

文章编号: 1001-1455(2011)06-0573-06

长药室装药中多点点传火一维两相流数值模拟*

季晓松^{1,2}, 王 浩¹, 冯国增^{1,3}, 黄 明¹, 王珊珊¹

(1. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 炮兵学院南京分院, 江苏 南京 211132;

3. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对药室长度超过 3 m 的长药室装药设计问题, 设计了以电点火具为点火源的多点点火系统, 在点传火模拟实验装置上进行了多点点火的实验研究。同时, 建立了点传火模拟实验装置中多点点传火过程的数学物理模型, 采用 MacCormack 差分格式进行了数值求解, 得到了点传火模拟装置中传火管的压力分布、固相和气相速度以及空隙率等数值解, 分析了多点点传火系统的点传火过程。计算结果与实验结果吻合, 比较准确地描述了点传火过程, 表明该数值模拟方法合理可行。

关键词: 爆炸力学; 长药室; 两相流; 多点点火

中图分类号: O381; TJ012.1

国标学科代码: 130 · 35

文献标志码: A

火炮发射装药点火的一致性, 是影响大口径火炮弹道性能和射击安全的重要因素。对于高动能大口径火炮, 解决药室发射装药点火一致性的问题, 是内弹道设计的重点工作。为了有效抑制压力波, 得到比较平坦的压力曲线, 弹道工作者提出了多种新型的点火概念^[1], 如激光点火、新型电点火、等离子点火、网络点火等, 多点点火则以激光多点点火研究居多, 但由于受到激光光源的限制, 目前该技术还处于实验室阶段^[2-4]。用点火具实现多点点火的研究也有报道, 但是火炮射击实验时得到的多点点火管压力-时间曲线不如普通点火管^[5]。关于点火问题的数值模拟多采用经典内弹道理论进行, 但点火过程远比经典内弹道数值计算出来的结果复杂得多, 采用两相流计算出的结果能较好地客观描述整个过程。王浩^[6]对随行装药结构采用两相流解法进行了初步的尝试。对多点点火问题以实验研究居多, 而用数值模拟方法研究报道较少。

本文中, 采用电点火具和中心传火管设计多点点传火系统, 在点传火模拟实验装置上进行点火管多点同时点火的实验研究, 取得良好的点火一致性^[7-8]。同时, 针对长药室装药中多点点传火过程的复杂性以及物理量分布的异常性, 建立相应的一维两相流数学物理模型, 采用 Mac Cormack 差分格式进行数值求解, 探讨多点点传火过程燃气压力变化规律以及燃气流动特性。通过计算结果与实验结果对比分析了该多点点传火技术的可行性和可靠性。目前该多点点火系统已经应用于长药室的大口径火炮装药中, 火炮射击实验表明采用的多点点火技术可以极大地抑制膛内压力波, 具有良好的内弹道性能。

1 实 验

1.1 可燃中心传火管结构

中心传火管由 6 节传火管前后紧密衔接而成, 每节可燃传火管都由可燃传火管、传火管装药、2 个点火药盒(一端 1 个)、电点火头等组成, 单节传火管长 0.5 m, 两端为装有小粒黑的点火药盒, 每个点火药盒中装有 1 个电点火头, 中心为装有大粒黑的蛇型药袋, 如图 1 所示。

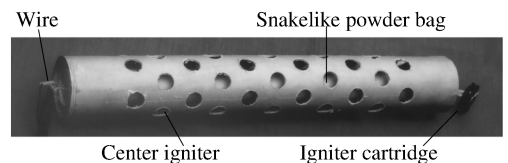


图 1 单节中心传火管照片

Fig. 1 Photo of single center igniter

* 收稿日期: 2010-08-20; 修回日期: 2011-03-25

作者简介: 季晓松(1979—), 男, 博士研究生, 讲师。

1.2 多点点传火模拟实验装置

为了研究多点点传火系统的点传火性能,设计了直径略大于可燃中心传火管的模拟实验装置,如图 2 所示。根据可燃中心传火管的尺寸,将模拟装置同样也设计成了 6 节,单节长 0.5 m,节与节之间有衔

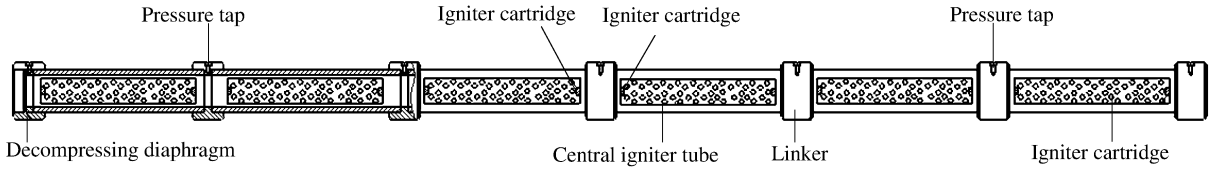


图 2 多点点传火模拟实验装置及点火装药结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the multi-point ignition analog device and the charge of multi-point ignition

接器,可方便进行不同长度的实验,每个衔接器上开有测压孔,单节传火管模拟实验装置结构如图 3 所示。多节组装后,位于装置两端的衔接器设计有密封环,用于压紧铝制膜片,接线一端的铝制膜片上装有接线柱。实验时,在测压孔处安装压电传感器,采用瞬态记录仪测量模拟装置内每个衔接器位置的

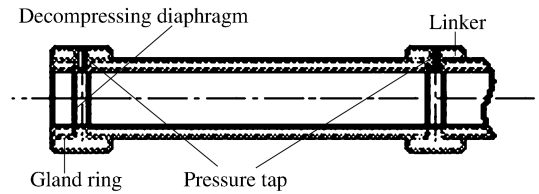


图 3 单节模拟装置结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single analog device

2 点传火过程的物理模型

点火时,所有药盒中的电点火头同时通电点火。电点火头先引燃药盒中的小粒黑火药,由小粒黑火药燃烧产生的炽热气体和固体产物冲破点火药盒,引燃传火管内蛇形药袋中的大粒黑火药并形成促使燃气沿轴向运动的压力梯度。由于药粒相对稠密,燃气通过黑火药床间隙时流动受到很大的阻力,使已燃的大粒黑药粒受到压缩,从而使局部空隙率减小,因而压力梯度将进一步增强,形成沿轴向向前传播的压力阵面。同时,在高温高压气体和炽热固体粒子的对流及辐射传热作用下,黑火药床逐次被加热到着火温度并相继被点燃,形成火焰阵面的传播。在压力阵面沿轴向传播的过程中,如果传火管内的压力超过衬纸的剪切强度,传火孔将依次被打开,气体和部分火药颗粒一起从传火孔中喷射到传火管外,当实验装置两端端面的压力达到一定值后,膜片被冲开,气体和部分药粒从两端面流出。在传火孔打开的初期,气体生成量大于气体流出量,管内压力仍继续上升;后因药粒燃烧,流出量大于生成量,管内压力下降,直至燃气和未燃尽的和火药颗粒全部流出管外为止。

根据以上多点点传火系统点传火过程的物理化学现象,提出以下基本假设:

- (1) 考虑药粒和气体的两相流动,但假设流动是一维的,不考虑侧向传火孔处径向流动的影响,并假设点火管截面积 A 为常数;
- (2) 除了未燃完的黑火药颗粒外,假设黑火药燃烧产物完全是气相的;
- (3) 点火药盒内的小粒黑火药同时点燃,位于传火管内蛇形药袋的大粒黑火药满足药粒点火准则(表面温度准则),即当表面达到着火温度时,大粒黑火药药粒即被点燃;
- (4) 假设黑火药的燃烧速度仅与压力有关,不考虑侵蚀燃烧及初温的影响;
- (5) 假设药粒是不可压缩的,即火药颗粒密度为常数,并忽略药粒大小的实际分布,用药粒当量尺寸来表示全部药粒的尺寸;
- (6) 忽略气体的粘性耗散及对管壁的热损失;
- (7) 假设火药燃气服从 Noble-Abel 状态方程。

3 点传火过程的数学模型

3.1 控制方程

将连续方程、动量方程和气相能量方程写成守恒形式

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{H}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \phi \rho_g \\ \phi \rho_g u_g \\ \phi \rho_g (e_g + 0.5 u_g^2) \\ (1 - \phi) \rho_p \\ (1 - \phi) \rho_p u_p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \phi \rho_g u_g \\ \phi \rho_g u_g^2 + \phi p \\ \phi \rho_g u_g \left(e_g + \frac{p}{\rho_g} + 0.5 u_g^2 \right) \\ (1 - \phi) \rho_p u_p \\ (1 - \phi) \rho_p u_p^2 + (1 - \phi) p + (1 - \phi) R_p \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \dot{m}_c \\ -f_s + \dot{m}_c u_p + p \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ -Q_p - f_s u_p + \dot{m}_c \left(e_p + \frac{p}{\rho_p} + 0.5 u_p^2 \right) - p \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ -\dot{m}_c \\ f_s - \dot{m}_c u_p - p \frac{\partial \phi}{\partial x} \end{bmatrix}$$

式中： ϕ 为空隙率， ρ_g 、 u_g 、 e_g 分别为气相的密度、速度、内能， ρ_p 、 u_p 、 e_p 为固相的密度、速度、内能， f_s 为相间阻力， Q_p 为相间热交换量， p 为压力， \dot{m}_c 为固体颗粒燃烧生成气体质量。

3.2 辅助方程

辅助方程包括相间阻力、相间热交换、状态方程、火药燃烧速率、形状函数、颗粒间应力和火药表面温度的方程，具体参见文献[9]。

关于本文的辅助方程需要说明 2 点：(1)火药着火准则采用的是固相点火理论模型，火药颗粒表面温度达到点火温度时，火药即被点燃，火药着火温度取 565 K；(2)文中左右边界破膜压力为 8 MPa。

3.3 差分格式及定解条件

(1)差分格式。

对于控制方程，采用 MacCormack 差分格式进行数值求解，具体形式参见文献[9]。

(2)初始条件。

在点火过程中，点火管由点火药盒引燃，点火管工作的初始条件是点火药盒被点燃后提供的压力、温度、密度等条件。如果假设点火药盒点火是瞬间完成，那么点火的初始条件应为点火药盒提供的沿点火轴向的压力、温度、密度及能量等参量的分布规律。设点火药盒所提供的初始参量为 E （可代表压力、密度、温度等参量），显然随着点火管轴向距离的增加，该参量的分布值要减小，它是一个衰减函数。一般可假设为指数衰减形式，即 $E = E_i e^{-C_i x}$ ，其中 C_i 与 E_i 均为常数。

(3)边界条件。

左右边界可分 2 种情况而定，在端面膜片未打开以前，忽略端面振动变形的影响，可当作固定边界，则 $u_g|_{x=0} = u_p|_{x=0} = 0$ ， $u_g|_{x=l} = u_p|_{x=l} = 0$ ，其中 l 为点火管内部空间的长度。

当两端面打开后就成为敞口边界，则管口的压力由流动条件决定，如果临界压力高于外界压力，则出口边界的压力为临界压力，否则就是外界压力 p_e ，则有 $p|_{x=0} = p|_{x=l} = p_e$ 。根据火药燃气的一维定熵流动确定左右边界的气相温度、密度、流动速度。

4 数值模拟结果分析

数值计算表明,某处压力曲线与实验测得的压力曲线基本吻合,达到近似相同的峰值时破膜,如图4所示。计算结果中达到压力峰值之后破膜,随后开始泄压;实验时,则由于破膜后气流不断向两端流出,气流的扰动对压力传感器有一定影响,产生不规则的锯齿状曲线。

不同时刻的压力曲线如图5所示,图中曲线显示了压力波阵面沿传火管轴向的传播过程。开始阶段12个点火器具同时引燃后,在这12个点火源处,产生高温燃气,这样就在12个点火源附近产生局部的峰值高压。在每一节传火管中,左端面压力波阵面向右端传播,右端面压力波阵面向左端传播。相邻两节传火管中间的点火源分别向两端传播。伴随着高温大粒黑火药气体的流动,由于辐射和对流换热使大粒黑火药颗粒的表面温度升高,当大粒黑火药颗粒表面温度达到着火温度时,引燃火药颗粒。随着传火管大粒黑火药燃烧,模拟装置内压力逐渐增大,致使模拟装置两端破膜,装置内压力高于外界压力,气体不断从两端破膜处流出,压力分布趋于平缓。

由于传火管中12处点火源同时被引燃,这样火焰传播的距离大约就只有管长的1/12,因此整个传火管内火药全面点火的延迟时间大大缩短,相应的压力梯度也就小得多,压力沿轴向分布比较均匀。

不同时刻的气、固相速度分布如图6~7所示。由于12个点火源瞬间被引燃,形成局部的压力梯度,产生的高温燃气就向未被点燃的大粒黑火药床区域运动。在左端面,燃气向右运动形成正向速度;在右端面,燃气向左运动,形成负向速度;在中间点火源处,燃气同时向左右两侧运动,速度为零。因此,起始时刻气相速度分布呈锯齿状,然后逐渐呈现线性分布,最终趋向光滑。固相速度分布曲线类似于气相速度。

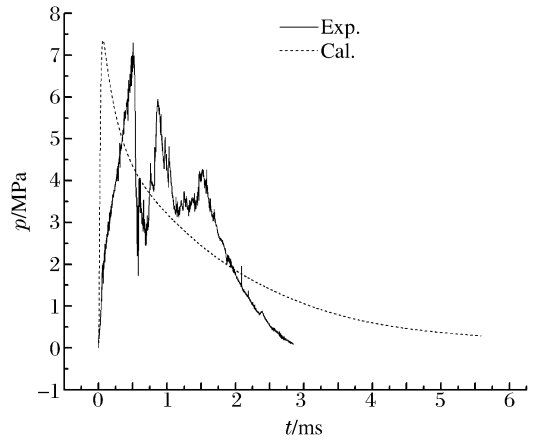


图4 距多点点火模拟实验装置左端0.5 m处 $p-t$ 曲线
Fig. 4 $p-t$ curves of 0.5 m to the left for the multi-point ignition analog device

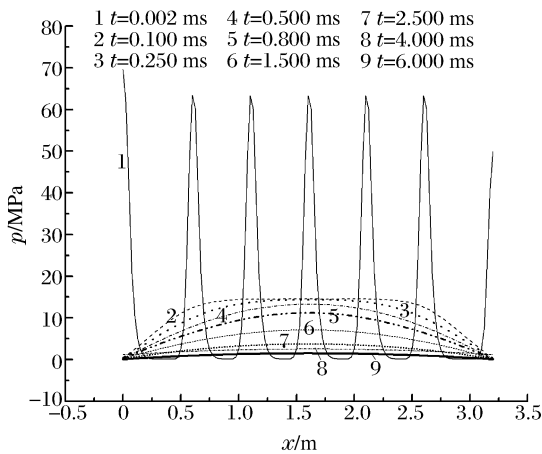


图5 不同时刻压力分布曲线

Fig. 5 Curves of pressure distribution at different times

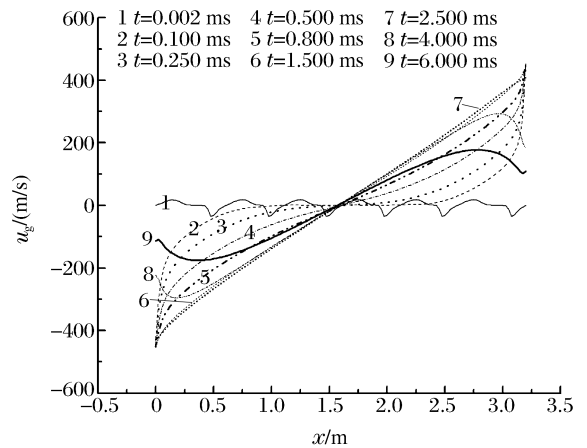


图6 不同时刻气相速度分布曲线

Fig. 6 Curves of gas velocity at different times

空隙率分布曲线如图 8 所示,由于存在压力梯度,在压力差作用力的推动下,左端面向右端聚集,右端面向左端聚集,中间 5 处点火源分别向两端聚集,开始阶段空隙率呈现锯齿状,随着时间推移,火药不断燃烧,空隙率趋于均匀。最后火药燃烧完,空隙率趋于 1。

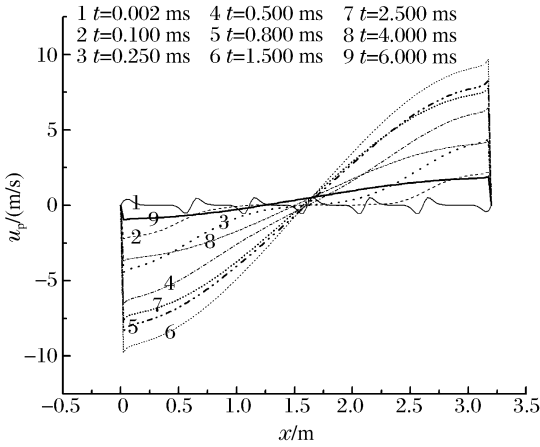


图 7 不同时刻固相速度分布曲线

Fig. 7 Curves of solid velocity at different times

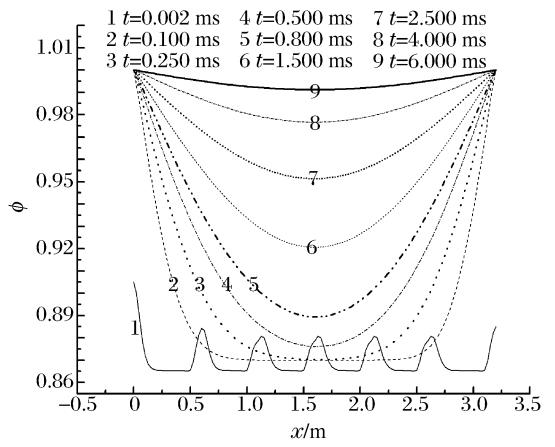


图 8 不同时刻空隙率分布曲线

Fig. 8 Curves of void ratio at different times

5 结束语

在长药室装药中,多点点传火技术可以提高点传火的同步性和均匀性,从而能够保证超长药室装药的安全性和稳定性。我们提出的多点点火系统具有点火时间短、一致性好的特点。通过建立点传火模拟实验装置中多点点传火过程的一维两相流模型,采用 Mac Cormack 差分格式进行数值求解,得到点传火模拟装置中传火管的压力分布、固相和气相速度以及空隙率等计算数据,计算结果与实验数据基本吻合,固相和气相速度以及空隙率等计算结果也较准确地描述了点传火过程,表明该数值模拟的计算方法合理可行。这部分工作将为进行火炮长药室装药多点点传火机理研究,为内弹道两相流计算提供理论基础。

由于在点传火过程的数值模拟中提出了一些假设,这些假设与实际的点传火过程有一定的差距。比如,火药颗粒的不一致性,点火药盒中的小粒黑火药并非瞬间燃完等。此外,传火管破孔后的复杂波系对整个点传火过程的影响还未考虑,以及研究点传火过程对火炮主装药床的影响,这些都是今后需要进一步进行的工作。

参考文献:

[1] 黄明,王浩. 传火管中不同装药结构传火性能试验研究[J]. 弹道学报,2005,15(1):83-86.
 HUANG Ming, WANG Hao. The experimental study on the performance of ignition and flame spreading in igniter for different charge constructions[J]. Journal of Ballistics, 2005,15(1):83-86.

[2] 王浩,黄明,邵志坚. 激光多点点火技术试验研究[J]. 弹道学报,2000,12(2):92-96.
 WANG Hao, HUANG Ming, SHAO Zhi-jian. The research on technology of laser multi-point ignition for gun[J]. Journal of Ballistics, 2000,12(2):92-96.

[3] 王浩,黄明,邵志坚. 火炮中激光多点点火技术试验研究[J]. 兵工学报,2000,21(2):101-104.
 WANG Hao, HUANG Ming, SHAO Zhi-jian. A study on the laser multi-point ignition of guns[J]. Acta Armamentarii, 2000,21(2):101-104.

[4] 龚海刚,李启明,袁稳新,等. 多点点火技术的试验研究[J]. 火炮发射与控制学报,2001(1):15-17.
 GONG Hai-gang, LI Qi-ming, YUAN Wen-xin, et al. Experiment research to multi-points-ignition technology [J]. Gun Launch & Control Journal, 2001(1):15-17.

- [5] Brad E. Trends observed in the laser ignition of black powder and JA2 propellant[R]. ADA277904, 1994.
- [6] 王浩. 粘结式随行装药两相流内弹道模型及其计算[J]. 弹道学报, 1998, 10(4): 31-36.
WANG Hao. Interballistics simulation and computation of two-phase flow of traveling charge[J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(4): 31-36.
- [7] 季晓松, 王浩, 冯国增. 长药室装药中多点点传火技术试验研究[J]. 含能材料, 2011, 19(1): 60-64.
JI Xiao-song, WANG Hao, FENG Guo-zeng. The research on technology of multi-point ignition in long-chamber charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(1): 60-64.
- [8] 季晓松, 王浩, 冯国增, 等. 高炮口动能大口径火炮中多点点火技术试验研究[J]. 弹道学报, 2010, 22(4): 67-69.
JI Xiao-song, WANG Hao, FENG Guo-zeng, et al. Experimental research on technology of multi-point ignition in large caliber gun with high muzzle energy[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(4): 67-69.
- [9] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

Numerical simulation of one-dimensional two-phase flow for multi-point ignition technology in long-chamber charge *

JI Xiao-song^{1,2}, WANG Hao¹, FENG Guo-zeng^{1,3},
HUANG Ming¹, WANG Shan-shan¹

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

2. Nanjing Branch, Artillery Institute, Nanjing 211132, Jiangsu, China;

3. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science
and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: A multi-point ignition system with an electric igniter was designed and experimental investigations were carried out by using this analogue ignition device to solve the charge problems in the powder chambers with the over 3m length. The corresponding mathematical and physical models were established to describe the multi-point ignition process in this analogue ignition device. The MacCormack difference equation was used to obtain the numerical solutions as follows: The pressure distribution and void ratio and solid and gas velocities. And the multi-point ignition process was analyzed. The calculated results are consistent with the experimental ones and the algorithm is effective.

Key words: mechanics of explosion; long powder chamber; two-phase flow; multi-point ignition

* Received 20 August 2010; Revised 25 March 2011

Corresponding author: WANG Hao, wanghao@mail.njust.edu.cn