掺氢乙醇预混燃料火焰不稳定性研究

朱 源，姜根柱，王筱蓉，苏傲成，陆皓炜
（江苏科技大学 机械工程学院，江苏 镇江 212003）

摘 要：文章研究了初始压力(P_0)和当量比(Φ)对掺氢乙醇预混燃料火焰不稳定性的影响。结果表明：增大 Φ 或 P_0 会加剧火焰的表面裂纹与细胞化程度，从而增强火焰不稳定性，其中 P_0 对火焰不稳定性的影响更显著；从流体动力学不稳定性(HDI)和热扩散不稳定性(TDI)两个方面对火焰不稳定性进行综合评估，发现增大 P_0，HDI 增强，但 TDI 受 P_0 的影响不大；此外，在实验工况下，有效 Lewis 数均大于 1，热扩散效应始终在抑制火焰的不稳定性，因此，导致火焰不稳定的原因是流体动力学效应；利用线性稳定性理论模型确定了预混火焰发生不稳定的临界条件，发现增大 Φ 或 P_0，火焰失稳的临界半径减小，火焰不稳定性得到促进。

关键词：火焰不稳定性；流体动力学不稳定性；热扩散不稳定性；临界条件
中图分类号：TK401 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)11-1428-07

0 引言

温室气体排放和全球气候变暖已经成为世界各国需要面对的紧迫问题。因此，寻找更加环保和可持续的能源替代品以及减少 CO_2 排放、实现燃料清洁燃烧成为当前许多研究的焦点。作为一种清洁的可再生能源，乙醇在减少温室气体排放和替代传统石油燃料方面展现出巨大的潜力[1]。由于乙醇具有较高的辛烷值，因此可以降低发动机爆震并提高发动机性能。但是，乙醇的高汽化潜热易导致纯乙醇发动机在冷启动和怠速条件下的性能下降[2]。相比之下，氢气作为“零碳”能源，因其高热值、宽可燃极限和高清洁度，而倍受关注[3]。有研究表明，在乙醇中加入氢气可以在一定程度上改善燃烧性能[4]。

由于不稳定和细胞化的火焰会导致火焰的自加速和湍流，因此，固有的火焰不稳定性会直接影响燃烧装置的效率和输出功率[5]。此外，不稳定的火焰可能迅速提高燃烧过程的温度和压力，从而导致爆炸和燃烧污染物的生成。因此，有必要研究预混燃料燃烧时的火焰不稳定性。目前，诸多学者对掺氢燃料燃烧时的火焰不稳定性进行了研究。Li Y[6]研究了氢气含量对甲烷-空气预混火焰不稳定性的影响，结果表明，氢气的加入增强了火焰热扩散不稳定性（Thermal Diffusion Instability，TDI）和流体动力学不稳定性（Hydrodynamic Instability，HDI）。Wu H[7]研究了氢气含量对甲醇球形扩散火焰不稳定性的影响，结果表明，对于贫混合物，加氢对火焰不稳定性的促进作用更明显。Liang C[8]通过实验和理论分析，探究了氢气含量、初始压力和当量比对乙酸乙酯-空气火焰不稳定性的影响，结果表明：初始压力的增加促进了火焰不稳定性；相比之下，氢气含量对火焰不稳定性的影响较小，而当量比是影响火焰不稳定性的主要因素。Hu X[9]研究了氢气含量对氨-空气火焰不稳定性的影响，结果表明，氢气含量增加导致的火焰稳定性减弱主要归因于其增强了 HDI。目前，关于火焰不稳定性的研究主要集中在 TDI 和 HDI 等宏观因素上，对于这些不稳定性内在影响机制的揭示尚不深入。此外，关于氢气-乙醇-空气预混燃料火焰不稳定性的研究较少，相关研究体系尚未完全构建。因此，作为未来发动机的替代燃料，深入揭示掺氢乙醇燃料火焰不稳定性的内在影响机制是十分必要的。

本文基于定容燃烧弹系统，结合高速纹影技术，在初始温度为 450 K，掺氢比例为 20%的工况下，探究了初始压力(P_0)和当量比(Φ)对掺氢乙醇燃料火焰不稳定性的影响。在不稳定性参数的基础上，引入线性稳定性理论，对比分析了不同初

收稿日期：2024-04-26。
基金项目：国家自然科学基金国际青年科学家基金(52350410458)。
通信作者：姜根柱(1979-)，男，博士，高级实验师，主要从事清洁燃料燃烧蒸发和燃烧特性的研究。E-mail：jianggenzhu2just@163.com

始条件对火焰不稳定性的影响并预测了火焰不稳定性发生的临界状态(临界半径)。研究结果可为掺氢乙醇预混燃料在实际燃烧装置中的应用提供一定的理论指导。

1　实验装置与数据处理

1.1　实验装置

图 1 为实验装置示意图。实验装置由定容燃烧弹(CVCB)、气体排放与供应系统、温度控制系统,点火系统和纹影成像系统组成。CVCB 是容积为 2.067 L 的立方体结构，采用壁面电阻加热的方式,通过 K 型热电偶(精度为±0.75%)、PID 控制器和温度显示器来控制和监测实验所需温度。实验过程中,CVCB 内部温差维持在±2 K。两根位于 CVCB 中心的铂电极(直径为 0.4 mm)以 15 mJ 的能量点燃燃料。使用高精度压力计(精度为 0.1 kPa)、压力传感器(精度为±0.05%)来监测实验初始时的压力和燃烧瞬间产生的爆炸压力。同时,采用高速摄像机记录火焰燃烧时的图像。在实验中,使用微型注射器将乙醇注入弹体，设置注入燃料的蒸发时间为 5 min（由于乙醇的沸点为 351.15 K,而实验设定温度为 450 K,所以乙醇可由液态转为气态),并与压缩空气(N_2 和 O_2 的体积比为 79:21)混合。为了确保燃料的充分混合,点燃前,保证燃料与气体充分混合 3 min。每组实验完成后,使用抽气泵来清洁 CVCB 燃烧后残余气体。此外,为了确保实验的可重复性和实验结果的准确性,每组工况进行 3 次重复实验,结果取平均值。

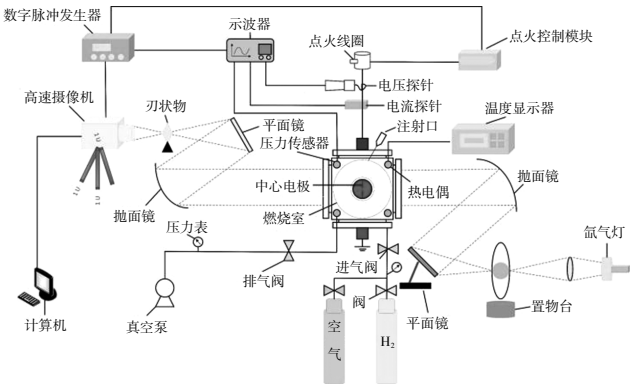


图 1　实验装置示意图

Fig.1 Experimental device diagram

在氢气/乙醇预混燃料中,定义掺氢比 $X(H_2)$ 为

$$X(H_2)=\frac{\varphi_2}{\varphi_2+\varphi_1}\times 100\% \qquad (1)$$

式中:φ_1,φ_2 分别为 C_2H_5OH 和 H_2 的体积分数,%。

在本文中,$X(H_2)=\varphi_2$,选择 $X(H_2)$=20%为典型的燃料配比进行研究。

式(2)给出了当量比 Φ 的定义。

$$\Phi=(F/A)/(F/A)_{st} \qquad (2)$$

式中:F/A 和$(F/A)_{st}$分别为燃料空气比和化学计量燃料空气比。

本文定义:Φ<1 为贫混合物,Φ=1 为化学计量比,Φ>1 为富混合物。

1.2　数据处理

1.2.1　火焰不稳定性参数

HDI 与热膨胀率(σ)和火焰厚度(δ)密切相关。σ 越大,δ 越小,HDI 越强。σ 和 δ 的计算式分别为

$$\sigma=\rho_u/\rho_b \qquad (3)$$

$$\delta=(T_{ad}-T_u)/(\mathrm{d}T/\mathrm{d}x)_{max} \qquad (4)$$

式中:ρ_b 和 ρ_u 分别为已燃和未燃气体的密度,kg/m^3;T_{ad} 为绝热火焰温度,K;T_u 为初始温度,K;$(\mathrm{d}T/\mathrm{d}x)_{max}$ 为最大燃烧温度梯度。

TDI 是由气体混合物的导热性和反应物组分的不均匀扩散引起的[10],TDI 强度与有效 Lewis 数(Le_{eff})[11]直接关联,Le_{eff} 的计算式为

$$Le_{eff}=1+[(Le_E-1)+(Le_D-1)A]/(1+A) \qquad (5)$$

式中:Le_E 和 Le_D 分别为过量组分和不足组分的 Lewis 数(Le);$A=1+\beta(\varphi-1)$为混合强度,β 为 Zeldovich 数，表示化学反应过程中的活化能,φ 为过量和不足反应物相对于其化学计量比的质量比,对于富混合物,$\varphi=\Phi$,对于贫混合物,$\varphi=1/\Phi$。

对于本文使用的混合燃料（H_2 和 C_2H_5OH），根据 Muppala S P R[12]和 Lapalme D[13]的研究，可将 Le_{eff} 表示为

$$\frac{1}{Le_{eff}}=\sum\frac{\varphi_i}{Le_i}=\frac{\varphi_{H_2}}{Le_{eff\,H_2}}+\frac{\varphi_{C_2H_5OH}}{Le_{eff\,C_2H_5OH}} \quad (6)$$

式中：φ_i 为多燃料混合物中单一燃料的体积分数，%；Le_i 通过式(5)进行计算。

1.2.2 线性稳定性理论

线性稳定性理论同时考虑了火焰的 HDI 和 TDI[14]。扰动对数增长率(Σ)通过式(7)计算[15]。

$$\Sigma(n,Pe)=\omega-\Omega/Pe \quad (7)$$

式中：n 为波数；Pe 为 Peclet 数；ω 和 $-\Omega/Pe$ 分别代表火焰 HDI 和 TDI 主导的部分。

$$\omega=[-(b-a)+\sqrt{(b-a)^2-4ac}\,]/2a \quad (8)$$

$$\Omega=Q_1+Q_2\beta(Le_{eff}-1)/(\sigma-1)+PrQ_3 \quad (9)$$

式中：a,b 和 c 取决于 n 和 σ；Pr 为 Prandtl 数；Q_1,Q_2,Q_3 分别为热扩散系数、分子扩散系数和黏度扩散系数，其详细的计算方法可见文献[16]。

图 2 给出了典型的氢气-乙醇稳定性曲线。图 2 中标记了火焰稳定(Σ<0)和不稳定(Σ>0)的区域，曲线的上、下分支分别代表细胞的最小和最大波长，上分支受到 Le_{eff} 和混合物组分的影响；而下分支取决于 σ 的流体动力学效应。

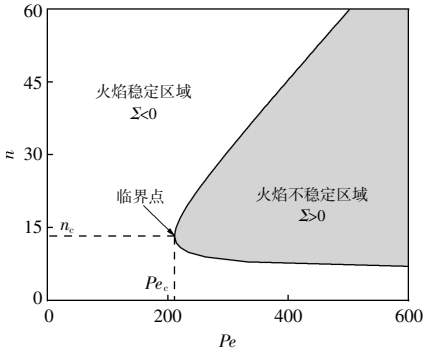


图 2 线性稳定性曲线示意图

Fig.2 Schematic diagram of linear stability curve

1.3 数据验证

为了验证机理和结果的可靠性，将在 450 K，0.1 MPa 下测得的纯乙醇的层流燃烧速度与文献[17-19] 的数据以及 Chemkin-Pro 模拟数据进行对比，结果如图 3 所示。

本文使用的机理整合了文献[20]的乙醇氧化还原机理与四川大学燃烧动力学中心抽取的氢气化学动力学机理。从图 3 可以看出，实验数据略低于仿真数据，但与文献中报道的数据基本一致。某些测量结果的差异可能是由于整合机理与实验结果后处理手段上的差异。总体而言，实验数据与仿真数据基本一致，因此，本文整合的机理以及获得的结果是可靠的。

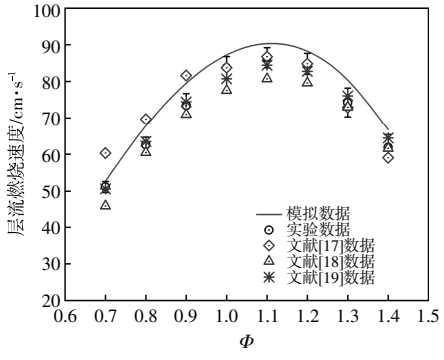


图 3 纯乙醇的层流燃烧速度比较

Fig.3 Comparison of laminar burning velocities of pure ethanol

2 结果与讨论

2.1 火焰形貌

不同当量比和初始压力下的火焰纹影图像如图 4 所示。

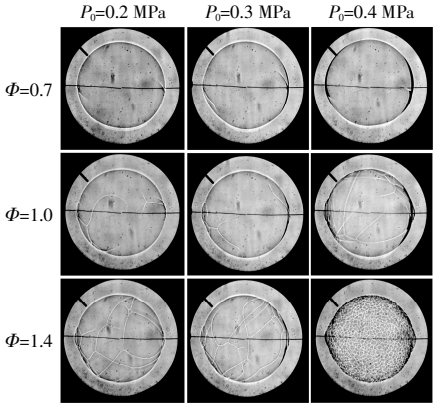


图 4 当量比和初始压力对火焰形貌的影响

Fig.4 Effect of equivalence ratio and initial pressure on flame morphology

Φ 为 0.7,1.0 和 1.4 分别代表典型的贫混合物、化学计量比和富混合物。观察火焰图像可以发现：在相同火焰半径下，富混合物表现出更强的不稳定性；对于贫混合物，除了由于点火扰动引起的较大裂纹外，火焰前沿基本保持光滑，并未观察到 P_0 变化对火焰形貌带来的明显改变；增加 Φ，火焰前锋细胞、褶皱增多，在 P_0=0.4 MPa 时尤为显著。相较于 Φ 的影响，P_0 变化对化学计量比和富混合物火焰形貌的影响更为显著，火焰不稳定性

明显增强。

2.2　当量比和初始压力对火焰不稳定性的影响

2.2.1　流体动力学不稳定性

掺氢乙醇燃料的热膨胀率和火焰厚度随当量比和初始压力的变化规律如图 5 所示。

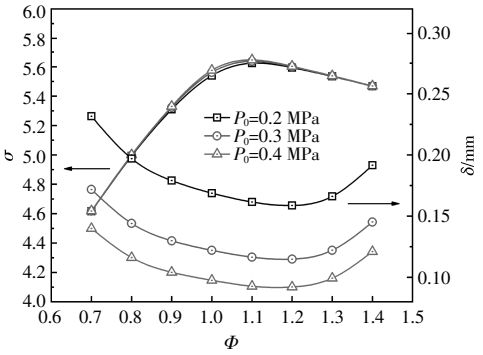


图 5　当量比和初始压力对热膨胀率和火焰厚度的影响

Fig.5 Influence of equivalence ratio and initial pressure on thermal expansion rate and flame thickness

从图 5 可以看出：随着 Φ 的增加，σ 呈现先增大后减小的趋势，在 $\Phi\approx1.1$ 时达到最大值；而 δ 则先减小，于 Φ=1.2 附近达到最小，随后增大。因此，HDI 先增加后降低，最大的 HDI 出现在靠近富混合物一侧（σ 最大，δ 最小）。此外，增大 P_0，σ 仅是略微增大，δ 则是急剧减小，即火焰 HDI 增强。P_0 通过改变 δ 直接影响了 HDI。这可以从以下两个方面解释：首先，火焰前锋的拉伸效应可以抑制正曲率火焰的细胞发育，火焰越薄，曲率拉伸效应越弱，HDI 越强；其次，对于轻微起皱的火焰表面，δ 影响着由密度和压力梯度产生的斜压扭矩的强度梯度[3]，δ 的减小导致密度梯度增加。因此，由于斜压扭矩强度的增加，HDI 得以增强。

2.2.2　热扩散不稳定性

Lewis 数是表征预混火焰 TDI 的关键参数。当 Le>1 时，预混火焰将是热扩散稳定的，当 Le<1 时，预混火焰则是热扩散不稳定的。不同 P_0 下，氢气–乙醇–空气预混火焰的 Le_{eff} 随 Φ 的变化如图 6 所示。

从图 6 可以看出，对于固定 P_0 的氢气–乙醇–空气预混火焰，Le_{eff} 随着 Φ 的增加而减小，这说明混合物不均匀扩散的增加，因此，TDI 随 Φ 的增加而减小，而富混合物火焰比贫混合物火焰更不稳定，这意味着可以通过减小 Φ 来抑制火焰的 TDI。P_0 变化对 Le_{eff} 的影响并不明显。此外，所有

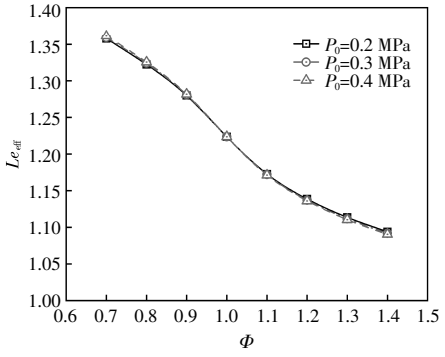


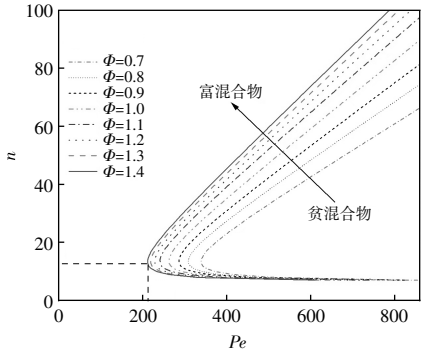
图 6　不同初始压力下有效 Lewis 数的变化情况

Fig.6 Changes of effective Lewis number under different initial pressure

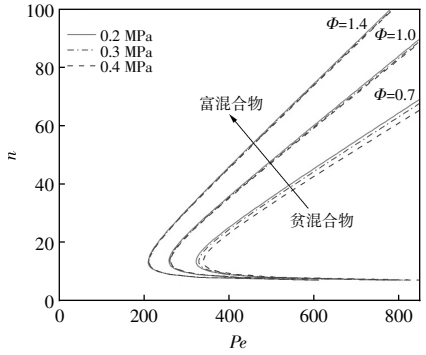
工况的 Le_{eff} 均大于 1，说明热扩散效应能够充分抑制火焰的 TDI，由此可得结论：本工况下预混火焰的不稳定性完全受到 HDI 的控制。

2.3　稳定性曲线与增长率

基于线性稳定性理论，进一步探讨 Φ 和 P_0 对火焰不稳定性的影响，结果如图 7 所示。



(a)不同当量比



(b)不同初始压力

图 7　当量比和初始压力对氢气–乙醇–空气预混火焰稳定性曲线的影响

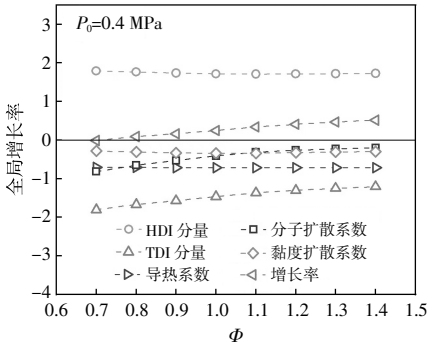
Fig.7 Influence of equivalence ratio and initial pressure on the stability curve of hydrogen–ethanol–air premixed flame

图 7 中的稳定性曲线是通过将式(8)设置为 0 得到的。半岛的前端是发生不稳定的临界点(临

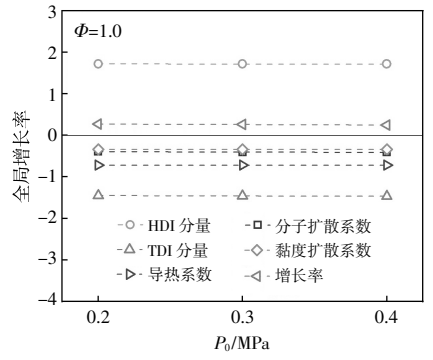
界波数 n_c,临界 Peclet 数 Pe_c)。当 $Pe>Pe_c$ 时,Σ 均大于 0,火焰表面细胞增长迅速,且出现褶皱,细胞化程度增强,火焰变得不稳定;当 $Pe<Pe_c$ 时,所有波数下的 Σ 均小于 0,火焰的拉伸和热扩散效应对火焰不稳定性的抑制作用增强,此时火焰趋于稳定。

从图 7 可以看出:不同工况的稳定性曲线的下分支几乎重合,这是因为它们的 σ 非常接近;火焰不稳定区域随 Φ 的增加而扩大,这是因为更高的 Φ 会导致不均匀扩散的增加,这与图 4 所展现的规律相同;P_0 变化对化学计量比和富混合物稳定性曲线几乎无影响,对贫混合物稳定性曲线存在较小影响,这是由于 P_0 的增加同时作用于燃料对流传输与扩散传输,最终导致 Pe_c 对 P_0 变化不敏感。

由于预混火焰的不稳定性受到 HDI 和 TDI 的综合影响,如果要阐明哪一个占主导地位以及各部分是如何作用的,仍须要进一步分析。临界条件(n=13.9,Pe=400)下得到的火焰不稳定性参数的全局增长率随 Φ 和 P_0 的变化如图 8 所示。



(a)不同当量比



(b)不同初始压力

图 8 火焰不稳定性参数的全局增长率随 Φ 和 P_0 的变化

Fig.8 Changes of global growth rate of flame instability parameters with Φ and P_0

由式(8)可知,HDI 部分(ω)和 TDI 部分($-\Omega/Pe$)对 Σ 起决定作用,而后者又受到热传导($-Q_1/Pe$)、分子扩散[$-Pe^{-1}\beta(Le_{eff}-1)Q_2/(\sigma-1)$]以及黏度扩散($-Pe^{-1}PrQ_3$)综合作用的影响[15]。当 ω 的贡献大于($-\Omega/Pe$)时,Σ>0,火焰不稳定,反之,则火焰稳定。

从图 8 可以看出,临界时刻发生在 Φ=0.71 附近,Σ 完成了从负值到正值的转变,火焰开始表现出不稳定性。HDI 分量受 Φ 增加的影响不大,并且恒为正值,说明 HDI 总是促进火焰失稳,而 TDI 分量的变化趋势与 Σ 相同并且总为负值,这说明 TDI 总在稳固火焰。同时,无论 Φ 和 P_0 如何变化,($-Q_1/Pe$),[$-Pe^{-1}\beta(Le_{eff}-1)Q_2/(\sigma-1)$]和($-Pe^{-1}PrQ_3$)的系数均小于 0,抑制了火焰不稳定性的发展。虽然 Φ 很大程度影响了火焰的分子扩散,有着促进火焰不稳定性的趋势,但其值始终为负,最终,仍能稳定火焰。因此,分子扩散系数对于 Φ 的改变很敏感,对于 P_0 的变化并不敏感,其对应的稳定性贡献项虽存在增强火焰不稳定性的倾向,但由于其值始终小于 0,所以并未表现出促进不稳定性的作用。从贫混合物到富混合物,火焰不稳定性的增强是由于热扩散效应对火焰的稳定作用减弱导致的。此外,ω 取决于混合物的 σ,其对 P_0 变化不敏感,Σ 随 P_0 的增加略有下降,这是因为混合物中的分子和热扩散系数均随着 P_0 的增加而降低。综上所述,HDI 始终促进火焰失稳,而 TDI 总是稳固火焰。

2.4 火焰不稳定发生时的临界条件

临界 Peclet 数和理论临界半径(R_c)是用来定义和量化火焰的不稳定性和细胞性的重要参数,可预测不稳定发生时的火焰尺寸[11]。$R_c=Pe_c\times\delta$,其大小表征了火焰开始出现不稳定的程度。从半岛曲线中提取的 Pe_c 曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出,随着 Φ 的增加,Pe_c 整体呈下降趋势,火焰失稳提前,随着 P_0 变化,Pe_c 只存在略微差异。

理论与实验临界半径随 Φ 和 P_0 的变化如图 10 所示。

从图 10 可以看出:随着 Φ 的增加,R_c 呈现出先减小后增大的变化趋势,这是火焰厚度变化引起的;随着 P_0 的增加,临界半径显著减小,这表明,在更高的 P_0 下,不稳定性更有可能发生。虽然

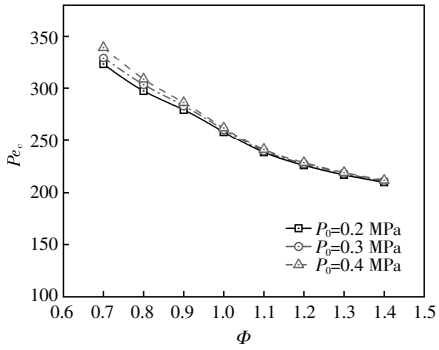


图 9　初始压力对临界 Peclet 数的影响

Fig.9 Influence of initial pressure on critical Peclet number

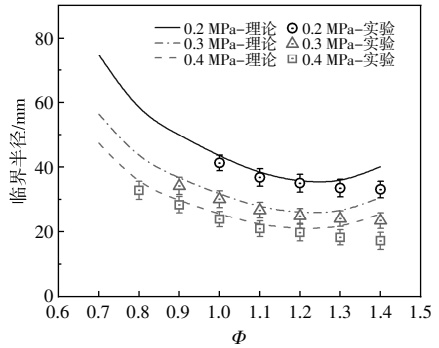


图 10　氢气–乙醇–空气预混火焰的理论与实验临界半径

Fig.10 Theoretical and experimental critical radius of hydrogen–ethanol–air premixed flame

理论与实验临界半径存在一定差异（理论临界半径是非单调变化，而实验临界半径是单调下降的),但是这种差异是可以接受的。产生这种差异的原因:一是对于理论临界半径而言,Le_{eff} 比 σ 和 δ 的影响更小，因此理论临界半径在 Φ=1.2 后增大;二是因为火焰的不均匀扩散,导致实验临界半径减小。实验临界半径低估了 Φ=1.4 的原因有如下几个方面:①在理论分析中,热扩散率的获取可能因化学反应机制而产生差异；②理论计算并未考虑热辐射的影响；③线性稳定性理论方程是基于渐近分析建立的,这是一种近似方法,会引入理论误差,因此,无法准确预测理论临界半径。

3　结论

本文从实验和理论上研究了掺氢乙醇预混燃料球形膨胀火焰的不稳定性,得出如下结论。

①与当量比相比，初始压力增加更容易导致火焰失稳。初始压力变化是通过改变火焰厚度影响流体动力学不稳定性，进而影响火焰的不稳定性。此外,本文中的有效 Lewis 数均大于 1,说明热扩散效应在所有工况下都在稳定火焰。

②流体动力学效应始终在破坏火焰的稳定性,促进火焰细胞化结构的产生,而热扩散效应始终起到稳固火焰的作用。从贫混合物到富混合物,火焰不稳定性的增强是由于热扩散效应对火焰的稳定作用减弱导致的。

③增大初始压力,临界半径显著减小,说明火焰在更高的初始压力下将更早地出现不稳定性。最小理论临界半径出现在当量比为 1.2 时，实验临界半径与理论临界半径基本一致，但低估了当量比为 1.4 时的临界半径。

参考文献:

[1] 刘说,刘晓旭,寇巍,等.甲醇同系化制乙醇热力学研究[J].可再生能源,2022,40(3):307–312.

[2] Ji C,Liu X,Wang S,et al. A laminar burning velocity correlation for combustion simulation of hydrogen – enriched ethanol engines [J].Fuel,2014,133:139–142.

[3] 张振扬,解辉.液氢的制、储、运技术现状及分析[J].可再生能源,2023,41(3):298–305.

[4] Zhen X,Li X,Wang Y,et al. Comparative study on combustion and emission characteristics of methanol/hydrogen, ethanol/hydrogen and methane/hydrogen blends in high compression ratio SI engine [J].Fuel, 2020,267:117193.

[5] Matsugi A,Terashima H. Diffusive –thermal effect on local chemical structures in premixed hydrogen –air flames [J].Combustion and Flame,2017,179:238–241.

[6] Li Y,Bi M,Li B,et al. Effects of hydrogen and initial pressure on flame characteristics and explosion pressure of methane/hydrogen fuels [J].Fuel,2018,233:269–282.

[7] Wu H,Zheng J,Dong X,et al. Investigations on the cellular instabilities of expanding hydrogen/methanol spherical flame [J].International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(67):33601–33615.

[8] Liang C,Li X,Xu C,et al. Hydrogen addition effect on cellularization and intrinsic instability of ethyl acetate spherical expanding flame [J].International Journal of Hydrogen Energy,2024,49:222–239.

[9] Hu X,Luo C,Chen X,et al. Study on flame propagation and inherent instability of hydrogen/ammonia/air mixture [J].Fuel,2024,357:129848.

[10] Lowry W B,Serinyel Z,Krejci M C,et al. Effect of methane–dimethyl ether fuel blends on flame stability, laminar flame speed and Markstein length [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2011,33(1): 929–937.

[11] Xu C,Liu W,Oppong F,et al. Investigations on cellularization instability of 2-ethylfuran[J].Renewable Energy,2022,191:447-458.
[12] Muppala S P R, Nakahara N K, Aluri N K, et al. Experimental and analytical investigation of the turbulent burning velocity of two-component fuel mixtures of hydrogen,methane and propane [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2009,34(22):9258-9265.
[13] Lapalme D,Lemaire R,Seers P. Assessment of the method for calculating the Lewis number of H_2/CO/CH_4 mixtures and comparison with experimental results[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2017,42(12):8314-8328.
[14] Addabbo R,Bechtold J K,Matalon M. Wrinkling of spherically expanding flames [J].Proceedings of the Combustion Institute,2002,29(2):1527-1535.
[15] Li Y,Jiang Y,Xu W,et al. Laminar burning velocity and cellular instability of 2-butanone-air flames at elevated pressures [J].Fuel,2022,316:123390.
[16] Bao Y,Li X,Xu C,et al. Experimental and theoretical study of 2-ethylfuran spherical expanding flame: Cellularization, intrinsic instability and self-acceleration [J].Fuel Processing Technology,2022,238:107521.
[17] Yang Q,Liu Z,Hou X,et al. Measurements of laminar flame speeds and flame instability analysis of E30-air premixed flames at elevated temperatures and pressures [J].Fuel,2020,259:116223.
[18] Liu Y,Gu W,Wang J,et al. Study on the laminar burning velocity of ethanol/RP-3 aviation kerosene premixed flame [J]. Combustion and Flame,2022,238:111921.
[19] Zhou J,Lu C,Xu C,et al. Experimental and numerical study on the effect of hydrogen addition on laminar burning velocity of ethanol-Air mixtures[J].Energies,2022,15(9):3114.
[20] Mittal G,Burke S M,Davies V A,et al. Autoignition of ethanol in a rapid compression machine [J]. Combustion and Flame,2014,161(5):1164-1171.

Study on flame instability of hydrogen-added ethanol premixed fuel

Zhu Yuan, Jiang Genzhu, Wang Xiaorong, Su Aocheng, Lu Haowei
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Based on the constant volume combustion bomb combined with the high-speed schlieren system, the effects of initial temperature of 450 K, initial pressures and equivalence ratios on the flame instability of hydrogen-added ethanol premixed fuel were studied. The results show that the increase of Φ or P_0 enhances crack and cellularity on the flame surface, and the flame instability is enhanced, and the effect of P_0 on the flame instability is more significant. The flame instability was comprehensively evaluated from the aspects of hydrodynamic instability(HDI) and thermal diffusion instability (TDI), and it was found that the increase of P_0 increased the hydrodynamic instability, but the thermal diffusion instability was not greatly affected by P_0. In addition, under the experimental conditions, the effective Lewis number is greater than 1, and the thermal diffusion effect always suppresses the instability of the flame, so flame instability is primarily driven by the hydrodynamic effect, which can be further verified by evaluating the global growth rate of each instability parameter. Finally, the linear stability theory model was used to determine the critical condition for the instability of the premixed flame, and it was found that the critical radius of flame instability decreases and the flame instability is promoted with the increase of Φ or P_0.

Keywords: flame instability; HDI; TDI; critical conditions