超声速气体化学反应流的数值计算格式研究

李彬

摘要

超声速气体化学反应流的研究对于高超声速推进系统的设计, 空间飞行器的气动热防护及布局优化等有重要的指导作用. 在超声速气体化学反应流的数值模拟中, 存在着复杂的化学反应机理, 刚性问题及由流动和化学反应相互作用引起的广泛的时空尺度等众多困难. 如何有效地模拟化学反应流, 是计算科学研究者致力解决的一个难题.

本文研究高分辨率格式在计算超声速气体燃烧流中的模拟能力问题. 在结构网格有限体积法和 LU-SGS 格式求解多组分反应 Navier-Stokes 方程基础上, 分别应用基于 Roe 近似 Riemann 求解器的 MUSCL 格式和 WENO 格式, 基于局部 Lax-Friedrichs 分裂通量的 NND 格式和 WENO 格式, 以及 Harten-Yee 迎风 TVD 格式等五种高分辨率方法离散对流项, 数值模拟了H_2/Air和H_2/O_2预混合气体以马赫数 M = 3.55、M = 4.48 和 M = 6.46 绕球头体外流和 M = 6.7 绕冲压加速器内流的激波诱导燃烧流场. 数值结果表明: 对于马赫数 M = 3.55 激波与燃烧波分离的情况, 二阶 NND、MUSCL 和 TVD 格式都可以很好地收敛到定常解, 而 WENO 格式很难收敛到残差很小的定常解. 当网格数较密时, 所有格式计算 M = 6.46 球头体和 M = 6.7 冲压加速器的燃烧流场都得不到收敛的定常解, 尽管它们在粗网格或在无化学反应项的密网格下能得到收敛的结果. 文中探讨了气体化学反应流数值模拟中不收敛的原因. 此外, 本文还将计算格式和程序推广到非定常燃烧和三维问题的数值模拟, 获得了初步的结果.

关键词: 有限体积法; 高分辨率格式; 超声速燃烧; 网格收敛性.