

文章编号:1006-9941(2023)09-0903-07

## 高低温循环保存下片状变燃速发射药的燃烧稳定性

赵先正<sup>1,2</sup>, 刘 详<sup>3</sup>, 丁亚军<sup>1,2</sup>, 李世影<sup>1,2</sup>, 肖忠良<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学 特种能源材料教育部重点实验室, 江苏 南京 210094; 3. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646003)

**摘要:** 为了研究片状变燃速发射药在高低温循环保存下的燃烧稳定性,将样品形貌及燃烧性能变化作为考察依据,以70℃高温10h,-50℃低温10h为一个循环周期,对片状变燃速发射药样品进行了20次高低温循环保存。通过光学显微镜观察了高低温循环前后片状变燃速发射药的表面形貌,利用密闭爆发器测试了高温50℃、常温20℃、低温-40℃下高低温循环前后片状变燃速发射药的燃烧性能。显微观测发现经高低温循环后,片状变燃速发射药表层气泡扩大增多,发射药断面出现塑性形变现象,内外层界面结合保持紧密,没有开裂与脱黏。密闭爆发器试验反映了该类型发射药经过高低温循环后,高温、常温、低温下动态活度曲线与高低温循环前都基本重合,动态活度变化值 $\Delta L$ 最大值出现在低温条件下,为2.57%,能量渐增性释放规律基本不变。高低温循环下,片状变燃速发射药在高压常温-低温阶段的燃速温度系数对比原样在相同条件下显著降低,高温与低温下片状变燃速发射药的压力指数差距对比原样在相同条件下减小。结果表明,片状变燃速发射药在高低温循环条件下界面和燃烧性能稳定,具有较好的变温贮存稳定性。

**关键词:** 片状变燃速发射药;高低温循环;燃烧性能;温度系数;压力指数

**中图分类号:** TJ55;O63

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022209

## 0 引言

发射药作为身管武器弹丸推进能源,一方面需要满足各自武器平台的初速、膛压等作战指标,另一方面还需要在各类极端气候环境下保证性能稳定可靠,这对发射药的环境稳定性提出了新要求<sup>[1]</sup>。现阶段为满足武器系统高初速的要求,通常使用具有渐增性燃烧特点的发射药,对于燃速调控方法,一般需在增面燃烧药型的基础上,引入新物质进入发射药体系,通过调控新物质在发射药基体内的空间与浓度分布,构建在燃烧方向上的燃速渐增性,因此发射药整体的组分分布将直接影响发射药的燃烧性能<sup>[2-3]</sup>。发射药在储存、服役期间,根据菲克第二扩散定律<sup>[4]</sup>,各组分将按浓度

梯度差异向低浓度方向迁移与扩散<sup>[5]</sup>,破坏原有组分空间与浓度分布,一定程度上影响发射药燃烧性能,甚至出现射击有害现象。而片状变燃速发射药是一种通过特定模具在挤压成型阶段,将缓燃层与速燃层按三明治结构固定成型的发射药,其外层加入乙基纤维素高分子降低表面燃速,使发射药整体具有范围可调的燃烧渐增性。由于高分子物质具有较低的迁移性<sup>[6]</sup>,以及挤压成型阶段存在界面结合过程<sup>[7]</sup>,使得片状变燃速发射药在组分抗迁移与降低温度系数方面具有优势<sup>[8]</sup>,有利于发射药的储存稳定性,因此需要进一步开展对片状变燃速发射药储存稳定性的研究。

宋亚苹等<sup>[9]</sup>通过高温加速老化试验,研究了不同钝感剂在发射药中的迁移性能以及钝感剂对叠氮硝酸铵发射药的影响,结果表明高分子钝感剂几乎不发生迁移。梁昊等<sup>[10-11]</sup>基于扩散原理及钝感剂分布与燃烧性能的关联,将静态燃烧性能与武器膛压进行联系,建立了动态活度8.64%为阈值作为评判方法,建立了钝感发射药老化迁移导致钝感剂浓度分布及燃烧性能变化的理论模型。赵其林等<sup>[12]</sup>依据菲克第二定律和扩

收稿日期:2022-08-15;修回日期:2022-10-17

网络出版日期:2023-07-12

作者简介:赵先正(1993-),男,博士研究生,主要从事发射药及装药研究。e-mail:njust\_zhaoxz@163.com

通信联系人:丁亚军(1990-),男,副研究员,主要从事发射药及装药研究。e-mail:dyy@njust.edu.cn

引用本文:赵先正,刘详,丁亚军,等.高低温循环保存下片状变燃速发射药的燃烧稳定性[J].含能材料,2023,31(9):903-909.

ZHAO Xian-zheng, LIU Xiang, DING Ya-jun, et al. Combustion Stability of Flake Variable Burning Rate Propellant after High and Low Temperature Cycling[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(9):903-909.

散系数与扩散活化能的关系,研究了轻武器钝感发射药的长贮性能,建立了轻武器用钝感发射药功能失效阈值预估方法。目前针对发射药环境稳定性的研究主要集中于恒温贮存方面:对发射药进行长贮试验,通过测定指示物浓度、静态燃烧试验等方法,依据时温等效原理代入 Arrhenius 方程或 Berthelot 方程<sup>[12]</sup>,从发射药的安定性寿命或弹道寿命方面进行评价预估。然而,对于发射药服役期间在短期极端气候环境条件下的燃烧稳定性能,仍有待进一步研究。

为此,本研究针对片状变燃速发射药,以 70 °C 高温保存 10 h、-50 °C 低温保存 10 h 为一个循环周期,高低温循环 20 次,模拟服役期间的极端气温变化<sup>[13-14]</sup>。采用光学显微镜与密闭爆发器作为表征手段,针对高低温循环前后样品进行表征评价<sup>[15-16]</sup>,分析高低温循环前后样品在高、常、低温下的燃速、动态活度、动态活度下降点以及燃速温度系数与压力指数的表现,以期得到对片状变燃速发射药在极端温度环境下贮存稳定性的评价。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

双基片状变燃速发射药样品(内层主要成分为硝化纤维素、硝化甘油、黑索今,外层主要成分为硝化纤维素、硝化甘油、乙基纤维素),泸州北方化学工业有限公司。

程式高低温试验箱,上海奇珊电子科技有限公司;显微镜 inVia™ Qontor®,英国 Renishaw 有限公司;50 mL 密闭爆发器,咸阳宝丰机械电器有限公司。

### 1.2 实验过程

#### 1.2.1 试样制备

将内外层物料分别胶化,过滤,通过片状变燃速模具使 2 种物料挤压成型为三明治结构的片状发射药。经过烘干处理后,采用 GJB 770B-2005 中试样准备方法,按 4 cm 长度截取片状变燃速发射药,用铝塑复合膜封装袋进行封装、标记。

将待处理样品放入程式高低温试验箱进行高低温循环,对试验箱进行温度参数设定:升温速率设定为 1 °C·min<sup>-1</sup>,到达 70 °C 后保持 10 h;降温速率设定为 1 °C·min<sup>-1</sup>,到达 -50 °C 后保持 10 h,共 20 次循环,总计 20 d。将高低温循环前样品,记为原样;高低温循环后的样品记为处理样。

#### 1.2.2 光学显微形貌表征

显微镜设定 10 倍目镜与 20 倍物镜,对高低温循

环前后的发射药样品进行表面与断面形貌表征。形貌图像利用 Image Pro Plus 6.0 软件,对气泡进行识别测量,得到统计数据。

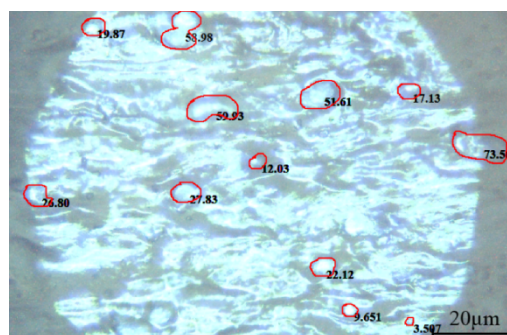
### 1.2.3 静态燃烧性能测试

采用国军标 GJB 770B-2005 方法,通过密闭爆发器测试不同温度条件下(50, 20, -40 °C)样品的燃烧性能。样品装填密度为 0.2 g·cm<sup>-3</sup>,点火药为 C 级硝化棉,点火压力为 10 MPa。通过处理软件分析得到样品的压力-时间(*p-t*)曲线、燃速-压力(*u-p*)曲线、动态活度-相对压力(*L-B*)曲线。

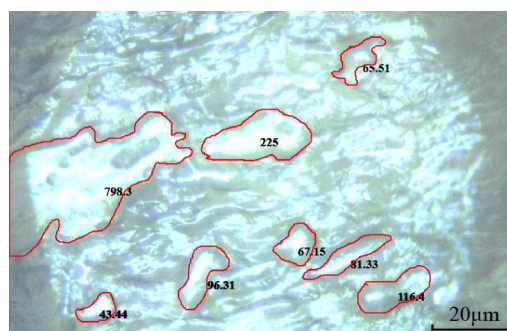
## 2 结果与讨论

### 2.1 表层形貌表征

为了分析高低温循环对片状变燃速发射药的影响,对原样与处理样的表面与断面分别进行光学显微表征形貌与图像处理,结果如图 1、图 2 所示。从图 1a 中可以看出原样表层存在部分气泡,体积较小,且呈离散、随机状态分布。处理样表面形貌如图 1b 所示,可以观察到发射药表层气泡增多、变大。经过图像软件处理分析,统计数据如下,原样气泡的平均面积为 31.91 μm<sup>2</sup>,



a. the original sample



b. the treated sample

图 1 原样与处理样表面形貌及图像处理

Fig.1 Surface morphology and image process of the original and treated samples

中位数是  $24.46 \mu\text{m}^2$ , 最小值  $3.507 \mu\text{m}^2$ , 最大值  $73.50 \mu\text{m}^2$ ; 处理样气泡的平均面积为  $186.66 \mu\text{m}^2$ , 中位数是  $88.82 \mu\text{m}^2$ , 最小值  $43.44 \mu\text{m}^2$ , 最大值  $798.3 \mu\text{m}^2$ 。这是由于高温环境下对聚合物基体的软化作用以及对发射药自身外挥发份的进一步挥发, 导致了气泡的增多, 微观上使得发射药表面的平整度发生改变, 形成更多潜在缺陷<sup>[17-18]</sup>。

如图 2a、图 2b 所示为原样与处理样的断面形貌图, 从图 2a 中可以看出, 高低温循环前, 发射药断面切口较为整齐, 形貌较为均一, 可以明显看出切痕方向。而经过高低温循环后, 由于受到温度影响、发射药挤出过程中的部分纤维取向以及变燃速发射药内外层膨胀率差异三方的共同影响, 释放了发射药制备与切断过程中所受的应力并产生应变<sup>[19]</sup>, 致使样品断面形貌发生变化, 平整截面与切痕消失。其次, 可以发现在同一景深下只能对内层物料进行清晰成像而外层模糊, 是由于外层相较于内层而言, 乙基纤维素的引入使外层膨胀系数大于内层药, 经过高低温循环后, 外层药相较于内层药产生了更大的塑性形变, 使得在原本平整的断面上, 外层尺寸变化过大导致成像模糊。

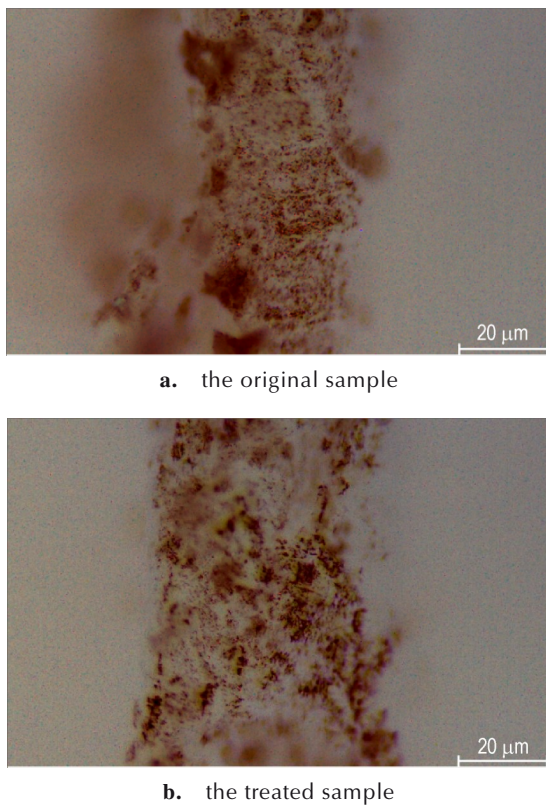


图 2 原样与处理样断面形貌  
Fig. 2 Section morphology of the original and treated samples

## 2.2 燃烧性能表征

为了考察高低温循环对片状变燃速发射药燃烧性能的影响, 对原样与处理样分别进行了高、常、低温下 ( $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的密闭爆发器试验, 得到压力-时间 ( $p-t$ ) 曲线、燃速-压力 ( $u-p$ ) 曲线以及动态活度-相对压力 ( $L-B$ ) 曲线, 其中样品的密闭爆发器试验结果见表 1,  $p-t$  与  $u-p$  曲线如图 3 所示。

从表 1 与图 3 可以看出, 处理样对比原样在高温、常温与低温测试环境下最大压力分别下降 5.41, 8.84, 5.16 MPa, 说明处理样的能量降低, 总产气量下

表 1 样品密闭爆发器测试结果

Table 1 Test results of the closed bomb for the original and treated samples

samples		$p_{\text{max}} / \text{MPa}$	$t / \text{ms}$	$n$	$\Delta n / \%$
original	$50 \text{ }^\circ\text{C}$	293.06	1.46	0.87724	4.63
	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	293.81	1.573	0.83845	0
	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$	289.2	1.812	0.89511	6.76
treated	$50 \text{ }^\circ\text{C}$	287.65	1.427	0.87097	2.41
	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	284.97	1.535	0.85045	0
	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$	284.04	1.683	0.83944	-1.30

Note:  $n$  is the pressure index.  $\Delta n$  is the change rate of pressure index.

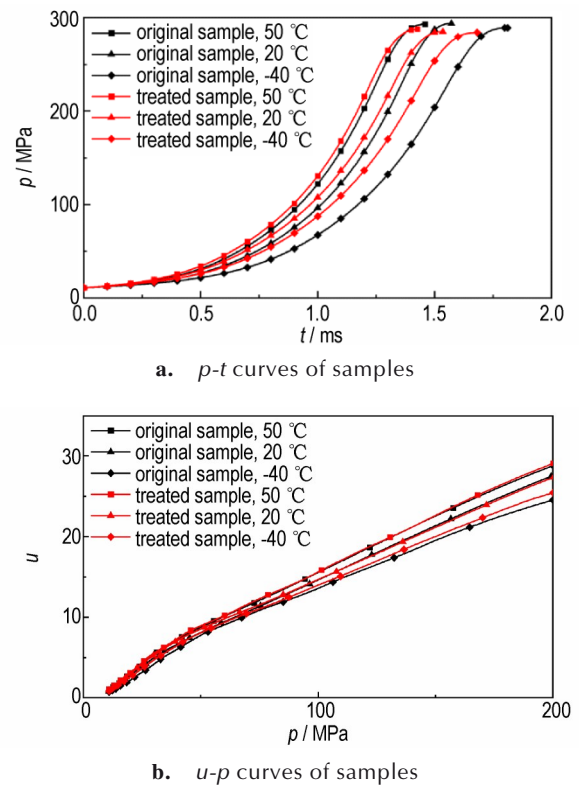


图 3 样品高低温循环前后的  $p-t$  与  $u-p$  曲线  
Fig. 3  $p-t$  and  $u-p$  curves of the original and treated samples

降;而燃烧时间  $t$  在高温、常温、低温测试环境下,分别缩短了 0.033, 0.038, 0.129 ms, 反映了样品燃烧速度加快, 从二者的对比, 可以综合地得出结论: 高低温循环过程, 对发射药有增加燃面的影响, 而在能量属性方面有减弱的影响。佐证了前文对于形貌表征部分的描述, 发射药表面的微小气泡进一步扩大贯通, 同时体系在循环的低温过程中银纹增多<sup>[20]</sup>, 导致燃面扩大, 补偿了燃速。

从表 1 所列的燃速压力指数中还可以看出以下 2 点规律: 首先, 片状变燃速发射药的燃速压力指数较低, 其中原样在低温下的燃速压力指数为 0.89511, 高于常温环境下的原样的燃速压力指数 0.83845, 是因为低温下发射药机械性能下降, 在燃烧气流冲击与腔内药粒相互碰撞的作用下发生药体碎裂, 导致燃面不规则地迅速扩大, 燃速压力指数增加。而处理样在低温下的燃速压力指数为 0.83944, 低于常温环境下处理样的燃速压力指数 0.85045, 说明高低温循环减少了低温下燃烧过程中的药体碎裂。其次, 从原样与处理样在不同温度条件下, 自身的燃速压力指数变化值  $\Delta n$  也可以看出, 高低温循环后, 在高温与低温测试条件下, 片状变燃速发射药的燃速压力指数减小; 高温与低温下的燃速压力指数变化值从 4.63%, 6.67% 下降到 2.41%, -1.30%, 说明高低温循环抑制了燃速压力指数的上升, 使得发射药整体在高温、常温、低温环境下, 燃烧时间与最大压力差值减小, 燃烧性能更趋于接近, 说明片状变燃速发射药对高低温循环在燃速压力指数上具有良好适应性。

另一方面, 对片状变燃速发射药的燃速温度系数  $\sigma_p$  进行考察, 对图 3b 的  $u-p$  曲线进行数据处理, 取高、常、低温下 50~200 MPa 区间的数据, 分别带入发射药燃速温度系数公式 (1)<sup>[21]</sup> 进行计算, 得到 50, 100, 200 MPa 下高温-常温阶段的燃速温度系数  $\sigma_p(h)$  以及常温-低温阶段的燃速温度系数  $\sigma_p(l)$ , 所得结果于表 2 中展示, 并计算同一压力下, 常温-低温阶段的燃速温度系数  $\sigma_p(l)$  与高温-常温阶段的燃速温度系数  $\sigma_p(h)$

的相对变化值  $\Delta$ 。

$$\sigma_p = \frac{\ln u_2 - \ln u_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_p$  为燃速温度系数;  $u$  为线性燃速,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $T$  为测试温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

从表 2 可以发现, 片状变燃速发射药的燃速温度系数较低。在 200 MPa 下, 无论是原样还是处理样, 常温-低温阶段的燃速温度系数  $\sigma_p(l)$  都大于高温-常温阶段的燃速温度系数  $\sigma_p(h)$ , 验证了前文提到的低温下发生药体碎裂的讨论。在 50, 200 MPa 条件下, 处理样常温-低温与高温-常温阶段的燃速温度系数相对变化值  $\Delta$  分别为 14.96, -28.91, 原样的相对变化值  $\Delta$  为 59.67, -161.30, 对比有所降低, 说明高低温循环抑制了燃烧初期和中后期的燃速温度系数变化。从上述结果可以看出, 片状变燃速发射药的燃烧性能对高低温循环较不敏感, 且自身具有良好的低温感效应, 有利于应对极端温度变化环境, 具有较好的温度稳定性。

为了进一步分析片状变燃速发射药的燃烧性能, 分别作原样和处理样品的动态活度-相对压力 ( $L-B$ ) 曲线, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 2 个样品的  $L-B$  曲线都存在上升阶段、平稳阶段以及下降阶段 3 个阶段, 研究分别就此 3 个阶段进行分析, 定义以下数个特征点作为发射药燃烧渐增性特征点作为评价指标: 定义相对压力  $B$  在区间 0~0.2 范围内的峰值  $L_1$  为初始动态活度,  $B_1$  为对应相对压力; 定义  $L_a$  为在平台范围内稳定燃烧阶段的动态活度, 取  $B$  在区间 0.2~0.8 范围内对应  $L$  的平均值作为  $L_a$ 。  $\Delta L_{a1}$  为不同温度下对比常温条件下的动态活度变化百分比,  $\Delta L_{a2}$  为相同温度下, 原样与处理样动态活度变化百分比; 定义  $B_s$  为动态活度加速下降时刻对应的相对压力, 2 个样品各参数数据列于表 3 中。

从图 4a 中, 以原样在常温下测试结果作为基准, 可以直观看出高温下原样动态活度整体上升, 结合表 3, 可以计算出稳定燃烧阶段动态活度上升 5.77%; 低温下原样动态活度整体下降, 稳定燃烧阶段动态活

表 2 样品在不同压力下的燃速温度系数

Table 2 Temperature coefficients of the original and treated samples under different pressures

samples	50 MPa			100 MPa			200 MPa		
	$\sigma_p(h)$	$\sigma_p(l)$	$\Delta / \%$	$\sigma_p(h)$	$\sigma_p(l)$	$\Delta / \%$	$\sigma_p(h)$	$\sigma_p(l)$	$\Delta / \%$
original	$15.3 \times 10^{-4}$	$6.17 \times 10^{-4}$	59.67	$12.2 \times 10^{-4}$	$10.7 \times 10^{-4}$	12.30	$8.84 \times 10^{-4}$	$23.1 \times 10^{-4}$	-161.30
treated	$9.49 \times 10^{-4}$	$8.07 \times 10^{-4}$	14.96	$12.2 \times 10^{-4}$	$7.07 \times 10^{-4}$	42.05	$12.8 \times 10^{-4}$	$16.5 \times 10^{-4}$	-28.91

Note:  $\sigma_p$  is the temperature index,  $h$  and  $l$  stand for high and low temperature respectively.  $\Delta$  stands for the change rate of temperature coefficient under same pressure.

度下降 8.72%；且原样在高、低温下动态活度下降点都有所提前，分别提前了 9.6%，17.4%。由图 4b 可以看出，经过高低温循环后，处理样在高、常、低温下的静态燃烧表现稳定，整体趋势与高低温循环前相同：以处理样在常温下测试结果作为基准，处理样在高温下的动态活度整体上升，稳定燃烧阶段动态活度上升 6.79%；低温下处理样的动态活度整体下降，稳定燃烧阶段动态活度下降 5.57%；并且相似地，处理样在高、低温下

动态活度下降点都有所提前，对应分别提前了 1.6%，4.8%。综上分析可知，片状变燃速发射药在经历高低温循环后，处理样在高、常、低温下的  $L-B$  曲线相较于原样在高、常、低温下的  $L-B$  曲线，动态活度差值减小；同时高、常、低温下燃烧动态活度下降点差距减小，说明高低温循环后，片状变燃速发射药在高、常、低温条件下，燃烧性能差异减小。

为具体考察高低温循环前后，片状变燃速发射药分别在高温、常温和低温下的静态燃烧性能，将原样与处理样在相同测试温度下的  $L-B$  曲线单独作图，如图 5 所示。结合表 3 所列的燃烧渐增性特征值，以动态活

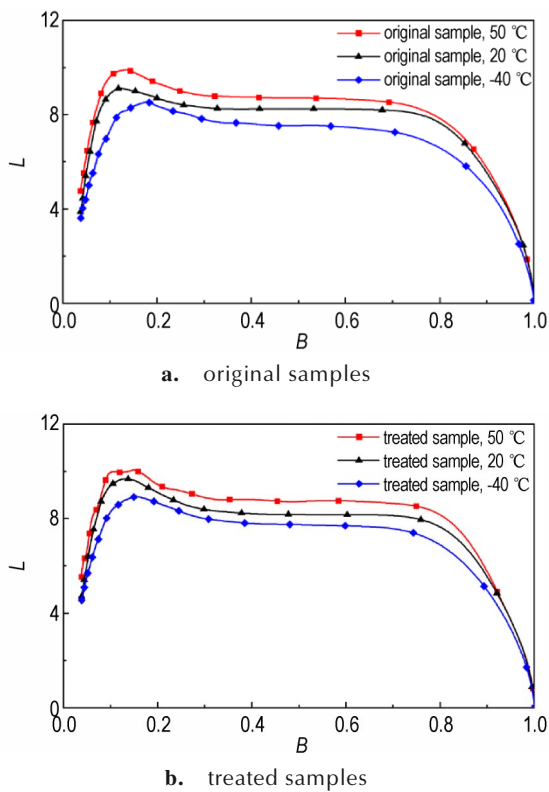


图 4 原样和处理样不同温度下的  $L-B$  曲线  
 Fig.4  $L-B$  curves of the original and treated samples at different temperatures

表 3 原样和处理样的燃烧渐增性特征值

Table 3 Progressive combustion feature points of the original and treated samples

samples	$B_i$	$L_i$	$B_s$	$L_a$	$\Delta L_{a1}$	$\Delta L_{a2}$	
original	50 °C	0.1303	9.8943	0.6326	8.7160	5.77	0
	20 °C	0.1181	9.0999	0.6998	8.2407	0	0
	-40 °C	0.1759	8.5216	0.5778	7.5218	-8.72	0
treated	50 °C	0.1473	10.0505	0.6995	8.7247	6.79	0.10
	20 °C	0.1291	9.6707	0.7109	8.1697	0	-0.86
	-40 °C	0.1493	8.9088	0.6764	7.7150	-5.57	2.57

Note:  $L_i$  is the maximum value of  $L$  between  $B=0$  to  $B=0.2$ .  $B_i$  is the relative pressure where the  $L_i$  is.  $B_s$  is the relative pressure where dynamic activity descends dramatically.  $L_a$  is average activity where  $B$  is from 0.2 to 0.8.

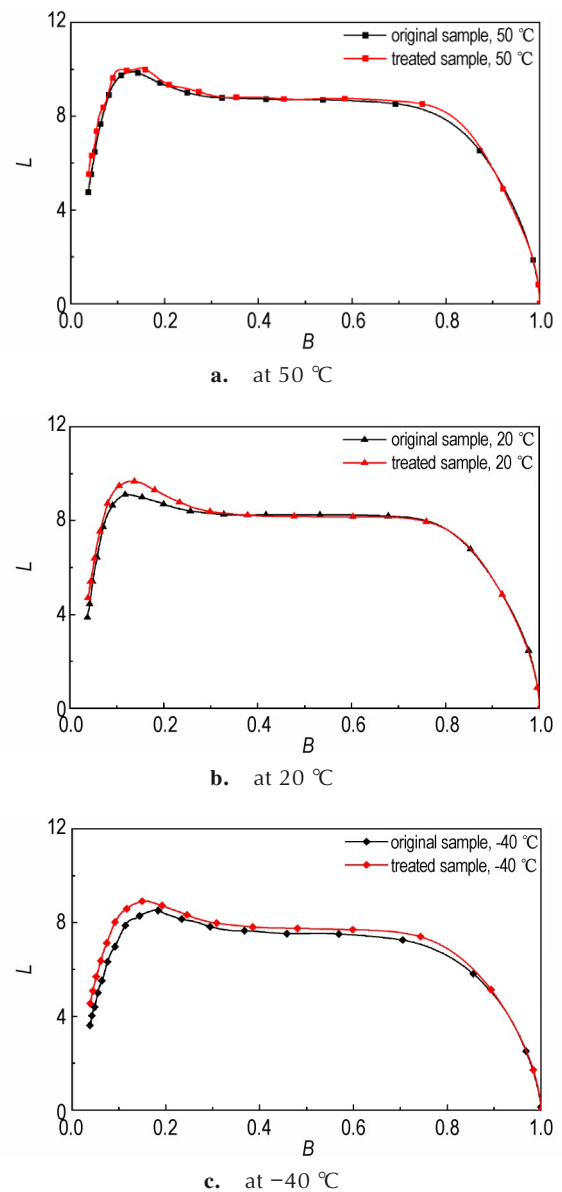


图 5 50, 20, -40 °C 下原样与处理样的  $L-B$  曲线  
 Fig.5  $L-B$  curves of original and treated samples at 50, 20, -40 °C

度变化值 8.64% 为燃烧性能变化阈值,从图 5 中可以明显看出,高温 50 °C 条件下,原样与处理样的 2 条  $L-B$  曲线几乎完全重合,  $\Delta L_{a2}$  为 0.10%; 常温 20 °C 下, 高低温循环仅对发射药点火初期有所影响, 使得处理样点火初期动态活度上升了 6.27%, 当  $B > 0.3$  后, 二者动态活度曲线几乎完全重合,  $\Delta L_{a2}$  为 0.86%。而在图 5c 所示的低温 -40 °C 条件下, 原样与处理样的动态活度曲线相近,  $\Delta L_{a2}$  为 2.57%。从图 5a、图 5c 中可以看出, 在经历过高低温循环后, 原样对比处理样, 其动态活度下降点都有所后延: 高温下动态活度下降点后延了 10.57%; 低温下动态活度下降点向后延迟了 17.06%。上述数据说明经过高低温循环, 在常温燃烧条件下片状变燃速发射药在点火初期动态活度有所上升; 而在高温测试环境下, 高低温循环延后了片状变燃速发射药的动态活度下降点; 在低温环境下, 整体动态活度值较小, 高低温循环同样对发射药的动态活度下降点有后延作用, 提高了低温下发射药燃烧的一致性。

### 3 结论

(1) 由于气泡扩增与外层乙基纤维素膨胀的共同作用, 高低温循环前后发射药的  $L-B$  曲线基本重合, 动态活度变化值  $\Delta L$  最大为 2.57%, 小于动态活度变化值 8.64% 的燃烧性能变化阈值。

(2) 在 50, 100, 200 MPa 下, 片状变燃速发射药经高低温循环, 燃速温度系数有进一步降低的趋势; 在燃速压力指数上, 经高低温循环后, 高温与低温下的压力指数变化值从 4.63%, 6.67% 下降到 2.41%, -1.30%, 说明片状变燃速发射药在变温条件下, 仍具有较好的低温感效应。

(3) 片状变燃速发射药具有较低的燃速温度系数、较小的燃速压力指数, 进一步验证了片状变燃速发射药在极端温度变化条件下仍具备良好的燃烧渐增性与燃烧稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 李国平, 王晓青, 罗运军. 火炸药物理化学性能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 387-392.  
LI Guo-ping, WANG Xiao-qing, LUO Yun-jun. Physical and chemical properties of propellants and explosives [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 387-392.
- [2] 肖忠良. 火炸药导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 83-88.  
XIAO Zhong-liang. Introduction of propellants and explosives [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 83-88.
- [3] 何卫东. 火炸药应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 5-9.  
HE Wei-dong. Application technology of explosives and explosives [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 5-9.
- [4] WINKLER D A, STARKS A. The non-Fickian diffusion of deterrents into a nitrocellulose-based propellant[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1988, 35(1): 51-62.
- [5] 武海顺, 王泽山. 三基包覆药中二氧化钛迁移行为的研究[J]. 火炸药学报(火化工分册), 1994, 5(1): 1-5.  
WU Hai-shun, WANG Ze-shan. Study on the migration behavior of  $TiO_2$  in the coated three based gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1994, 5(1): 1-5.
- [6] 张勇. 钝感剂在贮存过程中的扩散行为及其对球扁药性能的影响[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.  
ZHANG Yong. Migration phenomenon of deterrent during storage and their influence on the performance of double-base oblate spherical propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [7] 贺增弟, 刘幼平, 马忠亮, 等. 变燃速发射药的低温感性能[J]. 火炸药学报, 2006, 29(1): 65-67.  
HE Zeng-di, LIU You-ping, MA Zhong-liang, et al. Low temperature sensitivity of variable burning rate propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(1): 65-67.
- [8] 萧忠良, 贺增弟, 刘幼平, 等. 变燃速发射药的原理与实现方法[J]. 火炸药学报, 2005, 28(1): 25-27.  
XIAO Zhong-liang, HE Zeng-di, LIU You-ping, et al. Principle and method of variable burning rate propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2005, 28(1): 25-27.
- [9] 宋亚苹, 黄振亚, 解德富, 等. 钝感剂种类对叠氮硝胺发射药贮存稳定性的影响[J]. 火炸药学报, 2020, 43(5): 553-557.  
SONG Ya-ping, HUANG Zhen-ya, XIE De-fu, et al. Effect of deterrents on storage stability of azidonitramine gun propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2020, 43(5): 553-557.
- [10] 梁昊, 丁亚军, 李世影, 等. 钝感双基发射药老化迁移机理及动力学过程[J]. 含能材料, 2021, 29(11): 1080-1088.  
LIANG Hao, DING Ya-jun, LI Shi-ying, et al. Aging migration mechanism and kinetic process of deterred DB propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(11): 1080-1088.
- [11] 梁昊, 丁亚军, 李世影, 等. 钝感双基发射药迁移失效评价方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(2): 297-304.  
LIANG Hao, DING Ya-jun, LI Shi-ying, et al. Evaluation method for migration invalidation of deterred double-base gun propellants[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(2): 297-304.
- [12] 赵其林, 周宏伟, 陈春林, 等. 轻武器用钝感发射药功能失效阈值预估方法[J]. 火炸药学报, 2021, 44(1): 101-105.  
ZHAO Qi-lin, ZHOU Hong-wei, CHEN Chun-lin. Prediction methodology of function failure threshold value of deterred gun propellant for firearms [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2021, 44(1): 101-105.
- [13] THOMAS J C, SAMMET T E, DILLIER C A M, et al. Aging effects on the burning rates of composite solid propellants with nano-additives[C]//2018 Joint Propulsion Conference. Cincinnati OH USA, 2018.
- [14] 顾妍, 张冬梅, 张林军, 等. 某三基发射药贮存寿命的预估方法[J]. 火炸药学报, 2017, 40(1): 91-96.  
GU Yan, ZHANG Dong-mei, ZHANG Lin-jun, et al. Method of predicting the storage life of a tri-base gun propellant [J].

- Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2017, 40(1): 91-96.
- [15] 中国人民解放军总装备部. GJB 5309.27-2004, 2004, 火工品试验方法第27部分:温度冲击试验[S]. 北京: 2004.
- [16] TSOTSIS T K, KELLER S, LEE K, et al. Aging of polymeric composite specimens for 5000 hours at elevated pressure and temperature[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(1): 75-86.
- [17] 付有, 王彬彬, 徐滨, 等. RDX对改性单基发射药燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 161-166.  
FU-You, WANG Bin-bin, XU Bin, et al. Effect of RDX on combustion performance of modified single base propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(2): 161-166.
- [18] 贺增弟, 刘幼平, 萧忠良. 变燃速发射药微观结构及对燃烧的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2005, 26(6): 424-427.  
HE Zeng-di, LIU You-ping, XIAO Zhong-liang, et al. Micro-structure and its effect on combustion of variable burning rate propellant[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2005, 26(6): 424-427.
- [19] W L HAWKINS. Polymers properties and applications Vol. 8: polymer degradation and stabilization [M]. USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984: 3-5.
- [20] 华幼卿, 金日光. 高分子物理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 198-220, 316-320.  
HUA You-qin, JIN Ri-guang. Polymer physics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 236-270.
- [21] 梁家豪, 齐乐, 陈春林, 等. 不同黑索金含量的双基发射药膨胀系数的研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(7): 111-114.  
LIANG Jia-hao, QI Le, CHEN Chun-lin, et al. Study on the expansion coefficient of double-base propellant with different RDX content [J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(7): 111-114.
- [22] 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 and Propellants*, 2019, 42(6): 540-547.
- [23] 任务正, 王泽山. 火炸药理论与实践[M]. 北京: 中国北方化学工业总公司出版社, 2001: 355-356.  
REN Wu-zheng, WANG Ze-shan. Theory and practice of propellant [M]. Beijing: China North Chemical Industries Corp Press, 2001: 355-356.

## Combustion Stability of Flake Variable Burning Rate Propellant after High and Low Temperature Cycling

ZHAO Xian-zheng<sup>1,2</sup>, LIU Xiang<sup>3</sup>, DING Ya-jun<sup>1,2</sup>, LI Shi-ying<sup>1,2</sup>, XIAO Zhong-liang<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Special Energy Materials, Ministry of Education, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Luzhou North Chemical Industry Co., Ltd, Luzhou 646605, China)

**Abstract:** In order to investigate the combustion stability of flake variable burning rate propellant under high and low temperature cycle preservation, based on the morphology of samples and the change of combustion performance, a 20 time thermal cycling treatment was carried out, in which samples were separately stored at 70 °C and -50 °C for 10 h as one cycle. The surface and section morphology of propellant was observed via optical microscope, and the combustion performance at 50 °C, 20 °C, -40 °C was tested by closed bomb. Microscopic observation shows that after thermal cycling treatment, the bubbles on the surface increase and the section of propellant becomes lumpy and uneven due to plastic deformation, while the interface between the inner and outer layers remains tight without visible cracks. The combustion performance basically unchanged after thermal cycling treatment, and the dynamic activity curves nearly overlap, for which the maximum  $\Delta L_0$  is 2.57% at low temperature. After thermal cycling treatment, the temperature coefficient under high-pressure from normal to low temperature is significantly lower than that of the original under the same conditions, and the difference in pressure index of the flake variable burning rate propellant at high temperature and low temperature is smaller than that of the original under the same conditions. Attributed to bound interface and combustion consistency, flake variable burning rate propellant has good storage stability under different temperatures.

**Key words:** flake variable burning rate propellant; high and low temperature cycling; combustion performance; temperature coefficient; pressure index

**CLC number:** TJ55;O63

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022209

(责编:姜梅)