

文章编号:1006-9941(2020)08-0731-09

单模块装药点传火过程中药粒散布模拟试验与仿真

陈安,余永刚

(南京理工大学 能源与动力工程学院,江苏 南京 210094)

摘要: 为了深入了解模块装药点传火过程中的药粒散布特性,设计了可视化模块装药点传火试验平台,针对 $\Phi 130\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的单模块装药的点传火过程进行试验,通过高速摄像系统记录了单模块装药点传火、药盒破裂及药粒飞散过程;基于气相-颗粒相耦合的方法,建立了模块装药药盒破裂及药粒飞散三维非稳态气固两相流模型,数值模拟了模块不同初始装填位置对单模块装药点传火过程中药粒散布特性的影响。模拟结果表明,模块初始装填位置距底火端分别为40,80,120 mm和150 mm四种模拟工况下,单模块装药点传火过程中,药粒最终均分布在药盒及其破裂端面右侧的药室内,自底火侧向控压膜片侧分别呈现为水平堆积和坡状堆积的组合形态;模块初始装填位置与底火端距离从40 mm增为150 mm时,水平堆积轴向长度由269.5 mm减为200.4 mm,坡状堆积坡度角由 25.03° 降为 21.31° 。随着模块初始装填位置向右移动,药粒水平堆积轴向长度变短,堆积厚度增加,坡状堆积坡度角减小;数值模拟结果与试验观测到的药粒坡状堆积形态基本吻合,验证了模型的合理性。

关键词: 单模块装药;药粒散布;离散单元法(DEM);气固两相流

中图分类号: TJ55; O359

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019311

1 引言

模块装药是顺应火炮自动装填、提高射速、简化后勤供应而产生的一种装药方式。它既能提高火炮武器系统的效率,又能改善后勤供应条件。然而,在模块装药点传火过程中,模块药盒破裂后,药粒会在药室内飞散运动,最终在药室内形成一定的药粒群分布形态。药粒飞散形成的不均匀分布药粒群发生燃烧时会导致炮膛内产生初始压力波,若膛内压力波过大,会导致制导弹药失效,严重时会发生发射安全性事故。

火炮点传火过程中,发射药粒散布形态对膛内压力波特性有重要影响。根据装药方式可将其大致分为两方面:一方面,在传统粒状装药、药包和药筒装药方式中,曾思敏^[1]利用脉冲X射线摄影技术记录了发射

药床运动过程中不同瞬间的分布情况,并通过研究发现药床运动会影响压力波的形成和发展造成影响;East J L^[2]和金志明^[3-4]对不同颗粒尺寸装药的点传火过程进行研究,发现颗粒尺寸会影响发射药床中颗粒密度分布,进而影响发射药床内压力波的传播速度;肖正刚^[5]、韩博^[6]等分别对不同发射装药结构的点传火过程进行研究,发现通过合理设计传火结构,可以减小发射药床在点传火过程中的运动,减小发射药床的着火延迟时间;张文星等^[7]对埋头弹内弹道过程进行研究,发现击发底火后火药床在压力梯度作用下会在膛内运动,并分析了内弹道过程中的膛内压力波特性。另一方面,在模块装药方式中,陆中兵等^[8]针对大号装药,建立了两相流内弹道模型,认为模块破裂前发射药粒在模块药盒内随模块运动,模块破裂后发射药粒在主装药区呈均匀分布状态,并结合模块药盒运动及发射药粒分布分析了膛内压力波特性。赵毅^[9]根据点传火模拟试验建立了模块装药点传火两相流数学模型,对模块装药点传火过程中传火药粒的流动进行了研究。王育维等^[10]针对小号装药的双元模块装药,建立了二维两相流内弹道模型,将发射药与可燃容器视为连续固体相介质,并将破裂后的可燃药盒与发射药床视

收稿日期:2019-12-15;修回日期:2020-02-11

网络出版日期:2020-05-25

基金项目:国防基础科研课题资助

作者简介:陈安(1995-),女,博士研究生,主要从事模块装药点火、燃烧特性研究。e-mail:958424702@qq.com

通信联系人:余永刚(1963-),男,教授,主要从事含能材料燃烧推进理论与技术的研究。e-mail:yygnjust801@163.com

引用本文:陈安,余永刚.单模块装药点传火过程中药粒散布模拟试验与仿真[J].含能材料,2020,28(8):731-739.

CHEN An, YU Yong-gang. Modeling Test and Simulation Study of Granular Dispersion Characteristics for Single Modular Charge Ignition and Flame-spreading[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(8):731-739.

为一个整体,对其整体运动进行分析。

目前,关于模块装药的研究主要包括热安全性^[11]、装药结构^[12]、弹道性能^[13-14]以及燃烧残渣的形成^[15]等方面。而关于模块装药点火燃烧过程中药盒破裂、药粒散布的理论模拟与实验诊断方面研究较少,相关内弹道模型中涉及到模块装药药粒散布的模型还停留在简化假设上,即对模块装药破裂后的发射药颗粒和模块药盒均简化为拟流体进行分析,且药盒破裂后一般假定发射药在药室内呈均匀分布或一定几何分布。然而事实上,模块装药点传火过程中药盒破裂后药粒的最终分布形态是不均匀的,受多种因素影响而发生变化,它对膛内压力波有重要影响,而这类问题鲜有研究。为此,本研究以此为背景,设计了可视化点传火试验平台,对模块装药点传火过程进行试验,对药室内药粒分布形态进行观测。然后,基于气相-颗粒相耦合方法,建立模块装药点火、药盒破裂及药粒飞散的三维非稳态气固两相流模型,预测单模块装药不同初始装填位置对其点传火过程中药粒散布形态的影响。

2 试验部分

2.1 试验装置

本次试验采用如图1所示的可视化半密闭爆发器式点传火平台,药室直径 $\Phi 135$ mm、长度500 mm。装置上方的五个孔分别用来安装压力传感器和定位销;装置右侧装有控压膜片,保证药室内压力不超过安全极限值。试验时,利用机械作用使击针撞击药室底部的底火,通过底火射流点燃模块装药中心点火药包,利用日本产FASTCAM Mini AX-50高速摄像机拍摄模块装药点火、

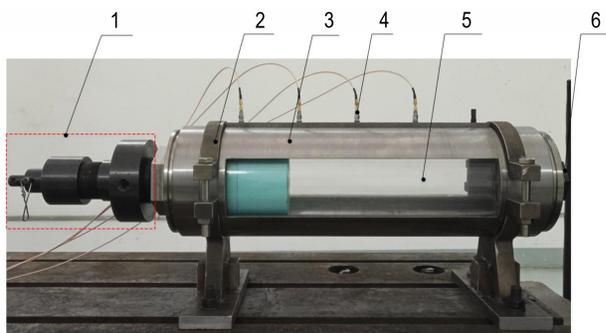


图1 可视化试验平台

1—击发机构,2—固定支架,3—金属套筒,4—压力传感器,5—可视化药室,6—控压膜片

Fig.1 Visualization experimental platform

1—firing mechanism, 2—fixation apparatus, 3—metal sleeve, 4—pressure sensor, 5—visualized chamber, 6—control pressure diaphragm

药盒破裂及药粒飞散的全过程,拍摄速度为1000帧/s。

为保证模块装药点传火过程的安全性,采用部分模拟发射药粒代替真药粒,尺寸为 $\Phi 8$ mm \times 13 mm的圆柱形颗粒。图2为试验用模块药盒的实物图,图2a为模块药盒,内装有中心传火管(管内装有14.2 g黑火药作为点火药)、20 g真火药颗粒及600 g模拟发射药粒(二者体积比为1:42),将药盒端盖安装在盒体上,并用特制胶涂抹在药盒与端盖间隙中进行密封及固定,成品如图2b所示。

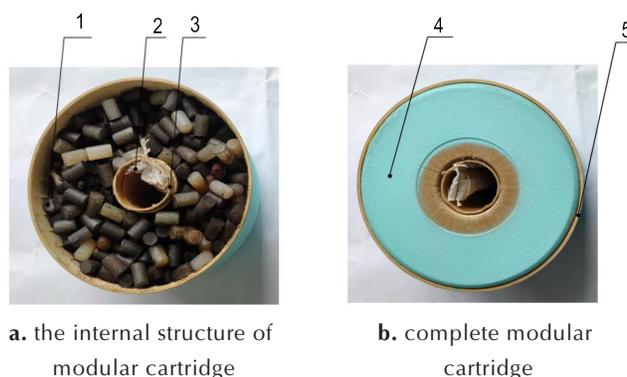


图2 试验用模块药盒

1—模拟发射药粒,2—点火药包,3—中心传火管,4—模块药盒端盖,5—模块装药盒体

Fig.2 Experimental modular cartridge

1—false propellant grains, 2—the igniter bag, 3—center core igniter, 4—the end cover of cartridge, 5—body of cartridge

2.2 试验结果

图3为单模块装药点传火序列过程照片。由图3可见,底火击发产生射流火焰,点燃模块药盒可燃中心传火管中的点火药包,约6 ms时火焰传播至传火管右端,部分高温高压的气体和灼热的黑火药颗粒,沿传火管向右侧药室喷出,如图3b所示,另一部分通过中心传火管上的小孔喷入装有火药的模块药盒内,从而使药盒内火药颗粒着火燃烧,模块药盒端面也着火燃烧,火焰同时向药室径向及药室右侧扩展,同时喷至药室右侧的火药颗粒开始燃烧,火焰向左传播,如图3c所示,随着火药及模块药盒燃烧加剧,火焰逐渐充满药室,约60 ms时(图3e)燃烧最剧烈,此后药室内火焰逐渐衰减,如图3f、3g所示,直至1000 ms时药室内燃烧基本结束。点火过程中模块药盒端盖被高压气体冲开,部分药粒及传火管被高压气流冲至药室右端。当药室右端控压膜片附近的压力达到设定值时,破孔压螺处的剪切膜片破裂,高温高压气体从喷口喷出,使得药室内的压力迅速降低,保证药室内最大压力值在装置承压范围内。

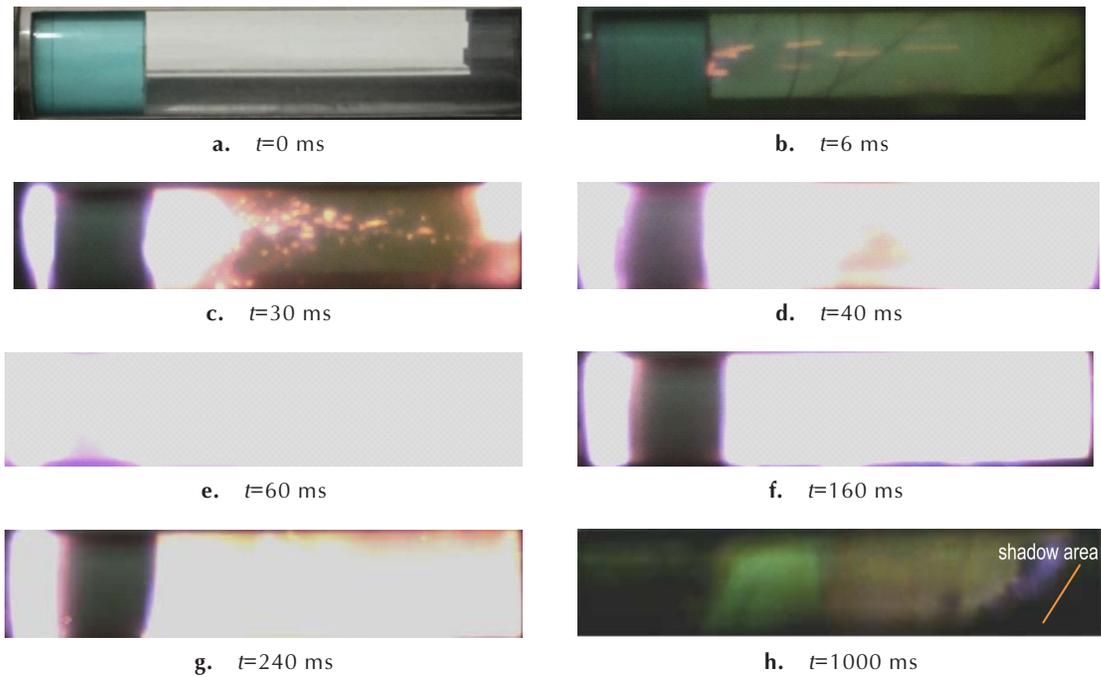


图3 模块装药点传火试验序列图

Fig.3 Sequence diagram of modular charging ignition and flame-spreading experiment

图3h表示1000 ms时刻药室内基本燃烧结束时的观察窗图像。由图3h可见,将起始位置即零点设在药室左端面,此时药粒分布主要集中在整个药室由左至右350~475 mm区域(阴影区域),药粒呈较规律的坡状分布;在可观察到的药粒坡状堆积区域等间距取6个特征点,分别测量其轴向位置(记为 x_1)和药粒堆积高度(记为 h_1),即药室内相同轴向位置处药粒堆积最高点与药室最底面的高度差,结果见表1。

表1 试验测得药粒堆积高度

Table 1 Gunpowder grains accumulation height measured in experiment

feature point	1	2	3	4	5	6
x_1/mm	350	375	400	425	450	475
h_1/mm	22.50	34.31	41.90	47.50	58.78	64.41

3 理论模型

模块药盒由药盒盒体、药盒端盖以及中心传火管三部分组成。其中,模块药盒各部件均由可燃材料制成,药盒内装有火药药粒及模拟发射药粒,中心传火管内放置传火药包,两端用纸质挡板密封。在模拟试验基础上,建立模块装药药盒破裂及药粒飞散的三维非稳态气固两相流模型,并采用如下简化假设:

- (1)点传火药燃烧产生的高压燃气压力为定值,通过等效方法考虑药盒内少量发射药燃烧能量的贡献;
- (2)不考虑模块药盒与药室内径的间隙,两者作等直径处理;
- (3)模块药盒破裂时,药盒端盖先破开;
- (4)药粒与药粒,药粒与药室壁面间的碰撞均采用Hertz-Mindlin无滑动接触模型;
- (5)由于药粒飞散过程时间短暂,忽略气相对药粒的传热作用;
- (6)药室内点火燃气射流的湍流流动采用Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型描述;
- (7)由于单模块药粒在药室中相体积分率约为8%(<12%),故不考虑药粒对流体的作用^[18]。

3.1 气相-固相药粒耦合模型

3.1.1 气相控制方程^[16]

气相质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\phi\rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi\rho_g \vec{v}_g) = \dot{m}_{in} \quad (1)$$

气相动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\phi\rho_g \vec{v}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi\rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\phi\nabla p - \vec{M}_{cp} \quad (2)$$

气相能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\phi\rho_g E_g)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\phi\rho_g \vec{v}_g \left(E_g + \frac{p}{\rho_g} \right) \right) + \rho \frac{\partial\phi}{\partial t} = \dot{m}_{in} \left(E_{in} + \frac{p}{\rho_{in}} \right) \quad (3)$$

式中, ϕ 是气相体积分数, ρ_g 是气体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; v_g 是气体速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; \dot{m}_{in} 是输入气体的质量流率, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; p 是气体压力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; M_{cp} 是气相压力入口输入气体增加的动量, $\text{N}\cdot\text{s}$; E_g 是气相总能量, $\text{N}\cdot\text{m}$; ρ_{in} 是输入气体的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; E_{in} 是输入气体的能量, $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

Realizable k - ε 模型^[17]的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \quad (4)$$

$$G_b - \rho\varepsilon - Y_M$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S\varepsilon - \quad (5)$$

$$\rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b$$

其中:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

式中, G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能变化, $\text{N}\cdot\text{m}$; G_b 是用于浮力影响引起的湍动能变化, $\text{N}\cdot\text{m}$; Y_M 可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; C_2 和 $C_{1\varepsilon}$ 是常数, σ_k 和 σ_ε 分别是湍动能 k 及其耗散率 ε 的湍流普朗特数。

3.1.2 药粒运动方程

在药室内药粒的运动根据牛顿运动定律将其分解为药粒的移动和转动两部分,其控制方程表示如下:

$$m_s \frac{dU_s}{dt} = F_p + F_g + F_c \quad (6)$$

$$I_s \frac{d\omega_s}{dt} = T_s \quad (7)$$

式中, m_s 为药粒的质量, kg ; I_s 为药粒转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; U_s 为药粒的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ω_s 为药粒的角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; T_s 为药粒力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; F_p ($= -V_s \nabla p_i$) 为颗粒所受到流体作用的压力梯度力, F_g 为颗粒所受重力 $F_g = m_s g$, F_c 为药粒与药粒、壁面间的碰撞力, N 。

3.2 药粒碰撞模型

数值模拟研究中采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型^[18]。其中,法向力 F_n 包含法向弹性力 F_n^e 和法向阻尼力 F_n^d ; 切向力 F_τ 包含切向弹性力 F_τ^e 和切向阻尼力 F_τ^d , 切向力受库伦摩擦 $\mu_s F_n$ 限制, 其中 μ_s 是静摩擦系数。表达式分别如下:

$$F_n = F_n^e + F_n^d \quad (8)$$

$$F_\tau = F_\tau^e + F_\tau^d \quad (9)$$

其中:

$$F_n^e = \frac{4}{3} E^b \sqrt{R^b \delta_n^{\frac{3}{2}}}, F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{k_n \cdot m^b} v_n^{\text{rel}}$$

$$F_\tau^e = -8 G^b \sqrt{R^b \delta_\tau^{\frac{3}{2}}}, F_\tau^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{k_\tau \cdot m^b} v_\tau^{\text{rel}}$$

式中, δ_n 和 δ_τ 分别为法向重叠量和切向重叠量, m ; v_n^{rel} 和 v_τ^{rel} 分别为相对速度的法向分量和切向分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; k_n 和 k_τ 分别为法向刚度 and 切向刚度, $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$; β 为恢复系数 e 的表达式, E^b 为当量杨氏模量, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; G^b 为当量剪切模量, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; R^b 为当量半径, m ; m^b 为当量质量, kg ; 表达式^[18]分别如下:

$$k_n = 8 E^b \sqrt{R^b \delta_n}, k_\tau = 8 G^b \sqrt{R^b \delta_\tau}, \beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$$

$$\frac{1}{E^b} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j}, \frac{1}{R^b} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}, m_b = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1}$$

式中, E_i, ν_i, R_i 和 E_j, ν_j, R_j 分别是药粒 i 和药粒 j 的杨氏模量、泊松比和拟球体半径。

滚动摩擦为:

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (10)$$

式中, μ_r 是滚动摩擦系数; R_i 是接触到质心的距离, m ; ω_i 是物体在接触点处单位角速度矢量, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

4 数值模拟与分析

4.1 计算模型

运用计算流体力学软件 FLUENT, 结合离散元程序对位于距药室左端面 $L=40$ mm 处的单模块装药点火、破裂及药粒飞散过程进行了数值模拟。计算模型如图 4 所示, 对此三维气固两相流问题采用结构化网格。由于气相与颗粒相耦合问题中网格尺寸须大于颗粒尺寸, 故取网格尺寸为 10 mm, 共计 15098 个网格单元, 并经过网格无关性验证。求解时选择基于压力求解器, 压力-速度耦合采用 SIMPLEC 模式, 密度、压力、动量和能量方程均采用二阶迎风格式。时间步长取 1×10^{-5} s, 并经过时间步长无关性验证。

通过数值模拟预测单模块装药不同初始装填位置对药粒分布的影响(记药盒底端面与药室左端面的间距为 L)。初始条件: 气固两相速度均为 0, 药室内气相压强为一个大气压, 初始温度为 300 K。边界条件: 药

盒及药室壁面均为固定边界,且各区域的气相与固相交界面满足温度连续,并通过自然对流的方式换热,固壁采用无滑移边界条件。

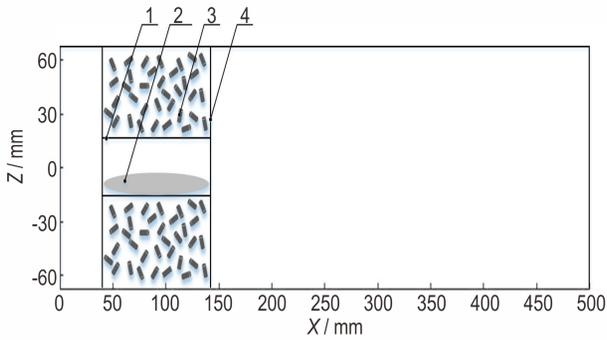


图4 计算模型结构示意图

1—中心传火管,2—传火药包,3—模拟发射药粒,4—模块药盒

Fig.4 Schematic diagram of structure of calculation model

1—center core igniter, 2—the igniter bag, 3—false propellant grains, 4—modular cartridge

计算过程中模块装药结构与物性参数如表2所示,其中, D_1 和 L_1 分别为圆柱形模块药盒的直径和长度, D_2 和 L_2 分别为中心传火管的直径和长度, D_3 和 L_3 分别为模拟发射药粒的直径和长度,模拟发射药粒密度为 ρ ,模块药盒内模拟发射药粒总质量为 m 。

表2 模块装药的结构与物性参数

Table 2 Structure and physical parameters of the module charge

structural parameter	parameter values	structural and physical parameters	parameter values
D_1 /mm	135	D_3 /mm	8
L_1 /mm	100	L_3 /mm	13
D_2 /mm	30	ρ /kg·m ⁻³	1600
L_2 /mm	100	m /kg	0.6

Note: D_1 and L_1 are the diameter and length of the modular cartridge, D_2 and L_2 are the diameter and length of the igniter, D_3 and L_3 are the diameter and length of the false propellant grain, ρ is the false propellant grain density, m is the total mass of the false propellant grain in the modular cartridge.

4.2 数值模拟结果与分析

4.2.1 药粒飞散特性的计算结果与分析

图5表示0.22~30 ms内不同时刻药室内 $Y=0$ 截面的气相压力云图。由图5可知,在药盒端盖打开前,中心传火管向药盒内输入点火燃气,药盒内压力逐渐上升,同时经中心传火管向药室内输入燃气,由于模块盒空间较小,内部压力上升较快,约0.22 ms即由0.1 MPa上升至10 MPa,而药室空间较大,压力上升缓慢。当模块盒内压力上升至约10 MPa时,药盒端

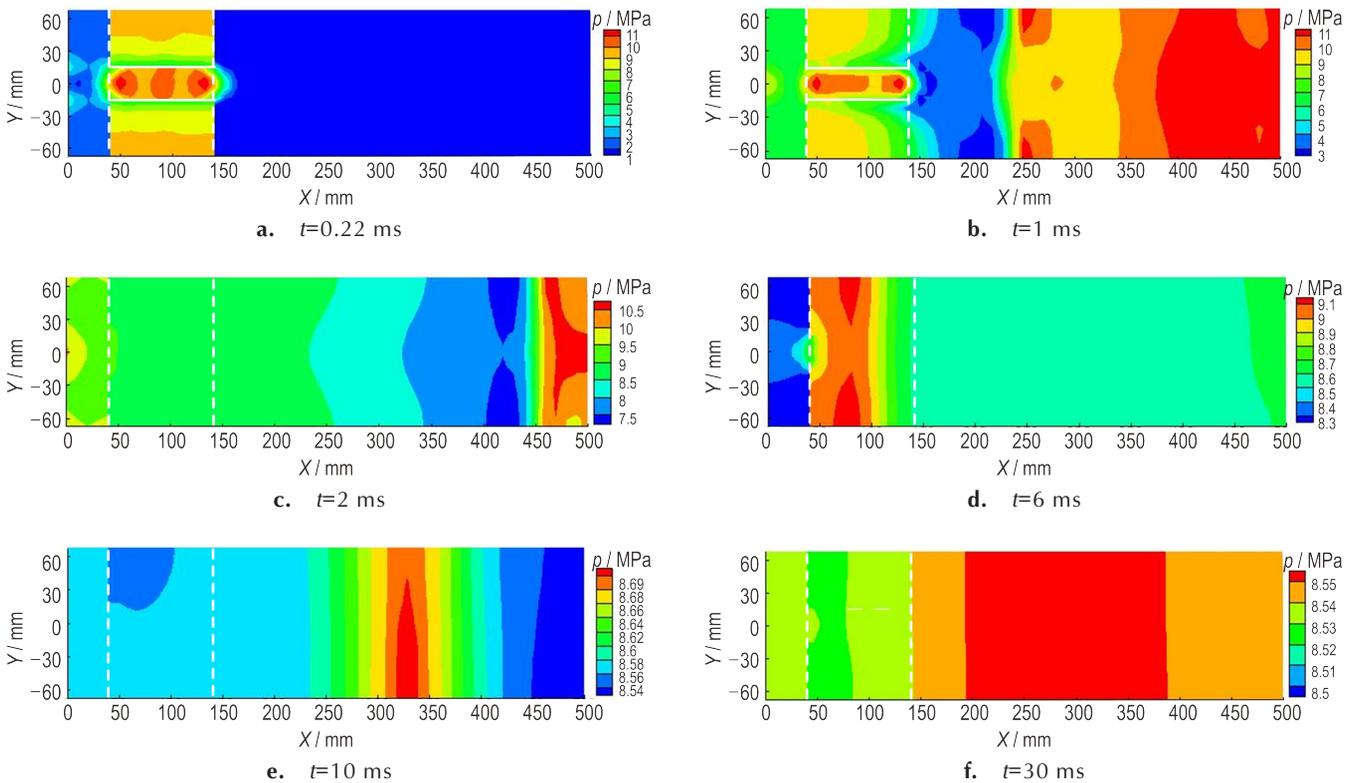


图5 不同时刻药室内 $Y=0$ 截面的压力分布

Fig.5 Pressure distribution of $Y=0$ section in the chamber at different times

盖破开,此时药盒端盖左侧压强约为 10 MPa,远高于其右侧药室的压强(约 1 MPa),药盒内燃气向药盒右侧泄出,如图 5b 所示,一段时间后药室内会形成一个低压区。如图 5e、5f 所示,传火药燃烧结束后药室内最大压力不再上升,药室内最大压差逐渐减小,压力逐渐趋于均匀。

不同时刻模块装药点传火过程中药粒运动速度大小及药粒飞散形态如图 6 所示。模块装药点火破裂过程中,随着中心传火管向模块药盒内输入燃气,药盒内产生压力梯度,药盒内药粒由于受到气相压力作用,沿径向由内向外逐渐获得速度。药盒端盖瞬时打开后,端盖两侧压差约为 9 MPa,附近药粒在气相压力的作用下,获得向右运动趋势。如图 6b 所示,约 2 ms 时药室内药粒速度达到最大值,约为 $93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时药室内药粒整体呈向右运动趋势。如图 6c 所示,10 ms 时部分药粒运动到药室右端并与壁面产生碰撞,速度迅速减小。此后,药室内的压力梯度逐渐减小,较小的气相

压力作用在药粒上,不会改变其整体运动趋势。如图 6f 所示,600 ms 时药粒最大速度小于 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且仅剩约 2% 的颗粒在运动,药粒整体趋于静止,可将这一时刻近似视为模块装药点火、药盒破裂后药粒飞散的终态,以此时刻的药粒分布作为药室内药粒的最终分布。

从图 6f 可处理得终态药室内药粒数随轴向位移的变化关系如图 7 所示。结合图 6f 可知,药盒左侧药室内无药粒存在,终态药室内颗粒分布可以分为两部分,一部分位于药室轴向位置 40~350 mm 区域内,药粒呈水平分布且药粒数较少,约为总数的 1/10;另一部分在轴向位置 350~500 mm 区域内,药室内药粒主要集中在这一区域,药粒呈坡状分布,药粒数随轴向位置的右移而迅速增大。

为了进一步分析药室内药粒质量分布特性,选取图 6f 时刻药室内 2 个代表性截面,分别为 $Y=0$ 和 $X=475 \text{ mm}$ 截面,观察其药粒密度 C (单位体积内药粒的质量)的分布规律,如图 8 所示,由图 8 可见,终态药室

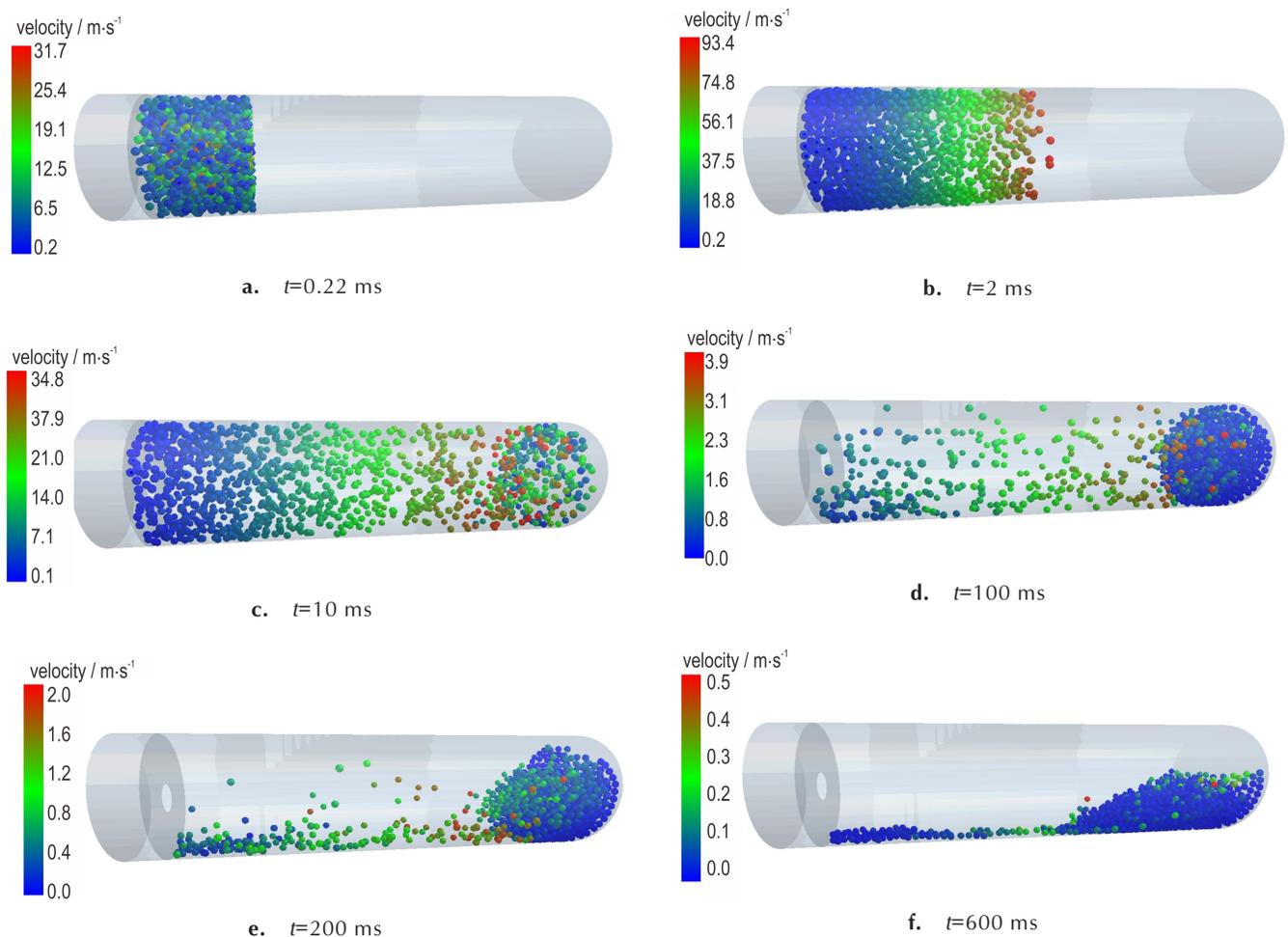


图 6 不同时刻药室内的药粒速度分布及飞散形态

Fig.6 Velocity distribution and dispersion pattern of grains in the chamber at different times

中药粒分布在模块药盒及药盒右侧的药室中,坡状堆积相同轴向位置的药粒中下部堆积密度要比堆积表面大,且随着堆积高度变大,药粒最大堆积密度也变大。

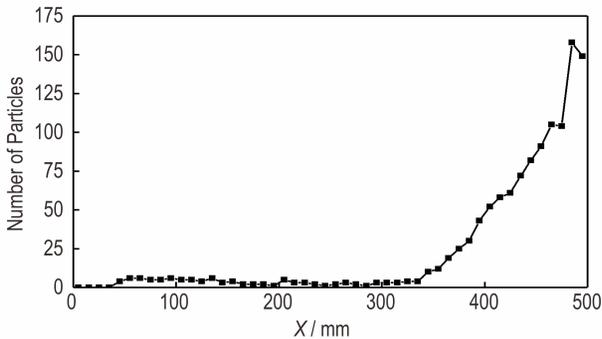


图7 终态药室内药粒数随轴向位移变化
Fig.7 Changes of the number of grains in the chamber with the axial displacement

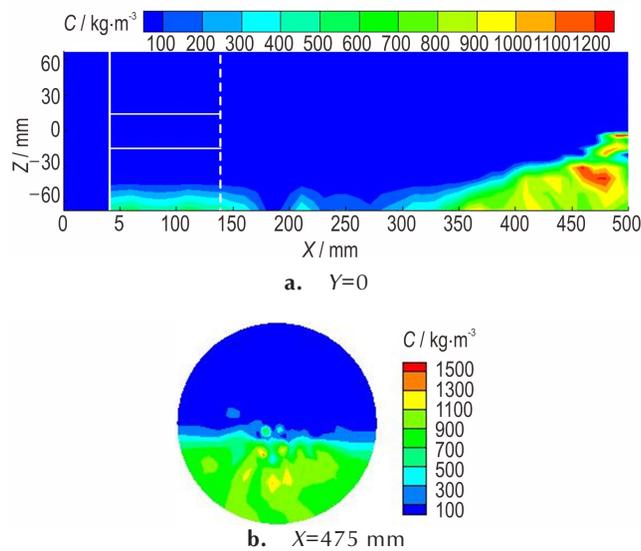


图8 终态药室内不同截面药粒密度分布
Fig.8 Grain density distribution at different sections

4.2.2 模型验证

由上述4.2.1节数值模拟得到的药室内药粒分布的正视图如图9所示。在药室轴向350~475 mm区域内的坡状堆积药粒群表面,取与试验所取特征点轴向位置相同的6个点,测量其药粒堆积高度。将数值模拟得到的数据与表1中实验测量值进行对比,如图10所示。由于试验过程中模拟发射药粒及可燃药盒燃烧会产生粘性物质对药粒分布产生影响,试验结束后药室右侧可能还存在有未完全燃烧的传火管和药盒端盖,高速录像拍摄的角度,会使药粒分布观测得到的数据产生一定误差。综合以上因素,估计试验测量误差约为15%。将表1中试验测得药粒堆积高度与数值模

拟得到的结果进行对比,二者的平均误差约为10.6%,说明数值模拟结果与试验现象基本吻合,验证了计算模型是合理的。

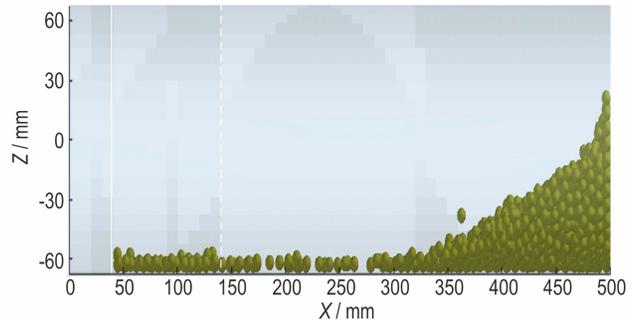


图9 药室内药粒分布正视图(L=40 mm)
Fig.9 Front view of granular distribution in the chamber (L=40 mm)

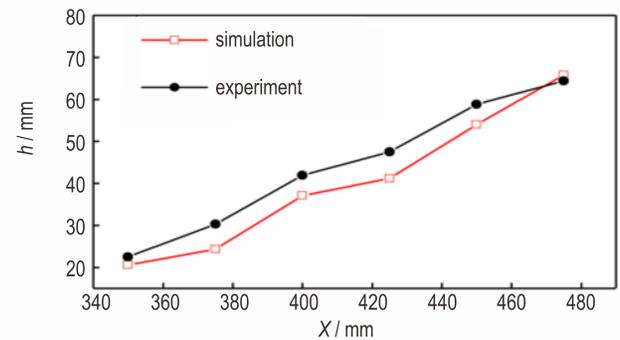


图10 药粒堆积高度测量值与计算值的比较
Fig.10 Comparison of measured value and calculated value of the accumulation height of grains

4.2.3 模块装填位置对药粒分布特性的影响

分别针对单模块装药条件下四种不同装填位置的模块药盒点火、破裂及药粒飞散过程进行数值模拟,四种计算工况分别为 $L_1=40\text{ mm}$, $L_2=80\text{ mm}$, $L_3=120\text{ mm}$, $L_4=150\text{ mm}$ 。

图11为四种不同工况下药室内终态药粒分布正视图。可以观察到模块四种不同的初始装填位置下,药室中药粒堆积均自左向右呈现两种堆积形态,分别为水平堆积和坡状堆积。其中,水平堆积起始点随装填距离 L 的增大而向右移动,堆积厚度随 L 的增大而增大,坡状堆积高度均匀升高无特殊凸起或凹陷。为了更好地表示药粒堆积特性,引入两个特征参数,分别为水平堆积轴向长度(l)和坡状堆积坡度角(α),对四种装填工况下药室内终态药粒堆积分布正视图分别进行测量,将测得数据整理得表3。由表3可知,随着装填距离 L 由40 mm增大到150 mm,水平堆积轴向长度由269.5 mm缩短为200.4 mm,坡状药粒堆积坡度角由 25.03° 降为 21.31° ,坡状堆积变平缓。这是由于模

块装药点传火过程中,模块右侧端盖破裂瞬间,药粒获得的初始加速度基本相同,在短暂的加速过程中药粒获得一定的速度,在气固两相流场中药粒平均速度沿程衰减。当模块初始装填位置远离底火端时,药粒运

动至药室右端位移变小,到达右端时速度相对较大,与药室端面碰撞后,反向运动的药粒速度也相对较大,且由于反向药粒数相对较多,这部分药粒可反向运动至药室更远距离才散落下来。

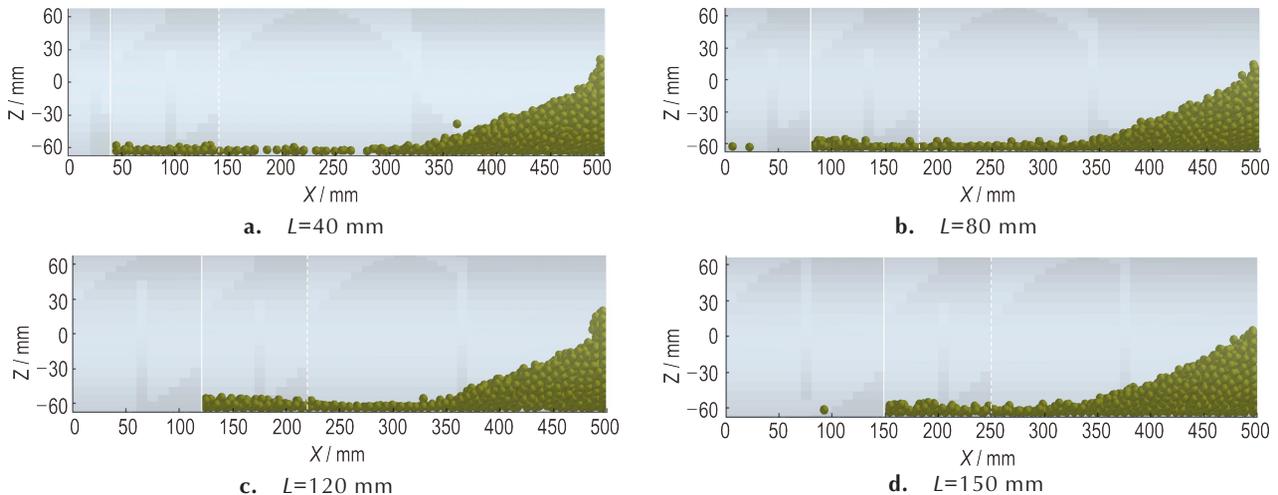


图11 不同装填位置下的终态药粒堆积分布

Fig.11 Distribution of grains under different working conditions

表3 药粒堆积特征参数

Table 3 Characteristic parameters of accumulation of propellant grains

working condition	L/mm	l/mm	$\alpha/(^\circ)$
1	40	269.5	25.03
2	80	252.0	23.94
3	120	224.9	22.10
4	150	200.4	21.31

Note: L is the distance between the cartridge and the end surface of the primer in the chamber, l is the axial length of the horizontal accumulation of the propellant grains, and α is the slope angle of the accumulation of the propellant grains.

5 结论

(1) 基于设计的可视化半密闭爆发器式点传火平台,试验表明,模块装药点火、药盒破裂及药粒飞散过程结束后,药室内药粒分布自药盒底部向右呈现为水平堆积和坡状堆积的组合形态,水平堆积药粒数量较少,坡状堆积药粒高度逐渐增大,直至药室右端面附近达到最高。

(2) 在试验基础上,基于气相—颗粒相耦合方法,建立了三维非稳态气固两相流模型,结果表明,药室内药粒分布呈现水平堆积和坡状堆积的组合形态,水平堆积药粒数约占总量的1/10。当模块药盒初始装填位置与药室底火端距离由40 mm增大到150 mm时,水平堆积轴

向长度由269.5 mm缩短为200.4 mm,但水平堆积厚度增大,同时坡状药粒堆积坡度角由25.03°降为21.31°,坡状堆积变平缓。模拟结果与试验观测到的坡状堆积形态基本吻合,表明该模型是合理的。

参考文献:

- [1] 曾思敏. 内弹道中的脉冲X射线摄影技术装备的研制及其应用的研究[D]. 南京: 华东工学院, 1988.
ZENG Si-min. Research on the Development and Application of Pulse X-ray Photography Technology Equipment in the Internal Ballistics[D]. Nanjing: East China Institute of Technology, 1988.
- [2] East J L. Ignition and flame spreading phenomena in granular propellant gun charges[J]. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1979, 66: 228-245.
- [3] 金志明. 火炮膛内压力波产生机理及其特征分析[J]. 华东工学院学报, 1992, 61: 26-31.
JIN Zhi-ming. Generation mechanism and characteristic analysis of pressure wave in gun[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 1992, 61: 26-31.
- [4] 宋明, 金志明. 膛内压力波的数值模拟[J]. 兵工学报, 1992, 13(1): 12-19.
SONG Ming, JIN Zhi-ming. Numerical simulation of pressure waves in guns[J]. *Acta Armamentarii*, 1992, 13(1): 12-19.
- [5] 肖正刚, 杨栋, 应三九, 等. 减小高装填密度发射装药膛内压力波的实验研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(1): 8-11.
XIAO Zheng-gang, YANG Dong, YING San-jiu, et al. Experimental study on reducing the pressure wave of gun propelling charge with high loading density[J]. *Chineses Journal of Explosives & Propellant*, 2001, 24(1): 8-11.
- [6] 韩博, 张晓志, 王超, 等. 新型大口径全装药膛内压力波问题研究[J]. 火炸药学报, 2007, 30(6): 54-57.
HAN Bo, ZHANG Xiao-zhi, WANG Chao, et al. Research on

- chamber-pressure variation of a new large-caliber full-charge propellant [J]. *Chineses Journal of Explosives & Propellant*, 2007, 30(6):54-57.
- [7] 张文星, 陆欣. 埋头弹药膛内压力波传播模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7):60-63.
ZHANG Wen-xing, LU Xin. Simulation study on pressure wave propagation in cased telescoped ammunition[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(7):60-63.
- [8] 陆中兵, 周彦煌. 模块装药膛内两相燃烧模型及压力波模拟[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3):269-273.
LU Zhong-bing, ZHOU Yan-huang. Two-phase-combustion mode and numerical simulation of pressure wave in the gun with modular charges[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(3):269-273.
- [9] 赵毅. 模块装药点传火过程的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2):33-36.
ZHAO Yi. Numerical simulation for ignition and flame-spreading of modular charge[J]. *Chineses Journal of Explosives & Propellant*, 2003, 26(2):33-36.
- [10] 王育维, 郭映华, 董彦诚, 等. 可燃容器对小号模块装药压力波影响的研究[J]. 发射与控制学报, 2016, 37(2):31-35.
WANG Yu-wei, GUO Ying-hua, DONG Yan-cheng, et al. Study of combustible case effects on pressure waves for low-zone of bi-modular charge [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2016, 37(2):31-35.
- [11] 刘静, 余永刚. 模块装药快速烤燃特性的数值预测[J]. 含能材料, 2019, 27(5):25-30.
LIU Jing, YU Yong-gang. Numerical prediction of fast cook-off characteristics for modular charges[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(5):25-30.
- [12] 周瑶. 模块装药总体结构及装药弹道性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
ZHOU Yao. Research on the overall structure of the modular charge and its ballistic performance [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [13] 张洪林. 模块装药性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
ZHANG Hong-lin. The Study of Performances for Modular Propelling Charge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [14] 梁世超, 徐文娟. 模块装药的内弹道分析[J]. 弹道学报, 2000, 12(4):39-44+66.
LIANG Shi-chao, XU Wen-juan. The analysis on interior ballistic of modular charges[J]. *Journal of Ballistics*, 2000, 12(4):39-44+66.
- [15] 乔丽洁, 堵平, 廖昕, 王泽山. 可燃药筒对模块装药燃烧残渣的影响[J]. 兵工学报, 2011, 32(10):1250-1254.
QIAO Li-jie, DU Ping, LIAO Xin, et al. Influence of combustible case on combustion residue of modular charges[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(10):1250-1254.
- [16] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WENG Chun-sheng, WANG Hao. Computational Internal Ballistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [17] ZHOU Jia-wei, DU Chang-long, LIU Song-yong, et al. Comparison of three types of swirling generators in coarse particle pneumatic conveying using CFD-DEM simulation [J]. *Powder Technology*, 2016, 301:1309-1320.
- [18] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在EDEM上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
WANG Guo-qiang, HAO Wan-jun, WANG Ji-xin. Discrete element method and its practice on EDEM [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.

Modeling Test and Simulation Study of Granular Dispersion Characteristics for Single Modular Charge Ignition and Flame-spreading

CHEN An, YU Yong-gang

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

Abstract: To investigate the distribution characteristics of propellant grains during ignition and flame-spreading of modular charge, a visualized modular charge experiment platform was designed. The test of $\Phi 130$ mm \times 100 mm single-modular charge ignition, rupture of the cartridge, and the movement of the propellant grains was conducted, and recorded by high speed camera system. A three-dimensional unsteady-state gas-solid two-phase flow model of the modular charge cartridge rupture and particle movement was established based on the gas phase-solid particle coupling method. Under different initial loading conditions of the cartridge, the distribution characteristics of propellant grains during the modular charge ignition and instantaneous process of flame spreading were analyzed. The simulation results indicate that, in the four simulated conditions that the distance between the initial loading position of modular cartridge and the primer is 40, 80, 120 mm and 150 mm, during the modular charging ignition and flame-spreading, the grains are finally distributed in the cartridge and the chamber on the right side of the modular cartridge. And they appear as a combination form horizontal and slope from primer side to pressure control diaphragm side. When the distance between the initial loading position of the modular charge and the primer is increased from 40 mm to 150 mm, the axial length of the horizontal stack is reduced from 269.5 mm to 200.4 mm, and the slope angle of the sloped stack is reduced from 25.03° to 21.31°. As the initial loading position of the module moves to the right, the axial length of the horizontal stack of grains becomes short, the stack thickness increases, and the slope angle of the sloping stack decreases. The numerical simulation results are basically consistent with the the sloping accumulation of the propellant grains observed experimentally, which verifies the rationality of the model.

Key words: single modular charge; propellant granular dispersion; discrete element method (DEM); gas-solid two phase flow

CLC number: TJ55; O359

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019311

(责编: 姜梅)