文章编号：1000-8055(2024)11-20220948-14 doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220948

基于模型燃烧室的回火过程数值模拟和机理

杨 琨[1]，田泽民[1]，刘重阳[2]，齐东东[2]，颜应文[1]

（1. 南京航空航天大学 能源与动力学院，南京 210016；
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院，四川 绵阳 621000）

摘 要： 以旋流预混模型燃烧室为对象，基于试验手段获得了不同压力下航空煤油预混火焰的回火发生边界条件及其动态过程。以此为基础，基于雷诺平均方法，利用 realizable k-ε 及小火焰生成模型（FGM），数值地复现了回火发生的临界状态。数值计算获得的回火压力边界与试验结果相比，误差不超过 10%。利用大涡模拟方法，精细化再现了典型工况下回火的发生和发展过程。分析表明，下游压力增加引起预混通道出口附近压力和密度脉动耦合变化，产生具有负速度区的逆向涡旋。下游压力持续增大使逆向涡旋增大，将预混通道外的热焰带入通道内，诱发回火。进一步，在斜压梯度的作用下，预混通道内的火焰不断向上游传播。

关 键 词： 旋流预混燃烧室；回火；数值模拟；贫燃预混；液态燃料

中图分类号： V231.1 **文献标志码：** A

Numerical simulation and mechanism of flame flashback process based on model combustor

YANG Kun[1], TIAN Zemin[1], LIU Chongyang[2], QI Dongdong[2], YAN Yingwen[1]

（1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment,
Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China）

Abstract: The boundary conditions and propagation process of flame flashback were experimentally obtained for aviation kerosene at different pressures in a premixed swirl model combustor. The reliable k-ε model of Reynolds average Navier-Stokes method, coupled with flamelet generated method (FGM), was applied to numerically capture the flame flashback. It was shown that the simulated critical pressure conditions were within 10% errors compared with the experimental results. Then the large eddy simulation method was used to reproduce the flame flashback process in detail. The analysis showed that the combination of fluctuations of pressure and density in the region near the exit of premix tube caused by increase of downstream pressure yielded reverse eddy with minus speed. As the reversed eddy was enlarged with the increase in downstream pressure, the hot flame outside the exit of premix tube was brought into the tube, which induced flame flashback. Then the flame in the premix tube propagated upstream due to the influence of baroclinic pressure.

Keywords: swirl premixed combustion chamber; flame flashback; numerical simulation; lean fuel premixing; liquid fuel

收稿日期： 2022-12-10

基金项目： 中国航发涡轮院稳定支持项目（GJCZ-2020-0039）

作者简介： 杨琨（1998—），男，硕士生，主要从事航空发动机燃烧数值计算研究。

通信作者： 田泽民（1991—），男，讲师，博士，主要从事航空发动机燃烧技术研究。E-mail: tzm@nuaa.edu.cn

引用格式： 杨琨, 田泽民, 刘重阳, 等. 基于模型燃烧室的回火过程数值模拟和机理[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220948. YANG Kun, TIAN Zemin, LIU Chongyang, et al. Numerical simulation and mechanism of flame flashback process based on model combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220948.

在预混贫油燃烧方式下,因为各种原因导致火焰从燃烧室内回传到预混管中,称为回火现象。它是贫燃预混燃烧过程中经常出现的燃烧不稳定性问题,不仅严重影响了燃烧室的性能,也大大提高了燃烧过程中污染物的排放。从 20 世纪开始,已有大量学者开展了相关研究。研究发现可以引起回火的机制众多,主要有:自发点火、边界层回火、中心流回火、燃烧不稳定引发回火、燃烧诱发涡旋破碎诱导回火。

燃烧室的结构参数对于燃烧室的流场分布,火焰位置以及回火方式及回火临界值都有着重大的影响。通过改变旋流燃烧室结构参数来观察燃烧室回火特性也是部分学者在过往研究一个十分重要的方向。对于旋流燃烧室而言,喷嘴结构、旋流位置、中心钝体等结构改变都是可以用于研究的思路。

魏星[1]以丙烷为燃料,对旋流突扩燃烧室贫燃预混燃烧进行研究。利用高速摄影和 PIV(particle image velocimetry)拍摄和观察火焰形态。研究发现,随着当量比减小,燃烧室内火焰结构会经历一系列转变,上述火焰形态转变可以通过增加燃烧室直径来影响。同时,在不同火焰形态下,燃烧室流场内角回流区出现涡的频率也会受到影响,突扩截面角度也会影响旋流燃烧中的角回流区和剪切层的产生。结果表明,在发生角回流区回火时,角回流区内流动加剧,角回流区内涡出现频率更高,角回流区火焰的出现与角回流区涡出现的频率呈线性关系。

母滨等[2]通过敏感性分析和不确定性分析方法,建立了复杂的 CRN(chemical reactor network)模型对贫燃预混燃烧室 NOx 排放特性进行了系统研究,确定了烟气停留时间及其回流比例关系及其对大气 NOx 摩尔分数排放强度预测模型的重要影响。

杨亚晶等[3]通过对模型燃烧室贫燃预混燃烧稳定性的数值研究,对于当量比和旋流数两个因素对于贫燃预混燃烧稳定性的影响。研究表明,在贫预混燃烧中,基本振荡频率随着当量比和旋流数的增加而逐渐增大。

在有关回火的文献中,针对燃料与氧化剂当量比对于旋流燃烧器回火性能影响的试验及数值模拟研究数量最为庞大,理论最为系统,研究方法最容易实现,且可以科学地阐释回火临界值这一抽象概念对于贫燃预混燃烧室的实际物理意义,将燃烧室的稳定火焰与回火火焰在数值条件上区分开来。经过往学者的研究表明,燃料当量比的变化和燃烧室内火焰的回火和吹熄直接相关,通过在合理区间调整当量比,可以科学地得到一系列回火和吹熄边界[4-6]。同时,在燃料中加入氢气、二氧化碳等改变燃料组分以研究回火机制的方法也较为常见[7-15]。

宋权斌[16]对比了多旋流燃烧室与单旋流燃烧室的回火过程,得出不管是多旋流燃烧室还是单旋流燃烧室,氢气摩尔分数越大,越容易回火。

郭乔轩[17]对贫预混旋流燃烧器进行了数值模拟研究,以甲烷为燃料,以富氧空气作为氧化剂,使用雷诺应力模型(Reynolds stress model, RSM)结合 FGM(flamelet generated method)燃烧模型进行模型燃烧室回熄火边界的稳态计算,得到不同当量比下的火焰分布。模拟发现,燃烧室火焰在高于某一当量比后发生回火。以此为思路,不断缩小当量比的差值,来获得回火和吹熄的边界,当稳态火焰与回火状态下火焰当量比足够小时,以稳态火焰当量比为初始条件,进行非稳态计算,来完成火焰由稳定向回火状态的转变。通过这种方法,得到一系列回火与吹熄的临界当量比值。除此之外,郭还对自行设计的旋流燃烧器以相同的方法进行了非稳态数值模拟,同样得到了该旋流燃烧器的回火临界当量比。同时,研究表明,加氢燃料比普通的燃料更容易引发燃烧室的回火,因为加氢燃料进行试验得到的回火临界当量比更低。

曹敏等[18]对于组内贫油直喷燃烧室进行了数值研究,通过改变进口空气流量和航空煤油质量流量,从而改变燃料与氧化剂的当量比,从而引发了回火。曹首先通过稳态计算得到贫油直喷燃烧室的火焰稳定状态,作为初始状态的边界条件后,改变进口边界条件数值从而增大当量比,引起回火的发生,应用 LES(大涡模拟)的计算方法成功复现了燃烧室回火过程。通过中心截面 OH 摩尔分数来判断剧烈化学反应的发生,并以此为根据得到火焰前锋与喷嘴的距离,记录回火发生时燃烧室内的状态变化。

樊艳娜[19]搭建了含 PIV 的贫预混旋流燃烧试验台,进行了冷态和热态试验以及贫燃吹熄和回火试验,并进行冷态及热态流场的 PIV 分析,试验结果表明,相较于冷态流场的回流区位置,热态条件下,回流区中心位置向燃烧室下游移动,

且角回流区缩小，最大回流速度减小。当量比大小对于回火影响很大，随着当量比增大，角回流区先被点燃，随后火焰向上游预混通道传播。

Ebi 等[20]在 0.1 MPa、473 K 的预热温度混气来流下的火焰回火进行了系统的研究，采用高速成像和激光诊断用于表征火焰传播路径和火焰形状，研究了甲烷-氢气-空气火焰的边界层回火。研究结果表明，与之前的涡流火焰研究相比，火焰传播路径不同，它决定了回火的相关流-火焰相互作用。发现当前配置中的回火特征与非涡流边界层中的回火相似。混合气体氢的体积分数从 50% 增加到 100% 时，回火倾向的增加，回火极限降低。

部分学者从涡量方程角度出发，对稳定燃烧旋流结构的核心涡进行了研究，对稳定燃烧旋流结构的核心涡进行了研究[21-22]，证明了燃烧引起的斜压扭矩对于回火的影响。乔英杰等[23]采用 LES 方法及部分预混燃烧模型对以航空煤油为燃料的低排放燃烧室进行了数值模拟，成功重现了回火现象的发生和火焰向主燃级上游传播的动态过程，从涡量方程角度对回火现象的起因进行了相关分析，验证了燃烧引起的斜压及体积膨胀是诱发回火现象的主要原因。

以往的回火研究大多为预混燃烧或部分预混燃烧，回火的发生以预混通道等关键部位的火焰分布作为判定依据，建立相应的判定准则。也有部分学者对于燃烧器内不同火焰分布形状进行分类以更精细地划分火焰状态[24-25]。但目前以航空煤油等液体燃料的气液两相燃烧回火问题研究较少，液体燃料的喷射、雾化过程如何影响燃烧室内火焰的发展，包括回火、熄火等过程仍然需要进一步研究。

就回火的影响因素而言，过往研究主要集中在燃烧室结构参数以及燃烧室运行参数对于回火的影响。研究方法上，理论分析、试验研究和数值模拟相结合的方式是回火等非稳态燃烧现象研究的主要途径。与此同时，通过既有燃烧器数据进行数值仿真计算对比验证，并对数值仿真结果进行分析推导，也是比较常见的方式。随着计算机性能的提高，高精度的数值模拟技术得到更广泛的推广，LES 和直接数值模拟方法对于回火问题也发挥了至关重要的作用，LES 和直接数值模拟方法能够很好地解决以往研究中回火发生时间短的问题，并生动复现回火发展历程以及回火发生前后流场变化，成为回火问题研究的主要途径。

以往的研究主要集中在气态燃料，对于液态燃料预混火焰回火过程的研究较少。而且回火的促发机理主要集中在低流速下来流速度与火焰传播速度的不匹配。在本研究中，通过改变压力边界，对航空煤油预蒸发预混合火焰开展回火研究，预混管内流速达到 50 m/s 以上，拓展了回火研究的边界。进一步通过数值计算研究，探究压力变化导致回火发生的机理。

1　研究对象与数值计算方法

1.1　模型燃烧室结构

如图 1 所示为了模型旋流燃烧室的几何结构，气体由进口通入，分别进入外腔体与旋流器，旋流器内均匀排布 10 个直射式喷嘴进行燃油供给。具体的进口气体分配情况如图 2 所示。预混段中心为一个圆管体，出口设置旋流孔阵，以保持出口旋流与气体流经旋流器产生的旋流方向一致的同时，向燃烧室中心提供冷却气体。帽罩上均匀分布孔阵，以防止燃烧室头部角回流区火焰的产生。

在试验过程中，保持进口流量不变，通过调整改变试验燃烧室的背压，从而均匀增大进口压力，使得进入燃烧室的气流速度减小，最终影响来流速度与当地火焰传播速度的相对关系。随着背压的缓慢升高，进口速度逐渐降低，火焰将从燃烧

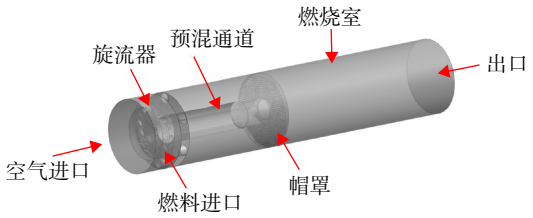


图 1　模型燃烧室示意图

Fig. 1　Schematic diagram of model combustion chamber

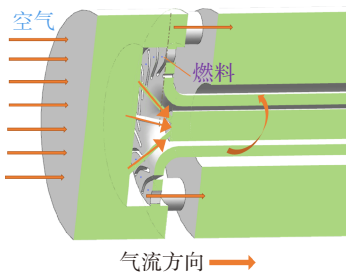


图 2　空气及燃料进口剖面示意图

Fig. 2　Air and fuel inlet profile diagram

室传入预混通道内，发生回火。

1.2 计算域网格

考虑到模型燃烧室尺寸较大，为了在数值计算中最大程度地复现物理几何结构，保留各种微小的气体流通孔，对整体结构进行合理地进行划分，对于不同的部分，选取合适的尺寸和网格类型，才能在保证计算准确性的同时，将网格控制在合理区间内。

网格无关性验证如图 3 所示，选取面平均轴向速度作为比较的指标，横轴为 z 坐标，即轴向坐标，不同数量的网格在燃烧室头部的轴向速度测量表现有差异，当网格量增加到 1 400 万以上时，数值趋于接近，因此，1 400 万网格可以在保证精度的同时节省计算资源，本文选用该套网格进行计算。具体的网格展示如图 4 及图 5 所示。

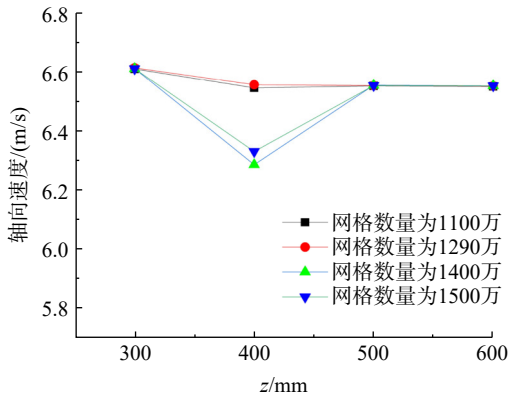


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

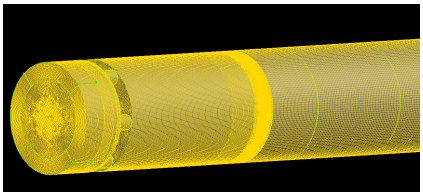


图 4 网格示意图

Fig. 4 Mesh encryption

1.3 数值模拟方法

本研究采用雷诺时均(RANS)方法和 LES 方法针对回火过程开展了数值模拟计算。由于回火的促发是通过逐渐调整压力实现的，采用 RANS 方法可以较快速地再现不同压力及压力变化下的火焰形态，从而获得回火的边界条件。而 LES 方法能够较精细化地展现火焰微团的结构，便于分析回火发生动态过程的机制。因此，在本研究中首先采用 realizable k-ε 模型获得回火边界，然后

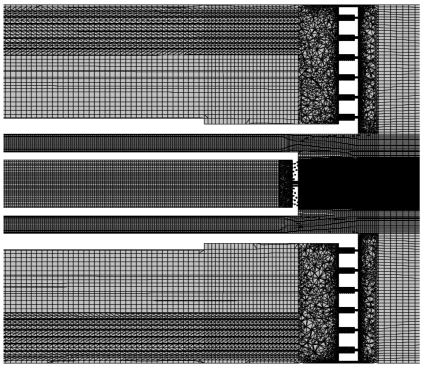


图 5 局部网格示意图

Fig. 5 Local mesh encryption

再用 LES 方法获得回火的动态过程。同时与试验数据对比，验证计算方法的可靠性。进行数值计算。

气相燃烧模型选择适用于部分预混燃烧的火焰面生成模型(FGM)。该模型通过求解混合分数方程和反应过程参数来确定火焰峰面的位置。

考虑到十二烷烃在点火延迟时间、火焰传播速度能够很好地表征实际航空燃料的燃烧性质，选择正十二烷作为实际航空煤油的替代燃料，进行数值计算，采用的了 53 组分 228 步的正十二烷多步反应简化机理[26]进行 FGM 的建表计算。通过离散相模型(DPM)来实现液体燃料的供给。对于锥形喷嘴几何结构设置主要参考真实结构喷嘴安装位置，即均匀分布的 10 个直射式喷嘴。根据实际的燃油量和喷嘴选用的是平口雾化喷嘴(plain-orifice atomizer)，喷嘴内径设置为 0.2 mm。进行根据该燃烧室的喷嘴安装结构和物理位置，将喷射位置设置在喷嘴安装位置，能获得一个较好的流场。

2 试验数据分析及稳态计算

2.1 试验结果分析

在回火特性试验过程中，保持副油路燃油压力不变 750 kPa 不变，以及维持 5 g/s 的燃油流量，副油路燃油压力及燃油流量随时间变化如图 3 所示。同时，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整个燃烧室流场的速度，进而改变局部来流速度与火焰传播速度的相对关系而推动回火的产生。

对于本文所研究的旋流燃烧器，回火的判断标准为是否在预混通道出口上游有火焰的产生和

发展。使用像增强器的高速摄像机对预混通道流场进行光学拍摄，同时在预混通道外壁均匀设置了 6 组热电偶进行温度的监测，如果在通道内发生回火，可以通过高速摄像机记录通道内火焰的发生与发展过程，并通过热电偶得到温度升高的响应。如图 6 所示，随着进口总压的升高，气动条件发生变化，燃烧室总体气流速度降低，在 160 s 左右，局部来流速度达到临界值，小于当地火焰传播速度，进而发生了回火，短时间内热电偶监测温度迅速升高。图 7 反映了在预混通道壁面处等距选取的 6 个监测点（TA1~TA6）温度随时间的变化。试验过程中通过高速摄影仪拍摄的回火过程如图 8 所示。可以观察到，随着进口总压的上升，火焰的位置逐渐从下游靠近预混通道出口处，随后火焰紧贴壁面向上游传播，回火过程伴随着燃烧室下游火焰极不稳定的振荡现象。

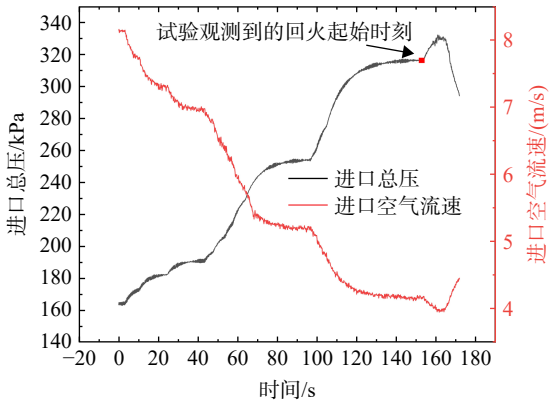


图 6　进口总压及燃烧室进口流速随时间的变化

Fig. 6　Variation of total inlet pressure and inlet velocity of combustion chamber with time

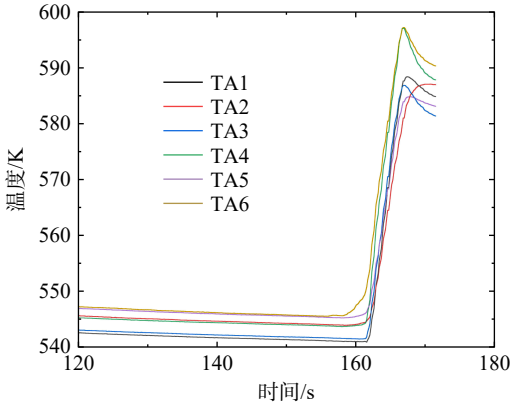


图 7　预混通道壁面处某点温度随时间变化

Fig. 7　Variation of temperature with time at a certain point on the wall of premixed channel

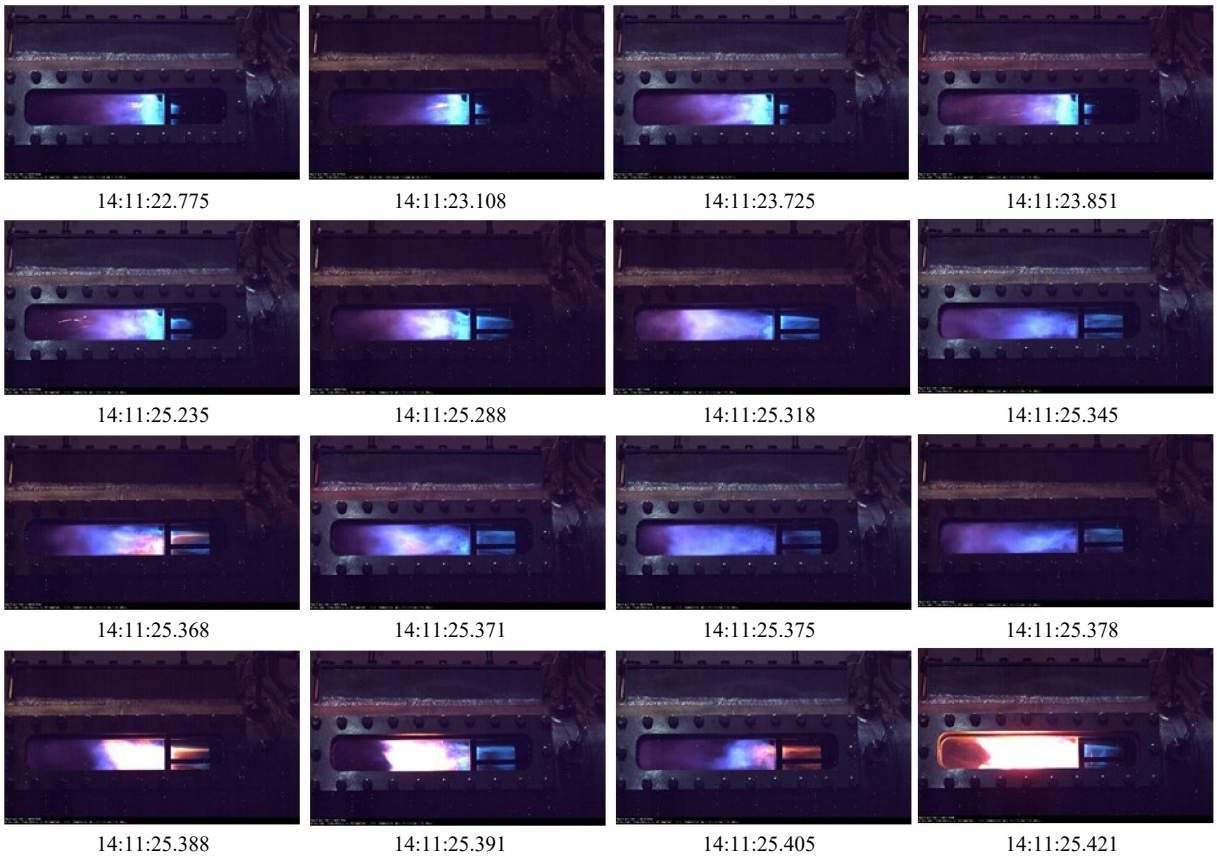


图 8　高速摄影仪拍摄的回火过程（单位：h:min:s）

Fig. 8　Flame flashback process photographed by high-speed camera (unit: h:min:s)

为了验证计算方法的合理性，图 9 展现了通过 RANS 计算出的进口流速随背压升高的变化与实际试验测量结果的对比。可以观察到数值计算结果有较强的可靠性，随着进口总压的升高，试验与 RANS 结果中进口流速都呈现下降趋势，且数值上几乎保持一致，说明数值仿真计算方法基本合理，能够允许进一步研究。

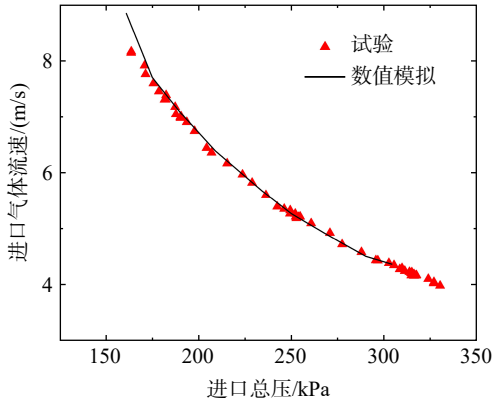


图 9 进口流速随进口总压的变化

Fig. 9 Variation of inlet velocity with inlet total pressure

对于本文所研究的试验模型燃烧器，回火的判断标准为是否在预混通道出口上游有火焰的产生和发展，如果在通道内发生回火，可以通过热电偶得到温度升高的响应。在每个工况中，燃烧室前平均静压记录平均测点温度开始明显上升时的压力，作为信号压力，即回火临界压力。表 1 中展示了试验数据提取的回火临界压力与数值模拟得出的临界压力，图 10 展示了不同工况下回火临界压力的试验与数值结果比较。从对比来看，误差在 1.4%～7.1% 之间。两组数据的对比表明，计算结果误差均小于 10%，平均误差小于 5%，能够说明计算方法的可靠性。

表 1 回火临界压力比较

Table 1 Flame flashback boundary pressure

工况	回火临界压力/kPa		误差/%
	试验	RANS	
1	379	390	3.1
2	380	398	4.7
3	391	401	2.6
4	448	469	4.8
5	434	440	1.4
6	261	262	3.8
7	261	266	2.0
8	285	265	7.1

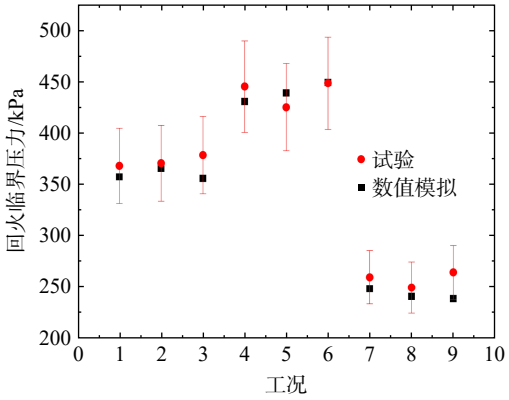


图 10 回火时刻进口总压对比

Fig. 10 Comparison of total inlet pressure at flame flashback

2.2 冷态流场数值计算

为了能够更好地表现回流区的发展，获得部分典型截面中轴线的速度场来观察回流区沿程轴向速度的变化。选取 x 方向为燃烧室径向，z 方向为燃烧室轴向，分别选取燃烧室中间切面处中轴线作为该截面处的代表观测对象。在轴向方向 z=370, 380, 390, 410, 430, 450, 500, 600 mm 处输出该中轴线上的轴向速度。由于回流区的发展伴随着轴向速度分布的变化，选取中轴线的轴向速度能够表征当地回流区状态，并与实际燃烧室的流场分布作比较，中轴线的分布如图 11 所示。

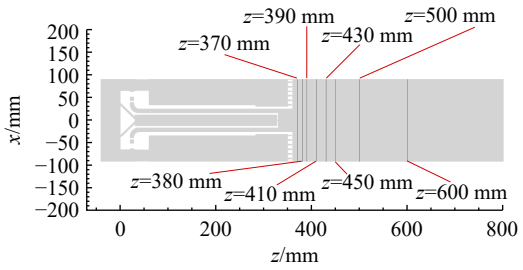


图 11 中轴线分布

Fig. 11 Distribution of central line

如图 12 所示，当轴向坐标为 370～390 mm 时，可以明显看到，半径为 35～40 mm 处有一段轴向速度峰值区，为主回流区与角回流区的交界处，相对于其他位置，有更大的轴向速度。沿主流方向，随着轴向坐标的增大，回流区剪切位置的峰值逐渐消失，取而代之的是更为平滑的过渡，轴向速度沿中心向外逐渐增大，意味着角回流区已经消失，该段完全由主回流区主导。结合图 13 的中心截面流线图，可以更直观地观察主回流区的分布。由于该模型燃烧室并没有主燃孔、掺混孔的截断作用，冷态流场下主回流区长而饱满，纵

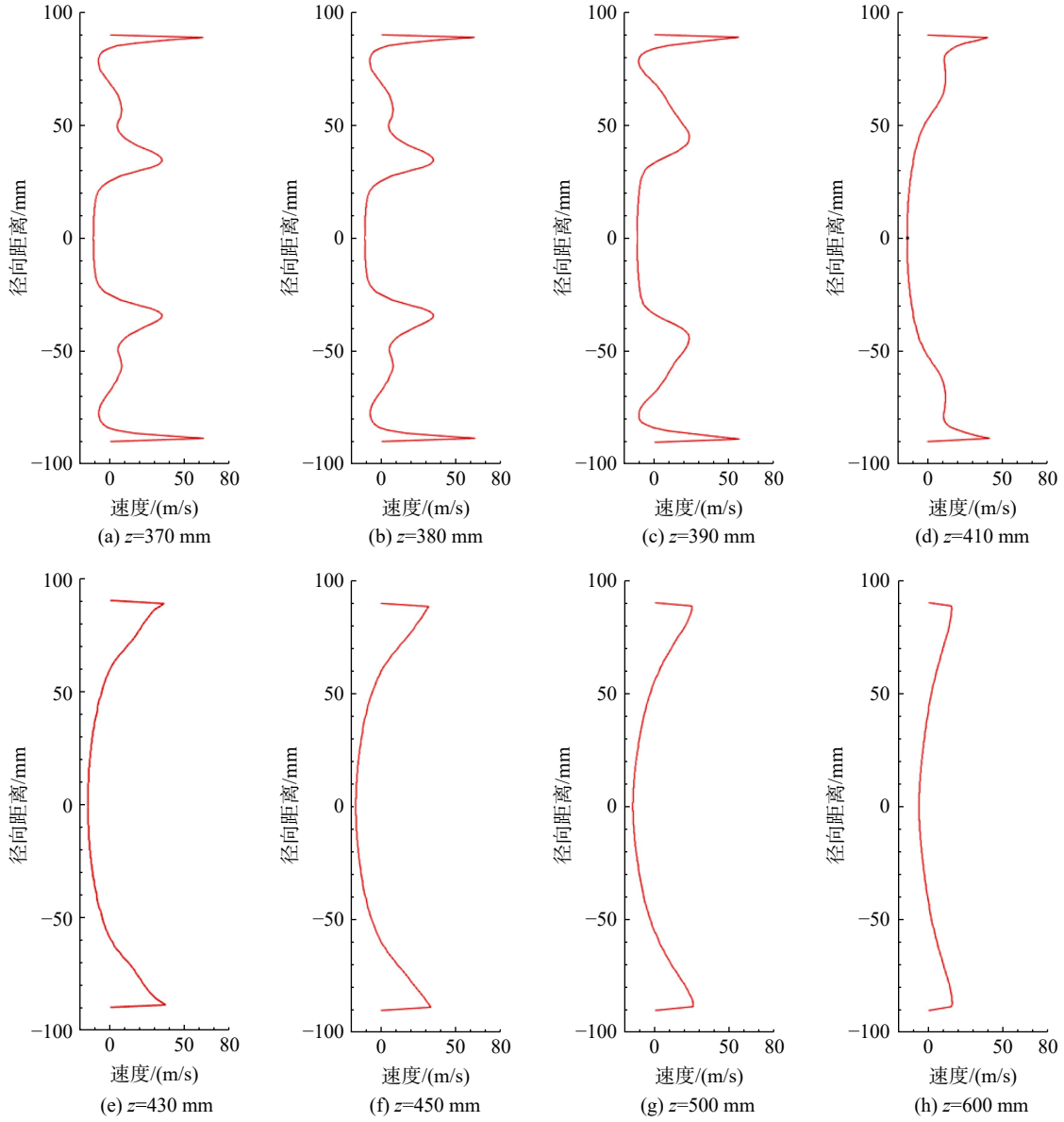


图 12　y=0 mm 截面中轴线轴向速度分布

Fig. 12　Axial velocity distribution of central line on section y=0 mm

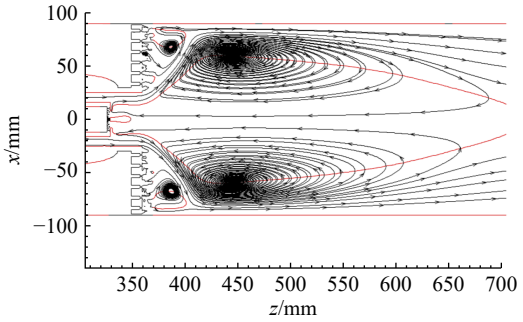


图 13　冷态流场中心截面示意图

Fig. 13　Cold flow field on central section

向尺寸很深。

2.3　热态流场数值计算

选取典型工况(工况 6)进行热态计算，数值地获得回火过程，详细讨论其机理。其中，保持空气进口质量流量为 190 g/s，燃油流量为 5 g/s，油气比为 0.026，当量比经过计算为 0.395。

如图 14 所示，图 14(a)为常压工况下，未发生回火时的中心截面速度分布，而图 14(b)为发生回火后的速度分布。由于火焰出现在预混通道中，导致预混通道内混合气体轴向速度急剧升高，挤压了主回流区的径向尺寸，明显观察到中心回流区在缩小。

主回流区的径向尺寸减小，高温区向后延伸，火焰轴向尺寸增加，视觉上有拉长的变化。同时，由于火焰的作用，在预混通道出口处出现了众多小尺寸涡团。同时，角回流区由于中心区高速流

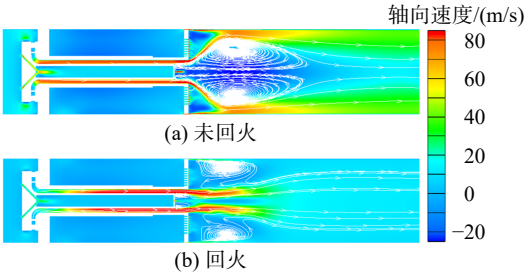


图 14 中心截面速度分布

Fig. 14 Velocity distribution on central section

的存在，有了更大区域的分布。

对热态流场时均计算结果进行了后处理。温度云图如图 15 所示，可以判断火焰锋面在预混通道中的位置。同时，从温度场可以观察到，在预混通道内的火焰前锋紧贴预混管内壁，也与试验中观察到的沿内壁向上游发展一致，高温区开始发生回火进入旋流出口通道，逐渐在出口处产生高温区，且流速增大，原本轴向速度标识已不明显的中心回流区重新出现，贴附在旋流器出口壁面，剪切层因角回流区的扩大受到挤压，下游则受角回流区影响不大，高温区由预混段环形出口外周面沿壁面逐渐向内传播，但回到预混段的高温区域并未有明显的涡结构，判断边界层回火为此贫燃预混旋流器结构下主要的回火方式。根据各压力下高温区的移动趋势表明，回火的发生过程中边界层回流区占据主导，由于预混气进口速度水平并不高，当来流与火焰速度无法匹配，火焰即沿着预混通道出口环面内边界逐渐回到旋流器通道，最终导致回火的发生。随着背压的提高，气体流速的降低，火焰紧贴壁面处向上游传播，并对更大的区域造成影响。

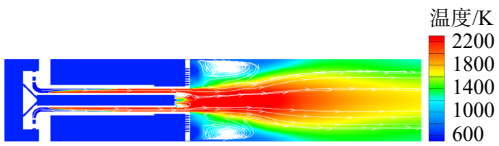


图 15 回火时中心截面温度分布

Fig. 15 Temperature distribution on central section at flame flashback

作为燃烧的中间产物，CO 可以用于表征火焰发生的区域。图 16 展现了不同压力状态下 y=0 mm 截面 CO 的分布。在未回火的状态下，CO 主要分布于旋流产生的剪切层，位于燃烧室前部，预混通道的后方。进口总压升高的热态流场中，可以明显地观察到，预混通道内出现了部

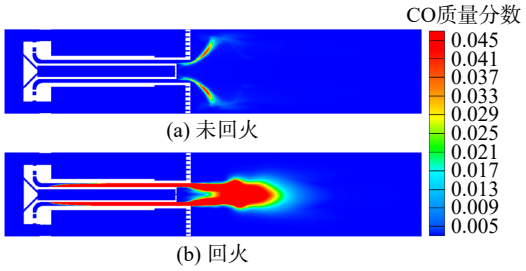


图 16 y=0 mm 中心截面 CO 质量分数分布

Fig. 16 CO mass fraction distribution on y=0 mm central section

分 CO，说明燃烧在预混通道中发生。

如图 17(a)所示，在回火发生前，预混管内并没有火焰产生，压力从内壁处沿径向向外增加；在回火状态时，如图 17(b)所示，压力分布产生变化，压力更明显地沿主流方向减小，梯度沿轴向偏转分布，说明在此处火焰在此处发生，产生了体积膨胀，一定程度上推动了火焰向上游传播。

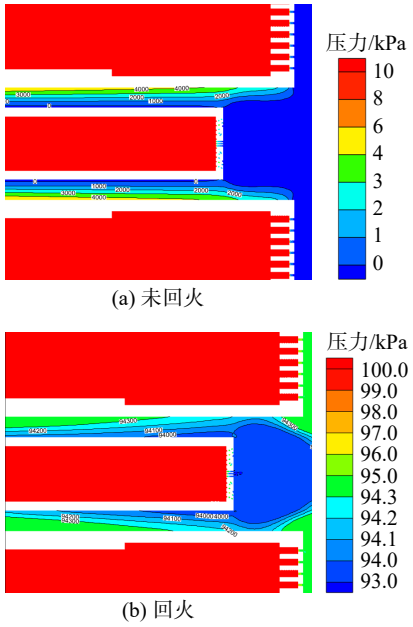


图 17 局部压力分布

Fig. 17 Local pressure distribution

3 LES 计算与回火机理分析

3.1 基于 LES 计算的火焰传播过程分析

为了进一步研究回火的发生过程，选择典型的回火工况，以 RANS 方法获得的稳态火焰为初始条件，改变压力，利用 LES 方法获得回火的动态过程。具体选择表 1 中的工况 6 进行分析，其余工况的结果类似。

如图 18 的温度云图所示，1 ms 时，预混通道

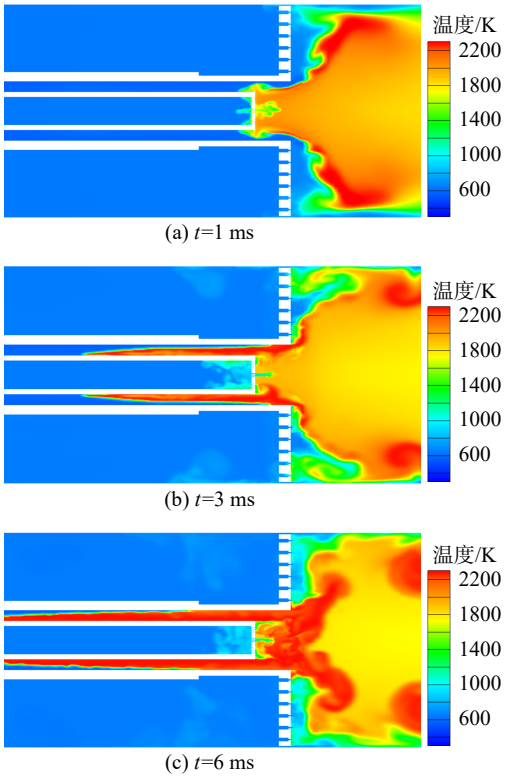


图 18　回火过程中火焰温度分布

Fig. 18　Temperature distribution of flame flashback

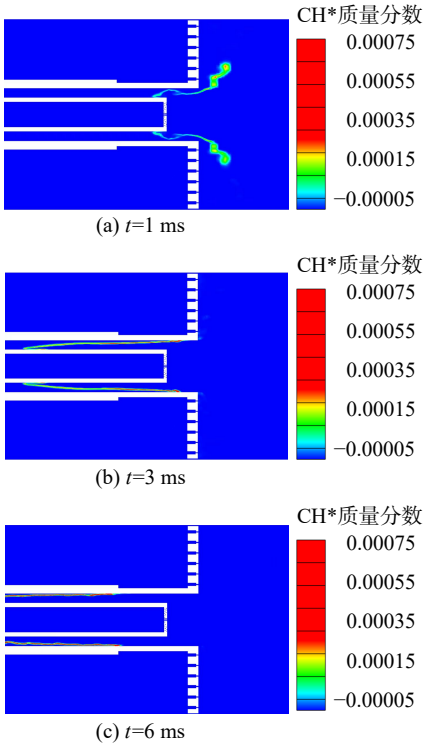


图 19　不同时刻 y=0 mm 中心截面 CH*质量分数分布

Fig. 19　CH* mass fraction distribution on y=0 mm central section at different times

出口处壁面开始出现局部温度上升。同时，逆压的传递导致来流侧的混合气体密度一定程度的升高，混气来流速度下降，来流密度的上升，使得火焰前锋向前推进，最终固定在预混通道内的位置。

图 19 展示了中心截面 CH*分布的变化，CH*作为燃烧的中间产物，常用于火焰锋面的判别，从 CH*云图可以观察到，从 1 ms 开始，在预混通道出口处产生 CH*的斜向分布，随着负速度向上传播，开始火焰前推过程，与此同时，CH*的分布不断向上游发展，可以理解为火焰的位置向上游移动。最终在 6 ms 时，预混通道内的由于升压而产生的负速度消失，火焰前推至最上游，压力梯度开始回归正常，此时火焰有一定的后退趋势，但最终稳定紧贴于预混通道内壁。

回火发生时，预混通道内出现火焰，燃烧过程中产生了体积膨胀，一定程度上推动了火焰向上游传播，膨胀的已燃气体在火焰锋面后的已燃区产生了较高的轴向速度，从预混通道射出的已燃气体一定程度上也改变了主回流区的分布，挤压了主回流区的尺寸，也使燃烧室头部的火焰更为不稳定。

火焰稳定的工况下，压差约 9 kPa，因此，直接给出 20 kPa 的压升，会在短时内剧烈地改变燃烧室流场分布。在实际的试验过程中，背压的升高是一个连续的过程，逆压传递是微小且持续的，实际的变化可能不如模拟出的过程这样剧烈，因此，模拟所得到的结果存在一定的不足，但可以大致描述压力向上传递导致回火发生的过程。

根据第 1 次 LES 结果推测，本研究产生的回火过程大致可以分为以下 3 个阶段：

第 1 阶段（0～6 ms）：在负压影响下，局部回流向上传递的过程，燃烧室流场剧烈变化，上游来流气体密度增大，预混通道内的混气轴向速度受到影响而迅速减小。可能引起负速度及随之发生的火焰向上游传播；该过程在短时间内迅速发生，宏观上有较大的扰动，可以很明显地观察到压力自下游到上游的波动。

第 2 阶段（6～9 ms）：火焰有所回退，速度分布，压力梯度逐渐恢复正常。

第 3 阶段（9 ms～）：火焰前锋锚定在预混通道内边界层固定的位置，伴随近壁面的涡团产生。

3.2　回火的发生和发展机制

如图 20 显示，获得 1 800 K 等温面和 y=0 mm 中心截面的速度分布。对 t_0+0.1、t_0+1.3、t_0+2.1 ms 时刻数据进行输出，t_0 为模拟仿真起始时刻。可以清楚地观察到，回火发生前期，燃烧室短时内

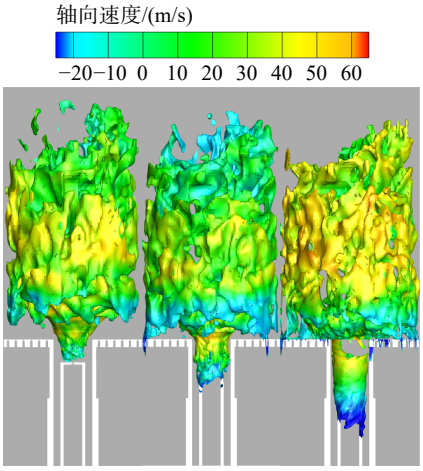
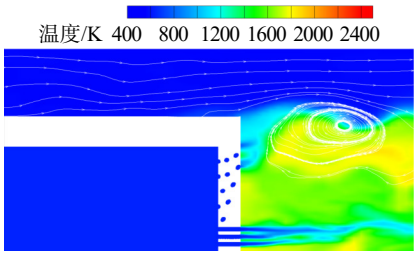


图 20 t_0+0.1、t_0+1.3、t_0+2.1 ms 时刻下 1 800 K 的等温面

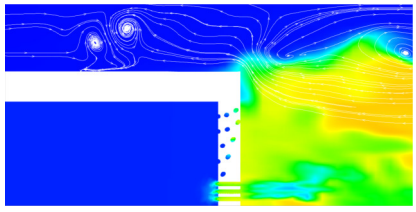
Fig. 20 Isothermal surface of T=1 800 K at t_0+0.1, t_0+1.3, t_0+2.1 ms

出现了大片区域的回流，随着预混通道出口处轴向速度的减小，高温面出现在了预混通道内。

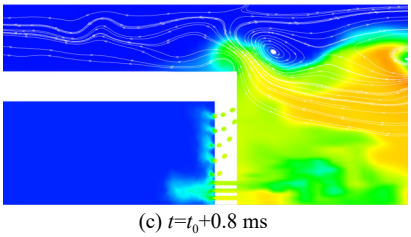
图 21 展示了预混通道出口处的局部放大流线温度云图，在 0.2 ms 时刻，通道内流线沿正向分布，此时火焰还未进入预混通道内，稳定于中心体旋流孔阵出口。在 0.7 ms 时刻的流线图可以发现，预混通道出口处出现了逆向流线，说明随着背压升高，这里出现了局部负速度，与此同时，火焰也沿内壁面进入了预混通道内。而时间到 0.8 ms 时，在图像内的主流都呈现负轴向分布。



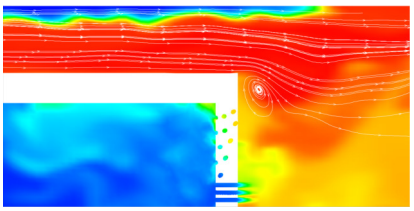
(a) t=t_0+0.2 ms



(b) t=t_0+0.7 ms



(c) t=t_0+0.8 ms



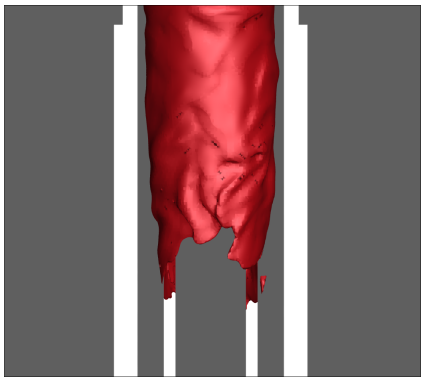
(d) t=t_0+2.7 ms

图 21 y=0 mm 中心截面预混通道出口处局流线图

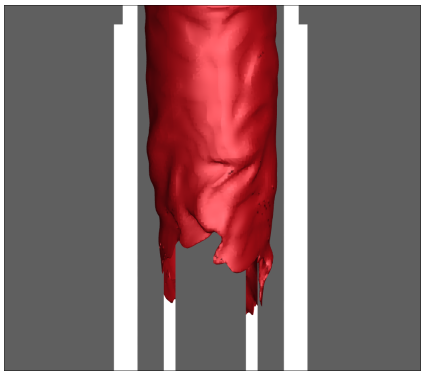
Fig. 21 Streamlines at the outlet of premixed channel on y=0 mm central section

随着火焰进一步向上游传播，燃烧过程中产生了体积膨胀使得已燃区的速度流线回归正常，预混通道出口处负压消失，火焰逐渐稳定于预混通道中。图 22 展示了 2.8～2.9 ms 火焰前锋向上推进的过程，火舌的运动沿轴向按逆时针向上传播。预混通道出口处是火焰传播过程中发生剧烈化学反应的关键位置，同时，火焰锋面是否通过此处向上传播也是本文判断回火是否发生的标志。因此，针对预混通道出口处的气动参数、温度变化、组分化学反应等方面的研究非常重要，基于回火临界条件的分析需要以此进行展开。

在本文所用的旋流燃烧室结构中，预混通道出口界面的轴向坐标位置为 z=330 mm，预混管道



(a) t=t_0+2.8 ms



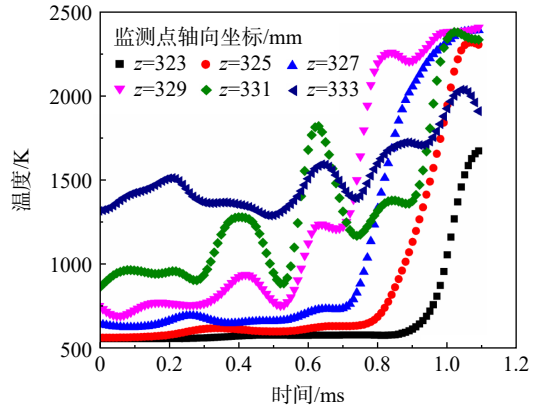
(b) t=t_0+2.9 ms

图 22 1 800 K 等温面火焰前锋

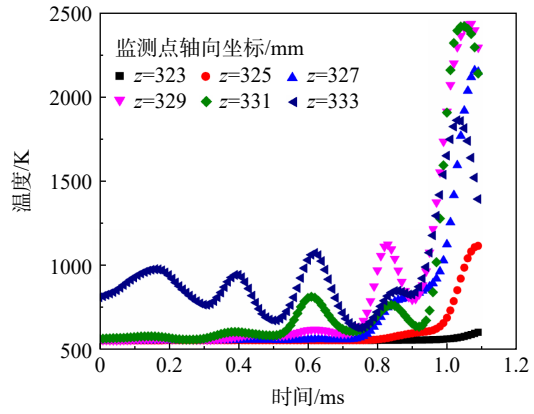
Fig. 22 Flame front of 1 800 K isothermal surface

内半径为 16 mm。即当监测点 z 方向坐标小于 330 mm, 径向坐标大于 16 mm 时, 该点位于预混管内; 当监测点 z 方向坐标大于 330 mm 时, 该点位于预混管管口外部。为了研究回火发生时预混管内外侧压力、密度、温度等参数的变化规律, 沿着轴向选取 z=323, 325, 327, 329, 331, 333 mm, 共 6 个位置; 沿着径向选取 16.5 mm 和 17.5 mm, 共 2 个位置, 共计 12 个监测点。

图 23～图 25 给出了监测点处的温度、密度



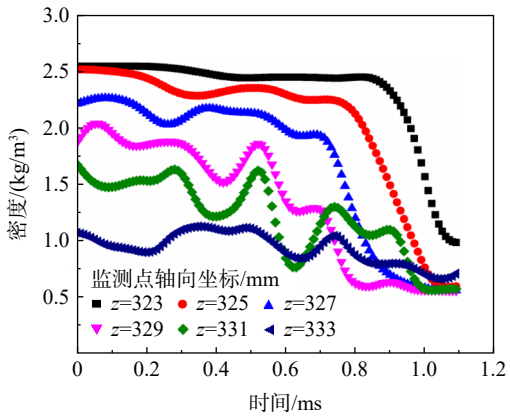
(a) 监测点径向坐标 x=16.5 mm



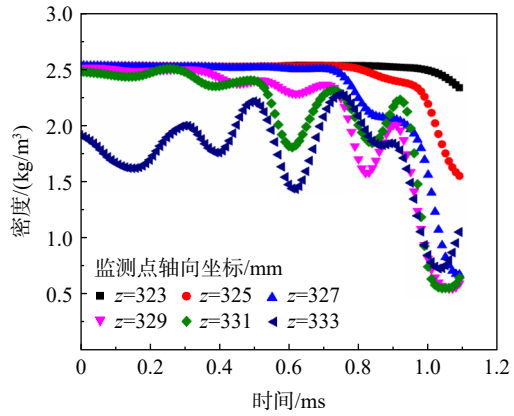
(b) 监测点径向坐标 x=17.5 mm

图 23　各监测点温度随时间变化规律

Fig. 23　Temperature profile along time at all monitor points



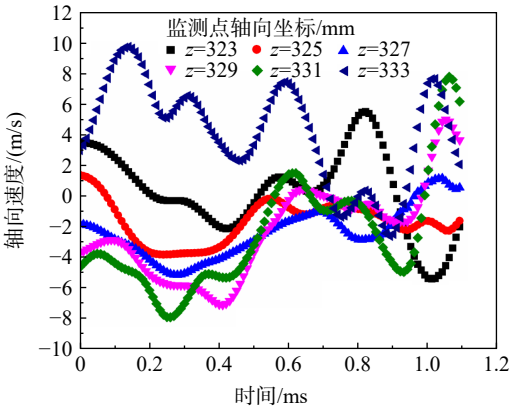
(a) 监测点径向坐标 x=16.5 mm



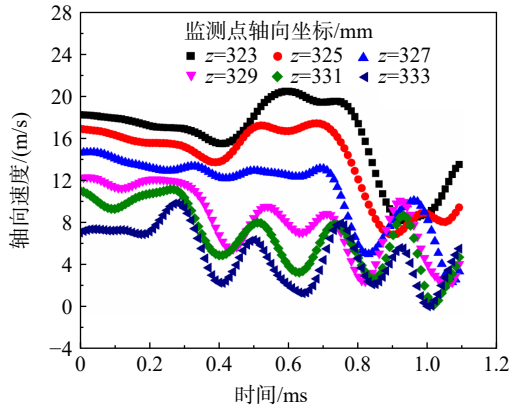
(b) 监测点径向坐标 x=17.5 mm

图 24　各监测点密度随时间变化规律

Fig. 24　Density profile along time at all monitor points



(a) 监测点径向坐标 x=16.5 mm



(b) 监测点径向坐标 x=17.5 mm

图 25　各监测点轴向速度随时间变化规律

Fig. 25　Axial velocity profile along time at all monitor points

和轴向速度随着时间的变化关系。可以看到从 0.95 ms 开始, 预混通道内温度显著上升, 密度下降; 意味着回火的发生。预混通道出口处附近的温度, 密度呈现反复振荡的趋势, 这表现出预混火焰的动力学的不稳定特性。通过之前的研究, 燃烧室关键部位速度和压力的变化是回火发生的

主要诱因，压力变化带来的负速度诱导火焰进入通道，近壁侧微小涡团的产生推动火焰向上游传播，同时压力波动产生的逆压梯度叠加影响，导致回火的发生。

如图 23 所示，展示了不同径向位置在回火发生前后的温度变化。从 x=16.5 mm 的 6 个监测点可以看到预混管内发生了回火。距离管口最近的位置（z=329 mm）在 0.6 ms 时就有显著温升，即使距离管口最远的位置（z=323 mm）在 1.0 ms 时也出现了大幅温升。另一方面，从 x=17.5 mm 的 6 个监测点来看，回火发生的时刻被明显延后了。最靠近管口的位置（z=329 mm）出现明显温升的时刻也在 0.9 ms，而直到监测时刻结束，最远端仍未出现火焰。可见回火是紧邻壁面发生的，远离内壁面后，火焰将延后到达。

图 24 所示给出了各监测点处密度的变化规律。可以发现，随着火焰向上游的推进，火焰锋面处发生着剧烈的化学变化。这是因为火焰到达监测点后，温度大幅升高，导致在压力变化不大的情况下，密度显著减小。其变化规律与图 23 所呈现的温度变化规律一致。图 25 则给出了监测点处轴向速度的变化规律。以近壁面处 x=16.5 mm 来看，在 0.6 ms 前，各个监测点都呈现出反常的负速度，而在 0.6 ms 后，轴向速度迅速升高，达到 4～8 m/s，其中，以下游的 z=329, 331, 333 mm 三点最为明显，结果表明，在火焰前缘可能存在微小的负速度区，不断促使火焰向上推进，随着火焰锋面上游通过监测点时，由于处于已燃区，燃烧带来的体积膨胀和化学反应引起了监测点的轴向速度急剧升高。和预估的一样，通过径向位置位于 x=16.5 mm 及 x=17.5 mm 各个监测点轴向速度变化图可以发现，远离壁面处的其他点，径向位置越高，越接近于主流速度，速度的波动并没有近壁侧明显。综上所述，燃烧器内压力波动会引起预混通道出口处的压力、密度等参数出现逆流增大，使近壁面处形成反向涡旋，出现局部负速度区。逆向压力、密度的增大进一步扩大的负速度区。由此形成的逆向涡旋会将火焰团带入通道内，破坏原有的火焰稳定机制，诱发回火。

当通道内预混气体被点燃引发回火后，火焰在通道内向上游移动。图 26 展示了回火发生后某时刻 1 800 K 等温面的轴向速度染色图。图 27 则是间隔 0.1 ms 的 3 个时刻的等温面染色图。可以看到，此时的火焰锚定在预混通道内部，且火焰径向厚度较薄，紧贴预混通道内壁面分布。

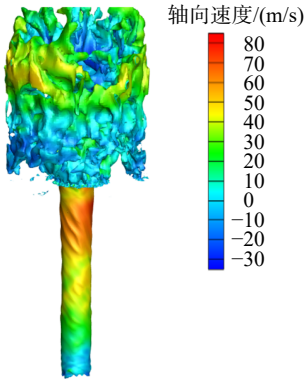


图 26 t=1.33 ms 时刻火焰分布

Fig. 26 Flame distribution at t=1.33 ms

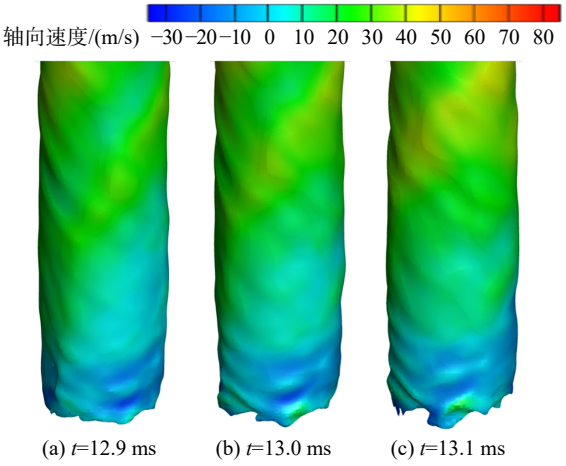
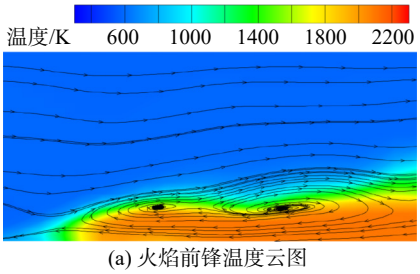


图 27 t=12.9～13.1 ms, 1 800 K 等温面

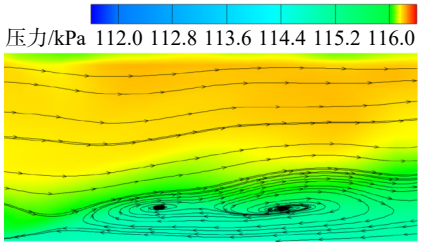
Fig. 27 Isothermal surface of 1 800 K at t=12.9—13.1 ms

针对发生在预混通道内的回火问题，部分学者以斜压梯度为例分析涡量方程右侧各项的影响机理，本文也通过具体分析火焰前锋的压力分布及密度分布，来完善火焰锋面向上游推进时，斜压扭矩对于回火的具体影响。

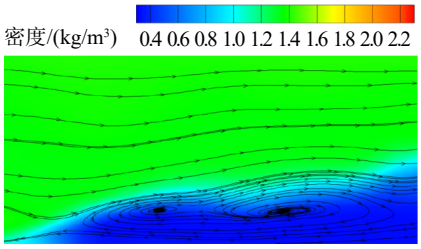
图 28(a)展示了火焰前锋温度分布，图 28(b)和图 28(c)分别展示了火焰前锋附近，压力梯度(grad(p))与密度梯度(grad(ρ))的分布，并分别标出梯度的方向，按右手定则取压力梯度与密度梯度的叉积，即可定义出斜压梯度的方向，如图 28(d)所示，实际方向为垂直于纸面方向向里，



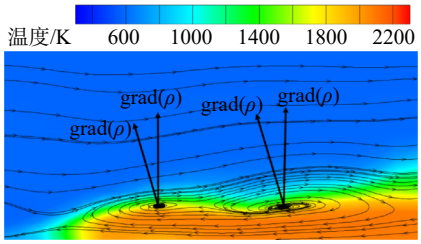
(a) 火焰前锋温度云图



(b) 火焰前锋压力梯度



(c) 火焰前锋密度梯度



(d) 涡流引起的斜压扭矩

图 28　t=1.33 ms 时刻火焰前锋

Fig. 28　Flame front at t=1.33 ms

以该方向为正向。该涡量在混合通道内卷起顺时针方向的旋涡，在远离壁面侧引起流体沿主流方向运动，但是在靠近壁面侧则引起逆向速度分量，推动高温燃尽气体不断向上游运动，是引发回火火焰锋面向上游传播的机制。

4　结　论

本文针对航空煤油旋流预混燃烧的回火过程开展了详细研究。通过调整背压获得不同压力下回火发生发展的动态试验观测结果。以此为基础，通过数值模拟方法再现回火发生的临界条件和动态过程，并剖析回火发生的机理。

首先，基于 RANS 方法，利用 realizable k-ε 模型和 FGM 部分预混火焰模型，可靠地捕捉了回火发生时的临界压力，与试验结果对比，模型预测误差不超过 10%。然后，利用 LES 方法，模拟计算了回火发生，发展的动态过程。由此确定了一套适用于旋流预混燃烧室模拟的计算方法，比较了在燃烧室在火焰稳定状态与回火的不稳定状态下的流场区别。

从 LES 复现的回火发生发展的微观火焰运动形态来看，当压力升高后，燃烧器内的下游压力波会回传到预混通道出口附近，改变该区域的局部压力波动，密度波动的耦合特性，促使产生负速度的逆向涡旋的形成。当压力呈现持续增大的特性时，逆向涡旋将增大，负速度区域增强，将燃烧器内的高温火焰微团携带进入预混通道，点燃预混通道出口附近预混管内的可燃混合气，破坏了之前以预混通道管口为锚定点的稳定旋流火焰形态，从而引起回火。这种情况下，即使主流速度很高，远高于湍流预混火焰速度，但由于流场结构的变化，依然引发了回火。进一步，通道内的燃烧引起的斜压梯度在预混通道边界层内引起回流，不断推进回火火焰锋面向上游移动，这也是高压条件下火焰在预混通道内壁向上游传播的原因。由此可见，对于预混火焰，当调节压力实现火焰特性变化的研究的过程中，须特别注意回火的发生。

另外，综合试验和数值模拟结果，也可以看到，关键部位的压力波动和速度的耦合是回火发生的主要因素，在试验中监测压力，速度参数的波动，可以用于监测回火的发生，对于解决工程问题有一定的指导意义。

参考文献：

[1] 魏星. 贫燃预混燃烧火焰形态与流场研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2017.
WEI Xing. Flame shape and flow field research of lean premixed combustion[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)

[2] 母滨, 雷福林, 邵卫卫, 等. 贫预混燃烧室化学反应器网络模型建模及不确定性分析[J]. 航空动力学报, 2019, 34(10): 2108-2119.
MU Bin, LEI Fulin, SHAO Weiwei, et al. Modeling and uncertainty analysis of chemical reactor network model in lean premixed combustion chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(10): 2108-2119. (in Chinese)

[3] 杨亚晶, 李晓亚, 谢伟. 贫预混燃烧室燃烧稳定性的数值研究[J]. 推进技术, 2017, 38(11): 2562-2571.
YANG Yajing, LI Xiaoya, XIE Wei. Numerical study on combustion stability in a lean premixed combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(11): 2562-2571. (in Chinese)

[4] 许洪雪. 贫燃预混旋流火焰的非稳态燃烧行为研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2014.
XU Hongxue. Study on behavior of unstable combustion of lean premixed swirl flame[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)

[5] 柳伟杰, 葛冰, 臧述升, 等. 部分预混旋流火焰不稳定燃烧的大涡模拟[J]. 热能动力工程, 2016, 31(4): 67-73, 145.
LIU Weijie, GE Bing, ZANG Shusheng, et al. Large eddy simulation of combustion instabilities in a partially premixed swirl stabilized flame[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and

Power, 2016, 31(4): 67-73, 145. (in Chinese)

[6] 袁艳. 贫燃预混预蒸发燃烧不稳定性的数值研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.
YUAN Yan. Numerical investigations on the instability of lean premixed prevaporized combustion [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011. (in Chinese)

[7] KIYMAZ T B, BÖNCÜ E, GÜLERYÜZ D, et al. Numerical investigations on flashback dynamics of premixed methane-hydrogen-air laminar flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(59): 25022-25033.

[8] PERS H, ANIELLO A, MORISSEAU F, et al. Autoignition-induced flashback in hydrogen-enriched laminar premixed burners[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(27): 10235-10249.

[9] VANCE F H, DE GOEY L P H, VAN OIJEN J A. Development of a flashback correlation for burner-stabilized hydrogen-air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2022, 243: 112045.

[10] SAQIB AKHTAR M, SHAHSAVARI M, GHOSH A, et al. Effect of fuel reactivity on flame properties of a low-swirl burner[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 142: 110795.

[11] GOLDMANN A, DINKELACKER F. Experimental investigation and modeling of boundary layer flashback for non-swirling premixed hydrogen/ammonia/air flames[J]. Combustion and Flame, 2021, 226: 362-379.

[12] ANIELLO A, POINSOT T, SELLE L, et al. Hydrogen substitution of natural-gas in premixed burners and implications for blow-off and flashback limits[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(77): 33067-33081.

[13] ZIMONT V, POLIFKE W, BETTELINI M, et al. An efficient computational model for premixed turbulent combustion at high Reynolds numbers based on a turbulent flame speed closure[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 120(3): 526-532.

[14] YAHOU T, DAWSON J R, SCHULLER T. Impact of chamber back pressure on the ignition dynamics of hydrogen enriched premixed flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4): 4641-4650.

[15] GOLDMANN A, DINKELACKER F. Investigation of boundary layer flashback for non-swirling premixed hydrogen/ammonia/nitrogen/oxygen/air flames[J]. Combustion and Flame, 2022, 238: 111927.

[16] 宋权斌. 多旋流合成气燃烧室燃烧特性的实验研究[D]. 北京: 中国科学院, 2009.
SONG Quanbin. Experimental investigation of combustion characteristics of multi-swirling syngas combustors[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)

[17] 郭乔轩. 贫预混旋流燃烧器的回熄火数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
GUO Qiaoxuan. Numerical simulation of flashback and blowout of lean premixed burner[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)

[18] 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.
CAO Min, ZHANG Wenpu. Numerical investigation of flame flashback in LDI combustor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(9): 1111-1116. (in Chinese)

[19] 樊艳娜. 贫燃旋流预混燃烧室回火行为实验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2016.
FAN Yanna. Experimental study on flashback of lean premixed swirl-stablized combustor[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

[20] EBI D, BOMBACH R, JANSOHN P. Swirl flame boundary layer flashback at elevated pressure: modes of propagation and effect of hydrogen addition[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 6345-6353.

[21] LIEUWEN T, MCDONELL V, PETERSEN E, et al. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 011506.

[22] ZHAO Guoyan, DU Jianhui, LIU Mingjiang, et al. Numerical investigation of the scale effects of the flame flashback phenomenon in scramjet combustors[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119: 107165.

[23] 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.
QIAO Yingjie, MAO Ronghai. Large eddy simulation of flashback phenomenon in a lean premixed prevaporized combustor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1505-1512. (in Chinese)

[24] MESQUITA L C C, VIÉ A, DUCRUIX S. Flashback-induced flame shape transition in a two-stage LPP aeronautical combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4): 4781-4790.

[25] LIU Xin, BERTSCH M, SUBASH A A, et al. Investigation of turbulent premixed methane/air and hydrogen-enriched methane/air flames in a laboratory-scale gas turbine model combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(24): 13377-13388.

[26] 华晓筱, 王静波, 王全德, 等. 正十二烷高温燃烧机理的构建及模拟[J]. 物理化学学报, 2011, 27(12): 2755-2761.
HUA Xiaoxiao, WANG Jingbo, WANG Quande, et al. Mechanism construction and simulation for the high-temperature combustion of n-dodecane[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27(12): 2755-2761. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)