

掺氢丙烷MILD燃烧与传统燃烧的反应传播速度数值研究

刘立业, 张健鹏

四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月9日; 发布日期: 2026年6月16日

摘要

针对MILD燃烧无视觉可见火焰的现象, 本文提出了一种基于火焰传播速度的分析方法, 用于预混丙烷掺氢MILD燃烧的反应传播速度评估。通过CFD模拟与CHEMKIN化学动力学计算相结合的方式, 研究了MILD燃烧与传统有焰燃烧在掺氢比 $F_{H_2} = 0\% \sim 50\%$ 条件下的流动速度、燃烧反应传播速度及Damköhler数(Da)的空间分布。本研究改进了丙烷-氢气MILD燃烧层流火焰速度经验公式, 将其预测误差控制在10%以内。研究发现: 主要反应区内 Da 保持在1左右, Da 的空间分布主要由流动特征时间主导, 表明在MILD燃烧中化学时间与混合时间相当。与传统燃烧不同的是, MILD主要反应区域内湍流火焰速度低于局部流速, 湍流增强因子在全流场大于1, 为揭示无焰燃烧的实现建立机制提供了一种新的视角。

关键词

MILD燃烧, 无焰燃烧, 火焰传播速度, 掺氢燃烧, Da

Numerical Study on Reaction Propagation Speed in Propane/Hydrogen MILD Combustion and Traditional Combustion

Liye Liu, Jianpeng Zhang

School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: May 11, 2026; accepted: June 9, 2026; published: June 16, 2026

Abstract

To address the phenomenon of visually invisible flames in MILD (Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution) combustion, this paper proposes a method based on flame propagation speed to evaluate

the reaction propagation speed of propane/hydrogen MILD combustion. By using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and CHEMKIN chemical kinetic calculations, the spatial distributions of flow velocity, combustion reaction propagation speed, and the Damköhler number (Da) were investigated for both MILD combustion and conventional flaming combustion at hydrogen blending ratios (F_{H_2}) ranging from 0% to 50%. This study improved the empirical formula for the laminar flame speed of propane-hydrogen MILD combustion that its prediction error is within 10%. The results reveal that Da remains at approximately 1 within the main reaction zone, and its spatial distribution is predominantly governed by the characteristic flow time. This indicates that the chemical timescale is comparable to the mixing timescale in MILD combustion. Unlike conventional combustion, the turbulent flame speed within the main MILD reaction zone is lower than the local flow velocity, and the turbulence enhancement factor is greater than 1 throughout the entire flow field. These findings offer a new perspective for describing the establishment of flameless combustion.

Keywords

MILD Combustion, Flameless Combustion, Flame Propagation Speed, Hydrogen-Blended Combustion, Da

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

燃烧至今仍是飞行器动力装置热力转换系统的核心。航空业贡献了全球约 2.5% 的人为 CO_2 排放[1], 国际民航组织(ICAO)对航空产业提出了更为严苛的 NO_x 、CO 和 UHC 的限值要求。发动机要进一步改进温升能力、污染物控制和宽速域适应性[2], 须发展兼顾低碳化与低污染的新型燃烧技术[3]。

掺氢燃料引起了燃烧领域的关注[4]-[6]。然而, 氢气绝热火焰温度高, 在局部富燃或高温区会加速热力型 NO_x 的生成[7][8]。MILD 燃烧, 也称无焰燃烧, 以其均匀的温度分布和低氧稀释特性, 有望缓解这一矛盾。MILD 燃烧是过去三十年发展起来的一种低氧稀释燃烧模式[9][10]。MILD 燃烧通过强烟气卷吸让反应物在进入反应区前就被大量惰性产物稀释, 没有视觉可见的传统燃烧火焰锋面, 温度场整体均匀, 峰值温度明显下降, 从根源上抑制了热力型 NO_x , 降低燃烧过程的污染排放。其特征能满足掺氢燃烧中突出的 NO_x 控制需求。但燃料切换为掺氢碳氢燃料[7][11]时, NO_x 排放和燃尽率难以平衡。

针对掺氢 MILD 燃烧, 已有研究主要围绕燃烧稳定性、燃尽特性及 NO_x 排放规律展开。Ayoub 等人[12]通过实验室规模炉膛实验实现了约 10 ppmv 量级的 CO 和 NO 平衡排放。Ferrarotti 等人[13]发现减小空气喷嘴直径或使用长喷管预热燃料可有效降低峰值温度和 NO_x 排放。Xu 等人[14]将 MILD 燃烧与旋流火焰模式进行了直接对比, 发现对于掺氢体积分数 $F_{H_2} = 20\%$ 的甲烷-氢气掺混燃料, MILD 燃烧的稳定形成需要壁面温度高于 868 K 这一阈值, NO 生成主要在火焰锋面下游的燃烧器出口, 可用壁面温度、排气温度和炉温进行控制。在高掺氢比乃至纯氢条件下, Xu 等人的工作[15]进一步表明, 压力与 H_2O 稀释对 NO 生成路径的影响不可忽视, 表明燃烧室设计还须将燃烧压力和稀释策略纳入协同优化的范畴。Yang 等人[16]近期在双同轴射流喷嘴 MILD 模型燃烧室上的实验进一步证实, 通过抬升火焰和分散反应区来强化高温烟气与未燃反应物的混合, 可实现燃烧后烟气的 NO_x 和 CO 排放低于 10 ppm@15% O_2 。

针对 MILD 燃烧无视觉可见火焰锋面的现象, Wang 等人[17]通过对比 MILD 燃烧与传统钝体稳焰燃烧的数值仿真结果, 发现 MILD 条件下层流火焰速度远低于局部流速, 化学反应时间尺度与混合时间尺度相当, Damköhler 数更接近 1。Göktolga 等人[18]通过三维直接数值模拟, 揭示了 MILD 燃烧中的火焰形成受自点火控制, 而非传统火焰传播机制。Minamoto 等人[19]通过对 MILD 条件下强烟气回流的湍流燃烧进行系统性的直接数值模拟, 阐明了反应区的形态特征以及标量梯度演化。Awad 等人[20]最近评估了均相混合物 MILD 燃烧中 Damköhler 数的分布, 为理解该燃烧模式下的湍流-化学相互作用提供了理论基础。

针对 MILD 燃烧建立机制的探究, 本课题组前期已开展了一系列基于 FLUENT [21]平台的数值模拟研究工作: 深入分析了燃烧功率、喷口直径及全局当量比对丙烷 MILD 燃烧特性的影响规律[22]。Wang 等[23]在后续研究中结合反应器网络计算与详细燃烧化学反应机理, 系统研究了预热混丙烷/空气 MILD 燃烧在不同操作条件及炉膛几何形状下的排放特性。本文将进一步探索 MILD 燃烧反应区内, 燃烧反应传播速度与当地局部流动的关系。虽然 MILD 燃烧无明显火焰锋面, 但已有研究表明[24] [25], 其燃烧反应传播速度仍可用传统燃烧中火焰传播速度的概念进行评估和模拟。MILD 燃烧的火焰传播速度不再解释为火焰锋面的实际运动速度, 而是把它作为一种基于化学动力学和流动条件构建的燃烧指标。为深入揭示 MILD 燃烧反应传播速度的化学本质, 本文利用 CHEMKIN [26]进行化学动力学层面的补充分析, 对一维层流预混火焰结构进行求解, 获得层流燃烧速度、火焰厚度及关键自由基分布等参数。通过上述数值方法的综合运用, 本文旨在系统分析 MILD 燃烧在不同工况下的反应传播特性, 并利用计算获得的反应传播速度来分析其与流场结构的关系。

2. 研究方法

2.1. 模型设置和实验数据验证

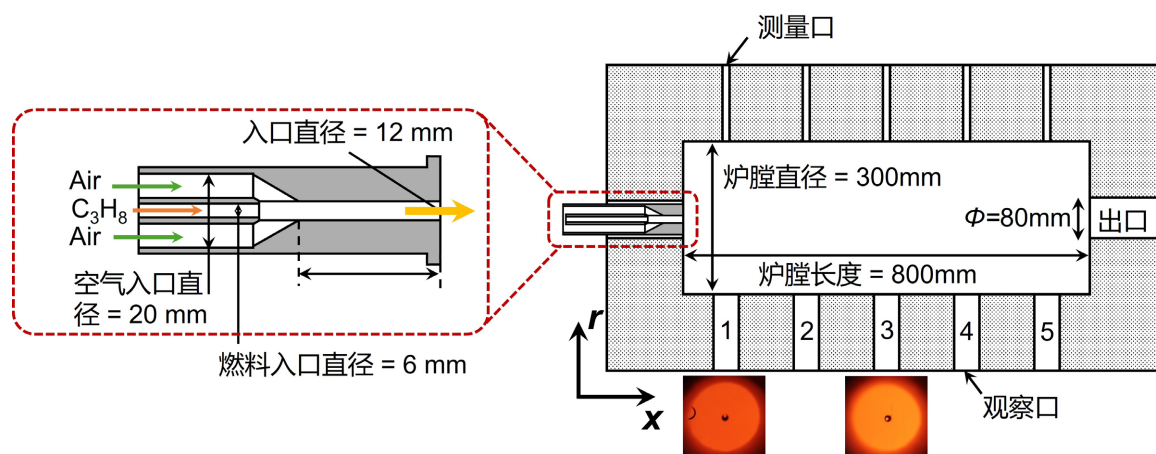


Figure 1. Schematic diagram of the furnace structure and premixed burner dimensions [23]

图 1. 炉膛结构及预混燃烧器尺寸示意图[23]

本文采用商业软件 FLUENT 进行 CFD 模拟。根据图 1 中燃烧炉膛和预混燃烧器的具体尺寸, 利用 ICEM 软件对计算域进行网格划分。网格类型采用 2D 网格, 由于实际问题的高度对称性, 使用轴对称模型来进行简化。为了验证计算结果对网格数量和精细度的依赖性, 分别对 21,000、40,300、50,900 的网格模型进行了温度的结果对比, 见图 2, 40,000 以上的网格数量已经足够重现实验结果。为更好地保证剪切层的仿真精度, 我们最终选择如图 3 所示的 2D 轴对称网格模型, 共计 50,929 个平面网格。

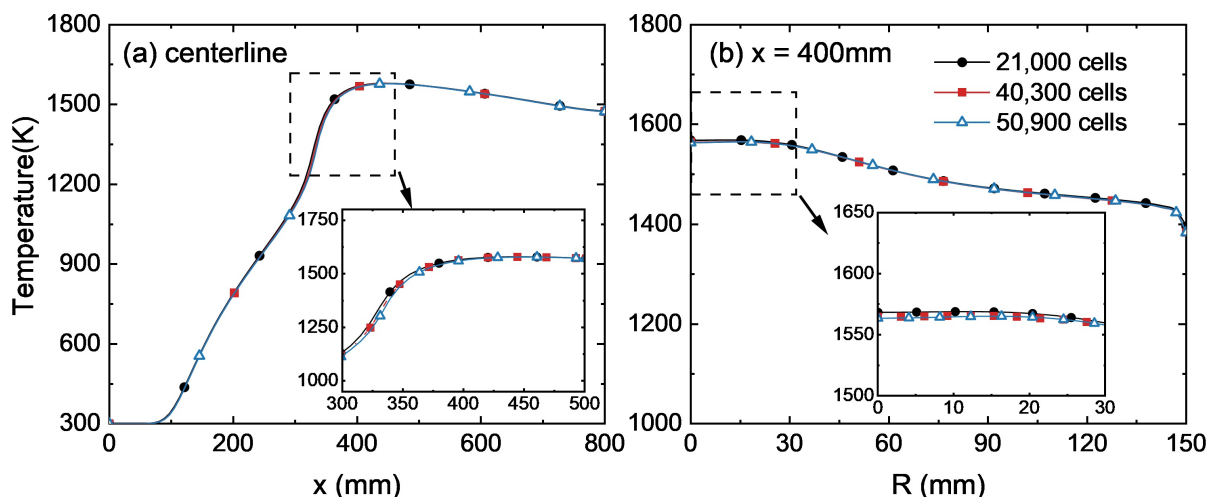


Figure 2. Verification of grid independence: (a) Temperature along the centerline; (b) Radial temperature at $x = 400$ mm
图 2. 网格独立性验证: (a) 中心线温度; (b) $x = 400$ mm 处的径向温度

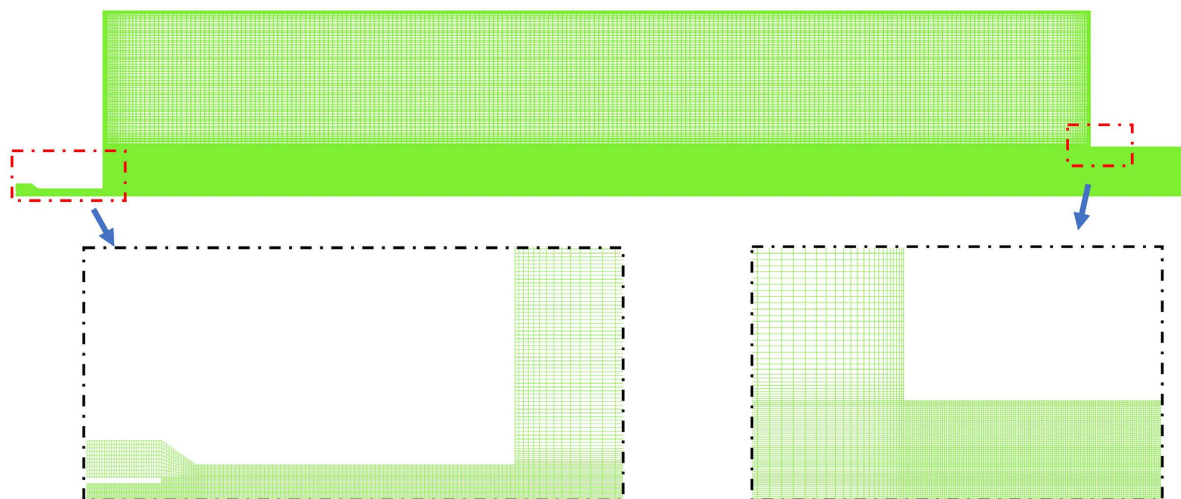


Figure 3. 2D axisymmetric mesh of the premixed combustion chamber
图 3. 预混燃烧室 2D 轴对称网格

对于实验的模拟, 本文中选择了稳态 RANS 控制方程组用于描述燃炉内的流动和组分传输。采用标准 $k-\epsilon$ 模型对湍流控制方程进行封闭。速度 - 压力耦合求解采用了 SIMPLE 算法。对于燃烧过程和炉壁产生的辐射, 本计算中采用了离散坐标法(DO)计算辐射换热量, 并采用灰体气体加权算法(WSGGM)来计算气体的发射率。除压力方程采用二阶中心差分之外, 其余的控制方程均采用二阶格式进行离散。湍流 - 化学反应之间的相互作用采用涡耗散概念(EDC)模型[27], 用于描述 MILD 燃烧中的详细化学反应过程。本文中的 MILD 预混燃烧选择丙烷作为主要燃料, 空气作为氧化剂, 计算中采用了 Jiménez 等人[28]提出的丙烷燃烧骨架机理。所有气体均视为理想气体, 其比热、焓值和熵均以温度的多项式函数形式表示。进口设置为速度进口, 出口设置为压力出口(1 atm), 其他均为定温壁面, 其中壁面温度是参考了实验测量结果, 并对关键火焰参数计算式进行了定义, 利用 FLUENT 的用户自定义函数功能(UDF)搭载计算。壁面的热辐射系数设置为 0.6。

图 4 展示了上述数值模型所预测的燃烧功率 15 kW, $\phi = 0.9$, 丙烷 - 空气 MILD 燃烧工况下, 炉内

温度、二氧化碳、一氧化碳和氧浓度与实验测量结果的对比。利用前述的模型设置基本上重现了炉内的燃烧特性。炉内大部分的模拟结果与实验测量符合较好对于火焰传播速度的数值仿真, 燃烧的输入功率和当量比分别通过改变燃气和空气的流量进行调节。此外, 保证在燃烧总强度不变的情况下, 调整了燃料端 C_3H_8 和 H_2 的体积分数占比, 增加了掺氢比 $F_{H_2} = 10\%$, 20% 和 50% 三个额外的工况以作为对比, 具体混合燃料热值 LHV_{mix} 和入口速度设置如表 1 所示。除此之外, 为了对比 MILD 燃烧与传统燃烧的燃烧特性, 按照 Wang 等人[17]的设置方法, 在网格模型中两倍入口半径位置处添加了一个斜 45° 凸体挡板作为稳焰钝体以产生传统燃烧火焰, 如图 5 所示, 除去计算域网格的几何差异, 在传统燃烧模式下的其它参数设置均保持不变。

Table 1. CFD inlet conditions setting
表 1. CFD 入口工况设置

F_{H_2}	LHV_{mix} (MJ/m ³)	v_{fuel} (m/s)	v_{ox} (m/s)	Φ	P (kw)
0%	91.4	5.688	16.27	0.9	14.7
10%	83.34	6.238	16.24	0.9	14.7
20%	75.28	6.905	16.19	0.9	14.7
50%	51.10	10.18	16.01	0.9	14.7

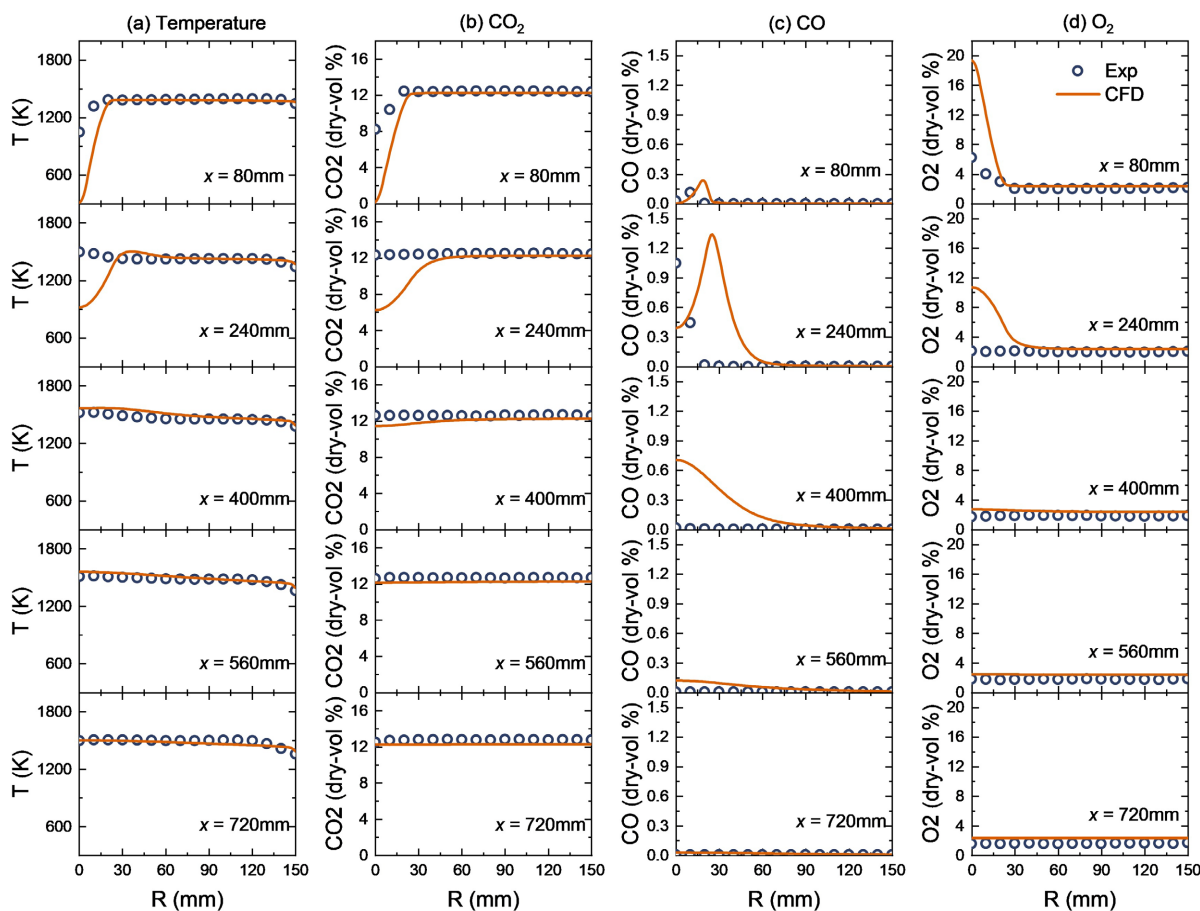


Figure 4. Comparison of CFD simulations and experimental measurements of premixed MILD combustion
图 4. 预混 MILD 燃烧的 CFD 模拟与实验测量结果对比

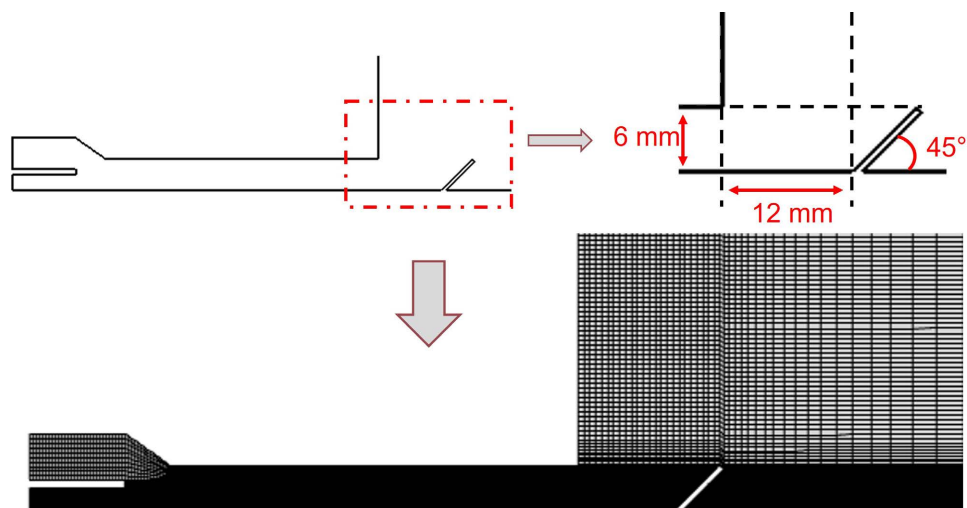


Figure 5. Mesh model using convex baffles
图 5. 采用凸体挡板的网格模型

2.2. 火焰特征参数公式推导和反算验证

在 CFD 计算模型中, 用稳态 RANS 控制方程组描述燃炉内的流动和组分传输, 并采用了标准 $k-\varepsilon$ 模型对湍流控制方程进行封闭。湍流动能及其耗散率由 $k-\varepsilon$ 模型的两个方程求解, 湍流动能(turbulent kinetic energy) k 的方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (2-1)$$

湍流动能耗散率(dissipation) ε 的方程为:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-2)$$

本工作中的燃烧反应传播速度通过火焰传播速度进行评估。根据 Turns 和 Haworth [29], 层流火焰速度 S_L 可表示为:

$$S_L = S_{L,ref} \left(\frac{T_u}{T_{u,ref}} \right)^\gamma \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.1Y_{dil}) \quad (2-3)$$

式(2-3)是 Metghalchi 和 Keck [30]提出的丙烷层流火焰传播速度计算公式, 其中 T_u 为未燃反应物的温度, P 为压强, Y_{dil} 为稀释剂(如 CO_2 , H_2O 等)的质量分数, 参考状态参数为 $T_{u,ref} = 298 \text{ K}$, $P_{ref} = 1.0 \text{ atm}$ 及

$$S_{L,ref} = B_M + B_2 (\Phi - \Phi_M)^2 \quad (2-4)$$

对于纯丙烷燃烧, $B_M = 34.22 \text{ cm/s}$, $B_2 = -138.65 \text{ cm/s}$, $\Phi_M = 1.08$ 。式(2-3)中的温度和压强指数可分别表示为:

$$\gamma = 2.18 - 0.8(\Phi - 1), \beta = -0.16 + 0.22(\Phi - 1). \quad (2-5)$$

本研究发现, 针对丙烷-氢气混合燃料, 使用纯丙烷公式(2-4)、(2-5)的各项指数和函数形式都不再适用。 β 和 γ 均无法使用线性关系来描述。因此在 10%、20% 和 50% 三个固定掺氢比例下, 基于多项式重

构了层流火焰传播速度的经验公式。本文重构的公式中保留将火焰速度表示为参考火焰速度、温度修正项和压力修正项的乘积(见公式(2-3)), 但针对每个掺氢比例, 重新确定参考火焰速度 $S_{L,ref}(\Phi)$ 以及指数 $\gamma(\Phi)$ 和 $\beta(\Phi)$ 的函数形式与系数。

本研究在 Metghalchi-Keck 层流火焰计算公式基础上, 引入可调阶数多项式, 对掺氢混合燃料的层流火焰速度各组成项进行拟合, 能够捕捉指数随当量比变化的非线性特征, 为后续工程计算提供了更高精度的半经验公式。反算值与对应工况下的模拟值的差异, 如图 6 所示。相较于经典线性拟合(部分工况下超过 20% 的误差), 优化后的火焰速度计算模型在不同的条件下(Φ, F_{H_2}, T, P), 均有着更高的预测精度, 相对误差稳定维持在 10% 以内。

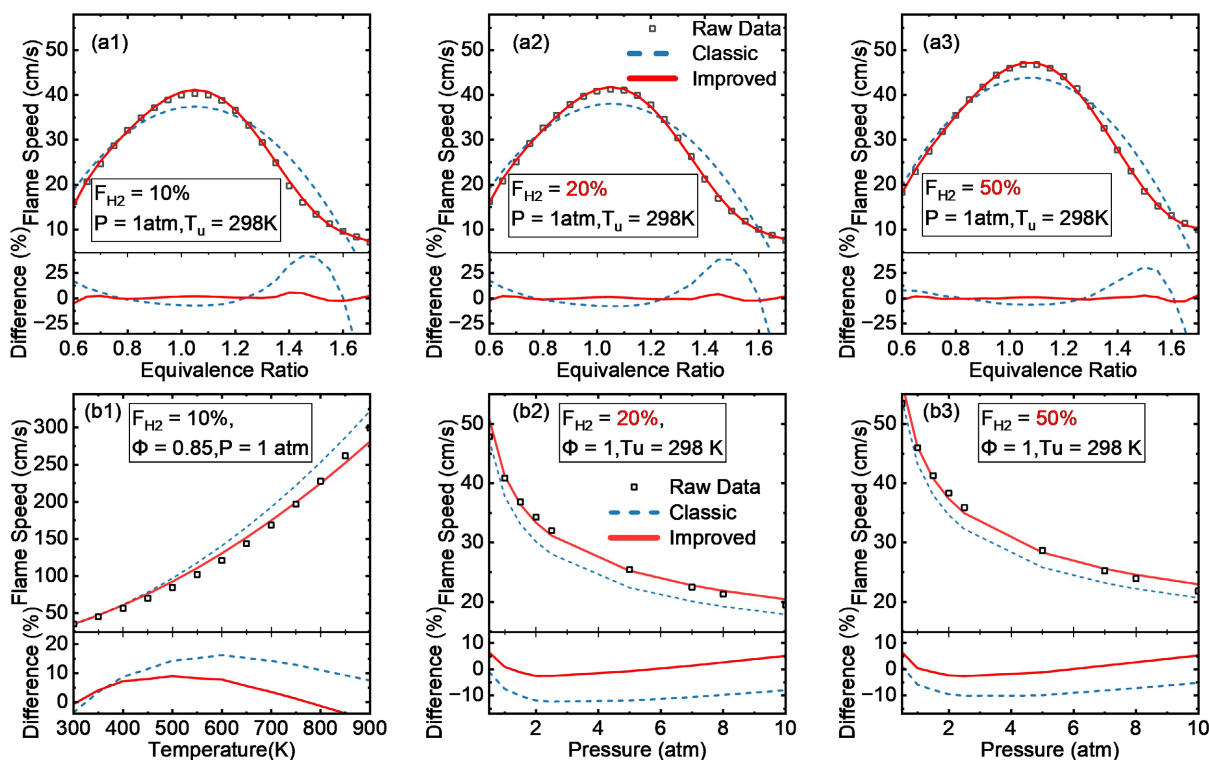


Figure 6. Validation of the optimized flame velocity model inversion under different conditions (Φ, F_{H_2}, T, P)

图 6. 不同的条件下(Φ, F_{H_2}, T, P)优化火焰速度模型反算验证

通过上述方式, 本研究定量评估了高阶多项式为火焰传播速度计算带来的精度提升, 确立了针对不同掺氢比例的最优模型形式, 最终针对每个掺氢比例, 分别给出 $S_{L,ref}(\Phi)$ 、 $\gamma(\Phi)$ 和 $\beta(\Phi)$ 的最佳多项式表达式及系数, 如表 2 所示:

Table 2. Optimal fitting coefficients and equations

表 2. 拟合最佳系数和表达式

掺氢比例	参数	阶数	多项式表达式
$F_{H_2} = 10\%$	$S_{L,ref}(\Phi)$	6	$-896\Phi^6 + 6124\Phi^5 - 16812\Phi^4 + 23742\Phi^3 - 18322\Phi^2 + 7442\Phi - 1237$
	$\gamma(\Phi)$	4	$7.35\Phi^4 - 28.3\Phi^3 + 42.7\Phi^2 - 30.1\Phi + 10.3$
	$\beta(\Phi)$	4	$-3.95\Phi^4 + 14.9\Phi^3 - 22\Phi^2 + 14.8\Phi - 4.17$

续表

$F_{H_2} = 20\%$	$S_{L,ref}(\Phi)$	6	$-846\Phi^6 + 5813\Phi^5 - 16045\Phi^4 + 22770\Phi^3 - 17658\Phi^2 + 7212\Phi - 1206$
	$\gamma(\Phi)$	4	$10.5\Phi^4 + -40.9\Phi^3 + 61.1\Phi^2 + -41.9\Phi + 12.9$
	$\beta(\Phi)$	4	$-4.13\Phi^4 + 15.8\Phi^3 - 23.4\Phi^2 + 15.8\Phi + -4.43$
$F_{H_2} = 50\%$	$S_{L,ref}(\Phi)$	6	$-631\Phi^6 + 4425\Phi^5 - 12379\Phi^4 + 17688\Phi^3 - 13740\Phi^2 + 5626\Phi - 942$
	$\gamma(\Phi)$	4	$4.51\Phi^4 - 17.2\Phi^3 + 26.3\Phi^2 - 19.5\Phi + 7.71$
	$\beta(\Phi)$	4	$-3.95\Phi^4 + 14.9\Phi^3 - 21.8\Phi^2 + 14.5\Phi - 4.03$

燃烧区域内的局部当量比可以通过未燃反应物和燃烧产物的体积分数进行计算, 如 Kamal 等人[31]所提出针对甲烷的局部 Φ 估算公式(2-6), 与之类似, 本文中将其修改为适用于丙烷掺氢燃料, 即:

$$\Phi = \frac{X_{CO_2} + 5X_{C_3H_8} + 2X_{CH_4} + 0.5(X_{CO} + X_{H_2O} + X_{H_2})}{X_{CO_2} + X_{O_2} + 0.5(X_{H_2O} + X_{CO})} \quad (2-6)$$

此外, 湍流火焰速度 S_T 主要决定于相应的层流火焰速度以及局部的湍流脉动速度, 对于不同范围 u'/S_L 比值范围内有不同的估算方法, 本文中采用如下分段式公式:

$$S_T = S_L \left(1 + C \left(\frac{u'}{S_L} \right)^2 \right), \frac{u'}{S_L} \leq 1.454 \quad (2-7)$$

$$S_T = 2.4S_L \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.7}, \frac{u'}{S_L} \geq 1.454 \quad (2-8)$$

式(2-7)由 Williams 提出[32], 其中湍流脉动速度 $u' = (2k/3)^{0.5}$, k 为湍动能, C 约为 1。式(2-8)由 Klimov [33] 通过理论推导和实验数据总结的方法得出, 适用于 u'/S_L 较大的情况。Williams 建议将式(2-8)中的比例系数从 3.5 改为 2.4。当 $u'/S_L \geq 1.454$ 时, 采用式(2-8)进行估算。

针对湍流场的气流流动特征, 有如下的一种表征时间尺度的定义, 我们称之为流动特征时间:

$$\tau_{flow} = l_0 / u' \quad (2-9)$$

其中 l_0 为湍流积分尺度可由湍动能 k 及湍流耗散率 ε 进行估算, 即 $l_0 = C_\mu k^3 / \varepsilon$, 系数 $C_\mu = 0.09$ 。化学特征时间定义为:

$$\tau_{chem} = \delta_L / S_L \quad (2-10)$$

在此研究中, 根据 Kumar 等人[34]的方法来计算达姆科勒数 Da , 即湍流特征时间(τ_{flow})与化学特征时间(τ_{chem})之比:

$$Da = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{chem}} \quad (2-11)$$

3. 结果与讨论

3.1. 燃烧场特征

如图 7 所示, 展示了不同工况下的炉内温度模拟结果及它们各自的主要反应区 $X_{OH} \geq 0.05X_{OH,max}$ 。可以看出, 工况 1~4 的炉内温度都较为均匀, 最高温度不超过 1700 K, 主要反应区在炉内分布广泛。值得

注意的是, 提高燃料中 H_2 的占比, 会使得丙烷燃烧的温度有轻微提升。

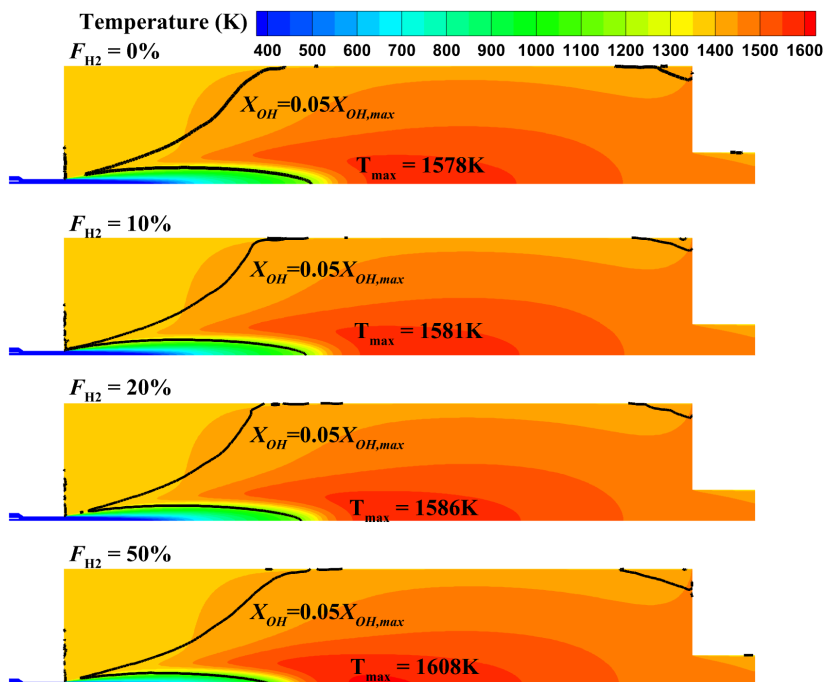


Figure 7. Combustion temperature distribution inside the furnace
图 7. 炉内燃烧温度场

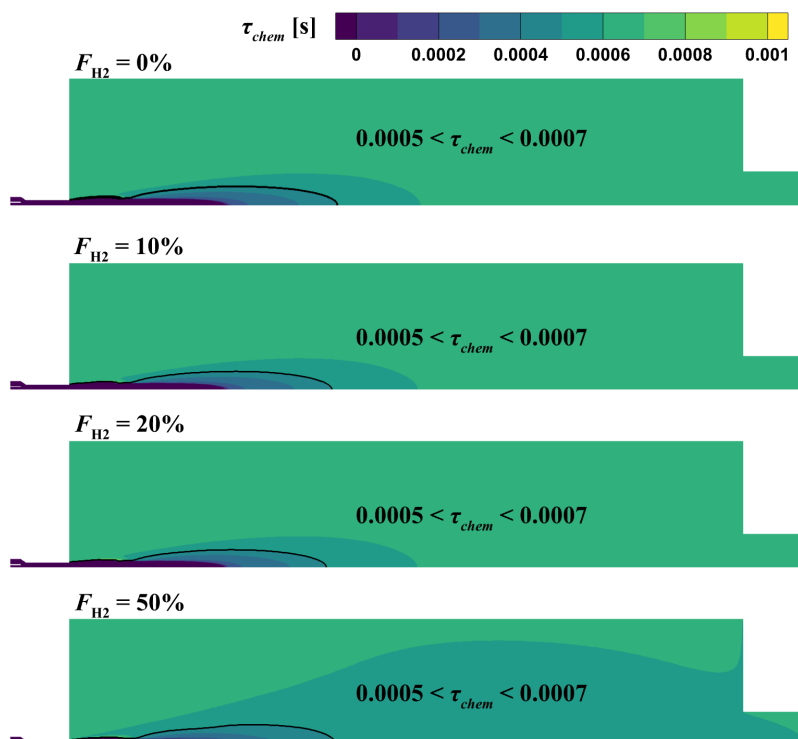


Figure 8. Time distribution of the chemical characteristics time of MILD combustion
图 8. MILD 燃烧化学特征时间分布

化学特征时间的分布能够反映局部燃烧化学反应速率。总的来说, 化学反应速率越快, 燃烧传播则越快, 相应的化学特征时间就越小。如图 8 所示, 化学特征时间由中心向壁面升高, 除去燃料入射区外的绝大多数区域的化学特征时间分布在 0.0005~0.0007 之间(黑线之外到壁面的部分), 表明整个反应区内发生了均匀的容积式燃烧反应。增大掺氢比 F_{H_2} 至 50%, 化学特征时间的数量级未发生明显变化, 但主反应区内的反应速度有一定的提升。

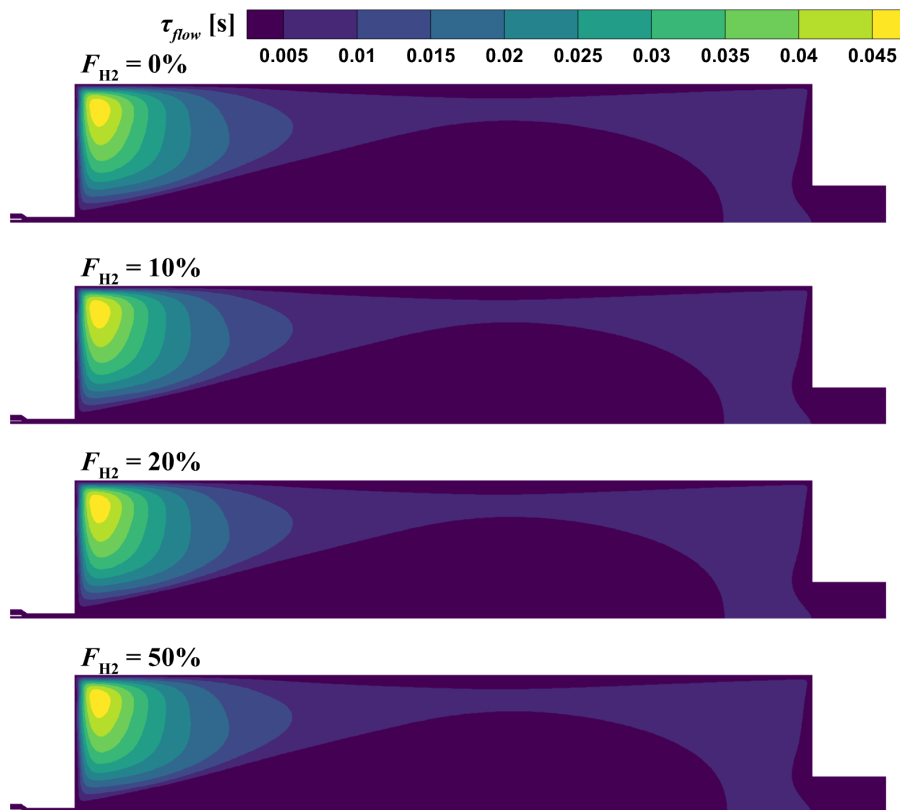


Figure 9. The distribution of CFD flow characteristic time
图 9. CFD 流动特征时间分布

从图 9 的流动特征时间分布中观察到, 增大 F_{H_2} , 流动特征时间的分布未发生明显变化。但相较于化学反应时间的均匀分布, 燃烧室内的流动情况并不均匀, 有着较为明显的差异: 中心射流处有着最低的流动特征时间, 中心区域向壁面则流速变慢, 流动特征时间升高。值得注意的是, 在燃料入射口径向方向区域的流动特征时间明显高于其它地方, 通过分析和流动速度分布得出, 该区域为圆柱形燃烧室内产生的二次流, 也是高温烟气与中心射流进行混合的区域, 其最高的流动特征时间代表此处气流的流动速度较慢。达姆科勒数 Da 能够表示在燃烧区域内, 是化学反应还是流动特性占主导地位。从图 10 可发现, Da 的分布情况与流动特征时间的分布一致, 这是由于在整个 MILD 燃烧反应区内, 化学反应相对较慢, 主要由流动特性占主导地位。在本研究的掺氢丙烷 MILD 燃烧工况下, 由于热烟气与反应物能进行充分的混合, 反应物预热温度、当量比及稀释程度在主反应区域内基本一致, 使得混合物的化学动力学特性未发生显著变化, 因此化学特征时间在大范围内保持相对稳定。与此形成鲜明对比的是, 流动特征时间在流场不同区域呈现出显著差异, 成为决定 Da 数空间分布的主导因素。在燃烧器喷嘴附近的回流区内, 高温烟气的低速回流运动导致当地流速显著降低, 流体微元停留时间延长, 流动

特征时间相应增大, 从而形成 Da 数的高值区。而在反应物入射区, 高速射流使流体快速通过该区域, 流动特征时间急剧缩短, Da 数随之降至低值。剪切层区域则处于二者过渡带, 流动特征时间介于其间, Da 数亦呈现中间值。

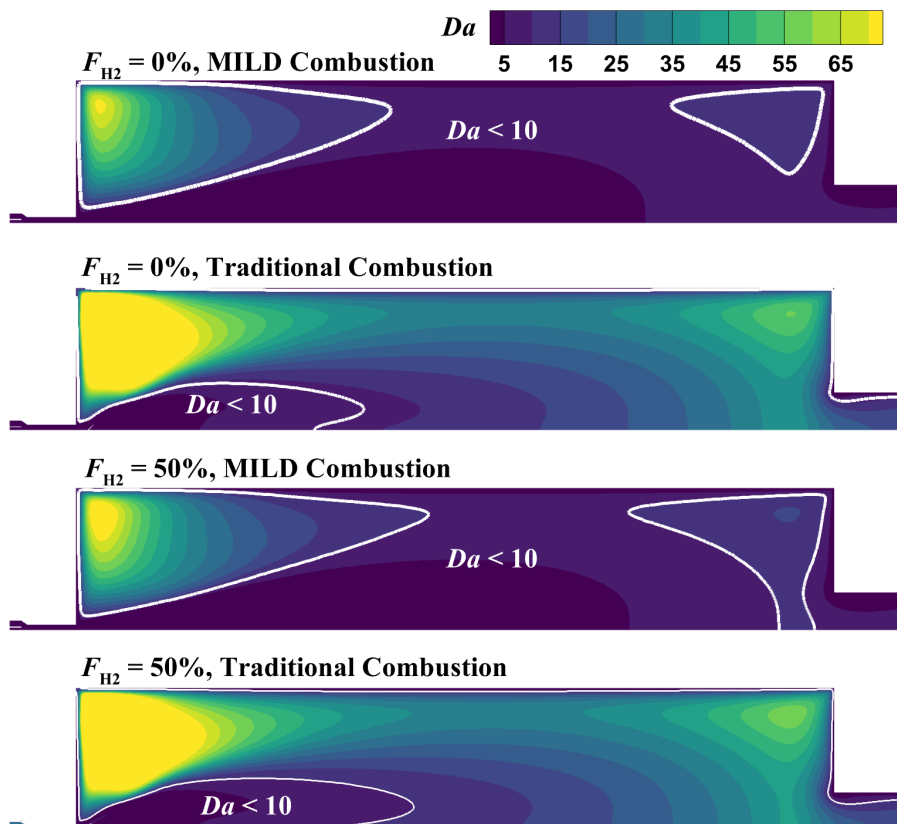


Figure 10. Comparison of Da between MILD combustion and traditional combustion

图 10. MILD 燃烧与传统燃烧的 Da 对比

当燃烧模式切换为传统燃烧时, Da 数有显著提升, 如图 10 所示。对比将火焰模式由 MILD 燃烧切换为传统燃烧时 Da 数的分布情况, 可发现: 相较于 MILD 燃烧, 传统燃烧模式下只有很小一片区域的 Da 数小于 10, 整体上传统燃烧有着更大的 Da 数, 且无法在整个燃烧室内稳定在较小的数量级。在 $F_{H_2} = 50\%$ 条件下的传统燃烧的最大 Da 高达 147, 远超 MILD 燃烧下的 Da 最大值。

综上, 丙烷掺氢 MILD 燃烧中 Da 数的空间分布是化学特征时间与流动特征时间共同作用的结果: 前者为 Da 数提供了相对稳定的基准, 后者则主导了其空间变化趋势。表明在 MILD 燃烧下, 流场结构对燃烧模式的调控作用超越了化学动力学因素。同时, Da 数的量级在主要反应区趋近于 1 的特征 ($Da < 10$) 也印证了 MILD 燃烧发生时, 化学时间与混合时间相当的特性。

3.2. 火焰传播速度

如图 11 所示, 为丙烷掺氢 MILD 燃烧工况下取得的层流火焰传播速度云图, 在 MILD 燃烧流场中, 尽管反应物经历了强烈的稀释和预热, 但局部混合状态的变化仍会导致 S_L 的空间差异。从图 11 中可以识别到以下关键特征: S_L 最高区域主要出现在入射区和分布区的剪切层附近, 该区域高温烟气与新鲜反应物发生强烈混合, 局部温度较高且当量比接近化学计量比因此化学活性最强, 达到峰值; S_L 最低区域主

要分布在反应物入射的核心区, 该区域虽未受稀释, 但温度较低, 尚未达到显著反应的条件, 因此较低。

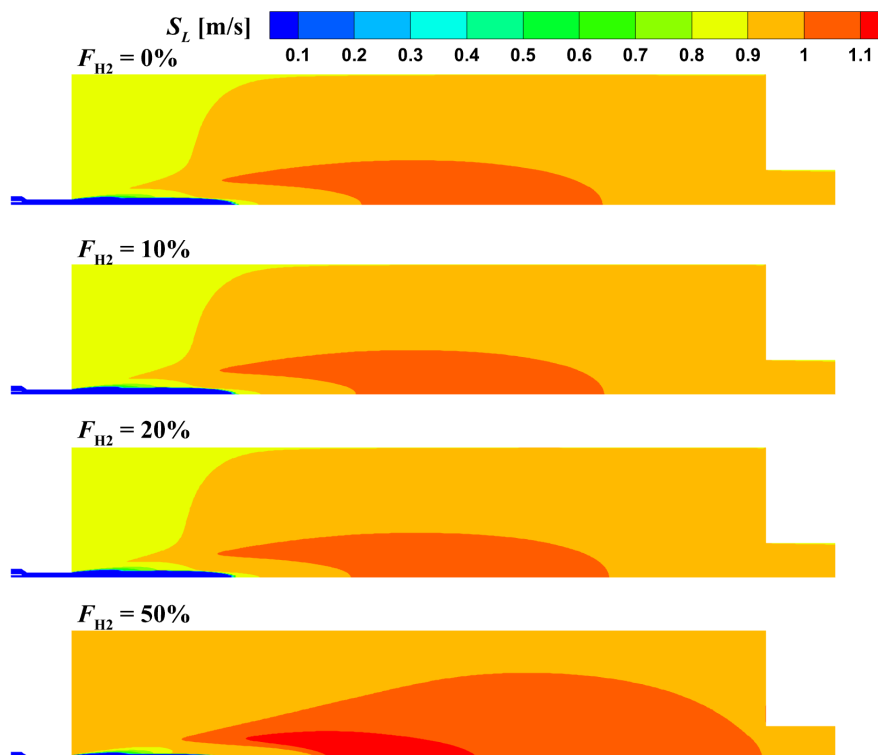


Figure 11. Distribution of laminar flame propagation velocity
图 11. 层流火焰传播速度分布

值得注意的是, 在提高 F_{H_2} 之后, 层流火焰传播速度表现出增长的趋势。如图 12 所示, 分别提取了在 $X = 200 \text{ mm}$, $X = 400 \text{ mm}$ 和中心轴线上层流火焰传播速度, 可以发现, $F_{H_2} = 50\%$ 时, 层流火焰传播速度明显高于其他工况, 而在较低含量下 $F_{H_2} = 0\% \sim 20\%$, 增大氢气的比例, 也可以提高层流火焰传播速度, 但提升幅度并不大。

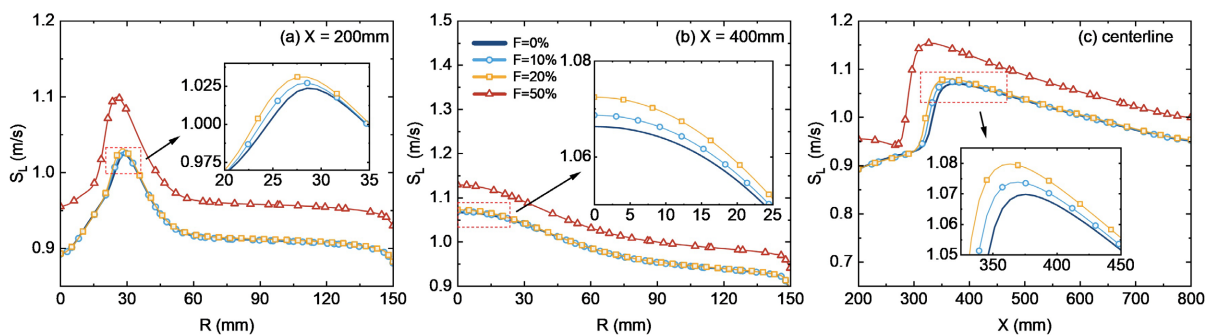


Figure 12. Distribution of laminar flame velocity across different cross-sections
图 12. 层流火焰速度在不同截面上分布

如图 13 所示, 我们对比了 MILD 燃烧和传统火焰模式下的 S_L 分布差异, 发现当火焰模式切换为传统燃烧时, S_L 在整体上会有一定程度的增加, 因为稳焰钝体的添加, 整个燃烧室内的 S_L 分布也会出现差

异。黑线内的区域表示流场中 S_L 最大的区域，其中 $F_{H_2} = 50\%$ 的传统燃烧有着最高的 S_L 。传统燃烧模型中的 S_L 最大区域出现在了稳焰钝体之后，而非 MILD 燃烧中的入射区和分布区的剪切层附近。

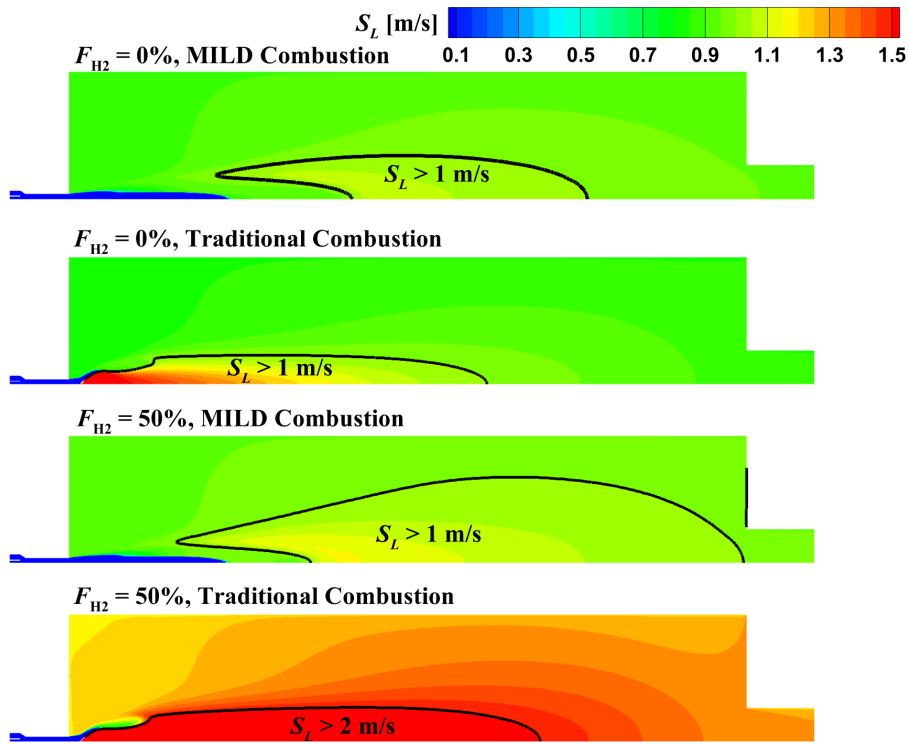


Figure 13. Comparison of S_L distributions between MILD combustion and traditional combustion
图 13. MILD 燃烧与传统燃烧 S_L 分布对比

湍流火焰传播速度(S_T)是在湍流作用下火焰前锋向未燃气体传播的表现速率，其数值不仅取决于燃料的化学活性，还受湍流脉动、火焰拉伸、局部熄火等因素的影响。在 MILD 燃烧条件下， S_T 的空间分布直接反映了燃烧反应的实际发生强度。在增大 H_2 占比时， S_T 的提升幅度不明显，如图 14 所示。只有在部分截面的特征曲线上才能观察到， S_T 随着氢气占比的增大而提高。

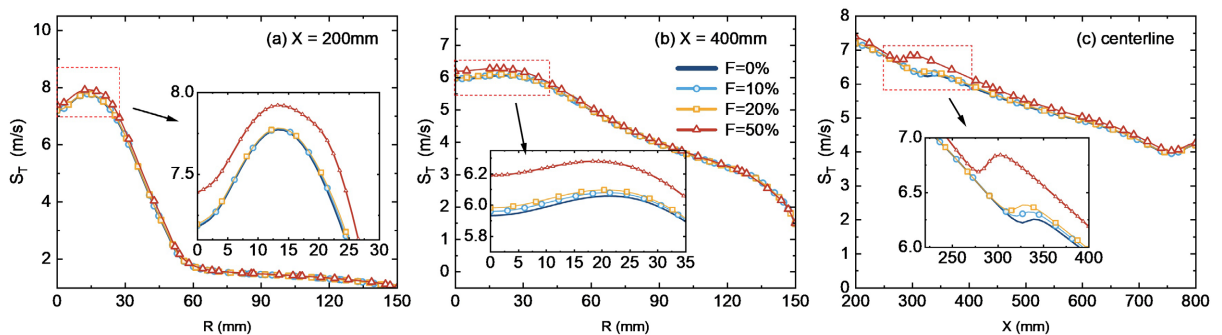


Figure 14. Distribution of turbulent flame velocity across different cross-sections
图 14. 湍流火焰速度在不同截面上分布

如图 15 所示，我们对 MILD 燃烧与传统燃烧模式下的 S_T 进行了对比，与 S_L 的分布情况类似，利用

稳焰钝体使得传统火焰下的 S_T 最大值区域提前到了挡板之后。相较于 MILD 燃烧, 传统燃烧模式下的 S_T 最大值更大, $F_{H_2} = 50\%$ 情况下的增幅甚至超过了 100%, 最大值区域分布在稳焰钝体之后。此外, 还可观察到, 传统燃烧下的 $S_T > 4 \text{ m/s}$ 的区域相较于 MILD 燃烧更加的集中, 传统燃烧模式中的火焰传播速度会更大, 但相较于 MILD 燃烧, 高速火焰传播区域也会更加集中。

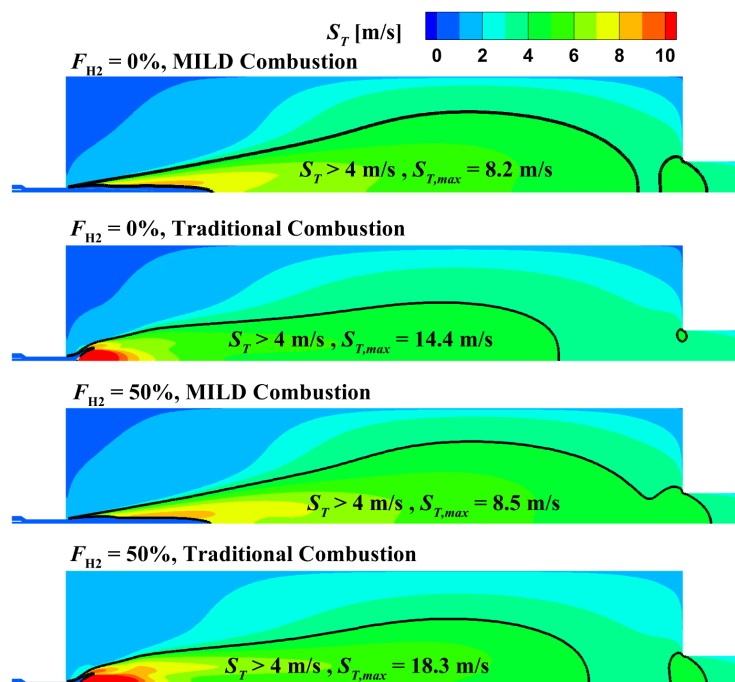


Figure 15. Comparison of S_T distributions between MILD combustion and traditional combustion
图 15. MILD 燃烧与传统燃烧 S_T 分布对比

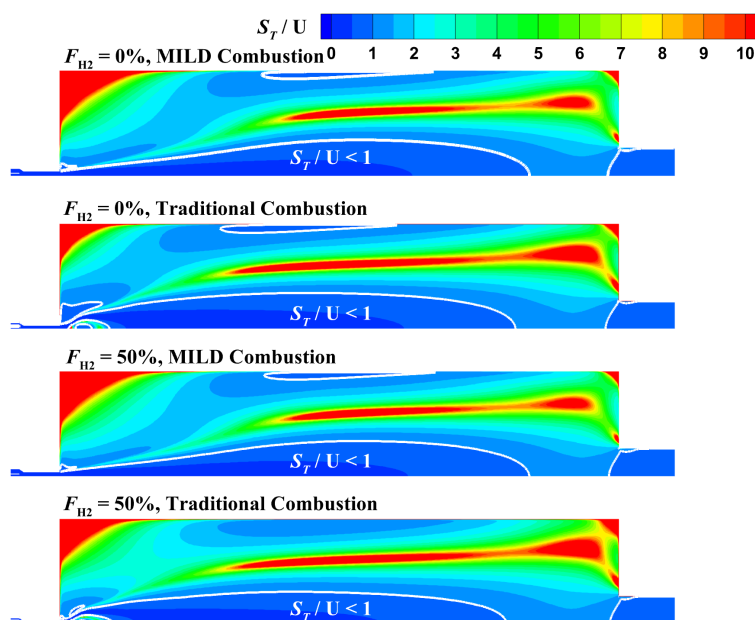


Figure 16. Comparison of S_T/U distributions between MILD combustion and conventional combustion
图 16. MILD 燃烧与传统燃烧 S_T/U 分布对比

当燃烧切换为传统火焰时, 如图 16 所示, 湍流火焰速度与当地流速 U 之比的分布情况产生了变化: 入口气流通过稳焰钝体之后, 产生了一块涡流区域, 在此区域内有着很高的 S_T/U 值, 受此区域影响, $S_T < U$ 的区域也略微缩小。在燃烧反应前端就产生的极高湍流火焰传播速度导致了传统燃烧中火焰锋面的产生。而在 MILD 燃烧过程中, 主要高温区域内的湍流火焰传播速度始终小于当地流速, 导致火焰锋面无法往上游传播, 也就无法形成可视的火焰锋面, 作为化学指标的 S_L 又显示化学反应在整个燃烧室持续进行, 化学和流动的综合作用最终导致了 MILD 燃烧的无焰状态。

4. 总结

本文围绕丙烷掺氢 MILD 燃烧的流场特征与火焰传播特性开展了系统的数值模拟研究。针对 MILD 燃烧无可见火焰锋面的现象, 提出了一种基于火焰传播速度的诊断分析方法, 将层流火焰传播速度作为化学反应活性的指标, 将湍流火焰传播速度作为实际燃烧强度的指标, 通过二者的对比与关联, 揭示流场不同区域(入射区、剪切层、回流区)的燃烧特性, 识别主反应区位置, 量化湍流对燃烧的增强效应, 并与获得的 Da 分布建立关联解释。在此基础上, 本章进一步研究了同一燃烧强度下不同氢气掺混比例对丙烷 MILD 燃烧特性的影响规律。主要工作和结论总结如下:

(1) 改进了丙烷掺氢条件下的火焰传播速度的数值计算公式, 拓宽了火焰传播速度数值计算场景, 能够有效降低计算误差。

(2) 丙烷掺氢 MILD 燃烧工况下, 化学特征时间 τ_{chem} 在流场大范围内保持相对恒定, 预热温度、当量比及稀释程度在主流区域基本一致, 化学动力学特性未发生显著波动。

(3) 流动特征时间 τ_{flow} 在 MILD 燃烧流场的不同区域呈现显著差异, Da 数的空间分布由流动特征时间主导, 揭示了 MILD 燃烧中流场结构对燃烧模式的调控作用超越了化学动力学因素。

(4) MILD 燃烧发生时, 当 F_{H_2} 较低时, 炉膛内的燃烧结构(包括回流区尺寸、剪切层位置、速度场分布等)未发生明显变化, 燃料组分的化学活性改变不足以引起整体燃烧结构的剧烈变化。丙烷掺氢后, 层流火焰传播速度(S_L)和湍流火焰传播速度(S_T)均有所提升。

(5) 当火焰模式切换为传统燃烧时, Da 数, S_L , S_T 均有很大程度的提升, 且最大值分布区域更为集中, 这也说明了 MILD 燃烧能控制各流场参数在相对稳定的范围之内。MILD 燃烧模式下主要高温区域内的湍流火焰速度与当地流速(U)之比均保持在 1 以内, 而传统火焰在火焰形成初期湍流火焰传播速度远大于当地流速, 因此 MILD 燃烧可以归纳为, Da 更小更接近 1, 火焰传播速度更小分布更广的 $S_T/U \leq 1$ 的燃烧过程。

基金项目

四川省自然科学基金面上项目 2026NSFSC0408。

参考文献

- [1] Bergero, C., Gosnell, G., Gielen, D., Kang, S., Bazilian, M. and Davis, S.J. (2023) Pathways to Net-Zero Emissions from Aviation. *Nature Sustainability*, **6**, 404-414. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01046-9>
- [2] Zhong, S., Deng, Y., Ma, C., Huang, B., Zhou, S., Zhang, F., et al. (2025) Development and Prospects of Advanced Combustion Technologies for Aero-Engines. *Gas Turbine Experiment and Research*, **38**, 33-44. <https://doi.org/10.3724/j.gter.20250027>
- [3] Liu, Y., Sun, X., Sethi, V., Nalianda, D., Li, Y. and Wang, L. (2017) Review of Modern Low Emissions Combustion Technologies for Aero Gas Turbine Engines. *Progress in Aerospace Sciences*, **94**, 12-45. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.08.001>
- [4] Chu, H., Yao, J., Dong, W., Yang, Y. and Wang, D. (2025) Comparative Effects of H_2 and NH_3 on Hydrocarbon Fuels Laminar Combustion Characteristics and Pollutant Emissions: Status and Challenges. *International Journal of Hydrogen*

- Energy*, **109**, 129-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.056>
- [5] Valera-Medina, A., Viguera-Zuniga, M.O., Shi, H., Mashruk, S., Alnajideen, M., Alnasif, A., *et al.* (2024) Ammonia Combustion in Furnaces: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, **49**, 1597-1618. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.241>
- [6] Kohse-Höinghaus, K. (2023) Combustion, Chemistry, and Carbon Neutrality. *Chemical Reviews*, **123**, 5139-5219. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00828>
- [7] Verhelst, S. and Sierens, R. (2007) A Quasi-Dimensional Model for the Power Cycle of a Hydrogen-Fuelled Ice. *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, 3545-3554. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.011>
- [8] Zhang, Y. and Wei, W. (2020) Decentralized Coordination Control of PV Generators, Storage Battery, Hydrogen Production Unit and Fuel Cell in Islanded DC Microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 8243-8256. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.058>
- [9] Mi, J., Li, P., Wang, F., Cheong, K. and Wang, G. (2021) Review on MILD Combustion of Gaseous Fuel: Its Definition, Ignition, Evolution, and Emissions. *Energy & Fuels*, **35**, 7572-7607. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00511>
- [10] Cavaliere, A. and de Joannon, M. (2004) Mild Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, **30**, 329-366. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.003>
- [11] Ali, G., Zhang, T., Wu, W. and Zhou, Y. (2020) Effect of Hydrogen Addition on Nox Formation Mechanism and Pathways in MILD Combustion of H₂-Rich Low Calorific Value Fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 9200-9210. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.027>
- [12] Ayoub, M., Rottier, C., Carpentier, S., Villermaux, C., Boukhalfa, A.M. and Honoré, D. (2012) An Experimental Study of Mild Flameless Combustion of Methane/Hydrogen Mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**, 6912-6921. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.018>
- [13] Ferrarotti, M., De Paepe, W. and Parente, A. (2021) Reactive Structures and Nox Emissions of Methane/Hydrogen Mixtures in Flameless Combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 34018-34045. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.161>
- [14] Xu, S., Dou, C., Tian, Z., Chen, Y., Li, W. and Liu, H. (2025) Experimental and Numerical Study on Formation and NO Emission of Hydrogen-Enriched Methane Combustion in Swirl Flame and MILD Modes. *International Journal of Hydrogen Energy*, **101**, 848-862. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.439>
- [15] Xu, S., Xi, L., Tian, S., Tu, Y., Chen, S., Zhang, S., *et al.* (2023) Numerical Investigation of Pressure and H₂O Dilution Effects on NO Formation and Reduction Pathways in Pure Hydrogen MILD Combustion. *Applied Energy*, **350**, Article ID: 121736. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121736>
- [16] Yang, N., Xiong, Y., Liu, Z., Liu, Y. and Xu, X. (2025) Reaction Zone Structure and Stability of Lifted Hydrogen Flames in a MILD Model Combustor Equipped with Dual-Coaxial-Jet Nozzles. *International Journal of Hydrogen Energy*, **145**, 1071-1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.06.192>
- [17] Wang, G., Si, J., Xu, M. and Mi, J. (2019) MILD Combustion versus Conventional Bluff-Body Flame of a Premixed CH₄/Air Jet in Hot Coflow. *Energy*, **187**, Article ID: 115934. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115934>
- [18] Göktolga, M.U., van Oijen, J.A. and de Goey, L.P.H. (2015) 3D DNS of MILD Combustion: A Detailed Analysis of Heat Loss Effects, Preferential Diffusion, and Flame Formation Mechanisms. *Fuel*, **159**, 784-795. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.049>
- [19] Minamoto, Y., Swaminathan, N., Cant, S.R. and Leung, T. (2014) Morphological and Statistical Features of Reaction Zones in MILD and Premixed Combustion. *Combustion and Flame*, **161**, 2801-2814. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.04.018>
- [20] Awad, H.S.A.M., Abo-Amsha, K., Ahmed, U. and Chakraborty, N. (2023) An Assessment of the Validity of Damköhler's Hypotheses for Different Choices of Reaction Progress Variable in Homogenous Mixture Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution (MILD) Combustion. *Flow, Turbulence and Combustion*, **112**, 897-915. <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00520-4>
- [21] ANSYS, Inc. (2021) ANSYS Fluent.
- [22] Cheong, K., Wang, G., Mi, J., Wang, B., Zhu, R. and Ren, W. (2018) Premixed MILD Combustion of Propane in a Cylindrical Furnace with a Single Jet Burner: Combustion and Emission Characteristics. *Energy & Fuels*, **32**, 8817-8829. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01587>
- [23] Wang, Y., Cheong, K., Wang, J., Liu, S., Hu, Y., Chyu, M., *et al.* (2024) Operational Condition and Furnace Geometry for Premixed C₃H₈/Air MILD Combustion of High Thermal-Intensity and Low Emissions. *Energy*, **288**, Article ID: 129905. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129905>
- [24] Giuntini, L., Frascino, L., Ariemma, G.B., Galletti, C., Sorrentino, G. and Ragucci, R. (2024) Performance Assessment of Modeling Approaches for Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution Combustion in a Scale-Bridging Burner. *Energy*

- & *Fuels*, **37**, 9500-9513. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00597>
- [25] Göktolga, M.U., de Goey, P. and van Oijen, J. (2020) Modeling Temperature Variations in MILD Combustion Using MuSt-FGM. *Frontiers in Mechanical Engineering*, **6**, Article No. 6. <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00006>
- [26] Kee, R., Rupley, F. and Miller, J. (1989) Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics. <https://www.osti.gov/servlets/purl/5681118/>
- [27] Magnussen, B. (1981) On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow. *19th Aerospace Sciences Meeting*, St. Louis, 12-15 January 1981, 42. <https://doi.org/10.2514/6.1981-42>
- [28] Jiménez, C., Cuenot, B., Poinso, T. and Haworth, D. (2002) Numerical Simulation and Modeling for Lean Stratified Propane-Air Flames. *Combustion and Flame*, **128**, 1-21. [https://doi.org/10.1016/s0010-2180\(01\)00328-5](https://doi.org/10.1016/s0010-2180(01)00328-5)
- [29] Turns, S.R. and Haworth, D.C. (2021) *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw Hill.
- [30] Metghalchi, M. and Keck, J.C. (1982) Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol, Isooctane, and Indolene at High Pressure and Temperature. *Combustion and Flame*, **48**, 191-210. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90127-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90127-4)
- [31] Kamal, M.M., Barlow, R.S. and Hochgreb, S. (2015) Conditional Analysis of Turbulent Premixed and Stratified Flames on Local Equivalence Ratio and Progress of Reaction. *Combustion and Flame*, **162**, 3896-3913. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.07.026>
- [32] Williams, F.A. (1985) *Combustion Theory*. 2nd Edition, Benjamin/Cummings Publishing Company.
- [33] Klimov, A.M. (1983) Premixed Turbulent Flames—Interplay of Hydrodynamic and Chemical Phenomena. In: *Flames, Lasers, and Reactive Systems*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 133-146.
- [34] Kumar, S., Paul, P.J. and Mukunda, H.S. (2002) Studies on a New High-Intensity Low-Emission Burner. *Proceedings of the Combustion Institute*, **29**, 1131-1137. [https://doi.org/10.1016/s1540-7489\(02\)80143-2](https://doi.org/10.1016/s1540-7489(02)80143-2)