

基于多孔喷注方式的旋转爆轰波数值模拟

范肖肖

(江苏海事职业技术学院, 江苏 南京 211124)

摘要: 本文以船用燃气轮机旋转爆轰燃烧室为研究对象, 采用多孔喷注模型, 通过数值仿真方法研究燃烧室内旋转爆轰波的起爆及传播过程。燃烧室采用高温高压的点火方式起爆后, 旋转爆轰波从双波同向模态经过模态转换阶段变成三波同向传播模态。多孔喷注方式使爆轰产物与新鲜预混气的交界面面积增加引发提前燃烧现象, 提前燃烧释放的热量积累到一定程度时便会诱导产生新的爆轰波, 从而改变爆轰波在燃烧室内的传播模态。

关键词: 燃气轮机; 旋转爆轰; 多孔喷注; 传播模态

燃气轮机是利用柴油、天然气等燃料燃烧的动力装置之一, 被广泛应用于航空航天、船舶动力、能源电力、石油和天然气输送等诸多工业领域。近年来, 随着社会对节能减排需求的日益提升, 高水平燃气轮机的设计与发展吸引了行业内外外的广泛关注。然而传统的船舶用燃气轮机燃烧室多采用基于布雷顿循环的等压燃烧, 燃烧过程熵增大, 极大限制了循环热效率的进一步提高。

爆轰循环具有等容燃烧的特点, 燃烧过程具有自增压、熵增小、污染物特别是氮氧化物排放低等优点, 不仅适用于火箭基和冲压基, 还可以与燃气轮机组合使用。燃气轮机若采用旋转爆轰燃烧技术, 利用旋转爆轰燃烧室替代燃气轮机的等压燃烧室, 将能够大幅度提高燃烧室出口总压和热效率, 对于降低燃气轮机压气机的级数和耗功, 减少燃料的消耗和提高燃气轮机的热效率有着重要意义。

旋转爆轰燃烧室的出口压力和温度的振荡更加小, 出口处爆轰产物流动也更加均匀稳定, 其对压气机和涡轮造成的冲击作用也比较小, 因而旋转爆轰燃烧室与涡轮进行组合更加具有优势。由于爆轰燃烧的自增压特性以及热力学循环效率高的特点, 旋转爆轰涡轮组合发动机可以在较少压气机级数下产生更大的推力。近年来, 国内外学者对此进行了相关的探索与研究, 通过对装有旋转爆轰燃烧室的燃气轮机与常规等压燃烧室的燃烧效率进行对比, 发现在低压比下旋转爆轰燃烧室比常规等压燃烧室的效率至少提高 5%。与同参数等压燃烧室燃气涡轮发动机相比, 旋转爆轰涡轮发动机在工作范围内总体性能具有较大的优势。

目前针对燃气轮机旋转爆轰燃烧技术的研究尚处于起步阶段, 旋转爆轰燃烧室特性参数的系统性研究以及旋转爆轰燃气轮机的组合研究均有待完善。因此, 进一步开展旋转爆轰燃烧室基本特性研究, 构建旋转爆轰燃烧室总体性能预测模型, 对完善旋转爆轰燃气轮机热力循环模型、推进燃气轮机循环的技术变革具有重要的理论意义和应用价值。

本文以船用燃气轮机旋转爆轰燃烧室为研究对象, 采用多孔喷注模型, 通过数值仿真方法研究燃烧室内旋转爆轰波的起爆及传播过程。本文的研究, 为后续新型旋转爆轰燃烧室的设计、基于旋转爆轰燃烧室的船用燃气轮机设计与性能分析提供一定的参考依据。

一、爆轰波形成过程分析

采用 Fluent 求解器中基于密度基的瞬态方法, 通过对可压缩无粘流动的欧拉控制方程进行求解来进行旋转爆轰燃烧室工作过程数值研究。为捕捉爆轰波以及斜激波等强间断面, 通量用 Roe-FDS 格式进行分裂, 对流项用二阶迎风格式进行离散, 采用二阶隐式格式对时间项进行离散。

在稳定的冷流流场中赋予一个高温高压区作为点火源, 如图 1 红色区域所示, 高温高压区域的温度和压力分别为 2000K 和 2.5MPa, 其余蓝色部分的压力和温度为常温常压。

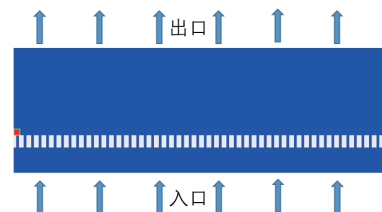
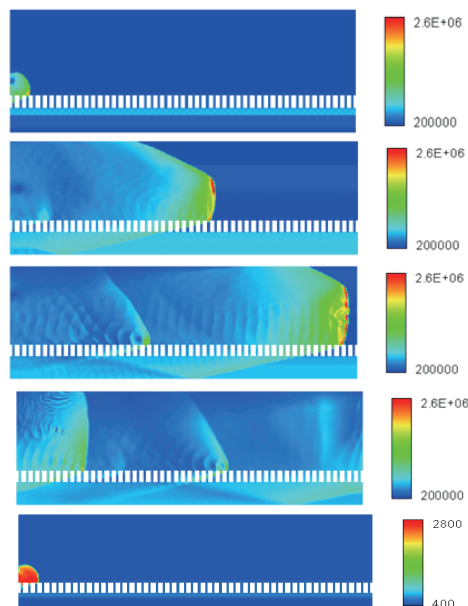


图 1 初始条件和边界条件

下端为旋转爆轰燃烧室入口, 计算采用质量流量入口作为边界条件。上端为压力出口边界条件, 当出口为超声速时, 边界点上所有流动参数由流场内部通过插值外推得到, 当出口为亚声速时, 边界点压力等于外界反压, 外界反压为一个大气压。其余边界条件设置为绝热固壁边界。

图 2 是从起爆到形成两个同向传播的爆轰波时间段内的压力和温度云图。由于采用高温高压进行点火起爆且未加任何速度以及隔离区域, 会在燃烧室内形成两道传播方向相反的激波。在向右的激波诱导可燃预混气发生化学反应然后形成旋转爆轰波, 向左的激波强度逐渐衰退。经过多次碰撞与透射之后, 爆轰波前导激波进入积气腔内并在入口处反射回燃烧室, 并与反应物能量释放相互作用发展形成在 2 个同向传播的爆轰波。



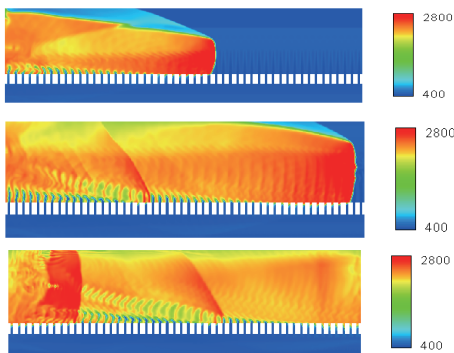


图2 起爆阶段

图3是从双波同向传播模态向三波同向传播模态转变过程中的压力和温度云图。从图中可以观察到,预混多孔喷注条件下,爆轰产物与新鲜预混气的交界面面积大大增加,预着火现象更加明显。当预着火释放的热量积累到一定程度时在喷注孔附近形成了一个热点,继而诱发新的爆轰波。随着新形成的旋转爆轰波不断向前传播,爆轰波的高度不断增大,激波面与燃烧火焰面的位置重合,激波与火焰面相互耦合传播。

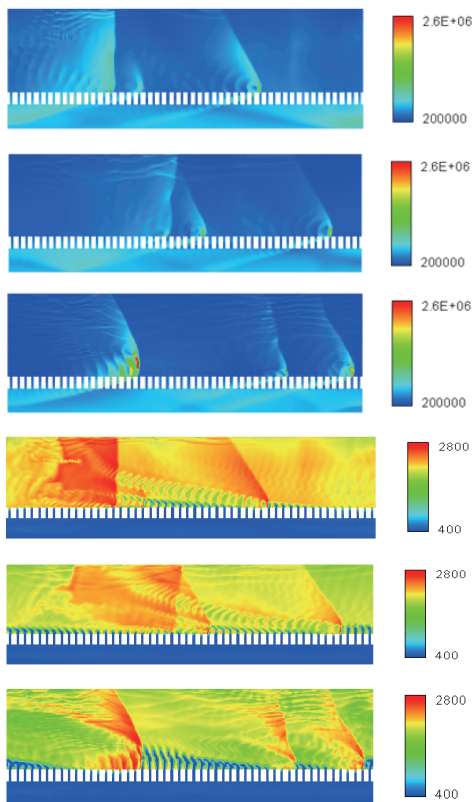


图3 模态转变阶段

图4是从三波同向传播模态稳定自持传播阶段的压力和温度云图。模态转变阶段形成的爆轰波强度差异较大,经过较长时间的自适应发展过程,三道爆轰波的强度逐渐趋于一致,同时三个爆轰波的距离也趋于一致,燃烧室内最终形成三道稳定传播的同向爆轰波。在远离旋转爆轰波阵面位置处的压力逐渐衰减,当压力低于填充压力时,新鲜的燃料便从集气腔进入燃烧室。从温度云图可以看出在三个爆轰波后压力较低区域均已经形成了低温区,该低温区就是新鲜燃料填充区,新鲜燃料填充区的形成是维持旋

转爆轰波自持传播的关键。由于总质量流量是固定的,爆轰波头数的增加使得爆轰波平均高度较起爆阶段的初始爆轰波有所降低。

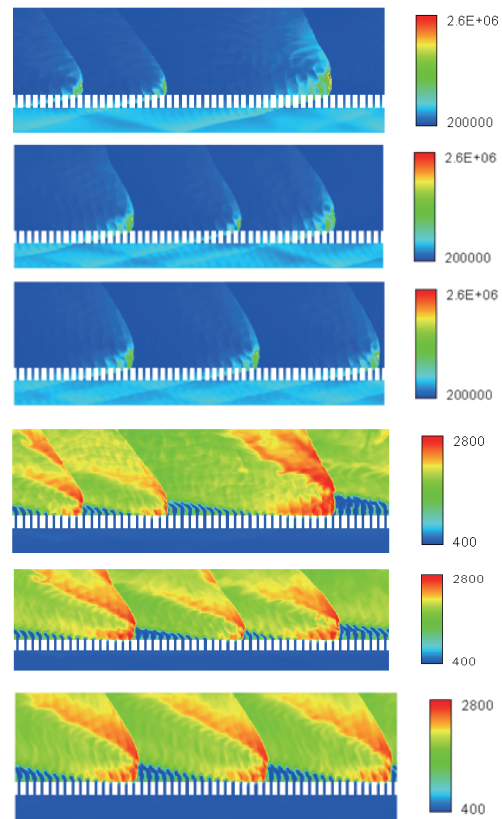


图4 自持传播阶段

二、结论

本文以船用燃气轮机旋转爆轰燃烧室为研究对象,采用Fluent求解器中基于密度基的瞬态方法研究旋转爆轰燃烧室工作过程。对带有多孔喷注方式的燃烧室进行仿真分析,得到了燃烧室内旋转爆轰波的从起爆到形成三波同向传播模态的全过程。发现多孔喷注方式引发的提前燃烧是诱发形成新的爆轰波的关键因素。

参考文献:

- [1] 李群, 武郁文, 翁春生, 等. 旋转爆轰波与涡轮平面叶栅相互作用数值模拟 [J]. 推进技术, 2022, 43 (09): 299-309.
- [2] 张成名, 林志勇, 吴倩敏. 连续旋转爆轰波与涡轮静子叶栅相互作用数值研究 [J]. 推进技术, 2022 (006): 043
- [3] 孟博威, 杨博, 张翠珍, 等. 面向旋转爆轰燃烧室的涡轮气动性能数值研究 [J]. 推进技术, 2023, 44 (9): 90-103.

基金项目: 本文系2021年江苏海事职业技术学院校级课题“基于多孔喷注模型的旋转爆轰发动机工作特性研究”(项目编号: ZRKX06)的研究成果。