



部分切口多孔杆状药装药二维两相流数值模拟

郭永利,薛 绍*,王鹏飞,王 骁,孙 鹏,张日来

(中国电子科技集团公司 光电研究院,天津 300308)

摘要:为研究部分切口多孔杆状药装药的内弹道特性,基于药柱燃烧过程的形态变化特点,分段建立了内弹道两相流模型。在弹丸启动前,药柱以长杆形态存在于药室内,此时采用欧拉-拉格朗日方法描绘流场;当弹丸启动后,药柱断裂为粒状药,此时采用欧拉-欧拉方法描绘流场;最后通过初值映射的方法耦合求解两个过程,编制程序对膛内药床和燃气的运动进行了数值模拟。计算结果显示:数值模拟结果与实验曲线吻合较好,最大压力误差为 0.31%,弹丸初速误差为 0.29%,验证了建立的轴对称内弹道模型的准确性和耦合计算方法的有效性。在点传火初期,膛内流场呈现短暂的径向效应,轴向效应明显,且在膛内波动传递;弹丸启动后,径向效应逐渐减弱,轴向效应不断增大;随着火药燃尽,膛内流场分布逐渐均匀,轴向效应也减弱。部分切口多孔杆状药在保证传火性能的同时提高弹丸初速。

关键词:内弹道;杆状发射药;两相流

中图分类号:TJ012.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2026)03-0087-13

Two-phase Flow Simulation of the Partially Cut Multi-perforated Stick Propellant Charge

GUO Yongli, XUE Shao*, WANG Pengfei, WANG Xiao, SUN Peng, ZHANG Rilai

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technongy Group Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: To investigate the interior ballistic characteristics of partially cut multi-perforated stick propellant charges, a segmented two-phase flow model for interior ballistics was established based on the morphological variation characteristics of propellant grains during combustion. Before projectile startup, the propellant remains in a long rod state inside the chamber, and the Euler-Lagrange method was employed to describe the flow field. After projectile startup, the rod propellants break into granular particles, and the Euler-Euler method was adopted for flow field characterization. Finally, the initial value mapping method was applied to couple the two computational processes, and a self-compiled program was used to numerically simulate the motion of the propellant bed and gas flow in the gun bore. The computational results demonstrate good agreement with experimental data, showing a maximum pressure error of 0.31% and an initial velocity deviation of 0.29%, thereby verifying both the accuracy of the axisymmetric model and the effectiveness of the coupled computational methodology. During the initial point ignition stage, the intra-bore flow field presents transient radial effects and prominent axial effects, with flow fluctuations propagating along the barrel. Following projectile startup, the radial effects gradually weaken while the axial effects are continuously enhanced. As the propellant burns out completely, the intra-bore flow field distribution tends to be uniform, and the axial effects decay correspondingly. The partially cut multi-perforated stick propellant can effectively improve the projectile muzzle velocity while

maintaining favorable ignition and flame propagation performance.

Key words: internal ballistics; stick propellant; two-phase flow

装药结构是影响身管武器弹道性能和发射安全性的因素之一^[1-2]。目前主要有多孔粒状和杆状两种发射药。粒状发射药装填时,多孔药粒燃烧渐增性强有利于提高弹道性能,但其药床的透气性差,易产生压力波,在一定条件下容易出现裂纹甚至破碎,造成炸膛等事故^[3-6]。杆状发射药装填时,由于其药柱排列有序,药床透气性好,有利于降低压力波,提高发射安全性。但其孔道过长,孔内压力不能及时排出,容易造成药柱破裂,而这种破裂是随机的,影响射击精度,同时,杆状药在射击过程中滞留在药室内,造成弹底压力偏低,进而影响初速^[7]。

综合上述粒状药和杆状药的优缺点,部分切口多孔杆状药应运而生^[8]。它是一种含有横向切口的大长径比的多孔杆状发射药,在多孔杆状药体上增加横向切口,既发挥了杆状药装填密度大、透气性好等优点,又改善了内孔的通气状况,减小侵蚀燃烧和杆状药的破裂现象,还保留了粒状发射药高渐增性的优点,而且燃烧中后期杆状药会在切口处断裂为粒状药,有效解决了杆状药滞留在药室内造成弹底压力偏低的问题。目前国内外对部分切口多孔杆状药的实验研究较多^[9-12],结果表明,部分切口多孔杆状药显著降低膛内压力波的同时提升了弹丸发射初速。姚志^[13]模拟了该发射药内孔中燃气流动特性,结果表明切口参数显著影响发射药的侵蚀燃烧现象。ZHAO等^[14]建立了经典内弹道模型,对部分切口多孔杆状药装药结构开展了数值模拟,探讨了切口参数对弹道性能的影响,但受限于经典内弹道的均匀压力假设,未能从膛内流场演化角度解释内在原因。特别是其装药内弹道过程中,发射药燃烧会发生断裂,前后存在明显的几何形态变化,这势必会对内弹道过程产生影响。但目前关于其装药内弹道过程的研究还未见报道。

目前数值模拟身管武器内弹道过程时,对于粒状药装药结构多采用欧拉-欧拉模型^[15-18],而杆状装药结构多采用欧拉-拉格朗日模型^[19-21]。对于部分切口多孔杆状发射药,前期为杆状药,后期为粒状药,存在明显形态变化的情况,单一的数值模型已无法满足计算要求。因此,需要根据发射药形态,分段

建立内弹道数学模型并进行数值模拟,探究其内弹道特性。在点传火阶段,发射药以杆状药束存在于膛内,其长度比火炮内膛直径还要大,因此不能做拟流体假设,此时采用欧拉-拉格朗日模型,用欧拉法描述气相流场,用拉格朗日法描述杆状药的运动。随着弹丸启动和发射药的燃烧,发射药断裂为粒状药,此时将颗粒药做拟流体处理,采用欧拉-欧拉模型描绘流场,然后通过初值映射的方法耦合两个过程,求解全内弹道过程。

本文介绍了部分切口多孔杆状药装药的二维两相流模型,通过耦合求解方法,研究了部分切口多孔杆状药装药的内弹道过程,成功获得了膛内各物理参量的二维分布及其变化规律,进一步分析了装药结构对弹道性能的影响。本研究成果将为此类型装药设计提供有价值的参考。

1 数理模型及数值方法

本文在155 mm榴弹炮结构上开展部分切口多孔杆状药装填弹道仿真,在密实装填的情况下,膛内在径向上装填密度也相近,根据药室直径和发射药直径的比例关系,在二维轴对称处理时,将本装药结构等效为径向6根杆状药,沿径向分别定义为 $r_1 \sim r_6$,示意图见图1。

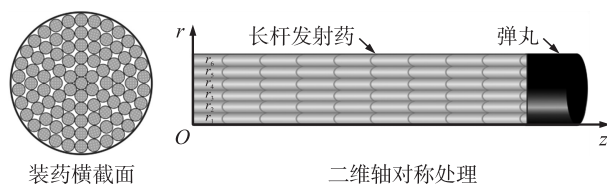


图1 二维轴对称示意图

Fig. 1 Two-dimensional axisymmetric schematic

选用十九孔部分切口多孔杆状药为主装药,如图2(a)所示,基于平行层燃烧理论,其燃烧发展过程如图2(b)所示。图中,绿色区域表示内部穿孔随着燃烧不断扩大,橙色区域为燃烧层,长杆发射药随着燃烧的进行在切口处断裂为粒状药。 L 为发射药总长, d 为内孔直径, D 为外径,内孔数 $n=19$, a 为异向切口距离, b 为切口初始宽度, c 为同向切口距离, N 为切口组数。其形状函数和燃烧特性参照文献^[12]。

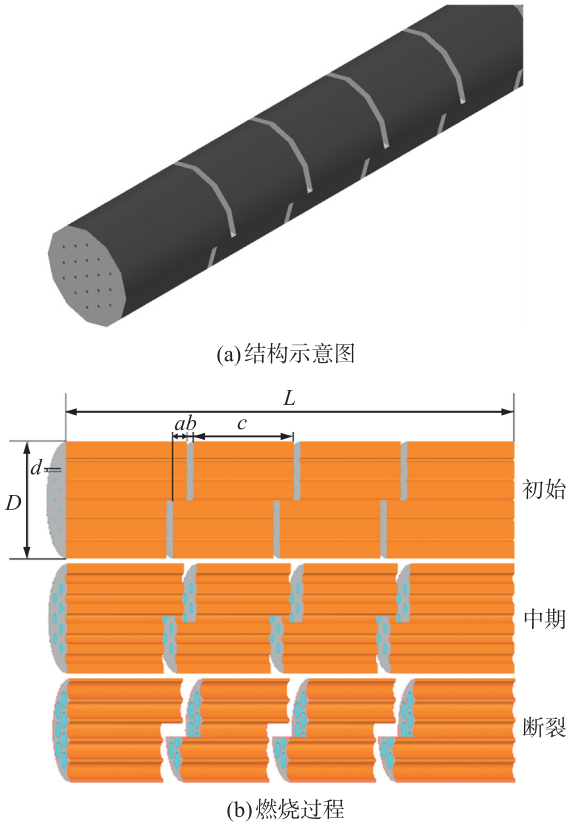


图2 部分切口多孔杆状药示意图

Fig. 2 Schematic of partially cut multi-perforated stick propellant

对于内弹道膛内气固两相流过程,由于膛内沿身管轴线方向呈对称形式,因此在内弹道膛内气固两相流二维计算时,往往采用轴对称模型。根据药柱断裂情况,前后分别建立数学模型,辅助方程同文献[16],结合物理模型提出如下基本假设:

①不考虑气体及气固间的黏性作用,不考虑湍流效应。

②气相沿轴向和径向两维流动,杆状药仅沿轴向运动。采用欧拉法描述气体非定常流动,用变质量的质量、动量守恒方程分别描述径向上杆状药运动。

③采用欧拉法描述气体非定常流动,用变质量的质量、动量守恒方程分别描述径向上杆状药运动。

④弹丸开始启动时,部分切口多孔杆状药瞬间全部断裂为粒状药,忽略断裂过程。

1.1 断裂前状态方程

在点传火阶段,发射药以长杆状存在于炮膛内,此时采用欧拉-拉格朗日模型,用欧拉法描述气相流场,用拉格朗日法描述杆状药的运动。

①燃气质量方程。

$$\frac{\partial(A\phi\rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,r})}{\partial r} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,z})}{\partial z} = -\frac{A\phi\rho_g u_{g,r}}{r} + Am_c + Am_{ign} \quad (1)$$

式中: A 为炮膛横截面积, ϕ 为燃气空隙率, ρ_g 为燃气物质密度, u_g 为燃气速度, m_c 为火药燃气生成率, m_{ign} 为点火系统流入的气体速率。

②径向燃气动量方程。

$$\frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,r})}{\partial t} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,r}^2)}{\partial r} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,r} u_{g,z})}{\partial z} + A\phi \frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{A\phi\rho_g u_{g,r}^2}{r} - Af_{s,r} + Am_c u_{p,r} + Am_{ign} u_{ign,r} \quad (2)$$

式中: f_s 为单位体积内气固相间界面阻力, u_p 为发射药运动速度, u_{ign} 为点火系统流入膛内气体的速率。

③轴向燃气动量方程。

$$\frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,z})}{\partial t} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,z} u_{g,r})}{\partial r} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_{g,z}^2)}{\partial z} + A\phi \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{A\phi\rho_g u_{g,z} u_{g,r}}{r} - Af_{s,z} + Am_c u_{p,z} + Am_{ign} u_{ign,z} \quad (3)$$

④燃气能量方程。

$$\frac{\partial\left(A\phi\rho_g\left(e_g + \frac{u_g^2}{2}\right)\right)}{\partial t} + \frac{\partial\left(A\phi\rho_g u_{g,r}\left(e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{u_g^2}{2}\right)\right)}{\partial r} + \frac{\partial\left(A\phi\rho_g u_{g,z}\left(e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{u_g^2}{2}\right)\right)}{\partial z} + p \frac{\partial(A\phi)}{\partial t} = -\frac{A\phi\rho_g u_g\left(e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{u_g^2}{2}\right)}{r} - AQ_p - A(f_{s,r} u_{p,r} + f_{s,z} u_{p,z}) + Am_c\left(e_p + \frac{p}{\rho_p} + \frac{u_{p,r}^2 + u_{p,z}^2}{2}\right) + Am_{ign} H_{ign} \quad (4)$$

式中: e_g 为燃气比内能, e_p 为发射药的化学潜能, Q_p 为单位体积内热传导和辐射引起的气固相间传热, H_{ign} 为点火系统流入燃气的滞止焓。

⑤发射药质量方程。

$$\frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p)}{\partial t} + u_p \frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p)}{\partial z} = -Am_c \quad (5)$$

⑥发射药动量方程。

在拉格朗日坐标系考虑杆状药的运动,由于切口很窄,作用在切口左右端面的力近似相等,力相互抵消,因此只考虑杆状药左右端面的受力情况。

根据牛顿第二定律,考虑压差作用与相间阻力,杆状药的运动方程可以写成:

$$\frac{d}{dt} \int_{z_1}^{z_2} (1-\phi) \rho_p u_p A dz = - \int_{z_1}^{z_2} (1-\phi) A dp - \int_{z_1}^{z_2} m_c u_p A dx + \int_{z_1}^{z_2} f_s A dz \tag{6}$$

式中: z_1 、 z_2 分别为药柱左、右端面的坐标,同一药柱不同位置上速度相同,即 $u_p = dz_2/dt = dz_1/dt$ 。

1.2 断裂后状态方程

随着药柱的燃烧和弹丸启动,部分切口多孔杆状药断裂为粒状药,用欧拉-欧拉模型描绘流场,气相方程同上,固相方程如下。

①发射药质量方程。

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p)}{\partial t} + \frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,r})}{\partial r} + \\ &\frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,z})}{\partial z} = -\frac{A(1-\phi)\rho_p u_{p,r}}{r} - Am_c + Am_p \end{aligned} \tag{7}$$

②径向发射药动量方程。

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,r})}{\partial t} + \frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,r}^2)}{\partial r} + A(1-\phi) \frac{\partial p}{\partial r} + \\ &\frac{\partial(A(1-\phi)R_p)}{\partial r} + \frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,r} u_{p,z})}{\partial z} = \\ &-\frac{A(1-\phi)\rho_p u_{p,r}^2}{r} + Af_s - Am_c u_{p,r} + Am_p u_{ip,r} \end{aligned} \tag{8}$$

式中: R_p 为药床颗粒间应力, $u_{ip,r}$ 为点火系统流入膛内的径向速度。

③轴向发射药动量方程。

$$\frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,z})}{\partial t} + \frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,r} u_{p,z})}{\partial r} + A(1-\phi) \frac{\partial p}{\partial z} +$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(A(1-\phi)\rho_p u_{p,z}^2)}{\partial z} + \frac{\partial(A(1-\phi)R_p)}{\partial z} = \\ &-\frac{A(1-\phi)\rho_p u_{p,r} u_{p,z}}{r} + Af_s - Am_c u_{p,z} + Am_p u_{ip,z} \end{aligned} \tag{9}$$

将上述内弹道两相流控制方程写为守恒形式:

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_i}{\partial r} + \frac{\partial \boldsymbol{G}_i}{\partial z} + \frac{\boldsymbol{H}_i}{r} = \boldsymbol{S}_i \tag{10}$$

式中: $\boldsymbol{U}$ 为时间守恒矢量; $\boldsymbol{F}$ 为径向矢通量; $\boldsymbol{G}$ 为轴向矢通量; $\boldsymbol{H}$ 为轴向对称变换矢量; $\boldsymbol{S}$ 为源项; $i=1,2$,分别对应分裂前和分裂后。

在求解二维流动问题时,用算子分裂法分裂为沿 r 方向和 z 方向的两个一维流动问题。上述守恒形式进行空间导数离散后的方程为

$$\begin{aligned} U_{i,j}^{n+1} &= U_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta r} (F_{i,j+1/2}^n - F_{i,j-1/2}^n) - \\ &\frac{\Delta t}{\Delta z} (G_{i+1/2,j}^n - G_{i-1/2,j}^n) + \Delta t R^n \end{aligned} \tag{11}$$

采用算子分裂法将其分为两个一维流动:

$$U_t + F(U_r) = \frac{1}{2} \Delta t R^n \Bigg\} \Rightarrow U^{n+1/2} \tag{12}$$

$$U_t + G(U_z) = \frac{1}{2} \Delta t R^{n+1/2} \Bigg\} \Rightarrow U^{n+1} \tag{13}$$

分裂后,采用 WENO 格式^[22-23] 分别进行求解。

2 模型验证

根据上述控制方程和求解方法,通过初值映射的方法耦合求解整个内弹道过程,装填参数见表 1。

表 1 装填参数

Table 1 Loading parameters

口径 /mm	弹丸行程 /mm	弹丸质量 /kg	主装药质量 /kg	火药力 /(kJ·kg ⁻¹)	切口宽度 /mm	异向距离 /mm	同向距离 /mm
155	5 020	43.1	11.58	1 174	1	3	17
比热比	燃速系数 /(m·s ⁻¹ ·Pa ⁻ⁿ)	燃速 指数	发射药长度 /mm	余容 /(m ³ ·kg ⁻¹)	爆温 /K	弧厚 /mm	内孔直径 /mm
1.225	2.52×10 ⁻³	0.82	490	0.9×10 ⁻³	3 517	2.54	0.558 8

图 3 为数值模拟与实验测试的膛底压力曲线对比。可以看出,数值模拟与实验曲线吻合较好,数值计算最大压力为 286.9 MPa,与实验最大压力

286 MPa 相比,误差仅为 0.31%,全局 100 个对比点平均误差为 9.1%。图 4 显示了弹丸位移和速度随时间的变化,数值模拟弹丸初速为 822.6 m/s,与实

验测得初速 825 m/s 相比,误差仅为 0.29%,进一步验证了建立的轴对称内弹道模型的准确性和耦合计算方法的有效性。

3 仿真结果与分析

图 5 为点火初期不同时刻压力分布云图。图 5 清晰展现了点火管破孔点燃主装药的过程。随着点火击发,点火管内小粒黑迅速燃烧建压,当达到破孔压力时,首孔率先破孔,炙热燃气喷射进膛内,随后传火孔序列打开。随着点火燃气的流入,破孔区域的主装药逐渐被点燃,形成高压区,并向四周扩散。

图 6 为点火发展阶段不同时刻压力分布云图。图 6 清晰展现了随主装药逐渐燃烧膛内压力发展的情况。随着破孔区域主装药的引燃,该区域压力迅速升高,形成较大的轴向和径向压力梯度,加速了高温燃气向膛壁和药室两端的流动,运动到膛底和弹底时,受膛壁阻碍燃气堆积,形成图中 1 和 2 两个高压区。随后高温燃气向药室中部回流,又在中部堆积形成高压区。受点火压力及膛壁对压力阻碍的影响,膛内压力波动较大,最大压力点在膛底和弹底来回波动,整个膛内轴向和径向效应都很明显。

图 7 为弹丸启动初期膛内不同时刻压力分布云图。图中清晰反映了弹丸启动过程中膛内压力的发展过程。随着弹丸的启动,膛内从膛底向弹底形成一定的轴向压力梯度,推动弹丸运动,膛内径向二维效应逐渐消失,在点火管破孔区域,随着点火管内小粒黑的逐渐燃尽,喷入膛内的燃气速率也逐渐减小,径向效应也同步减弱。

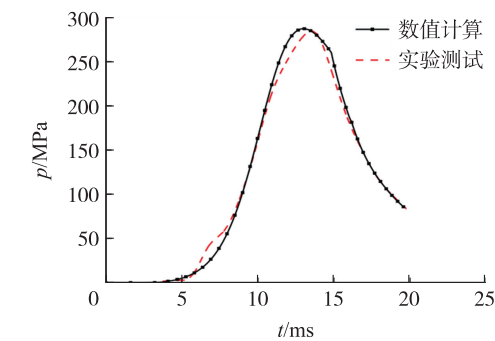


图 3 膛底压力曲线对比

Fig. 3 Comparison of breech pressure curves

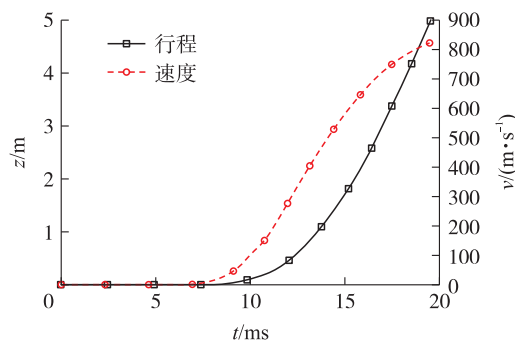


图 4 弹丸速度和行程计算曲线

Fig. 4 Calculated curves of projectile velocity and travel

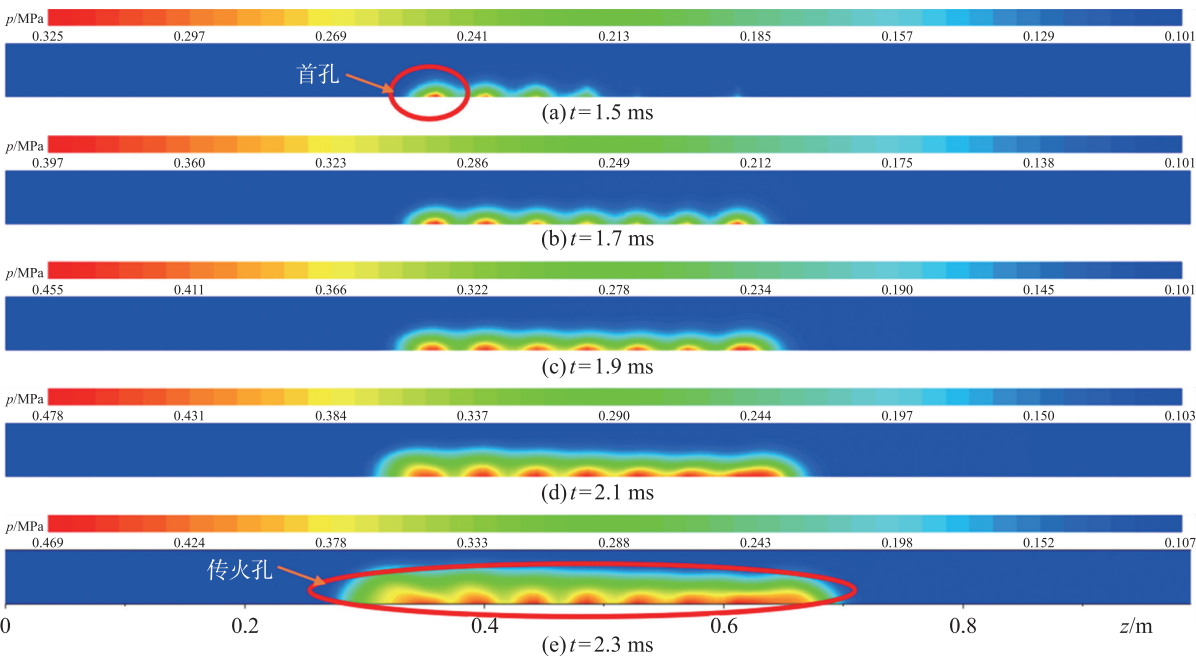


图 5 点火初期不同时刻压力分布云图

Fig. 5 Pressure contour plots at different times in the early ignition stage

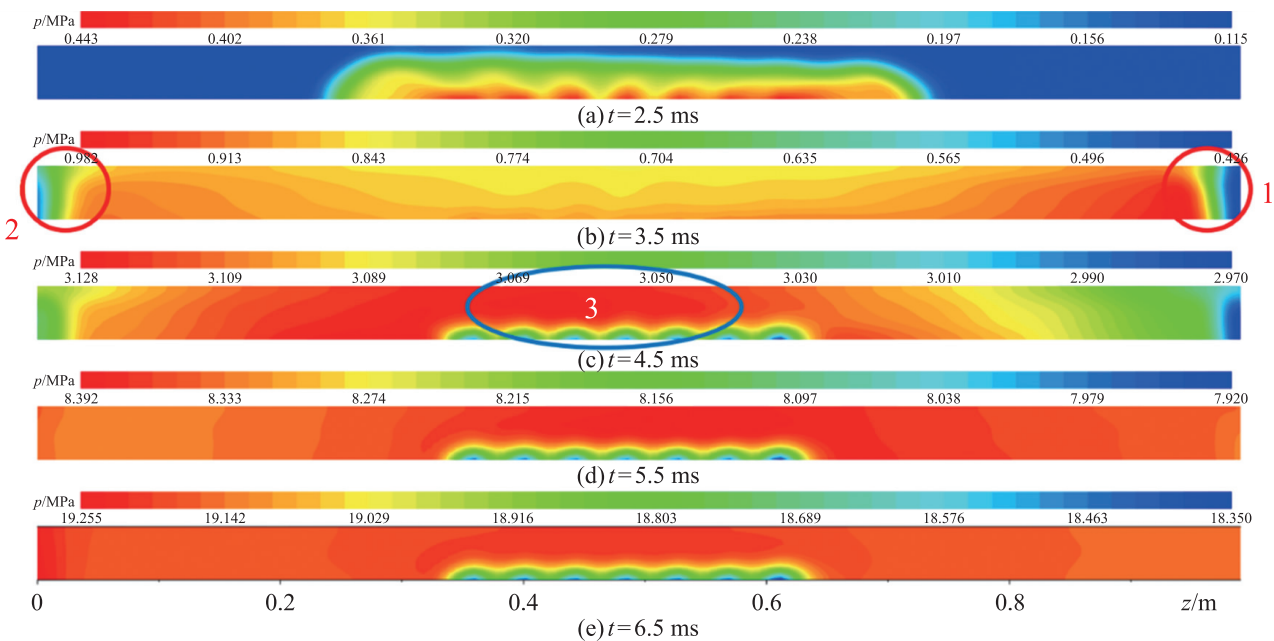


图 6 点火发展阶段不同时刻压力分布云图

Fig. 6 Pressure contour plots at different times in the ignition development stage

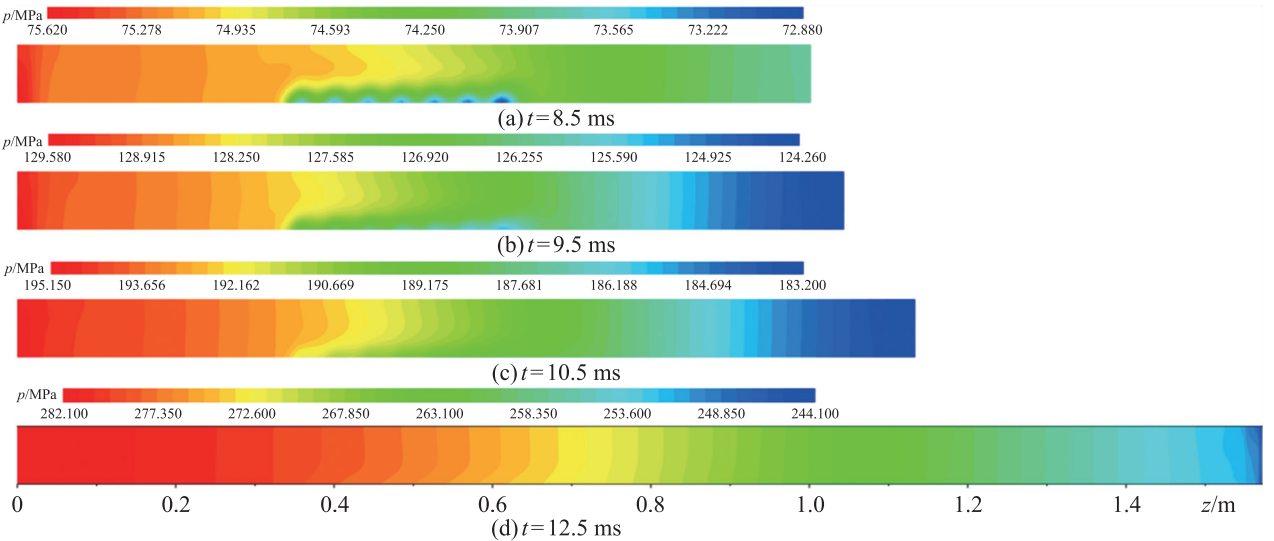


图 7 弹丸启动初期不同时刻压力分布云图

Fig. 7 Pressure contour plots at different times in the early projectile start stage

图 8 为弹丸高速运动时膛内不同时刻压力分布云图。图中展现了弹丸加速运动过程中膛内压力的发展过程。随着点火药燃尽,点火源项消失,传火孔位置不再有火焰流出,膛内压力的径向效应消失。随着主装药的全面燃烧,膛内压力迅速升高达到最大值,轴向压力梯度明显。随着弹丸加速运动,弹后空间不断增大、主装药快速燃尽,膛内压力迅速降低,轴向压力梯度也逐渐消失。

图 9 为点火前期不同时刻药床内气相和固相温度对比。图中清晰展现了膛内药床中火焰的传播过程及主装药的引燃情况。首先,在点火管破孔区域,由于点火管流出的高温燃气的强烈传热作用,该区域主装药被点燃,释放更多热量,气相温度逐渐升高,并逐步点燃周边药床。随后,主装药的燃烧火焰迅速向膛壁及膛底和弹底传播,并引燃整个药床。受传热的影响,固相温度略滞后于气相温度。

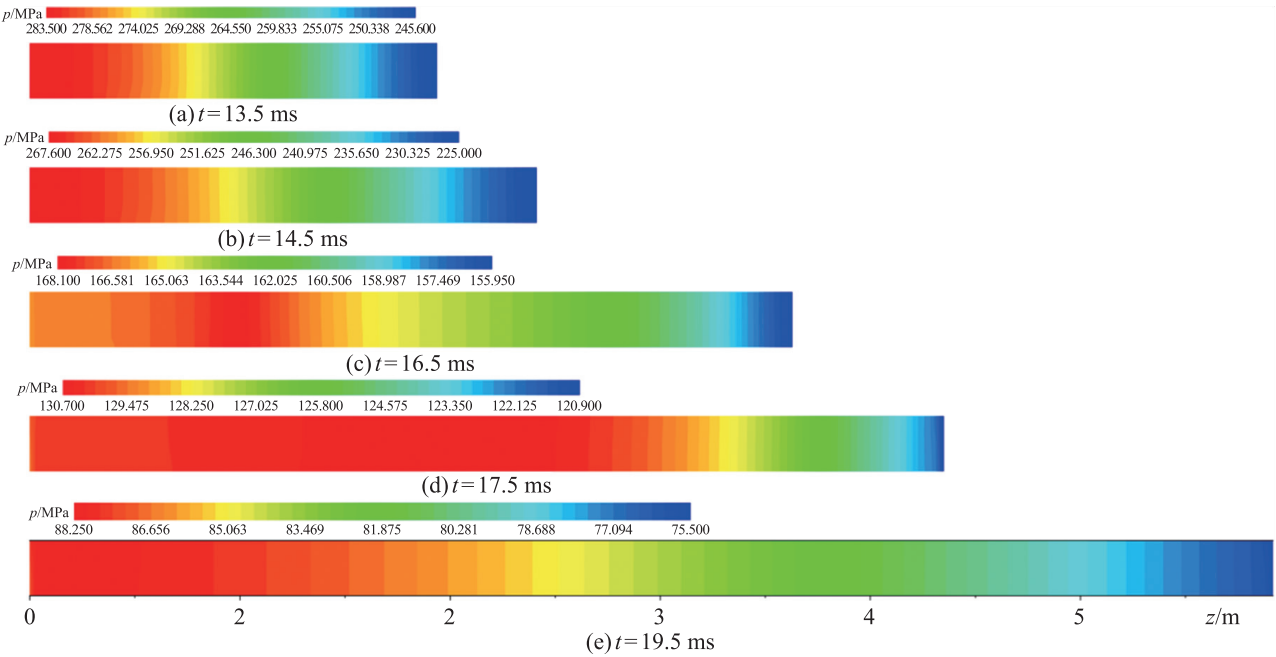


图 8 弹丸高速运动不同时刻压力分布云图

Fig. 8 Pressure contour plots at different times during projectile high-speed motion

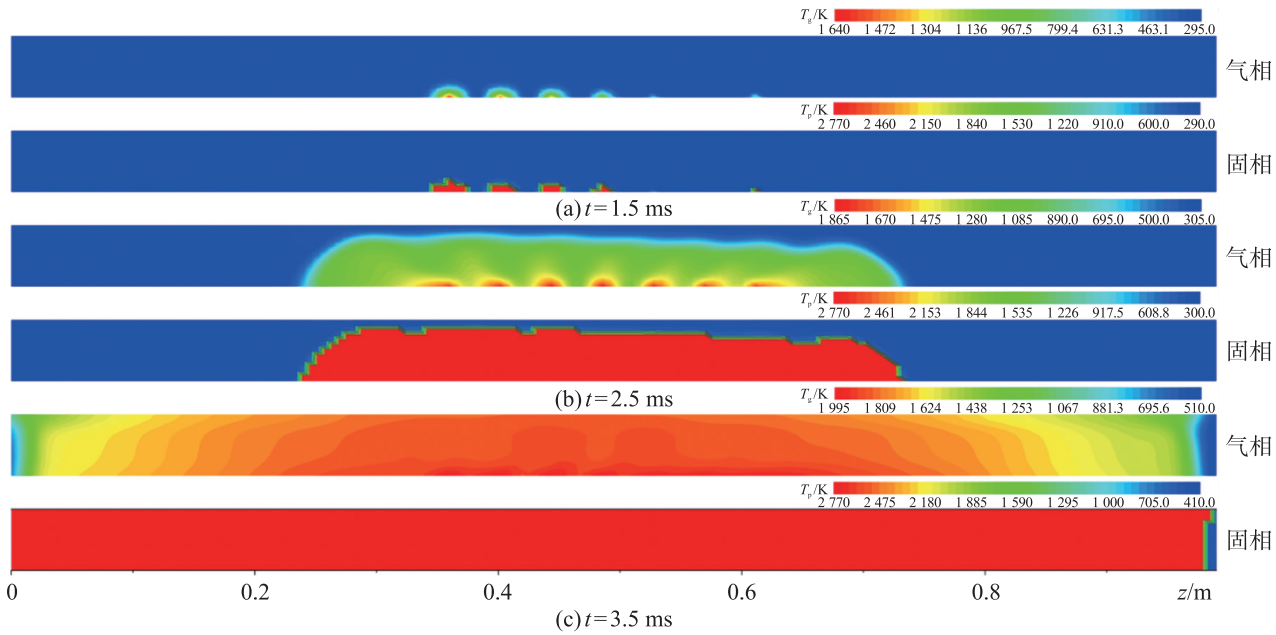


图 9 点火前期气相和固相温度对比

Fig. 9 Comparison of gas-phase and solid-phase temperatures in the early ignition stage

图 10 为发射过程中孔隙率的分布云图。图中清晰展现了药床中发射药的装填密度变化。随着点火孔的破孔,破孔区域的主装药首先引燃,装填密度降低,孔隙率变大。随着药床的燃烧,着火区域孔隙率明显升高,未着火的膛底和弹底孔隙率未见明显变化,这是由于部分切口多孔杆状药装填结构下,发射药以药柱的形式存在于药床,不具

有堆积的特点。弹丸启动后,部分切口多孔杆状药断裂为粒状药,并随弹丸向前运动,发射药颗粒由膛底向弹底形成梯度分布,在破孔区域,受点火源项的持续喷入,孔隙率具有一定径向梯度。由于固相速度小于弹丸速度,发射药逐渐脱离弹底,在弹后形成纯气相区。随着发射药快速燃烧,膛内孔隙率迅速升高,逐渐趋于 1。

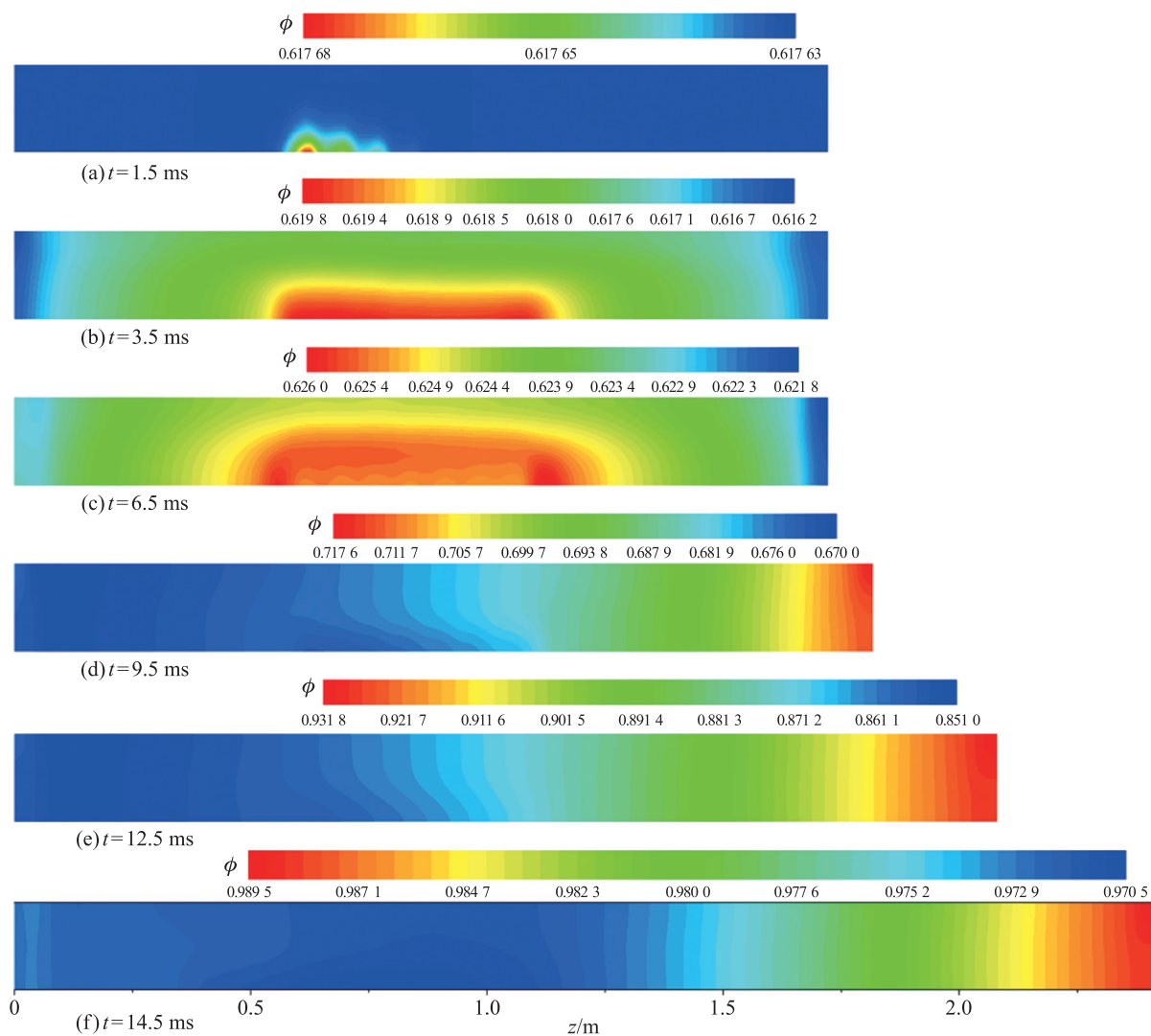


图 10 发射过程中孔隙率的分布云图

Fig. 10 Porosity contour plots during the launching process

图 11 为不同时刻气相速度云图及矢量图。图 11 中上图为速度云图,下图为对应的矢量图。随着点火管的破孔,燃气向膛内喷入,燃气快速向轴向和径向流动,由于径向空间小,燃气传播到壁面后反射转向,燃气以轴向流动为主,随着主装药的燃烧,流动速度越来越快。在 2.3 ms 左右燃气流动到膛底和弹底,受到壁面的阻碍开始反向运动,同时速度也相应降低。在 4.5 ms 左右,正常向两端流动的燃气和受壁面反射的燃气在 $z=0.2$ m 和 $z=0.8$ m 的区域碰撞汇合,形成两个旋涡区域。由于左侧旋涡强,向右传播,在 6.5 ms 左右与右侧旋涡融合。随着弹丸启动,燃气由膛底向弹底不断运动,速度也不断升高,直至弹丸飞离炮口。

为更详细描绘整个发射过程中膛内流场的发展过程,选取 $z=0.36$ m 和 $r=0.05$ m 两个特征位置监

测流场变化。图 12 为 $r=0.05$ m 轴向位置点处压力变化分布。图 12(a) 为点火初期压力变化情况,压力在破孔区域率先升高,随时间不断增大,并向膛底和弹底方向发展,轴向压力梯度明显。受不连续点火孔的影响,压力曲线呈现锯齿状。图 12(b) 为点火发展阶段压力变化情况,随主装药燃烧,轴向压力迅速呈均匀状态。图 12(c) 为弹丸运动后压力变化情况,随着弹丸启动,由膛底向弹底逐渐形成压力梯度,并随压力升高而增大,约在 13.5 ms 时刻达到峰值,之后压力迅速降低,压力梯度也逐渐降低,膛内压力逐渐呈均匀状态,直至弹丸飞出炮口。图 13 为 $z=0.36$ m 径向位置点处压力变化分布。图 13(a) 为点火初期压力变化情况,随着点火管的破孔,膛内径向形成一定压力梯度,随着压力的扩散及药床的着火,径向效应迅速消失。

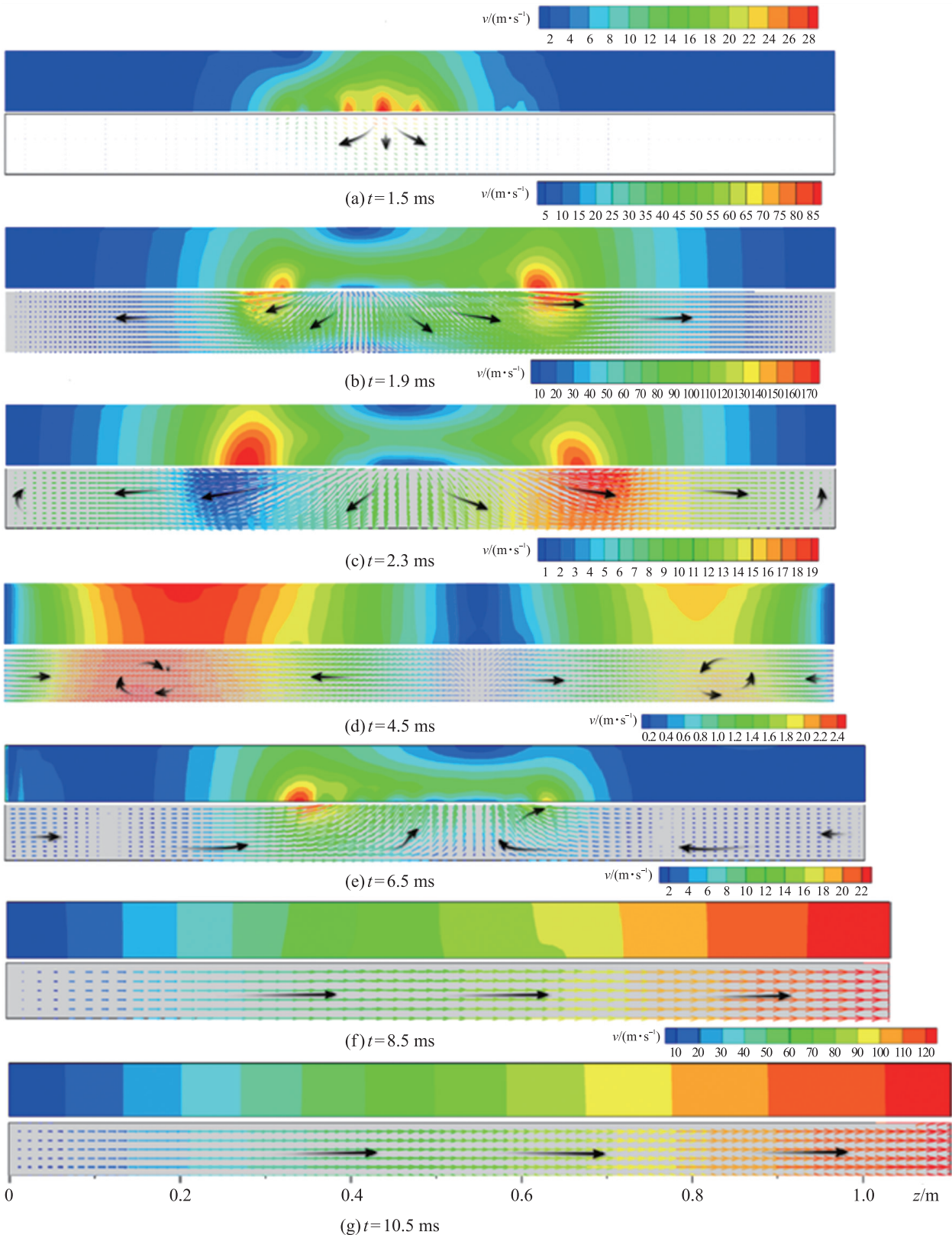
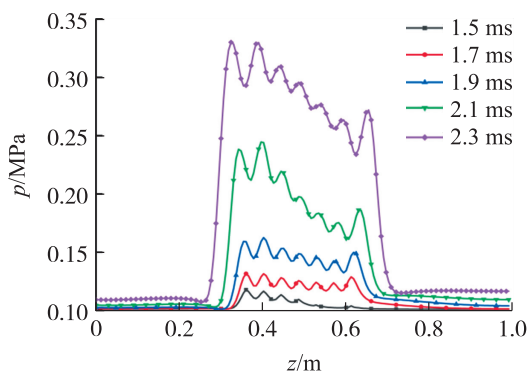
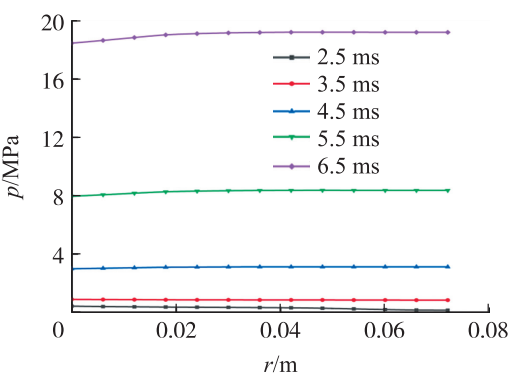


图 11 不同时刻气相速度云图及矢量图

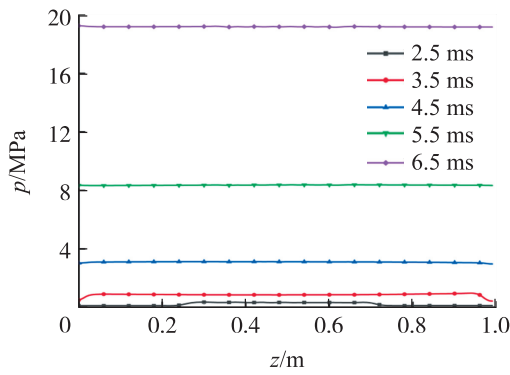
Fig. 11 Gas-phase velocity contours and vector plots at different times



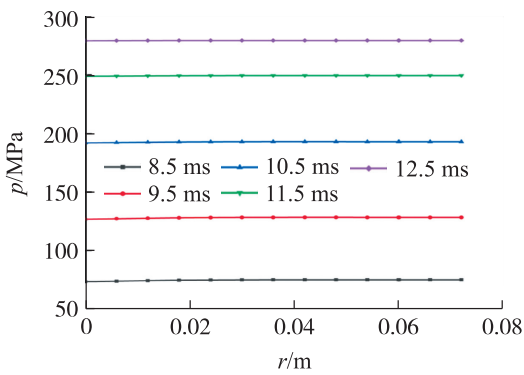
(a) 点火初期



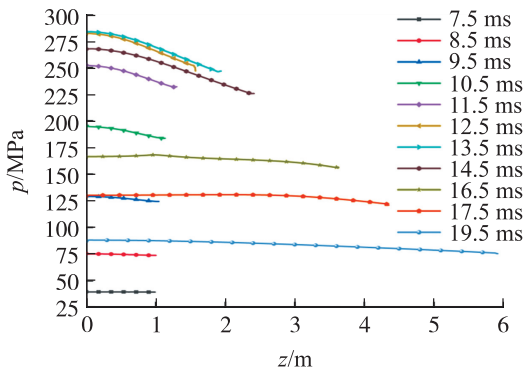
(b) 点火发展阶段



(b) 点火发展阶段



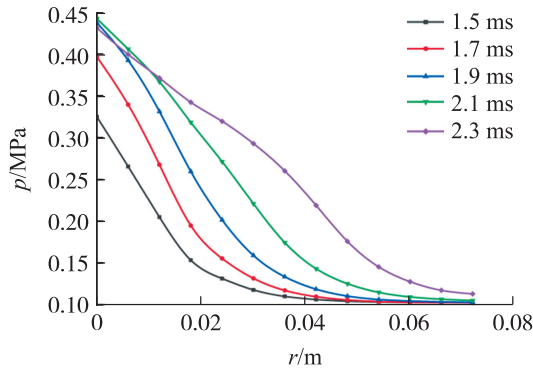
(c) 弹丸启动后



(c) 弹丸启动后

图 12 $r=0.05\text{ m}$ 处压力变化分布

Fig. 12 Pressure variation at $r=0.05\text{ m}$

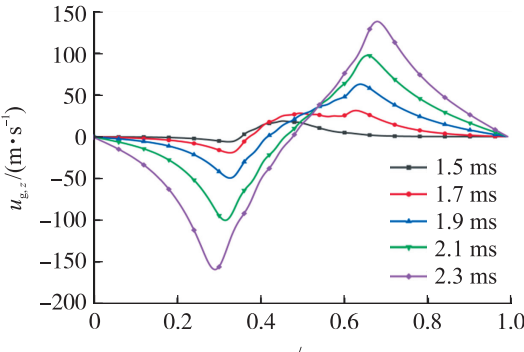


(a) 点火初期

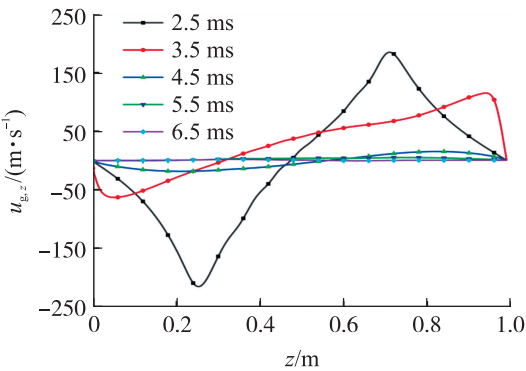
图 13 $z=0.36\text{ m}$ 处压力变化分布

Fig. 13 Pressure variation at $z=0.36\text{ m}$

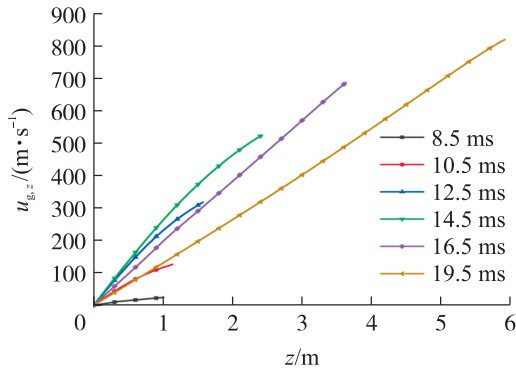
图 14 为 $r=0.05\text{ m}$ 处气相轴向速度分布。图 14(a) 中显示,随着点火管传火孔的依次破孔,点火燃气流入膛内,在破孔区域两侧分别出现向膛底的负向轴向速度和向弹底的正向轴向速度,并随着燃气的进一步流入,速度逐渐变大。图 14(b) 中显示,随着点火燃气的到达,主装药开始燃烧,轴向的速度趋于平缓。图 14(c) 中显示,随着弹丸开始运动,燃气开始由膛底向弹底运动,气相速度与弹丸速度息息相关,轴向速度由膛底向弹底呈线性分布。



(a) 点火初期



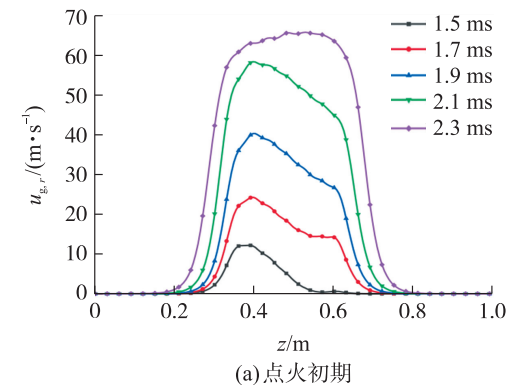
(b)点火发展阶段



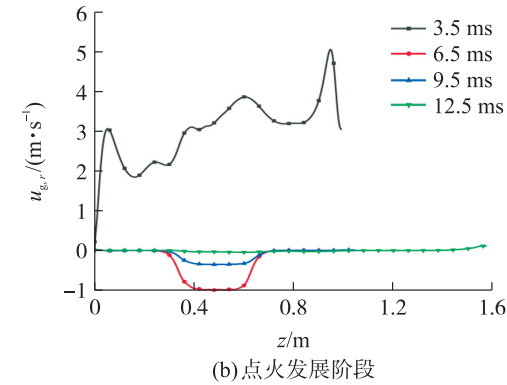
(c)弹丸启动后

图 14 $r=0.05\text{ m}$ 处气相轴向速度分布
Fig. 14 Axial gas-phase velocity distribution at $r=0.05\text{ m}$

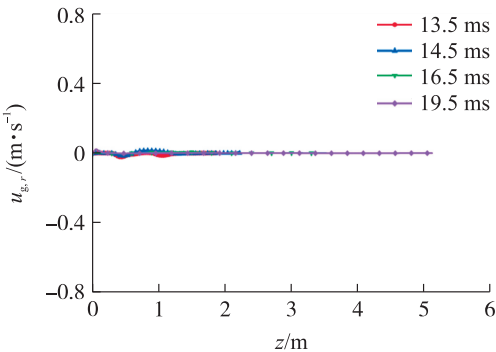
图 15 为 $r=0.05\text{ m}$ 处气相径向速度分布。



(a)点火初期



(b)点火发展阶段

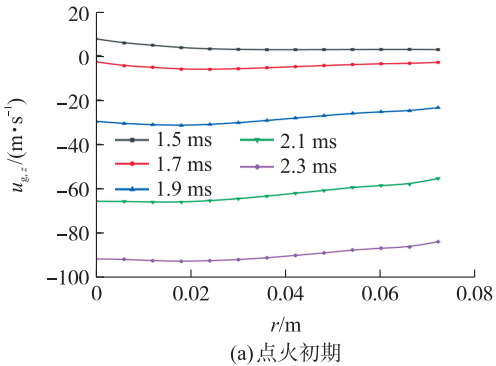


(c)弹丸启动后

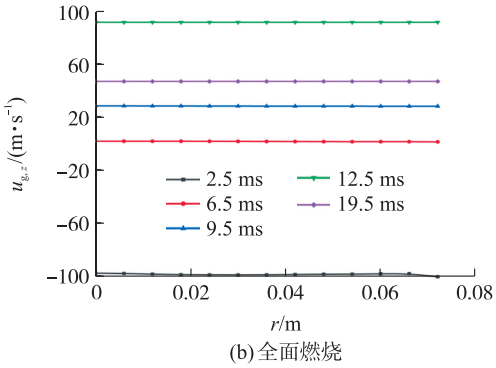
图 15 $r=0.05\text{ m}$ 处气相径向速度分布
Fig. 15 Radial gas-phase velocity distribution at $r=0.05\text{ m}$

图 15(a) 中显示,随着点火管传火孔的破孔,破孔区域存在明显的径向效应,由于传火孔破孔具有一定时序性,轴向不同位置的径向效应也存在波动。图 15(b) 中显示,当燃气碰到膛壁发生反射会出现短暂的负向径向效应。图 15(c) 中显示,随着弹丸的启动,径向效应快速消失。

图 16 为 $z=0.36\text{ m}$ 处气相轴向速度分布。由于选取的检测点为点火管首孔的位置,仅在首孔破孔时出现正向速度,之后随着右侧传火孔的破孔,该位置点形成向膛底的负向速度,并存在微弱的径向差异。随着膛内主装药的全面着火,轴向速度趋于一致。



(a)点火初期



(b)全面燃烧

图 16 $z=0.36\text{ m}$ 处气相轴向速度分布
Fig. 16 Axial gas-phase velocity distribution at $z=0.36\text{ m}$

图17为 $z=0.36\text{ m}$ 处气相径向速度分布,点火初期径向效应明显,随着主装药的全面着火,径向效应快速消失。

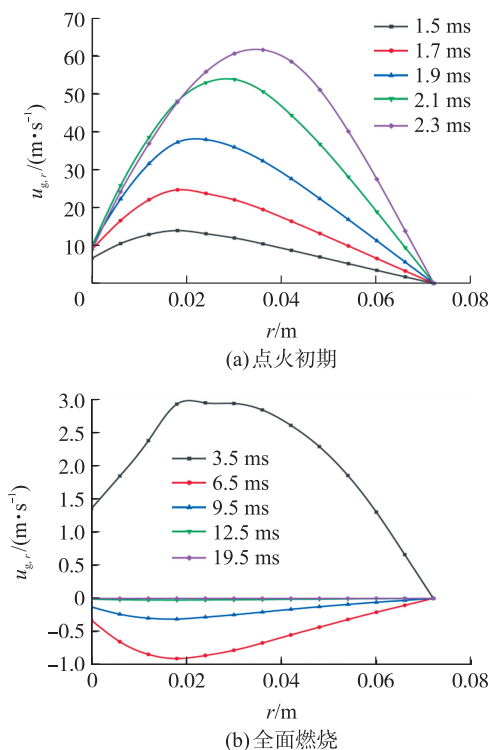


图17 $z=0.36\text{ m}$ 处气相径向速度分布

Fig. 17 Radial gas-phase velocity distribution at $z=0.36\text{ m}$

为进一步对比分析装药结构对弹道性能的影响,设立了部分切口多孔杆状药(方案1)、杆状药(方案2)、粒状药(方案3)3种装药方案,开展弹道仿真。

图18为不同装药弹底压力对比图。由图可知,方案1的压力比方案3上升快,而和方案2基本保持同步,这说明部分切口多孔杆状药装药结构提升了药床的传火性能。方案1的峰压比方案2的低,而和方案3基本相同。图19为不同方案弹丸速度对比,显示方案2的弹丸速度最低,这是由于方案2多孔杆状药未发生断裂,导致发射药全部滞留在膛内燃烧,造成膛底压力偏高,弹底压力却偏低。综上所述,部分切口多孔杆状药即保留了杆状药的高传火性能,又获得了粒状药的流动特性,在保证传火性能的同时,提高弹丸初速。

为了进一步验证上述结论,图20给出了不同方案膛内传火过程示意图,图中不同颜色代表不同时刻火焰位置。由图可知,部分切口多孔杆状药的传火性能明显优于粒状药,传火初期都存在明显二维效应,部分切口多孔杆状药的火焰阵面前端逐渐由“手掌”

状变为“平齐”状,而粒状药床的火焰阵面始终保持“手掌”状,这不利于药床径向点火的一致性。

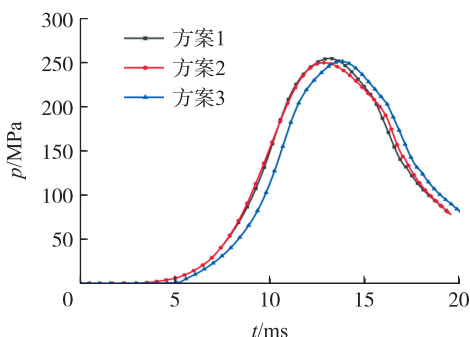


图18 不同方案弹底压力对比

Fig. 18 Comparison of projectile base pressure under different schemes

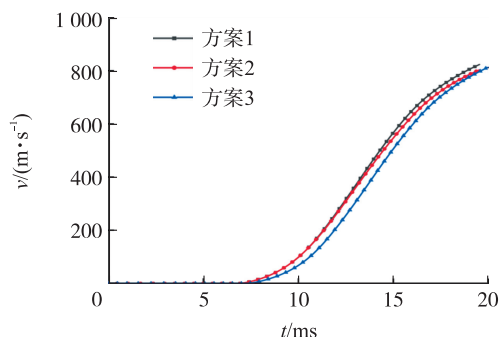


图19 不同方案弹丸速度对比

Fig. 19 Comparison of projectile velocity under different schemes

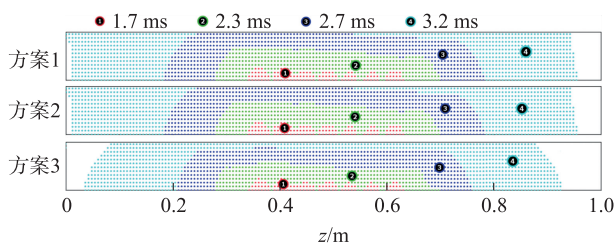


图20 不同方案膛内传火过程示意图

Fig. 20 Schematic of flame propagation process in bore under different schemes

4 结束语

本文根据部分切口多孔杆状药的燃烧特点,建立了轴对称内弹道数学模型,并进行数值仿真计算。数值仿真计算形象地描绘了内弹道复杂两相流的物理过程,准确地捕捉了膛内各流场参量,分析讨论得到如下结论:①在点传火初期,膛内流场呈现短暂的径向效应,轴向效应明显,且在膛内波动传递。在弹丸运动后,径向效应逐渐减弱,而由于复杂的流场作

用,膛内流场轴向梯度不断增大,轴向效应明显。随着火药燃尽,膛内流场分布逐渐均匀,轴向效应也减弱。②部分切口多孔杆状药既保留了杆状药的高传火性能,又获得了粒状药的流动特性,在保证传火性能的同时,提高了弹丸初速。

参考文献

- [1] 芮筱亭. 弹药发射安全性导论[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
RUI Xiaoting. Introduction to ammunition firing safety [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2009. (in Chinese)
- [2] GUILLERMO J, RAMON A. Analysis of pressure waves generation in gun combustion chambers during the propellant ignition process[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 41(2): 228–237.
- [3] JIANG S P, RUI X T, HONG J. Numerical simulation of impact breakage of gun propellant charge[J]. Granular Matter, 2011, 13: 611–622.
- [4] MIURA H, MATSUO A, NAKAMURA Y. Three-dimensional simulation of pressure fluctuation in a granular solid propellant chamber within an ignition stage [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011, 36(3): 259–267.
- [5] ZHANG R H, RUI X T. Study on the change of gas generation law caused by fracture of propellant charge [J]. Journal of Energetic Materials, 2018, 36(4): 454–467.
- [6] LI C, RUI X T, GU J, et al. Influences of the random stacking and charges diameter on compression and fracture process of propellant charge [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(1): 202100177.
- [7] 薛绍,陶如意,王浩,等. 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 Ruyi, 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, 2021, 41(11): 15–23. (in Chinese)
- [8] CARL R R, FREDERICK W R, THOMAS C M. A new high-progressivity/high-density propulsion concept: partially cut multiperforated stick propellant; AD-A234255[R]. 1991.
- [9] 王锋,李梓超,刘国涛,等. 多孔环切杆状发射药的燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2015, 38(2): 89–92.
WANG Feng, LI Zichao, LIU Guotao, et al. Combustion performances of multi perforated curve cut stick gun propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(2): 89–92. (in Chinese)
- [10] 徐汉涛,肖正刚,何卫东. 部分切口多孔杆状发射药的燃烧性能[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 251–255.
XU Hantao, XIAO Zhenggang, HE Weidong. Combustion characteristics of partially cut multiperforated stick propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(2): 251–255. (in Chinese)
- [11] 王艳宾. 多孔切口杆状发射药燃烧性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
WANG Yanbin. Study on the combustion performance of porous incision rod propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] XUE Shao, WANG Hao, TAO Ruyi, et al. Study of the form function and combustion characteristics of partially-cut stick propellants [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2023, 48(8): 1–10.
- [13] 姚志. 部分切口杆状发射药内孔燃气流动数值模拟研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
YAO Zhi. Numerical simulation of gas flow in inner perforation of partially-cut stick [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 赵煜华,杨伟涛,严文荣,等. 部分切口杆状发射药内弹道性能的数值模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(6): 487–492.
ZHAO Yuhua, YANG Weitao, YAN Wenrong, et al. Numerical simulation of the interior ballistic performance for partially cut multi-perforated stick propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(6): 487–492. (in Chinese)
- [15] CHENG Shenshen, TAO Ruyi, XUE Shao, et al. Two-phase flow characteristics of different charging structure in ignition and flame spreading [J]. Combustion Theory and Modelling, 2021, 25(4): 751–764.
- [16] CHENG Shenshen, TAO Ruyi, XUE Shao, et al. Particle element method to obtain parameter distributions of two-phase reactive flow in a propulsion combustion system [J]. Combustion Science and Technology, 2022, 196(5): 730–752.
- [17] JARAMAZ S, MICKOVIC D, ELEK P. Two-phase flows in gun barrel: theoretical and experimental studies [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(5): 475–487.
- [18] OTONMARTINEZ R A, VELASCO F J S. Three-dimensional numerical modeling of internal ballistics for solid propellant combinations [J]. Mathematics, 2021, 9(21): 2714.
- [19] JANG J S, SUNG H G, ROH T S, et al. Numerical analysis of interior ballistics through Eulerian-Lagrangian approach [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(8): 2351–2357.
- [20] SUNG H G. Development of code for numerical analysis of interior ballistics using Eulerian-Lagrangian approach and SMART scheme [J]. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2010, 13(3): 349–357.
- [21] 蒋淑园,王浩,林长津,等. 考虑管状药束轴向运动的大口径平衡炮二维内弹道模型的建立与仿真[J]. 兵工学报, 2016, 37(10): 1941–1948.
JIANG Shuyuan, WANG Hao, LIN Changjin, et al. Establishment and simulation of two-dimensional interior ballistics model of large caliber davis gun considering the axial movement of tubular charge clusters [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(10): 1941–1948. (in Chinese)
- [22] JIANG G, SHU C W. Efficient implementation of weighted ENO schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1996, 126: 208–228.
- [23] 程申申,王浩,薛绍,等. 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 Shenshen, 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. (in Chinese)