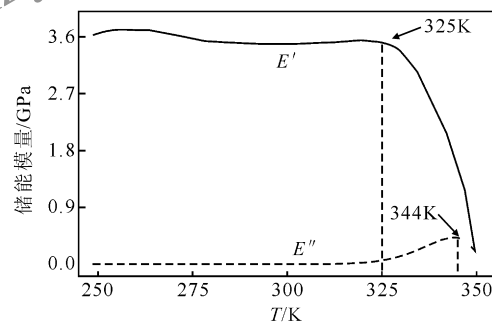


图 1 HMX 基 PBX 线性膨胀量与温度的函数关系

Fig. 1 Thermal expansion as a function as temperature for HMX based PBX



(a) 黏结剂



(b) PBX

图 2 黏结剂和 PBX 的 DMA 温度图谱

Fig. 2 Storage modulus and loss modulus variation with the temperature of binder and PBX

由图 2 可见,在 $325 \sim 350\text{K}$,HMX 基 PBX 的储能模量出现了明显的跌落,由最大值 3.6GPa 迅速跌落到 0.25GPa ,跌幅达到 1 个数量级;而损耗模量则逐渐增长,在 344K 达到最大值约 0.3GPa ,这是黏结剂软化所致。在此温度内,黏结剂熔化导致体积急剧膨胀,同时炸药颗粒间作用力迅速减弱使得炸药晶体之间滑移变形更为容易。由于此温度内 HMX 基 PBX 的物理特征量(体积、密度和力学性能等)随温度变化与高聚物玻璃化转变类似,对应的温度区间定义为 HMX 基 PBX 的玻璃化转变区,损耗模量峰值对应的温度定义为玻璃化温度($T_g = 344\text{K}$)。平均线膨胀系数由下式计算得到:

$$\alpha_1 = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\Delta l}{\Delta T} \right) \quad (2)$$

式中: α_1 为线膨胀系数; L_0 为试样初始长度; Δl 为温度变化 ΔT 长度变化量。

如前所述, 考虑到温度对线膨胀系数的影响, 分段计算出不同温度区间 HMX 基 PBX 炸药的平均线膨胀系数, 结果见表 1。

表 1 不同温度区间 HMX 基 PBX 的线膨胀系数

Table 1 Mean coefficients of the linear thermal expansion of HMX based PBX

T / K	$\alpha_1 / (10^{-5} K^{-1})$
240~330	5.34±0.18
330~350	13.47±2.45
350~373	8.04±0.52

由表 1 可见, 在低于 330K 时, HMX 基 PBX 线膨胀系数较小, 约为 $5.14 \times 10^{-5} K^{-1}$, 与基体 HMX 值接近。随着温度的升高, 在 330~350K 玻璃化转变区范围内, α_1 迅速增大到 $13.47 \times 10^{-5} K^{-1}$, 增幅接近 2 倍, 这是黏结剂流态转变所致。随着黏结剂流态转变的完成, 线膨胀系数随之减小到 $8.04 \times 10^{-5} K^{-1}$, 减幅接近 50%。

2.2 温度对密度的影响

各向同性材料长度变化与密度之间的关系可用下式描述^[10]:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{1 - (1 + \Delta l / L_0)^3}{(1 + \Delta l / L_0)^3} \quad (3)$$

表 2 HMX 基 PBX 密度与温度函数关系多项式拟合参数值

Table 2 Fitting parameters of the density for HMX based PBX as a function of the temperature

T / K	$p_1 / 10^{-4}$	$p_2 / 10^{-6}$	$p_3 / 10^{-8}$	R^2
293~350	-1.9894	3.4607	-7.7589	0.9996
>350	-3.5292	11.147	-26.3120	0.9994

由表 2 可见, 相关系数 R 非常接近于 1, 即利用三次多项式能较好地描述密度随温度的变化关系, 利用式(4)可以计算不同温度下 HMX 基 PBX 的密度。

2.3 温度对导热系数的影响

用激光闪光法测得不同温度下 HMX 基 PBX 热扩散率(α)和比热(C_p), 结果见图 4。

由图 4(a)可见, 随温度的升高, HMX 基 PBX 的热扩散率下降; 比热则随温度的升高而增大。但在 343K 附近, 比热增加明显, 而热扩散率则明显降低, 异常值出现在 PBX 的玻璃化转变温度($T_g = 344K$)附近, 分析认为是黏结剂流态转变所致。因此, 在 343K 附近增加测量温度点, 每个温度点取 5 发样品平均值, 结果如图 4(b)所示。可见, 异常值仅出现在(343±5)K 附近, 其余测量点比热和热扩

散率均无明显异常, 这就证明了前面的推断: 黏结剂熔化吸热, 一方面造成比热测量值偏大; 另一方面, 由于热量的损失导致热扩散率测量值失真。因此, 剔除 343K 附近因黏结剂熔化吸热的异常数据, 比热和热扩散率随温度变化分别如图 5(a)和图 5(b)所示。

由图 5(a)可见, 在 293~373K, HMX 基 PBX 的比热从 $0.978 J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ 近似线性增长到 $1.254 J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ 。对图 5(a)数据进行线性拟合, 得到比热随温度的变化函数:

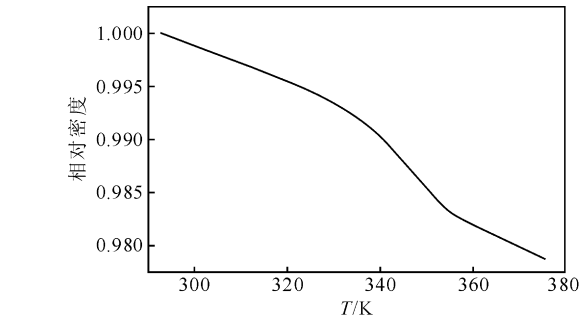


图 3 HMX 基 PBX 相对密度与温度之间的函数关系

Fig. 3 Relationship between relative density of HMX based PBX and temperature

散率均无明显异常, 这就证明了前面的推断: 黏结剂熔化吸热, 一方面造成比热测量值偏大; 另一方面, 由于热量的损失导致热扩散率测量值失真。因此, 剔除 343K 附近因黏结剂熔化吸热的异常数据, 比热和热扩散率随温度变化分别如图 5(a)和图 5(b)所示。

由图 5(b)可见, 在 293~373K, 热扩散率从 $0.256 mm^2/s$ 缓慢下降至 $0.179 mm^2/s$, 对图 5(b)数据进行非线性拟合, 得到热扩散率随温度变化函数:

$$\rho = \rho_0 (1 + p_1 \Delta T + p_2 \Delta T^2 + p_3 \Delta T^3) \quad (4)$$

式中: $\Delta T = T - T_0$, p_1 、 p_2 、 p_3 为常数。

$$C_p = 0.0134 + 3.3177 \times 10^{-3} T \quad (5)$$

式中: C_p 为定压比热, $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$; T 为绝对温度, K 。

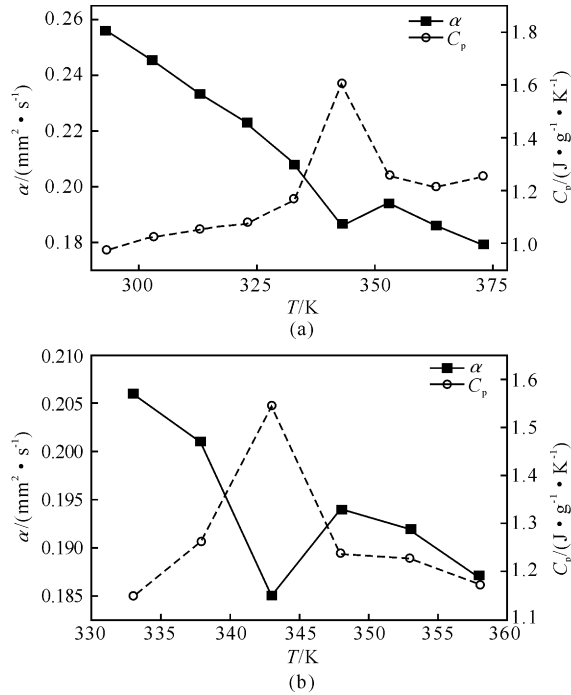


图 4 不同温度下 HMX 基 PBX 的热扩散率和比热容
Fig. 4 The thermal diffusivity and specific heat capacity of HMX based PBX under different temperatures

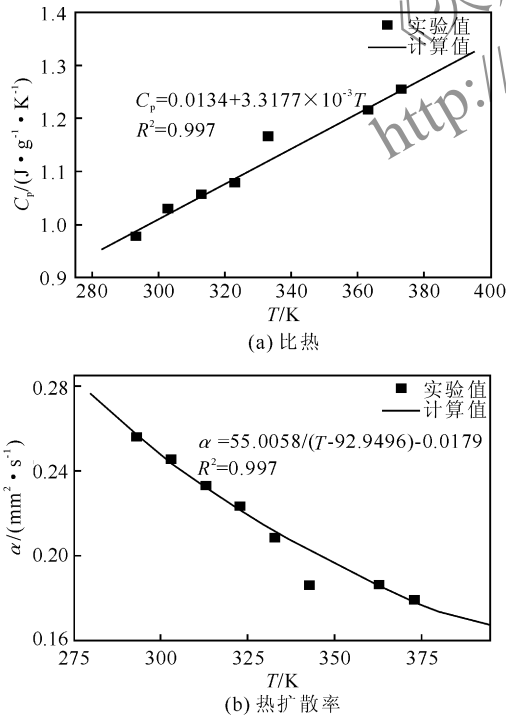


图 5 HMX 基 PBX 比热容、热扩散率与温度之间的关系
Fig. 5 Specific heat capacity and thermal diffusivity variation with the temperature of HMX based PBX

$$\alpha = \frac{55.0058}{T - 92.9496} - 0.0179 \quad (6)$$

式中: α 为热扩散率, mm^2/s ; T 为绝对温度, K 。

将式(4)、式(5)和式(6)代入式(1), 得到不同温度下的导热系数, 如图 6 所示。

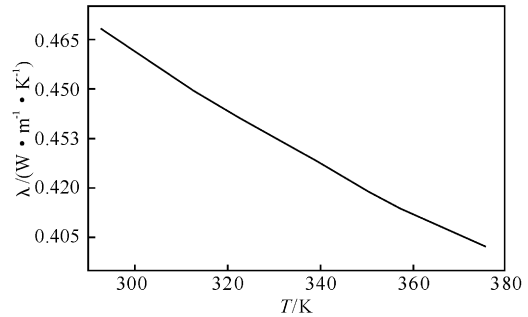


图 6 HMX 基 PBX 导热系数与温度之间的关系
Fig. 6 Retotionship between thermal conductivity of HMX based PBX and temperature

由图 6 可见, 随温度的升高, HMX 基 PBX 的导热系数降低, 在 293~373K, 热导率从 $0.462 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 下降至 $0.406 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。一般说来, 温度对复合材料导热性的影响主要表现在相组成的变化和各相自身导热特性的变化两个方面, HMX 基 PBX 导热性质与 HMX 分子晶体相似^[11-12], 主要靠晶格振动产生的声子传热, 根据声子传热理论模型^[13] $\lambda = 1/(A + BT)^{-1}$, 对数据进行回归分析可确定导热系数与温度的函数关系:

$$\lambda = \frac{1}{0.8896 + 0.00426T} \quad (7)$$

式中: λ 为导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; T 为绝对温度, K 。

2.4 HMX 基 PBX 导热机理分析

聚合物基复合材料等效导热系数与组分的自身导热性能及其在基体中的分布有关, 对于颗粒填充聚合物基复合材料导热模型, 现在应用较为广泛的是 Agari 模型^[14]。Agari 模型考虑了高填充体系内填充粒子的分布形态, 引入了垂直和平行传导机理, 用简单的方法很好地描述了连续相为聚合物, 分散相为填充物的聚合物基复合材料热导率:

$$\lambda_c = f(\lambda_p, \lambda_f, V_f, G(f)) \quad (8)$$

式中: λ_c 为复合材料的热导率; λ_f 和 λ_p 分别为填充相和连续相的热导率; V_f 为填充相的体积分; $G(f)$ 为描述填充粒子形态的分布函数。

在二相体系中, 考虑分布函数 $G(f)$ 的极限情况, 如图 7 所示, 在聚合物基复合材料体系中, 若所有填充粒子聚集形成的传导块与聚合物传导块在热流方向上是成行的, 则热导率最高, $G(f)$ 为 1, 称其为并联系统。反之, 若是成列的, 则热导率最低, $G(f)$ 为 0, 称其为串联系统。

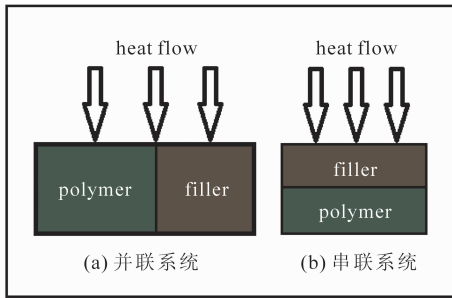


图 7 聚合物基复合材料的热传导模型

Fig. 7 Thermal conductivity model for polymer based composites

对于并联模型:

$$\lambda_v = V_f \cdot \lambda_f + (1 - V_f) \cdot \lambda_p \quad (9)$$

对于串联模型:

$$\lambda_h = [V_f / \lambda_f + (1 - V_f) / \lambda_p]^{-1} \quad (10)$$

HMX 基 PBX 由炸药晶体和黏结剂组成, 其中 HMX 颗粒为高填充相, 而黏结剂为连续相。假设理想情况下, HMX 颗粒在造粒过程中被黏结剂完好包裹, PBX 成型后 HMX 颗粒均匀分布在聚合物基体中, 如图 8 所示。

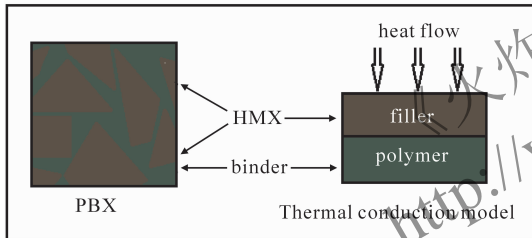


图 8 HMX 基 PBX 的热传导模型

Fig. 8 Thermal conduction model of HMX based PBX

HMX 基 PBX 热导率可以用两相串联模型进行计算。常温下, HMX 的热导率约为 $0.511 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 三元乙丙共聚物^[15]的热导率约为 $0.190 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。利用式(10)计算得到 HMX 基 PBX 的热导率为 $0.470 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 与实验值 $0.462 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 基本一致。

3 结 论

(1) HMX 基 PBX 的热膨胀系数随温度变化较为复杂, 在低于 330 K 时, 线膨胀系数约为 $5.34 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; 在 330~350 K 玻璃化转变区, 线膨胀系数迅速增大到 $13.47 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, 增幅接近 2 倍, 这是黏结剂流态转变所致; 随着此过程的完成, 线膨胀系数减小到 $8.04 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, 减幅接近 50%。

(2) 293~373 K, HMX 基 PBX 的比热从 $0.978 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 线性增长到 $1.254 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 但在

343 K 附近存在异常偏大值, 是黏结剂熔化吸热所致。

(3) 在 293 K 和 373 K 时, HMX 基 PBX 的热扩散率分别为 $0.256 \text{ mm}^2/\text{s}$ 和 $0.179 \text{ mm}^2/\text{s}$, 热导率分别为 $0.462 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $0.406 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。二者均随温度的升高而下降, 与温度之间的函数关系符合分子晶体传热理论模型。

(4) HMX 基 PBX 的导热机制符合两相串联模型, 计算得到的热导率与实验值吻合。

参考文献:

- [1] 李圣英, 蒋承伟. 高聚物黏结炸药中的界面作用[D]. 西安: 西安近代化学研究所, 1989.
- [2] 马秀芳, 肖继军, 殷开梁, 等. TATB/聚三氟氯乙烯复合材料力学性能的 MD 模拟[J]. 化学物理学报, 2005, 18(1): 55-58.
MA Xiu-fang, XIAO Ji-jun, YIN Kai-liang, et al. Molecular dynamics simulation on mechanical properties of TATB/PCTFE composite material [J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2005, 18(1): 55-58.
- [3] Rizzo H F, Humphrey J R, Kolb J R. Growth of 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene (TATB) II: control of growth by use of high Tg polymeric binders [J]. Propellants and Explosives, 1981, 5(6): 27-36.
- [4] 李玉斌, 聂福德, 孙杰, 等. PBX 药柱的不可逆长大对 TATB/黏结剂界面黏结性能的影响[J]. 火炸药学报, 2001, 24(4): 15-16.
LI Yu-bin, NIE Fu-de, SUN Jie, et al. Influence of irreversible growth of PBX on interface of TATB/binder [J]. China Journal of Explosives and Propellants, 2001, 24(4): 15-16.
- [5] 李玉斌, 郑雪, 沈明, 等. TATB 基 PBX 的热膨胀系数研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 23-25.
LI Yu-bin, ZHENG Xue, SHEN Ming, et al. Study on thermal expansion coefficient of TATB-based PBX [J]. China Journal of Explosives and Propellants, 2003, 26(1): 23-25.
- [6] 孔扬辉, 刘子如, 吴承云. 火炸药及其相关物的热导率测定——小样品量的 DSC 测定法[J]. 含能材料, 1998, 6(3): 128-133.
KONG Yang-hui, LIU Zi-ru, WU Cheng-yun. Determination of thermal conductivity of propellants explosives and their related materials a method of DSC for small sample [J]. Energetic Materials, 1998, 6(3): 128-133.

(下转第 41 页)

来源主要由两部分组成:第一部分是标准装置的不确定度 u_1 ;第二部分是标准物质的不确定度 u_2 。通过分析评估得到 $u_1 = 35.4 \text{ J/g}$, $u_2 = 15.3 \text{ J/g}$, 标准不确定度为 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 38.6 \text{ J/g}$, 扩展不确定度为 $U = k u_c = 2 \times 38.6 = 77.2 \text{ J/g}$, ($k=2$), 因此, 非理想炸药爆热标准物质的爆热标准值为 $(7535.4 \pm 77.2) \text{ J/g}$ 。

6 结 论

(1) 采用含铝炸药作为非理想炸药爆热计量标准物质, 其爆热值与其他非理想炸药的爆热值相当, 其能量释放结构与其他非理想炸药相似, 可保证非理想炸药爆热测量值的可靠性和可比性。

(2) 该爆热标准物质的稳定性至少在 365 d 以上, 能够满足国防标准物质的要求。

(3) 评定了该标准物质的爆热定值的不确定度, 其爆热标准值为 7535.4 J/g , 扩展不确定度为 77.2 J/g 。

(4) 研制的非理想炸药爆热标准装置用标准物质, 解决了非理想炸药爆热热值的测量和量值之间的传递。

参考文献:

- [1] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [2] 王晓峰, 郝仲璋. 炸药发展中的新技术[J]. 火炸药学报, 2002, 30(4): 35-38.
WANG Xiao-feng, HAO Zhong-zhang. New development of explosive technology[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2002, 30(4): 35-38.
- [3] 殷海权, 潘清, 张建亮, 等. 铝粉对炸药性能的影响[J]. 含能材料, 2004, 12(5): 318-319.
YIN Hai-quan, PAN Qing, ZHANG Jian-liang, et al. The influence of Al powder on explosive performance[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(5): 318-319.
- [4] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药与理想炸药能量输出结构的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 6-8.
XIN Chun-liang, XU Geng-guang, LIU Ke-zhong, et al. Numerical simulation of energy output structure for aluminized explosive and idealized explosive in underwater explosion[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007, 30(2): 6-8.
- [5] 全浩. 标准物质及其应用技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [7] 徐抗震, 宋纪蓉, 赵凤起. 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯的比热容、热力学性质及绝热至爆时间研究[J]. 化学学报, 2007, 65(24): 2873-2831.
XU Kang-zhen, SONG Ji-rong, ZHAO Feng-qi. Special heat capacity thermodynamic properties and adiabatic time-to-explosion of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene[J]. Acta Chimica Sinica, 2007, 65(24): 2873-2831.
- [8] 张泰华, 丁雁生, 陈力. 从数量级分析看含能材料的临界热能密度[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(2): 124-132.
ZHANG Tai-hua, DING Yan-sheng, CHEN Li. Study on critical thermal energy density for energetic materials by magnitude order analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(2): 124-132.
- [9] 黄辉, 王泽山, 黄亨建, 等. 新型含能材料的研究进展[J]. 火炸药学报, 2005, 28(4): 9-13.
HUANG Hui, WANG Ze-shan, HUANG Heng-jian, et al. Researches and progresses of novel energetic materials[J]. China Journal of Explosives and Propellants, 2005, 28(4): 9-13.
- [10] 田蔚. 材料物理性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [11] Bedrov D, Smith G, Sewell T. Thermal conductivity of liquid octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX) from molecular dynamics simulations[J]. Chemical Physics Letters, 2000, 324: 64-68.
- [12] Donna M, Hanson-Parr. Thermal properties of solid rocket propellants oxidizers and binder materials as a function of temperature[J]. Journal Energetic Material, 1999, 17: 1-47.
- [13] 韦丹. 固体物理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [14] Agari Y, Ueda A, Nagai S. Thermal conductivity of composites in several types of dispersion systems[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1994, 42: 1665-1669.
- [15] 李振环, 杨家义, 孔建. 全氟醚橡胶及其制品[J]. 特种橡胶制品, 2010, 31(6): 67-70.
LI Zhen-huan, YANG Jia-yi, KONG Jian. Perfluoroether rubber and its products[J]. Special Purpose Rubber Products, 2010, 31(6): 67-70.

(上接第 37 页)