

doi: 10.7690/bgzdh.2024.08.020

不敏感推进剂及 HTPE 推进剂的不敏感特性

袁申¹, 余海勇¹, 史慧芳¹, 罗运军²

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000;
2. 北京理工大学材料学院, 北京 100081)

摘要: 为了解不敏感推进剂的发展思路及端羟基嵌段共聚醚(hydroxyl-terminated polyether, HTPE)推进剂不敏感特性的技术途径, 对国内外不敏感推进剂及 HTPE 推进剂不敏感特性的研究情况进行综述。概括未来不敏感推进剂的发展趋势, 总结 HTPE 推进剂不同不敏感评估试验的响应机理。结果表明, 该研究可为推进剂发展提供理论支撑。

关键词: 不敏感; 固体推进剂; HTPE; 烤燃

中图分类号: TJ55; V512 **文献标志码:** A

IM Propellant and IM Characteristics of HTPE Propellant

Yuan Shen¹, Yu Haiyong¹, Shi Huifang¹, Luo Yunjun²

(1. Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the development ideas for insensitive munition (IM) propellant and technical ways for IM characteristics of hydroxyl-terminated polyether(HTPE) propellant, the domestic and foreign researches on IM propellant and IM properties of HTPE propellant are overviewed, the development trend of IM propellant in the future and the response mechanism of HTPE propellant under IM evaluation tests. The result shows that the research can provide theoretical support for the development of propellant.

Keywords: IM; solid propellant; HTPE; cook-off

0 引言

固体推进剂作为导弹、火箭等武器装备的动力源, 是实现精确打击和高效毁伤的重要基础。为提高导弹、火箭等的射程, 要求推进剂具有尽可能高的能量水平, 为此常添加高能量密度材料予以实现; 但这也增加了推进剂在外界刺激下的危险性。据相关统计^[1], 推进剂在受火焰、子弹和射流等意外刺激时, 意外点火引起的爆炸是造成作战人员、武器装备平台损伤的主要原因; 且随着高价值武器装备的不断列装, 对推进剂安全性能的要求越来越高, 这促使各国高度重视并研发对外界刺激不敏感的推进剂。

1 不敏感推进剂研究进展

对于不敏感推进剂, 不仅要求其应具有优良的综合性能, 而且要求其应具有在受到外界刺激时, 能被引发的可能性及随之造成的伤害降低至最小程度的安全性能。

为评估推进剂的不敏感性, 许多国家和组织都

分别建立了相应的试验标准, 当前主要有美国 MIL-STD-2105 系列、北约 STANAG 4439 系列标准及法国 DGA/IPE INSTRUCTION NO.260 (MURAT) 系列标准^[2]。

STANAG 4439 系列标准沿用了 MIL-STD-2105 系列标准, 2 种标准基本相同。最新版的 STANAG 4439 标准(第三版)及 MIL-STD-2105D 标准规定, 推进剂需通过慢速烤燃、快速烤燃、子弹撞击、破片撞击、聚能射流冲击和殉爆 6 项试验后才能达到不敏感推进剂的标准^[3-4]。

MURAT 系列标准是参照 MIL-STD-2105 系列标准发展而成, 相较于最新版的 STANAG 4439(第三版)及 MIL-STD-2105D 标准, MURAT(第一版)标准中增加了重型破片撞击, 并将响应类型分为 3 个星级, 且其评估标准存在差异^[5]。不同推进剂不敏感评估试验标准要求如表 1 所示。其中, STANAG 4439(第三版)及 MIL-STD-2105D 标准规定推进剂慢速烤燃、快速烤燃、子弹撞击和破片撞击试验的响应类型不能比燃烧更严重, 聚能射流冲击和殉爆

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-05-28

第一作者: 袁申(1989—), 男, 四川人, 博士。

的响应类型不能比爆炸更严重。

基于相应的推进剂不敏感评估试验标准, 国内

外研究人员对推进剂的不敏感性影响因素和机理进

行了大量的探索和研究。

表 1 不同推进剂不敏感评估试验标准要求

试验	MIL-STD-2105D	STANAG 4439 (第三版)	MURAT (第一版)		
			1 星级	2 星级	3 星级
慢速烤燃	燃烧	燃烧	爆炸	燃烧	燃烧
快速烤燃	燃烧	燃烧	爆燃	燃烧	燃烧
子弹撞击	燃烧	燃烧	爆炸	燃烧	燃烧
破片撞击	燃烧	燃烧	—	燃烧	燃烧
重型破片撞击	—	—	—	爆炸	爆炸
聚能射流冲击	爆炸	爆炸	—	爆炸	爆炸
殉爆	爆炸	爆炸	爆炸	爆炸	爆炸

2 HTPE 不敏感推进剂研究进展

端羟基嵌段共聚醚 (HTPE) 推进剂是以端羟基四氢呋喃-乙二醇嵌段共聚醚为粘合剂的不敏感推进剂^[6]。HTPE 推进剂采用低感度含能增塑剂, 固含量相对较低, 具有良好的能量、力学和工艺等性能, 同时其 6 项不敏感性评估试验全部通过, 具有良好的不敏感特性, 受重视程度越来越高^[7-8]。其中, 对烤燃、撞击和冲击不敏感是 HTPE 推进剂最具优势的特性^[9-10]。近年来, 关于 HTPE 推进剂不敏感的工作主要集中在烤燃、撞击和冲击试验的影响因素及机理的研究。

2.1 烤燃试验

烤燃试验可反映推进剂在受到火焰加热、缓慢升温等热刺激时的不敏感性, 通过分析推进剂烤燃的响应类型、响应程度等对其不敏感性进行评估。20 世纪 90 年代, Goleniewski^[11]首次公开了 HTPE 推进剂的基本组成, 如表 2 所示。该 HTPE 推进剂通过了快速和慢速烤燃试验, 响应类型均为燃烧。

表 2 HTPE 推进剂的基本组成 wt%

组分	功能	含量
HTPE	粘合剂	3~10.0
乙酰柠檬酸三丁酯 (ATBC)	增塑剂	3~10.0
二羟乙基酰胺	键合剂	0~0.3
Fe ₂ O ₃	燃速催化剂	0~1.0
高氯酸铵 (AP)	氧化剂	0~70.0
奥克托今 (HMX)	高能组分	0~10.0
Al	金属燃料	16~24.0
异氰酸酯	固化剂	0.5~2.0
三苯基铋/顺丁烯二酸酐	固化催化剂	0~0.1

由于上述 HTPE 推进剂采用了惰性 ATBC 为增塑剂, 能量水平较低; 因此, Goleniewski^[12]将低感度 N-丁基硝氧乙基硝胺 (Bu-NENA) 用于替换 ATBC 为含能增塑剂 (如表 3 所示), 以提高 HTPE 推进剂的能量水平。该 HTPE 推进剂同样通过了快速和慢速烤燃试验, 响应类型均为燃烧。

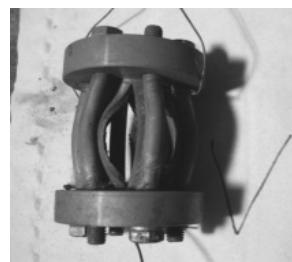
HTPE 推进剂的烤燃特性明显优于端羟基聚丁二烯 (hydroxyl-terminated polybutadiene, HTPB) 推进剂。Caro 等^[13]对相同固含量的 HTPE/Bu-NENA 和 HTPB/癸二酸二辛酯 (DOS) 推进剂进行了慢速烤燃试验, 试验结果如图 1 所示。结果表明: HTPE/Bu-NENA 推进剂的慢速烤燃响应类型为燃烧, 烤燃弹壳体完整; 而 HTPB/DOS 推进剂的响应类型为爆炸, 烤燃弹壳体开裂, 其响应程度较剧烈。

表 3 HTPE/Bu-NENA 推进剂的基本组成 wt%

组分	功能	含量
HTPE	粘合剂	3~12.0
Bu-NENA	增塑剂	3~12.0
二羟乙基酰胺	键合剂	0~0.3
Fe ₂ O ₃ 或 Al ₂ O ₃ 或 Cr ₂ O ₃	燃速催化剂	0~1.0
AP	氧化剂	0~60.0
黑索金 (RDX) 或 HMX	高能组分	0~20.0
Al 或 Mg 或 Zr	金属燃料	0~24.0
MNA/2-NDPA	安定剂	0~0.1
异氰酸酯	固化剂	0.5~2.0
三苯基铋/顺丁烯二酸酐	固化催化剂	0~0.1



(a) HTPE/Bu-NENA 推进剂



(b) HTPB/DOS 推进剂

图 1 相同固含量推进剂的慢速烤燃试验结果

李军强等^[14]对相同能量水平的 HTPE/Bu-NENA 和 HTPB/DOS 推进剂进行了慢速烤燃试验, 试验结果如图 2 所示。研究发现, HTPE/Bu-NENA 推进剂的响应温度为 166 °C, 响应类型为燃烧, 烤燃弹壳体完整, 仅烤燃弹端盖被破坏, 响应程度较低; 而 HTPB 推进剂的响应温度为 210 °C,

响应类型为爆炸，烤燃弹被严重破坏，响应程度较剧烈。



图 2 相同能量水平推进剂的慢速烤燃试验结果

Kim 等^[15]通过模拟未添加增塑剂的 HTPB/AP 和 HTPB/AP 推进剂的慢速烤燃试验发现，2 种推进剂的响应类型均为爆炸，表明 AP 的低温热分解是引发推进剂点火爆炸的主要原因。

综上，可将 Bu-NENA 对 HTPB 推进剂慢速烤燃的作用机理概括为 2 方面：1) 在 AP 低温分解形成孔洞前，Bu-NENA 就已经进行了热分解，使推进剂在低温时发生点火；2) HTPB/DOS 粘合剂体系在受热时变硬，而 HTPB/Bu-NENA 粘合剂体系变软，能够减少烤燃时药柱中裂纹的出现，2 方面原因避免了推进剂燃面的急剧增加、燃速的迅速加快，因此含 Bu-NENA 的 HTPB 推进剂的慢速烤燃响应类型为燃烧，响应程度更低。

除此之外，HTPB 推进剂的烤燃试验结果还与装药尺寸(装药量)、约束条件和装药结构等因素相关^[16]。吕玺等^[17]对 75、50 mm 装药的 HTPB 推进剂进行了快速烤燃试验。结果表明：2 种推进剂响应类型均为燃烧，烤燃弹壳体完整，仅端盖变形，结果如图 3 所示。另外，设有或未设有薄弱部位的烤燃弹，其响应类型均为燃烧。其中，设有薄弱部位的响应程度较低，因薄弱部位有利于热分解气体产物的释放，故响应程度降低。

烤燃弹装药结构与实际发动机装药结构相差较大，烤燃弹的烤燃结果仅能部分反应推进剂的烤燃特性，而实际发动机装药又受限于较高的制造成本；因此，目前常采用数值模拟分析技术，帮助研究实际发动机装药结构对烤燃试验的影响^[18]。

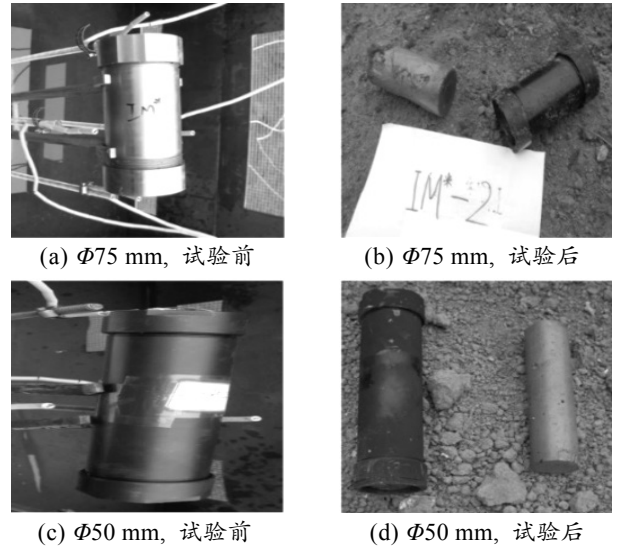


图 3 不同装药尺寸的 HTPB 推进剂快速烤燃试验结果

杨筱等^[19]通过模拟对比不同 HTPB 推进剂装药结构的慢速烤燃发现，实心装药、星形装药推进剂的响应类型均为燃烧，但实心装药的推进剂，由于热传导较慢，其响应温度更高。

对于星形装药的 HTPB 推进剂，Ye 等^[20]通过建立其慢速烤燃的数值模型发现，热传导和自然对流这 2 种传热方式对推进剂的响应温度影响显著。经热传导升温，推进剂的响应温度不会受环境温度变化影响；而经自然对流升温，推进剂的响应温度随环境温度升高而降低。

2.2 撞击试验

研究人员还对 HTPB 推进剂的子弹撞击和破片撞击试验开展了相应工作。子弹撞击主要是模拟推进剂在战场中受到子弹撞击意外时的不敏感特性。吕玺等^[17]研究发现，HTPB 推进剂的轴向和径向子弹撞击响应类型均为燃烧，通过了不同方向的子弹撞击试验。采用轴向撞击时，壳体被击碎，产生较多破片，壳体中含少量残余推进剂，响应程度较剧烈；采用径向撞击时，壳体被击穿，无碎片产生，壳体中含大量残余推进剂，响应程度较低，试验结果如图 4 所示。

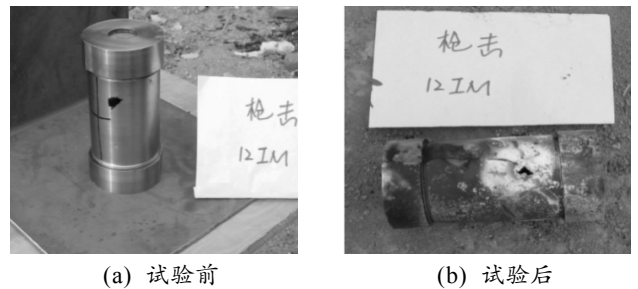


图 4 HTPB 推进剂的子弹径向撞击试验结果

破片撞击试验可模拟推进剂在储运和战备等状态下受到碎片撞击时可能出现的响应及破坏形式。Comfort^[21]通过对比 25.4 cm 石墨壳体发动机装药的 HTPE 和 HTPB 推进剂的子弹及破片撞击试验发现, HTPE 推进剂 2 项试验的响应类型为燃烧; 而 HTPB 推进剂的子弹撞击响应类型为爆燃、破片撞击程度为爆炸, 2 项试验均未通过。HTPE 表现出对子弹和破片撞击良好的不敏感性。

2.3 聚能射流冲击试验

聚能射流冲击试验是推进剂最难通过的不敏感评估试验之一。曹军等^[22]对 HTPE 推进剂进行聚能射流冲击试验发现, 壳体被完全破坏, 推进剂点火形成散射火球, 判断其响应类型为爆燃, 满足聚能射流冲击的响应类型不能比爆炸更严重的要求, 试验结果如图 5 所示。



图 5 HTPE 推进剂的聚能射流冲击试验结果

综上所述, HTPE 推进剂在受外界刺激时, 展现了良好的不敏感特性, 使其成为了一类极具发展前途的高性能不敏感推进剂。

3 结束语

不敏感推进剂是当前推进剂发展的重要方向, 也是火箭、导弹武器装备发展的必然要求。不敏感推进剂的研发工作将对整个推进剂领域带来深远影响。目前, 推进剂高能与不敏感的矛盾关系还需综合考虑, 推进剂的不敏感性并不是单一因素所致, 推进剂的不敏感机理还尚不清楚; 因此, 未来不敏

感推进剂的发展趋势可从开展新型高能不敏感推进剂研究、提高不敏感推进剂的综合性能和建立推进剂的不敏感性机理分析方法等方面进行。

参考文献:

- [1] 梁晓璐, 梁争峰, 程淑杰, 等. 不敏感弹药试验方法及评估标准研究进展[J]. 飞航导弹, 2016, 17(6): 84-87.
- [2] 许蕾, 张鹏. 国内外钝感弹药评估标准的发展与分析[J]. 航天标准化, 2010(4): 35-37.
- [3] MIL-STD-2105D, Hazard assessment tests for non-nuclear munitions[S]. Washington D C: Department of Defense, 2011.
- [4] Guidance on the development, assessment and testing of insensitive munitions, AOP-39 (Edition 3)[S]. NATO Standardization Agency: North Atlantic Treaty Organization (NATO), 2010.
- [5] IGA Yves de Longueville, French IM position[S]. France Defense: Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, 2006.
- [6] COMFORT T F. High density HTPE propellants[C]. NIDA Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. San Antonio, 2000.
- [7] 石小兵, 庞维强, 蔚红建. 钝感推进剂研究进展及发展趋势[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2007, 5(2): 24-32.
- [8] 宋晓庆, 周集义, 王文浩, 等. HTPE 推进剂研究进展[J]. 含能材料, 2008, 16(3): 349-352.
- [9] RAO K, SIKDER A K, KULKARNI M A, et al. Studies on n-Butyl Nitroxyethylnitramine (n-BuNENA): Synthesis, Characterization and Propellant Evaluations[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2010, 29(2): 93-98.
- [10] 刘运飞, 庞维强, 谢五喜, 等. TKX-50 对 HTPE 推进剂能量特性的影响及应用可行性[J]. 推进技术, 2017, 38(12): 2851-2856.
- [11] GOLENIEWSKI J R. Solid propellant with non-crystalline polyether/inert plasticizer binder[P]. US: 19890398210, 1994.
- [12] GOLENIEWSKI J R, ROBERTS J A. Solid propellant with non-crystalline polyether /energetic plasticizer binder[P]. US: 19890326852, 1998.
- [13] CARO R I, BELLERBY J M, KRONFLI E. Synthesis and characterization of a hydroxy terminated polyether (HTPE) copolymer for use as a binder in composite rocket propellants[J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2007, 6(3): 289-306.
- [14] 李军强, 樊学忠, 唐秋凡, 等. HTPE 推进剂慢速烤燃及其热分解特性[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(5): 597-603.
- [15] KIM K H, KIM C K, YOO J C, et al. Test-based thermal decomposition simulation of AP/HTPB and AP/HTPE propellants[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 27(4): 822-827.
- [16] 宋柳芳, 李尚文, 王拯, 等. HTPE 推进剂烤燃试验尺

寸效应及数值模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(9): 735-742.

[17] 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.

[18] COCCHIARO J. Subscale Fast cookoff testing and modeling for the hazard assessment of large rocket motors[J]. Chemical Propulsion Information Agency Laurel MD, 2001, 6: 44-58.

[19] 杨筱, 智小琦, 杨宝良, 等. 装药尺寸及结构对 HTPE

推进剂烤燃特性的影响[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6): 84-89.

[20] YE Q, YU Y, LI W. Study on cook-off behavior of HTPE propellant in solid rocket motor[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167: 114791-114798.

[21] Comfort T F. Solid rocket propellant[P]. US, 60066214, 2000.

[22] 曹军, 郭颜红. 固体火箭发动机聚能射流低易损试验研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(3): 72-77.

(上接第 95 页)

3.4 电气防爆改造

给袋式装袋机需要更改为防爆型号的元器件包括三相异步电机、电磁阀、光纤传感器等, 选择相应的防爆型号。

3.5 真空发生装置改造

民用领域给袋式装袋机生产效率高, 因此采用真空泵加电机的方式产生真空, 但在电机产生真空的过程中, 电机周围温度升高, 现场使用温度枪测量, 高达 90°, 是不可忽视的安全隐患。推进剂药柱生产作为军品并没有民用产品那么大的需求, 因此生产效率并非首要考虑, 将真空泵加电机产生真空的方式直接改为真空发生器, 既能满足推进剂的生产效率, 又能规避高温问题。

3.6 程序更改

给袋式包装机旋转由普通电机提供动力, 驱动给袋式装袋机转盘沿逆时针方向步进运动, 并通过各种凸轮与连杆控制各个工位动作, 程序上比较简单; 但是过快的节拍会导致装袋装置装料时间不够。调低电机转速, 增加工位停留时间, 会导致图 3 所示, 5、6 和 7 工位上装有推进剂的药柱长时间停留, 增加局部药量, 有安全隐患。因此, 程序上需做更改, 装料装置里面有推进剂药柱时, 信号反馈给控制系统, 给袋工位供袋, 电机转速不变, 迅速将包装袋送至装袋工位, 电机停止转动, 完成装袋后, 电机启动, 迅速将药柱送至下料工位。

4 验证结果

通过以上设计和改进措施, 最终将广泛用于民用市场的给袋式装袋机成功改制为使用于药柱火工品装袋包装的自动化防爆装袋机。其装袋效果如图 7 所示。

除实现装袋功能之外, 改造设备同时实现以下功能:

- 1) 消除热源, 杜绝过高温度可能导致的危险;
- 2) 完成相关电器元器件的防爆型号替换, 使之满足相应的安全要求;
- 3) 消除设备上积料的隐患, 控制了生产场地药量。



图 7 装袋效果

5 结论

笔者针对药柱推进剂包装工艺现状, 在成熟的民用包装设备基础上, 进行相应的改造和优化, 着重解决药柱装袋功能、消除热源和防爆改造等相应问题, 通过实践证明了该方案的可行性。充分利用成熟的民用包装设备, 有针对性地解决了工艺难点, 降低了技术风险, 缩短了研发周期, 也为火工品相关产品生产如何充分利用民用市场成熟设备提供一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 罗运军, 刘晶如. 高能固体推进剂研究进展[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 407-410.

[2] 刘小琴. 固体推进剂生产过程的系统风险评估与安全优化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

[3] 聂坤亮. 火工品生产自动化影响因素[J]. 兵工自动化, 2014, 33(2): 84-86.

[4] 黄颖为. 包装机械结构与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 3.

[5] 张赛. 我国食品包装机械现状及发展趋势[J]. 硅谷, 2008, 7(6): 132.