

文章编号:1006-9941(2020)10-0969-06

# 基于多孔介质模型的点火火焰在发射药颗粒床中的传播特性

刘承,陶如意,薛绍,王浩

(南京理工大学能源与动力工程学院,江苏南京210094)

**摘要:** 为了研究中心传火管点传火结构下点火药燃烧后产生的火焰在发射药药粒填充床中的传播特性,使用多孔介质模型模拟发射药药室颗粒填充床,并采用N-S方程模型对点火药燃烧产生的高温高速气体在发射药颗粒床中的流动传播过程进行数值仿真计算,并以温度场的等温面传播等效于火焰阵面传播,仿真数据与试验数据进行对比。结果表明,在密实装药床下,点火火焰传播过程中,以等温面等效于火焰阵面,火焰传播速度的仿真计算值为 $91\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与试验测得 $96\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 较为接近;仿真得到的高温火焰气体传播的温度场云图与试验拍摄的火焰传播图像具有较好的一致性;采用多孔介质模型计算所得的膛内3处测压孔的压力数据与试验测得的压力数据吻合度较高。

**关键词:** 火焰传播;多孔介质;等温面;数值仿真

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019290

## 1 引言

点火过程是影响火炮武器成功发射的因素之一,火炮膛内点传火过程始于点火药被点燃,点火药点燃后产生的高温气体喷入主装药药室引燃主装药,主装药顺利燃烧并产生高压推动弹丸成功发射。主装药能否被顺利引燃,与点火药燃烧产生的气体在药床中的传播过程有关,点火药燃气的传播速度影响主装药点燃的一致性,压力场影响主装药的受力与结构变化<sup>[1-4]</sup>,因此研究点火药燃烧产生的气体在药床中的传播规律尤为重要。针对不同口径的火炮,点传火结构也不尽相同,小口径火炮装药量少,空隙率高,因此多采用底部点火结构,而大口径武器装药量大,大多采用管状药束,因而多采用中心传火管点传火结构<sup>[5]</sup>。

王浩等人<sup>[6]</sup>在1997年利用光导纤维测量了传火管中火焰的传播特性,发现火焰阵面落后于压力阵面的传播,并验证了光导纤维测试的可行性,但受限于技

术,当时无法进行直接观测,并且只测试了传火管中的火焰,没有深入到发射药药床当中,因此对于点火药燃烧后火焰在发射药药床中传播需进行进一步研究。朱跃龙<sup>[7]</sup>在2013年采用了底部点火方式研究了底火能量的输出特性,但没有针对特定药床进行研究,没有将点火能量与发射药床相结合进行探讨。可见,传统的点传火研究未针对于传火过程,大多将发射药的燃烧同时考虑在点传火过程中;对点火药的输出能量特性研究较为深入,但对点火药燃烧产物在药床中的传播过程研究较少,且对可视化试验方法的探究较少。

而现代火炮武器以中大口径居多,本研究基于105 mm口径火炮膛内点传火,发射药为颗粒药,选用中心点传火方式进行研究,通过仿真计算模拟点火药燃烧产生的高温气体通过中心传火管上的传火孔流入药室并在药室内的传播过程,获得药室内压力变化曲线、温度场分布及等温面传播速度,并与点传火试验相应数据进行对比,验证仿真计算模型的准确性与有效性。

## 2 中心点传火结构及试验装置

试验所用的点传火系统如图1所示,主要由传火管及药室组成,传火管壁上共有18个传火孔,等距交叉分布,首孔圆心距药室左端为130 mm。传火管内

收稿日期:2019-11-13;修回日期:2019-12-26

网络出版日期:2020-08-13

作者简介:刘承(1994-),男,硕士生,主要从事兵器发射理论与技术研究。e-mail:lcheng@qq.com

通信联系人:陶如意(1978-),女,副研究员,主要从事兵器发射理论与技术研究。e-mail:Tao801801@163.com

引用本文:刘承,陶如意,薛绍,等.基于多孔介质模型的点火火焰在发射药颗粒床中的传播特性[J].含能材料,2020,28(10):969-974.

LIU Cheng, TAO Ru-yi, XUE Shao, et al. The Propagation Characteristics of Ignition Flame in Propellant Particle Bed Based on Porous Media Model[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(10):969-974.

装2#小粒黑火药充填的点火药袋,通过电点火方式击发底火并引燃点火药袋,点火药袋燃烧后,火焰由传火孔喷入药室,在药室中传播。药室中充填假药粒用以模拟发射药颗粒床。图2为试验装置图,试验装置主体为金属筒状结构,左端设置底火装置,中间嵌套耐高压玻璃管,玻璃管的目的在于保证试验的可视化,装置中部开设矩形窗口,通过高速摄像仪器拍摄点火火焰在药粒床中的传播。装置顶端开设3个测压孔安装压力传感器,用以记录该位置的压强变化,开孔位置从左至右依次距药室左端距离为40,247.5,455 mm,并将测压孔从左至右标记为1#、2#、3#。右端端盖设有泄压膜片。

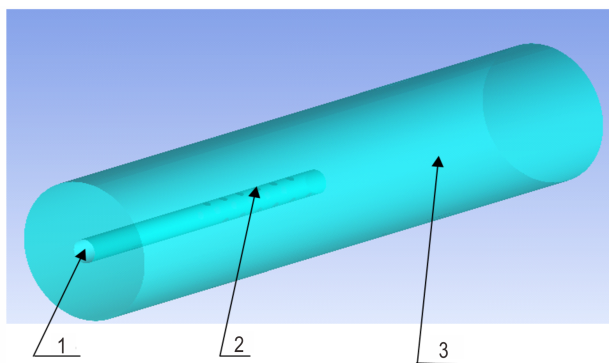


图1 药室几何模型

1—传火管,2—传火孔,3—药室

Fig.1 Geometric model of gun propellant chamber

1—the fire tube,2—the fire hole,3—propellant chamber

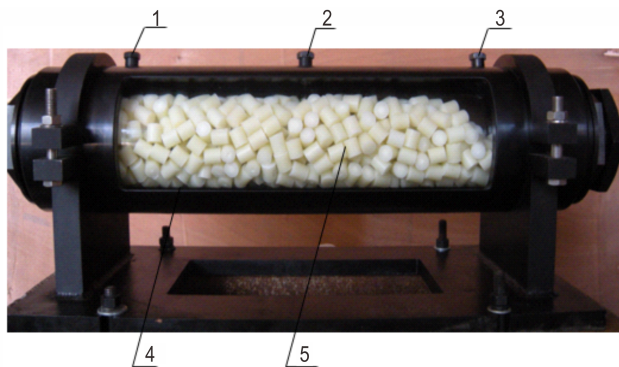


图2 试验装置照片

1—1#测压孔,2—2#测压孔,3—3#测压孔,4—透明窗口,5—假药粒

Fig.2 Experimental device photo

1—1# pressure hole,2—2# pressure hole,3—3# pressure hole,4—transparent window,5—false gun propellant pellets

本研究中,传火管中的点火药为30 g的2#小粒黑火药,发射药药室中的假发射药药粒装填量为3 kg,采

用自然堆积方式进行装填,如图2所示,药粒基本装满药室。使用高速摄像机对点火火焰在颗粒药床内的传播过程进行拍摄。从触发点火信号到药室内压力达到右端泄压膜片临界值而破膜的时间约为3.6 ms,因此仿真计算过程只计算这3.6 ms内的火焰传播过程,破膜后的变化不进行计算。

### 3 数值仿真计算模型

#### 3.1 多孔介质模型

发射药药床为发射药药粒堆积形成的填充床,对颗粒填充床建立相应实际的几何模型并生成计算域网格难度较大,采用多孔介质模型进行仿真计算,可对填充床模型进行合理简化。多孔介质模型并未在流体域中生成类似的固体骨架结构,而是在动量方程中添加阻力源项<sup>[8]</sup>,模拟颗粒对流体流动的阻碍作用,在动量方程上的表现形式为:

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} u v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j\right) \quad (1)$$

式中, $S_i$ 为第*i*( $x, y, z$ )方向的动量方程阻力源项,Pa; $D$ 和 $C$ 是规定的矩阵, $v$ 为速度,单位 $m \cdot s^{-1}$ ;括号中左侧为黏性损失项,右侧为惯性损失项。

对于均匀的多孔介质,可改写为:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} |v| v_i\right) \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 为渗透率; $C_2$ 为惯性阻力系数,在高速流动中,多孔介质动量源项中的惯性阻力系数 $C_2$ 可以对惯性损失做出修正。 $C_2$ 可以看作沿着流动方向每一单位长度的损失量<sup>[9]</sup>。

针对填充床多孔介质模型,此多孔介质模型的湍流流动中, $\alpha$ 和 $C_2$ 的计算方法根据文献[10]可采用半经验公式Ergun方程来计算数值,此方法使用的雷诺数范围很广,对填充物类型也有很广的适用性。计算公式为:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (4)$$

式中, $D_p$ 为粒子的平均直径,m; $\varepsilon$ 为药床的孔隙率。

#### 3.2 数学模型

点火药燃烧产生的高温气体在膛内的流动传播过程遵循以下方程模型:

连续性方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho v) = 0 \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为气体密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $v$  为气体速度矢量,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\varepsilon$  为多孔介质区域的孔隙率。

动量方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho v v) = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon\tau) + S_i \quad (6)$$

式中,  $\tau$  为黏性应力张量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

能量方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_g C_g T_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho_g C_g v T_g) = \nabla \cdot (\varepsilon\lambda_g \nabla T_g) + h_v(T_s - T_g) \quad (7)$$

式中,  $C_g$  为气体的比热容,  $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $T_g$  为气相的温度,  $\text{K}$ ;  $\lambda_g$  为气体的导热系数,  $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $h_v$  为气体与固体的综合换热系数,  $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $T_s$  为固相药粒的温度<sup>[11]</sup>,  $\text{K}$ 。

### 3.3 基本假设

当点火药开始燃烧, 产生的高温气体流入药室时, 整个点火火焰传播过程可视为高温、高压及具有一定速度的气体从传火管壁上的小孔流入药床, 此过程包含一系列复杂的反应过程, 如点火药的非定常燃烧、点火药气体与主装药及火炮壁面之间的对流及辐射换热。

因点火过程极短, 大约只有几毫秒, 因此需对点火火焰传播过程做出如下简化假设:

(1) 将点火药气体流入作为传火孔边界的质量流量入口条件; 点火药同时燃烧, 每个传火孔的质量流量采用均匀分配, 即总的质量流量均匀分配给每个传火孔。

(2) 当点火药燃烧产生的气体流入药室后, 在药室内产生的压力在空间上均匀分布, 即传火孔处的背压相同, 每个传火孔处的边界条件始终相同;

(3) 因点传火过程时间极短, 忽略点火药燃烧产生的高温气体与发射药粒和药室壁面的换热;

(4) 点火药燃烧产生的气体视为理想气体;

(5) 不考虑重力的影响。

### 3.4 计算域网格模型

传火孔附近结构复杂, 因此在传火管壁附近采用非结构四面体网格, 其他部分采用结构化六面体网格, 简化的二维截面网格模型如图 3 所示, 并利用 CFD-POST 后处理软件输出位置点 1、2、3 处的压力变化曲线, 分别对应于试验装置上 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 测压孔位置。

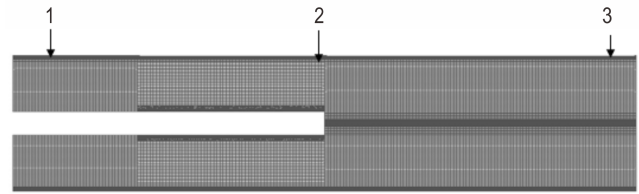


图 3 流体计算域网格

1—1<sup>#</sup>测压孔位置, 2—2<sup>#</sup>测压孔位置, 3—3<sup>#</sup>测压孔位置

Fig.3 The mesh of fluid computing domain

1—position of 1<sup>#</sup> pressure hole, 2—position of 2<sup>#</sup> pressure hole, 3—position of 3<sup>#</sup> pressure hole

### 3.5 初始条件与边界条件

药室初始环境压力为 101325 Pa, 温度为 300 K, 传火管喷口采用质量流量入口条件, 根据经典内弹道计算理论以及平行层燃面退移理论所计算的 2<sup>#</sup> 小粒黑火药的燃烧气体产物温度大约为 2500 K, 因此入口气体温度设为 2500 K。对于使用 N-S 方程进行计算的湍流流动问题, 利用湍流粘度使计算方程组得以封闭, 考虑流体黏性情况下, 将固体壁面边界条件设定为无滑移壁面。

## 4 结果与讨论

### 4.1 点火能量分布与火焰阵面传播速度

从试验拍摄图像(图 4)能够看出, 点火火焰能够均匀一致且快速的在药粒床中传播, 图 4 为 1.8, 2.0, 2.5 ms 和 3.0 ms 4 个时刻高速摄像所拍摄的点火火焰的状态。仿真计算结果中以温度场云图近似等效为点火火焰, 将温度场中的等温面近似等效于火焰阵面, 并列举与试验同时刻的仿真结果中的温度云图与试验拍摄的图像进行对比, 如图 5 所示。

由于试验中, 发射药药粒充满整个药室, 药床具有较高的各向同性, 即各个方向对点火火焰气体传播的阻力大小基本相同, 在试验拍摄图像上表现为点火火焰发展均匀, 火焰阵面较为清晰。在各个时刻, 仿真计算得到的温度场云图与试验拍摄的火焰图像呈现较好的一致性: 图 4b 显示, 2.0 ms 时刻, 点火火焰在径向上基本发展完全, 火焰在发射药药床中表现为完全轴向传播; 图 4d 的 3.0 ms 时刻, 点火火焰发生分离现象, 试验表现为右侧出现高亮区, 仿真温度云图的图 5d 表现为右侧出现高温区, 原因为点火火焰气体在右侧底端聚积, 未破膜前, 底端压力升高, 火焰轴向传播阻力增大, 因此右侧形成高温区域。

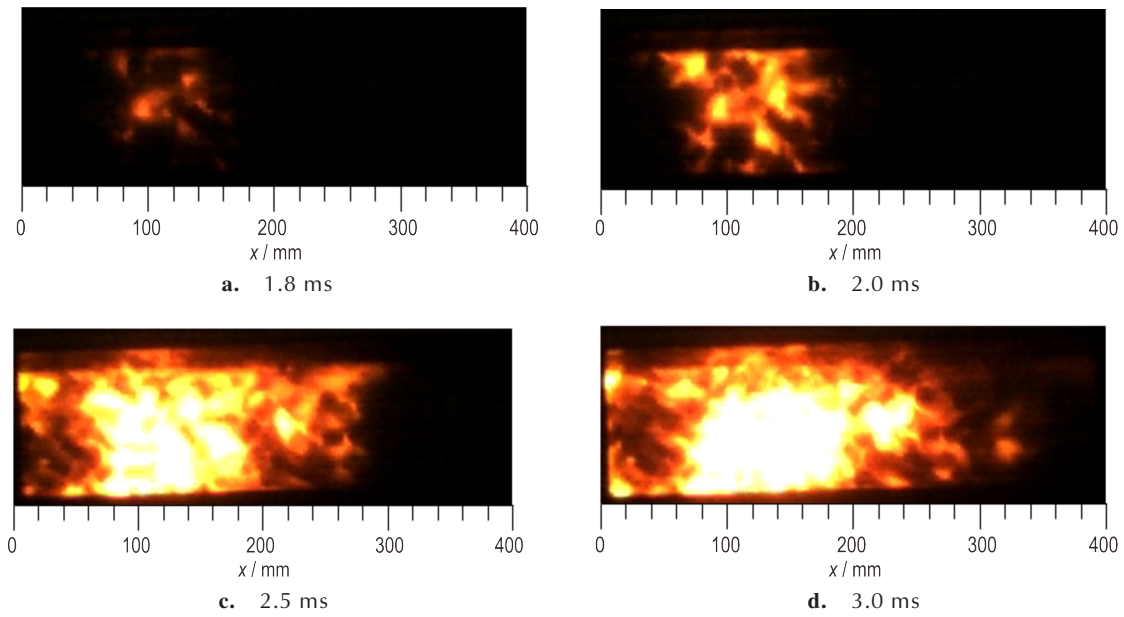


图4 点火火焰传播过程照片  
Fig.4 Pictures of ignition flame propagation process

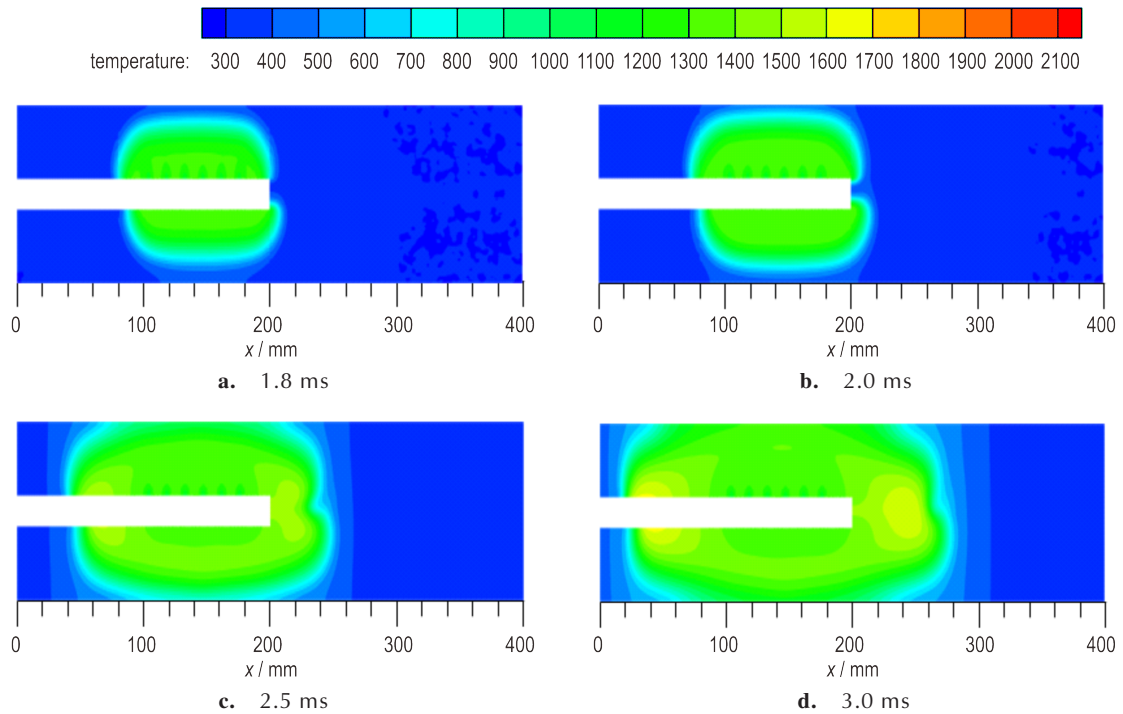


图5 仿真计算所得温度云图  
Fig.5 The temperature cloud pictures by simulation

根据试验拍摄图像和仿真温度场云图,绘制试验火焰阵面位移曲线和仿真计算等温面位移曲线并对比,如图6所示,横坐标时间起点2 ms表示火焰径向发展完全,开始轴向传播的时刻。根据计算,火焰阵面

向右端药床的平均传播速度为  $96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,等温面向右端药床的平均传播速度为  $91 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,等温面的传播与火焰阵面的传播速度一致性较高,且根据图6火焰阵面轴向位移-时间曲线的变化趋势表明,仿真和试验都

显示在发射药药粒装填满药室的情况下,由于火焰气体流动时在各个方向所受阻力大小基本相同,因此火焰阵面传播速度较为均匀。

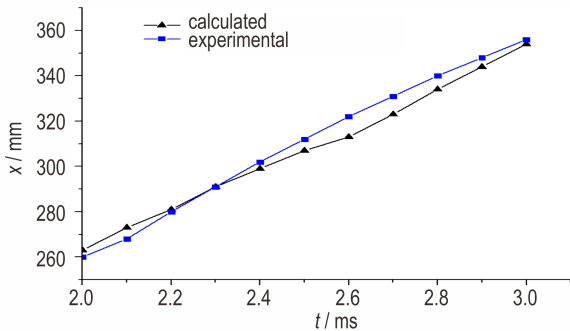


图6 试验与仿真火焰阵面位移曲线对比

Fig.6 Comparison of flame front displacement curves between experiment and simulation

#### 4.2 仿真与试验压力曲线对比

三处测压孔测得的压力随时间变化的曲线与仿真计算所得的压力曲线对比如图7所示。

由三处测压孔的计算与试验所得压力曲线对比可以看出,在假发射药药粒装填满药室的条件下,三处测压孔记录的压力曲线结果显示,仿真结果与试验结果的一致性较好。由于药室中装填满药粒,点火火焰气体在药床中传播过程时药粒的阻力作用一直存在,所以距离传火孔位置最远的3#测压孔压力发生变化的时刻最迟,即火焰气体向右端传播所需的时间较长,而1#测压孔距离传火管孔距离较3#近,因此1#测压孔压力发生变化的时刻较3#早,因此药室内各处的压力变化响应时刻和该位置与传火孔的距离相关。2#测压孔距离传火孔最近,所以此处的压力最先产生变化。在压力变化趋势上,仿真值较为贴近试验值,且试验与仿真计算的最大压力值在三处都较为接近,因此,在药室中装填满颗粒发射药的情况下,利用多孔介质模型模拟点火火焰气体在发射药药床中的传播过程具有较高的准确性。

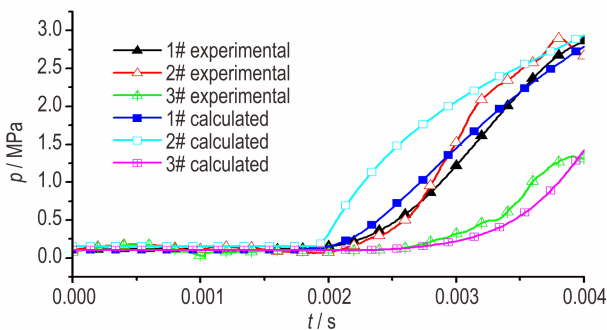


图7 三处测压孔的试验与仿真压力曲线对比

Fig.7 Comparison of pressure curves between experiment and simulation at position 1#-3# pressure hole

## 5 结论

(1) 仿真计算得到的高温气体温度场云图与可视化试验得到的火焰光亮图像呈现较好的一致性,仿真计算所得等温面轴向传播平均速度值  $91 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  与试验中火焰光阵面轴向传播平均速度值  $96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  较为接近,因此利用温度场变化等效为高温气体的传播过程具有可行性。

(2) 当颗粒发射药装填满发射药药室时,点火火焰传播过程中所受药床的阻力各向同性较高,火焰在药床中均匀扩散传播,所得火焰阵面传播速度曲线与药室内压力曲线的变化较均匀。

(3) 在不考虑发射药燃烧的情况下,发射药药室内各处压力变化由高温气体流入导致,因此压力变化时刻与各位置与传火管喷孔距离相关,火焰传播过程中,药室内不会产生压力波动,药床稳定性不受影响。

#### 参考文献:

- [1] 蒋淑园,季晓松,王浩,等. 大口径长药室平衡炮发射装药多点点火特性[J]. 含能材料, 2015, 23(5): 477-483.  
JIANG Shu-yuan, Ji Xiao-song, WANG Hao, et al. Multi-point ignition characters in large caliber balance gun propellant with long-chamber chares[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(5): 477-483.
- [2] Desoto S, Friedman H A. Flame spreading and ignition transients in solid grain propellants[J]. *AIAA Journal*, 2014, 3(03): 66-69.
- [3] 田春雷,高俊国,杜仕国,等. 一种新型高能点火药的配方设计及性能[J]. 火炸药学报, 2006(1): 75-76+80.  
TIAN Chun-lei, GAO Jun-guo, DU Shi-guo, et al. Formulation design of a new ignition composition and its performances[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2006 (1): 75-76+80.
- [4] 张丁山. 高过载下装药及爆轰点传火技术试验与理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.  
ZHANG Ding-shan. The experimental and theoretical research for technology about charge structure and ignition by detonation under high surcharge[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [5] 陈涛. 火炮发射装药发射安全性数值仿真与试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.  
CHEN Tao. Numerical simulation and experiment study on launch safety of gun propellants charge[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [6] 王浩,张莺,高付申,等. 药床中火焰传播速率测试技术研究[J]. 弹道学报, 1997(02): 91-94.  
WANG Hao, ZHANG Ying, GAO Fu-shen. et al. A method of measuring the flame propagation rate in fire transfer tube [J]. *Journal of Ballistics*, 1997(02): 91-94.
- [7] 朱跃龙. 底火能量释放特性及其对内弹道性能影响的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.  
ZHU Yue-long. The primer energy release characteristics and

- its influence on the interior ballistic performance[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [8] 高阳. 多孔介质内层流与湍流气相燃烧的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- GAO Yang. Numerical simulation of gaseous laminar and turbulent combustion within porous media[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [9] 刘桂兵. 含能颗粒多孔填充床的传热特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- LIU Gui-bing. Study on heat transfer characteristics of the energetic particles porous pocked-bed[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [10] Mohammadpour K, Alkhalaf A, Specht E. CFD simulation of cross-flow mixing in a packed bed using porous media model and experimental validation [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2019, 6(2): 157-162.
- [11] 胡延栋. 多孔质材料中气相爆轰试验及数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- HU Yan-dong. Experiment and numerical simulation of gaseous detonation in porous materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

## The Propagation Characteristics of Ignition Flame in Propellant Particle Bed Based on Porous Media Model

LIU Cheng, TAO Ru-yi, XUE Shao, WANG Hao

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

**Abstract:** In order to study the propagation characteristics of the flame generated by ignition charge combustion in the propellant pellet packed bed under the ignition transmission structure of the central fire tube, a porous media model was used to simulate the gun propellant pellet packed bed in the propellant chamber, the flow and propagation process of high temperature and high speed gas generated by the combustion of ignition charge in the gun propellant pellet bed is simulated by using the N-S equation, the isothermal surface propagation of the temperature field is equivalent to the flame front propagation, and the simulation results were compared with those of experimental data. The results show that in the case of a dense charge bed of propellant, the isothermal surface is equivalent to the flame front in the process of ignition flame propagation, and the simulation value of flame propagation velocity is  $91 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , which is close to  $96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  obtained by experiment; the simulated cloud images of temperature field of high temperature flame gas propagation are consistent with those of the experimental flame propagation images; the pressure data at the three pressure measuring holes in the chamber calculated by the porous media model are in good agreement with those of experimental data.

**Key words:** flame propagation; porous media; isothermal surface; numerical simulation

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019290

(责编: 高毅)