

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0030

中心点火火焰在药床中传播规律的试验研究*

薛绍,陶如意,王浩,程申申

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究中心点火管火焰在药床中的传播规律,设计了可视化模拟试验平台,开展了不同点火药量、不同装药结构的中心点传火试验。采用高速图像采集系统记录了中心点火管火焰在药床中的传播过程,采用瞬态压力记录仪记录膛内压力的时空变化。结果表明,点火药量为20 g时,出火时间为0.6 ms;点火药量为30 g时,出火时间为1.5 ms;杆状装药床的传火时间平均为2.2 ms,粒状装药床的传火时间平均为3.4 ms,而杆粒混装药床的传火时间为3.1 ms。可见,点火药量对药床出火时间影响显著,较大的点火药量导致药床出火时间延长;不同装药床结构传火性能差异较大,单一杆状装药床传火性能优于单一粒状装药和杆粒混装药床,并且粒状装药床易形成气体壅塞,膛内会出现明显的压力波动现象;根据火焰传播时序位置点,利用一阶指数衰减函数拟合建立了火焰传播过程数学模型,拟合优度大于0.98。

关键词: 内弹道;可视化平台;点传火;传火模型

中图分类号: O381

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Experimental research on the law of flame spreading in the charge bed of a central ignition tube

XUE Shao, TAO Ruyi, WANG Hao, CHENG Shenshen

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to investigate the development of flame spreading in the charge bed of a central ignition tube, a visualized ignition experiment platform was designed, and experiments were carried out with different ignition charge masses and charge structures. A high-speed image acquisition system was used to record the propagation process of ignition flame in the propellant bed at 10 000 frames per second, and a transient pressure recorder was used to obtain the variation of pressure with time and position in the chamber. In addition, a synchronous trigger was used to connect the high-speed image acquisition system, the transient pressure recorder and the ignition system of the experimental platform, giving the system a trigger zero point, which is convenient for the statistical analysis of subsequent experimental phenomena. The experimental results show that the time of flame-appearing from the ignition tube into the combustion chamber is 0.6 ms when the mass of the black powder is 20 g. However, the time increases to 1.5 ms when the mass of the black powder is 30 g. The average flame-spreading time of the stick charge structure is 2.2 ms, the average flame-spreading time of the granular charge structure is 3.4 ms, and the average flame-spreading time of the mixed charge structure is 3.1 ms. The results indicate that the mass of the black powder in an ignition tube has a significant effect on the time of flame-appearing from the ignition tube, and the higher black powder mass lead to the longer flame-appearing time. The performances of flame-spreading in different charge bed structures are quite different. The performance of flame-spreading in the stick charge structures is better than that in the granular charge structures and mixed charge structures. In addition, the pressure fluctuations will appear in the chamber due to gas choking in the granular charge structures. A mathematical model of the flame-spreading process was established by fitting the first-order exponential decay function according to the time sequence of the position of flame, and the goodness of fit is greater than 0.98.

Keywords: interior ballistic; visualization platform; ignition; mathematical model of the flame-spreading

* 收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-03-19

第一作者: 薛绍(1991—),男,博士研究生, xue18761686700@163.com

通信作者: 陶如意(1978—),女,博士,副教授, tao801801@163.com

炮弹火药床的点火和传火是内弹道过程中相当复杂的一个阶段,也是影响内弹道性能稳定的重要因素之一^[1-3]。主装药的引燃情况和力学结构与点火药燃烧产物在药床中的传播过程息息相关,主要表现在如下两个方面,即:主装药的点火一致性主要受点火药燃气的传播速度的影响,非均匀点火易造成膛内压力波动^[4-6];主装药的力学结构受点火压力的影响,大的点火冲击易造成发射药的破碎,这种情况对发射安全性是致命的^[7-9]。因此,研究点火能量在药床中的传播规律,对于精确的内弹道建模和发射安全性至关重要。

近年来,针对炮弹火药床的点火和传火过程的研究成果已有很多。王浩等^[10]利用光导纤维测量技术,对点火管内火焰的传播过程进行了研究,验证了火焰阵面落后于压力阵面传播的现象。王珊珊等^[11-12]建立了点火管和中心管双一维两相流模型,分析了点火管结构和点火药量对点传火的影响。韩博等^[13]设计了一种大口径火炮发射装药点传火模拟试验装置,用于监测点传火阶段膛内各物理参量,为大口径火炮装药点传火结构设计以及火炮射击试验初期的安全评估提供指导。程诚等^[14]对某大口径火炮内弹道膛内循环过程进行了二维两相流数值模拟,详细研究了火药床燃烧及弹丸推进过程中膛内流场特性。Miura 等^[15]和 Jang 等^[16]对粒状装药火炮内弹道膛内循环过程进行了三维数值模拟,模拟结果表明,颗粒药床的运动会引起压力波动,而压力波动的大小取决于点火管的孔径和孔间距。Jenaro 等^[17]利用小波分析方法研究了点火阶段膛内压力波问题。Jaramaz 等^[18]利用可视化玻璃纤维管点传火模拟试验装置,研究了底部点火条件下药床的点火和燃烧情况。Colletti 等^[19]利用惰性推进剂、光学探测器及 X 射线能量摄像仪等设备,对火炮点火系统中典型的点火器射流的侵彻特性进行了实验研究,并建立了点火器射流产物在粒状药床中的轴向和径向的穿透深度数学模型。以上研究着重于火药床的燃烧和流动过程,大多将发射药的燃烧同时考虑在点传火过程中,而对点火药燃烧产物在药床中的传播规律研究较少。现代火炮武器多以中大口径为主,点火系统多为底火加中心点火管的方式,装药结构也呈现多样化,因此开展对中心点火管点火药火焰在不同药床结构中的传播规律研究是十分必要的。

本文中,设计可视化点传火模拟试验系统,开展对不同点火药量、不同装药结构的中心点火管点传火试验,获得膛内火焰传播及压力变化过程,建立火焰传播数学模型。

1 模拟试验系统

模拟试验系统主要由模拟试验装置和多通道测试系统组成,模拟试验装置为火药的点传火及燃烧提供场所,采用透明材料制造的燃烧室有利于对火焰传播过程进行直观观察,多通道测试系统由高速图像采集系统、同步触发器和瞬态压力记录仪组成,在点火的同时测试记录燃烧室内的物理参数和现象,其工作流程如图 1 所示。

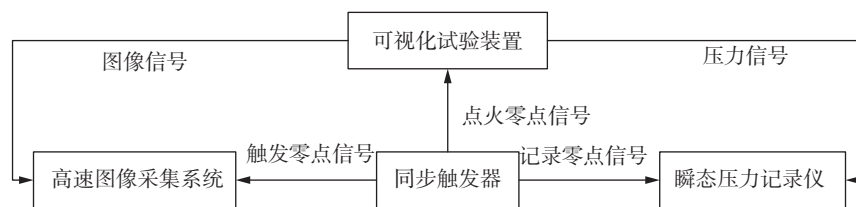


图 1 模拟试验系统流程图

Fig. 1 Flow chart of the simulation experimental system

1.1 可视化模拟试验装置

可视化模拟试验装置是研究点火火焰在药床内传播的一个关键设备,由点火系统、玻璃纤维管燃烧室、保护壳体、泄压系统等组成,如图 2 所示。图 2 中 $P_1 \sim P_3$ 为测压孔,这 3 个测压孔分别距离玻璃纤维管燃烧室左端 40.0、247.5、455.0 mm。

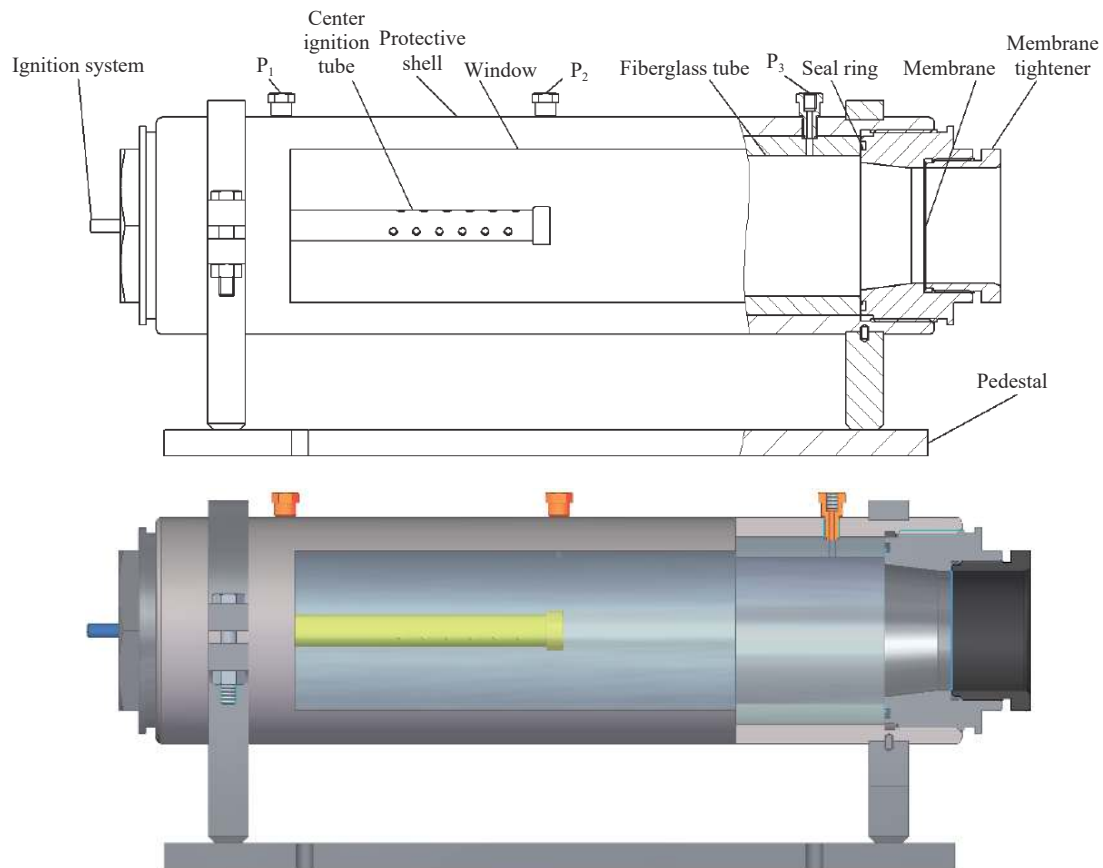


图 2 可视化模拟装置

Fig. 2 The visualization device for experimental investigation of propellant charge ignition

玻璃纤维管燃烧室长度为 495 mm, 直径为 110 mm, 容积为 $4.7 \times 10^6 \text{ mm}^3$, 该燃烧室为承压主体, 设计最高承压 30 MPa, 在其管壁上开有 3 个测压孔, 用于监测燃烧室内的压力变化。

点火系统为自密封结构, 采用电底火加中心点火管的点火结构, 可多次重复使用。点火管为金属材质, 在其壁面开有 3 列传火孔 (共 18 个), 如图 3 所示, 点火管全长 $a=250 \text{ mm}$, 首孔高度 $b=130 \text{ mm}$, 点火孔间距 $c=18 \text{ mm}$, 点火孔直径 $d=6 \text{ mm}$, 点火管内径 $D=19 \text{ mm}$ 。

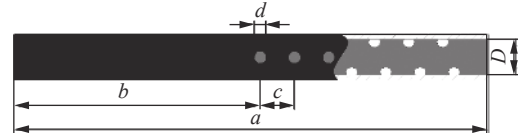


图 3 中心点火管结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the central ignition tube

保护壳体为钢结构, 为玻璃纤维管提供结构保护, 其两端分别安装点火系统和泄压系统, 在其正面开有长 400 mm、宽 120 mm 的矩形窗口, 通过窗口可直接观察记录玻璃纤维管燃烧室内火药燃烧和火焰传播情况。

泄压系统采用爆破膜泄压方式, 可进行 5 MPa 以下的不同破孔压力点传火试验。该泄压系统采用的膜片材料为 Al1070, 膜片厚度为 0.4 mm, 膜片直径为 100 mm, 破膜压力为 1.5 MPa。

1.2 多通道测试系统

多通道测试系统由德国工业设备公司 IABG 生产的 DEWE-2500 型瞬态压力记录仪、瑞士 KISTLER 公司生产的压电式压力传感器、同步触发器及高速图像采集系统组成, 现场布置如图 4 所示。同步触发器同时连接高速图像采集系统、瞬态压力记录仪及点火系统, 给予系统触发零点, 方便后续试验现象的统计分析, 高速图像采集系统以 10000 s^{-1} 的频率对火焰传播过程进行记录, 高频率可最大限度地记录药床中火焰的传播过程。

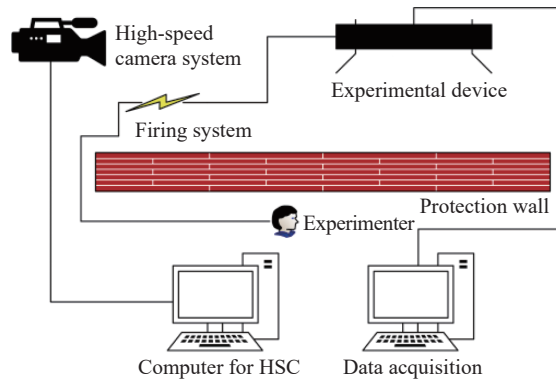


图 4 测试现场布置

Fig. 4 Arrangement of the test site

2 试验方案与实施

试验共有 5 种方案, 统一采用 3#电底火, 中心点火管中的点火药为 2#小粒黑。仿真发射药由不可燃材料制成, 密度为 1.5 g/cm^3 , 直径为 16 mm。该仿真发射药外形尺寸和密度与 24/19 发射药相近, 具有一定的强度, 试验中不产生形变, 为研究不同装药结构的点传火特性提供技术保证。仿真发射药装药结构分单一粒状、单一杆状和杆-粒混合装药 3 种, 如图 5 所示, 粒状药长度为 16 mm, 杆状药长度为 160 mm。为降低偶然误差, 每种方案重复进行 2 次试验, 具体参数见表 1。

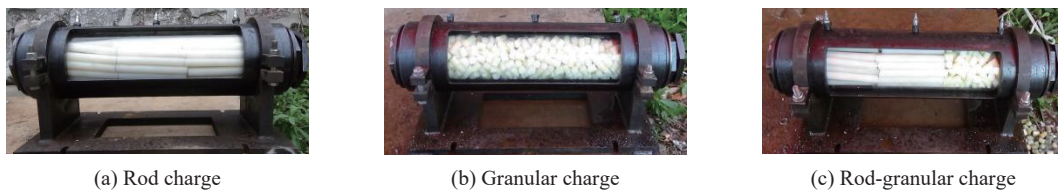


图 5 不同装药结构

Fig. 5 Different charging configurations

表 1 各方案装填参数

Table 1 Charging parameters in each case

方案	电底火	点火药量/g	仿真发射药装药结构	仿真发射药量/kg	仿真发射药装填密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	3#	20	单一杆状发射药	2.7	0.58
2	3#	30	单一杆状发射药	2.7	0.58
3	3#	20	单一粒状发射药	3.0	0.64
4	3#	30	单一粒状发射药	3.0	0.64
5	3#	20	杆状-粒状混装发射药	1.8(杆状), 0.9(粒状)	0.58

3 结果与分析

可视化区域点火火焰在药床传播过程如图 6 所示: 点火过程由电底火击发开始, 对应各方案序列照片中的第 1 张; 电底火中的黑火药首先燃烧, 并在自由空腔内形成高温燃烧产物区, 随后点燃中心传火管中的黑火药, 当传火管内外压差大于内衬纸的破孔压力时, 火焰进入药床, 对应序列照片中的第 2 张照片; 然后向药床径向和轴向传播, 图像显示火焰的径向效应小, 在很短的时间内火焰到达管壁, 在轴向上火焰由出火位置向左右两端序列传播。以可视化矩形窗口的左边界为火焰位置 X 坐标零点, 右边界为火焰位置正向边界。由于主装药为仿真发射药, 不具有可燃性, 且各方案主装药量相近, 因此以下影

响因素分析中忽略装药量的影响, 主要考虑主装药结构的影响。在轴向火焰面位置判定中以明亮火焰面最前端为火焰位置, 结合高速图像采集系统中的像素点坐标计算读取火焰位置。



图 6 不同试验方案火焰传播序列照片

Fig. 6 High-speed photography of flame spreading through propellant charge in different cases

3.1 出火时间

出火时间 t_c 为从点火击发开始至窗口内第 1 次出现火焰的时间, 能够反映中心点火管内的传火性能, 该值越小, 说明中心点火管内的传火越通畅, 点火延时越短。方案 1、3、5 的点火药量为 20 g, 火焰在 0.6 ms 左右出现; 而方案 2 和 4 的点火药量为 30 g, 火焰在 1.5 ms 才出现, 较 20 g 点火药量的火焰出现时间晚了 0.9 ms。这说明: 中心点火管内装药量越大, 管内传火速度并非越快, 反而有所降低, 延长了出火时间。这是由于高的装填密度导致中心点火管内的传火通道不畅, 阻碍管内气体流通, 进而影响黑火药的全面点燃, 造成点火延时。因此, 合理的点火药量对降低点火延时影响显著, 通过对不同方案出火时间的对比分析可以优选点火药量。

3.2 传火时间

传火时间 $t_t = t_L + t_R$ (t_L 为火焰从出现位置传播到窗口左边界所用的时间, t_R 为火焰从出现位置传播到窗口右边界所用的时间, t_t 即为火焰传播至整个窗口的时间), 其大小能够说明药床内传火性能的好坏,

t_l 的值越小, 说明传火通道畅通, 主装药被点燃的瞬时性越好。 t_l 的值越大, 说明主装药结构不合理, 传火通道不畅, 主装药被点燃的瞬时性也越差, 燃烧室内易出现较大的压力波动。不同方案传火时间见表 2, 由表 2 可知, 主装药同为杆状发射药且装填密度相同的方案 1 和方案 2, 传火时间分别为 2.4 和 2.0 ms, 平均传火时间为 2.2 ms。而主装药同为粒状发射药且装填密度相同的方案 3 和方案 4, 传火时间分别为 3.6 和 3.2 ms, 平均传火时间为 3.4 ms。方案 1 和 3、方案 2 和 4 点火药量相同, 分别为 20 和 30 g, 而传火时间方案 1 比方案 3 少 1.2 ms, 方案 2 比方案 4 也少 1.2 ms。数据表明, 杆状药床比粒状药床的传火时间短, 火焰传播速度快, 这是由于粒状药床相间阻力大, 降低了火焰速度。同时注意到, 同为杆状装药的方案 1 和 2, 同为粒状装药的方案 3 和 4, 点火药量分别由 20 g 增加至 30 g, 传火时间分别由 2.4 ms 降低为 2.0 ms, 由 3.6 ms 降低为 3.2 ms。两组数据显示, 点火药量由 20 g 增加至 30 g, 传火时间均降低 0.4 ms, 说明点火药量对主装药的传火时间也有影响。方案 1 和 2 的 t_l 分别为 0.8 ms 和 0.6 ms, 点火药量由 20 g 增加至 30 g, 传火时间降低 0.2 ms, 而方案 3 和 4 的 t_l 都为 1.0 ms, 点火药量的增加并未影响传火时间, 这是由于粒状药床的阻力较大, 点火药量对传火速度的影响在短距离内未得到明显的展现。对比方案 1 和 5, 火焰从出现位置传播到窗口左边界都用了 0.8 ms, 这是由于在此区域两者都为杆状装药床, 药床阻力相同, 火焰传播速度也相同。而火焰从出现位置传播到窗口右边界, 方案 5 所用时间却比方案 1 长了 0.5 ms, 这是由于火焰传播至粒状药床位置阻力变大、传播速度降低。通过对不同方案传火时间的分析可以优选主装药结构。

表 2 各方案传火时间

Table 2 Flame speeding time of each case

方案	t_l /ms	t_r /ms	t_f /ms
1	0.8	1.6	2.4
2	0.6	1.4	2.0
3	1.0	2.6	3.6
4	1.0	2.2	3.2
5	0.8	2.3	3.1

3.3 传火数学模型

方案 1、3、5 的点火药量均为 20 g, 而主装药结构各不相同。各方案火焰传播位置随时间的变化如图 7 所示。方案 1 为单一杆状装药, 传火通道通畅, 相间阻力小, 火焰面沿轴向线性传播, 传播速度均匀, 平均速度为 179.7 m/s; 方案 3 为单一粒状装药, 传火通道不畅, 相间阻力大, 火焰面沿轴向衰减传播, 传播速度逐渐减慢, 平均速度为 112.8 m/s; 方案 5 为杆粒混合装药, 火焰面在杆状药床部分的传播特性与方案 1 相近, 传播速度均匀, 到达粒状装药区域, 传播速度减慢, 传播特性与方案 3 相近, 平均速度为 145.7 m/s。根据火焰位置点, 利用一阶指数衰减函数:

$$X = A \exp(-t/t_1) + X_0 \quad t > t_c \tag{1}$$

拟合建立火焰面位置随时间变化的函数, 函数参数见表 3。通过拟合建立的点火火焰传播过程数学模型的拟合优度均大于 0.98, 采用建立的火焰传播数学模型可精确开展内弹道建模。

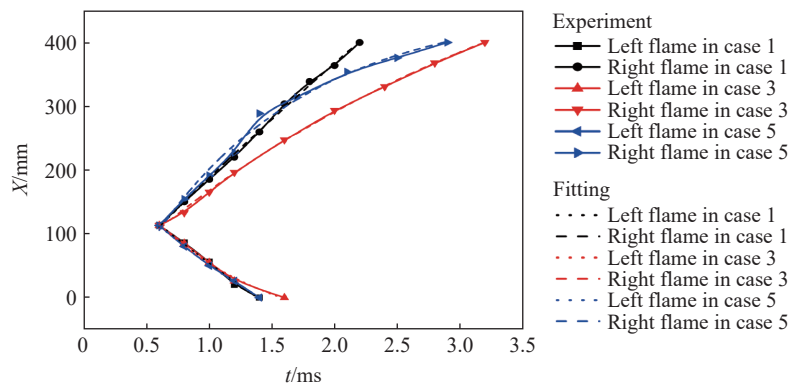


图 7 方案 1、3、5 火焰传播位置

Fig. 7 Flame positions along the propellant chamber during charge ignition of cases 1, 3 and 5

表 3 方案 1、3、5 火焰传播位置函数拟合系数

Table 3 Exponential decay function coefficients in cases 1, 3 and 5

方案	火焰传播方向	A/mm	t_i/ms	X_0/mm
1	左	960.73748	5.48834	-746.77192
	右	-2140.67126	10.28158	2129.96097
3	左	337.19979	0.96082	-65.56418
	右	-670.86944	3.58306	675.19170
5	左	449.90302	1.92159	-216.47406
	右	-567.63017	1.26204	458.43930

3.4 压力

各方案测点 P_1 、 P_2 、 P_3 处测得的压力曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 测点 P_1 、 P_2 处压力的增长趋势相近, 这是由于 P_1 、 P_2 两测点相对传火管的位置对称, 感受到的压力也相近。各方案的最高压力和破膜压力见表 4, 表中显示最高压力受点火药量的影响, 20 g 的点火药(方案 1、3、5)最高压力为 2.5 MPa 左右, 30 g 的点火药(方案 2、4)最高压力为 2.8 MPa 左右, 相较 20 g 的高 11%; 各方案的破膜压力为 1.0 MPa 左右, 说明

系统采用的爆破膜泄压系统具有一定的稳定性。对比不同装药结构的压力曲线发现, 杆状装药结构的压力曲线较光滑, 未见明显的波动, 而粒状装药和杆粒混装结构都出现不同程度的压力波动区, 如图 8 中标识区域。这是由于粒状药床的相间阻力大, 阻碍气体传播, 形成气体堵塞现象, 膛内易形成压力波动。通过分析对各方案燃烧室内压力, 可洞悉压力波动形成的原因, 提高发射安全性。

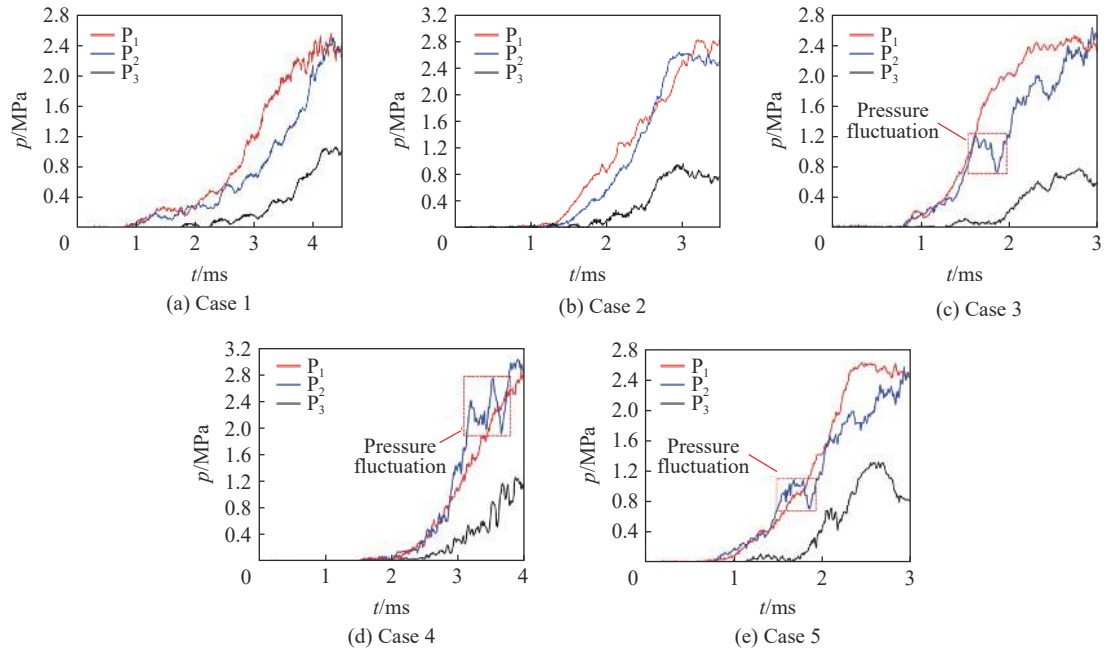


图 8 各方案 P_1 、 P_2 、 P_3 测点的压力曲线

Fig. 8 Pressure-time curves measured at measuring points P_1 , P_2 and P_3 in each case

表 4 各方案的最高压力和破膜压力

Table 4 The highest pressure and membrane-broken pressure in each case

方案	最高压力/MPa	破膜压力/MPa
1	2.51	0.98
2	2.82	0.96
3	2.53	0.85
4	2.91	1.00
5	2.63	1.10

4 结 论

(1)设计的模拟试验系统是一套集多项技术于一体的完整的模拟试验系统,可以进行不同点火药量、不同装药结构的点传火试验。可视化的燃烧室将火焰的传播过程直观展现,为点传火过程的研究提供新方法,结合多通道测试系统可对出火时间、传火时间、火焰传播位置及燃烧室内压力等参数进行测试,从而对不同点火药量、不同装药结构的点传火的一致性、瞬时性、均匀性等进行对比试验研究,进而优选点火药量、优化装药结构,建立火焰传播模型,为精确开展内弹道建模、提高发射安全性提供参考。还可以减少弹道试验次数,有效缩短研究周期,因此具有较高的经济和社会效益。

(2)较大的点火药量使出火时间延长,单一杆状装药床传火性能优于单一粒状装药和杆粒混装药床,粒状装药床易形成气体堵塞,膛内出现压力波动现象。火焰传播过程符合一阶指数衰减函数,拟合建立的点传火火焰传播过程数学模型的拟合优度大于0.98。

参考文献:

- [1] 金志明,翁春生. 高等内弹道学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 237-239.
- [2] 翁春生,王浩. 计算内弹道学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 95-97.
- [3] 王升晨,周彦煌,刘千里,等. 膛内多相燃烧理论及应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994: 84-86.
- [4] ACHARYA R. Effect of different flash-tube vent-hole patterns on interior ballistic processes of ignition cartridge of 120-mm mortar system [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2008, 7(5): 383-397. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v7.i5.30.
- [5] HOUIM R W, KUO K K. Understanding interior ballistic processes in a flash tube [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2010, 77(5): 051403. DOI: 10.1115/1.4001285.
- [6] MOORE J D, ACHARYA R, FERRARA P J. Effect of flash-tube vent-hole patterns on the combustion product discharge rate [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2009, 8(3): 199-220. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v8.i3.30.
- [7] JIANG S P, RUI X T, HONG J, et al. Numerical simulation of impact breakage of gun propellant charge [J]. *Granular Matter*, 2011, 13(5): 611. DOI: 10.1007/s10035-011-0276-1.
- [8] 张瑞华,芮筱亭,赵宏立,等. 基于离散单元法的发射装药挤压破碎模拟实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(6): 062301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0157.
ZHANG R H, RUI X T, ZHAO H L, et al. Simulational experiment on compression and fracture of propellant charge based on the discrete element method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(6): 062301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0157.
- [9] 陈言坤,罗兴柏,甄建伟,等. 发射药动态力学性能的研究进展 [J]. *含能材料*, 2013, 21(5): 675-680. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.023.
CHEN Y K, LUO X B, ZHEN J W, et al. Review on dynamical mechanical properties of propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(5): 675-680. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.023.
- [10] 王浩,梁世超,张莺,等. 火焰在传火管装药床中的传输特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1999, 19(1): 66-71.
WANG H, LIANG S C, ZHANG Y, et al. Study of flame propagation characteristics in fire transferring tube [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(1): 66-71.
- [11] 王珊珊,张玉成,王浩,等. 大长径比点火管高密实火药床点传火过程两相流的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(4): 444-448. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0444-05.
WANG S S, ZHANG Y C, WANG H, et al. Two-phase flow in ignition process of consolidated charge bed within a large length-to-diameter ratio igniter tube [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(4): 444-448. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0444-05.
- [12] 王珊珊,王浩,黄明,等. 药床透气性对大长径比点传火管点传火性能的影响研究 [J]. *弹道学报*, 2013, 25(4): 95-99. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2013.04.019.
WANG S S, WANG H, HUANG M, et al. Research on influence of charge permeability on ignition characteristics on large

- length-diameter ratio igniter tube [J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(4): 95–99. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2013.04.019.
- [13] 韩博, 张晓志, 邢浴仁, 等. 大口径火炮发射装药点传火模拟试验装置的研究 [J]. *兵工学报*, 2008, 29(3): 262–265. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2008.03.002.
- HAN B, ZHANG X Z, XING Y R, et al. Research on simulation testing device of the ignition system for large caliber propellant charging [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(3): 262–265. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2008.03.002.
- [14] 程诚, 张小兵. 某制导炮弹二维两相流内弹道性能分析与数值模拟研究 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(1): 58–63. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.01.009.
- CHENG C, ZHANG X B. Two-dimensional numerical simulation on two-phase flow interior ballistic performance of a guided projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(1): 58–63. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.01.009.
- [15] MIURA H, MATSUO A, NAKAMURA Y. Three-dimensional simulation of pressure fluctuation in a granular solid propellant chamber within an ignition stage [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, 36(3): 259–267. DOI: 10.1002/prop.201000058.
- [16] JANG J S, Oh S H, ROH T S. Development of three-dimensional numerical model for combustion-flow in interior ballistics [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(4): 1631–1637. DOI: 10.1007/s12206-016-0319-y.
- [17] JENARO G, OTON-MARTINEZ R A, MORATILLA D, et al. Analysis of pressure waves generation in gun combustion chambers during the propellant ignition process [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(2): 228–237. DOI: 10.1002/prop.201500173.
- [18] JARAMAZ S, MICKOVIĆ D, ELEK P. Two-phase flows in gun barrel: theoretical and experimental studies [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(5): 475–487. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.01.003.
- [19] COLLETTI A, BOYER E, KUO K K, et al. Characterization of black-powder igniter jets into a granular bed through analysis of condensed-phase product deposition and regions of penetration [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2010, 9(6): 505–522. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2011001422.

(责任编辑 张凌云)