

# Rayleigh-Taylor 不稳定的物理模型和数值模拟

李家春<sup>1</sup> 王丽丽<sup>2</sup>

(中国科学院, 力学研究所, 北京, 100080<sup>1</sup>)

(中国工程物理研究院, 应用物理和计算数学研究所, 北京, 100088<sup>2</sup>)

## 摘要

界面不稳定是自然界和工业中流动的普遍现象。本文以 Rayleigh-Taylor 不稳定性为范例, 说明基于物理思想的 CFD 方法在流动问题研究中的应用。

为了确定自由面, 以往的 Lagrange 坐标法、阵面跟踪法在界面发生大变形时都会失效。同时, 因流动不稳定从层流发展到湍流要经历若干阶段。因此, 如何追踪演化过程的界面变形和如何确定湍流模型是 R-T 不稳定性研究中的主要困难。本文将溶质浓度差异视为导致介质轻重不同的原因, 在不稳定发展过程中发生对流和混合。我们提出采用被动标量的大涡模拟方法来模拟 R-T 不稳定。鉴于该物理模型考虑了流体粘性和物质扩散的影响, 可以自动确定阵面。完整描述不稳定从线性小扰动阶段、经过非线性变形阶段、剪切不稳定阶段到湍流混合阶段, 真实重现了现象的物理过程, 所以更为优越。通过比较尖钉和气泡阵面前进速度和计算亚格子分量的份额, 验证模型的可靠性。

我们计算了几种不同条件下 Rayleigh-Taylor 不稳定性发展过程, 分析了二维和三维情况下界面形状、被动标量浓度分布、混合层宽度、速度场等随时间的演化规律; 研究了在具有不同长宽比的初始扰动下不稳定性发展的规律: 扰动尺度对称性越好, 界面前沿速度越快, 狭长型扰动较中心对称型扰动发展慢。研究了相邻的不同尺度扰动之间的相互作用及其对流场速度、能量分布的影响。分析了不同尺度扰动在发展过程中相互耦合作用, 小尺度结构会制约相邻大尺度结构的界面前沿发展速度, 使动能往水平方向迁移, 并发生吞并现象。所以如果在大尺度扰动附近加入适当小尺度扰动, 有可能使不稳定性混合更多地水平方向发展, 这样有利于降低界面前沿的发展速度; 数值模拟了非定常加速度场下不稳定性发展至湍流混合的过程, 计算结果表明在不稳定性发展过程中如果加速度方向突然改变, 有以下规律: 若加速度场突变发生在不稳定性发展的线性阶段, 扰动将随着时间增长而逐渐衰减, 界面振荡一段时间后将逐渐恢复原状。由于分子扩散程度很小, 流体仍能保持分层状态。若加速度场突变发生时界面已形成“气泡”和“尖钉”的结构, 加速度场的反向会使混合在一定程度上减弱。但由于不可逆的分子扩散过程, 流体无法再恢复到原来的分层状态。由于惯性效应, 界面的恢复过程与反向时刻存在时间滞后。

## 参考文献

- 1 M. Brouillette, Ann. Rev. Fluid Mech., 34, 2002: 445-468.
- 2 N J Zabusky, Ann. Rev. Fluid Mech., 31, 1999: 495-535.
- 3 J C Li, Acta Mech. Sinica, 17(4), 2001: 289-301.
- 4 L L Wang, J C Li, Z T Xie, Scientia Sinica, A, 45(1), 2002: 95-106.