



基于 CE/SE 方法考虑黏性的铝粉/空气三维爆轰模拟

韦 伟¹, 翁春生^{2*}

(1.江苏海事职业技术学院 船舶与智能制造学院,江苏 南京 211170;

2.南京理工大学 瞬态物理全国重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要:针对固体燃料脉冲爆轰发动机工程研发需求,现有数值模拟多采用二维或者无黏简化假设,忽略流体黏性与三维流场耦合效应,难以准确刻画管壁边界层、黏性耗散对爆轰传播、压力分布及速度场的影响。为此开展了考虑流体黏性的铝粉/空气三维两相爆轰数值模拟研究。将气体黏性完整引入建模框架,基于柱坐标系建立圆柱形爆轰管内铝粉-空气三维黏性两相爆轰数学模型,依托 CE/SE(守恒元-求解元)方法,完成三维黏性两相爆轰全过程高精度数值仿真。通过仿真结果系统剖析不同时刻爆轰波压力场、气固两相速度场的时空演化规律,获得爆轰从点火、压缩波叠加、DDT 转变直至自持稳定传播的完整阶段特征,对比有无黏性条件下的流场差异,揭示流体黏性对爆轰波传播速度、峰值压力、近壁面流场参数的作用机理。计算结果表明该模型能够精准捕捉两相爆轰强间断特征,为完善铝粉/空气爆轰多相爆轰理论体系、揭示铝粉燃烧转爆轰(DDT)内在机理提供了重要的理论支撑,为脉冲爆轰发动机优化设计提供理论依据。

关键词:脉冲爆轰发动机;铝粉/空气;三维两相爆轰;CE/SE 方法;流体黏性;气固两相流

中图分类号:TJ011.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2026)03-0079-08

Three-dimensional Detonation Simulation of Aluminum-air With Viscosity Based on CE/SE Method

WEI Wei¹, WENG Chunsheng^{2*}

(1.School of Naval Architecture and Intelligent Manufacturing,Jiangsu Maritime Institute,Nanjing 211170,China

2.National Key Laboratory of Transient Physics,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China)

Abstract: Aiming at the engineering-research requirements of solid-fuel pulse detonation engines, most existing numerical simulations adopt two-dimensional or inviscid simplifying assumptions, neglecting fluid viscosity and three-dimensional flow-field coupling effects. Consequently, they cannot accurately characterize the influences of tube-wall boundary layers and viscous dissipation on detonation propagation, pressure distribution and velocity fields. Accordingly, this paper conducted numerical simulation research on three-dimensional two-phase aluminum-particle/air detonation with fluid viscosity taken into account. In this work, gas viscosity was fully incorporated into the modelling framework, and a mathematical model for three-dimensional viscous two-phase aluminum-particle/air detonation inside a cylindrical detonation tube was established in the cylindrical coordinate system. High-precision numerical simulation of the full process of three-dimensional viscous two-phase detonation was implemented based on the CE/SE(Conservation Element and Solution Element) method. From simulation results, the temporal-spatial evolution of detonation-wave pressure fields and gas-solid two-phase velocity fields at different instants was systematically analyzed. Full-stage characteristics covering ignition, compression-wave superposition, DDT (Deflagration-to-Detonation Transition) and self-sustained stable detonation

propagation were obtained. Flow-field differences under viscous and inviscid conditions were compared to reveal the action mechanism of fluid viscosity on detonation-wave propagation velocity, peak pressure and near-wall flow-field parameters. Calculation results demonstrate that the proposed model can precisely capture the strong-discontinuity features of two-phase detonation. It provides important theoretical support for improving the multiphase detonation theoretical system of aluminum-particle/air detonation and uncovering the inherent mechanism of aluminum-particle DDT, as well as furnishing a theoretical basis for the optimal design of pulse detonation engines.

Key words: pulse detonation engine; aluminum powder/air; three-dimensional two-phase detonation; CE/SE method; fluid viscosity; gas-solid two-phase flow

铝粉能量密度高、储运便捷,是固体燃料脉冲爆轰发动机(pulse detonation engine, PDE)的优质燃料。铝粉/空气两相爆轰是涉及气固两相耦合、激波-燃烧相互作用、湍流剧烈演化的强非定常复杂过程,其燃烧转爆轰(deflagration to detonation transition, DDT)诱发机制、爆轰波传播特性及流场参数演化规律,既是多相爆轰理论研究的核心内容,也是脉冲爆轰发动机优化设计的关键科学依据。受限于高温高压高速瞬态流场的实验观测难度,数值模拟已成为揭示铝粉爆轰机理、支撑工程应用的核心手段。

近年来,国内外学者围绕铝粉/空气爆轰开展了大量实验与数值研究。实验方面,李小东等^[1]借助大型水平爆轰管,阐明了铝粉-空气混合物 DDT 过程的阶段特征,明确了铝粉浓度与点火延迟时间对爆轰参数的影响。JING 等^[2]通过实验获得片状铝粉自持爆轰浓度范围,观测到双头螺旋爆轰结构与胞格特征,为数值模型验证提供了关键数据。数值仿真方面,守恒元-求解元(conservation element and solution element, CE/SE)方法因对强间断流场捕捉精度高、稳定性好,被广泛应用于爆轰模拟。文献[3]建立铝粉/空气二维黏性两相模型,验证了 CE/SE 方法在气固爆轰模拟中的适用性;文献[4]又完成 PDE 内流场数值研究,证实铝粉燃料可提供有效推进性能。沈洋等^[5]采用改进 CE/SE 方法模拟氢氧爆轰,展现了该方法在三维爆轰模拟中的优势。针对多相爆轰发动机,LI 等^[6]定量分析了工作频率与点火能量对 JP-10/PO/铝粉多相 PDE 爆轰与推进特性的影响。在旋转爆轰领域,李世全等^[7-8]揭示颗粒注射速度、当量比对铝粉/空气旋转爆轰波传播与流场分布的作用规律。文献[9~11]分别探究液态燃料、尾喷管结构对爆轰性能的影响,推动了工程应用研究。

现有研究仍存在明显局限:多数工作采用二维或无黏简化假设,忽略三维效应与流体黏性耦合;管壁边界层、黏性耗散对爆轰传播、压力分布及速度场的影响机制尚不清晰;兼顾三维、黏性与气固强耦合的高精度模型与数值方法仍不完善,难以满足工程实际需求。为此,本文以 PDE 研发为背景,基于 CE/SE 方法建立铝粉/空气三维黏性两相爆轰模型,推导含组分变化的三维两相雅可比矩阵,系统分析爆轰波压力、气固速度等参数的时空演化,揭示黏性对爆轰流场的作用机制,明确爆轰形成与传播的阶段特征。研究可进一步加深对三维黏性工况下铝粉爆轰机理的认知,为 PDE 优化设计、铝粉尘爆炸风险评估与防护提供理论支撑与数据参考。

1 物理模型

为简化铝粉/空气复杂的气固两相爆轰物理化学过程,首先构建铝粉/空气气固两相爆轰物理模型,在保证研究合理性与结果可靠性的前提下,提出如下基本假设,物理模型与假设共同构成数值模拟的基础建模体系^[12-14]。

1.1 基本建模假设

①爆轰管壁为绝热边界,流场为三维非定常流场;

②铝粉颗粒为球形,均匀分布于气相中,将其视为具有连续介质特性的拟流体;

③铝粉颗粒初始粒径均一致,颗粒内部温度场均匀分布,无径向温度梯度;

④忽略铝粉颗粒间的相互作用,以及固体颗粒与爆轰管壁的直接作用;

⑤不考虑铝粉氧化反应的中间产物,颗粒放能速率与流场压力无关,化学反应释放的能量全部被气相介质吸收;

⑥铝粉燃烧产物氧化铝以气相形式存在,其体积变化对爆轰流场压力的影响可忽略;

⑦气、固两相存在速度与温度滑移,气相、固相的速度场与温度场相互独立;

⑧考虑气、固两相之间的动量交换与能量传递,相间作用遵循经典流体力学关联模型。

1.2 研究对象物理模型

本研究以圆柱形爆轰管内铝粉/空气预混气、固两相体系为研究对象,构建三维轴对称物理模型。爆轰管为刚性空心圆管,几何参数:长度 $L=1.2$ m、半径 $R=0.04$ m。管体为均质刚性材料,无变形、无质量泄漏;铝粉/空气两相流体填充于爆轰管内部,气相为空气(氧气、氮气混合)与铝粉燃烧产物的可压缩黏性流体,固相为球形铝粉颗粒构成的拟流体,气、固两相形成均匀预混的气固两相流场,起爆点设置于爆轰管左端($z=0$),爆轰波沿管体轴向(z 轴)正方向传播,流场为三维非定常气固两相流场,径向(r 轴)、切向(θ 轴)、轴向(z 轴)构成三维柱坐标系研究体系。

2 控制方程

基于上述基本假设,构建考虑组分变化的铝粉/空气三维气固两相爆轰控制方程组,该方程组涵盖气、固两相的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程及气相组分输运方程。具体如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(rF)}{r\partial r} + \frac{\partial G}{r\partial\theta} + \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial(rF_v)}{\partial r} + \frac{\partial G_v}{r\partial\theta} + \frac{\partial H_v}{\partial z} + R$$

$$U = \begin{pmatrix} \varphi_g \rho_g \\ \varphi_s \rho_s \\ \varphi_g \rho_g v_g \\ \varphi_g \rho_g w_g \\ \varphi_g \rho_g u_g \\ \varphi_s \rho_s v_s \\ \varphi_s \rho_s w_s \\ \varphi_s \rho_s u_s \\ \varphi_g \rho_g E_g \\ \varphi_s \rho_s E_s \\ \varphi_g \rho_g Y_O \\ \varphi_g \rho_g Y_A \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \varphi_g \rho_g v_g \\ \varphi_s \rho_s v_s \\ \varphi_g (\rho_g v_g^2 + p) \\ \varphi_g \rho_g w_g v_g \\ \varphi_g \rho_g u_g v_g \\ \varphi_s (\rho_s v_s^2 + p) \\ \varphi_s \rho_s w_s v_s \\ \varphi_s \rho_s u_s v_s \\ \varphi_g (\rho_g E_g + p) v_g \\ \varphi_s (\rho_s E_s + p) v_s \\ \varphi_g \rho_g v_g Y_O \\ \varphi_g \rho_g v_g Y_A \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} \varphi_g \rho_g w_g \\ \varphi_s \rho_s w_s \\ \varphi_g \rho_g w_g v_g \\ \varphi_g (\rho_g w_g^2 + p) \\ \varphi_g \rho_g w_g u_g \\ \varphi_s \rho_s w_s v_s \\ \varphi_s (\rho_s w_s^2 + p) \\ \varphi_s \rho_s w_s u_s \\ \varphi_g \rho_g w_g E_g \\ \varphi_s (\rho_s E_s + p) w_s \\ \varphi_g \rho_g w_g Y_O \\ \varphi_g \rho_g w_g Y_A \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} \varphi_g \rho_g u_g \\ \varphi_s \rho_s u_s \\ \varphi_g \rho_g u_g v_g \\ \varphi_g (\rho_g u_g^2 + p) \\ \varphi_s \rho_s u_s v_s \\ \varphi_s (\rho_s u_s^2 + p) \\ \varphi_g (\rho_g E_g + p) u_g \\ \varphi_s (\rho_s E_s + p) u_s \\ \varphi_g \rho_g u_g Y_O \\ \varphi_g \rho_g u_g Y_A \end{pmatrix}$$

$$F_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_{g,rr} \\ \tau_{g,r\theta} \\ \tau_{g,rz} \\ \tau_{s,rr} \\ \tau_{s,r\theta} \\ \tau_{s,rz} \\ v_g \tau_{g,rr} + w_g \tau_{g,r\theta} + u_g \tau_{g,rz} + r_c \frac{\partial T_g}{\partial r} \\ v_s \tau_{s,rr} + w_s \tau_{s,r\theta} + u_s \tau_{s,rz} + r_c \frac{\partial T_s}{\partial r} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$G_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_{g,r\theta} \\ \tau_{g,\theta\theta} \\ \tau_{g,\theta z} \\ \tau_{s,r\theta} \\ \tau_{s,\theta\theta} \\ \tau_{s,\theta z} \\ v_g \tau_{g,r\theta} + w_g \tau_{g,\theta\theta} + u_g \tau_{g,\theta z} + r_c \frac{\partial T_g}{r\partial\theta} \\ v_s \tau_{s,r\theta} + w_s \tau_{s,\theta\theta} + u_s \tau_{s,\theta z} + r_c \frac{\partial T_s}{r\partial\theta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$H_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_{g,zr} \\ \tau_{g,z\theta} \\ \tau_{g,zz} \\ \tau_{s,zr} \\ \tau_{s,z\theta} \\ \tau_{s,zz} \\ v_g \tau_{g,zr} + w_g \tau_{g,z\theta} + u_g \tau_{g,zz} + r_c \frac{\partial T_g}{\partial z} \\ v_s \tau_{s,zr} + w_s \tau_{s,z\theta} + u_s \tau_{s,zz} + r_c \frac{\partial T_s}{\partial z} \\ 0 \\ 0 \\ I_d \\ -I_d \\ I_d v_g - F_{d,r} + \varphi_g (p + \rho_g w_g^2)/r \\ I_d w_g - F_{d,\theta} + \varphi_g \rho_g w_g v_g / r \\ I_d u_g - F_{d,z} \\ -I_d v_s + F_{d,r} + \varphi_s (p + \rho_s w_s^2)/r \\ -I_d w_s + F_{d,\theta} + \varphi_s \rho_s w_s v_s / r \\ -I_d u_s + F_{d,z} \\ -Q_d + Q_c - (F_{d,r} v_g + F_{d,\theta} w_g + F_{d,z} u_g) + I_d (E_g + p/\rho_g) \\ Q_d + (F_{d,r} v_s + F_{d,\theta} w_s + F_{d,z} u_s) - I_d (E_s + p/\rho_s) \\ -\frac{8}{9} I_d \\ \frac{17}{9} I_d \end{pmatrix}$$

$$\tau_{g,rr} = \mu_g \left(2 \frac{\partial v_g}{\partial r} - \frac{2}{3} \nabla u_g \right), \quad \tau_{s,rr} = \mu_s \left(2 \frac{\partial v_s}{\partial r} - \frac{2}{3} \nabla u_s \right)$$

$$\tau_{g,\theta\theta} = \mu_g \left[2 \left(\frac{\partial w_g}{r \partial w} + \frac{v_g}{r} \right) - \frac{2}{3} \nabla u_g \right]$$

$$\tau_{s,\theta\theta} = \mu_s \left[2 \left(\frac{\partial w_s}{r \partial w} + \frac{v_s}{r} \right) - \frac{2}{3} \nabla u_g \right]$$

$$\tau_{g,zz} = \mu_g \left(2 \frac{\partial u_g}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla u_g \right), \quad \tau_{s,zz} = \mu_s \left(2 \frac{\partial u_s}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla u_s \right)$$

$$\tau_{g,r\theta} = \tau_{g,\theta r} = 2\mu_g \left(\frac{\partial w_g}{\partial r} + \frac{\partial v_g}{r \partial \theta} - \frac{\partial w_g}{\partial r} \right)$$

$$\tau_{s,r\theta} = \tau_{s,\theta r} = 2\mu_s \left(\frac{\partial w_s}{\partial r} + \frac{\partial v_s}{r \partial \theta} - \frac{\partial w_s}{\partial r} \right)$$

$$\tau_{g,z\theta} = \tau_{g,\theta z} = 2\mu_g \left(\frac{\partial w_g}{\partial z} - \frac{\partial u_g}{r \partial \theta} \right)$$

$$\tau_{s,z\theta} = \tau_{s,\theta z} = 2\mu_s \left(\frac{\partial w_s}{\partial z} - \frac{\partial u_s}{r \partial \theta} \right)$$

$$\nabla u_g = \frac{\partial(rv_g)}{r \partial r} + \frac{\partial w_g}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_g}{\partial z}, \quad \nabla u_s = \frac{\partial(rv_s)}{r \partial r} + \frac{\partial w_s}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_s}{\partial z}$$

式中:下标“g”,“s”分别表示气相和固相; $\varphi, \rho, u, \mu, T, E$ 分别为体积分数比、密度、速度、黏性系数、温度和内能,其中 $\varphi_g + \varphi_s = 1$; p 为爆轰管内的压力; Y_0, Y_A 分别为气相部分中 O_2 和 Al_2O_3 的体积百分数; I_d 为单位体积内铝粉颗粒因燃烧引起的质量变化率; F_d 为气相与固体颗粒相间的相互作用力; Q_d 为气相与固体颗粒间的对流传热量; Q_c 为铝粉燃烧释放的热量。

3 数值计算方法

3.1 计算域与网格划分

结合三维爆轰流场的梯度分布特征,实施非均匀网格划分以平衡计算精度与效率:轴向(z 方向)起爆点附近($z \in [0, 0.2]$)爆轰波结构复杂、参数梯度大,网格尺寸取 $\Delta z = 1$ mm; 远离起爆点区域($z \in [0.2, 1.0]$)参数变化平缓,网格尺寸逐步增大至 $\Delta z = 5$ mm。径向(r 方向):管中心区域($r \in [0, 0.025]$)流场参数均匀,网格尺寸 $\Delta r = 2$ mm; 近壁面区域($r \in [0.025, 0.05]$)需捕捉边界层效应,网格尺寸加密至 $\Delta r = 1$ mm。切向(θ 方向):为保证三维对称性,采用均匀网格划分,网格尺寸 $\Delta \theta = \pi/30$ 。

3.2 初始与边界条件

①初始条件。

计算域初始状态设定为铝粉/空气混合物的均匀预混状态,参数参考工程实际工况。

初始压力 $p_0 = 101\,325$ Pa;

初始温度 $T_0 = 298$ K;

铝粉体积分数 $\phi = 0.05$, 初始铝粉颗粒直径 $d_p = 50$ μm ;

气相组分初始质量分数: $Y_{O_2} = 0.232$, $Y_{N_2} = 0.768$, $Y_{Al_2O_3} = 0$;

初始速度:气、固两相初始均静止, $u_{g,0} = u_{s,0} = 0$, $v_{g,0} = v_{s,0} = 0$, $w_{g,0} = w_{s,0} = 0$, 轴向、径向、切向速度均为 0。

②边界条件。

结合三维圆柱形计算域的几何特征,爆轰管左端为固壁边界条件,右端为压力出口边界,壁面为无滑移边界。

3.3 数值求解方法

采用守恒元-求解元(CE/SE)方法对三维黏性两相爆轰控制方程组进行数值求解。该方法核心优势在于:无需黎曼分解,避免了爆轰波强间断处的数值振

荡;计算格式简洁、稳定性强,对三维复杂流场的捕捉能力优异,适配铝粉/空气两相爆轰的数值模拟需求^[14]。

本研究采用显式龙格-库塔法进行时间推进,时间步长满足 CFL 条件,取 CFL 为 0.25,确保数值计算的稳定性;将相间动量交换、能量传递及化学反应源项单独离散,采用半隐式方法处理刚性源项(如化学反应速率),避免显式处理导致的时间步长过小问题,提升计算效率;爆轰波传播速度、压力等关键参数趋于稳定时,判定计算收敛。

4 计算结果及其分析

基于所建立的铝粉/空气三维黏性两相爆轰数学模型与 CE/SE 数值求解方法,对圆柱形爆轰管内的爆轰波形成、传播及气固两相流场演化规律展开系统分析,重点探究不同时刻爆轰波压力分布、气固两相速度演化特征,以及流体黏性对爆轰流场的影响规律,验证模型对三维黏性两相爆轰过程的模拟精度。

4.1 爆轰波压力时空分布特征

图 1 为不同时刻爆轰管截面上的压力分布云图。

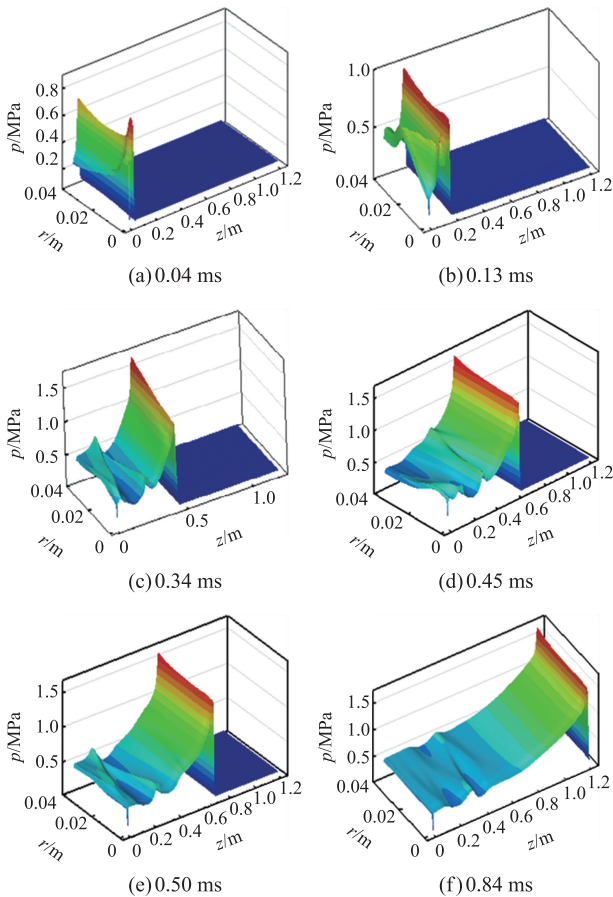


图 1 $\theta=27.6^\circ$ 截面上的压力分布图

Fig. 1 Pressure distribution on the cross section of $\theta=27.6^\circ$

图 1 清晰反映了爆轰波从形成到稳定传播的压力演化过程。初始点火阶段,高温点火区引燃铝粉/空气预混混合物,燃烧产物快速膨胀产生初始压缩波,对未燃混合物形成压缩并使其压力逐步上升;随着后续压缩波不断追及叠加,压力呈激增趋势,逐步形成前导激波。0.04 ms 时,截面上最大压力为 0.8 MPa,前导激波尚未形成自持爆轰波;0.13 ms 时,最大压力升至 1.0 MPa,激波强度持续增强;0.34 ms 时,截面上最大压力达到 1.67 MPa,标志着前导激波完成燃烧转爆轰(DDT)过程,形成能自持能量传播的爆轰波。在 0.45~0.84 ms 的爆轰波稳定传播阶段,压力在径向方向的梯度变化极小,压力演化与传播主要集中在轴向方向,体现了三维圆柱形爆轰管内爆轰波传播的轴向主导特征。

图 2 为爆轰管中心点压力沿轴向(z 轴)的变化曲线。从曲线特征可判断,0.56 ms 时刻爆轰波已进入稳定传播阶段,轴向不同位置的 pressure 分布规律趋于一致,无明显波动。图 3 为爆轰波轴向传播速度随时间的变化曲线。波速在初始阶段呈急速上升趋势,随 DDT 过程的完成逐步趋于平稳。

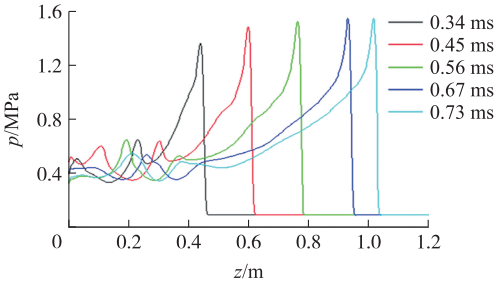
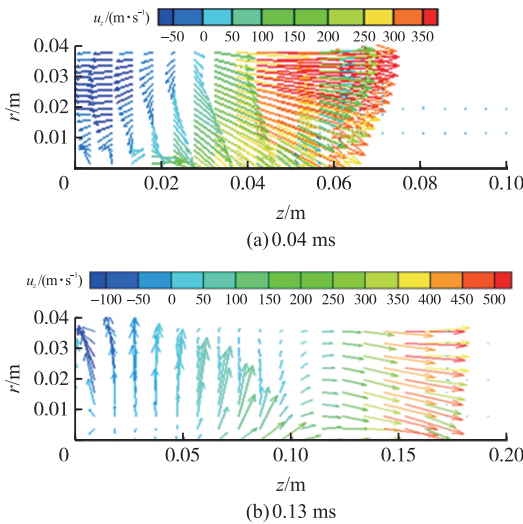


图 2 爆轰波压力随 z 轴的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of detonation wave pressure along the z-axis



(b) 0.13 ms

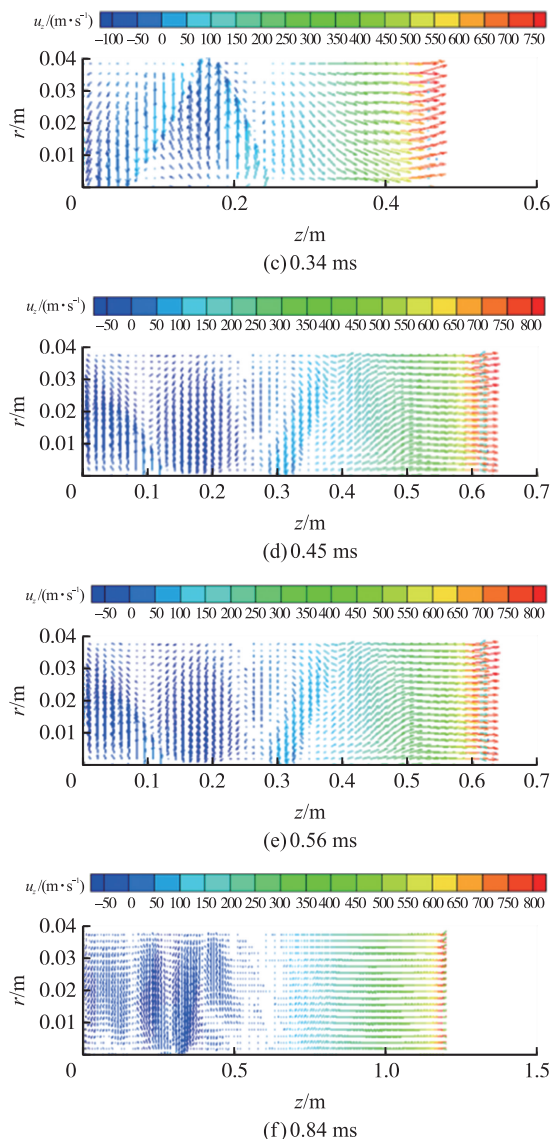


图3 不同时刻 $\theta = 27.6^\circ$ 截面上的气相速度矢量图

Fig. 3 Gas phase velocity vector on the cross section at different moments of $\theta = 27.6^\circ$

4.2 气固两相速度演化规律

①气相速度时空变化特征。

图3为不同时刻爆轰管截面上的气相速度矢量图,直观展现了气相轴向与径向速度的演化规律。0.04 ms时,气相轴向速度最大值为409 m/s,径向速度最大值为328 m/s;靠近推力壁的局部区域出现速度负值,该现象由燃烧波后膨胀波向爆轰管左端反向传播所致。0.13 ms时,轴向速度最大值升至519 m/s,径向速度最大值略降至320 m/s,激波强度增强,推动气相轴向运动加速,径向扰动略有减弱。在0.34~0.56 ms的DDT关键阶段,伴随铝粉氧化化学反应的持续进行,气相轴向速度最大值从739 m/s持续增加至823 m/s,而径向速度最大值从

211 m/s逐步减小至106 m/s,流场运动逐步向轴向主导转变。0.84 ms爆轰波稳定传播时,气相轴向速度最大值达到847 m/s,径向速度最大值为110 m/s,此时轴向与径向速度均无明显波动,气相流场进入稳定状态。

②气固两相径向与切向速度对比。

图4为0.03 ms时刻爆轰管截面上气相径向与切向速度分布云图。该时刻为爆轰波形成初期,气相径向与切向速度处于同一量级,体现了初始点火阶段流场的三维扰动特征。图5为同时刻铝粉颗粒相径向与切向速度分布云图,固相径向与切向速度同样处于同一量级,但数值远低于气相对应速度,原因在于铝粉颗粒存在惯性效应,其速度响应滞后于气相流场。

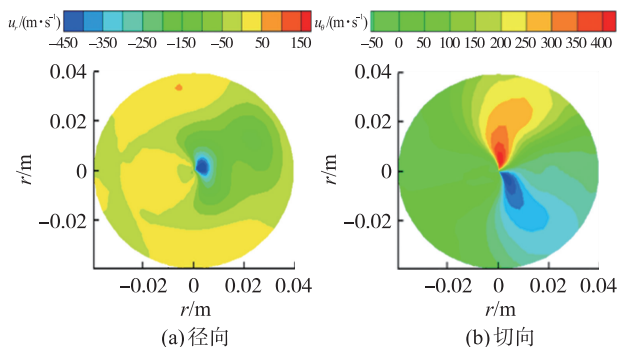


图4 0.03 ms时刻 $z = 0.096$ m 截面上的气相速度分布

Fig. 4 Gas phase velocity distribution on the cross section of $z = 0.096$ m at 0.03 ms

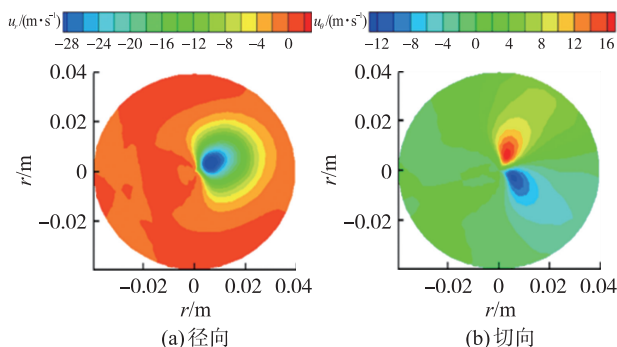


图5 0.03 ms时刻 $z = 0.096$ m 截面上的固相速度分布

Fig. 5 Solid phase velocity distribution on the cross section of $z = 0.096$ m at 0.03 ms

图6与图7分别为0.78 ms时刻气相、固相的径向与切向速度分布云图。此时爆轰波已稳定传播,流场三维扰动显著减弱。气相径向速度分布梯度极小,最大值从初始阶段的数百米每秒降至数米每秒,切向速度较径向速度小两个量级,可忽略不计;固相径向与切向速度仍远低于气相,且数值均处于极低水平,气、固两相的径向、切向运动对爆轰波传播的影响可忽略。

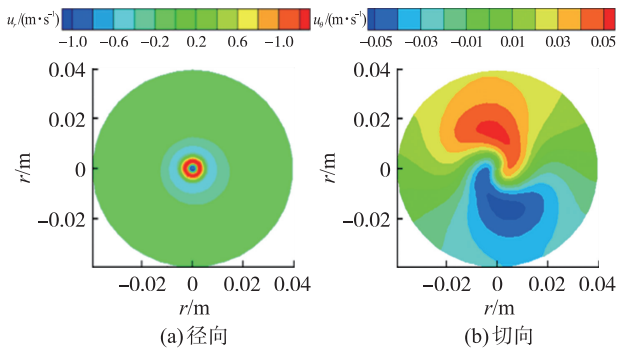


图6 0.78 ms 时刻 $z=1.15$ m 截面上的气相速度分布

Fig. 6 Gas phase velocity distribution on the cross section of $z=1.15$ m at 0.78 ms

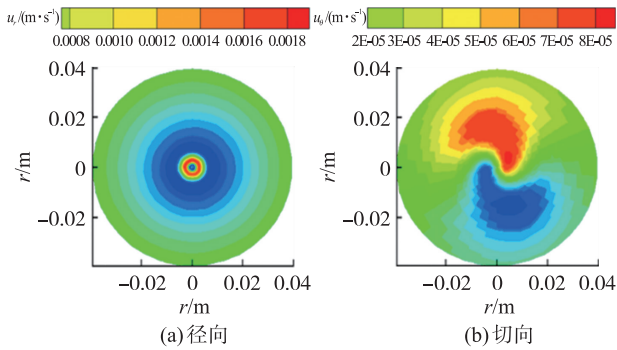


图7 0.78 ms 时刻 $z=1.15$ m 截面上的固相速度分布

Fig. 7 Solid phase velocity distribution on the cross section of $z=1.15$ m at 0.78 ms

③气固两相轴向速度特征。

径向 0.009 m,切向 26.7°时,固相和气相的轴向传播速度变化曲线如图 8 所示。气相和液相的轴向速度值都比其各自的切向和径向速度值大得多,这与 PDE 结构是相符的,因为 PDE 径向和切向方向的尺寸远小于其轴向尺寸。气相轴向传播速度最大值为 786 m/s,固相轴向传播速度最大值为 98 m/s,且两者速度值都随着 DDT 过程而增加。当形成稳定爆轰波后,气相轴向速度和液相轴向速度都在很小范围内波动,即速度值也趋于稳定。

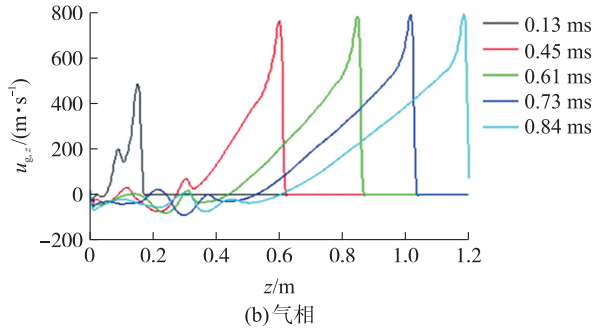
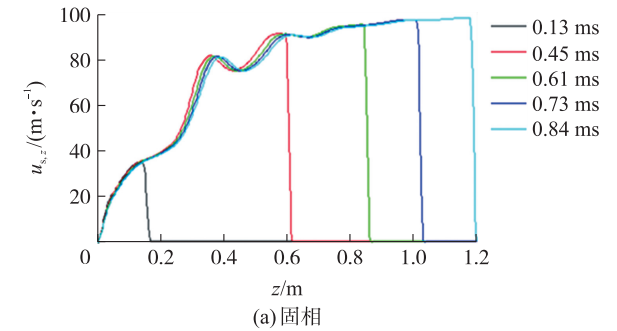


图8 固相和气相的轴向速度变化曲线

Fig. 8 Axial velocity variation curves of solid and gas phases

4.3 流体黏性对爆轰流场的影响

为探究流体黏性对铝粉/空气三维爆轰过程的影响,对比分析了考虑黏性与不考虑黏性工况下的爆轰管截面压力等值线分布,结果如图 9(不考虑黏性)与图 10(考虑黏性)所示。不考虑黏性时,压力等值线分布相对简洁,流场参数变化的细节特征未得到充分体现;考虑流体黏性作用后,压力等值线分布更为复杂细密,因气固两相动量交换造成的流场非均匀性更显著,更真实地反映了实际工程中爆轰波的压力流场分布特征。

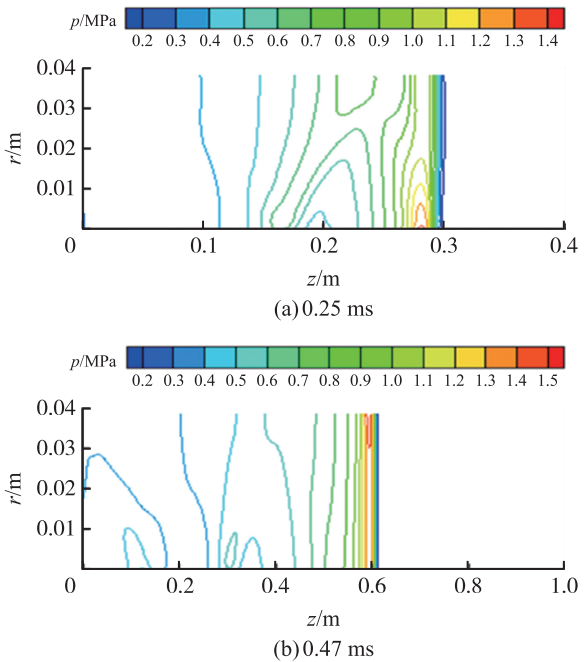


图9 $\theta=27.6^\circ$ 截面上不考虑黏性的压力等值线图

Fig. 9 Pressure contour on the cross section of $\theta=27.6^\circ$ without considering viscosity

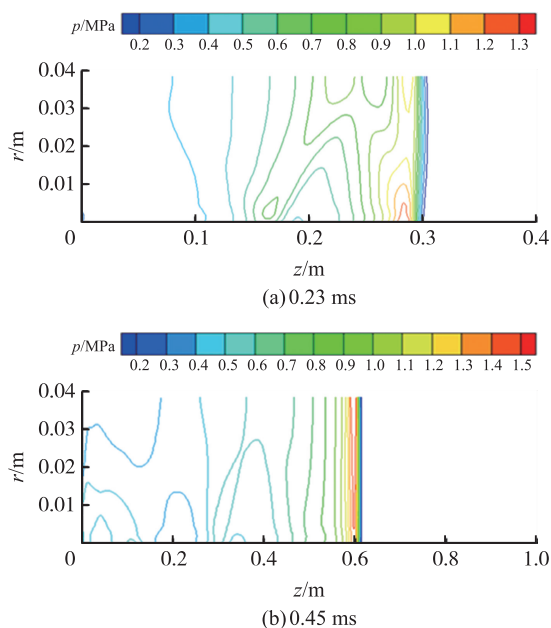


图 10 $\theta = 27.6^\circ$ 截面上考虑黏性的压力等值线图

Fig. 10 Pressure contour on the cross section of $\theta = 27.6^\circ$ with viscosity considered

流体黏性的作用还体现在爆轰波传播特性与流场速度分布上:黏性作用使爆轰波的传播速度略有降低、峰值压力小幅下降,且对管壁附近流场的速度分布影响更为突出,表现为轴向速度小幅下降、径向速度略有上升,这是由于黏性应力引发的管壁摩擦阻力与相间动量交换,改变了气固两相的运动规律。

5 结束语

本文基于 CE/SE 方法,构建管内铝粉/空气三维黏性两相爆轰数学模型,通过结构化非均匀网格与科学初边值条件设置,实现该爆轰过程的高精度数值模拟,系统分析了爆轰波关键参数时空演化规律及流体黏性的作用机制,主要研究结论如下:

①所建模型与 CE/SE 数值求解方案可精准捕捉爆轰波强间断特性,模拟的爆轰波稳定传播速度与工程实际高度吻合,能有效反映三维效应与黏性耦合下铝粉/空气爆轰的全过程,验证了模型与方法的可靠性和精度。

②铝粉/空气爆轰波形成与传播呈明显阶段化特征,初始点火阶段压缩波叠加增强,完成燃烧转爆轰 (DDT) 后进入稳定传播阶段,此阶段爆轰波演化与传播以轴向为主导,径向压力梯度极小,流场参数趋于平稳。

③气固两相速度演化与爆轰波发展阶段高度关

联,爆轰波形成初期流场三维扰动显著,铝粉颗粒相因惯性,其径向、切向速度远低于气相;稳定传播阶段三维扰动大幅减弱,气固两相均以轴向运动为主,轴向速度随 DDT 过程提升,爆轰波稳定后保持小幅波动,适配脉冲爆轰发动机结构与工作要求。

④流体黏性对铝粉/空气三维爆轰流场及特性影响显著,对于管壁边界层效应、黏性耗散的压力梯度变化以及气固两相动量交换引起的流场非均匀性捕捉得更为精准,更贴合工程实际;同时黏性引发的管壁摩擦阻力与相间动量交换变化,会使爆轰波传播速度略降、峰值压力小幅下降,且对管壁附近流场速度分布影响更为突出。

本研究将气体黏性纳入铝粉/空气三维两相爆轰模型,完善了多相爆轰理论体系,为固体燃料脉冲爆轰发动机优化设计、工业铝粉尘爆炸风险评估与防护措施制定,提供了重要的理论支撑。

参考文献

- [1] 李小东,刘庆明,白春华,等. 铝粉-空气混合物的燃烧转爆轰过程[J]. 火炸药学报,2009,32(6):58-61.
LI Xiaodong, LIU Qingming, BAI Chunhua, et al. Deflagration-to-detonation process of aluminum-air mixture[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(6): 58-61. (in Chinese)
- [2] JING Q, WANG D, SHI C L, et al. Deflagration-to-detonation characteristics and detonation wave structure of the flake aluminum powder-air mixture[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2023, 59(5): 647-656.
- [3] 韦伟,翁春生. 铝粉/空气二维黏性两相爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 29-35.
WEI Wei, WENG Chunsheng. Numerical simulation of two-dimensional viscous two-phase detonation of aluminum powder/air[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(1): 29-35. (in Chinese)
- [4] 韦伟,翁春生. 以铝粉为燃料的脉冲爆轰发动机数值研究[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(1): 37-40, 59.
WEI Wei, WENG Chunsheng. Numerical study of pulse detonation engine using aluminum powder as fuel[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(1): 37-40, 59. (in Chinese)
- [5] 沈洋,刘凯欣,陈璞,等. 采用改进的 CE/SE 方法模拟方管中氢氧爆轰波的稳定传播结构[J]. 航空学报, 2019, 40(5): 73-85.
SHEN Yang, LIU Kaixin, CHEN Pu, et al. Simulation of stable propagation structure of hydrogen-oxygen detonation wave in square tube using improved CE/SE method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(5): 73-85. (in Chinese)

- afterburning[J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1207–1216.
- [11] 王惠方, 刘洋佐, 乐贵高, 等. 导流结构对火箭炮冲击载荷的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(8): 74–79, 86.
WANG Huifang, LIU Yangzuo, LE Guigao, et al. Influence of deflector structure on rocket launcher impact loads[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(8): 74–79, 86. (in Chinese)
- [12] 赵若男, 姜毅, 李静, 等. 不同导流型面对燃气流场的影响研究[J]. 固体火箭技术, 2020, 42(5): 671–678.
ZHAO Ruonan, JIANG Yi, LI Jing, et al. Research on influence of different flow deflectors on jet flow field[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 42(5): 671–678. (in Chinese)
- [13] 赵谢, 程洪杰, 赵媛, 等. 导流锥型对燃气弹射内弹道的影响数值研究[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(2): 243–249.
ZHAO Xie, CHENG Hongjie, ZHAO Yuan, et al. Influence of diversion cone on gas-ejection internal ballistic[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43(2): 243–249. (in Chinese)
- [14] MCILROY K, FUJII K. Computational analysis of supersonic under expanded jets impinging on an inclined flat plate: AIAA 2007–3859[R]. 2007.
- [15] MEHTA R. Analysis of supersonic free jets and impinging supersonic jets on deflector[M]. London: Intech Open, 2023.
- [16] ALVI F S, IYER K G. Mean and unsteady flowfield properties of supersonic impinging jets with lift plates: AIAA 99–1829[R]. 1999.
- [17] 刘念昆. 车载导弹垂直发射装置燃气排导的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LIU Niankun. Numerical study of gas flow for a vehicle-mounted missile vertical launcher[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] ALLGOOD D, AHUJA V. Computational plume modeling of conceptual ARES vehicle stage tests: AIAA 2007–5708[R]. 2007.
- [19] SINHA P K, CHAKRABORTY D. Numerical study of hot launch of missile inside a tube[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering, 2014, 228(14): 2604–2611.
- [20] BERTIN J J, BERTIN R S, YUNG A, et al. The launch-tube flow-field for a vertical launching system: AIAA 88–0332[R]. 1988.
- [21] 孙中一, 崔阳文, 赵晨耕, 等. 冷发射弹体偏转对发射车力热环境影响[J]. 航空动力学报, 2025, 40(11): 358–369.
SUN Zhongyi, CUI Yangwen, ZHAO Chengeng, et al. Influence of cold launch bullet body deflection on the force and thermal environment of launch vehicles[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(11): 358–369. (in Chinese)

(上接第86页)

- [6] LI Y T, QI S, JING Q, et al. The effect of operating frequency and ignition energy on JP-10/PO/aluminum powder multiphase-pulse-detonation-engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 244: 122758.
- [7] 李世全, 祝文超, 孙方平, 等. 颗粒注射速度对铝粉/空气两相旋转爆轰波的影响[J]. 兵工学报, 2024, 45(4): 1148–1157.
LI Shiquan, ZHU Wenchao, SUN Fangping, et al. Effect of particle injection velocity on aluminum powder/air two-phase rotating detonation wave[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(4): 1148–1157. (in Chinese)
- [8] 李世全, 杨帆, 王宇辉, 等. 当量比对铝粉/空气旋转爆轰发动机流场影响的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2024, 39(5): 85–99.
LI Shiquan, YANG Fan, WANG Yuhui, et al. Numerical simulation of the effect of equivalence ratio on the flow field of aluminum powder/air rotating detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(5): 85–99. (in Chinese)
- [9] WANG F, WENG C S, WU Y W, et al. Effects of total pressures and equivalence ratios on kerosene/air rotating detonation engines using a paralleling CE/SE method[J]. Defence Technology, 2021, 17(6): 1805–1816.
- [10] 李宝星, 翁春生. 液态燃料对连续旋转爆轰发动机爆轰特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 331–338.
LI Baoxing, WENG Chunsheng. Effect of liquid fuel on detonation characteristics of continuous rotating detonation engine[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 331–338. (in Chinese)
- [11] 王研艳, 翁春生. 基于带源项非结构网格 CE/SE 方法的 PDRE 爆轰排气流场中尾喷管特性研究[J]. 弹道学报, 2016, 28(4): 90–96.
WANG Yanyan, WENG Chunsheng. Study on nozzle characteristics in PDRE detonation exhaust flow field based on CE/SE method with source terms on unstructured grids[J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(4): 90–96. (in Chinese)
- [12] WEI W, YANG J L, LI N, et al. Experimental study of a new injection mode of aluminum dust fuel of pulse detonation engine based on particle image velocity[J]. SPIE, 2016, 10155: 1015520.
- [13] NGUYEN V B, LI J, CHANG P H, et al. On the deflagration-to-detonation transition(DDT) process with added energetic solid particles for pulse detonation engines(PDE)[J]. Shock Waves, 2018, 28(6): 1143–1167.
- [14] 韦伟, 翁春生. 基于三维两相 CE/SE 方法的点火位置对固体燃料 PDE 的影响研究[J]. 弹道学报, 2016, 28(3): 65–70.
WEI Wei, WENG Chunsheng. Analysis of the influence of different ignition location on pulse detonation engine with solid fuel based on three-dimensional two-phase CE/SE method[J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(3): 65–70. (in Chinese)