

文章编号:1006-9941(2024)08-0811-07

## 功能结构调控降低改性单基发射药温度系数的研究

陈春林,赵剑春,涂雯雯,熊鹏,杨琴,杨奇,张俊

(泸州北方化学工业有限公司,四川泸州646003)

**摘要:**为适应发射药不同作战环境应用需求,以低温度系数的调控原理为基础,研究了单基发射药物理结构功能改性、钝感及表面处理三种方法对发射药低温度系数的调控效果。采用内弹道性能测试对发射药性能进行评价,并对低温度系数调控机理进行了探讨。当发射药经增孔剂(5%)和含能固体材料(55  $\mu\text{m}$ )物理结构功能改性、醇酯钝感(MA)及表面敏化处置后,发射药低温速度温度系数能有效控制在5%以内,高温膛压温度系数能有效控制在10%以内。经分析,发射药低温度系数调控机理主要为:在发射药内部形成预制孔道、不规则凸起、未封闭界面和带端面封堵的拉链状内孔端面结构。在低温条件下,发射药堵(闭)孔层及钝感剂变脆、抗冲击能力减弱,微孔及界面的破碎倾向增大,促使发射药在低温条件下初始燃面增大;在高温条件下,发射药堵(闭)孔层闭孔现象加剧,PMA(MA聚合物)呈膨胀状态挤占孔穴,抗冲击能力增强,孔道及界面的破碎倾向减小,促使发射药在高温条件下初始燃面降低。研究通过燃面补偿法的技术途径,实现燃面对燃速的补偿,最终达到调控发射药温度系数的目的。

**关键词:**温度系数;功能结构改性;发射药

中图分类号:TJ55;TQ562

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2024070

### 0 引言

作战场景的多样性变化对武器装备的功能改进提出了更高的要求。目前,发射药多存在高温膛压增大、低温初速降幅大、弹道稳定性变差、钝感剂或增塑剂迁移等问题<sup>[1-2]</sup>。为满足武器作战效能要求,制备出具有良好温度系数、弹道一致性、储存稳定性和抗迁移能力的发射药极为迫切<sup>[3-4]</sup>,而其中温度系数是衡量发射药在不同温度范围下弹道性能变化的主要指标,是评价发射药性能优劣的特征因子之一。近年来,针对发射药温度使用要求的发射药温度系数调控,克服了发射药应用短板,成为提升其作战效能和拓展其应用场景的有效手段<sup>[5]</sup>。

降低发射药温度系数的方法包含燃面补偿法和降低温度对发射药燃速影响两种路径,其中发射药燃速

随温度变化规律属于发射药固有属性,难以实现发射药燃速不随温度而变化<sup>[6]</sup>。因此在降低温度系数方面,主要采用燃面补偿法的技术途径。燃面补偿法即为发射药燃烧面积随温度变化而变化,当温度升高时,发射药的燃烧面积减小;当温度降低时,发射药的燃烧面积增加。发射药温度系数调节方法如钝感/包覆、浸渍钝感、球扁发射药的压扁、预制微孔等均是燃面补偿的有效途径,上述方法对制备低温度系数发射药具有技术指导作用<sup>[7]</sup>。

本研究依托多种发射药燃面改性方式对单基发射药进行复合改性,采用物理结构功能改性、钝感及表面处理3种方法制备出一种具有低温度系数的改性单基发射药,结合内弹道等性能试验,研究了该发射药的环境适应性、温度系数和弹道一致性,同时对其改性机制进行了讨论和叙述,提出了一种发射药低温度系数设计方案,以期对发射药在多种环境场景下的应用提供科学支撑。

### 1 低温度系数的调控原理

温度系数是指发射药弹道性能随温度的变化程度。为减小或消除温度变化对弹道性能的影响,需要

收稿日期:2024-02-29;修回日期:2024-04-24

网络出版日期:2024-06-03

作者简介:陈春林(1983-),男,正高级工程师,主要从事含能材料研究。e-mail:c654417855@163.com

通信联系人:赵剑春(1984-),男,高级工程师,主要从事含能材料研究。e-mail:513677694@qq.com

引用本文:陈春林,赵剑春,涂雯雯,等.功能结构调控降低改性单基发射药温度系数的研究[J].含能材料,2024,32(8):811-817.

CHEN Chun-lin, ZHAO Jian-chun, TU Wen-wen, et al. Effect of Low Temperature Coefficient on the Functional Structure Modification of Single-Based Propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(8):811-817.

补偿由于温度变化引起的气体生成速率的改变以调整温度系数。发射药的气体生成速率表达式为<sup>[8]</sup>:

$$d\psi/dt = (S/V_1)(de/dt) \quad (1)$$

式中,  $\psi$  为某瞬间发射药燃烧掉的相对体积,  $\text{mm}^3$ ;  $t$  为发射药的燃烧时间,  $\text{ms}$ ;  $e$  为发射药的燃烧层厚度,  $\text{mm}$ ;  $S$  为发射药的燃烧面积,  $\text{mm}^2$ ;  $V_1$  为发射药原有的体积,  $\text{mm}^3$ ;  $de/dt$  为发射药燃速, 采用物理量  $u$  表示,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由公式(1)可知, 气体生成速率的大小, 主要取决于燃烧面积  $S$  和发射药的燃速  $u$ 。温度与燃速  $u$  的关系遵循阿仑尼乌斯关系式<sup>[7]</sup>:

$$u = u_0 \cdot e^{-E/RT} \quad (2)$$

式中,  $u_0$  为常数, 无量纲;  $E$  为活化能,  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $R$  为气体常数, 取  $8.314 \text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ 。

由公式(2)可知, 随着  $T$  的增大,  $u$  将随之增大; 而  $T$  变化对燃烧面积  $S$  的影响较小。

气体生成速率与膛压的关系式见公式(3)<sup>[9]</sup>:

$$\frac{d\bar{p}}{dt} = \frac{l_0}{(\bar{l} + \bar{l}_\psi)v_j} \left[ 1 + \Delta \left( \alpha - \frac{1}{\rho} \right) \bar{p} \right] \frac{d\psi}{dt} - \frac{1 + \theta}{\bar{l} + \bar{l}_\psi} \bar{p} \bar{v} \quad (3)$$

由式(3)可得式(4):

$$\bar{p} = \frac{\rho}{f\Delta} \bar{v} = \frac{v}{v_j} \bar{l} = \frac{l}{l_0} \bar{l}_\varphi = 1 - \frac{\Delta}{\rho_p} - \Delta \left( \alpha - \frac{1}{\rho_p} \right) \varphi \quad (4)$$

式中,  $l_0$  为药室容积缩径长,  $\text{mm}$ ;  $l$  为弹丸行程长,  $\text{mm}$ ;  $l_\psi$  为药室自由容积缩径长,  $\text{mm}$ ;  $l_0$  为药室容积缩径长,  $\text{mm}$ ;  $\Delta$  为装填密度,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $\rho$  为密度,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $\alpha$  为火药气体余容,  $\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\bar{p}$  为平均压力,  $\text{MPa}$ ;  $v_j$  为弹丸极限速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $v$  为弹丸运动的相对速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $f$  为火力,  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $\rho_p$  为火药密度,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

由式(3)可知, 随着气体生成速率  $d\psi/dt$  增大, 膛压随之增加, 表现出较高的温度系数; 随着  $d\psi/dt$  减小, 膛压随之降低, 表现出较低的温度系数。

综上所述, 如要减少温度对气体发生速率的影响, 补偿温度变化对气体生成速率的影响, 即降低温度系数的方法为: (1) 燃面补偿法, 即使发射药燃烧面积  $S$  随温度  $T$  变化而变化。当温度  $T$  升高时, 发射药的燃烧面积  $S$  减小; 当  $T$  降低时, 发射药的  $S$  增加。(2) 降低温度  $T$  对发射药燃速  $u$  的影响。随着  $T$  的增大, 降低发射药的  $u$  增加幅度; 随着  $T$  的降低, 发射药  $u$  降低的幅度尽量减小。其中, 低温度系数(LTC)、电热化学发射等技术是降低温度  $T$  对发射药燃速  $u$  影响的有效途径。

而发射药燃速  $u$  随温度变化规律属于发射药的固

有属性, 要使发射药燃速  $u$  不随温度而变化较难实现。因此在降低温度系数方面, 主要采用燃面补偿法的技术途径, 即低温  $S$  增加、高温  $S$  减小, 以补偿因燃速  $u$  随温度升高而增大对  $d\psi/dt$  的影响, 实现减小  $d\psi/dt$  随温度变化的幅度, 图1为燃面补偿法的作用原理示意图<sup>[10]</sup>。

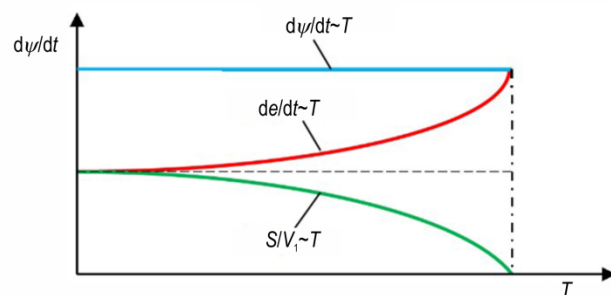


图1 燃面补偿法的调控原理示意图<sup>[10]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of control principle of burning surface compensation method<sup>[10]</sup>

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与仪器

硝化纤维素, 工业级, 泸州北方化学工业有限公司; 含能固体材料, 工业级, 甘肃银光化学工业集团有限公司; 醇酯(MA)、聚酯(NA)钝感剂, 工业级, 抚顺安信化学有限公司。发射药组分测试采用高效液相色谱仪, LC 2050, 岛津仪器公司。

### 2.2 样品制备

改性发射药的制备工艺是在单基发射药“溶剂法”制备工艺的基础上进行优化和改进, 主要工艺单元包含驱水、胶化、压伸、钝感、表面处理等<sup>[6,11]</sup>。其中, 含能固体材料、安定剂等胶化工序加入, 钝感剂在钝感工序加入, 表面敏化剂在表面处理工序加入。改性单基发射药试样制备采用七孔粒状发射药, 药形结构实物图见图2, 并将该发射药命名为 DHi-1。实验时, 分别设计了不同变量的实验组以考察温度系数变化概况, 具体实验设计如表1所示。

### 2.3 内弹道性能试验

内弹道性能试验按照《炮用发射药与装药内弹道试验方法》(GJB2179) 执行, 针对速度的测试, 采用测速弹道炮, 先对发射药进行药量选择试验。选药采用光电靶或线圈靶测速, 根据选药量试验结果确定装药量, 随后按选定的药量在常温、高温和低温条件下保温 24 h 后进行成组速度实验, 每组 7 发; 针对膛压的测试, 采用测压弹道炮, 按选定的药量在常温、高温及低

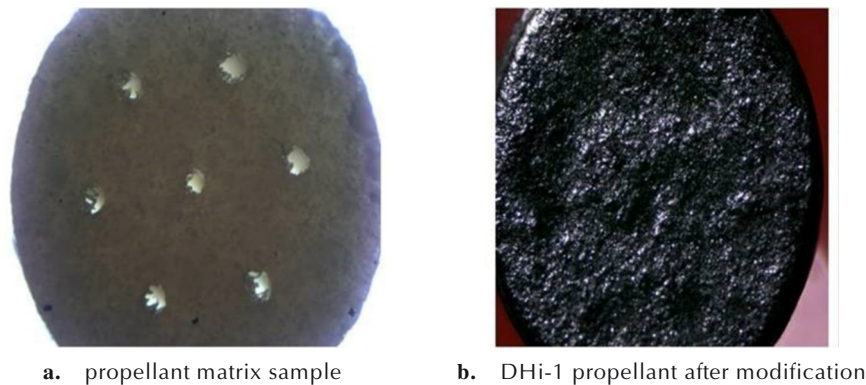


图2 发射药改性前后显微实物图

Fig.2 Micrograph of propellant after modification

表1 发射药不同变量的实验组

Table 1 propellant sample for test

modification methods	experimental content	experimental design	sample abbreviated name
physical structure-functional modification	amount of pore extender	0%	FSY-1
		3.5%	FSY-2
		5.0%	FSY-3
	different particle size of energetic solid material	8.5 $\mu\text{m}$	FSY-4
		54.6 $\mu\text{m}$	FSY-5
insensitive technology	different insensitive agents	NA	FSY-6
		MA	FSY-7
surface modification	surface sensibilization	sensibilizatio	FSY-8
		unsensibilizatio	FSY-9

温条件下保温 24 h 后进行成组压力试验, 每组 7 发。

## 2.4 温度系数的计算/测定

研究通过发射药内弹道性能指标膛压或初速计算发射药温度系数, 具体计算方法由式(5)~式(6)可得<sup>[2]</sup>:

$$\varphi_v = \frac{v_1 - v_2}{v_1} \times 100\% \quad (5)$$

$$\varphi_p = \frac{p_2 - p_1}{p_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $\varphi_v$  为常、低温条件下初速变化量, 反映了发射药低温速度温度系数, 无量纲;  $\varphi_p$  为为常、高温条件下膛压变化量, 反映了发射药高温膛压温度系数, 无量纲;  $v_1$  为常温速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_2$  为低温速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $p_1$  为常温压力, MPa;  $p_2$  为高温压力, MPa。

## 3 结果与讨论

### 3.1 物理结构功能改性对温度系数的影响

发射药物理结构如孔隙度和比表面积对其燃烧性能影响较大, 因此, 一般采用一定物理手段调控发射药

内部结构属性, 以提升其应用效能。通常来说, 采用 MA 钝感时, 一般需在发射药体系内加入一定量的增孔剂, 使发射药基体内形成蜂窝状的微孔, 增大发射药内部孔隙度和比表面积。本研究通过调控增孔剂加入量, 调整微孔的数量。为研究增孔剂加入量对温度系数的影响, 研究制备了 FSY-1、FSY-2、FSY-3 发射药样品, 并完成了样品的制备及试验验证, 测试结果见表 2。

表 2 试验结果表明, 随着增孔剂加入量的增加, 发射药的低温速度下降程度和高温膛压升高程度均呈现

表2 不同增孔剂加入量对温度系数的影响

Table 2 Temperature coefficient with different amount of pore extender

sample	pore extender amount / %	diame-ter of pore / $\mu\text{m}$	low temperature velocity temperature coefficient / %	high temperature chamber pressure temperature coefficient / %
FSY-1	0	/	4.3	16.8
FSY-2	3.5	50.1	3.7	5.9
FSY-3	5.0	55.3	1.8	4.8



出下降的趋势。随着增孔剂加量的增加,发射药低温速度温度系数由4.3降低至1.8,高温膛压温度系数由16.8降低至4.8,表明增孔剂的加入增大了发射药体系内燃烧面积,提高了 $S/V_1$ ,使 $S/V_1-T$ 曲线上移,从而实现燃面对燃速的补偿作用,因此,采用预制微孔方法能有效改善发射药的温度系数。同时,发射药中孔道直径为50.1  $\mu\text{m}$ 和55.3  $\mu\text{m}$ ,亦印证孔道的形成可调控发射药温度系数。

另一方面,在发射药配方中添加、优化含能固体材料粒度兼具提升发射药配方体系能量和提高发射药内在比表面积的作用,在一定程度上具备改善发射药的温度系数的功能。为考察不同粒径含能固体材料对温度系数的影响,在其它工艺条件不变且含能固体材料含量相同的条件下,制备FSY-4和FSY-5发射药试样,并完成了样品的内弹道性能验证试验,测试结果见表3。

表3 不同含能固体材料粒径对温度系数的影响

Table 3 Temperature coefficient with different particle size of energetic solid material

sample	particle size of energetic solid material / $\mu\text{m}$	percentage content of energetic solid material / %	low temperature velocity temperature coefficient / %	high temperature chamber pressure temperature coefficient / %
FSY-4	8.5	15.0	5.2	16.8
FSY-5	54.6	15.0	4.1	11.9

表3结果表明,在同一含能固体加量条件下,随着含能固体材料粒径由8.5  $\mu\text{m}$ 增加至54.6  $\mu\text{m}$ ,发射药的低温初速下降幅度和高温膛压上升幅度均呈现出下降的趋势,发射药低温下速度温度系数从5.2降至4.1,高温下膛压温度系数由16.8降低至11.9,这是因为随着含能固体材料粒径的增加,含能固体材料与发射药基体间的接触面积增大,发射药微观结构中可能出现较大的“空穴”,这些“空穴”增大了发射药体系中燃烧面积,进而实现了燃面补偿效果,有效改善发射药的温度系数。故提高含能材料粒径有助于降低发射药的温度系数。

### 3.2 钝感剂对温度系数的影响

基于上述最优化实验结果,随后选择FSY-5发射药为研究对象,采用钝感工艺对药粒表面进行处理,考察钝感剂NA和MA对温度系数的影响。在保持其他工艺条件不变的基础上,采用干法钝感工艺分别制备了含NA和PMA(MA聚合物)的FSY-6和FSY-7发射

药样品,并完成了样品的内弹道性能验证试验,试验结果见表4。

表4 不同钝感剂对温度系数的影响

Table 4 Effects of the insensitive agents on the temperature coefficient

sample	insensitive agents	low temperature velocity temperature coefficient / %	high temperature chamber pressure temperature coefficient / %
blank	matrix sample	6.8	15.7
FSY-6	NA	5.4	9.7
FSY-7	MA	4.3	5.9

表4试验结果表明,经MA和NA钝感的发射药的温度系数分别为5.4/9.7和4.3/5.9,与未钝感发射药相比,发射药温度系数均有所降低,且MA钝感发射药的低温初速下降程度和高温膛压上升程度均明显低于NA钝感发射药,表明MA钝感发射药能更有效改善发射药的温度系数。

### 3.3 表面处理对温度系数的影响

发射药在完成MA钝感处理后,为提升发射药点传火性能,采用“敏化剂+溶剂”对药粒表面进行涂覆处理,以考察表面处理工艺对发射药温度系数的影响,制备了FSY-8和FSY-9两种发射药试样,并完成了发射药样品试验验证,试验结果见表5。

表5 表面处理对温度系数的影响

Table 5 Effects of the surface sensibilization on the temperature coefficient

sample	sensitization	low temperature velocity temperature coefficient / %	high temperature chamber pressure temperature coefficient / %
FSY-8	unsensibilization	4.1	7.2
FSY-9	sensibilization	3.2	5.6

FSY-9是在FSY-8钝感样品的基础上进行表面处理。表5试验结果表明,FSY-9发射药采用表面处理,发射药的温度系数分别为3.2/5.6,低温下速度温度系数有效控制在5%以内,高温下膛压温度系数能有效控制在10%以内,与未处理样品相比,其低温初速下降程度和高温膛压上升程度均呈现出下降的趋势,由于表面处理增强了发射药点传火的作用性能,提高了点传火的一致性,因此,对钝感发射药进行表面处理,能明显降低发射药的温度系数。

综合发射物理结构功能改性、钝感及表面处理3种方法对发射药进行温度系数的优化调控,低温下速度温度系数有效控制在5%以内,高温下膛压温度系数能有效控制有10%以内。为明确上述三种方式对发射药温度系数的调控机理,随后根据上述研究结果进行相应的机理分析。

### 3.4 低温度系数调控机理探讨

DHi-1 发射药体系中添加增孔剂以预制微孔,并添加含能增塑剂和含能固体材料。采用“MA+引发剂”工艺,即干法钝感工艺对基药进行表面钝感聚合处理。采用“敏化剂+溶剂”表面处理工艺对发射药进行改性处理。DHi-1 低温度系数调控方案见图3,由外层到内层依次是:

(1)敏化层。采用“敏化剂+溶剂”对药粒表面进行敏化处理,以改善发射药的点传火性能,特别是低温条件下的点传火性能。

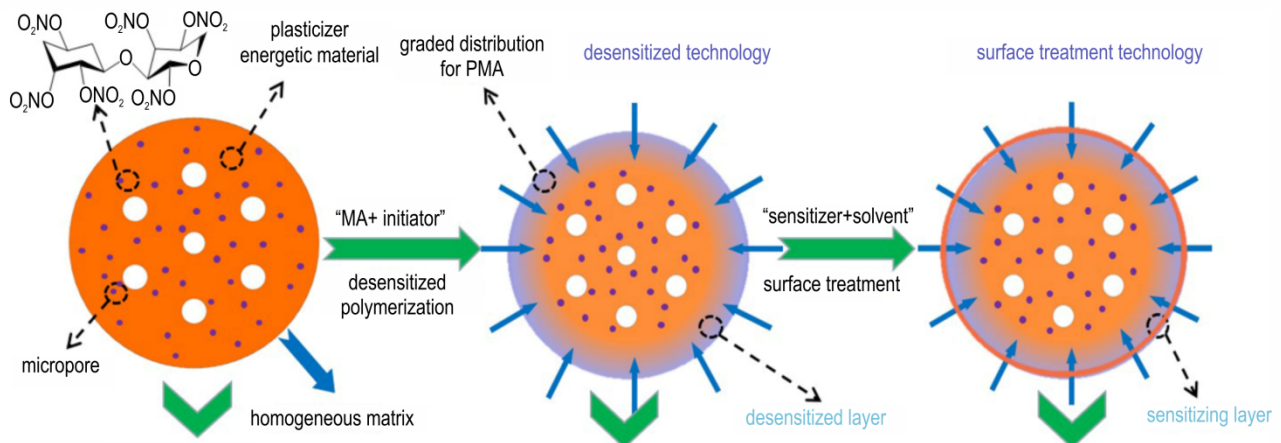


图3 低温度系数调控方案

Fig.3 Low temperature coefficient modification method

DHi-1 的燃烧过程分以下几个部分:(1)点火;通过底火的作用,药筒底部的药粒先局部点火,然后药筒内部的药粒全面点火;由于敏化层敏化剂的作用,有效改善了药粒的点传火性能,缩短了局部点火及全面点火的时间,提高了点传火的一致性;(2)钝感层燃烧至基体层及内孔燃面暴露;(3)基体层及堵(闭)孔层燃烧至内孔全部暴露;(4)基体层通过表面及内孔燃烧至燃烧结束。在基体层燃烧的过程中,基体微孔同步燃烧。在药粒结构中,与温度系数相关的结构有:敏化层、钝感层、堵(闭)孔层及基体微孔,其温度系数调控机理为:

(1)药粒基体中含有预制的微孔,在低温压力冲击作用下,基体微孔易出现一定程度的开裂或破碎,初

(2)PMA钝感层。通过采用“MA+引发剂”进行聚合钝感,以达到改善温度系数、提高发射药燃烧渐增性等目的。

(3)均质基体。基体在制备的过程中,内添加一定量的增孔剂,通过工艺控制将增孔剂驱除,并在基体表面及内部形成一定大小的预制微孔。通过添加含能固体材料,提高发射药的能量水平,同时由于含能固体材料与基体存在界面,能在一定程度上改善发射药的温度系数。通过内添加含能增塑剂,改善发射药的力学性能和加工性能。

(4)堵(闭)孔层。在钝感及表面敏化处理过程中,在内孔的端面渗透部分钝感剂和敏化剂;由于MA和溶剂对硝化棉有较强的增塑效果,钝感时所添加的溶剂对硝化棉有一定的溶胀作用,同时钝感液的黏度较大,药粒内孔较小,因此在钝感过程中容易形成堵(闭)孔现象;表面敏化处理时,敏化剂进一步对内孔的端面进行封堵。

始燃面增大,补偿因温度降低导致燃速下降而引起的燃气生成速率的变化。

(2)药粒基体中含有一定量的含能固体材料,由于含能固体材料与基体存在界面,增加了基体中的微孔结构,与预制微孔相同,低温下易出现一定程度的开裂且界面扩大,因燃面补偿效应能降低发射药的温度系数。

(3)DHi-1 采用敏化剂对药粒表面进行敏化处理,能有效改善低温条件下的点传火性能,减小温度对点传火性能的影响,达到改善温度系数的目的。

(4)通过聚合钝感,由于钝感剂无定向迁移移动渗透至硝化棉内部,PMA与基体形成互穿网络结构;PMA的膨胀系数与基体存在较大差异(PMA的线膨胀系

数 $\alpha$ 为 $1.79 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , 基体的 $\alpha$ 为 $1.17 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ), 当温度变化时, 钝感层和基体的结合强度发生变化。高温时PMA呈膨胀状态, 挤占孔穴, 使发射药钝感层致密, 燃烧面积减小, 燃烧减缓; 低温下PMA易脆且呈收缩状态, 使发射药钝感层疏松, 孔隙增大, 燃烧面积增大, 燃烧变快, 从而实现装药的低温感效果。

(5) 通过钝感和表面敏化处理, 形成了带端面封堵的拉链状内孔端面结构, 越靠近表面拉链闭合得越严密(图4)。常温时拉链处于半合半开状态; 低温时

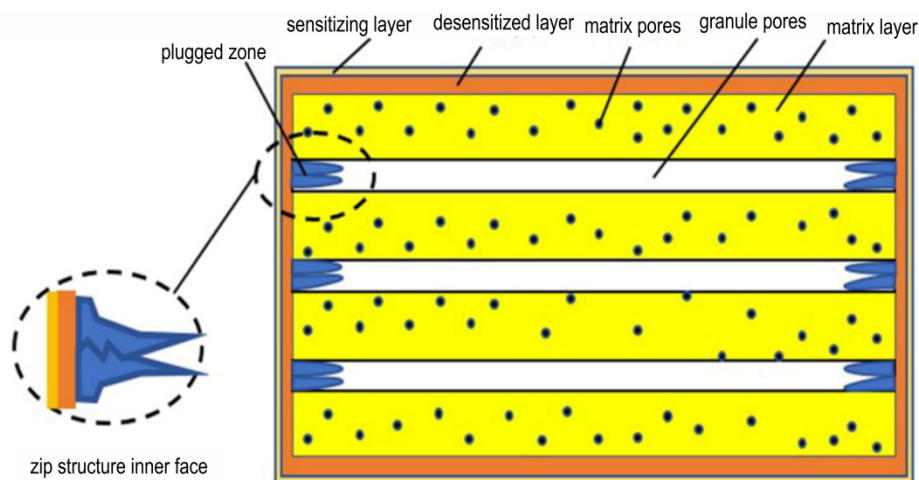


图4 DHi-1结构示意图

Fig.4 Structure diagram of DHi-1

## 4 结论

(1) 采用物理结构功能改性、钝感工艺及表面处理三种调控方法对DHi-1发射药进行处理, 以发射药内弹道性能试验对其进行表征验证, 结果表明, 该低温度系数调控技术可使发射药具有明显的低温感性能。当采用5%左右的增孔剂、含能固体材料粒径约 $55 \mu\text{m}$ 、采用MA作为钝感剂、采用敏化剂进行表面处理等技术措施时, 低温下速度温度系数有效控制有5%以内, 高温下膛压温度系数能有效控制有10%以内。

(2) DHi-1发射药具有低温度系数, 其中: 发射药中物理增孔方法可增加发射药内比表面积, 含能材料粒度增长可调控发射药内部孔隙大小, 药粒基体中含有预制的孔道, 同时含能固体材料与基体存在界面, 在低温压力冲击作用下, 基体孔道和界面易出现一定程度的开裂或破碎, 初始燃面增大; 高温时抗冲击能力较好, 基体孔道和界面未出现开裂或破碎, 初始燃面低; 通过聚合钝感处理, 钝感剂随低温和高温环境发生特

堵(闭)孔层变脆、抗冲击能力弱, 易在初始压力的冲击下破孔, 不具备堵孔效应, 燃烧总面积增大; 高温时由于堵(闭)孔层膨胀系数显著增大, 且抗冲击能力增强, 产生部分闭孔现象, 使高温燃烧总面积显著降低。

基于上述因素的综合作用, DHi-1发射药低温条件下燃烧面积大幅度提高, 弥补了由于温度降低而造成膛压和初速的下降; 高温下燃烧面积小幅度降低, 部分抵消了由于温度升高而造成膛压和初速的增大, 在内弹道上表现出低温初速降和高温膛压升较小的低温感性能。

异性收缩或膨胀变化, 调控发射药内部燃面变化, 进而调控温度系数; 通过表面敏化处理, 提升发射药低温下点传火能力。综合发射药的物理结构功能、钝感和表面处理改性后, 发射药的温度系数得以进一步的改善。

### 参考文献:

- [1] 何卫东, 董朝阳. 高分子钝感发射药的低温感机理[J]. 火炸药学报, 2007(1): 9-12.  
HE Wei-dong, DONG Chao-yang. Study of low temperature coefficient mechanism of polymer deterred propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007(1): 9-12.
- [2] 赵其林, 黄顺友, 李纯志. 球扁药低温度系数装药研究[J]. 火炸药学报, 2004(4): 42-45.  
ZHAO Qi-lin, HUANG Shun-you, LI Chun-zhi. The low temperature-sensitive coefficient charge of flat ball gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004(4): 42-45.
- [3] 芮久后, 王泽山. 端面粘帖包覆火药界面粘结强度研究[J]. 火炸药学报, 2002(1): 1-3.  
RUI Jiu-hou, WANG Ze-shan. Study on the interfacial binding strength of the end-surface-binding coated propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002(1): 1-3.
- [4] 陈敏. 某高分子特性材料含量测定及低温度系数效应研究[J]. 四川兵工学报, 2007(2): 63-64+66.



- CHEN Min. Research on the content determination of a polymer characteristic material and the effect of low temperature coefficient [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2007 (2): 63-64+66.
- [5] 堵平. 低温感发射药包覆层、包覆界面特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- DU Ping. Study on the characteristics of coating layer and coating interface of low-temperature sensitive propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [6] 翁业芹. 一种低温度系数的RDX改性单基药探索研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- WENG Ye-qin. Research on modified single base propellant containing RDX with low temperature [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [7] 王琼林. 发射药装药温度系数的塑性调节原理[J]. *火炸药学报*, 2002, 25(1):4-7.
- WANG Qiong-lin. New method of adopting the temperature sensitivity of gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(1):4-7.
- [8] 赵强, 刘波, 刘少武, 等. 降低发射装药弹道温度系数技术的国内外研究进展[J]. *火炸药学报*, 2019, 42(6):540-547.
- ZHAO Qiang, LIU Bo, LIU Shao-wu, et al. Research progress at home and abroad on the technology of reducing ballistic temperature coefficient of gun propellant charge [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(6):540-547.
- [9] 王泽山, 徐复铭, 张豪侠. 火药装药设计原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 6.
- WANG Ze-shan, XU Fu-min, ZHANG Hao-xia. Design principle of gunpowder charge [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995. 6.
- [10] 王保柱. 火药燃烧定律的精确度及其实用价值[C]//弹道学术交流会议论文集, 1992.
- WANG Bao-zhu. The accuracy of the law of gunpowder combustion and its practical value [C]//Proceedings of the Ballistic Academic Exchange, 1992.
- [11] 杨三斌. 降低大弧厚粒状药温度系数的复合钝感技术[J]. *四川兵工学报*, 2010, 32(12): 42-44.
- YANG San-bin. A composite insensitive technique for reducing the temperature coefficient of large arc thickness granules [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2010, 32(12): 42-44.

## Effect of Low Temperature Coefficient on the Functional Structure Modification of Single-Based Propellant

CHEN Chun-lin, ZHAO Jian-chun, TU Wen-wen, XIONG Peng, YANG Qin, YANG Qi, ZHANG Jun

(Lu Zhou North Chemical Industries Co., Ltd., Luzhou 646003, China)

**Abstract:** To adapt to the operational requirements of the wide temperature range environment for the single-based propellant, this work investigated the modification effects of temperature coefficient of propellant through physical structure modification, insensitive technology, and surface modification methods. Here, the prepared propellant was evaluated by the internal ballistic performance test. The low temperature velocity temperature coefficient and high temperature chamber pressure temperature coefficient could be controlled below 5% and 10%, respectively when the propellant was modified with 5% pore extender, a particle size of energetic solid material of 55  $\mu\text{m}$ , the insensitive agent MA, and surface sensibilization modification. The modification mechanism for the propellant towards these methods is attributed to that the pores, irregular bulge, open interface, and zipper hole section structure are formed. Hence, at the lower temperature condition, because of the porous layer and PMA of the propellant becoming brittle, the impact resistance-being weakened, the fracture tendency of the pores and the interface being increased, the initial burning surface of the propellant was increased at low temperature. At the lower temperature condition, because of the closed hole phenomenon of the propellant blocked (closed) hole layer being intensified, insensitive agent being expanded and squeezed into the hole, the impact resistance being enhanced, the fracture tendency of the pore and the interface being reduced, the initial burning surface of the propellant was reduced under high temperature conditions. Through the compensation of the burning rate, the aim of adjusting the temperature coefficient of the propellant is achieved.

**Key words:** temperature coefficient; functional structure modification; propellant

**CLC number:** TJ55; TQ562

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024070

(责编: 姜梅)