

# 冲压加速器弹丸发射系统 非反应流数值模拟

翁春生 金志明 袁亚雄

(南京理工大学动力工程学院 南京 210094)

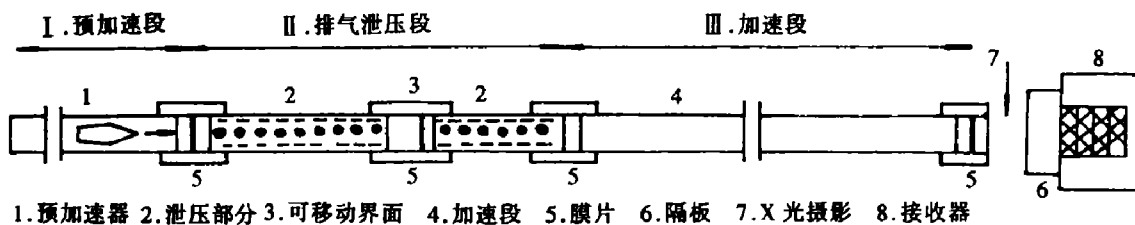
**摘要** 介绍一种新型发射技术——冲压加速器技术。根据冲压加速过程中复杂激波系的流场特点,构造了有限体积的 TVD 格式,用于求解 N-S 方程。计算结果与试验结果相一致,给出详细的流场谱图。为冲压加速器的冷态试验提供有益的指导。

**关键词** 冲压加速器 TVD 格式 N-S 方程 内弹道

**中图分类号** TJ012

## 1 引言

80年代末,美国华盛顿大学的 A. Hertzberg 教授及其同事根据超音速吸气冲压发动机(Supersonic Airbreathing Ramjet)原理,提出了冲压加速器(Ram Accelerator)概念<sup>[1]</sup>。图1为冲压加速装置的一种原理结构,它由预加速段、排气泄压段和加速段三部分组成。他们首次获得45~75g的弹丸通过冲压加速到2.5 km/s的实验结果,并从理论上预测初



I. Pre-accelerator section; II. Gas release section; III. Accelerator section;

1. Pre-accelerator; 2. Venting sections; 3. Mobile interface; 4. Ram accelerator stage;

5. Diaphragms; 6. Membrane; 7. X-rays radiography; 8. Catcher

图1 冲压加速器实验装置

Fig. 1 Ram accelerator test facility

速可达12 km/s<sup>[1~2]</sup>。受到这一诱人前景的鼓舞,很多研究机构加入这一新型发射技术的研究。美国陆军弹道研究所的HIRAM计划中,准备将5~10kg的弹丸在120mm口径,5级冲压加速器上获得3km/s的初速,并已完成单级的实验结果,将4.29kg的弹丸在入口速度为1175~1182m/s加速到1419~1440m/s<sup>[3]</sup>。法国的法-德研究所(French-German

Research Institute) 将 2.5kg 的弹丸通过单级加速, 将入口速度为 1250~1450m/s 加速到 1660m/s 左右, 弹道效率可达 26%<sup>[4]</sup>。美国 Eglin 空军基地与空军科学研究办公室在 90mm 口径冲击加速器上联合进行研究<sup>[5]</sup>。在数值模拟方面, 美国华盛顿大学、计算物理与流体动力学国家实验室、陆军弹道所、海军研究所、Eglin 空军基地以及法-德研究所等单位的科研人员均已编制了非定常轴对称湍流数值模拟的计算机编码<sup>[6~10]</sup>, 计算结果与实验结果的一致性较好。

国内目前正准备从事这方面的实验研究。考虑到射击安全性问题, 在装填预混可燃气体实验之前, 一定要进行装填惰性气体的冷态实验, 摸索冲击加速的基本规律, 为热态实验提供必要的准备。据有关资料报道, 冷态实验仍可能出现异常压力而发生不测事故, 因此我们首先进行数值模拟, 为系统设计、弹丸形状选择以及加速机理研究提供必要的理论指导。

## 2 基本方程

二维或轴对称非反应流的 N-S 方程组, 通过无量纲化后, 可写成守恒形式

$$\frac{\partial y^{\circ} \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial y^{\circ} \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial y^{\circ} \mathbf{G}}{\partial y} = \frac{\partial y^{\circ} \mathbf{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial y^{\circ} \mathbf{G}_v}{\partial y} + \alpha y^{\circ} \mathbf{H} \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho u(e + p/\rho) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho v(e + p/e) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_v = \frac{1}{Re} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + \frac{k}{k-1} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_v = \frac{1}{Re} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + \frac{k}{k-1} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\tau_{\theta\theta}/y^{\circ} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \nabla \cdot \vec{V}, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \nabla \cdot \vec{V}, \quad \tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

$$\tau_{\theta\theta} = 2\mu \frac{v}{y} + \lambda \nabla \cdot \vec{V}, \quad \nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{y^{\circ}} \left( \frac{\partial y^{\circ} u}{\partial x} + \frac{\partial y^{\circ} v}{\partial y} \right).$$

在如图 2 所示的任意四边形网格  $\Omega_{ij}$  中, 积分方程 (1), 并利用 Green 公式, 可得积分形式 N-S 方程

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial t} \iint_{\hat{n}_{ij}} y^{\circ} dA + \int_{\Sigma \Gamma_m} (\mathbf{F} y^{\circ} n_x + \mathbf{G} y^{\circ} n_y) dl = \int_{\Sigma \Gamma_m} (\mathbf{F}_v y^{\circ} n_x + \mathbf{G}_v y^{\circ} n_y) dl + \alpha \mathbf{H} \iint_{\hat{n}_{ij}} y^{\circ} dA \quad (2)$$

状态方程为

$$e = \frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad (3)$$

式中： $\alpha=1$  为轴对称流， $\alpha=0$  为二维流。

数值模拟时将参考坐标系建立在弹丸上，其来流速度由弹丸运动方程确定。

$$\frac{du_\infty}{dt} = \frac{d(-u_p)}{dt} = -\frac{F_p}{M_p} \quad (4)$$

式中： $u_p$ 、 $M_p$ 、 $F_p$  分别为弹丸的运动速度、质量以及表面所受应力的积分。

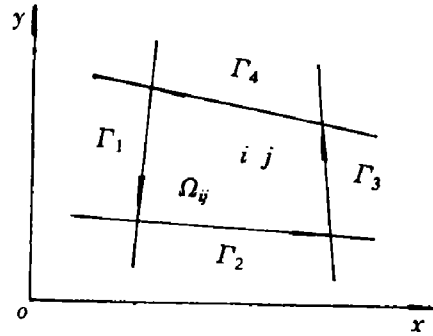


图 2 任意四边形有限体网格

Fig. 2 Finite volume cell geometry for skewed cell

### 3 计算网格

我们采用文献[11]提出的弧长参数生成法，进行贴体网格生成。与其它方法相比，该方法具有以下的特点：(1)采用分块法，具有很强的灵活性和适应性；(2)网格曲线的间距及弯曲程度完全由边界点的分布确定；(3)整个计算域内部的网格曲线足够光滑，具有良好的可微性；(4)网格生成速度极快，比椭圆型偏微分方程生成法要快几十乃至几百倍。冲击加速器内计算网格示意图如图 3 所示，网格数为  $168 \times 50$ 。



图 3 计算网格

Fig. 3 Computational grids

### 4 差分格式及边界条件

#### 4.1 差分格式

冲压加速器的弹丸运动速度极高 ( $M=3 \sim 9$ )，在弹丸与发射管壁之间将产生很强的激波系。为了提高捕获激波的能力，选用合适的差分格式尤为重要。近几年来，TVD 格式被证明是一种有效的差分格式。自从 Harten 1983 年提出构造 TVD 格式的思想以来<sup>[12]</sup>，人们发展了多种类型的 TVD 格式。我们根据计算域网格为任意四边形的特点，参考文献 [13, 14]，构造了有限体积的 TVD 格式，尝试求解冲压加速器复杂激波系。

由基本方程(2)可得

$$U_{ij}^{n+1} = U_{ij}^n - \frac{\Delta t}{s_{ij}} \left[ \sum_{m=1}^4 (\bar{F}n_x + \bar{G}n_y)_{\Gamma_m}^n L_m \right] + \frac{\Delta t}{s_{ij}} \left[ \sum_{m=1}^4 (\bar{F}_v n_x + \bar{G}_v n_y)_{\Gamma_m}^n L_m \right] + \alpha H_{ij}^n \Delta t \quad (5)$$

式中

$$s_{ij} = \iint_{\bar{\Omega}_{ij}} y^e dA, \quad l_m = \int_{\bar{\Gamma}_m} y^e dA, \quad m = 1, 2, 3, 4,$$

$$\text{令: } \quad P(\bar{F}n_x + \bar{G}n_y)_{\bar{\Gamma}_m}^n L_m, \quad Q = (\bar{F}_v n_x + \bar{G}_v n_y)_{\bar{\Gamma}_m}^n L_m,$$

则(5)式可写成为

$$U_{ij}^{n+1} = U_{ij}^n - \frac{\Delta t}{s_{ij}} [(P_{i+1/2,j} - P_{i-1/2,j}) + (P_{i,j+1/2} - P_{i,j-1/2})] + \frac{\Delta t}{s_{ij}} [(Q_{i+1/2,j} - Q_{i-1/2,j}) + (Q_{i,j+1/2} - Q_{i,j-1/2})] + \Delta t(\alpha H_{ij}^n) \quad (6)$$

在(6)式中,对流项  $P$  采用 TVD 格式离散,扩散项  $Q$  及源项则采用中心差分离散。

首先确定  $x$  方向上的对流通量,采用文献[12]中类似的方法有

$$\bar{F}_{i+1/2,j} = \frac{1}{2} \{ [F(U_{i,j}) + (F(U_{i+1,j}))] - [F(U_{i+1,j}) - F(U_{i,j})] \frac{\Delta x_{i+1} - \Delta x_i}{\Delta x_{i+1} + \Delta x_i} - \sum_k \beta_{F_{i+1/2,j}}^k R_{F_{i+1/2,j}}^k \} \quad (7)$$

$$\beta_{F_{i+1/2,j}}^k = Q^k (a_{F_{i+1/2,j}}^k + \gamma_{F_{i+1/2,j}}^k) \cdot a_{F_{i+1/2,j}}^k - (g_{F_{i+1/2,j}}^k + g_{F_{i,j}}^k) \quad (7a)$$

$$\alpha = (a_{F_{i+1/2,j}}^1, a_{F_{i+1/2,j}}^2, a_{F_{i+1/2,j}}^3, a_{F_{i+1/2,j}}^4) \\ = R_{F_{i+1/2,j}}^{-1} \cdot (U_{i+1,j} - U_{i,j}) \quad (7b)$$

$a_{F_{i+1/2,j}}^k$  是 Jacobi 矩阵  $A = \partial F / \partial U$  的特征值,  $R_{F_{i+1/2,j}}$ ,  $R_{F_{i+1/2,j}}^{-1}$  分别为  $A$  的右特征向量所组成的矩阵及其逆。为简化标记,省去下标  $F, j$ , 则

$$a_{i+1/2}^1 = u_{i+1/2} - c_{i+1/2}, \quad a_{i+1/2}^2 = u_{i+1/2}, \quad a_{i+1/2}^3 = u_{i+1/2} + c_{i+1/2}, \quad a_{i+1/2}^4 = u_{i+1/2} \quad (7c)$$

$$R_{i+1/2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ u_{i+1/2} - c_{i+1/2} & u_{i+1/2} & u_{i+1/2} + c_{i+1/2} & 0 \\ v_{i+1/2} & v_{i+1/2} & v_{i+1/2} & 1 \\ H_{i+1/2} - u_{i+1/2}c_{i+1/2} & (u_{i+1/2}^2 + v_{i+1/2}^2)/2 & H_{i+1/2} + u_{i+1/2}c_{i+1/2} & v_{i+1/2} \end{bmatrix} \quad (7d)$$

$$H = \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

$$R_{i+1/2}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(b_1 + \frac{u_{i+1/2}}{c_{i+1/2}}) & \frac{1}{2}(-b_2 u_{i+1/2} - \frac{1}{c_{i+1/2}}) & \frac{1}{2}(-b_2 v_{i+1/2}) & \frac{1}{2}b_2 \\ 1 - b_1 & b_2 u_{i+1/2} & b_2 v_{i+1/2} & -b_1 \\ \frac{1}{2}(b_1 - \frac{u_{i+1/2}}{c_{i+1/2}}) & \frac{1}{2}(-b_2 u_{i+1/2} + \frac{1}{c_{i+1/2}}) & \frac{1}{2}(-b_2 v_{i+1/2}) & \frac{1}{2}b_2 \\ -v_{i+1/2} & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7e)$$

$$b_1 = b_2 \frac{u_{i+1/2}^2 + v_{i+1/2}^2}{2}, \quad b_2 = \frac{k-1}{c_{i+1/2}^2}$$

$$\begin{bmatrix} a_{i+1/2}^1 \\ a_{i+1/2}^2 \\ a_{i+1/2}^3 \\ a_{i+1/2}^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(c_1 - c_2) \\ [\rho]_{i+1/2} - c_1 \\ \frac{1}{2}(c_1 + c_2) \\ [\rho v]_{i+1/2} - v_{i+1/2}[\rho]_{i+1/2} \end{bmatrix} \quad (7f)$$

其中

$$\begin{aligned} c_1 &= (k - 1) \{ [\rho e]_{i+1/2} + \frac{1}{2}(u_{i+1/2}^2 + v_{i+1/2}^2)[\rho]_{i+1/2} - \\ &\quad u_{i+1/2}[\rho u]_{i+1/2} - v_{i+1/2}[\rho v]_{i+1/2} \} / c_{i+1/2}^2, \\ c_2 &= \{ [\rho u]_{i+1/2} - u_{i+1/2}[\rho]_{i+1/2} \} / c_{i+1/2}, \\ [b]_{i+1/2} &= b_{i+1} - b_i. \end{aligned}$$

数值粘性项  $Q$  取为

$$Q(z) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{z^2}{\epsilon} + \epsilon \right) & |z| < \epsilon \\ z & |z| \geq \epsilon \end{cases} \quad (7g)$$

$\epsilon$  为常数。

$$g_i^t = (1 + \omega^t Q_i^t) \bar{g}_i^t + \quad (7h)$$

$$\bar{g}_i^t = s \cdot \max[0, \min(\sigma_{i+1/2}^t |a_{i+1/2}^t|, s \cdot \sigma_{i-1/2}^t a_{i-1/2}^t)]$$

$$\sigma_{i+1/2}^t = \sigma(a_{i+1/2}^t), \quad \sigma(z) = Q(z)/2, \quad s = \text{sign}(a_{i+1/2}^t)$$

$$\gamma_{i+1/2}^t = \begin{cases} (\bar{g}_{i+1}^t - \bar{g}_i^t) / a_{i+1/2}^t & a_{i+1/2}^t \neq 0 \\ 0 & a_{i+1/2}^t = 0 \end{cases} \quad (7i)$$

计算中定义在网格边界处的物理量用 Roe 平均：

$$\begin{cases} u_{i+1/2} = \frac{\rho_i^{1/2} u_i + \rho_{i+1}^{1/2} u_{i+1}}{\rho_i^{1/2} + \rho_{i+1}^{1/2}} \\ v_{i+1/2} = \frac{\rho_i^{1/2} v_i + \rho_{i+1}^{1/2} v_{i+1}}{\rho_i^{1/2} + \rho_{i+1}^{1/2}} \\ H_{i+1/2} = \frac{\rho_i^{1/2} H_i + \rho_{i+1}^{1/2} H_{i+1}}{\rho_i^{1/2} + \rho_{i+1}^{1/2}} \\ c_{i+1/2}^2 = (k - 1) [H_{i+1/2} - \frac{1}{2}(u_{i+1/2}^2 + v_{i+1/2}^2)] \end{cases}$$

至此就可确定出通量  $\bar{F}_{i+1/2,j}$ 。

同理可确定出通量  $\bar{G}_{i+1/2,j}, \bar{F}_{i,j+1/2}, \bar{G}_{i,j+1/2}$ 。对流项的有限体积 TVD 格式已构造完毕。

### 4.2 边界条件

由于参考坐标系建立在弹丸上，这样弹丸壁面为无滑移边界，发射管壁为自由流速度的边界，中心轴线采用对称边界条件，入口边界为来流条件，出口边界则采用外推法。

## 5 结果分析

以美国华盛顿大学 38mm 口径的冲压加速器作为算例<sup>[2]</sup>，其中冲压管内初始装填压

力为  $25.33 \times 10^5 \text{Pa}$  (25atm), 装填气体为  $\text{N}_2$ , 弹丸入口速度为  $1102 \text{m/s}$ 。

图 4 中为趋于“定常”时管壁压力的计算值与文献[2]实验结果比较, 由图中看出, 计算结果与实验结果一致性很好。

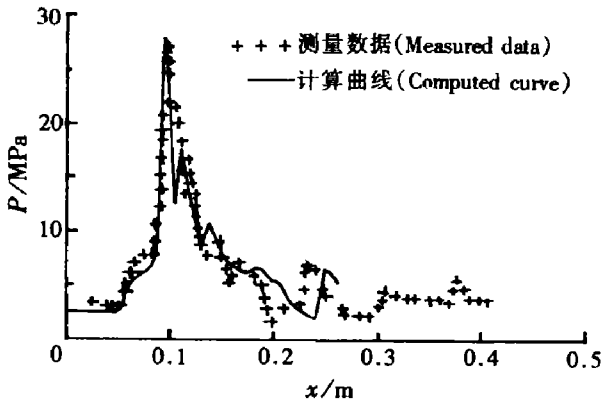


图 4 管壁压力的计算与实验比较  
Fig. 4 Comparison of computed and measured tube wall pressures

图 5 (a) ~ (d) 分别为  $t = 0.679, 1.375, 2.263, 6.275$  (无量纲) 时的压力等值线图。从图中可看出相互作用的多道斜激波系的发展过程, 在  $t \geq 2.263$  之后, 几乎趋于稳定状态。从图 5 (b)、(c) 可知, 一道斜激波附在弹丸的头部, 并从壁面上反射回弹体上, 然后又从弹体上反射到管壁面上, 之后在喉部下游区域的弹丸与管壁之间多次反射。从图 5 (c)、(d) 看出, 在尾流区, 也存在多道斜激波的反射, 并逐渐衰减退化。

图 6 为  $t = 2.263$  时密度等值线图。在弹丸所在区域, 其流谱与压力的

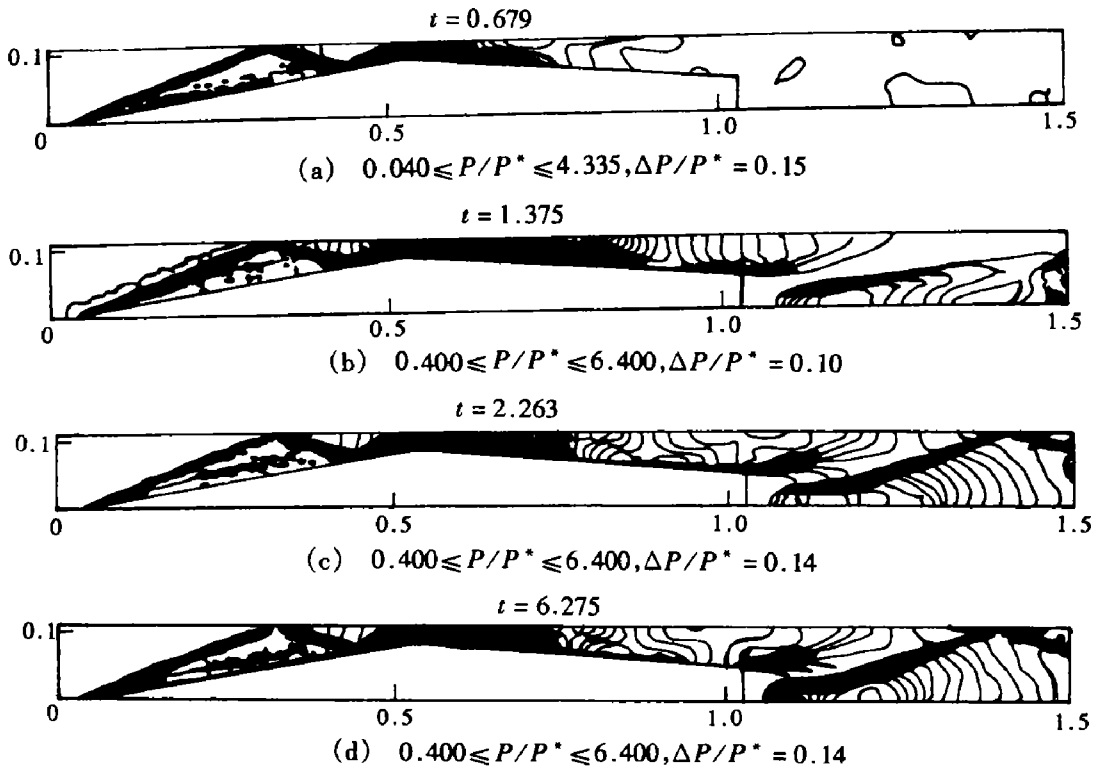


图 5 计算压力等值线图  
Fig. 5 Computed pressure contours

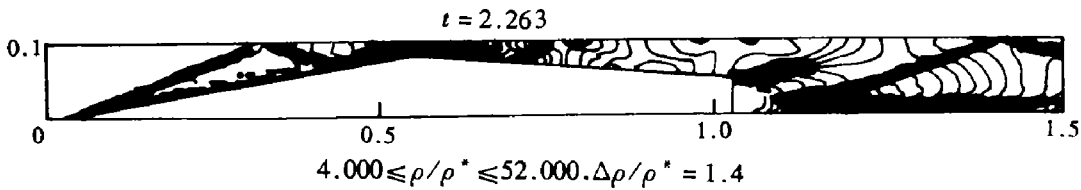


图 6 计算密度等值线图

Fig. 6 Computed density contours

流谱类似,但在尾流区靠近中心线上有一密度间断。

## 6 结 论

(1) 冲压发射技术是本世纪 80 年代末新发展起来的一种超高音速射弹技术,它一问世即引起世界各国的关注。其弹道效率可达 30%,弹丸质量可以从几 g 到几 t 范围内变化,发射时不产生后坐。该技术是对常规发射技术的突破,在 高能碰撞、远程防御、将运载器直接发射进入空间以及超高音速航空航天弹道方面都具有实际应用前景,是一种很有发展前景的新型发射技术。

(2) 本文构造的有限体积 TVD 格式,可有效地求解含有复杂波系的流场。部分计算结果与试验结果的一致性很好,还给出冲压加速过程中激波系产生与发展的详细过程。为冲压加速器的冷态试验提供有益的指导。

## 参 考 文 献

- 1 Hertzberg A, et al. A Exploratory Study of Ram Accelerator Principles. AD-A202185, 1988
- 2 Bruckner A P, et al. Investigation of Superdetonation Ram Accelerator Drive Modes. AD-A216505, 1990
- 3 Kruczynski D L. Experiments in a 120-mm Ram Accelerator. Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, 1993, 173~184
- 4 Girand M, et al. Ram Accelerator in 90 mm Calibre on Ramac 90 Experimental Results Concerning the Transdetonative Combustion Mode. Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, 1993, 95~100.
- 5 Randall P D, et al. Progress Towards the Development of Transient Ram Accelerator Simulation as Part of the USAF Armament Directorate Research Program. AD-A259769, 1993
- 6 Hinkey J B, et al. Investigation of Ram Accelerator Flow Fields Induced by Canted Projectiles. AIAA-93-2186
- 7 Kruczynski D L, et al. Experimental and Computational Investigation of Scaling Phenomena in a Large Calibre Ram Accelerator AIAA-92-3245
- 8 Soetrison M, et al. Numerical simulations of the Trans-detonative Ram Accelerator Combusting Flow Field on a Parallel Computer. AIAA-92-3249
- 9 Soetrison M, et al. Numerical Simulations of the Superdetonative Ram Accelerator Combusting Flow Field. AIAA-93-2185
- 10 Yungster S, et al. Navier-Stokes Simulation of the Supersonic Combustion Flowfield in a Ram Accelerator. AIAA-91-1916.
- 11 石周和,张惠民. 二维任意区域贴体曲线坐标的弧长参数生成法. 航空动力学报, 1991, 6(1): 67~69
- 12 Ami Hartern. High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws. J Comput phys, 1983,

49: 357~393

- 13 Wang J C T, et al. A High-Resolution TVD Finite Volume Scheme For Euler Equations in Conservation Form. *J Comput Phys*, 1989, 84:145~173
- 14 Wang J C T, et al. Numerical Simulation of Blast Flowfields Using a high Resolution TVD Finite Volume Scheme. *Computers and Fluids*, 1990, 18(1): 103~137.

## NUMERICAL SIMULATION OF NON-REACTING FLOWFIELDS FOR A RAM ACCELERATOR PROJECTILE LAUNCH SYSTEM

Weng Chunsheng, Jin Zhiming, Yuan Yaxiong  
(*College of Power Engineering, Nanjing University  
of Science and Technology, Nanjing, 210094*)

**ABSTRACT** A new type of projectile launch technology —ram accelerator is introduced in this paper. Based on the interacting complex shock flowfields of the ram accelerator, a high resolution TVD finite volume scheme has been constructed for solution of the N-S equations. Some computed results are in good accord with experimental results. Computed flowfields are given in detail. This paper gives the theoretical guide to design the non-reacting flowfield test.

**KEY WORDS** ram accelerator, TVD scheme, N-S equation, interior ballistics