

复现飞行条件大尺度圆锥边界层转捩实验研究¹⁾

刘美宽^{*,2)}, 韩桂来^{*,+}, 姜宗林^{*,+}

^{*}(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)

摘要: 高超声速边界层转捩现象是一个极其复杂的、具有强烈的非定常、非线性、对于扰极其敏感的过程, 是一直没有得到解决的复杂流体力学的重大研究课题。传统的高超声速边界层转捩实验是在常规风洞中开展的, 常规模拟类风洞在实现高马赫数来流时, 是通过降低来流静温实现的, 对于边界层转捩问题而言, 这导致壁温比的边界条件不一致。复现类风洞实现高马赫数不通过降低来流静温, 因此其在保持动力学参数相似的同时, 也保持了壁温比的边界条件相似。而且单位雷诺数对于转捩雷诺数的关联依赖性使得依靠小模型结合高单位雷诺数的来达到相同当地雷诺数的相似准则失效。JF-12 复现风洞以其独有驱动方式及创新技术, 可实现在低单位雷诺数, 高总温的来流条件下测试大尺度模型上的边界层演化规律。在此来流条件下边界层厚度趋于一致, 同时降低了流场中物理参数的梯度, 延长了时间以及空间尺度。结合大尺度模型布置传感器达到了较高的空间分辨率, 可捕捉到之前由于模型尺寸限制而被淹没的物理现象。研究采用大尺度圆锥模型(高 3.0m)结合 JF-12 复现风洞来流条件还原飞行条件下高超声速边界层转捩的物理过程。实验关注不同来流雷诺数, 不同马赫数, 壁面条带, 来流攻角, 不同模型前缘钝度对于圆锥边界层转捩的影响。随着来流马赫数的增加, 转捩雷诺数增大, 边界层内不稳定波演化处于更早期阶段。随着单位雷诺数的增加, 转捩空间位置提前, 但其前移比例大于单位雷诺数增大比例, 导致转捩雷诺数随单位雷诺数增大而减小。单位雷诺数增长使得边界层层流阶段内的不稳定波向扰动演化过程的后期发展, 导致边界层失稳提前。通过在层流区边界层内布置壁面条带可实现有效的边界层转捩控制, 使得圆锥边界层转捩提前。结合其边界层不稳定波分析发现, 改变尖锥头部的壁面条带均能激发高频不稳定波, 在高频不稳定波的作用下, 会使得扰动特征趋于非线性演化阶段, 导致转捩提前。不同圆锥头部钝度, 其转捩雷诺数都随着单位雷诺数的增长呈现减小的趋势; 而对于同一单位雷诺数, 随着头部钝度雷诺数的增长, 转捩雷诺数表现出“转捩反转”的现象, 结合不稳定波的分析发现圆锥头部钝度增长对边界层内不同频段不稳定波的调制作用使得转捩雷诺数出现反转的现象。在 10° 攻角条件下, 随着模型钝度的增大转捩雷诺数整体呈现先推迟而后稳定的趋势。

关键词: 高超声速; 圆锥; 边界层转捩; 大尺度

1) 资金资助项目(国家重点研发计划: 2016YFA0401201, 2019YFA0405204, 重点基金: E123020101)