

文章编号: 1003-1480 (2023) 01-0063-06

HTPE 推进剂机械刺激下的安全性研究

李 扬¹, 徐 森^{1,2}, 马 腾¹, 徐飞扬¹, 刘静平², 白大宇¹

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094; 2. 国家民用爆破器材质量监督检测中心, 江苏 南京, 210094)

摘 要: 为研究 HTPE 推进剂在机械刺激下的安全性, 采用 BAM 撞击感度仪和摩擦感度仪测试了其临界撞击能量和临界摩擦力, 参考北约 STANAG 4496 标准对其进行破片撞击试验, 测试其在不同破片撞击速度、不同破片撞击角度下的响应等级。结果表明: 该 HTPE 推进剂的临界撞击能量为 7J, 其在撞击刺激下的安全性高于常规丁羟推进剂, 临界摩擦力为 54N, 对摩擦刺激敏感; 撞击角度 90° 时, 破片速度增大 (2 100~2 300 m/s), HTPE 推进剂响应等级均为 V 类 (燃烧); 破片速度为 1 850 m/s、撞击角度 60° 时, HTPE 推进剂响应等级为 III 类 (爆炸); 撞击角度由 90° 转为 60° 时, HTPE 推进剂受到的摩擦作用增强, 响应等级由燃烧转为爆炸, 其破片撞击安全性下降。

关键词: HTPE 推进剂; 临界撞击能量; 临界摩擦力; 破片速度; 撞击角度; 响应等级

中图分类号: TJ410.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.013

Study on Safety of HTPE Propellant under Mechanical Stimulation

LI Yang¹, XU Sen^{1,2}, MA Teng¹, XU Fei-yang¹, LIU Jing-ping², BAI Da-yu¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2. National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials, Nanjing, 210094)

Abstract: In order to study the safety of HTPE propellant under mechanical stimulation, the BAM impact sensitivity instrument and the BAM friction sensitivity instrument were used to test its critical impact energy and critical friction. According to NATO STANAG 4496 standard, fragment impact tests were carried out to test its response grade under different fragment impact speeds and different fragment impact angles. The results show that the critical impact energy of HTPE propellant is 7J, and the safety of HTPE propellant under impact stimulation is higher than that of the common butylated propellant. Its critical friction is 54N, HTPE propellant is sensitive to friction stimulation. When the impact angle is 90°, as the fragment velocity increasing from 2 100m/s to 2 300m/s, both of which response grade are classified as class V (combustion). When the fragment velocity is 1 850m/s and the impact angle is 60°, the HTPE propellant response grade is class III (explosion). When the impact angle changes from 90° to 60°, the HTPE propellant is subjected to the increased friction, the response grade changes from combustion to the explosion, and the fragment impact safety of the HTPE propellant decreases.

Key words: HTPE propellant; Critical impact energy; Critical friction; Fragment velocity; Impact angle; Response grade

推进剂在运输、储存、维护及使用过程中可能遇到静电、冲击、撞击、摩擦、热等不可控刺激, 其中机械撞击是最常遇到的刺激之一, 尤其在作战过程中, 一旦遇到子弹或高速碎片冲击, 存在发生爆轰危

险, 对人员、设备及周围环境造成极大威胁^[1-2]。

HTPE 推进剂固含量可达 80% 以上, 具有较高的比冲、优良的力学性能和钝感特性, 是当下高能钝感推进剂研究领域的热点^[3]。吕玺等^[4]对 HTPE 钝感推

收稿日期: 2022-07-19

作者简介: 李扬 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事 HTPE 推进剂安全及应用研究。

通讯作者: 刘静平 (1974-), 女, 高级工程师, 主要从事含能材料应用研究。

基金项目: 航空航天化学动力实验室科技开放研究基金项目 (STACPL220181B01)。

进剂进行了子弹撞击和快烤试验,结果表明,HTPE 钝感推进剂在两种试验中的响应程度均为燃烧,具有较低的易损性。Wang 等^[5]研究了不同尺寸的 HTPE 固体推进剂的热稳定性,首次采用等转化率 Friedman 法,计算了 HTPE 固体推进剂的热分解动力学参数。Wu 等^[6]研究发现随着 AP 含量(52%~67%)的增加和 AP 粒径(400~5 μ m)减小,HTPB 推进剂慢烤反应会越剧烈。Yuan 等^[7]研究 PCL 对于 HTPE 推进剂热分解行为的影响,发现试验压力 0.1MPa 时,PCL 的引入可以促进 HTPE/PCL 推进剂中 RDX 和 AP 的分解。

撞击感度与摩擦感度可定量表征推进剂受到撞击或摩擦刺激时发生爆炸的难易程度,反映推进剂机械刺激安全性。大量研究证明,推进剂机械感度受其组分的分子结构、粒度和配比的影响^[8-12]。

破片撞击试验是评估推进剂易损性的重要试验方法之一^[13],试验结果的响应等级可分为无显著反应、燃烧、爆燃、爆炸和爆轰,所对应的破片撞击安全性依次降低。北约 STANAG 4496 规定了破片撞击试验所用破片的各项参数^[14],包括其材质、形状、质量和速度,目前国外大部分测试中心采用北约 STANAG 4496 规定的标准破片进行试验,但针对特殊的试验目的也常用一种直径 12.7mm 的软钢立方体破片。Xu 等^[15]采用量纲分析与试验结合的方法,得到单一小质量破片冲击起爆铝柱壳装药的比动能判据。王建灵等^[16]对 CMDB 推进剂、NEPE 推进剂进行了破片撞击试验,CMDB 推进剂响应等级为爆炸,NEPE 推进剂的响应等级为爆轰。刘健等^[17]研究了 HMX 基含铝炸药的低易损性能,其中,12.7mm 破片撞击试验中,样品响应等级为燃烧。Peng 等^[18]采用不同质量的破片(6, 8, 10, 12 g)对带有 10mm 厚防护层的 H6 炸药进行撞击试验,发现破片质量(撞击速度为 2 000~2 200m/s)不低于 10g 时,H6 炸药会发生爆燃甚至爆轰反应。王旭等^[19]研究 PBT 基推进剂在破片撞击刺激下的反应等级,发现 P-01、P-02 推进剂反应级别均为燃烧。Zhao 等^[20]研究结果表明,RDX 基含铝炸药在破片撞击下的安全性随炸药温度的升高先上升(25~111 $^{\circ}$ C)后下降(111~170 $^{\circ}$ C)。

本文以 HTPE 推进剂为研究对象,对其进行临界撞击能量测试、临界摩擦力测试、破片撞击试验,探究 HTPE 推进剂在机械刺激下的安全性,对于推进剂的机械刺激安全性研究具有一定意义。

1 试验

1.1 试验样品

试验样品为 HTPE 推进剂,推进剂配方主要组分为 HTPE/AP/Al,固含量 80%。临界撞击能量和临界摩擦力测试中,每次试验用药量为(40 $\pm$ 1)mg。破片撞击试验中,破片装药壳体外径为 162mm,长度为 773mm;装药量约 19.20kg,试验样品见图 1。



图 1 破片撞击试验样品

Fig.1 Fragment impact test sample

1.2 临界撞击能量测试

采用德国 BAM 撞击感度仪^[21],开展样品的临界撞击能量试验,装置示意图见图 2。

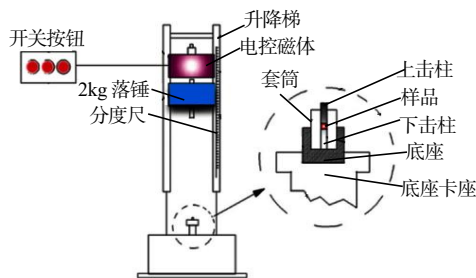


图 2 BAM 撞击感度仪

Fig.2 BAM impact sensitivity instrument

BAM 撞击感度仪工作原理:试验装样时,先将套筒装入底座,下击柱放入套筒,将样品装入套筒,上击柱放入套筒,使得样品位于上、下击柱之间,完成放样。开关按钮控制电控磁体吸放落锤,升降梯可将落锤和电控磁体固定在分度尺特定刻度,分度尺刻度即为此位置距离样品的高度。根据每次试验条件将落锤和电控磁体推至分度尺特定刻度,升降梯固定落锤位置,通过操控开关按钮,释放落锤(落锤做自由落体运动),击打上击柱,进而给予样品特定的撞击刺激。此次试验使用 2kg 落锤,落锤在不同高度下给

予试样的撞击能量不同, 撞击能量计算公式为:

$$E = w \cdot h \cdot 10 \quad (1)$$

式(1)中: E 为样品受到的撞击能量, J; w 为落锤的质量, kg; h 为落锤的高度, cm。

临界撞击能量 E_c 的判定: 选择 1 个落锤高度 h 进行试验, 每个落锤高度最多进行 6 次试验, 样品在连续 6 发试验中都没有显著反应 (即没有发生爆炸), 记为“-”, 升高 h (即增加撞击能量 E), 试样发生爆炸反应, 记为“+”, 则降低 h (即减小撞击能量 E), h 的升降梯度为 5cm (即加减小撞击能量梯度为 1J)。当测得 2 个相邻的撞击能量中, 低撞击能量连续 6 发均为“-”, 高撞击能量在 6 发试验内出现“+”, 即可判定高撞击能量即为临界撞击能量, 记为 E_c 。

1.3 临界摩擦力测试

采用德国 BAM 摩擦感度仪, 开展样品的临界摩擦力试验, 装置示意图见图 3^[21]。

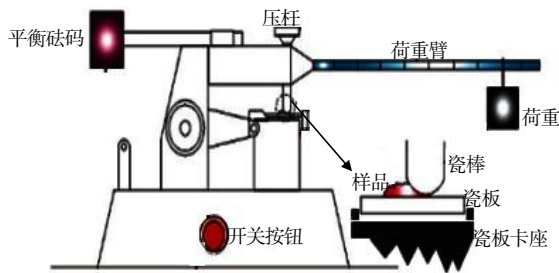


图 3 BAM 摩擦感度仪

Fig.3 BAM friction sensitivity instrument

BAM 摩擦感度仪工作原理: 首先需调整荷重臂的平衡, 将瓷棒装入压杆中, 将瓷板装入瓷板卡座中, 不装样品, 也不装荷重, 旋转平衡砝码, 调整荷重臂的平衡, 使得荷重臂不受其他外力时能保持水平, 此时瓷棒接触到瓷板但对瓷板产生的压力为零。完成荷重臂的平衡后, 逆时针抬起荷重臂, 在瓷板上装入样品, 放下荷重臂使得瓷棒可以压在样品上, 根据每次试验条件, 在荷重臂的特定位置装上特定荷重, 此时瓷棒会给予样品一个特定压力, 操控开关按钮, 瓷棒保持静止, 瓷板会先向右滑动后向左滑回到初始位置, 进而给予样品特定的摩擦刺激。

临界摩擦力 F_c 的判定: 不同荷重或荷重装在不同位置会对样品产生不同的摩擦力, 记为 F , 临界摩擦力的测试方法与临界撞击能量测试方法相同, 当测

得 2 个相邻的摩擦力 F 中, 小的摩擦力连续 6 发均为“-”, 大的摩擦力在 6 发试验内出现“+”, 即可判定大的摩擦力即为临界摩擦力, 记为 F_c 。

1.4 破片撞击试验

试验时由破片发射装置发出高速破片, 高速破片穿过 2 个测速靶板后击中 HTPE 推进剂, 给予其强烈的机械刺激。破片撞击试验系统工作原理: 破片撞击试验装置中包括破片发射装置、测速装置、测压装置、验证板、相机、圆柱石墩。破片发射装置包括破片与 30mm 口径火炮, 用于发射高速破片; 测速装置包括测速靶板与高速录像仪, 通过高速录像仪可测得破片通过 2 个测速靶板所用时间, 进而计算出破片速度; 测压装置用于测试样品反应产生的冲击波超压; 相机记录样品反应过程现象; 验证板用于分析样品的响应等级, 圆柱石墩用于固定样品位置。

破片规格: 质量为 18.6g, 直径为 14.3mm, 材质为 20 号钢, 经过锐边倒钝处理, 破片顶端的角度为 160° , 破片实物见图 4 (a), 设计参数见图 4 (b)。

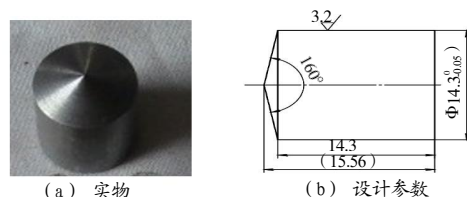


图 4 破片

Fig.4 Fragment

试验场地三维图见图 5。

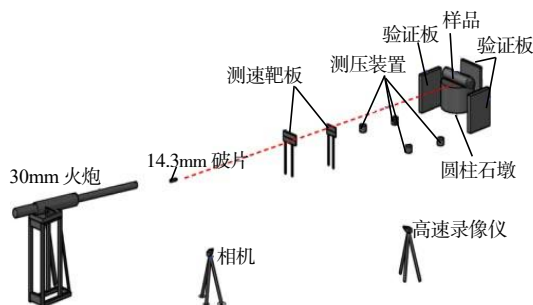


图 5 试验场地三维图

Fig.5 Three-dimensional view of the test site

测压装置: 布置 A、B 两条测压带, A1、B1 为水平方向上距离样品 2m 处的测压点, A2、B2 为水平方向上距离样品 4m 处的测压点。验证板: 边长 1m, 厚 0.5cm, 3 块验证板竖立布置于样品左、右、后 3

侧，与样品水平距离为 1m。

2 结果及分析

2.1 HTPE 推进剂撞击敏感度

HTPE 推进剂临界撞击能量 E_C 测试结果见表 1，其与常规丁羟推进剂撞击感度的对比见表 2。

表 1 HTPE 推进剂临界撞击能量试验结果

Tab.1 Critical impact energy test results of HTPE propellant

试验条件			E/J	结果	E_C/J
$T/^\circ\text{C}$	w/kg	h/cm			
25	2	35	7	1/6	7
		30	6	0/6	

表 2 HTPE 推进剂与常规丁羟推进剂撞击感度对比

Tab.2 Comparison of impact sensitivity between HTPE propellant and the common butylated propellant

	HTPE 推进剂	常规丁羟推进剂 ^[22]
固含量/%	80	88
E/J	7	2.4
爆炸概率/%	< 50	50

由表 1 可知，在试验条件 $w=2\text{kg}$ ， $h=30\text{cm}$ 时，连续 6 发试验结果均为“-”，样品在 $E=6\text{J}$ 的刺激下未发生明显反应。试验条件 $w=2\text{kg}$ ， $h=35\text{cm}$ 时，连续 6 发试验中前 5 发试验结果为“-”，样品未发生显著反应；第 6 发试验结果为“+”，样品在 $E=7\text{J}$ 的刺激下发生爆炸。因此，HTPE 推进剂的临界撞击能量 $E_C=7\text{J}$ 。在 $E=7\text{J}$ 时，6 发试验中仅 1 发试验结果为“+”，保守估计在 $E=7\text{J}$ 时，其爆炸概率小于 50%。由表 2 可知，与文献[22]中常规丁羟推进剂（HTPB/AP/Al）相比，该 HTPE 推进剂在较高的撞击能量下其撞击感度更低，说明该 HTPE 推进剂在撞击刺激下的安全性高于常规丁羟推进剂。

2.2 HTPE 推进剂摩擦敏感度

HTPE 推进剂临界摩擦力 F_C 测试结果见表 3。

表 3 HTPE 推进剂临界摩擦力试验结果

Tab.3 Critical friction test results of HTPE propellant

试验条件		结果	F_C/N
$T/^\circ\text{C}$	F/N		
25	160	1/1	54
	120	1/1	
	80	1/1	
	60	1/1	
	54	1/2	
	48	0/6	

由表 3 可知，在摩擦力 $F=160\text{N}$ 、 120N 、 80N 、 60N 时，进行了 1 发试验，试验结果均为“+”，样品发生爆炸反应。在摩擦力 $F=54\text{N}$ 时，进行了 2 发试

验，第 1 发试验结果为“-”，样品无明显反应；第 2 发试验结果为“+”，样品发生爆炸反应。在摩擦力 $F=48\text{N}$ 时，连续 6 发试验结果为“-”，样品均无明显反应。因此，HTPE 推进剂的临界摩擦力 $F_C=54\text{N}$ ，对摩擦的灵敏度为“高”^[23]，即在摩擦刺激作用下安全性低。

2.3 HTPE 推进剂破片撞击敏感度

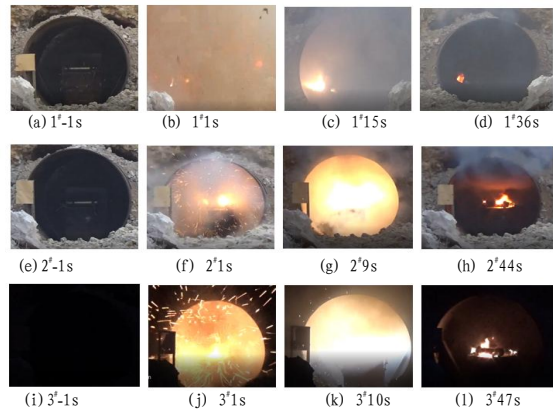
HTPE 推进剂破片撞击试验结果见表 4，其中撞击角度为破片运动轨迹与弹体轴线夹角；试验过程中样品反应如图 6 所示，试验后壳体与验证板情况见图 7。

表 4 破片撞击试验结果

Tab.4 Fragment impact test results

试验序号	破片速度 $/(m \cdot s^{-1})$	撞击角度/ $^\circ$	验证板结果	A1 /MPa	A2 /MPa	B1 /MPa	B2 /MPa
1#	1 850	60	发生显著形变	0.300	0.098	损坏	损坏
2#	2 100	90	无显著形变	-	-	-	-
3#	2 300	90	无显著形变	-	-	-	-

注：“-”表示未测到明显冲击波超压



注：图中 1# -1s 表示 1# 试验中破片击中样品前 1s 样品的状态，1# 1s 表示 1# 试验中破片击中样品后第 1s 样品的状态，其余同理。

图 6 样品反应过程

Fig.6 Sample reaction process

由图 6 可知，1# 试验中，破片击中样品后 1s 内样品发生爆炸，5s 后可观察到燃烧现象，36s 后逐渐熄灭；2# 试验中，破片击中样品后 1s 内样品发生燃烧，9s 时燃烧最为剧烈，44s 后逐渐熄灭；3# 试验中，破片击中样品后 1s 内样品发生燃烧，10s 时燃烧最为剧烈，47s 后逐渐熄灭。

空中点源爆炸冲击波超压的计算式^[24]为：

$$P=0.102\frac{\sqrt[3]{m}}{d}+0.399\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{d}\right)^2+1.26\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{d}\right)^3 \quad (2)$$

式（2）中： P 为爆炸在空气中某一点产生的冲击波超压，MPa； m 为 TNT 当量，kg； d 为该点距

离爆心的距离, m。

由式(2)反推出爆炸反应的 TNT 当量, 1[#]试验中 A1、A2 测压点的压力值所对应爆炸反应的 TNT 当量结果见表 5。

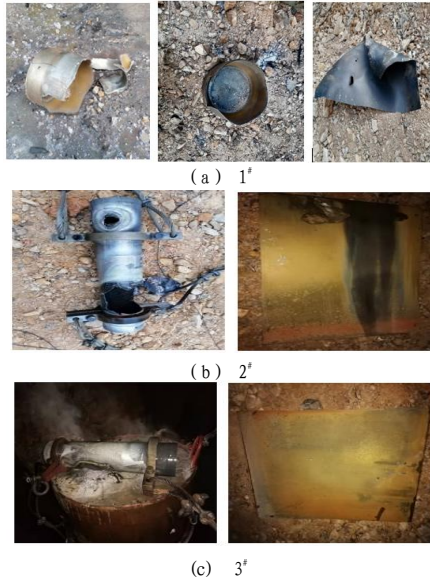


图 7 试验后壳体与验证板

Fig.7 Shells and witness plates after test

表 5 1[#]样品爆炸反应的 TNT 当量

Tab.5 TNT equivalent of 1[#] sample explosive reaction

A 测压带	冲击波超压/MPa	TNT 当量/kg
A1 (2m 处)	0.300	1.10
A2 (4m 处)	0.098	1.37

由表 5 可知, A1、A2 测压点所对应的 TNT 当量相近, 约为 1.10~1.37kg, 样品仅发生了部分爆炸, 说明测压装置所测数据具有可靠性。由表 4、图 6~7 可知, 破片速度为 1 850m/s、撞击角度为 60° 时, 样品先发生部分爆炸后发生燃烧, 试验后壳体完全破碎, 验证板发生明显变形, A 测压带的测压点测得冲击波超压, 样品的响应等级为Ⅲ类(爆炸); 破片速度为 2 100m/s、2 300m/s, 撞击角度为 90° 时, 样品仅发生燃烧反应, 试验后壳体与验证板均无显著形变, 测压点均未测得明显冲击波超压, 样品的响应等级均为 V 类(燃烧)。其他条件相同时, 破片速度越大, 携带能量越大, 对样品产生的刺激越强。撞击角度为 90° 时, 破片携带能量主要表现为撞击刺激, 破片速度由 2 100m/s 增加至 2 300m/s 时, 破片撞击刺激作用虽增强, 但在此增幅下, 样品的破片撞击安全性未发生显著改变, 均为 V 类(燃烧)。破片速度为 1 850m/s、

撞击角度为 60° 时, 虽然破片携带能量与 90° (2[#]、3[#]) 相比较低, 但摩擦刺激作用增强, 又因该样品的临界摩擦力 F_c 低, 仅为 54N, 样品对摩擦刺激作用敏感, 破片撞击样品时产生严重的摩擦生热^[25], 导致反应更为剧烈, 响应等级表现为Ⅲ类(爆炸), 即撞击角度由 90° 降低至 60° 时, 样品的破片撞击安全性下降。

3 结论

对 HTPE 推进剂在机械刺激下的安全性进行了研究, 得到以下结论:

(1) 该 HTPE 推进剂的临界撞击能量 $E_c=7J$, 其在撞击刺激下的安全性高于常规丁羟推进剂; 临界撞击能量 $F_c=54N$, 对摩擦的灵敏度为“高”, 即在摩擦刺激作用下安全性低。

(2) 破片速度为 1 850m/s、撞击角度为 60° 时, 该 HTPE 推进剂的响应等级为Ⅲ类(爆炸); 破片速度为 2 100m/s、2 300m/s, 撞击角度为 90° 时, 该 HTPE 推进剂的响应等级均为 V 类(燃烧)。

(3) 破片撞击角度从 90° 降低为 60° 时, 尽管破片速度降低, 携带能量减小, 但破片对 HTPE 推进剂产生的摩擦刺激作用增强, 导致样品响应等级由 V 类(燃烧)提高至Ⅲ类(爆炸), 即推进剂的破片撞击安全性降低。

参考文献:

- [1] Koroleva T V, Semenov I N, Sharapova A V, et al. Ecological consequences of space rocket accidents in Kazakhstan between 1999 and 2018[J]. Environmental Pollution, 2021(268):1-12.
- [2] 陈通, 耿葵, 韩俊杰, 等. 液体推进剂事故应急处置方法[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2022, 20(4):26-32.
- [3] 付小龙, 姜丽萍, 蔚红建, 等. HTPE 推进剂研究进展与展望[J]. 飞航导弹, 2020(10): 82-90.
- [4] 吕玺, 庞维强, 李军强, 等. HTPE 钝感推进剂的子弹撞击和快

- 速烤燃特性[J]. 火炸药学报, 2019, 42(1): 79-83.
- [5] Wang X, Pei C X, Xu F Y, et al. Experimental and simulative thermal stability study of HTPE solid propellants in different scales[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021(28): 101 566.
- [6] Wu W, Jin P, Zhao S, et al. Mechanism of AP effect on slow cook-off response of HTPE propellant[J]. Thermochimica Acta, 2022(715): 1-18.
- [7] Yuan S, Zhang B W, Wen X M, et al. Investigation on mechanical and thermal properties of HTPE/PCL propellant for wide temperature range use[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(8): 4 971-4 982.
- [8] 庞爱民, 刘学. 降低丁羟高燃速推进剂机械感度研究[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 961-966.
- [9] Pang W Q, DeLuca Luigi T, Wang K, et al. Effect of hydroborate iron additives (BH-Fe) on the properties of composite solid rocket propellants[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1 721(1): 012 006.
- [10] 常双君, 赵芦奎, 杨雪芹, 等. PBX 浇注炸药撞击感度的影响因素研究[J]. 火工品, 2010(3): 44-46.
- [11] Pang W Q, Deng C Q, Li H, et al. Effect of nano-sized energetic materials (nEMs) on the performance of solid propellants: a review[J]. Nanomaterials, 2021, 12(1): 133.
- [12] Wang D Q, Yu H M, Liu J, et al. Preparation and properties of a flake aluminum powder in an ammonium-perchlorate-based composite modified double-base propellant [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2020, 56(6): 691-696.
- [13] 李海涛, 钱勛, 庞爱民, 等. 低易损性推进剂研究进展及发展趋势[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(6): 19-23.
- [14] Baker E L, Al-Shehab N, Miers K, et al. Insensitive munitions fragment impact gun testing technology challenges[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2016, 41(3): 572-579.
- [15] Xu Y X, Gao P, Wang S S. Critical criterion for the shock initiation/ignition of cylindrical charges with thin aluminum shell impacted by steel fragment[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(8): 921-931.
- [16] 王建灵, 刘海让, 杨建, 等. 固体推进剂易损性试验研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 60-62, 69.
- [17] 刘健, 李斌, 解立峰, 等. HMX 基含铝炸药低易损性能测试研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(08): 56-61.
- [18] Peng J, Yuan B H, Sun X Y, et al. The response characteristics of warhead fragment impact on shielded H6 explosive[J]. The International Journal of Multiphysics, 2018, 12(2): 89-99.
- [19] 王旭, 徐森, 李苗苗, 等. 钝感氧化剂对 PBT 基推进剂低易损性的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(6): 7-12, 18.
- [20] Zhao P, Chen L, Li J H, et al. Characteristics of fragment impacting steel cover at high speed to initiate heated explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(6): 1-9.
- [21] 吴星亮, 王红松, 李文海, 等. RDX 和 HMX 机械刺激临界反应阈值试验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 9-14.
- [22] 张琼方, 张教强. 钝感固体推进剂的研制与进展[J]. 含能材料, 2004(06): 371-375, 6.
- [23] Kirstin F W, Mary M S, Geoffrey W B, et al. ABL and BAM friction analysis comparison[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 40(4): 583-589.
- [24] Bai C, Zhao X, Yao J, et al. Numerical investigation of the shockwave overpressure fields of multi-sources FAE explosions [J]. Defense Technology, 2021, 17(4): 1 168-1 177.
- [25] Kimura E, Oyumi Y. Sensitivities of azide polymer propellants in fast cook-off, card gap and bullet impact tests[J]. Journal of Energetic Materials, 1997, 15(2-3): 163-178.