

# CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 稀释对 H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 层流火焰传播特性的影响

尚融雪<sup>1</sup>, 高俊豪<sup>1,2</sup>, 杨悦<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

**摘 要:** 利用本生灯-纹影系统实验研究含有 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 的掺氢天然气层流预混火焰传播速度, 并应用 GRI-3.0 机理模拟计算不同组分预混燃气绝热火焰温度、敏感性系数及重要自由基浓度等, 详细讨论 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 的稀释效应。研究表明, GRI-3.0 机理能较好地预测掺氢天然气层流预混火焰传播速度; CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 稀释分会显著抑制掺氢天然气层流预混火焰速度及其绝热火焰温度; 与 N<sub>2</sub> 相比, CO<sub>2</sub> 不仅具有较强的热力学效应, 且随着 CO<sub>2</sub> 稀释比的增加, 火焰中重要自由基 H 浓度显著减少, 抑制氧化反应  $H + O_2 = O + OH$  对燃烧的主导促进效应, 使预混燃料的层流火焰传播速度显著降低。

**关 键 词:** 本生灯; 层流火焰传播速度; CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 稀释; 敏感性分析; 重要自由基

**中图分类号:** TK 1211

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-3026(2020)09-1321-07

## Effect of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Dilution on the Propagation of Laminar Flames of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>

SHANG Rong-xue<sup>1</sup>, GAO Jun-hao<sup>1,2</sup>, YANG Yue<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China. Corresponding author: SHANG Rong-xue, E-mail: shangrongxue@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The transmission speeds of laminar flames of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/air mixtures with CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dilution were experimentally studied using the Bunsen burner method incorporating the schlieren technique. To thoroughly investigate the diluted effect of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> on laminar premixed flames of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/air mixtures, the adiabatic flame temperatures, sensitivities of the mixtures with various CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dilution ratios and the mole fractions of vital radicals were calculated using GRI-3.0 mechanism. The research results showed that GRI-3.0 mechanism provided better estimates of the transmission speeds of hythane flames; laminar flame speeds and adiabatic flame temperatures decreased with the growth of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dilution ratios. Compared with N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> presented the stronger thermal effect and chemical kinetics effect on the decrease of the laminar flame speeds of diluted hythane. With the increase of CO<sub>2</sub> dilution ratios, the dominant promotion of the oxidation reaction  $H + O_2 = O + OH$  on the mass burning rates of mixtures can be inhibited by the significant reductions of H radicals. Therefore, the laminar flame speed of mixtures remarkable decreased with the growth of CO<sub>2</sub> rations.

**Key words:** Bunsen burner; laminar flame speed; CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dilution; sensitivity analysis; vital radical

掺氢天然气作为一种新型气体燃料,其主要可燃组分 H<sub>2</sub> 可燃极限范围较宽,火焰传播速度较快,最小点火能量较低。与传统天然气相比,掺氢天然气能有效拓宽燃烧设备的稳定工作范围,提高燃烧效率及能源有效利用率并控制污染物排

放等。此外,由于制备技术条件差异,掺氢天然气中也会含有 CO<sub>2</sub> 以及 N<sub>2</sub> 等稀释组分,燃气中组分变化会显著改变其基础燃烧特性。层流预混火焰传播特性作为燃料的重要基础燃烧特性,不仅能综合表征燃料热力学、扩散以及化学动力学特

性物化参数,也是防止燃料不完全燃烧,指导燃烧器安全高效设计的重要参数.为此,研究不同稀释条件下掺氢天然气层流预混火焰传播特性对其安全高效燃烧利用具有重要现实意义.

自 20 世纪中叶,学者们开始对  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$  等单组分燃料燃烧特性及其影响机制进行相关研究<sup>[1-2]</sup>.近年来,国内外学者也对含有稀释组分的多组分预混燃料的影响机制进行了大量研究<sup>[3]</sup>.Weng 等<sup>[4]</sup>研究了  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  等惰性组分对预混燃气火焰传播和熄灭的影响作用.Zhang 等<sup>[5]</sup>发现稀释组分的热效应及化学动力学效应对层状火焰传播速度的抑制起主导作用.

Wang 等<sup>[6]</sup>通过对比合成气层流火焰传播速度实验数据及数值模拟结果,分析了 GRI-Mech 3.0、USC Mech II 和 Davis 等化学动力学反应机理的适用性.Shang 等<sup>[7]</sup>研究发现,与  $\text{N}_2$  相比, $\text{CO}_2$  及  $\text{H}_2\text{O}$  由于化学动力学效应对层流火焰的传播具有更强的抑制作用,层流火焰传播速度较低.综上可知,虽然目前已有许多学者开展了单组分及多组分层流预混燃烧研究,但针对掺氢天然气的文献数据仍十分有限,特别是含有稀释组分的掺氢天然气,其预混物中各组分物化性质差异较大,使其燃烧过程更为复杂.

为此,本文自主搭建本生灯-纹影实验平台,利用 CHEMKIN-PRO 研究标准状况下  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  稀释比为 20%、40% 的掺氢天然气层流预混火焰传播特性,其中当量比<sup>[2]</sup>为 0.8~1.2.并从热力学及化学动力学效应两方面详细对比分析不同稀释组分对掺氢天然气层流预混火焰传播特性的稀释作用.

## 1 实验及数值模拟方法

### 1.1 实验装置及原理

为测量不同组分预混燃气层流预混火焰传播速度,自主搭建了本生灯-纹影实验平台,包括配气系统、本生灯燃烧系统、纹影成像系统等.

实验中使用的氧化剂是干燥的压缩空气.掺氢天然气由高纯度  $\text{CH}_4$  以及  $\text{H}_2$  配制而成,其中  $\text{CH}_4$  纯度大于 99.9%, $\text{H}_2$  纯度大于 99.99%.稀释气体主要为二氧化碳( $\text{CO}_2$ )及氮气( $\text{N}_2$ ),稀释气体的纯度均大于 99.9%.实验主要使用质量流量控制器配置不同组分比例的预混燃气并计算总流量.

在预混燃气中,定义当量比( $\phi$ )如式(1)所示:

$$\phi = \frac{n_F/n_A}{(n_F/n_A)_{st}} \quad (1)$$

其中: $(n_F/n_A)_{st}$ 表示标准状态下,混合气中的燃料(fuel)与空气(air)完全燃烧时物质的量的比; $n_F/n_A$ 表示实际燃烧情况下的燃料与空气物质的量的比.

定义掺氢天然气中的掺氢比( $X_{\text{H}_2}$ )及稀释比( $X_{\text{dilution}}$ )如式(2)及式(3)所示:

$$X_{\text{H}_2} = \frac{x_{\text{H}_2}}{x_{\text{H}_2} + x_{\text{CH}_4}}, \quad (2)$$

$$X_{\text{dilution}} = \frac{x_{\text{dilution}}}{x_{\text{H}_2} + x_{\text{CH}_4} + x_{\text{dilution}}}. \quad (3)$$

其中: $x_{\text{CH}_4}$ 为混合气体中  $\text{CH}_4$  的摩尔分数; $x_{\text{H}_2}$ 为混合气体中  $\text{H}_2$  的摩尔分数; $x_{\text{dilution}}$ 为混合气体中稀释组分的摩尔分数.

实验过程中为获得稳定且火焰高度适合的锥形本生灯火焰,并使本生灯管道内的混合燃气预混均匀且充分发展保持层流状态,本文选用内径为 6 mm 及 8 mm,管长均为 800 mm 的不锈钢管作为本生灯主体.计算不同实验工况下混合燃气雷诺数( $Re$ )均在 400~1 400 之间,满足层流预混条件.

为准确获取混合气预混层流火焰未燃侧火焰面表面积,实验中使用 1 套 Z 型纹影系统对本生灯火焰进行拍摄.纹影系统是通过利用光在被测流体的折射率梯度正比于流场的密度的原理,记录温度变化引起的密度变化.本文使用的纹影系统凹面圆形反射镜的镜面直径为 200 mm,焦距为 2 000 mm.

### 1.2 火焰边缘识别

本文使用本生灯火焰面积法测量不同实验工况下的层流预混火焰传播速度( $S_u$ ).为获得准确的未燃侧火焰表面积,利用 MATLAB 编辑了图像识别处理程序,并对火焰未燃侧表面积进行批量计算.

在 MATLAB 中将左右对称的锥形本生灯火焰图像沿中心轴切割,得到半本生灯火焰图像;利用软件中集成的灰度函数对图像进行灰度化处理,将彩色图片的三维矩阵转化为二维矩阵;选取边缘处理效果较好的二阶 canny 算子对本生灯锥形火焰未燃侧进行边缘检测,提取灰度梯度变化最大值,得到火焰边界散点坐标;并选用二次多项式对边缘散点进行拟合,利用定积分求绕分割线位置  $x$  旋转曲面面积,即为锥形火焰未燃侧表面积  $A_u$ .

### 1.3 数值模拟方法

本文主要利用化学动力学软件 CHEMKIN-

PRO 中的一维预混层流火焰模型 (PREMIX 模型) 对含有稀释组分的掺氢天然气层流火焰传播特性进行数值模拟计算. 其中自适应网格计算范围为 10 cm, 火焰反应区域网格数为 300 ~ 1 500. 此外, 本文主要选用 GRI - 3.0 机理 (含有 35 组分, 217 基元反应), 模拟计算掺氢天然气层流火焰传播特性. GRI - 3.0 机理主要以天然气燃烧特性数据为基础, 可用于 H<sub>2</sub>/CO/C<sub>1</sub> - C<sub>3</sub> 系统的模拟计算研究.

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果及数值模拟对比分析

#### 2.1.1 甲烷/空气层流预混火焰传播速度

使用本生灯 - 纹影实验系统测试了 CH<sub>4</sub>/空气 S<sub>u</sub>, 并与其他学者获得的 CH<sub>4</sub>/空气层流预混火焰传播速度实验数据<sup>[8-10]</sup> 进行对比.

由图 1 可知, 不同学者使用获取的实验数据有一定差异性, 但实验数据随当量比的变化趋势一致性较好. 本文获得的实验数据与文献数据结果<sup>[8-10]</sup> 吻合较好, 且相同工况下实验所测的 S<sub>u</sub> 与文献数据总体变化趋势一致, S<sub>u</sub> 随着 CH<sub>4</sub>/空气预混气体当量比的增加呈现先增大后减小的趋势, 当 φ 达到 1.1 附近时, CH<sub>4</sub>/空气预混气体的 S<sub>u</sub> 达到最大值. 由此可说明本文实验系统及图像处理方法较可靠.

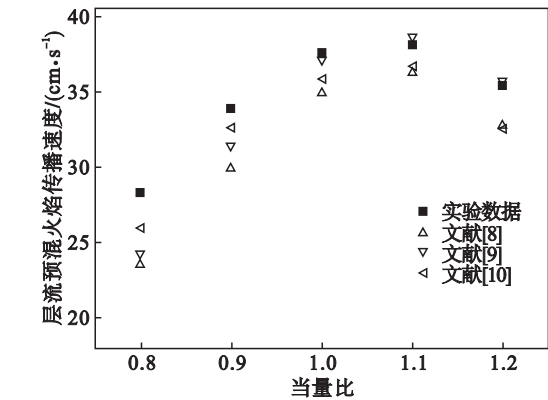


图 1 CH<sub>4</sub>/空气层流预混火焰传播速度  
Fig. 1 Experimental laminar flame speeds of CH<sub>4</sub>/air mixtures

#### 2.1.2 掺氢天然气层流预混火焰传播速度

图 2 给出了不同掺氢比条件下掺氢天然气 S<sub>u</sub> 实验数据与数值模拟结果.

对比图 1 及图 2 实验数据可以看出, 预混物 S<sub>u</sub> 随着 CH<sub>4</sub> 中氢气的加入显著增大. 当预混物的掺氢比从 0.3 增加到 0.4 时, 其 S<sub>u</sub> 最大值从 47.4 cm/s 增加到 54.27 cm/s. 从图 2 可知, 本文

获得的掺氢天然气实验 S<sub>u</sub> 与数值模拟结果吻合性较好, 实验与数值模拟的结果均随着当量比的增加呈现先增大后减小的趋势, 且两者 S<sub>u</sub> 峰值对应当量比一致. 因此本文均采用 GRI - 3.0 机理对不同掺氢比及稀释比条件下的掺氢天然气层流预混火焰传播特性进行数值模拟研究.

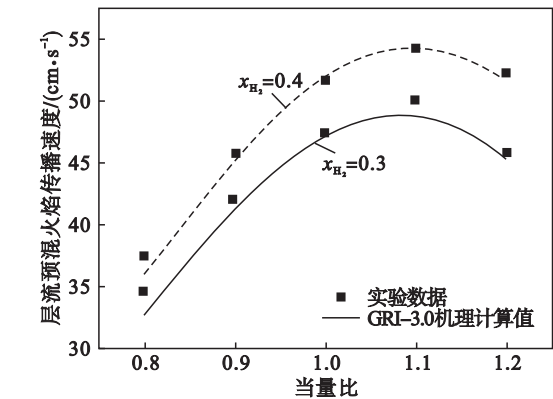


图 2 掺氢天然气层流预混火焰传播速度  
Fig. 2 Laminar flame speeds of CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air mixtures

### 2.2 N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 对层流预混火焰传播速度的影响

图 3 给出了不同掺氢比及 N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 稀释比条件下掺氢天然气 S<sub>u</sub> 实验数据与数值模拟结果.

从图 3 可以看出, 随着 N<sub>2</sub> 稀释组分的增加, 其 S<sub>u</sub> 逐渐降低, 且 S<sub>u</sub> 峰值对应的当量比向贫燃侧发展. 在掺氢比为 0.4 条件下, 当 N<sub>2</sub> 稀释比从 0 增加到 0.4 时, 其实验测试 S<sub>u</sub> 峰值从 54.24 cm/s 降低到 41.22 cm/s, 其 S<sub>u</sub> 峰值对应当量比从 1.09 降低到 1.05.

从图 4 可以看出, 在稀释组分为 CO<sub>2</sub> 预混燃料火焰传播速度变化规律与稀释组分为 N<sub>2</sub> 时相似, 在掺氢比为 0.4 的条件下, 当 CO<sub>2</sub> 稀释比从 0 增加到 0.4 时, 其 S<sub>u</sub> 峰值对应当量比从 1.09 降低到 1.05. 对比图 3 和图 4 的稀释气体分别为 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的情况下, 在相同掺氢比、稀释比、当量比下, 稀释气体为 CO<sub>2</sub> 的 S<sub>u</sub> 总比稀释气体为 N<sub>2</sub> 的低, 针对这种现象, 下文将对对比两种稀释气体稀释效应.

### 2.3 N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 稀释作用对比分析

基于上述实验及数值模拟校核和分析, 本文分别选取 φ = 0.8 及 φ = 1.8, x<sub>H<sub>2</sub></sub> 为 0.4 时, 模拟计算不同稀释组分对预混燃料的稀释作用. 由图 5 可知, 在 N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 稀释作用下, 掺氢天然气的 S<sub>u</sub> 在贫燃和富燃时均随着稀释比增加而显著降低. 与 N<sub>2</sub> 相比, 在相同稀释比条件下, CO<sub>2</sub> 对掺氢天然气的层流火焰传播速度稀释抑制作用更显著. 在贫燃条件下, 当 x<sub>N<sub>2</sub></sub> 从 0 增加到 0.4 时, S<sub>u</sub> 从

35.93 cm/s 降低到 27.7 cm/s,降低了 22.91%。当向预混物中加入 CO<sub>2</sub> 时,随着 x<sub>CO<sub>2</sub></sub> 增加至 0.4,其 S<sub>u</sub> 从 35.93 cm/s 降低到 21.16 cm/s,降低了 41.11%。根据相关文献,稀释组分对预混燃料的抑制效应主要体现在热力学效应、化学动力学效

应以及扩散效应等方面,其中扩散效应影响并不显著<sup>[8]</sup>,因此下文将主要针对 N<sub>2</sub> 及 CO<sub>2</sub> 的热力学和化学动力学效应,对其稀释作用进行对比分析。

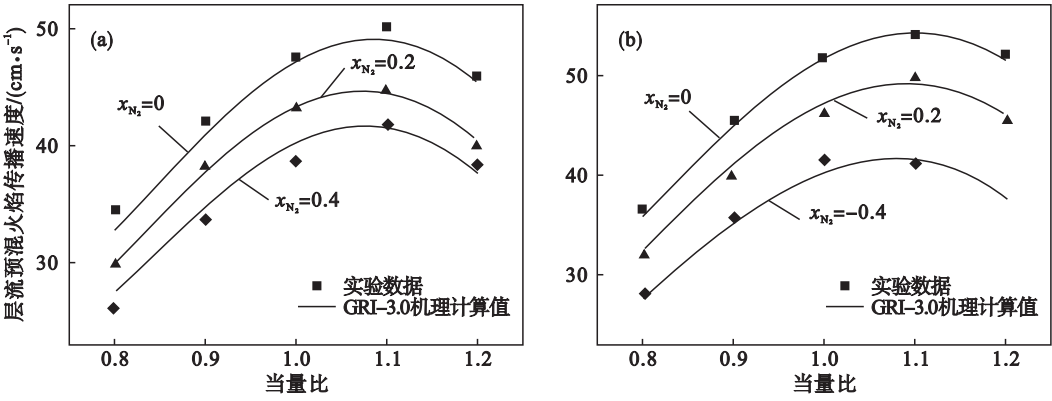


图 3 含有 N<sub>2</sub> 的掺氢天然气层流预混火焰传播速度  
Fig. 3 Laminar flame speeds of hythane with N<sub>2</sub> dilution

(a)—x<sub>H<sub>2</sub></sub> = 0.3; (b)—x<sub>H<sub>2</sub></sub> = 0.4.

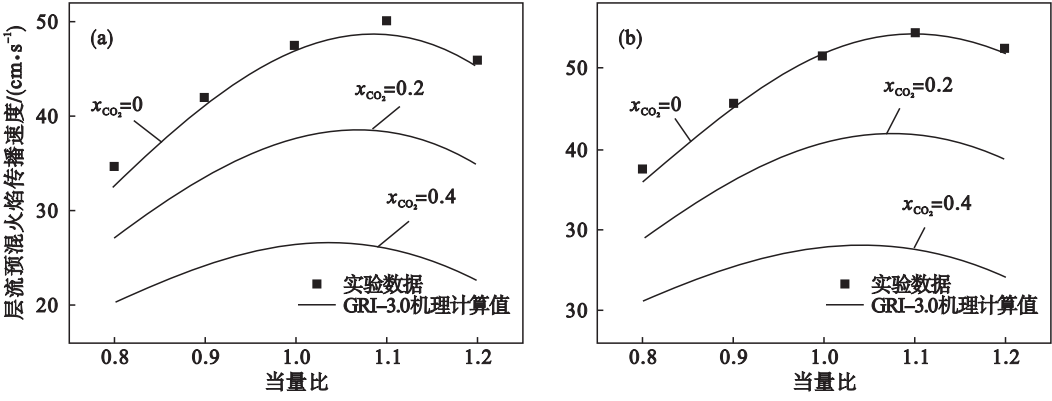


图 4 含有 CO<sub>2</sub> 的掺氢天然气层流预混火焰传播速度  
Fig. 4 Laminar flame speeds of hythane with CO<sub>2</sub> dilution

(a)—x<sub>H<sub>2</sub></sub> = 0.3; (b)—x<sub>H<sub>2</sub></sub> = 0.4.

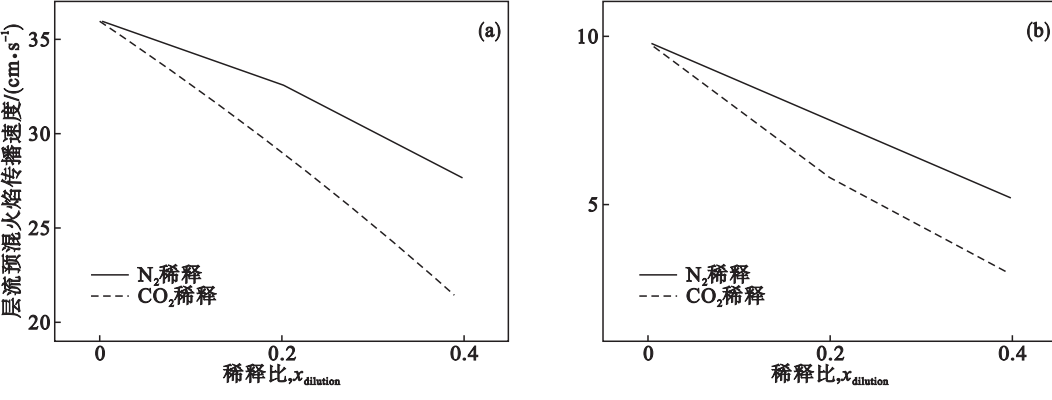


图 5 不同 N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 稀释比下掺氢天然气层流预混火焰传播速度  
Fig. 5 Laminar flame speeds of hythane with different N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> dilution ratios

(a)—φ = 0.8; (b)—φ = 1.8.

2.3.1 热力学效应影响

对于稀释组分的热力学效应主要是由于其本

身的吸热作用导致预混燃料火焰温度下降,从而  
影响燃烧反应的进程,抑制其 S<sub>u</sub>。



从图 6 可以看出,与  $S_u$  模拟计算结果相似,随着  $N_2$  及  $CO_2$  稀释比例的增加,掺氢天然气绝热火焰温度显著下降.且在相同稀释比的条件下, $CO_2$  对其绝热火焰温度的抑制作用强于  $N_2$ ,且随着稀释比的上升, $CO_2$  对其绝热火焰温度的抑制程度进一步提升.由此可知, $CO_2$  对掺氢天然气层流预混火焰传播速度抑制作用的热力学效应显著强于  $N_2$ .

2.3.2 化学动力学效应影响

为分析两种稀释气体在燃烧反应中起到的化学动力学效应,本文模拟计算了不同稀释组分条件下掺氢天然气质量燃烧速率敏感性系数,并从中选取重要自由基,对反应进程中重要自由基浓度的变化进行对比计算.

由图 7 可知,贫燃条件下,反应  $H + O_2 = O + OH$  对于整个燃烧起主导促进作用.随着稀释组分的增加, $H + O_2 = O + OH$  的正敏感性系数不断增加,但稀释组分的加入会降低火焰中自由基  $H$  的浓度,进而抑制该反应的进程及其火焰传播速度.与贫燃条件相比,富燃时火焰中不足的氧气会显著影响  $H_2$  的氧化,进而抑制火焰中自由基  $H, OH$  等的生成,同时火焰中富余的  $CH_4$  会大量消耗自由基  $H, OH$  等.随着预混燃料中稀释组分  $N_2/CO_2$  的加入,生成  $CH_3$  基元反应的负敏感性系数均随着稀释组分的加入显著增加,并进一步加强终止反应  $H + CH_3 (+M) = CH_4 (+M)$  对火焰质量燃烧速度的抑制作用,影响火焰传播速度.

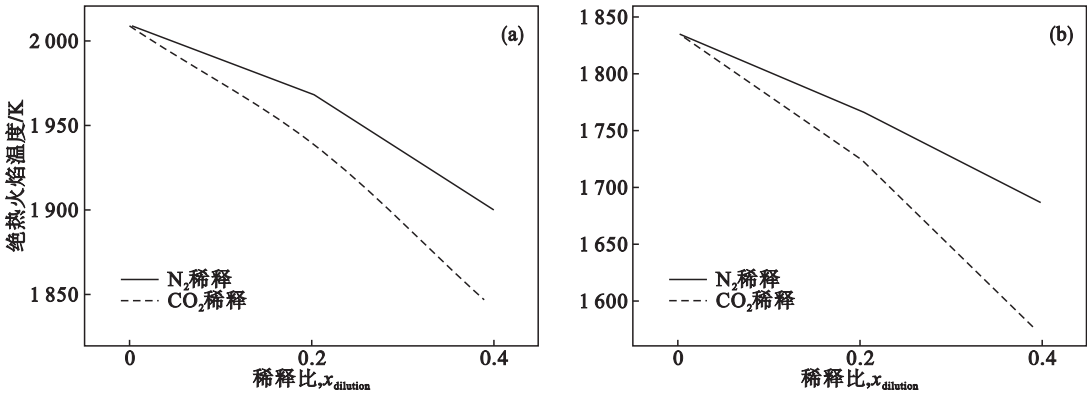


图 6 不同  $N_2/CO_2$  稀释比下掺氢天然气绝热火焰温度  
Fig. 6 Adiabatic flame temperatures of hythane with different  $N_2/CO_2$  dilution ratios  
(a)— $\phi = 0.8$ ; (b)— $\phi = 1.8$ .

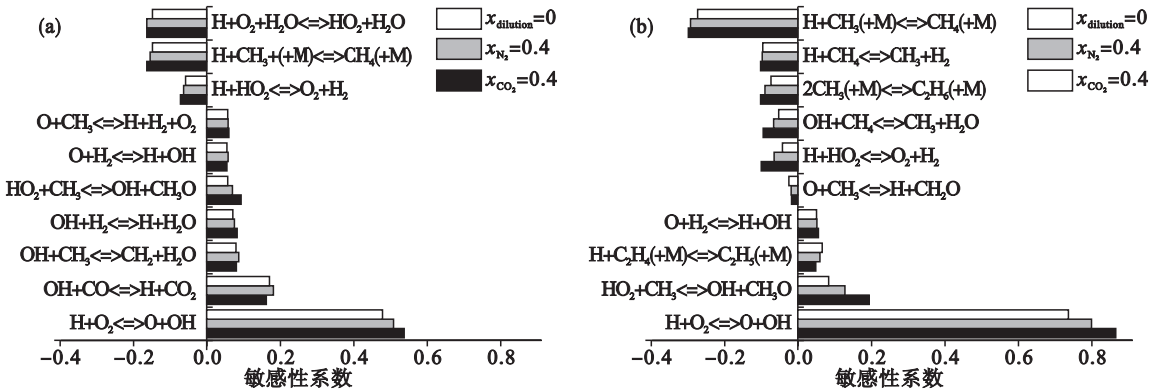


图 7 不同稀释比掺氢天然气质量燃烧速率敏感性分析  
Fig. 7 Sensitivities of mass burning rate of  $CH_4/H_2$ /air with different dilution ratios in terms of chemical kinetic coefficients  
(a)— $\phi = 0.8$ ; (b)— $\phi = 1.8$ .

为详细分析稀释组分化学动力学效应影响,结合敏感性分析,选取重要自由基为  $H, CH_3$ ,对其组分浓度变化进行详细计算,如图 8,图 9 所示. 无论是在贫燃还是富燃条件下, $H, CH_3$  自由基的浓度均随着稀释气体的加入逐渐降低. 贫燃

时,相同稀释比下,加入  $CO_2$  后,自由基浓度降低的幅度要大于  $N_2$ . 富燃时, $CH_4$  浓度的增加使  $OH + CH_4 = CH_3 + H_2O$  的反应速率增加,消耗大量  $OH, CH_4$  生成  $CH_3$ ,此时,对火焰传播起抑制作用,且消耗  $H$  自由基的终止反应  $H + CH_3 (+$

M) = CH<sub>4</sub>( + M) 的反应速率增加, H 自由基浓度降低, 基元反应  $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$  的反应速率降低. 此外, 在贫燃条件下, 随着氢气的加入, 反应中 H 自由基浓度上升, 起主导促进作用的反应  $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$  反应速率加快, 使火焰传播速度增加. 随着 N<sub>2</sub> 或者 CO<sub>2</sub> 的加入,  $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$  相对于未稀释前的敏感性系数增大, 而反应

$\text{OH} + \text{CO} = \text{H} + \text{CO}_2$  则由于加入稀释气体的不同, 变化趋势发生变化, 加入 N<sub>2</sub> 后敏感性系数增大, 加入 CO<sub>2</sub> 后敏感性系数降低. 与 N<sub>2</sub> 相比, CO<sub>2</sub> 的加入, 不仅会显著降低 H, CH<sub>3</sub> 自由基浓度, 同时 CO<sub>2</sub> 会直接作为反应物或以“第三体”的形式参与燃烧, 影响火焰传播速度, 因此 CO<sub>2</sub> 对掺氢天然气层流预混火焰传播速度的稀释效应要强于 N<sub>2</sub>.

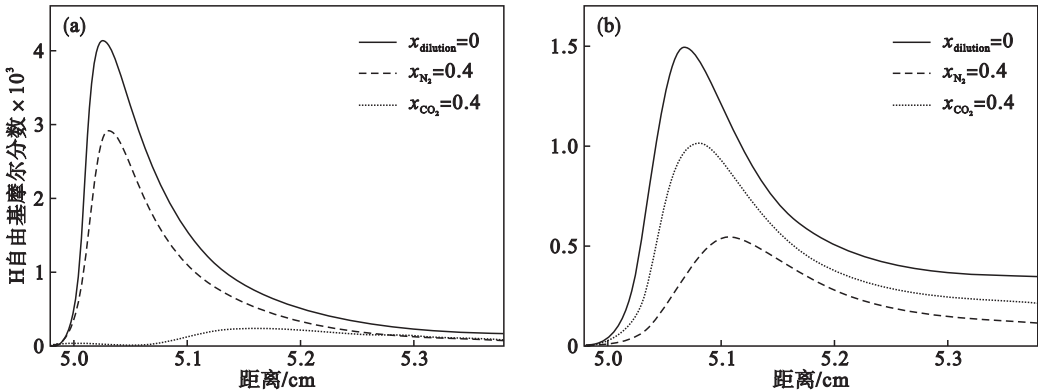


图 8 H 自由基摩尔分数  
Fig. 8 Mole fraction of H radicals  
(a)— $\phi=0.8$ ; (b)— $\phi=1.8$ .

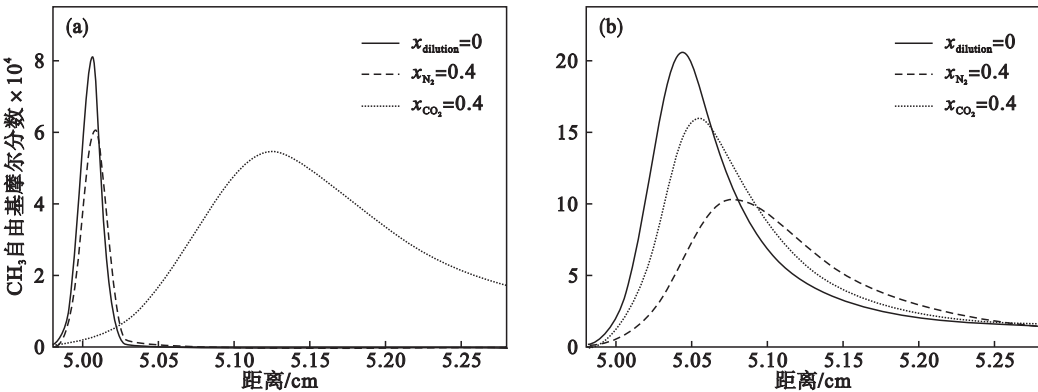


图 9 CH<sub>3</sub> 自由基摩尔分数  
Fig. 9 Mole fraction of CH<sub>3</sub> radical  
(a)— $\phi=0.8$ ; (b)— $\phi=1.8$ .

### 3 结 论

- 1) 随着掺氢比的增加, 掺氢天然气层流预混火焰传播速度逐渐增加, 当掺氢比增加到 0.4 时, 层流预混火焰传播速度峰值从 47.4 cm/s 增加到 54.27 cm/s.
- 2) CO<sub>2</sub> 及 N<sub>2</sub> 稀释组分的加入会显著降低掺氢天然气层流预混火焰传播速度及绝热火焰温度; 随着掺氢天然气稀释组分 CO<sub>2</sub> 及 N<sub>2</sub> 稀释比的增加, 层流火焰传播速度峰值从 54.24 cm/s 降低到 41.22 cm/s.

3) 与 N<sub>2</sub> 相比, CO<sub>2</sub> 对掺氢天然气层流预混火焰传播特性具有显著抑制作用; 除热力学效应, 随着 CO<sub>2</sub> 稀释比的增加, 火焰中重要自由基 H 浓度显著减少, 抑制氧化反应  $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$  对燃烧的主导促进效应, 使预混燃料层流火焰传播速度显著降低.

#### 参考文献:

[1] Kim J S, Park J, Bae D S, et al. A study on methane-air premixed flames interacting with syngas-air premixed flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35 (3): 1390–1400.

[2] Lyu Y, Qiu P, Liu L, et al. Effects of steam dilution on laminar flame speeds of H<sub>2</sub>/Air/H<sub>2</sub>O mixtures at

atmospheric and elevated pressures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43 (15): 7538 – 7549.

[ 3 ] 宋占峰,张欣,胡尚飞,等. CO<sub>2</sub> 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 Zhan-feng, Zhang Xin, Hu Shang-fei, et al. Effect of CO<sub>2</sub> diluent gas on combustion characteristic of laminar flame of premixed hydrogen enriched natural gas and air mixtures [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(5): 408 – 412. )

[ 4 ] Weng W B, Wang Z H, He Y, et al. Effect of N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> dilution on laminar burning velocity of H<sub>2</sub>-CO-O<sub>2</sub> oxy-fuel premixed flame [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(2): 1203 – 1211.

[ 5 ] Zhang Y, Shen W, Zhang H, et al. Effects of inert dilution on the propagation and extinction of lean premixed syngas/air flames[J]. *Fuel*, 2015, 157: 115 – 121.

[ 6 ] Wang Z H, Weng W B, He Y, et al. Effect of H<sub>2</sub>/CO ratio and N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> dilution rate on laminar burning velocity of syngas investigated by direct measurement and simulation [J]. *Fuel*, 2015, 141: 285 – 292.

[ 7 ] Shang R X, Zhang Y, Zhu M M, et al. Laminar flame speed of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> diluted H<sub>2</sub>/CO/air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41 (33): 15056 – 15067.

[ 8 ] Osorio C, Morones A, Hargis J W, et al. Effect of C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>F and C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>F on methane and propane ignition and laminar flame speed; experimental and numerical evaluation [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 48: 21 – 31.

[ 9 ] Mathieu O, Goulier J, Gourmel F, et al. Experimental study of the effect of CF<sub>3</sub>I addition on the ignition delay time and laminar flame speed of methane, ethylene, and propane [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35 (3): 2731 – 2739.

[ 10 ] Park O, Veloo P S, Liu N, et al. Combustion characteristics of alternative gaseous fuels [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 887 – 894.



(上接第 1309 页)

[ 3 ] 石莉,巩亚东,姜增辉. S30T 正交车铣 TC4 钛合金磨损形貌及机理分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38 (8): 1133 – 1136.

( Shi Li, Gong Ya-dong, Jiang Zeng-hui. Experimental analysis toward wear characteristics and mechanisms for S30T tools through orthogonal turning-milling on TC4 titanium alloy [J]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science)*, 2017, 38(8): 1133 – 1136. )

[ 4 ] 孙瑶,巩亚东,刘寅. 慢走丝电火花线切割 TC4 试验研究和参数优化[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37 (7): 979 – 983.

( Sun Yao, Gong Ya-dong, Liu Yin. Experimental research and parameters optimization for low speed wire electrical discharge machining TC4 [J]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science)*, 2016, 37(7): 979 – 983. )

[ 5 ] 杨长盛,朱荻,明平美. 电解研磨复合加工技术在孔后处理中的应用[J]. *电加工与模具*, 2006 (2): 27 – 30.

( Yang Chang-sheng, Zhu Di, Ming Ping-mei. Electrochemical abrasive hybrid machining applied in improving surface quality of fabricated holes [J]. *Electromachining & Mould*, 2006 (2): 27 – 30. )

[ 6 ] Zhou K, Chen Y, Du Z W, et al. Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(5/6/7/8): 997 – 1005.

[ 7 ] Choopani Y, Razfar M R, Saraeian P, et al. Experimental investigation of external surface finishing of AISI 440C stainless steel cylinders using the magnetic abrasive finishing process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(9/10/11/12): 1811 – 1821.

[ 8 ] Lin C T, Yang L D, Chow H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34(1/2): 122 – 130.

[ 9 ] Hung C L, Ku W L, Yang L D. Prediction system of magnetic abrasive finishing (MAF) on the internal surface of a cylindrical tube [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25(12): 1404 – 1412.

[ 10 ] Liu Z Q, Chen Y, Li Y J, et al. Comprehensive performance evaluation of the magnetic abrasive particles [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(1/2/3/4): 631 – 640.

[ 11 ] Jiao A Y, Quan H J, Li Z Z, et al. Study of magnetic abrasive finishing in seal ring groove surface operations [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(5/6/7/8): 1195 – 1205.

[ 12 ] Jiao A Y, Quan H J, Li Z Z, et al. Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(9/10/11/12): 1613 – 1623.

[ 13 ] Yamaguchi H, Kang J, Hashimoto F. Metastable austenitic stainless steel tool for magnetic abrasive finishing [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 339 – 342.