

高超声速飞行器热电转换与主动冷却一体化耦合机理研究

高尔康^{*+}, 仲峰泉^{*+}

* (中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室 北四环西路 15 号, 北京 100190)

+ (中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 高超声速飞行器在飞行过程中面临严酷的气动热环境, 导致飞行器结构失效甚至损毁。传统的热防护结构难以满足高马赫数、长航时飞行器的冷却需求。直接热电转换技术可以将气动热能转化为电能进行储存和利用, 成为未来高超声速飞行器热防护以及能源管理的热点之一。然而, 现有的直接热电转换技术面临热电转换效率低、输出功率小, 以及极端恶劣热环境下器件的可靠性差等挑战。为解决这些问题, 将热电转换与飞行器冷却结构相结合, 不仅可以降低飞行器机体温度、提升热防护效率, 还能显著提升热电转换效率和输出功率, 解决飞行器的供电问题, 实现热能的回收利用。

本文针对基于碲化铋 (Bi_2Te_3) 和方钴矿 (CoAs_3) 两种不同热电材料的直接热电转换与主动冷却一体化系统, 提出了一维传热分析模型, 并揭示了热能与电能转换以及热能传递机制。针对飞行马赫数 6 飞行器机体热环境条件, 采用一维分析模型研究了热电材料种类、器件结构参数和主动冷却参数对一体化系统性能的影响。研究结果显示, 相较于市面上成熟的碲化铋热电器件, 具有更高耐热温度和转换效率的新型高温方钴矿热电器件在一体化系统中展现出更大的输出功率和更轻的系统重量。在相同热电材料和制备工艺条件下, 增大热电器件尺寸能有效提高能量转换效率和输出功率, 例如, 在相同热环境下, 器件边长为 50mm 的方钴矿一体化系统的单位面积输出功率是器件边长为 40mm 系统的 2 倍。此外, 增加主动冷却的对流传热系数不仅可以降低系统结构温度, 提高热电器件表面的温度均匀性, 还能有效增加能量转换效率和输出功率, 当对流传热系数从 $500\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 增加到 $5000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 时, 单位面积输出功率可提高 10% 以上。

关键词: 高超声速飞行器; 热电转换; 主动冷却; 一体化系统

1) 资金资助项目 (中国科学院 B 类先导专项项目 XDB0620400)