

天然气层流燃烧特性的实验与数值计算

党嘉莹¹, 曾文¹, 陈潇潇¹, 谷午¹, 胡二江², 马宏宇³

- (1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 沈阳 110136;
2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 在定容弹中试验测量了压力分别为 0.1、0.2、0.3 MPa, 当量比范围为 0.7~1.4, 温度分别为 300、350、400 K, O₂ 体积分数分别为 15%、18%、21%, CO₂ 体积分数分别为 0%、10%、20%, H₂O 体积分数分别为 0%、10%、20% 工况条件下天然气 (0.9 甲烷/0.07 乙烷/0.03 丙烷, 摩尔分数) 的火焰发展特性以及层流燃烧速度。同时, 利用敏感性分析等方法构建了天然气的简化反应机理 (40 种组分和 189 个反应), 并对其层流燃烧速度进行了数值计算。结果表明: 当量比由 0.7 提升至 1.4 时, 天然气的层流燃烧速度先升高后降低, 其峰值在当量比 1.1 附近; 层流燃烧速度随着初始温度、O₂ 体积分数的增多或初始压力、CO₂ 及 H₂O 体积分数的减少而逐渐得到提升。构建的天然气简化反应机理可以较好的预测层流燃烧速度随当量比变化的整体趋势; 但是, 部分工况下预测值略低于试验值。

关 键 词: 天然气; 层流燃烧速度; 定容弹; 简化反应机理; 敏感性分析

中图分类号: V231.2; TK401

文献标志码: A

Simulation and experiment on the laminar combustion characteristics of natural gas

DANG Jiaying¹, ZEGN Wen¹, CHEN Xiaoxiao¹, GU Wu¹, HU Erjiang², MA Hongyu³

- (1. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The flame propagation characteristics and laminar combustion speeds of natural gas (0.9 methane/0.07 ethane/0.03 propane, mole fraction) were experimentally tested in the constant volume bomb under the conditions of the pressures of 0.1, 0.2, 0.3 MPa, the equivalence ratios range of 0.7—1.4, the temperatures of 300, 350, 400 K, the contents of O₂ of 15%, 18%, 21%, the contents of CO₂ and H₂O of 0%, 10%, 20%. Meanwhile, the simplified reaction mechanism of natural gas (including 40 species and 189 reactions) was constructed by sensitivity analysis and other methods, and the laminar combustion speeds of natural gas were calculated numerically. The results showed that as the equivalent ratio increased from 0.7 to 1.4, the laminar combustion speeds of natural gas rose and then declined, and the peak appears near the equivalent ratio was 1.1; With the increase of initial temperature and the content of O₂ or the decrease of initial pressure, the contents of CO₂ and H₂O, the laminar combustion speeds gradually

收稿日期: 2021-08-22

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0006-0031)

作者简介: 党嘉莹(1996—), 女, 硕士生, 主要从事碳氢燃料基础燃烧特性研究。

通信作者: 曾文(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事发动机先进燃烧技术研究。E-mail: zengwen928@sohu.com

引用格式: 党嘉莹, 曾文, 陈潇潇, 等. 天然气层流燃烧特性的实验与数值计算[J]. 航空动力学报, 2024, 39(2): 20210468. DANG Jiaying, ZEGN Wen, CHEN Xiaoxiao, et al. Simulation and experiment on the laminar combustion characteristics of natural gas[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(2): 20210468.

increased. The simplified reaction mechanism of natural gas constructed hereto can better predict the overall trends of the laminar combustion speed with the equivalent ratio. However, the predicted values were slightly lower than the experimental values under certain conditions.

Keywords: natural gas; laminar combustion speed; constant volume bomb; simplified reaction mechanism; sensitivity analysis

燃气轮机根据设计指导思想、设计理念、整机参数匹配和部件设计方法不同,可分为轻型和重型燃气轮机,两者都主要以天然气为燃料,因而国内外市场对天然气燃气轮机的需求量很大。由于受环保法规的约束,具有低排放燃烧技术的燃气轮机才能进入市场。我国对天然气燃气轮机低排放燃烧技术方面的研究相对滞后,还没有形成完整的技术体系^[1]。降低天然气燃气轮机污染物排放的重要途径是采用预混燃烧的方式降低燃烧室内火焰锋面前的当量比以及主燃区的燃烧反应温度,并且辅以内燃燃气(主要成分为 CO_2 和 H_2O)再回流方式降低反应区氧浓度,从而抑制 NO_x 生成量。同时,减少燃料的预混当量比,使得化学反应速率不超出标准限度,从而抑制 CO 和 UHC (未燃碳氢)的产生^[2-5]。天然气燃气轮机燃烧室内部的燃烧情况非常复杂,而燃烧性能与排放性能紧密相关。因此,对复杂燃烧环境、宽工况下天然气的层流燃烧进行试验研究,从而获得天然气的层流燃烧特性,将为低排放天然气燃气轮机燃烧室的结构与性能优化提供理论和技术支持,也为天然气燃烧反应简化机理的构建与验证提供试验数据。

与对冲火焰法^[6]、本生灯法^[7]等测试方法相比,定容弹法^[8]可以正确分析碳氢燃料层流燃烧中火焰稳定性与拉伸效应,因而得到广泛应用。汤成龙等^[9]、曾文等^[10]、宋占锋等^[11]、Tang 等^[12]、Liao 等^[13]分别在定容弹中试验测试了天然气层流火焰发展特性和燃烧特性,分析了不同稀释气体(氮气、 CO_2 等)体积分数对天然气层流燃烧特性的影响规律。天然气的组成成分及比例因产地不同差异明显,其层流燃烧火焰发展特性与层流燃烧速度也不相同;同时,由于低排放燃气轮机采用内部燃气再回流技术,混合气中氧气体积分数将降低,并包含部分 CO_2 、 H_2O 等,其对燃烧室的燃烧性能也将会产生较大影响。因此,有必要对宽工况范围下天然气的层流燃烧火焰的发展特性及燃烧特性进行研究,并分析稀释气体以及 O_2 体积分数(内部燃气再回流技术会改变混合气的

成分及比例)对其的影响规律。

本文在定容弹中试验测试了当量比范围为 0.7~1.4,压力分别为 0.1、0.2、0.3 MPa,温度分别为 300、350、400 K, O_2 体积分数分别为 15%、18%、21%, CO_2 体积分数分别为 0%、10%、20%, H_2O 体积分数分别为 0%、10%、20% 的工况条件下天然气层流燃烧火焰的发展特性和层流燃烧速度;同时基于敏感性分析等方法构建了天然气的简化反应机理,完成宽工况下层流燃烧速度的数值计算,并与相应试验数据进行了对比分析。

1 试验装置

本文采用的定容燃烧试验系统如图 1 所示^[14],定容弹如图 2 所示,内径为 180 mm、长为 180 mm、容积约为 4.3 L 的不锈钢圆柱体。Liu 等^[14]对该试验测试系统进行了详细论述,这里不再提及。

试验数据的不确定性主要来源于混合气制备、数据采集和数据处理。混合气制备时(确定当量比),主要通过压力变送器获得混合气中各气体的分压力,该压力变送器的测量精度为 0.075%,因此当量比的不确定度为 $\pm 3\%$ 。在数据采集过程中,利用自行开发的软件实现火焰半径的自动测量,测量误差小于 0.3%;在数据处理时,需要选择合理的火焰半径范围、拟合试验数据、获得无拉伸火焰速度等,误差为 $\pm 10\%$ 。基于上述分析,本文的层流燃烧速度试验误差为 1.0~4.5 cm/s^[15]。

在球形火焰理论中,拉伸火焰传播速度 S_n 定义为火焰半径对时间的微分:

$$S_n = \frac{dr}{dt} \quad (1)$$

式中 r 为火焰半径, t 为时间, n 为火焰传播方向。

球形火焰前锋面将受到拉伸作用,拉伸率定义为:

$$\alpha = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{dA}{A \cdot dt} \quad (2)$$

式中 α 为火焰面拉伸率, A 为火焰前锋面积。

根据球体的表面积公式,式(2)还可以表示为:

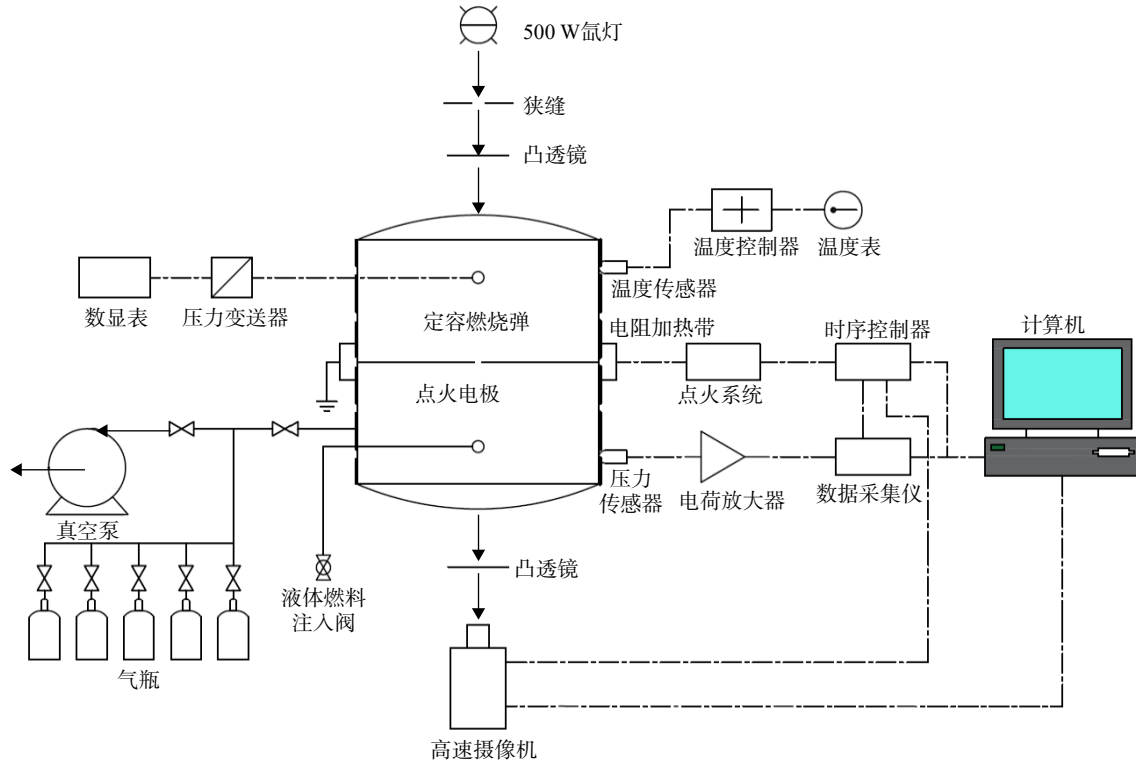


图1 试验平台装置图

Fig. 1 Device diagram of the experimental platform

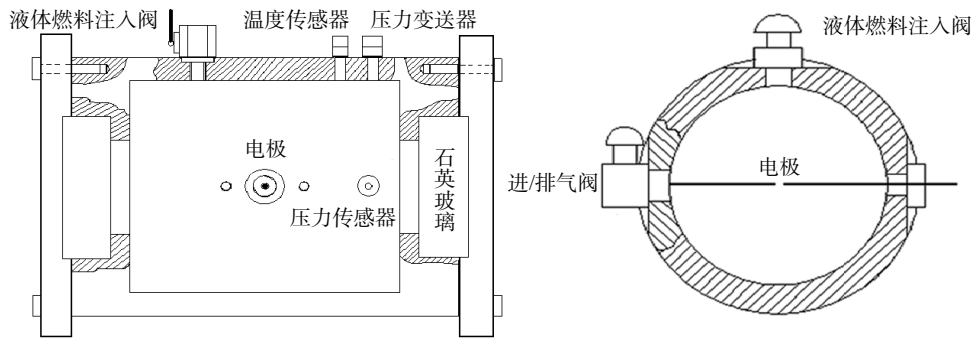


图2 定容弹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of constant volume bomb

$$\alpha = 2 \cdot dr / (r \cdot dt) = \frac{2S_n}{r} \quad (3)$$

略去拉伸效应,无拉伸火焰传播速度 S_1 可由式(4)得到。

$$S_1 - S_n = L_b \alpha \quad (4)$$

假设火焰面为等面积稳态流,则:

$$A \rho_u U_1 = A \rho_b S_1 \quad (5)$$

式中 ρ_u 与 ρ_b 依次为未燃区和已燃区混合气的密度。

根据式(6)即可得到层流燃烧速度:

$$U_1 = (\rho_b S_1) / \rho_u \quad (6)$$

O_2 体积分数按式(7)进行计算:

$$\varphi(O_2) = \frac{V_{O_2}}{V_{O_2} + V_{N_2}} \quad (7)$$

CO_2 体积分数按式(8)进行计算:

$$\varphi(CO_2) = \frac{V_{CO_2}}{V_{CO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}} \quad (8)$$

H_2O 体积分数按式(9)进行计算:

$$\varphi(H_2O) = \frac{V_{H_2O}}{V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2}} \quad (9)$$

式中 V_{O_2} 为 O_2 的体积、 V_{N_2} 为 N_2 的体积、 V_{CO_2} 为稀释气 CO_2 的体积、 V_{H_2O} 为稀释气 H_2O 的体积。 $\varphi(O_2)$ 、 $\varphi(CO_2)$ 、 $\varphi(H_2O)$ 分别为 O_2 、 CO_2 及 H_2O 的体积分数。

2 反应动力学模型

本文基于 Aramco 2.0 详细反应机理, 采用路径敏感性分析(PSA)^[16]、生成速率分析(ROP)、反应路径分析以及解耦法^[17], 构建了天然气(0.9 甲烷/0.07 乙烷/0.03 丙烷, 体积分数)的简化反应机理。通过宽工况条件下试验与计算结果的分析表明, Aramco 2.0 机理可以较准确地预测甲烷、乙烷以及两者混合物的层流燃烧速度、氧化过程中主要组分浓度的变化趋势以及着火延迟时间。

首先, 删除 Aramco 2.0 机理中 C₄ 及以上反应机理, 对 C₀-C₃ 反应机理(包括 175 种组分、1080 个反应)进行路径敏感性分析, 获得重要组分及组分相关反应步; 然后, 通过 ROP 分析和反应路径分析, 补充或删除组分及其相关反应步, 得到初始简化反应机理; 最后, 基于解耦法将初始简化反应机理中 C₁-C₃ 反应机理与 H₂/CO 详细反应机理及 NO_x 简化反应机理进行耦合, 形成天然气的简化反应机理。

在路径敏感性分析中, 通过引入路径敏感性系数 P_{ij} , 来评估反应机理中组分的重要性。路径敏感性系数可通过式(10)计算:

$$P_{ij} = \frac{|Y_{i,j} - Y_j|}{\max(Y_{i,j}, Y_j)} \quad (10)$$

式中 Y_j 表示采用详细反应机理计算第 j 个简化目标的计算结果; $Y_{i,j}$ 表示采用从详细反应机理中删除第 i 种组分及该组分相关反应后计算第 j 个简化目标的计算结果。因此, P_{ij} 表示去除第 i 种组分及其相关反应步对第 j 个简化目标的影响大小, 该值越大表明删除该种组分对简化目标的影响越大。

为了考虑组分及其相关反应步对简化目标的综合影响, 采用平均指标 η 来评估组分的重要性, 如式(11)所示:

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij}}{n} \quad (11)$$

式中 j 为某一温度下的简化目标, n 为简化目标总数。

将组分按其平均指标从小到大排序, 然后从平均指标最小的组分及相关反应开始进行依次删除, 并采用删除该组分及其相关反应后的反应机理对简化目标进行计算, 当其对简化目标的预测

值超过详细反应机理对简化目标预测值的不确定度范围时, 该组分的 η 就确定为阈值 η^* , 只有满足 $\eta \geq \eta^*$ 的组分及其相关反应步才能保留。不确定度区间为 $(\bar{Y}_{ij} - \sigma, \bar{Y}_{ij} + \sigma)$, 式中 σ 的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{ij})^2}{n-1}} \quad n = 1, \dots, 175 \quad (12)$$

$\bar{Y}_{ij}$ 由式(13)计算:

$$\bar{Y}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}{n} \quad n = 1, \dots, 175 \quad (13)$$

式中 $\bar{Y}_{ij}$ 表示删除组分及相关反应后对简化目标预测值的平均值。

天然气详细反应机理的路径敏感性分析中, 有些组分较小, 但其对简化目标的影响较大。为了保证这些组分不被删除掉, 对天然气组成成分(甲烷、乙烷和丙烷)的化学反应过程进行生成速率(ROP)与反应路径分析。可知, 反应速率高的反应已包含在路径敏感性分析结果中。同时对丙烷氧化过程中部分重要组分进行生成速率分析。C₃H₈ 的主要消耗反应为 C₃H₈(+M) = CH₃+C₂H₅(+M), 在该反应中, C₃H₈ 主要向 CH₃ 和 C₂H₅ 转化。CH₃ 主要通过 CH₃+HO₂=CH₃O+OH、CH₃+O=CH₂O+H 以及 CH₃+OH(+M)=CH₃OH(+M)等 3 个反应转化为 CH₂O、CH₃O 和 CH₃OH。CH₃OH 通过脱氢反应转化为 CH₂OH 和 CH₃O, 并由 CH₃ 和 CH₃O₂ 与 OH 反应生成 CH₃OH。CH₃O₂ 主要通过反应 CH₃+O₂(+M)=CH₃O₂(+M)生成, 通过消耗反应生成 CH₃OH、CH₃O 和 CH₃O₂H。CH₃O₂H 主要通过反应 CH₃O₂H=CH₃O+OH 消耗, 通过反应 CH₃O₂+HO₂=CH₃O₂H+O₂ 生成, 表明 CH₃O₂H 与 OH 的生成及 CH₃O₂、HO₂ 的消耗密切相关。由 C₃H₈ 氧化过程中部分重要组分的生成速率分析可获得 C₃H₈ 转化为 CH₂O 的反应路径, 再基于各个重要组分的 ROP 分析结果生成完整的 C₃H₈ 转化为 CO₂ 的反应路径。

通过生成速率分析与反应路径分析, 在路径敏感性分析中获得的重要组分中删除 C₃H₄-A、C₃H₅O、HOCH₂O、C₃H₅-A、HOCHO、C₃H₆ 及相关反应, 另外添加 CH₃O₂、CH₃O₂H、C₂H₂ 及相关反应, 形成天然气的初始简化反应机理, 包括 22 种组分、150 个反应。采用解耦法, 耦合该天然气初始简化反应机理中的 C₁-C₃ 反应机理以及 H₂/CO

详细反应机理^[18]和 NO_x 简化反应机理^[19], 获得由 40 种组分和 189 个反应组成的天然气最终简化反应机理。

3 结果与分析

在定容弹中测量了当量比范围为 0.7~1.4, 温度分别为 300、350、400 K, 压力分别为 0.1、0.2、0.3 MPa, O₂ 体积分数分别为 15%、18%、21%, CO₂ 体积分数分别为 0%、10%、20%, H₂O 体积分数分别为 0%、10%、20% 条件下天然气(0.9 甲烷/

0.07 乙烷/0.03 丙烷, 摩尔分数)层流燃烧过程中的火焰发展特性以及层流燃烧速度, 试验工况如表 1 所示。同时, 分别采用 Aramco 2.0 机理和新构建的天然气简化反应机理, 对层流燃烧速度进行数值计算, 并与试验数据进行了对比分析。

图 3~图 8 显示了不同工况下天然气层流燃烧时火核形成及火焰扩展的过程。火焰图片下方标注的时间表示从电极点火到火焰半径分别 7、37 mm 及 60 mm 时所历经的时间。

图 3 与图 5 分别显示了不同当量比与初始

表 1 试验工况
Table 1 Experiment conditions

工况	当量比	初始压力/MPa	初始温度/K	体积分数/%		
				O ₂	CO ₂	H ₂ O
1	0.7~1.4	0.1	350	21	0	0
		0.2				
		0.3				
2	0.7~1.4	0.1	300	21	0	0
			400			
3	0.7~1.4	0.1	400	15	0	0
				18		
4	0.7~1.4	0.1	400	18.9	10	0
				16.8	20	
5	0.7~1.4	0.1	400	18.9	0	10
				16.8		20

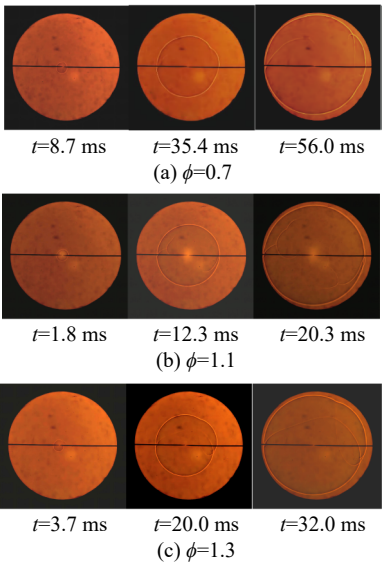


图 3 当量比对天然气层流火焰发展的影响
($p=0.1$ MPa, $T=350$ K)
Fig. 3 Effect of equivalent ratio on the laminar flame development of natural gas ($p=0.1$ MPa, $T=350$ K)

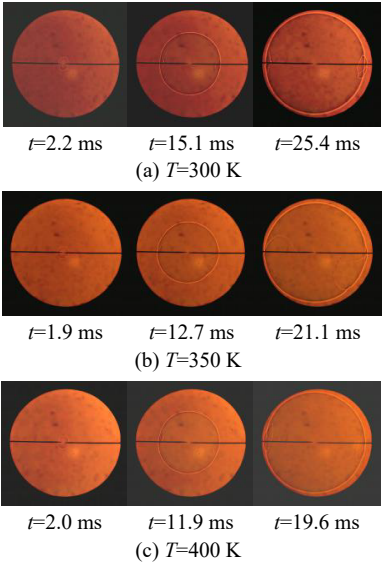


图 4 初始温度对天然气层流火焰发展的影响
($p=0.1$ MPa, $\phi=1.0$)
Fig. 4 Effect of initial temperature on the laminar flame development of natural gas ($p=0.1$ MPa, $\phi=1.0$)

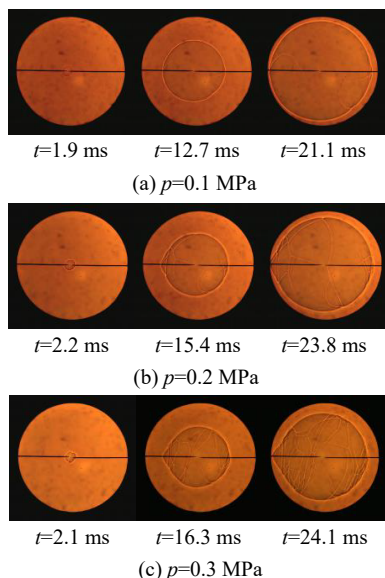


图 5 初始压力对天然气层流火焰发展的影响
($T=350\text{ K}$, $\phi=1.0$)

Fig. 5 Effect of initial pressure on the laminar flame development of natural gas ($T=350\text{ K}$, $\phi=1.0$)

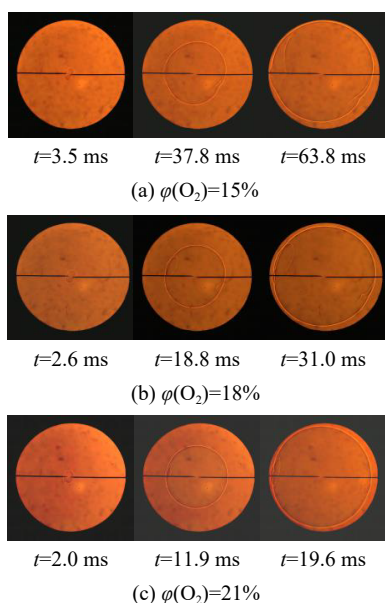


图 6 O_2 体积分数对天然气层流火焰发展的影响
($p=0.1\text{ MPa}$, $T=400\text{ K}$, $\phi=1.0$)

Fig. 6 Effect of the content of O_2 on the laminar flame development of natural gas ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=400\text{ K}$, $\phi=1.0$)

压力下天然气层流火焰的发展特性。在当量比(ϕ)或压力(p)较低时,点火成功后球形火焰锋面形成于容弹中心,随后向壁面扩散,火焰在发展过程中前锋面一直较为光滑。但当量比或压力较高时,火焰前锋面随着时间推移变得不再光滑,开始出现裂纹或胞状结构,且火焰半径越大该现象越明显。从图 5 可以看出,当压力升高

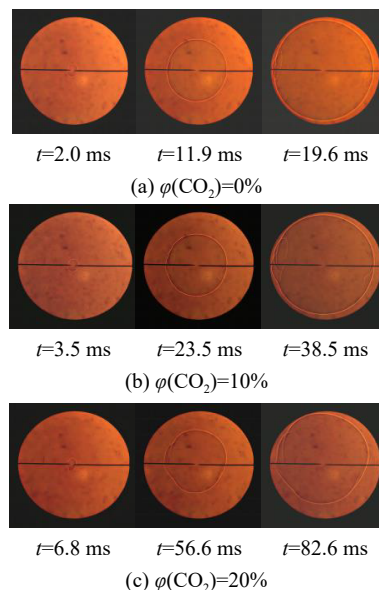


图 7 CO_2 体积分数对天然气层流火焰发展的影响
($p=0.1\text{ MPa}$, $T=400\text{ K}$, $\phi=1.0$)

Fig. 7 Effect of the content of CO_2 on the laminar flame development of natural gas ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=400\text{ K}$, $\phi=1.0$)

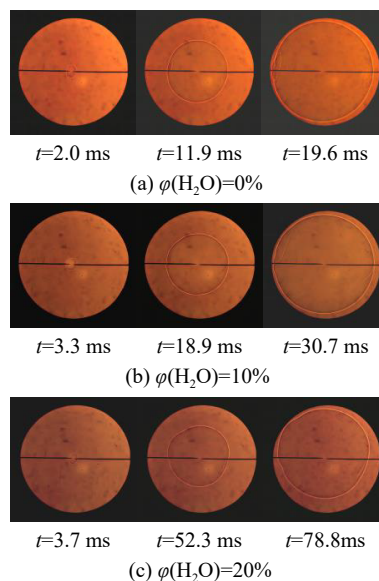


图 8 H_2O 体积分数对天然气层流火焰发展的影响
($p=0.1\text{ MPa}$, $T=400\text{ K}$, $\phi=1.0$)

Fig. 8 Effect of the content of H_2O on the laminar flame development of natural gas ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=400\text{ K}$, $\phi=1.0$)

到 0.3 MPa 时,在火焰发展末期,火焰前锋面左侧出现了大量裂纹和胞状结构,此时火焰已趋于不稳定。

图 4 显示了不同初始温度下天然气层流火焰的发展特性。由图可知,天然气预混层流火焰发展趋势受温度的影响不明显。主要原因是,火焰厚度和热膨胀系数受初始温度的影响显著。当初

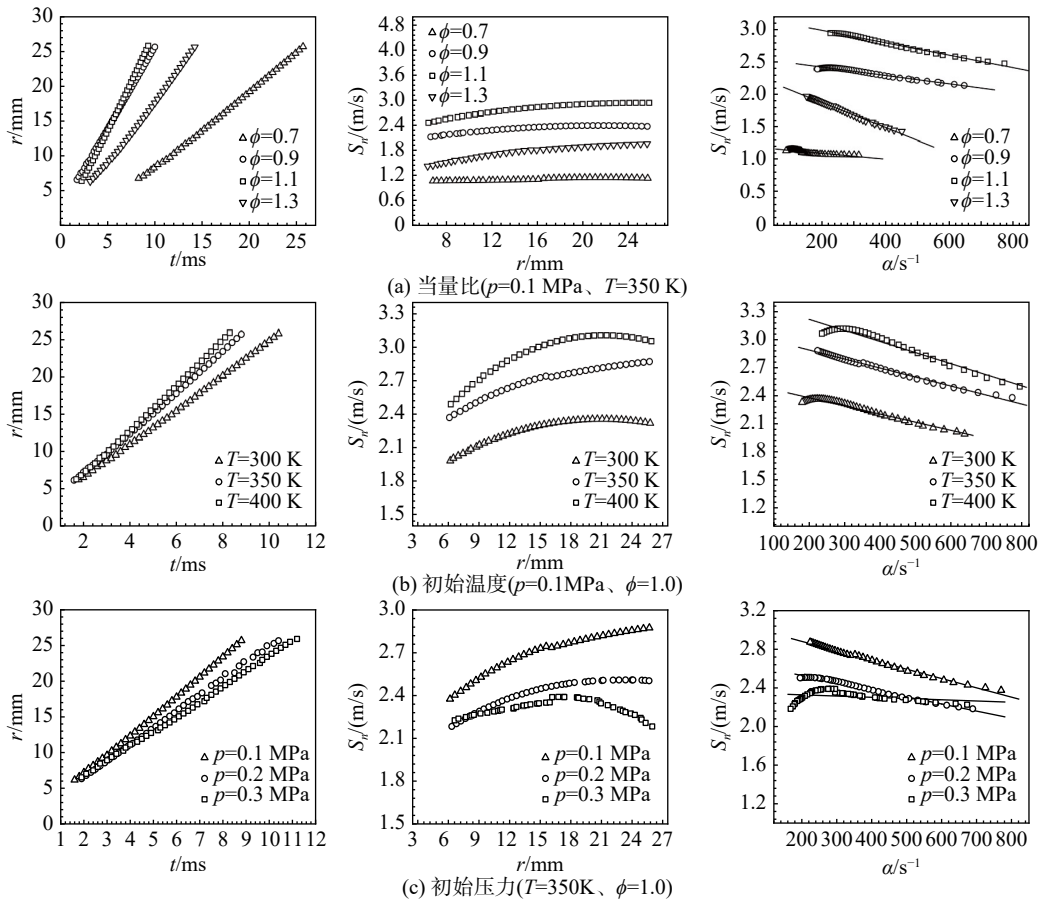
始温度升高时,两者会随之减小,而火焰稳定性随火焰厚度的减小而减弱、随热膨胀系数的减小而增强,它们的相互作用导致火焰发展特性受温度影响不显著。

图6显示了 O_2 体积分数对天然气预混层流火焰发展趋势的影响规律。当混合气中 O_2 体积分数下降时,在火焰发展早期,火焰锋面边缘就已经出现了凹陷,且随火焰向外扩展火焰前锋面裂纹越来越明显。该现象说明,随着混合气中 O_2 体积分数降低,天然气预混层流燃烧火焰不稳定性程度加剧。

图7与图8分别显示了当量比为1.0、初始温度为400 K、初始压力为0.1 MPa时,混合气中不同 CO_2 体积分数与 H_2O 体积分数下天然气预混层流火焰发展的趋势。从图可以看出, CO_2 或 H_2O 体积分数较高时,浮力不稳定性对火焰影响较为显著。浮力不稳定性现象是当火焰传播速度过慢时,火焰受到浮力的影响而向定容弹上端飘浮。当 CO_2 或 H_2O 体积分数为20%时,火焰发展早期已出现变形,且缓慢向定容弹顶部传播;在火焰发展末期,火焰前锋面已经出现上半球大下半球小的现象。

图9显示了不同工况下天然气预混层流燃烧过程中火焰半径随时间、拉伸火焰传播速度(S_n)随火焰半径及拉伸率(α)的变化趋势。从图9可以看出,在各工况下天然气预混层流燃烧火焰半径与时间呈线性增长关系,其增长速度随当量比的增加先变高后变低,当量比为1.1时达到峰值,说明当量比为1.1时拉伸火焰传播速度最大;随着初始温度、 O_2 体积分数的升高或初始压力、 CO_2 及 H_2O 体积分数的降低,直线斜率变大,说明拉伸火焰传播速度随之升高。主要原因是,当初始温度升高时,分子间距增大且运动剧烈,火焰会迅速传播;当 O_2 体积分数增加时,提高了燃烧过程的氧气浓度并促进燃料完全燃烧;当初始压力升高时,定容弹内混合气密度增大,分子间距减小,从而阻碍了火焰的发展; CO_2 与 H_2O 作为稀释气具有较高的比定压热容,因而吸热能力较强。混合气的平均比定压热容由于稀释气的添加得到增加,混合气的温度会降低,从而火焰传播速度会变慢。

图10显示了不同工况下天然气的层流燃烧速度(U_l)随当量比(ϕ)的变化趋势,在所有试验数据上都添加了 $\pm 5\%$ 误差线。从图可以看出,天然



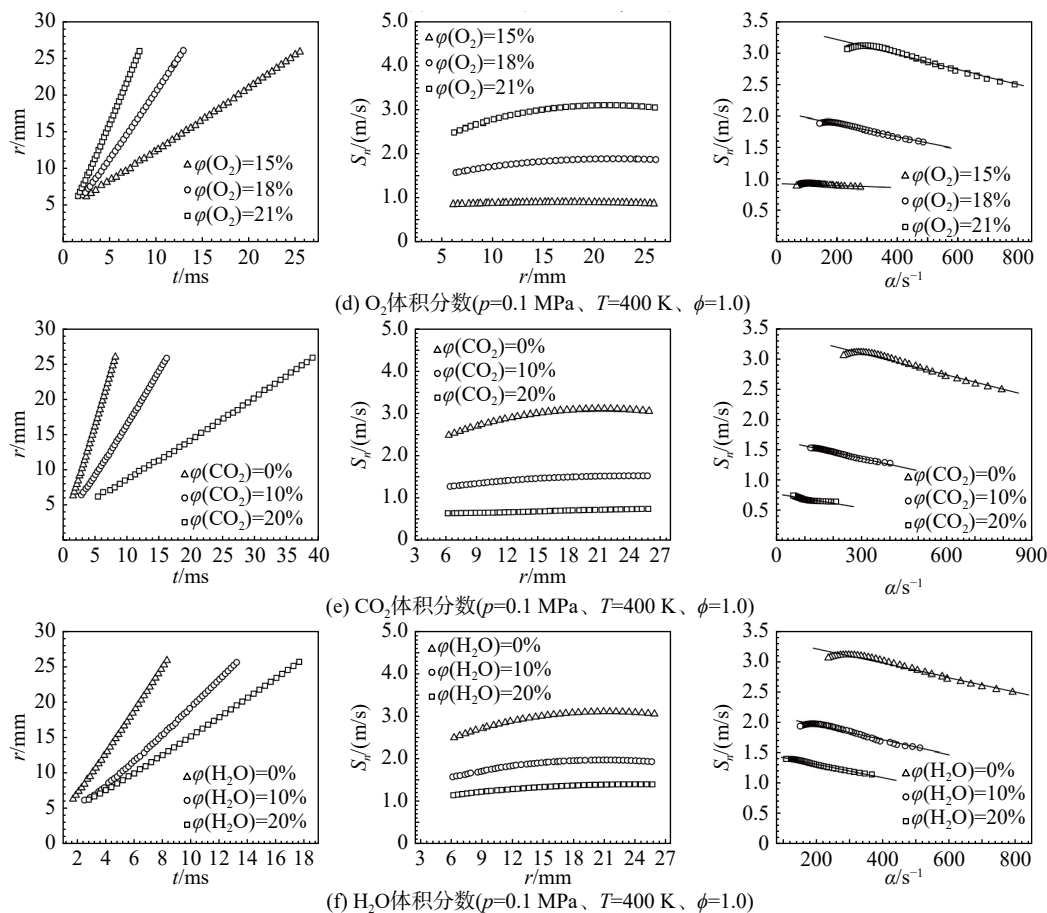


图 9 不同工况下天然气层流燃烧过程中的火焰发展特性

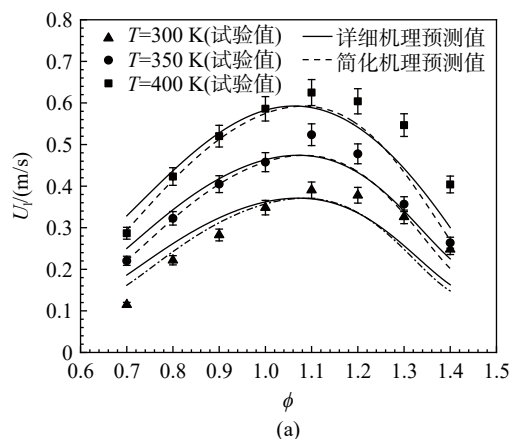
Fig. 9 Flame development characteristics in laminar combustion of natural gas at different working conditions

气的层流燃烧速度随着当量比由 0.7 提升至 1.4 时, 表现为先升高后降低的特征, 其峰值在当量比为 1.1 附近; 同时, 层流燃烧速度随着初始温度、 O_2 体积分数 O_2 体积分数的提升或初始压力、 CO_2 及 H_2O 体积分数的降低而增大。初始温度和压力的改变会影响混合气密度及分子的运动, 从而对火焰发展产生影响; 氧气浓度及稀释气比例的改变使混合气当量比或燃烧温度改变, 进而对混合气燃烧过程产生影响。添加 CO_2 或 H_2O 作为稀释气时, 随着稀释气比例增加, 天然气的层流燃烧速度逐渐降低, 即稀释气的添加对预混层流燃烧火焰的发展有抑制作用。综合分析说明, 混合气过浓或过稀都不利于火焰的传播, 升高温度或 O_2 体积分数、减小压力或稀释气比例有利于层流火焰的发展。

在不同工况下, 火焰半径增大, 拉伸火焰传播速度随之缓慢增大; 但是, 在当量比为 0.7、 O_2 体积分数为 15%、 CO_2 体积分数为 20% 时, 拉伸火焰传播速度基本不会随火焰半径改变而发生变化。拉伸火焰传播速度随拉伸率的提升而降低(压力

为 0.3 MPa 时除外), 说明马赫斯坦长度(直线斜率的相反数)均为正值, 火焰基本稳定, 不会发生熄火现象。

从图 10 可以看出, 在各工况条件下, 采用两种机理计算获得的天然气层流燃烧速度与试验值吻合良好, 但是在大部分工况下试验值略高于计算值。同时, 稀燃状态时(当量比小于 1.1), 值更为吻合; 但是在富燃状态时(当量比大于 1.1), 简化反应机理的预测精度要低于详



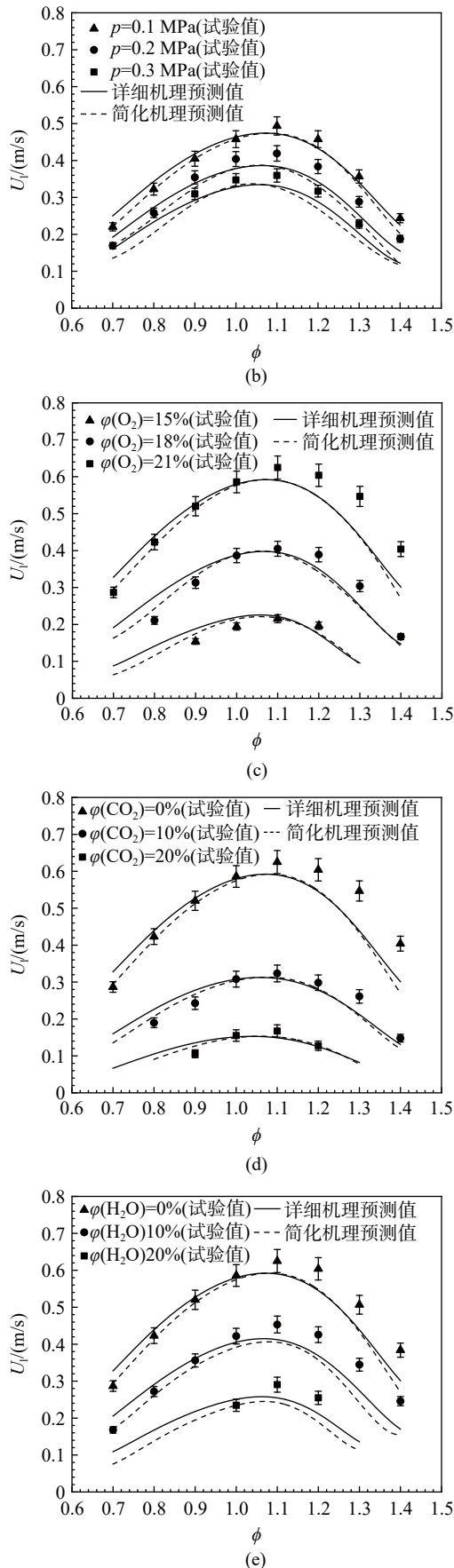


图 10 不同工况下天然气的层流燃烧速度

Fig. 10 Laminar combustion speeds of natural gas at different

细反应机理。

4 结 论

在定容弹中试验测试了不同初始压力、初始温度、当量比、 O_2 体积分数、 CO_2 与 H_2O 体积分数条件下天然气层流火焰的发展特性和层流燃烧速度; 同时构建了天然气的简化反应机理, 对层流燃烧速度进行了数值计算, 并与试验值进行了对比研究, 结论如下:

1) 天然气的预混层流燃烧速度随着当量比由 0.7 提升至 1.4, 呈现先上升后下降的变化, 峰值在当量比 1.1 附近; 层流燃烧速度随初始温度、 O_2 体积分数的增加或初始压力、 CO_2 及 H_2O 体积分数的减少而上升。

2) 天然气的简化反应机理由 40 种组分和 189 个反应组成。

3) 天然气的简化反应机理可以较准确地预测层流燃烧速度随当量比变化的整体趋势; 但是, 部分工况下预测值略低于试验值。

参考文献:

- [1] 尉曙明, 索建秦. 航空衍生工业燃气轮机双燃料贫燃预混低污染燃烧技术[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(9): 2049-2057. WEI Shuming, SUO Jianqin. Aero-derivative industrial gas turbine dual fuel lean premixed low emission combustion technology[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(9): 2049-2057. (in Chinese)
- [2] BULAT G, JONES W P, MARQUIS A J. NO and CO formation in an industrial gas-turbine combustion chamber using LES with the Eulerian sub-grid PDF method[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(7): 1804-1825.
- [3] DE ALMEIDA D S, LACAVA P T. Analysis of pollutant emissions in double-stage swirl chamber for gas turbine application[J]. *Energy Procedia*, 2015, 66: 117-120.
- [4] LYRA S, CANT R S. Analysis of high pressure premixed flames using Equivalent Reactor Networks for predicting NOx emissions[J]. *Fuel*, 2013, 107: 261-268.
- [5] STARIK A M, KOZLOV V E, LEBEDEV A B, et al. Application of reactor net models for the simulation of gas-turbine combustor emissions[J]. *International Journal of Sustainable Aviation*, 2014, 1(1): 43-57.
- [6] KUMAR K, SUNG C J, HUI Xin. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels[J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1004-1011.
- [7] BOSSCHAART K J, DE GOEY L P H. The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 136(3): 261-269.
- [8] WANG Shuangfeng, ZHANG Hai, JAROSINSKI J, et al. Laminar burning velocities and Markstein lengths of premixed methane/air flames near the lean flammability limit in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(4): 667-675.
- [9] 汤成龙, 张旭辉, 司占博, 等. 甲烷/乙烷-空气预混层流燃

- 烧特性试验和数值模拟研究[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(1): 83-88.
- TANG Chenglong, ZHANG Xuhui, SI Zhanbo, et al. Experimental and numerical investigation on the laminar flame characteristics of $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ -air mixture[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(1): 83-88. (in Chinese)
- [10] 曾文, 刘靖, 马洪安, 等. 氮气稀释气对天然气燃烧特性的影响[J]. *热科学与技术*, 2019, 18(3): 219-227.
- ZENG Wen, LIU Jing, MA Hongan, et al. Effects of nitrogen diluent gas on the combustion characteristics of natural gas[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2019, 18(3): 219-227. (in Chinese)
- [11] 宋占锋, 张欣, 胡尚飞, 等. CO_2 稀释对天然气掺氢预混层流火焰燃烧特性的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2016, 22(5): 408-412.
- SONG Zhanfeng, ZHANG Xin, HU Shangfei, et al. Effect of CO_2 diluent gas on combustion characteristic of laminar flame of pre-mixed hydrogen enriched natural gas and air mixtures[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(5): 408-412. (in Chinese)
- [12] TANG Chenglong, ZHANG Shuang, SI Zhanbo, et al. High methane natural gas/air explosion characteristics in confined vessel [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 278: 520-528.
- [13] LIAO S Y, JIANG D M, GAO J, et al. Measurements of markstein numbers and laminar burning velocities for natural gas-air mixtures[J]. *Energy & Fuels*, 2004, 18(2): 316-326.
- [14] LIU Yu, LUO Rui, SUN Zhen, et al. Experimental study on the Markstein length and laminar burning velocity of $\text{CH}_4/\text{RP-3}$ mixture[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(11): 5527-5537.
- [15] ZENG Wen, LIU Jing, LIU Yu, et al. The effect of hydrogen addition on the combustion characteristics of RP-3 kerosene/air premixed flames[J]. *Energies*, 2017, 10(8): 1107.1-1107.12.
- [16] CHANG Yachao, JIA Ming, NIU Bo, et al. Reduction of large-scale chemical mechanisms using global sensitivity analysis on reaction class/sub-mechanism[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 355-366.
- [17] CHANG Yachao, JIA Ming, FAN Weiwei, et al. Decoupling methodology: an effective way for the development of reduced and skeletal mechanisms[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2016, 32(9): 2209-2215.
- [18] BURKE U, METCALFE W K, BURKE S M, et al. A detailed chemical kinetic modeling, ignition delay time and jet-stirred reactor study of methanol oxidation[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 165: 125-136.
- [19] HUANG Haozhong, LÜ Delin, ZHU Jizhen, et al. Development of a new reduced diesel/natural gas mechanism for dual-fuel engine combustion and emission prediction[J]. *Fuel*, 2019, 236: 30-42.

(编辑: 张 雪)