

变壁温条件下的高超声速飞行器热防护材料响应与气动烧蚀研究

汪旭*, 肖天白⁺, 张勇豪⁺, 陈松^{*,2)}

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

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

摘要: 高超声速飞行器巡航与再入飞行过程的气动加热效应对热防护系统提出了严峻的挑战。高温气流与飞行器表面材料的多物理、化学作用导致飞行器表面形貌的显著变化, 影响流动结构演化与飞行器气动力、热特性。因此, 准确预测再入过程的烧蚀过程对于热防护系统的设计至关重要。现有气动烧蚀研究主要针对固定壁面温度条件的流场变化, 忽视了烧蚀过程中复杂化学反应与壁面材料性质差异导致的升温过程及烧蚀形貌的影响。本研究基于直接模拟蒙特卡洛 (DSMC) 方法, 耦合壁面能量守恒方程, 采用开源程序 SPARTA 对飞行器再入时的气动加热过程开展解耦分析。以柱体模型为例, 本文对解耦后的壁面升温 and 模型烧蚀两个过程分别建立了相应的控制方程, 综合气-气与气-固化学反应, 分析了在二维条件下不同壁面材料的气动烧蚀机制。研究表明, 本工作提出的烧蚀模型不仅能够复现文献中已有的烧蚀形貌, 也能够有效揭示不同材料壁面升温速率与烧蚀退缩速率的差异。该方法为深入理解变壁面温度下的复杂热化学非平衡现象提供了理论依据与数据支撑。

关键词: 气动烧蚀; DSMC; SPARTA; 高超声速流动; 热化学非平衡流动

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)