

# PBT基推进剂热分解特性与慢烤行为关系研究

李洋, 王晓倩, 刘婕, 牛草坪, 邬斌, 甘露, 林锋, 邹艳红

(湖北三江航天江河化工科技有限公司, 湖北 宜昌 444200)

**摘要:** **目的** 研究 PBT (3,3-二叠氮甲基氧丁环-四氢呋喃共聚醚) 基推进剂慢速烤燃响应情况与热分解特性之间的关系。**方法** 采用差示量热扫描仪和慢速烤燃试验, 研究推进剂在不同固含量 (通过改变高氯酸铵含量来调整) 和不同铝粉含量下的热分解温度变化情况, 计算不同组分含量下推进剂的热分解动力学参数, 对比分析 PBT 基推进剂固、铝粉含量变化对热分解特性及慢速烤燃行为影响。**结果** 固含量从 78% 下降至 75% 时, 配方中 AP (高氯酸铵) 的高、低温热分解温度和热分解活化能均会下降。铝粉质量分数从 18% 下降至 5% 时, 配方中 AP 的高、低温热分解温度和热分解活化能均会下降。当采用 78% 的固含量时, 配方无法通过慢烤试验, 而采用 75% 的固含量, 铝粉质量分数为 18%、5% 时, 均能通过慢烤试验。**结论** 根据热分析及慢烤试验结果可认为, 固含量变化对慢烤响应程度变化有较大影响, Al 粉含量变化对配方慢烤响应程度的影响较小。影响配方慢烤响应程度主要由 AP 高温分解控制, AP 高温分解活化能越低, 越有利于推进剂通过慢速烤燃测试。

**关键词:** PBT 推进剂; 慢速烤燃; 热分解; 低易损性; 动力学; 航天材料

中图分类号: TJ760

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)10-0043-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.006

## The Relationship between Thermal Decomposition Characteristics and Slow Cook-off Behaviour of PBT-based Propellants

LI Yang, WANG Xiao-qian, LIU Jie, NIU Cao-ping, WU Bin, GAN Lu, LIN Feng, ZOU Yan-hong

(Jianghe Chemical Technology Co., Ltd., Hubei Yichang, 444200, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to study the relationship between the slow cook-off response of PBT-based propellant and the thermal decomposition characteristics. Adopting DSC and slow cook-off experiments, we studied the thermal decomposition temperature that changes in the content of pushing agents in different solid content (changing the AP content) and different aluminum powder content as well as calculated the thermal decomposition dynamic parameters of the promotion agent under different component content. Also, we compared and analyzed the impact of PBT base pushing agent solid content, aluminum powder content to thermal decomposition characteristics and slow roasting behavior. The results showed that when the solid content decreased from 78% to 75%, the thermal decomposition temperature and activation energy of AP in the formula de-

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2021-09-17

Received: 2022-07-04; Revised: 2022-09-17

作者简介: 李洋 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为固体推进剂配方设计。

**Biography:** LI Yang (1992-), Male, Master, Engineer, Research focus: design of solid propellant formulation.

通讯作者: 王晓倩 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为固体推进剂、火炸药配方设计。

**Corresponding author:** WANG Xiao-qian (1988-), Female, Master, Senior engineer, Research focus: design of solid propellant formulation and explosives.

引文格式: 李洋, 王晓倩, 刘婕, 等. PBT 基推进剂热分解特性与慢烤行为关系研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 043-049.

LI Yang, WANG Xiao-qian, LIU Jie, et al. The Relationship Between Thermal Decomposition Characteristics and Slow Cook-off Behaviour of PBT-based Propellants[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 043-049.

creased at high temperature and low temperature. When the aluminum power content decreased from 18% to 5%, the high temperature and low temperature decomposition temperature and activation energy in the formula also decreased. When the solid content of 78% is used, the recipe fails the slow cook-off, while using 75% solids, both 18% and 5% aluminum power passed the slow cook-off. According to the results of thermal analysis and slow cook-off tests, it can be seen that the change of solid content has a great influence on the response of slow cook-off, and the change of aluminum power content has little effect on it. The slow cook-off response of the formula is mainly controlled by AP pyrolysis. The lower the activation energy of AP pyrolysis, the better the propellant can pass the slow cook-off test.

**KEY WORDS:** PBT-based propellant; slow cook-off; thermal decomposition; low vulnerability; dynamics; aerospace material

固体推进剂是导弹发动机的动力源<sup>[1]</sup>, 提高固体推进剂的能量是实现导弹远程打击的必要条件<sup>[2]</sup>, 然而随着推进剂能量的提高, 对推进剂的安全性也带来挑战, 特别是随着大型水面舰船、潜艇、战机等高价值、高集成武器平台的广泛应用, 使得推进剂低易损性的重要性日益突出。因此, 低易损性是推进剂发展的另一个重要方向<sup>[3-8]</sup>。

低易损性推进剂是指在热、机械、静电等外部刺激作用下, 具有防止发生燃烧转爆轰特性的推进剂<sup>[9]</sup>。目前国内外针对弹药低易损性试验, 建立了不同的评估方法, 用于模拟不同环境下的危害状况<sup>[10-14]</sup>, 其中的慢速烤燃试验, 是评估推进剂及弹药易损性能重要项目之一。国内赵孝彬等<sup>[15]</sup>研究了推进剂配方组成、燃速、升温速率、约束条件等对慢速烤燃特性的影响。陈忠娥等<sup>[16-17]</sup>则联合使用差示扫描-热重联用仪(DSC-TG)、扫描电镜(SEM)和慢烤试验, 研究了AP/HTPB推进剂的热分解特性与慢速烤燃行为的关系。结果表明, AP低温分解形成的大量孔隙, 是导致AP/HTPB推进剂慢速烤燃响应剧烈的重要原因, 并在此结论基础上, 提出了改善AP/HTPB推进剂慢速烤燃响应的技术途径。张杰凡等<sup>[18]</sup>研究了PBT(3,3-二叠氮甲基氧丁环-四氢呋喃共聚醚)基复合推进剂的热分解特性, 认为配方慢烤过程分解温度最低的增塑剂首先发生热分解。廖林泉等<sup>[19]</sup>通过真空安全性测试, 研究了几种推进剂配方在75℃下的热安全性, 结果表明, 推进剂的热安全性与AP粒度有关, 粒度越小, 发生分解反应的活性越高。Komai等<sup>[20]</sup>利用差示扫描量热分析仪(DSC)测量了AP/HTPB推进剂在不同升温速率下的着火温度, 结果表明, 着火温度随着升温速率的增大而提高。Rodrigo等<sup>[21]</sup>利用慢烤装置(SCO)重点研究了在6℃/h升温速率下, AP/HTPB推进剂的慢烤燃特性。国内外有关推进剂慢烤试验研究主要集中在装药尺寸、装药结构、配方种类对慢烤特性的影响, 有关配方组分含量变化对配方热分解特性及慢烤响应程度关系的研究尚未见相关报道。

本文以PBT为粘合剂的推进剂为研究对象, 研究了固含量、铝粉含量变化对推进剂热性能及慢烤响应程度影响, 并探讨了PBT基推进剂热分解特性与

慢速烤燃行为关系, 旨在为后续通过热性能评判配方慢烤特性提供参考。

## 1 试验

### 1.1 样品

PBT复合固体推进剂: 以PBT/A3为粘合剂体系, AP、Al粉、RDX为固体组分, 按照一定配比制备而成。

烤燃弹: 将上述制备的推进剂药浆浇入尺寸为 $\phi$ 100 mm×200 mm的壳体中, 固化后将端盖与筒体通过螺纹连接。

### 1.2 DSC测试

采用美国TA公司DSC差示扫描量热仪, 对PBT基复合固体推进剂中会发生热分解的单体组分进行DSC测试, 采用密闭不锈钢坩埚, 氮气氛围, 升温速率为10℃/min。然后对不同配比的PBT基复合固体推进剂进行DSC测试, 升温速率分别为10、15、20℃/min, 氛围及坩埚不变。

### 1.3 慢烤测试

慢速烤燃装置由加热套、控温仪、记录仪、调压变压器、热电偶等组成, 将烤燃弹装入加热套后, 连接好设备。为提高试验效率, 升温过程首先以60℃/h的速率将烤燃弹升温至80℃, 保温2h后, 再按照3.3℃/h的升温速率进行加热直至烤燃弹响应。

## 2 结果与分析

### 2.1 PBT基推进剂热分解特性

PBT基复合固体推进剂组分主要由PBT粘合剂、A3、AP、Al粉组成, 以10℃/min的升温速率对各组分进行DSC测试, 其结果见图1。对测试结果进行统计, 见表1。

表1显示, A3增塑剂、PBT粘合剂热分解均有一个明显的放热峰, 其中A3热分解峰温为261.4℃, PBT热分解峰温为258.4℃, 将PBT与A3以1:1

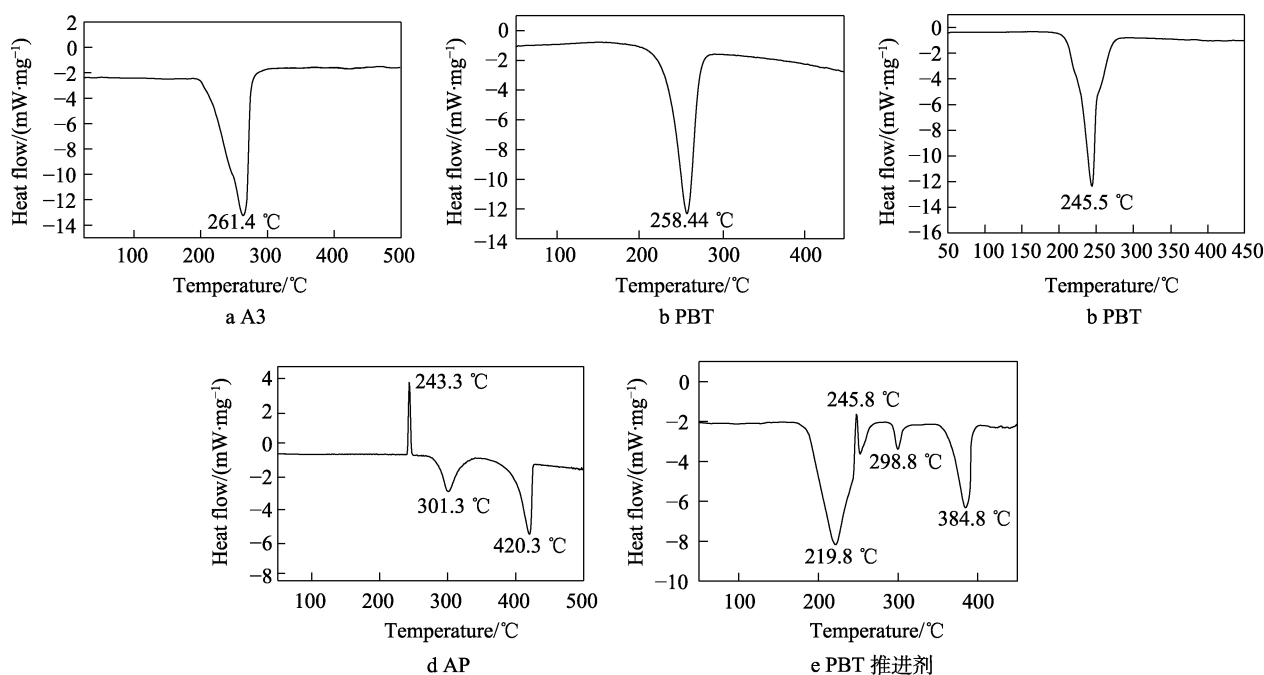


图 1 PBT 基推进剂及其单体热分解图

Fig.1 Thermal decomposition of PBT-based propellant and its monomer components: a) A3; b) PBT; c) PBT+A3; d) AP; e) PBT-based propellant

表 1 PBT 基推进剂及其单体热分解温度对比

Tab.1 Thermal decomposition of PBT-based propellant and its monomer components

	°C				
	PBT 分解温度	A3 分解温度	AP 转晶温度	AP 低温分解温度	AP 高温分解温度
PBT 推进剂	219.8	/	245.8	298.8	384.8
PBT 粘合剂	258.4	/	/	/	/
A3 增塑剂	/	261.4	/	/	/
PBT+A3	245.5		/	/	/
AP	/	/	243.3	301.3	420.3

的质量比混合后,受二者协同作用影响,其热分解峰温下降至 245.5 °C,低于 A3 增塑剂和 PBT 粘合剂单体的热分解温度。推进剂的 DSC 曲线在 219.8 °C 出现第一个放热峰,与粘合剂体系热分解温度相差较大,分析认为,粘合剂在热分解过程会受 AP 转晶吸热影响,在粘合剂热分解未达到最大时 AP 开始转晶吸热,从而在 DSC 曲线上过早反映吸热峰的存在。推进剂在 245.8 °C 处的吸热峰为 AP 的转晶温度,比 AP 单体转晶峰温低 2.5 °C;在 298.8 °C 处放热峰为 AP 低温分解,比 AP 单体低温分解温度低约 2.5 °C;在 384.8 °C 处放热峰为 AP 的高温分解,比 AP 单体高温分解温度低约 35.5 °C。

## 2.2 组分含量对 PBT 基推进剂热分解影响

复合固体推进剂是以高分子粘合剂为基体,添加固体氧化剂、金属燃烧剂以及其他功能助剂形成的一种多相混合的异质推进剂<sup>[22]</sup>。受各组间协同作用影响,推进剂组分配比不同,其热分解温度有所变化。

### 2.2.1 固含量

以 PBT 基推进剂为对象,参照某低易损配方,研究了固含量分别为 78% (5%A1、70%AP、3%RDX) 和 75% (5%A1、67%AP、3%RDX) 时,配方热分解温度的变化情况 (DSC 升温速率均采用 10 °C/min),结果见图 2。从图 2 可以看出,不同固含量下,推进剂中 AP 的吸热转晶温度变化不大,均在 246 °C 左右。AP 热分解分为 2 步,分别为 AP 的低温分解和 AP 的高温分解,二者分解温度随固含量的变化而变化,随推进剂固含量的提高,AP 的 2 步分解均出现推后的现象。分析认为,随固含量下降,配方粘合剂占比增多,其在热分解过程可释放更多热量,可引发 AP 高、低温分解提前进行。

### 2.2.2 铝粉含量

以 PBT 基推进剂为对象,研究配方铝粉质量分数分别为 18%、5% 时 (固含量均为 75%),配方热分解温度变化情况 (DSC 升温速率均采用 10 °C/min),结果见图 3。图 3 显示,不同铝粉含量对推进剂中

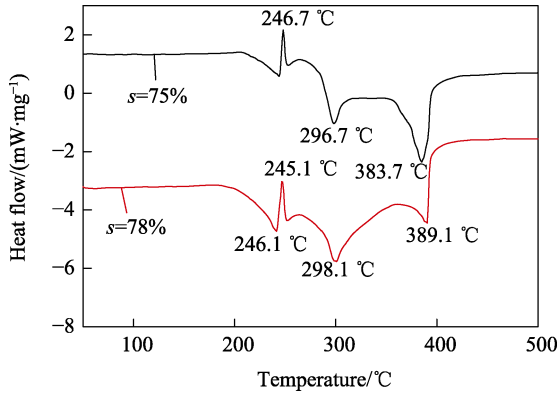


图2 不同固含量的PBT推进剂热分解情况  
Fig.2 Thermal decomposition of PBT propellants with different solid contents

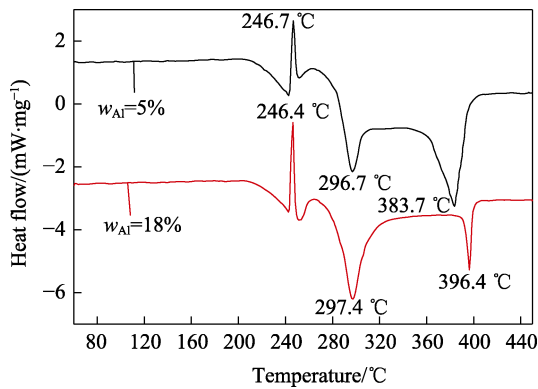


图3 不同铝粉含量的PBT推进剂热分解情况  
Fig.3 Thermal decomposition of PBT propellants with different aluminum powder contents

AP吸热转晶温度的影响不大。对AP的热分解有一定影响，随推进剂中铝粉含量的提高，AP的2步分解也呈现推后的现象。分析认为，随Al粉含量的提升，在推进剂缓慢升温过程中，Al粉吸附了A3、AP、PBT相互作用的气体产物，或与某些氧化性气体发生反应，这些复杂作用间接影响了AP的分解。从DSC曲线来看，Al粉含量的提升降低了AP的热分解。

### 2.3 动力学参数计算

为进一步分析固含量、铝粉含量变化引起的热分解温度变化原因，采用Kissing法计算研究了不同固含量、铝粉含量下AP转晶、各热分解阶段的相关动力学参数<sup>[23]</sup>变化情况，见式(1)。试验过程DSC升温速率选择10、15、20℃/min。

$$\ln \frac{\beta}{T_{\max}^2} = \ln \frac{RA}{E} - \frac{E}{RT_{\max}} \quad (1)$$

式中： $\beta$ 为升温速率，K/min； $T_{\max}$ 为热分解峰温，K； $A$ 为反应指前因子； $E$ 为反应活化能，kJ/mol； $R$ 为普适气体常数，J/(mol·K)。

根据式(1)，以 $\ln(\beta/T_{\max}^2)$ 对 $-1/T_{\max}$ 作图，得到一条直线，以 $E/R$ 为斜率， $\ln(RA/E)$ 为截距，可计算得到活化能与指前因子。

### 2.3.1 固含量变化对推进剂热分解动力学参数影响

图4对比了不同固含量、不同升温速率下复合固体推进剂热分解情况。热分解活化能作为阈值，其表示物质在热分解过程中所需克服的最小能量。表2显示，当固含量从78%降低至75%时，AP低温分解活化能从144.79 kJ/mol下降至111.42 kJ/mol，AP高温分解活化能从288.27 kJ/mol下降至84.20 kJ/mol。这说明随固含量的下降，AP高、低温分解更易进行。这也进一步解释了在PBT基推进剂中，固含量降低导致AP高、低温分解温度提前的原因。

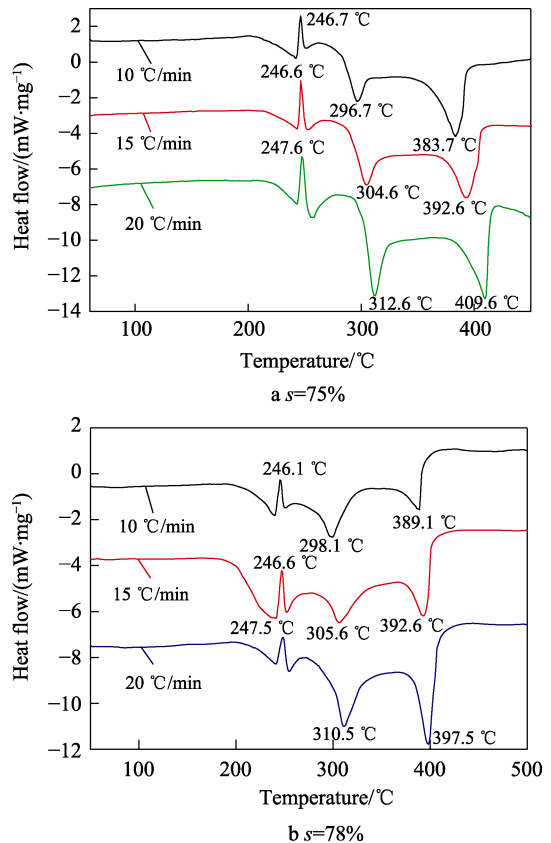


图4 不同升温速率下不同固含量DSC曲线  
Fig.4 DSC curves of different solid contents at different heating rates

表2 不同固含量推进剂热分解动力学参数对比  
Tab.2 Thermal decomposition kinetic parameters of propellants with different solid contents

样品	s=75%		s=78%	
	Ln A	E <sub>a</sub> /(kJ·mol <sup>-1</sup> )	Ln A	E <sub>a</sub> /(kJ·mol <sup>-1</sup> )
AP低温分解	6.84	111.42	9.97	144.79
AP高温分解	3.10	84.20	19.66	288.27

### 2.3.2 铝粉含量变化对推进剂热分解动力学参数影响

图6对比了不同铝粉含量、不同升温速率下复合固体推进剂的热分解情况。表3显示，当铝粉的质量分数从5%提升至18%时，AP低温分解活化能从111.42 kJ/mol提高至135.61 kJ/mol，AP高温分解活

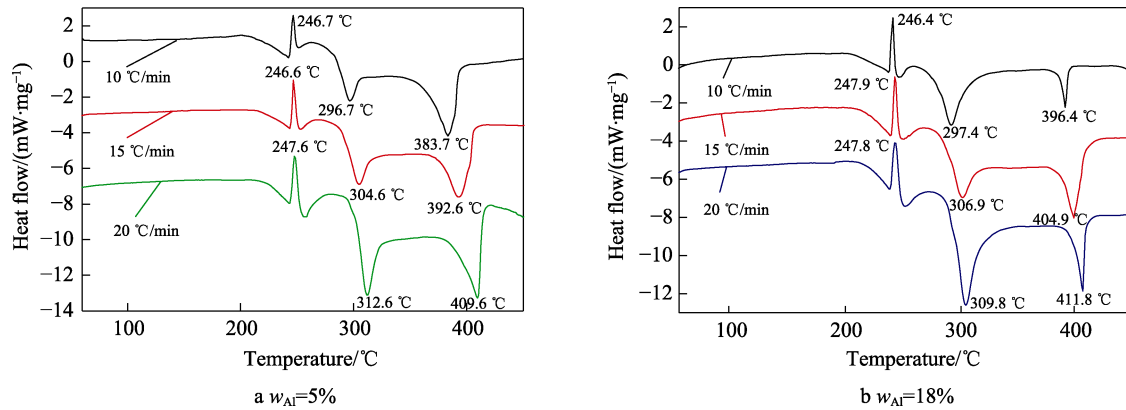


图 5 不同铝粉含量下配方热分解情况

Fig.5 DSC curves of different aluminum powder contents at different heating rates

表 3 不同铝粉含量推进剂热分解动力学参数对比

Tab.3 Thermal decomposition kinetic parameters of propellants with different aluminum powder contents

样品	$w_{Al}=5\%$		$Al=18\%$	
	$\ln A$	$E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$	$\ln A$	$E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$
AP 低温分解	6.84	111.42	9.11	135.61
AP 高温分解	3.10	84.20	9.17	160.72

化能从 84.20 kJ/mol 提升至 160.72 kJ/mol。这说明, 随铝粉含量的升高, AP 高、低温分解更难进行。

### 2.4 慢速烤燃试验

为研究推进剂组分变化对慢烤响应程度的影响, 测试了不同固含量、铝粉含量下配方的慢烤响应程度, 测试结果见图 6。从慢烤试验结果可以看到, 当配方固含量选择 78%、 $w_{Al}=5\%$ 时(见图 7a), 烤燃弹整体被撕裂成较大碎块, 烤燃弹响应温度为 158.6 °C,

响应程度为爆燃。当固含量选择 75%、 $w_{Al}=5\%$ 时(见图 7b), 烤燃弹端盖从螺纹两端被冲开, 端盖、筒段螺纹处略有变形, 烤燃弹响应温度为 169.5 °C, 响应程度为燃烧。当固含量选择 75%、 $w_{Al}=18\%$ 时(见图 7c), 烤燃弹一侧端盖被冲开, 端盖、筒段螺纹处略有变形, 烤燃弹响应温度为 170.7 °C, 响应程度为燃烧。

为深入了解 PBT 基推进剂组分变化引起的慢烤响应行为变化与热分解特性之间的关系, 对比分析了组分变化引起的配方热分解特性变化及慢烤响应程度变化情况, 结果见表 4。从表 4 可以看出, 当配方固含量从 78%下降至 75%时, 配方中 AP 热分解活化能降低, AP 高温分解活化能的下降幅度尤为显著。在相同固含量下, 当配方中 Al 粉的质量分数从 5%提升至 18%时, 配方中 AP 热分解活化能提升, 尤其 AP 高温分解活化能的提升较为明显。



图 6 组分变化对慢烤响应程度影响

Fig.6 The effect of composition changes on the response of slow cook-off

表 4 不同固含量、Al 粉含量下配方热分解情况及烤燃响应情况

Tab.4 Thermal decomposition of formula and slow cook-off response under different solid content and aluminum powder content

配方	固含量/%	Al 粉质量分数/%	AP 低温分解温度/°C	AP 低温分解活化能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	AP 高温分解温度/°C	AP 高温分解活化能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	慢烤响应温度/°C	慢烤响应程度
001	78	5	298.09	144.79	389.09	288.27	158.6	爆炸
002	75	5	296.7	111.42	383.7	84.20	169.5	燃烧
003	75	18	297.39	135.61	396.39	160.72	170.7	燃烧

注: 慢烤响应温度为采用传感器测试的烤燃弹壳体表面温度。

从响应程度看,当配方中 AP 高温分解活化能下降,配方慢烤响应温度提升,慢烤响应程度下降。据文献资料显示,引起推进剂配方慢烤响应难以通过的主要原因是 AP 热分解导致的。在配方逐渐升温过程中,AP 会缓慢形成大量的多孔状物质。当温度继续上升,超过推进剂点火温度时,这些多孔状 AP 会迅速分解,瞬间释放大热量,剧烈反应会导致配方慢烤难以通过<sup>[24]</sup>。本配方中,一方面当推进剂固含量下降,配方中 AP 占比下降,当推进剂达到点火温度后,整体放热量降低,反应剧烈程度下降;另一方面,当固含量下降,粘合剂占比提高,AP 高温分解活化能下降,推进剂热分解过程为 AP 低温分解控制。随着温度逐渐升高,更多的多孔状 AP 在较低的温度下进行分解。当温度升高至推进剂点火温度时,多孔状 AP 含量占比降低,其分解过程产生的热量下降,综合作用下降低配方慢烤响应程度。这与文献[16]中记载的降低配方固含量有利于推进剂降低慢烤响应程度的结论一致。

### 3 结论

1) 当推进剂固含量从 78%降低至 75%时,配方中 AP 低温分解温度降低约 1 °C,高温分解温度降低约 5 °C,配方中 AP 低温分解活化能降低约 33 kJ/mol,高温分解活化能降低 204 kJ/mol。

2) 当推进剂中铝粉的质量分数从 5%提升至 18%时,配方中 AP 低温分解温度升高约 1 °C,高温分解温度升高约 13 °C,配方中 AP 低温分解活化能提高约 24 kJ/mol,高温分解活化能提高 76 kJ/mol。

3) 通过慢烤试验发现,当推进剂固含量为 78%时,推进剂无法通过慢速烤燃试验,而采用 75%的固含量时,推进剂可通过慢速烤燃测试。

4) 通过分析组分变化对配方热分解及慢烤响应程度变化的影响可知,影响配方慢烤响应程度主要由 AP 高温分解控制,AP 高温分解活化能越低,越有利于推进剂通过慢速烤燃测试。

#### 参考文献:

- [1] 彭培根,刘培凉,张仁,等. 固体推进剂性能及原理[M]. 长沙: 中国人民解放军国防科学技术大学, 1987. PENG Pei-gen, LIU Pei-liang, ZHANG Ren, et al. Properties and Principles of Solid Propellants[M]. Changsha: National University of Defense Technology, 1987.
- [2] 刘运飞,张伟,谢五喜,等. 高能固体推进剂的研究进展[J]. 飞航导弹, 2014(9): 93-96. LIU Yun-fei, ZHANG Wei, XIE Wu-xi, et al. Research Progress of High Energy Solid Propellants[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(9): 93-96.
- [3] 李军,程立国,赵孝彬,等. 固体推进剂低易损性试

验方法及评价技术研究[C]//第六届含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集. 成都: [出版者不详], 2014.

- LI Jun, CHENG Li-guo, ZHAO Xiao-bin, et al. Study on Test Method and Evaluation Procedure of Low-vulnerability Properties for Solid Propellant[C]. 6th Symposium on Energetic Materials and Insensitive Munitions. Chengdu: [s. n.], 2014.
- [4] 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. WANG Xu, XU Sen, LI Miao-miao, et al. Influence of Insensitive Oxidants on Low Vulnerability of PBT-Based Propellants[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(6): 7-12.
- [5] 马哈晔,王雨时,王光宇. 国外不敏感炸药综述[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 166-174. MA Han-ye, WANG Yu-shi, WANG Guang-yu. Summary of Foreign Insensitive Explosives[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(5): 166-174.
- [6] 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. WANG Jian-ling, LIU Hai-rang, YANG Jian, et al. Vulnerability Experimental Study on Solid Propellant[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(7): 60-62.
- [7] 李焕,樊学忠,庞维强. 低易损性固体推进剂钝感特性及评估试验方法研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2017, 15(2): 56-59. LI Huan, FAN Xue-zhong, PANG Wei-qiang. Research Progress in Insensitivity Characteristic and Evaluation Test Method of Low Vulnerability Solid Propellant[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2017, 15(2): 56-59.
- [8] 董友亮,王玉刚,刘伟峰,等. 关于我军发展低易损航空弹药的思考[J]. 中国设备工程, 2017(8): 111-112. DONG You-liang, WANG Yu-gang, LIU Wei-feng, et al. The Low Vulnerability of Aviation Ammunition on Our Development Thinking[J]. China Plant Engineering, 2017(8): 111-112.
- [9] 庞爱民. 固体火箭推进剂理论与工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014. PANG Ai-min. Theory and Engineering of Solid Rocket Propellant[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2014.
- [10] 方学谦,王建灵,杨建,等. 固体推进剂安全性评价试验研究[J]. 火工品, 2017(3): 49-52. FANG Xue-qian, WANG Jian-ling, YANG Jian, et al. The Experimental Study of Hazard Assessment on Solid Propellant[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(3): 49-52.
- [11] MIL-STD-2105C, Hazard Assessment Tests for Non-Nuclearmunition[S].
- [12] UN38.3, Recommendation on the Transport of Dangerous Goods: Manual of Tests and Criteria[S].
- [13] 黄韵. 钝感固体推进剂的安全性影响因素研究[D].

- 南京: 南京理工大学, 2020.
- HUANG Yun. Research on Influencing Factors of Safety of Insensitive Solid Propellants[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020.
- [14] 李军, 焦清介, 庞爱民, 等. 固体发动机低易损性评估研究进展[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(1): 1-6.
- LI Jun, JIAO Qing-jie, PANG Ai-min, et al. Recent Progress on Evaluation of Low-Vulnerability Properties for Solid Rocket Motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(1): 1-6.
- [15] 赵孝彬, 李军, 程立国, 等. 固体推进剂慢速烤燃特性的影响因素研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 669-672.
- ZHAO Xiao-bin, LI Jun, CHENG Li-guo, et al. Influence Factors of Slow Cook-off Characteristic for Solid Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6): 669-672.
- [16] 陈中娥, 唐承志, 赵孝彬. HTPB/AP 推进剂的慢速烤燃特征[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 155-157.
- CHEN Zhong-e, TANG Cheng-zhi, ZHAO Xiao-bin. Characteristics of HTPB/AP Propellants in Slow Cook-off[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(2): 155-157.
- [17] 陈中娥, 唐承志, 赵孝彬. 固体推进剂的慢速烤燃行为与热分解特性的关系研究[J]. 含能材料, 2005, 13(6): 393-396.
- CHEN Zhong-e, TANG Cheng-zhi, ZHAO Xiao-bin. Relationship between Slow Cook-off Behaviour and Thermal Decomposition Characteristics of Solid Propellant[J]. Energetic Materials, 2005, 13(6): 393-396.
- [18] 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 Jie-fan, XU Sen, LIU Da-bin, et al. Thermal Decomposition Characteristics of PBT Composite Solid Propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(6): 752-757.
- [19] 廖林泉, 胥会祥, 李勇宏, 等. HTPB 推进剂危险性实验研究[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 28-31.
- LIAO Lin-quan, XU Hui-xiang, LI Yong-hong, et al. Experimental Study on Hazard of HTPB Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4): 28-31.
- [20] Komai I, Sato W. Reaction mechanism in slow cook-off Test of GAP-AP propellants[C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Symposium (IMEMTS), Bristol: [s. n.], 2006.
- [21] RODRIGO I C, JOHN M B. Behavior of Hydroxyl-Terminated Polyether (HTPE) Composite Rocket Propellants in Slow Cook-Off[J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2008, 7(3): 171-185.
- [22] 李葆萱. 固体推进剂性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990.
- LI Bao-xuan. Solid Propellant Performance[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1990.
- [23] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- HU Rong-zu, SHI Qi-zhen. Thermal Analysis Kinetics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [24] KENNETH J G, GUY N S, EDNA M W. Improved Slow Cook-Off Response of HTPB Propellants[R]. Naval Air Warfare Center China Lake, CA93555, 1994.

责任编辑: 刘世忠