doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240204

O_2/CO_2气氛下初始压力对CH_4/H_2可燃下限的影响

尚融雪，谭鑫悦，孙奇琪，曹毓璐
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：针对O_2/CO_2气氛下掺氢天然气燃烧的火灾爆炸危险性，通过实验及数值模拟研究了初始压力对$O_2/CO_2/CH_4/H_2$混合物可燃下限的影响机制．结果表明：预混燃气可燃下限随掺氢比和氧含量增加而逐渐降低，且Le Chatelier公式能准确预测不同初始压力下预混燃气的可燃下限．高初始压力下，随掺氢比增加，OH自由基摩尔分数增加，$OH+H_2=H+H_2O$反应促进整体燃烧的作用增强；随氧含量增加，H自由基摩尔分数增加，减弱$H+O_2+M=HO_2+M$反应对近极限预混燃烧的抑制作用．随着初始压力升高，预混燃气可燃下限降低，同时OH自由基摩尔分数下降，$HO_2+CH_3=OH+CH_3O$反应促进整体预混燃烧的作用增强．此外，线性关系式与指数关系式均能准确预测预混燃气可燃下限随初始压力的变化．

关 键 词：掺氢天然气；富氧燃烧技术；初始压力；近极限燃烧；化学动力学
中图分类号：X 932 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)03-0096-07

Effect of Initial Pressure on Lower Flammability Limit of CH_4/H_2 in O_2/CO_2 Atmosphere

SHANG Rong-xue, *TAN Xin-yue*, *SUN Qi-qi*, *CAO Yu-lu*
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SHANG Rong-xue, E-mail: rongxue.shang@foxmail.com)

Abstract: In view of the fire and explosion hazard in the combustion process of hydrogen-blended natural gas in O_2/CO_2 atmosphere, the influence mechanism of initial pressure on the lower flammability limit of $O_2/CO_2/CH_4/H_2$ mixtures was studied by experiments and numerical simulation. The results show that the lower flammability limit of premixed gas gradually decreases with the increase of hydrogen blending ratio and oxygen content, and the Le Chatelier formula can accurately predict the lower flammability limit of the premixed gas under different initial pressures. Under high initial pressure, the mole fraction of OH radicals increases with the increase of hydrogen blending ratio, and the promoting effect of the reaction $OH+H_2=H+H_2O$ on overall combustion is enhanced. With the increase of oxygen content, the mole fraction of H radicals increases, and the inhibition effect of the reaction $H+O_2+M=HO_2+M$ on near-limit premixed combustion is weakened. As the initial pressure increases, the lower flammability limit of the premixed gas decreases; the mole fraction of OH radicals decreases; the promoting effect of the reaction $HO_2+CH_3=OH+CH_3O$ on the overall premixed combustion is enhanced. Furthermore, both the linear relationship and the exponential relationship can accurately predict the lower flammability limit of premixed gas under different initial pressures.

Key words: hydrogen-blended natural gas; oxygen-enriched combustion technology; initial pressure; near-limit combustion; chemical kinetics

O_2/CO_2燃烧技术又称富氧燃烧技术，可实现CO_2低成本富集及污染物近零排放，在实现我国“双碳”能源转型目标中发挥重要作用[1]．此外，天然气掺氢可有效提高燃料燃烧效率，减少CO_2排放．但由于氢气具有燃烧速率快、点火能低和宽爆炸极限等特征[2]，使掺氢天然气具有火灾爆炸

收稿日期：2024-11-06
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52274180)．
作者简介：尚融雪(1987—)，女，辽宁沈阳人，东北大学副教授，博士．
通信作者：尚融雪，E-mail：rongxue.shang@foxmail.com.

危险性.因此，开展O_2/CO_2气氛下掺氢燃气燃烧特性的研究对其安全高效利用具有重要意义.

可燃下限（lower flammability limit，LFL）作为燃料的本质特征，是指层流绝热平面火焰能够维持传播的极限燃料浓度[3].可燃下限不仅能够定量表征燃料的可燃范围，作为预混火焰稳定性的关键判据，也是评价燃料燃爆危险性的重要参数.在预混燃气可燃极限研究方面，学者们已利用不同方法研究了燃料组分、初始条件等因素对燃料可燃极限的影响机理.Miao等[4]利用定容燃烧室和高速纹影摄影系统开展实验，发现氢气含量增加使CH_4/H_2混合气的可燃极限范围扩大；Hao等[5]利用标准20 L球形反应容器测量CH_4/H_2/空气混合物的爆炸特性参数，发现混合气的可燃下限随H_2添加量的增加呈线性下降趋势；Li等[6]利用2 L的反应容器进行实验，发现高温高压会扩大H_2/CO混合气的可燃极限范围.此外，少数学者开展了O_2/CO_2气氛下掺氢燃气燃烧特性的研究.郜晓晖[7]分别在O_2/CO_2气氛和空气气氛下进行实验，发现氧含量增加促进H_2/CO、纯H_2和纯CO气体燃料的点燃，随着氢气含量增加，H_2/CO合成气的可燃极限范围越宽；胡贤忠[8]在O_2/CO_2气氛下测量了CH_4的可燃极限，发现CO_2浓度增加使CH_4可燃下限上升.为详细分析燃料组分和初始条件对可燃极限的影响机理，部分学者通过实验结合数值模拟分析了可燃极限的变化规律.Tong等[9]测量了$CH_4/H_2/CO/CO_2/N_2/O_2$混合气体的可燃极限，发现混合气的可燃下限随着氢气含量的增加呈下降趋势，并归因于化学反应及热力学效应；Zhang等[10]通过实验和数值模拟研究发现在不同初始压力和初始温度下，NH_3/H_2混合气可燃下限随氢气的增加而降低，且与Le Chatelier定律呈现的变化规律一致；Su等[11]选用GRI机理模拟计算了掺氢比从0.2至0.8的H_2/CH_4/空气混合气，发现氢含量增加使爆炸反应加快.文献调研发现，关于含H_2或CH_4的混合气可燃极限的研究成果颇丰，但关于在O_2/CO_2气氛下初始压力变化对掺氢天然气的可燃下限影响的研究仍需深入.

为此，本文利用8 L圆柱形爆炸罐实验研究了O_2/CO_2气氛下掺氢天然气可燃下限（LFL）的变化规律，其中掺氢比为0~0.75，氧含量为0.2~0.3，初始压力为0.10~0.25 MPa；通过Chemkin数值模拟，详细分析了预混气体的近极限化学动力学和热力学效应；并基于实验及数值模拟结果，对比研究了不同拟合关系式对掺氢天然气可燃下限的预测准确性.

1　实验及数值模拟方法

1.1　实验方法

本文基于EN1839：2017[3]搭建了可燃极限测试系统.采用的8 L圆柱形爆炸罐材质为不锈钢，设计抗爆压力为2.5 MPa.实验采用镍铬合金熔丝点火方式，熔点为1 673 K，直径为0.2 mm.爆炸罐上连接数显压力表、压力传感器和进气口.此外，在爆炸罐的侧面设有由30 mm厚耐压钢化玻璃制成的圆形观察窗.配气系统主要由真空泵、实验气体以及爆炸罐上的数显压力表组成.实验基于分压法进行配气，配气完成后应静置3~5 min以保证预混充分.实时数据采集系统由罐体上部的Gensors压力传感器和计算机组成，可测量并记录火焰传播过程中爆炸容器内的压力变化.上述实验设施的详细描述可参考文献[12].

本文定义混合气体中掺氢比（x_{H_2}）如式（1）所示，氧含量（x_{O_2}）如式（2）所示：

$$x_{H_2}=\frac{X_{H_2}}{X_{H_2}+X_{CH_4}},\tag{1}$$

$$x_{O_2}=\frac{X_{O_2}}{X_{O_2}+X_{CO_2}}.\tag{2}$$

其中：X_{H_2}为混合气体中H_2的摩尔分数；X_{CH_4}为混合气体中CH_4的摩尔分数；X_{O_2}为混合气体中O_2的摩尔分数；X_{CO_2}为混合气体中CO_2的摩尔分数.

根据EN1839：2017[3]，本实验以5.0%爆炸超压为判据.当实验系统的爆炸压力升高值大于或等于初始压力的5.0%时，预混燃气发生爆炸，反之则未发生爆炸.为减小实验偶然性误差，实验中连续测得10次未发生爆炸的同一可燃气浓度为有效火焰未传播最高可燃气浓度.可燃下限可表示为

$$x_{LFL}=x_1+x_2.\tag{3}$$

其中：x_{LFL}为可燃下限；x_1为火焰传播的最低可燃气体体积分数；x_2为火焰未传播的最高可燃气体体积分数.

初始温度波动、压力测量和可重复性误差是实验测量误差的主要来源[8]，基于系统的不确定度分析，实验的综合误差（E）可表示为

$$E=\sqrt{E_1^2+E_2^2+E_3^2}.\tag{4}$$

其中：E_1为初始温度变化引起的误差，取1.00%；E_2为压力测量的最大误差，取1.65%；E_3为可燃极限计算

方法带来的偏差,取0.69%[8].根据式(4),E=2.05%.

上述实验系统测得常温常压下的CH_4可燃下限为5.1%[12],H_2可燃下限为4.2%[13].该数据与其他类似利用圆柱形爆炸罐的实验数据相符[4,14-15],因此认为该实验系统能够准确测量多种可燃气体的可燃下限.

1.2 数值模拟方法

本文数值模拟采用Chemkin的Premix模型对混合气近极限预混火焰燃烧特性进行数值计算.Premix模型主要用于一维平面预混火焰的化学反应动力学求解以及热力学过程模拟研究.为保证高掺氢比工况下计算的准确性,采用多组分扩散(multi-component)模型.模拟中设置火焰尺度为0~10 cm,并在火焰反应区域内设置最大值为3 000的网格数目.

反应机理选用GRI 3.0机理,该机理包含了从燃料分解到燃烧结束各个过程的多个中间产物和325个基元反应.GRI 3.0机理已经过大量实验验证,被广泛应用于研究CH_4,H_2,CO等单组分可燃气体及其混合气体[9-11]燃烧特性的数值模拟.

2 实验结果与讨论

2.1 不同氧含量下掺氢比对可燃下限的影响

2.1.1 预混燃气可燃下限变化规律

利用上述可燃极限实验系统测量不同条件下的掺氢天然气可燃下限,其中掺氢比为0~0.75,氧含量为0.2和0.3,初始压力为0.10~0.25 MPa,实验结果如图1所示.

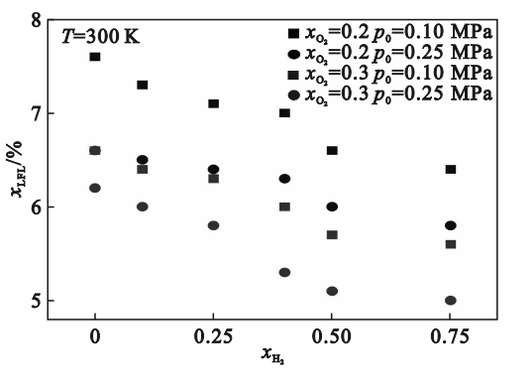


图1 掺氢天然气可燃下限随掺氢比的变化

Fig. 1 Variation of lower flammability limit of hydrogen-blended natural gas with hydrogen blending ratio

如图1所示,在相同压力下,掺氢天然气可燃下限均随掺氢比的增加而下降.在x_{O_2}=0.2,p_0=0.10 MPa工况下,当掺氢比从0增加到0.75时,掺氢天然气可燃下限由7.6%降至6.4%.此外,在相同压力下,掺氢天然气可燃下限随氧含量增加而下降.在x_{H_2}=0.75,p_0=0.10 MPa工况下,当氧含量从0.2增加到0.3时,掺氢天然气可燃下限由6.4%降至5.6%.在空气气氛下,氢气热值高于甲烷且扩散速度更快[16],随着掺氢比的增加,释放更多热量促进燃烧反应的进行.与空气气氛相似,在富氧燃烧技术下,氢气和氧气进入反应体系快速形成大量自由基并迅速化合产生大量热量,进一步促进燃烧.

为探究预混燃气可燃极限随掺氢比的变化规律,学者们利用Le Chatelier公式[17]对多种条件下混合气体的可燃极限进行估算.基于化学平衡原理,Zhang等[10]对不同初始压力和温度下NH_3/H_2混合气的可燃下限进行了预测,最大相对误差为6.2%.因此,利用Le Chatelier公式和上述富氧条件下单组分燃料实验数据,可对各实验工况下掺氢天然气可燃下限进行理论计算.

利用Le Chatelier公式得到的计算值与实验值之间的最大误差为6.4%.因此认为Le Chatelier公式能够准确地预测掺氢天然气可燃下限在不同初始压力下随掺氢比变化的规律.此外,不同初始压力下,在低掺氢比时利用Le Chatelier公式得到的计算值与实验数据误差更小.在p_0=0.25 MPa时,x_{H_2}=0.25工况下计算值与实验值的误差为2.3%,而x_{H_2}=0.75工况下误差为3.4%.由此可知,随着掺氢比的增加,预测值与实验值的偏差呈上升趋势.类似地,利用Le Chatelier公式得到的H_2/CO/CO_2/O_2预混气[12]可燃下限在高掺氢比下误差更大.

2.1.2 不同掺氢比下预混燃气近极限燃烧化学动力学影响

为详细分析掺氢比对可燃下限的影响机制,本文利用Chemkin软件,基于GRI 3.0机理详细模拟分析了在O_2/CO_2气氛下,掺氢天然气在近极限处预混燃烧的化学动力学效应.图2给出了p_0=0.25 MPa,x_{O_2}=0.2工况下的预混燃气近极限燃烧的燃烧速率敏感性分析结果.

由图2可知,在不同掺氢比下,基元反应H+O_2=O+OH和OH+H_2=H+H_2O均起促进作用;随着掺氢比的增加,H+O_2=O+OH和OH+H_2=H+H_2O对整体预混燃烧的促进作用增强.此外,通过上述敏感性分析发现,OH自由基和CH_3自由基对预混燃烧起重要作用.因此,图3给出了不同掺氢比下重要自由基的摩尔分数.

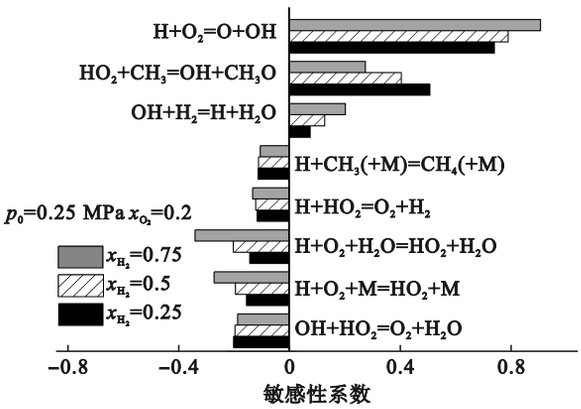


图2　不同掺氢比的掺氢天然气敏感性分析

Fig. 2　Sensitivity analysis of hydrogen-blended natural gas under different hydrogen blending ratios

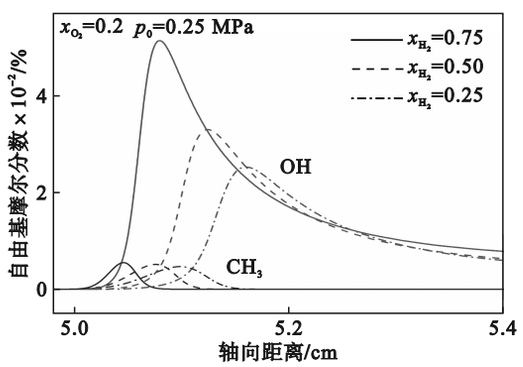


图3　不同掺氢比下掺氢天然气的重要自由基摩尔分数

Fig. 3　Mole fractions of important free radicals in hydrogen-blended natural gas under different hydrogen blending ratios

如图3所示，在 p_0=0.25 MPa 工况下，随着掺氢比的增加，掺氢天然气预混燃烧过程中 CH_3 自由基与 OH 自由基摩尔分数均上升．结合图2可知，随着掺氢比增加，CH_4 含量减少的同时 CH_3 自由基摩尔分数增加，促进反应 $H+CH_3(+M)=CH_4(+M)$ 正向进行，该反应对整体燃烧的抑制作用减弱．此外，随着掺氢比的增加，OH 自由基摩尔分数显著上升，促进反应 $OH+H_2=H+H_2O$ 正向进行，进一步增强该反应对整体预混燃烧的促进作用．

2.1.3　不同含氧量下预混燃气近极限燃烧化学动力学影响

为探究氧含量对掺氢天然气可燃下限的影响，基于 GRI 3.0 机理详细分析了 p_0=0.25 MPa，x_{H_2}=0.5 的工况下不同氧含量的近极限处预混燃烧敏感性系数，如图4所示．

如图4所示，且随着氧含量增加，基元反应 $H+O_2+M=HO_2+M$，$OH+HO_2=O_2+H_2O$ 和 $H+HO_2=O_2+H_2$ 的抑制作用减弱．通过上述敏感性分析发现，H 自由基和 OH 自由基在基元反应中高频出现并参与起主导作用的基元反应．因此，图5给出了不同氧含量下预混燃气近极限火焰结构和反应的绝热火焰温度 T_f，图6给出了不同氧含量下的重要自由基摩尔分数．

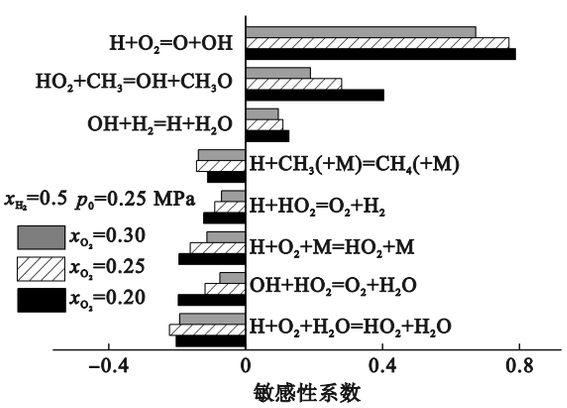


图4　不同氧含量下掺氢天然气的敏感性分析

Fig. 4　Sensitivity analysis of hydrogen-blended natural gas under different oxygen contents

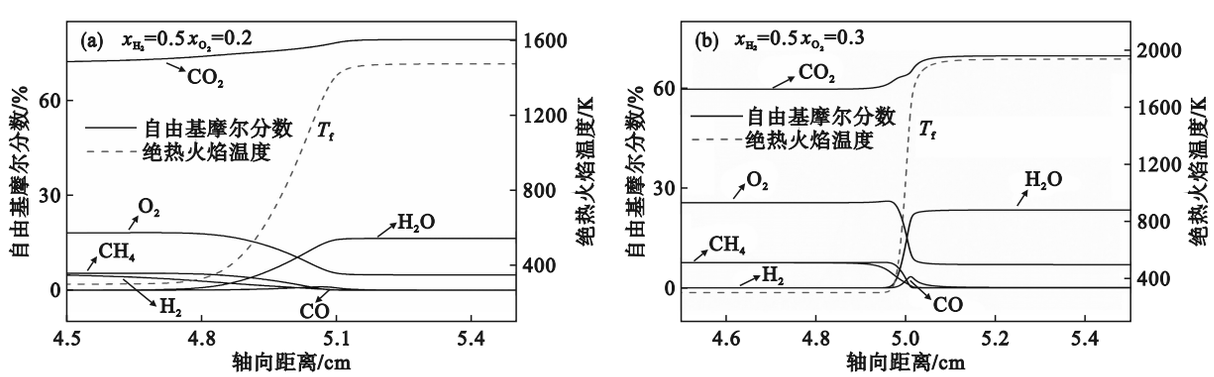


图5　不同氧含量下掺氢天然气的火焰结构

Fig. 5　Flame structure of hydrogen-blended natural gas under different oxygen contents

(a)—x_{O_2}=0.2；(b)—x_{O_2}=0.3.

如图5所示，随着氧含量增加，由 CO_2，O_2，CH_4，H_2 等反应物与 H_2O，CO 等生成物组成的反应区域减小．此外，在反应区域内 T_f 显著升高，氧含量从0.2升至0.3，T_f 终值增加超过400 K，温度

升高使燃料分子不稳定性增加,增加了分子间的碰撞几率[18],促进整体预混燃烧.如图6所示,随氧含量的升高,H自由基、OH自由基摩尔分数显著增加.结合图4可知,随氧含量升高,基元反应$H+O_2+M=HO_2+M$的抑制作用减弱,同时H自由基摩尔分数显著增加,促进反应正向进行,该反应对整体燃烧反应的抑制作用进一步减弱.

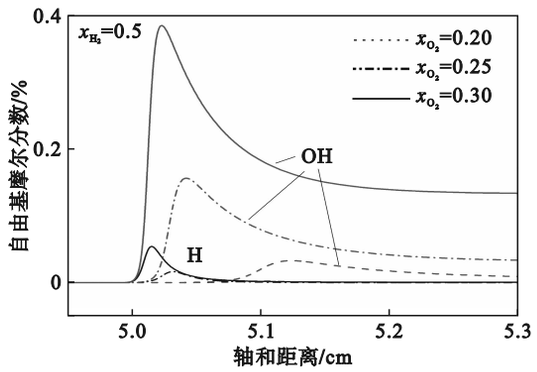


图6 不同氧含量下掺氢天然气的重要自由基摩尔分数

Fig. 6 Mole fractions of important free radicals in hydrogen-blended natural gas under different oxygen contents

2.2 初始压力对可燃下限的影响

2.2.1 不同初始压力下可燃下限变化规律

利用上述可燃极限实验系统测量不同初始压力下掺氢天然气的可燃下限,其中初始压力分别为0.10,0.15,0.20,0.25 MPa;掺氢比为0~0.75;氧含量为0.3,实验结果如图7所示.

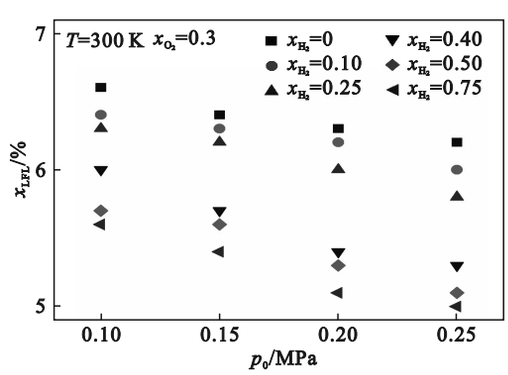


图7 掺氢天然气可燃下限随初始压力的变化

Fig. 7 Variation of lower flammability limit of hydrogen-blended natural gas with initial pressure

由图7可知,在氧含量和掺氢比一致的条件下,掺氢天然气可燃下限随初始压力的增加呈下降趋势.相较于空气气氛,在O_2/CO_2气氛下初始压力对可燃下限的影响更为显著.在空气气氛中,当初始压力从0.10 MPa升至0.20 MPa时,x_{H_2}=0.25下掺氢天然气的可燃下限下降了2.0%.在O_2/CO_2气氛中,相同条件下掺氢天然气的可燃下限下降了7.0%.在O_2/CO_2气氛中,CO_2以三体或其他形式参与整体燃烧反应过程.因此,在O_2/CO_2气氛下,CO_2除了影响热力学效应,对化学动力学效应也产生影响.数值计算表明,两种气氛下大部分支链反应相似,而各基元反应的敏感性及H,CH_3,OH自由基摩尔分数的差异是导致初始压力对可燃下限的影响程度不同的原因之一.

2.2.2 不同初始压力下预混燃气近极限燃烧化学动力学影响

随着初始压力增加,爆炸容器中的气体分子在更小的体积内被压缩,使分子间平均自由程缩小、碰撞频率增高,导致化学反应机理发生变化[16].因此,为详细分析不同初始压力下掺氢天然气在近极限处预混燃烧的化学反应动力学影响效应,同样利用Chemkin软件,基于GRI 3.0机理对x_{H_2}=0.5,x_{O_2}=0.2的工况计算不同初始压力下的质量燃烧速率敏感性,如图8所示.

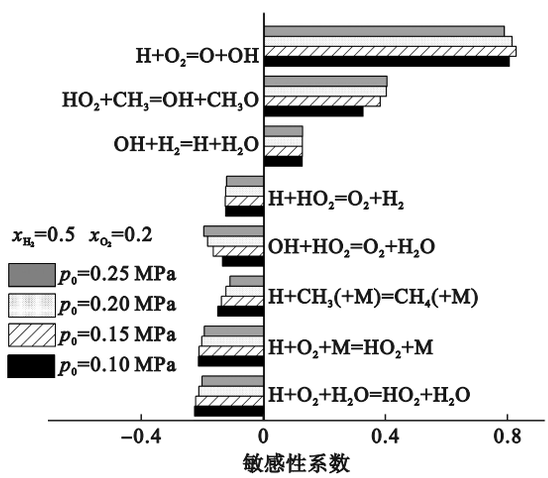


图8 不同初始压力下掺氢天然气的敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of hydrogen-blended natural gas under different initial pressures

如图8所示,不同初始压力下,基元反应$H+O_2=O+OH$,$H_2O+CH_3=OH+CH_3O$和$OH+H_2=H+H_2O$均对整体燃烧反应起促进作用,而基元反应$H+O_2+H_2O=HO_2+H_2O$和$H+CH_3(+M)=CH_4(+M)$在不同初始压力下均起抑制作用.随着初始压力增加,基元反应$H_2O+CH_3=OH+CH_3O$的促进作用增强,$H+CH_3(+M)=CH_4(+M)$的抑制作用减弱.可以看出,H自由基和OH自由基均对重要基元反应有显著影响.因此,图9给出了不同初始压力下预混燃气的重要自由基摩尔分数.

由图9可知,随初始压力升高,OH自由基摩尔分数变化速率加快使可燃气消耗加快,H自由

基与OH自由基摩尔分数峰值提前出现，基元反应的平衡受到影响.且随初始压力升高，H自由基与OH自由基摩尔分数峰值降低，可燃气消耗量减少，最终导致掺氢天然气可燃下限下降[10].

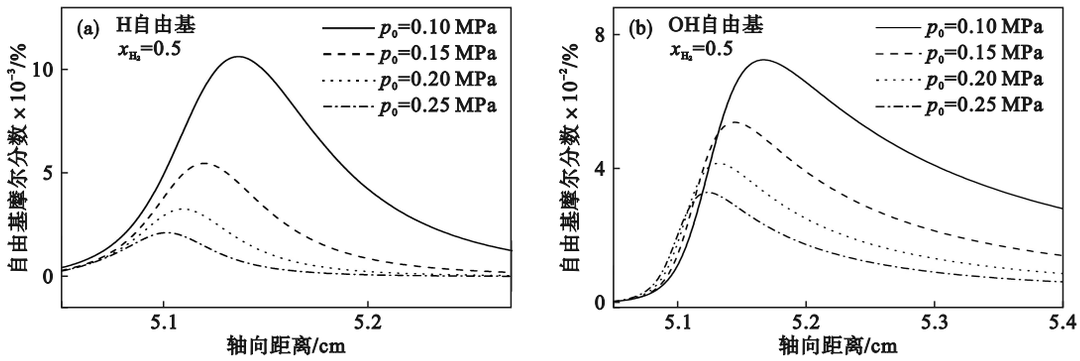


图9　不同初始压力下掺氢天然气的重要自由基摩尔分数

Fig. 9　Mole fractions of important free radicals in hydrogen-blended natural gas under different initial pressures

(a)—H自由基；(b)—OH自由基.

由图9可知，初始压力从0.10 MPa升至0.25 MPa时，预混燃气中H自由基摩尔分数降低最为显著，OH自由基次之.随初始压力升高，起促进作用的$H+O_2=O+OH$反应敏感性系数略微下降，但不同初始压力下该反应的正敏感性系数均大于其他基元反应，表明该反应对整体预混燃烧起主导促进作用.此外，随着初始压力升高，OH自由基摩尔分数下降促使反应$HO_2+CH_3=OH+CH_3O$正向进行，该基元反应对整体预混燃烧的促进作用增强.

2.2.3　初始压力对可燃下限影响的理论计算

为研究掺氢天然气可燃下限随初始压力的变化规律，Li等[19]发现空气气氛下碳氢可燃气体的可燃下限随压力呈线性变化，可燃上限随压力呈对数变化.因此，采用线性和指数拟合关系对O_2/CO_2气氛中不同初始压力下的掺氢天然气可燃下限进行理论计算，计算结果见图10(实心符号：实验数据；线形符号：拟合数据).

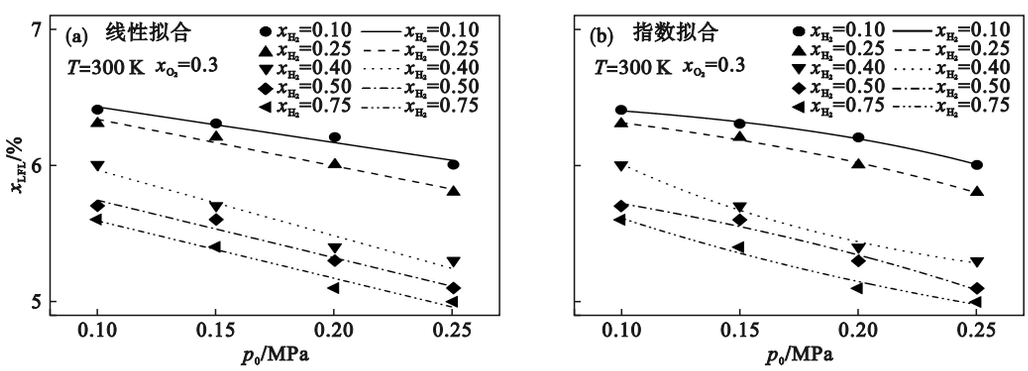


图10　掺氢天然气可燃下限随初始压力变化的拟合结果

Fig. 10　Fitting results of lower flammability limit of hydrogen-blended natural gas under different initial pressures

(a)—线性拟合；(b)—指数拟合.

如图10a所示，不同掺氢比的掺氢天然气可燃下限随初始压力的升高近似线性下降.如图10b所示，利用指数关系式估算得到的掺氢天然气可燃下限值与实验值整体吻合.不同掺氢比条件下，随初始压力变化的线性拟合关系式和指数拟合关系式的R^2均大于0.93.如图10b所示，指数拟合关系式的凹凸方向不一致，具有不同的正负关系.此外，利用线性关系式得到的计算值与实验数据之间的最大误差为1.48%，利用指数关系式的最大误差为1.72%.可知两种关系式拟合的计算值与实验值之间的误差均小于2%，因此认为线性关系式和指数关系式均能准确预测不同初始压力下掺氢天然气的可燃下限.

3　结　　论

1）在O_2/CO_2气氛下，掺氢天然气可燃下限随氧含量、掺氢比增加而下降；Le Chatelier公式能够准确地预测不同初始压力下随掺氢比变化的可燃下限.

2) 在实验压力下,随着掺氢比增加,OH 自由基摩尔分数显著增加,增强了 $OH+H_2=H+H_2O$ 反应对整体预混燃烧的促进作用;随氧含量增加,$H+O_2+M=HO_2+M$ 反应的抑制作用减弱,同时 H 自由基摩尔分数增加使该反应的抑制作用进一步减弱,进而促进整体燃烧.

3) 随着初始压力的升高,在 O_2/CO_2 气氛下掺氢天然气的可燃下限均呈下降趋势.初始压力升高时,$HO_2+CH_3=OH+CH_3O$ 对预混燃烧的促进作用增强,同时 OH 自由基摩尔分数下降促进反应正向进行,进一步增强了对近极限预混燃烧的促进作用.

4) 线性与指数拟合关系式均能准确预测 O_2/CO_2 气氛下不同初始压力的可燃下限,线性关系式计算值与实验数据之间的最大误差为 1.48%,指数关系式的最大误差为 1.72%.

参考文献:

[1] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3856-3864.
(Zheng Chu-guang, Zhao Yong-chun, Guo Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(23): 3856-3864.)

[2] 荆琦, 周硕, 周芮, 等. 多组分天然气掺氢爆炸下限实验及模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(7): 43-48.
(Jing Qi, Zhou Shuo, Zhou Rui, et al. Experimental and model study on lower explosion limit of multi-component natural gas blended with hydrogen [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2024, 20(7): 43-48.)

[3] EN1839: 2017. Determination of explosion limits of gases and vapours [S]. Standards Policy and Strategy Committee, 2017.

[4] Miao H Y, Lu L, Huang Z H. Flammability limits of hydrogen-enriched natural gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(11): 6937-6947.

[5] Hao Q Q, Luo Z M, Wang T, et al. The flammability limits and explosion behaviours of hydrogen-enriched methane-air mixtures [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 126: 110395.

[6] Li R, Liu Z Y, Li P L, et al. Investigation on the flammability limit and limiting oxygen concentration of N_2-diluted H_2/CO/air mixtures at high temperature and pressure [J]. *Fuel*, 2022, 308: 121955.

[7] 郜晓晖. H_2/CO 合成气在 O_2/CO_2 气氛下可燃极限的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2020.
(Gao Xiao-hui. Study on the flammability limit of H_2/CO syngas at O_2/CO_2 atmosphere [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.)

[8] 胡贤忠. CH_4 在 O_2/CO_2 气氛下燃烧特性的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
(Hu Xian-zhong. Research of combustion characteristics of methane at O_2/CO_2 atmosphere [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.)

[9] Tong J M, Shao C, Hu X Z. The effects of oxygen and gas composition on the flammability limits of steelworks gas blends under oxygen-enriched condition [J]. *Fuel*, 2024, 364: 131053.

[10] Zhang K, Shang S, Li X L, et al. Lower flammability limits of NH_3/H_2 mixtures under different initial temperatures and initial pressures [J]. *Fuel*, 2023, 331: 125982.

[11] Su B, Luo Z M, Wang T, et al. Chemical kinetic behaviors at the chain initiation stage of CH_4/H_2/air mixture [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123680.

[12] Shang R X, Zhuang Z X, Niu J Y, et al. Experimental study on the lower flammability limit of N_2 and CO_2 diluted H_2/CO/air mixtures at high initial pressure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(1): 393-406.

[13] Shang R X, Li G, Wang Z, et al. Lower flammability limit of H_2/CO/air mixtures with N_2 and CO_2 dilution at elevated temperatures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(16): 10164-10175.

[14] Cui G, Yang C, Li Z L, et al. Experimental study and theoretical calculation of flammability limits of methane/air mixture at elevated temperatures and pressures[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 41: 252-258.

[15] Schroder V, Molnarne M. Flammability of gas mixtures. part 1: fire potential [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 121: 37-44.

[16] Wang P X, Zhao Y J, Chen Y L, et al. Study on the lower flammability limit of H_2/CO in O_2/H_2O environment [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(16): 11926-11936.

[17] Le Chatelie H, Boudouard O. Limits of flammability of gaseous mixtures [J]. *Bulletin de la Société Chimique de France*, 1898, 19: 483-488.

[18] Duan X B, Li Y Y, Liu Y Q, et al. Dilution gas and hydrogen enrichment on the laminar flame speed and flame structure of the methane/air mixture[J]. *Fuel*, 2020, 281: 118794.

[19] Li P L, Liu Z Y, Li M Z, et al. Experimental study on the flammability limits of natural gas/air mixtures at elevated pressures and temperatures[J]. *Fuel*, 2019, 256: 115950.