

高马赫数下串列射流流场分析¹⁾

王嘉麟^{*,+,2)}, 韩桂来^{*,+}

* (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 10049)

+ (中国科学院大学工程科学学院, 北京 10049)

摘要: 以爆轰波组织燃烧的斜爆轰发动机由于具有燃烧速率快, 放热效率高的特点, 在高马赫数飞行上具有广泛的应用前景。虽然斜爆轰发动机已成功完成了多次地面风洞实验, 但在真正投入使用前仍有许多问题亟待解决。其中之一是燃料的混合问题。由于爆轰燃烧属于预混燃烧, 且爆轰波在斜爆轰发动机燃烧室的入口建立, 因此, 燃料通常需要在斜爆轰发动机的进气道内喷射。进气道内的高超声速来流对燃料的充分混合提出了严峻的挑战。针对该问题, 本文通过数值模拟, 采用 SST 湍流模型, 分析了来流马赫数 $Ma_\infty=8$, 射流间隙比 $L/d_j=8$, 射流总压 0.5Mpa 的串列等强度氢气组合射流的流场特性。同时比较了单孔, 双孔和 4 孔串列射流的异同。结果显示, 在该计算条件下, 下游射流的存在并不会影响最上游射流的马赫胞结构及弓形激波形状。由于流场高温区主要由分离激波及弓形激波的加热形成, 因此三种情况下的流场温度极值均位于 1500K 左右。由于下游射流位于上游射流的背风区, 较低的当地马赫数使下游射流的动量通量比 J 偏高, 因此马赫胞膨胀更充分, 穿透深度更高。流线及涡结构的显示表明, 对于双孔射流, 射流孔间存在两个回流区, 根据相对位置可划分为上游/下游孔间回流区。其中, 上游孔间回流区的卷吸能力较强。在 4 孔串列射流的 3 个间隙中, 最上游间隙间的卷吸模式与双孔射流间的卷吸模式相同。由于下游射流膨胀得更充分, 马赫胞更大, 因此下游间隙间的回流区更小。通过对串列射流每个射流孔喷射的气体进行追踪可以发现, 每个射流孔中的燃料均可覆盖下游除下游马赫胞以外的区域。根据该特性将 4 孔串列射流中最上游的氢气射流替换为空气射流可明显提高混合效率, 同时空气射流阻挡了弓形激波后的高温区, 有利于避免燃料在进气道内的提前燃烧。

关键词: 斜爆轰发动机, 高超声速流动, 串列射流, 燃料混合

1) 资金资助项目: 国家重点研发计划项目 2016YFA0401201, 2019YFA0405204; 中国国家自然科学基金会 12132017, 11872066, 11727901