

文章编号:1006-9941(2023)01-0070-13

单模块装药膛内流场特性试验及数值仿真

马天一,陶如意,森思义,王浩

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 模块装药是目前大口径榴弹主要的装药结构之一。为了更加精确地研究单模块装药膛内燃烧的内弹道特性,分析膛内燃气流动及压力波变化规律,设计了模块装药燃烧模拟试验平台,并进行了单模块装药的膛内燃烧试验。根据模块装药的特点,分区域建立了模块装药轴对称二维两相流内弹道模型。基于高阶精度 MUSCL (Monotonic Upstream-centered Scheme for Conservation Laws) 格式,数值模拟了单模块装药药室内部点火过程。结果表明,计算结果与试验结果吻合较好,不同测试点的压力曲线的计算峰值误差均低于 4%,表明所建立数学模型和使用的计算方法能够较好地描述单模块装药药室内部燃烧过程。结果还发现,在 $t=5.0$ ms 前,由于模块未破裂,药盒端盖的阻隔导致主装药燃气无法及时向药室扩散,仅传火管燃气对膛内流场造成微弱的影响,这一时期药室内部压力最大值比传火管右端未破膜前仅上升约 4.3%;当模块破裂后,模块与药室边界处存在 3.05 MPa 的压力梯度,使得火药燃气及固相颗粒沿轴向快速向药室自由空间流动,在弹丸底部区域形成较强反射压力波;随着时间的推移,压力波反复震荡,并逐渐减弱。

关键词: 模块装药;数值模拟;两相流;内弹道;MUSCL 格式

中图分类号: TJ012.1; O359

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2022198

0 引言

为提高大口径榴弹发射速率,实现火炮自动装填,具有可燃和较强结构强度特点的刚性模块装药结构应运而生。模块装药结构是将火药装载在一个个单独的可燃容器中,再装上独立的传火管,形成一个完整的模块药盒^[1]。在火炮发射时,只需要根据发射的战术技术指标需求选择相应装药量、相应数量的模块药盒即可。

模块装药作为一种不同于布袋式装药的装药结构,会对包括点火性能、压力波传递在内的诸多火炮发射内弹道性能有较大影响。特别是在单一模块装药中,较长的药室自由空间,对燃气流动及膛内压力波的

产生和发展均有很大的影响。近年来,对于模块装药的研究受到了广泛的关注。其中,在热安全性方面,刘静等^[1-3]对不同升温速率下模块药盒的烤燃特性进行了数值分析,发现模块药盒烤燃响应时间与升温速率呈指数关系,但升温速率对烤燃响应温度影响较小;钱环宇等^[4-6]对不同射击温度、不同射击工况下模块药盒的热安全性进行了数值预测,结果表明,射速及环境温度对滞留在膛内的模块药盒均会产生影响。这些研究主要侧重于研究膛内火焰射流对模块药盒安全性的影响,而缺乏模块装药条件下主装药燃烧对膛内流场的影响分析。在药粒散布方面,陈安等^[7-8]采用三维非稳态气固两相流模型对单模块与两模块装药点火过程和药粒飞散过程进行了数值模拟,发现药粒呈陡坡状堆积在药室右侧;杨旭光等^[9]则是利用同样的三维模型,改变模块端盖的破裂形态,分析不同破裂状态对单模块装药模块破裂后药室内部药粒散布的影响,发现不同的破裂位置、破孔大小均会对模块药粒散布产生影响。这些研究将主装药替换为不具备燃烧特性的假药粒,未能研究主装药在药室内的燃烧现象。

由于模块装药结构的复杂性,目前国内对于模块

收稿日期: 2022-07-31; 修回日期: 2022-09-22

网络出版日期: 2022-09-29

作者简介: 马天一(1994-),男,博士研究生,主要从事模块装药膛内流场与燃烧特性研究。e-mail: 318108010188@njtu.edu.cn

通信联系人: 陶如意(1978-),女,副教授,硕士生导师,主要从事兵器发射理论与技术、计算流体力学等方面的研究。

e-mail: tao801801@163.com

引用本文: 马天一,陶如意,森思义,等. 单模块装药膛内流场特性试验及数值仿真[J]. 含能材料, 2023, 31(1):70-82.

MA Tian-yi, TAO Ru-yi, SEN Si-yi, et al. Experiment and Simulation of Flow Field Characteristics for Single Modular Artillery Charge System[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(1):70-82.

装药膛内燃烧的内弹道两相流理论研究也仅局限于(双)一维两相流内弹道数值模拟,且主要研究内容集中在模块装药全装药结构内弹道参数沿轴向分布规律。其中陆中兵等^[10-11]对单一传火管的模块装药全装药结构(6个模块)建立了两相流内弹道模型,对模块装药传火过程和膛内火焰扩散过程进行了数值模拟,为模块装药早期点火、火焰扩散等提供了理论依据。王育维等^[12-13]考虑模块运动模型模拟了火炮发射过程,发现可燃容器、主装药火药力与模块药盒长度对模块装药压力波均有明显影响。赵毅等^[14]结合集总参数法对模块装药点火过程进行数值模拟,发现提高传火管强度可以提高模块装药传火性能。赵欣^[15]对可变药室火炮模块装药进行了研究,分析了模块装药结构在可变药室火炮内的内弹道过程。马昌军等^[16]针对模块装药的结构特点,对其数理模型加以改进,将点火过程的不连续性、装药的不连续性以及模块的非同时破裂特性等因素考虑在内,数值模拟了模块装药内弹道过程,发现模块药盒对传火性能有影响,模块药盒的破裂时间也受到药盒强度和传火性能等多重影响。然而,对于火炮发射系统,其膛内燃烧过程本就是一个伴随有复杂物理化学过程、具有多维效应的多相燃烧流动过程,这一过程用一维两相流无法详细呈现其膛内现象。因此,开展真实状态下模块装药二维两相流研究,更准确地反映单模块装药结构膛内燃烧特点及流场特性,发现其内弹道燃烧特性,对模块装药在现代火炮发射系统的应用和射击安全具有重要意义。

本研究以某大口径榴炮模块装药结构为研究背景,设计了模块装药燃烧模拟试验平台,考虑模块药盒与主装药的燃烧,基于单模块装药燃烧模拟试验以及高精度间断分解算法 Monotonic Upstream-centered Scheme for Conservation Laws (MUSCL) 格式,针对传火管、模块药盒与药室分区域建立了模块装药二维轴对称两相流模型并编制了计算机代码,数值模拟了单模块装药药室内点火传火过程燃烧规律及流场流动特性;通过与单模块装药燃烧模拟试验的测试压力曲线对比,验证了算法的准确性与模型的可靠性;同时分析了单模块装药药室内主装药点火传火过程燃烧特点及流场变化规律。

1 试验研究

1.1 试验设备

为研究模块装药药室内燃烧现象,设计了如图1

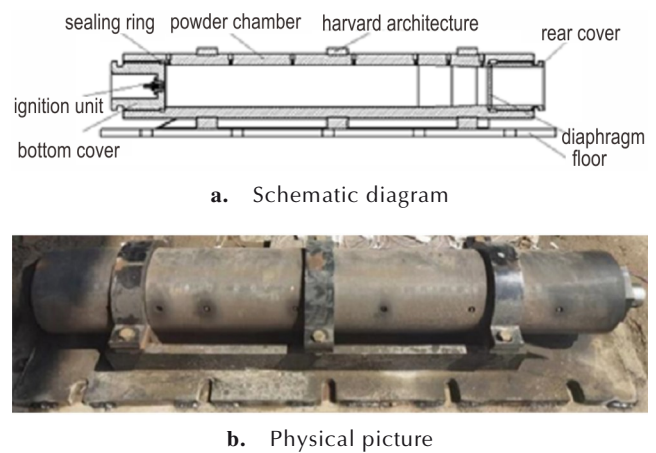


图1 模块装药燃烧模拟试验平台

Fig.1 Test platform for Combustion simulation of Modular Artillery Charge System (MACS)

所示模块装药燃烧模拟试验平台。该平台由点火系统、药室、底盖、后盖、泄压膜片、基座以及底板等部分构成。药室最大内径170 mm,炮口直径155 mm。装置上方设有7个测压孔,根据需要可用于测量药室不同位置、坡膛以及弹底的压力。底火置于点火装置中,采用电点火方式击发点火。

泄压系统采用爆破膜泄压方式^[17],该泄压系统采用的膜片材料是屈服极限为235 MPa的普通碳素结构钢,根据膜片薄弱处厚度的不同,可以进行不同挤进压力的试验。

1.2 装药方案

本试验采用3号电底火,传火管中用蛇形药袋装有2号大粒黑火药30 g,两端封闭,模块药盒内装有23/19火药3.0 kg,传火管两侧端盖破膜压力为0.2 MPa,模块药盒破裂压力为3.0 MPa。模块药盒紧贴底火端。模块药盒与传火管实物图如图2所示;传火管与模块药盒、模块药盒与端盖之间用特制胶水固定、密封,装

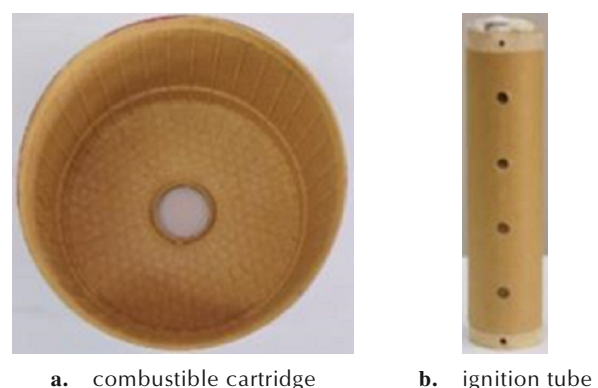


图2 模块药盒与传火管实物图

Fig.2 Combustible cartridge and ignition tube

药示意图如图3所示;药室泄压膜片薄弱处厚度选择5.0 mm,破膜压力为30.0 MPa。其中点火药、主装药与可燃容器的弹道特征量参数如表1所示。

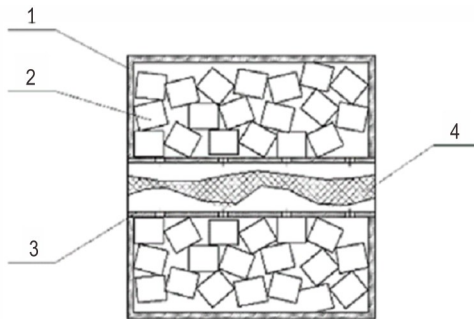


图3 模块装药示意图

1—可燃药盒, 2—粒状火药, 3—传火管, 4—蛇形药袋

Fig.3 Diagram of MACS

1—combustible cartridge, 2—granular propellant, 3—ignition tube, 4—powder bags

表1 火药弹道特征量

Table 1 Ballistic characteristic value of powder

power type	f /kJ·kg ⁻¹	α /m ³ ·kg ⁻¹	ρ /kg·m ⁻³	u /m·s ⁻¹ ·MPa ⁻ⁿ	n
igniter	300.0	0.000485	1600	0.00264	0.7
main propellant	1030.0	0.001	1650	0.0024	0.8
combustible container	616.3	0.001267	1139	-	-

Note: f is propellant force. α is covolume. ρ is density. u is burn rate coefficient. n is burning rate index.

1.3 测试系统

本试验测试系统^[17]利用压电式压力传感器与DEWE-2500型瞬态压力记录仪对各测试点压力进行测试并记录在存储装置中,并用FASTCAM Mini UX-50系列高速图像采集系统对试验过程进行拍摄。本试验测试点位置如图4所示。

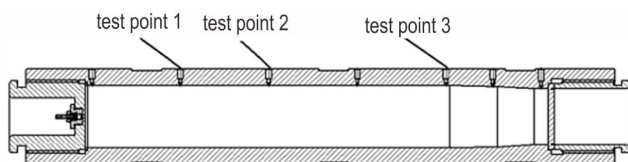


图4 测试点位置

Fig.4 Location of test points

2 单模块装药两相流数理模型

研究仿真对象为单模块装药燃烧模拟试验,装药结构布置如图5所示,药室贴近底火部放置模块药盒。单模块装药膛内燃烧的物理过程可以描述为:电底火

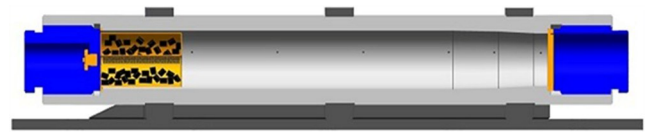


图5 单模块装药结构布置示意图

Fig.5 Diagram of structural layout of single modular artillery charge system

击发点燃传火管中的点火药,点火药燃气在传火管内部燃烧,当传火管壁面传火孔内外存在压力差时,部分点火药燃气通过点传火孔向模块内部传播,同时大量点火药燃气继续沿传火管轴向传播,当传火管端盖处压力随着点火药的燃烧达到端盖破裂压力后,端盖破裂,点火药燃气及少量黑火药颗粒进入药室,在药室内继续燃烧。在此过程中,流入模块的点火药燃气逐步加热并点燃模块内部主装药,同时当药盒壁面处温度达到药盒燃烧温度时,药盒开始燃烧。当模块药盒壁面内外压差达到药盒破裂压力时,模块药盒破裂,未燃完的火药分散在药室自由空间内继续燃烧,直到药室泄压膜片处压力达到药室破膜压力,泄压膜片破裂。

2.1 基本假设

根据上述物理过程建立模块装药传火管一维两相流模型以及模块药盒及药室内燃烧轴对称二维两相流模型,为简化计算,对实际物理过程进行合理假设如下^[7,18-22]:

(1)使用双流体弹道模型,即把固相火药颗粒当作拟流体,认为火药颗粒群组成的固相具有连续介质特性,且固相连续分布在气相中。

(2)将模块药盒与药室作等直径处理。

(3)模块与传火管的破裂准则采用压差准则,即模块药盒与传火管均能承受一定压力。传火管的传火孔与端盖未破裂前,传火管密闭;模块未破裂前,模块药盒密闭;由于传火管与模块药盒材料相似,假设模块药盒与传火管同时破裂。

(4)将传火管、模块药盒、炮膛分区域建模。模块作为单独区域计算,但是考虑传火管与药室、传火管与模块药盒之间的气体交换。

(5)由于高能模块药盒会引起模块装药内弹道过程出现明显压力波^[13],因此本文将模块药盒的燃烧产物作为源项加入到模块装药内弹道计算中。

2.2 数学模型

针对上述物理模型,分别建立传火管一维两相流模型、模块药盒内部二维轴对称两相流模型以及药室内火药燃烧二维轴对称两相流模型。

2.2.1 传火管一维两相流模型

为简化计算,忽略传火管的二维效应,在传火孔破膜后,将传火管作为线源耦合到模块药盒内部的主装药燃烧中,传火管一维两相流内弹道模型参考文献[21]与文献[22]。

2.2.2 二维轴对称两相流模型

模块药盒区域与药室区域轴对称二维两相流内弹道守恒型方程组^[18-22]可统一描述为:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} + \frac{\mathbf{H}}{r} = \mathbf{S} \quad (1)$$

式中, \mathbf{U} 为与时间相关的守恒矢量, \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 分别为径向和轴向的矢通量, \mathbf{H} 为轴对称变换矢量, \mathbf{S} 为源项。具体可表示如下:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \phi \rho_g \\ (1 - \phi) \rho_p \\ \phi \rho_g u_{gr} \\ \phi \rho_g u_{gz} \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pr} \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pz} \\ \phi \rho_g E_g \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \phi \rho_g u_{gr} \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pr} \\ \phi (\rho_g u_{gr}^2 + p) \\ \phi \rho_g u_{gr} u_{gz} \\ (1 - \phi) (\rho_p u_{pr}^2 + p + R) \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pr} u_{gz} \\ \phi \rho_g u_{gr} (E_g + p/\hat{\rho}_g) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \phi \rho_g u_{gz} \\ (1 - \phi) \rho_p u_{gz} \\ \phi \rho_g u_{gr} u_{gz} \\ \phi (\rho_g u_{gz}^2 + p) \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pr} u_{gz} \\ (1 - \phi) (\rho_p u_{pz}^2 + p + R) \\ \phi \rho_g u_{gz} (E_g + p/\hat{\rho}_g) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \phi \rho_g u_{gr} \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pr} \\ \phi \rho_g u_{gr}^2 \\ \phi \rho_g u_{gr} u_{gz} \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pr}^2 \\ (1 - \phi) \rho_p u_{pr} u_{pz} \\ \phi \rho_g u_{gr} (E_g + p/\hat{\rho}_g) \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = \dot{m}_c + \dot{m}_{ign} + \dot{m}_{igmk}$$

$$S_2 = -\dot{m}_c$$

$$S_3 = -F_{sr} + p \frac{\partial \phi}{\partial r} + \dot{m}_c u_{pr} + \dot{m}_{ign} u_{ignr} + \dot{m}_{igmk} u_{igmkr}$$

$$S_4 = -F_{sz} + p \frac{\partial \phi}{\partial z} + \dot{m}_c u_{pz} + \dot{m}_{ign} u_{ignz} + \dot{m}_{igmk} u_{igmkz}$$

$$S_5 = F_{sr} - p \frac{\partial \phi}{\partial r} - \dot{m}_c u_{pr}$$

$$S_6 = F_{sz} - p \frac{\partial \phi}{\partial z} - \dot{m}_c u_{pz}$$

$$S_7 = -F_{sr} u_{pr} - F_{sz} u_{pz} - p \frac{\partial \phi}{\partial t} - Q_p + \dot{m}_c H_p + \dot{m}_{ign} H_{ign} + \dot{m}_{igmk} H_{igmk}$$

式中, ϕ 为孔隙率; ρ_g 为气相密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_p 为固相密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; u_{gr} 、 u_{gz} 分别为径向与轴向的气体流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_{pr} 、 u_{pz} 分别为径向与轴向的固相颗粒速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; E_g 为气相总能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; p 为气相燃烧压力, Pa ; R 为颗粒间应力, Pa ; \dot{m}_c 、 \dot{m}_{ign} 为单位体积内火药燃气的生成速率以及点火源相燃气生成速率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$; \dot{m}_g 、 \dot{m}_p 分别为单位体积气相与固相流出速率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$; u_{ignr} 、 u_{ignz} 分别为径向与轴向的源相速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; F_{sr} 、 F_{sz} 分别为径向与轴向的气、固相间阻力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$; Q_p 为相间传热, $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$; H_{ign} 为点火源相气体的滞止焓, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; \dot{m}_{igmk} 为模块药盒源项燃气生成速率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, 根据式(4)计算得到; u_{igmkr} 、 u_{igmkz} 分别为径向与轴向的模块药盒源相速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.3 辅助方程

为了使两相流内弹道基本方程组构成封闭的方程系,除上述守恒方程组外,根据文献[21-22]建立了包括相间阻力、相间热交换、颗粒间应力、气体状态方程、火药燃烧方程在内的多个辅助方程。

另外,根据2.1节中的假设,将模块药盒作为源项加入模块装药膛内两相流过程,假设模块药盒燃烧遵循几何燃烧定律^[20],则模块药盒的燃烧方程^[20]可表述为

$$\psi_{mk} = \chi_{mk} Z_{mk} (1 + \lambda_{mk} Z_{mk} + \mu_{mk} Z_{mk}^2) \quad (2)$$

$$\frac{dZ_{mk}}{dt} = \begin{cases} \frac{u_{mk}}{e_{mk}} \rho_{mk}^{n_{mk}} & (Z_{mk} < 1) \\ 0 & (Z_{mk} \geq 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$r_{mk} = u_{mk} \rho_{mk}^{n_{mk}} \quad (4)$$

式中, $Z_{mk} = e/e_{mk}$ 为已燃厚度百分比。 e 表示模块药盒已燃厚度, m ; e_{mk} 表示模块药盒初始弧厚的一半, m ; u_{mk} 表示模块药盒的燃速系数, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$; n_{mk} 表示其燃速指数; ρ_{mk} 表示燃烧压力, Pa ; ψ_{mk} 表示模块药盒已燃质量百分比; χ_{mk} 、 λ_{mk} 、 μ_{mk} 表示模块药盒形状特征量。

则单位体积内模块药盒燃烧生成的燃气体积^[20]为

$$\dot{m}_{igmk} = \rho_{mk} r_{mk} A_{mk} \quad (5)$$

$$\bar{A}_{mk} = \rho_{mk} (1 - \psi) S_{mk} / M_{mk} \quad (6)$$

式中, ρ_{mk} 为模块药盒密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; r_{mk} 为模块药盒燃烧速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; A_{mk} 为固相比表面积; S_{mk} 为模块药盒的燃烧面积, m^2 ; M_{mk} 为模块药盒的燃烧质量, kg 。

经密闭爆发器试验测定,可燃容器燃速方程为

$$r_{mk} = \begin{cases} 2.5 \times 10^{-8} p^{0.917} & (p < 15 \text{MPa}) \\ 8.21 \times 10^{-8} p^{0.844} & (p \geq 15 \text{MPa}) \end{cases} \quad (7)$$

式中, p 表示燃烧压力, Pa 。

2.3 计算模型

为便于计算,将计算区域划分为传火管、模块药盒与药室自由空间三个区域,对于传火管、模块及药室自由空间部分的网格划分情况如图6所示。药室由模块药盒与自由空间共同组成,模块药盒位于药室底部。传火管直径31 mm,长230 mm;模块药盒直径170 mm,长230 mm;药室长度为1270 mm;采用四边形结构网格划分计算域,轴向与径向网格长度为5 mm。模型之间相互耦合关系同样如图6所示,在传火管破裂前,底火射流在传火管中传播(图6a),当传火孔破裂后,传火管燃气作为线源加入到模块药盒与药室的燃

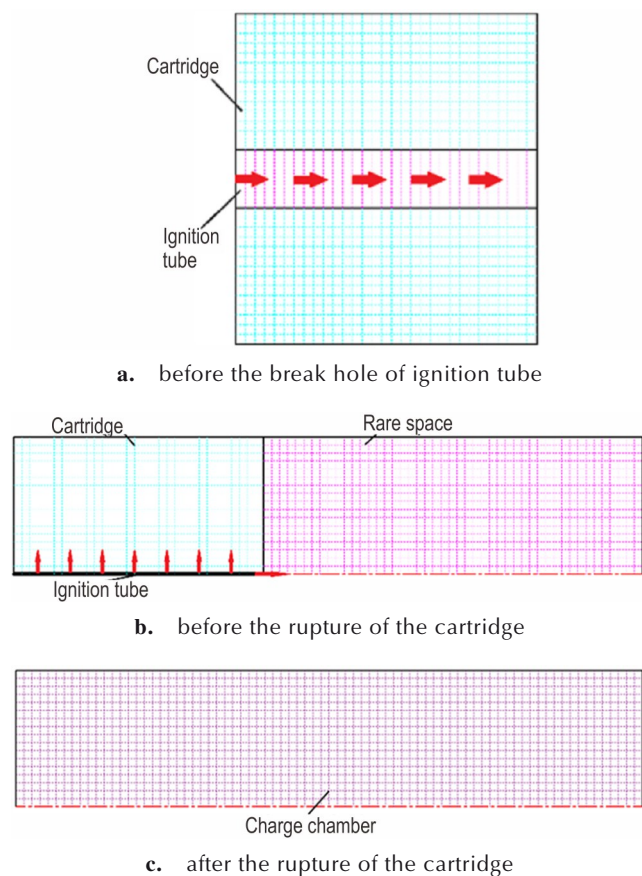


图6 网格划分与区域耦合示意图

Fig.6 Diagram of grid division and interaction regions

烧之中(图6b),当模块药盒破裂后,原模块药盒内部空间与自由空间共同组成药室空间,火药燃气与未燃完的火药颗粒在药室空间内自由流动(图6c)。

2.4 数值计算方法

自20世纪70年代以来,欧美各国对高阶精度间断分解算法开展了深入研究,其中Van Leer^[23]所提出的高阶精度MUSCL差分格式是最具有代表性的高阶精度间断分解算法。对于空间项,采用高阶精度MUSCL差分格式进行计算,时间项则采用四阶龙格库塔法^[21]进行推进。

2.4.1 MUSCL差分格式^[24]

由于2.2.3节中方程组(1)不是双曲型方程,无法直接采用MUSCL差分格式求解,因此需要将该方程组转化为双曲型方程组,源项作为非守恒相。将守恒型向量方程Jacobian转换^[24]后得:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}(\mathbf{U}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial r} + \mathbf{B}(\mathbf{U}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S} - \frac{\mathbf{H}}{r} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{A}(\mathbf{U})$ 、 $\mathbf{B}(\mathbf{U})$ 为Jacobian矩阵系数,有

$$\mathbf{A}(\mathbf{U}) = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \quad (9)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{U}) = \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{U}} \quad (10)$$

矩阵A与矩阵B的特征值及左、右特征矩阵分别为 Λ_x 、 Λ_y 、 L_A 、 L_B 、 R_A 、 R_B , 流通量矢量 $\mathbf{f}(\mathbf{u}) = R_x \Lambda_x L_x \mathbf{u}$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{u}) = R_y \Lambda_y L_y \mathbf{u}$ 。

求解时,采用流通量矢量分裂法:

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}) = \mathbf{f}^+(\mathbf{u}) + \mathbf{f}^-(\mathbf{u}) \quad (11)$$

用Steger-Warming流通量矢量分裂法,有:

$$\lambda_j^\pm = \frac{1}{2} \left(\lambda_j \pm \sqrt{\lambda_j^2 + \varepsilon^2} \right) \quad (12)$$

这里 ε 是修正小量^[24],取 $\varepsilon=10^{-4}$ 。

得到高阶精度MUSCL差分格式:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(f_{i+\frac{1}{2},j}^n - f_{i-\frac{1}{2},j}^n \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(g_{i,j+\frac{1}{2}}^n - g_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) \quad (13)$$

其中,

$$f_{i+\frac{1}{2},j}^n = f^+ \left(u_{i+\frac{1}{2},j,L}^n \right) + f^- \left(u_{i+\frac{1}{2},j,R}^n \right) \quad (14)$$

$$g_{i,j+\frac{1}{2}}^n = g^+ \left(u_{i,j+\frac{1}{2},L}^n \right) + g^- \left(u_{i,j+\frac{1}{2},R}^n \right) \quad (15)$$

2.4.2 初始条件和边界条件

单模块装药数值模拟时,药室内初始分为传火管、模块与药室3个区域,各区域的初始条件均为环境常

量和试验装填条件^[21]。

对于传火管区域,在传火管内压力达到破孔压力前,传火管壁面均为固壁边界,在达到破孔压力后,传火管前端变为流出边界;在模块破裂前,模块及自由空间处下边界为轴对称边界,其他边界均为静止固壁边界,当模块破裂瞬间,将模块与药室进行耦合计算,将模块内部网格点的参量值赋值给药室内部网格点上;药室区域与模块药盒区域处理方式相同。对于中心轴线对称边界满足轴对称关系式^[22]

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{gr} = u_{pr} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial \rho_g}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial u_{gz}}{\partial r} = \frac{\partial u_{pz}}{\partial r} = 0 \end{array} \right. \quad (16)$$

2.4.3 稳定性条件和时间步长的确定

采用的稳定性条件^[21]为:

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{|u_r|}{\Delta r} + \frac{|u_z|}{\Delta z} + c \sqrt{\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (17)$$

数值实践表明,此稳定性条件用于计算两维多相流动,既能保证程序运行时间短,又能保证格式的稳定。

3 数值仿真及结果分析

3.1 试验对比与验证

试验测得的三个测试点的压力曲线如图7所示,可以发现,由于传火速度较快,3个测试点的测试结果基本相同,故选用测试点1进行展示说明。为了验证所建立模型及数值算法的准确性,将试验参数代入数值模拟程序,采用MUSCL格式对其进行求解。得到测试点1处试验压力曲线与数值模拟曲线对比图如图8所示,3个测试点处计算峰值与试验测量峰值误差如表2所示。由于膜片破裂后药室会产生泄压,因此压力曲线仅取到膜片破裂瞬间截止。从图8可以看出,测试点1处计算压力曲线与试验压力曲线重合度较高,且由表2可以看出,三个测试点处数值模拟结果与试验结果对比良好,峰值误差均不超过4%,说明模型与数值计算方法合理有效。

由图7可以看出,模块药盒破裂前药室自由空间

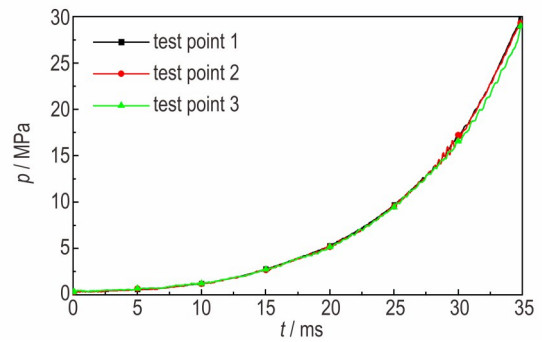


图7 药室内不同测试点压力分布曲线图

Fig.7 Pressure distribution curves of different test points in chamber

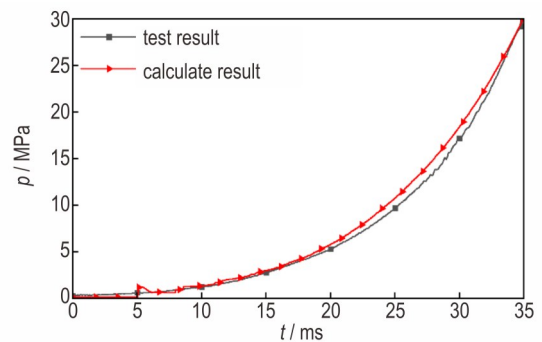


图8 测试点1处药室内试验压力与计算压力对比图

Fig.8 Comparison of pressure distributions in chamber between the experimental and calculated results of test point 1

表2 不同测试点处试验峰值压力与计算峰值压力数据对比与误差

Table 2 Comparison and Error of Peak Pressure between tests and calculations at Different Test Points

test point	1	2	3
test pressure peaks/MPa	29.18	29.31	28.99
calculated pressure peaks/MPa	29.996	29.993	29.992
maximum error	2.80%	2.33%	3.46%

位置处压力几乎不发生变化,在点火起5.0 ms以内压力曲线一直保持在较低的压力值。分析认为这是因为自点火开始,底火射流点燃传火管内点火药,点火药燃气冲破传火孔点燃模块药盒中的主装药,主装药燃烧,模块药盒破裂,火药燃气在药室中传播,这一系列过程需要经过一定的时间^[18],模块药盒部分与药室自由空间部分相互独立,因此当模块破裂后,模块内部火药在药室内传播,当火药燃气充满整个药室后,随着模块内部火药传播到药室中并在药室中继续燃烧时,压力逐渐增大,曲线呈现出不断上升趋势,直到 $t=34.94$ ms时,药室前端压力达到膜片破裂压力,单模块装药药室内点火过程结束。

3.2 药室内部两相流动现象分析

3.2.1 模块内部流场特性

为了更加清楚地分析模块药盒破裂前药盒内部燃气流动及火药分布情况,选取模块药盒破裂前不同时刻的压力分布云图如图9所示、孔隙率分布云图如图11所示。

由图9a可以看出,随着传火管内点火药燃气的大量流入,模块内部传火孔处存在明显的压力波动,形成轴向与径向的压力梯度;这一压力梯度逐渐沿轴向与径向传播,碰到壁面后发生反射,直到模块与传火管破裂,如图9b~图9d所示。同时,火药燃气也由传火孔

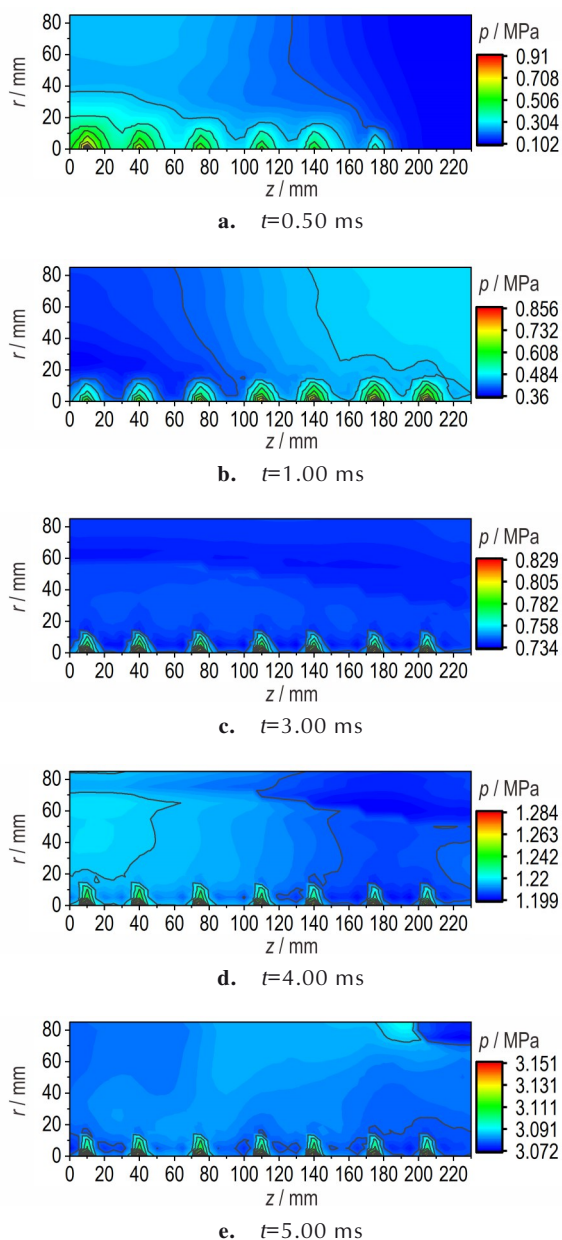


图9 模块破裂前内部压力变化云图

Fig.9 Internal pressure contours before cartridge rupture

向外传热,逐步点燃模块内部主装药。随着主装药的燃烧,模块内部压力也随之上升,火药燃气向模块药盒边缘扩散。当模块药盒边缘处气相温度达到药盒燃烧温度时,模块药盒开始燃烧。在药盒破裂前,火药燃气在遇到药盒壁后会发生反射,未燃完的固相颗粒则随着火药燃气的流动而流动,从而对模块药盒内部固相颗粒分布产生影响。另外,从图9中各图的压力分布可以发现模块内部压力主要是由传火孔开始沿轴向与径向减缓,并且计算结果表明,当模块药盒破裂时,模块药盒燃烧百分数仅有1.8%,因此可以得知模块药盒的燃烧对内部压力场影响较小。

图10为模块破裂前模块内部压力差值随时间变化曲线,从图10可以看到,当 $t=0.5$ ms时,药室内部压差较大,约为0.808 MPa, $t=1.0$ ms时约为0.496 MPa, $t=3.0$ ms时约为0.095 MPa, $t=4.0$ ms时约为0.084 MPa, $t=5.0$ ms时约为0.079 MPa,随着时间推移,模块内部压力差值逐渐减小,直到保持在一个相对平稳的状态直到模块破裂,这是因为点火初期,模块药盒内火药装填密度大,主装药还未被完全点燃,模块内部透气性差,点火药燃气无法很快充满整个药盒所致,而随着点火药燃气在模块药盒内部流动以及主装药的逐步燃烧,火药燃气在药盒内均匀分布,使得压力差值逐步减小。

当传火管的传火孔破孔时,点火燃气从传火孔流入模块对模块内部火药颗粒造成冲击,导致临近底火端的中心轴线位置的火药颗粒向右端挤压,靠近底火处孔隙率较大,为0.6401,而远离底火处孔隙率较小,为0.6397(图11a);随着时间的推移,传火孔逐个破裂,火药燃气在模块药盒内扩散,火药颗粒向远离传火管及底火端运动,孔隙率随之发生变化(图11b~图11d);当模块破裂时,药盒内部火药颗粒孔隙率呈左高右低的

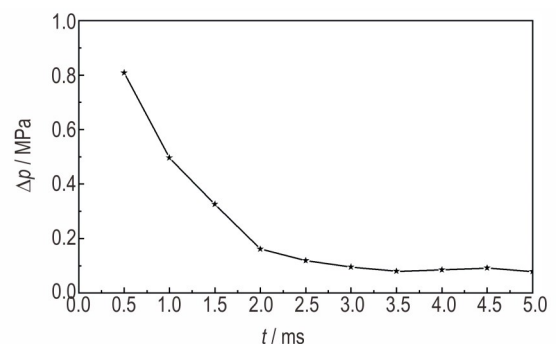


图10 模块破裂前内部压力差值曲线

Fig.10 Curve of Internal pressure difference before cartridge rupture

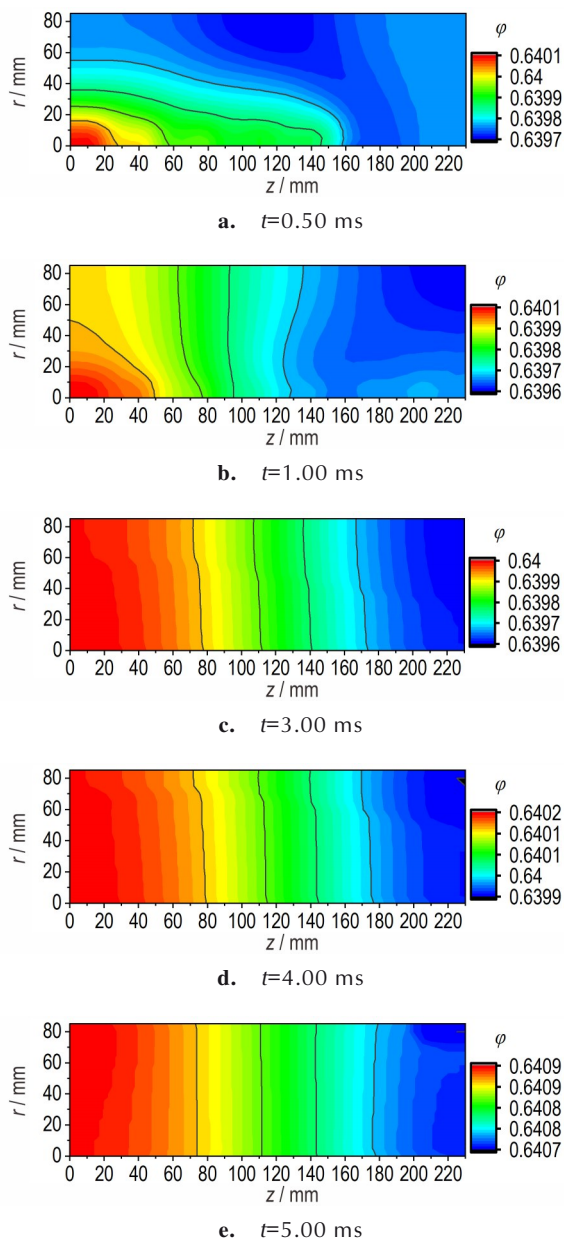


图11 模块破裂前内部孔隙率变化云图

Fig. 11 Contours of Internal porosity change before cartridge rupture

规律,即火药颗粒有向右堆积的趋势(图11e);但是,由于模块药盒内部空间较小,装药量较多,导致模块药盒内部装填密度较大,固相颗粒运动阻力也随之增加,故可以从图11中各时刻模块药盒内部各网格点处的孔隙率值发现,模块药盒内部孔隙率始终在初始孔隙率值0.64附近浮动。

3.2.2 药室内流场特性

单模块装药药室(Charge Chamber)内部燃烧过程不同时刻的压力分布云图如图12所示,其中虚线框

代指模块药盒位置。在模块药盒与传火管端盖均未破裂之前,药室自由空间压力为0.1 MPa; $t=0.56$ ms时,由于传火管端盖强度远小于模块药盒端盖强度,因此在模块药盒破裂之前,传火管内火焰波已经冲破传火管端盖向药室内流动,此时药室自由空间压力有轻微扰动(图12a); $t=3.0$ ms时,自由空间部分最大压力位于传火管端盖处,为0.1046 MPa,远离传火管端盖处压力约0.102 MPa,扰动约为初始压力的5%,这是因为点火药燃烧不充分,且药室自由空间过大导致(图12b); $t=5.0$ ms时,模块药盒破裂,此时药室自由空间部分最大压力仅有0.11 MPa,而药盒端盖位置处有明显压力梯度,此扰动迅速沿轴向向泄压膜片处传播(图12c); $t=15.0$ ms时,药室底部压力大于药室膜片处压力,压缩波由药室底部不断向泄压膜片处传递(图11d); $t=21.0$ ms时,压缩波已经触碰到泄压膜片并产生反射,此时药室内压力分布呈现中间高两端低的规律,且由于此时膜片处压力大于药室底部压力,出现负向压力波(图12e);随着压力在药室内的反复波动,膜片破裂瞬间,药室内压力分布称中间低两端高的特点,如图11f所示。由图12d~图12f的压力分布可以发现,随着时间的推移,药室内部压力沿径向分布逐渐均匀,这是因为火药在药室内燃烧过程中,由于药盒破裂时压力梯度的存在,导致二维效应不明显,在泄压膜片破裂时刻,药室内流动轴向变化比较强烈,径向几乎没有变化。

为能够更加清楚地分析模块破裂前后药室内部流场,取距离药室中心轴线10 mm处各参量为例,该处模块破裂前后不同时刻压力、孔隙率、气相速度、固相速度如图13~16所示。

从图13a可知,在点火初期,由于传火管传火孔传火的原因,模块内部压力在传火孔处有一定波动,随着药室内火药的燃烧和火药燃气的流动,此压力波动逐渐趋于平稳;且在模块破裂前,模块内部与药室内部互不影响,初期药室内部微小压力波动均为传火管端盖打开,点火药燃气在药室中传播所致。从图13b可知,模块破裂初期,在 $r=10$ mm处药室与模块边界形成约3.05 MPa的压力梯度,随着模块内部气固两相向药室中流动,压力梯度也逐渐趋于平稳。

结合图13、14可以发现,在模块破裂前,主装药由于集中在模块位置处,即药室轴向0~230 mm区域,故模块内部孔隙率最小。随着模块破裂,火药燃气向药室右端膜片处传播,固相火药颗粒也随之向右侧运动,药室左端孔隙率逐渐增大,火药颗粒端面不断前移,直

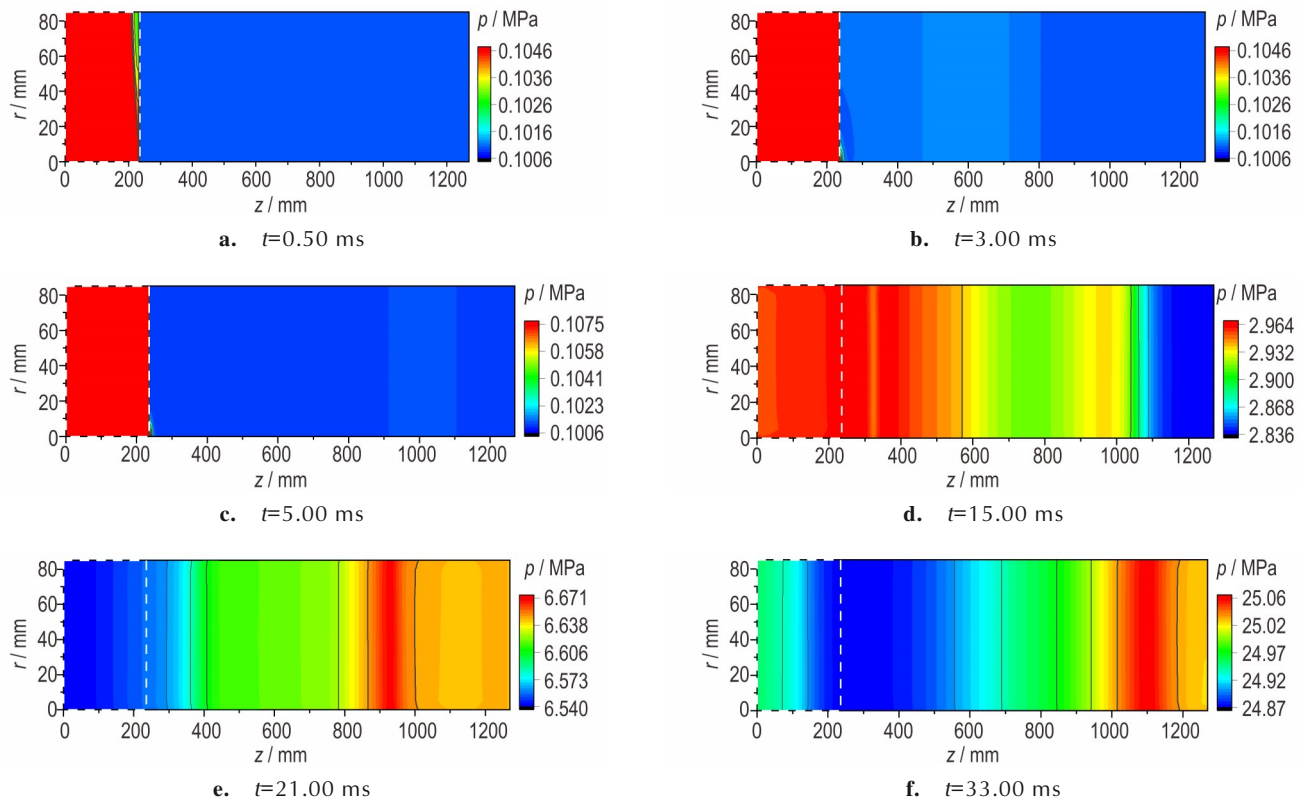
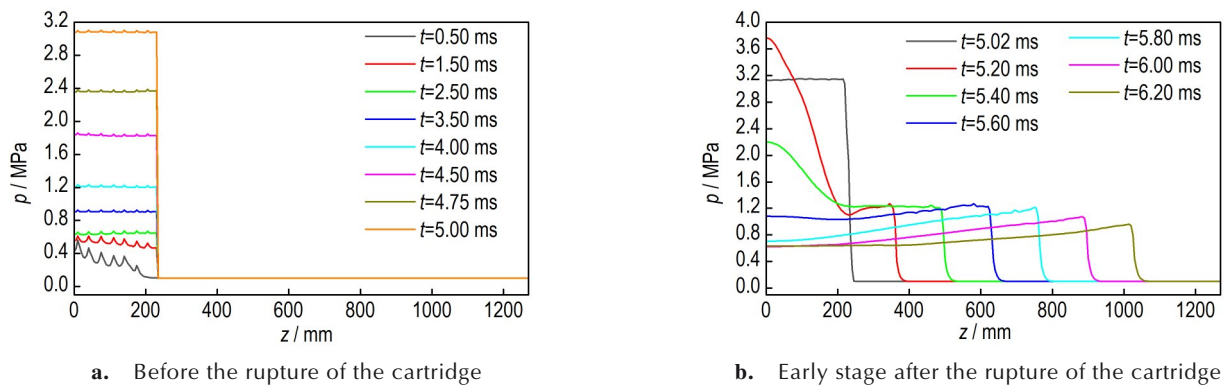


图12 药室内部压力变化云图

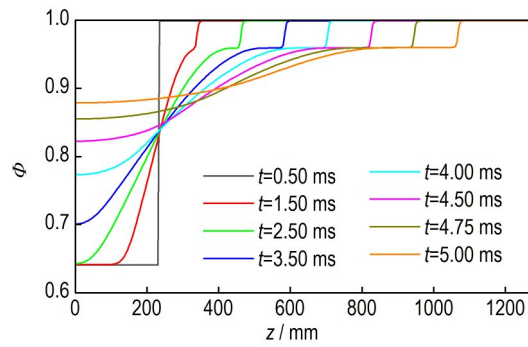
Fig.12 Contours of pressure change inside the drug room

图13 $r=10$ mm处压力分布曲线Fig.13 Pressure distributions along the axis at $r=10$ mm

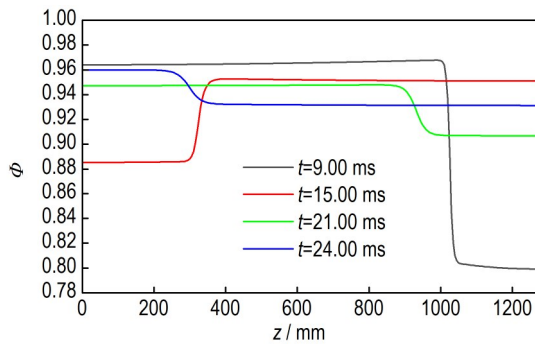
到触碰药室右端膜片后产生反射,在药室内不往复运动,导致药室内部孔隙率发生变化,如图14b与图14c所示。虽然火药颗粒在逐步燃烧,但是由于药室容积较大,膜片破膜压力较小(仅30 MPa),当膜片破裂时,火药仅燃烧13.53%左右,大量火药向远离底火端堆积,从图14c可以看出,当膜片破裂时刻(33.0 ms),药室近底火端孔隙率约为0.95,而近膜片处孔隙率约为0.93,孔隙率越低说明该处火药密集度越高。

从图15、16可以发现,模块破裂后,固相火药颗粒

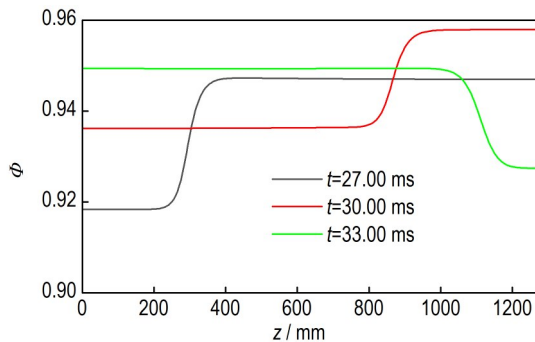
随火药燃气共同向药室膜片处传播。当与膜片发生碰撞时,由于膜片未破裂,会产生反射波,气流方向与固相颗粒运动方向发生改变,且随着时间的推移,气相速度与固相速度逐渐降低。由于药室长1270 mm,而直径只有170 mm,且模块破裂时有沿轴向的压力梯度,将图15a与图15c对比、图15b与15d对比,在同一时刻火药燃气沿轴向运动速度不超过径向运动速度的5%,即火药燃气与火药颗粒沿轴向运动明显,沿径向运动相对微弱;将图16a与图16c对比、图16b与16d



a. 5.0–6.4 ms



b. 9.0–24.0 ms



c. 27.0–33.0 ms

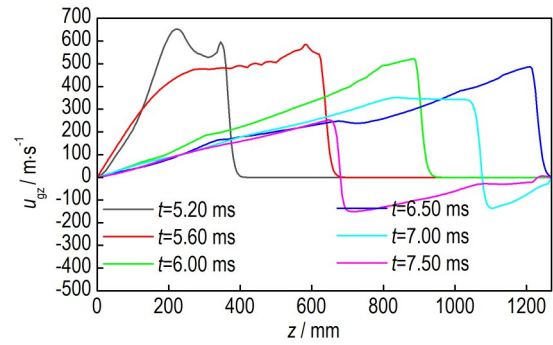
图 14 $r=10$ mm 处孔隙率分布曲线

Fig.14 Porosity distributions along the axis at $r=10$ mm

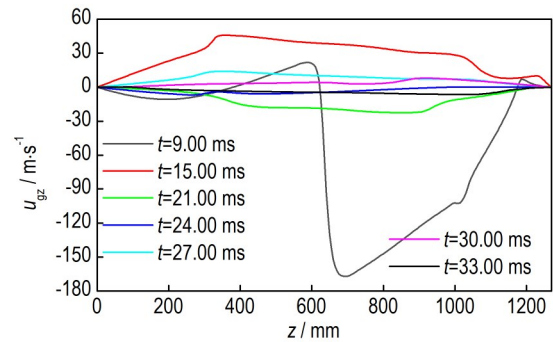
对比,会发现对于固相火药颗粒,径向运动更加微弱,同一时刻其径向速度不超过轴向速度的0.1%。

3.2.3 药室内部压力波动

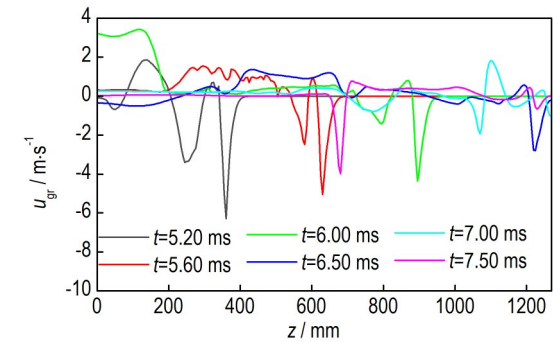
由 3.2.1 节和 3.2.2 节的分析可知,药室内压缩波的反复震荡对膛内流场有明显影响,因此对单模块装药点传火过程中的压力波进行研究有重要价值,因此对膛低压力与弹底压力进行差值计算,得到单模块装药膛内压力波曲线,结果如图 17 所示,其中 p_i 为膛底压力, p_a 为弹底压力。可以看出,单模块装药膛内燃烧压力波变化范围较小,第一个正压差 3.66 MPa,是由于初期轴向不均匀点火导致的,第一个负压差为 -1.82 MPa,



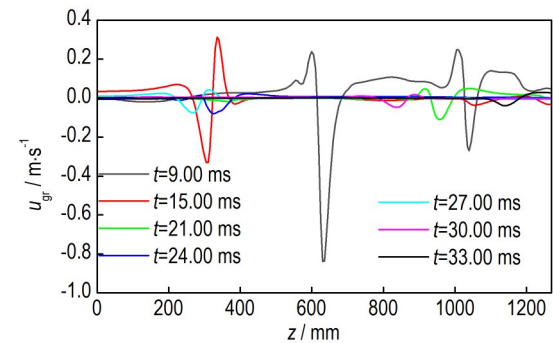
a. axial velocity for 5.2–7.5 ms



b. axial velocity for 9.0–33.0 ms



c. radial velocity for 5.2–7.5 ms



d. radial velocity for 9.0–33.0 ms

图 15 $r=10$ mm 处气相速度变化曲线

Fig.15 Gas phase velocity distributions at $r=10$ mm

说明单模块装药药室内部安全性较好。该装药结构的压力波强度完全在安全范围内,其压力波动幅度收敛能力较好^[25]。

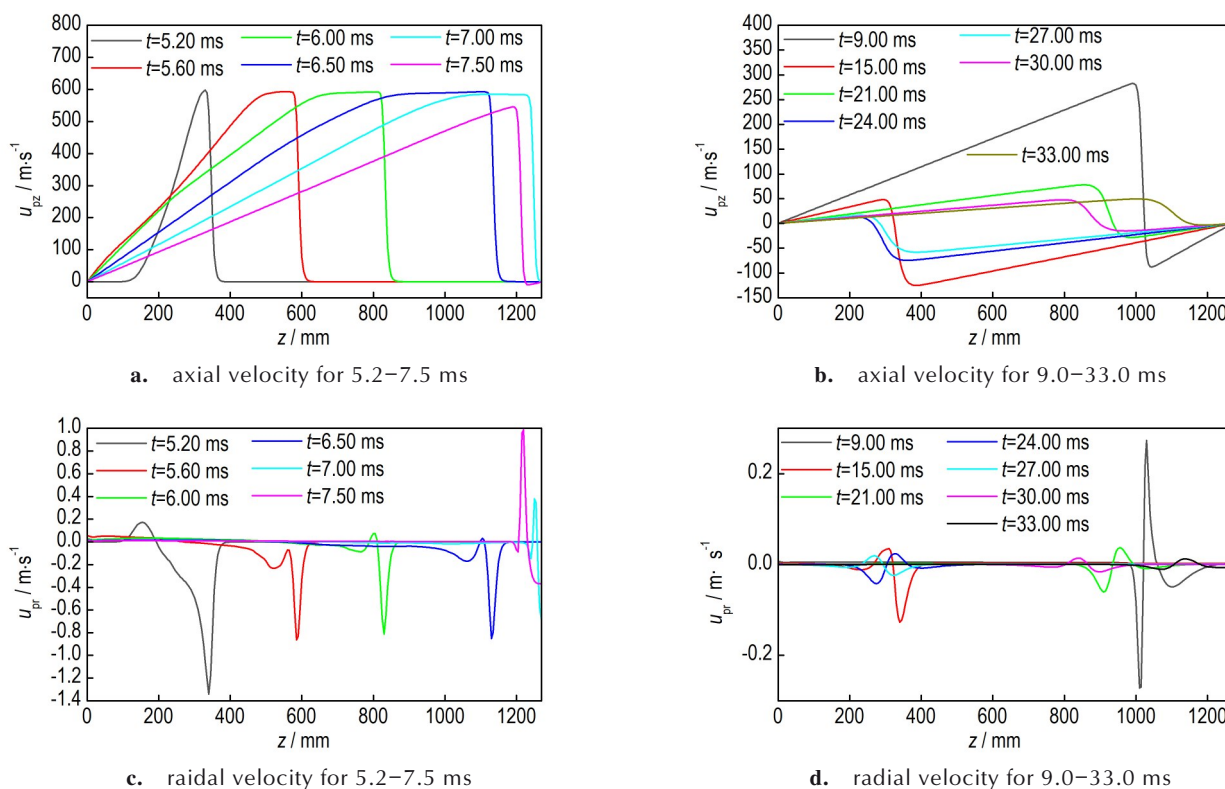
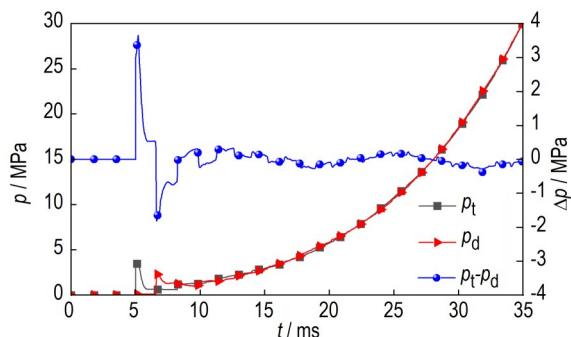
图 16 $r=10$ mm 处固相速度变化曲线Fig.16 Velocity distributions of solid phase at $r=10$ mm

图 17 压力波曲线

Fig.17 Curves of pressure wave

3 结论

(1) 将不同测试点压力随时间变化曲线的数值模拟结果与试验结果对比, 峰值误差分别为 2.80%、2.33% 和 3.46%, 验证了单模块装药轴对称二维两相流内弹道模型的准确性, 对后续研究模块装药膛内流场有重要参考价值。

(2) 由于模块药盒端盖和传火管端盖强度不同, 在模块药盒破裂前传火管端盖就已经破裂, 传火管内部点火药燃气会对药室内部产生影响, 但是相对于主

装药燃气, 点火药燃气产生的影响十分微弱。

(3) 模块药盒的存在对药室内部传火有一定延迟效果。在模块药盒破裂瞬间, 模块药盒与药室接触面上会出现一定压力梯度, 从而使得模块装药火药颗粒与火药燃气流场沿轴向传播更加剧烈。随着火药燃烧, 轴向运动会逐渐减弱并趋于平衡, 但在整个内弹道过程中, 轴向运动始终占主体, 径向运动相对微弱

参考文献:

- [1] 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): 371-376.
LIU Jing, YU Yong-gang. Numerical Prediction of Fast Cook-off Characteristics for Modular Charges[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(5): 371-376.
- [2] 刘静, 余永刚. 不同升温速率下模块装药慢速烤燃特性的数值模拟[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 990-995.
LIU Jing, YU Yong-gang. Simulation of slow cook-off for modular charges at different heating rates[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(5): 990-995.
- [3] 刘静, 赵非玉. 不同升温速率下模块装药的烤燃特性分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 11-16.
LIU Jing, ZHAO Fei-yu. Analysis of cook-off characteristics of modular charges at different heating rates[J]. *EQUIPMENT ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 2022, 19(3): 11-16.
- [4] 钱环宇, 余永刚, 刘静. 火炮射击环境温度对膛内模块装药热安全性的影响分析[J]. 兵工学报, 2020, 41(2): 254-261.

- QIAN Huan-yu, YU Yong-gang, LIU Jing. The influence of ambient temperature after gun firing on thermal safety of modular charge in the chamber[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(2):254-261.
- [5] 钱环宇,余永刚,刘静.不同射击工况下膛内模块装药的热安全性预测[J].*火炸药学报*, 2020, 43(2): 230-236.
- QIAN Huan-yu, YU Yong-gang, LIU Jing. Thermal safety prediction of modular charge in the chamber under different firing conditions[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(2): 230-236.
- [6] 钱环宇,余永刚.2种低射速下火炮膛内模块装药烤燃特性的对比与分析[J].*装备环境工程*, 2022, 19(3):32-38.
- QIAN Huan-yu, YU Yong-gang. Comparison and analysis of cook-off characteristics of modular charge in gun chamber at two low firing rates[J]. *EQUIPMENT ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 2022, 19(3):32-38.
- [7] 陈安,余永刚.单模块装药点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. Ignition process and propellant grain distribution of modular charge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(8): 731-739.
- [8] 陈安,余永刚.两模块装药点火过程及药粒散布特性[J].*爆炸与冲击*, 2021, 41(7):39-49.
- CHEN An, YU Yong-gang. Modeling test and simulation study of granular dispersion characteristics for single modular charge ignition and flamespreading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(7):39-49.
- [9] 杨旭光,余永刚,陈安.单模块装药点火燃烧过程中端盖破裂形态对药粒散布的影响[J].*火炸药学报*:1-8.
- YANG Xu-guang, YU Yong-gang, CHEN An. Effect of the rupture form of end cover on grain dispersion during ignition and combustion of single module charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*: 1-8.
- [10] 陆中兵,周彦煌,王育维.短管炮模块装药两相流内弹道模拟[J].*南京理工大学学报*, 1999(02): 13-16.
- LU Zhong-bing, ZHOU Yan-huang, WANG Yu-wei. Two phase flow interior ballistic simulation of the short-barrel gun with modular charges[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 1999(02): 13-16.
- [11] 陆中兵,周彦煌,丁珏,郭映华.模块装药膛内火焰扩散过程的理论研究[J].*弹道学报*, 1998(03): 10-14.
- LU Zhong-bing, ZHOU Yan-huang, DING Yu, et al. Theoretical studies of flamespreading processes of modular charges[J]. *Journal of Ballistics*. 1998(03): 10-14.
- [12] 王育维,魏建国,郭映华,王升晨.模块装药压力波数值模拟[J].*火炮发射与控制学报*, 2000(4): 1-5+15.
- WANG Yu-wei, WEI Jian-guo, GUO Ying-hua, et al. Simulation of pressure wave in modular charge system[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2000(4): 1-5+15.
- [13] 王育维,郭映华,董彦诚,张洪汉.可燃容器对小号模块装药压力波影响的研究[J].*火炮发射与控制学报*, 2016, 37(2): 31-35+45.
- 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+45.
- [14] 赵毅.模块装药点火过程的数值模拟[J].*火炸药学报*, 2003(02):32-35.
- ZHAO Yi. Numerical simulation for ignition and flame-spreading of modular charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(2): 32-35.
- [15] 赵欣.可变药室火炮模块装药一维两相流数值模拟[D].南京理工大学, 2012.
- ZHAO Xin. Numerical simulation of one-dimensional two-phase flow on variable volume chamber cannon with modular charge[D]. Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [16] 马昌军,张小兵.基于改进两相流模型的模块装药内弹道模拟[J].*兵工学报*, 2013, 34(6): 678-683.
- MA Chang-jun, ZHANG Xiao-bing. Interior ballistics simulation of modular propellant charge using an improved two-phase flow model[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(6): 678-683.
- [17] 薛绍,陶如意,王浩,程申申.中心点火火焰在药床中传播规律的试验研究[J].*爆炸与冲击*, 2021, 41(11): 15-23.
- XUE Shao, TAO Ru-yi, WANG Hao, et al. Experimental research on the law of flame spreading in the charge bed of a central ignition tube[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(11): 15-23.
- [18] 程申申,王浩,薛绍,陶如意.基于五阶WENO格式的燃气在药床中流动过程二维两相流研究[J].*爆炸与冲击*, 2021, 41(6): 38-47.
- CHENG Shen-shen, WANG Hao, XUE Shao, et al. Two-dimensional numerical simulation on gas-solid two-phase flow induced by combustion gas flow in a chamber based on a fifth-order WENO scheme[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(6): 38-47.
- [19] 程诚,张小兵.某制导炮弹二维两相流内弹道性能分析与数值模拟研究[J].*兵工学报*, 2015, 36(1):58-63.
- CHENG Cheng, ZHANG Xiao-bing. Two-dimensional numerical simulation on two-phase flow interior ballistic performance of a guided projectile[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(1): 58-63.
- [20] 程诚,张小兵, Mahmoud M.Rashad, Hazem Elsadek.基于高阶黎曼近似解的膛内多相燃烧过程研究[J].*弹道学报*, 2013, 25(3):79-82.
- CHENG Cheng, ZHANG Xiao-bing, Rashad M, et al. Study on multi-phase combustion based on high resolution approximate Riemann solver in guns[J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(3): 79-82.
- [21] 翁春生,王浩.计算内弹道学[M].北京:国防工业出版社, 2006:113-123.
- WENG Chun-sheng, WANG Hao. *Computational Internal Ballistics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [22] 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, 2005:140-203.
- YUAN Ya-xiong, ZHANG Xiao-bing. *Multiphase hydrokinetic foundation of high temperature and high pressure*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.
- [23] Van Leer B. Towards the Ultimate Conservation Difference Schemes: V.A Second-order Sequel to Godunov Method[J]. *Journal of Computational Physics*, 1979, 32:101-136.
- [24] 张德良.计算流体力学教程[M].北京:高等教育出版社, 2010: 431-439.
- ZHANG De-liang. *A course in Computational Fluid Dynamics*[M]. Beijing: Higher Educational Press, 2010: 431-439.

[25] 白桥栋,翁春生.二维粘性CE/SE方法在两相流内弹道计算中的应用[J].火炮发射与控制学报,2009(01):13-17.
BAI Qiao-dong, WENG Chen-sheng. Application of two di-

mension viscous CE/SE method in two-phase flow interior ballistic computation[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2009 (1): 13-17.

Experiment and Simulation of Flow Field Characteristics for Single Modular Artillery Charge System

MA Tian-yi, TAO Ru-yi, SEN Si-yi, WANG Hao

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

Abstract: Modular artillery charge system (MACS) is one of the main charge structures for large-caliber howitzers. To accurately study the interior ballistic characteristics of single modular artillery charge system and analyze the variation law of gas flow and pressure wave in the chamber, a combustion experiment platform for MACS was designed to carry out the combustion experiment of single modular artillery charge system. According to the characteristics of modular artillery charge system, the axisymmetric two-dimensional two-phase flow interior ballistic model of modular charge was constructed in different regions. Based on the high-order accurate Monotonic Upstream-centered Scheme for Conservation Laws (MUSCL), the numerical simulation of the ignition process of single-module charge was carried out. The results show that the calculated results are in good agreement with the experimental results. The calculated maximum errors of the pressures at different test points are less than 4%, indicating that the mathematical model established and calculation method used can describe the combustion process of single modular artillery charge system well. The results also show that before $t=5.0$ ms, the combustion of the module cartridge has little effect on the internal flow field of the module. The gas of main propellant can't diffuse into the charge chamber in time due to the obstruction of the end cover of the cartridge. Only the gas of the ignition tube has a certain effect on the flow field in the chamber. The maximum pressure in the chamber during this period is about 4.3% higher than that before the right end of the fire tube is not broken. After the rupture of the cartridge, there is a pressure difference of 3.05 MPa at the boundary between the cartridge and the chamber, so that the propellant gas and solid particles flow rapidly along the axial direction to the free space of the chamber. A strong reflection of the pressure wave is formed at the bottom of the projectile. After that, the pressure wave oscillates repeatedly and gradually weakens.

Key words: modular artillery charge system; numerical simulation; two-phase flow; interior ballistics; MUSCL scheme

CLC number: TJ5; O359

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022198

(责编:姜梅)