

文章编号: 1006-9941(2009)03-0334-05

## 新型含能纤维可燃药筒性能研究

李 煜<sup>1</sup>, 郭德惠<sup>2</sup>, 赵成文<sup>1</sup>, 周伟良<sup>1</sup>, 徐复铭<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 西安北方惠安化学有限公司, 陕西 西安 710302)

**摘要:**为了同时提高可燃药筒的力学性能与燃烧性能,以含能纤维作为可燃药筒的增强组分,制备了一组新型可燃药筒,并对所制药筒进行了力学性能和燃烧性能的测试研究。结果表明,含能纤维的引入,可有效提高可燃药筒的力学性能;有利于药筒的点火,同时提高了药筒能量,使药筒燃烧速度加快,燃尽时间缩短,且随药筒中含能纤维含量的增加,这种趋势更为明显;而从枪弹模拟射击试验结果推论,与对比配方相比含能纤维可燃药筒能降低装药燃烧产生的固体残渣和可燃气体,减弱射击特性信号。

**关键词:**材料学;可燃药筒;含能纤维;力学性能;燃烧性能

中图分类号: TJ012.14

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.03.020

### 1 引 言

20 世纪 50 年代美国首先研制出了可燃药筒<sup>[1]</sup>,其具有制造简单,成本低廉,便于战时大量、快速生产弹药,并有利于炮弹的装填和后勤供应,战略意义重大,因此得到了迅速发展<sup>[2]</sup>。可燃药筒的出现导致了火炮结构和装药结构的改进,并使模块化装药得到实现<sup>[3]</sup>。

随着现代高膛压、高初速武器的发展,对可燃药筒的燃烧性能和力学性能有了更高的要求,但可燃药筒的燃尽性与强度是一组矛盾<sup>[4]</sup>。现行模块装药用可燃药筒是以抽滤模压工艺生产的<sup>[5]</sup>,提高强度主要通过增加纸纤维和粘结剂含量,减少硝化棉含量来实现<sup>[6]</sup>;加入增强组分提高其燃烧性能的方法也有大量研究,Deluca<sup>[7]</sup>研究了以聚丙烯酸纤维增强的可燃药筒,Syal<sup>[8]</sup>等研究了以云母纤维增强的可燃药筒;Kestusis G. Chesonis<sup>[9]</sup>等则提出在药筒外覆盖铝箔以提高力学强度的方法。但这些方法都是以降低药筒的燃烧性能为代价<sup>[10]</sup>,致使药筒在膛内燃烧不完全,严重时出现残燃物等致命缺陷,影响了可燃药筒的使用<sup>[2]</sup>。

本研究在不改变可燃药筒粘结剂种类与用量的条件下,采取以含能纤维部分替代纸纤维的方法,制备了一系列新型可燃药筒,一定范围内提高了可燃药筒的力学性能。

### 2 试样制备

试验由抽滤模压工艺制备 4 个配方的可燃药筒,分别为 N-0 参比配方,N-1,N-2,N-3 三个配方添加的含能纤维量分别为 9%、12% 和 16.5%,具体配方见表 1。

表 1 可燃药筒制备试验配方

Table 1 Composition of combustible cartridge cases

composition	N-0	N-1	N-2	N-3
NC fibers/%	62	62	62	62
kraft fibers/%	24.5	15.5	12.5	8
adhesive and addition agent/%	13.5	13.5	13.5	13.5
energetic fibers/%	/	9	12	16.5

### 3 性能测试

**密度:**测试温度(25 ± 2) °C,密度瓶内径 35 mm,高 60 mm,读数管 100 mL,刻度范围 50 mL,分度值 0.1 mL,试样尺寸 25 mm × 25 mm,取 4 块试样浸入 70 ~ 90 °C 石蜡包覆,以密度瓶法测量。

**压缩力:**测试温度(25 ± 2) °C,从壳体靠近底部位置切取(50 ± 1) mm 圆环,上下截面平行,外观平整,加载速度 20 mm · min<sup>-1</sup>。试样破坏时的载荷值即为压缩力。

**抗拉强度:**测试温度(25 ± 2) °C,从壳体中部位位置切取 120 mm 圆环,以 ASTM1708-95 标准裁剪成哑铃状,进行抗拉强度测试,拉伸速度 11 mm · min<sup>-1</sup>。用试样破坏时的拉力值计算配方抗拉强度。

**密闭爆发器试验:**密闭爆发器容积为 109 mL,测试室温为 20 °C,MAINFRAMEJV53500A 采集系统,

收稿日期:2008-09-03;修回日期:2008-12-08

基金项目:南京理工大学研究生创新基金(2007030001)

作者简介:李煜(1983-),男,博士研究生,研究方向为含能材料。

SYC-3000-99120 传感器, 2# 硝化棉点火药, 以点火压力 10 MPa 确定点火药量, 试样尺寸 35 mm × 11 mm × 2.5 mm。火药力、余容以 3 发平均值计算。

枪弹模拟射击烟、焰试验: 以 5.8 mm 枪用制式药为基本药剂, 加入量为 1.7 g, 用 N-0 和 N-1 试样部分替换制式药, 替换量为 4% (质量分数)。以可见光透射试验分析表征可燃药筒对射击产生烟的影响; 以高速摄影法分析表征可燃药筒对射击产生焰的特征的影响, MS55KCMOS 型高速摄影仪。

## 4 分析与讨论

### 4.1 可燃药筒的力学性能

试验制备的参比配方 N-0、含能纤维增强 N-1、N-2、N-3 配方可燃药筒的密度与力学性能数据见表 2。

表 2 可燃容器力学性能对比

Table 2 Comparison of mechanical property of combustible cartridge cases

composition	N-0	N-1	N-2	N-3
density/g · cm <sup>-3</sup>	1.0	1.0	1.0	1.0
compression pressure/kN	17.77	18.97	18.37	16.29
extension strength/MPa	22.78	26.685	22.26	22.24

由表 2 可见, 配方 N-1 药筒压缩力较参比配方 N-0 提高 13.8%, 抗拉强度提高了 9.7%; 配方 N-2 药筒压缩力较参比配方 N-0 提高 3%, 抗拉强度降低 2%; 配方 N-3 药筒压缩力和抗拉强度反而有一定程度的降低。结果表明在不改变粘结剂种类和用量下, 加入一定量的含能纤维, 能提高可燃药筒的力学性能, 但当含能纤维加入量过多时, 体系强度有一定程度的降低, 这由于含能纤维与纸纤维存在着最佳配比。

### 4.2 可燃药筒的定容燃烧性能

#### 4.2.1 可燃药筒点火

可燃药筒的定容燃烧点火时间  $t_i$  见表 3。 $t_i$  定义为点火药击发到完全燃尽且压力为 10 MPa 的点火时间。图 1、2 分别为三种配方的可燃药筒定容燃烧点火阶段的  $p-t$  曲线和  $dp/dt-t$  曲线 (图中曲线为各配方三发平行试验数据, 下同)。由图 1 可知, 0 ~ 0.5 ms 为电点击发阶段, 随后点火药燃烧, 压力稳定上升。图 2 中 N-0 配方的  $dp/dt-t$  曲线在 6 ms 处出现峰值, 说明点火药在此时的燃烧速率达到极值, 6.7 ms 后压力速率的再次上升是可燃药筒开始燃烧所致, 在 7.13 ms 时才达到 10 MPa, 说明可燃药筒在点火药燃尽前已经开始燃烧。而 N-1 与 N-3 配方的  $dp/dt-t$  曲线在 6 ms 未

出现峰值, 压力上升速率曲线呈指数上升, 说明药筒在 6 ms 前已经开始燃烧, 即配方 N-1、N-3 的点火较 N-0 配方提前, 这是因为配方 N-1 和 N-3 加入了含能纤维, 在相同燃气压力下更容易燃烧, 故点火时间较参比配方 N-0 缩短, 且随含能纤维含量的提高, 这种趋势更为明显。

表 3 可燃药筒密闭爆发器点火时间

Table 3 Ignition time of combustible cartridge cases in closed-bomb

composition	$t_i$ /ms			
	No. 1	No. 2	No. 3	average value
N-0	7.17	7.10	7.12	7.13
N-1	6.84	6.81	6.77	6.81
N-3	6.75	6.71	6.73	6.73

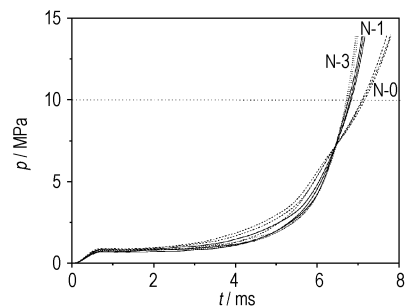


图 1 可燃药筒点火阶段  $p-t$  曲线

Fig. 1  $p-t$  Curves of combustible cartridge cases at ignition

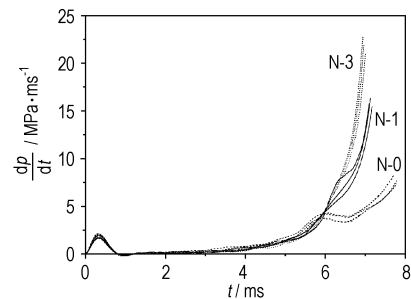


图 2 可燃药筒点火阶段  $dp/dt-t$  曲线

Fig. 2  $dp/dt-t$  Curves of combustible cartridge cases at ignition

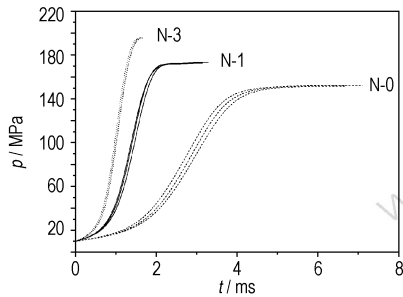
#### 4.2.2 可燃药筒定容燃烧 $p-t$ 曲线及燃烧结束点

试验假设压力达到 10 MPa 时, 点火药已完全燃烧, 可燃药筒被点燃并开始燃烧, 忽略热损失, 测试压力值达到最大时药筒已完全燃尽, 即可燃药筒的燃烧结束时间  $t_k$  为从 10 MPa 到最大压力  $p_m$  的时间 (见表 4)。N-1 配方的燃烧结束时间  $t_k$  比 N-0 配方的 6.82 ms 缩短到 3.14 ms, N-3 配方的燃烧结束时间  $t_k$  缩短到 1.64 ms。密闭爆发器试验的  $p-t$  曲线如图 3 所示。与参比配方 N-0 相比, N-1、N-3 配方压力突变时间提前, 燃烧速度提高, 燃烧结束时间缩短。且随含能纤维加入量的增大, 变化更为明显。

表4 可燃药筒密闭爆发器燃烧结束时间

Table 4 Burning-off time of combustible cartridge cases in closed-bomb

composition	$t_k/\text{ms}$			
	No. 1	No. 2	No. 3	average value
N-0	6.74	7.08	6.64	6.82
N-1	3.26	3.05	3.11	3.14
N-3	1.66	1.61	1.65	1.64

图3 可燃药筒密闭爆发器  $p-t$  曲线Fig. 3  $p-t$  Curves of combustible cartridge cases in closed-bomb

#### 4.2.3 可燃药筒火药力及余容

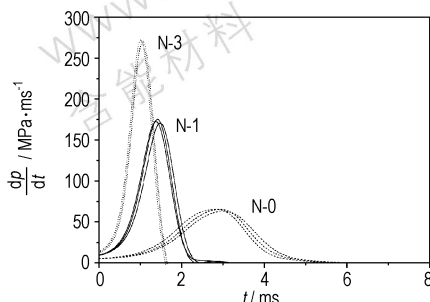
表5为3种可燃药筒的火药力、余容。其中  $p_{m1}$ 、 $p_{m2}$  分别为装填密度  $0.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  下所测密闭爆发器试验的最大压强扣除 10 MPa 的点火压力后数值。从表5中数据可以看出,各配方的平行试验重复性较好。随含能纤维加入量的提高,相同装填密度下密闭爆发器燃烧最大压强逐步提高。N-1配方的火药力比N-0配方增加约21%;N-2配方的火药力较N-0配方增加约36%。表明加入含能纤维对可

表5 可燃药筒密闭爆发器试验测得的火药力、余容

Table 5 Measured values of impetus and covolume of combustible cartridge cases in closed-bomb

composition	$p_{m1} (\rho = 0.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$				$p_{m2} (\rho = 0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$				$f/\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	$\alpha/\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$
	No. 1	No. 2	No. 3	average value	No. 1	No. 2	No. 3	average value		
N-0	82.20	82.76	81.57	82.18	152.32	152.37	151.65	152.11	488.92	1.56
N-1	95.47	95.14	94.87	95.16	173.46	173.03	172.68	173.06	594.21	1.36
N-3	105.79	106.15	106.51	106.15	196.20	195.73	195.22	195.71	664.59	1.42

Note: 10 MPa ignition pressure was deducted when calculating impetus and covolume.

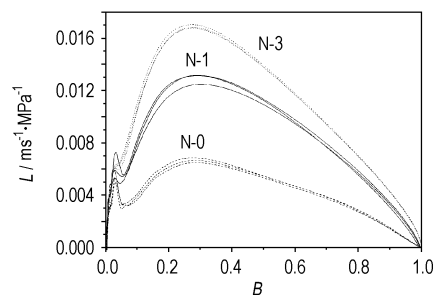
图4 可燃药筒密闭爆发器  $dp/dt-t$  曲线Fig. 4  $dp/dt-t$  Curves of combustible cartridge cases in closed-bomb

燃药筒的能量提高具有明显作用。

#### 4.2.4 可燃药筒定容燃烧的燃气生成速率与动态活性曲线

可燃药筒密闭爆发器  $dp/dt-t$  曲线如图4所示。由图4可见,3种配方的  $dp/dt-t$  曲线中,下降段陡度略微大于上升段,燃烧末段都有较长的延迟,说明可燃药筒燃烧后期燃烧渐减性明显。随着含能纤维在可燃药筒中含量的增加,压力上升速率变化加快,峰值增大。

可燃药筒的动态活性  $L-B$  曲线见图5,活性是指当地压力条件时,单位压力下的压力变化速率,它集中反映了可燃药筒在燃烧条件下燃气的生成特性及燃烧速度特性<sup>[11]</sup>,定义为  $L = (dp/dt)/(p_i * p_m)$ ,其中  $dp/dt$  为压力时间变化率,  $p_i$  为  $i$  时刻测试压力,  $p_m$  为测试最大压力。曲线中  $B = 0.05$  处峰值为点火药燃烧所形成,随含能纤维在药筒中含量的提高,点火峰值后的动态活性下降趋势渐弱,说明可燃药筒点火提前,含能纤维的引入有利于可燃药筒的点火。三种配方的  $L$  值在  $B$  值从 0.1 到 0.3 的变化范围内迅速增大,在 0.28 ~ 0.32 范围时达到峰值,此时可燃药筒瞬间燃烧最为剧烈,随后又迅速下降,表现出强渐减性。随含能纤维加入量的提高,配方动态活性的最大值和平均值都提高。由活性定义可知,活性越大,低压力下压力变化速率越快,燃烧结束时间越早,故含能纤维的加入使药筒燃尽时间缩短,即提高了药筒燃烧速度,也使得药筒的燃尽性能得到提高。

图5 可燃药筒密闭爆发器  $L-B$  曲线Fig. 5  $L-B$  Curves of combustible cartridge cases in closed-bomb

### 4.3 含能增强纤维对可燃药筒燃烧烟、焰的影响

与参比配方 N-0 相比, N-1 配方的枪弹模拟装药射击试验的烟雾强度大幅减小(见表 6), 枪口焰有一定程度的下降, 如图 6 所示, 即 N-1 配方相比 N-0 配方燃烧时生成的固体残渣少, 可燃气体含量低。这是因

为含能纤维的引入改善体系的氧平衡, 使产物中固体残渣和可燃燃气的含量相对减少, 从而使得枪口烟强度和二次燃烧火焰强度减小。说明加入含能纤维有利于提高可燃药筒的燃尽性。

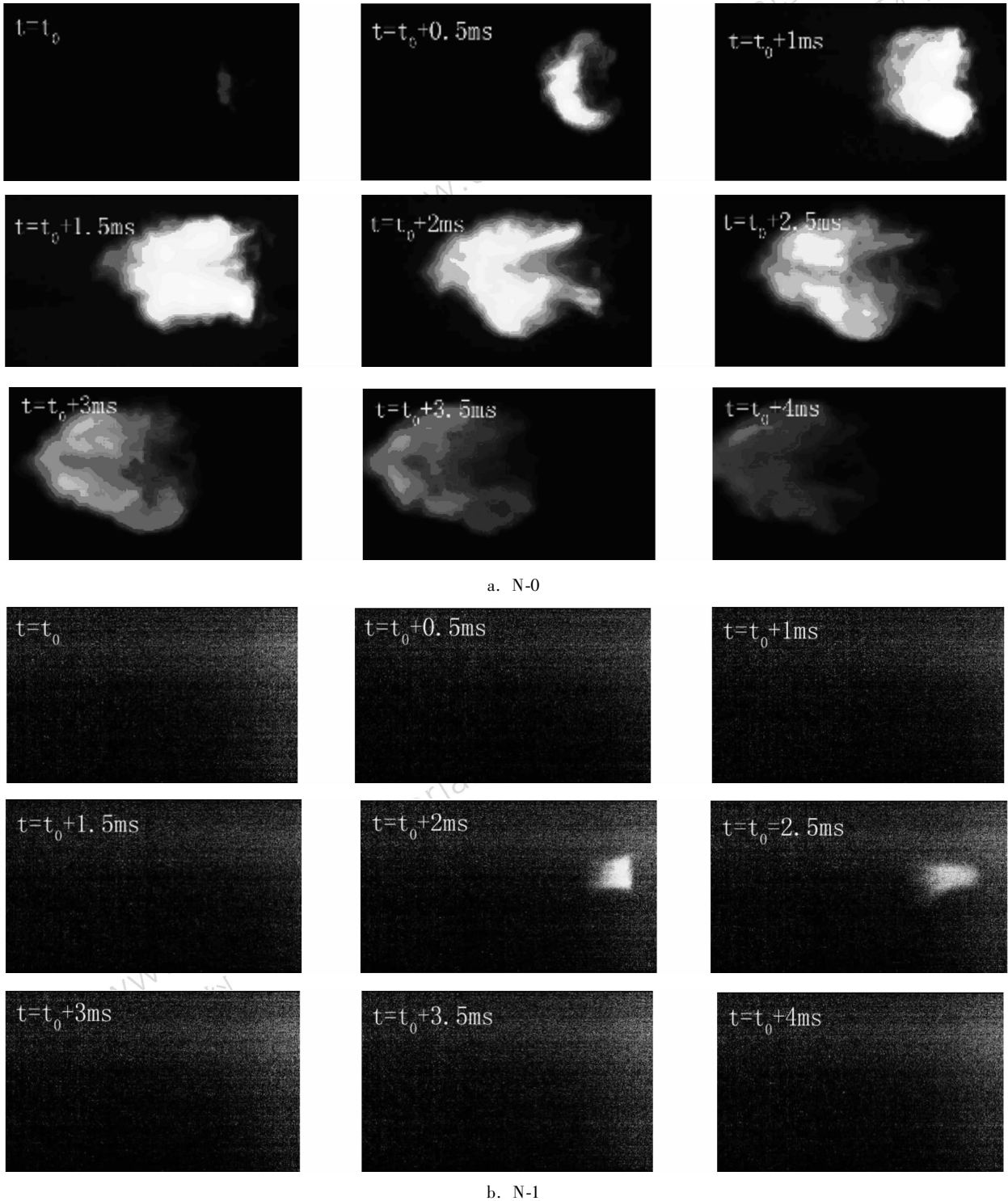


图 6 两种配方枪弹模拟实验枪口焰照片  
Fig. 6 Muzzle flash photographs of gun charge cartridge tests

表6 可燃药筒枪弹模拟试验燃烧烟雾对比

Table 6 Comparison of smoke of combustible cartridge cases in gun charge cartridge tests

charge	visible light transmittance/%					average value
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	
N-0(96/4)	26.5	23.7	35.3	28.5	29.4	28.68
N-1(96/4)	68.1	75.5	72.5	73.7	75.8	73.12

## 5 结论

在可燃药筒中加入一定比例的含能纤维能够有效提高可燃药筒的力学性能,同时含能纤维引入有利于药筒的点火,并提高药筒的能量,且随药筒中含能纤维含量的提高,药筒燃烧速度加快,燃尽时间缩短,使得可燃药筒燃尽性能得以改善。从枪弹模拟射击试验推论,含能纤维的引入还可以降低装药燃烧产生的固体残渣和可燃气体,减弱射击特性信号。

### 参考文献:

- [1] Beal K F, Schmidt W D. Combustible cartridge case and method of making same: US PATENT-2982211[P],1953.
- [2] Puri V P. Combustible cartridge cases: An account of the current technology and proposals for future development[R]. WSRL-0471R-TR,1986.
- [3] Remaly R F, Nusbaum M S, Johnson K G, et al. Duplex combustible cartridge case[R]. AD 1648666,1974.
- [4] Brabets R I. Combustible cartridge case characterization[R]. ADA 1406644,1984.
- [5] Simpson D C, Westley S, Moreira R. Variations in manufacturing processes 155 mm combustible cartridge case[R]. ADA 1318955,1983.
- [6] 王志军,尹建平. 弹药学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005. WANG Zhi-jun, YIN Jian-ping. Danyaoxue[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2005.
- [7] Peter L Deluca. Fibrillated polyacrylic fiber in combustible cartridge cases[J]. *Ind Eng Chem Prod Res*,1984,23: 438-441.
- [8] Syal R K, Sindker D V, Narr P S, et al. Hazard assessment for manufacture of combustible cartridge cases using picrite[J]. *Defence Science Journal*,1996,46(2): 71-75.
- [9] Kestusis G, Chesonis, Pauline M Smith, William S Lum. Investigation of residue and coating stoichiometry on 120 mm combustible cartridge case[R]. ARL-TR-2337,2000.
- [10] 刘涌. 自行反坦克炮战斗室失火原因分析及改进探讨[J]. 军械工程学院学报,2000,12(3): 9-11. LIU Yong. Reasons for chamber catching fire of self-propelled antitank gun and improvement on the weapon system[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*,2000,12(3): 9-11.
- [11] 徐文娟,张会生. 可燃药筒活性的分析[J]. 南京理工大学学报,1996,20(1): 21-25. XU Wen-juan, ZHANG Hui-sheng. An analysis on the activity of combustible cases[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*,1996,20(1): 21-25.

## Characterization of Combustible Cartridge Cases Enhanced by Novel Energetic Fibers

LI Yu<sup>1</sup>, GUO De-hui<sup>2</sup>, ZHAO Cheng-wen<sup>1</sup>, ZHOU Wei-liang<sup>1</sup>, XU Fu-ming<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Xi'an North Huian Chemical Co. Ltd, Xi'an 710302, China)

**Abstract:** In order to improve mechanical properties and combustion performance simultaneously, novel combustible cartridge cases were manufactured by adding energetic fibers as reinforcement component. The mechanical properties were characterized by compression and tensile strength, and combustion performance was evaluated by closed-bomb and gun charge cartridge tests. Results show that these novel combustible cartridge cases have good mechanical properties, and combustion performance is also improved. With increasing of the energetic fibers content, the ignition time and burning-off time are shrunk more and more, and the burning rate and impetus of the case are increased gradually. Compared with the original ones, fewer solid residues and combustible gas are found in gun charge cartridge tests, which means adding energetic fibers could decrease the shooting features.

**Key words:** materials; combustible cartridge case; energetic fiber; mechanical property; combustion performance