

掺氢天然气可燃极限动力学特性与机理研究

卢欣¹, 赵俊¹, 赵延芳¹, 亢银虎²

(1. 中石油天然气销售公司, 北京 100007; 2. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:基于火焰控制连续算法对掺氢天然气层流平面预混火焰传播极限进行了高精度的数值模拟,揭示了掺氢比对可燃极限的影响机制,并基于化学爆炸模式分析(CEMA)方法剖析可燃极限的形成机制及主导控制因素。结果表明:掺氢比例对贫燃传播极限的影响微弱,而在富燃极限处由于剩余氢气热解所产生的H基以及氢气的优先扩散效应拓宽了富燃区的可燃极限;氢气的优先扩散特性对甲烷传播极限的影响较弱,而氢气的化学特性对贫燃和富燃极限影响显著,并且对富燃极限的影响更大;氢气的化学特性主要在贫燃极限处起主导作用,而扩散特性主要在富燃极限处发挥主导作用;对于掺氢甲烷预混传播火焰,尽管预热区上游的燃料初始裂解反应放热微弱,但此区域内局部熄火模式控制火焰整体的稳定性,利用多孔介质燃烧器能够显著拓宽贫燃/富燃传播极限;对贫燃与富燃极限,导热是最重要的因素,其次是 N_2 (贫燃)与 H_2 (富燃)的扩散传输过程。

关键词:天然气;氢气;可燃极限;熄火;化学爆炸模式分析

中图分类号:TK4 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2025.05.009

[引用本文格式]卢欣,赵俊,赵延芳,等.掺氢天然气可燃极限动力学特性与机理研究[J].热能动力工程,2025,40(5):75-82. LU Xin, ZHAO Jun, ZHAO Yanfang, et al. Study on flammability limit dynamics and mechanism of hydrogen-blended natural gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5): 75-82.

Study on Flammability Limit Dynamics and Mechanism of Hydrogen-Blended Natural Gas

LU Xin¹, ZHAO Jun¹, ZHAO Yanfang¹, KANG Yinhu²

(1. PetroChina Natural Gas Marketing Company, Beijing, China, Post Code: 100007; 2. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education of China, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044)

Abstract: Based on "flame-controlling" continuous algorithm, a high precision numerical simulation of the propagation limit of hydrogen-blended natural gas laminar planar premixed flame was performed, revealing the impacting mechanism of hydrogen blending ratio on flammability. The chemical explosive mode analysis (CEMA) method was used to identify the flammability limit formation mechanism as well as the dominate control factor. Results show that the role of hydrogen blending ratio in the lean flammability limit is ignorable, while the rich flammability limit is broadened due to production of H radicals by residual hydrogen pyrolysis at rich flammability limit and hydrogen's preferential diffusion effect. In overall, the effect of hydrogen preferential diffusion characteristics on methane propagation limit is fairly weak, however, hydrogen chemical reactions can affect the lean/rich flammability limits remarkably, especially for the rich flammability limit. The hydrogen chemical reactions are important for the lean flammability limit, while hydrogen diffusion property plays the governing role in the rich flammability limit. For the premixed propagation flame of hydrogen doped methane, although the heat release from incipient fuel-pyrolysis reactions occurring the preheating zone upstream is indiscernible, the appearance of local extinction (EXTC) mode in this area plays the governing role in the global flame stability. The employment of

porous plate burner can effectively extend the lean/rich flammability limits. Heat conductivity is always the most important factor for the lean/rich flammability limits; N_2 and H_2 play the secondary significance for the lean and rich flammability limits, respectively.

Key words: natural gas, hydrogen, flammability limit, extinction, chemical explosive mode analysis

引 言

我国 CO_2 排放常年占据全球总量的 30% 左右,是最主要的碳排放大国之一^[1]。为应对气候恶化与能源危机,我国提出并实施了“碳达峰、碳中和”战略目标,这不仅要求加大对可再生能源的开发与利用,更需要在传统燃料燃烧技术方面探索更加清洁、低碳的燃烧方式。

天然气作为主要的化石能源,其碳排放量相比煤与石油相对较低,且燃烧过程中二氧化硫、飞灰的排放量较少,目前在民用与工业领域应用非常广泛。然而,天然气燃烧利用不符合低碳要求,亟需发展零碳燃料燃烧技术。氢气作为一种零碳燃料,同时也是绿色能源的载体,具有来源广泛、可再生的优势,将氢气与天然气进行掺混燃烧,不仅可以有效降低碳排放,同时由于氢气着火温度较高、火焰传播速度快,掺氢燃烧有助于提高燃烧效率。目前,人们在掺氢燃料的基础燃烧机理方面已取得重大进展。文献[2]发现掺混氢气会显著提高火焰传播速度,使火焰厚度变窄^[3]。刘晓佩^[4]通过实验发现,随着掺氢比例的升高,在火焰厚度变小的同时,燃烧重心会前移,化学反应特征时间与点火延迟时间也会相应缩短。Aguilar 等人^[5]针对单火焰燃烧器实验发现,当氢气的热值占比增加至不稳定临界点(0.27)时,火焰速度升高,导致火焰长度缩短,且火焰形态从附着侧壁的抬升火焰转变为脱离侧壁的钝体火焰。El-Ghafour 等人^[6]通过实验研究发现,得益于氢气的高燃烧速度,火焰稳定性得到有效增强。在污染物排放方面,当掺氢比为 50% 时 CO_2 排放量可降低 30%,而 CO 排放水平随掺氢比的增加先升高后降低。

与此同时,掺氢所引起的燃烧问题更为显著,已成为阻碍氢气燃烧利用的关键瓶颈。掺氢火焰的传播速度过快导致着火点向上游移动,从而增加回火风险;此外还会引发 NO_x 排放量增加的问题^[2]。目

前,世界范围内商业管道掺氢输配储运如火如荼,掺氢天然气的可燃极限与安全性问题也成为当下的研究热点。着火、熄火等极限现象普遍存在于各类燃烧设备中,发生在很小的空间尺度及很短的时间间隔内,涉及复杂的化学反应及传热传质耦合过程,对燃烧系统安全性与可靠性意义重大。Zhang 等人^[7]研究发现微重力二甲醚球形扩散火焰在热焰区的振荡熄灭过程由单一振荡模式控制,而冷焰的熄灭由双频振荡模式控制,并且熄火行为主要由链分支与终断反应的竞争控制。Yoo 等人^[8]对微重力 H_2 球形扩散火焰的实验发现,在火焰逐渐接近熄火极限时,先出现一个振荡起始点,随后进入周期性增幅振荡状态,并经历若干周期后发展至熄火,整个过程持续时间很短。Christiansen 等人^[9]分别对 CH_4 和 H_2 球形扩散火焰进行了瞬态数值模拟,两者在近熄火区域均呈现出振荡现象。Um 等人^[10]对 NH_3/H_2 混合燃料的实验结果显示,添加 H_2 和提高伴流空气流速可扩大氨气火焰的稳定燃烧极限,同时 NO_x 排放量略有降低。此外,贫燃状态下的不稳定性相比富燃更为显著。Park 等人^[11]对 CH_4/N_2 /空气对冲扩散火焰进行了实验研究,发现火焰长度与横向热损失密切相关,直接影响火焰熄灭和火焰振荡不稳定性,整体应变率的增加导致火焰振荡区域变窄。Li 等人^[12]通过实验与模拟发现,随着伴流空气速度的提升,甲烷射流扩散火焰吹熄极限速度呈现先增大后减小的趋势,而熄火极限与火焰高度则基本保持不变。候彬等人^[13]模拟了甲烷掺氢微管射流火焰,发现随着掺氢比的增大,管口热效应导致火焰吹熄极限显著提高,同时掺氢导致的强烈化学反应使得熄火极限略有降低。

综上所述,对掺氢燃料的基础燃烧特性和稳定机理已有较多研究,且主要集中于球形扩散火焰和对冲火焰等方面,但是对掺氢甲烷的层流预混燃烧极限与熄火机理尚缺乏系统深入的研究报道。本文基于平面层流预混火焰(PREMIX)模型,植入火焰控制连续算法,开发出层流预混火焰传播极限的高

效数值求解程序,并对掺氢甲烷的可燃极限动力学特性及熄火机理开展深入分析。利用化学爆炸模式分析 (CEMA) 方法明晰熄火过程中火焰内部局部燃烧模式的演变、燃烧反应与组分传输之间的相互作用关系以及起控制作用的关键因素。

1 数学模型与 CEMA 分析方法

1.1 火焰构型、数学模型及边界条件设定

1.1.1 无拉伸层流平面预混火焰的 PREMIX 模型

本文的预混气由掺氢甲烷与空气混合而成,考虑 0.5%, 10%, 20% 和 30% 5 种掺氢比,分别研究这 5 种掺氢比下的无拉伸层流平面预混火焰的传播极限,传播极限基于燃料/空气当量比 ϕ 而定义。由于国内管道掺氢比例最高为 30%, 因此掺氢比例的变化范围设定为 0 ~ 30%。采用 GRI-3.0 甲烷反应机理^[14]进行模拟,火焰控制方程包括连续性方程、组分方程和能量方程:

$$M = \rho u A \quad (1)$$

$$M \frac{\partial Y_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A Y_k V_k) - A \omega_k W_k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

$$M \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_k c_{pk} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \omega_k h_k W_k + \frac{A}{c_p} q_r = 0 \quad (3)$$

式中: x —沿火焰传播方向的一维空间坐标; ρ 、 u 、 c_p 、 λ —混合气的密度、流速、比定压热容和导热系数; M 、 T —某截面的质量流率和当地温度; K —组分总数量; Y_k 、 c_{pk} 、 h_k 、 W_k 、 ω_k 、 V_k —组分 k 的质量分数、比定压热容、焓、摩尔质量、净反应速率和扩散速度; A —流通截面积, $A = 1 \text{ cm}^2$; q_r —气体辐射散热速率,采用光学薄层模型并考虑了 $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ 共 4 种组分的辐射散热; 压力 $p = 101.325 \text{ kPa}$, 根据理想气体状态方程 ($p = \rho RT$) 计算当地密度。

对于自由传播火焰,只有当入口来流速度恰好等于层流火焰传播速度时,才能保证火焰锋面在某网格点处驻定,而火焰传播速度是该问题的特征值,一般是未知的,系统额外增加了一个自由度,方程组无法封闭可解。为高效求解该类特征值问题,本文增加一个关于 M 的方程,并在火焰内部设定一个内部固定边界条件,即将内部某节点处 (j^*) 的某标量

值 (一般为温度) 固定为预设值,以保证方程组封闭可解。

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} j < j^*, & M_j = M_{j+1} \\ j = j^*, & T_j = T_j^* \\ j > j^*, & M_j = M_{j-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: 下标 $j-1$ j $j+1$ —网格序号; 上标 *—内部固定边界。

1.1.2 火焰控制连续算法^[15]

上述模型适用于远离传播极限的火焰计算,在靠近传播极限处,由于迭代雅可比矩阵变成一个奇异矩阵,导致牛顿迭代速度变慢甚至发散。为高效求解获得可燃极限的准确位置,本文采取与式 (4)、式 (5) 相似的特征值问题算法,将当量比 ϕ 作为一个特征值,并建立如式 (6) 的虚假方程,并通过增加内部固定边界条件,即式 (7) 中 $j = j^{**}$, $T_j = T_j^{**}$, 其中 $j^{**} \neq j^*$, 来反向求解 ϕ 的值。由于变成了非奇异矩阵,新问题的迭代雅可比矩阵能保证快速收敛。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{cases} j < j^{**}, & \phi_j = \phi_{j+1} \\ j = j^{**}, & T_j = T_j^{**} \\ j > j^{**}, & \phi_j = \phi_{j-1} \end{cases} \quad (7)$$

1.2 化学爆炸模式分析 (CEMA) 的数学原理

化学爆炸模式分析 (CEMA)^[16-18] 是对控制方程中化学反应源项的雅可比矩阵进行特征分析的数值诊断方法,通过分析混合气的化学爆炸模式,对着火、熄火等临界燃烧现象的机理及主导反应动力学因素做定量、精确的表征。

对于式 (2)、式 (3) 所示的包含 K 种组分的反应流系统,瞬态方程的向量形式为:

$$\frac{D\mathbf{y}}{Dt} = \boldsymbol{\omega}(\mathbf{y}) + \mathbf{s}(\mathbf{y}), \quad (8)$$

$$\mathbf{y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_K, T]^T$$

式中: $D \cdot / Dt$ —随体导数; $\mathbf{y}$ — $K+1$ 维的独立变量列向量 (包含各组分的质量分数 Y_i 与温度 T); $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{y})$ —化学反应源项; $\mathbf{s}(\mathbf{y})$ —扩散源项。

CEMA 方法中仅考虑 $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{y})$ 项,而忽略 $\mathbf{s}(\mathbf{y})$ 项,此时控制方程经变换后得式 (9)。其中, $\mathbf{J}_\omega$ 是化学

源项的雅可比矩阵,对其作特征分解后可得到一组独立的反应模式 $f = [f_1, f_2, \dots, f_{k+1}]^T$, 其中具有最大正特征值的反应模式称为化学爆炸模式 f_e (CEM), 其对应的特征值记为 λ_e , 左、右特征向量分别为 b_e, a_e 。

$$\frac{d\omega(y)}{dt} = J_\omega \cdot \omega(y), J_\omega = \frac{\partial \omega(y)}{\partial y} \quad (9)$$

$$J_\omega = B \cdot A \cdot A, B = A^{-1} \quad (10)$$

$$\frac{df}{dt} \approx A \cdot f, f = B \cdot \omega(y), \quad (11)$$

$$\text{CEM: } f_e = b_e \cdot \omega, \lambda_e = b_e \cdot J_\omega \cdot a_e \quad (12)$$

式中: A, B 是矩阵 J_ω 的右、左特征向量矩阵; A 由特征值 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{K+1})$ 构成的对角矩阵。

左特征向量 b_e 代表源项向 CEM 模式空间方向的投影, 因此式 (12) 中的 $\varphi_s, \varphi_\omega$ 分别代表扩散源项和化学源项对 CEM 的投影和贡献, 进一步可提出式 (13) 所示的指数 α 以表征局部燃烧模式^[19]。当 $|\alpha| \leq 1$ 时 $|\varphi_\omega| \geq |\varphi_s|$, 自着火反应占主导, 扩散输运对着火反应不重要, 燃烧处于自着火模式 (AUTO); 当 $\alpha \geq 1$ 时, 扩散输运占主导, 并且由于其方向与 CEM 相同, 对着火反应起促进作用, 燃烧处于扩散辅助着火模式 (DIFF); 当 $\alpha \leq -1$ 时, 扩散输运占主导, 并且对着火反应起抑制作用, 燃烧处于局部熄灭模式 (EXTC)。

$$\alpha = \varphi_s / \varphi_\omega, \varphi_s = b_e \cdot s(y), \varphi_\omega = b_e \cdot \omega(y) \quad (13)$$

$$DI^n = \frac{b_e^n s^n}{\sum_{n=1}^{K+1} abs(b_e^n s^n)} \quad (14)$$

利用式 (14) 的扩散指数 (DI) 揭示主导的扩散过程, 上标 n ($=1 \sim K+1$) 代表 DI 的元素序号, $abs()$ 算子返回绝对值, DI^n 绝对值越大代表第 n 种组分扩散对 CEM 越重要, 并且符号相反代表作用相反。向量 b_e 需乘以 -1 或保持不变, 以保证化学爆炸模式 $\varphi_\omega = b_e \cdot \omega$ 的值始终为正。

由于 $f_e = b_e \cdot \omega$, 可利用参与指数 (PI)^[20] 来揭示主导的基元反应, 其绝对值越大代表对 CEM 模式越重要, 符号相反代表作用相反。 S_i 化学计量数矩阵, R 为各基元反应的净反应速率向量, 符号 $\otimes$ 表示沿着两个向量的元素方向进行乘法运算。

$$PI = \frac{(b_e \cdot S_i) \otimes R}{\sum abs((b_e \cdot S_i) \otimes R)} \quad (15)$$

2 结果与讨论

2.1 掺氢比对天然气传播极限的影响

掺氢比例 ω_{H_2} 为 0, 5%, 10%, 20% 和 30% 时掺氢甲烷层流预混火焰最高温度 T_{max} 及传播速度 S_L 随当量比 ϕ 的稳态响应曲线 (即 S 曲线) 如图 1 所示。可以看到, 稳态 S 曲线呈 “ Δ ” 形状, 实线代表稳定可燃分支, 虚线代表不稳定分支 (客观上不可能存在)。在每个 ω_{H_2} 条件下, T_{max} 与 S_L 的峰值始终位于 $\phi = 1.05$ 处; 在贫燃区和富燃区内随着 ϕ 逐渐远离化学当量比 ϕ_{st} , T_{max} 及 S_L 逐渐降低, 并分别在数学分岔点处由于下降速度趋于无穷大, 而形成熄火极限 (传播极限), 这与文献 [17] 中火焰极限理论相符。

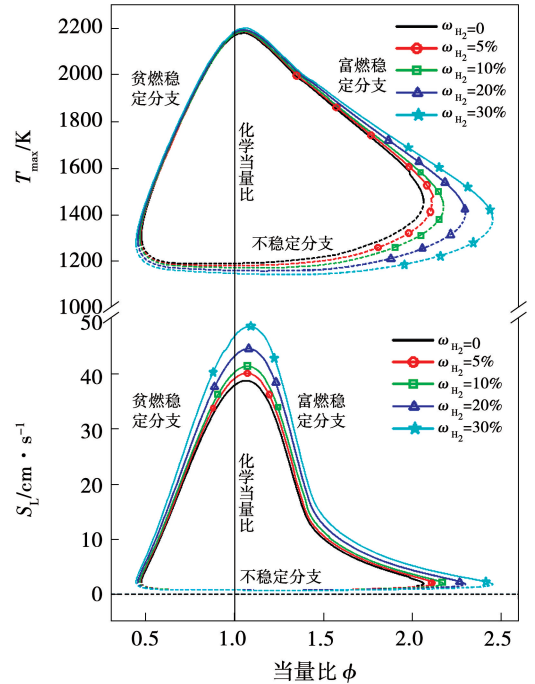


图 1 ω_{H_2} 为 0, 5%, 10%, 20% 和 30% 时掺氢甲烷层流预混火焰最高温度 T_{max} 及传播速度 S_L

随燃空当量比的稳态响应曲线

Fig. 1 Steady-state response curve of hydrogen doped methane laminar premixed flame T_{max} (a) and S_L (b) with ϕ for the cases $\omega_{H_2} = 0\%, 5\%, 10\%, 20\%, \text{ and } 30\%$

表 1 为不同掺氢比例 ω_{H_2} 下贫燃与富燃传播极限所对应的 ϕ 、 T_{max} 与 S_{L} 值。可以看到, ω_{H_2} 对贫燃传播极限的影响较弱, 随着 ω_{H_2} 的增加, 贫燃极限略微降低, 但是 ω_{H_2} 对富燃传播极限影响显著, 当 ω_{H_2} 由 0 增至 30% 时, 富燃极限下 ϕ 从 2.04 增至 2.46。这是因为在贫燃极限处由于燃料不足, 掺氢并不会显著提升锋面内活性成分的浓度, 而在富燃极限处由于燃料过剩, 锋面内活性成分尤其是由于掺氢所衍生的 H、OH 自由基浓度显著提升, 氢气的优先扩散效应能够维持火焰稳定, 拓宽富燃可燃极限。对比 $\phi = 1.05$ 处的 T_{max} 与 S_{L} 变化也可以看出, 随着 ω_{H_2} 的升高, 尽管火焰温度几乎不变, 但产物中过剩的氢气热分解生成 H 基, 优先扩散效应导致传播速度大幅加快。另外, 从图 1 还可看出, ω_{H_2} 为 0 ~ 30% 时, ω_{H_2} 对最大传播速度及富燃极限的影响是近乎呈线性的。从表 1 可看出, 贫燃与富燃传播极限所对应的 T_{max} 与 S_{L} 基本不受 ω_{H_2} 的影响, 因此可将 T_{max} 或 S_{L} 作为稳态熄火的判据。

表 1 不同 ω_{H_2} 下贫燃与富燃传播极限所对应的 ϕ 、 T_{max} 及 S_{L} 值

Tab. 1 Lean- and rich-combustion propagation limits with the corresponding ϕ , T_{max} , and S_{L} at different ω_{H_2}

$\omega_{\text{H}_2}/\%$	贫燃传播极限			富燃传播极限		
	ϕ	T_{max}/K	$S_{\text{L}}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	ϕ	T_{max}/K	$S_{\text{L}}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
0	0.471	1 309	2.16	2.04	1 457	1.89
5	0.469	1 302	2.17	2.11	1 441	1.83
10	0.464	1 299	2.19	2.18	1 434	1.84
20	0.453	1 287	2.17	2.30	1 405	1.78
30	0.443	1 283	2.28	2.46	1 378	1.74

2.2 氢气对甲烷火焰传播极限的影响作用机制

氢气的高反应活性、高扩散速度及热力学特性都可能改变甲烷火焰的传播极限, 为分离出上述 3 种因素对甲烷火焰传播极限的定量影响, 阐明掺氢的影响作用机制, 本文采取虚拟氢气的方法^[21]开展分析: 即关闭 H_2 参与的基元反应, 将 H_2 的输运参数、热力学参数更换为 N_2 的参数, 并重新计算 S 曲线, 通过对比前后变化得出 H_2 的化学动力学特性、输运特性及热力学特性对传播极限的定量影响。由于 H_2 与 N_2 同属双原子气体, 其热力学参数相近, 因

此这里不讨论热力学特性的影响。图 2 为关闭 H_2 反应、替换 H_2 输运参数后所得 S 曲线与原 S 曲线的对比。

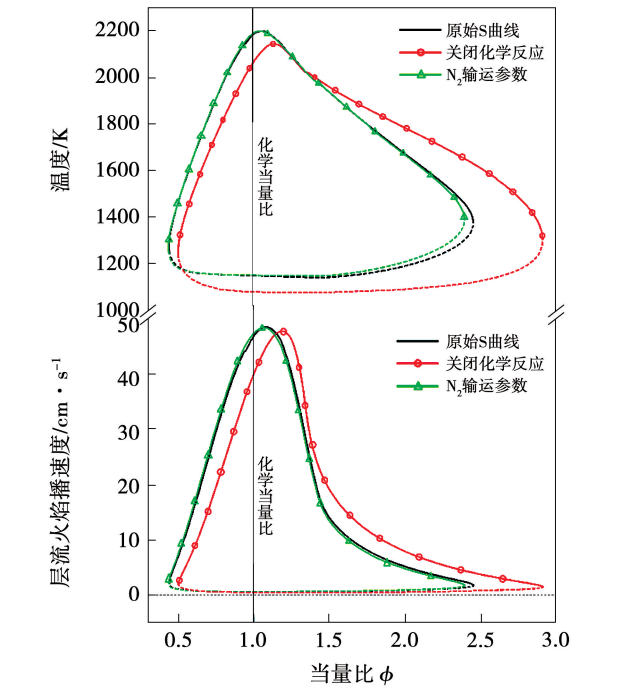


图 2 ω_{H_2} 为 30% 时关闭 H_2 反应、将 H_2 输运参数替换为 N_2 后的 S 曲线与原 S 曲线对比

Fig. 2 Comparison of the original S-curve with that obtained by turning-off H_2 chemistry, and replacing H_2 transport parameters with N_2 transport parameters respectively at $\omega_{\text{H}_2} = 30\%$

从图中可看出, 氢气的优先扩散特性对贫燃极限没有任何影响, 仅略微拓宽富燃传播极限, 整体而言氢气扩散特性对甲烷传播极限的影响是比较微弱的。氢气的化学动力学特性对贫燃和富燃极限都会产生显著影响, 并且对富燃极限的影响更大。关闭氢气反应后贫燃可燃范围缩小, 这是由于反应区内燃烧速率降低。但是关闭氢气反应后富燃可燃范围拓宽, 这是由于预混气中的氢气未被消耗, 此时氢气变成了一种惰性组分, 氢气的高扩散速度与高导热系数加快了燃烧锋面内活化中心向预热区的扩散速度, 进而拓展了富燃熄火极限。这也说明, 向预混气中掺混 He 等轻质惰性成分有助于拓宽可燃范围。综合而言, 氢气的化学特性主要在贫燃极限处起主导作用, 而扩散特性主要在富燃极限处发挥主导作用^[22]。

2.3 火焰传播极限的 CEMA 方法

利用 CEMA 方法分析掺氢甲烷火焰的传播机理。先以甲烷 CH_4 /空气预混气为例,其稳态 S 曲线如图 3 所示,贫燃传播极限是 $\phi = 0.471$,富燃传播极限是 $\phi = 2.04$ 。P1 ~ P8 是 S 曲线上所选取的 8 个典型工况点,下面对其进行 CEMA 分析。

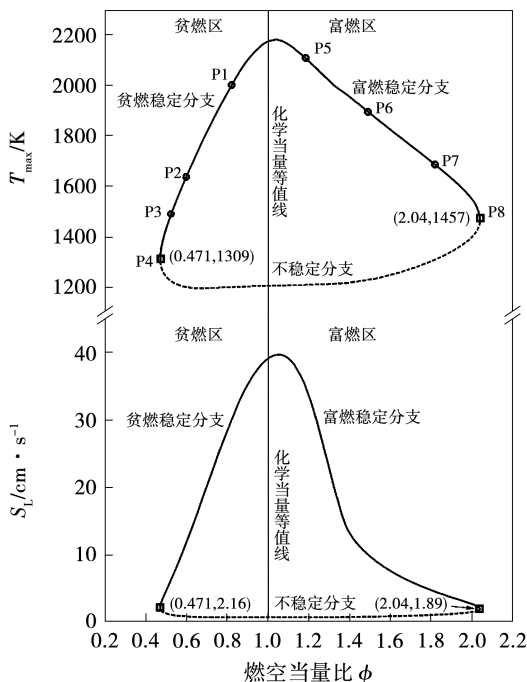


图 3 甲烷/空气预混传播火焰的稳态 S 曲线

Fig. 3 Steady-state S-curves of CH_4/air premixed spread flame

图 4(a) 为对贫燃熄火极限点 P4 火焰锋面内温度及对数特征值的分布。可以看到,在着火点以前 $Re(\lambda_e) \approx 0$; 进入反应区以后 λ_e 变为正数,代表快速放热与升温着火过程;在反应区下游反应物被消耗,反应速率逐渐衰减, λ_e 突变为较大的负数,因此 $Re(\lambda_e) = 0$ 等值线可以识别火焰锋面位置^[17,19], $Re(\cdot)$ 算子返回虚数的实部。图 4(b) 为基于局部燃烧模式指数 α 的贫燃稳定分支上 P1 ~ P4 火焰内部局部燃烧模式的分布。细实线代表着火后的反应区,其上游是热质扩散过程占主导的预热区(细虚线),因此反应区内的热量和活化中心向预热区扩散传输,支撑火焰锋面传播过程。研究还发现, ϕ 为 0.6 ~ 1.48 时燃烧稳定性强,火焰锋面内不存在局部熄火(EXTC)分支,但是当足够靠近贫燃熄火极限后($\phi < 0.6$),在 P2 锋面内部首次出现 EXTC 分支(粗实线),并且在向熄火极限趋近的过程中 EX-

TC 的分布范围也逐渐拓宽。另外,EXTC 始终分布在 DIFF 分支的上游,说明尽管此区域内的反应放热和升温不显著,但是此区域内的 EXTC 分支控制火焰的整体稳定性。为拓宽贫燃传播极限,工程实际中可以采用多孔介质燃烧器,当 EXTC 分支位于多孔介质内部时,可以利用多孔介质的蓄热或催化作用有效抑制 EXTC 模式的出现,进而维持火焰整体稳定性,这是本文新发现的多孔介质燃烧器的稳燃机理。为验证这一假说,本文在 EXTC 分支上施加一个生热源项,该生热量仅为燃料总热值的 1%,图 5 是所得的新的 S 曲线,可以看到,贫燃/富燃传播极限均大幅拓宽,充分证明了本假说的正确性。

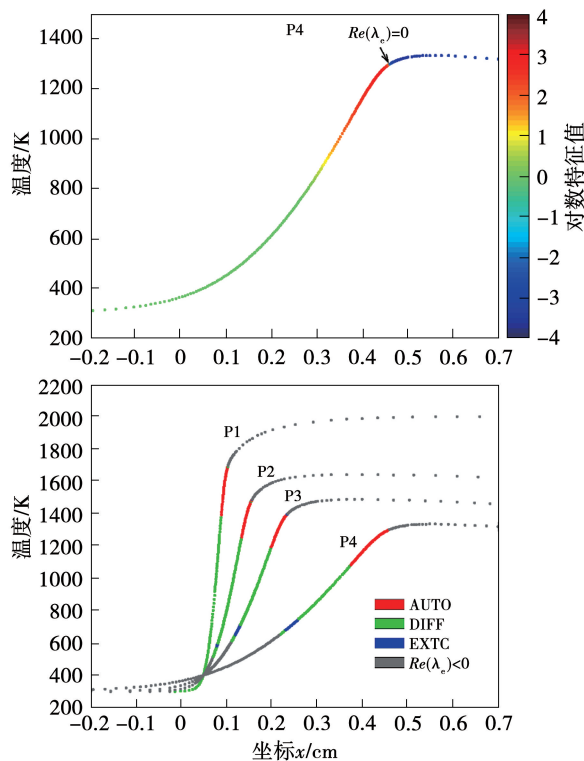


图 4 $\omega_{\text{H}_2} = 0$ 时贫燃极限 P4 内温度及对数特征

值的分布,贫燃分支上点 P1 ~ P4 的温度及局部模式分布

Fig. 4 Logarithmic eigenvalues profiles in the lean-combustion limit P4, and local combustion modes at points P1 ~ P4 on the lean-combustion branch at $\omega_{\text{H}_2} = 0$

图 6 为富燃分支及富燃熄火极限的 CEMA 分析结果,可以看到,与贫燃分支一致,即预热区上游 EXTC 分支的出现控制火焰整体燃烧稳定性,采用多孔介质燃烧器能够有效抑制 EXTC 模式,拓宽传播极限。

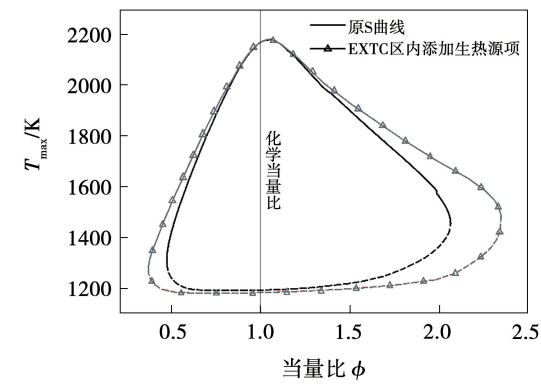


图 5 EXTC 分支上施加生热源项后的 S 曲线
与原 S 曲线对比

Fig.5 Comparison of the original S-curve with that
obtained by superimposing a heating source
on the EXTC branch

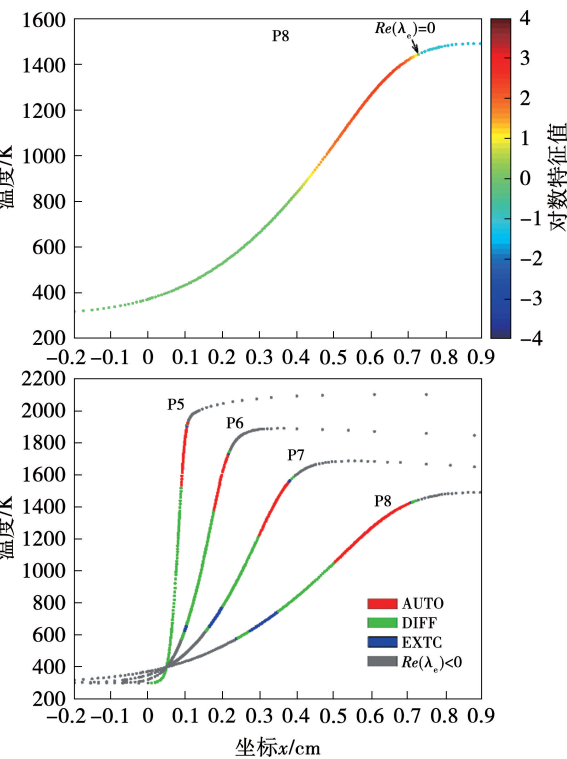


图 6 $\omega_{\text{H}_2} = 0$ 时富燃熄火极限 P8 内温芳及
对数特征值分布，
富燃分支上点 P5 ~ P8 的温度及局部燃烧模式分布

Fig.6 Logarithmic eigenvalues profiles in the rich-combustion
limit P8 (a) , and local combustion modes at points P5 - P8
on the rich-combustion branch (b) at $\omega_{\text{H}_2} = 0$

图 7 为 $\omega_{\text{H}_2} = 0$ 条件下贫燃熄火极限 P4 内 EX-
TC 分支上主导扩散过程的 DI 指数以及主导反应的

PI 指数,剩余未展示的扩散变量与基元反应是次要
因素、此处忽略。导热过程(T)对贫燃熄火极限最
重要,其次依次是 N_2 、 O_2 、 CH_4 、 CO_2 和 H_2 等组分的扩
散,这与文献[17,20]研究相符。主导组分都是稳
定的大分子,而活性自由基的扩散是次要的,这是由
于 EXTC 分支位于远离着火点的上游区域内,活性
自由基的浓度微乎其微,对 EXTC 分支起主导作用
的基元反应都是初始的燃料裂解反应。

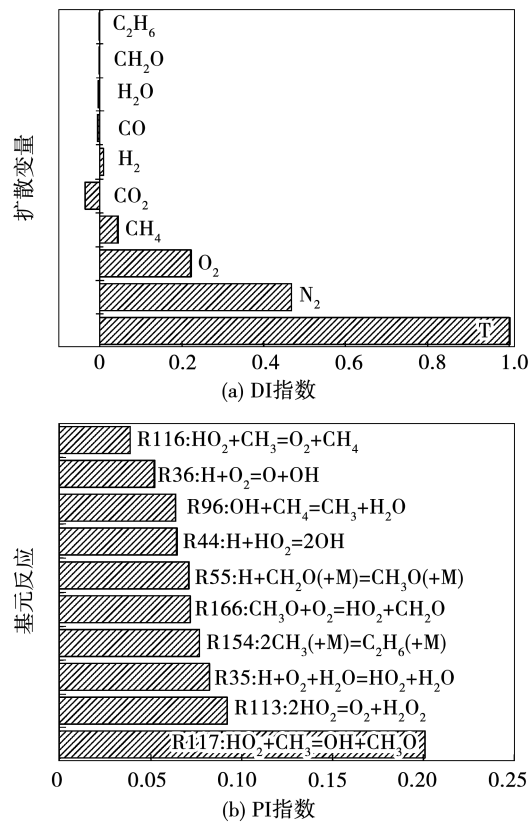


图 7 贫燃熄火极限 P4 内 EXTC 分支上主导扩散过程的
DI 指数以及主导反应的 PI 指数

Fig.7 Dominating diffusion process DI indices and dominating
reaction PI indices on the EXTC branch in the
lean-combustion extinction limit P4

图 8 为富燃熄火极限 P8 内 EXTC 分支上主导
扩散过程的 DI 指数、以及主导反应的 PI 指数,传热
与 H_2 扩散过程对富燃熄火极限起控制作用。可以
看到,掺氢比例对贫燃/富燃传播极限处主导因素的
影响是微乎其微的,因此这里不再赘述。总之,氢气
扩散对富燃传播极限影响显著,并且甲烷的初始裂
解反应与放热控制 EXTC 模式的产生以及火焰的整
体稳定性。

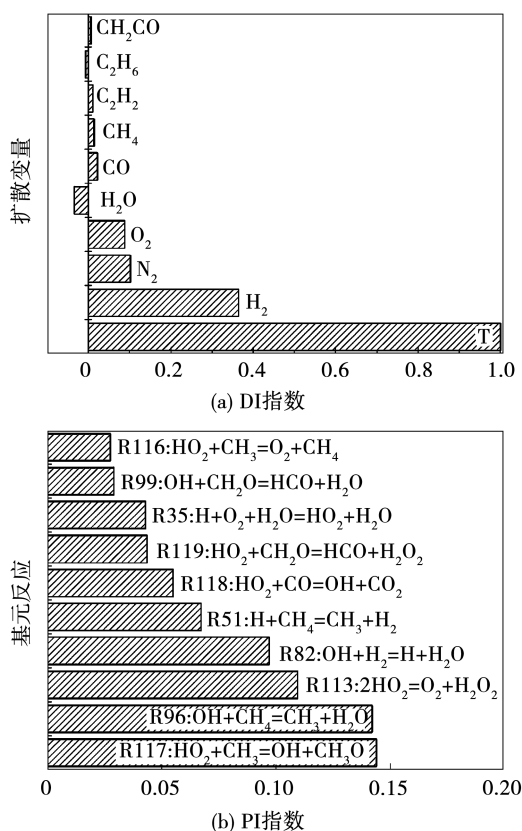


图8 富燃熄火极限 P8 内 EXTC 分支上主导扩散过程的 DI 指数以及主导反应的 PI 指数

Fig. 8 Dominating diffusion process DI indices and dominating reaction PI indices on the EXTC branch in the rich-combustion limit P8

3 结 论

(1) ω_{H_2} 对贫燃传播极限的影响较弱,而在富燃极限处由于剩余氢气热解所产生的 H 基以及氢气的优先扩散效应拓宽了富燃区的可燃极限。可利用临界 T_{max} 与 S_L 值来判断掺氢甲烷预混火焰的传播极限。

(2) 氢气的优先扩散特性对甲烷传播极限的影响较弱,而氢气的化学特性对贫燃和富燃极限都会产生显著影响,并且对富燃极限的影响更大。氢气的化学特性主要在贫燃极限处起主导作用,而扩散特性主要在富燃极限处发挥主导作用。

(3) 对于掺氢甲烷预混传播火焰,尽管预热区上游的燃料初始裂解反应放热较弱,但此区域内 EXTC 模式的出现控制火焰整体稳定性,利用多孔介质燃烧器能够显著拓宽贫燃/富燃传播极限。对

于贫燃与富燃极限,导热都是最重要的因素,其次是 N_2 (贫燃) 与 H_2 (富燃) 的扩散传输过程。

参考文献:

- [1] 胡道明,李 蛟,杜晓东,等. 碳中和背景下含氢综合能源系统碳排放和经济性分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 111-120.
HU Daoming, LI Jjiao, DU Xiaodong, et al. Carbon emissions and economic analysis of integrated energy system containing hydrogen using for carbon neutrality[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 111-120.
- [2] LI L X, LIU X Y, ZENG G F, et al. Numerical modeling of natural gas combustion with hydrogen blending in SGT-800 heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 70-78.
- [3] 朱稳初,张 露,康 鑫. 半封闭狭窄通道内甲烷/空气预混火焰传播不稳定性实验研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(5): 57-64.
ZHU Wenchu, ZHANG Lu, KANG Xin. Experimental study on propagation instabilities of premixed methane/air flames in a semi-closed narrowchannel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 57-64.
- [4] 刘晓佩. 氢气/天然气混合燃料贫预混旋流燃烧特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. 4.
LIU Xiaopei. Investigation onto the combustion characteristics of hydrogen/natural gas hybrid fuel pf lean-premixed swirl flame [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. 4.
- [5] AGUILAR J G, AESOY E, DAWSON J R. The influence of hydrogen on the stability of a perfectly premixed combustor[J]. Combustion and Flame, 2022, 245: 112323.
- [6] EL-GHAFOUR S, EL-DEIN A, AREF A. Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(6): 2556-2565.
- [7] ZHANG P Y, KANG Y H, ZHANG Y, et al. Flammability dynamics and oscillation-induced extinction mechanism of dimethyl ether spherical diffusion flame in microgravity[J]. Combustion Theory and Modelling, 2020, 24(6): 1130-1152.
- [8] YOO S W, CHRISTIANSEN E W, LAW C K. Oscillatory extinction of spherical diffusion flames: Micro-buoyancy experiment and computation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 29-36.
- [9] CHRISTIANSEN E W, TSE S D, LAW C K. A computational study of oscillatory extinction of spherical diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 2003, 134(4): 327-337.
- [10] UM D H, JOO J M, LEE S, et al. Combustion stability limits and NO_x emissions of nonpremixed ammonia-substituted hydrogen-air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(34): 14854-14865.

(下转第 91 页)