

网格与燃烧模型对燃烧室出口温度场预测影响研究

林鹤洲, 陶焰明, 蔡江涛

(中国航发湖南动力机械研究所燃烧室研究部, 湖南 株洲 412002)

摘要 网格划分及燃烧模型对燃烧室热流耦合仿真计算精度影响显著。本研究以某直流燃烧室为研究对象, 分别采用了三种不同的网格方案, 并匹配假定化学平衡、非预混稳态层流火焰面和基于火焰面生成流型的部分预混三种燃烧模型对燃烧室出口温度场进行了计算, 并与试验结果进行了对比。计算结果表明, 带有壁面加密的多面体-六面体核心网格配合非预混稳态层流火焰面模型的计算结果与试验结果的一致性明显优于其他方案。

关键词 航空发动机; 燃烧室; 网格划分; 燃烧模型

中图分类号: V23; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2023)12-0010-03

燃烧室作为航空发动机的核心部件之一, 主要负责将燃料中的化学能转化为热能。燃烧室从入口接收来自压气机的高压气体, 经过充分燃烧与混合均匀, 从出口排出, 为下游的涡轮提供各项参数合适的高温燃气用于做功。随着计算设备的计算能力不断提高和仿真技术的不断发展, 热态仿真计算成为燃烧室设计的一个重要参考依据, 合理的计算条件使计算结果具有较高的参考价值, 可以辅助优化结构、减少试错成本、缩短研发周期。

为了指导优化燃烧室的设计, 许多学者对燃烧室出口温度分布进行了热态数值模拟研究。范珍滂等^[1]在对燃烧室进行热态数值模拟时采用了不同的化学反应机理进行计算, 结果表明 23 步反应机理和 30 步反应机理能准确预测出口温度分布; 吴超^[2]等对某型航空发动机环型燃烧室在不同工作状态下的温度场进行了数值模拟, 得到了不同工况下燃烧室的出口温度分布, 发现掺混孔可以降低主燃区出口温度并均化温度场; 祁海鹰、樊凡^[3]采用六面体和四面体混合网格对 R0110 重型燃气轮机 DLN 燃烧室的掺混过渡段进行了热态数值研究, 发现逆流式燃烧室上下射流分布不均对出口温度分布形态有关键性影响。

本文通过对燃烧室进行热稳态数值模拟, 将计算结果与试验结果进行对比, 研究不同网格方案和燃烧模型对燃烧室出口温度数值计算精度和效率的影响, 从而指导燃烧室的设计过程。

1 模型和计算方法

本文使用的研究对象为某型环形直流燃烧室。对燃烧室的单头部模型进行处理, 设置旋转周期面, 并

将对流动和传热影响较小但严重影响网格生成质量的细小结构进行简化、转换。燃烧室试验件主要包括扩压器、内外机匣、火焰筒、涡流器等结构, 燃烧室内有大小射流孔数百个, 气体流动复杂。

本文使用混合网格和多面体-六面体核心 (poly-hexcore) 网格进行数值计算。混合网格主要由四面体网格和六面体网格构成, 两种网格的交界面由五面体网格 (金字塔形) 进行过渡。多面体-六面体核心网格实体边界上的面网格由六边形和少量五边形网格构成, 内部则使用六面体填充, 两者过渡区域填充多面体网格, 边界层为棱柱, 如图 1 所示。局部加密采用 BOI 处理方式。

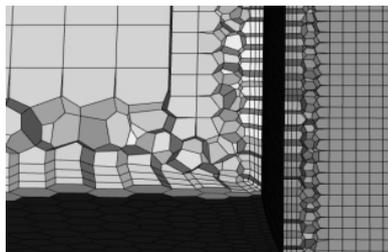


图 1 多面体-六面体核心网格

燃烧室内流动速度偏低 ($Ma > 0.3$), 未表现出强可压缩性, 采用基于压力的不可压定常求解器求解, 压力速度耦合方法为 SIMPLEC 格式。空间离散方法: 梯度离散为基于网格单元的最小二乘法格式, 压力项为标准格式, 其他所有项均选用二阶迎风格式。燃油喷雾模型采用经过大量工程实践的离散项模型 (Discrete Phase Model, DPM), 喷雾形式为空心锥, 并按照试验数据设置液滴尺寸分布 (分布类型、最大液滴直径、

最小液滴直径、平均液滴直径、分布指数以及不同直径液滴数目等参数)。入口为流量入口,出口为自由出流,单头部计算域的左右截取面设置为周期面,其余边界均为壁面,采用标准壁面函数。

湍流模型根据实际条件选用可实现 $k-\epsilon$ 模型 (Realizable $k-\epsilon$ model)。相较于标准 $k-\epsilon$ 模型,其湍动力粘度计算式中的系数 c_{μ} 从常数变为与时均应变率相关的变量,从而保证了计算的可实现性^[4],能更精确地计算圆孔射流、射流冲击、有旋均匀剪切流等燃烧室内的复杂流动。燃烧室模拟常用的燃烧模型包括非预混燃烧、预混燃烧、部分预混燃烧等。非预混燃烧是指燃料和氧化剂分别加入、反应和混合同时进行的燃烧过程,化学反应速率一般远大于混合速率,燃烧速率由混合速率主导;预混燃烧是指燃料和氧化剂在反应之前就已经充分混合的燃烧过程,燃烧速率由化学反应速率主导^[5];部分预混燃烧是介于非预混和预混之间的过程,也是多数燃烧所处的实际情况。纯预混燃烧不符合本文计算条件,因此从非预混、部分预混两种燃烧条件开展数值模拟。

网格划分方案如表 1 所示,所有网格方案最大扭曲度均不超过 0.9。数值计算方案如表 2 所示。方案 1、2、4、6 采用非预混燃烧模型,其中方案 1 为假定化学平衡模型 (Chemical Equilibrium),该模型假定化学反应总是很快达到平衡,燃烧室内处于近似化学平衡状态;方案 2、4、6 采用稳态层流火焰面模型 (Steady Laminar Flamelet Model, SLFM),这是一种理想的简化模型,火焰面是指气体燃烧中燃料和氧化剂当量比为 1 的点构成的面,通过求解火焰面可以得到低维火焰的形状、组分浓度分布和温度分布等信息;方案 3、5、7 采用基于 FGM 方法的部分预混燃烧模型,FGM 即火焰面生成流型 (Flamelet Generated Manifolds, FGM),该方法通过计算低维火焰面流型来模拟高维复杂火焰面流型,在考虑详细化学反应机理的同时大大减少了计算量。本文计算所使用的燃烧模型机理均为 23 步机理。

表 1 网格划分方案

方案	网格类型	网格量 / 万	边界层
网格 1	混合网格	1866	无
网格 2	多面体 - 六面体 核心网格	1330	无
网格 3	多面体 - 六面体 核心网格	1471	3 层

表 2 数值计算方案

计算方案	网格方案	燃烧模型
方案 1	网格 1	非预混化学平衡态
方案 2	网格 1	非预混稳态层流火焰面
方案 3	网格 1	基于 FGM 的部分预混
方案 4	网格 2	非预混稳态层流火焰面
方案 5	网格 2	基于 FGM 的部分预混
方案 6	网格 3	非预混稳态层流火焰面
方案 7	网格 3	基于 FGM 的部分预混

2 计算结果及分析

按照表 2 计算方案和上述计算设置对燃烧室出口温度分布进行了热态数值仿真,图 2 为各计算方案与试验结果的出口 RTDF 曲线图。表 3 为各方案计算结果与试验结果的偏差值。

从图 2 可以看出各计算方案的 RTDF 曲线与试验结果曲线变化趋势基本一致,其中方案 6 的曲线与试验结果一致性最好,计算结果上半叶片部分的温度曲线与试验结果几乎贴合;方案 4 和方案 5 的温度曲线在各方案中最偏离试验温度曲线。从表 3 可以看出,各计算方案的出口平均温度均与试验结果一致,最大偏差为试验测量值的 2.18%,但不同方案的 OTDF、RTDF 和径向温度峰值位置的偏差值区别很大。使用混合网格 (方案 1、方案 2、方案 3) 计算得出的 OTDF 偏差值较大,最高超过试验值的 38%,其中方案 3 使用 FGM 燃烧模型明显降低了 OTDF 的偏差,但依然超过 30%;而使用多面体 - 六面体核心网格 (方案 4、方案 5、方案 6、方案 7) 计算得出的 OTDF 偏差较小,最高为 17.69%。所有计算方案计算结果的 RTDF 与试验值偏差最大不超过 20%,在试验 RTDF 值测量受到测点数量影响较大的情况下可以认为所有方案的 RTDF 计算均与试验结果相符。所有方案计算得到的径向平均温度峰值点均比试验结果更靠近叶尖位置,方案 6 偏差最小,为 18% 叶高,其余偏差为 30% 叶高左右。

综合以上,方案 6 的结果最接近试验数据,本文计算中的实际情况更接近完全非预混燃烧。

3 总结

通过使用不同网格生成方式分别配合非预混和和部分预混燃烧模型进行了热态数值模拟,得到了以下结论:

1. 在本文计算中,带边界层的多面体 - 六面体核心网格配合稳态层流火焰面模型的计算结果总体最准确,燃烧室的实际燃烧过程更接近完全非预混燃烧。

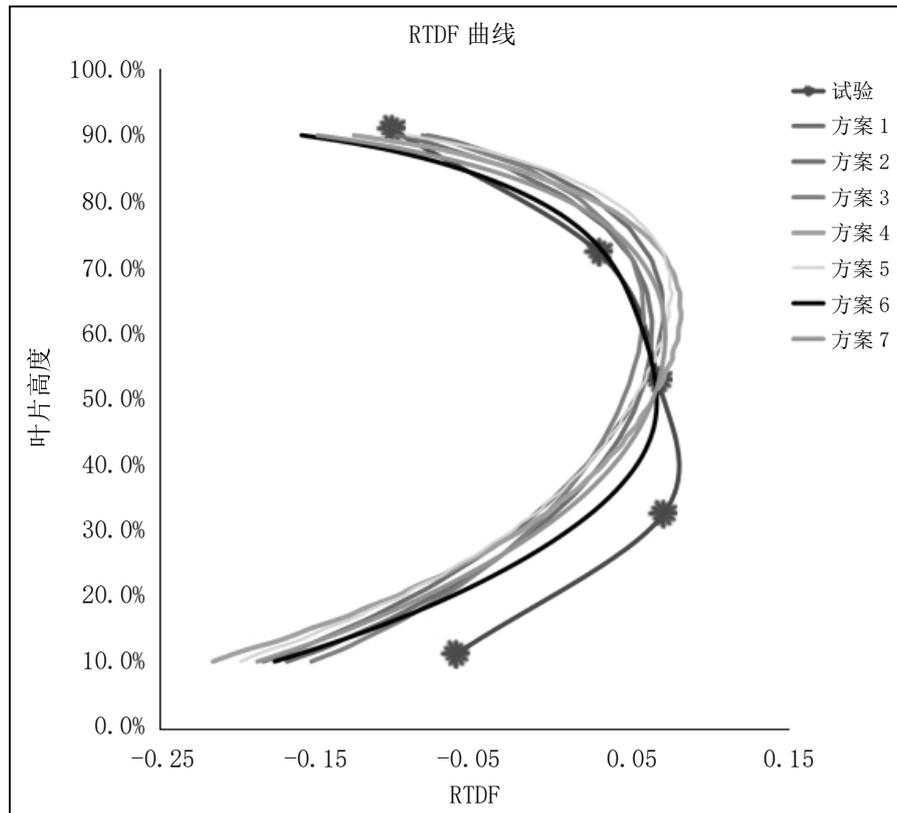


图2 各计算方案与试验结果出口 RTDF 曲线

表3 各计算方案与试验结果的偏差

计算方案	出口平均温度	OTDF	RTDF	最大 RTDF 位置偏差 / 总叶高
方案 1	2.18%	-38.08%	0.00%	30%
方案 2	1.59%	-38.08%	0.00%	29%
方案 3	1.97%	-32.31%	-18.57%	30%
方案 4	-0.65%	-16.00%	15.86%	30%
方案 5	-0.34%	-17.69%	7.14%	31%
方案 6	-0.13%	-12.31%	-5.71%	18%
方案 7	0.89%	-17.69%	1.43%	28%

2. 各方案计算结果的出口平均温度均与试验结果一致,最大偏差为 2.18%,网格和燃烧模型对燃烧室出口平均温度影响很小,主要影响出口温度的分布。

3. 多面体-六面体核心网格比混合网格计算结果的 OTDF 值更接近试验值。

[2] 吴超,徐让书,等.某型航空发动机燃烧室出口温度场数值模拟[J].沈阳航空工业学院学报,2009,24(02):1-4.

[3] 祁海鹰,樊凡.燃烧室出口温度分布偏差的机理[J].燃烧科学与技术,2013,19(02):121-127.

[4] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.

[5] 黄勇,林宇震,等.燃烧与燃烧室[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009.

参考文献:

[1] 范珍涪,程波,等.反应机理对燃烧室出口温度分布仿真结果的影响[J].燃气涡轮试验与研究,2016,29(04):17-21.