

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-08

## HTPB 推进剂药浆及成品安全性能影响因素的灰色关联分析

王斐<sup>1,2</sup>, 王天帅<sup>1,2</sup>, 张维海<sup>3</sup>, 刘晋湘<sup>3</sup>, 张秋禹<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学化学与化工学院, 陕西 西安 710000; 2. 特种功能与智能高分子材料工信部重点实验室, 陕西 西安 10000;  
3. 西安北方惠安化学工业有限公司, 陕西 西安 710302)

**摘要:** 研究端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂的固体组分因素、燃速性能与其药浆及成品的撞击感度、摩擦感度和静电火花感度之间的关联性,对于固体推进剂的安全生产与性能优化具有重要意义。本研究基于灰色关联分析方法,计算了HTPB推进剂的固体组分因素(铝(Al)含量、高氯酸铵(AP)含量、黑索今(RDX)含量及总固体组分占总质量的比例(固含量,S))及燃速与推进剂药浆及成品不同感度之间的灰色关联度,并确定了各感度的主要影响因素。研究表明,AP含量是影响HTPB推进剂药浆撞击感度和静电火花感度的主要因素,而RDX含量对药浆摩擦感度的影响最为显著。在HTPB推进剂成品感度的关联性方面,Al含量是撞击感度的关键影响因素,燃速和固含量分别是HTPB推进剂成品摩擦感度和静电火花感度的主要影响因素。

**关键词:** 端羟基聚丁二烯推进剂;安全性能;灰色关联分析;固体组分;燃速

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024305

### 0 引言

端羟基聚丁二烯推进剂简称丁羟推进剂,是以端羟基聚丁二烯(HTPB)为粘合剂,与无机氧化剂、能量添加剂、固化剂及键合剂等组成的复合推进剂<sup>[1-2]</sup>,在其生产、运输、贮存和使用过程中,常因受到机械撞击、摩擦、静电火花等外界刺激引发燃烧、爆炸事故,造成人员伤亡、设备和建筑设施破坏的严重后果<sup>[3]</sup>。因此,针对此类复合固体推进剂生产过程的安全性评估和分析是一项至关重要的工作<sup>[4-6]</sup>。

近年来,众多研究人员将统计方法应用于火炸药安全评价体系来指导实际生产<sup>[7-9]</sup>。青勤等<sup>[10]</sup>运用模糊综合评价法研究了固体推进剂粉尘爆炸影响因素,建立了评价指标体系。付强<sup>[11]</sup>在系统论、模糊数学理论及层次分析法理论基础,根据变燃速发射药生产特点,综合运用事故树分析法和模糊综合评价法对其

进行了安全评价。作为统计方法中重要组成部分,灰色关联分析法可以在较少的数据下建立复杂体系之间的联系<sup>[12]</sup>,对系统发展变化态势提供量化依据,进一步判断自变量对研究因素的影响程度。因此,研究人员也基于灰色关联分析方法,对固体推进剂的配方与其感度及其力学性能等进行关联度分析。例如,张兴高等<sup>[13]</sup>运用灰色关联分析法,分析了影响HTPB推进剂宏观力学性能的主要影响因素。秦超等<sup>[14]</sup>运用灰色关联分析法计算了硝酸酯增塑聚醚固体推进剂配方与摩擦感度、撞击感度及火焰感度等多项感度的灰色关联度,得出了影响固体推进剂安全性能的影响因素排序。

在推进剂的生产过程中,药浆状态至关重要<sup>[15]</sup>。在该阶段,各组分(如氧化剂、粘结剂、金属燃料等)尚未发生固化反应,仍处于自由分布状态<sup>[16]</sup>。随着固化反应的进行,成品推进剂逐渐形成稳定的三维交联结构<sup>[17]</sup>,最终固化为推进剂成品。目前已有研究多聚焦于推进剂成品的感度展开分析,而对推进剂在药浆阶段的感度特性及其影响因素关注不足。但安全性直接关系到生产过程的可操作性与风险管控,因此,深入理解推进剂在不同形态下的安全特性,对其全生命周期的风险管理至关重要。此外,燃速作为固体推进剂燃烧过程中最关键的性能之一,不仅影响能量释放速率,还影响燃烧稳定性与

收稿日期: 2024-09-27; 修回日期: 2025-03-25

网络出版日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(22275148)

作者简介: 王斐(1985-),女,正高级工程师。

e-mail: h125135185@qq.com

通信联系人: 王天帅(1994-),男,副教授。主要从事固体推进剂计算模拟仿真工作。e-mail: tianshuai@nwpu.edu.cn

引用本文: 王斐,王天帅,张维海,等. HTPB 推进剂药浆及成品安全性能影响因素的灰色关联分析[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2024305.

WANG Fei, WANG Tian-shuai, ZHANG Wei-hai, et al. Grey Relational Analysis of Factors Influencing the Safety Performance of HTPB Propellant Slurry and Final Product[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2024305.

安全性。燃速性能受氧化剂/燃料比、粒度分布及固体含量等因素影响<sup>[18-19]</sup>,而这些因素同样影响推进剂感度,进而影响整体安全性能<sup>[20]</sup>。然而,目前尚缺乏针对推进剂组分因素及燃速与感度之间在推进剂药浆与成品两种形态下关联性的系统研究。

本研究以典型HTPB推进剂药浆及成品为研究对象,采用灰色关联分析方法,分析了影响推进剂药浆及成品撞击感度、摩擦感度和静电火花感度的主要因素,建立了推进剂固体组分因素、燃速性能和药浆及成品的感度性能之间的关联关系,为HTPB推进剂混合工艺优化和产品安全性能提升提供了理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

端羟基聚丁二烯(HTPB),数均分子量为3200,羟值为 $0.61 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,黎明化工研究设计院有限责任公司;甲苯二异氰酸酯(TDI),纯度98.6%,甘肃银光化学工业集团有限公司;癸二酸二辛脂(DOS),分析纯,营口天元化工研究所股份有限公司;AP,大连高佳化工有限公司;RDX,7类,甘肃银光化学工业集团有限公司;Al, $D_{50}$ 为 $13 \mu\text{m}$ ,鞍钢实业微细铝粉有限公司。

撞击感度测试仪,HT-202B,湖北航天化学技术研究所;摩擦感度测试仪,HT-203B,湖北航天化学技术研究所;静电火花感度测试仪,HT-201B-3,湖北航天化学技术研究所。

### 1.2 推进剂样品药浆与成品的制备

采用了7种不同类型的配方来考察固体组分因素及燃速性能对HTPB推进剂药浆及成品撞击感度、摩擦感度和静电火花感度的影响程度,具体组成见表1。

表1 HTPB推进剂的固体组分信息

Table 1 Mass ratios of solid components in formulation of HTPB propellants

	$m_{\text{AP}} / \%$	$m_{\text{Al}} / \%$	$m_{\text{RDX}} / \%$	$S / \%$
HTPB-1	62.00	5.50	20.00	87.50
HTPB-2	54.50	12.50	20.00	87.00
HTPB-3	61.00	8.50	18.00	87.50
HTPB-4	58.30	13.50	15.00	86.80
HTPB-5	60.50	10.50	16.00	87.00
HTPB-6	69.50	16.50	0.00	86.00
HTPB-7	64.50	16.00	6.00	86.50

Note:  $m_{\text{AP}}$  refers to the mass ratio of AP,  $m_{\text{Al}}$  refers to massratio of Al,  $m_{\text{RDX}}$  refers to mass ratio of RDX,  $S$  refers to the total mass fraction of solid components.

将组分按照不同配方比例准确称取后依次加入到立式混合机内机械搅拌,制备成药浆,在 $(50 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 下混合135 min后出料,将混合好的药浆一部分置于样品杯中得到推进剂药浆样品,命名为HTPB-X( $X=1, 2, \dots, 7$ )。部分药浆制备成测试方坯中,于 $(60 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内固化4 d,得到推进剂成品样品,命名为HTPB-X( $X=1, 2, \dots, 7$ )。

### 1.3 性能测试

推进剂药浆和成品的机械感度按GJB770B-2022.601.2特性落高法测试,测试环境温度为25摄氏度,其中摩擦感度按照GJB770B-2022中方法602.1爆炸概率法测试,测试条件为摆角 $66^\circ$ ,压力2.45 MPa,推进剂药浆和成品测试药量均为30 mg;撞击感度测试,锤重5 kg,药浆药量50 mg,成品药量30 mg;静电火花感度按QJ 20019.5-2018标准执行,测试药量50 mg,电容10000 pF,针距1 mm;推进剂燃速性能采用GJB770B靶线法测试,测试压强7.0 MPa。

7种不同类型配方的推进剂药浆的感度测试值及推进剂成品的感度测试值及成品燃速性能如表2和表3所示。

表2 不同配方的HTPB推进剂药浆感度实测值

Table 2 Experimentally measured sensitivity of the HTPB propellants slurries with different formulations

types	impact sensitivity / J	friction sensitivity / %	electrostatic sensitivity / mJ
HTPB-1	28.09	78	40.61
HTPB-2	25.34	80	22.41
HTPB-3	20.98	34	29.02
HTPB-4	26.01	22	19.01
HTPB-5	18.07	24	25.70
HTPB-6	34.03	0	27.21
HTPB-7	28.63	48	19.01

表3 不同配方HTPB推进剂成品感度及燃速实测值

Table 3 Experimentally measured sensitivity and burning rate of the HTPB propellants products with different formulations

types	impact sensitivity / J	friction sensitivity / %	electrostatic sensitivity / mJ	burning rate / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
HTPB-1	10.16	50	74.11	11.73
HTPB-2	25.03	56	72.2	6.11
HTPB-3	25.88	28	82.58	11.42
HTPB-4	11.18	20	61.85	5.69
HTPB-5	10.76	14	86.11	13.54
HTPB-6	13.81	48	63.19	13.12
HTPB-7	36.04	24	76.71	5.64

## 2 灰色关联度计算方法

在采用灰色关联分析方法对不同配方 HTPB 推进剂药浆及成品的感度影响因素进行分析时,需依次完成参考序列与比较序列的构建、数据归一化处理、关联系数计算以及灰色关联度的计算。具体流程如下:

### 2.1 构建参考序列和比较序列

将撞击感度、摩擦感度和静电火花感度数据确定为参考序列,将对固体推进剂安全性能影响的因素(配方及燃速)作为比较序列。

其中比较序列为:

$$[X'_1 X'_2 \cdots X'_n] = \begin{bmatrix} x'_1(1) & \cdots & x'_n(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_1(m) & \cdots & x'_n(m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

参考序列为:

$$X'_0 = (x'_0(1), x'_0(2), \cdots, x'_0(m))^T \quad (2)$$

式中,  $X'_0$  代表系统的关键变量(感度数据),  $X'_n$  代表影响该变量的不同因素(推进剂组分、燃速)。其中  $n$  表示影响因素的个数,  $m$  表示样本数量。

### 2.2 量纲一化处理

对由参考序列和比较序列构成的矩阵数据进行量纲一化处理,消除各个指标单位的不同及其数值数量级间的悬殊差别带来的影响。常用的量纲统一化方法有初值法和均值法,因初值法适用于稳定递增或递减的数据,均值法适合没有明显升降趋势现象的数据,本项目进行量纲一化处理时,采用均值法进行分析。

均值法:

$$x_i(k)' = \frac{x_i(k)}{\text{Ave}(x_i)} \quad (3)$$

$$\text{Ave}(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k) \quad (4)$$

式中,  $\text{Ave}(x_i)$  为数据均值,  $x_i(k)$  表示第  $i$  个比较序列在第  $k$  个样本的数据值,  $x_i(k)'$  为均值法处理后的数据。

### 2.3 计算关联系数

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta ik + \rho \Delta \max} \quad (5)$$

$$\Delta \min = \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (6)$$

$$\Delta \max = \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (7)$$

$$\Delta ik = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (8)$$

式中,  $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$  和  $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$  分别表示所有序列间的最小和最大绝对差值。 $|x_0(k) - x_i(k)|$  表示参考序列与比较序列在第  $k$  个数据点的绝对差值。其中  $\rho$  为分辨系数,取值范围为  $(0, 1)$ ,分辨系数越小时,关联系数间的差异越大,区分能力越强。采用均值分析法进行分析时,  $\rho$  的取值通常为 0.5。

### 2.4 获取灰色关联度

通过计算对各个指标与参考序列对应元素的关联系数平均值得出灰色关联度:

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m r(x_0(k), x_i(k)) \quad (9)$$

式中,  $r(x_0, x_i)$  为灰色关联度,  $m$  为总的样本数量。 $x_0, x_i$  分别为变换前的参考序列和比较序列。

### 2.5 分析评价安全影响因素

通过对不同感度的组分元素关联度大小进行排序,从而对固体推进剂安全性能影响因素进行分析,确定各影响因素的显著程度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 固体组分因素及成品燃速与推进剂药浆感度的关联性分析

在药浆阶段,推进剂中的固体组分(如 AP、RDX、Al)尚未形成稳定的三维交联网络,而是分散在液相基质中。因此,组分间的直接接触、分布状态及相互作用更直接地影响感度。通过灰色关联分析法,利用表 1 及表 2 的实验结果,对影响 HTPB 固体推进剂药浆撞击感度、摩擦感度和静电火花感度因素进行了关联性分析,分析结果如图 1 及表 4 所示,AP 含量是 HTPB 推进剂药浆安全性的关键影响因素,在撞击感度(0.847 J)和静电火花感度(0.783 mJ)中均表现出最高的关联度,显示其在液相环境中的分布更易受到机械应力和电荷积聚的影响。RDX 含量在摩擦感度(0.632%)方面的影响最为突出,相比之下,其对撞击感度(0.582 J)和静电火花感度(0.627 mJ)的影响相对较小。此外,成品燃速性能在静电火花感度中的关联度达到 0.714,高于其在撞击感度和摩擦感度中的影响,说明成品燃速性能对推进剂药浆的静电火花感度影响更为显著。

### 3.2 固体组分因素及成品燃速与推进剂成品感度的关联性分析

在推进剂固化过程中,交联结构的逐步形成限

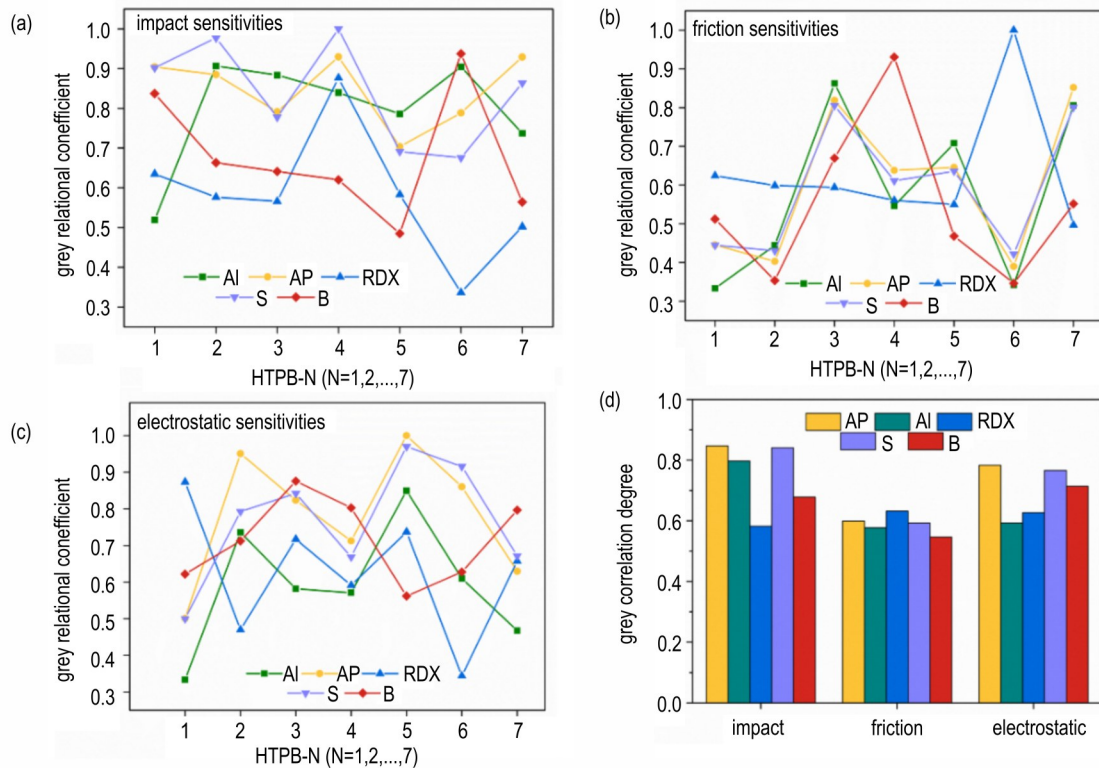


图1 组分及燃速与HTPB推进剂药浆撞击感度、摩擦感度静电火花感度的关联系数及其关联度

Fig.1 Correlation coefficients and overall correlation degree between composition/burning rate with impact sensitivity, friction sensitivity, electrostatic sensitivity for the HTPB propellant slurry

表4 组分因素及成品燃速与HTPB推进剂药浆不同感度的灰色关联度及显著程度

Table 4 Grey correlation degree and significance level of component factors and burning rate of final product with different sensitivities of HTPB propellant slurry

gray correlation	grey relation degree					significant level
	$m_{AP}$	$m_{Al}$	$m_{RDX}$	$S$	$B$	
impact	0.847	0.797	0.582	0.841	0.678	$m_{AP} > S > m_{Al} > B > m_{RDX}$
friction	0.599	0.577	0.632	0.593	0.547	$m_{RDX} > m_{AP} > S > m_{Al} > B$
electrostatic	0.783	0.593	0.627	0.766	0.714	$m_{AP} > S > B > m_{RDX} > m_{Al}$

Note:  $S$  refers to the total mass fraction of solid components.  $B$  refers to the burning rate of propellant products.

制了固体颗粒的移动性,使其被包裹于弹性基体中,界面效应随之增强。为进一步探究固体组分因素及燃速对推进剂成品感度的影响,本研究考察了7种不同配方的固体组分因素及燃速对HTPB推进剂成品撞击感度、摩擦感度和静电火花感度的影响程度(表3)。

基于计算结果(如图2和表5所示),铝含量是影响HTPB推进剂成品撞击感度的主要因素,而燃速和固含量分别是影响摩擦感度和静电火花感度的主导因素。在药浆阶段,由于颗粒间的直接接触、分布状态及相互作用未受交联网络的约束,其对感度的影响更为直接。而在推进剂固化后,交联反应的进行使推进剂

弹性体网络结构逐步完善,材料的整体力学性能(如弹性模量、断裂韧性等)随之变化,从而影响固体颗粒及燃速对推进剂感度的作用机制。RDX在药浆阶段更易受到外界摩擦作用的诱导,从而显著影响摩擦感度。然而,在成品推进剂中,RDX被弹性网络包裹,与外界的直接接触减少,使其对摩擦感度的影响下降,导致主要影响因素发生变化。药浆与成品推进剂在感度影响因素上的不同关联度,主要源于推进剂固化过程中微观结构的重构、颗粒-基质界面效应的变化以及材料机械性能的调整。这些因素共同作用,导致不同组分在推进剂感度中的影响权重发生重构,从而影响推进剂的安全性能。

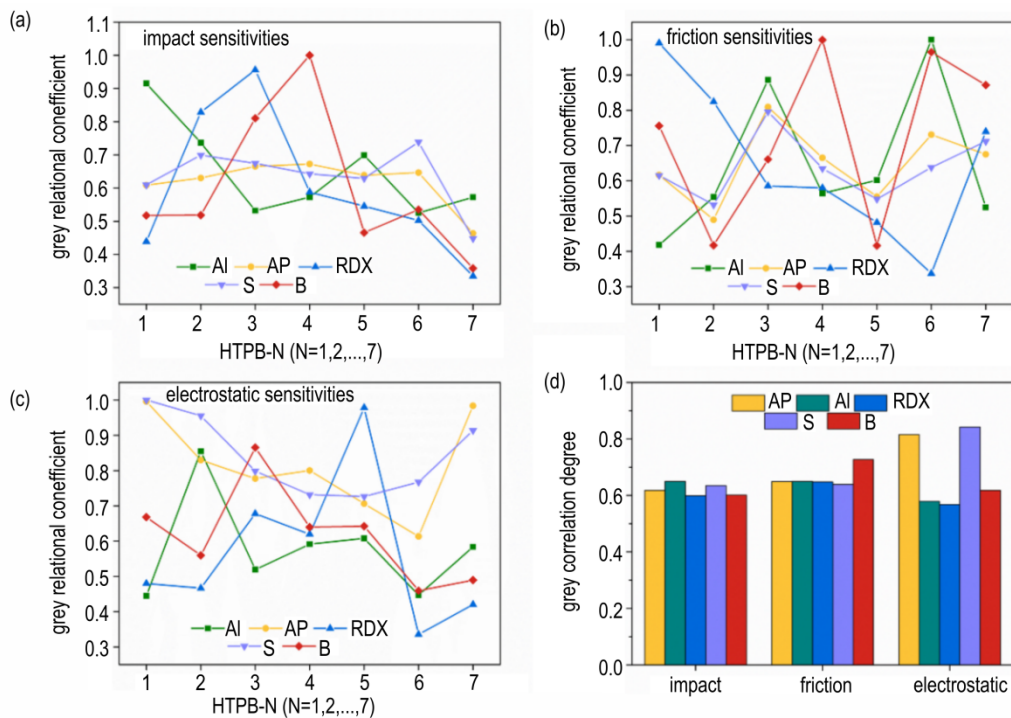


图2 组分及燃速与HTPB推进剂成品撞击感度;摩擦感度;静电火花感度的关联系数及其关联度

Fig.2 Correlation coefficients and overall correlation degree between composition/burning rate with impact sensitivity, friction sensitivity, electrostatic sensitivity for the HTPB propellant product

表5 组分及成品燃速与HTPB推进剂成品不同感度的灰色关联度及显著程度

Table 5 Grey correlation degree and significance level of component factors and burning rate of final product with different sensitivities of HTPB propellant products

gray correlation	grey relation degree					significant level
	$m_{AP}$	$m_{Al}$	$m_{RDX}$	$S$	$B$	
impact	0.618	0.650	0.599	0.635	0.601	$m_{Al} > S > m_{AP} > B > m_{RDX}$
friction	0.649	0.650	0.648	0.639	0.727	$B > m_{Al} > m_{AP} > m_{RDX} > S$
electrostatic	0.815	0.579	0.568	0.842	0.618	$S > m_{AP} > B > m_{Al} > m_{RDX}$

Note:  $S$  refers to the total mass fraction of solid components.  $B$  refers to the burning rate of propellant products.

## 4 结论

为探讨HTPB推进剂中固体组分因素及成品燃速与其药浆及成品的撞击感度、摩擦感度和静电火花感度之间的关联程度,研究采用灰色关联分析方法,分析了不同因素对推进剂敏感性参数的影响,以及推进剂药浆与成品在不同感度指标上的主要影响因素,并比较了二者之间的关联性差异。研究结果表明:

(1)在HTPB推进剂药浆的感度影响因素中,高氯酸铵含量是影响撞击感度(灰色关联度0.847)和静电火花感度(灰色关联度0.783)的主导因素,而黑索金含量对摩擦感度的影响最为显著(灰色关联度0.632)。此外,成品燃速性能在推进剂药浆的静电火

花感度关联性中表现突出,其关联度明显高于撞击感度和摩擦感度,表明燃速对推进剂药浆的放电敏感性具有更大的影响。

(2)在HTPB推进剂成品的感度影响因素方面,铝粉含量对撞击感度的影响最强(灰色关联度0.650),燃速成为摩擦感度的主导影响因素(灰色关联度0.727),而固含量对静电火花感度的影响最为显著(灰色关联度0.842)。

(3)固化过程引发了感度影响权重的重构。与推进剂药浆相比,推进剂在固化后,其影响感度的主要因素发生了显著变化。

### 参考文献:

- [1] 徐纪琳,李兆娜,陈建发,等.低铝含量HTPB固体推进剂的燃烧特性[J].火炸药学报,2023,46(8):755-760.

- XU Ji-lin, LI Zhao-na, CHEN Jian-fa, et al. Combustion characteristics of low-aluminum htpb solid propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(8):755-760.
- [2] 施冬梅,杜仕国,邓辉. 火箭弹复合固体推进剂贮存安全性研究[J]. *火炸药学报*, 2002, 25(1): 22-24.
- SHI Dong-mei, DU Shi-guo, DENG Hui. Advance of study of storage life for rocket composite solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 25(1): 22-24.
- [3] 薛妍,曲文刚,刘所恩,等. 单原子催化剂的催化效果及其作为固体推进剂燃烧催化剂的应用前景分析[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(4): 275-284.
- XUE Yan, QU Wen-gang, LIU Suo-en, et al. The catalytic effect of single atom catalysts and its application prospect in solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(4): 275-284.
- [4] 袁俊明,刘家尧,周翰鹏,等. HTPB固体推进剂落锤撞击试验及点火响应模拟[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(5): 15-22.
- YUAN Jun-ming, LIU Jia-yao, ZHOU Han-peng, et al. Drop hammer impact test and ignition response simulation of HTPB composite solid propellant tablets[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(5): 15-22.
- [5] 郁红陶,张庆明,何远航. AP/HTPB/Ferrocene混合体系粉尘爆炸特性研究[J]. *含能材料*, 2009, 17(3): 283-286.
- YU Hong-tao, ZHANG Qing-ming, HE Yuan-hang. Characteristics of dust explosion of AP/HTPB/Ferrocene mixed system[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(3): 283-286.
- [6] 刘学. 复合固体推进剂用键合剂的种类及其作用机理[J]. *含能材料*, 2000, 8(3): 135-140.
- LIU Xue. Kinds of bonding agents and their acting mechanism for composite solid propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(3): 135-140.
- [7] 刘彝,肖磊,武宗凯,等. 螺压改性双基推进剂压延过程质量及安全控制研究进展[J]. *火炸药学报*, 2022, 45(5): 612-628.
- LIU Ben, XIAO Lei, WU Zong-kai, et al. Research progress on quality and safety control in calendaring process of screwed modified double-base propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(5): 612-628.
- [8] 徐爽,汪越,武卓,等. 铝粉含量对GAP钝感推进剂性能的影响[J]. *含能材料*, 2021, 29(10): 928-936.
- XU Shuang, WANG Yue, WU Zhuo, et al. Influence of aluminum powder contents on insensitive gap propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(10): 928-936.
- [9] 郭延芝,吴艳玲,刘润青,等. 基于机器学习的RDX-CMDB推进剂安全性能预测[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2025, 62(1): 228-236.
- GUO Yan-zhi, WU Yan-ling, LIU Run-qing, et al. Machine-learning prediction for safety of RDX-CMDB propellants[J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2025, 62(1): 228-236.
- [10] 青勤,黄智勇,金国锋. 固体推进剂粉尘爆炸危险性的模糊综合评价[J]. *安全与环境工程*, 2009, 16(4): 58-61.
- QING Qin, HUANG Zhi-yong, JIN Guo-feng. Fuzzy comprehensive evaluation method for dust explosion of solid propellant[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2009, 16(4): 58-61.
- [11] 付强,马忠亮,高可正,等. 变燃速发射药连续化生产模糊综合评价模型研究[J]. *安全与环境学报*, 2010, 10(1): 197-200.
- FU Qiang, MA Zhong-liang, GAO Ke-zheng, et al. Comprehensive fuzzy continuous production evaluation model for the variable-combustion rate propellants. *Journal of Safety and Environment*. 2010, 10(1):197-200.
- [12] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社. 2002.
- DENG Ju-long. Grey theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing Agency. 2002.
- [13] 张兴高,张炜,朱慧,等. 固体推进剂贮存老化研究进展[J]. *含能材料*, 2008, 16(2): 232-237.
- ZHANG Xing-gao, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. Review on the aging of solid propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 232-237.
- [14] 秦超,赵孝彬,李军. 固体推进剂安全性能影响因素的灰色关联分析[J]. *含能材料*, 2012, 20(6): 762-765.
- QIN Chao, ZHAO Xiao-bin, LI Jun. Grey relational analysis in influencing factors of nepe propellant sensitivity[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 762-765.
- [15] 郭骥瑞,任丽媛,陈康,等. 用于HTPB推进剂药浆的静态混合管数值模拟[J]. *化工学报*, 2024, 75(S1): 206-216.
- GUO Qi-ru, REN Li-yuan, CHEN Kang, et al. Numerical simulation of static mixing tubes for HTPB propellant slurry[J]. *CI-ESC Journal*, 2024, 75(S1): 206-216.
- [16] 卢鑫浩,叶宝云,程王健,等. B-GAP基推进剂药浆流变特性和固化动力学研究[J]. *含能材料*, 2022, 30(11): 1083-1089.
- LU Xin-hao, YE Bao-yun, CHENG Wang-jian, et al. Research on rheological properties and curing kinetics of b-gap-based propellant slurry[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(11): 1083-1089.
- [17] 刘晶如,罗运军. 非等温DSC研究Al/HTPB/TDI体系的固化反应动力学[J]. *含能材料*, 2009, 17(1): 83-86.
- LIU Jing-ru, LUO Yun-jun. Curing kinetics of HTPB/TDI/Al system by non-isothermal DSC[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(1): 83-86.
- [18] 李鑫,牟国柱,周鹏,等. 噁二唑类含能金属盐对高燃速丁羟推进剂性能的影响[J]. *固体火箭技术*, 2025, 48(1): 133-138.
- LI Xin, MU Guo-zhu, ZHOU Peng, et al. Influence of oxadiazole energetic metallic salts on high burning rate HTPB propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2025, 48(1): 133-138.
- [19] 贾方娜,丁温霞,刘琮佩,等. 碳硼烷衍生物在高燃速丁羟固体推进剂中的应用研究[J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(6): 848-853.
- JIA Fang-na, DING Wen-xia, LIU Cong-peilin, et al. Application of a carborane derivative in high-burning-rate HTPB solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(6): 848-853.
- [20] 吴海波,武毅,张超,等. 高燃速丁羟推进剂药浆在热与低速撞击刺激下点火响应的实验研究[J]. *火炸药学报*, 2025, 48(1): 95-104.
- WU Hai-bo, WU Yi, ZHANG Chao, et al. Experimental research on ignition response of high burning rate HTPB propellant slurry stimulated by heat and low speed impact[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2025, 48(1): 95-104.

## Grey Relational Analysis of Factors Influencing the Safety Performance of HTPB Propellant Slurry and Final Product

WANG Fei<sup>1,2</sup>, WANG Tian-shuai<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei-hai<sup>3</sup>, LIU Jin-xiang<sup>3</sup>, ZHANG Qiu-yu<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China; 2. Key Laboratory of Special Functions and Intelligent Polymer Materials, Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710000, China; 3. Xi'an North Huian Chemical Industry Co., Ltd, Xi'an 710302, China)

**Abstract:** Understanding the correlations between solid propellant composition, burning rate characteristics, and safety parameters including the impact, friction, and electrostatic spark sensitivities for both HTPB (Hydroxyl-Terminated Polybutadiene) propellant slurry and its final cured product is crucial for optimizing both the safety profile and performance characteristics of solid composite propellants. This study systematically applies the grey relational analysis method to quantitatively evaluate the relationships between formulation parameters (aluminum content, ammonium perchlorate content, RDX proportion and the total solid loading in the overall mass) and burn rate with the safety parameters measured for both HTPB propellant slurry and its final product. The key influencing factors for each sensitivity parameter were identified. The results indicate that ammonium perchlorate content exhibits the strongest correlation with both impact and electrostatic spark sensitivities in HTPB propellant slurry, while RDX content displays the predominant influence on friction sensitivity. Regarding the sensitivity of the final cured product, aluminum content emerges as the dominant factor influencing impact sensitivity, whereas burning rate and solid content become the primary determinants affecting the friction and electrostatic spark sensitivity, respectively.

**Key words:** hydroxyl-terminated polybutadiene propellant; safety performance; grey correlation analysis; solid component; Burning rate

**CLC number:** TJ55

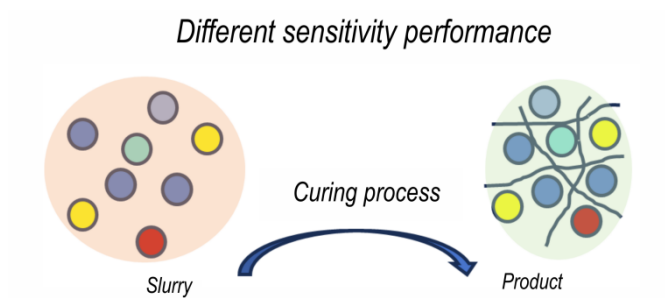
**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024305

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (No. 22275148)

(责编: 高毅)

图文摘要:



A gray relational analysis was performed to investigate the relationships between composition, burning rate, and the impact, friction, and electrostatic sensitivities for both uncured HTPB propellants slurry and final cured products.