

超高速发射实验模型的数值计算^{*}

柏劲松¹, 华劲松¹, 沈 强², 戴诚达¹, 李 平¹, 谭 华¹, 张联盟²

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川绵阳 621900;

2. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘要:采用三阶精度 PPM(Parabolic Piecewise Method)方法和 VOF(Volume of Fluid)相结合, 运用 Lagrange-Remapping 算法, 编制了多介质流体高精度欧拉计算程序 MFPPM, 可以对多介质复杂流场进行数值计算。对程序计算精度进行了测试, 并应用于超高速发射实验模型数值计算, 对 Sandia 实验室不带会聚作用的实验模型进行了一维计算以及带会聚作用的实验模型进行二维计算并与其实验结果和 CTH 计算结果进行对比, 其中一维计算最大相对误差 1%, 二维计算相对误差 4.7%, 在此基础上对超高速发射设计模型进行了初步计算。

关键词: PPM; 多介质流体; 超高速发射; 高精度计算方法

中图分类号: O35; O347.1

文献标识码: A

1 引言

研究超高速发射的目的是为材料的超高压状态方程测量提供加载手段。Sandia 实验室从 20 世纪 90 年代至今, 一直在研究利用二级轻气炮的波阻抗梯度飞片技术实现对二级飞片的无冲击驱动^[1,2], 1995 年报道了使克量级的二级飞片达到约 16 km/s 的超高速, 利用这种高速运动的飞片可以在重材料中达到 1~2 TPa 的压力。在数值计算方面, Sandia 实验室主要采用 CTH 程序对超高速发射过程进行数值模拟^[3], 该程序应用界面重构方法描述多介质流体界面, 尽管逻辑复杂但界面精度较高。在国内, 波阻抗梯度飞片加载下的超高速发射二维数值模拟起步较晚, 但一维数值模拟已有一些阶段性结果^[4]。

本文在文献[5]的基础上进行推广, 使之适用于金属等凝聚介质形式的状态方程。采用多介质流体高精度 PPM 计算方法, 以 VOF 为基础编制 MFPPM 一维、二维欧拉计算程序, 文中首先对计算方法和程序计算精度进行了数值验证, 然后对 Sandia 实验室不带会聚作用的实验模型进行了一维计算以及带会聚作用的实验模型进行二维计算并与实验结果和 CTH 程序计算结果进行对比, 进一步检验计算程序, 在此基础上对超高速发射设计模型进行了初步计算, 给出相关数值结果。

2 计算方法

2.1 基本控制方程

PPM 方法对于多维多介质流的数值计算, 本研究采用维数分裂方法将多维问题简化为多个一维问题来处理, 一维问题的计算方法可以适用于多维问题的数值计算。采用体积分形式描述的一维多介质流 Euler 方程组为

^{*} 收稿日期: 2004-01-06; 修回日期: 2004-03-15

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金(20040650)

作者简介: 柏劲松(1968—), 男, 博士, 副研究员; 主要研究方向为计算流体力学的理论和数值方法研究。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho E + p)u]}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Y^{(i)}}{\partial t} + u \frac{\partial Y^{(i)}}{\partial x} = 0 \quad i = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 、 u 、 p 分别表示密度、速度和压力, E 表示单位质量的总能量, N 表示介质的种类, $Y^{(i)}$ 为第 i 种介质的体积分数。在含有 N 种不同介质的混合网格, 各体积分数满足 $\sum_{i=1}^N Y^{(i)} = 1$ 。状态方程采用凝聚介质简化形式的 Grüneisen 状态方程

$$p = (\gamma - 1)\rho e + c_0^2(\rho - \rho_0) \quad (2)$$

式中: γ 为材料的拟合常数, e 为单位质量的内能, ρ_0 、 c_0 是常态下材料的密度和声速。

2.2 多介质流体的 PPM 计算方法

为了有效地捕捉多介质流体交界面, 我们采用 Lagrange-Remapping 两步算法来求解方程组(1), 即 Lagrange 步加上输运步。整个计算分成 4 个步骤完成, 即: ① 物理量的分段抛物插值; ② 近似 Riemann 问题求解; ③ Lagrange 方程组的推进求解; ④ 最后将物理量变回到静止的 Euler 网格上。步骤①中物理量的分段抛物插值按照文献[6]所描述的过程进行, 此时无需对接触间断进行检测, 因为在 Lagrange 步计算中, 接触间断是自动保持的。步骤②的近似 Riemann 问题求解, 采用双激波近似计算, 只是这里状态方程采用(2)式形式, 对于步骤②、③和步骤④的详细计算过程, 可以参见文献[7]。在上述计算方法基础上, 编制的一维、二维计算机程序为 MFPPM。

3 MFPPM 程序计算精度的数值验证

3.1 MFPPM 差分格式计算精度

用两种不同气体的一维数值计算来测试多介质流体 PPM 计算方法的数值精度。两种气体均采用理想气体状态方程描述, 在计算区域 $[0, 1]$ 内的初始分布为(取无量纲形式)

$$(\rho, u, p, \gamma, Y^{(1)}) = \begin{cases} (4, 0, 4, 1.2, 1.0) & x \leq 0.5 \\ (1, 0, 1, 1.4, 0.0) & x > 0.5 \end{cases}$$

$Y^{(1)}$ 表示左边气体的体积分数。两种网格的宽度分别为 $h=0.01$ 和 $h=0.005$, 在 $t=0.28$ 时刻, 计算得到密度、动量、总能量、 $Y^{(1)}$ 的最大和最小误差以及数值解的最大最小精度情况如表 1。从比较可见, 多介质流体 PPM 计算方法计算出的体积分数的计算精度高于一阶, 最大达到 1.73, 它对其它守恒量的计算精度产生了一定影响, 因此低于单介质 PPM 理想情况下的三阶精度。

表 1 密度、动量、能量和体积分数的最大最小误差及其计算精度和误差常数

Table 1 The max-norm error, 1-norm error and error constant of the density, momentum, total energy and volume of fraction

Item	$h=0.01$		$h=0.005$		Accuracy τ		Error constant C	
	1-norm	Max-norm	1-norm	Max-norm	1-norm	Max-norm	1-norm	Max-norm
ρ	193.088×10^{-4}	191.458×10^{-3}	499.521×10^{-5}	123.884×10^{-3}	1.95	0.63	154	3.45
ρu	150.295×10^{-4}	212.033×10^{-3}	375.490×10^{-5}	837.553×10^{-4}	2.00	1.34	151	102
ρE	119.751×10^{-3}	192.309×10^{-2}	313.246×10^{-4}	938.315×10^{-3}	1.93	1.04	886	226
$Y^{(1)}$	952.918×10^{-5}	387.095×10^{-3}	287.670×10^{-5}	189.567×10^{-3}	1.73	1.03	27.2	44.4

3.2 MFPPM 界面计算检验

3.2.1 一维气-液界面问题数值计算

高压气体与液体相互作用, 求解两种流体组成的一维 Riemann 问题。初始时刻在 $x \in [0, 1.0 \text{ cm}]$

内为高压气体状态,压力为 1.0×10^8 Pa,密度为 1.29 g/cm^3 ;在 $x \in [1.0 \text{ cm}, 5.0 \text{ cm}]$ 内为液体水,初始压力为 1.0×10^5 Pa,密度为 1.0 g/cm^3 。计算网格宽度为 0.01 cm ,左右取透射边界条件。 $t = 20 \mu\text{s}$ 时刻计算各物理量的分布如图 1 所示。从计算可见,高压气体与液体相互作用时,在液体中产生一个向前传播的激波,在高压气体中产生一个向后传播的稀疏波,接触间断处经 3~4 个网格过渡,同时在气-液界面附近压力、速度保持了很好的连续性,未出现非物理振荡情况。

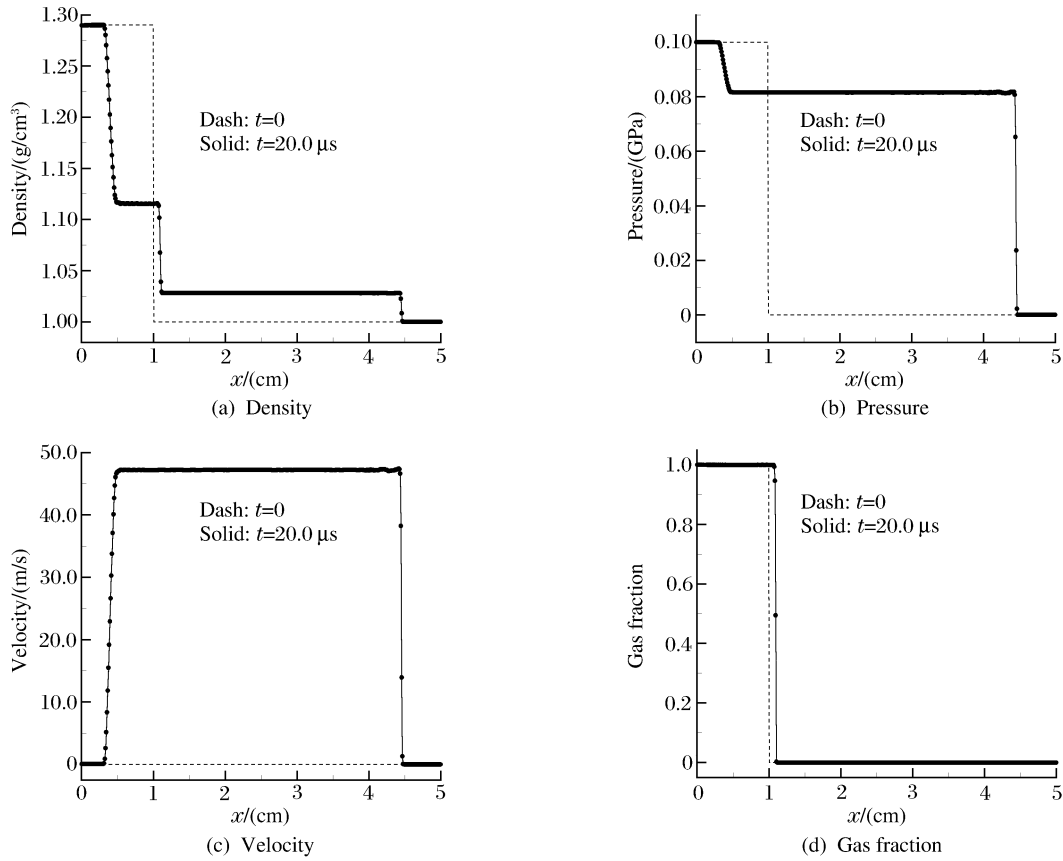


图 1 一维界面问题数值计算

Fig. 1 Numerical simulation of the 1D interface problem

3.2.2 沿 45° 方向的二维界面输运计算数值实验

直径为 0.01 m 的圆柱和边长为 0.01 m 的方形铜块在空气中以 $u=v=10 \text{ km/s}$ 速度沿 45° 方向运动,计算区域 $[0, 0.1 \text{ m}] \times [0, 0.1 \text{ m}]$,计算网格 200×200 。理论和数值计算给出 $t=0.0, 2.0 \mu\text{s}, 4.0 \mu\text{s}$ 和 $6.0 \mu\text{s}$ 时刻,铜的体积分数 $0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ 和 0.9 的等值线分布如图 2,对应时刻铜的体积分数精确解和数值解比较如表 2。从计算可见,方形区域计算的相对误差较圆形区域要大一些。

表 2 铜的比容分数数值解与精确解比较

Table 2 Comparison with the theoretic and numerical results of the copper's VOF

Shape	$t/(\mu\text{s})$	Theoretic/ (m^2)	Numerical/ (m^2)	Relative error/(%)
Cylindrical	0.0	7.8539×10^{-5}	7.8393×10^{-5}	0.1859
	2.0		8.0185×10^{-5}	2.0958
	4.0		8.0359×10^{-5}	2.3173
	6.0		8.0644×10^{-5}	2.6802
Box	0.0	1.0000×10^{-4}	1.0000×10^{-4}	0.0000
	2.0		1.0630×10^{-4}	6.3000
	4.0		1.0741×10^{-4}	7.4100
	6.0		1.0927×10^{-4}	9.2700

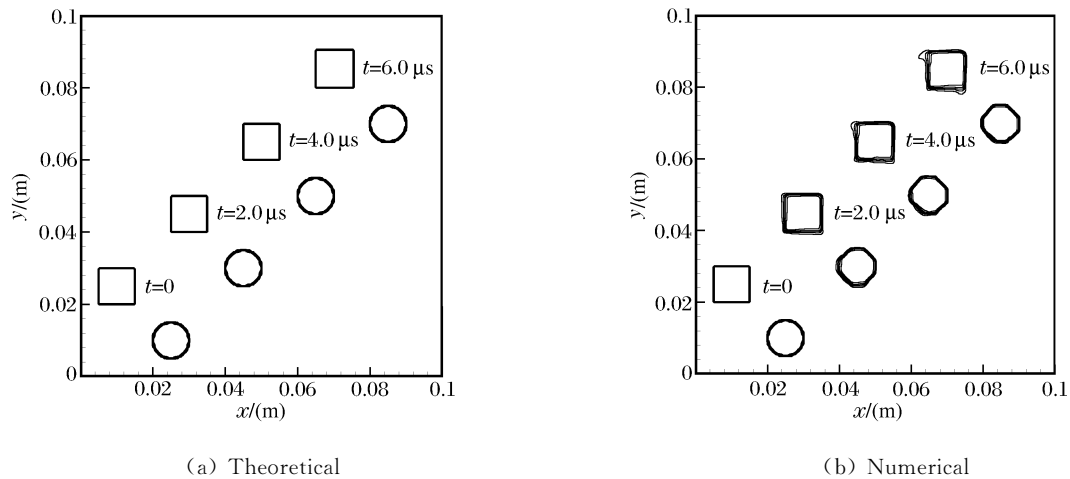


图 2 二维界面输运计算数值实验

Fig. 2 Numerical advection test of the 2D interface problems

4 Sandia 实验室超高速发射实验模型的数值计算

4.1 不带会聚作用的一维计算

在文献[8]中,Sandia 实验室设计的一级飞片和二级飞片等直径不带会聚作用的实验模型,结构如图 3 所示,这里选取其中二级飞片达到 10 km/s 以上的三组实验模型。其中一级飞片采用 6 种材料叠层组合而成,6 种材料阻抗从低到高分别为 TPX 塑料、镁、铝、Ti6 钛合金、铜和钽,二级飞片材料分别为铝、Ti6 钛合金和铝,缓冲层采用 TPX 塑料。各种材料厚度、一级飞片初始速度、Sandia 实验结果以及本文 MFPPM 一维数值计算结果如表 3,二级飞片速度历史曲线如图 4 所示。从本文计算结果与 Sandia 实验结果的比较可见,3 组实验模型中相对误差最大为 1.07%,最小为 0.67%。

表 3 Sandia 实验结果和本文 MFPPM 一维数值计算结果比较

Table 3 Comparison of the flyer-plate velocity between Sandia experiment and MFPPM simulation					
Experiment No.	Multi-ply assembly by thickness/(mm)	Buffer/flyer-plate thickness/(mm)	Impact velocity /(km/s)	Flyer-plate material/ velocity/(km/s)	MFPPM1 velocity result/(km/s)
EHVL1	0.64/0.33/0.28/0.31/0.19/0.52	0.81/0.41	7.20	Al/11.6	11.71
EHVL2	0.61/0.30/0.24/0.32/0.20/0.44	1.21/0.43	7.35	Ti6/11.9	11.82
EHVL3	0.62/0.30/0.23/0.33/0.19/0.44	1.25/0.42	7.35	Al/12.2	12.33

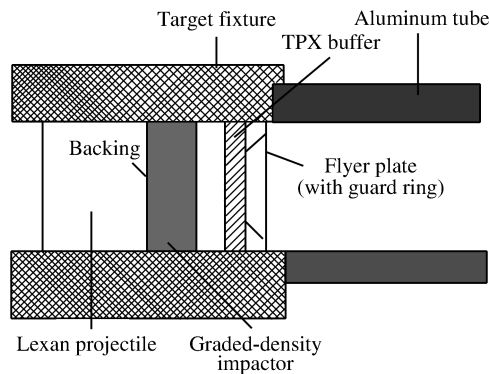


图 3 不带会聚的实验模型结构图

Fig. 3 Schematic of a graded-density

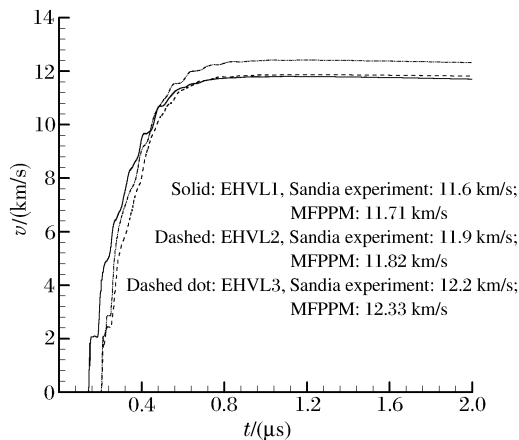


图 4 二级飞片速度历史曲线

Fig. 4 Axial velocity curves of the flyer-plate

4.2 带会聚作用的二维计算

Sandia 实验室 1995 年报道了带会聚作用的超高速发射二维实验模型如图 5 所示, 6 层阻抗梯度飞片与聚碳酸酯一起构成一级飞片, 一级飞片初始速度为 5.8 km/s。其中, 一级飞片用了 6 种材料, 分别为钛、铜、聚乙烯、铝、镁和聚碳酸酯, 二级飞片为钛合金, 具有会聚作用的发射装置材料为钨。由于模型具有轴对称性, 因此取一半的计算区域为 $[0, 3 \text{ cm}] \times [-0.2 \text{ cm}, 8 \text{ cm}]$, 计算网格宽度 $\Delta x = \Delta y = 0.025 \text{ cm}$, 取透射边界条件。在文献[2]中, Sandia 实验室通过实验测得二级飞片达到的最大速度为 10.2 km/s, 他们用 CTH 程序^[4]计算的二级飞片对称轴中心处速度最大值为 9.6 km/s, 本文应用多介质流体 PPM 方法计算得到二级飞片对称轴中心处点 (0.0 cm, 3.015 cm) 速度最大值为 9.722 km/s, 时间历史曲线的比较如图 6 所示。另外我们还跟踪了中心点的压力历史, 其最大压力值为 63 GPa, CTH 计算二级飞片中最大压力大约为 75 GPa; 同时在 $t = 3.0 \mu\text{s}$ 时刻给出 CTH 程序和 MFPPM2 程序计算得到的界面位置, 如图 7 所示。从我们的计算结果与 Sandia 实验室的实验和数值模拟结果比较可见, 两者计算的二级飞片速度历史曲线和最大速度值均一致, 在 $t = 3.0 \mu\text{s}$ 两个时刻物质界面形状也比较接近, 这说明我们的计算方法是正确的, 计算程序 MFPPM 用于超高速发射过程的二维数值模拟是可行的。

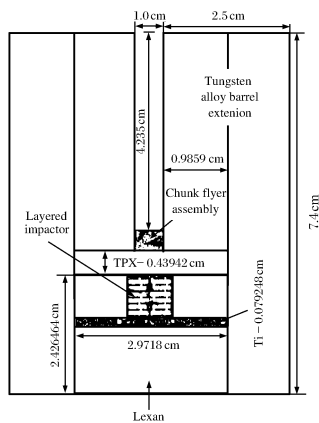


图 5 Sandia 实验室超高速发射实验模型

Fig. 5 Schematic of the Sandia experimental configuration

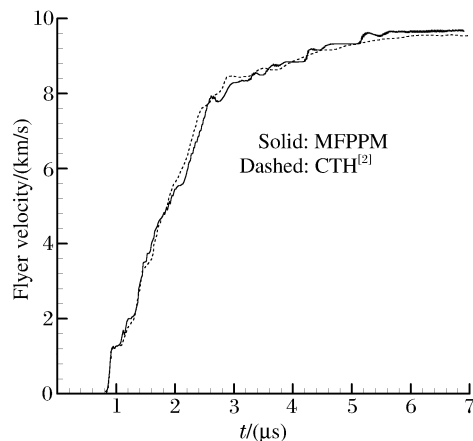
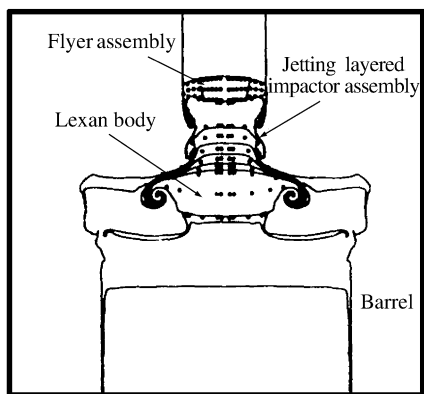
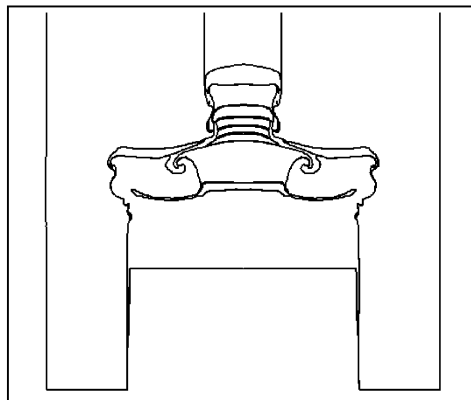


图 6 CTH 和 MFPPM 计算的二级飞片中心处速度历史曲线

Fig. 6 Axial velocity of the flyer-plater from CTH and MFPPM



(a) CTH



(b) MFPPM

图 7 $t = 3.0 \mu\text{s}$ 时 CTH 和 MFPPM 计算的界面位置

Fig. 7 Interfaces configuration from the CTH and MFPPM at $t = 3.0 \mu\text{s}$

5 一个超高速发射设计模型的数值计算

超高速发射设计模型的初始构形如图 8(a)所示,发射管材料为钨,直径 10 mm,一级飞片由钨、铜、Ti6、铝、镁铝合金和 LEXAN6 种材料组成,初始速度为 4.89 km/s,二级飞片材料为 Ti6,缓冲层采用 LEXAN。

应用本文计算程序 MFPPM,给出 $t=2.5\ \mu\text{s}$ 时刻的界面形状如图 8(b)所示,给出二级飞片中心对称轴上四分点、中心点、四分之三点处的速度和压力历史曲线如图 9。从计算结果的速度曲线可以看出,二级飞片的平均速度约为 10.31 km/s,其对称中心上四分点、中心点、四分之三点处速度是逐渐递增的,四分点和四分之三点之间的速度差比较大,最大达到近 1 km/s;从压力曲线可见,四分点、中心点和四分之三点上的压力逐渐递减,最大压力出现在四分点上达到 69.15 GPa;从二级飞片的界面形状可见,前界面中心较边缘有所超前。根据材料超高压状态方程测量对加载飞片的要求,二级飞片在发射管内速度稳定时应基本满足变形小、温升小、冲击小、飞行姿态好(即平面性好)的特点。因此该设计模型还有待改进,主要针对二级飞片汇聚较强造成飞片前界面中心较边缘超前和飞片内速度梯度较大进行改进。这些工作待上述计算结果经实验验证后再进行。

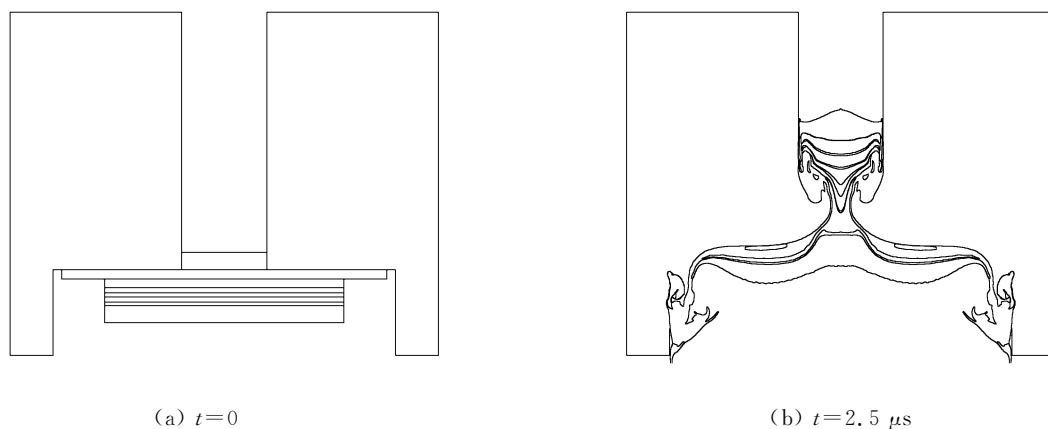


图 8 界面形状

Fig. 8 Configuration of the interfaces

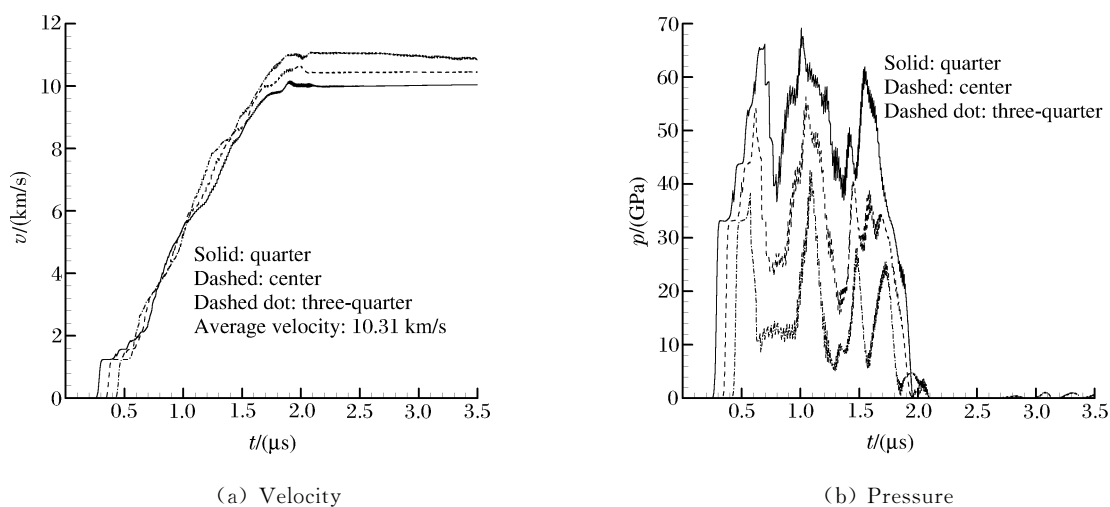


图 9 中心对称轴上四分点、中心点和四分之三点处的速度和压力曲线

Fig. 9 Axial velocity and pressure of the flyer-plater at quarter, center and three-quarter point

6 结 论

推广并研制了以 VOF 为基础的 MFPPM 计算程序,并对程序计算精度进行了数值验证,通过对 Sandia 实验室不带会聚作用实验模型的一维计算和带会聚作用实验模型的二维计算,验证了本文计算程序,并对超高速发射设计模型进行了初步的数值计算,给出了计算结果并提出了相应的改进意见。

References:

- [1] William D R. Equation of State Measurements of Materials Using a Three-State Gun to Impact Velocities of 11 km/s [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 625—637.
- [2] Timothy G T. Computational Design of Hypervelocity Launchers [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17: 849—860.
- [3] McGlaun J M, Thompson S L. CTH: A Three-Dimensional Shock Wave Physica Code [J]. Int J Impact Eng, 1990, 10: 351—360.
- [4] Hua J S, Jing F Q, Gong G Z, et al. Study of Numerical Simulation for Quasi-Isentropic Compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14 (3): 195—202. (in Chinese)
华劲松, 经福谦, 龚自正, 等. 准等熵压缩的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2000, 14 (3): 195—202.
- [5] Ma D J. Study of High Resolution Numerical Methods for Compressible/Incompressible Interface Flows [D]. Hefei: University of science and Technology of China, 2002. (in Chinese)
马东军. 可压缩/不可压缩流体交界面高精度数值方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.
- [6] Colella P, Woodward P. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for Gas Dynamical Simulations [J]. J Comput Phys, 1984, 54: 174—201.
- [7] Bai J S. High Resolution Numerical Methods and Adaptive Mesh Refinement Algorithms for Compressible Multi-Fluid Dynamics [D]. Mianyang: China Academic Engineer Physics, 2003. (in Chinese)
柏劲松. 可压缩多介质流体动力学高精度数值计算方法和网格自适应技术 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2003.
- [8] Chhabildas L C. An Impact Technique to Accelerate Flier Plates to Velocities over 12 km/s [R]. Sandia National Laboratories, DE93 002467.

Numerical Simulation of the Experimental Hypervelocity Launcher

BAI Jing-Song¹, HUA Jing-Song¹, Shen Qiang², DAI Cheng-Da¹

LI Ping¹, TAN Hua¹, ZHANG Lian-Meng²

(1. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research ,
Institute of Fluid Physics , CAEP, Mianyang 621900, China ;

2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing ,
Wuhan University of Technology , Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on multi-fluid VOF and PPM methods, we develop a MFPPM shock wave physics code to simulate the experiment configuration of the hypervelocity launcher and test the resolution of the algorithms in this code. By using the MFPPM, we simulate some experimental hypervelocity launchers from Sandia National Laboratories, and obtain the numerical results with maximal relative error 1% to 1D, 4.7% to 2D problems compared to that experiments and CTH simulations. Also, a designed model of hypervelocity launcher is simulated too, and some results are given in this paper.

Key words: PPM; multi-fluid; hypervelocity launch; high resolution algorithm