

宽广工况下湍流燃烧速度模型适用性评估与发展^{*}

蔡 骁, 代鸿超, 王金华, 黄佐华

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 为了发展高适用性的湍流燃烧速度 (S_T) 模型, 本研究对比了最近提出的多种 S_T 预测模型在不同湍流预混燃烧条件的准确性。在宽广工况条件下使用 300 个数据确定了 14 个 S_T 预测模型的平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)。通过寻找最小的 MAPE, 对这 14 个预测模型中原作者提出的可调常数项进行了修正。结果表明, 基于宽广工况修正的拟合常数项均提升了模型准确度。然而, 但大多数模型在宽广的 Lewis 数范围 ($Le=0.33\sim 2.94$) 和 Karlovitz 数范围 ($Ka=0.03\sim 90$) 下不具有普适性。研究发现, Liu 和 Nguyen 的模型分别对固定 Le 工况 ($Le=1$) 和变化 Le 工况 ($Le=0.33\sim 2.94$) 具有较好的适用性, 但分别缺乏对 Damköhler 数 (Da) 和相对湍流长度尺度 (L_t/δ) 的考虑。因此, 本文提出两个修正的预测模型, 分别将其 MAPE 降低至 11.5% 和 15.5%。

关键词: 湍流燃烧速度; 湍流传播火焰; 速度模型; 宽广工况; 差异扩散

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2025) 02-2309007-12

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2309007

1 引 言

航空发动机研发过程中, 基础概念研发被首要开展, 一方面用于探究机理, 另一方面支撑数值仿真模型发展, 用于更高技术等级的研发, 以达到降低成本和缩短周期的目的^[1-2]。因此, 对于先进发动机的研发, 基础实验数据库及仿真模型的发展必不可少, 其中包括燃烧室中的燃烧过程^[3-4]。燃烧室内燃烧往往存在强烈的湍流与火焰化学间相互作用, 湍流燃烧速度 (S_T) 与火焰化学、流动特性和火焰动力学密切相关, 常被用作燃料消耗率的指标^[5-6]。因此, 当进口温度、压力、当量比和燃料成分等参数发生变化时, S_T 被用作估计燃烧室反应程度的重要指标。湍流燃烧速度也被用于湍流燃烧仿真模型中来封闭非线性源项, 是湍流预混燃烧建模的关键组成部分。例如, S_T 是商业 CFD 软件中常用的火焰面密度 (Flame Surface Density, FSD)、湍流火焰速度封闭 (Turbulent Flame Closure, TFC) 和 G-方程的必不可少的封闭参数。由

于其对于工业设计和燃烧建模具有重要的实际意义, S_T 已经成为大量分析研究^[7]、实验研究^[8-9]和计算研究^[10]的焦点。这些研究的主要目标之一是基于层流火焰特性 (层流燃烧速度 S_L 和厚度 δ)、湍流特性 (积分长度尺度 L_t 和均方根湍流速度 u') 和无量纲数 (雷诺数 Re , Karlovitz 数 Ka 和 Damköhler 数 Da) 等发展 S_T 预测模型^[11]。

S_T 预测模型的理论发展一般是基于小火焰概念^[5]和火焰面积估计^[12]。Damköhler^[12]假设 S_T 受火焰面面积和湍流输运作用两部分影响, 将湍流火焰分为大尺度湍流和小尺度湍流, 这分别对应于 Peters^[5]提出的湍流分区图中薄火焰面区和薄反应区。在薄火焰面区, Damköhler 认为 S_T 增加完全归因于火焰面褶皱导致的面积增加, 提出 S_T 理论预测模型, 即 $S_T/S_L = 1 + u'/S_L$; 在薄反应区, 湍流影响未燃气的输运速率, 此时 S_T 与湍流扩散系数 (D_T) 与层流火焰系数 (D_L) 的比值相关, 即 $S_T/S_L \sim D_T/D_L = [(u'/S_L)(L_t/\delta)]^{0.5}$ 。在理论方面, Zimont^[13]将增强湍流输运的小尺度湍流

^{*} 收稿日期: 2023-09-04; 修订日期: 2024-02-04。

基金项目: 国家自然科学基金 (52106183); 中国博士后科学基金 (2023T160513); 中央高校基本科研业务费专项资金 (xzy012022069)。

通讯作者: 蔡 骁, 博士, 助理教授, 硕士生导师, 研究领域为面向先进航空发动机的湍流燃烧和燃烧激光诊断。

E-mail: xiao.cai@xjtu.edu.cn

引用格式: 蔡 骁, 代鸿超, 王金华, 等. 宽广工况下湍流燃烧速度模型适用性评估与发展[J]. 推进技术, 2025, 46(2): 2309007. (CAI X, DAI H C, WANG J H, et al. Assessment and development of applicability of turbulent burning velocity correlations over a wide range of conditions[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(2): 2309007.)

效应与使火焰表面起皱的大尺度湍流效应相结合,推导出了一个模型。Peters^[5]通过湍流项、火焰传播和标量耗散项,得到了一个代数表达式。但这些模型表征了湍流通过火焰面积对 S_T 的影响,但忽略了火焰拉伸作用,难以准确预测 S_T 规律。换句话说, S_T 与湍流和层流火焰面比(A_T/A_0)以及拉伸因子(I_0)相关,表征为 $S_T/S_L=I_0A_T/A_0$ 。发现 I_0 受热扩散效应作用,总是偏离1^[14-15],说明湍流火焰对火焰拉伸具有很强的依赖性。最近,Lu和Yang^[10]基于平面湍流预混DNS研究,建立了拉伸因子模型来表征火焰拉伸影响,并建立了结合火焰面积和拉伸系数的 S_T 预测模型;随后他们基于拉格朗日建模方法,添加湍流长度尺度等参数建立了适用于更广泛条件的 S_T 预测模型。然而,该模型的应用局限于平面结构,且 S_T 的预测模型存在火焰结构特异性。实验上,Kobayashi等^[8-9]使用湍流本生燃烧器测量了高达3 MPa的甲烷/空气湍流燃烧速度数据,来阐明高压对火焰-湍流相互作用的影响。然后,Kobayashi等^[8-9]提出考虑压力影响的 S_T 相关性

为 $\frac{S_T}{S_L} \sim \left(\frac{u' p}{S_L p_0} \right)^{0.38}$ 。Chaudhuri等^[16]通过甲烷/空气火

焰的球形传播火焰实验发现球形火焰存在自相似加速传播现象,他们认为火焰流体动力学尺度正比于火焰刷厚度,进而与火焰半径正相关,因此他们提出将湍流雷诺数(Re_T)中湍流积分尺度替换为火焰半径($\langle r \rangle$)来得到湍流火焰雷诺数($Re_{T, \text{flame}}$),推导得到

$\frac{S_T}{S_L} \sim \left(\frac{u' \langle r \rangle}{S_L \delta} \right)^{\frac{1}{2}} = (Re_{T, \text{flame}})^{\frac{1}{2}}$ 。随着近年来氢气、大分

子燃料(如异辛烷)等差异扩散显著的燃料特性研究深入,差异扩散对湍流燃烧速度的影响十分显著。Lewis数(Le)作为热扩散与质扩散系数比,常用于量化差异扩散特性影响。Bradley等^[17]通过提出 $S_T/u' \sim (KLe)^{-0.3}$ 来描述差异扩散的影响,其中 K 为湍流拉伸因子。Nguyen等^[18]认为 $Le^{-0.5 \sim -0.3}$ 是描述不同无量纲相关性中燃料类型效应的更好术语。然而,文献[17-21]对 Le 影响的表述存在明显不一致,即 Le 的幂指数在一个巨大的范围(-1.2~-0.35)内变化。Dai等^[22]在分析大量数据后发现,由于 Le 在相关性中的权重较低, S_T/S_L 对 Le 的幂指数不敏感。最近,Zhao等^[23]报道了在大范围当量比(0.4~5.0)下氢气的 S_T 数据,他们发现 S_T/S_L 和 $Re_T Le^{-2}$ 之间的关系取决于相对湍流强度(u'/S_L)的范围,这似乎表明统一的湍流燃烧速度相关性与湍流状态有关。

总体来看,尽管在数十年的研究中发现了大约数十种不同的相关性,但并不存在统一的 S_T 相关性。

除了湍流火焰复杂性质影响,没有统一的参数定义和 S_T 定义,使这个问题更加复杂化。本研究旨在了解最新提出的 S_T 预测模型准确性,并确定在不同湍流预混燃烧条件下预测性能最佳的速度模型。为此,本文采用统一的数据参数及 S_T 定义,规定使用平均绝对百分比误差(MAPE)值来评估每个预测模型的准确性;同时汇总了用于模型评估的11组共300个工况的湍流传播火焰的实验数据和14组待评估的 S_T 模型。通过寻找最小MAPE对应的拟合常数项,本研究优化了14个 S_T 模型。随后,依据不同 Le, Ka, Da 等参数范围的数据,评估了几个代表性模型相应的参数敏感性。最终,本文对代表性模型进行优化,得到能够准确预测不同条件(进口温度 T ,当量比 ϕ ,压力 p 和湍流特征)实验数据的 S_T 模型。

2 实验数据和评估方法

2.1 参数定义及实验数据

与层流火焰速度不同,湍流燃烧速度没有统一的定义^[11]。一些研究人员将 S_T 定义为消耗速度,即反应物穿过火焰刷的速度,通过燃烧器出口反应物体积流量与火焰刷面积之比来确定,其中进展变量 c 为0.5的等值面常用于计算火焰刷面积^[11]。其他人将 S_T 表示为位移速度,并通过平均流场与火焰刷前缘传播速度之间的运动平衡来确定,一般采用 $c=0.05$ 的等值面来确定火焰刷位置^[24-25]。然而,需要注意到,由于火焰中流线的收敛或发散,导致这两种等值面处的火焰速度并不相等,从而导致 S_T 的差异。 c 与火焰结构相关:进展变量从未燃区($c=0$)到已燃区($c=1$)变化,对于滞止火焰(如本生火焰),未燃气存在于火焰中心,低进展变量位置火焰面面积较小,导致 $S_{T,c=0.05} > S_{T,c=0.5}$,对于球形火焰,已燃气占据中心,低进展变量位置火焰面面积大,导致 $S_{T,c=0.05} < S_{T,c=0.5}$ 。因此,只有相同定义获得的 S_T 值才有可比性。对于纹影方法获取的球形火焰边界对应进展变量0.1位置,Bradley等^[26]实验获取了 S_T 在不同进展变量下的换算式,如公式(1)所示

$$\frac{S_{T,c=0.5}}{S_{T,c=0.1}} = \left(\frac{\langle r \rangle_{c=0.1}}{\langle r \rangle_{c=0.5}} \right)^2 \quad (1)$$

式中 $\langle r \rangle_{c=0.1} / \langle r \rangle_{c=0.5} \approx 1.4$,另外 $\langle r \rangle_{c=0.05} / \langle r \rangle_{c=0.1} \approx 1.11$ 。对于来自不同设备及等值面上的半径比值并不统一,同时Driscoll^[11]认为,针对具有相同几何形状和边界条件进行实验数据比较更加合适。因此,对于本研究,仅球形传播火焰数据被使用。

为了评估湍流模型的预测能力,本文汇总了来

自 12 个研究中的 300 个不同的球形传播火焰数据, 如表 1 所示。其中包含甲烷、氨气、氢气、氢气掺混燃料、丙烷、正庚烷、异辛烷等最新的 S_T 数据。值得注意的是, 球形传播火焰具有自加速传播特性, 即瞬时火焰半径 $\langle r \rangle$ 随传播时间 t 的变化率 $(d\langle r \rangle/dt)$ 持续增加, 该变化率与火焰前后密度比 (σ) 之比称为火焰传播速度。为了提取火焰传播过程的单一湍流燃烧速度值 S_T , 通常采用自由传播段火焰半径范围 $(r_1 \sim r_2)$ 内的火焰传播速度的数值平均方法获取, 即 $(d\langle r \rangle/dt)/\sigma$ 在 $r_1 \sim r_2$ 间的平均值^[22]。此外, 一些研究者^[27]选用 $r_1 \sim r_2$ 中半径随时间变化线性拟合线斜率与 σ 之比表示 S_T 。另外, Kitagawa 等^[19]采用半径 30 mm 处火焰传播速度代表 S_T 。在数据汇总前, 同一组原始数据(即半径随时间变化数据)采用三种不同方法提取, 以数值平均方法为标准, 拟合线斜率法和 30 mm 半径提取法分别相差 2% 和 1% 以内^[28], 远小于湍流燃烧速度 10%~20% 的测量误差。本文主要采用数值平均方法来提取 S_T 。表 1 中详细展示了每组数据对应的火焰半径处理范围以及实验设备内径 (D_{chamber}) ^[29-34]。依据 Lewis 数与 1 的关系划分的速度数据, 可以用来判断差异扩散对 S_T 的影响。球形火焰传播速度数据最初均在进展变量 0.1 火焰面位置获取, 在本文中, 所有 S_T 依据 Bradley 提出的关系式^[26]转化为进展变量 0.5 处的数值。需要说明, 文献中并未全部给出层流火焰参数, 文献缺乏的参数根据以下方法计算: 采用 CHEM-KIN-Pro 软件计算一维自由传播火焰和平衡过程, 得到密度比 σ , 绝热火焰温度 T_{ad} 和火焰厚度 δ 等基本火焰参数。火焰厚度定义如公式(2)所示

$$\delta = (T_{\text{ad}} - T)/(dT/dx)_{\text{max}} \quad (2)$$

式中 T 是初始温度, $(dT/dx)_{\text{max}}$ 是最大的温度梯度。单

一燃料的 Lewis 数用混合气热扩散系数与不足反应物 i 相对于氮气的质量扩散率的比值表征, 如公式(3)所示

$$Le_i = \alpha/D_{i,N_2} \quad (3)$$

式中 α 是热扩散系数, D_{i,N_2} 是不足反应物相对于氮气的质量扩散率。混合物的全局 Lewis 数考虑了充足和不足反应物共同的影响, 定义为有效 Le_{eff} ^[29]。此外, 湍流无量纲参数湍流雷诺数 Re_T , Karlovitz 数 Ka 和 Damköhler 数 Da 分别采用 δ , S_L , L_i 和 u' 计算获取, 计算方法如公式(4)~(6)所示

$$Re_T = (u'/S_L)/(L_i/\delta) \quad (4)$$

$$Ka = (u'/S_L)^{3/2}(L_i/\delta)^{-1/2} \quad (5)$$

$$Da = (u'/S_L)^{-1}(L_i/\delta) \quad (6)$$

需要注意, 由于 Chaudhuri 等^[16]提出的湍流火焰雷诺数随半径变化, 为了便于不同工况间对比, 下文采用的 $Re_{T,\text{flame}}$ 中 $\langle r \rangle$ 均选取为 30 mm。根据相对湍流强度 (u'/S_L) 和相对湍流长度尺度 (L_i/δ) , 将当前工况绘制到 Borghi-Peters 湍流分区图中, 如图 1 所示。可以发现, 工况主要集中在薄反应区等发动机工况区域, 这说明当前工况的研究具有一定的实际意义。

2.2 湍流燃烧速度模型

S_T 的准确预测式用于封闭商业 CFD 代码中常用的 FSD, TFC 和 G-方程方法中 Favre-average 方程^[35]。在 FSD 方法中, S_T 用于描述湍流燃烧速度对火焰表面形成和演化的影响。通过考虑 S_T , 可以更好地模拟火焰表面的动态变化, 从而提高对湍流燃烧过程的理解。TFC 方法旨在解释湍流燃烧速度在火焰传播中的影响, S_T 是其中一个封闭参数, 用于表征湍流和火焰之间的相互作用。G-方程是一种用于模拟火焰形成和传播的数值方法, S_T 是与 G-方程中源项有关, 用

Table 1 Test condition

Fuel	ϕ	T/K	p/MPa	Re_T	Ka	Le_{eff}	$r_1 \sim r_2/\text{mm}$	$D_{\text{chamber}}/\text{mm}$
CH_4 ^[27]	0.9	300~423	0.1~0.5	206~8 750	0.41~10.35	1.00	25~45	300
NH_3 ^[30]	1.0	298	0.1~0.3	1 188~3 571	0.12~7.40	1.00	20~45	440
$\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{H}_2$ ^[31]	0.6~0.8	373	0.1~0.5	49~1 237	0.07~10.34	0.63~0.96	20~45	440
H_2 ^[19]	0.4~1.0	298	0.1~0.5	11~936	0.03~45.66	0.33~1.10	30	406
H_2 ^[23]	0.4~5.0	298	0.1	7~160	0.04~8.96	0.33~2.24	15~45	303
H_2/NH_3 ^[22]	0.8~1.3	298	0.1~0.5	42~1 661	0.51~89.22	0.88~1.62	15~45	303
H_2/CH_4 ^[29]	0.4~1.0	298	0.1	30~616	0.14~33.26	0.58~1.19	15~45	303
H_2/CO ^[32]	0.7	298	0.1~0.5	26~727	0.20~3.89	0.73~1.05	15~45	303
$\text{H}_2/\text{C}_7\text{H}_{16}$ ^[33]	0.5~1.0	393	0.1	10~295	0.05~9.84	0.63~2.48	15~45	303
C_3H_8 ^[18]	0.7	298	0.1~0.5	402~8 535	1.79~12.13	1.62	25~45	300
$i\text{-C}_8\text{H}_{18}$ ^[18]	1.0	423	0.1~0.5	259~5 768	0.39~1.85	1.43	25~45	300
$i\text{-C}_8\text{H}_{18}$ ^[34]	1.0~1.25	358~373	0.1~0.5	122~3 012	0.55~3.56	0.93~2.94	25~45	300

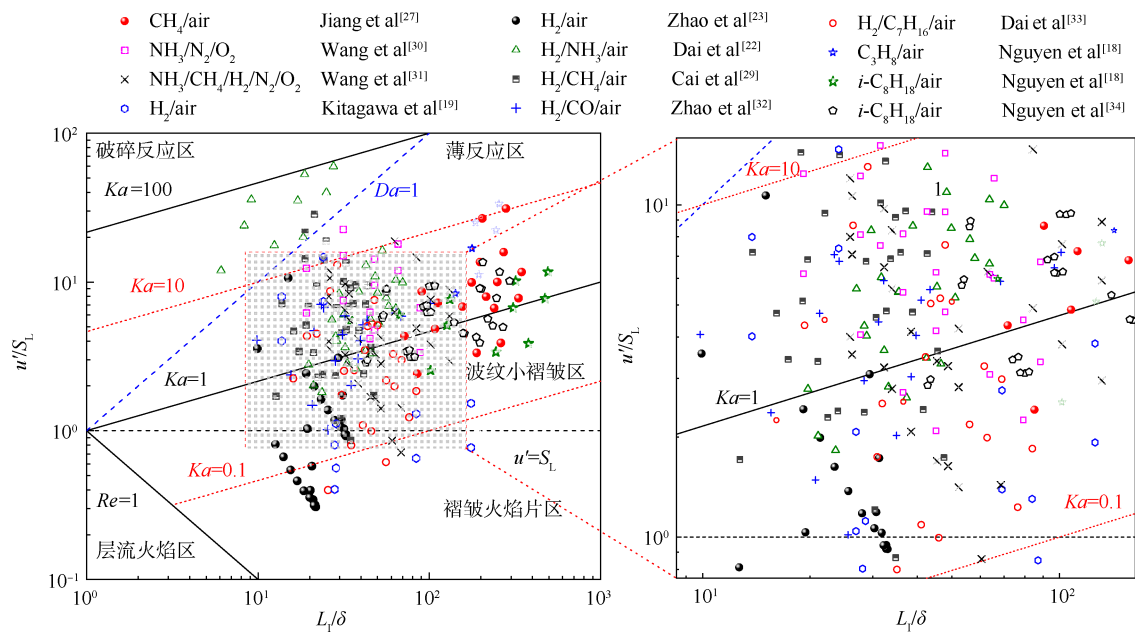


Fig. 1 Turbulent conditions for the data displayed in Table 1 plotted on the Borghi-Peters diagram^[1]

于描述湍流对火焰传播速度的影响,进而影响火焰形成和演化的过程。正因为如此,许多研究已经开展并建立预测 S_T 的一般形式,但这种预测模型在火焰化学、流场性质以及湍流和化学相互作用预测上各有侧重,存在很大的不一致。本文选取了近年来新提出的14个 S_T 预测模型进行评估, S_T 预测模型汇总在表2中。参数 C 为模型推导或拟合中的经验项。当前工况范围远大于提出原始参数 C 的工况范围,因此,在本文后续提出了对于宽广工况更合适的修正参数 C 。最新研究^[15-29]证明,即使在强湍流分区下, Le 不等于1的工况仍会受到强烈的差异扩散作用,因此, Le 是 S_T 预测模型的必须项。而在表2中,并不是所有的公式均考虑了 Le 数影响,为此,挑选表1中 Le 在0.96~1.05内的共73组数据作为验证这些公式的数据库。此外,考虑了 Le 数影响的其他模型采用所有300组数据进行验证。为了评估每个模型的精度,平均绝对百分比误差(MAPE)采用公式(7)计算,其中 $x_{exp,i}$ 是实验值, $x_{corr,i}$ 是湍流速度关系式的预测值, n 是工况个数,这一方法在以往研究中已被证明有效^[35]。

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{exp,i} - x_{corr,i}}{x_{exp,i}} \right|}{n} \times 100\% \quad (7)$$

3 结果与讨论

3.1 湍流燃烧速度模型评估与优化

图2显示了对于14个 S_T 预测模型进行的准确性评估结果,原始的经验常数项 C 分别被修正为最小

MAPE下对应的常数数值,修正前后常数项与MAPE值展示在表3中。根据图2的结果,与优化参数 C 后,所有模型的预测精度均有所提升。图2显示,对于未考虑 Le 的模型,C13,C2,C6在修正后准确性MAPE低于35%;对于考虑 Le 的模型,C7,C3准确度低于35%。

在众多的研究中, Le 不同带来的 S_T 数据差异十分显著。尽管许多模型已经进行了相应考虑,但 Le 表征项 Le^n 中幂指数 n 仍然不统一,在-1.2~-0.35内变化。Dai等^[22]和Wang等^[31]最近的研究表明,这归因于 Le 改变导致的 Le^n 项变化范围相较于其他参数项小很多,以至于 Le^n 项在 S_T 预测式中权重不大。因此,为了提高预测式中幂函数 n 的可信度,宽广范围变化的 Le 数据就尤为重要。当前数据库 Le 在0.33~2.94中变化,为广泛 Le 范围下模型准确性验证甚至发展提供了可能。由于 Le^n 中 n 为负数, Le^n 随 Le 增加呈逐渐变缓的降低趋势,因此本文将数据分成 $0.3 < Le < 0.7$, $0.7 \leq Le \leq 1.0$ 和 $Le > 1$ 三类,用于含 Le 模型验证。

图3显示了基于这三种范围数据得到的 S_T 模型准确性评估。可以发现,对于每个模型,三种 Le 范围下的最小MAPE都存在较大不一致,尤其是修正参数 C 差距较大。一般可以认为,修正参数在不同 Le 范围下显著变化时,此时 Le 的幂函数或许不具有普适性。因此,定义参数 C 的变化率(Rate of C)为三种条件下参数 C 的最大最小之差与表3中对应最小MAPE的修正参数 C 的比值,即 $(C_{max} - C_{min})/C$,结果如表4所示。C7,C3,C14具有低于40%的变化率,对应 Le 的幂函数分别为-0.42,-1,-1,这意味着这些数值更能适用

Table 2 Summary of S_T correlations

Correlation & Author		Equation	Parameter C	Progress variable c
C1	Glder ^[36]	$\frac{S_T}{S_L} = \left[1 + C \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.5} Re_T^{0.25} \right] / 1.7$	0.62	0.5
C2	Kobayashi et al ^[9]	$\frac{S_T}{S_L} = C \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.38} \left(\frac{p}{0.1 \text{ MPa}} \right)^{0.38}$	2.90	0.5
C3	Muppala et al ^[37]	$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \frac{C}{Le} Re_T^{0.25} \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.3} \left(\frac{p}{0.1 \text{ MPa}} \right)^{0.2}$	0.46	0.5
C4	Bradley et al ^[17]	$\frac{S_T}{u'} = C \left[0.157 \left(\frac{u'}{S_L} \right)^2 Re_T^{-0.5} Le \right]^{-0.3}$	0.88	0.5
C5	Chaudhuri et al ^[16]	$\frac{S_T}{S_L} = C Re_{T, \text{flame}}^{0.54}$	0.10	0.1
C6	Liu et al ^[38]	$\frac{S_T - S_L}{u'} = C Da^{0.47}$	0.14	0.5
C7	Nguyen et al ^[18]	$\frac{S_T}{S_L} = C \left(\frac{u'}{S_L} \frac{p}{0.1 \text{ MPa}} Le^{-1} \right)^{0.42}$	2.54	0.5
C8	Nguyen et al ^[18]	$\frac{S_T}{S_L} = C \left(Re_{T, \text{flame}} Le^{-1} \right)^{0.54}$	0.26	0.5
C9	Nguyen et al ^[18]	$\frac{S_T}{u'} = C \left(Da Le^{-1} \right)^{0.5}$	0.09	0.5
C10	Cai et al ^[29]	$\frac{S_T}{S_L} = 1 + C \left(Re_{T, \text{flame}} Le^{-2} \right)^{0.66}$	0.16	0.5
C11	Wang et al ^[30]	$\frac{S_T}{S_L} = C Ka Da^{0.8896}$	0.78	0.5
C12	Lhuillier et al ^[39]	$\frac{S_T}{S_L} = C Da Ka^{1.1694}$	0.18	0.1
C13	Dai et al ^[28]	$\frac{S_T}{S_L} = C \left(\frac{L_1}{1 \text{ mm}} \right)^{0.5} \left(\frac{u'}{S_L} \frac{p}{0.1 \text{ MPa}} \right)^{0.41}$	0.47	0.5
C14	Wang et al ^[31]	$\frac{S_T}{S_L} = C \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.69} \left(\frac{L_1}{\delta} \right)^{0.31} Le^{-1}$	0.26	0.1

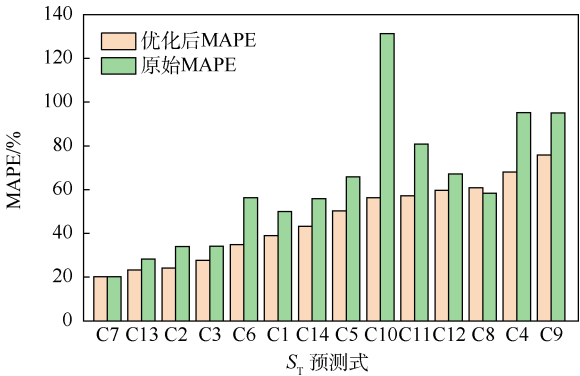


Fig. 2 Predictive accuracy of S_T based on MAPE

于广泛的 Le 范围变化。

在不同的湍流分区中,湍流与火焰面相互作用机理差异显著,Cai 等^[40]和 Yang 等^[41-42]的研究发现不

稳定性与球形火焰传播规律的相互作用规律以 $Ka=1$ 为分界线。Wang 等^[31]最近发现,仅使用考虑湍流流动特性(由 $Re_{T, \text{flame}}$ 表征)和差异扩散影响(由 Le 表征)的预测模型在 $Ka<1$, $Ka=1$ 以及 $Ka>1$ 工况下具有显著的不一致性,这归因于湍流拉伸程度及湍流涡作用时间未被充分考虑。本文所选数据涵盖了三个典型的湍流分区, Ka 范围很广(0.3~90),这允许在不同 Ka 范围下对每个相关性进行研究。如图 4 所示,所有工况点依据 Ka 数值大小,分为 $Ka<1$, $1\leq Ka\leq 10$ 和 $Ka>10$ 三个部分。同样地,三种范围下 S_T 预测模型的常数项修正为最小 MAPE 对应值;随后三种范围的对应修正常数变化率也被计算并添加在表 5 中。可以发现,对于大多数 S_T 预测模型在 $Ka>10$ 范围中最小 MAPE 相

Table 3 Original and modified parameters C and MAPE

Correlation	C	MAPE	Modified C	Minimum MAPE
C1	0.62	0.50	0.37	0.39
C2	2.90	0.34	2.02	0.24
C3	0.46	0.34	0.64	0.28
C4	0.88	0.95	11.02	0.68
C5	0.10	0.66	0.06	0.50
C6	0.14	0.56	0.29	0.35
C7	2.54	0.20	2.58	0.20
C8	0.26	0.58	0.18	0.61
C9	0.09	0.95	0.71	0.76
C10	0.16	1.31	0.06	0.56
C11	0.78	0.81	0.39	0.57
C12	0.18	0.67	0.26	0.60
C13	0.47	0.28	0.38	0.23
C14	0.26	0.56	0.49	0.43

较于全部数据的准确度更好,而对于其他 Ka 范围的 MAPE 与全部数据的准确度接近,这说明当前验证的大多数模型更加适用于高 Ka 工况。然而,如表 5 所示,不同 Ka 范围下,修正参数 C 变化参差不齐,其中

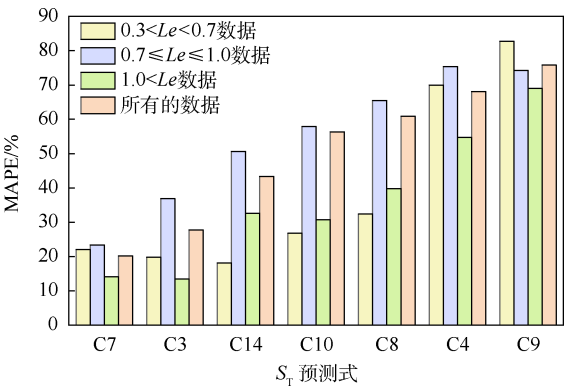


Fig. 3 S_T prediction accuracy evaluation and correction based on data from different Le range

C7, C2, C4, C9 的变化率低于 30%, 说明这些模型对不同 Ka 范围的工况具有相似的预测能力。综合来看,在未考虑 Le 影响的模型中, C2, C6 对广泛的 Ka 工况范围具有更好的普适性;在考虑 Le 影响的模型中, C7 在宽广 Le 范围和 Ka 工况范围下具有普适性。为了进一步提升 S_T 预测模型预测精度,在下文中,分别以 C6 和 C7 为例,对各参数的影响开展研究;由于 C2 与 C7 形式接近,故仅采用作为考虑 Le 影响更全面 C7 模型用于后续研究。

Table 4 Modified parameter C depended on data from different Le range

Correlation	0.3< Le <0.7		0.7≤ Le ≤1.0		Le >1.0		Rate of C /%
	Modified C	Minimum MAPE	Modified C	Minimum MAPE	Modified C	Minimum MAPE	
C3	0.68	0.20	0.54	0.37	0.73	0.13	30
C4	27.74	0.70	9.83	0.75	11.28	0.55	162
C7	3.07	0.22	2.59	0.23	2.47	0.14	23
C8	0.36	0.32	0.07	0.66	0.27	0.40	161
C9	1.43	0.83	1.16	0.74	0.54	0.69	125
C10	0.11	0.27	0.02	0.58	0.11	0.31	150
C14	0.60	0.18	0.41	0.51	0.62	0.33	39

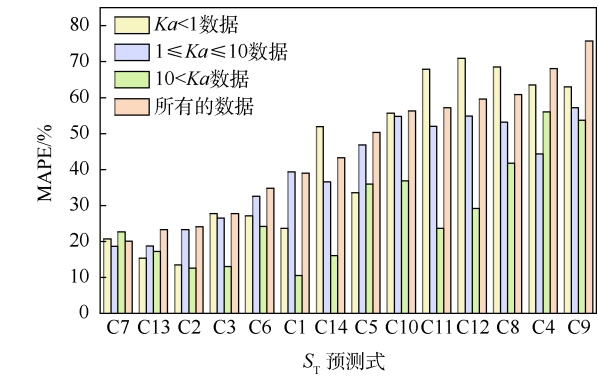


Fig. 4 S_T prediction accuracy evaluation and correction based on data from different Ka range

3.2 湍流火焰参数影响评估

S_T 的改变通常可以归因于火焰面面积与火焰面

附近输运速率增大或减小的作用。具体来说,增大 S_T 的因素有:湍流直接作用于火焰面导致火焰面褶皱加剧(u'/S_L 与 L_f/δ),湍流涡加强火焰附近质热输运,火焰面附近质热扩散不稳定($Le<1$)导致火焰褶皱和局部燃烧速度提升,以及受火焰两侧密度差导致的流体动力学不稳定性(与 p 相关)的褶皱加速作用。另外,降低 S_T 的因素有:运动学惠更斯恢复作用,小尺度褶皱被扩散作用耗散,质热扩散稳定($Le>1$)使得火焰面趋于恢复至平均位置,以及强拉伸作用导致局部火焰面断裂甚至熄灭。因此,本部分研究了湍流强度(u'/S_L),最大湍流涡尺度(L_f/δ),湍流分区位置(Ka),初始压力(p)等参数对 C6 和 C7 的影响,来尝试优化 S_T 预测模型。

图 5 给出了 C6 的预测值与实验值的对比结构, S_t 数据对应的几种特征参数用颜色数值来表征。可以直观发现, 尽管 C6 具有相对较低的 MAPE, 但数据点围绕在 $y=x$ 的黑色实线两侧分布, 说明 C6 仍然难以实现定量预测。从图 5(a) 中可以发现, u'/S_L 从小到大的分布均围绕 $y=x$ 分布, 其他参数如 $Le/\delta, p, Re$,

Table 5 Modified parameter C depended on data from different Ka range

Correlation	$Ka < 1$		$1 \leq Ka \leq 10$		$Ka > 10$		Rate of C/%
	Modified C	Minimum MAPE	Modified C	Minimum MAPE	Modified C	Minimum MAPE	
C1	2.61	0.21	2.51	0.19	3.16	0.23	176
C2	0.35	0.15	0.40	0.19	0.82	0.17	23
C3	1.79	0.13	2.06	0.23	3.52	0.13	270
C4	0.60	0.28	0.64	0.27	1.05	0.13	4
C5	0.29	0.27	0.28	0.33	0.82	0.24	900
C6	0.37	0.24	0.34	0.39	1.19	0.11	293
C7	0.55	0.52	0.47	0.37	0.69	0.16	9
C8	0.06	0.34	0.07	0.47	0.64	0.36	322
C9	0.03	0.56	0.07	0.55	0.19	0.37	23
C10	0.43	0.68	0.38	0.52	0.81	0.24	717
C11	0.34	0.71	0.25	0.55	0.43	0.29	46
C12	0.17	0.69	0.18	0.53	0.62	0.42	173
C13	32.12	0.64	12.89	0.44	2.78	0.56	7 721
C14	0.55	0.63	2.26	0.57	12.95	0.54	2 531

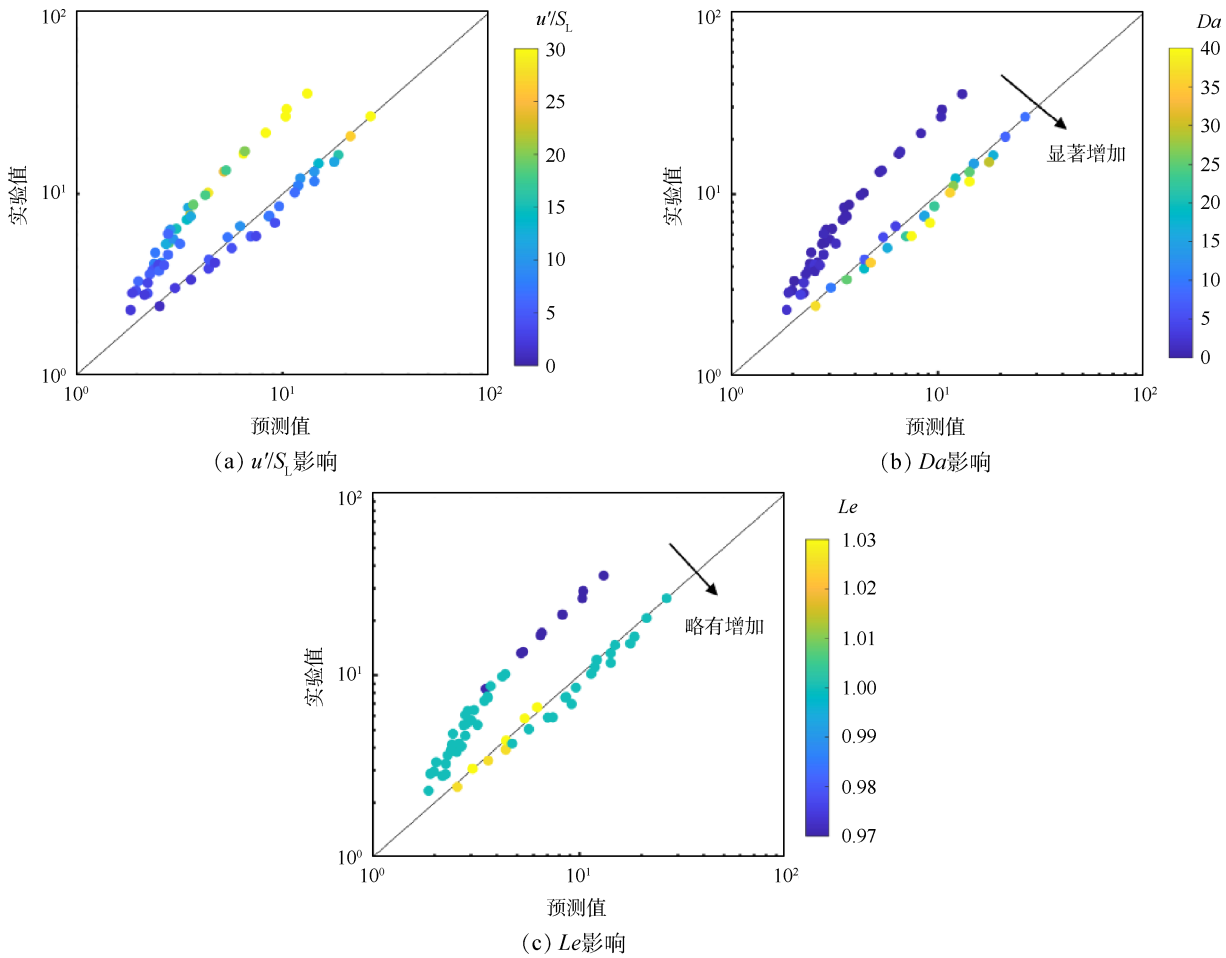


Fig. 5 Comparison between experimental values and predicted values from C6: (a) Distribution of u'/S_L of relative turbulence intensity; (b) Distribution of Da ; (c) Le distribution

Ka 等分布都被发现存在类似现象,说明 C6 中对这些参数的表征较为充分。如图 5(b) 可以发现,图中数据点位置存在显著的 Da 范围相关关系,即数据点对应 Da 值越小,其预测值越低。这意味着 C6 未充分实现对 Da 影响因素的表征,这可能是造成图 5 中数据存在明显两端离散的主要因素。图 5(c) 表明,尽管当前工作是围绕 $Le=1$ 的工况开展, Le 增加会导致预测值略微增加。此处,本文尝试调整 C6 的常数项 C 和 Da 幂指数来消除 Da 范围对速度预测值的影响。当保持修正常数 C 为 0.29,调整 Da 幂指数时可以发现,当幂指数从 0.47 减小至 0.2 附近,预测值分布与 Da 范围的关系减弱,即不同 Da 范围的预测值和实验值分布出现交叉。此时,可以认为 Da 影响被充分考虑。随后,固定幂指数,调整常数 C 数值,来寻找最低 MAPE 对应的修正常数 C 。最终,得到 $\frac{S_T - S_L}{u'} = CDa^{0.2}$,最小 MPAE 约为 11.5%,对应修正参数 C 为 0.56,预测效果如图 6。此时数据点几乎都落在 $y=x$ 这

条线上。这进一步证明了图 5 数据点离散主要受 Da 影响,修正后的公式可视为未考虑 Le 影响的最佳湍流燃烧速度模型。

图 7 对比了 C7 的预测值与实验值,可以发现,此

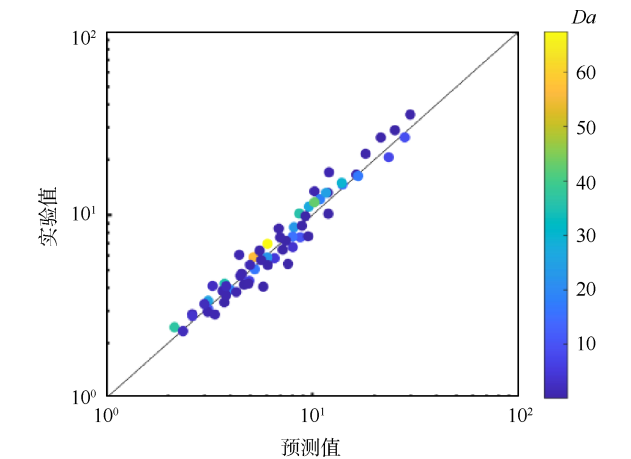


Fig. 6 Comparison between experimental values and predicted values from modified C6

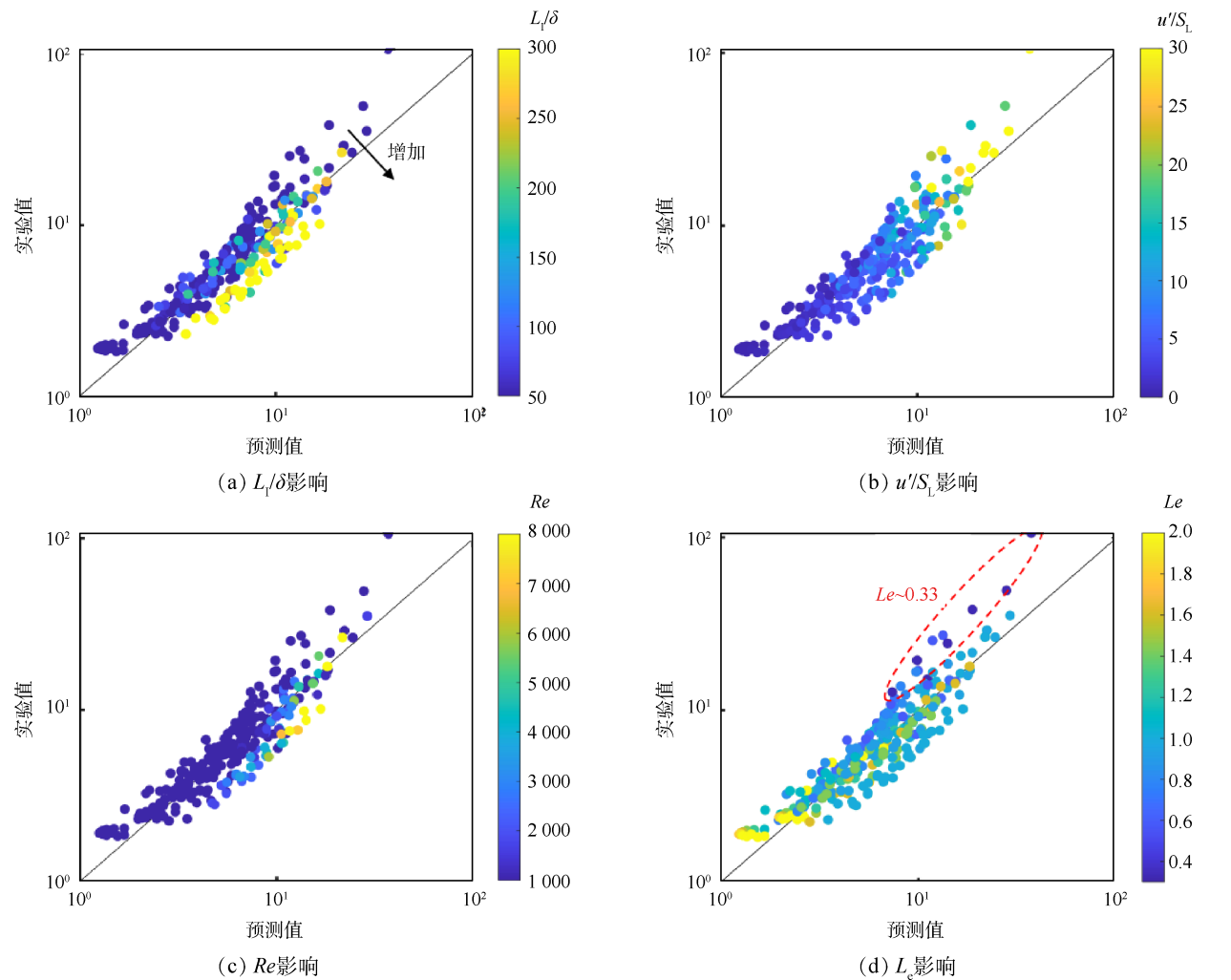


Fig. 7 Comparison between experimental values and predicted values from C7: (a) Distribution of the relative turbulence length scale L_t/δ ; (b) Distribution of u'/S_L of relative turbulence intensity; (c) Distribution of Re ; (d) Le distribution

时数据均匀分布在 $y=x$ 黑线两侧,说明C7预测式存在较好的预测性能。然而,从图7(a)中可以发现,由于C7中未包含湍流尺度的影响,此时预测值随着 L_t/δ 的增加逐渐增加,导致在高 L_t/δ 下预测偏高。图7(b)显示除个别点外,即使 u'/S_L 很大,数据点仍然均匀分布在 $y=x$ 附近,其他参数如 Ka, p 等分布都被发现存在类似现象。由于 L_t/δ 考虑不足,C7也呈现出随 Re 增加而过高预测的现象。尽管C7在2.1节中已经充分说明了其对 Le 影响的表征,但需要注意到在特别低的 Le 工况下,预测值偏低。在最近的研究中这种极端的 Le 下,差异扩散和不稳定性与压力的耦合作用会导致火焰速度显著加速传播^[31-43]。这说明,对于这种极端的 Le 工况需要更加谨慎地选取专用的 Le 幂指数。本文尝试将 L_t/δ 的影响补充到C7中。与C6修正方法相似,固定常数 C 下,调整 L_t/δ 幂指数项直至数据点分布不再存在显著的 L_t/δ 数值相关性。随后找到该幂函数下最小MAPE对应的常数项 C 。最终,得到修正的关系式

$$\frac{S_T}{S_L} = C \left(\frac{u'}{S_L} \frac{p}{0.1 \text{ MPa}} Le^{-1} \right)^{0.42} \left(\frac{L_t}{\delta} \right)^{-0.15}$$

其最小MAPE为15.5%,对应参数 C 等于4.71。如图8所示,修正的 S_T 预测值均匀分布在 $y=x$ 附近,且其预测准确度远高于其他关系式。

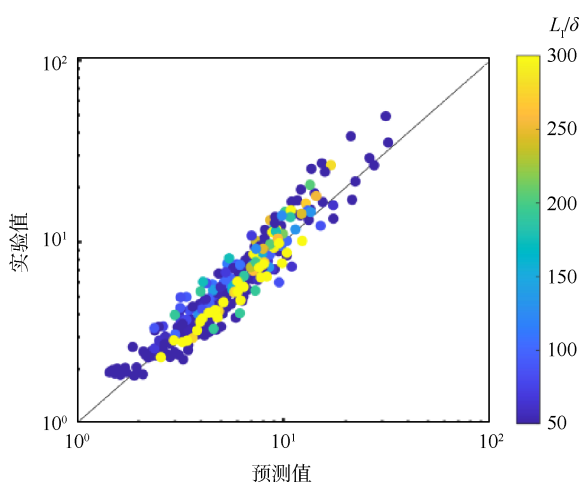


Fig. 8 Comparison between experimental values and predicted values from modified C7

根据优化结果以及表2中模型公式可以知道,对于 $Le=1$ 的数据,湍流燃烧速度一般表征形式可转换为

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + 0.56 \left(\frac{u'}{S_L} \right) Da^{0.2} = 1 + 0.56 \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.8} \left(\frac{L_t}{\delta} \right)^{-0.2};$$

对于受 Le 影响的数据,湍流燃烧速度一般形式为

$\frac{S_T}{S_L} = 4.71 \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.42} \left(\frac{L_t}{\delta} \right)^{-0.15} \frac{p}{0.1 \text{ MPa}} Le^{-0.42}$ 。这说明,在湍流燃烧速度预测模型中必须包含相对湍流强度、相对湍流尺度, $Le^{-0.42}$ 被认为是差异扩散作用的准确表征。然而,仍然需要注意,来自Kitagawa等^[19]的 H_2/air 实验数据相较于预测值仍然偏高,这可能归因于高压下DL不稳定性作用^[40],在未来仍需要进一步考虑其影响。

4 结论

本研究修正得到适用于宽广工况范围下的最佳 S_T 预测模型。这为湍流数值燃烧模拟提供了准确的速度源项,并且有利于接近发动机工作条件下不同燃料燃烧速度特性估计。本文的主要结论如下:

(1)优化 S_T 预测模型中常数项可以显著降低预测误差,对于未考虑 Le 影响的模型,分别由Dai, Kobayashi和Liu等提出的C13, C2和C6模型具有较小的MAPE(低于25%);然而,仅Kobayashi提出的C2模型对不同 Ka 工况具有普适性。对于考虑 Le 影响的模型,仅Nguyen等提出的C7模型在不同 Le 和 Ka 保持普适性。

(2)发现Liu和Nguyen等提出的C6和C7模型未充分考虑 Da 和相对积分尺度 L_t/δ 的影响,本文在此基础上分别提出了适用于固定 Le 工况($Le=1$)和变化 Le 工况($Le=0.33\sim 2.94$)的最佳预测模型,分别将其MAPE降低至11.5%和15.5%,这两个最佳预测模型分别为 $\frac{S_T - S_L}{u'} = 0.56 Da^{0.2}$ 和

$$\frac{S_T}{S_L} = 4.71 \left(\frac{u'}{S_L} \frac{p}{0.1 \text{ MPa}} Le^{-1} \right)^{0.42} \left(\frac{L_t}{\delta} \right)^{-0.15}.$$

致谢:感谢国家自然科学基金、中国博士后科学基金和中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

参考文献

- [1] 张弛, 林宇震, 徐华胜, 等. 民用航空发动机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 332-350.
ZHANG C, LIN Y Z, XU H S, et al. Development status and level of low emissions combustor technologies for civil aero-engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 332-350. (in Chinese)
- [2] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 961-970.
CAO J G. Status, challenges and perspectives of aero-engine simulation technology[J]. Journal of Propulsion

- Technology, 2018, 39(5): 961–970. (in Chinese)
- [3] 静大亮, 王珂, 陈曦, 等. 燃烧室数值仿真研究现状与发展趋势[J]. 航空动力, 2018(1): 44–47.
- JING D L, WANG K, CHEN X, et al. The progress on numerical simulation of combustion chamber[J]. Aerospace Power, 2018(1): 44–47. (in Chinese)
- [4] 黄家骅, 冯国泰. 航空发动机特性仿真技术的进展与展望[J]. 推进技术, 2002, 23(4): 83–88.
- HUANG J H, FENG G T. Development and expectation of performance simulation in aviation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(4): 83–88. (in Chinese)
- [5] PETERS N. Turbulent combustion[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(11).
- [6] LIPATNIKOV A N, CHOMIAK J. Turbulent flame speed and thickness: phenomenology, evaluation, and application in multi-dimensional simulations[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2002, 28(1): 1–74.
- [7] LAW C K. Combustion physics[M]. London: Cambridge University Press, 2010.
- [8] KOBAYASHI H, KAWABATA Y, MARUATA K. Experimental study on general correlation of turbulent burning velocity at high pressure[C]. Boulder: Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, 1998.
- [9] KOBAYASHI H, SEYAMA K, HAGIWARA H, et al. Burning velocity correlation of methane/air turbulent premixed flames at high pressure and high temperature[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 827–834.
- [10] LU Z, YANG Y. Modeling pressure effects on the turbulent burning velocity for lean hydrogen/air premixed combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(2): 2901–2908.
- [11] DRISCOLL J. Turbulent premixed combustion: flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(1): 91–134.
- [12] DAMKÖHLER G. Der einfluss der turbulenz auf die flammengeschwindigkeit in gasgemischen[J]. Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, 1940, 46(11): 601–626.
- [13] ZIMONT V L. Theory of turbulent combustion of a homogeneous fuel mixture at high Reynolds numbers[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1979, 15: 305–311.
- [14] LAPOINTE S, BLANQUART G. Fuel and chemistry effects in high Karlovitz premixed turbulent flames[J]. Combustion and Flame, 2016, 167: 294–307.
- [15] CAI X, FAN Q S, BAI X S, et al. Turbulent burning velocity and its related statistics of ammonia-hydrogen-air jet flames at high Karlovitz number: effect of differential diffusion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4): 4215–4226.
- [16] CHAUDHURI S, WU F J, ZHU D L, et al. Flame speed and self-similar propagation of expanding turbulent premixed flames[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(4): 044503.
- [17] BRADLEY D, LAU A K C, LAWES M. Flame stretch rate as a determinant of turbulent burning velocity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1992, 338(1650): 359–387.
- [18] NGUYEN M T, YU D W, SHY S S. General correlations of high pressure turbulent burning velocities with the consideration of Lewis number effect[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(2): 2391–2398.
- [19] KITAGAWA T, NAKAHARA T, MARUYAMA K, et al. Turbulent burning velocity of hydrogen-air premixed propagating flames at elevated pressures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(20): 5842–5849.
- [20] GOULIER J, COMANDINI A, HALTER F, et al. Experimental study on turbulent expanding flames of lean hydrogen/air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2823–2832.
- [21] ZHAO H R, WANG J H, CAI X, et al. Turbulent burning velocity and its unified scaling of butanol isomers/air mixtures[J]. Fuel, 2021, 306: 121738.
- [22] DAI H C, WANG J H, CAI X, et al. Lewis number effects on laminar and turbulent expanding flames of NH_3/H_2 /air mixtures at elevated pressures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(2): 1689–1697.
- [23] ZHAO H R, LI G, WANG J H, et al. Experimental study of H_2 /air turbulent expanding flames over wide equivalence ratios: effects of molecular transport[J]. Fuel, 2023, 341: 127652.
- [24] TAMADONFAR P, GÜLDER Ö L. Flame brush characteristics and burning velocities of premixed turbulent methane/air Bunsen flames[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(12): 3154–3165.
- [25] TAMADONFAR P, GÜLDER Ö L. Effects of mixture composition and turbulence intensity on flame front structure and burning velocities of premixed turbulent hydrocarbon/air Bunsen flames[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(12): 4417–4441.
- [26] BRADLEY D, LAWES M, MANSOUR M S. Correlation of turbulent burning velocities of ethanol-air, measured in a fan-stirred bomb up to 1.2 MPa[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(1): 123–138.

- [27] JIANG L J, SHY S S, LI W Y, et al. High-temperature, high-pressure burning velocities of expanding turbulent premixed flames and their comparison with Bunsen-type flames [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 172: 173–182.
- [28] DAI H C, WANG J H, CAI X, et al. Measurement and scaling of turbulent burning velocity of ammonia/methane/air propagating spherical flames at elevated pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 242: 112183.
- [29] CAI X, WANG J H, BIAN Z J, et al. Self-similar propagation and turbulent burning velocity of CH_4/H_2 /air expanding flames: effect of Lewis number [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 1–12.
- [30] WANG S X, ELBAZ A M, WANG Z H, et al. The effect of oxygen content on the turbulent flame speed of ammonia/oxygen/nitrogen expanding flames under elevated pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 232: 111521.
- [31] WANG S X, ELBAZ A M, WANG G Q, et al. Turbulent flame speed of $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ /air-mixtures: effects of elevated pressure and Lewis number [J]. *Combustion and Flame*, 2023, 247: 112488.
- [32] ZHAO H R, WANG J H, CAI X, et al. Flame structure, turbulent burning velocity and its unified scaling for lean syngas/air turbulent expanding flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (50): 25699–25711.
- [33] DAI H C, WANG J H, SU S G, et al. Turbulent burning velocity of hydrogen/n-heptane/air propagating spherical flames: effects of hydrogen content [J]. *Combustion and Flame*, 2024, 260: 113248.
- [34] NGUYEN M T, YU D W, CHEN C Y, et al. General correlations of iso-octane turbulent burning velocities relevant to spark ignition engines [J]. *Energies*, 2019, 12 (10): 1848.
- [35] BURKE E M, GÜTHE F, MONAGHAN R F D. A comparison of turbulent flame speed correlations for hydrocarbon fuels at elevated pressures [C]. Seoul: ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2016.
- [36] GÜLDER O L. Turbulent premixed flame propagation models for different combustion regimes [J]. *Symposium on Combustion*, 1991, 23: 743–750.
- [37] MUPPALA S P R, ALURI N K, DINKELACKER F, et al. Development of an algebraic reaction rate closure for the numerical calculation of turbulent premixed methane, ethylene, and propane/air flames for pressures up to 1.0 MPa [J]. *Combustion and Flame*, 2005, 140 (4): 257–266.
- [38] LIU C C, SHY S S, PENG M W, et al. High-pressure burning velocities measurements for centrally-ignited premixed methane/air flames interacting with intense near-isotropic turbulence at constant Reynolds numbers [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159 (8): 2608–2619.
- [39] LHUILLIER C, BREQUIGNY P, CONTINO F, et al. Experimental investigation on ammonia combustion behavior in a spark-ignition engine by means of laminar and turbulent expanding flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38 (4): 5859–5868.
- [40] CAI X, WANG J H, BIAN Z J, et al. Propagation of Darrieus-Landau unstable laminar and turbulent expanding flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38 (2): 2013–2021.
- [41] YANG S, SAHA A, LIU Z R, et al. Role of Darrieus-Landau instability in propagation of expanding turbulent flames [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 850: 784–802.
- [42] LIU Z R, YANG S, LAW C K, et al. Cellular instability in $Le < 1$ turbulent expanding flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37 (2): 2611–2618.
- [43] 蔡 骁, 王金华, 赵浩然, 等. 稀甲烷/氢气预混湍流传播火焰实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41 (2): 514–519.
- CAI X, WANG J H, ZHAO H R, et al. Experimental research on expanding turbulent flames of lean methane/hydrogen/air mixtures [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41 (2): 514–519. (in Chinese)

(编辑:梅 瑛)

Assessment and development of applicability of turbulent burning velocity correlations over a wide range of conditions

CAI Xiao, DAI Hongchao, WANG Jinhua, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To develop the highly applicable turbulent burning velocity (S_T) correlations, this study compares the accuracy of recently proposed S_T correlations across a diverse range of conditions. The mean absolute percentage error (MAPE) of 14 S_T prediction correlations was determined using 300 data sets spanning a wide range of conditions. To enhance accuracy, the adjustable constant term, initially suggested by the author in the original correlations, was adjusted by identifying the minimum MAPE. The results indicate that correcting the fitting constant terms under broader conditions improve the accuracy of the original correlation. However, most models are proved not universal for a wide range of Lewis numbers ($Le=0.33\sim2.94$) and Karlovitz numbers ($Ka=0.03\sim90$). While Liu and Nguyen's correlations exhibit good applicability for fixed Le condition ($Le=1$) and arbitrary Le conditions ($Le=0.33\sim2.94$), they lack consideration of the Damköhler number (Da) and the relative turbulence length scale (L_t/δ), respectively. Therefore, this work proposed two modified prediction correlations, reducing the MAPE to 11.5% and 15.5%, respectively.

Key words: Turbulent burning velocity; Turbulent propagation flame; Velocity correlation; Broad condition; Differential diffusion

Received: 2023-09-04; **Revised:** 2024-02-04.

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2309007

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52106183); China Postdoctoral Science Foundation (2023T160513); Fundamental Research Funds for the Central Universities (xzy012022069).

Corresponding author: CAI Xiao, E-mail: xiao.cai@xjtu.edu.cn