

文章编号: 1006-9941(2015)11-1073-06

# 颗粒固结发射药作随行装药的应用研究

梁泰鑫, 肖忠良, 吕秉峰, 马忠亮, 代淑兰

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 将颗粒固结发射药应用于随行装药技术, 提出了一种新的随行装药方案。通过密闭爆发器与 30 mm 弹道炮试验, 对该随行装药的点火延迟时间、力学强度、燃速和燃烧性能的稳定性进行了研究。结果表明, 依托随行装药高力学强度, 延迟机构可对随行装药点火延迟时间进行控制。初步验证了该随行装药的燃烧性能基本稳定。增加延迟机构的厚度、乙基纤维素( EC )含量, 均可使随行装药点火延迟时间延长。增加随行装药的粘结剂含量、压制密度, 均可使其力学强度增加、燃气释放速率降低。随行装药具有较高的燃速, 粘结剂含量 5%、压制密度  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 随行装药燃速最大值是 6/7 发射药的 46 倍。主装药量 113 g、延迟机构厚 0.4 mm 时, 在最大膛压基本不变的情况下, 随行装药在内弹道试验中的初速较标准弹丸初速增加  $73.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 增幅约 8%。

**关键词:** 随行装药; 固结; 点火延迟; 发射药; 燃烧性能; 增加初速

**中图分类号:** TJ55; TQ562

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.007

## 1 引言

初速是身管武器性能的一个重要指标, 提高初速是武器发展的核心任务之一。就常规火炮而言, 一般采用增加发射药量与弹丸质量比 ( $\omega/m$ ) 的方法提高初速, 由于膛底到弹底间的压力梯度是  $\omega/m$  的强函数, 所以随着  $\omega/m$  值的增加, 压力梯度越明显, 而弹底压力的提升却相对较小, 不利于弹丸初速的再提高<sup>[1-2]</sup>。在这种背景下, 随行装药技术应运而生, 其基本设想是在弹底部携带一定量的发射装药, 并使之随弹丸一起运动。随行装药在膛内适时点燃, 对弹底“空穴”区进行冲压, 实现最大膛压不变, 弹丸初速大幅提高的目标<sup>[3-5]</sup>。

Oberle<sup>[6]</sup>、Tompkins<sup>[7]</sup> 等将高燃速火药作随行装药进行了内弹道试验, 并对其发射过程进行了模拟, 研究了随行装药的延迟机构、随行装药与主装药的质量配比等问题。Michel<sup>[8]</sup> 等将稳态爆燃技术引入随行装药中, 通过内弹道试验对该方案的可行性进行了分析。杨京广<sup>[9-10]</sup> 等在弹后固连一个随行药室, 药室内

装入单基 4/7 和 3/1 发射药, 药室后部安装延迟机构和后螺盖, 在 30 mm 火炮上进行了射击试验, 实现了随行装药原理。Liu<sup>[11]</sup> 等将包覆阻燃发射药作随行装药, 采用可燃药筒携带的方式进行了内弹道试验, 实现了最大膛压不变而初速提高的目标。Ermolaev<sup>[12]</sup> 等将颗粒粘结压实药柱作随行装药, 采用粘结随行技术在 23 mm 滑膛实验炮上进行了射击试验, 实现了局部压力平台的弹道效果。上述文献均指出, 随行装药的点火延迟时间、燃烧性能的稳定性及高燃速是随行装药技术研究的关键问题。

颗粒固结发射药在随行装药中的应用研究还在探索阶段, 因此对其进一步的研究具有理论意义和实用价值。鉴于颗粒固结发射药具有高装填密度、高力学强度和燃烧性能稳定性较好等特点<sup>[13-18]</sup>, 本研究提出了一种新的随行装药方案: 将颗粒固结发射药成型于特制圆柱形钢桶内, 依托装药药柱的高力学强度, 在其端面安装延迟机构, 以期实现对装药点火延迟时间的控制, 并将其整体安装在与之匹配的弹尾腔体内。通过密闭爆发器和 30 mm 弹道炮试验, 对该随行装药的点火延迟时间、力学强度、燃速和燃烧性能的稳定性进行了研究。

## 2 试验部分

### 2.1 试样制备

以多孔单基小粒药多-125 发射药为基体药, 与一

收稿日期: 2015-02-09; 修回日期: 2015-04-27

基金项目: 国防预研基金(404060401)

作者简介: 梁泰鑫(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事新型发射药工艺与装药技术研究。e-mail: liangtx2006@126.com

通信联系人: 马忠亮(1967-), 男, 教授, 主要从事含能材料工艺及性能研究。e-mail: ma19960512@sohu.com

定比例的粘结剂(二缩三乙二醇二硝酸酯、双铅推进剂、2#硝化棉)预先混合;置于捏合机内捏合 30 min,使粘结剂对基体药粒表面进行充分浸润;在适当压力下成型于特制圆柱形钢桶内,该装药药柱的密度(以下称之为压制密度)可通过压力进行控制,且药柱成型后基体药与粘结剂均匀分布,药柱与钢体紧密结合、无缝隙;最后在装药端面安装延迟机构,完成了随行装药试样制备,其整体结构见图 1 所示。

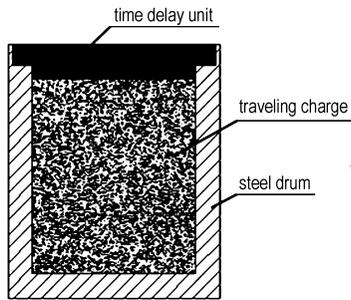


图 1 随行装药结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of traveling charge structure

图 1 中随行装药方案的延迟机构实质是一种缓燃材料,其材料均为可燃物质,与随行装药端面能有效粘合、可塑性强,若要对随行装药点火延迟时间的控制,需要随行装药有较高的力学强度,保证其在高压下结构完整,从而通过延迟机构的缓燃,实现随行装药的延迟点燃。

随行装药的力学强度,主要是通过粘结剂的含量与压制密度来控制。在随行装药中加入一定比例的粘结剂,不仅增加了基体药粒间的粘结力,同时填充药粒间缝隙,其目的是使压制的随行装药具有较高的力学

强度。

针对该随行装药结构,制式弹丸尾部设计了与之匹配的腔体结构。在弹道试验时,只需将其安装在弹尾腔体内即可。

## 2.2 密闭爆发器试验

为研究延迟机构的厚度、组分乙基纤维素(EC)含量对随行装药点火延迟时间的影响,随行装药的粘结剂含量、压制密度对其力学强度、燃气释放速率的影响,随行装药燃烧性能的稳定性,将 6/7 发射药与随行装药试样采用混装的方式进行 200 cm<sup>3</sup> 密闭爆发器试验,试验方案见表 1。试验条件:装填密度 0.2 g·cm<sup>-3</sup>;点火压力 10 MPa;压力传感精度 0.005 MPa;采样时间间隔 0.05 ms。为便于分析随行装药的点火延迟时间,需使随行装药在点燃前的 *p-t* 曲线与 6/7 发射药的 *p-t* 曲线重合,这就要求密闭爆发器试验时,装填密度 0.2 g·cm<sup>-3</sup> 不变。故在计算其装填密度时,随行装药试样占用的体积不可忽略。本次试验中所用随行装药试样的体积均为 17.5 cm<sup>3</sup>,在密闭爆发器容积中扣除该部分,计算得到 6/7 发射药的装药量应为 36.5 g。

为研究随行装药的燃速,进行了 100 cm<sup>3</sup> 密闭爆发器试验。试验条件:装填密度 0.2 g·cm<sup>-3</sup>;点火压力 10 MPa;压力传感精度 0.005 MPa;采样时间间隔 0.02 ms;在室温下进行实验。

## 2.3 弹道试验

弹道试验采用 30 mm 弹道炮,药室容积 140 cm<sup>3</sup>,弹丸行程长 2.4 m,标准弹丸质量 389 g,试验弹丸质量 322 g,点火药为 2 号小粒黑,铜柱测压法测试膛底最大压力。

表 1 随行装药试验方案

Table 1 Experimental schemes of traveling charge

sample	propellant 6/7 /g	traveling charge				time delay unit	
		dose/g	porous propellant 125 /%	binder /%	pressed density /g·cm <sup>-3</sup>	thickness/mm	content of EC /%
AC-0	40	none					
AC-1	36.5	12.5	92	8	1.5	1	10
AC-2	36.5	12.5	92	8	1.5	1.5	10
AC-3	36.5	12.5	92	8	1.5	2	10
AC-4	36.5	12.5	92	8	1.5	0.6	10
AC-5	36.5	12.5	92	8	1.5	0.6	20
AC-6	36.5	12.5	92	8	1.5	0.6	30
AC-7	36.5	11.7	95	5	1.4	0.4	7
AC-8	36.5	12.5	95	5	1.5	0.4	7
AC-9	36.5	11.7	92	8	1.4	0.4	7
AC-10	36.5	12.5	92	8	1.5	0.4	7

Note: EC is ethyl cellulose.

### 3 结果与分析

#### 3.1 延迟机构的厚度、EC 含量对随行装药点火延迟时间的影响

为研究延迟机构厚度对随行装药点火延迟时间的影响,选用延迟机构厚度不同的 3 个试样 AC-1、AC-2、AC-3 进行了密闭爆发器实验,得到了相应的  $p-t$  曲线,如图 2 所示。从图 2 可以看出,试样 AC-1、AC-2、AC-3 的  $p-t$  曲线均存在两个压力增长阶段。与试样 AC-0 的  $p-t$  曲线对比可知,第一个压力增长阶段为 6/7 发射药与延迟机构共同燃烧阶段,该阶段的压力增长主要由 6/7 发射药燃烧决定。在第一个压力增长阶段结束后,三条曲线均出现了“压力保持”阶段,该阶段为延迟机构的缓燃。说明在该装药条件下,延迟机构厚度  $\geq 1.0$  mm 时,可将随行装药点火延迟时间延长到 6/7 发射药燃完以后。经过一段时间的缓燃,延迟机构燃尽,进入第二个压力增长段,随行装药开始燃烧,并在燃烧结束时压力达到最大值。同时可以看出,试样 AC-1、AC-2、AC-3 的  $p-t$  曲线在不同时刻与试样 AC-0 的  $p-t$  曲线分离,分离时间即随行装药点火延迟时间分别为 57、59.7 ms 和 63 ms,较 6/7 发射药燃完的时间 56 ms,分别延迟了 1、3.7 ms 和 7 ms。说明在静态燃烧环境下,依托随行装药的高力学强度,延迟机构可实现对随行装药点火延迟时间进行有效控制。随着延迟机构厚度的增加,随行装药点火延迟时间延长。

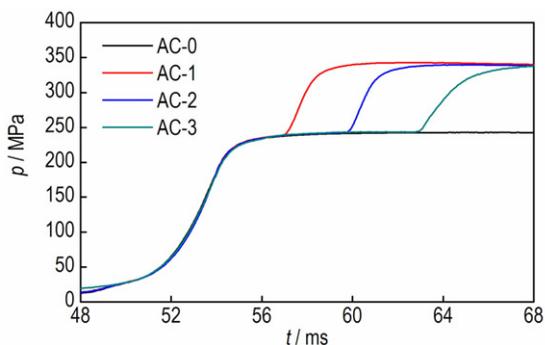


图 2 不同延迟机构厚度的随行装药试样  $p-t$  曲线

Fig. 2  $p-t$  curves of traveling charge samples with different time delay unit thickness

由于延迟机构组分中 EC 为主要阻燃物质,改变其含量,必然会对随行装药点火延迟时间产生影响。为此,选用 EC 含量不同的 3 个试样 AC-4、AC-5、AC-6 进行了密闭爆发器试验,得到了相应的  $p-t$  曲线,如图

3 所示。从图 3 可以看出,试样 AC-4、AC-5、AC-6 的  $p-t$  曲线在不同时刻与试样 AC-0 的  $p-t$  曲线分离,分离时间即随行装药点火延迟时间分别为 53.2、53.6 ms 和 53.9 ms。说明在延迟机构厚度一定的情况下,增加其组分 EC 的含量,可使延迟机构缓燃能力增强,从而使随行装药点火延迟时间延长。

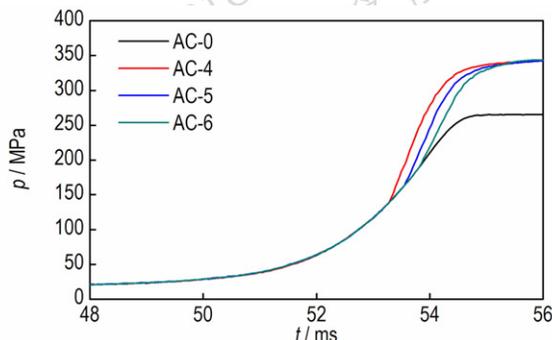


图 3 不同 EC 含量的随行装药试样  $p-t$  曲线

Fig. 3  $p-t$  curves of traveling charge samples with different EC content

#### 3.2 随行装药粘结剂含量、压制密度对其力学强度、燃气释放速率的影响

由于粘结剂的含量与压制密度可以影响随行装药的力学强度,且在一定程度上影响其燃气释放速率。为此,选用粘结剂含量、压制密度不同的 4 个试样 AC-7、AC-8、AC-9、AC-10 进行了密闭爆发器试验,得到了相应的  $p-t$  曲线,见图 4 所示。从图 4 可以看出,在 52.5 ~ 56 ms 内,对应时刻下试样 AC-7 的  $p-t$  曲线要高于试样 AC-8 的  $p-t$  曲线,试样 AC-9 的  $p-t$  曲线要高于试样 AC-10 的  $p-t$  曲线。说明随着压制密度的增加,提高了随行装药的力学强度,降低了随行装药的燃气释放速率。同时可以看出,在 52.5 ~ 56 ms 内,试样 AC-7 与 AC-9 的  $p-t$  曲线相比较,试样 AC-9 的  $p-t$  曲线陡

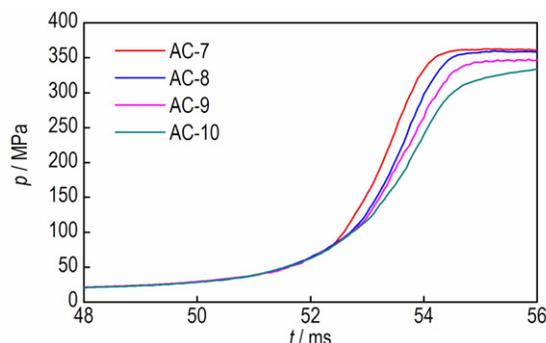


图 4 不同粘结剂含量、压制密度的随行装药试样  $p-t$  曲线

Fig. 4  $p-t$  curves of traveling charge samples with different binder content and pressed density

度较小,试样 AC-8 与 AC-10 的  $p-t$  曲线相比较,试样 AC-10 的  $p-t$  曲线陡度较小。说明随着粘结剂含量的增加,提高了随行装药的力学强度,降低了随行装药的燃气释放速率。通过以上分析可知,增加随行装药的压制密度和粘结剂含量,均可使其力学强度增加、燃气释放速率降低。这是由于针对该随行装药方案,增加粘结剂含量,可提高多-125 发射药粒间的粘结能力,增加压制密度,可提高随行装药的密实性,从而提高了随行装药的力学强度,控制其解体过程,使随行装药的燃气释放速率降低。

### 3.3 随行装药燃烧性能的稳定性

对试样 AC-8 进行了平行试验,测试了随行装药燃烧性能的稳定性,得到了相应的动态活度曲线 ( $L-B$ ),见图 5 所示。从图 5 可以看出,三次试验曲线始终具有较好的重合度。以相对压力 0.4 (随行装药开始燃烧) 处为界,三条曲线呈现出阶梯上升。在相对压力 0.4 处,三条曲线基本重合,说明在相同装药条件下,依托随行装药的高力学强度,延迟机构对随行装药点火延迟时间的控制,具有良好的稳定性;相对压力 0.4 ~ 1,为主装药与随行装药共同燃烧阶段,该阶段三条曲线基本重合,说明在相同装药条件下,随行装药的燃烧性能基本稳定。因此在静态燃烧条件下,该随行装药整体的燃烧性能基本稳定。

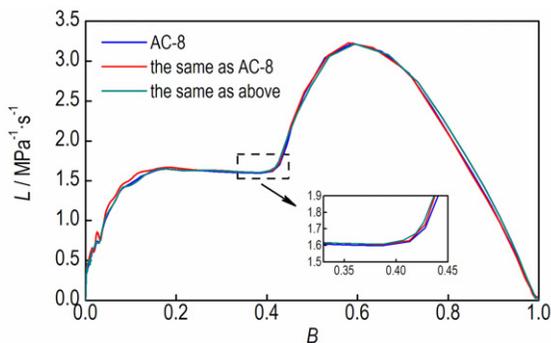


图 5 随行装药重复性试验  $L-B$  曲线

Fig. 5  $L-B$  curves of traveling charge in repeated experiments

### 3.4 随行装药的燃速

为研究随行装药的燃速,压制了直径 19 mm、高 26 mm,粘结剂含量 5%,压制密度  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,质量为 10 g 的随行装药药柱。在无钢体及延迟机构的情况下,对其进行了  $100 \text{ cm}^3$  密闭爆发器试验,试验时随行装药的装药量 20 g。为对比说明该随行装药具有较高的燃速,对 6/7 发射药也进行了试验,装药量 20 g。对试验得到的  $p-t$  曲线进行处理,得到了其在

不同压力下的燃速值,见图 6 所示。从图 6 可以看出,在相应压力下随行装药的燃速值均大于 6/7 发射药的燃速值,随行装药与 6/7 发射药的燃速最大值分别为  $4130.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $89.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,随行装药燃速最大值是 6/7 发射药的 46 倍。说明随行装药具有较高的燃速。

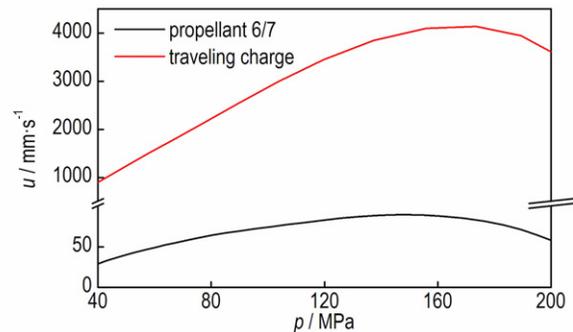


图 6 随行装药和 6/7 发射药的  $u-p$  曲线

Fig. 6  $u-p$  curves of traveling charge and propellant 6/7

### 3.5 内弹道试验结果

将试样 AC-8 安装在试验弹丸尾部腔体内,为防止高压气体对延迟机构的冲击而造成的整体结构的变形、失效,在弹尾加盖了 0.2 mm 厚的硝化纤维塑料片,总弹重为 389 g。主装药为 6/7 发射药,在装药量 113 g、117.5 g 的情况下,对随行装药试样 AC-8 进行 30 mm 弹道炮试验,并于标准弹丸的试验进行了对比,结果见表 2。

表 2 随行装药内弹道试验结果

Table 2 Results of interior ballistic experiment for traveling charge

No.	main charge/g	$p_m$ /MPa	$v_0$ /m · s <sup>-1</sup>
standard	113	279.8	909.7
projectile	117.5	307.9	956.5
1	113	276.1	980.8
2	113	286.7	975
3	113	282.4	989.6
4	113	274.4	986.2
5	117.5	342.1	1021
6	117.5	332.9	1017.6

Note:  $p_m$  is the maximum chamber pressure,  $v_0$  is the muzzle velocity.

从表 2 可以看出,主装药量 113 g 时,对试样 AC-8 的 4 次内弹道试验(1、2、3、4)的最大膛压( $p_m$ )与标准弹丸的  $p_m$  相当,而初速( $v_0$ )有较大的提升。说明在该装药条件下,延迟机构厚 0.4 mm,可将随行装

药点火延迟时间延长在  $p_m$  以后, 获得较佳的点火延迟时间,  $v_0$  显著提升。可见在动态燃烧环境下, 依托随行装药的高力学强度, 延迟机构可实现对随行装药点火延迟时间进行有效控制。4 次内弹道试验的平均初速约  $983 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与标准弹丸  $v_0 909.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  相比,  $v_0$  增加  $73.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 增幅约 8%。主装药量 117.5 g 时, 对试样 AC-8 的 2 次内弹道试验 (5、6) 的  $p_m$  与标准弹丸的  $p_m$  相比相对较高, 说明随行装药在  $p_m$  以前已开始燃烧。可见在该装药条件下, 若要实现随行装药在  $p_m$  后点燃, 延迟机构厚度应  $>0.4 \text{ mm}$ , 还需作进一步的试验探索。

从表 2 同时可以看出, 主装药量 113 g 时, 4 次内弹道试验 (1、2、3、4) 的试验结果基本稳定, 初步验证了该随行装药, 在动态燃烧条件下燃烧性能基本稳定。在试验中, 通过高速摄影仪对弹丸出炮口后的情况进行了观察, 该组试验均未发现有弹尾光, 说明随行装药在膛内已燃烧完全。

## 4 结 论

(1) 密闭爆发器与内弹道试验均表明: 依托随行装药高力学强度, 延迟机构可对随行装药点火延迟时间进行控制; 初步验证了该随行装药的燃烧性能基本稳定。

(2) 增加延迟机构的厚度、组分 EC 含量, 均可使随行装药点火延迟时间延长。增加随行装药的粘结剂含量、压制密度, 均可使随行装药的力学强度增加、燃气释放速率降低。

(3) 该随行装药具有较高的燃速, 粘结剂含量 5%、压制密度  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 其燃速最大值是 6/7 发射药的 46 倍。

(4) 主装药量 113 g、延迟机构厚  $0.4 \text{ mm}$ , 在最大膛压基本不变的情况下, 随行装药在内弹道试验中的初速较标准弹丸初速增加  $73.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 增幅约 8%。

### 参考文献:

[1] 萧忠良. 提高火炮初速(动能)技术途径与潜力分析[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(4): 277-280.  
XIAO Zhong-liang. The analysis of the technical way and potentiality on improving initial velocity of gun[J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2001, 22(4): 277-280.

[2] 王泽山, 何卫东, 徐复铭. 火药装药设计原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 249-258.  
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. Propellant Charge Design Principle and Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 249-258.

[3] 金志明. 高速推进内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 286-294.  
JIN Zhi-ming. High Speed Propulsion Internal Ballistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 286-294.

[4] 邹华, 陆欣, 周彦煌, 等. 一种提高炮射智能弹药初速的新型发射装药方案[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 834-839.  
ZOU Hua, LU Xin, ZHOU Yan-huang, et al. A new firing charge concept of increasing intelligent ammunition muzzle velocity[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 834-839.

[5] 邹华, 张领科, 周彦煌. 采用组合发射提高某型火炮初速的理论研究[J]. 火炸药学报, 2013, 36(2): 69-75.  
ZOU Hua, ZHANG Ling-ke, ZHOU Yan-huang. Theoretical study of increasing projectile initial velocity by using combined firing[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(2): 69-75.

[6] Oberle W F, Wren G P, Robbins F W, et al. Parameters for optimizing a traveling charge gun system[R]. ADA195666: 1988.

[7] Tompkins R E, White K J, Oberle W F, et al. Traveling charge gun firings using very high burning rate propellants [R]. ADA203307, 1988.

[8] Michel S, Dieter H. Application of stationary deflagration to traveling charge[C] // 14th International Symposium on Ballistics. Arlington, America: ADPA, 1993: 429-438.

[9] 杨京广, 余永刚. 随行装药方案提高大口徑火炮初速的数值预测[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(2): 161-165.  
YANG Jing-guang, YU Yong-gang. Velocity prediction of big caliber gun based on traveling charge scheme[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(2): 161-165.

[10] 杨京广, 余永刚. 固体随行装药内弹道模型及数值模拟[J]. 火炮发射与控制学报, 2006(2): 1-5.  
YANG Jing-guang, YU Yong-gang. Interior ballistic model and numerical simulation of solid traveling charge[J]. *Journal of Gun Launch and Control*, 2006(2): 1-5.

[11] Liu D Y, Zhao Z Y, Yu Y G, et al. Experiments on the combustion characteristics of deterrent-coated propellants and their application in traveling charge propulsion [J]. *Combust Science and Technology*, 2012, 184: 178-185.

[12] Ermolaev B S, Romankov A V, Sulimov A A, et al. Compacted modified propellant blocks as traveling charge in the hybrid shot scheme[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(6): 881-889.

[13] 姚月娟, 刘少武, 王琼林, 等. 颗粒模压发射药的燃烧性能[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 76-79.  
YAO Yue-juan, LIU Shao-wu, WANG Qiong-lin, et al. Burning performance of grain-molded propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(1): 76-79.

[14] 梁勇, 姚月娟, 杨建, 等. 颗粒密实模块药的弹道性能[J]. 火炸药学报, 2010, 33(3): 51-54.  
LIANG Yong, YAO Yue-juan, YANG Jian, et al. Ballistic performance of gun propellant grain compressed modular[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2010, 33(3): 51-54.

[15] 马忠亮, 夏萍, 贺增弟, 等. 胶黏固结发射药的燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 60-62.  
MA Zhong-liang, XIA Ping, HE Zeng-di, et al. Combustion properties of a glued consolidation gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(5): 60-62.

[16] 中国科学技术协会. 2012-2013 兵器科学技术学科发展报告(含

- 能材料)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014: 53-82.  
China Association for Science and Technology. Report on Advances in Ordnance Science and Technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2014: 53-82.
- [17] 肖正刚, 应三九, 徐复铭. 粘结压实药柱解体及渐增性燃烧性能的中止实验研究[J]. 弹道学报, 2013, 25(3): 70-74.  
XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, XU Fu-ming. Experimental studies of interrupted burning characteristics and deconsolidation performance of consolidated propellant charge [J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(3): 70-74.
- [18] 肖正刚, 应三九, 徐复铭. 粘结压实药柱变容燃烧中止实验研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(1): 1-5.  
XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, XU Fu-ming. Experimental studies on interrupted burning of consolidated propellant charges in semi-closed chamber with variable volume[J]. *Journal of Ballistics*, 2014, 26(1): 1-5.
- [19] 张相炎. 新概念火炮技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.  
ZHANG Xiang-yan. Introduction to new concept gun technique [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.

## Applied Study on the Grain Consolidation Propellant as Traveling Charge

LIANG Tai-xin, XIAO Zhong-liang, Lü Bing-feng, MA Zhong-liang, DAI Shu-lan

(School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** As the grain consolidation propellant charge was applied to traveling charge technique, a new traveling charge scheme was presented. The ignition delay time, mechanical strength, burning rate and stability of combustion performance for traveling charge were studied by the closed bomb and 30 mm ballistic gun test. The results show that the ignition delay time of traveling charge can be controlled by the time delay unit which relying on its high mechanical strength. The experiment results verify preliminarily that the combustion performance of traveling charge is basically stable. The increasing of the time delay unit thickness and ethyl cellulose (EC) content can make the ignition delay time of traveling charge prolong. The increasing of the binder content and pressed density can make the mechanical strength increase and combustion gas release rate decrease for traveling charge. The traveling charge has higher burning rate. When the binder content and the pressed density of traveling charge are 5% and  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , respectively, the maximum burning rate of traveling charge is 46 times as fast as 6/7 propellant. When the main charge dose and the time delay unit thickness are 113 g and 0.4 mm, respectively, the muzzle velocity in interior ballistic test increases by  $73.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  with an increase range of about 8%, compared with the standard projectile under the condition that the maximum chamber pressure does not change basically.

**Key words:** traveling charge; consolidation; ignition delay; gun propellant; combustion performance; muzzle velocity increment

**CLC number:** TJ55; TQ562

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.007