

文章编号: 1001-1455(2013)04-0444-05

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*

王珊珊¹, 张玉成², 王浩¹, 张博孜¹, 陶如意¹

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 设计了某中心点火管, 完成了该点火管的点传火实验, 针对该点火管长径比大、装填密度高的特点, 建立了点火管内气固两相流动和燃烧过程的一维两相流模型, 并进行了数值模拟。计算结果与实验结果良好符合, 说明计算模型能够准确描述点火管内的实际物理化学过程, 计算程序参数取值合理, 该计算程序可为此类点火管各种结构尺寸及装填条件下的点传火性能分析及优化计算提供充分的理论依据和方法。并且, 根据计算结果初步分析了该结构及装填条件下点火管的点传火性能, 为下阶段工程优化设计提供参考。

关键词: 流体力学; 点传火性能; 两相流; 点火管

中图分类号: O359

国标学科代码: 1302534

文献标志码: A

近年来, 随着科学技术的发展, 现代高性能武器对点火系统的精确性、一致性、快速性、安全性等要求越来越高。在火炮及一些发射装置的设计中, 良好而可靠的点传火系统对弹道稳定性和射击安全性尤其重要, 点火系统的合理性关系弹药系统能否安全、可靠地作用, 直接影响着发射药点火与燃烧的一致性、膛内压力波的产生情况、膛压与初速的稳定性等^[1-3]。因此, 对点火系统的点传火过程进行分析, 对于工程设计与应用具有十分重要的意义。

各种武器的点火系统有各自的特点, 即使采用同一种类型的点火方式, 由于点火具结构尺寸及装填条件的不同, 产生的问题及解决方法也各有差异^[1,4-6]。本文中的点火管是典型的中心点火管, 具有长径比大、装填密度高的特点。本文中, 主要根据工程需要设计点火管结构, 完成点传火实验, 建立管内两相流模型, 对管内的火药燃烧、燃气流动过程进行数值模拟, 分析管内压力随时间变化的计算值与测试值, 并通过计算结果分析该结构点火管的点传火性能。

1 点传火过程实验

点火管点传火过程实验将点火管置于大气中。点火管实验结构如图 1 所示, 由点火具、点火管、衬纸、端盖等组成。装药为火炮中常用的点火药 2# 小粒黑火药, 点火管的长径比 $L/D=38$, 装填密度 $\rho_0=1\ 027.8\ \text{kg/m}^3$, 采用端面点火方式。

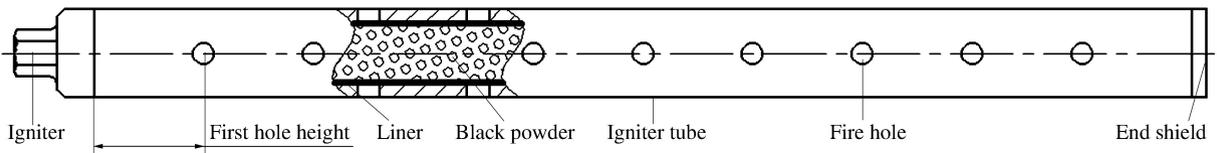


图 1 点火管结构示意图

Fig. 1 A schematic constructional diagram of igniter tube

* 收稿日期: 2012-04-11; 修回日期: 2012-10-12

基金项目: 南京理工大学自主科研专项计划项目(2011YBXM110)

作者简介: 王珊珊(1985—), 女, 博士研究生。

实验可测得点火管前端(近点火端)、中部、末端 3 处位置的压力变化,图 2 为压力测试系统的测量原理示意图。采用高速摄像机拍摄整个点传火过程以观察破孔顺序及火焰的传播,高速摄像机根据场地实际情况位于点火管中垂线上的某处位置。

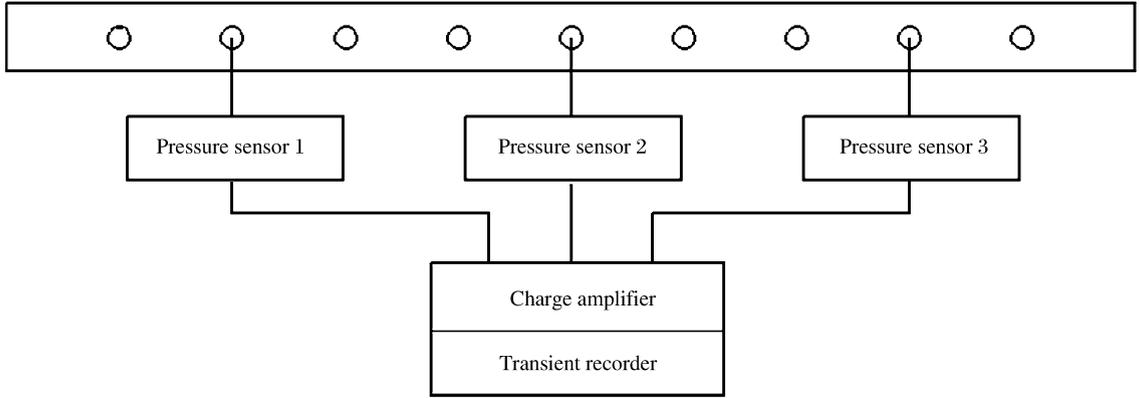


图 2 点火管测压原理示意图

Fig. 2 A schematic diagram of pressure experiment

2 数值模拟

2.1 数学物理模型

根据点火管工作过程的物理化学现象,并结合大长径比、高装填密度的特点,建立了管内火药燃烧、气固两相流动的一维两相流数学模型。基本假设^[1-2,5,7-8]如下:

(1) 双流体假设,把黑火药颗粒群当作一种具有连续介质特性的拟流体,认为黑火药颗粒群组成的固相连续分布在气相中。

(2) 由于点火管的截面积较小,不考虑管内气固两相的径向效应,假设气固两相仅沿轴向运动,即认为所有流动参量均是轴向坐标 x 和时间 t 的函数;点火管破膜后,考虑药粒和气体的两相流动,不考虑侧向传火孔处径向流动的影响,认为是一维流动。

(3) 假设黑火药燃烧产物都是气相,通过比热比 γ 修正燃气混合物的热力学参量。

(4) 药粒着火取表面温度准则,而当药粒表面温度达到着火温度时,药粒即被点燃。

(5) 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影响。

(6) 假设药粒不可压缩,并忽略药粒大小的实际分布,用药粒的当量尺寸表示全部药粒的尺寸。

(7) 假设点火过程中密实的火药床运动后最极限状态为接近达到药粒不破碎的极限装填密度。

(8) 忽略气体的粘性耗散及对管壁的热损失。

(9) 假设燃气服从诺贝尔-阿贝尔状态方程。

(10) 对于相间阻力、颗粒间应力、相间热交换及化学反应等微观过程,假定作为两相当地平均状态的函数,并用经验方程处理。

将控制方程即气相质量、动量、能量守恒方程,固相质量、动量守恒方程写成守恒形式^[1-3,7]:

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

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

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \dot{m}_c - \dot{m}_g \\ -f_s + \dot{m}_c u_p - \dot{m}_g u_g + p \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ -Q_p - f_s u_p + \dot{m}_c \left(e_p + \frac{p}{\rho_p} + \frac{u_p^2}{2} \right) - \dot{m}_g \left(e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{u_g^2}{2} \right) - p \frac{\partial \varphi}{\partial t} \\ -\dot{m}_c - \dot{m}_p \\ f_s - \dot{m}_c u_p - \dot{m}_p u_p - p \frac{\partial \varphi}{\partial x} \end{bmatrix}$$

式中： φ 为气相空隙率； ρ_g 、 ρ_p 分别为气相与固相的密度； u_g 、 u_p 分别为气固两相的速度； \dot{m}_c 、 \dot{m}_g 分别表示火药燃烧气体生成量和流出量； p 为气相压力； f_s 为相间阻力； e_g 、 e_p 分别为气固相比内能； Q_p 表示相间热传递量； \dot{m}_p 为固相流出量； R_p 为颗粒间应力。

关于点火管的辅助方程，限于篇幅不再列出，详细可见文献[1-3]。

2.2 数值模拟结果

对上述方程组，采用 Mac Cormack 预估校正二步显格式编制了计算程序，并对点火实验采用的结构及装填条件进行了模拟计算。图 3 给出了距点火端 2 个不同位置压力随时间变化的计算结果和实验

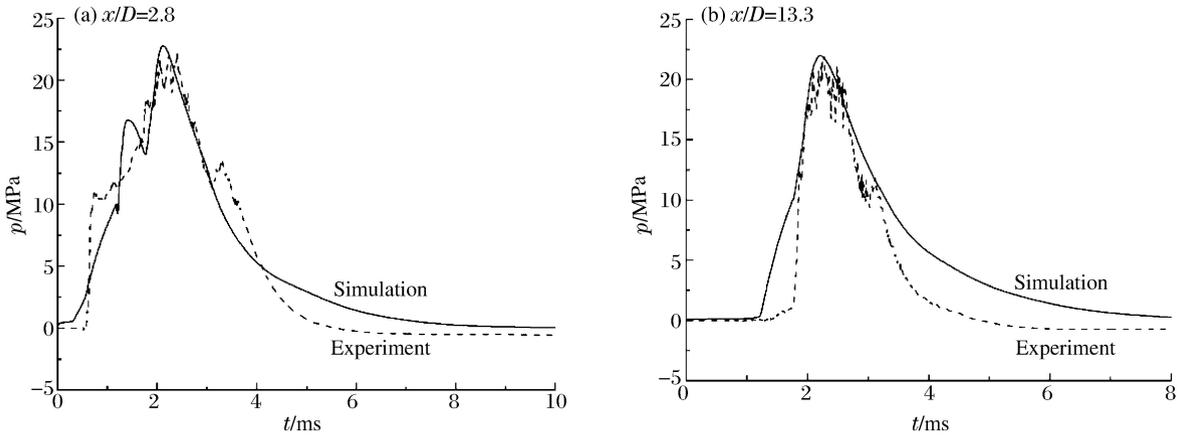


图 3 压力的计算结果和实验结果

Fig. 3 The simulational and experimental results of pressures

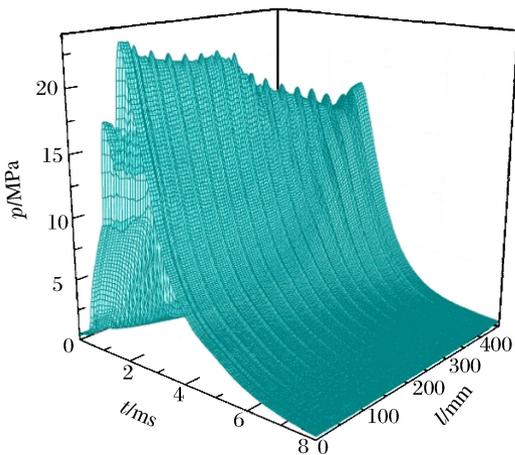


图 4 燃气压力沿点火管轴向的分布

Fig. 4 Along-axis distributions of pressure in ignier tube

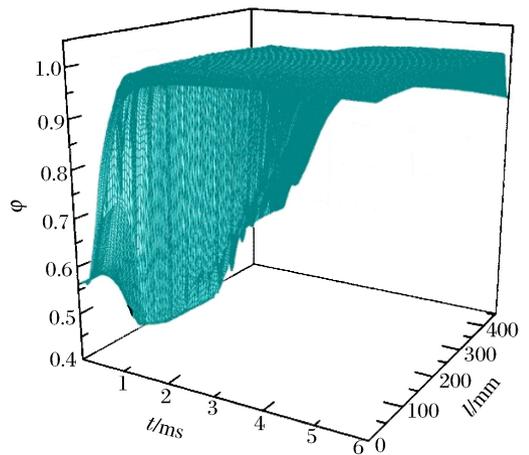


图 5 空隙率沿点火管轴向的分布

Fig. 5 Along-axis distributions of void ratio in ignier tube

结果,图4给出了不同时刻燃气压力沿点火管轴向的分布图,图5给出了不同时刻气相空隙率沿点火管轴向的分布图。

由图3~4可以看出,管内压力达到破膜压力前,压力上升平稳,无异常压力波动,达到10 MPa的破膜压力后,虽然有气固两相的流出,但是管内压力由于点火药的燃烧总体仍然保持继续增长的状态,直至达到最大压力;由于管内外压力差逐渐增大,气固两相的流出逐渐增多,使得压力最终平稳下降。由图4可以看出,破膜后由于有孔处有流出,使有孔处比无孔处压力略低,因此同一时刻整个管内压力处于锯齿形分布。由图3可以看出,计算结果与实验结果良好符合,说明计算模型能够准确描述点火管内的实际物理化学过程,计算程序参数取值合理,该计算程序可为此类点火管各种结构尺寸及装填条件下的点传火性能分析及优化计算,提供充分的理论依据和方法。

由图5可以看出,在1 ms左右空隙率在点火管中部一段明显减小。通过分析可以得到,点火具作用后点火能量将火药颗粒推向另外一端,在密实火药床装填条件下,点火管内一部分火药颗粒有堆积现象,造成在此阶段压力上升迅速(见图4),但较为合理的小孔分布能够及时泄压,使堆积现象并未明显影响以后的点传火过程。由整个点火过程可知,该结构和装填条件下的点火管存在火药堆积现象,传火通道不畅通,这对传火时间存在一定影响,并且影响点火一致性,所以此结构的点火管不是最优设计。下一步的工作可利用计算模拟对大长径比点火管高密实火药床装填条件下的点传火特性作进一步的研究,分析影响点传火性能的主要因素,得到符合工程背景要求的、更优化的结构设计。

3 结束语

针对设计的大长径比、高装填密度的点火管完成了点传火实验,通过对比实验结果和数值模拟结果可知,本文中所建立的计算模型可以准确描述点火管内的火药燃烧、气固两相的流动等化学物理过程,计算模块参数设置合理,可以为此类点火管各种结构尺寸及装填条件下的点传火性能分析及优化计算提供充分的理论指导。在以后的研究中,可利用计算模拟对传火孔径、首孔高度、小孔分布等主要特征量对大长径比点火管在高密实火药床下点传火性能的影响,作进一步的分析,优化设计满足工程要求的点火管结构。

参考文献:

- [1] 翁春生,王浩. 计算内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 袁亚雄,张小兵. 高温高压多相流体动力学基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [3] 周彦煌,王升晨. 实用两相流内弹道学[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.
- [4] 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,2003,15(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, 2003,15(1):83-86.
- [5] 李锋,张振铎. 密实火药床的点传火技术研究[J]. 工程热物理学报,1994,15(2):227-230.
Li Feng, Zhang Zheng-duo. The research of ignition and its translation technology in consolidated propellant bed [J]. Journal of Engineering Thermo Physics, 1994,15(2):227-230.
- [6] 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 Hao, Liang Shi-chao, Zhang Ying, et al. Study of flame propagation characteristics in fore transferring tube [J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(1):66-71.
- [7] 王颖泽,张小兵. 点传火过程中火药颗粒热应力的计算分析[J]. 火炸药学报,2009,32(3):66-70.
Wang Ying-ze, Zhang Xiao-bing. Calculation analysis of thermal stress of propellant grain in ignition process[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009,32(3):66-70.
- [8] 王沛,陈朗,冯长根,等. 火炮同步点火管的燃烧实验和数值模拟[J]. 火炸药学报,2007,30(5):66-69.
Wang Pei, Chen Lang, Feng Chang-gen, et al. Experiments and numerical simulation of isochronous core igniter [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007,30(5):66-69.

Two-phase flow in ignition process of consolidated charge bed within a large length-to-diameter ratio igniter tube^{*}

Wang Shan-shan¹, Zhang Yu-cheng², Wang Hao¹, Zhang Bo-zi¹, Tao Ru-yi¹

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

2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: A central igniter tube was designed according to engineering requirements and firing tests were completed. By considering the large length-to-diameter ratio and consolidated charge of the designed igniter tube, a one-dimensional, two-phase flow model was developed to numerically simulate the combustion process of the gas-solid two-phase flow. The simulated results are consistent with the measured ones. So the developed two-phase flow model can correctly describe the actual physical process and the parameters used in the program are reasonable. The calculation program can provide a theoretical guidance for the ignition performance analysis and optimal design of the igniter tube in different construction measurements and charge conditions. The ignition performances of the igniter tube were also analyzed on the basis of the computational results, which providing reference for the optimal design in further work.

Key words: fluid mechanics; ignition performance; two-phase flow; igniter tube

* Received 11 April 2012; Revised 12 October 2012

Corresponding author: Wang Shan-shan, wss19851026@aliyun.com.cn

(责任编辑 丁峰)

本刊关于稿件、版权等声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中,作者需注意如下问题:

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果,无抄袭,无一稿多投,未在国内外公开发表过。
2. 稿件无政治错误,不涉及保密和拟申请专利的内容,已经过作者单位保密审查。
3. 作者署名和排序无异议,单位署名和排序无争议,且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中,如有作者或单位署名变更,需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。
4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时,编辑部将在4个月内反馈处理结果。若超过4个月未答复的,作者有权另行处理稿件,但需事先通知编辑部。
5. 对录用的稿件,在尊重稿件内容的基础上,编辑部有权作必要的修改和删减,按规定进行标准化和规范化。
6. 稿件录用后,稿件的所有出版版权归编辑部。
7. 稿件发表后,编辑部赠送样刊,并一次性付给作者稿酬及版权转让费。