DOI: 10.11858/gywlxb.20230824

HMX 含量对 PBT 基推进剂撞击感度和非冲击点火反应特性的影响

杨 年,马 腾,过光飞,吴三震,夏 语,黄寅生,刘大斌,徐 森

(南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究 HMX 的含量对 PBT 基推进剂撞击感度和非冲击点火反应特性的影响,开展了 BAM 落锤撞击感度试验、脆性试验和 Susan 试验。结果表明:随着 HMX 含量的增加,PBT 基推进剂爆炸概率为 50% 时的特性落高(H_{50})减小,即推进剂的撞击感度随着 HMX 含量的增加而增大。对于 HMX 的质量分数分别为 0、5%、10% 和 15% 的 PBT 基推进剂,其临界撞击点火速度分别为 168、147、136、131 m/s,临界撞击点火速度随 HMX 含量的增加而减小;在撞击速度为 120～300 m/s 的非冲击作用下,4 种 PBT 基推进剂的反应等级为爆炸或部分爆轰,相同撞击速度下,HMX 的质量分数为 10% 的 PBT 基推进剂相较于其他 3 种 PBT 基推进剂具有更剧烈的反应等级。

关键词: HMX; PBT 基推进剂; 撞击感度; 非冲击点火; 反应特性

中图分类号: O381 **文献标志码:** A

3,3-双 (叠氮甲基) 氧丁环(BAMO)与四氢呋喃(THF)共聚醚(PBT)作为新型固体推进剂的黏结剂具有高能、钝感、低特征信号、环境友好等特点,具有良好的应用前景[1−6]。为了进一步改变 PBT-AP-Al 混合固体推进剂的燃烧特性,提高推进剂的比冲,通常在 PBT 基推进剂中加入硝胺类炸药,如 RDX、HMX 和 CL-20 等。随着硝胺类炸药的引入,PBT 基推进剂的比冲得到显著提升,但撞击敏感性和非冲击点火反应特性也发生变化。推进剂的撞击敏感性和非冲击点火反应特性是其生产、储存和运输过程中的一个重要问题。在低速撞击刺激下,许多推进剂可以被点燃,进而演变成更危险的事故[7−8]。针对特定的事故场景,研究人员已经开发出多种冲击试验,如改进的 BAM 落锤撞击感度试验[7]、脆性试验[8]、Spigot 试验[9]、Steven 试验[10]、Susan 试验[11−16] 等。

BAM 落锤撞击感度试验基于德国联邦材料检验局相关标准,用于测定含能材料的撞击敏感性,撞击能量在 0.5～100 J 间可调,可测量各种含能材料的撞击感度。周小清等[17] 使用 BAM 落锤撞击感度仪测试了 5,5′-肼基-双四唑(HBT)的撞击感度,结果显示,其撞击感度大于 30 J。王帜等[18] 采用 BAM 撞击感度仪测得了 3,5-二氨基-2,6-二硝基吡嗪-1-氧化物(DDPZO-i)的撞击感度,结果表明,其撞击感度为 5 J,高于 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105)的撞击感度。潘鹏阳等[19] 利用 BAM 落锤撞击感度仪进行了含能材料感度测量,发现 1,2-二 (3,3′-二硝氨基-1H-1,2,4-三唑-5-基) 乙烷水合物的撞击感度为 35 J, 1,2-二 (3,3-二硝氨基-1H-1,2,4-三唑-5-基) 乙烷-1,3-丙二铵盐的撞击感度大于 40 J。BAM 落锤撞击感度试验已经被用于各种新型含能材料的撞击敏感性测试。

脆性试验可用于测量固体含能材料在无约束条件下的冲击损伤,损伤特性或韧性是影响固体含能

* **收稿日期:** 2023-12-20; **修回日期:** 2024-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(12272184)

作者简介: 杨 年(1994—),男,博士,主要从事含能材料反应机理研究. E-mail: youngnian@njust.edu.cn

通信作者: 徐 森(1981—),男,博士,研究员,主要从事含能材料危险性分级与控制技术研究. E-mail: xusen@njust.edu.cn

材料低易损特性的因素之一。2009 年, Atwood 等[20] 对 5 种推进剂和 3 种炸药在撞击条件下的损伤水平进行了评估, 试验结果表明, 推进剂的燃烧速率越高, 撞击后收集的样品碎片在密闭爆发器中反应的压力变化率最大值($(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$)越大。他们还指出, $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$ 可以用来表征一些含能材料燃烧转爆轰(deflagration to detonation transition, DDT)的能力, 而一些推进剂不能使用 $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$ 来评估其 DDT 的能力, 因此其 $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$ 与 DDT 之间的关系有待进一步研究。随后, 他们开展了 2 种以蜡作为黏合剂、金属燃料与硝胺类炸药含量不同的熔铸炸药的脆性试验研究[21]。2015 年, Atwood 等[22] 研究了 LX-10 炸药的撞击损伤特性, 表征了 LX-10 在 2 种几何构型下的机械损伤, 并与 B 炸药的试验结果进行了比较, 并为美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)开发断裂模型提供了验证数据。值得注意的是, 推进剂在撞击过程中会发生点火现象, 点火的临界撞击速度可用于评估 PBT 基推进剂在无约束条件下的撞击感度。相较于 BAM 落锤撞击感度试验, 脆性试验使用的药量更高, 提供的撞击速度更加贴合实际生产和运输场景。

Susan 试验是一种弹丸冲击试验, 旨在评估低速冲击条件下含能材料密闭装药的相对爆炸能力。它可以评估一个密闭爆炸系统从高空(如从飞机上)意外下落并以一定速度撞击地面的危险性。Susan 试验中试样的变形特性更接近实际状态, 对于评估爆炸件的冲击安全程度具有重要的现实意义。Weston 等[16] 对多种 HMX 基压装 PBX 炸药进行了 Susan 试验, 并将观察到的撞击过程分为 4 个阶段, 分析了反应时间和反应过程, 获得了各种 PBX 炸药的爆炸量级与撞击速度的关系。Kim 等[11] 研究了 LX-14(HMX 的质量分数为 95.5%)和 DXD-59(HMX 的质量分数为 92%)在低速冲击条件下的行为和反应, 试验结果表明: LX-14 具有非常高的敏感性, 在低速冲击条件下表现出不稳定的反应行为和严重的反应等级; DXD-59 的冲击波超压最大值随撞击速度的增加呈线性增大, 其对破碎冲击具有中等敏感性。Li 等[23] 采用 Susan 试验研究了 HMX 的晶体质量对 HMX 基 PBX 炸药反应特性的影响, 结果表明, PBX 炸药的起始撞击速度阈值随 HMX 晶体质量的提高而增大。

本研究将针对一种高能钝感推进剂——PBT 基推进剂(以 PBT 为黏结剂, A3 为增塑剂, Al 粉、HMX 和 AP 为固相组分), 通过 BAM 落锤感度试验、脆性试验和 Susan 试验分析不同强度撞击下其撞击感度、反应特性和反应等级, 以期为提升 PBT 基推进剂在生产、存储和使用过程中的安全性提供支撑。

1　试　验

1.1　试验样品

PBT 基推进剂的主要成分包括: 黏结剂 PBT(BAMO 与 THF 按摩尔比 3∶2 形成的共聚物, 数均分子量为 5 500)、单质炸药 HMX(中值粒径 D_{50}=20 μm)、氧化剂 AP(D_{50}=100 μm)、还原剂球形铝(D_{50}=10 μm)、增塑剂 A3, HMX 和 AP 的质量分数之和为 57%。共有 4 种 PBT 基推进剂, 各组分的含量见表 1, 其中: ρ 为密度, w_{PBT}、w_{HMX}、w_{AP}、w_{Al}、w_{A3} 分别为 PBT、HMX、AP、Al、A3 的质量分数。

表 1　4 种 PBT 基推进剂的组分

Table 1　Formulation of four kinds of PBT based propellants

Specimen	ρ/(g·cm^{-3})	w_{PBT}/%	w_{HMX}/%	w_{AP}/%	w_{Al}/%	w_{A3}/%
1	1.78	19	0	57	19	5
2	1.78	19	5	52	19	5
3	1.78	19	10	47	19	5
4	1.78	19	15	42	19	5

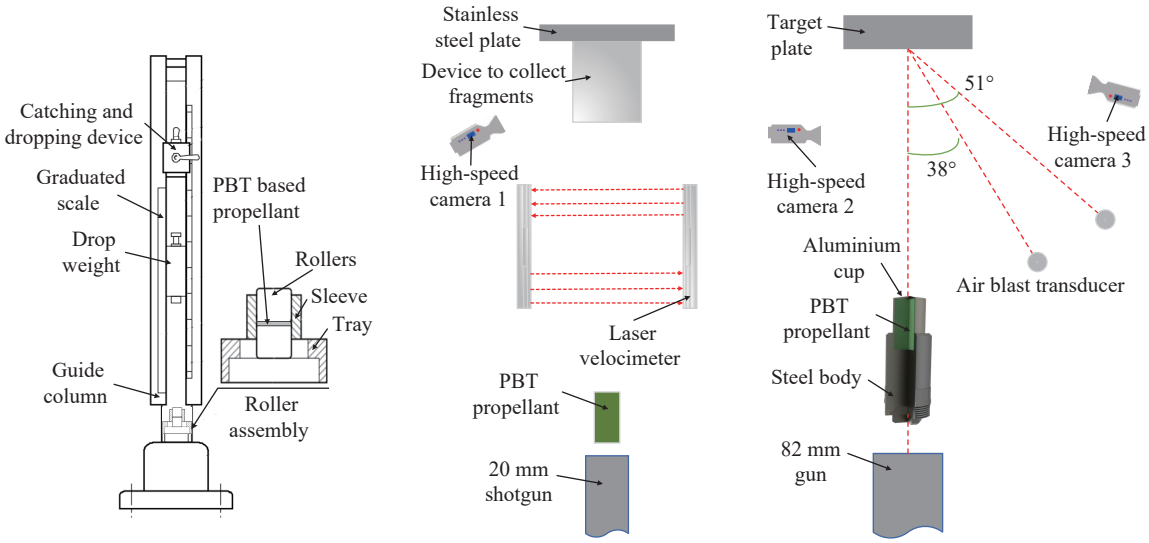
1.2　试验方法

采用 BAM 落锤撞击感度仪测量 PBT 基推进剂的撞击感度, 试验装置如图 1(a) 所示。试验中, 将 PBT 基推进剂裁切成圆片, 圆片直径为 4 mm, 厚度为 3 mm, 体积约为 40 mm^3, 质量约为 0.07 g, 使用

1 kg 的落锤进行撞击感度试验。

无约束撞击试验(脆性试验)装置主要由样品发射装置、碎片回收装置等组成，如图 1(b) 所示。采用 20 mm 口径弹道枪，通过改变发射药(黑火药)的装药量，使 PBT 基推进剂药柱以不同的速度撞击钢板。采用光栅测速仪测量药柱的发射速度，通过高速相机 1(2×10^4 帧/秒)记录药柱撞击全过程，以判断样品是否发生反应。试验中，PBT 基推进剂试样为圆柱形药柱，直径为 18 mm，长度为 22 mm，质量约为 10 g。

Susan 试验布局如图 1(c) 所示。通过改变发射药的装药量，使 82 mm 口径火炮以不同的速度发射 Susan 试验弹，发射速度在 100～300 m/s 之间。炮口距撞击点 4.65 m，弹丸飞行弹道距地面 1.2 m。采用空中压力传感器测量 Susan 试验弹撞击靶板后反应的冲击波超压。2 支空中压力传感器感应点与撞击点相距 4 m，且处于同一水平面，感应点与撞击点的连线和试验弹飞行弹道线的夹角分别为 38°和 51°。高速相机 2(2×10^4 帧/秒)用于评估试验弹的飞行速度，高速相机 3(1.9×10^5 帧/秒)记录试验弹撞击图像。试验中，PBT 基推进剂为圆柱形药柱，直径为 50 mm，长度为 100 mm，质量约为 345 g。



(a) Impact sensitivity test　　(b) Friability test　　(c) Susan test

图 1　试验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the experimental setup

2　分析与讨论

2.1　HMX 含量对 PBT 基推进剂撞击感度的影响

采用 BAM 落锤撞击感度仪测量 PBT 基推进剂的撞击感度，采用特性落高法确定爆炸发生概率为 50% 时的特性落高(H_{50})。每个试样进行 25 发试验。不同 HMX 含量的 PBT 基推进剂的 H_{50} 如表 2 所示，其中：E 为特性落高对应的撞击能量，s 为标准差，δ 为相邻 2 个 PBT 基推进剂试样的特性落高变化率。试验结果表明，w_{HMX} 分别为 0、5%、10%、15% 的 4 种 PBT 基推进剂的 H_{50} 分别为 56.46、50.83、50.21 和 49.82 cm，相邻 2 个 PBT 基推进剂试样的特性落高变化率分别为 11.08%、1.23% 和 0.78%，说明随着 HMX 含量的增加，PBT 基推进剂的特性落高减小，撞击感度增大，但特性落高的减小幅度放缓。

PBT 基推进剂具有良好的塑性，在落锤的作用下在上、下击柱之间做径向运动，直至填满上、下击柱之间的所有空隙，期间 PBT 基推进剂内部各主要固体颗粒发生摩擦作用；随着上击柱持续向下运动，上击柱将挤压各固体颗粒使其发生破碎、剪切，从而引发点火。根据配方中 HMX、AP 和 Al 颗粒尺寸(D_{50} 分别为 20、100、10 μm)可知，随着 HMX 的加入，较小的 HMX 颗粒将填入较大颗粒 AP 与 AP 之间的缝隙，导致 HMX 与 HMX、HMX 与 Al、HMX 与 AP 颗粒之间相较于没有加入 HMX 时的 AP 与 AP、

AP 与 Al 之间的空隙更小，受到击柱挤压时固体颗粒更容易发生破碎、剪切，更容易发生点火。宏观上表现为随着 HMX 含量的增加，PBT 基推进剂的特性落高减小，撞击感度增大。然而，PBT 基推进剂内部各组分之间的空隙是有限的，特性落高不会一直减小，最终趋于一个定值。

表 2　4 种 PBT 基推进剂的撞击感度测量结果

Table 2　Impact sensitivity test results of four kinds of PBT based propellants

Specimen	w_{HMX}/%	H_{50}/cm	E/J	s/cm	δ/%
1	0	56.46	5.646	1.78	
2	5	50.83	5.083	2.03	11.08
3	10	50.21	5.021	1.78	1.23
4	15	49.82	4.982	1.69	0.78

2.2　HMX 含量对 PBT 基推进剂撞击点火能量阈值的影响

在脆性试验中，PBT 基推进剂以不同的速度撞击钢板，撞击后推进剂试样快速发生形变。当撞击速度较低时，试样只发生较大的形变，形成大量大小不一的碎片；随着撞击速度的增大，撞击后试样在撞击面发生点火，但试样并不能持续燃烧，会快速熄灭。这是由于在外部条件相同的情况下，撞击点火的临界速度（v_{cri}）只与 PBT 基推进剂本身的组分及内部结构有关。脆性试验中的 v_{cri} 可以很好地表征 PBT 基推进剂在撞击条件下的撞击感度。

如图 2 所示，当 w_{HMX} 分别为 0、5%、10% 和 15% 时，PBT 基推进剂的 v_{cri} 分别为 168、147、136、131 m/s。随着 HMX 含量的增加，PBT 基推进剂的 v_{cri} 逐渐减小，即撞击感度升高，与 BAM 落锤撞击感度测试结果一致。该现象可以归因于低速撞击点火时 PBT 基推进剂的撞击面与撞击钢板之间产生摩擦、破碎和剪切等作用，且作用强度与固相组分粒径有关，粒径越大，各组分间的空隙越大，越不易点火。随着 HMX 含量的增大，HMX 颗粒将填入固相组分间的空隙，使空隙变小，试样受到撞击时更容易点火。然而，PBT 基推进剂中的空隙是有限的，随着 HMX 含量的增大，剩余空隙量减少，因而 v_{cri} 的降幅减小。对比脆性试验和撞击感度试验结果可以发现，2 种撞击试验的结果相似，且互相印证。

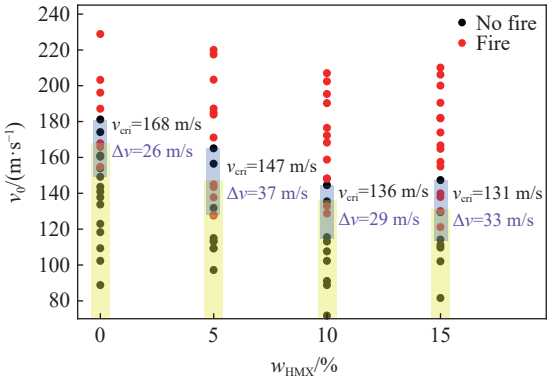


图 2　4 种 PBT 基推进剂点火的临界撞击速度

Fig. 2　Critical impact ignition velocity of four kinds of PBT based propellants

此外，一些试样在发射速度超过 v_{cri} 时依然没有点火，一些试样在发射速度小于 v_{cri} 时已经点火，说明 v_{cri} 存在一定的区间。w_{HMX} 分别为 0、5%、10% 和 15% 的 PBT 基推进剂的 v_{cri} 误差区间（Δv）分别为 26、37、29 和 33 m/s，均在 30 m/s 左右。观察高速摄影结果可以发现，这一方面是由大量试验的系统误差造成的，另一方面受试样与钢板撞击接触面大小的影响，即当撞击速度一定时，撞击接触面越大，空隙压缩过程中受到的力越小，越不容易形成热点，反之，撞击接触面越小，越容易点火。

为了进一步表征 PBT 基推进剂撞击点火能量特征值，取撞击点火前后相邻 2 张图像（时间间隔 Δt=50 μs），如图 3 所示，统计像素点数量变化，计算 PBT 基推进剂的长度变化，由此计算撞击后 50 μs 内的平均速度，即

$$\bar{v} = (L_0 - L_{50\,\mu s})/\Delta t \tag{1}$$

式中：$\bar{v}$为 0～50 μs 间试样飞行的平均速度，m/s；L_0为试样撞击前的长度，mm；$L_{50\,\mu s}$为撞击 50 μs 后试样的长度，mm。

由于试样的初始速度 v_0 已知，则平均速度 $\bar{v}$ 的另一种近似算法为

$$\bar{v} = (v_0 + v_{50\,\mu s})/2 \tag{2}$$

式中：$v_{50\,\mu s}$ 为撞击 50 μs 后的速度。$v_{50\,\mu s}$ 可近似为

$$v_{50\,\mu s} = 2\bar{v} - v_0 \tag{3}$$

撞击能量主要来自药柱撞击前后的动能变化，即药柱的初始动能减去 50 μs 后的剩余动能

$$\Delta E = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_{50\,\mu s}^2 \tag{4}$$

式中：ΔE 为撞击后试样的能量变化，J/g。

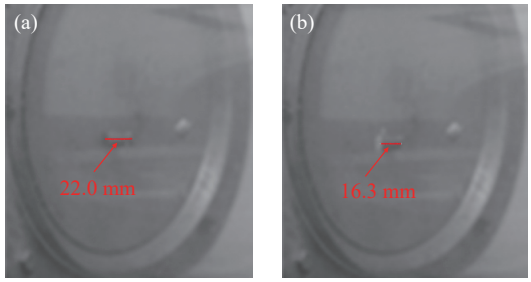


图 3　撞击前 (a) 和撞击 50 μs 后 (b) PBT 基推进剂图像（试样 1）

Fig. 3　Images of PBT based propellant before impact (a) and 50 μs after impact (b) (specimen 1)

为了提高可比性，进行单位质量撞击能量换算，即

$$\Delta E' = \frac{10\Delta E}{\rho S(L_0 - L_{50\,\mu s})} \tag{5}$$

式中：$\Delta E'$ 为单位质量撞击点火能量，J/g；S 为撞击面横截面积，cm^2。

通过以上公式计算及数据分析，可以得到 v_{cri} 条件下单位质量撞击点火临界能量。由图 4 可知，当 w_{HMX} 分别为 0、5%、10% 和 15% 时，脆性试验获得的 PBT 基推进剂的单位质量撞击点火临界能量分别为 106.68、99.61、90.66 和 88.68 J/g，即单位质量撞击点火临界能量随着 HMX 含量的增加而减小。与 BAM 撞击感度试验得到的单位质量撞击点火临界能量相比，脆性试验得到的单位质量撞击点火临界能量要大得多，提高了 20%～40%。这一方面是由撞击药量增大引起的（在常规撞击感度试验中，增加药量需要更高的点火能量，从而提高了试样的特性落高）；另一方面则由于脆性试验中 PBT 基推进剂的撞击面更大，试样质量更大，撞击速度更高（在 BAM 撞击感度试验中，1 kg 落锤高度一般不超过 1 m，即下落速度不大于 5 m/s，撞击速度远小于脆性试验试样的撞击速度），相较于 BAM 撞击感度试验，需要更高的能量进行点火。在实际生产和使用过程中，试样不可避免地会受到各种撞击作用，获得其在撞击刺激下撞击点火临界能量是表征其撞击安全性的一个十分关键的安全特性参数，结合 BAM 落锤撞击感度与脆性试验结果，可以更加全面地表征这一特性。

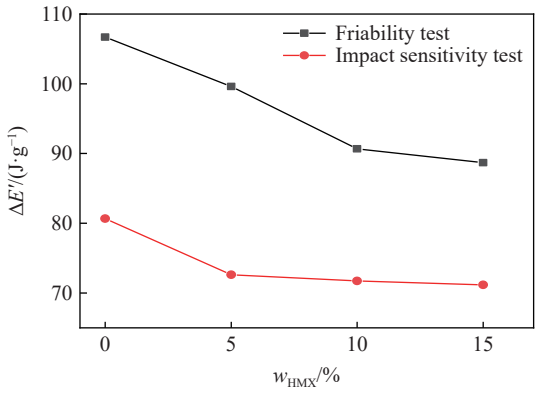


图 4　HMX 的质量分数与 PBT 基推进剂的 $\Delta E'$ 的关系

Fig. 4　Relationship between the mass fraction of HMX and $\Delta E'$ of PBT based propellants

2.3　HMX 含量对 PBT 基推进剂非冲击点火后反应等级的影响

冲击波超压峰值反映了 PBT 基推进剂在不同撞击速度下的整体反应等级。不同 HMX 含量的 PBT 基推进剂非冲击点火后的冲击波超压峰值 Δp_{max} 如图 5 所示。当撞击速度在 120～300 m/s 区间时，4 种 PBT 基推进剂的冲击波超压峰值在 18～32 kPa 之间，其中，w_{HMX} 为 0、5% 和 15% 的 PBT 基推进剂在最大撞击速度下的冲击波超压峰值均小于 30 kPa，而 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂在最大撞击速度下的冲击波超压峰值大于 30 kPa，说明 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂的反应较其他 3 种配方更剧烈。

联合国《试验和标准手册》系列 7(c) 中关于 Susan 试验的判别标准指出：当撞击速度为 333 m/s 时，若 5 次反应的冲击波超压峰值平均值大于或等于 27 kPa，则受试物质不是极不敏感物质。为此，选取反应冲击波超压峰值 27 kPa 对应的撞击速度为临界值，称为 27 kPa 临界撞击速度。由图 5 可知，w_{HMX} 分

别为 0、5%、10% 和 15% 的 PBT 基推进剂的 27 kPa 临界撞击速度分别为 241.36、230.69、233.00 和 241.97 m/s, 均小于 333 m/s。由此推断, 4 种 PBT 基推进剂均不是极不敏感物质。另外, 4 种不同 HMX 含量的 PBT 基推进剂的 27 kPa 临界撞击速度差别不大, 并且 w_{HMX}=0 和 w_{HMX}=15% 的 PBT 基推进剂的 27 kPa 临界撞击速度接近, 说明两者具有相似的反应等级, 类似地, w_{HMX}=5% 和 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂具有相似的反应等级。

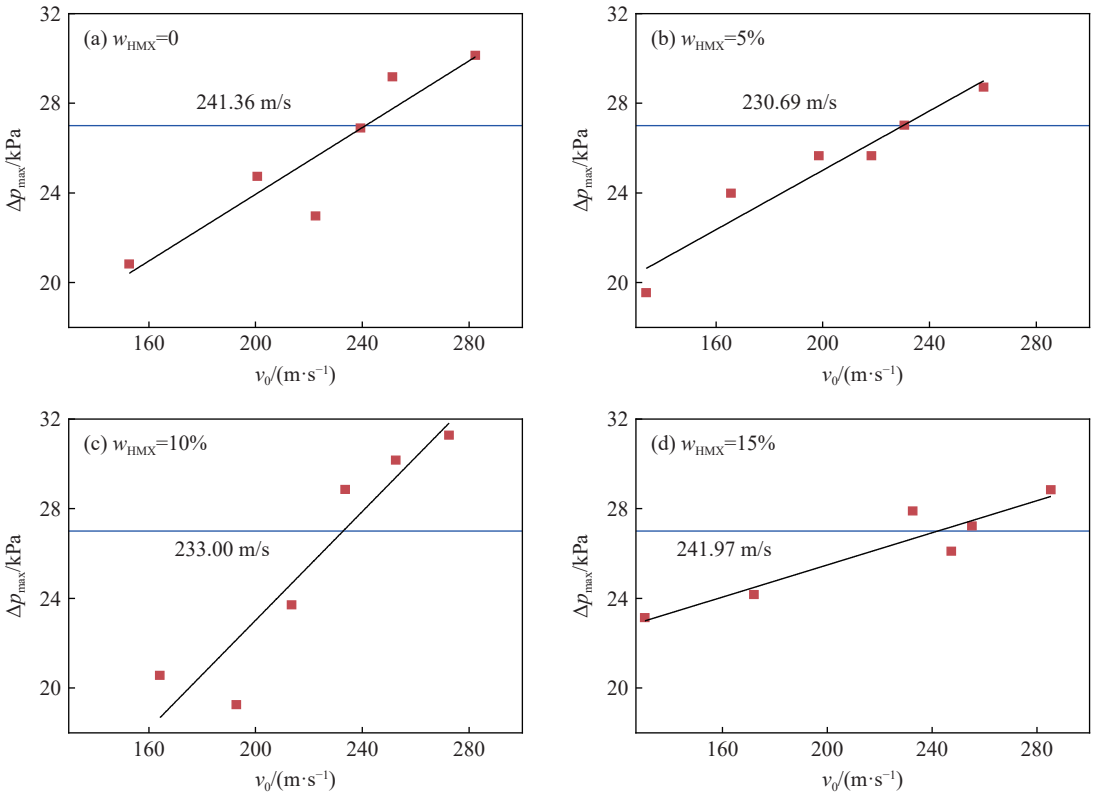
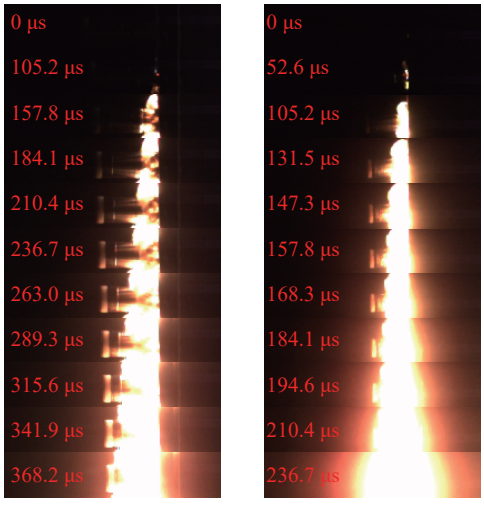


图 5　不同撞击速度下 4 种 PBT 基推进剂的冲击波超压峰值

Fig. 5　Shockwave overpressure peaks of four kinds of PBT based propellants after ignition with different impact velocities

为了研究 PBT 基推进剂的反应过程, 需要观察试样撞击过程中的反应状态。高速相机 3 记录的 Susan 试验弹体撞击过程图像, 如图 6 所示。在撞击速度为 152.7 m/s 的情况下: 105.2 μs 时, 撞击端面下部出现微弱的火光; 157.8 μs 时, 火光发生扩展, 并从上下两侧同时透出; 在 157.8～289.3 μs 之间, 火光在上下两侧继续扩展; 289.3 μs 时, 火光覆盖撞击端面, 而后继续扩大, 直至完全覆盖 Susan 试验弹体。当撞击速度增大至 272.5 m/s 时: 52.6 μs 时, 撞击端面上沿和下沿同时出现 2 个火光点; 105.2 μs 时, 火光均匀地出现在撞击端面上方, 并完全覆盖撞击端面; 随着试验弹体继续向前运动, 火光继续扩展, 直至完全覆盖弹体。随着撞击速度的提高, 撞击端面较早地出现了火光, 并被高速相机记录。当撞击速度较低时, 撞击端面的火光扩散得不均匀, 说明撞击后撞击端面的



(a) v_0=152.7 m/s　　(b) v_0=272.5 m/s

图 6　不同撞击速度下 PBT 基推进剂反应变化过程

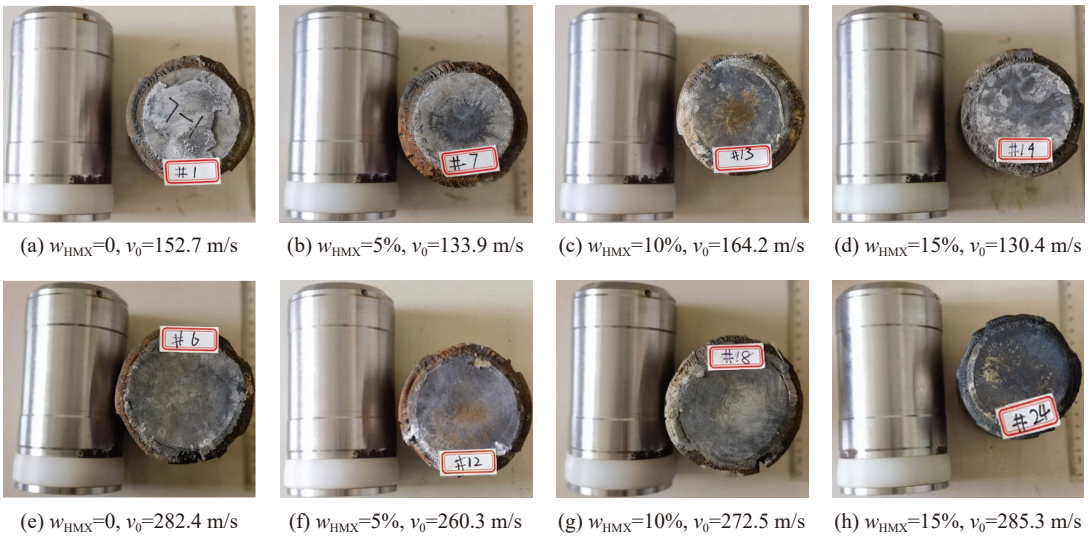
Fig. 6　Reaction changes of PBT based propellants after ignition with different impact velocities

PBT 基推进剂反应并不均匀；当撞击速度较高时，撞击端面的火光扩散得均匀，且扩散速度较快，说明撞击后撞击端面处 PBT 基推进剂反应均匀。

结合文献报道与分析[14] 可知，Susan 试验弹体撞击靶板瞬间，撞击端面成为高温高压接触面，使撞击端面附近的 PBT 基推进剂发生形变、破碎和热分解等，但这一过程因铝壳的遮蔽而无法被观察到；试验弹体继续向前运动，铝壳与 PBT 基推进剂发生形变，撞击端面与靶板齐平，然后铝壳沿径向扩展，PBT 基推进剂也将发生形变，填入空隙之间；随后，铝壳继续形变，在轴向上产生裂缝，着火点的火光和未反应的 PBT 基推进剂碎片沿着裂缝透出和飞出，此时才观察到火光，这一现象出现的时间随着撞击速度的增加而减短。提高撞击速度时，撞击后撞击端面的着火点更多，反应等级更高，沿着铝壳裂缝透出的火光更均匀，火光扩展速度也更快。

Susan 试验弹体撞击靶板后，经过 50～110 μs 延迟才出现火光。观测到的火光是撞击端面的 PBT 基推进剂在撞击挤压、流动摩擦和加热等作用下受热分解形成着火点，着火点燃烧并沿着铝壳破裂处透出光线造成的。随着撞击速度的增大，延迟时间缩短，透出的火光更均匀地分布在撞击端面四周，火光的扩展速度也更快。需要指出的是，被钢体和铝帽包裹（见图 1(c) 所示）的 PBT 基推进剂反应时的火光扩散过程被屏蔽，无法通过高速相机记录的图像进行判断。

为了进一步分析试验过程中 PBT 基推进剂的反应特性，通过撞击后钢体与药柱的接触面、钢体形变和钢体飞行距离判断 PBT 基推进剂冲击后的反应特性。如图 7 所示，接触面有明显的反应痕迹，且随着撞击速度的增加，接触面的反应效应出现较大的差异。当撞击速度较低时，接触面较为平整，对于 w_{HMX} 为 0、10% 和 15% 的 3 种工况，钢体接触面没有明显的爆炸痕迹；随着撞击速度的增加，对于 w_{HMX} 为 0、5%、10% 和 15% 的 4 种工况，钢体接触面均出现明显的爆炸点，同时发生明显的形变。一般而言，反应等级可分为无反应、燃烧、爆燃、爆炸、部分爆轰和爆轰。结合撞击后钢体的损伤程度和冲击波超压峰值可以有效地评估 PBT 基推进剂的反应等级。观测 24 发试验钢体上钢环的变化情况和钢体长度，可以发现：钢环均被撕裂，较大的钢体发生了长距离抛射，且当撞击速度较高时，钢体发生了较为严重的塑性变形，说明撞击后 PBT 基推进剂发生了剧烈的反应，反应等级为爆炸和部分爆轰。



(a) w_{HMX}=0, v_0=152.7 m/s　(b) w_{HMX}=5%, v_0=133.9 m/s　(c) w_{HMX}=10%, v_0=164.2 m/s　(d) w_{HMX}=15%, v_0=130.4 m/s

(e) w_{HMX}=0, v_0=282.4 m/s　(f) w_{HMX}=5%, v_0=260.3 m/s　(g) w_{HMX}=10%, v_0=272.5 m/s　(h) w_{HMX}=15%, v_0=285.3 m/s

图 7　撞击后回收的钢体

Fig. 7　Recovered steel body after impact

进一步分析可以得出，试验弹撞击后有 2 次点火过程：第 1 次点火为撞击端面上 PBT 基推进剂因撞击、挤压、受到铝帽加热等作用而发生点火；第 2 次点火是钢体与 PBT 基推进剂的接触面因挤压等作用出现点火。高速相机记录的火光是撞击端面点火及端面点火后反应增长造成的。相关研究结果表明，较强的约束条件更容易使推进剂点火后发展成反应等级较高的反应。因此，在钢环这一较强的

约束下，第 2 次挤压造成的点火更容易集聚能量，致使反应增长，形成更剧烈的反应，从而主导 Susan 试验的反应等级和钢体损伤程度。

如图 8 所示，根据撞击速度与钢体剩余长度（L_r）及剩余动能（E_r）的关系，可以发现：对于 w_{HMX}=0 和 w_{HMX}=15% 的 PBT 基推进剂，当撞击速度处于 120～300 m/s 区间时，钢体剩余长度接近，均大于 90 mm（钢体原长 100 mm），剩余钢体动能接近，均小于 300 J，说明这 2 种 PBT 基推进剂的反应等级相似，均发生了爆炸反应。对于 w_{HMX}=5% 和 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂，当撞击速度大于 220 m/s 时，钢体剩余长度开始迅速变短，前者的钢体剩余长度最小值为 87 mm（撞击速度 260 m/s），后者为 85 mm（撞击速度 272 m/s），同时剩余钢体动能迅速增大，前者的剩余钢体动能最大值为 450 J（撞击速度 260 m/s），后者为 800 J（撞击速度 272 m/s），大于相同撞击速度下 w_{HMX}=0 和 w_{HMX}=15% 的 PBT 基推进剂的剩余钢体动能。综合钢体剩余长度和剩余动能可以发现：撞击速度在 120～220 m/s 区间时，w_{HMX}=5% 和 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂的反应等级为爆炸；撞击速度在 220～300 m/s 区间时，w_{HMX}=5% 和 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂的反应等级变为部分爆轰；撞击速度在 120～300 m/s 范围内时，w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂撞击后，钢体动能大于其他 3 种配方的钢体动能，且具有更高的反应等级。

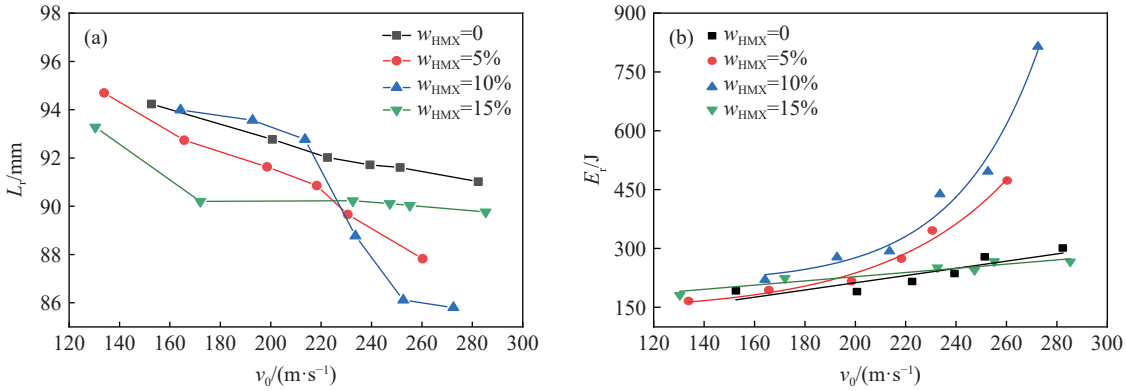


图 8　撞击后钢体的剩余长度及动能

Fig. 8　Residual lengths and kinetic energy of steel bodies after impact

Susan 试验中 60% 的 PBT 基推进剂由铝壳约束，40% 由强度较强的钢壳约束，结合撞击感度与约束强度的耦合作用，进一步分析可知，当 PBT 基推进剂受到撞击时，虽然 w_{HMX}=15% 的 PBT 基推进剂的撞击感度最高，撞击后应该最容易点火，但是其撞击端面受铝帽约束，约束作用较弱，点火后推进剂反应等级无法进一步提升，致使其反应等级不是最高的。对于 w_{HMX}=0 的 PBT 基推进剂，不但撞击感度较低，整体能量也较低，因而反应等级也不高。对于 w_{HMX}=5% 和 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂，其撞击感度适中，能量也适中，撞击后不但能点火，且在铝帽的弱约束下点火后反应增长，反应等级甚至比 w_{HMX}=15% 的 PBT 基推进剂更强，其中 w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂的反应最剧烈。这是撞击感度、推进剂能量、撞击能量和约束强度耦合作用的结果，在相同条件下，w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂相比其他 3 种配方具有更高的反应等级。

3　结　论

为了探究 HMX 含量对 PBT 基推进剂的撞击感度和非冲击点火反应特性的影响，开展了 BAM 落锤撞击试验、脆性试验和 Susan 试验，得到以下结论。

(1) 在 BAM 落锤撞击试验中，对于 w_{HMX} 分别为 0、5%、10%、15% 的 PBT 基推进剂，爆炸概率为 50% 时的特性落高分别为 56.46、50.83、50.21 和 49.82 cm，特性落高随着 HMX 含量的增加而减小，即撞击感度随 HMX 含量的增加而增大，但变化幅度不断减小。

(2) 在脆性试验中，w_{HMX} 分别为 0、5%、10%、15% 的 PBT 基推进剂发生撞击点火的临界速度分别为 168、147、136、131 m/s，撞击点火临界速度随 HMX 含量的增加而降低，但变化幅度逐渐减小，相应

的单位质量撞击点火临界能量分别为 106.68、99.61、90.66、88.68 J/g，比 BAM 落锤撞击测得的撞击点火临界能量高得多（高 20%～40%）。

(3) 在 Susan 试验中，撞击速度在 120～300 m/s 的 24 发试验均发生了反应等级为爆炸或部分爆轰的反应。w_{HMX}=0 和 w_{HMX}=15% 的 PBT 基推进剂的反应等级相似，在 120～300 m/s 的撞击速度范围内，反应等级为爆炸；w_{HMX}=10% 的 PBT 基推进剂的冲击反应等级最高，高于其他 3 种不同 HMX 含量的 PBT 基推进剂，在 120～220 m/s 撞击速度范围内，反应等级为爆炸，撞击速度大于 220 m/s 时，反应等级为部分爆轰。

参考文献：

[1] MIYAZAKI T, KUBOTA N. Energetics of BAMO [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1992, 17(1): 5–9.

[2] 翟进贤, 杨荣杰, 朱立勋, 等. BAMO-THF 复合推进剂能量特性计算与分析 [J]. 含能材料, 2009, 17(1): 73–78.
ZHAI J X, YANG R J, ZHU L X, et al. Calculation and analysis on energy characteristics of composite BAMO-THF propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(1): 73–78.

[3] 张杰凡, 徐森, 刘大斌, 等. PBT 复合固体推进剂的热分解特性 [J]. 固体火箭技术, 2017, 40(6): 752–757.
ZHANG J F, XU S, LIU D B, et al. Thermal decomposition characteristics of PBT composite solid propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(6): 752–757.

[4] 李洋, 陶维斌, 李国平, 等. FT-IR 法研究 PBT 粘合剂的固化反应动力学 [J]. 含能材料, 2018, 26(7): 572–577.
LI Y, TAO W B, LI G P, et al. FT-IR studies on the curing reaction kinetics of PBT binder [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(7): 572–577.

[5] 李洋, 姜磊, 尹必文, 等. PBT 基钝感低特征信号推进剂的力学性能优化研究 [J]. 固体火箭技术, 2021, 44(4): 479–485.
LI Y, JIANG L, YIN B W, et al. Research on mechanical properties optimization of PBT-based insensitive low signature solid propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021, 44(4): 479–485.

[6] DENG S W, WANG S X, ZHOU H W, et al. Molecular dynamics simulation of molecular network structure and mechanical properties of polymer matrix in PBT propellant [J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105723.

[7] PRESTON D N, BROWN G W, TAPPAN B C, et al. Drop weight impact measurements of HE sensitivity: modified detection methods [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 500(18): 182033.

[8] YANG N, MA T, LIU J P, et al. Influences of HMX contents on potential reaction violence and fragmentation degree of PBT-propellants after impact load [J]. AIP Advances, 2022, 12(8): 085202.

[9] WALLACE I G. Spigot intrusion [C]//Proceedings of 26th Department of Defense Explosives Safety Seminar. Miami, USA, 1994.

[10] CHIDESTER S K, TARVER C M, GARZA R. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives: UCRL-JC-127963 [R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1998.

[11] KIM H S, PARK B S. Characteristics of the insensitive pressed plastic bonded explosive, DXD-59 [J]. Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 1999, 24(4): 217–220.

[12] 高大元, 郑保辉, 黄亨建, 等. 高聚物添加剂对 B 炸药撞击感度和作功能力的影响 [J]. 含能材料, 2017, 25(4): 326–332.
GAO D Y, ZHENG B H, HUANG H J, et al. Effect of polymer additives on impact sensitivity and power of composition B [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(4): 326–332.

[13] 阮庆云, 陈启珍. 评价炸药安全性能的苏珊试验 [J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(1): 68–72.
RUAN Q Y, CHEN Q Z. Safety evaluation of explosives by Susan test [J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(1): 68–72.

[14] 代晓淦, 韩敦信, 向永, 等. 苏珊试验中弹体形变的测量和模拟计算 [J]. 含能材料, 2004, 12(4): 235–238.
DAI X G, HAN D X, XIANG Y, et al. The measurement and numerical simulation of the projectile deformation in Susan test [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(4): 235–238.

[15] HUMPHREY J R. Safety handling characteristics of LX-04-1: UCRL-ID-124086 [R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.

[16] WESTON A M, GREEN L G. Data analysis of the reaction behavior of explosive materials subjected to Susan test impacts:

NSA-31-008091 [R]. Berkeley, CA, USA: Brobeck and Associates, 1970.

[17] 周小清, 马卿, 张晓玉, 等. 5,5′-肼基-双四唑的合成与性能 [J]. 含能材料, 2011, 19(3): 361–362.
ZHOU X Q, MA Q, ZHANG X Y, et al. Synthesis and properties of 5,5′-hydrazinebistetrazole [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(3): 361–362.

[18] 王帜, 张文全, 王康才, 等. 3,5-二氨基-2,6-二硝基吡嗪-1-氧化物合成及性能 [J]. 含能材料, 2016, 24(8): 820–824.
WANG Z, ZHANG W Q, WANG K C, et al. Synthesis and property of 3,5-diamino-2,6-dinitropyrazine-1-oxide [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(8): 820–824.

[19] 潘鹏阳, 王霆威, 张祺, 等. 1,2-二 (3,3′-二硝氨基-1H-1,2,4-三唑-5-基) 乙烷及其 1,3-丙二铵盐的合成、晶体和性能 [J]. 含能材料, 2021, 29(8): 732–738.
PAN P Y, WANG T W, ZHANG Q, et al. Synthesis, crystal and properties of 1,2-bis(3,3′-dinitroamine-1H-1,2,4-triazol-5-yl)ethane and its 1,3-propanediamine salt [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(8): 732–738.

[20] ATWOOD A I, FORD K P, BUI D T, et al. Assessment of mechanically induced damage in solid energetic materials [J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2009, 8(5): 391–410.

[21] ATWOOD A I, FORD K P, GENNRICH M T, et al. Melt cast explosive friability studies [J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2012, 11(6): 537–547.

[22] ATWOOD A I, PURIFOY I, WHEELER C J, et al. LX-10 explosive damage studies: 201516 [R]. China Lake, USA: Naval Air Warfare Center, Weapons Division, 2015: 133–267.

[23] LI Y B, ZHENG X. Influence of crystal characteristics on reaction for HMX-based pressed PBXs in the Susan impact test [J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2016, 77(1/2): 34–39.

Influences of HMX Content on the Impact Sensitivity and Non-Shock Initiation Reaction Characteristics of PBT Based Propellants

YANG Nian, MA Teng, GUO Guangfei, WU Sanzhen, XIA Yu, HUANG Yinsheng, LIU Dabin, XU Sen

(*School of Chemistry and Chemical Engineering*, *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: In order to investigate the effect of HMX content on the impact sensitivity and non-shock initiation reaction characteristics of PBT based propellants, BAM impact sensitivity tests, friability tests and Susan tests were carried out. The experimental results show that with the increase of HMX content, the characteristic drop height of PBT based propellants at 50% explosion probability (H_{50}) decreases, indicating that the impact sensitivity increases with higher HMX content. In friability tests, the critical non-shock initiation velocities for the PBT based propellants with the HMX mass fraction of 0, 5%, 10%, and 15% are 168, 147, 136, and 131 m/s, respectively, showing a decline in the critical non-shock initiation velocity as HMX content rises. In Susan tests, four different kinds of PBT based propellants react as explosion or partial detonation at velocities range of 120 m/s to 300 m/s. The PBT based propellant with the HMX mass fraction of 10% exhibits more intense reactions compared to the other three PBT based propellants at the same velocity.

Keywords: HMX; PBT based propellants; impact sensitivity; non-shock initiation; reaction characteristics