

非线性局部熵黏性算法及其在复杂多相流动中的自适应界面捕捉研究

管佳佳^{1,2} 崔策¹ 殷翔¹ 卓娅² 曹锋¹

(1 西安交通大学压缩机工程系 压缩机与制冷实验室 西安 710049; 2 华商国际工程有限公司 北京 100071)

摘要 针对可压缩多相流中激波、接触间断与相界面共存场景下数值计算稳定性与精度难以兼顾的问题,提出一种非线性局部熵黏性相界面自适应捕捉算法。该算法通过构建融入相界面物理特性的广义熵函数,并结合多通道间断感知机制,实现了对激波、接触间断及相界面的统一识别与分类处理。算法进一步引入非线性局部熵黏性自适应分配策略,配合定向界面压缩、能量相容的表面张力-相变耦合模型以及动态自适应调参技术,在维持计算稳健性的同时显著提升界面分辨能力。以跨临界CO₂引射器内部流动为代表算例,开展了包含相变、激波/相界面相互作用和非平衡热力学过程的数值模拟。结果表明,本算法能清晰捕捉多尺度流动结构,界面厚度维持在2~3个网格内,质量与能量守恒误差低于1%,在强梯度、多物理耦合的复杂多相流场中表现出优越的精度与可靠性,为工程实际中的多相流模拟提供了具有普适性的高分辨率数值工具。

关键词 可压缩多相流;计算流体力学;相界面捕捉;熵黏性;引射器

中图分类号: TH45; O359; TK121

文献标识码: A

A Nonlinear Local Entropy Viscosity Method and Its Adaptive Interface-Capturing Application in Complex Multiphase Flows

Guan Jiajia^{1,2} Cui Ce¹ Yin Xiang¹ Zhuo Ya² Cao Feng¹

(1. Compressor Engineering Department, Compressor and Refrigeration Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100071, China)

Abstract Accurately balancing numerical stability and resolution remains a major challenge in compressible multiphase flows where shocks, contact discontinuities, and phase interfaces coexist. To address this issue, a nonlinear local entropy-viscosity-based adaptive interface-capturing algorithm is proposed. By constructing a generalized entropy function that incorporates the physical characteristics of phase interfaces and coupling it with a multi-channel discontinuity sensing mechanism, the proposed method achieves unified identification and classification of shocks, contact discontinuities, and phase interfaces. Furthermore, a nonlinear adaptive allocation strategy of local entropy viscosity is introduced, in conjunction with directional interface compression, an energy-consistent surface tension-phase change coupling model, and a dynamic adaptive parameter adjustment technique. This framework significantly enhances interface resolution while maintaining numerical robustness. A transcritical CO₂ ejector flow is selected as a representative test case, in which numerical simulations involving phase change, shock/interface interactions, and nonequilibrium thermodynamic processes are performed. The results demonstrate that the proposed algorithm can clearly capture multiscale flow structures, with the interface thickness consistently maintained within 2-3 grid cells. The mass and energy conservation errors are both below 1%, indicating superior accuracy and reliability in complex multiphase flow fields characterized by strong gradients and multi-physics coupling. The proposed method therefore provides a generally applicable high-resolution numerical tool for multiphase flow simulations in practical engineering applications.

Keywords compressible multiphase flow; computational fluid dynamics; interface capturing; entropy viscosity; ejector

在能源动力、航空航天、化工过程及低温流体系统等诸多工程与科学领域中,多相流动广泛存在并伴随相变、激波、界面失稳等复杂物理过程。这些流

动一般同时包含激波、接触间断以及相界面等多种强间断结构,且各间断之间相互耦合、演化机理复杂。高精度捕捉此类流动中的相界面,并同时保持

激波等压缩间断的稳定分辨,一直是计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)面临的核心挑战之一。传统界面捕捉方法,如体积分法(volume of fluid, VOF)、水平集法(level set)和相场法,在处理单一界面演化方面已较为成熟,但在面对激波-界面相互作用、跨临界相变及高密度比等多尺度、强非线性问题时,常面临界面过度耗散、虚假流动、质量不守恒或热力学描述失真等局限。因此,发展一种能够统一处理多种间断类型、且具备热力学自适应耗散机制的高鲁棒性数值方法,具有重要的理论意义与工程应用价值。

近年来,随着多相流数值模拟研究的深入,一系列新型界面捕捉与相变建模方法相继涌现,在提升界面分辨率、耦合多物理过程等方面取得了显著进展。在基于动理学框架的界面捕捉方面,Wang Kai等^[1]采用基于Allen-Cahn方程的相场格子 Boltzmann方法,并耦合二叉树自适应网格细化技术,成功模拟了液-气相变过程,验证了其在保证界面精度同时节约计算资源的优势。类似地,Xia Yanchen等^[2]引入了全线索树自适应网格,发展了三维相场-格子 Boltzmann方法,显著提高了气液相变模拟的计算效率与精度。Xia Yanchen等^[3]进一步将离散统一气体动理学格式拓展至气液相变问题,结合保守 Allen-Cahn相场模型,实现了界面演化、流动与温度场的一体化求解,展现了动理学方法在描述非平衡相变过程中的潜力。

在可压缩多相流的高分辨率格式发展方面,一系列工作致力于降低数值耗散、锐化界面捕捉。T. Paula等^[4]对离散元方程法进行了鲁棒性扩展,通过改进黎曼解的分区与通量组合,避免了高精度界面重构带来的时间步长限制,在激波-界面相互作用问题上表现出色。Yang Xiaobin等^[5]发展了一种结合界面压缩与锐化技术的扩散界面方法,并集成 WENO-THINC-BVD (weighted essentially non oscillatory-tangent of hyperbola for interface capturing-boundary variation diminishing) 重构格式与自适应网格加密,精确模拟了两气泡溃灭诱导的射流与冲击波。Yang Xiaobin等^[6]进一步应用该方法研究了气泡簇溃灭的冲击波特性和,揭示了气泡空间分布对压力载荷的关键影响。H. Wakimura等^[7]则提出了一种基于边界变分递减原理的低耗散方法,在非结构网格上结合 MUSCL (monotone upstream-centered schemes for conservation laws) 格式与 THINC 界面捕捉函数,有效抑制了接触间断与相界面处的数值耗散,清晰分辨了由相变动态生成的气液界面。

针对包含相变的特定复杂流动,众多研究提出了针对性的建模与模拟策略。对于高温条件下的多相流,T. D. Stoffell等^[8]应用扩散界面多相方法模拟了高温高超声速流动中的相变,揭示了液态铝液滴与激波相互作用中相弛豫对压力扰动与空化潜能的影响。Song Jiaxi等^[9]采用一种锐界面方法,数值研究了带相变的蒸气-液体界面 Richtmyer-Meshkov 不稳定性,发现蒸发抑制而冷凝促进界面失稳发展,并观察到因声阻抗差导致的独特双峰结构。在低温流体界面捕捉方面,Xiao Mingkun等^[10]通过实施均匀分布的表面力模型并耦合 Schrage 相变模型,显著减少了液氢等低温流体中非等温界面附近的虚假速度与等温线畸变。在电子器件冷却等工程应用中,J. Caner等^[11]构建了壁面子网格模型与界面解析模型相结合的混合相变模型,成功模拟了热虹吸管内的两相流型与沸腾现象。Jin Kaiyan等^[12]则针对发汗冷却问题,建立了 CFD 与孔隙网络模型的全耦合多尺度模型,揭示了多孔介质界面处孔隙尺度两相流与非平衡相变与外部流动的强烈相互作用。

为改进传统界面捕捉方法的精度与鲁棒性,一系列混合或改进方法被提出。Y. F. Yap等^[13]较早地利用 2 个水平集函数建立了统一处理三相流与相变的数值框架。G. Sahut等^[14]系统评估了非结构网格上水平集函数重初始化算法对相变模拟的影响,强调了该步骤对界面法向、曲率及相变速度计算精度的关键作用。在更基础的界面捕捉模型方面,L. Bureš等^[15]开发了与几何 VOF 界面追踪方法耦合的锐界面相变模型,实现了界面位置与温度场的亚网格精度分辨,并验证了其在气泡上升与核态沸腾问题中的能力。A. Yahyaee等^[16]将水平集法与 VOF 法耦合,用于纳米流体的热驱动相变模拟,利用水平集法提高曲率计算精度,同时保持 VOF 的质量守恒性,取得了与基准解更好的一致性。

此外,在激波与界面/气泡相互作用这一经典问题上,研究不断深入。Y. de Gouvello等^[17]结合激波折射理论与高分辨率模拟,研究了超爆震相关条件下慢-快气体界面的折射波系,发现了向双 von Neumann 折射结构转变时形成的温度压力峰值及其对点火延迟的潜在影响。Li Linfei等^[18]对平面气体界面在扰动激波与反射激波作用下的 RM (Richtmyer-Meshkov) 不稳定性进行了数值研究,详细分析了“λ”形结构演化、尖钉-气泡形成及涡混合过程。从数学角度,Chen Yunkun等^[19]在一维情况下证明了带激波的压缩 Navier-Stokes/Allen-Cahn 扩散界面模型系统向其对应的锐界面两相可压缩 Navier-

Stokes 方程的极限收敛。M. Thangadurai 等^[20]数值研究了平面激波与背向三角形气泡的相互作用,捕获了不同 Atwood 数下 RM 与 KH (Kelvin-Helmholtz) 不稳定性的发展及气泡运动。S. S. Alsaeed 等^[21]通过间断伽辽金方法模拟了激波与 V 形重/轻界面的相互作用,系统分析了顶点角、马赫数与阿特伍德数对流动结构、涡量产生及界面变形的影响。

综上所述,当前多相流界面捕捉领域的研究呈现出多方法融合(动理学-相场、Level Set-VOF)、高分辨率格式发展(BVD、WENO、自适应网格)以及面向特定复杂物理过程(相变、激波相互作用、跨临界、高温)深度建模的鲜明趋势。然而,现有方法仍存在一些共性局限:首先,大多数方法针对特定类型的间断或流动进行优化,缺乏一种能够统一、自适应识别与处理激波、接触间断和相界面的普适性数值框架;其次,在耗散机制上,一般采用经验性或线性调节策略,未能充分基于流动的局部热力学非平衡状态(如熵产)来施加物理意义明确且强度自适应的数值黏性,导致在激波稳定捕捉与界面锐度保持之间难以取得最优平衡;最后,在涉及强非线性相变(如跨临界转变)与复杂耦合(如表面张力、热毛细对流)的工程实际问题中,现有方法的精度、稳定性与计算效率仍有待提升。

熵黏性方法源于计算气动力学,其核心思想是利用热力学熵的单调性作为流动“光滑度”的指示器,在解的非光滑区域自适应地添加熵黏性以抑制数值振荡,在光滑区域则保持低耗散。这一物理基础明确、具有内在自适应性的特点,使其在处理可压缩流动激波捕捉方面表现出色。然而,经典熵黏性方法建立在单相均匀流体的热力学熵框架上,无法直接表征多相流中相界面的存在、表面张力效应以及相变引起的质量与能量输运。因此,将其成功拓展至气液两相流领域,关键在于构建能够融合相界面物理状态的广义熵函数,并设计与之配套的多通道间断感知机制与非线性黏性分配策略。

本文正是针对上述挑战,提出一种非线性局部熵黏性相界面自适应捕捉算法,以高精度、高鲁棒性地求解包含激波、接触间断、相变界面及其相互作用的复杂可压缩多相流动问题。

1 非线性局部熵黏性相界面自适应捕捉算法

本文算法以热力学熵原理为基础,通过构造广义熵函数实现热力学非平衡与界面效应的同步感知;采用多通道间断感知器统一识别激波、接触间断

与相界面,避免多套判据的冲突;基于间断类型自适应分配非线性局部熵黏性,对激波施加强耗散以保证稳定,对接触间断施加适度耗散以平滑过渡,对相界面采用定向压缩与弱扩散结合的策略以保证锐度;同时实现表面张力与相变的能量一致耦合及自适应调参,在提升计算精度的同时优化计算效率。

1.1 广义熵函数构造

针对多相流(尤其含相变与表面张力)问题,传统单一热力学熵函数难以充分表征由界面自由能引起的非平衡效应。因此,本算法在经典熵函数基础上,显式引入表征相界面几何特征的项,相体积分数 α 及其梯度 $\nabla\alpha$, 构建适用于气液两相流跨临界及相变问题的广义熵函数 η , 其表达式可表示为物理熵的负值或其仿射变换:

$$\eta(U) = \eta_0(\rho, e) + \omega \cdot \alpha \cdot |\nabla\alpha| \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; e 为总能量, J ; η_0 为熵函数, 反映由激波、黏性耗散等引起的热力学不可逆过程; 增加项 $\alpha \cdot |\nabla\alpha|$ 对应相界面区域的界面自由能密度贡献, 其空间积分与界面面积成正比, 物理上表征因界面存在而引入的额外“构型熵”或能级非平衡。 ω 为界面效应权重系数, 是为实现量纲一致性并调节界面效应强度而引入的物理参数, 它将界面几何量转换为与热力学熵同量纲的贡献, 其数值决定了界面非平衡在广义熵中的权重。依据间断类型自适应分配非线性局部熵黏性: 对激波施加强耗散以保证稳定, 对接触间断施加适度耗散以平滑过渡, 对相界面则采用定向压缩与弱扩散结合的策略以保持界面锐度。权重系数 ω 可根据界面曲率、相变强度等局部特征进行自适应调节, 从而对不同尺度的界面现象(如平滑扩散界面、锐利界面及相变剧烈区域)均保持良好的物理适应性。

广义熵函数 $\eta(U)$ 既统一描述了热力学与界面 2 种非平衡机制, 也为熵稳定通量构造与熵残差量化提供了基准。离散熵残差 R_η 用于量化局部流动的非平衡程度, 其近似表达式为:

$$R_\eta \approx (\eta(U_i) - \eta(U_L)) / \Delta t + (F_\eta(U_R) - F_\eta(U_L)) / h \quad (2)$$

式中: U_i 、 U_L 、 U_R 分别为当前单元及左右界面的守恒变量; Δt 为时间步长, s ; h 为网格尺度, m ; F_η 为广义熵通量。

1.2 统一间断检测

随后,设计多通道间断感知器,包括激波间断感受器 S_η 、接触间断感受器 S_c 、相界面感受器 S_α , 采用激波优先级覆盖策略消除通道干扰。各感受器均通过限幅函数 $\text{clamp}(x, 0, 1)$ 约束于 $[0, 1]$ 区间, 保证数值

稳定性并便于作为权重使用,其中 $\text{clamp}(x, a, b) = \min(\max(x, a), b)$ 。3类感受器具体表达如下。

1) 激波间断感受器。基于熵残差或压缩性指标与压力跳的组合构造,核心表达式为:

$$S_s = \text{clamp}(h|R_\eta|/(aE_\eta + \varepsilon), 0, 1) \quad (3)$$

或替代形式:

$$S_s = \text{clamp}(\max(0, -\nabla \cdot u)h/a \cdot f_p, 0, 1) \quad (4)$$

式中: a 为声速, m/s; E_η 为熵尺度; ε 为小正数以避免分母为零; u 为流速, m/s; f_p 为于压力跳的放大函数, $f_p = \text{clamp}(|\Delta p|/(\bar{p} + \varepsilon), 0, 1)$ Δp 为压力跳, Pa; \bar{p} 为邻域平均压力, Pa。

2) 接触间断感受器。基于密度突变特性构造,考虑压力跳的抑制作用:

$$S_c = \text{clamp}(|\Delta \rho|/(\bar{\rho} + \varepsilon) \cdot g \cdot |\Delta p|, 0, 1) \quad (5)$$

式中: $\Delta \rho$ 为密度跳, kg/m³; $\bar{\rho}$ 为邻域平均密度, kg/m³; g 为权函数,实现对低压跳的放大与高压跳的抑制。

3) 相界面感受器表达式为:

$$S_i = \text{clamp}(|\nabla \alpha| h / (\alpha(1 - \alpha) + \varepsilon), 0, 1) \quad (6)$$

式中: α 为相体积分。相界面感受器还有另一种替代形式:

$$S_i = \text{clamp}(|\nabla s| h / (s_r + \varepsilon), 0, 1) \quad (7)$$

式中: s 为无量纲材料指示场; s_r 为有效跨度, m。

采用激波优先级屏蔽策略,对接触间断与相界面感受器进行屏蔽修正: $\chi_i = S_i(1 - S_s)$, $\chi_c = S_c(1 - S_s)$,通过 $(1 - S_s)$ 实现激波区域对其他通道的屏蔽,减少参数冗余与策略冲突。

1.3 非线性黏性计算

基于多通道间断感知结果,构造非线性局部熵黏性强度函数 W ,实现耗散的自适应分配:

$$W = w_s S_s + w_c \chi_c + w_i \chi_i \quad (8)$$

式中: w_s 、 w_c 、 w_i 为可调权重系数,满足 $w_s > 1$ 、 $w_c \in [0.1, 0.5]$ 、 $w_i \in [0.05, 0.3]$,并可根据局部马赫数 Ma 、密度比 DR 、韦伯数 We 及界面质量通量 m'' 自适应更新。该权重函数确保在激波区域($S_s \approx 1$)触发强耗散,在无激波的接触间断区域(χ_c 主导)触发适度耗散,在相界面区域(χ_i 主导)触发弱耗散并配合定向压缩策略。

在熵稳定通量基础上,引入面级熵黏性张量 $D = \lambda_{\max} W I$,其中 λ_{\max} 为局部最大特征速度, I 为单位张量,修正后的数值通量为:

$$F^* = F_{\text{ES}} - D \cdot [U] \quad (9)$$

式中: F_{ES} 为熵稳定 Riemann 通量; $[U]$ 为守恒变量跳跃。针对动量、能量与指示场方程,分别构造扩散系

数与压缩系数:

$$\begin{aligned} \nu_m &= C_m h \lambda_{\max} W \\ \nu_E &= C_E h \lambda_{\max} W \\ \nu_s &= C_s h \lambda_{\max} \chi_i \end{aligned} \quad (10)$$

定向压缩速度幅值 $u_c = C_c \lambda_{\max} \chi_i$,其中 χ_i 为界面综合指示因子, C_m 、 C_E 、 C_s 、 C_c 经验系数,界面法向 $\hat{n} = \nabla s / (|\nabla s| + \varepsilon)$ 。

1.4 自适应求解

首先是材料指示场输运:针对不同界面捕捉方法采用有界、守恒的输运形式。输运方程为:

$$\partial t \cdot \alpha + \nabla \cdot (u\alpha) + \nabla \cdot (u_c \alpha(1 - \alpha)\hat{n}) = \nabla \cdot (v_s \nabla \alpha) \quad (11)$$

通过通量限制器及投影裁剪保证 $\alpha \in [0, 1]$;对于 Level Set 方法,输运方程为 $\partial t \cdot \varphi + u \cdot \nabla \varphi = 0$, φ 为距离函数, m,通过重初始化方程维持 $|\nabla \varphi| \approx 1$;对于相场方法,采用 Cahn-Hilliard 或 Allen-Cahn 方程,结合时间分裂法实现稳定推进。

随后耦合表面张力与相变过程:采用连续体表面力模型描述表面张力 $F_\sigma = \sigma \kappa \delta_s \hat{n}$,其中 σ 为表面张力系数, κ 为曲率, δ_s 为界面特征函数。离散时通过力压平衡化抑制伪流;相变采用半隐式耦合,界面质量通量 m'' 由界面能量平衡与动理学关系确定,界面法向速度修正为:

$$v_n = (u \cdot \hat{n}) - m''(1/\rho_l - 1/\rho_g) \quad (12)$$

式中: ρ_l 、 ρ_g 分别为液相、气相的密度, kg/m³。

自适应时间推进采用复合 CFL (Courant Friedrichs Lewy) 约束确定时间步长 Δt ,确保计算稳定性:

$$\Delta t \leq \min \begin{cases} C_{\text{conv}} h / |u|_{\max} \\ C_{\text{acou}} h / a_{\max} \\ C_{\text{capi}} \sqrt{\rho h^3 / \sigma} \\ C_{\text{phase}} \end{cases} \quad (13)$$

采用显-隐分裂格式,对流项与熵黏性项为显式,曲率项与相变源项为半隐式;通过离散熵监测自适应调整 W 与 Δt 。

最后是参数自适应标定。基于离散熵产 S_η 、界面积分指标 $I_i = \int \alpha(1 - \alpha) dx$ 、伪流强度 M_p 、质量/能量守恒误差 E_m/E_e 自动调节 w_s 、 w_c 、 w_i 、 C_s 、 C_c 等参数,减少经验参数依赖。自适应调节原理如下:

激波耗散权重 w_s 其调整与局部离散熵产 R_η 强相关,旨在激波处增强耗散,在光滑区保持低耗散。控制逻辑为:

$$w_s^{n+1} = w_s^{\text{base}} + C_s \cdot \tanh\left(\frac{R_\eta}{R_\eta^{\text{ref}}}\right) \quad (14)$$

式中: w_s^{base} 为无量纲基准值; C_s 为缩放系数; R_η^{ref} 为参考熵产值, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。该函数形式确保 w_s 随不可逆程度的增强而平滑、有界地增加。

界面耗散/压缩权重 w_c, w_i 的调整依赖于界面面积分指标 $I_\Gamma = \int |\nabla \alpha| dV$ 和伪流强度 M_{sp} 。控制逻辑如下:

$$\begin{aligned} w_c^{n+1} &= w_c^0 \cdot \left(1 + k_c \cdot \frac{I_\Gamma - I_\Gamma^{\text{target}}}{I_\Gamma^{\text{target}}}\right) \\ w_i^{n+1} &= w_i^0 \cdot \left(1 + k_i \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{\text{tol}}}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: k 为松弛因子; I_Γ 为监测的物理量; I_Γ^{target} 为该物理量设定的目标数值; Φ 为检测的物理量特征值; Φ_{tol} 为该特征值对应的容许阈值。

当界面出现扩散,即 I_Γ 增大时,适当增加压缩项权重 w_c 以锐化界面;当检测到显著伪流时,则增加界面耗散权重 w_i 以增强稳定性。

模型常数 C_s, C_c 的修正:这些常数与整体质量/能量守恒误差 E_m, E_e 挂钩。采用积分反馈防止误差漂移:

$$C_s^{n+1} = C_s^n [1 - \lambda \cdot \text{sign}(E_m) \cdot \min(|E_m|, E^{\text{tol}})] \quad (16)$$

当守恒误差持续为正或负时,该策略将自动微调模型常数 C_s, C_c ,从源头上减小误差累积。

1.5 计算流程

本算法的数值计算实现流程步骤如图1所示:1)首先初始化计算网格、流动参数(压力、温度、速度等)、边界条件及相分数场;2)构造广义熵函数并计算离散熵残差;3)通过多通道间断感知器识别激波、接触间断与相界面,完成屏蔽修正与平滑处理;4)计算非线性局部熵黏性强度函数 W 及熵黏性张量;5)构造熵稳定修正通量,求解控制方程并更新流场参数;6)实现材料指示场的有界运输与定向压缩;7)耦合表面张力与相变源项,更新界面参数;8)基于复合CFL约束与熵监测调整时间步长,触发自适应参数标定;9)判断计算终止条件,若未满足则返回步骤2)迭代推进,若满足则输出计算结果。

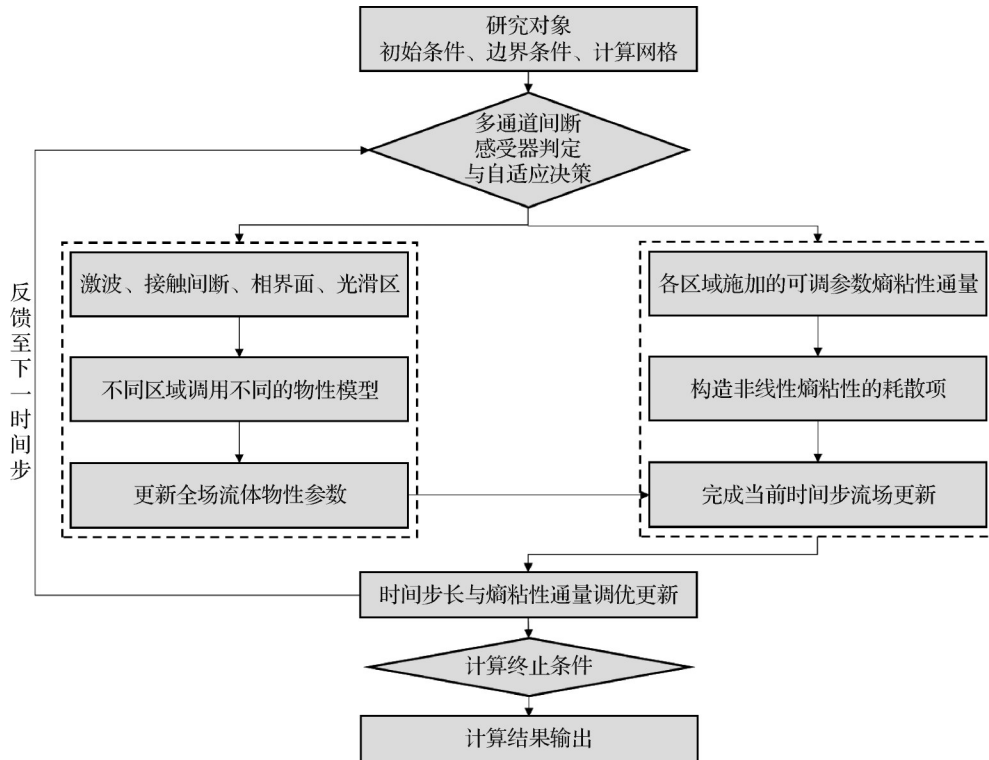


图1 计算流程

Fig.1 The calculation process

2 计算验证

2.1 Shu-Osher 激波管算例

对一维 Shu-Osher 激波管问题进行求解。该算

例不仅模拟了一维无黏流动中正常激波的传播,还考虑了存在高频扰动的密度波动。目的是评估计算方法在准确捕捉激波的情况下同时准确求解流动高频特征的能力。该无量纲问题流动的初始条件如图

2及式(17)所示, $x=1$ 的左侧为高密度区, $x=1$ 的右侧为正弦密度波, 其无量纲表达式具体为:

$$(\rho, u, p) = \begin{cases} (3.86, 2.63, 10.33) & 0 \leq x < 1 \\ (1 + 0.2\sin(5x), 0, 1) & 1 \leq x \leq 10 \end{cases} \quad (17)$$

其中, 计算域为 $x \in [0, 10]$, 时间步长固定, 考虑不同的网格单元数 $N=100, 200$ 进行计算。

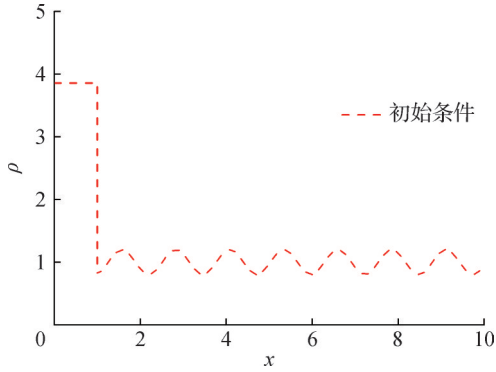


图2 Shu-Osher激波管算例计算初始条件
Fig.2 Initial conditions for the Shu-Osher shock tube problem

图3所示为应用本文算法得到的计算结果与解析解的对比。图3(a)对应计算单元数为 $N=100$ 的情况, 计算结果与解析解在 $5 < x < 7.2$ 区域内波动幅值的中间段吻合较好, 而在 $x \leq 5$ 和 $x \geq 7.2$ 的光滑区域吻合度很高。图3(b)为计算单元数增至 $N=200$ 的情况, 此时计算结果与解析解在全域内均表现出更好的一致性, 尤其在激波附近及高频扰动幅值变化显著的区域, 其逼近解析解的程度明显优于 $N=100$ 的情形。这说明提高网格分辨率有助于更精确地捕捉高频特征与激波结构, 验证了本文数值方法在求解此类包含激波与高频扰动传播问题时的准确性与稳定性, 同时在其他低频扰动或光滑处也能保证计算的高精度。图4进一步给出了对应2种网格下施加的熵黏性分布情况。可以看到, 熵黏性主要施加在激波附近及高频变化明显的区域, 这与图3中观察到的高频变化且幅值变化较大的位置一致。值得注意的是, 在 $N=200$ 的精细网格下, 施加的熵黏性数值更小, 说明网格细化后数值耗散降低, 有助于进一步提升计算精度。 $N=100$ 时黏性略大, 虽然能保证计算稳定, 但在高频区域会引入稍强的耗散, 导致与解析解产生可见偏差。综上, 尽管 $N=100$ 的计算结果在整体趋势上已与解析解吻合良好, 且计算效率较高, 但在高频与激波分辨率要求较高的区域, $N=200$ 能显著提升精度、减小数值耗散。

通过对一维 Shu-Osher 激波管问题的计算, 证明了本研究计算方法在处理含有激波的间断问题和含

有湍流的高频变化问题的流动时, 不仅能够通过提高计算单元数的方式得到高精度的解, 还能借助熵黏性使得计算稳定进行。

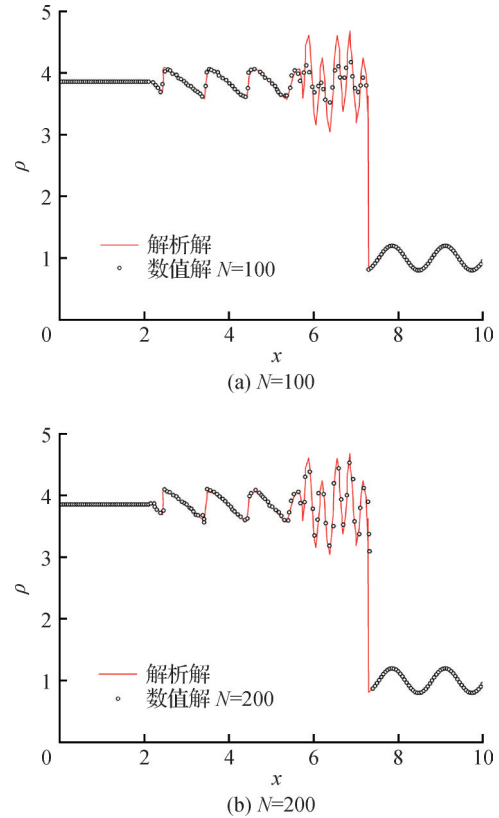


图3 不同计算单元数时数值解与解析解对比
Fig.3 Numerical and analytical results for different mesh

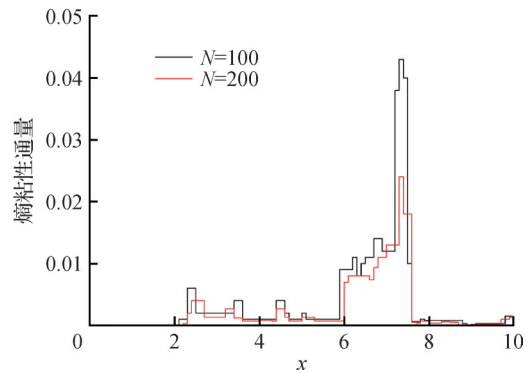


图4 不同计算单元数时熵黏性施加在每个单元的大小
Fig.4 The entropy viscosity applies to each unit with different mesh

2.2 RT 不稳定性算例

第2个验证算例是 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性算例, 该算例是验证多相流、界面捕捉和混合过程数值方法的核心基准算例。它模拟了重力场中密度梯度与压力梯度方向相反时发生的流体失稳现象。能够考验算法捕捉相界面的能力。

流动的初始条件如下, 计算区域的大小为 $[0,$

$0.25] \times [0, 1]$, 以 $y=1/2$ 为分界, 上层为重介质, 下层为轻介质。具体地, 上下两层介质的物性参数分别为:

$$(\rho, u, v, p) = \begin{cases} (1, 0, -0.025c \cdot \cos(8\pi x), 1.5 + y) \\ (2, 0, -0.025c \cdot \cos(8\pi x), 1 + 2y) \end{cases}, \quad \begin{matrix} 0 \leq y < 1/2 \\ 1/2 \leq y \leq 1 \end{matrix} \quad (18)$$

式中: 当地声速 $c = \sqrt{\gamma p / \rho}$, m/s; 理想气体无量纲比热比 $\gamma = 5/3$; p 为压力, Pa; ρ 为密度, kg/m^3 。

计算结果如图 5 所示, 初始扰动随时间推进按线性规律放大, 界面形成周期性的“尖峰-气泡”结构。流体受重力驱动向下侵入低密度流体, 形成尖锐的尖峰; 低密度流体向上攀升, 形成圆润的气泡。尖峰与气泡相互作用加剧, 尖峰顶端因剪切效应发生卷曲、破碎, 气泡底部出现二次扰动; 部分相邻尖峰/气泡融合, 形成更大尺度的流动结构, 密度等值线呈现扭曲、折叠特征, 界面区域扩展为混合层。最后尖峰与气泡完全破碎, 形成无序的湍流涡旋结构, 密度等值线呈不规则网状分布, 整个流场呈现“大涡卷吸-小涡耗散”的多尺度特征; 高密度流体与低密度流体在混合层内充分掺混, 界面消失, 形成均匀化的混合区域。本文算法重现了 RT 不稳定性典型的蘑菇云结构, 其气泡的拱起、尖钉的下落以及次级 Kelvin-Helmholtz 涡旋的卷起等特征结构和文献[22]结果一致。表明算法能正确捕捉非稳态相界面, 验证了计算方法的准确性和稳定性。

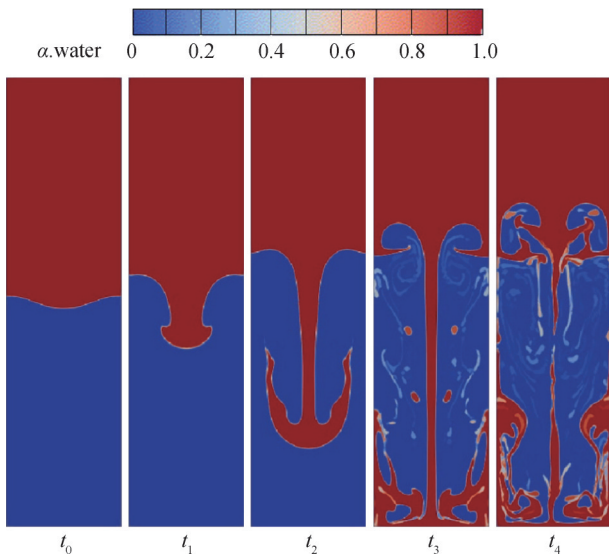


图 5 RT 不稳定性算例随时间发展的相分数云图

Fig.5 Phase fraction contours of the RT instability problem over time development

3 CO₂引射器算例建模

3.1 算例模型构建

选取跨临界 CO₂ 力循环系统中的轴向引射器为研究对象, 建立三维轴对称模型。引射器结构包括喷嘴段、混合段与扩散段, 其中喷嘴入口为高压超临界 CO₂ 口, 混合段侧面为低压亚临界 CO₂ 入口, 两股流体在混合段内发生撞击、混合、激波相互作用及相界面演化。模型尺寸参数: 喷嘴喉部直径为 3.5 mm, 混合段直径为 5 mm, 扩散段锥角为 8°, 喷嘴出口至扩散段入口距离为 80 mm。

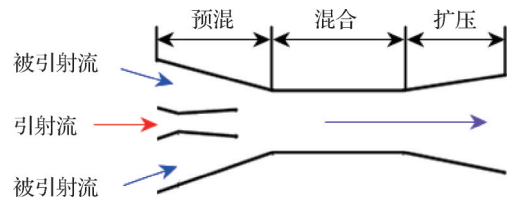


图 6 引射器物理模型

Fig.6 Physical model of ejector

3.2 计算条件设定

3.2.1 流动控制方程

本算例为三维可压缩两相流问题, 据此给出无量纲守恒形式的可压缩 Navier-Stokes 方程。

$$\begin{aligned} \partial_t \alpha_i + \mathbf{u}_{int} \cdot \nabla \alpha_i &= 0, \\ \partial_t (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) &= 0, \\ \partial_t (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i + \alpha_i p_i \mathbf{I}) &= p_{int} \nabla \alpha_i, \\ \partial_t (\alpha_i E_i) + \nabla \cdot (\alpha_i (E_i + p_i) \mathbf{u}_i) &= p_{int} \mathbf{u}_{int} \cdot \nabla \alpha_i \end{aligned} \quad (19)$$

式中: α_i 、 ρ_i 、 \mathbf{u}_i 、 E_i 分别为该单相流体的体积分数; 密度, kg/m^3 ; 速度, m/s; 总能量, J。下标 i 表示不同的相态, int 表示初始条件。其中,

$$\begin{aligned} E_i &= \rho_i e_i + \frac{1}{2} \rho_i \|\mathbf{u}_i\|^2 \\ \sum \alpha_i &= 1, \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1 \end{aligned} \quad (20)$$

对 CO₂ 热力学特性, 采用 Span-Wagner 状态方程描述, 以实现亚临界到超临界区域的连续物性计算。

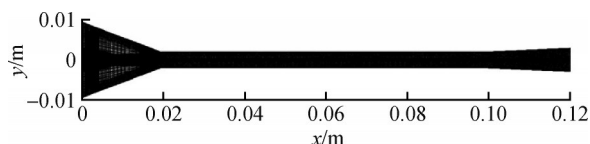
3.2.2 边界条件与初始条件

喷嘴入口为压力入口, 设定压力为 8 MPa, 温度为 310 K, 流速为 200 m/s; 混合段入口为压力入口, 设定压力为 2 MPa, 温度为 280 K, 流速为 50 m/s; 引射器出口为压力出口边界条件, 壁面采用无滑移绝热边界条件。

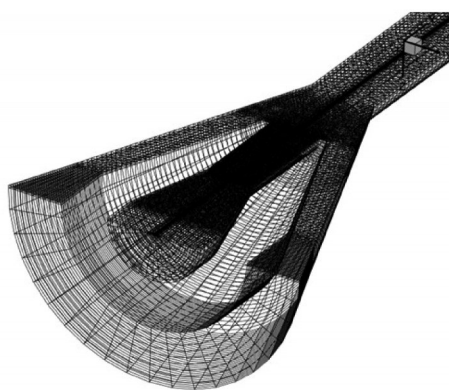
3.2.3 计算网格与网格无关性分析

计算网格如图 7 所示, 采用结构化网格划分计算域, 网格总数约为 5.7 万, 在喷嘴出口、混合段入口等预期间断密集区域设置网格加密过渡区。采用本文

提出的非线性局部熵黏性相界面自适应捕捉算法, 时间推进采用 Runge-Kutta 格式。为保证含激波、相界面及高频扰动等复杂流动计算的稳定性, 同时兼顾计算效率, 复合 CFL 数取为 0.5。该取值基于显-隐分裂格式的稳定性要求, 并与离散熵监测的自适应时间步长机制相协调, 确保在流动结构剧烈变化时, 时间步长能自动收缩以维持稳定性, 且在流动平缓区域可保持较高的计算效率。



(a) 整场二维计算网格



(b) 局部三维网格视图

图7 计算网格

Fig.7 Calculating mesh

首先进行了网格无关性验证, 网格疏密对模拟结果存在影响, 当网格数较少时, 插值计算精度不足, 而随着网格数的增加, 计算量增大, 计算时间变长, 因此需要进行网格无关性验证获得合适的网格数。若计算结果不随网格的加密而变化, 那么表明此套计算网格能够完全反映出准确的计算结果, 即完成了网格无关性验证。如图8所示, 当计算网格达到 5.7 万时, 引射流质量流量已经不随着计算网格的增加而变化, 因此后续计算基于 5.7 万单元数的网格进行。

本文将采用本文算法的计算结果和未施加自适应黏性方法的计算结果进行了对比, 如图9所示, 预测的压力分布除了在 $x \in [0.1, 0.2]$, 即主动喷嘴渐扩段不同外, 在其余部分几乎相同。区别在于, 未施加自适应黏性方法的计算结果没有准确捕捉到两股流体相遇开始进行混合, 即 $x \in [0.1, 0.2]$ 时发生的界面失稳现象, 本文算法则准确地反映出此时的剧烈变化。验证了本文算法计算过程的稳定和计算结果的准确。

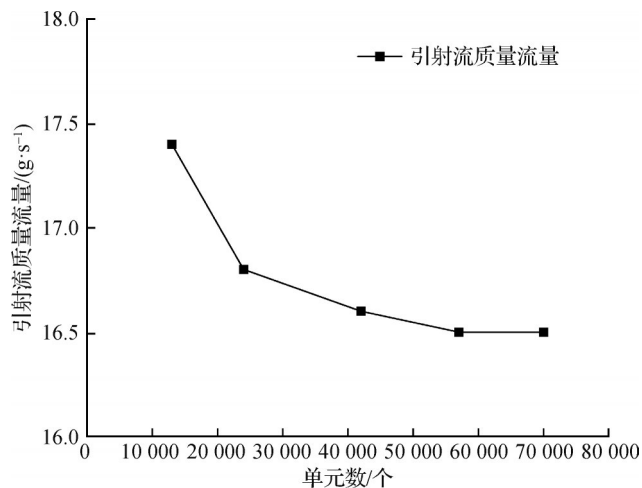


图8 网格无关性验证

Fig.8 Mesh independence verification

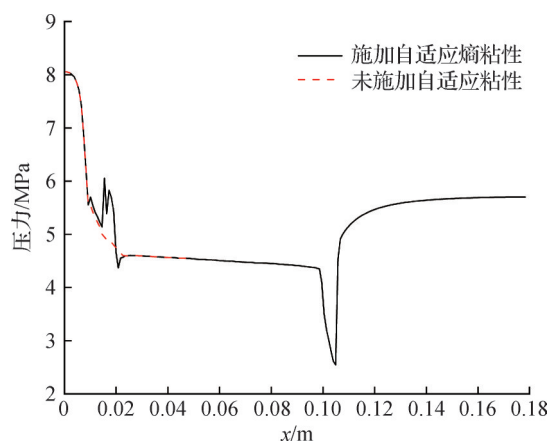


图9 施加本文算法自适应熵黏性与否的压力分布对比

Fig.9 Comparison of pressure distribution under the influence of the algorithm applies adaptive entropy viscosity or not

4 计算结果与分析

4.1 流场整体流动结构

图10所示为 $t=0.005$ s 时引射器内 CO_2 两相流场的 u 速度、压力、温度与密度分布云图。由图10可知, 高压超临界 CO_2 经喷嘴加速后形成高速射流, 在喷嘴出口处引射低压亚临界 CO_2 , 在混合段内, 两股流体逐渐混合, 相界面逐渐模糊, 激波经壁面反射后与相界面发生相互作用; 扩散段内压力逐渐升高, 流场趋于稳定。算法能够清晰捕捉到激波、相界面、涡旋等关键物理现象。

由图10(a)速度云图可知, 高压超临界 CO_2 在喷嘴内迅速加速, 在喉部及喷嘴出口处形成明显的高速射流。射流进入混合段后, 对侧壁低压亚临界 CO_2 产生强烈引射作用, 两股流体在混合段内发生显著的速度剪切与动量交换, 形成复杂的剪切层与涡旋

结构。高速主射流在混合段内逐渐扩散,其速度沿轴向逐步衰减,在扩散段内趋于均匀分布,表明流动逐步完成动量重分配并趋于稳定。

图 10(b)压力云图显示,喷嘴内存在明显的膨胀过程,压力沿轴向快速下降,在喷嘴出口及混合段入口附近形成局部低压区。由于超声速射流与周围低速流体的相互作用,在混合段内出现多道激波结构,部分激波在壁面发生反射,并与相界面及剪切层相互作用,导致局部压力突升。进入扩散段后,流体减速,压力逐渐恢复并沿轴向平缓升高,体现出扩散段良好的压力回收特性。

图 10(c)温度云图表明,超临界 CO_2 在喷嘴内经历显著的膨胀降温过程,喷嘴出口区域温度明显低于入口;低压亚临界 CO_2 在被引射并与主流混合过程中发生显著的热量交换。激波与相变区域附近温度梯度较大,反映出强烈的热力学非平衡过程。扩散段内温度场逐渐趋于均匀,说明流动和热过程逐步稳定。

密度云图(d)清晰展示了两相流体的分布及相界面演化特征。喷嘴出口及混合段内密度变化剧烈,密度突变区域与激波结构高度一致;在两股流体混合区域,相界面逐渐扩展并模糊,密度梯度呈现明显的多尺度特征。算法能够在激波与相界面共存的复杂区域内保持界面清晰,并准确捕捉密度的陡峭变化,未出现明显的非物理振荡或数值扩散。

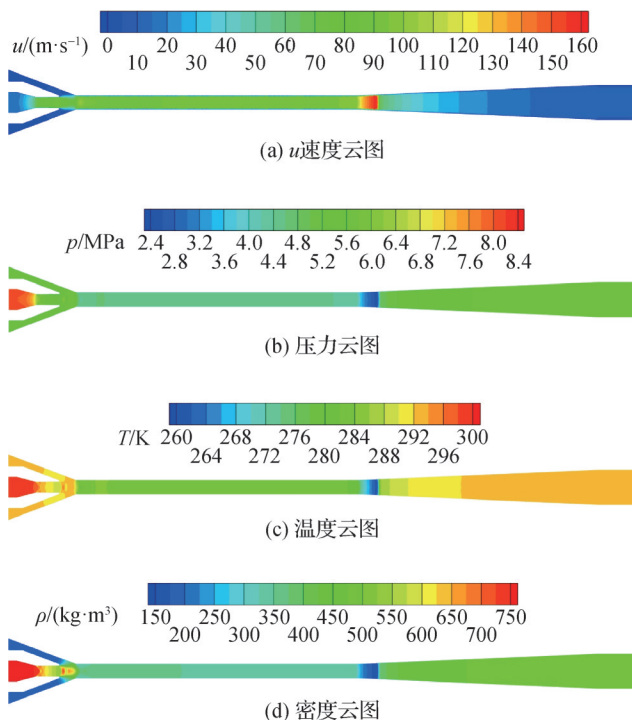


图 10 引射器中心截面计算结果云图

Fig.10 The contours of the central cross-section of the ejector

总体而言,图 10 所示结果表明,本文提出的非线性局部熵黏性相界面自适应捕捉算法能够在引射器复杂流场中同时清晰分辨激波、相界面及旋涡等关键结构,较好地反映跨临界 CO_2 两相流动的真实物理特征。

4.2 引射器中轴线参数分布

图 11 所示为计算过程中引射器中轴线上的 u 速度、压力、温度与密度的演化曲线。由图 11(a) u 速度分布曲线可知,流体在喷嘴段内迅速加速,在喉部及喷嘴出口附近达到峰值速度;进入混合段后,由于引射流体的加入及强烈混合,轴向速度出现明显下降,并伴随一定幅度的波动,这与激波和剪切层的存在密切相关。进入扩散段后,速度逐渐减小并趋于平缓,表明流动逐步稳定。

图 11(b)压力分布图显示出沿轴线呈现典型的“先降后升”特征。喷嘴内压力快速下降,在混合段内由于激波作用出现局部压力突升与振荡;扩散段内压力逐渐恢复并趋于稳定,且未出现明显的非物理振荡,说明算法在强间断区域具备良好的稳定性。

图 11(c)温度分布图沿轴向的变化与压力和速度分布相互对应。喷嘴出口区域温度明显降低,而在激波及混合区域温度出现局部升高,反映出压缩效应及相变过程的共同影响。图 11(d)密度分布图则在激波和相界面区域呈现明显突变,其变化趋势与压力分布高度一致。

由图 11 可知,流场参数在计算迭代过程中逐渐收敛,无明显的非物理振荡。这说明非线性局部熵黏性的自适应分配有效抑制了激波/相界面相互作用区域的数值不稳定性。保证了计算稳定性。统计计算最终时刻的质量与能量守恒误差,结果显示 $E_m=0.85\%$, $E_e=0.62\%$,均低于 1% ,满足工程计算对守恒性的要求,验证了算法能量一致耦合策略的有效性。

图 12 所示为引射器中轴线的相分数 α 分布曲线。由图 12 可知,相界面区域的 α 分布呈现明显的陡峭特性, α 从 0.09 升至 0.1 仅跨越 2~3 个计算单元,表明算法通过定向压缩与弱扩散的协同作用,有效控制了相界面厚度,避免了传统方法中相界面过度模糊的问题。且本文算法能够准确捕捉到激波间断的位置与形状,激波前后的压力跳跃明显,符合其热力学特性。由此发现本文算法能够精准聚焦相界面区域,在保证相界面捕捉精度的同时,未过度增加非间断区域的计算量,兼顾了精度与效率。

同时,将本算法计算结果与 VOF 方法在完全相同的计算网格、初始条件进行了对比。表 1 所示为 2 种算法具体对比的结果。在相界面捕捉精度方面,

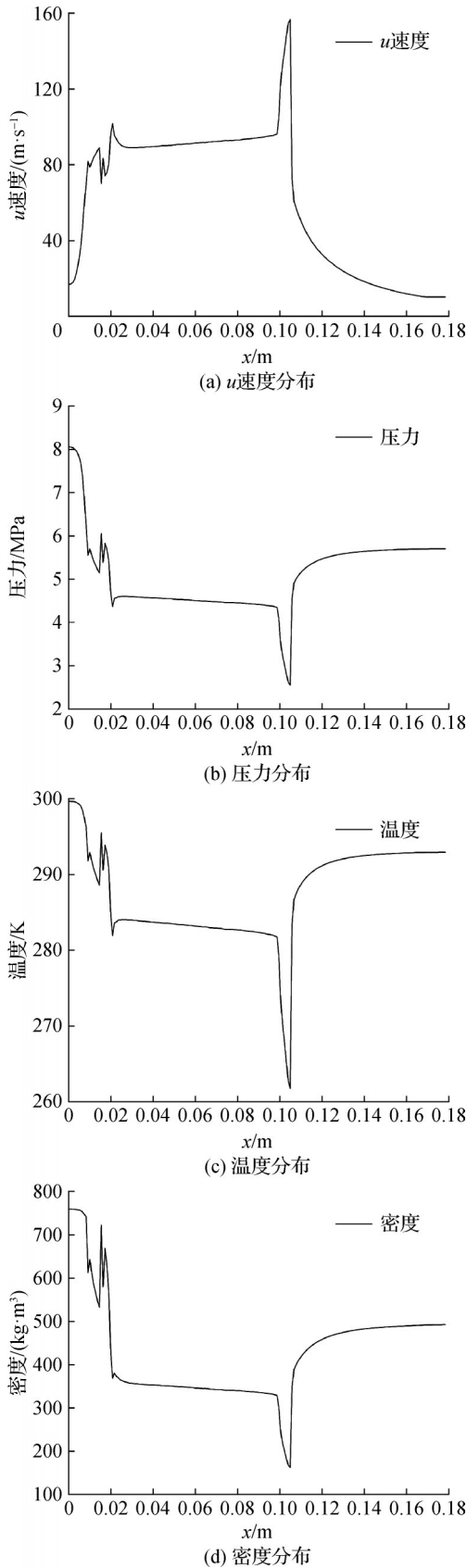


图 11 引射器中轴线计算结果分布

Fig.11 Distribution of the results of the axis line in the ejector

本算法展现出了显著优势,VOF方法所捕获的相界面平均约跨越4~5个网格单元,而本算法将界面厚度

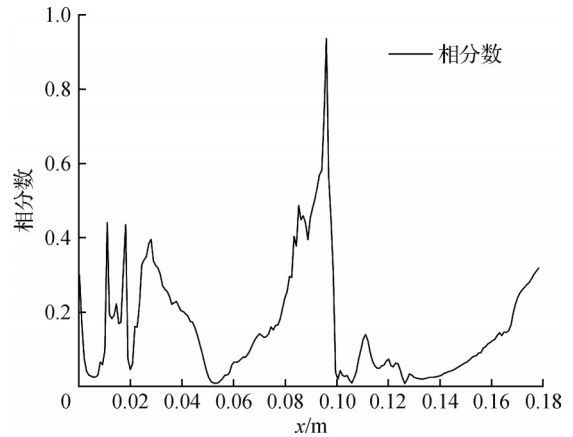


图 12 引射器中轴线相分数分布

Fig.12 Distribution of the phase fractions of the axis line in the ejector

稳定控制在约3个网格单元以内。这一提升直接归因于算法中基于熵残差的自适应机制:它仅在界面附近施加极小的、定向的数值耗散,同时激活界面压缩效应,从而在同等网格分辨率下获得了更为锐利的物理界面。质量与能量守恒误差对比,本文算法误差更小。本文算法的总CPU(central processing unit)耗时较VOF方法增加了约13%。这部分额外耗时主要来源于算法中实时进行的局部熵产计算、多尺度间断感知判断以及非线性黏性系数的自适应分配。

综上所述,相较于VOF方法,本文提出的算法在计算效率相当(耗时仅小幅增加13%)的前提下,成功实现了相界面捕捉锐度、质量与能量守恒精度的显著提升。这验证了本文所采用的局部熵黏性自适应框架的有效性与先进性,其为处理包含激波、相变及高梯度界面的复杂多相流动问题,提供了一种在精度与效率间取得更优平衡的高保真数值解决方案。

表 1 本文算法和 VOF 计算结果对比

方法	相界面厚度	$E_c/\%$	$E_m/\%$	CPU 耗时/s
本文	2~3	0.62	0.85	1 450
VOF	5~7	1.1	1.8	1 280

5 结论

本文提出一种非线性局部熵黏性相界面自适应捕捉算法,通过广义熵函数构造、多通道间断感知、非线性黏性自适应分配及自适应求解等核心模块,实现了可压缩多相流中激波、接触间断与相界面的统一精准捕捉。得到如下结论:

- 1) 本文构造了一种非线性局部熵黏性相界面自

适应捕捉算法,通过 Shu-Osher 激波管算例和 Rayleigh-Taylor 不稳定性算例验证了算法的稳定性与准确性。

2)本文求解了跨临界 CO₂ 热力循环过程中,引射器内部两相混合流动问题。相界面厚度可稳定控制在 2~3 个计算单元,精度显著优于传统相界面捕捉方法,且有效抑制了数值振荡。说明本文算法能够稳定、清晰、准确地捕捉引射器内复杂多相流、非平衡相变等复杂流动现象。

3)本文算法的相界面厚度更薄,数值振荡幅度更小,质量与能量守恒误差更低。虽然计算由于间断感知与参数自适应过程导致耗时增加约 13%,但计算效率仍优于传统方法结合局部加密的策略,表明本算法在精度与效率的平衡上具有明显优势。质量与能量守恒误差均低于 1%,计算稳定性与守恒性良好,且参数在线自适应标定策略减少了经验参数依赖。

参考文献

- [1] Wang Kai, Xia Yanchen, Li Zengyao. A phase-field Lattice Boltzmann method for liquid-vapor phase change problems based on conservative Allen-Cahn equation and adaptive treegrid [J]. *Computers & Fluids*, 2023, 264: 105973.
- [2] Xia Yanchen, Yao Bowen, Wang Kai, et al. A three-dimensional fully threaded tree adaptive mesh phase-field lattice Boltzmann method for gas - liquid phase change problems[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(10): 103323.
- [3] Xia Yanchen, Li Zengyao. An extension of the discrete unified gas-kinetic scheme to gas - liquid phase change problems[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(7): 073392.
- [4] Paula T, Adami S, Adams N A. A robust high-resolution discrete-equations method for compressible multi-phase flow with accurate interface capturing [J]. *Journal of Computational Physics*, 2023, 491: 112371.
- [5] Yang Xiaobin, Liu Cheng, Li Jingqi, et al. Numerical study of liquid jet and shock wave induced by two-bubble collapse in open field [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2023, 168: 104584.
- [6] Yang Xiaobin, Liu Cheng, Hu Yiding, et al. Shock wave induced by the collapse of a bubble cluster with each bubble distributed randomly [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 300: 117362.
- [7] Wakimura H, Aoki T, Xiao Feng. A low-dissipation numerical method based on boundary variation diminishing principle for compressible gas - liquid two-phase flows with phase change on unstructured grid [J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37: 016103.
- [8] Stoffel T D, Viqueira-Moreira M, Brehm C, et al. Application of a diffuse interface multiphase method for high temperature and hypersonic flows with phase change [C]//AIAA AVIATION 2023 Forum. San Diego, CA and Online. AIAA, 2023: AIAA2023-4250.
- [9] Song Jiayi, Pan Shucheng. Numerical investigation of the Richtmyer-Meshkov instability for the vapor-liquid interface with phase change [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, 54(10): 104710.
- [10] Xiao Mingkun, Yang Guang, Huang Yonghua, et al. CryoFoam: a practical numerical framework for non-isothermal two-phase flows in cryogenic fluids with phase change [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 80: 871-889.
- [11] Caner J, Videcoq E, Benselama A M, et al. Simulation of a two-phase loop thermosyphon using a new interface-resolved phase change model [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 228: 125607.
- [12] Jin Kaiyan, Zhao Jin, Yao Guice, et al. A fully coupled multiscale phase-change model at the porous interface for transpiration cooling: coupling dynamics pore-scale networks to continuum-scale free flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 236: 126396.
- [13] Yap Y F, Li H Y, Lou J, et al. Numerical modeling of three-phase flow with phase change using the level-set method [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 730-740.
- [14] Sahut G, Ghigliotti G, Balarac G, et al. Evaluation of Level Set reinitialization algorithms for phase change simulation on unstructured grids [J]. *La Houille Blanche*, 2020, 106(2): 43-48.
- [15] Bureš L, Sato Y. Sharp-interface phase-change model with the VOF method [C]//Proceedings of the 5th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC), 2020.
- [16] Yahyaee A, Bahman A S, Olesen K, et al. Level-set interface description approach for thermal phase change of nanofluids [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(13): 2228.
- [17] De Gouvello Y, Dutreuilh M, Gallier S, et al. Shock wave refraction patterns at a slow-fast gas-gas interface at superknock relevant conditions [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(11): 116101.
- [18] Li Linfei, Jin Tai, Zou Liyong, et al. Numerical study of Richtmyer-Meshkov instability of a flat interface driven by perturbed and reflected shock waves [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(2): 026104.
- [19] Chen Yunkun, Huang Bin, Shi Xiaoding. Sharp interface limit for compressible Navier-Stokes/Allen-Cahn system with shock wave [J]. *Communications in Mathematical*

Sciences, 2023, 21(6): 1487–1503.

- [20] Thangadurai M, Kundu A, Biswas G. Numerical simulation of the interaction between a planar shock wave and a backward-facing triangular bubble containing gases with different Atwood numbers[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(4): 046119.
- [21] Alsaeed S S, Singh S. Numerical study of shock wave interaction with V-shaped heavy/light interface [J]. *Mathematics*, 2024, 12(19): 3131.
- [22] Fleischmann N, Adami S, Adams N A. Numerical symmetry-preserving techniques for low-dissipation shock-capturing schemes[J]. *Computers & Fluids*, 2019, 189:

94–107.

通信作者简介

曹锋,男,教授,西安交通大学能源与动力工程学院,13571825806,E-mail:fcao@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:跨临界CO₂热泵系统关键技术。

About the corresponding author

Cao Feng, male, professor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 86-13571825806, E-mail: fcao@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: key technologies for transcritical CO₂ heat pump systems.

(责任编辑:王亚薇)