

一维 CE/SE 方法在气液两相爆轰计算中的应用

马丹花¹, 翁春生²

(1 南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

2 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

[摘要] 应用 CE/SE 方法对气液两相爆轰进行数值求解, 研究了爆轰波在管内的传播过程. 对刚性源相, 采用四阶龙格库塔法对其求解. 分析了液滴半径大小对爆轰波峰值压力的影响, 液滴半径增大, 爆轰压力减小, 形成稳定爆轰波的距离增加; 且液滴半径过大不能形成稳定的爆轰波.

[关键词] 脉冲爆轰发动机, CE/SE 方法, 两相爆轰, 数值计算

[中图分类号] TJ011⁺. 1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)03-0025-05

Application of One-Dimension CE/SE Method to Simulate Gas-Droplets Two Phase Detonation

Ma Danhua¹, Weng Chunsheng²

(1. School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

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

Abstract Gas-Droplets Two Phase Detonation is numerically solved with CE/SE method. The source items are calculated by the fourth-order Runge-Kutta method. The effects of different size of the droplets on the detonation pressure are studied. The larger the size of droplets, the smaller detonation pressure, the longer distance to get the fully developed detonation. If the size of droplet radius is too large, the stable detonation cannot be formed.

Key words pulse detonation engine, CE/SE method, two-phase detonation, numerical simulation

脉冲爆轰发动机 (Pulse Detonation Engine, PDE) 是一种利用脉冲式爆轰波产生推力的新概念发动机. PDE 具有热循环效率高、结构简单等特点, 具有广阔的应用前景. 目前 PDE 研究中对气体燃料的研究比较多, 而在很多实际情况下要求 PDE 用液体燃料. 气液两相爆轰的理论研究比纯气相爆轰要复杂, 气液两相需考虑两相之间的作用力和热交换等问题. 液滴在激波后高速气流的作用下加速、变形, 被剥离形成小的液滴, 蒸发成燃料蒸汽, 由于两相间对流传热, 液滴升温与氧气发生化学反应释放能量, 用来支持爆轰波阵面的激波运动, 形成自持的爆轰波.

Brophy CM^[1-2] 等人研究了液体燃料 JP-10 氧气和 JP-10 空气混合物的爆轰特性, Cheathan 和 Kailas-anath^[3-4] 利用欧拉拉格朗日方法对 JP-10 燃料和氧气作为燃料氧化剂的单次爆轰燃烧进行了数值计算. 张海波等人^[5-6] 用 TVD 格式模拟气相, 用 MacComack 格式模拟液相, 对轴对称气液两相爆轰进行了数值模拟, 对 TVD 格式作了改进, 并提出垂直扰动法处理连续边界. 洪滔^[7] 用两相流体力学模型对气液两相系统进行研究, 采用 TVD、MacComack 格式对液体燃料和空气、液体燃料和氧气两种情况进行了数值模拟.

应用守恒元和求解元 (the Method of Conservation Element and Solution Element, CE/SE 方法) 方法模拟气相爆轰^[8-10] 比较多, 而用 CE/SE 方法数值模拟气液两相爆轰现象的, 尚未见相关文献. 本文用 CE/SE 方法数值模拟以液态庚烷为燃料、以氧气为氧化剂的气液两相爆轰波特性, 研究不同尺寸的液滴半径对爆轰波压力产生的影响. CE/SE 方法与传统的 CFD 方法相比有一些特殊的优点: (1) 将空间量与时间量统一

收稿日期: 2007-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (10672080) 资助项目.

通讯联系人: 翁春生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 兵器发射与推进技术. E-mail: weng@njnu.edu.cn

处理; (2)精度高,时空都为两阶精度; (3)无需黎曼分解; (4)是真正的多维格式,在计算空间通量时无需方向分裂.

1 理论模型

由于 PDE 内气液两相的爆轰过程异常复杂,为简化问题,做如下假设: (1)气液两相爆轰过程为一维非定常; (2)单个液滴的温度处处相同; (3)忽略液滴间的相互作用; (4)激波过后液滴不破碎并保持球形,在激波的气流作用下仅发生剥离; (5)液滴剥离后成为气体,与气体瞬间均匀混合.

根据上述假设,得到以下形式的控制方程组

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = H,$$
$$U = \begin{bmatrix} \phi_1 \rho_1 \\ \phi_1 \rho_1 u_1 \\ \phi_1 \rho_1 E_1 \\ \phi_2 \rho_2 \\ \phi_2 \rho_2 u_2 \\ \phi_2 \rho_2 E_2 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \phi_1 \rho_1 u_1 \\ \phi_1 (\rho_1 u_1^2 + p) \\ \phi_1 \rho_1 u_1 (E_1 + p / \rho_1) \\ \phi_2 \rho_2 u_2 \\ \phi_2 (\rho_2 u_2^2 + p) \\ \phi_2 \rho_2 u_2 (E_2 + p / \rho_2) \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} I_d \\ I_d u_2 - F_d \\ -Q_d + Q_c - F_d u_2 + I_d (E_2 + p / \rho_2) \\ -I_d \\ F_d - I_d u_2 \\ Q_d + F_d u_2 - I_d (E_2 + p / \rho_2) \end{bmatrix}.$$

式中,下标 1、2 分别表示气相和液相; ϕ_1, ϕ_2 表示气相和液相的体积分数比,满足 $\phi_1 + \phi_2 = 1$; ρ, u, p 分别表示密度、速度和压力; e_1, e_2 是内能.

$$E_1 = e_1 + \frac{1}{2} u_1^2, \quad E_2 = e_2 + \frac{1}{2} u_2^2.$$

I_d 是由于液滴剥离引起的单位体积液滴的质量变化率,剥离的液滴蒸发成气体,表达式如下^[11]:

$$I_d = -n \rho_2 4 \pi R^2 \frac{dR}{dt},$$

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{1}{2} \sqrt{3 \pi} \left(\frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2} \right)^{1/6} \left(\frac{\mu_2}{\rho_2} \right)^{1/2} |u_1 - u_2|^{1/2} R^{-1/2} - \frac{3 N u (T_1 - T_2)}{\pi R \rho_2 L},$$

式中, R 为液滴的半径; μ 为动力粘性系数; λ 为气体的热传导系数; N 为单位体积中液滴的颗粒数; L 为燃料液滴的蒸发热; 液相温度由 $e_2 = C_v T_2$ 求得, C_v 是液相的比容; Nu 为 Nusselt 数.

单位体积中气体对液滴的作用力为^[7]:

$$F_d = N f_d,$$

$$f_d = \frac{1}{2} \pi R^2 C_D \rho \left| u_1 - u_2 \right| (u_1 - u_2).$$

式中, C_D 为阻力系数, $C_D = \begin{cases} 27 Re^{-0.84}, & Re < 80 \\ 0.27 Re^{0.21}, & 80 \leq Re < 10^4 \\ 2, & Re \geq 10^4. \end{cases}$ Re 为雷诺数, $Re = \frac{2 \rho \left| u_1 - u_2 \right| R}{\mu_1}.$

Q_d 为两相对流热传导^[7]:

$$Q_d = 4 \pi R^2 N q_d,$$

$$q_d = Nu (T_1 - T_2) / 2 R.$$

Q_c 为化学反应热^[7]:

$$Q_c = I_d q_f,$$

k 为绝热系数, q_f 为液相的燃烧热.

2 计算方法

2.1 一维 CE/SE 方法

CE/SE 方法是由美国 NASA 科学家 Chang Singcung^[8] 在 1995 年提出的,是近年来在计算流体力学领域中出现的捕获激波等强间断能力强的一种高精度计算格式,它是基于空间通量与时间通量的守恒性原

理推导出来的. 在 CE/SE方法中, 求解元与守恒元的定义是很重要的. 图 1 是 CE/SE 方法中网格点的分布图, Δt Δx 分别是时间步长和空间步长. 图 2 是求解元和守恒元的定义的示意图. 在每个求解元中, 流场的变量是连续的, 可用泰勒级数展开, 穿过相邻求解元的边界, 流场的变量可以是不连续的. 对于每个网格点对应的守恒元上, 空间时间密度矢量的积分通量是守恒的.

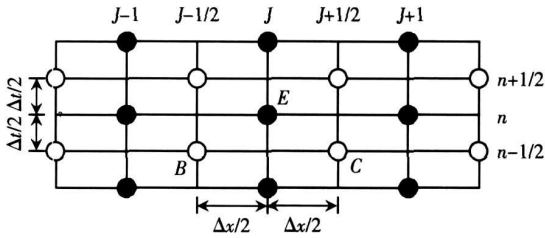


图 1 CE/SE 方法的网格点分布

Fig.1 CE/SE mesh point distributing

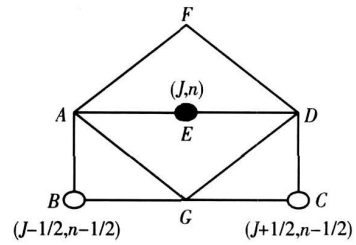


图 2 求解元和守恒元的定义

Fig.2 The definition of CEs and SEs

通过求解守恒元 CE (E) 边界的空间时间密度矢量的积分通量, 可得到 CE/SE 的计算格式:

$$(U)_j^n = \frac{1}{2} \left[(U)_{j-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + (U)_{j+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + (S)_{j-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - (S)_{j+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \right] + \frac{\Delta t}{2} H_j^n, \quad (8)$$

$$(S)_j^n = \frac{\Delta x}{4} (U_x)_j^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q)_j^n + \frac{\Delta t^2}{4\Delta x} (Q_t)_j^n, \quad (9)$$

式 (8)、(9) 中未知量为 U_x 、 Q 。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (10)$$

$$\text{其中, } \frac{\partial Q}{\partial U} = A, \frac{\partial U}{\partial t} = H - \frac{\partial Q}{\partial x}, \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial x} = A \frac{\partial U}{\partial x}.$$

$$\text{故此, } \frac{\partial Q}{\partial t} = A \left[H - A \frac{\partial U}{\partial x} \right].$$

可见, Q 是 U_x 的函数, 因此只需给出 $(U_x)_j^n$ 的算法即可. $(U_x)_j^n$ 用中心差分格式离散:

$$(U_x)_j^n = \frac{1}{2} [(U_x^+)_{j-1/2}^n + (U_x^-)_{j+1/2}^n], \quad (11)$$

$$\text{其中, } (U_x^\pm)_j^n = \pm [(U')_{j\pm 1/2}^n + (U)_j^n] / (\Delta x / 2), (U')_{j\pm 1/2}^n = (U)_{j\pm 1/2}^{n-1/2} + (\Delta t / 2) (U_t)_{j\pm 1/2}^{n-1/2}.$$

对于存在间断的流场, 比如激波、爆轰波等, 方程 (11) 应修正为

$$(U_x)_j^n = W((U_x^-)_j^n, ((U_x^+)_{j-1/2}^n, \alpha)), \quad (12)$$

式中, 加权函数 W 定义为:

$$W(x_-, x_+, \alpha) = \frac{|x_+|^\alpha x_- + |x_-|^\alpha x_+}{|x_+|^\alpha + |x_-|^\alpha}. \quad (13)$$

此处, α 是一个可调整的常数, 通常取 $\alpha = 1$ 或 $\alpha = 2$ 上述的加权函数是关于 $(U_x)_j^n$ 一个简单的限制器, 可有效抑制激波的数值振荡.

2.2 源项处理

由于液滴剥离引起的化学反应的特征时间比对流项的特征时间小得多, 因此方程中的源项是刚性的, 可能导致求解 U 时不收敛. 为此本文用四阶龙格库塔方法对源项求解, 其中时间步长取为 $\Delta t_{r-k} = \frac{\Delta t}{N}$, N 通常取 5 ~ 20 Δt 是 CE/SE 方法计算的时间步长. 具体步骤为: 在 CE/SE 格式下求得 $(U)_j^n$, 然后以 $(U)_j^n$ 为初值, 求常微分方程组 $\frac{dU}{dt} = H$, 最后得出 $(U)_j^n$.

3 计算结果及分析

初始条件: 燃烧混合物为氧气和庚烷, 液滴初始半径 $R = 10^{-4}$ m; 气相初始温度 $T_1 = 298$ K, 液相初始温度 $T_2 = 298$ K. PDE 一端为固壁边界, 一端为开口边界.

图 3 为液滴半径为 1×10^{-4} m 时不同时刻压力随轴线的变化曲线图. 图中的 9 条曲线对应的时刻分别为 0.047 6 0.093 4 0.138 4 0.254 6 0.293 6 0.330 4 0.403 3 0.439 5 0.475 6 ms 图中每个时刻曲线都存在明显的间断, 说明爆轰波在管内产生并沿轴向传播. 前 3 个时刻压力曲线的峰值由 2.2 MPa 迅速增大到 3.8 MPa, 表示随着高温、高压点火起爆过程的开始, 爆轰逐渐增强的过程; 曲线 4 5 6 的压力峰值增长非常缓慢. 到 0.403 3 ms 时刻后, 峰值压力为 5.4 MPa 并基本保持不变, 此爆轰波速度为 2077 m/s 表示在爆轰管内形成了稳定发展的爆轰波. 从图 3 也可以看到, 波阵面图形陡峭, 激波宽度约为 2 个网格点, 说明了该 CE/SE 方法数值模拟气液两相爆轰波有很高的分辨率, 捕捉激波能力强.

图 4 是推力壁压力随时间的变化图. 初始时刻起爆后, 从固壁发出的膨胀波向开口端传去, 将爆轰波后区域的压力降低到 1.15 MPa 左右, 这个压力通常称为平台压力. 当爆轰波传出爆轰管出口时, 由于该处的压力远大于环境压力, 因此产生一个膨胀波反向传 PDE 管内, 进一步降低管内压力. 当它到达固壁时反射为另一个膨胀波向开口端传去. 由开口端和封闭端交替产生的膨胀波和压缩波多次反复作用后, 使得最后管内的压力降至环境压力. 爆轰波传出管外的时间为 0.475 6 ms, 反射的第一道膨胀波到达固壁的时间为 0.924 4 ms

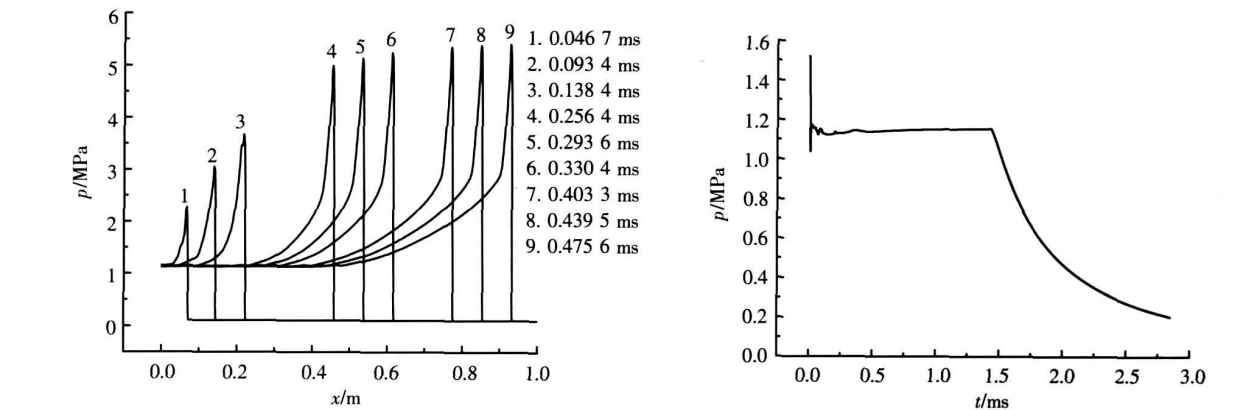


图 3 液滴半径为 1×10^{-4} m 时压力随轴线的变化曲线图
Fig.3 Pressure distribution along the x-axis when the liquid radius is 1×10^{-4} meter

图 4 推力壁压力随时间的变化图
Fig.4 Pressure of thrust wall distribution vs different time

图 5~7 是不同液滴半径情况下压力随轴线的变化曲线图. 比较曲线图可得: 随着液滴半径增大, 爆轰峰值压力减小, 获得稳定爆轰波的距离增加. 图 5 中爆轰波在离固壁 0.25 m 左右就得到了稳定发展的爆轰波, 而图 6 中即使爆轰波传到 PDE 管出口, 还未得到充分发展的爆轰波. 而当液滴半径为 4×10^{-4} m 时不能产生稳定的爆轰波. 当液滴半径增大, 会使液滴蒸发率、剥离速度减小, 释放出的能量也随之减少; 且单位体积中燃料液滴数目减少后与氧气的接触面积变少, 两者的化学反应程度减弱, 当爆轰波传播过程中

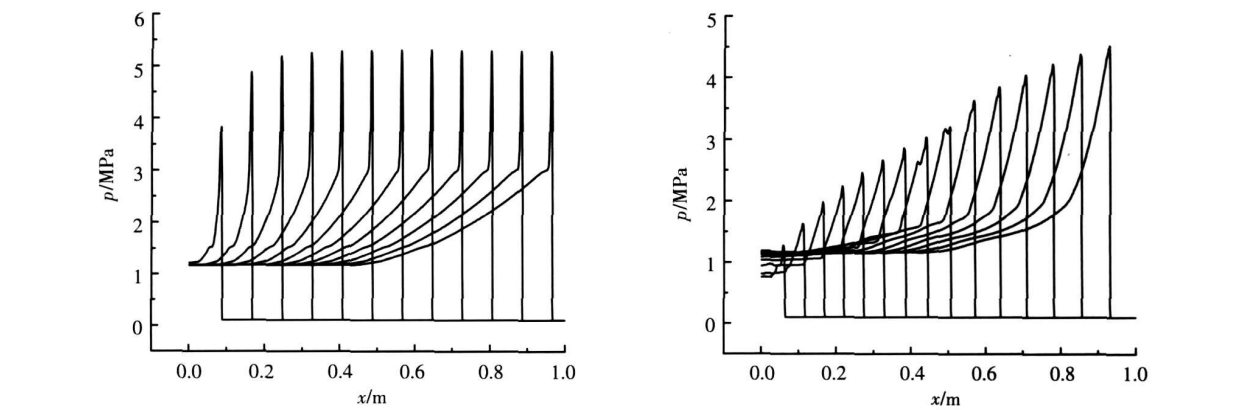


图 5 液滴半径为 5×10^{-5} m 时压力随轴线的变化图
Fig.5 Pressure distribution along the x-axis when the liquid radius is 5×10^{-5} meter

图 6 液滴半径为 2×10^{-4} m 时压力随轴线的变化图
Fig.6 Pressure distribution along the x-axis when the liquid radius is 2×10^{-4} meter

加入到爆轰波的能量减少, 所以爆轰波压力会随着半径的增大而减小.

4 结论

本文所建立的气液两相模型能够描述 PDE 一维两相爆轰的过程. 且 CE/SE 方法精度高, 捕捉激波能力强, 一般只需 2~3 个网格. 计算结果表明: 液滴半径越大, 爆轰波压力随之减小, 获得稳定爆轰波所需的距离也增加; 当液滴半径过大时不会产生稳定的爆轰波.

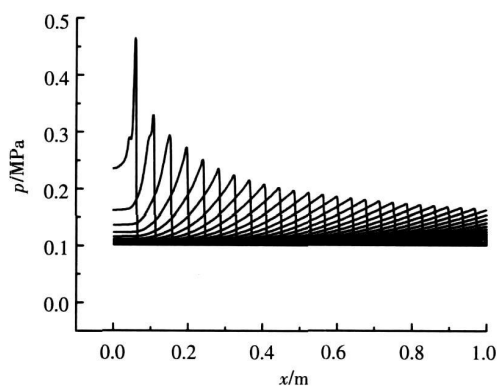


图 7 液滴半径为 4×10^{-4} m 时压力随轴线的变化图

Fig.7 Pressure distribution along the x -axis when the liquid radius is 4×10^{-4} meter

[参考文献] (References)

- [1] Brophy CM, Netzer DW. Effect of ignition characteristics and geometry on the performance of a JP-10/ O_2 fueled pulse detonation engine; AIAA99-2635[R]. Monterey: U. S. Naval Postgraduate School; 1999.
- [2] Brophy CM, Sinbaklij Netzer DW, et al Operation of a JP-10/air pulse detonation engine; AIAA2000-3591[R]. Monterey: U. S. Naval Postgraduate School; 2000.
- [3] Cheatham S, Kailasanath K. Numerical simulations of multiphase detonations in tubes; AIAA2003-1315[R]. Washington D C: U. S. Naval Research Laboratory; 2003.
- [4] Cheatham S, Kailasanath K. Multiphase detonations in pulse detonation engines; AIAA2004-306[R]. Washington D C: Naval Research Laboratory; 2004.
- [5] 张海波, 白春华, 丁徽. 气液两相爆轰的数值模拟[J]. 兵工学报, 2000, 21(2): 1119-1125.
Zhang H abo, Bai Chunhua, Ding Jing. Numerical simulation for two-phase gas-droplet detonation[J]. Acta Armamentarij, 2000, 21(2): 1119-1125. (in Chinese)
- [6] 张海波, 白春华, 丁徽, 等. 气液爆轰的数值模拟与连续边界垂直扰动法[J]. 火炸药学报, 1999(4): 9-13.
Zhang H abo, Bai Chunhua, Ding Jing, et al. Numerical simulation for gas-droplet detonation and a new method for continuous-boundary[J]. Chinese Journal of Explosive and Propellant; 1999(4): 9-13. (in Chinese)
- [7] 洪滔, 秦承森. 气体-燃料液滴两相系统爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 335-342.
Hong Tao, Qin Chengsen. Numerical modeling of detonation in gas-fuel droplets system[J]. Explosion and Shock Waves; 1999, 19(4): 335-342. (in Chinese)
- [8] Zhang Zengchan, Yu Shengtao. Shock capturing without riemann solver-A modified space-time for conservation laws; AIAA99-0904[R]. Michigan: Wayne State University; 1999.
- [9] Park Sung jae, Yu Shengtao, Lai Mingchun, et al. Numerical calculation of unstable detonations by the method of space-time conservation element and solution element; AIAA99-0491[R]. Michigan: Wayne State University; 1999.
- [10] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines; AIAA2002-0470[R]. Washington D C: U. S. Naval Postgraduate Laboratory; 2002.
- [11] 翁春生, 王浩. 计算内弹道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 85-90.
Weng Chunsheng, Wang Hao. Computational Interior Ballistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press; 2006: 85-90. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]