

### 一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证

焦旭英, 严蕊, 周敬, 汤林静, 杨伟涛, 张玉成, 付小龙

#### 引用本文:

焦旭英, 严蕊, 周敬, 等. 一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 183-187.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. [船用主泵卡轴特性实验与应用](#)

引用本文: 李伟通, 于雷, 李攀, 等. 船用主泵卡轴特性实验与应用[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 48-52.

#### 2. [基于粒子滤波的非线性退化设备剩余寿命自适应预测](#)

引用本文: 王玺, 周薇, 胡昌华, 等. 基于粒子滤波的非线性退化设备剩余寿命自适应预测[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 41-47+57.

#### 3. [基于多岛遗传算法的12.7 mm枪管结构优化](#)

引用本文: 王力, 杨臻, 蔡翹楚, 等. 基于多岛遗传算法的12.7 mm枪管结构优化[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 53-57.

#### 4. [12.7 mm动能弹侵彻装甲钢板的结构响应特性研究](#)

引用本文: 赵太勇, 王维占, 赵军强, 等. 12.7 mm动能弹侵彻装甲钢板的结构响应特性研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 146-149.

#### 5. [弹道修正引信隔转平台抗高过载优化设计](#)

引用本文: 李鑫鹏, 郭朝勇, 孔刚鹏, 等. 弹道修正引信隔转平台抗高过载优化设计[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 69-75.

# 一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证

焦旭英, 严蕊, 周敬, 汤林静, 杨伟涛, 张玉成, 付小龙

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

**摘要:**针对颗粒模压发射药装药点传火管的点传火过程,建立了两相流模型,预测了点传火特性参数范围,结合点传火性能模拟实验和颗粒模压发射药装药实验证明了模型的准确性。结果表明,合理的点传火特性参数范围为 $L_1: 25 \sim 30$  mm、 $D: 4.0 \sim 5.0$  mm、 $d: 2.5 \sim 3.5$  mm、 $S: 70.65 \sim 84.78$  mm<sup>2</sup>、 $w_i: 1.5 \sim 1.7$  g;特性参数为 $L_1 = 30$  mm、 $D = 5$  mm、 $d = 3$  mm、 $S = 84.78$  mm<sup>2</sup>、 $w_i = 1.5$  g点传火管内最大压力的计算值与实验值误差为4.2%,应用于颗粒模压发射药装药点传火系统时点火延长时间为2.02 ms,最大负压差为6.04 MPa,点传火性能稳定。本研究所建立的模型能够较为准确地反映传火管内的压力波动,较好地指导颗粒模压发射药装药点传火系统设计。

**关键词:**发射药;点传火;传火管;两相流

**本文引用格式:**焦旭英,严蕊,周敬,等.一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证[J].兵器装备工程学报,2020,41(10):183-187.

**Citation format:**JIAO Xuying, YAN Rui, ZHOU Jing, et al. Theoretical Estimation and Experimental Verification of Characteristics Parameters of Igniter[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(10): 183-187.

中图分类号:O359

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)10-0183-05

## Theoretical Estimation and Experimental Verification of Characteristics Parameters of Igniter

JIAO Xuying, YAN Rui, ZHOU Jing, TANG Linjing,  
YANG Weitao, ZHANG Yucheng, FU Xiaolong

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The two-phase flow model was established which described the process of ignition for Grain-molded gun propellant. The reasonable range of characteristic parameters of ignition was estimated theoretically, and the accuracy of the model was verified. Results show that the reasonable range of characteristic parameters of ignition are  $L_1: 25 \sim 30$  mm,  $D: 4.0 \sim 5.0$  mm,  $d: 2.5 \sim 3.5$  mm,  $S: 70.65 \sim 84.78$  mm<sup>2</sup>,  $w_i: 1.5 \sim 1.7$  g. The characteristic parameters with good performance were selected for simulation and experimental verification. The calculation error of the maximum pressure in tube is more than 4.2%, ignition delay of charge is 2.02 ms, and the maximum negative pressure is 6.04 MPa. The model can accurately reflect the pressure fluctuation in the igniter, and can be used to guide the design of igniter of the Grain-molded gun propellant.

**Key words:** ignition and flame propagation; igniter; igniting primer; two-phase flow

随着现代军事战争的升级,武器炮口动能面临更高的需求<sup>[1-2]</sup>。颗粒模压发射药,以粒状高能硝胺发射药为基药

(堆积密度 $0.95$  g/cm<sup>3</sup>),采用高分子钝感剂、含能黏结剂进行钝感、包覆技术处理,最后经过密实化压模处理成型,获得

收稿日期:2019-12-06;修回日期:2020-01-15

作者简介:焦旭英(1987—),女,助理研究员,主要从事发射药技术研究,E-mail:jiaoxuying1987@163.com。

具有高密度特性(药柱压实密度  $1.25 \text{ g/cm}^3$ )、高燃烧渐增性的样品。相比于粒状自由装填,颗粒模压发射药单位容积能量密度提高 20%~40%,能够在最大膛压不变的条件下实现装药量增多<sup>[3-4]</sup>,满足新时期军事武器高炮口动能的需求。

颗粒模压发射药的燃烧过程包括黏结剂燃烧、药柱解体、基药燃烧三个阶段,对点传火系统具有较为严格的要求。相比传统的点火药包形式,一种新型点传火系统(见图 1)能够将颗粒模压发射药装药的点火延迟时间缩短 15.2%,膛内最大负压差降低 8.41 MPa,装药床受到的最大挤压力减小 11.93 MPa,具有良好的点传火性能<sup>[5]</sup>。该点传火系统采用大长径比的点传火管(见图 2)、点火药封装于硝基软片管的新颖装填方式,装填密度高,传火速度达到  $214 \text{ m/s}$ <sup>[6]</sup>,较高的火焰传播速度赋予其良好的点传火输出特性,为颗粒模压发射药装药燃烧提供了优质的输入能源。目前,子母弹抛撒专用金属传火管、中心炸管等<sup>[7-13]</sup>方面开展了一些大长径比点传火管仿真模拟研究,仍缺乏针对颗粒模压发射药装药点传火管相关特性参数的设计、选取的仿真技术研究。

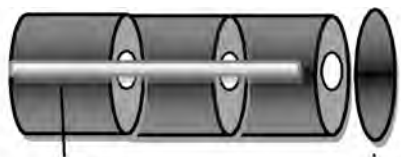


图 1 点传火系统示意图

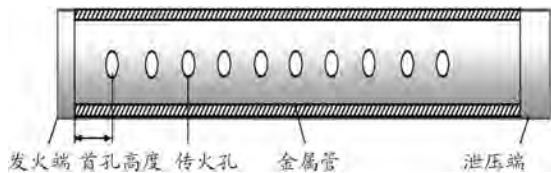


图 2 点传火管结构示意图

本研究通过针对颗粒模压发射药点传火管的点传火过程,建立两相流模型,对合理的点传火特性参数范围进行理论预估,结合仿真和实验验证两种手段进行点传火性能对比,为颗粒模压发射药点传火系统设计与优化提供理论技术支持。

## 1 点传火模型

### 1.1 基本假设

根据大长径比点传火管的火焰传播物理模型,结合颗粒模压发射药特点,建立点传火管内火药燃烧、气固两相流动的一维两相流数学模型,做出如下基本假设:

① 由点火药颗粒群组成的固相连续地分布在气相中,把点火药颗粒群当作一种具有连续介质特性的拟流体来处理;② 传火管的工作过程看作是一维非常两相流问题;③ 以点火药粒的表面温度建立着火准则,当点火药粒表面温度

达到着火温度时,即被点燃;④ 认为点火药粒是不可压缩的,并忽略药粒大小的实际分布,以点火药粒当量球半径代替药粒的几何尺寸;⑤ 传火管内点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;⑥ 单个点火药颗粒服从几何燃烧定律和指数燃烧规律;⑦ 燃气服从诺贝尔-阿贝尔状态方程;⑧ 忽略气体对壁面的热损失和气体的粘性耗散系数;⑨ 点火药燃烧产物都是气相,通过比热比  $\gamma$  修正燃气混合物的热力学参量;⑩ 相间阻力、热传导等均作为两相当地平均状态的函数,并由经验方法确定。

### 1.2 守恒方程

根据以上假设,气相质量、动量、能量守恒方程,固相质量、动量守恒方程如下:

气体质量守恒方程

$$\frac{\partial(\varphi\rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi\rho_g u_g)}{\partial x} = \dot{m}_c - \dot{m}_g$$

气体动量守恒方程

$$\frac{\partial(\varphi\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi\rho_g u_g^2)}{\partial x} + \varphi \frac{\partial p}{\partial x} = -f_s + \dot{m}_c u_p - \dot{m}_g u_g$$

气体能量守恒方程

$$\frac{\partial[\varphi\rho_g(e_g + \frac{u_g^2}{2})]}{\partial t} + \frac{\partial[\varphi\rho_g u_g(e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{u_g^2}{2})]}{\partial x} + p \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -Q_p - f_s u_p + \dot{m}_c(e_p + \frac{p}{\rho_p} + \frac{u_p^2}{2}) - \dot{m}_g(e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{u_g^2}{2})$$

固相质量守恒方程

$$\frac{\partial[(1-\varphi)\rho_p]}{\partial t} + \frac{\partial[(1-\varphi)\rho_p u_p]}{\partial x} = -\dot{m}_c - \dot{m}_p$$

固相动量守恒方程

$$\frac{\partial[(1-\varphi)\rho_p u_p]}{\partial t} + \frac{\partial[(1-\varphi)\rho_p u_p^2]}{\partial x} + (1-\varphi) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial[(1-\varphi)R_p]}{\partial x} = f_s - \dot{m}_c u_p - \dot{m}_p u_p$$

辅助方程包括状态方程、气体内能、气体总焓、燃烧速率方程、燃烧释放能、相间传热方程、颗粒表面温度、颗粒间应力、相间阻力、单位体积、时间内黑火药燃烧气体生成量、传火孔流出气体质量以及固相流出质量等,这里不再详细阐述。

## 2 点传火特性参数理论预估

根据以上物理数学模型,采用 Mac Cormack 算法编制了点传火管的一维两相流模型程序,计算喷火孔处压力随时间的变化曲线,方便后续的点传火管仿真优化。

### 2.1 结构参数对点传火过程的影响

分别以首孔高度( $L_1$ )、传火管内径( $D$ )、传火孔直径( $d$ )和传火总面积( $S$ )为变量,计算长度为 120 mm 的点传火管同一位置处(距发火端 30 mm)不同时刻的压力分布,以研究结构参数对点传火管传火性能的影响。

1) 首孔高度

改变首孔高度,传火总面积及其余结构参数不变( $D = 5 \text{ mm}$ 、 $d = 3 \text{ mm}$ 、 $S = 84.78 \text{ mm}^2$ 、 $w_i = 1.5 \text{ g}$ ),分析首孔高度对点传火过程的影响。

图3(a)反映了点传火管同一位置在不同 $L_1$ 下的压力分布( $p-t$ ), $L_1$ 越大,最大压力越大,破孔后得到缓慢释放。 $L_1 = 25 \text{ mm}$ 和 $L_1 = 30 \text{ mm}$ 的计算曲线在 $t \leq 1.5 \text{ ms}$ 时间段内近乎重合,最大压力为41 MPa,后期压力分布趋于一致,点传火性能稳定。 $L_1$ 过小时,提早泄压导致管内起始压力不足,降低火焰传播速度。 $L_1$ 过大时,最大压力过高,泄压滞后,不利于火焰稳定传播。 $L_1$ 决定了点火源沿轴向的分布均匀程度, $L_1$ 适宜范围为25~30 mm。

#### 2) 传火管内径

设定首孔高度、传火总面积不变( $L_1 = 30 \text{ mm}$ 、 $S = 84.78 \text{ mm}^2$ 、 $w_i = 1.5 \text{ g}$ ),改变传火管内径,分析传火管内径对点传火过程的影响。

图3(b)反映了不同 $D$ 下点传火管同一位置处的压力分布( $p-t$ )。4.0 mm $\leq D \leq 5.0 \text{ mm}$ 时,最大压力能够维持在40~50 MPa之间,压力释放较为规律,点传火性能稳定。 $D$ 过小,最大压力高达80 MPa左右,并出现60 MPa反弹压力,压力释放不规律导致中后部建压困难、压力过低,火焰传播不稳定,影响试验安全。 $D$ 过大,最大压力仅为30 MPa左右,计算曲线泄压段波动大,影响管内气体正常流动,火焰传播动力的削弱将使火焰传播速度明显下降。传火管内径影响管内压力分布、火焰传播, $D$ 的适宜范围为4.0~5.0 mm。

#### 3) 传火孔直径

设定首孔高度、传火管内径( $L_1 = 30 \text{ mm}$ 、 $D = 5 \text{ mm}$ 、 $w_i = 1.5 \text{ g}$ ),改变传火孔直径,分析传火孔直径对点传火过程的影响。

图3(c)反映了在不同 $d$ 下点传火管同一位置处的压力分布( $p-t$ ), $d$ 越大,最大压力越小。可以看出,2.5 mm $\leq d \leq 3.5 \text{ mm}$ 时,最大压力在40~50 MPa之间压力释放较为平稳,压力波阵面、火焰波阵面传播稳定,点传火性能稳定。 $d$ 过小,计算曲线呈现异常波动,最大压强出现在破孔之后,延迟了管内压力峰值的出现,火药粒不易喷出,容易出现管内火焰传播不畅现象。传火孔直径影响着单位时间、单位体积内从传火管流出的气体质量, $d$ 的适宜范围为2.5~3.5 mm。

#### 4) 传火总面积

设定首孔高度、传火管内径和传火孔排布方式( $L_1 = 30 \text{ mm}$ 、 $D = 5 \text{ mm}$ 、 $d = 3 \text{ mm}$ 、 $w_i = 1.5 \text{ g}$ ),改变传火孔数量,分析传火总面积对点传火过程的影响。

图3(d)反映了在不同 $S$ 下点传火管同一位置处的压力分布( $p-t$ ), $S$ 越大,最大压力变化甚微,稳定维持在45 MPa左右,破孔后缓慢释放。70.65 mm $^2 \leq S \leq 84.78 \text{ mm}^2$ ,压强变化规律一致,压力释放过程比较均匀。 $S$ 过小,管内压力释放过程出现了2次异常波动,不利于维持点火过程的稳定性。 $S$ 过大, $p-t$ 下降速率过快,管内压力释放过快,很难保证中后部建压。传火总面积影响管内气体压力的大小及分布状况, $S$ 的适宜范围为70.65~84.78 mm $^2$ 。

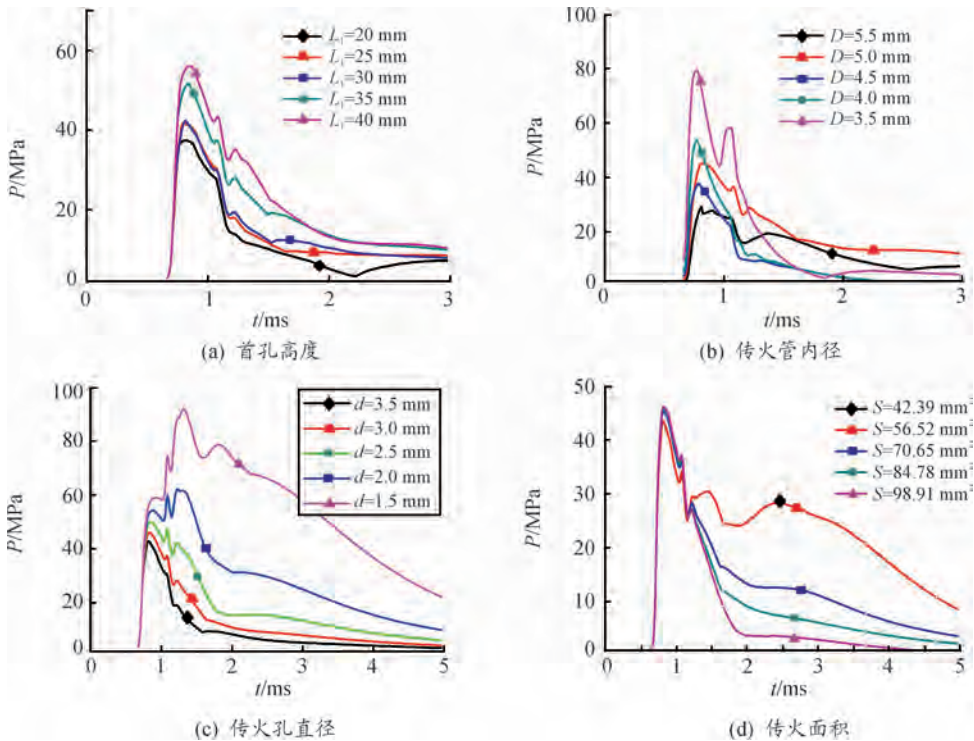


图3 结构参数对点传火管同一位置处压力分布的影响

## 2.2 点火药量

设定结构参数( $L_1 = 30 \text{ mm}$ 、 $D = 5 \text{ mm}$ 、 $d = 3 \text{ mm}$ 、 $S = 84.78 \text{ mm}^2$ ),改变点火药量装填密度,分析点火药量对点传火过程的影响。

图4反映了在不同 $w_i$ 下点传火管同一位置处的压力分布( $p-t$ ), $w_i$ 越大,最大压力越大,破孔后得到缓慢释放。在 $1.5 \text{ g} \leq w_i \leq 1.7 \text{ g}$ 时,最大压力维持在45 MPa左右,计算曲线走势相近,点传火性能稳定。 $w_i$ 过小,点火药总能量低,点火压力下降,最大压强不足以引燃主装药。 $w_i$ 过大,点火药总能量过高,点火药粒不易喷出,产生过高的管内压力且呈现明显的振荡变化,影响点传火管管材安全。点火药量决定了点火药总能量, $w_i$ 的适宜范围为 $1.5 \sim 1.7 \text{ g}$ 。

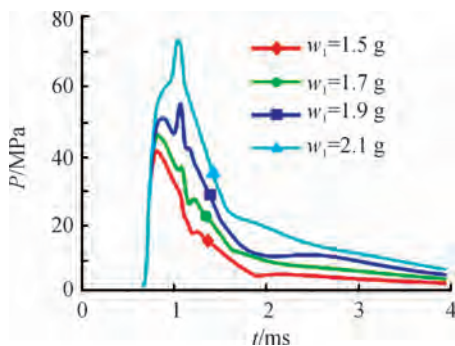


图4 点火药量对点传火管同一位置处压力分布的影响曲线

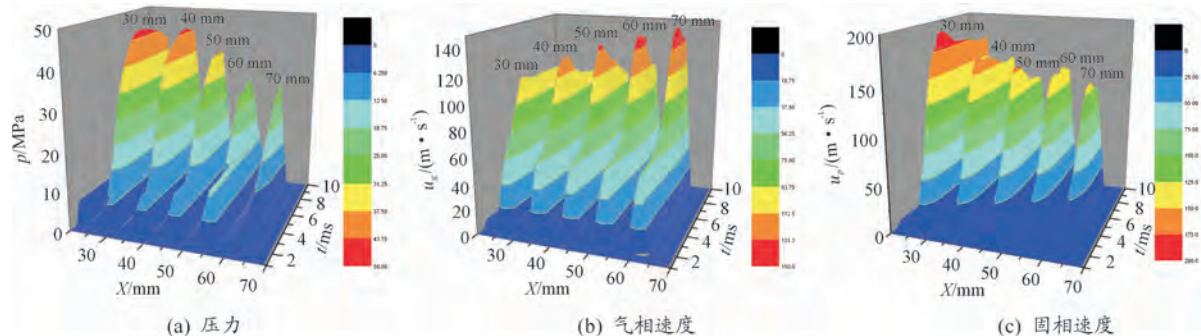


图5 不同位置处压力、速度特性分布的仿真结果

## 3.2 点传火性能模拟实验

采用点传火模拟实验装置<sup>[6]</sup>对上述选定点传火管进行点传火性能模拟实验,利用压电传感器测量传火管内的压力变化情况。如图6为试验与仿真计算的压力-时间曲线,其压强变化规律一致,最大压力的计算值约为45.9 MPa、试验值约为47.9 MPa,差值为2 MPa,精度误差约为4.2%,结果吻合较好,表明仿真计算能够较为准确地模拟传火管中管压随时间的变化。分析认为,传火管内的点火药被点燃后,管内压力在0.3 ms内迅速上升达到压力最大值,破孔后管内的点火药气体从传火孔向外流出,压力得到释放。由于模型计算的小孔流量系数与试验过程存在一定的偏差,导致在压

因此,合理的点传火特性参数理论预估范围为: $L_1: 25 \sim 30 \text{ mm}$ 、 $D: 4.0 \sim 5.0 \text{ mm}$ 、 $d: 2.5 \sim 3.5 \text{ mm}$ 、 $S: 70.65 \sim 84.78 \text{ mm}^2$ 、 $w_i: 1.5 \sim 1.7 \text{ g}$ 。

## 3 点传火性能实验验证

### 3.1 仿真实验

选取预估性能优良的点传火管参数进行仿真实验,选取参数为: $L_1 = 30 \text{ mm}$ 、 $D = 5 \text{ mm}$ 、 $d = 3 \text{ mm}$ 、 $S = 84.78 \text{ mm}^2$ 、 $w_i = 1.5 \text{ g}$ 。

选定点传火管的不同位置(30、40、50、60、70 mm)进行压力、速度等特性随时间变化的仿真实验计算,仿真结果如图5所示,最大压力沿着点传火管轴向逐渐降低(由45 MPa降低至30 MPa),气相速度沿着点传火管轴向逐渐增大(由112 m/s增大至142 m/s),固相速度沿着点传火管轴向逐渐降低(由185 m/s降低至130 m/s)。可以看出,对于同一位置,点火药被点燃后,管内压力、气相速度以及固相速度增大,破孔后管内压力缓慢释放、气相速度和固相速度下降。对于不同位置,随着点火药燃烧产生的压力波阵面、火焰波阵面传播,从传火管的前端至后端管内的压力逐渐减小且后部建压迟缓,气相速度不断增大且后部达到最大值,固相速度不断减小。可见,本文设计的点传火模型能够初步解析点传火过程中的压力分布规律,作为发射装药的能量输入。

力释放前期计算曲线略高于试验曲线。

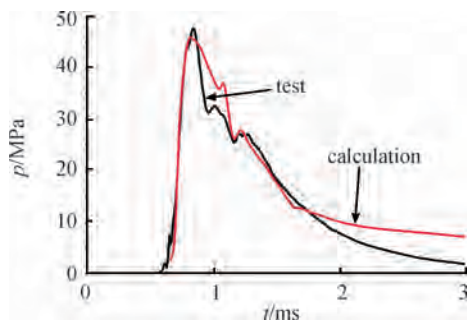


图6 仿真计算与试验 $p-t$ 曲线(30 mm处)

### 3.3 颗粒模压发射药装药实验

将上述点传火管应用于颗粒模压发射药装药的点传火系统,采用 30 mm 口径的高压模拟火炮进行装药弹道实验,用电传感器测量膛底与弹底的压力,结果如图 7 所示,其中  $p_b$  代表膛底压力、 $p_m$  代表弹底压力、 $\Delta p_i$  代表膛底与弹底的压力差。从图 7 可以看出,点火延长时间为 2.02 ms,最大负压差为 6.04 MPa,表明该点传火系统的膛内压力波较小,点火延长时间短,弹底与膛底间能够迅速建立压力平衡,点火一致性好。因此,该点传火管可以较好地应用于颗粒模压发射药装药点传火系统。

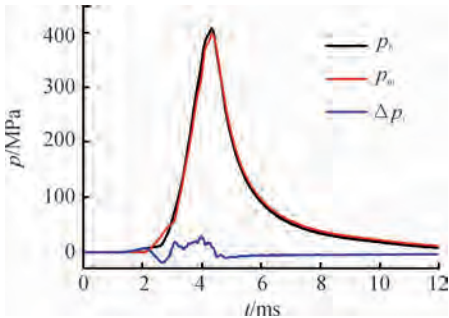


图 7 装药内弹道试验  $p-t$  曲线

## 4 结论

1) 建立了中心管式传火管点传火过程的一维两相流模型,基于 Mac Cormack 格式理论预估了点传火性能优良的点传火特性参数范围:  $L_1$ : 25 ~ 30 mm、 $D$ : 4.0 ~ 5.0 mm、 $d$ : 2.5 ~ 3.5 mm、 $S$ : 70.65 ~ 84.78 mm<sup>2</sup>、 $w_i$ : 1.5 ~ 1.7 g。

2) 选取预估性能优良的参数进行仿真与实验验证,选取参数为:  $L_1 = 30$  mm、 $D = 5$  mm、 $d = 3$  mm、 $S = 84.78$  mm<sup>2</sup>、 $w_i = 1.5$  g。验证实验表明,点传火管内压力最大值计算误差不高于 4.2%,点传火系统的点火延长时间为 2.02 ms,最大负压差为 6.04 MPa,即点传火模型能够较为准确地预测传火管测试孔位置处的压力变化过程,点传火管可以较好地应用于颗粒模压发射药装药点传火系统。

## 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.

- [2] 王泽山,徐复铭. 火药装药设计原理[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
- [3] 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.
- [4] 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(3):76-79.
- [5] 焦旭英,杜江媛,张玉成,等. 颗粒模压发射药装药的点传火性能[J]. 含能材料,2014,22(6):845-847.
- [6] 焦旭英,张玉成,杜江媛,等. 大长径比点传火管的点传火性能[J]. 火炸药学报,2013,36(1):78-81.
- [7] Dahlberg Johan. New low-sensitivity modular charge propellant based on GUDN[C]//27rd Int Conf of ICT. Karlsruhe:ICT,2006.
- [8] 深瑞琪,戴实之,叶迎华,等. 炮用点火系统的内弹道点火性能评价[J]. 火工品,1996(3):1-6.
- [9] 赵宝明,郭丹,辛凯迪,等. 环切杆状发射药的点传火试验研究[J]. 爆炸器材,2017,46(4):30-33.
- [10] 王珊珊,王浩,张博孜,等. 大长径比、高密实火药床点火管点传火特性的影响因素[J]. 爆炸与冲击,2014,34(4):489-494.
- [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过程两相流的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2013,33(4):444-448.
- [12] 郭梦婷,陶如意,李子杰. 大长径比中心炸管式抛撒定容阶段两相流模拟[J]. 弹道学报,2017,29(1):68-72.
- [13] 姬晋卿,王浩. 大点火具能量释放过程数值仿真分析[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(10):63-68.
- [14] 任慧,乔小晶,焦清介,等. 提高点火管点火性能的一种方法[J]. 含能材料,2001,9(4):168-171.
- [15] 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.

科学编辑 程李东(北京理工大学博士研究生)

责任编辑 杨梅梅