

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.028

预混旋流器回火数值模拟方法研究

刘猛, 沈宇豪, 田泽民

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:在预混旋流燃烧室的基础上设计模型燃烧室,并以此为研究对象,运用数值仿真研究了EDC燃烧模型下,不同湍流模型对于预测燃烧室回火特性的准确性。结果表明:EDC模型和湍流 $k-\varepsilon$ 模型不能用于计算回火现象;EDC模型和SW-RNG模型可用于快速预测燃烧室的火焰现象,在工程实践中具有较好的应用前景。

关键词:仿真;燃烧;回火;燃烧室;预混旋流器

中图分类号:TK421 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0144-04

Study on Numerical Simulation Method for Flashback in Premixed Swirlers

Liu Meng, Shen Yuhao, Tian Zemin

(college of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A model combustor was designed based on a premixed swirl combustor and taken as the research object. Numerical simulation was employed to investigate the accuracy of different turbulence models in predicting the flashback characteristics of the combustor under the EDC combustion model. The results indicate that the EDC model combined with the turbulence $k-\varepsilon$ model cannot be used to calculate the flashback phenomenon; the EDC model combined with the SW-RNG model can be used to rapidly predict the flame phenomena in the combustor, showing significant application prospects in engineering practice.

Keywords: simulation; combustion; flashback; combustor combustor; premixed swirler

0 引言

燃烧室内的回火问题是一个复杂的非稳态燃烧过程。其主要现象表现为燃料在预混区域内燃烧造成燃烧室头部结构的烧蚀。从20世纪开始,已有大量学者开展了相关研究^[1-3]。回火现象发生的机制复杂,一般难以通过特定的试验装置复现回火现象。目前的回火试验研究中,针对特定的试验件的结构一般采用改变燃烧室的边界条件来捕捉这一物理现象,如通过调节来流的空气流量、调节燃油的流量和改变下游压力等。但试验中由于结构、气动参数在回火边界之外,多次调节边界条件仍未发生火焰回火现象。而通过数值模拟方法可提前预测燃烧室的回火边界,以便进行后续的工程研究。针对非稳态的回火过程,尽管大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法能较好的预测非稳态过程,既能获得流场平均量,又能获得大尺度涡旋的脉动信息。但LES对于网格尺度有着较高的要求。特别是壁面附近的惯性子区,导致所需要的计算代价极大^[4-5],制约了LES在工程应用中快速获得回火边界并初步捕捉回火动态过程的大规模应用。而雷诺平均数值模拟

(RANS)计算量小,能够获得运动的平均物理量,满足工程计算的需要。

现阶段,关于燃烧室的回火机制的研究主要基于LES方法,研究周期较长。目前尚缺少面向工程应用的数值模拟方法。本文通过数值模拟方法探究基于涡耗散概念(eddy dissipation concept, EDC)模型下,不同湍流模型是否可以作为捕捉回火现象的可选模型。

1 计算模型简介

1.1 物理模型

本文选用的模型燃烧室结构如图1所示。首先加热空气从右侧的进气管道内送入,经过由20个叶片组成的径向旋流通道进入长度为305 mm的预混管道。燃料通过位于中间位置的供油管路,在压差的作用下喷入旋流叶片通道内。燃料的喷口直径为1 mm,共20个,分布在旋流叶片组成的通道之间。这样的设计保证空气与燃料在旋流通道中开始混合,并在预混预蒸发管中充分蒸发形成可燃预混合气。在燃烧室中点火燃烧,理想情况下,在一定的气动参数条件下,火焰将进入预混通道内,发生回火。

为了计算的便捷性,对上述试验件的结构进

第一作者简介:刘猛(1997—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为燃烧室设计,liumeng19971026@163.com。

行了简化,只保留局部的进气管道。由于进口边界条件采用质量流量进口,因此这种简化对计算结果不会产生影响。在燃烧室中通过调整背压实现与试验相同的流速。用于数值模拟的模型保留了与实际试验件相同的旋流器结构和预混通道结构,其截面如图2所示。

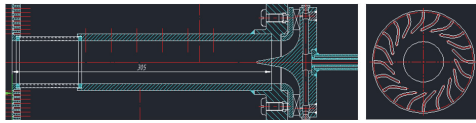


图1 预混燃烧室剖面图及其旋流器结构



图2 简化结构图

1.2 计算模型的选择

回火过程是一个非稳态湍流燃烧过程,在数值模拟中,需要考虑多种影响因素,包括:湍流模型的选择、燃烧模型的选择、喷雾模型的选择、离散与求解方法的选择。此外,边界条件的设置和模型网格的影响也必须考虑在内。

在模拟过程中,燃烧模型选用 EDC 燃烧模型。EDC 燃烧模型描述的燃烧过程发生在湍流精细尺度中,理论上可以耦合详细的氧化机制。EDC 燃烧模型将湍流微团看作定压燃烧器,利用

湍动能和湍流耗散率计算微型燃烧器的空间和时间参数,在耦合(详细的)反应机制后,可以求解得到各个组分的质量分数。

本文研究的湍流模型包括标准 $k-\varepsilon$ 、涡旋主导 RNG 模型(SW-RNG)、RNG 模型。标准 $k-\varepsilon$ 是目前应用最为广泛的湍流模型,预测结果相对较为稳定,但是标准 $k-\varepsilon$ 在分离和强流线曲率的复杂流场预测中表现不佳。RNG 模型相较于标准 $k-\varepsilon$ 在处理应变率高及流线弯曲程度较大的流动方面更具优势。勾选了涡旋主导流动(swirl dominated flow, SW)的 RNG 模型可以提高涡流(如盘腔)的计算精度。

1.3 简化机制的选择

一般碳氢燃料的详细反应机制包含几十甚至几百种组分,涉及上千个基元反应,可以较准确地表征燃料燃烧的化学过程。然而,详细反应机制过于复杂,目前仍无法直接用于 CFD 数值计算。因此本文选用甲烷的四步反应机制^[6]作为模拟计算的机制。如表1所示,四步机制由于具有相对较少的基元反应能直接应用于燃烧模拟,也可以作为低维燃烧模型(如小火焰模型)的输入条件。之前的文献比较了四步机制和正癸烷、正十二烷以及正庚烷的氧化特性的表征能力;发现在压力为 1 atm(1 atm=101.325 kPa)和当量比为 1.2 以下时,甲烷的着火滞燃期与大分子的吻合度很好。因此甲烷四步机制可以满足工程应用的需求。

表1 简化甲烷4步反应机制

化学反应	物种系数	A	n	Ea/cal (1 cal $\approx$ 4.184 J)
$\text{CH}_4 + 0.5\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	$\text{CH}_4 : 0.70, \text{O}_2 : 0.97$	1.400×10^{12}	0.80	36 500
$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 : 0.55, \text{O}_2 : 1.01$	1.266×10^{18}	-1.48	40 000
$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$	$\text{CO} : 1.00, \text{O}_2 : 0.50$	2.333×10^{13}	-0.40	35 500
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$		2.836×10^{13}	0.40	32 857

1.4 燃烧室模拟工况

表2通过实际试验观察到的回火现象,拟定

了计算工况。

表2 几种 RANS 方法比较的计算工况

单位:g/s

编号	模型	空气流量	燃料流量	编号	模型	空气流量	燃料流量
CaseA1	$k-\varepsilon$	25	1.50	CaseC1	RNG	10	0.32
CaseA2		25	1.00	CaseC2		10	0.50
CaseA3		50	2.10	CaseC3		25	0.70
CaseA4		50	4.50	CaseC4		25	1.20
CaseB1	SW-RNG	50	1.00	CaseC5		50	2.00
CaseB2		50	2.00	CaseC6		50	5.20
CaseB3		50	4.00				

2 结果分析

2.1 EDC 燃烧模型下,不同湍流模型的温度比较

图3所示是各典型算例的计算结果。其中图3(a)是标准 $k-\varepsilon$ 模型下获得的火焰形态,可以看到在各工况条件下都能点火成功且火焰稳定在燃烧室中,火焰呈现中心凹陷的旋涡形特征,与文献[7]所报道的无钝体燃烧室的火焰形态一致。在25 g/s空气流量下,燃料流量从1.00 g/s增加到1.50 g/s,即当量比从0.69增加到1.02的过程中,未出现明显的火焰形态变化。在50 g/s空气流量下,燃料流量从2.10 g/s增加到4.50 g/s,即当量比从0.72增加到1.55也没有观察到火焰的形态变化。由此认为:采用标准 $k-\varepsilon$ 模型的数值模拟结果难以发生回火现象。

图3(b)所示的结果采用以旋涡主导的RNG模型耦合EDC方法,计算了50 g/s进口空气条件

下,燃料流量分别为1.00 g/s、2.00 g/s、4.00 g/s时的温度场。在此计算方法条件下,各种工况的火焰形态也十分相似,即中心区域的火焰总是落在了预混管内部,表明回火极容易发生。最后,以RNG模型计算了空气流量为10 g/s、25 g/s、50 g/s,不同燃料流量的稳定燃烧情况,从图3中可以看到,10 g/s和25 g/s的空气流量条件下,当油气比增加后,火焰从燃烧室进入预混管中。在10 g/s的工况下,燃料流量为0.32 g/s和0.50 g/s均观察到火焰进入预混管且直达底部。在25 g/s工况下,燃料流量为0.70 g/s时,火焰稳定在燃烧室中,此时的油气比为0.028,当量比为0.48。在另一个燃料流量为1.20 g/s的条件下(当量比0.82,油气比0.048),则发生了回火。但当空气流量增加到50 g/s以后,使用RNG方法,也难以获得回火的现象,将油气比提高到0.104(燃油流量为5.20 g/s),也无回火现象发生。

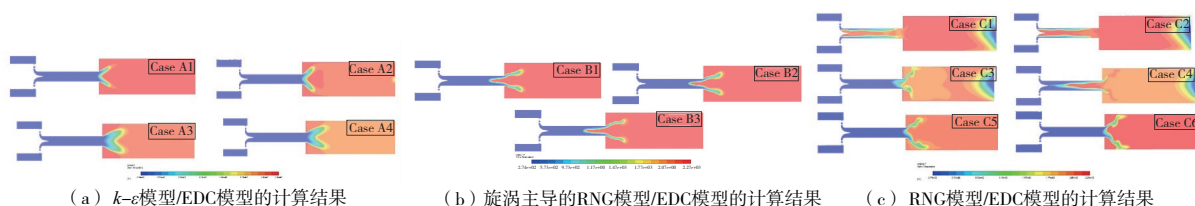


图3 燃烧室中心截面上的温度云图

2.2 EDC 燃烧模型下,不同湍流模型的速度比较

如图4所示,不同湍流模型获得了差异明显的火焰情况,主要的原因是流场的计算结果不同。从图4(a)中可以看出, $k-\varepsilon$ 模型得到的流场均匀性很好,预混管出口的下游形成了一个较大的回

流区。而旋涡主导的RNG模型,在靠近预混管的出口处总是形成一个极强的负速度区。RNG模型获得的流场,在燃烧室内存在角旋涡和两侧对峙的侧旋涡。当回流发生时,强负速度区域从预混管出口位置移动到了预混管上游。

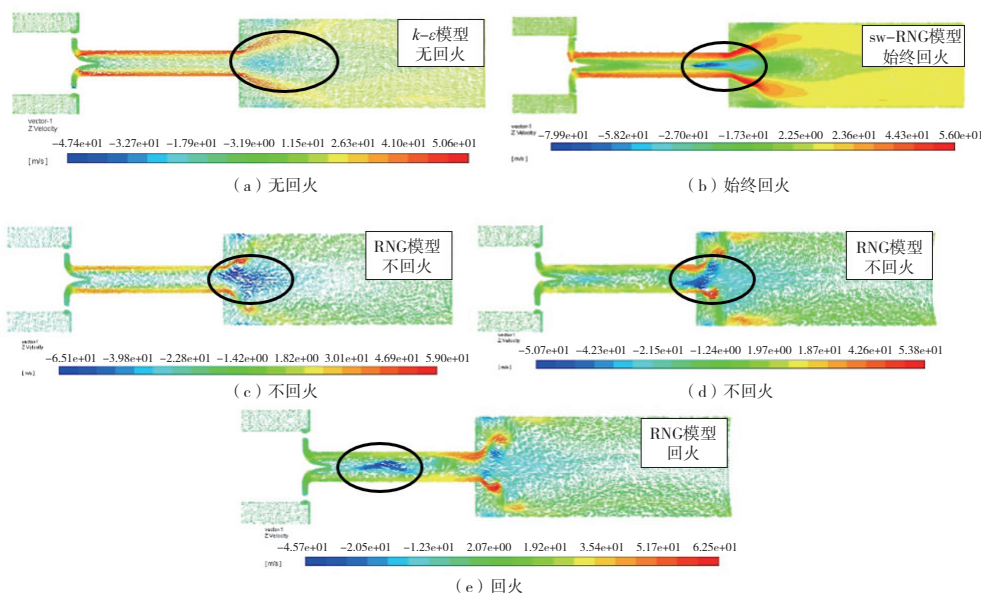


图4 不同湍流模型获得的中心截面速度矢量(轴向速度分布)

此外,对比了各种工况条件下的预混管和燃烧室中轴线上压力和速度的结果,如图5所示。从图5中可以看到,以各种模型计算获得压力结果来看,在预混管内部,无火焰存在的情况下,压

力总是低于燃烧室外压力的。然而,从图5(a)可以看到,当回火发生时,火焰进入预混管道,压力增大,呈现大于燃烧室外压力的规律。

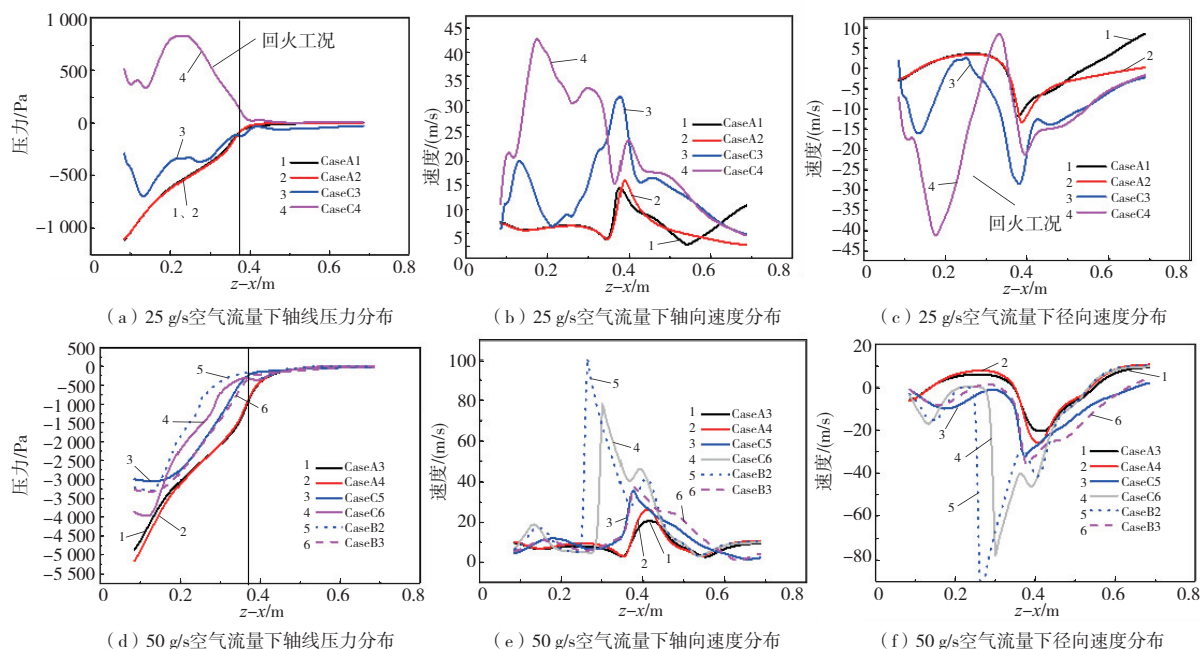


图5 不同 RANS 方法获得的轴线方向压力、速度分布

本文利用了试验研究来验证数值模拟的合理性,具体试验方法及试验设备的介绍可参考文献[7]。试验中通过保持燃料压力及流量不变,通过缓慢升高背压,来达到提高进口总压的效果。由于空气进口质量流量不变,进口速度随着总压的升高而降低,进而影响预混通道内混合气体及其整个燃烧室流场的速度,进而改变局部流动速度与火焰传播速度的相对关系而推动回火的产生。表3选取了两组典型工况的对比试验,分别为两组回火工况与两组不回火工况。

表3 回火试验工况

工况编号	空气流量/(g/s)	燃料流量/(g/s)	是否回火
1	236.74	6.10	是
2	235.65	6.90	是
4	193.37	3.26	否
5	218.86	6.65	否

图6为EDC耦合3种RANS湍流模型的温度云图,可以看到; $k-\varepsilon$ 模型/EDC模型预测的燃烧室未发生回火(图6(a));SW-RNG湍流模型在预测预混燃烧室回火现象中与试验结果符合较好(图6(b))。

针对工况1 RNG模型能较好地预测回火现

象,对于工况2却未能成功预测。由此可见,SW-RNG湍流模型相比其他两种RANS方法,更适用于预混旋流燃烧室回火边界的计算。满足预混旋流燃烧室回火预测工程应用的要求。如图6所示不同RANS方法获得的轴线方向压力、速度分布。

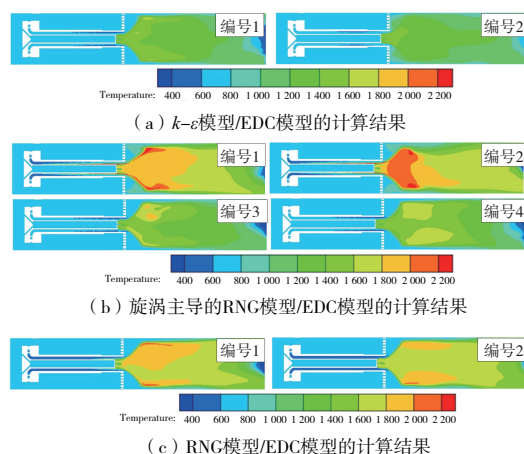


图6 燃烧室中心截面上的温度分布

3 结语

本文采用数值模拟结合试验方法,探究 EDC
(下转第 157 页)

- 2022,39(1):93-97.
- [9] 胡宁沙,梁晓曦,闫红梅,等. 温排水热能利用-海淡原水热能利用技术方案研究[J]. 给水排水,2024,60(增刊1):611-614,622.
- [10] 李雁飞,冯巧莲,蔡德华,等. 基于 Simulink 的余热驱动冷-淡联产系统动态特性分析[J]. 海军工程大学学报,2022,34(4):87-92.
- [11] 王宇辰,江斌. 热泵辅助的露点蒸发海水淡化装置初步研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(3):315-319.
- [12] 侯峰,张爽,刘瑞,等. 低温多效海水淡化蒸发器换热管振动监测与分析[J]. 噪声与振动控制,2022,42(1):150-155,161.
- [13] 袁合涛,彭昌盛. 光热光电驱动的海岛型太阳能海水淡化装置研制与性能分析[J]. 环境工程,2022,40(11):165-170,181.
- [14] 毕俊召,刘碧伟,罗伟忠. 用于液体容器内液位测量的金属薄壁梁振动模态仿真研究[J]. 机械设计与制造,2024(7):50-56.
- [15] 周琦,夏兆东,成昱廷,等. 铀溶液多体系统核临界安全实验不确定度分析与基准化[J]. 原子能科学技术,2024,58(6):1319-1326.
- [16] 丁俊杰,马万太,张遵祥. 基于内模控制的喷射成形漏包液位时滞控制策略[J]. 机械制造与自动化,2024,53(4):250-254.
- [17] 张锋,李梦蛟,张权,等. 基于模糊 PID 算法的新型双电源自动切换控制器设计[J]. 自动化应用,2025(9):50-52.
- [18] 舒一鸣,戴毅茹. 基于高斯-柯西混合变异的多目标粒子群算法[J]. 计算机与数字工程,2024,52(6):1593-1597,1603.
- [19] 王毅,秦小鹏,胡垚,等. 基于遗传模糊控制的燃料电池混合动力汽车燃油经济性提高方法[J]. 汽车电器,2025(1):23-27.
- [20] 朱嵘涛,何朝霞,王腾,等. 基于模糊自适应 PID 算法的直流电机控制设计[J]. 现代电子技术,2025,48(2):103-108.
- [21] 王桥. 自适应机制赋能模糊控制规则库——电机控制优化[J]. 日用电器,2024(12):136-140.
- [22] 黄国争. 双轮铣槽机进给压力自适应模糊控制算法研究[J]. 中国机械,2024(32):33-36.
- [23] 石礁,顾泽明,郭凯. 自适应模糊 PID 控制器的电气设备温度控制研究[J]. 计算技术与自动化,2024,43(3):26-30.
- [24] 肖浩,李涛. 基于 PSO-模糊 PID 电液伺服系统控制[J]. 机床与液压,2025,53(10):139-144.
- [25] 李立,蔡思捷,沈志煌,等. 考虑磁悬浮轴承非线性特征的空间自适应 PID 控制方法[J]. 福州大学学报(自然科学版),2025,53(3):309-317.

收稿日期:2025-06-10

(上接第 147 页)

模型耦合不同 RANS 湍流模型,在预测燃烧室回火时的准确性。结果表明:

1) 湍流 $k-\varepsilon$ 模型耦合诸如典型 EDC 模型的燃烧模型用于计算回火现象比较困难;

2) 湍流涡旋主导 RNG 模型可用于快速预测燃烧室的回火现象,在工程实践中具有一定的应用意义。

3) 数值模拟中尽管 RANS 耦合燃烧模型能捕捉到回火过程,但是受到湍流模型的限制,若要针对回火边界小尺度涡的研究,需要考虑其他的计算方法。

参考文献:

- [1] 李文栋,张文普. 预混燃烧边界层回火的数理模型及研究进展[J]. 应用数学和力学,2023,44(1):36-51.
- [2] 张文普,李宇斌. 燃气轮机燃烧回火机理与数值模拟

的研究进展[J]. 燃烧科学与技术,2016,22(5):385-401.

- [3] 曹敏,张文普. 贫油直喷燃烧室回火的数值研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1111-1116.
- [4] 乔英杰,毛荣海. 贫油预混预蒸发燃烧室回火现象的大涡模拟[J]. 航空学报,2014,35(6):1505-1512.
- [5] 李想,王军,宋彩玉,等. 障碍物条件下氢气火焰传播特性的大涡模拟计算[J]. 油气储运,2024,43(2):144-152.
- [6] Wei Z N, Li M H, Li S, et al. Development of natural gas chemical kinetic mechanisms and application in engines: a review[J]. ACS Omega, 2021, 6(37): 23643-23653.
- [7] 杨琨. 基于模型燃烧室的回火过程和机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2022.

收稿日期:2024-02-28