

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.027

## 小口径可燃药筒与发射药匹配性研究

苏精明<sup>1</sup>, 王满林<sup>2</sup>, 霍永清<sup>1</sup>, 陈一进<sup>1</sup>, 刘羽平<sup>1</sup>, 王国强<sup>3</sup>

(1. 重庆嘉陵特种装备有限公司弹药技术中心, 重庆 400032; 2. 海装广州局, 广州 510000;  
3. 中北大学机电学院, 太原 030051)

**摘要:** 采用密闭爆发容器试验的方式, 研究不同配方的可燃药筒和不同配比混合装药的燃烧性能, 并通过内弹道性能试验研究不同发射药与可燃药筒占比下的内弹道性能及其燃尽性。试验结果表明: 合适比例的含能纤维能提高药筒的燃速和力学性能, 采用 3/7-单作为主装药与可燃药筒配合能有效提高内弹道性能和燃尽性, 可提高内弹道模型的准确性。

**关键词:** 可燃药筒; 燃速规律; 弹道性能; 混合装药

**中图分类号:** TJ6 **文献标志码:** A

## Study on Matching of Small Caliber Combustible Cartridge and Propellant

Su Jingming<sup>1</sup>, Wang Manlin<sup>2</sup>, Huo Yongqing<sup>1</sup>, Chen Yijin<sup>1</sup>, Liu Yuping<sup>1</sup>, Wang Guoqiang<sup>3</sup>

(1. *Ammunition Technology Center, Chongqing Jialing Special Equipment Co., Ltd., Chongqing 400032, China;*  
2. *Guangzhou Military Representation Bureau of Naval Equipment Department, Guangzhou 510000, China;*  
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

**Abstract:** The combustion performance of combustible cartridges with different formulations and mixed charges with different proportions is studied by means of closed explosion container test, and the interior ballistic performance and burnout performance under different propellant and combustible cartridge case proportions are studied by means of interior ballistic performance test. The test results show that the appropriate proportion of energetic fiber can improve the burning rate and mechanical properties of the cartridge case, and the combination of 3/7-single as the main charge with the combustible cartridge case can effectively improve the internal ballistic performance and burnout, and can improve the accuracy of the internal ballistic model.

**Keywords:** combustible cartridge; combustion rate; ballistic performance; mixed charge

### 0 引言

可燃药筒是一种含能的多孔复合材料, 孔隙分布不完全一致, 规律性不强, 呈现出渗透性燃烧的特点, 具有特殊的燃烧性。目前, 对于可燃药筒的燃烧性, 尚无普遍适用的燃烧规律<sup>[1-3]</sup>。同时, 可燃药筒在内弹道过程中与发射药的共同燃烧, 由于可燃药筒的特殊结构和组分、储存情况导致燃烧速度慢、燃烧后残渣多<sup>[4]</sup>, 对弹丸发射和内弹道性能产生较大影响; 因此, 开展可燃药筒及其装药配比的燃烧规律研究, 以期能为可燃药筒设计和内装药的燃烧规律及弹道性能的研究奠定基础。

小口径可燃药筒要求可燃药筒燃烧速度更快, 药筒强度更高, 且发射后无残留。在可燃药筒方面, 目前已经取得了一些研究成果。邹伟伟等<sup>[3]</sup>通过添加含能纤维有效提高了药筒装药的弹道性能。田书春和李煜等<sup>[5-6]</sup>通过含能纤维部分替代硝化棉或木质纤维素, 发现均可使可燃药筒的力学性能和燃烧

性能得到改善, 其展现出的性能正是小口径弹药所需的。

笔者以不同含能纤维替换参比配方案中硫酸盐木浆纸, 制备含能纤维 NGEC 比例不同配方的可燃药筒, 研究掺杂一定比例含能纤维的小口径可燃药筒燃烧性能。采用密闭爆发器实验<sup>[7-10]</sup>获得压力时间曲线、活性和燃气生成规律, 以表征可燃药筒燃烧特性参数。同时, 采用弹道枪对不同配方可燃药筒与同种主装药、不同类型主装药与同一配方可燃药筒开展实弹射击试验, 分析混合装药的内弹道性能及其燃尽性。最后, 对效果最好的可燃药筒的燃速规律进行研究, 用于修正内弹道数学模型, 提高模型的准确性。

### 1 实验

#### 1.1 试样制备

试验所用到的主要原材料有硝化棉、硫酸盐木

收稿日期: 2022-08-14; 修回日期: 2022-09-25

作者简介: 苏精明(1984—), 男, 湖北人, 高级工程师, 从事轻武器弹药研究。E-mail: Sujingming2003@163.com。

浆纸、粘接剂、自制含能纤维及分散成型助剂。用上述原材料制备 3 种配方的 12.7 mm 口径可燃药筒，具体配方如表 1 所示。

表 1 可燃药筒制备配方 %

组成	$N_1$	$N_2$	$N_3$
硝化棉含量	63.0	63.0	63.0
硫酸盐木浆纸含量	23.5	20.5	10.5
粘接剂含量	12.0	12.0	12.0
安定剂含量	1.5	1.5	1.5
含能纤维含量	0	5.0	15.0

表中： $N_1$  为参比配方； $N_2$ 、 $N_3$  分别为以质量百分比 5% 和 15% 的含能纤维替代参比配方中的硫酸木浆纸。试验样品及相关器材如图 1 所示。



图 1 可燃药筒样品、香烟感度测试仪和马弗炉

### 1.2 实验方法与条件

燃烧性能实验方法：以密闭爆发器为能量测试手段，其容积为 100 mL，测压传感器测量压力，测试温度为  $20 \pm 2$  °C。2 号硝化棉点火药，点火药量为 1 g，药筒尺寸为 35 mm×10 mm×2 mm。测试方法按照 GJB5472.9—2005 对可燃药筒与发射药筒混合组成的装药，以 0.12、0.2 g/cm<sup>3</sup> 2 种装填密度进行实验，每个装填密度实验 3 发。

内弹道性能实验方法：集成弹药在  $20 \pm 1$  °C 温度条件下保温 6 h，采用测压弹道枪固定射击，压电传感器测试膛压、天幕靶测试弹丸速度，射击完成后通过内窥镜观察各组弹药击发后的膛内残留。

### 1.3 实验安排

#### 1.3.1 不同配方药筒燃烧性能研究

将按 3 种配方制得的可燃药筒分别取 3 次样进行密闭爆发器实验，得到不同配方可燃药筒的燃烧性能。实验测得的定容燃烧结束时间  $t_k$  如表 2 所示。

表 2 可燃药筒密闭爆发器燃烧结束时间 ms

配方	$t_k$			平均值
	1	2	3	
$N_1$	3.67	3.72	3.48	3.62
$N_2$	2.46	2.29	2.37	2.37
$N_3$	0.99	1.01	1.02	1.01

分析上表的数据可知， $N_2$  配方燃烧结束平均时长与参比配方燃烧平均时长短 1.25 ms， $N_3$  配方燃烧结束平均时长与参比配方燃烧平均时长短

2.61 ms。结果表明，随着含能纤维占比增加，其燃烧时间缩短。

得到不同配方可燃药筒下的  $p-t$ 、 $dp/dt-t$ 、 $L-B$  曲线如图 2—4 所示。

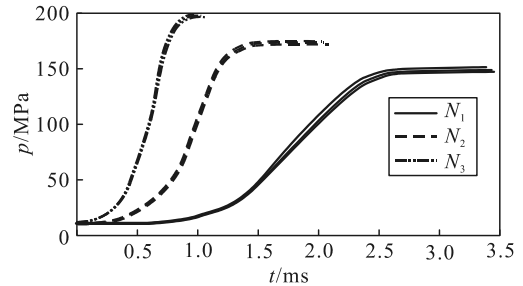


图 2 可燃药筒密闭爆发器  $p-t$  曲线

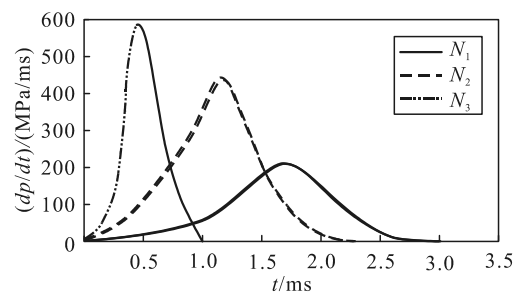


图 3 可燃药筒  $dp/dt-t$  对比曲线

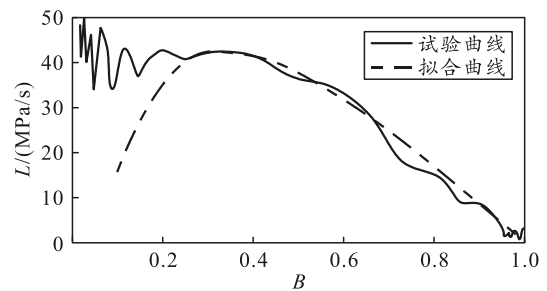


图 4 可燃药筒  $L-B$  拟合曲线

从图 2 可分析出，与参比配方  $N_1$  相比， $N_2$  与  $N_3$  配方药筒燃烧速度加快，最大压力提高，燃烧结束时间明显缩短。从图 3 可分析出，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，时间缩短，有助于药筒的燃尽性。图 4 为可燃药筒  $N_3$  的  $L-B$  拟合曲线。消除点火药的影响，仅考虑  $B$  在 0.1 以后的动态活性变化规律，最终得到 3 种可燃药筒的  $L-B$  对比曲线如图 5 所示。

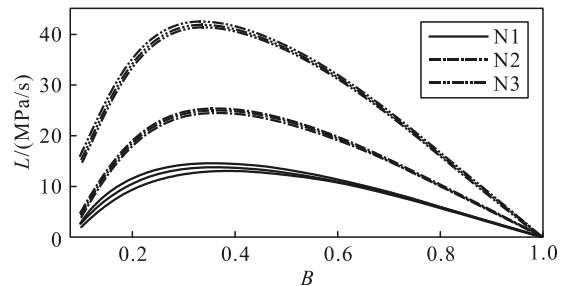


图 5 可燃药筒  $L-B$  对比曲线

实验测得 3 种配方的小口径可燃药筒火药力  $f$ 、余容  $a$  如表 3 所示。 $p_{m1}$ 、 $p_{m2}$  分别是装填密度为 0.12 和 0.20 g/cm<sup>3</sup> 条件下测得最大压力(减去点火压力 10 MPa)数值。分析表中数据可知, 含能纤维使药筒的火药力得以提高。与参比配方  $N_1$  相比较,  $N_2$ 、 $N_3$  配方的火药力分别提高了 13.7% 和 32.8%。

表 3 可燃药筒密闭爆发器实验测得的火药力、余容



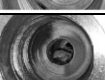

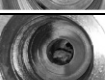

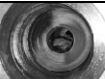
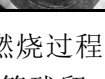
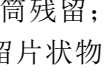
配方	$p_{m1}/\text{MPa}$	$p_{m2}/\text{MPa}$	$f/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$a/(\text{L}\cdot\text{kg}^{-1})$
$N_1$	80.3	152.4	581.6	1.18
$N_2$	92.5	175.5	661.4	1.23
$N_3$	107.2	206.8	772.3	1.26

### 1.3.2 弹道试验

#### 1) 不同配方药筒与发射药弹道试验。

采用弹道枪对不同配方可燃药筒和 ZT-14 发射药进行内弹道性能试验, 混合装药各试验 3 发, 得到不同可燃药筒配方内弹道试验结果如表 4 所示。

表 4 不同药筒配方内弹道试验结果

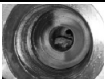
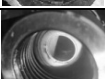
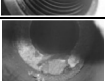
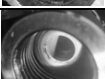
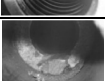

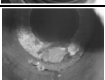
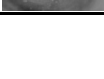

编号	药筒类型	初速/(m/s)	测压点压力/MPa	膛内情况	残渣
1	$N_1$	920.2	285.3		药筒未燃完
2		902.4	261.5		药筒未燃完
3		944.7	298.2		药筒未燃完
4	$N_2$	985.3	344.1		残留片状物
5		1 006.6	367.2		药筒碎粒
6		986.1	352.3		药筒碎粒
7	$N_3$	1 142	445.1		粉末颗粒、碎粒
8		1 109	409.2		粉末颗粒、碎粒
9		1 119	421.3		粉末颗粒、碎粒

分析上表可知: 在膛内燃烧过程中, 药筒配方  $N_1$  存在大面积未燃完可燃药筒残留; 药筒配方  $N_2$  出现大量药筒碎粒和部分残留片状物; 药筒配方  $N_3$  仅出现粉末碎粒。由此可见, 含能纤维可以达到提高药筒的能量、改善药筒燃烧性能的目的。同时提高了药筒装药的內弹道性能, 膛压和初速都有相对明显的提高。

#### 2) 不同配方药筒与发射药弹道试验。

采用弹道枪对 3 种发射药组成的混合装药的弹药进行内弹道试验, 实验结果如表 5 所示。

表 5 小口径发射系统不同发射药内弹道试验结果

编号	发射药类型	初速/(m/s)	测压点压力/MPa	膛内情况	残渣
1	ZT-14	1 142	445.1		粉末碎粒
2		1 109	409.2		粉末碎粒
3		1 119	421.3		粉末碎粒
4	3/7	999	375.1		无残留
5		995	377.7		无残留
6		1 001	382.1		无残留
7	SBe-17	885	254.3		残留片状物
8		853	265.6		残留片状物
9		891	300.2		残留片状物

分析上表可知, 采用 3/7-单作为主装药, 可燃药筒选取  $N_3$  配方, 射击后膛内无残留, 燃烧充分, 效果最好, 其余匹配方案射击后均有残留物。得到 3/7-单作为主装药, 可燃药筒选取  $N_3$  配方的内弹道性能参数如表 6 所示, 分析可知其内弹道性能也较好。

表 6 内弹道性能参数

发射药类型	平均初速/(m/s)	初速跳差/(m/s)	平均膛压/MPa	膛压跳差/MPa
ZT-14	1 123.3	33	425.5	36
3/7	998.3	6	378.3	7

## 2 燃烧规律

可燃药筒由于内部结构疏松多孔, 可燃药筒的不均质性, 厚度难于准确确定, 故采用药筒的相对重量燃速。其表达式为:

$$u = d\psi/dt. \tag{1}$$

式中  $d\psi/dt$  为药筒燃气生成速率, 以压力为自变量, 则其燃速方程为:

$$u = d\psi/dt = f(p). \tag{2}$$

其试验燃速曲线如图 6 所示。

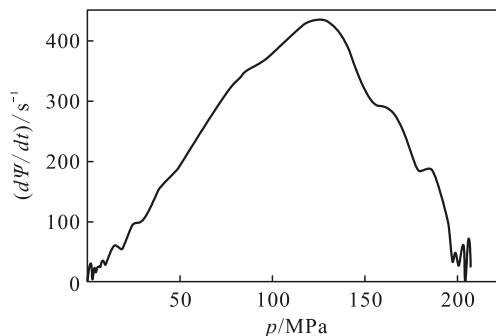


图 6 可燃药筒试验燃速曲线

考虑到整段曲线前后特征不一致, 对试验曲线进行分段拟合的处理方式, 选取燃气生成速率最大点作为分界点, 即  $p \leq 123$  MPa 时为燃气生成速率上升阶段,  $p > 123$  MPa 时为燃气生成速率下降阶段, 将试验曲线分为 2 段, 采用三项式拟合 2 段曲线, 其拟合曲线如图 7 所示。

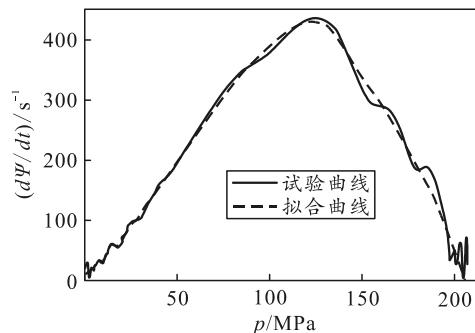


图 7 可燃药筒实验及拟合燃速曲线

可燃药筒燃速拟合公式如下:

$$\frac{d\psi}{dt} = \begin{cases} 5.23p(1+0.0035p-0.000051p^2) & p \leq 123 \text{ MPa} \\ 5.23p(1+0.0075p-0.000019p^2) & p > 123 \text{ MPa} \end{cases}$$

### 3 结论

笔者以不同含能纤维替换参比配方案中硫酸盐木浆纸,通过抽滤压模工艺制备含能纤维 NGEC 百分比例分别为 0、5、15 的 3 种不同配方的可燃药筒,通过实验分析了含能纤维对小口径可燃药筒燃烧性能的影响。同时,采用弹道枪对不同配方可燃药筒与同种主装药、不同类型主装药与同一配方可燃药筒开展实弹射击试验,根据试验结果分析了药筒与主装药组成的混合装药的弹道性能及其燃尽性,得到如下结论:

1) 随着含能纤维比例的增加,药筒能量及其燃速增大,起到了改善药筒燃烧性能的作用,使得燃烧结束时间缩短,提高了药筒的燃尽性。

2) 不同配方可燃药筒与同种主装药、不同类型主装药与同一配方可燃药筒的弹道试验结果表明,含能纤维的增加能够改善药筒的燃尽性,同时,提高混合装药的弹道射击性能。当主装药火药力基本保持相当时,可燃药筒与燃速较高的主装药匹配时,则装药燃速快,药筒燃烧完全,能量释放充

分,同时改善了药筒装药的弹道性能,使药筒燃烧更加充分。

### 参考文献:

[1] 李煜,赵成文,郭德惠,等.可燃药筒的定容燃烧特性[J].火炸药学报,2009,32(4):75-79.

[2] 邹伟伟,郝晓琴,张志勇,等.小口径可燃药筒及装药的燃烧性能研究[J].兵工学报,2015,36(8):1423-1429.

[3] 邹伟伟,郝晓琴,张志勇,等.小口径模压可燃药筒的结构与性能[J].火炸药学报,2015,38(4):80-85.

[4] 乔丽洁,堵平,廖昕,等.可燃药筒对模块装药燃烧残渣的影响[J].兵工学报,2011,32(10):1250-1254.

[5] 田书春,胡义文,李忠山,等.PMMA树脂降速剂对K树脂基可燃药筒结构和燃烧性能的影响[J].南京理工大学学报,2018,42(2):243-248.

[6] 李煜,郭德惠,田书春,等.纤维增强组份对可燃药筒性能的影响[J].弹道学报,2009,21(4):95-98.

[7] 李煜,郭德惠,赵成文,等.新型含能纤维可燃药筒性能研究[J].含能材料,2009,17(3):334-338.

[8] 刘静,余永刚,严小林.可燃药筒材料高压燃烧性能的测量与计算[J].弹道学报,2017,29(2):54-57.

[9] 李煜,赵成文,郭德惠,等.可燃药筒的定容燃烧特性[J].火炸药学报,2009,32(4):75-79.

[10] 张会生,徐文娟.可燃药筒实际燃烧速度的研究[J].弹道学报,1996(4):28-31.

\*\*\*\*\*

(上接第 124 页)

2) 通过观察试验监控录像及试验结束后的试验件残骸,未涂覆隔热材料的试验件反应类型为剧烈的爆燃反应,涂覆隔热材料后的反应类型为燃烧反应,涂覆隔热材料可降低炸药的反应类型。

3) 试验结果表明,将隔热材料应用于超声速武器战斗部中可大大提高其隔热安全性。

### 参考文献:

[1] 吴江.飞航导弹热防护技术发展趋势[J].强度与环境,2009,36(1):57-63.

[2] 刘海鑫,徐戈,丁尚宗.导弹弹头防热技术初探[J].复合材料,2008(S1):69-72.

[3] 李俊宁,胡子君,孙陈诚,等.高超声速飞行器隔热材

料技术研究进展[J].宇航材料工艺,2011,41(6):10-13.

[4] 夏成,董可海,赖帅光,等.基于外隔热的固发烤燃安全性综述[J].兵工自动化,2020,39(12):12-16.

[5] Pajonk Gm.Transparent silica aerogels[J].J Non-cryst Solids,1998,225:307.

[6] 赵南,冯坚,姜勇刚,等.耐高温气凝胶隔热材料[J].宇航材料工艺,2010(5):10.

[7] 陈晓红,胡子君,宋怀河,等.SiO<sub>2</sub>气凝胶常压干燥工艺与隔热应用进展[J].宇航材料工艺,2010(6):10.

[8] Zhu H,Sankar B V.Analysis of sandwich TPS panel with functionally graded foam core by Galerkin method[J].Compo s-ite Structures,2007,77:280.

[9] 叶丹丹,文庆珍,王晓晴.空心玻璃微珠/硅橡胶隔热材料的研究[J].弹性体,2017(2):24-28.