

文章编号:1006-9941(2024)08-0855-09

模糊综合评价模型在高能硝胺发射药改性评价中的应用研究

郭志罡,李曼曼,王 锋,于慧芳,魏 伦,王琼林

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究模糊综合评价模型在高能硝胺发射药改性评价中的应用,采用包覆工艺,分别选取三氨基三硝基苯(TATB)和聚酯(NA)作为包覆工艺中的降燃速材料,制备了TATB包覆发射药和NA包覆发射药,对比了包覆和未包覆发射药的堆积密度、局部燃速、爆热、燃烧渐增性以及内弹道性能;基于此实验结果,采用层次分析法,评价了TATB和NA对发射药基本性质和燃烧性能的影响程度。研究建立了发射药基本性质和发射药燃烧性能间的模糊评价方法;发现面向发射药燃烧性能,局部燃速的影响权重最大,为0.82;爆热的影响权重次之,为0.11;堆积密度的影响权重为0.07。在堆积密度差异较小的情况下,由于NA包覆发射药的降燃速效果明显强于TATB包覆发射药,NA包覆发射药的能量损失虽然较TATB包覆发射药更大,NA包覆发射药的燃烧性能优于TATB包覆发射药,且二者明显强于未包覆的空白发射药。

关键词: 模糊综合评价模型;高能硝胺发射药;包覆;三氨基三硝基苯(TATB);聚酯(NA)

中图分类号:TJ55;TQ562

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2024069

0 引言

为弹丸发射提供能源的发射药是决定武器威力及弹道稳定性的核心^[1]。在众多发射药中,高能硝胺发射药属于能量高、密度大的新型发射药^[2],倍受关注。为充分挖掘高能硝胺发射药的应用潜力,研究人员需进一步调控燃烧渐增性^[3]和低温性能^[4]等特性。目前在发射药性能调控研究中,基于燃速调控的包覆技术^[5],比燃面调控的几何药型优化^[6]的工艺可操作性强,改善效果好,利于应用推广。

包覆工艺的基础研究中,降燃速材料的选取一直是热点,它是影响发射药性能变化的重要因素。常见降燃速材料包括樟脑^[7]、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)^[8]等小分子材料,以及三氨基三硝基苯(TATB)^[3]、聚酯(NA)^[9]等高分子材料。小分子材料迁移性问题严重,与之相比,高分子材料具有良好的抗迁移性能,据此魏

伦等^[10]应用一种新型聚酯提升了发射药长贮稳定性。经降燃速材料包覆处理,发射药的基本性质会发生变化,如发射药的氧平衡、火药力等能量特性^[8]、发射药堆积密度^[11]与表面包覆层的局部燃速等;包覆层的燃速变化与降燃速材料的种类和组分含量密切相关^[3]。合理调控发射药的基本性质,会一定程度改善发射药燃烧渐增性和内弹道性能,通过密闭爆发器^[11]和内弹道实验测试^[12]已开展了相关研究。

整体来看,包覆工艺中可选择的降燃速材料种类已趋于多样化,影响因素的分析方法也较成熟。包覆发射药配方设计是多目标决策的复杂问题。然而,现有研究尚未形成系统的定量评价方法,仅为有限实验工况点的对比,对不同影响因素评价分散,多为经验性/半经验性的定性结论;且不同学者的分析侧重点存在不确定性,难以互相借鉴。模糊综合评价模型可应用于多目标问题,可提供方案重要程度的排序分析^[13-14],实现多因素影响作用的量化加权。付强等^[13]采用模糊综合评价模型讨论发射药生产中造成事故发生的關鍵原因,工作人员、生产工艺、原料物质、机械设备和作业环境所占的权重依次降低。目前,在模糊综合评价模型的应用中,权重计算的主观性成分较大,相关数据与实际规律的关联性弱,很难直接指导包覆发

收稿日期:2024-02-27;修回日期:2024-04-01

网络出版日期:2024-05-14

作者简介:郭志罡(1995-),男,助理研究员,主要从事发射装药应用技术研究。e-mail:940897281@qq.com

通信联系人:于慧芳(1982-),女,副研究员,主要从事发射装药应用技术研究。e-mail:50793647@qq.com

引用本文:郭志罡,李曼曼,王锋,等.模糊综合评价模型在高能硝胺发射药改性评价中的应用研究[J].含能材料,2024,32(8):855-863.

GUO Zhi-gang, LI Man-man, WANG Feng, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation Model Applying in the Modification Evaluation of High Energy Nitramine Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(8):855-863.

射药改性评价。

因此,为验证模糊综合评价模型在高性能发射药改性评价中的可行性,本研究选取了空白发射药、三氨基三硝基苯(TATB)包覆发射药和聚酯(NA)包覆发射药,通过实验测试对比了3种发射药的堆积密度、局部燃速、爆热、燃烧渐增性以及内弹道性能;在此基础上,采用层次分析法,构建了发射药基本性质和发射药燃烧性能间的模糊评价方法,量化了不同因素的关联性,为未来高性能发射药的设计提供理论依据。在模糊评价过程中,通过实验数据和因素判断矩阵的映射,减少了重要程度评价的不确定性。

1 实验部分

1.1 原料与设备

空白发射药,主要含能成分为NC、NG、RDX和NQ,药形为7孔粒状,该发射药经吸收、压延、胶化、压伸成型、切粒、干燥等三基药生产工艺制备,由西安近代化学研究所提供。吸收药片,以NC和NG为主要含能成分,经吸收、驱水及压延等工序制得,由西安近代化学研究所提供。三氨基三硝基苯(TATB)^[3],属于一种低能单质炸药,常温呈固体粉末,由西安近代化学研究所提供。聚酯(NA)^[10],一种惰性高分子材料,常温呈浅黄色固态,由西安近代化学研究所提供。

1.2 包覆发射药样品制备

分别选择降燃速材料TATB和NA,和溶剂、吸收药片按一定比例配置2种包覆液,用于制备2种包覆发射药样品。其中TATB加入百分比是NA加入百分比的4倍。在包覆发射药制备过程中,称量空白发射药置于转鼓式包覆机中,在转鼓维持运转状态时,分别将TATB和NA包覆液均匀喷涂在空白发射药表面,通入热风驱除发射药中的溶剂,制备得到TATB包覆发射药和NA包覆发射药。所得包覆发射药样品具有较好的包覆均匀性。

1.3 发射药样品表征

测试空白发射药、TATB包覆发射药和NA包覆发射药的基本性能以及静态/动态燃烧性能,具体为:

(1)堆积密度测试:按照GJB 770B-2005方法402.1,基于量筒和天平测试3种发射药样品的堆积密度。

(2)爆热测试:按照GJB 770B-2005方法701.2,基于恒温式氧弹热量计测试3种发射药样品的爆热。

(3)局部燃速测试:对应3种发射药样品的材质组分,制备外径为6 mm的基础高能硝酸铵药条TR-0、添加TATB的高能硝酸铵药条TR-1和添加NA的高能硝酸铵药条TR-2。通过燃速仪进行3种药条的常规恒压燃速测试,通过药条长度和燃尽时间的比值,获得不同压力下的局部燃速变化。

(4)静态燃烧性能测试:参考GJB 770B-2005方法703.1,基于密闭爆发器实验进行3种发射药样品的静态燃烧性能测试。实验密闭爆发器的药室容积为100 cm³;装填密度取0.2 g·cm⁻³;样品初始处于常温状态。点火药为2#硝化棉,质量1.1 g,点火压力为10 MPa。由密闭爆发器实验可获得燃烧压力 p 随燃烧时间 t 的响应,进而计算活度 L 随相对压力 B 的变化^[11];活度 L 的单位为MPa⁻¹·s⁻¹,相对压力 B 是无量纲数。最终,按照式(1)计算不同样品的燃烧渐增性因子 P_r ^[11]:

$$P_r = L_s B_s / (L_{0.1B} + L_{0.3B}) \quad (1)$$

式中, L_s 对应着发射药燃烧分裂点的活度, B_s 对应着发射药燃烧分裂点相对压力, $L_{0.1B}$ 对应 $B=0.1$ 的活度; $L_{0.3B}$ 是 $B=0.3$ 的活度。 P_r 越大,表明发射药的燃烧渐增性越强,发射药的静态燃烧性能更好。

(5)内弹道性能测试:选用12.7 mm口径试验用机枪测试3种发射药样品的内弹道性能;弹头、弹壳均采用12.7 mm制式武器器材,根据GJB349.5-87所述的铜柱测压法,获得最大膛压;根据GJB349.4-87所述的恒磁靶测速法,获得弹丸初速。

1.4 结果与讨论

1.4.1 密度的对比分析

空白发射药、TATB包覆发射药、NA包覆发射药的堆积密度测试结果如表1所示。由表1可看出,3种发射药的堆积密度的宏观变化不大,不同样品的堆积密度差异可以忽略。

1.4.2 爆热的对比分析

不同发射药样品的爆热测试结果见表1。与空白发射药相比,TATB包覆发射药的爆热仅降低2.5%,变

表1 不同发射药样品的堆积密度与爆热

Table 1 Results of bulk density and explosion heat for different propellant samples

sample	bulk density / g·cm ⁻³	explosion heat / J·g ⁻¹
blank propellant	0.95	4806
propellant coated with TATB	0.95	4688
propellant coated with NA	0.96	4516

化缓慢;而NA包覆发射药爆热相对降低6%,变化明显。因此,降燃速材料的加入对发射药的能量水平存在不利影响,NA包覆引起的发射药能量损失大于TATB包覆。这是由于NA属于不含能的惰性高分子材料,而TATB属于低能单质炸药;自身含能的TATB加入,对包覆发射药的能量水平也存在贡献,故NA包覆发射药的爆热低于TATB包覆发射药。然而,TATB自身能量水平低于高能硝酸铵发射药,故TATB包覆发射药的爆热仍低于空白发射药。

1.4.3 局部燃速的对比

恒压燃速测试的结果如图1所示,不同药条的燃速(u)-压力(p)响应均满足 $u=u_1 p^n$ 公式形式,相关系数 $R^2>0.99$ 。在空白发射药的基础上,TATB和NA的添加仅引起发射药的燃速系数 u_1 的波动,且能明显减小燃速系数 u_1 ,进而影响不同压力下的燃速。从 u_1 来看,与添加TATB的药条TR-1相比,添加NA的药条TR-2的燃速更低,NA的降燃速影响明显大于TATB。这与降燃速材料的能量水平有关,含能TATB的燃烧反应速率实际大于不含能的NA。

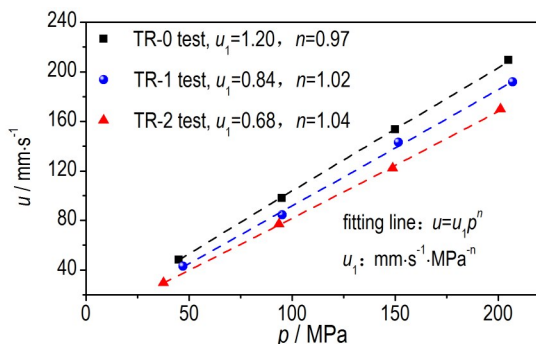
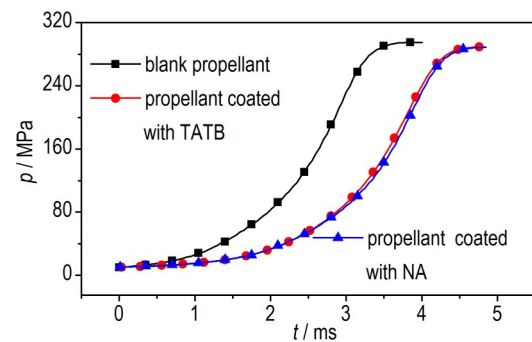


图1 三种发射药样品药条的恒压燃速测试结果

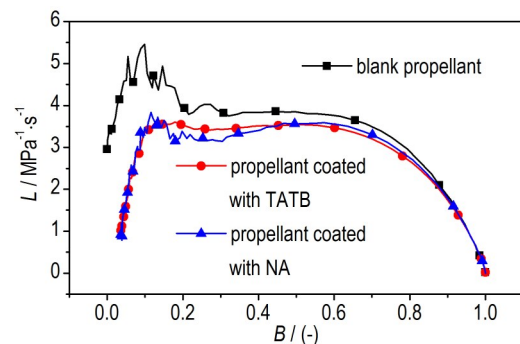
Fig.1 Results of burning rate test under constant pressure for three propellant strips

1.4.4 静态燃烧性能的对比

3种发射药的静态燃烧性能的测试结果如图2所示,TATB包覆发射药与NA包覆发射药的燃烧特性相似。由图2a可以看出,与空白发射药相比,包覆发射药的燃烧时间大约延长了0.9 ms,压力 p 急速上升的起点延迟。由图2b可以看出, $B<0.1$,包覆发射药与空白发射药的活度 L 存在显著差异;随着 B 增大,包覆发射药与空白发射药的 L 差值降低。这与包覆层的燃烧进程有关。 $B<0.1$ 属于发射药燃烧早期,包覆发射药的包覆层还未燃尽;含降燃速材料的包覆层和空白高能硝酸铵药的燃烧速率间存在差异,故此时期图2b中包覆发射药的 L 值低于空白发射药;



a. $p-t$ curves



b. $L-B$ curves

图2 三种发射药样品的静态燃烧性能对比

Fig.2 Comparison of static burning characteristic between three propellant samples

而随着 B 提高,包覆发射药的包覆层逐渐燃尽,不同发射药样品的燃烧反应都趋于高能硝酸铵发射药的燃烧。故图2b中不同样品的 $L-B$ 曲线逐渐趋于重合;在图2a中随着 t 增大,不同样品的 $p-t$ 曲线逐渐趋于平行。

由图2b可获得如表2所示的燃烧渐增性对比。从表2的 P_r 来看,与空白发射药相比,包覆发射药能明显改善燃烧渐增性, P_r 的相对增长为80%。TATB包覆发射药和NA包覆发射药的 P_r 差异主要与 $L_{0.3B}$ 和 $B_{0.1}$ 有关,反映了不同包覆发射药燃烧过程中局部燃速、燃烧面积和燃烧一致性的变化。NA包覆发射药的 P_r 略高于TATB包覆发射药,二者间存在相似的燃烧渐增性,图2b中包覆发射药的 $L-B$ 曲线整体差异不大。然而,在不同包覆发射药的制备过程中,NA的加入量低于TATB。整体来看,与空白发射药相比,两种包覆发射药都能明显改善燃烧渐增性;但在相近的 P_r 增长下,采用NA对发射药进行包覆处理,有利于减少降燃速材料的用量以控制成本,故NA包覆发射药的优势还比TATB包覆发射药略大。

表2 三种发射药样品的燃烧渐增性对比

Table 2 Comparison of burning progressivity between three propellant samples

sample	$L_{0.1B} / \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_{0.3B} / \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_s / \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	B_s	P_r
blank propellant	5.46	3.82	3.83	0.36	0.15
propellant coated with TATB	3.33	3.43	3.54	0.51	0.27
propellant coated with NA	3.48	3.15	3.59	0.57	0.31

Note: $L_{0.1B}$ is the vivacity as the relative pressure (B) is 0.1; $L_{0.3B}$ is the vivacity as B is 0.3; L_s is the vivacity at the splitting point of combustion stage; B_s is the relative pressure at the splitting point of combustion stage; P_r is the burning progressivity factor

1.4.5 内弹道性能的对比分析

3种发射药样品的内弹道特性如图3所示。由图3可以看出,经过包覆处理的发射药样品均表现出良好的内弹道性能,常温下($T=20\text{ }^\circ\text{C}$)的弹口初速 V_0 增长可超过 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3b)而最大膛压 p_m 增长不超过 24 MPa (图3a)。另一方面,TATB包覆发射药的 p_m 和 V_0 不再与 T 成正相关,出现负温度系数的效果;在 $T=50\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温工况下,与空白发射药相比,TATB包覆发射药的 p_m 减少,且不同温度点间的压差降低。对于NA包覆发射药,低温和高温下的 p_m 和空白发射药相近,但对应 V_0 能相对提升 4.1% 和 3.4% 。

基于上述静态燃烧特性和内弹道特性的分析可得,TATB包覆发射药和NA包覆发射药在不同方面互有优势,且二者性能均优于空白发射药。综合来看,在

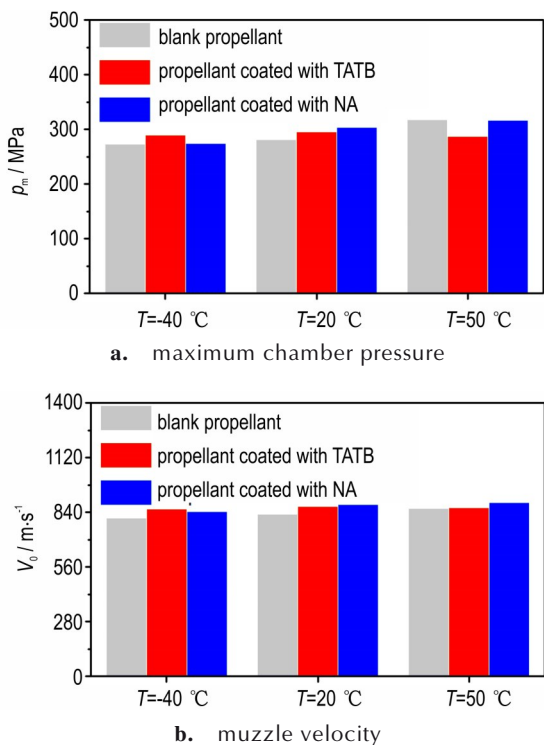


图3 三种发射药样品的内弹道特性对比

Fig.3 Comparison of internal ballistic characteristic between three propellant samples

相似的 P_r 水平下,NA包覆发射药更有利于不同温度下弹丸初速的提升,对于发射药燃烧特性的整体改善效果更好。特别地,在包覆发射药制备过程中,NA的用量能低于TATB,有利于控制生产成本。

本研究通过实验对比了3种发射药的堆积密度、局部燃速、爆热、燃烧渐增性以及内弹道性能;然而,由于上述物理参数具有不同的量纲,本节单独依靠实验方法难以定量评价发射药基本性质变化对燃烧性能的影响。为克服这一问题,下面引入层次分析法(AHP),依据本节的实验数据构建不同判断矩阵,进而计算堆积密度、局部燃速、爆热等基本性质对发射药综合燃烧性能的影响权重。

2 基于层次分析法(AHP)的应用分析

2.1 模型建立

2.1.1 层次结构模型

参照文献[13-14],可构建如图4所示的层次结构模型:

目标层中将发射药燃烧性能作为模糊评价中的最终分析对象,其与燃烧渐增性和内道弹性能有关;在准则层中,将堆积密度、局部燃速、爆热等发射药基本性质设为准则层因素,对目标层因素具有不同影响权重;在方案层中将空白发射药、TATB包覆发射药和NA包覆发射药作为待选方案,AHP需要在不同准则层因素下,对方案层中的所有方案进行模糊判断,最终通过权重来计算不同方案对目标层因素的相对影响情况。

2.1.2 判断矩阵

AHP的计算依赖于判断矩阵 A ; A 的元素 $A(i, j)$ 表征本层因素 i 与因素 j 对上一层因素的相对影响程度,如表3所示;此时,因素 i 比因素 j 的影响更重要;存在 $A(j, i)=1/A(i, j)$ 。

参照文献[13-14],本研究需要构建的判断矩阵为:

式(2)中,判断矩阵 A_i 表征不同发射药样品对堆

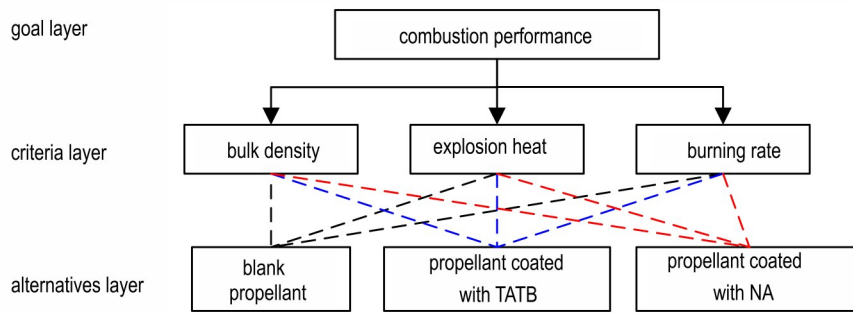


图4 层次结构模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of hierarchical model

表3 判断矩阵元素 $A(i, j)$ 的标度

Table 3 Numerical scale for judgment matrix element $A(i, j)$

numerical scale	description
1	factor i and factor j are equally important
3	factor i is slightly more important than factor j
5	factor i is more important than factor j
7	factor i is strongly more important than factor j
9	factor i is absolutely more important than factor j
2, 4, 6, 8	median value corresponding to the adjacent judgment above

积密度的影响,存在 a_{21} 、 a_{31} 和 a_{32} 这3个未知标度。其中, a_{21} 表征 TATB 包覆发射药和空白发射药对堆积密度的相对影响程度; a_{31} 表征 NA 包覆发射药和空白发射药对堆积密度的相对影响程度, a_{32} 表征 NA 包覆发射药和 TATB 包覆发射药对堆积密度的相对影响程度。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/a_{21} & 1/a_{31} \\ a_{21} & 1 & 1/a_{32} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(3)中,判断矩阵 A_2 表征不同发射药样品对爆热的影响,存在 b_{12} 、 b_{13} 和 b_{23} 这3个未知标度。其中, b_{12} 表征空白发射药和 TATB 包覆发射药对爆热的相对影响程度, b_{13} 表征空白发射药和 NA 包覆发射药对爆热的相对影响程度, b_{23} 表征 TATB 包覆发射药和 NA 包覆发射药对爆热的相对影响程度。

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & b_{12} & b_{13} \\ 1/b_{12} & 1 & b_{23} \\ 1/b_{13} & 1/b_{23} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(4)中,判断矩阵 A_3 表征不同发射药样品对局部燃速的影响,未知标度 c_{21} 、 c_{31} 和 c_{32} 与基础高能硝胺药药条 TR-0、添加 TATB 的高能硝胺药药条 TR-1 和添加 NA 的高能硝胺药药条 TR-2 的燃速差异有关。其

中, c_{21} 表征 TR-1 和 TR-0 对局部燃速的相对影响程度, c_{31} 表征 TR-2 和 TR-0 对局部燃速的相对影响程度, c_{32} 表征 TR-2 和 TR-1 对局部燃速的相对影响程度。

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/c_{21} & 1/c_{31} \\ c_{21} & 1 & 1/c_{32} \\ c_{31} & c_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(5)中,判断矩阵 A_4 表征不同发射药基本性质对综合燃烧性能的影响,存在 y_{21} 、 y_{31} 和 y_{32} 这3个未知标度。其中, y_{21} 表征爆热和堆积密度对燃烧性能的相对影响程度, y_{31} 表征局部燃速和堆积密度对燃烧性能的相对影响程度, y_{32} 表征局部燃速和爆热对燃烧性能的相对影响程度。

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/y_{21} & 1/y_{31} \\ y_{21} & 1 & 1/y_{32} \\ y_{31} & y_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

与经典方法^[13-14]不同,本研究将依靠实验表征的样品燃烧性能,直接构建目标层和方案层间的判断矩阵 A_5 ,用于后续模糊评价校核。式(6)中, z_{21} 表征 TATB 包覆发射药和空白发射药对燃烧性能的相对影响程度; z_{31} 表征 NA 包覆发射药和空白发射药对燃烧性能的相对影响程度, z_{32} 表征 NA 包覆发射药和 TATB 包覆发射药对燃烧性能的相对影响程度。

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1/z_{21} & 1/z_{31} \\ z_{21} & 1 & 1/z_{32} \\ z_{31} & z_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.1.3 影响权重计算

求解 3×3 的矩阵 $A_k (k=1 \sim 5)$ 的最大特征值 λ_k 和所对应的特征向量 $\omega_k = (\omega_{k,1}, \omega_{k,2}, \omega_{k,3})$:

$$A_k \omega_k = \lambda_k \omega_k \quad (7)$$

将 $\omega_k (k=1 \sim 5)$ 进行归一化处理获得权重向量 $\omega_{s,k} = (\omega_{s,k,1}, \omega_{s,k,2}, \omega_{s,k,3})$:

$$\omega_{s,k} = \omega_k / \sum_{i=1}^3 W_{k,i} \quad (8)$$

$\omega_{s,k}$ 的分量 $w_{s,k,1}$, $w_{s,k,2}$, $w_{s,k,3}$ 即是图4中不同因素对上一层因素的影响权重。例如, $\omega_{s,4} = (w_{s,4,1}, w_{s,4,2}, w_{s,4,3})$ 中, $w_{s,4,1}$, $w_{s,4,2}$ 和 $w_{s,4,3}$ 分别表征发射药堆积密度、爆热和局部燃速对综合燃烧性能的影响权重; $\omega_{s,5} = (w_{s,5,1}, w_{s,5,2}, w_{s,5,3})$ 中, $w_{s,5,1}$, $w_{s,5,2}$ 和 $w_{s,5,3}$ 则分别表征空白发射药、TATB包覆发射药和NA包覆发射药对燃烧性能的影响权重。判断矩阵 A_k 的一致性指标 CI 的计算公式为:

$$CI = (\lambda_k - 3)/2 \quad (9)$$

计算 $CR = CI/0.58$, 若 $CR < 0.1$, 判断矩阵 A_k 的一致性检验通过^[14]; 若 $CR > 0.1$, 需要重新构造 A_k 。

基于权重向量 $\omega_{s,1}$, $\omega_{s,2}$ 和 $\omega_{s,3}$, 可构建权重矩阵 W :

$$W = \begin{bmatrix} \omega_{s,1} \\ \omega_{s,2} \\ \omega_{s,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{s,1,1} & w_{s,1,2} & w_{s,1,3} \\ w_{s,2,1} & w_{s,2,2} & w_{s,2,3} \\ w_{s,3,1} & w_{s,3,2} & w_{s,3,3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

最后, 在经典 AHP 方法^[13-14]中, 按式(11)计算评价向量 $\omega_{PO} = (w_{PO,1}, w_{PO,2}, w_{PO,3})$:

$$\omega_{PO} = \omega_{s,4} W \quad (11)$$

可根据分量 $w_{PO,1}$, $w_{PO,2}$, $w_{PO,3}$ 的相对大小, 进行方案排序, 定量对比空白发射药、TATB 包覆发射药和 NA 包覆发射药对燃烧性能的综合影响。

在本研究中, 针对不同发射药样品对燃烧性能的综合影响, $\omega_{PO} = (w_{PO,1}, w_{PO,2}, w_{PO,3})$ 是通过经典 AHP 方法^[13-14]计算得到的评价, 而 $\omega_{s,5} = (w_{s,5,1}, w_{s,5,2}, w_{s,5,3})$ 则是直接对发射药燃烧性能实验测试结果的评价; 因此, 若图4中的层次结构模型构造合理, $\omega_{s,5}$ 和 ω_{PO} 各分量应足够接近。后续将基于这一准则验证经典 AHP 方法^[13-14]在 高能 硝 胺 发 射 药 改 性 评 价 中 的 应 用。

2.2 模型参数设置

在构建判断矩阵 A_k ($k=1\sim 3$) 时, 经典 AHP 方法^[13-14]仅根据表3进行人为主观取值, 具有较大的不确定性。在本研究中, 将引入1.4节中的实验测试结果来减少模糊判断的不确定性。首先比较差异明显的空白发射药和 TATB 包覆发射药, 依照表3确定标度 a_{21} , b_{12} 和 c_{21} , 从而建立因素标度和实际物理参数的映射; 而后, 在相同评价体系下, 可以快速确定与 NA 包覆发射药有关的标度, 包括 a_{31} , a_{32} , b_{13} , b_{23} , c_{31} 和 c_{32} 。上述操作在 TATB 包覆发射药和 NA 包覆发射药的对比中, 引入了空白发射药作为相对参考系; 在包覆发射药的模糊评价中, 这有利于降低人为主观因素造成的

不确定性。具体参数设置为:

2.2.1 判断矩阵 A_1

由表1可得, 不同发射药样品的堆积密度仅在 $0.95\sim 0.96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 区间波动, 故可取 $a_{21}=a_{31}=a_{32}=1$, 表征3种发射药样品对堆积密度的影响基本一致; 此时, A_1 对应 $CR=0$, 权重向量 $\omega_{s,1} = (1/3, 1/3, 1/3)$ 。

2.2.2 判断矩阵 A_2

由表1可得, TATB 包覆发射药的爆热值 $4688 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 仅稍差于空白发射药的爆热值 $4806 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。按表3可令 $b_{12}=3$, 表征空白发射药对爆热的影响稍强于 TATB 包覆发射药。此时, 以1作为基准值, 标度增加1对应着爆热差距增加 $(4806-4688)/(b_{12}-1) = 59 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

因此, 对比 NA 包覆发射药和其余2种发射药时, 爆热差距每增加 $59 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 标度 b_{13} 和 b_{23} 需升高1; 另外, 考虑包覆发射药制备过程中, NA 的用量远小于 TATB 的用量, b_{13} 和 b_{23} 可额外增加1。上述计算需四舍五入取整。表1中 NA 包覆发射药的爆热为 $4516 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 故计算 b_{13} 和 b_{23} 如式(12):

$$\begin{cases} b_{13} = 1 + (4806 - 4516)/59 + 1 \approx 7 \\ b_{23} = 1 + (4688 - 4516)/59 + 1 \approx 5 \end{cases} \quad (12)$$

最终, 基于上述 b_{12} , b_{13} 和 b_{23} , A_2 对应 $CR=0.056$, 权重向量 $\omega_{s,2} = (0.65, 0.28, 0.07)$ 。

2.2.3 判断矩阵 A_3

基于图1中的燃速系数 u_1 确定 A_3 中的未知标度 c_{21} , c_{31} 和 c_{32} 。与药条 TR-0 的 $u_1 = 1.20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-n}$ 相比, 药条 TR-1 的 $u_1 = 0.84 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-n}$ 小幅度下降, 按表3可令 $c_{21}=3$, 表明 TATB 的加入能起到有效的降燃速效果。此时, 以1作为基准值, 标度增加1对应着 u_1 差距增加 $(1.20-0.84)/(c_{21}-1) = 0.18 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-n}$ 。

因此, 对比药条 TR-2 和其余2种药条时, u_1 差距每增加 $0.18 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-n}$, 标度 c_{31} 和 c_{32} 可升高1; 此外, 考虑包覆发射药制备过程中, NA 的用量远小于 TATB 的用量, c_{31} 和 c_{32} 也可额外增加1。在图1中药条 TR-2 的 $u_1 = 0.84 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-n}$, 按上述计算四舍五入取整后, c_{31} 和 c_{32} 如式(13)所示:

$$\begin{cases} c_{31} = 1 + (1.20 - 0.68)/0.18 + 1 \approx 5 \\ c_{32} = 1 + (0.84 - 0.68)/0.18 + 1 \approx 3 \end{cases} \quad (13)$$

最终, 基于上述 c_{21} , c_{31} 和 c_{32} , A_3 对应 $CR=0.033$, 权重向量 $\omega_{s,3} = (0.10, 0.26, 0.64)$ 。

2.2.4 判断矩阵 A_4

A_4 中的未知标度值 y_{21} , y_{31} 和 y_{32} 无法直接参考实验结果。因此, 研究根据表3从1~9的离散区间中取

假设值,构造 $y_{21}=2, y_{31}=y_{32}=9$;在该假设下, A_4 对应 $CR=0.046$,权重向量 $\omega_{s,4}=(0.07, 0.11, 0.82)$ 。上述 A_4 和 $\omega_{s,4}$ 的假设验证将在 2.3 节开展。

2.2.5 判断矩阵 A_5

基于燃烧渐增性因子 P_i 和内弹道性能参数,确定 A_5 中的未知标度 z_{21} 、 z_{31} 和 z_{32} 。在表 2 中,与空白发射药相比,TATB 包覆发射药的 P_i 相对增长 80%,燃烧渐增性得到明显改善, z_{21} 可从基准值 1 相对增加 2;同时,由图 3 的实验数据可知,TATB 包覆发射药的温度系数性能和常温下的弹丸初速均得到改善, z_{21} 可再相对增加 2;最终 $z_{21}=1+2+2=5$;对于 NA 包覆发射药,因图 2 中不同包覆发射药具有相近的燃烧渐增性, z_{31} 也可从基准值 1 相对增加 2;同时,与空白发射药相比,NA 包覆发射药 3 个温度点下 V_0 均明显增加, z_{31} 可再相对增加 3;最终 $z_{31}=1+2+3=6$;为满足 $CR<0.1$ 的一致性准则, z_{32} 需在 z_{31}/z_{21} 左右取整。最终,可取 $z_{32}=2$,

其表征 NA 包覆发射药的综合燃烧性能略好于 TATB 包覆发射药,这与实验测试结果的分析相符。此时,基于上述 z_{21} 、 z_{31} 和 z_{32} , A_5 对应 $CR=0.025$,权重向量 $\omega_{s,5}=(0.08, 0.34, 0.58)$ 。

2.3 模型验证

研究将通过 $\omega_{s,5}$ 中的权重分量,校核由经典 AHP 方法^[13-14]所获得的模糊评价结果 ω_{p0} ,以验证本研究模糊评价模型的有效性。

基于上文参数设置,式(11)中的权重矩阵 W 为:

$$W = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0.65 & 0.28 & 0.07 \\ 0.1 & 0.26 & 0.64 \end{bmatrix} \quad (14)$$

结合 $\omega_{s,4}=(0.07, 0.11, 0.82)$,式(11)中 $\omega_{p0}=(0.17, 0.27, 0.56)$ 。最终,表 4 对比了 $\omega_{s,5}$ 和 ω_{p0} 中不同分量的偏差;不同权重分量的相对大小,表征了空白发射药、TATB 包覆发射药和 NA 包覆发射药对燃烧性能的影响程度。

表 4 基于层次分析法的模糊综合评价验证

Table 4 Verification for fuzzy comprehensive evaluation by analytic hierarchy process (AHP)

factor in alternative layer	blank propellant	propellant coated with TATB	propellant coated with NA
evaluation result from AHP calculation (ω_{p0})	0.08	0.34	0.58
evaluation result from judgment matrix for experimental measurement ($\omega_{s,5}$)	0.17	0.27	0.56
absolute deviation	0.09	0.07	0.02

由表 4 可以看出,在 ω_{p0} 和 $\omega_{s,5}$ 间,不同权重分量的绝对偏差,即 $|w_{p0,1}-w_{s,5,1}|$ 、 $|w_{p0,2}-w_{s,5,2}|$ 和 $|w_{p0,3}-w_{s,5,3}|$,均不超过 0.1,且不同分量的相对大小未发生变化,均满足空白发射药<TATB 包覆发射药<NA 包覆发射药。因此,基于经典 AHP 方法^[13-14]所得的 ω_{p0} 能够模糊反映不同发射药样品的真实燃烧性能差异;相关结果符合对应的实验测试分析。综上所述,在高性能发射药改性评价中建立模糊综合评价模型是可行的。模糊评价结果 ω_{p0} 的主要误差来源在于判断矩阵的元素仅能从表 3 的有限离散标度中进行选择,简化了发射药性能的实际差异。在未来的模型改进中,需对表 3 中的标度变化进一步细化。

2.4 结果与讨论

在本研究所构建的模糊评价模型中, $\omega_{s,4}=(0.07, 0.11, 0.82)$;其中, $w_{s,4,1}=0.07$ 、 $w_{s,4,2}=0.11$ 和 $w_{s,4,3}=0.82$ 分别表征发射药堆积密度、爆热和局部燃速对综合燃烧性能的影响权重。因此,对于发射药综合燃

烧性能,局部燃速的影响大于爆热的影响;而堆积密度的影响最小。对于准则层中不同因素的模糊评价, $\omega_{s,1}=(1/3, 1/3, 1/3)$ 表明 3 种发射药样品的堆积密度基本一致; $\omega_{s,2}=(0.65, 0.28, 0.07)$ 表明:针对爆热的影响,存在空白发射药>TATB 包覆发射药>NA 包覆发射药,与空白发射药相比,包覆发射药存在能量损失; $\omega_{s,3}=(0.10, 0.26, 0.64)$ 表明:针对局部燃速的影响,存在 NA 包覆发射药>TATB 包覆发射药>空白发射药,NA 包覆的降燃速效果强于 TATB 包覆。最终,在模糊评价的结论中,NA 包覆发射药因局部燃速的影响具有最好的综合燃烧性能,TATB 包覆发射药次之,而空白发射药燃烧性能最差。

从上述分析可以看出,在包覆工艺中,降燃速材料的选择应首要考虑包覆层的降燃速效果,同时避免爆热和堆积密度的过度下降;爆热变化的影响稍大于堆积密度,决定了发射药所能释放的能量上限。因此,低燃速的含能材料 TATB 能作为包覆工

艺中的降燃速材料;在发射药能量水平的小幅度变化下,TATB 包覆能有效地改善高能硝胺发射药的综合燃烧性能,具有实用性。与 TATB 相比,NA 属于燃速更低的惰性高分子材料,降燃速效果更强。最终,尽管 NA 包覆带来的能量损失较 TATB 包覆更大,NA 包覆发射药的综合燃烧性能优于 TATB 包覆发射药。

3 结论

针对 7 孔粒状高能硝胺发射药,分析了空白发射药、TATB 包覆发射药和 NA 包覆发射药间堆积密度、局部燃速、爆热、静态燃烧特性以及内弹道性能的差异;在此基础上,论证了模糊评价方法在包覆发射药设计应用中的可行性。主要结论如下所示:

(1) 可通过层次分析法(AHP),基于堆积密度、爆热和局部燃速的变化,评估发射药综合燃烧性能的改善情况。其中,局部燃速、爆热和堆积密度的影响权重分别为 0.82、0.11 和 0.07。在未来包覆工艺中,降燃速材料的选择应首要考虑包覆层的降燃速效果,同时避免爆热和堆积密度的过度下降。

(2) 3 种发射药堆积密度的宏观变化不大;与空白发射药相比,TATB 包覆发射药的爆热相对降低 2.5%,NA 包覆发射药的爆热可相对降低 6%;但在空白发射药的基础上,NA 包覆的降燃速效果强于 TATB 包覆。最终,基于实验测试的分析和模糊评价均表明:NA 包覆发射药的燃烧性能优于 TATB 包覆发射药,且二者明显强于空白发射药。具体的,2 种包覆发射药对燃烧渐增性因子的相对改善可达 80%,并使常温下($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)的弹口初速 V_0 增长超过 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 姜宏,高原,韩志强,等. 2022 世界火炮与自动武器技术发展报告[R]. 中国兵器工业集团第二一〇研究所, 2022.
JIANG Hong, GAO Yuan, HAN Zhi-qiang, et al. Report for world artillery and automatic weapon technology development in 2022 [R]. Research Institute 210 of Norinco Group, 2022.
- [2] 韦丁,靳建伟,严文荣,等. 高能硝胺发射药烧蚀特性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8563-8567.
WEI Ding, JIN Jian-wei, YAN Wen-rong, et al. Analysis of the erosion characteristics of high energy nitramine propellant [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(21): 8563-8567.
- [3] 王琼林,刘少武,朱扬春,等. 多层高能硝胺发射药研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(2): 64-67.
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, ZHU Yang-chun, et al. Research on multilayer disc nitramine gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(2): 64-67.
- [4] 杨建兴,杨伟涛,马方生,等. RDX 粒度对硝胺发射药力学性能及燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(9): 706-711.
YANG Jian-xing, YANG Wei-tao, MA Fang-sheng, et al. Effect of RDX particle size on the mechanical and combustion properties of nitramine gun propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(9): 706-711.
- [5] DAHIWALE M, BHONGALE C, ROY S, et al. Studies on ballistic parameters of deputy phthalate-coated triple base propellant-used in large caliber artillery gun ammunition [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2019, 37(1): 98-109.
- [6] WANG M, JIN G, ZHOU Y, et al. Integration of complex geometry gun propellant form function calculation and geometry optimization [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47, e202200062:1-11.
- [7] 王云云,邓国栋,徐君,等. 单基发射药中钝感剂组分含量的快速检测方法[J]. 火炸药学报, 2018, 41(4): 408-413.
WANG Yun-yun, DENG Guo-dong, XU Jun, et al. A rapid determination method of deterrent component content in single-base gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(4): 408-413.
- [8] LIANG H, DING Y, LI S, et al. Combustion performance of spherical propellants deterred by energetic composite deterring agents [J]. *ACS Omega*, 2021, 6: 13024-13032.
- [9] LIU Bo, WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, et al. Study on the performance of the modified single base gun propellant [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 415-417: 1656-1661.
- [10] 魏伦,于慧芳,韩冰,等. 一种新型聚酯钝感剂在发射药中的应用 [J]. 火炸药学报, 2012, 35(3): 91-94.
WEI Lun, YU Hui-fang, HAN Bin, et al. Application of a novel deterrent polyester in gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(3): 91-94.
- [11] 李达,刘少武,于慧芳,等. 溶剂抽取工艺制备改性单基发射药的燃烧性能 [J]. 含能材料, 2012, 20(3): 341-344.
LI Da, LIU Shao-wu, YU Hui-fang, et al. Combustion performance of modified single base gun propellant prepared by solvent extraction process [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(3): 341-344.
- [12] LI S, CHEN H, LI Y, et al. Surface denitration structure on dynamic combustion performance and muzzle flame of mixed nitrate gun propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2023, 48, e202300093: 1-13.
- [13] 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 [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(1): 197-200.
- [14] ZHOU Da-cheng, CHEN Hong-chang, CHENG Guo-zhen, et al. SecIngress: An API gateway framework to secure cloud applications based on N-variant system [J]. *China Communications*, 2021, 18(8): 17-34.

Fuzzy Comprehensive Evaluation Model Applying in the Modification Evaluation of High Energy Nitramine Gun Propellant

GUO Zhi-gang, LI Man-man, WANG Feng, YU Hui-fang, WEI Lun, WANG Qiong-lin

(Xi'an Institution of Modern Chemistry, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to investigate the application of the fuzzy comprehensive evaluation model in the modification evaluation of high energy nitramine gun propellant, the triamino trinitrobenzene (TATB) coated and polyester (NA) coated gun propellant were prepared by coating technology using TATB and NA as the burning rate reduction materials, and their bulk densities, burning rates, explosion heats, propellant burning progressivities and interior ballistic performances were compared. Moreover, the analytic hierarchy process (AHP) was adopted to quantify the influence of TATB and NA on the basic characteristics and the combustion performances above. It was found that, the fuzzy comprehensive evaluation can be established between the basic characteristics and combustion performances of propellants. For the better overall combustion performance, the weight of burning rate is equal to 0.82, which is the highest; the weights of explosion heat and bulk density are equal to 0.11 and 0.07, respectively. In the case of small difference in bulk density, even though the energy loss caused by NA coating is greater than that of TATB coating, the decrease of burning rate by NA coating would be larger and the propellant coated with NA has the better performance than the propellant coated with TATB, and the two are significantly better than that of blank propellant

Key words: fuzzy comprehensive evaluation model; high energy nitramine gun propellant; coating; triamino-trinitrobenzene (TATB); polymer ester (NA).

CLC number: TJ55;TQ562

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024069

(责编:姜梅)