

文章编号: 1000-8055(2008)09-1579-06

高速运动弹丸诱导的瞬态流场数值研究

姜孝海, 范宝春, 李鸿志

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

摘 要: 采用基于任意拉格朗日欧拉 (ALE) 方程的动网格及嵌入网格法, 结合二阶精度 Roe 格式和沉浸边界法, 对弹丸由高压气体驱动从静止状态加速至超声速, 射出膛口到完全飞离初始流场的整个过程进行了数值模拟。根据数值结果, 详细讨论了初始流场、火药燃气流场的形成与发展以及与弹丸的耦合和相互作用过程。

关 键 词: 任意拉格朗日欧拉 (ALE) 方程; 二阶 Roe 方法; 沉浸边界法; 膛口流场; 动力学过程

中图分类号: TJ012.2

文献标识码: A

Numerical Investigation on the transient flow induced by a high-speed projectile

JIANG Xiao-hai, FAN Bao-chun, LI Hong-zhi

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

Abstract: The entire process of the quiescent projectile accelerated by high-pressure gas to shoot out at a supersonic speed and fly out of the range of precursor flow field was simulated numerically. The calculation method was based on arbitrary Lagrangian-Eulerian equations and second-order precision Roe method by adopting the chimera grids, dynamic mesh and immersed boundary method. From the predicted results, the coupling and interaction process among the precursor flow field, propellant gas flow field and the high-speed projectile were discussed in detail.

Key words: ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) equation;

second-order precision Roe method; high-speed projectile;

immersed boundary method; muzzle flow; dynamic process

弹丸飞出枪炮后, 其后的高温高压火药燃气突然释放, 膛口流场发生剧烈的变化, 产生多股射流、多个冲击波, 并与高速运动弹丸发生相互作用, 形成气动结构异常复杂的高瞬态流场。对于它的研究不仅在军事应用方面具有现实的意义, 而且在学术上具有重要的研究价值。

关于膛口流场, 前人在实验、理论以及经验关系式等方面开展的大量的工作。由于实验周期、成本因素以及测试设备本身引入的扰动, 使得实验不可避免的存在一定的局限性。虽然理论-经验关

系式适合工程应用, 但对于研究流场冲击波或噪声的空气动力学特征及膛口流场的详细发展机理, 还是不够的。相对来说, 数值研究在这方面具有明显的优势。尤其是近年来, 随着计算速度的提高及 CFD 技术的不断成熟, 采用计算流体力学方法来模拟膛口流场, 愈来愈受到人们的重视^[1-10]。Alziary de Roquefort 等^[1]采用基于二维 Euler 方程二阶精度 TVD 格式的 FREIN 代码, 对不包含初始流场、弹丸简化为线边界条件并给定弹丸运动速度的定常过程进行了数值模拟。随后该代码

收稿日期: 2007-08-22; 修订日期: 2007-12-11

作者简介: 姜孝海 (1975 -), 男, 湖北阳新人, 副教授, 博士, 主要从事兵器发射、工业灾害等方面的研究。

发展成为可以计算包含初始流场和真实弹丸运动的瞬态流场,并对包含制退器的膛口流场^[2]以及 APFSDS 穿甲弹的脱壳过程^[3]进行了数值模拟. Watanabe 等采用二维^[4]和三维^[5]非稳态 Euler 方程,耦合运动区域网格法和 FSA 算法,对弹丸穿越前方激波所诱导的流场进行了模拟. 讨论了在弹丸相对波后气体超音速或亚音速的条件下,所诱导的流场特征及弹丸的受力状况. Cler 等^[6]分别采用 Fluent 6.1 中关于二阶无粘解算器和基于 Galerkin 方法的 DGM 代码对未包含运动弹丸的膛口流场(7.62 mm NATO rifle G3)进行了数值模拟,并与实验阴影进行了对照,结果表明在火药燃气未出之前,预测的初始流场与实验阴影符合得很好,而火药燃气喷出后,预测的火药燃气流场并不能很好的与实验相符. Jiang 等^[7-8]采用基于二维轴对称 Euler 方程的二阶精度 Dispersion-controlled 差分格式和动边界条件,讨论了不同初速条件下,膛口流场的波系特征、接触间断以及射流等的形成和发展以及与弹丸的相互作用过程,并分析了不同摩擦力的条件下的流场特征,其初始条件和摩擦力均作了特殊处理. 文献[9]对大口径火炮但不带运动弹丸的膛口流场进行了数值仿真. 文献[10]综合了计算流体力学(CFD)和计算声学(CAA)的适用特点,发展了 CFD-CAA 耦合算法,并应用于忽略弹丸影响的冲击波噪声场的研究.

本文采用基于 ALE 方程的二阶精度 Roe 方法、嵌入网格法及最近发展起来的沉浸边界法,对静止弹丸由膛内高压气体驱动加速至超声速射出膛外,直至飞离初速流场作用域的整个过程进行了数值模拟. 根据数值结果,从动力学特性上,讨论了膛口流场的发展过程.

1 数学模型

1.1 基本方程

不考虑粘性和化学反应,在体积可变的控制体内,理想气体满足

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V dV + \oint_{S(t)} \mathbf{F} - Q\mathbf{V}_b \cdot \mathbf{n} ds = 0 \quad (1)$$

这里 $\mathbf{F} = Q\mathbf{V} + G$, $Q = (\rho, \rho\mathbf{V}, E)$, $G = (0, p\mathbf{n}, p\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})$. $\rho, \mathbf{V}, E$ 分别表示流体密度、速度矢量和单位体积的总能. $S(t)$ 表示 t 时刻,控制体 $V(t)$ 的表面积($V(t)$ 是形状、体积随时间变化的控制体), $\mathbf{n}$ 表示其外法线方向, $\mathbf{V}_b$ 表示沿外法线方向控制体的表面速度矢量. 当 $\mathbf{V}_b = 0$ 时,方程(1)为一般静止网格的 Euler 方程;当

$\mathbf{V}_b = \mathbf{V}$ ($\mathbf{V}$ 表示流体质点运动速度)时,为 Lagrangian 方程,故称方程(1)为 ALE 方程(Arbitrary Lagrangian Eulerian equation)^[11].

令 $F = Q(\mathbf{V} - \mathbf{V}_b) + G$, 式(1)可简写为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V dV + \oint_{S(t)} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} ds = 0 \quad (2)$$

方程(2)包含连续性方程、动量和能量守恒方程,为使方程闭合,引入一般气体状态方程

$$p = p(\rho, e) \quad (3)$$

这里 e 表示比内能,即 $e = E - \frac{1}{2} \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}$, 对于理想气体,方程(3)为

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (4)$$

式中 γ 为气体比热比.

1.2 方程离散及二阶 Roe 方法

方程(2)在体积可变的控制体中离散后,得

$$Q^{n+1} = \frac{V^n}{V^{n+1}} \left(Q^n - \frac{1}{V^n} \sum_i F_i \Delta S_i \Delta t \right) \quad (5)$$

这里上标 n 表示前一时刻, $n+1$ 表示所求的时刻. N 表示所求控制体所包含的外表面总数, ΔS_i 表示第 i 个面的面积, F_i 表示 $\mathbf{F}$ 在该面外法线方向的分量,即界面流量. 将控制体界面视为一维黎曼问题,界面流量根据 Roe 格式求解,即界面流量与其两侧的格点值有关

$$F_i^M = \frac{1}{2} [F^M(Q_R) + F^M(Q_L) - \sum_j \alpha_j |A_j^M| r_j] \quad (6)$$

这里 Q_R, Q_L 分别表示界面左右两侧格点值. $\alpha, A, \mathbf{r}$ 分别表示其波强度、特征向量和右特征矩阵. 根据数学分析,网格运动时,仅改变 Jacobian 矩阵的特征值,即 $A^M = A^F - W_n$ (这里界面速度 W_n 需满足几何守恒律^[11]),而波强度(或黎曼不变量)和左右特征矩阵与静止网格的完全相同. 上标 F 和 M 分别表示静止网格和动网格.

为提高 Roe 方法的精度,引入二阶修正项

$$\tilde{F}_i = \frac{1}{2} \sum_j |\lambda_j| \left[1 - \frac{\Delta t}{\Delta x} |\lambda_j| \right] W_i \quad (7)$$

这里 $Q_i - Q_{i-1} = \sum_m W_i^m \equiv \sum_m \alpha_i^m \mathbf{r}_i^m$, 因此,界面流量为

$$F_i = \frac{1}{2} [F^M(Q_R) + F^M(Q_L) - \sum_j \alpha_j |A_j^M| r_j] + \tilde{F}_i \quad (8)$$

在超声速计算中,还需波修正(或称通量修正),以处理可能产生的所谓伪振荡(Spurious os-

cillation)^[12],即

$$W_i = \tilde{\alpha}_i r$$

其中 $\tilde{\alpha} = \phi(\theta)\alpha$, 这里

$$\theta = \frac{\alpha}{\alpha_i}, I = \begin{cases} i - 1, & \text{if } \lambda^p > 0 \\ i + 1, & \text{if } \lambda^p \leq 0 \end{cases}$$

关于 $\phi(\theta)$ 的取值,本文采用 Monotonized centered 方法^[13],即

$$\phi(\theta) = \max(0, \min((1 + \theta)/2, 2, 2\theta$$

这样代入式(13),即可求得新时刻的值.程序中,时间步采用二阶精度的 Runge-Kutta 法.

1.3 嵌入网格及沉浸边界法

考虑到弹丸的运动,流场计算域的大小及形状随时间发生变化,如果网格数保持不变,弹丸周围的网格会被压缩或拉伸,在跨度较大时,将引入较大的误差.因此,计算域采用两套网格,即背景网格和附着网格,如图 1.前者是静止、固定的网格;后者是附着于弹丸的网格,用以调节网格的疏密程度,以保证计算所需的精度要求,其界面速度按某种分布给定.当附着网格的变化超过给定的设定值时,将采用双线性插值进行重整.

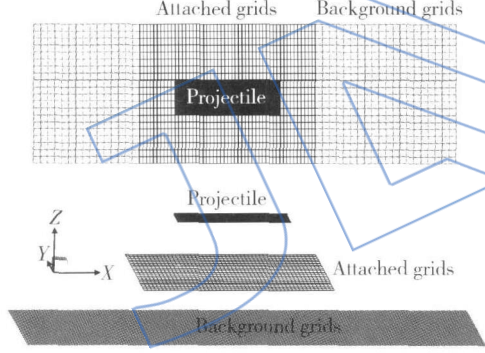


图 1 嵌入网格示意图

Fig. 1 Schematic of computation grids

沉浸边界法(Immersed boundary method)与传统从改变网格的角度去实现复杂边界(如贴体网格、非结构网格、Cut cell 方法)的思路不同,它通过构建边界附近(包括边界体本身)的流体变量来实现各种复杂边界,而不改变网格形状.该方法最大优势在于采用笛卡儿网格就可以实现几乎任意复杂外形的边界,简单、高效,且不失精度.本文采用用于可压缩无粘流的 Ghost body-cell method (GBCM) 边界法^[14],它包括虚网格 (Ghost cell), 曲率修正对称技术 (Curvature-corrected symmetry technique) CCST 方法和插值方法.虚网格为靠近边界,且胞格中心处于边界体内的格点;如果精度要求较高,如二阶精度,还必须找到

处于边界体内的第二排虚网格点. GBCM 法的重点是如何运用固壁边界条件,对虚网格点进行赋值.它采用已成功用于贴体网格的 CCST 方法,即虚网格和与它沿边界镜像对称的内点值(流体计算域内)之间存在如下关系式:

$$p_{-i} = p_i - \rho \frac{u_i^2}{R_i} \Delta n_i \tag{10}$$

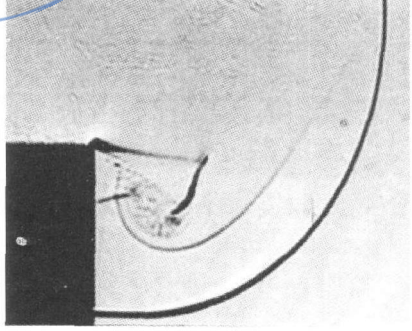
$$\rho_i = \rho \left(\frac{p_{-i}}{p_i} \right)^{1/\gamma} \tag{11}$$

$$u_{-i}^2 = u_i^2 + \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{p_i}{\rho_i} - \frac{p_{-i}}{\rho_{-i}} \right) + v_i^2 - v_{-i}^2 \tag{12}$$

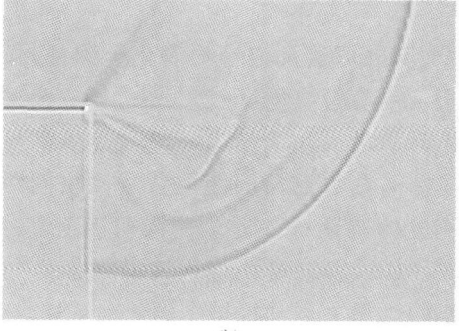
$$v_{-i} = -v_i \tag{13}$$

其中 $-i$ 表示虚网格点, i 表示与边界成镜像对称的内域点(一般不与内域网格点重合). u_i 和 v_i 分别表示沿边界的切向和法向速度分量. R_i 为对应边界点的曲率半径,若曲率中心在边界体内侧,则为正值,否则为负. Δn_i 为虚网格格点与对应镜像点之间的距离.当对应的镜像点与网格点不重合时,其值通过双线性插值得求.

图 2(a) 为实验阴影照片 ($Ma = 2.4$)^[15],图 2(b) 为采用本文数值模型及 GBCM 沉浸边界法计算获得的阴影图,该算例未用到动网格和嵌入网格法;从二者的对照可以看出数值阴影与实验阴



(a)



(b)

图 2 实验阴影图(a)和采用 GBCM 方法计算获得的阴影图(b)

Fig. 2 Experimental shadowgraph (a) and numerical shadow diagram of density based on GBCM method (b)

影吻合的相当好。

2 验证算例

根据上述数值方法,编写了 Fortran 计算程序。图 3(a) 为圆柱形弹丸在空气中以 $Ma = 3.6$ 高速飞行时的实验阴影照片^[15]。图 3(b) 为本程序计算获得的相应阴影图。从二者的对比中,可以看出数值阴影所反映出的流场特征与实验阴影是一致的。

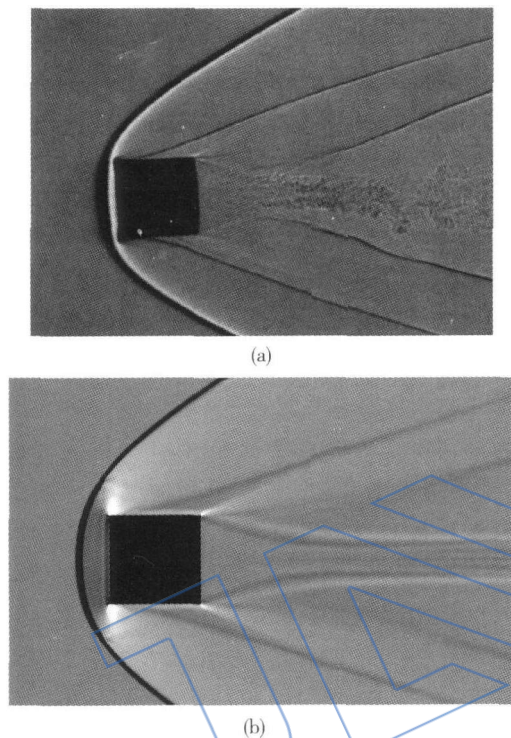


图 3 实验阴影照片(a)和数值计算获得的阴影图(b)
Fig. 3 Experimental shadowgraph (a) and numerical shadow diagram of density (b)

3 结果与讨论

本文弹丸形状及炮管均简化为圆柱,长分别为 $1.0d$ 和 $5.0d$,口径 $d = 24\text{ mm}$ 。计算时考虑轴对称性,计算域大小为 $75d \times 15d$,背景网格数为 $1\,200 \times 240$,附着网格间距取背景网格间距的一半。取弹丸的质量 $m = 25\text{ g}$,膛内初始压力为 $p_{in} = 101.325\text{ MPa}$,假定弹丸与炮管的摩擦力与接触面积成正比,弹丸运动根据牛顿运动定律求得。当弹丸到达膛口时,其速度为 $Ma = 2.34$ (相对周围大气)。

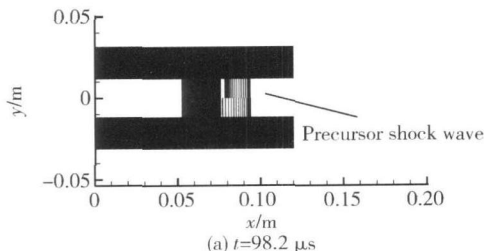
图 4 为计算获得的各个时刻的密度和压力等值线分布,该图形象的再现了弹丸射出后,膛口流场的动力学演化过程。这种演化过程主要包括三

个部分,即弹丸未射出前,膛口初始流场的发展;弹丸射出后,高压火药燃气流场的发展;弹丸穿越初始流场作用域之前,初始流场和火药燃气流场以及弹丸之间的相互耦合和作用。

弹丸未射出之前,其运动如同活塞,压缩前方气体形成激波,即初始激波,如图 4(a)。该激波到达膛口后,发生衍射而向外传播,形如球面,其后的高压气体泄出,形成欠膨胀射流结构,即初始激波、接触间断、桶激波、主涡环及剪切层等,如同图 4(b)。到图 4(c)时,弹丸尾部刚好到达膛口,初始流场继续发展,射流结构中的超声速膨胀区和初始激波波后区之间出现明显的帽状激波。这样,包括运动弹丸的非均匀初始流场,将影响高压火药燃气喷出后的欠膨胀气流结构。

弹丸射出后,因其背景流场不像初始流场为静止大气,而是上述的非均匀初始背景流场,故其结构变化较前述的欠膨胀射流更复杂。如图 4(d),受弹丸的阻挡,高压火药气体喷出形成的初始激波(即膛口冲击波),主要沿径向传播,波阵面如环状,并追赶弹丸。其后的射流结构中,桶激波、帽状激波,受初始流场主涡环以及弹丸的影响,发生复杂的变化,见图 4(d)~(f)。其中,帽状激波与弹丸尾部发生明显的衍射现象如图 4(g)~(h),并在轴线上碰撞反射图 4(i)~(j),最终形成如图 4(k)所示的火药燃气射流欠膨胀射流典型结构。

另一方面,弹丸头部穿越初始流场帽状激波后如图 4(d)~(f),即由超声速膨胀区进入亚声速波后区,弹丸前方必然出现如弓状的激波,即冠状激波。该激波逐渐与后来赶上的膛口冲击波相交,形成三波点结构,见图 4(g)~(i)。这样,初始激波、冠状激波、膛口冲击波以及其后的火药燃气流场欠膨胀射流结构,构成了膛口流场的典型动力学特征。随着弹丸的继续运动,冠状激波逐渐穿越初始激波见图 4(i)~(j),在穿越过程中,如果强度较大时,可能会出现所谓的声爆现象,图 4(k)时,弹丸已完全穿越初始激波,从而摆脱了初始流场的作用范围进入稳定飞行阶段。



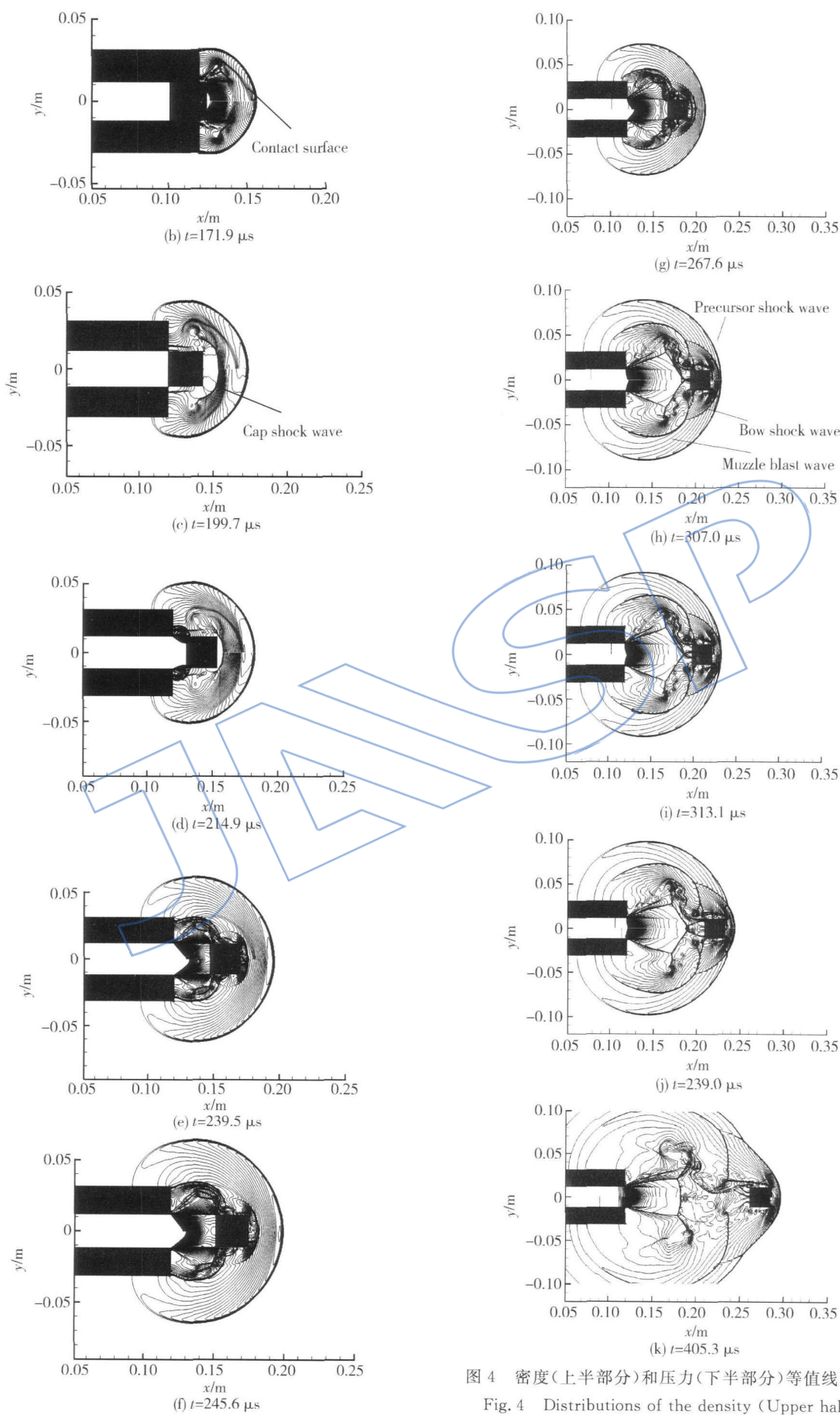


图 4 密度(上半部分)和压力(下半部分)等值线分布
Fig. 4 Distributions of the density (Upper half)
and pressure (Lower half)

4 结 论

关于膛口流场的数值模拟涉及到高精度算法、动网格和动边界、弹丸飞出过程中计算域网格的处理以及复杂边界的设置等问题,为此本文采用基于ALE方程的二阶Roe方法、嵌入网格法以及沉浸边界法,文中的验证算例表明了该数值方法的可行性.从本文算例的数值讨论中,可以看出数值结果基本上反映该流场的动力学特征,比较形象的再现了膛口流场的变化过程.

参考文献:

- [1] De Roquefort T A, Cayac R. Theoretical and comparison of unsteady flow through a muzzle brake[R]. Stockholm, Sweden: 13th International Symposium Ballistics, June 1992.
- [2] Cayzac R, Carette E, De Roquefort T A. et al. Intermediate ballistic computations and validations[R]. Midrand, South Africa: 17th International Symposium on Ballistics, 1998: 2-1-8.
- [3] Cayzac R, Carette E, De Roquefort T A. Intermediate ballistics unsteady sabot separation: first computations and validations[R]. Interlaken, Switzerland: 19th International Symposium of Ballistics, 2001: 297-305.
- [4] Watanabe R, Fujii K, Higashino F. Numerical simulation of the flow around a projectile passing through a shock wave[R]. AIAA 95-1790, 1995.
- [5] Watanabe R, Fujii K, Higashino F. Three-dimensional computation of the flow induced by a projectile overtaking a shock wave[R]. AIAA-97-1840, 1997.
- [6] Cler D L, Chevaugnon N, Shephard M S, et al. CFD application to gun muzzle blast—A validation case study[R]. AIAA, 2003-1142, 2003.
- [7] JIANG Zonglin, Takayama K, Skews B W. Numerical study on blast flowfields induced by supersonic projectiles discharged from shock tubes[J]. Physics of Fluids 1998, 10(1): 277-288.
- [8] JIANG Zonglin. Wave dynamic processes induced by a supersonic projectile discharging from a shock tube[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(6): 1665-1675.
- [9] 乐贵高, 马大为, 冯勇, 等. 某火炮膛口流场数值仿真[J]. 兵工学报, 2004, 25(1): 19-22.
LE Guigao, MA Dawei, FENG Yong, et al. Numerical simulation of muzzle blast flowfields of large caliber guns[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(1): 19-22. (in Chinese)
- [10] Lee I C, Lee D J, Ko S H, et al. Numerical analysis of a blast wave using CFD-CAA hybrid method[R]. AIAA 2006-2701, 2006.
- [11] Trepanier J Y, Reggio M, Zhang H. A finite-volume method for the Euler equations on Arbitrary Lagrangian-Eulerian grids[J]. Computer Fluids, 1991, 20(4): 399-409.
- [12] Leveque R J. Wave propagation algorithms for multi-dimensional hyperbolic systems[J]. Journal of Computational Physics, 131: 327-353, 1997.
- [13] Leveque R J. Finite volume methods for hyperbolic problems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 100-128.
- [14] Dadone A, Grossman B. Efficient fluid dynamic design optimization using Cartesian grids[R]. NASA/CR-2004-213036. NIA Report NO. 2004-07.
- [15] Van Dyke M. An album of fluid motion[M]. California: The Parabolic Press, 1988.