

文章编号: 1006-9941(2016)02-0149-06

# 苯乙炔共聚物改性 TATB 基 PBX 的抗热冲击性能

林聪妹, 刘佳辉, 曾贵玉, 巩飞艳, 黄忠, 潘丽萍, 张建虎, 刘世俊

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为改善 TATB 基高聚物粘结炸药(PBX)的抗热冲击性能,采用苯乙炔共聚物对 TATB 基 PBX 进行改性。分析了 TATB 基 PBX 及其苯乙炔共聚物改性配方的拉伸力学性能及热物理性能,并对改性前后配方的抗热冲击性能进行了比较。采用 Agari 串联模型对 TATB 基 PBX 及其苯乙炔共聚物改性配方的导热行为进行了模拟。结果表明,加入高玻璃化转变温度和高力学强度的苯乙炔共聚物可以明显提高 TATB 基 PBX 的拉伸强度和弹性模量,同时降低线膨胀系数和导热系数。理论预测模型和试验数据吻合良好。添加质量分数为 1% 的苯乙炔共聚物后,常温下 TATB 基 PBX 的抗热应力因子由  $10.72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  提高到  $13.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。随着温度升高,TATB 基 PBX 的抗热冲击性能逐渐下降。在玻璃化温度范围转变范围(323 ~ 343 K),TATB 基 PBX 的抗热应力因子显著降低。加入苯乙炔共聚物可以抑制 323 ~ 343 K 温度范围内 TATB 基 PBX 的抗热应力因子的下降程度。

**关键词:** TATB; 高聚物粘结炸药(PBX); 抗热应力因子; 拉伸力学性能; 抗热冲击性能; 热物理性能

中图分类号: TQ565; O38

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.007

## 1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)部件在加工、装配、运输和使用过程中,会受到一定的环境温度和热应力作用,导致材料产生形变,甚至发生破坏<sup>[1-2]</sup>。因此,提高 PBX 抵抗热冲击损伤的能力对改善炸药的安全性、可靠性和环境适应性具有重要意义。

国内外学者在 PBX 的热损伤机理、表征方法及数值模拟等方面开展了广泛深入的研究。田勇<sup>[3-5]</sup>、张伟斌等<sup>[6]</sup>研究了 PBX 材料的热冲击损伤,实验观察到了 PBX 炸药产生损伤并逐渐积累扩展至最后破坏的过程,同时证实了用超声波特性参量方法无损检测 PBX 损伤的可行性,试验表明初始损伤或裂纹对 PBX 炸药的力学性能有着十分重要的影响。韦兴文等<sup>[7]</sup>对 PBX 在温度冲击载荷作用下的热损伤进行了数值计算和试验研究,分析认为 PBX 热损伤破坏方式为拉应力破坏,抗拉强度可以较好地反映材料的抗热损伤能力。研究结果表明热冲击载荷产生的热应力容易使 PBX 内部产生微裂纹,甚至开裂失效<sup>[8]</sup>,但是关于如

何改进 PBX 抗热冲击性能的研究较少。

材料的抗热冲击性能取决于力学性能(拉伸强度、弹性模量)和热物理性能(热导率、热膨胀系数)<sup>[9]</sup>。目前针对 PBX 的力学性能和热物理性能的研究十分广泛<sup>[10-13]</sup>,但是综合评价 PBX 的力学性能和热物理性能,采用特征参数定量表征材料抗热冲击性能的研究较少。本研究采用苯乙炔共聚物对 TATB 基 PBX 进行改性,综合分析了 TATB 基 PBX 及其苯乙炔共聚物改性配方的强度、模量、线膨胀系数和热导率,采用 Agari 模型<sup>[14]</sup>对苯乙炔共聚物改性 TATB 基 PBX 导热行为进行模拟,探讨了苯乙炔共聚物对 TATB 基 PBX 抗热冲击性能的影响,为改善 PBX 的抗热冲击性能提供理论和试验依据。

## 2 试验部分

### 2.1 原材料

TATB,纯度为 99%,平均粒径为  $14 \mu\text{m}$ ,比表面积为  $0.87 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,导热系数为  $0.613 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,中国工程物理研究院化工材料研究所制备;氟聚物,密度为  $2.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,导热系数为  $0.179 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,拉伸强度为  $14.06 \text{ MPa}$ ,中昊晨光化工研究院生产;苯乙炔共聚物,密度为  $1.10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,导热系数为  $0.187 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,拉伸强度为  $64.76 \text{ MPa}$ ,上海高桥化工厂提供;乙酸乙酯、乙酸丁酯,分析纯,成都

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-11-11

作者简介: 林聪妹(1985-),女,助理研究员,研究方向为高聚物粘结炸药的配方设计和性能研究。e-mail: lincmei2009@163.com

通信联系人: 刘世俊(1975-),男,副研究员,主要从事含能材料设计及性能研究工作。e-mail: lsj99@sohu.com

市联合化工试剂研究所提供。

## 2.2 苯乙烯共聚物改性 TATB 基 PBX 的制备

将质量分数为 20% 的苯乙烯共聚物与氟聚合物密炼混合, 制备氟聚合物/苯乙烯共聚物复合材料, 然后微注塑制成 30 mm × 10 mm × 1 mm 样条, 用于动态力学性能测试。以氟聚合物和氟聚合物/苯乙烯共聚物复合材料为粘结剂, 制备 PBX-1 和 PBX-2 高聚物粘结炸药, PBX-2 中苯乙烯共聚物质量分数为 1%。采用水悬浮法制备 TATB 基 PBX 造型粉, 在油浴烘箱中于 60 °C 下干燥 24 h 后, 120 °C 下等静压成型并机加成药柱, 用于力学性能和热物理性能测试。

## 2.3 动态力学性能试验

采用德国耐驰公司 DMA 242C 型热机械分析仪进行动态力学性能测试: 试验温度为 273 ~ 423 K, 升温速率为 1 K · min<sup>-1</sup>, 测量模式为三点弯曲模式, 样品尺寸为 30 mm × 10 mm × 1 mm。

## 2.4 拉伸力学性能试验

按照 GJB772A-1997(417.1)《拉伸应力-应变曲线 电子引伸计法》, 采用 INSTRON-5582 电子万能试验机, 对尺寸规格为  $\phi 25$  mm × 65 mm 的哑铃型药柱进行拉伸力学性能测试。

## 2.5 线膨胀系数测试

按照 GJB772A-1997(408.2)《线膨胀系数 膨胀仪法》, 采用德国耐驰公司 DIL 402C 型热膨胀仪, 测试 TATB 基 PBX 药柱的膨胀曲线, 样品尺寸为  $\phi 5$  mm × 50 mm, 测量范围为 500 ~ 5000  $\mu$ m。

## 2.6 热导率测试

按照 GJB772A-1997(406.2)《比热容、热导率和热扩散率 激光脉冲法》, 采用德国耐驰公司 LFA 447Nanoflash<sup>TM</sup> 型闪光导热仪, 测试 TATB 基 PBX 的热导率, 样品尺寸为  $\phi 12.7$  mm × 2 mm。

## 3 结果与讨论

### 3.1 TATB 基 PBX 的力学性能

氟聚合物、苯乙烯共聚物及其复合材料的储能模量 ( $E'$ ) 和损耗因子 ( $\tan\delta$ ) 随温度的变化关系如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 与氟聚合物相比, 苯乙烯共聚物的储能模量显著增加。在氟聚合物中添加 20% 苯乙烯共聚物后, 复合材料的储能模量比纯氟聚合物明显提高, 表明苯乙烯共聚物的加入提高了材料抵抗形变的能力。随着温度升高, 氟聚合物、苯乙烯共聚物及其复合材料的储能模量逐渐降低。氟聚合物和苯乙烯共聚物的储

能模量分别在 303 ~ 323 K 和 373 ~ 393 K 显著下降, 表明材料在该温度范围内发生玻璃化转变。苯乙烯共聚物的玻璃化转变温度为 388.6 K, 比氟聚合物(322.6 K) 提高 66 K。这主要是因为苯乙烯共聚物的分子主链中含有苯基等芳杂环, 链上可以内旋转的单键比例相对较少, 分子链的刚性大。复合材料在 316.2 K 和 394.4 K 处出现两个损耗峰, 分别归属于氟聚合物和苯乙烯共聚物的玻璃化转变。

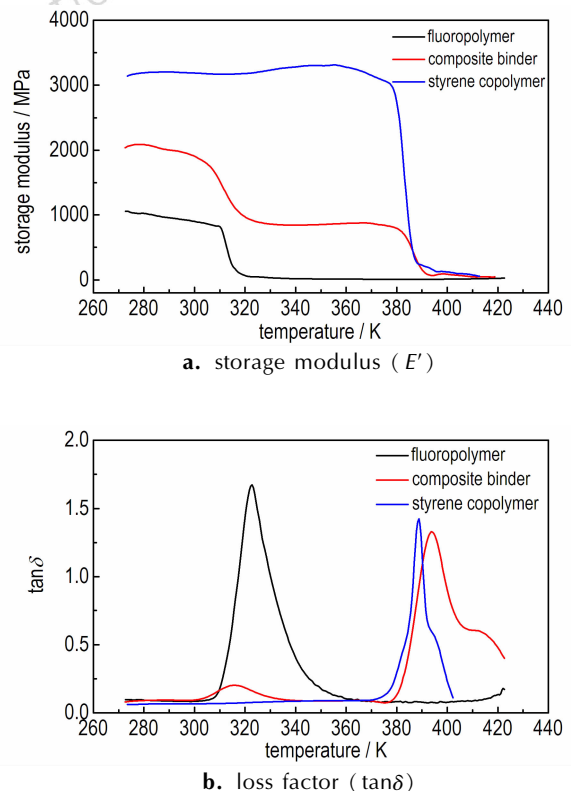


图 1 粘结剂体系的动态力学温度谱

Fig. 1 Dynamic mechanical temperature spectra of binder systems

图 2 为 TATB 基 PBX 的拉伸强度和弹性模量随温度变化曲线。由图 2 可知, PBX-2 的拉伸强度和弹性模量比 PBX-1 高。常温下, PBX-1 的拉伸强度和弹性模量分别为 8.56 MPa 和 7.15 GPa。PBX-2 的拉伸强度和弹性模量分别为 10.91 MPa 和 7.63 GPa, 比 PBX-1 分别提高 27.45% 和 6.71%。这是因为 PBX-2 中引入了带有芳杂环侧基的苯乙烯共聚物, 提高了分子主链的化学键力。TATB 基 PBX 的拉伸强度和弹性模量随温度的升高而下降。在 333 K 附近, 拉伸强度和弹性模量明显降低。这与 PBX 的玻璃化转变有关<sup>[15]</sup>。

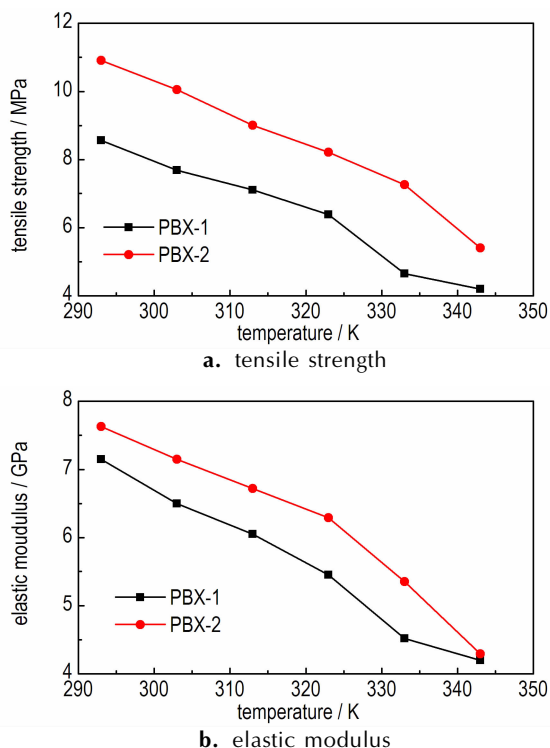


图2 TATB 基 PBX 的拉伸强度和弹性模量与温度的函数关系  
Fig.2 Tensile strength and elastic modulus as a function of temperature for TATB-based PBX

### 3.2 TATB 基 PBX 的热物理性能

自由膨胀条件下, TATB 基 PBX 在升温 and 降温过程的线性膨胀量 ( $dL/L$ ) 随温度的变化关系如图 3 所示。由图 3 可知, 在升温过程中, 低于 290 K 时, PBX-1 和 PBX-2 的线性膨胀量随温度的升高而线性增大。当高于 290 K 时, 随着温度升高, PBX-1 和 PBX-2 的线性膨胀量开始加速增长。当温度进一步升高至 335 K 时, PBX-1 和 PBX-2 的线性膨胀量随温度的升高再次呈现线性增长, 且高温下线性膨胀量的增长速度 (线膨胀系数) 比低温时大。PBX-1 和 PBX-2 膨胀系数的转变温度分别为 313.54 K 和 315.95 K。这主要与粘结剂的玻璃化转变有关。在玻璃态下, 粘结剂随温度升高发生的膨胀是由正常的分子膨胀造成的。在玻璃化转变过程中, 自由体积也开始解冻发生膨胀, 因此, 线性膨胀量显著增加。

从图 3 还可以看出, 降温过程 TATB 基 PBX 的线性膨胀量 ( $dL/L$ ) 随温度变化趋势与升温过程相同。但是降温过程中 PBX-1 和 PBX-2 的线性膨胀量高于升温过程。这主要与 TATB 的不可逆尺寸长大有关。根据图 3 可知, 经历 243 ~ 343 K 的一次温度循环后, PBX-1 和 PBX-2 的不可逆膨胀量分别为  $1.03 \times 10^{-3}$

和  $9.2273 \times 10^{-4}$ 。可见, 加入高玻璃化转变温度的苯乙烯共聚物有利于降低 TATB 基 PBX 的不可逆膨胀。这与之前报道的研究结果一致<sup>[11]</sup>。

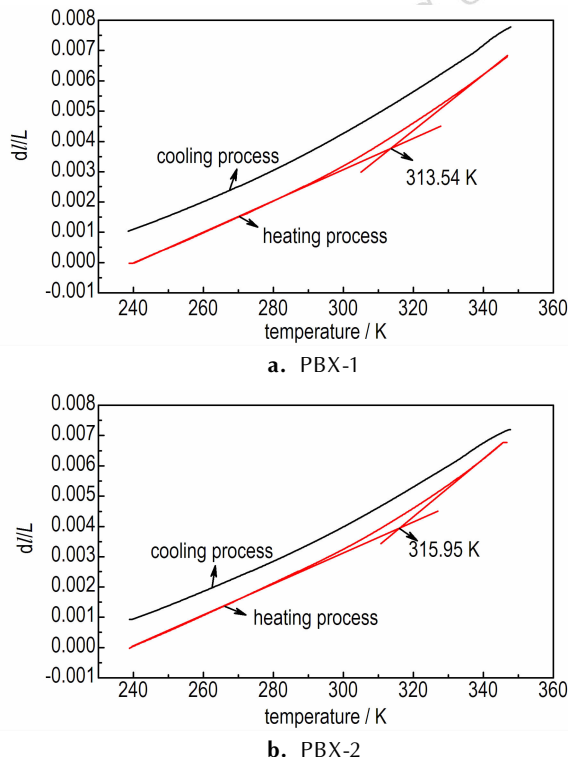


图3 升温和降温过程中 TATB 基 PBX 的热膨胀情况  
Fig.3 Thermal expansion of TATB-based PBX during heating and cooling processes

将升温过程和降温过程中 TATB 基 PBX 的线膨胀系数加和平均, 可以获得不同温度下 PBX-1 和 PBX-2 的平均线膨胀系数, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, PBX-1 和 PBX-2 的平均线膨胀系数随温度的升高而增大。总体来说, PBX-2 的平均线膨胀系数低于 PBX-1。常温下, PBX-2 的平均线膨胀系数分别为  $5.79 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , 比 PBX-1 ( $6.10 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) 降低 5.08%。这是因为苯乙烯共聚物的玻璃化转变温度为 388.6 K, 高于测试温度范围 243 ~ 343 K, 在测试过程中, 苯乙烯共聚物以玻璃态存在, 对 TATB 粒子运动具有较强的约束力。而氟聚物的玻璃化转变温度为 322.6 K, 在测试温度范围内发生玻璃化转变, 从玻璃态进入高弹态, 对 TATB 粒子运动的约束力明显下降。

图 5 为 TATB 基 PBX 导热系数与温度之间的函数关系。从图 5 可见, 随着温度升高, TATB 基 PBX 的导热系数降低。与 PBX-1 相比, PBX-2 的导热系数略微降低。常温下, PBX-1 和 PBX-2 的导热系数分别为  $0.546 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $0.533 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。这主

要与 PBX-2 中导热颗粒 TATB 体积分数下降有关。在 323 ~ 343 K, TATB 基 PBX 的导热系数明显降低。这主要归因于 PBX 中氟聚物的玻璃化转变。在玻璃化转变区域, 高聚物的热扩散率和定压比热会发生突变<sup>[15]</sup>。根据 PBX 的导热系数计算公式  $\lambda = \rho \cdot \alpha \cdot C_p$ <sup>[13]</sup> ( $\rho$  为密度,  $\alpha$  为热扩散率,  $C_p$  为定压比热), 热扩散率和定压比热的突变导致导热系数明显下降。

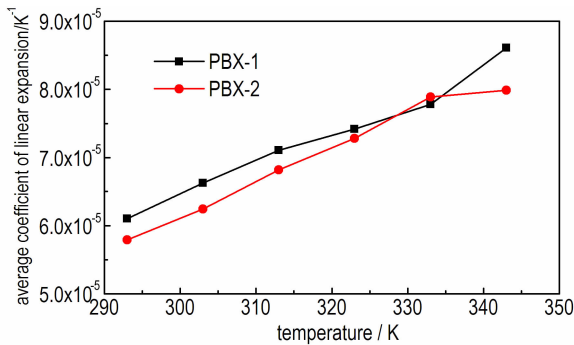


图 4 不同温度下 TATB 基 PBX 的平均线膨胀系数

Fig. 4 The average linear expansion coefficient of TATB-based PBX at different temperatures

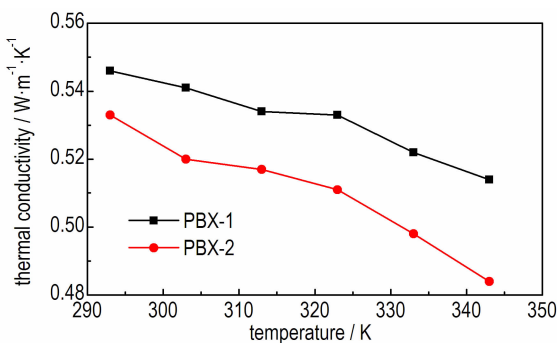


图 5 TATB 基 PBX 导热系数与温度之间的关系

Fig. 5 Relationship between thermal conductivity and temperature of TATB-based PBX

如何有效预测粒子填充聚合物基复合材料的导热系数引起研究者的广泛关注, 国内外学者提出了一些预测复合材料热导率的理论模型及相应的数学表达式, 如 Maxwell-Eucken、Bruggeman、Cheng-Vachon、Nielsen-Lewis 模型等<sup>[16-17]</sup>。但是当体系的填充量较高时, 这些模型不能够很好地预测试验结果, 这主要是因为高填充量的体系内, 粒子彼此有了接触而发生了团聚现象甚至形成了导热链, 另外还需要关注填充粒子对聚合物形态的影响, Agari 提出了一种新的模型<sup>[14]</sup>, 引入了垂直和平行传导机理, 即并联系统和串联系统, 很好地解决了前述模型的此类缺陷, 结构如图 6 所示。

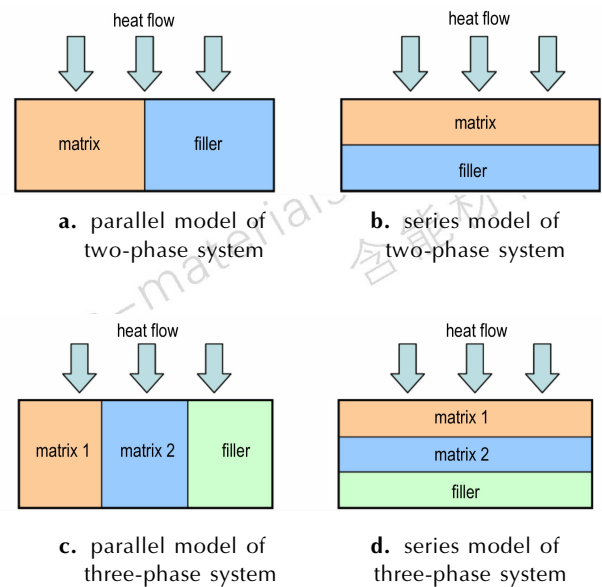


图 6 聚合物基复合材料的热传导模型

Fig. 6 Thermal conductivity model for polymer based composites

在并联系统中, 所有填充粒子聚集形成的传导块与聚合物传导块与热流方向一致, 此时复合材料导热系数最高<sup>[14]</sup>。若复合材料为两相体系(图 6a), 则导热系数为:

$$\lambda_c = V_f \lambda_f + (1 - V_f) \lambda_p \quad (1)$$

式中,  $\lambda_c$  为复合材料的导热系数;  $V_f$  为填充相的体积分数;  $\lambda_f$  和  $\lambda_p$  分别为填充相和基体相的导热系数。若复合材料为三相体系(图 6c), 含有两种不同的基体相, 则导热系数为:

$$\lambda_c = V_{p1} \lambda_{p1} + V_{p2} \lambda_{p2} + (1 - V_{p1} - V_{p2}) \lambda_f \quad (2)$$

式中,  $V_{p1}$  和  $V_{p2}$  分别为两种基体相的体积分数;  $\lambda_{p1}$  和  $\lambda_{p2}$  分别为两种基体相的导热系数。

在串联系统中, 所有填充粒子聚集形成的传导块与聚合物传导块与热流方向垂直, 此时复合材料导热系数最低<sup>[14]</sup>。若复合材料为两相体系(图 6b), 则导热系数为:

$$\lambda_c = \frac{1}{V_f / \lambda_f + (1 - V_f) / \lambda_p} \quad (3)$$

若复合材料为三相体系(图 6d), 含有两种不同的基体相, 则导热系数为:

$$\lambda_c = \frac{1}{V_{p1} / \lambda_{p1} + V_{p2} / \lambda_{p2} + (1 - V_{p1} - V_{p2}) / \lambda_f} \quad (4)$$

对于高填充聚合物基复合材料 PBX-1 两相体系, 基体相为氟聚物, 分散相为填充物 TATB。对于苯乙烯共聚物改性 PBX-2 三相体系, 增加了一个基体相聚



乙烯共聚物。常温下, TATB、氟聚物和苯乙烯共聚物的热导率为  $0.613, 0.179, 0.187 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。利用两相并联模型(式 1)和两相串联模型(式 3)计算得到 PBX-1 的热导率分别为  $0.592 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $0.549 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。可见, 两相串联模型计算结果与实验值  $0.546 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  基本一致, 相对误差为 0.55%。利用三相并联模型(式 2)和三相串联模型(式 4)计算得到 PBX-2 的热导率分别为  $0.589 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $0.541 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。三相串联模型计算结果与实验值  $0.533 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  基本相符, 相对误差为 1.48%。结果表明, 两种 TATB 基 PBX 的导热机制符合串联模型。这与 HMX 基 PBX 的导热机制相同<sup>[13]</sup>。

### 3.3 TATB 基 PBX 的抗热冲击性能

材料的抗热应力因子 ( $T_{SR}$ ) 与强度 ( $\sigma$ ) 和热导率 ( $\lambda$ ) 成正比, 与弹性模量 ( $E$ ) 和线膨胀系数 ( $\alpha_L$ ) 成反比, 即

$$T_{SR} = \frac{\sigma \lambda}{E \alpha_L} \quad (5)$$

两种 TATB 基 PBX 的抗热应力因子计算结果如图 7 所示。从计算结果可以看出, PBX-2 的抗热应力因子比 PBX-1 高。常温下, PBX-2 的抗热应力因子为  $13.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ , 比 PBX-1 ( $10.72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ ) 提高 22.76%。随着温度升高, 两种 TATB 基 PBX 的抗热应力因子下降。在 323 ~ 343 K 范围内, PBX-1 的抗热应力因子明显下降, 从  $8.41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  降低至  $5.97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  (降低 29.0%)。这主要是由于氟聚物发生玻璃化转变。加入苯乙烯共聚物可以抑制 323 ~ 343 K 范围内抗热应力因子下降程度。当温度从 323 K 升至 343 K 时, PBX-1 的抗热应力因子从  $9.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  下降至  $7.62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  (降低 16.9%)。可见, 加入苯乙烯共聚物有利于提高材料的抗热冲击性能。

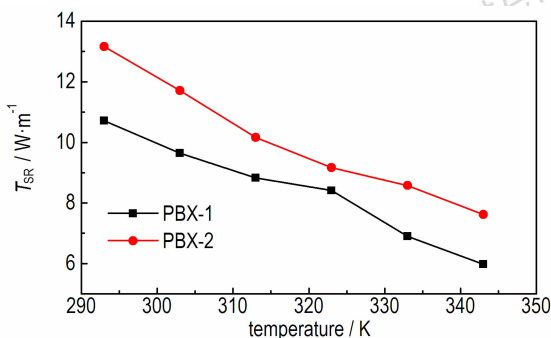


图 7 TATB 基 PBX 的抗热应力因子与温度的关系

Fig.7 The thermal stress resistance factor versus temperature of TATB-based PBX

## 4 结 论

将苯乙烯共聚物应用于 TATB 基 PBX, 研究了苯乙烯共聚物对 TATB 基 PBX 的拉伸力学性能、线膨胀系数和导热系数影响。与 TATB 基 PBX 相比, 常温下苯乙烯共聚物改性配方的拉伸强度和弹性模量分别提高 27.45% 和 6.71%, 而线膨胀系数与导热系数分别降低 5.08% 和 2.38%。

综合分析材料的力学性能和热物理性能, 结果表明采用苯乙烯共聚物对 TATB 基 PBX 进行改性可以提高材料的抗热冲击性能。添加 1% 的苯乙烯共聚物后, 常温下 TATB 基 PBX 的抗热应力因子由  $10.72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  提高到  $13.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。此外, 加入苯乙烯共聚物可以抑制 323 ~ 343 K 范围内抗热应力因子下降程度。当温度从 323 K 升至 343 K 时, TATB 基 PBX 及其苯乙烯共聚物改性配方的抗热应力因子分别降低 29.0% 和 16.9%。可见, 加入高玻璃化转变温度和高力学强度的粘结剂是改善 PBX 抗热冲击性能的有效途径。

### 参考文献:

- [1] 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]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(4): 15-16.
- [2] Trevor M W, Tony B van, Jonathan R L, et al. Changes in pore size distribution upon thermal cycling of TATB-based explosives measured by ultra-small angle X-ray scattering[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31(6): 466-471.
- [3] 田勇, 张伟斌, 郝莹, 等. 炸药热冲击损伤破坏及超声波特性参量检测[J]. 火炸药学报, 2000, 23(4): 13-15.  
TIAN Yong, ZHANG We-bing, HAO Ying, et al. Thermal shock damage of explosive and its ultrasonic characterization[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2000, 23(4): 13-15.
- [4] 田勇, 罗顺火, 张伟斌, 等. JOB-9003 炸药“激热”冲击损伤破坏及超声特征[J]. 火炸药学报, 2002, 25(3): 17-19.  
TIAN Yong, LUO Shun-huo, ZHANG Wei-bin, et al. Water-bathed thermal shock damage of PBX JOB-9003 and its ultrasonic characteristics[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(3): 17-19.
- [5] 田勇, 张伟斌, 温茂萍, 等. JOB-9003 高聚物粘结炸药热冲击损伤破坏相关性研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 174-177.  
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, WEN Mao-ping, et al. Research on correlation of thermal shock damage of PBX JOB-9003[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 174-177.
- [6] 张伟斌, 田勇, 温茂萍, 等. JOB-9003 炸药热冲击损伤的超声波检测[J]. 含能材料, 2004, 12(2): 85-88.  
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, WEN Mao-ping, et al. Experimental study on the thermal shock damage of explosive by ultra-

- sonic testing[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*( *Han-neng Cailiao*), 2004, 12(2): 85–88.
- [7] 韦兴文, 吴东力, 唐兴. HMX 基 PBX 炸药热损伤的数值计算与实验研究, *火炸药学报*, 2014, 37(4): 9–13.  
WEI Xing-wen, WU Shu-li, TANG Xing. Numerical calculation and experimental study on thermal damage of HMX based polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(4): 9–13.
- [8] 韦兴文, 周筱雨, 涂小珍, 等. HMX 基 PBX 的温度环境适应性[J]. *火炸药学报*, 2012, 35(1): 15–18.  
WEI Xing-wen, ZHOU Xiao-yu, TU Xiao-zhen, et al. Thermal environment adaptability of HMX based PBX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(1): 15–18.
- [9] 邓景屹, 刘文川, 杜海峰. C/C 复合材料的抗热应力因素[J]. *材料研究学报*, 2001, 15(3): 372–374.  
DENG Jing-yi, LIU Wen-chuan, DU Hai-feng. Thermal shock resistance of C/C composites[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2001, 15(3): 372–374.
- [10] Hoffman D M. Dynamic mechanical signatures of aged LX-17-1 plastic bonded explosive [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2001, 19(2–3): 163–193.
- [11] 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): 23–26.  
LI Yu-bin, ZHENG Xue, SHEN Ming, et al. Study on thermal expansion coefficient of TATB-based PBX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(1): 23–26.
- [12] Bedrov D, Smith G D, Sewell T D. 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.
- [13] 韦兴文, 周筱雨, 王培, 等. 温度对 HMX 基 PBX 炸药热膨胀系数和热导率的影响[J]. *火炸药学报*, 2012, 35(3): 33–37.  
WEI Xing-wen, ZHOU Xiao-yu, WANG Pei, et al. Influence of temperature on thermal expansion coefficient and thermal conductivity of HMX based polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(3): 33–37.
- [14] Agari Y, Ueda A, Nagai S. Thermal conductivity of composites in several types of dispersion systems[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1991, 42: 1665–1669.
- [15] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2005.
- [16] Ott H J. Thermal conductivity of composite materials[J]. *Plastic and Rubber Processing and Application*, 1981, 1: 9–24.
- [17] Lewis T and Nielsen L. Dynamic mechanic properties of particulate filled composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1970, 14(1): 449.

## Thermal Shock Resistance of Styrene Copolymer Modified TATB-based Polymer Bonded Explosive

LIN Cong-mei, LIU Jia-hui, ZENG Gui-yu, GONG Fei-yan, HUANG Zhong, PAN Li-ping, ZHANG Jian-hu, LIU Shi-jun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** To improve the thermal shock resistance of TATB-based polymer bonded explosive (PBX), TATB-based PBX was modified by styrene copolymer. The tensile mechanical properties and thermophysical properties of TATB-based PBX and its formulation modified by styrene copolymer were analyzed, and the thermal shock resistances of formulation before and after modification were compared. The thermal conductivity behaviors of TATB-based PBX and its styrene copolymer modified formulation were simulated by Agari series model. Results show that the addition of styrene copolymer with high glass transition temperature and high mechanical strength can improve the tensile strength and elastic modulus of TATB-based PBX and simultaneously reduce the linear expansion coefficient and thermal conductivity of TATB-based PBX. The results predicted by theoretical model are in good agreement with the experimental data. After the addition of styrene copolymer of mass fraction as 1%, the thermal stress resistance factor of TATB-based PBX at normal temperature increases from  $10.72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  to  $13.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ . With the increase of temperature, the thermal shock resistances of TATB-based PBXs decrease gradually. The thermal stress resistance factor of TATB-based PBX decreases significantly in the temperature range of glass transition from 323 K to 343 K. The addition of styrene copolymer can restrict decreasing extent of the thermal stress resistance factor of TATB-based PBX in the temperature range of 323 K to 343 K.

**Key words:** TATB; polymer bonded explosive (PBX); thermal stress resistance factor; tensile mechanical property; thermal shock resistance; thermophysical properties

**CLC number:** TQ565; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.007