

## 湍流预混燃烧条件下的壁面热流模型

李坤霖, 王利坡

(上海交通大学密西根学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对统计稳态的对冲构型预混湍流燃烧的等温壁面热流计算进行建模. 为排除实验或数值中可能出现的不确定性, 选用三维的直接数值模拟 (direct numerical simulation, DNS) 的结果作为对比参考. 计算结果表明该模型具备在不同过滤尺度下衡量壁面热流统计信息的能力, 并且比直接采用过滤后温度梯度及湍流导热系数以衡量壁面热流的方法表现更好. 模型在不同过滤尺度下表现出良好的预测稳定性, 另外将该模型植入已有求解器十分简单便捷.

**关键词:** 壁面热流建模; 预混湍流燃烧; 火焰壁面作用

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)03-0263-08

## Modelling of Wall Heat Flux in Turbulent Premixed Combustion

Li Kunlin, Wang Lipo

(UM-SJTU Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The paper focuses on modeling the heat flux through the isothermal wall boundary in premixed turbulent combustion. To exclude the interference in model validation from various inaccuracies, either numerical or experimental, the filtered three-dimensional direct numerical simulation (DNS) fields are adopted as the benchmark. Results justify that the proposed model is more capable to capture the wall heat flux statistics in a broad range of filter sizes, compared with the direct calculation from the filtered temperature gradient and turbulent diffusivity. In addition, it is also straightforward and convenient to integrate this model with the existing solver.

**Keywords:** wall heat flux modeling; premixed turbulent combustion; flame wall interaction

在内燃机、燃气轮机等大部分工业设备中, 燃烧均发生在受限的空间内. 燃烧室的壁面由于冷却的需要通常要保持较低的温度<sup>[1-2]</sup>, 这意味着在燃烧过程中可能会出现很大的壁面热流. 与此同时, 近些年燃烧室微小型化的趋势导致了更高的表面积与体积比, 这意味着衡量壁面热损失效应变得更加重要.

从物理本质考虑, 壁面热流模型的复杂性主要来自于火焰壁面相互作用. 根据火焰传播方向与壁面

的相对朝向, 近壁火焰问题包括火焰朝墙壁方向传播并逐渐熄火的迎面熄火 (head-on quenching)<sup>[3-13]</sup>, 火焰传播方向平行于壁面导致部分熄火的侧面熄火 (side-wall quenching)<sup>[9-10, 14-19]</sup>, 以及在非常受限管道中发生的全熄火 (total quenching)<sup>[20-21]</sup> 等不同情况. 近年来 Zhao 等<sup>[22-25]</sup> 提出了统计稳态的对冲火焰壁面作用构型, 新鲜反应物由进口以对冲流动方式冲刷壁面, 火焰面达到动态平衡. 平均的火焰壁面距离

收稿日期: 2024-04-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12272229).

作者简介: 李坤霖 (1998—), 男, 博士研究生, kunlin\_li@sjtu.edu.cn.

通信作者: 王利坡, 男, 博士, 教授, lipo.wang@sjtu.edu.cn.

由平均应变率、壁面温度以及湍流强度等决定。

对于真实的工业应用,采用直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)研究近壁火焰问题难以实现。因此,提出合适的壁面热流模型十分必要。一种直接衡量壁面热流的方法是通过利用近壁面第一个网格的平均滑移速度和温度。Han 等<sup>[26]</sup>针对变密度流,通过考虑气体密度及湍流普朗特数的变化提出一种温度壁面函数。依据内燃机相关工况的计算, Schmitt 等<sup>[27]</sup>提出将 DNS 确定的概率密度函数应用在粗网格计算中以描述相应壁面热流。Mandanis 等<sup>[28]</sup>在大涡模拟(large eddy simulation, LES)中采用不同的壁面律关系,发现在压缩行程中计算的壁面热流远远低于 DNS 结果,并且预测准确性对模型参数十分敏感。Bolla 等<sup>[29]</sup>由流动物理提出一种基于代数关系构造壁面律的 LES,然而非物理的模型参数需要根据实际情况调整。通过研究湍流边界层, Ghai 等<sup>[30]</sup>在低马赫数统计稳态的预混燃烧中提出了一个积分形式的能量守恒方程。由于壁面热流和释热率是主导项,因此模型的准确率很大程度由湍流边界层内的模型取得的平均反应速率决定。

除此之外,也有一些学者提出了简化理论模型。Poinsot 等<sup>[6]</sup>针对层流情况构造出最大壁面热流和熄火距离的关系。Boust 等<sup>[18]</sup>基于能量守恒提出壁面热流与熄火距离之间的关系式,这种预测与 DNS 或实验比对结果较好,但是并不适用于未熄火的火焰。Zhao 等<sup>[22]</sup>在统计稳态的迎面火焰中提出对冲流模型。通过唯一的输入参数局部应变率(火焰壁面距离),该模型便可以合理预测近壁温度和壁面热流。由于剪切流引起的平行壁面方向的热流远远小于壁面法向热流,该模型很可能拓广到不同实际工况。

本文将在未完整解析的流场中利用模型衡量壁面热流。为排除各种来源的不准确性,将采用过滤后的 DNS 数据以验证模型适用性。所提出的壁面热流估算可以应用到 LES 等实际工程计算分析。

## 1 模型构造

### 1.1 控制方程

如图 1 所示,在统计稳态的对冲流构型中<sup>[22]</sup>,火焰稳定在定温壁面附近。在主流方向上的连续性方程、温度方程及组分方程分别表示如下:

$$\tilde{\rho}_u \tilde{u}_{1,u} = \tilde{\rho}_b \tilde{u}_{1,b} = \tilde{\rho}_u \tilde{S}_L \quad (1)$$

$$\tilde{\rho} \tilde{u}_1 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}_1} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_1} \left( \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}_1} \right) + \tilde{\omega} \quad (2)$$

$$\tilde{\rho} \tilde{u}_1 \frac{\partial \tilde{c}}{\partial \tilde{x}_1} = \frac{1}{ReSc} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_1} \left( \tilde{\rho} \tilde{D} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial \tilde{x}_1} \right) + \tilde{\omega} \quad (3)$$

式中:上标  $\sim$  和  $\cdot$  代表无量纲量。参考尺度和速度分别选取为计算域尺寸  $L$  和层流火焰速度  $S_L^0$ , 进度变量  $c = \frac{Y_{R,u} - Y_R}{Y_{R,u} - Y_{R,b}}$ ,  $Y_{R,u}$  为新鲜反应物的质量分数,  $Y_{R,b}$  为经过火焰后的反应物质量分数,无量纲温度  $\tilde{T} = \frac{T - T_u}{T_{ad} - T_u}$ ,  $T_{ad}$  为绝热火焰温度,  $T_u$  为未燃侧温度,密度  $\rho$ 、比热容  $c_p$ 、热导率  $\lambda$  和质量扩散系数  $D$  的考量均选取为相应未燃侧的值,  $\tilde{\omega}$  是反应源项。

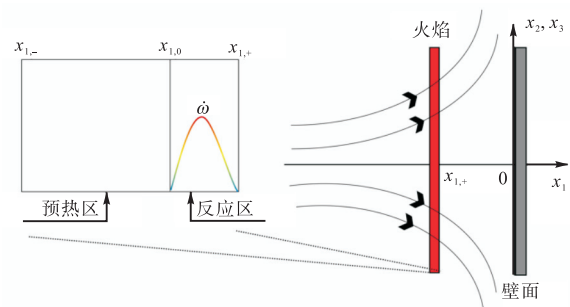


图 1 简化的迎面火焰与壁面作用示意  
Fig.1 Schematic of simplified flame-wall interaction for head-on flame case

根据火焰法向(已燃侧指向未燃侧)和壁面法向(壁面指向流体域)的相对方向,火焰可以被分类为迎面火焰(两向量同向)和卷吸火焰(两向量反向)。由于迎面火焰占比较高<sup>[22]</sup>,本文仅对迎面火焰的特性做讨论。反应物由左侧入口流入,  $\tilde{x}_{1,-}$  至  $\tilde{x}_{1,0}$  为预热区,  $\tilde{x}_{1,0}$  至  $\tilde{x}_{1,+}$  为反应区。分别对式(2)和式(3)由  $\tilde{x}_{1,-}$  至  $\tilde{x}_{1,+}$  积分可得

$$\tilde{\rho} \tilde{u}_1 (\tilde{T}_b - \tilde{T}_u) = \frac{\tilde{\lambda}}{RePr} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}_1} \Big|_{\tilde{x}_{1,+}} + \int_{\tilde{x}_{1,0}}^{\tilde{x}_{1,+}} \tilde{\omega} d\tilde{x}_1 \quad (4)$$

$$\tilde{\rho} \tilde{u}_1 (c_b - c_u) = \int_{\tilde{x}_{1,0}}^{\tilde{x}_{1,+}} \tilde{\omega} d\tilde{x}_1 \quad (5)$$

联立式(4)和(5),并代入边界条件  $\tilde{T}_u = 0$  和  $c_u = 0$  可以得到

$$\tilde{\rho} \tilde{u}_1 \tilde{T}_b = \frac{\tilde{\lambda}}{RePr} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}_1} \Big|_{\tilde{x}_{1,+}} + \tilde{\rho} \tilde{u}_1 c_b \quad (6)$$

对于火焰后的流场,涡量在火焰下游沿  $\tilde{x}_1$  方向近似保持不变<sup>[31]</sup>,流函数可以表示为

$$\Psi_0 = \tilde{x}_1^2 \tilde{\rho}(\tilde{x}_1) F(\tilde{x}_1) \quad (7)$$

因此火焰下游的流场可以通过涡量关系和流函数来决定

$$F'' - \frac{\tau \tilde{T}'}{1 + \tau \tilde{T}} F' + \left( \frac{\tau \tilde{T}'}{1 + \tau \tilde{T}} \right)^2 - \frac{\tau \tilde{T}''}{1 + \tau \tilde{T}} F =$$

$$\varepsilon^2 \frac{\tau \tilde{T}_b}{(1 + \tau \tilde{T}_b) \tilde{S}} \quad (8)$$

其中  $\tau$  和  $\alpha_0$  为释热率参数,  $t = \alpha_0 / (1 - \alpha_0)$ ,  $\alpha_0 = (T_{ad} - T_u) / T_{ad}$ ,  $\varepsilon$  表示以  $S_L^0 / L$  作无量纲的应变率.  $F$  的边界条件如下:

$$\begin{aligned} F(0) &= 0 \\ F(\tilde{x}_{1,+}) &= -\frac{(1 + \tau \tilde{T}_b) \tilde{S}}{2} \\ F'(\tilde{x}_{1,+}) &= \varepsilon - \frac{\tau \tilde{T}_b' \tilde{S}}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

与此同时, 式(7)表明火焰后的速度  $\tilde{u}_1 = -2F$ , 所以下游区域的温度方程为

$$-\frac{2F(\tilde{x}_1) d\tilde{T}}{1 + \tau \tilde{T} d\tilde{x}_1} = \frac{\tilde{\lambda}}{RePr} \frac{d^2 \tilde{T}}{d\tilde{x}_1^2} \quad (\tilde{x}_1 \geq \tilde{x}_{1,+}) \quad (10)$$

式(8)与式(10)联立求解时还需要提供近壁面的火焰速度关系, 考虑湍流效应,  $\tilde{S}$  可被构造为如下形式<sup>[22]</sup>

$$\tilde{S} = c_1 + c_2 \tilde{S}_L(T) \quad (11)$$

其中  $c_1$  和  $c_2$  是自由参数满足  $c_1 + c_2 = 1$ . 归一化的层流火焰速度  $\tilde{S}_L(T)$  是一个温度的函数, 可以通过理论分析确定为  $\left\{ \exp \left[ -\frac{\beta_0 (1 - \tilde{T}_b)}{1 - \alpha_0 (1 - \tilde{T}_b)} \right] \right\}^{0.5}$ <sup>[32]</sup>, 其中 Zeldovich 数  $\beta_0 = T_a (T_{ad} - T_u) / T_{ad}^2$ ,  $T_a$  为活化温度.

## 1.2 模型解

在具体计算中, 火焰锋面可以通过反应进度变量的等值面定义, 例如  $c = 0.95$ . 相应的  $\delta_{c=0.95}$  表示火焰壁面距离. 该迎面火焰模型可以通过耦合式(8)和(10)、边界条件(6)和(9)及定温边界温度进行求解, 式(11)中的火焰速度参数由 DNS 拟合选为  $c_1 = 0.4$  和  $c_2 = 0.6$ <sup>[22]</sup>. 火焰壁面距离由应变率决定. 给定应变率则对应一个火焰平衡位置及壁面热流值, 其无量纲表示为

$$Q_w = \frac{Q_w}{\rho_u S_L^0 c_{p,u} (T_{ad} - T_u)} = \frac{1}{RePr} \left( -\tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}_1} \Big|_w \right) \quad (12)$$

对于本文选取的数据,  $Re$  数和  $Pr$  数分别选取为 100 和 0.7<sup>[22]</sup>. 值得注意的是, 模型构型水平火焰代表系综平均后的结果, 因此该雷诺数需要由当地湍流黏度衡量, 具体实施将在下文讨论.

图 2 展示了不同应变率下的一系列模型解. 火焰壁面距离  $\delta_{c=0.95}$  的无量纲参考量选取为 Zeldovich 火焰厚度  $\delta_z = D_{th} / S_L^0$ , 其中  $D_{th}$  为未燃侧的气体热扩散系数. 在非常靠近壁面处, 例如  $\delta_{c=0.95} / \delta_z < 1.5$  时, 由于火焰速度表达式(11)表示火焰在近壁面依旧可以被湍流涡团推向壁面, 所以近壁面热流依旧较

大.  $\tilde{Q}_w$  在  $\delta_{c=0.95} / \delta_z = 5$  时取得最大值, 当火焰距离进一步增大时, 壁面热流逐渐减小.

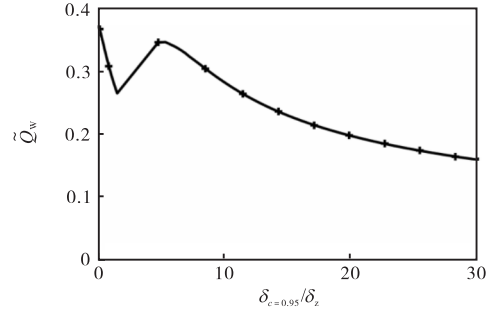


图 2 迎面火焰模型解得壁面热流与火焰壁面距离的关系  
Fig.2 Model solution of wall heat flux with flame-wall distance for head-on flame

## 2 DNS 数据及模型过滤条件的实施

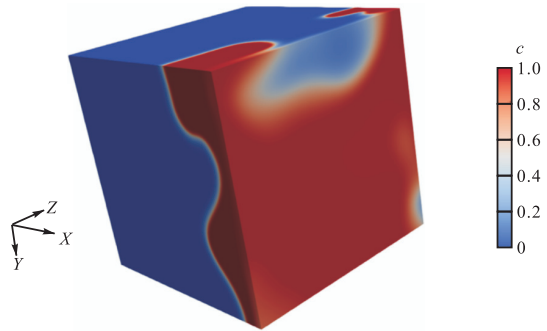
本文分析选取已有计算得到的 DNS 数据<sup>[22]</sup>, 主要算法如下. 由于近壁火焰由热传递主导<sup>[6, 33-34]</sup>, 采用简化的单步不可逆化学反应机理, 化学反应源项由阿伦尼乌斯公式表示为  $\dot{\omega} = B\rho(1-c)\exp[-\beta_0(1-\tilde{T}) / (1-\alpha_0(1-\tilde{T}))]$ , 其中  $B$  是指前因子. 计算域为边长  $L = 70\delta_z$  的立方体, 共划分了  $256 \times 256 \times 256$  的网格, 网格划分确保火焰反应区内包含 7 个网格尺度  $\Delta_{DNS}$  用于解析火焰结构. 入口速度的平均量为  $U_1 = 8.0 \times S_L^0$ ,  $U_2 = U_3 = 0$ , 速度的脉动部分为  $u_i' = 2.0 \times S_L^0$ , 在出口使用三维纳维斯托克斯特征边界条件(NSCBC), 等温壁面温度  $\tilde{T}$  被设置为 0, 所有热物性参数, 例如黏度  $\tilde{\mu}$ 、热导率  $\tilde{\lambda}$  和密度平均的质量扩散率  $\tilde{\rho} \tilde{D}$  都被认为是常数. 针对数值格式, 对于内部点采用十阶的中心差分格式, 在向边界点靠近过程中逐渐降为二阶格式, 时间积分采用显式的三阶龙格库塔格式. 反应进度变量和温度在一个选取的瞬时时刻分布如图 3 所示, 由于湍流强度在靠近壁面过程中逐渐衰减, 可以看出近壁面场相对光滑.

为验证所提出的模型, 选取过滤后的 DNS 场作为等效 LES 流场, 这样可以排除各种计算误差干扰, 例如湍流模型. 采用如下的物理空间高斯滤波函数  $G(x)$

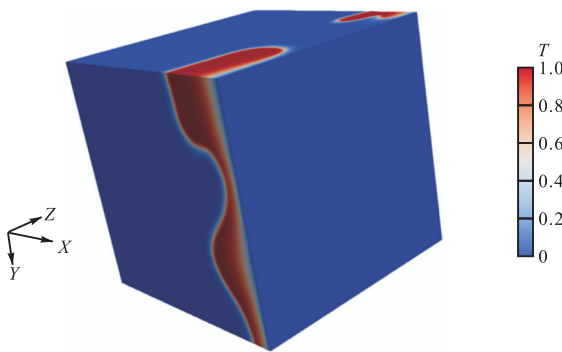
$$G(\mathbf{x}) = G(x_1, x_2, x_3) = \left( \frac{6}{\pi \Delta^2} \right)^{3/2} \exp \left[ -\frac{6}{\Delta^2} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) \right] \quad (13)$$

其中  $\Delta$  代表过滤尺度. 本文选取了不同的过滤尺度  $\Delta = n \times \Delta_{DNS}$ , 其中  $n = [5, 15, 45, 65]$  大致对应于  $\Delta = [0.7, 2.1, 6.4, 9.3] \times \delta_{th}$ ,  $\delta_{th}$  是定义为  $(T_{ad} - T_u) /$

$(\partial T / \partial x_1)_{\max}$  的热火焰厚度.



(a) 反应进度变量



(b) 无量纲温度

图3 DNS瞬时场分布

Fig.3 Spatial distribution of DNS

事实上,在未完整解析场内得到的火焰锋面代表了一系列在不同位置处的火焰,本文假定火焰位置的概率密度函数(probability density function, PDF)满足以下伽马分布

$$g(x, \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \quad (x > 0) \quad (14)$$

其中  $\Gamma$  表示伽马函数. 概率密度函数的控制参数  $\alpha$ ,  $\beta$  可以由 PDF 的峰值位置  $(\alpha-1)/\beta$  对应未完整解析的火焰锋面位置以及标准差  $\sigma = \sqrt{\alpha+1}/\beta$  为一半滤波尺度的量级来确定. 伽马分布随着控制参数  $\alpha$  和  $\beta$  的变化在图 4 中展示. 可以看出,随着  $\beta$  的减小或  $\alpha$  的增大, PDF 分布整体变得更宽并且期望变得更大.

具体在模型实施中,对于一个给定的空间点,  $\alpha$  和  $\beta$  可以由输入参数唯一确定,模型的壁面热流应由实际可能出现在壁面法向上各个位置  $\delta$  的火焰共同贡献得到

$$\langle \tilde{Q}_w \rangle = \int_0^\infty \tilde{Q}_w(\delta) g(\delta, \alpha, \beta) d\delta \quad (15)$$

图 5 展示了在不同滤波尺度下使用相应伽马分布沿壁面法向积分得到的一系列不同火焰壁面距离与壁面热流关系的模型解. 在较大滤波尺度下,由于

在每一个火焰位置下伽马分布更宽导致积分得到的壁面热流分布更加均匀,因此模型解趋于平坦.

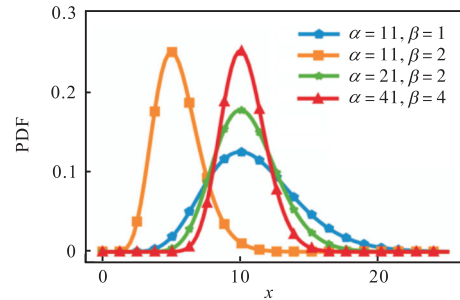


图4 不同参数下的伽马分布

Fig.4 Gamma distribution with different parameters

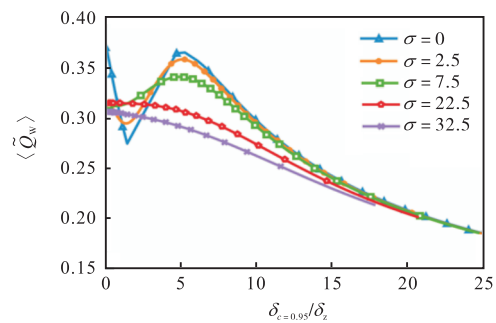


图5 迎面火焰模型在不同伽马分布标准差的积分壁面热流与火焰壁面距离之间的关系

Fig.5 Head-on model integrated wall heat flux with flame-wall distance under different Gamma distributions standard variance

### 3 结果与分析

火焰法向  $\mathbf{n} = -\nabla c / |\nabla c|$  和壁面法向  $\mathbf{N}$  的相对朝向  $\cos\langle \mathbf{n}, \mathbf{N} \rangle$  如图 6 所示,根据定义,  $\cos\langle \mathbf{n}, \mathbf{N} \rangle > 0$  代表迎面火焰,  $\cos\langle \mathbf{n}, \mathbf{N} \rangle < 0$  代表卷吸火焰,可以看出在当前构型下火焰主要为迎面火焰,有一定概率会表现为卷吸火焰,火焰几乎不平行于壁面. 本文仅针对占主要

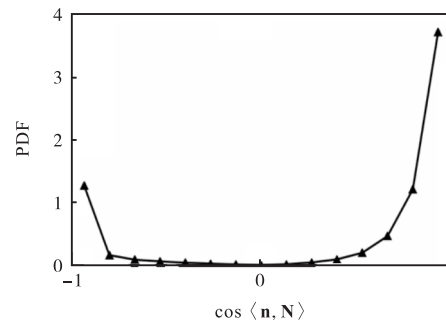


图6 火焰壁面相对朝向一维 PDF

Fig.6 PDF of the flame orientation relative to the wall normal

部分的迎面火焰情况作讨论,迎面火焰的火焰壁面距离 PDF 如图 7 所示,可以看到迎面火焰在空间上分布的较为均匀,PDF 的峰值大致取在  $Pe=10$  处.

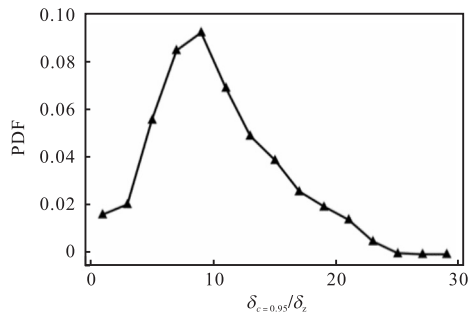


图 7 火焰壁面距离的一维 PDF

Fig.7 PDF of the normalized flame-wall distance

为获得系综平均代表的湍流黏度,本文对分析所选用的一系列 DNS 流场进行平均,并通过  $\nu_T = C_D \sqrt{k} l_m$  衡量当地湍流黏度<sup>[35]</sup>,其中  $k$  为湍动能,  $C_D$  选为 0.08<sup>[36]</sup>,  $l_m$  为湍流混合长度,本文选取为平均后平直火焰位置与壁面之间距离的一半.由此模型在系综平均下对应的湍流雷诺数  $Re_T$  可以被确定,另外湍流普朗特数  $Pr_T$  假定为 1. 图 8 展示了 DNS 结果中火焰壁面距离和壁面热流(式(12))的联合概率密度函数,同时模型解也在图中展示进行对比.在模型实施中,模型输入仅为火焰壁面距离这一参数,在分析的数据中该参数十分便于获得.模型解与 DNS 结果在整体变化趋势、峰值以及具体取值均吻合较好.一般来说,壁面热流整体随着火焰远离壁面而逐渐减小.

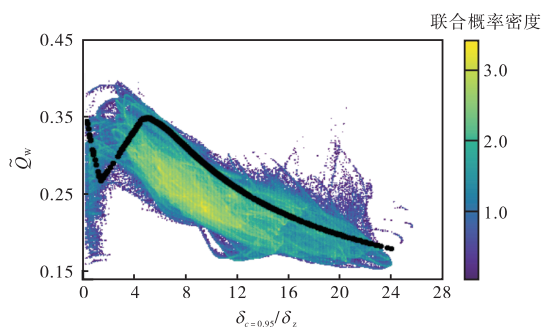


图 8 DNS 壁面热流与火焰壁面距离的联合概率密度分布函数及相应的模型解

Fig.8 Joint PDF between wall heat flux and flame-wall distance from DNS together with corresponding model solution

在给定瞬时时刻下不同过滤尺度的反应进度变量场  $c$  如图 9 所示,可以清晰地看出涡结构及标量峰值从图 (a) 到 (d) 逐渐光滑均匀.

图 10 展示了在不同的过滤尺度下,模型解与

DNS 结果的对比.无论从定性还是定量角度,模型解都基本独立于过滤尺度,并与 DNS 结果吻合较好.这样的鲁棒性表明即便在数值分辨率非常粗糙的情况下该模型仍适用.

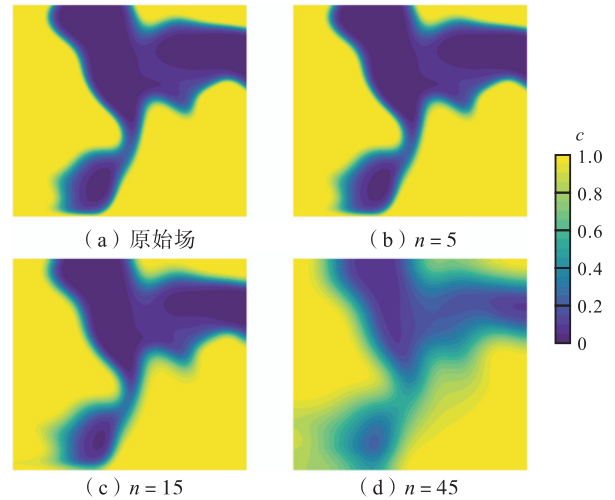


图 9 不同过滤尺度下  $\Delta = n \times \Delta_{DNS}$  近壁面法向截面反应进度变量云图

Fig.9 Near wall slices of the filtered progress variable  $c$  fields using filter sizes  $\Delta = n \times \Delta_{DNS}$

此外,本文还选取 DNS 壁面热流结果的条件平均作为传统衡量热流方法的对比验证,结果如图 11 所示.一般来说

$$Q_w = \frac{\bar{\rho} c_p}{Pr} (\nu_t + \nu) \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial n} \right|_{\text{wall}} \quad (16)$$

被用来在 LES 中预测壁面热流(有量纲形式),其中普朗特数  $Pr$  为常值,湍流黏度  $\nu_t$  可以由 Smagorinsky 模型<sup>[37]</sup>计算,表示为

$$\nu_t = l_s^2 (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{0.5} \quad (17)$$

其中  $\bar{S}_{ij}$  是过滤后的应变率,在近壁面使用 Van Driest 衰减函数以描述近壁面的长度尺度  $l_s = C_s \Delta \cdot [1 - \exp(-y^+/A^+)]$ ,其中模型参数通常取为  $C_s = 0.065$ ,  $A^+ = 25$ <sup>[38-39]</sup>.无量纲壁面距离  $y^+$  可以通过摩擦系数  $C_f = 0.027/Re_x^{1/7}$  确定,其中雷诺数  $Re_x$  由平行壁面的自由来流速度确定<sup>[40]</sup>.注意在式(16)中温度梯度和  $\nu_t$  代表在壁面上的热物性,因此,与本文中过滤操作一致,  $\nu_t$  选取为第 1 个过滤尺寸内的高斯平均.从图 11 可以看出,此计算得到的壁面热流结果严重依赖于过滤尺度.当  $n$  较小时( $n < 15$ ),与 DNS 结果的对比表现尚可;但对于较大的过滤尺度,比如  $n = 65$ ,热流预测结果偏差较大.由此对比可以看出新模型的预测精度优势(结果与网格尺度依赖很弱).

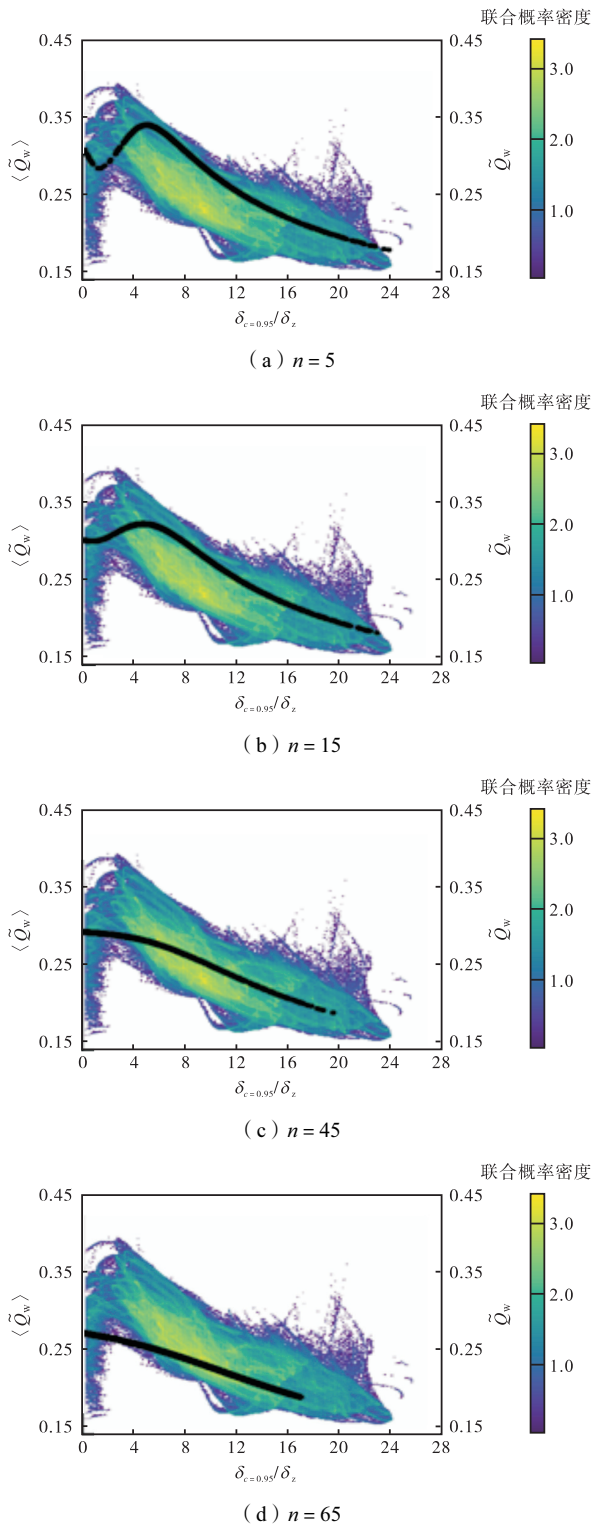


图10 DNS壁面热流与火焰壁面距离之间的联合概率密度分布函数及在不同过滤尺度下的模型解  
 Fig.10 Comparison of joint PDF between the DNS wall heat flux and the flame-wall distance with the model solutions under different filter sizes

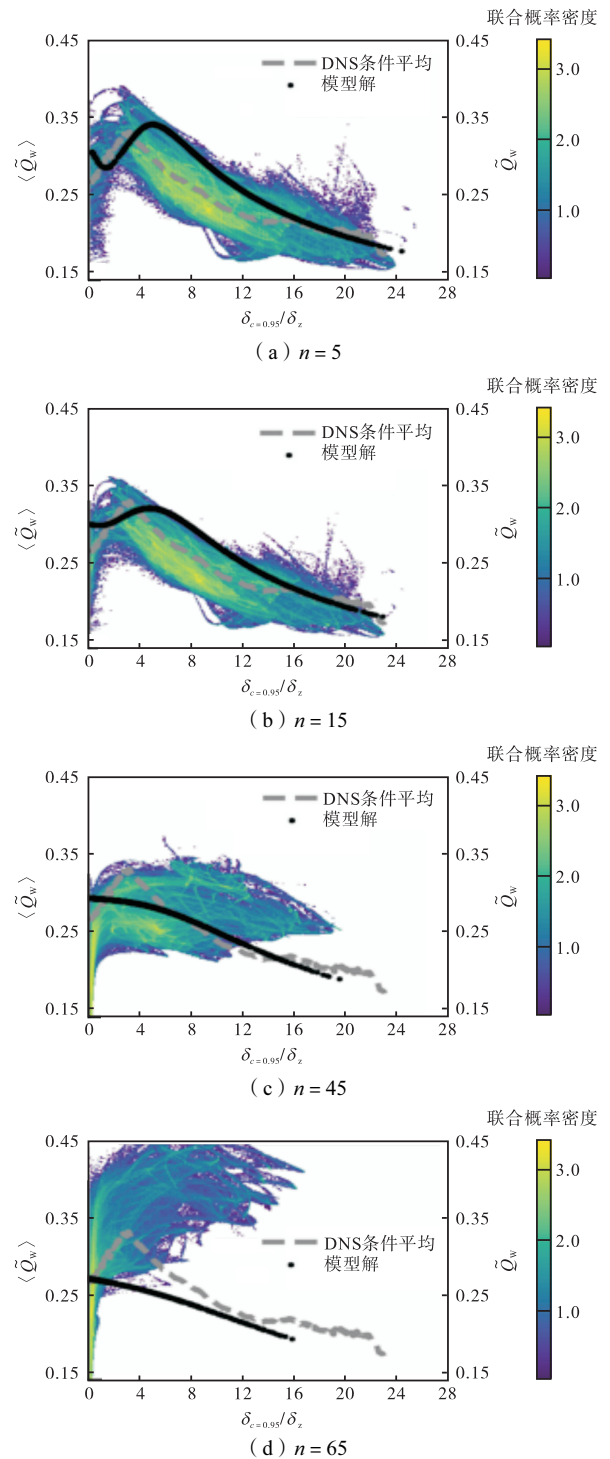


图11 在不同过滤尺度下传统方法计算得到的壁面热流结果与火焰壁面距离的联合概率密度分布函数与相应模型解、DNS条件平均结果的对比  
 Fig.11 Comparison of joint PDFs between the wall heat flux calculated by the traditional method and the flame-wall distance under different filter sizes with model solutions and DNS conditional mean

#### 4 结论

(1) 根据统计稳态的对冲近壁火焰构型的迎面火

焰部分, 发展了新的壁面热流模型. 为排除数值或实验的误差影响, 采用过滤的DNS结果做模型校验.

(2) 常规的温度梯度预测热流严重依赖于过滤尺度, 并可能在大过滤尺度下带来较大的预测偏差. 新

模型的预测结果几乎与网格尺度无关, 具有较高的鲁棒性, 并且与 DNS 结果吻合良好。

(3) 从实施角度考虑, 将本模型植入已有求解器十分便捷。由于壁面热流主要由壁面法向温度梯度决定, 此模型有望推广到其他不同应用工况。

#### 参考文献:

- [1] 王恩宇, 张翔宇, 史忠天, 等. 孔隙结构对水冷燃烧器燃烧换热特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(1): 27-35.  
Wang Enyu, Zhang Xiangyu, Shi Zhongtian, et al. Effect of pore structure on the combustion and heat transfer characteristics of water-cooled burners[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(1): 27-35 (in Chinese).
- [2] 刘海峰, 王冠月, 文铭升, 等. 喷油压力和进气温度对氨/正十二烷双燃料发动机燃烧稳定性影响研究[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(1): 1-8.  
Liu Haifeng, Wang Guanyue, Wen Mingsheng, et al. Influence of injection pressure and intake temperature on combustion stability of ammonia/n-dodecane dual-fuel engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(1): 1-8 (in Chinese).
- [3] Lai J, Chakraborty N. Effects of lewis number on head on quenching of turbulent premixed flames: a direct numerical simulation analysis[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2016, 96(2): 279-308.
- [4] Westbrook C K, Adamczyk A A, Lavoie G A. A numerical study of laminar flame wall quenching[J]. *Combustion and Flame*, 1981, 40: 81-99.
- [5] Hocks W, Peters N, Adomeit G. Flame quenching in front of a cold wall under two-step kinetics[J]. *Combustion and Flame*, 1981, 41: 157-170.
- [6] Poinot T, Haworth D, Bruneaux G. Direct simulation and modeling of flame-wall interaction for premixed turbulent combustion[J]. *Combustion and Flame*, 1993, 95(1/2): 118-132.
- [7] Popp P, Baum M. Analysis of wall heat fluxes, reaction mechanisms, and unburnt hydrocarbons during the head-on quenching of a laminar methane flame[J]. *Combustion and Flame*, 1997, 108(3): 327-348.
- [8] Alshaaan T, Rutland C J. Wall heat flux in turbulent premixed reacting flow[J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174(1): 135-165.
- [9] Bellenoue M, Kageyama T, Labuda S A, et al. Direct measurement of laminar flame quenching distance in a closed vessel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(3): 323-331.
- [10] Dabireau F, Cuenot B, Vermorel O, et al. Interaction of flames of  $H_2 + O_2$  with inert walls[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 135(1/2): 123-133.
- [11] Sotton J, Boust B, Labuda S A, et al. Head-on quenching of transient laminar flame: Heat flux and quenching distance measurements[J]. *Combustion Science and Technology*, 2005, 177(7): 1305-1322.
- [12] 刘军, 王意宝, 许朝阳, 等. 湿壁氛围甲烷预混火焰传播的可视化试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(2): 209-219.  
Liu Jun, Wang Yibao, Xu Zhaoyang, et al. Visualized experimental research on the propagation of methane premixed flame in wet wall atmosphere[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(2): 209-219 (in Chinese).
- [13] 杨灿, 李庆旗, 龚涛, 等. 壁面温度和撞壁距离对柴油喷雾燃烧特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(4): 373-380.  
Yang Can, Li Qingqi, Gong Tao, et al. Effects of wall temperature and impingement distance on impinged diesel spray ignition and combustion characteristics[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(4): 373-380 (in Chinese).
- [14] Zirwes T, Häber T, Zhang F, et al. Numerical study of quenching distances for side-wall quenching using detailed diffusion and chemistry[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2021, 106(2): 649-679.
- [15] Clendening C W, Shackelford W, Hilyard R. Raman scattering measurements in a side-wall quench layer[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, 18(1): 1583-1590.
- [16] Ezekoye O, Greif R, Sawyer R F. Increased surface temperature effects on wall heat transfer during unsteady flame quenching[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1992, 24(1): 1465-1472.
- [17] Alshaaan T M, Rutland C J. Turbulence, scalar transport, and reaction rates in flame-wall interaction[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, 27(1): 793-799.
- [18] Boust B, Sotton J, Labuda S A, et al. A thermal formulation for single-wall quenching of transient laminar flames[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 149(3): 286-294.
- [19] Jainski C, Rissmann M, Böhm B, et al. Sidewall quenching of atmospheric laminar premixed flames stud-

- ied by laser-based diagnostics[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 183: 271-282.
- [20] Jarosiński J. Flame quenching by a cold wall[J]. *Combustion and Flame*, 1983, 50: 167-175.
- [21] Harris M E, Grumer J, Von Elbe G, et al. Burning velocities, quenching, and stability data on nonturbulent flames of methane and propane with oxygen and nitrogen[J]. *Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena*, 1948, 3(1): 80-89.
- [22] Zhao P, Wang L, Chakraborty N. Analysis of the flame-wall interaction in premixed turbulent combustion[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 848: 193-218.
- [23] Zhao P, Wang L, Chakraborty N. Strain rate and flame orientation statistics in the near-wall region for turbulent flame-wall interaction[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2018, 22(5): 921-938.
- [24] Zhao P, Wang L, Chakraborty N. Vectorial structure of the near-wall premixed flame[J]. *Physical Review Fluids*, 2019, 4(6): 063203.
- [25] Zhao D, Hernández Pérez F E, Guo C, et al. Near wall effects on the premixed head-on hydrogen/air flame[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 244: 112267.
- [26] Han Z, Reitz R D. A temperature wall function formulation for variable-density turbulent flows with application to engine convective heat transfer modeling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(3): 613-625.
- [27] Schmitt M, Frouzakis C E, Wright Y M, et al. Direct numerical simulation of the compression stroke under engine relevant conditions: Local wall heat flux distribution[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 92: 718-731.
- [28] Mandanis C, Schmitt M, Koch J, et al. Wall heat flux and thermal stratification investigations during the compression stroke of an engine-like geometry: A comparison between LES and DNS[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, 100(3): 769-795.
- [29] Bolla M, Impagnatiello M, Keskinen K, et al. Development of an algebraic wall heat transfer model for LES in IC engines using DNS data[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 5811-5819.
- [30] Ghai S Kr, Ahmed U, Klein M, et al. Energy integral equation for premixed flame-wall interaction in turbulent boundary layers and its application to turbulent burning velocity and wall flux evaluations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 196: 123230.
- [31] Eteng E, Ludford G S S, Matalon M. Displacement effect of a flame in a stagnation-point flow[J]. *Physics of Fluids*, 1986, 29(7): 2172.
- [32] Glassman I, Yetter R A. *Flame Phenomena in Premixed Combustible Gases*[M]. Elsevier, 2008: 147-260.
- [33] Lai J, Klein M, Chakraborty N. Direct numerical simulation of head-on quenching of statistically planar turbulent premixed methane-air flames using a detailed chemical mechanism[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, 101(4): 1073-1091.
- [34] Ezekoye O A, Greif R. A comparison of one and two dimensional flame quenching: heat transfer results [C]//*National Conference and Exposition on Heat Transfer*. Atlanta, GA(United States), 1993.
- [35] Prandtl L. *Über Ein Neues Formelsystem Für Die Ausgebildete Turbulenz*[M]. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1945.
- [36] Wilcox D C. *Turbulence Modeling for CFD*[M]. La Canada, CA: DCW industries, 1998.
- [37] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations[J]. *Monthly Weather Review*, 1963, 91(3): 99-164.
- [38] Moin P, Kim J. Numerical investigation of turbulent channel flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 118(1): 341-377.
- [39] Van Driest E R. On turbulent flow near a wall[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1956, 23(11): 1007-1011.
- [40] White F M. *Fluid Mechanics*[M]. New York: McGraw-Hill, 2003.