

## 建库温度在超声速火焰面模型中的影响<sup>\*</sup>

牛东圣<sup>1,2</sup>, 侯凌云<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘要:** 在火焰面模型中, 数据库计算结果的准确程度对之后湍流燃烧流场的预测精度有重要影响。为了研究建库温度在超声速火焰面模型中的影响作用, 在建立火焰面数据库时增加了建库氧化剂温度这一维度, 并提出了一种由流场各点平均温度确定其对应的建库氧化剂温度的查表方法。针对 DLR 结构的超声速燃烧室, 以煤油作为燃料, 在五个温度级别条件下建立火焰面数据库, 考察了建库温度对一维火焰面数据库以及二维燃烧流场计算结果的影响。研究表明, 建库温度对一维火焰面的温度和组分分布有较为明显的影响, 增加建库温度这一查表维度有助于改善超声速湍流燃烧流场的预测精度。

**关键词:** 超声速燃烧; 数值模拟; 火焰面模型; 火焰面数据库; 氧化剂温度

中图分类号: TK16 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 12-2808-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190618

## Effects of Temperature Variation of Flamelet Library on Supersonic Flamelet Modeling

NIU Dong-sheng<sup>1,2</sup>, HOU Ling-yun<sup>2</sup>

(1. Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710065, China;

2. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In the flamelet modeling, the accuracy of flamelet library has a significant impact on the prediction precision of the turbulent combustion flow field. In order to study the effects of temperature variation of flamelet library on supersonic flamelet modeling, the oxidizer temperature was added as a control parameter during the flamelet library generation, and a lookup method to determine the oxidizer temperature from the local temperature for any node in the flow field was proposed. Taken the DLR supersonic combustor as test case and kerosene as fuel, the flamelet library was generated under five different temperature levels, and the effects of temperature on both the one-dimensional flamelet and two-dimensional turbulent reactive flow field were investigated. Results show that the temperature variation has fairly remarkable effects on the temperature and species distributions in one-dimensional flamelet database. Taking the temperature variation into account can help to improve the prediction results of supersonic turbulent reactive flow field.

**Key words:** Supersonic combustion; Numerical simulation; Flamelet model; Flamelet library; Oxidizer temperature

\* 收稿日期: 2019-09-10; 修订日期: 2019-11-20。

基金项目: 国家自然科学基金 (91641114)。

作者简介: 牛东圣, 博士, 研究领域为超声速燃烧数值模拟。E-mail: niudongsheng@hotmail.com

通讯作者: 侯凌云, 博士, 副教授, 研究领域为先进推进技术。E-mail: lyhou@tsinghua.edu.cn

引用格式: 牛东圣, 侯凌云. 建库温度在超声速火焰面模型中的影响[J]. 推进技术, 2020, 41(12): 2808-2814. (NIU Dong-sheng, HOU Ling-yun. Effects of Temperature Variation of Flamelet Library on Supersonic Flamelet Modeling [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(12): 2808-2814.)

## 1 引言

由于能够在计算量可承受的条件下较好地描述湍流和燃烧之间的相互作用,火焰面模型在超声速湍流燃烧过程数值模拟中的应用愈加广泛<sup>[1-5]</sup>。在采用火焰面模型进行超声速湍流燃烧数值模拟研究时,首先需要在一维对冲扩散火焰模型中建立起火焰面数据库<sup>[6]</sup>。之后流场计算中的组分质量分数分布将根据火焰面数据库中的组分信息通过假定PDF积分得到,而组分质量分数分布又会进一步影响到流场中平均温度、压力等参数的计算结果。因此,一维对冲扩散火焰计算结果的准确性、以及建立火焰面数据库时的计算条件与实际燃烧工况之间的对应关系是否合理将直接影响之后的CFD流场计算结果的预测精度。

在建立火焰面数据库时,在一维对冲扩散火焰模型计算中,为了简便起见,设定的燃料和氧化剂入口温度、压力等参数通常为未燃烧状态下的燃烧室边界条件。然而在真实超声速燃烧室中,随着燃烧反应的剧烈进行和激波波系的影响,燃烧室内的温度、压力会在较大范围内变化。用基于以上假设条件建立的火焰面数据库来代表实际燃烧流场,误差是否在可接受的范围内还需要具体对比分析。Zhao等<sup>[7]</sup>为考虑超声速燃烧流场中压力变化的影响,提出了在参考压力下建立火焰面数据库,而其他压力条件下的组分质量分数由压力的六阶多项式拟合的修正方法,改善了燃烧流场预测精度。Ladeinde等<sup>[8]</sup>针对超声速燃烧中压力的显著变化特性,在建立火焰面数据库时增加了压力这一维度,并与假设化学反应速率与压力平方成正比的常规计算模型对比,研究发现在数据库中增加压力维度的修正方法计算得到的压力和火焰分布更加合理。范周琴<sup>[9]</sup>在氢气火焰中考察了建立火焰面数据库时燃料和氧化剂温度对一维火焰面计算结果的影响。研究表明,建库燃料温度对一维火焰面主要组分分布几乎没有影响,而建库氧化剂温度对中间组分分布影响较大。目前文献中极少见到关于建库温度对湍流燃烧流场计算结果影响的研究报道。

本文以DLR超声速燃烧室模型为研究对象,采用煤油燃料,在建立火焰面数据库时增加了建库氧化剂温度这一维度,分别在五个温度级别下建立火焰面数据库,首先分析其对一维火焰面的影响作用;之后提出了一种由流场各点平均温度确定其对应的建库氧化剂温度的查表方法,从而在流场计算中引

入了建库氧化剂温度这一查表维度,对比采用五个温度级别下的数据库与采用单一温度级别下的数据库这两种工况的计算结果,分析了其对二维燃烧流场分布的影响。

## 2 数学和物理模型

### 2.1 考虑建库温度的超声速燃烧火焰面模型

将物理空间上的组分输运方程和能量方程经坐标变换到混合分数 $Z$ 空间,忽略辐射换热,可以得到火焰面模型的控制方程为<sup>[6]</sup>

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial \tau} = \frac{\chi}{2Le_i} \rho \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_i \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \rho \frac{\chi}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} - \sum_{i=1}^{ns} \frac{h_i}{c_p} \dot{\omega}_i \quad (2)$$

式中 $\rho$ 为密度; $T$ 为温度; $Y_i, Le_i, \dot{\omega}_i, h_i$ 分别为组分 $i$ 的质量分数、Lewis数、质量生成率以及单位质量焓值; $\chi$ 为标量耗散率,代表了非平衡影响。

常规的火焰面模型给定一系列的当量标量耗散率 $\chi_{st}$ ,求解火焰面方程组,即可生成火焰面数据库 $\phi = \phi(Z, \chi_{st})$ ,其中标量 $\phi$ 代表组分质量分数 $Y_i$ 。为了考察建库温度对计算结果的影响,同时考虑到实际燃烧室初始状态时流场内绝大部分区域为氧化剂所占据,而燃料仅占流场的很小区域,为了保持程序的简洁性,这里假设建立火焰面数据库时燃料温度仍取为入口温度值,而增加氧化剂温度这一建库参数,在不同氧化剂温度条件下建立数据库,即得到的数据库形式由 $\phi(Z, \chi_{st})$ 变为 $\phi(T_{ox}, Z, \chi_{st})$ 。

此时,流场中各点的平均热力参数由下式进行假定PDF积分

$$\tilde{\phi}(x_i) = \iiint \phi(T_{ox}, Z, \chi_{st}) \tilde{P}(T_{ox}, Z, \chi_{st}) d\chi_{st} dZ dT_{ox} \quad (3)$$

式中上标“ $\sim$ ”表示 Favre 加权平均值, $\tilde{P}(T_{ox}, Z, \chi_{st})$ 表示氧化剂温度 $T_{ox}$ 、混合分数 $Z$ 和当量标量耗散率 $\chi_{st}$ 的联合概率密度函数。这里假设三个变量之间是统计独立的,其中假定混合分数服从 $\beta$ 函数分布,氧化剂温度和当量标量耗散率均服从 $\delta$ 函数分布。

需要注意的是,火焰面模型最初在低速流动条件下发展得到,在低速流动与燃烧问题的求解中,流场内平均温度和组分质量分数信息均由式(3)积分得到。而在高速可压缩流动条件下,动能的增加甚至能达到与化学反应释热相同的量级,若仍使用数据库中的温度信息,则不能考虑到速度和温度的强耦合作用,激波捕捉算法也不再适用<sup>[10]</sup>。为了避免这一问题,本文采用基于 Oevermann<sup>[11]</sup>的处理方法,

即只由数据库获取组分质量分数信息,温度则由能量方程耦合求解得到。

## 2.2 确定流场各点对应氧化剂温度的查表方法

真实流场中各点的平均温度与该点的氧化剂温度并不是同一概念,因此需要先找出该点平均温度与建立火焰面时的氧化剂温度之间的对应关系,之后才能查找对应氧化剂温度级别的数据库。

为此,本文提出了如下方法:假设在若干个不同的氧化剂温度级别下建立火焰面数据库,此处以五个温度级别为例,图1给出了五个氧化剂温度级别条件下在某一相当量标量耗散率 $\chi_{si}$ 时的一维火焰面计算结果,图中左侧 $Z=0$ 处对应的温度即为氧化剂温度。

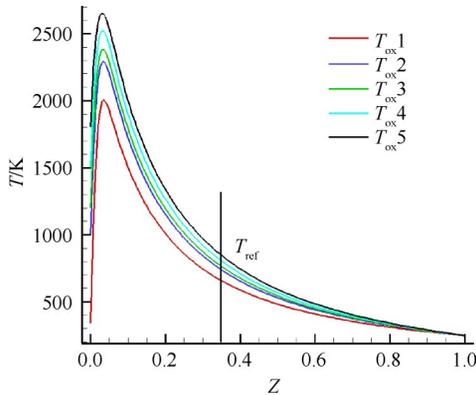


Fig. 1 Typical results of one-dimensional flamelet library under different temperatures

在这一方法中,首先由真实流场中各点的平均当量耗散率 $\chi$ 值,分别确定出在上述五个温度级别下对应的当量标量耗散率为 $\chi_{si}$ 的数据库;之后再由当地的混合分数平均值 $\tilde{Z}$ 分别在以上五个火焰面中查找到其对应的参考温度 $T_{ref}$ ,如图1所示,取值为 $\tilde{Z}$ 的等值线与每个火焰面的交点处均得到一个参考温度 $T_{ref}$ ,此步骤共得到五个参考温度点;之后再由当地的流场平均温度 $T$ 值与以上五个参考温度 $T_{ref}$ 值逐一对比,即可确定出采用哪个温度级别下的对应数据库,即由此得到了流场该点对应的建库氧化剂温度值 $T_{ox}$ 。这一查表流程见图2。

## 2.3 控制方程组

守恒形式的可压缩 Navier-Stokes 方程组由连续性方程、动量方程以及能量方程组成。湍流模型采用 Menter's  $k-\omega$  SST 双方程模型<sup>[12]</sup>。上述方程的二维 Favre 平均形式在直角坐标系下可写为如下统一格式

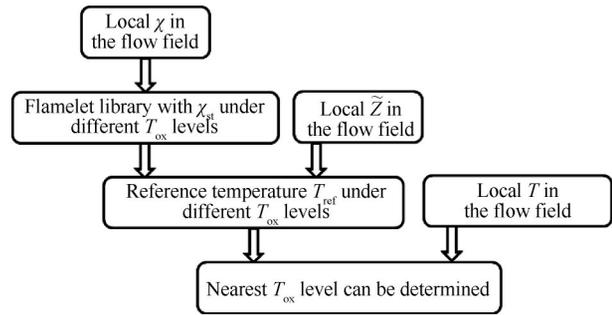


Fig. 2 Method to determine the oxidizer temperature in the flow field

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_c}{\partial x} + \frac{\partial G_c}{\partial y} = \frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} + H \quad (4)$$

式中 $U$ 为求解向量, $U = [\rho, \rho u, \rho v, \rho E, \rho k, \rho \omega]^T$ ;  $F_c, G_c$ 表示对流量向量; $F_v, G_v$ 表示扩散通量向量; $H$ 为源项向量。

除以上基本方程外,还需加入混合分数的平均值 $\tilde{Z}$ 及其脉动值 $\tilde{Z}''^2$ 的控制方程

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{Z} \tilde{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \bar{\rho} D + \frac{\mu_t}{\sigma_z} \right) \nabla \tilde{Z} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}''^2}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{Z}''^2 \tilde{v}) = \\ \nabla \cdot \left[ \left( \bar{\rho} D + \frac{\mu_t}{\sigma_{\tilde{Z}''^2}} \right) \nabla \tilde{Z}''^2 \right] + 2 \frac{\mu_t}{\sigma_{\tilde{Z}''^2}} (\nabla \tilde{Z} \cdot \nabla \tilde{Z}) - \bar{\rho} \tilde{\chi} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\sigma_z$ 和 $\sigma_{\tilde{Z}''^2}$ 分别为 $\tilde{Z}$ 和 $\tilde{Z}''^2$ 的施密特数,取值依次为0.85和0.35<sup>[13]</sup>。

## 2.4 数值求解方法

对流量采用 NND 格式离散<sup>[14]</sup>。NND 格式是一种高阶 TVD 格式,能准确捕捉激波,适用于高速流动燃烧问题的研究。扩散通量由二阶中心差分格式离散。采用正十二烷( $C_{12}H_{26}$ )煤油替代燃料模型,化学反应机理为 55 组分 202 步骨架反应机理。本文采用自编程序进行计算,其准确性和可靠性已在多个超声速燃烧算例的研究中得到了验证<sup>[15-16]</sup>。

## 3 算例研究

### 3.1 几何结构及边界条件

以德国宇航中心(DLR)进行的超燃冲压发动机实验中的模型燃烧室作为数值模拟对象<sup>[17-18]</sup>。该燃烧室的结构示意图见图3。燃烧室总长度为300mm,入口处的高度为50mm,宽度为45mm。下壁面为平直壁面,上壁面则由一段平直壁面和一段扩张壁面组成,扩张角为 $3^\circ$ 。在燃烧室前段中心位置,设置有

一个扩张角为  $12^\circ$  的楔形支板结构,燃料由位于支板尾部的喷射孔平行喷入燃烧室。

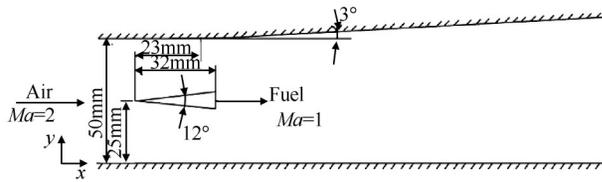


Fig. 3 Schematic of the DLR supersonic combustor

煤油燃料燃烧的化学反应当量比取为 1。燃料入口温度取为 500K,认为其处于超临界状态。具体的入口参数条件在表 1 中给出。

Table 1 Inflow conditions of the supersonic combustor

Parameters	Fuel	Air
$p/\text{kPa}$	112	112
$Ma$	1.0	2.0
$T/\text{K}$	500	745
$Y_{\text{O}_2}$	0	0.233
$Y_{\text{N}_2}$	0	0.767
$Y_{\text{C}_{12}\text{H}_{26}}$	1	0

采用结构网格对计算域进行划分,并在壁面边界层、中心支板附近区域以及中心剪切层区域对网格进行了加密。为了验证网格的独立性,共划分了三套网格,网格总数依次为 42290, 61664, 81554, 分别记为 Mesh 1, Mesh 2, Mesh 3。其中 Mesh 2 和 Mesh 3 是在 Mesh 1 的基础上在某些区域逐步加密而得到。图 4 给出了在其他计算条件相同时,分别在以上三套不同网格下计算得到的燃烧室中心轴线  $y=25\text{mm}$  处的速度分布对比。可以看出三套网格的计算结果分布规律一致,其中采用 Mesh3 的计算结果相比 Mesh 2 已无明显差异,说明此时计算结果不再随着网格变化而发生明显改变。综合考虑计算精度及计算成本,文中采用 Mesh 2 作为后续计算的网格。

### 3.2 对一维火焰面的影响分析

采用 FlameMaster 程序包<sup>[19]</sup>计算生成火焰面数据库。在五个不同的氧化剂温度条件下建立火焰面数据库,氧化剂温度依次取为 745K, 1000K, 1400K, 1800K 和 2100K。这一系列温度级别能够基本覆盖煤油燃料燃烧室流场中可能的氧化剂温度分布范围。以当量标量耗散率  $\chi_{st}$  取为  $2\text{ s}^{-1}$  时的计算结果为例,对比不同氧化剂温度条件下的一维火焰面计算结果,其他当量标量耗散率条件下的分布规律与之类似。

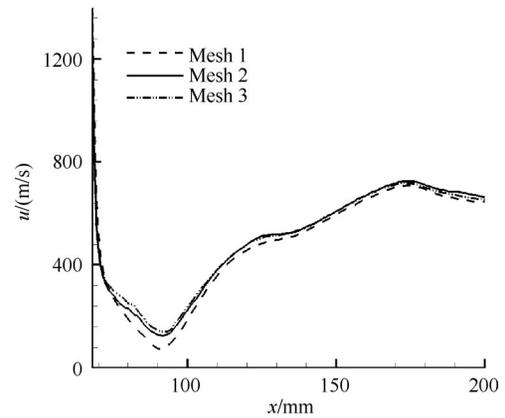


Fig. 4 Velocity distributions at  $y=25\text{mm}$  on different grids

图 5 和图 6 依次给出了一维对冲扩散火焰的温度分布和释热率分布对比。可以看出,火焰面最高温度随着氧化剂温度的上升而提高,然而释热率随着氧化剂温度的升高反而降低,  $T_{\text{ox}} = 2100\text{K}$  时的释热率低于  $T_{\text{ox}} = 745\text{K}$  时的释热率,这说明在本算例研究的温度范围内,氧化剂温度越高,燃烧反应进行的反而越不剧烈。由于  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  的燃烧过程比较复杂,涉及到的组分和基元反应很多,从图 6 更具体的来看,不同氧化剂温度条件影响到了反应区的位置,使  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  的释热率峰值在  $Z$  坐标轴上的位置有比较明显的偏移,这说明氧化剂的温度高,导致热扩散更快,与燃料的反应释热峰值更偏向燃料侧。另外注意到  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  的整个燃烧过程并非单纯的放热反应,在混合分数约为 0.3~0.7 时释热率为负值,这是由于大分子碳氢燃料  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  在发生燃烧反应之前,会首先在高温下裂解为小分子,该过程是吸热反应。

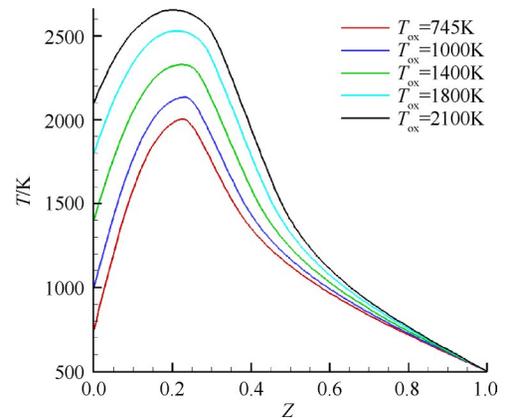


Fig. 5 Comparison of temperature distributions

图 7(a)~(f) 依次给出了反应物  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ , 重要的中间组分  $\text{C}_2\text{H}_4$ , OH 自由基和 CO, 以及最终生成物  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的质量分数分布对比。可以看出,建库氧化剂温度对包含反应物和最终生成物的各组分分布均有

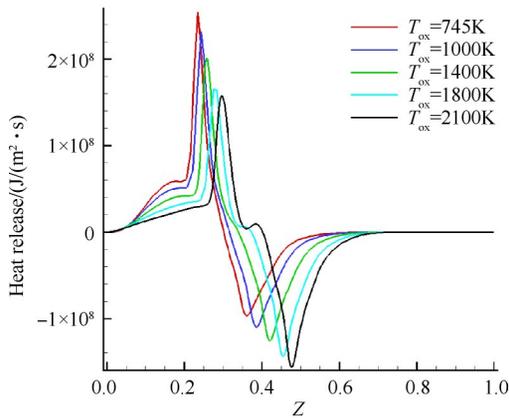


Fig. 6 Comparison of heat release rate distributions

比较明显的影响。在当前研究的温度范围内,更高的氧化剂温度抑制了 $C_{12}H_{26}$ 氧化反应的进行程度,较高氧化剂温度条件下计算得到的中间组分 $C_2H_4$ , OH自由基和CO的质量分数峰值均高于较低温度条件,相反,较高氧化剂温度条件下的最终生成物 $CO_2$ 和 $H_2O$ 的质量分数峰值又低于较低温度条件的计算结果。

还可看出,氧化剂温度不仅影响组分质量分数的峰值大小,亦影响其中一些组分的峰值位置。随着氧化剂温度升高,反应区位置向 $Z=1$ 的燃料一侧发生偏移。总的来看,氧化剂温度对各组分分布均产生了比较明显的影响,而且反应区的位置也随之发

生了显著的偏移。

作为对比,图8给出了以氢气作为燃料时,一维对冲扩散火焰中不同氧化剂温度下燃烧反应生成物 $H_2O$ 的质量分数分布。与图7对比可见,建库氧化剂温度对氢气燃料计算结果的影响不如对煤油燃料计算结果的影响显著。这是由于氢气是简单小分子,其氧化反应路径相对简单,涉及到的中间组分少,对氧化剂温度这一影响因素不是很敏感。

因此,下一小节将仍以煤油燃料为研究对象,进一步对比分析一维火焰面计算结果中的差异体现到二维燃烧流场计算中的影响作用。

### 3.3 对燃烧流场的影响分析

将采用五个氧化剂温度级别条件建立数据库的工况(Multi- $T_{ox}$  levels)与仅采用燃烧室入口条件即 $T_{ox} = 745K$ 时建立单一氧化剂温度级别数据库的工况(Single- $T_{ox}$  level)的计算结果进行对比分析,图9依次给出了燃烧室内沿流动方向三处截面位置上的速度分布对比。可以看出,两种工况计算结果在流场中部剪切流动反应区的差异大于上下壁面附近区域,引入建库氧化剂温度后对速度最小值以及中心反应区宽度的分布均产生了较显著影响。采用五个氧化剂温度级别建立数据库的工况在 $x=78mm$ 和 $x=125mm$ 处计算得到的中心反应区分布范围更宽,且中心位置处的速度最小值更小,其中在 $x=125mm$ 处

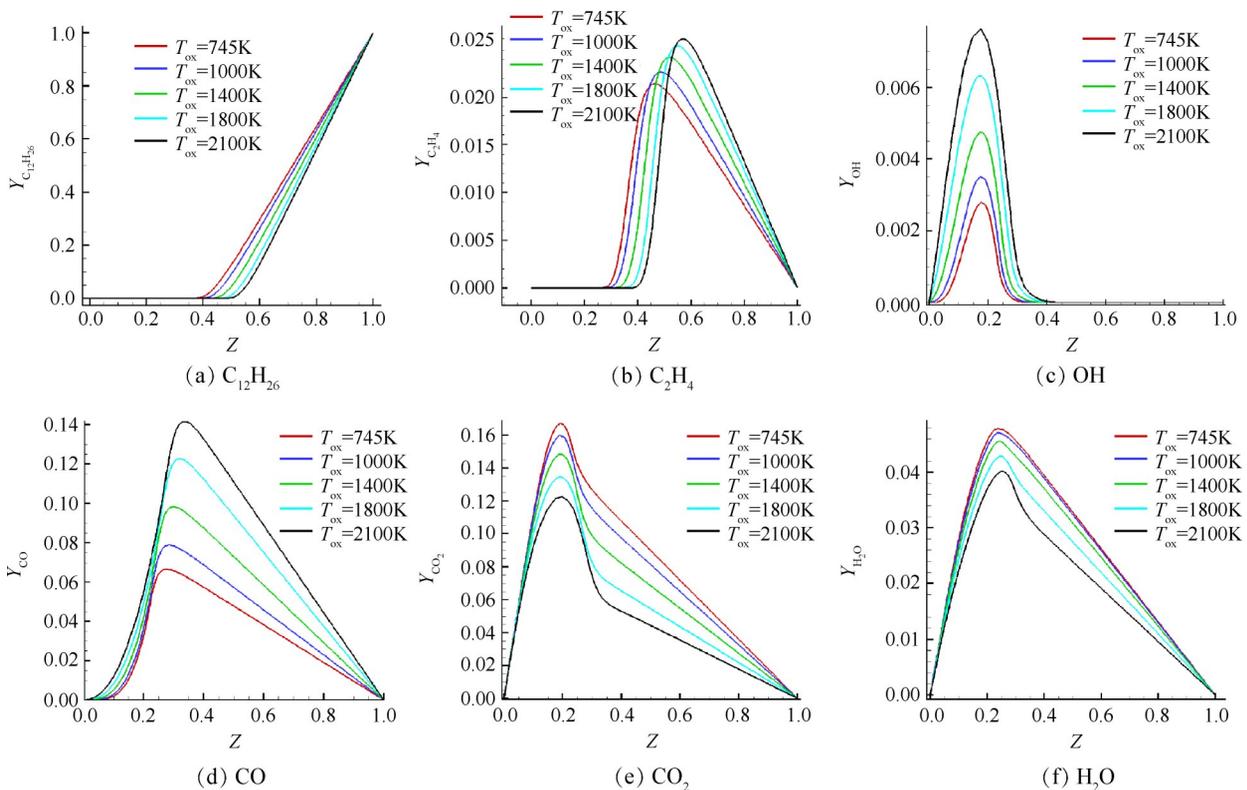


Fig. 7 Comparison of various species mass fraction distributions

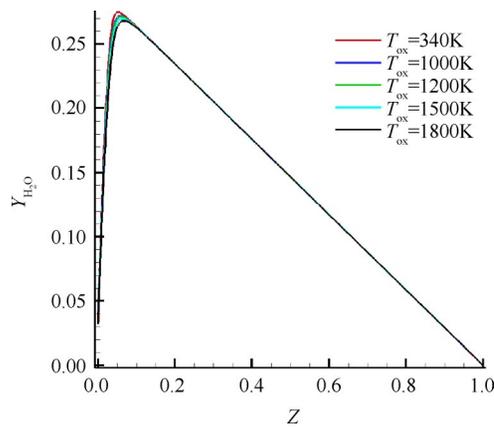


Fig. 8 Comparison of H<sub>2</sub>O mass fraction distributions

二者峰值相差达到10.2%。

图10依次给出了  $x=78\text{mm}$ ,  $x=125\text{mm}$  及  $x=207\text{mm}$  处的温度分布对比。可以看出,增加建库氧化剂温度这一维度对平均温度场产生了较为明显的影响。采用五个氧化剂温度级别建立数据库的工况计算得

到了分布范围更宽的中心反应区,同时两种工况计算得到的温度峰值也有所差别,在  $x=125\text{mm}$  处二者相对差值达到5.3%。

$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  作为大分子碳氢燃料,其燃烧过程十分复杂,在当前计算中共包含55组分和202步基元反应,因此不同氧化剂温度对其氧化反应路径以及中间反应过程会有较大影响。结合前文关于建库氧化剂温度对一维火焰面的影响分析可知,氧化剂温度对煤油燃烧的反应物、重要中间组分和最终生成物的质量分数分布均有比较显著的影响,既影响组分质量分数的峰值大小,亦影响混合分数空间中的反应区位置。氧化剂温度对一维火焰面中各种组分分布的显著影响通过能量方程中的相关项引入到二维燃烧流场计算中,也就对流场平均参数如速度、温度等产生了相应的影响。在建库过程中增加考虑氧化剂温度的影响,使火焰面数据库信息更完善、更贴近真实燃烧状态,可以相信会对计算结果起到正面的修正作用。

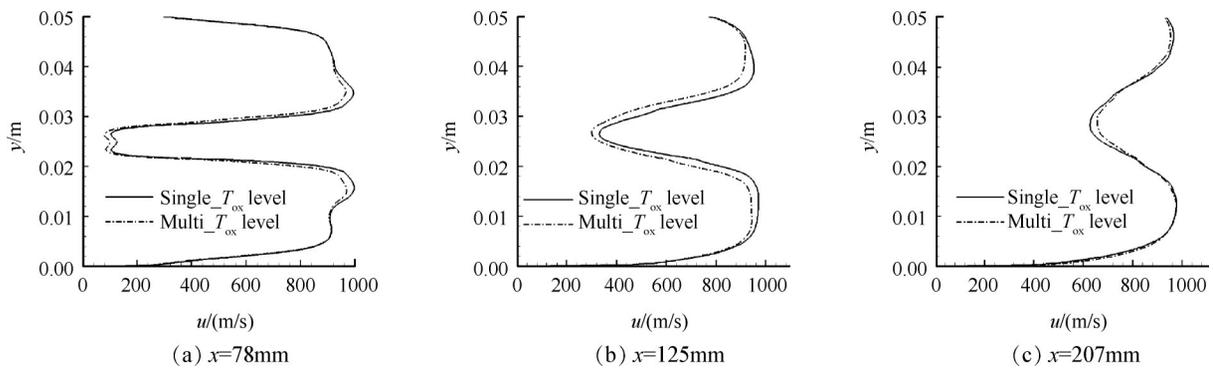


Fig. 9 Cross-stream distributions of velocity at different axial locations

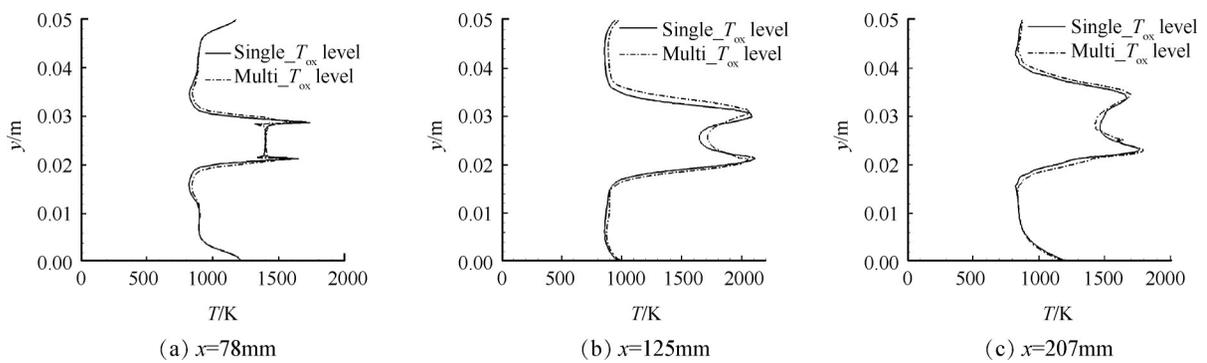


Fig. 10 Cross-stream distributions of temperature at different axial locations

### 4 结论

本文以煤油燃料超声速燃烧室模型为研究对象,考察了建库氧化剂温度对一维火焰面和二维湍流燃烧流场计算结果的影响作用。主要结论如下:

(1)随着建库氧化剂温度提高,火焰面最高温度

也相应上升,然而化学反应进行的程度反而更不彻底。

(2)建库氧化剂温度对一维火焰面中的反应物、中间组分和最终生成物的质量分数峰值大小及反应区位置均有较为明显的影响,相应的对二维燃烧流场中的速度和温度分布也有较显著影响,两种工况

得到的速度和温度局部相对差值在  $x=125\text{mm}$  处分别达到了 10.2% 和 5.3%。这是由于煤油的燃烧过程比较复杂,涉及到的中间组分和基元反应步数很多,因此建库氧化剂温度的改变对燃料反应路径的影响作用也较为明显。

(3)总的来说,通过增加建库氧化剂温度这一维度的修正方法对于更为准确地描述真实湍流燃烧流场、提高流场平均参数的预测精度有一定积极作用。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

### 参考文献

- [ 1 ] Gao Z X, Jiang C W, Lee C H. Representative Interactive Flamelet Model and Flamelet/Progress Variable Model for Supersonic Combustion Flows[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2937-2946.
- [ 2 ] Zhao G Y, Sun M B, Wang H B, et al. Investigation of Combustion Characteristics in a Scramjet Combustor Using a Modified Flamelet Model[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 148: 32-40.
- [ 3 ] Aravind S, Kumar R. Supersonic Combustion of Hydrogen Using an Improved Strut Injection Scheme[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12): 6257-6270.
- [ 4 ] 纪鹏飞, 罗雨, 陈兵, 等. 煤油燃料超声速燃烧室火焰面模型应用探究[J]. *推进技术*, 2017, 38(6): 1201-1208. (JI Peng-fei, LUO Yu, CHEN Bing, et al. Exploration of Flamelet Model Applications in a Kerosene Fueled Supersonic Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1201-1208.)
- [ 5 ] 赵国焱, 孙明波, 吴锦水. 基于不同PDF的超声速扩散燃烧火焰面模型对比[J]. *推进技术*, 2015, 36(2): 232-237. (ZHAO Guo-yan, SUN Ming-bo, WU Jin-shui. Comparison of Supersonic Diffusion Combustion Flamelet Model Based on Different PDF[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(2): 232-237.)
- [ 6 ] Peters N. *Turbulent Combustion*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [ 7 ] Zhao G Y, Sun M B, Wu J S, et al. A Flamelet Model for Supersonic Non-Premixed Combustion with Pressure Variation[J]. *Modern Physics Letters B*, 2015, 29(21).
- [ 8 ] Ladeinde F, Lou Z P, Li W H. The Effects of Pressure Treatment on the Flamelet Modeling of Supersonic Combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 204: 414-429.
- [ 9 ] 范周琴. 超声速湍流燃烧火焰面模型判别及应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- [ 10 ] 孙明波, 范周琴, 梁剑寒, 等. 部分预混超声速燃烧火焰面模式研究综述[J]. *力学进展*, 2010, 40(6): 634-641.
- [ 11 ] Oevermann M. Numerical Investigation of Turbulent Hydrogen Combustion in a Scramjet Using Flamelet Modeling[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2000, 4: 463-480.
- [ 12 ] Menter F R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [ 13 ] Jones W P, Whitelaw J H. Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review[J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 1-26.
- [ 14 ] 张涵信. *计算流体力学-差分方法的原理和应用*[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
- [ 15 ] Hou L Y, Niu D S, Ren Z Y. Partially Premixed Flamelet Modeling in a Hydrogen-Fueled Supersonic Combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(17): 9497-9504.
- [ 16 ] 牛东圣, 侯凌云. 乙烯超声速燃烧部分预混火焰面模型数值研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(9): 1376-1381. (NIU Dong-sheng, HOU Ling-yun. Numerical Simulation of Ethylene Supersonic Combustion Using Partially Premixed Flamelet Model[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(9): 1376-1381.)
- [ 17 ] Waidmann W, Alff F, Bohm M, et al. Supersonic Combustion of Hydrogen/Air in a Scramjet Combustion Chamber[J]. *Space Technology*, 1995, 15(6): 421-429.
- [ 18 ] Guerra R, Waidmann W, Laible C. An Experimental Investigation of the Combustion of a Hydrogen Jet Injected Parallel in a Supersonic Air Stream[R]. *AIAA* 91-5102.
- [ 19 ] Pitsch H. *FlameMaster: a C++ Computer Program for 0D Combustion and 1D Laminar Flame Calculations*[D]. Aachen: RWTH Aachen University, 1998.

(编辑:梅 瑛)