

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-776-08

# 混氢天然气燃烧特性及灭火剂抑制研究

王润晴 谢永亮 陈 兵

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘 要】** 利用 Chemkin-Pro 对混氢天然气层流预混火焰速度进行数值模拟研究, 从化学动力学的角度讨论混氢比对混氢天然气层流预混火焰速度的影响, 结果表明, FFCM1.0 机理能够较准确的预测混氢天然气层流预混火焰速度; 随着混氢比的增加, 混氢天然气的层流预混火焰速度逐渐升高, 在混氢比大于 60% 时, 火焰速度增幅更显著。对三氟甲烷 (HFC-23)、五氟乙烷 (HFC-125)、七氟丙烷 (HFC-227ea) 三种灭火剂抑制层流火焰速度的能力进行研究分析, 发现 HFC-227ea 对层流火焰速度具有更好的抑制效果, 进一步研究了 HFC-227ea 对层流火焰速度的影响。结论表明: 在未观察到不良反应浓度范围内, HFC-227ea 浓度越高, 层流火焰速度越低; 燃烧当量比在 1.5 左右, 该灭火剂对层流火焰速度有增强的效果。

**【关键词】** 混氢天然气; 层流火焰; 七氟丙烷 (HFC-227ea)

中图分类号 TK91 文献标识码 A

## Hydrogen Compressed Natural Gas Combustion Characteristics and Fire Extinguishing Agent Suppression Study

Wang Runqing Xie Yongliang Chen Bing

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** Numerical simulation study on the laminar premixed flame speed of mixed hydrogen natural gas was carried out by Chemkin-Pro, and the effect of hydrogen mixing ratio on the laminar premixed flame speed of mixed hydrogen natural gas was discussed from the perspective of chemical kinetics, and the results showed that the FFCM1.0 mechanism could predict the laminar premixed flame speed of mixed hydrogen natural gas more accurately; the laminar premixed flame speed of mixed hydrogen natural gas rised with the increase of hydrogen mixing ratio, and the flame speed increased more significantly when the hydrogen mixing ratio was more than 60%. The ability of three extinguishing agents, HFC-23, HFC-125 and HFC-227ea, to suppress the laminar flame speed was studied and analysed, and it was found that HFC-227ea had a better suppression effect on the laminar flame speed, and the effect of HFC-227ea on the laminar flame speed was further investigated. The conclusions showed that: in the concentration range where no adverse reaction was observed, the higher the concentration of HFC-227ea, the lower the laminar flame speed; with a burning equivalence ratio of about 1.5, the extinguishing agent had an enhanced effect on the laminar flame speed.

**【Keywords】** hydrogen compressed natural gas; Laminar flame speed; HFC-227ea

## 0 引言

传统化石能源的燃烧造成温室气体排放, 是引

起全球气候变暖的重要因素。为缓解全球气候升温, 世界各国大力发展可再生能源。氢能无碳化、

可再生的特点,使其在未来的能源应用领域具有先天优势和广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。氢能产业分为上游制氢、中游储运、下游应用,涉及制氢、储氢、运氢、加氢、用氢等环节<sup>[2]</sup>,其中,氢能产业链的中游储运环节是氢能产业发展规模化的关键环节之一,但目前氢气储运设施不完善,适用于氢气长距离,大规模运输的方案主要是管道运输。在我国,纯氢管道建设进展缓慢(总里程约为 100km),未能满足当前大规模氢能应用的需求<sup>[3]</sup>,利用现有的天然气管网运输掺混了一定比例氢气的天然气可作为氢能利用的过渡手段。2000 年之后,国内外相继开展了关于天然气管道混氢技术的应用研究,截至 2022 年,国内外开展了 13 个天然气管道混氢氢气示范项目<sup>[4]</sup>。近年来,我国的天然气运输管道基本成型。4 月 10 日,“西氢东送”输氢管道示范工程已被纳入《石油天然气“全国一张网”建设实施方案》,标志着我国氢气长距离输送管道进入新发展阶段<sup>[5]</sup>。

氢气与天然气性质相差很大,故混氢天然气 HCNG (hydrogen compressed natural gas) 泄漏、积聚、燃烧、爆炸等事故特征及规律与常规天然气存在差异<sup>[6]</sup>,利用天然气管道运输混氢天然气,也会带来一系列的适应性问题,使运输过程中的风险增加<sup>[7]</sup>。对高压管道,氢气的混入会使管道的疲劳寿命降低,由于氢气的密度小,易扩散,增加了气体泄漏与燃烧爆炸的风险,且该风险会随着混氢比例的增加逐渐升高。在现有的天然气管道中掺入体积分数为 20% 及以下的低浓度氢气,会导致轻微的点火风险,使爆炸严重程度增加;当体积分数超过 50% 时,爆炸超压将显著增加<sup>[8]</sup>。因此,混氢天然气泄漏将造成严重事故后果,开展混氢天然气泄漏扩散研究具有现实意义。

目前关于氢气与天然气的泄漏扩散研究主要有实验方法和数值模拟,刘明玮等<sup>[9]</sup>对纯氢气火焰、氢气/甲烷扩散火焰的层流火焰速度进行了分析,得出层流火焰速度随氢气的体积分数增加呈指数增长的结论;Zhang 等<sup>[10]</sup>使用气体爆炸软件 FLACS 对公用隧道中的气室爆炸进行了研究,燃料为 3 种不同比例的混氢天然气,结果表明,随着 H<sub>2</sub> 比例的增加,相同体积的气云会导致更高的超压,10% H<sub>2</sub> 和 20% H<sub>2</sub> 的超压分别增加 16% 和 32%;Lowe smith 等<sup>[11]</sup>对混氢天然气在家庭房间中的泄

漏、积聚进行研究,发现气体积聚在水平面上是均匀的,且仅随地板以上的高度而变化。可见目前在混氢天然气泄漏方面的研究已经取得了很大的进展,但对混氢天然气泄漏后添加灭火剂对其燃烧特性影响的相关研究还较少。

## 1 Chemkin-Pro 模型简介及机理验证

本文主要使用数值模拟的方法,从化学动力学的角度研究混氢天然气的燃烧特性,分析混氢比对层流火焰速度的影响;针对气体泄漏添加灭火剂后,其层流火焰速度随混氢比及灭火剂稀释比的变化进行研究分析,为预防控制混氢天然气火灾爆炸事故提供依据及科学指导。

### 1.1 控制方程

Chemkin-Pro 软件是一款化学动力学仿真器,是对理想化的反应流进行建模,常用于对燃烧过程、催化过程、化学气相沉积、等离子体及其他化学反应的模拟。Chemkin-Pro 提供多种反应器模块,包括层流燃烧火焰速度计算模型、均质燃烧模型、预混燃烧模型等。本研究主要对混氢天然气在空气中的燃烧特性进行模拟分析,模拟过程中输入相应的气相化学文件、物质热力学文件及输运文件。计算时选择该软件中的预混层流火焰速度计算器模型 Premixed Laminar Flame Speed Calculation。该模型是一个具有质量、能量和物种守恒方程的准一维等压系统<sup>[13]</sup>。

假设一维流动具有均匀的入口条件,控制守恒方程简化为:

$$\dot{M} = \rho u A \quad (1)$$

$$\dot{M} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} (\lambda A \frac{dT}{dx}) + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_k c_{pk} \frac{dT}{dx} + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \dot{w}_k h_k W_k + \frac{A}{c_p} \dot{Q}_{rad} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) - A \dot{w}_k W_k = 0 (k=1, \dots, K_g) \quad (3)$$

$$\rho = \frac{P \bar{W}}{RT} \quad (4)$$

式中:  $x$  为空间坐标;  $\dot{M}$  为质量流量;  $T$  为温度;  $Y_k$  为第  $k$  种物质的质量分数;  $P$  为压力;  $u$  为流体混合物的速度;  $\rho$  为质量密度;  $W_k$  为第  $k$  种物质的分子量;  $\bar{W}$  为混合物的平均分子量;  $R$  为通用气体常数;  $\lambda$  为混合物的导热系数;  $c_p$  为混合物的

恒压热容； $c_{pk}$ 为第  $k$  种物质的恒压热容； $\dot{\omega}_k$ 为单位体积中第  $k$  种物质的化学反应产生的速率； $h_k$ 为第  $k$  种物质的比焓； $V_k$ 为第  $k$  种物质的扩散速度； $\dot{Q}_{rad}$ 为气体和粒子辐射造成的热损失； $A$ 为火焰流管的横截面积（通常由于热膨胀而增加），由燃烧区域归一化。

层流火焰速度不仅是表征火焰燃烧特性的一个重要参数，也是影响燃料燃烧状况和效率的重要因素。与甲烷燃料相比，氢气具有更高的燃烧极限及层流火焰速度，在天然气中掺混氢气可以使预混燃气的层流火焰速度提高，拓宽燃烧极限。混氢比对火焰自由基浓度、特征尺度、辐射特性、温度特性、污染物排放、火焰稳定性等都有影响<sup>[14]</sup>。通过对混氢天然气层流火焰速度的计算，分析混氢比的影响。

混氢天然气中混氢比  $X_{H_2}$  定义为：

$$X_{H_2} = \frac{x_{H_2}}{x_{H_2} + x_{CH_4}} \quad (5)$$

式中： $x_{H_2}$ 为氢气的摩尔分数； $x_{CH_4}$ 为甲烷的摩尔分数。

### 1.2 机理验证与选择

计算时设置压力为 101.325kPa，温度为环境温度 298K，计算域选取-3~15cm，入口流速为 40cm/s。模拟计算设置如表 1 所示。

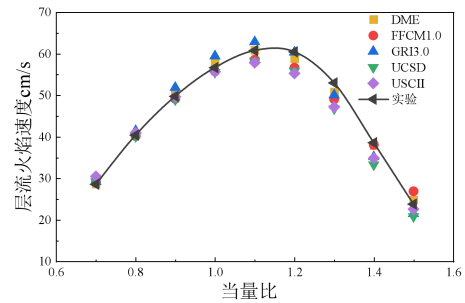
表 1 氢气与甲烷物理性质对比表<sup>[12]</sup>

Table 1 Comparative table of physical properties of hydrogen and methane<sup>[12]</sup>

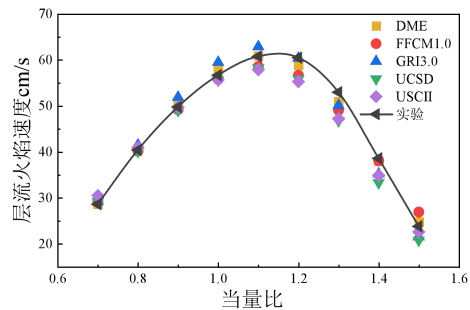
物理性质	氢气 (H <sub>2</sub> )	甲烷 (CH <sub>4</sub> )
分子量 g/mol	2.02	16.04
密度 (1atm, 0℃) g/L	0.089	0.716
临界温度 K	33.2	190.65
临界压力 10 <sup>6</sup> Pa	13.15	45.4
低位热值 (10 <sup>5</sup> kPa) MJ/m <sup>3</sup>	11	35
高位热值 (10 <sup>5</sup> kPa) MJ/m <sup>3</sup>	13	39
最高火焰温度 K	1800	1495
爆炸极限%	18.2-58.9	5.7-14
可燃性限制%	4.1-74	5.3-15
黏度 10 <sup>-6</sup> Pa/s	9	11
分子扩散系数 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	6.1	1.6

FFCM 1.0（基础燃料化学模型）是一个小碳氢化合物的燃料燃烧反应模型<sup>[15]</sup>，包含 291 个反应及 38 种物质；GRI-Mesh 3.0 化学机理是一种优化的

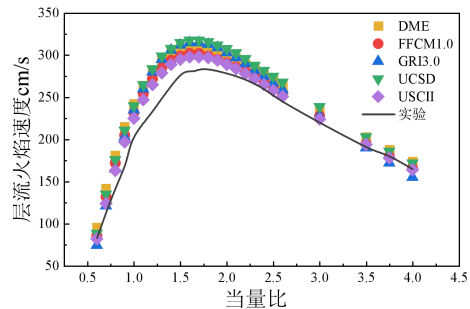
专门针对天然气燃烧的反应机理<sup>[16]</sup>，此机理也包括氢的详细燃烧反应，包括 325 个反应，涉及 53 种物质；USC II 反应机理由南加州大学王海教授开发<sup>[17]</sup>，旨在代表各种燃烧场景，适用于从 C<sub>0</sub>-C<sub>4</sub> 的多种燃烧过程，具有 111 个可逆反应，784 种物质；UCSD（圣地亚哥）机理重点关注与火焰、高温点火和爆炸相关的条件，适用于燃烧和爆炸过程，该机理包括 270 个反应和 58 种物质。DME（二甲醚）燃烧机理种的 C<sub>1</sub> 反应模块包含了 CH<sub>4</sub> 的氧化反应，该机理可用于甲烷和氢气的燃烧反应模拟。为了验证用于模拟层流火焰速度的反应机理的精确性，使用上述五种化学反应机理进行模拟计算，并将计算的混氢天然气的层流火焰速度与实验数据<sup>[18-20]</sup>进行对比，其结果如图 1 所示。



(a) 0%H<sub>2</sub>



(b) 50%H<sub>2</sub>



(c) 100%H<sub>2</sub>

图 1 混氢天然气模拟的层流火焰速度与实验数据对比

Fig.1 Comparison of laminar flame speeds simulated for hydrogen compressed natural gas with experimental data

表 2 各个机理的误差值统计

Table 2 Statistics of error values for each reaction

机理	mechanism			平均值
	CH <sub>4</sub> %	CH <sub>4</sub> -50%H <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	
USC II	5.83	5.42	5.41	5.55
UCSD	6.67	6.26	11.76	8.23
GRI 3.0	5.96	4.65	10.04	6.88
FFCM 1.0	4.81	4.05	7.19	5.35
DME	3.34	1.93	11.93	5.73

经过计算可知, USC II、UCSD、GRI 3.0、FFCM 1.0、DME 五种反应机理在三种混氢比下的模拟结果的平均误差分别为: 5.55%、8.23%、6.88%、5.35%、5.73%, 其中 FFCM 1.0 机理与实验比较时偏差最小, 因此, 最终选择 FFCM 1.0 作为反应机理进行后续研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同混氢比对层流火焰速度的影响

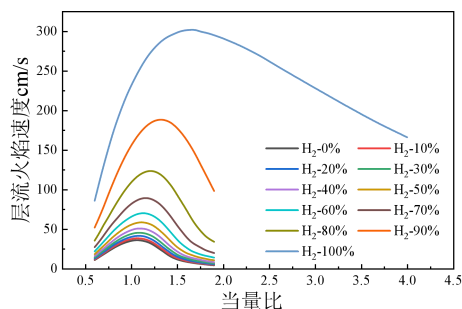


图 2 不同混氢比下混氢天然气层流火焰速度

Fig.2 Hydrogen compressed natural gas laminar flame speed at different hydrogen mixing ratios

图 2 描述了层流火焰速度随混氢比与当量比变化的关系, 同一当量比下燃料的层流火焰速度随着混氢比的增加逐渐升高, 且随着混氢比的增加, 层流燃烧速度峰值对应的当量比朝着更富的方向移动。当量比为 0.6, 混氢比  $X_{H_2}$  以 10% 的间隔在 10%–100% 范围内增加时, 燃料的火焰速度为甲烷的 1.08 倍、1.17 倍、1.29 倍、1.45 倍、1.68 倍、2.01 倍、2.50 倍、3.26 倍、4.78 倍、7.92 倍。当  $X_{H_2} > 80\%$  时, 层流火焰速度急剧上升,  $X_{H_2} = 60\%$ , 火焰速度约为甲烷的 2 倍,  $X_{H_2} < 60\%$  的情况下, 层流火焰速度的增加较为缓慢。这与 Hu 等<sup>[21]</sup>的研

究结论类似, Hu 等根据燃料混合物中含氢量将燃烧过程分为 3 个状态:  $X_{H_2} < 60\%$  时为甲烷主导燃烧机制,  $60\% < X_{H_2} < 80\%$  时为过渡机制,  $X_{H_2} > 80\%$  时为甲烷抑制氢燃烧机制, 也可将其称为氢主导燃烧机制<sup>[13]</sup>。无论是贫燃侧还是富燃侧, 氧化反应  $H + O_2 = O + H_2$  对整个燃烧过程起主要的促进作用<sup>[22]</sup>, 随着  $H_2$  比例的增加, 该反应涉及的 H 基、O 基和 OH 基浓度增大, 化学反应增强, 燃烧速度越大。

### 2.2 灭火剂对层流火焰速度的影响

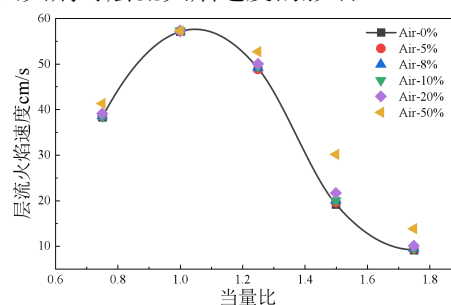


图 3 混氢比为 30% 时空气稀释对层流火焰速度的影响

Fig.3 Effect of air dilution on laminar flame velocity at 30% hydrogen mixing ratio

由图 4 可知, 在混氢天然气中喷入 50% 以内比例的空气, 并没有使层流火焰速度降低, 且在贫燃及富燃区燃料的层流火焰速度升高, 故空气不能达到灭火的效果, 因此考虑向燃料内喷入灭火剂以达到抑制火焰的目的。

三氟甲烷 (HFC-23)、五氟乙烷 (HFC-125) 和七氟丙烷 (HFC-227ea) 三种典型的氢氟烃 (HFCs) 是目前常用的哈龙替代型灭火剂, 具有清洁高效、性能可靠且无残留的特性<sup>[23]</sup>。对上述三种氢氟烃灭火剂的灭火特性进行对比, 在当量比为 1.0 且稀释比 (添加灭火剂浓度) 为 8% 时, 分别添加三种灭火剂对应的层流火焰速度如图 3 所示。

表 3 灭火剂主要物理性质

Table 3 Main physical properties of extinguishing agents

灭火剂	分子 质量	沸点 / °C	汽化 潜热 / kJ/kg	临界 温度 / °C	临界 压力 / MPa	临界 密度 / kg/L
HFC-23	70.0	-84.4	241.3	25.9	4.8	0.525
HFC-125	120.0	-48.1	164.1	66.0	3.6	0.568
HFC-227ea	170.0	-16.4	132.6	101.7	2.9	0.621

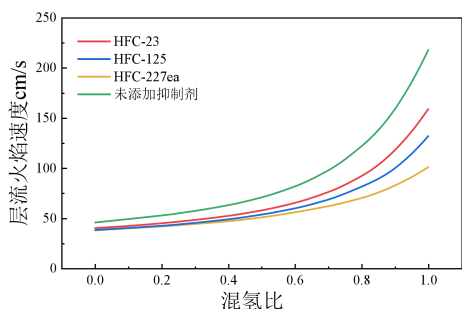


图 4 不同灭火剂对层流火焰速度的影响

Fig.4 Effect of different extinguishing agents on laminar flame speed

HFCs 类灭火剂的灭火机理主要包括物理机理和化学机理，物理机理即喷射出的 HFCs 在高温作用下发生气化的同时吸热分解，导致火场温度降低，使自由基链式反应减慢实现灭火；另一方面 HFCs 在高温场中热分解生成含氟自由基，与燃烧自由基 H, O, OH 反应实现化学抑制灭火<sup>[23]</sup>。由图 3 可知混氢比越大，灭火剂对混氢天然气的层流火焰速度降低的效果越明显，且 HFC-227ea 的抑制效果最好，HFC-23 的抑制效果最差。研究发现，HFC-227ea (CF<sub>3</sub>CHF<sub>2</sub>) 受热分解产生 CF<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>CFO, 和 CFO 等含氟自由基，含氟自由基与燃烧自由基反应，使燃烧反应中断<sup>[24,25]</sup>。Han 等<sup>[26]</sup>认为 CHF<sub>3</sub> 与 CH<sub>4</sub> 的一系列反应时通过 H 自由基引发的，掺混 H<sub>2</sub> 使 H 自由基浓度增加，故随着混氢比的升高其灭火效果越好。

### 2.2.1 HFC-227ea 对层流火焰速度的影响

燃料混氢比为 30%，不同稀释比对层流火焰速度的影响如图 5 所示，在贫燃区，稀释比越高，燃料的层流火焰速度越低。在当量比  $\phi=1.5$  时，稀释比  $\leq 20\%$  会使层流火焰速度升高，这说明在富燃的情况下，灭火剂有增强燃烧的作用。稀释比=30% 使得层流火焰速度略有下降，约为 0.37%。HFC-227ea 的加入使反应区内混氢天然气和空气的浓度大大稀释，并减少了甲烷分子、氢气分子与氧分子碰撞的机会，从而使层流火焰速度降低<sup>[27]</sup>。对于不同混氢比的混氢天然气，添加相同稀释比的 HFC-227ea 灭火剂，对层流火焰速度的抑制效果与未添加稀释剂时趋势等同，随着混氢比的增加，层流火焰速度逐渐升高。

由图 7 可知，随着灭火剂的浓度升高，层流火焰速度越小，即灭火效果越好，但 HFCs 热分解后产生的高浓度 HF 有一定的毒性，达到一定浓度后，

对人体和设备都会造成损害。HFC-227ea 未观察到不良反应的浓度为 9%，观察到不良反应的浓度为 10.5%<sup>[28]</sup>，在实际灭火中，为保证防护区内人员安全，灭火剂浓度设计一般不超过 9%，超过 9% 的防护区增设手动与自动控制的转换装置。在本文研究中，当量比为 1，分别添加 2%、5%、8% 浓度的 HFC-227ea 灭火剂，H<sub>2</sub> 的层流火焰速度为：187.96cm/s、149.60cm/s、101.25cm/s，降幅分别为：13.74%、31.34%、53.53%。在对天然气管网系统不做改变的情况下，最高可加入 20% 比例的氢气<sup>[29]</sup>，此时，HFC-227ea 浓度为 8% 时，层流火焰速度为 41.75cm/s，降幅 20.96%。

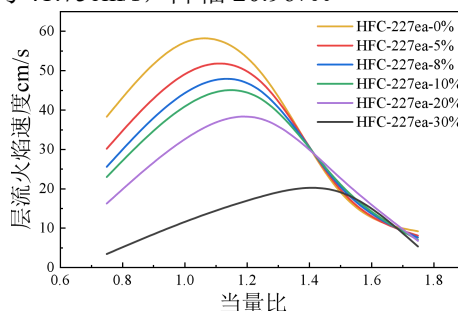


图 5 不同稀释比对层流火焰速度的影响

Fig.5 Effect of different dilution ratios on laminar flame speed

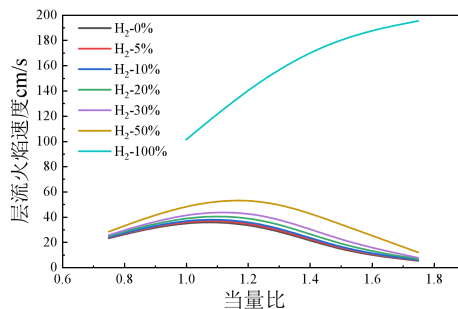


图 6 稀释比为 8% 时，混氢比对层流火焰速度的影响

Fig.6 Effect of hydrogen mixing ratio on laminar flame speed at 8% dilution ratio

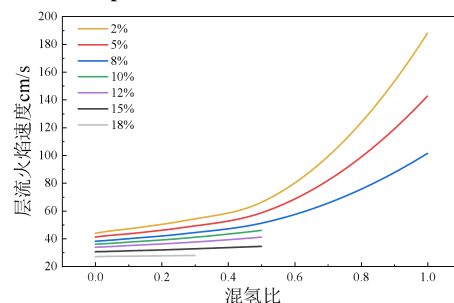


图 7 当量比为 1 时，HFC-227ea 浓度对层流火焰速度的影响

Fig.7 Effect of HFC-227ea concentration on laminar flame speed at an equivalence ratio of 1

### 2.2.2 HFC-227ea 敏感性分析

混氢比为 30%、50%、70%、90% 时, 在当量比为 1 时, 各基元反应对层流火焰速度的敏感性分析结果如图 8, 图中只显示了敏感性最高的前 10 个基元反应。研究发现, 基元反应 R1、R15、R97 是 4 种混氢比下敏感性反应中共有的。R1 是链分支反应, 不同混氢比下 R1 基元反应敏感性系数的最大最小值如表 4 所示, 可知, 随着氢气浓度的增大, R1 反应的敏感性系数的绝对值逐渐减小, 即 R1 反应对层流燃烧速度的抑制和促进效果随着氢气比例的增加而减小。对于 R15 反应式, 在高浓度氢气比例时, 对层流火焰速度表现出与中低氢气比例完全相反的抑制作用, 且随氢气浓度增加抑制效果增强。

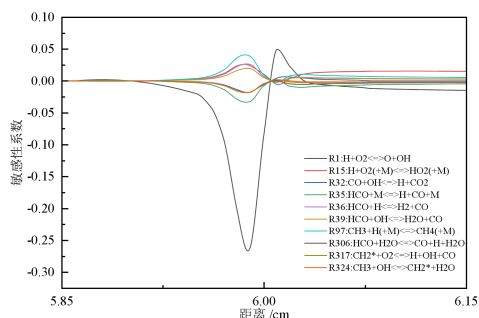
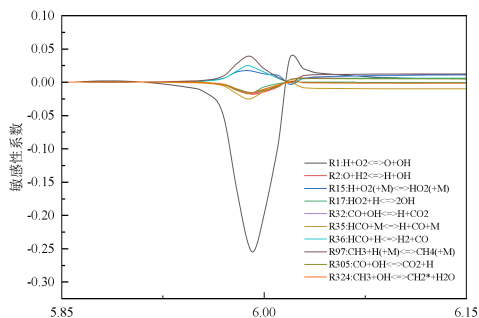
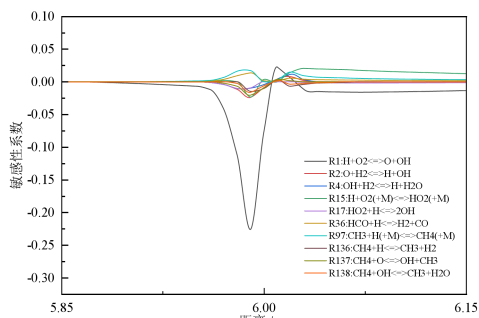
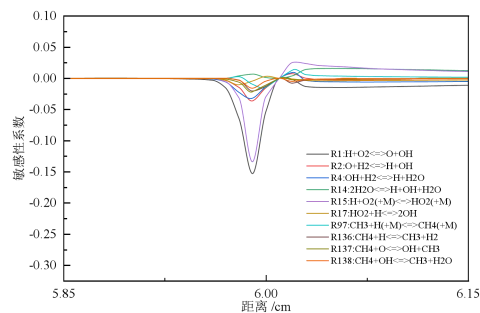
(a) 30% $\text{H}_2$ (b) 50% $\text{H}_2$ (c) 70% $\text{H}_2$ (d) 90% $\text{H}_2$ 

图 8 不同混氢比下敏感性系数分析

Fig.8 Sensitivity coefficient analysis at different hydrogen mixing ratios

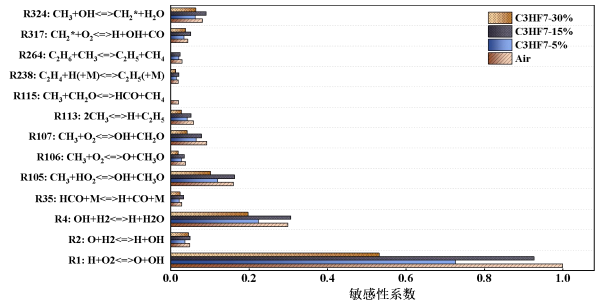
表 4 不同混氢比下 R1 基元反应浓度最大最小值

Table 4 Maximum and minimum values of reaction concentration of R1 base element under different hydrogen mixing ratios

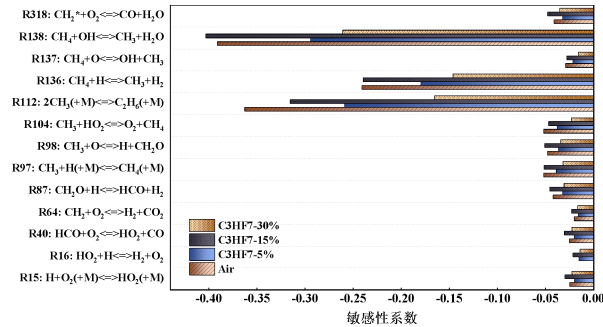
类别	30% $\text{H}_2$	50% $\text{H}_2$	70% $\text{H}_2$	90% $\text{H}_2$
最大值	0.0525	0.0426	0.0273	0.0054
最小值	-0.2774	-0.2660	-0.2304	-0.1546

在当量比 $\phi=1.0$ 时, 不同混氢比(30%、50%、70%、90%)下添加不同浓度的 HFC-227ea 灭火剂对层流火焰速度的敏感性分析如图 9 所示, 为了便于比较, 本文将敏感性系数为正值与负值的基元反应进行了分类表示。在 4 个混氢比中, 基元反应 R1、R4 的正敏感性系数远大于其他基元反应, 其中 R1 反应对从层流火焰速度的促进作用最大, 这是因为 R1 反应生成的 O 和 OH 自由基提高了反应的链支化效率, 并且 O 和 OH 自由基在反应中浓度最高, 因此 R1 反应的正敏感性系数最大, 促进混氢天然气的层流火焰速度升高; R4 反应消耗 OH 和  $\text{H}_2$  自由基, 生成一个 H 自由基与  $\text{H}_2\text{O}$ , 促进了 H 自由基浓度的提高, 具有较大的正敏感性系数。加入 HFC-227ea 灭火剂后, R1、R4 的敏感性系数依然远大于其他基元反应, 混氢比为 90% 时, 随着灭火剂浓度的增加, R1、R2、R4 的敏感性逐渐减弱。混氢比为 50% 与 70% 时, 由图可知, 绝大部分基元反应的敏感性在 HFC-227ea 添加比例为 5% 时最高, 这与混氢比为 30% 时的结果正好相反。在负敏感性系数的基元反应中, 混氢比为 30% 及 50% 时, R112、R136、R138 为敏感性系数最大的三个基元反应; 混氢比为 70% 及 90% 时, 敏感性最大的三个基元反应均为 R136、R138、R137, 可见随着混氢比的增加, R112 的敏感性系数绝对值逐渐降

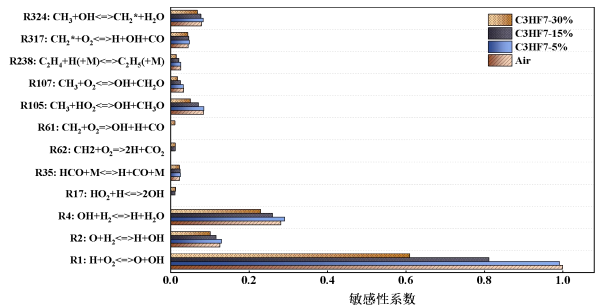
低，即对层流火焰速度的抑制作用逐渐降低。



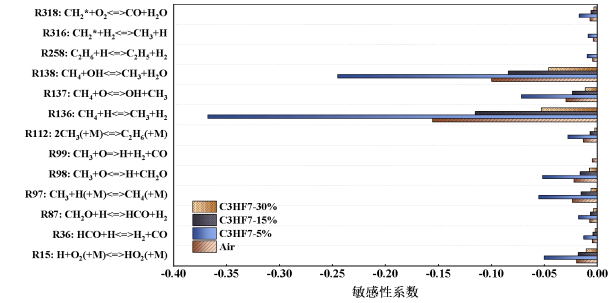
(a) 30% $H_2$



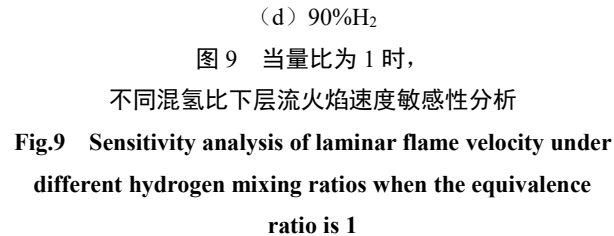
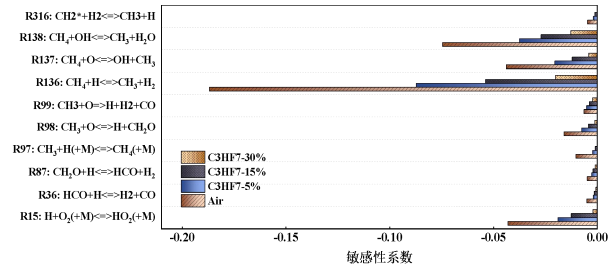
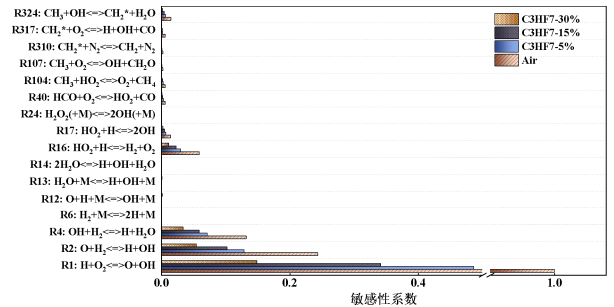
(b) 50% $H_2$



(c) 70% $H_2$



(d) 90% $H_2$



### 3 结论

对混氢天然气的燃烧特性进行模拟研究，分析了混氢比、灭火剂及灭火剂稀释比对混氢天然气层流火焰速度的影响，得出如下结论。

(1) USC II、UCSD、GRI 3.0、FFCM 1.0、DME 五种机理中，FFCM 1.0 机理能更准确的预测混氢天然气层流火焰速度。

(2) 在相同当量比下，混氢天然气的层流火焰速度随混氢比的增加逐渐升高；在相同混氢比下，层流火焰速度随当量比的增加呈先增大后减小的趋势，其峰值对应的当量比随混氢比的增加逐渐

图9 当量比为1时，不同混氢比下层流火焰速度敏感性分析  
Fig.9 Sensitivity analysis of laminar flame velocity under different hydrogen mixing ratios when the equivalence ratio is 1

变大。

(3) 三氟甲烷、五氟乙烷、七氟丙烷三种灭火剂,其中七氟丙烷对层流火焰速度的抑制效果最好。

(4) 随着七氟丙烷灭火剂浓度的升高,对层流火焰的抑制效果越来越好。但低浓度的HFC-227ea灭火剂对于富燃(当量比=1.5左右)火焰有增强燃烧的作用。

(5) 在相同当量比下,随着混氢天然气中氢气比例的增加,基元反应  $H+O_2 \leftrightarrow O+OH$  的反应速率逐渐降低,其对层流火焰速度的促进及抑制效果均减小,  $2CH_3+(M) \leftrightarrow C_2H_6+(M)$  反应的敏感性系数逐渐降低的同时  $CH_4+O \leftrightarrow OH+CH_3$  反应的敏感性系数逐渐升高。

#### 参考文献:

- [1] 沈丹丹,姚才华,刘京京.碳中和背景下天然气掺氢应用与关键技术研究[J].上海节能,2022,(3):6.
- [2] 彭苏萍.氢能产业链急需自主技术突破[J].中国石油企业,2021,(3):13.
- [3] 仲冰,张学秀,张博,等.我国天然气掺氢产业发展研究[J].中国工程科学,2022,(3):100-107.
- [4] 李凤,董绍华,陈林,等.掺氢天然气长距离管道输送安全关键技术与进展[J].力学与实践,2023,45(2):230-244.
- [5] 张翼.能源转型加速逐“绿”前行[N].光明日报,2023-05-18(015).
- [6] 李茜璐,唐柳怡.混氢天然气在终端管网中应用的研究进展[J].油气储运,2022,(4):41.
- [7] 潘耕裕,臧子璇,黄小美,等.天然气掺氢输送与应用安全性研究综述[J].煤气与热力,2021,41(9):29-35V0043, V0044.
- [8] 蒋庆梅,张小强.氢气与天然气长输管道线路设计ASME标准对比分析[J].压力容器,2015,32(8):44-49, 25.
- [9] 刘明玮,竺文惠.氢气/甲烷扩散火焰特性实验研究[J].能源研究与管理,2017,(4):4.
- [10] Zhang X P S. Numerical simulation on methane-hydrogen explosion in gas compartment in utility tunnel[J]. Transactions of The Institution of Chemical Engineers. Process Safety and Environmental Protection, Part B, 2020,140(1).
- [11] Lowesmith B J, Hankinson G, Spataru C, et al. Gas build-up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009,34(14):5932-59392.
- [12] Tabkhi F, Azzaro-Pantel C, Piboul-eau L, et al. A mathematical framework for modelling and evaluating natural gas pipeline networks under hydrogen injection[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33(21): 6222-6231.
- [13] 张永翔.掺氢对甲烷点火和层流燃烧影响的化学动力学研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [14] 肖华华,赵春祥.掺氢甲烷非预混射流火研究现状及展望[J].安全与环境学报,2022,22(6):3094-3103.
- [15] Smith G P, Tao Y, Wang H. Foundational Fuel Chemistry Model Version 1.0 (FFCM-1)[DB/OL]. <http://nanoenergy.stanford.edu/ffcm1>, 2016[05.10.2023].
- [16] Smith G P, Golden D M, Frenklach M, et al. GRI-Mech (GRI-Mech 3.0)[DB/OL]. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>, [05.10.2023].
- [17] Wang H, You X, Joshi A V, et al. High-Temperature Combustion Reaction Model of H<sub>2</sub>/CO/C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> C<sub>0</sub> compounds[DB/OL]. [http://ignis.usc.edu/USC\\_Mech\\_II.htm](http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm), 2007[05.10.2023].
- [18] Ilbas M, Crayford A P Yilmaz, et al. Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: An experimental study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31(12):1768-1779.
- [19] Nilsson E J K, Van Sprang A, Larfeldt J, et al. The comparative and combined effects of hydrogen addition on the laminar burning velocities of methane and its blends with ethane and propane[J]. Fuel, 2017, 189(feb.1):369-376.
- [20] Tse S D, Zhu D L, Law C K. Morphology and burning rates of expanding spherical flames in H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/inert mixtures up to 60 atmospheres[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000,28(2):1793-1800.
- [21] Hu E, Huang Z, He J, et al. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009,34(11):4876-4888.
- [22] 尚融雪,杨悦,李刚.高温下掺氢天然气层流预混火焰传播特性[J].东北大学学报:自然科学版,2021,42(8):7.



## 参考文献:

- [1] 冉均均,袁磊.暖通空调节能系统的测温数值模拟仿真研究[J].微型电脑应用,2022,38(7):114-120.
- [2] 李晓彤,崔承刚,杨宁,等.基于强化学习的中央空调系统温度控制与节能[J].计算机仿真,2021,38(4):198-224.
- [3] 何结龙,周仄,李克凡,等.基于 Spring Boot 的空调能耗智能控制系统的设计与实现[J].电脑知识与技术:学术版,2021,(3):109-112.
- [4] 白燕,武璐璐,贺引娥,等.基于动态温度调控的空调系统能耗预测[J].系统仿真学报,2022,34(2):366-375.
- [5] 孙增利,王亚峰.基于树莓派的自适应暖通空调自动控制系统[J].微型电脑应用,2021,37(10):42-45.
- [6] 喻锴,张九根,朱元.中央空调冷冻水系统遗传蚁群算法优化控制研究[J].现代电子技术,2019,42(11):135-139.
- [7] 于丹,王丽娜,曹勇,等.数据分布特性对空调系统能耗预测的影响[J].科学技术与工程,2020,20(14):5723-5728.
- [8] 张桂荣.暖通空调系统中新型传感器的应用[J].计算机仿真,2020,37(2):467-470.
- [9] 王定奥,刘清倦,戴伟,等.基于 BP 神经网络的空调能耗预测与监控系统[J].现代电子技术,2019,42(22):140-144.
- [10] 夏麟,刘剑,喻伟,等.基于空调系统能耗限额控制的上海某办公建筑运行效果分析研究[J].暖通空调,2020,50(5):26-33.
- [11] 曹馨匀,喻伟,熊杰,等.基于能耗限额的夏热冬冷地区居住建筑节能技术方案[J].暖通空调,2022,52(7):41-52.
- [12] 王斌,高岩,李瑞.集中空调系统变水温和变风量节能优化控制[J].现代电子技术,2019,42(5):141-144.

## (上接第 783 页)

- [23] 冒爱琴,丁赔偿,丁梦玲,等.哈龙替代型含氟灭火剂灭火过程中 HF 生成及灭火机理研究进展[J].过程工程学报,2016,(4):714-720.
- [24] Hynes R G, Mackie J C, Masri A R. Inhibition of Premixed Hydrogen-Air Flames by 2-H Heptafluoropropane[J]. Combustion & Flame, 1998, 113(4):554-565.
- [25] Hynes R G, Mackie J C, Masri A R. Sample Probe Measurementson a Hydroge-nEthaneAir2-H-Heptafluoropropane Flame[J]. Energy Fuels, 1999,13(2):485-492.
- [26] Han W, Kennedy E M, Kundu S K, et al. Experimental and chemi-cal kinetic study of the pyrolysis of trifluoroethane and the reactionof trifluoromethane with methane[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2010,131(7):751-760.
- [27] Wang S, Cai Y, Guo H, et al. Effect of fuel concentration, inert gas dilutions, inert gas-water mist twin fluid medium dilutions, and end boundary condition on overpressure transients of premixed fuel vapor explosion[J]. Fuel: A journal of fuel science, 2022, (Feb.1):309.
- [28] 倪照鹏,姜明理,潘复兴.哈龙气体替代应用技术——七氟丙烷灭火剂与系统[J].给水排水,2002,(6):54-59.
- [29] 于子龙,张立业,宁晨,等.天然气掺氢管道运输及终端应用[J].力学与实践,2022,44(3):12.