

## 局部粗糙元对高超声速非平衡边界层流动的影响

张天宇\*, 陈松<sup>\*,2)</sup>, 孙泉华<sup>+</sup>

\* (北京航空航天大学中法工程师学院/国际通用工程学院, 北京 邮编 100191)

<sup>+</sup> (中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 邮编 100190)

**摘要:** 可重复使用航天运载器在再入大气层时, 飞行器表面的热防护系统会由于高温烧蚀产生粗糙元形貌, 另一方面, 空气还将出现分子层面的内能激发、化学反应等热化学非平衡现象。在高超声速飞行条件下, 粗糙元引起的局部流动梯度将对边界层的稳定性产生十分复杂的影响, 进而给转捩的预测带来很大困难。本研究以高超声速平板流动为研究对象, 采用基于分子动理论的直接模拟蒙特卡罗 (DSMC) 方法对带有局部粗糙元的平板边界层流动开展非定常精细数值模拟。通过在自由来流中添加特定频率的小扰动波, 研究粗糙元尾迹流动中不稳定波的演化规律; 同时, 通过对比完全气体和真实气体模型的数值模拟结果, 分析高温非平衡效应对扰动增长率的具体影响。初步结果表明, 当粗糙元的特征尺寸相对边界层厚度较大时将导致边界层的分离并形成二次激波, 由此引发更为显著的热非平衡效应。在施加小扰动的情况下, 上游流动的热化学状态及粗糙元尺寸、数量等参数都会影响到下游边界层内扰动波的发展。本研究探讨了粗糙元诱发高超声速边界层失稳和转捩的物理机制, 可为工程上转捩主动控制和下一代可重复使用航天运载器气动设计提供有价值的参考。

**关键词:** 高超声速飞行; 边界层稳定性; DSMC 方法; 非平衡流动

1) 北京市自然科学基金资助 (编号: 1244055); 高温气体动力学国家重点实验室开放课题资助 (编号: 2023KF15)