

基于静电探针的高焓流场电子密度和电子温度诊断的实验方法研究

王传胜^{*+}, 张仕忠^{*}, 李飞^{*}, 林鑫^{*}, 曾徽[#], 欧东斌[#], 余西龙^{*+}

^{*} (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 100190)

⁺ (中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

[#] (中国航空气动力技术研究院, 北京 100074)

摘要: 高速飞行器在大气层中飞行时, 气动高温会使飞行器周围的空气电离形成包裹飞行器的等离子体鞘套。等离子体鞘套对入射的电磁波有反射和吸收的作用, 影响飞行器与地面通讯, 严重时会发生通讯中断的“黑障”现象, 突破“黑障”保持飞行器与地面通讯保证飞行器安全和复杂机动的关键技术。高焓电弧风洞是开展飞行器“黑障”研究的重要实验平台, 实现高焓流场中电子密度的准确测量是研究“黑障”问题的基础。本文基于中国航空气动力技术研究院 10MW 高焓电弧风洞, 开展了高频扫描静电探针结合快速送进诊断电弧风洞径向电子密度和电子温度分布的诊断技术研究, 实现了对电弧风洞径向分布的诊断。基于此系统研究了总焓为 11MJ/kg, 11.5MJ/kg 和 14.8MJ/kg 三个状态的等离子体电子密度和电子温度径向分布。实验结果表明: 随着风洞总焓的升高, 喷管核心区域电子密度升高。在三个状态下有效电子温度径向分布呈现喷管中心区域均匀, 电子温度约为 2eV, 而喷管边缘区域, 有效电子温度升高, 电子温度介于 3~6eV 之间; 电子密度分布趋势与电子温度相反, 呈现喷管中心高, 边缘低的分布规律。分析认为由于喷管中心为放电核心区域, 所以等离子体密度高, 该区域电子与离子以及中性气体碰撞频繁, 等离子体接近平衡态, 即电子温度接近离子温度, 所以诊断得到的电子温度较低; 而喷管边缘位置气体温度降低, 电子与离子复合导致电子密度降低, 导致电子与离子之间的碰撞频率减小, 等离子体呈现非平衡等离子体特性, 因此诊断得到边缘电子温度显著高于核心放电区。随着总焓的升高, 喷管中心区域电子温度基本维持在 2eV, 且范围逐渐扩大, 即高焓时有效实验区域变大; 同时喷管中心区域电子密度由 $\sim 5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 逐步升高到 $\sim 2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$, 喷管边缘区域电子密度基本不变, 主要是由于边缘气体为温度接近室温这一稳定状态, 因此等离子体在边缘可维持的电离率基本不变, 同时位于喷管中心区域的电子密度均匀区域逐步扩大。同时, 本实验对两种探针结构进行了测试分析, 并研究了探针烧蚀对诊断结果产生的影响。诊断结果与理论分析结果具有相同趋势, 表明该系统诊断结果可以为“黑障”问题中等离子体与电磁波相互作用的基础研究提供可靠的数据支撑。

关键词: “黑障”; 高焓电弧风洞; 高频扫描探针; 电子密度和电子温度径向分布