

# 燃气轮机掺氢燃烧技术

李小龙<sup>1,✉</sup>, 洪小飞<sup>2</sup>, 陈宇卿<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东广州 510663;  
2. 广东粤电大亚湾综合能源有限公司, 广东惠州 516211)

**摘要:** [目的] 随着国家为能源行业设立了碳达峰、碳中和的宏伟目标, 对电站燃气轮机低碳排放技术改进的需求日益增长。国内对该目标的关键技术路径的探索亟待展开。燃气轮机的贫预混燃烧技术能使燃烧偏离理论空气量, 是目前降低 $\text{NO}_x$ 排放主要技术, 同时通过在天然气中掺混氢气燃烧, 能够有效降低化石能源的消耗以及降低碳排放量。[方法] 采用 Chemkin-Pro 软件建立一维预混自由传播火焰模型, 比较不同当量比、初始温度、初始压力、掺氢比对燃烧温度、燃烧速率、污染物生成浓度、燃烧自由基、链式反应等的影响; 模拟燃烧过程的温度分布、燃料组分变化及其排放特性。[结果] 发现了通过在天然气中掺混氢气燃烧, 能够有效降低化石能源的消耗以及降低碳排放量。但天然气掺氢的贫预混燃烧所带来的较高的火焰温度反而会促进 $\text{NO}_x$ 的生成, 同时, 在较低的当量比下将会产生更多的 CO。[结论] 基于以上研究, 获得了掺氢燃烧的关键数据, 为掺氢燃烧技术路径的完成奠定了基础。

**关键词:** 掺氢;  $\text{NO}_x$  排放; 预混燃烧; 当量比; 层流燃烧速度

中图分类号: TK91; TK471

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0014-12

开放科学(资源服务)二维码:



## Hydrogen-Blended Combustion Technology in Gas Turbine

LI Xiaolong<sup>1,✉</sup>, HONG Xiaofei<sup>2</sup>, CHEN Yuqing<sup>1</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;  
2. Guangdong Yuedian Daya Bay Integrated Energy Co., Ltd., Huizhou 516211, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] As the country has set ambitious targets in carbon peaking and carbon neutrality for the energy sector, there is a growing demand for technology improvements of low-carbon emission for power station gas turbines. It is urgent to explore the path of the key technology for this goal in China. The lean premixed combustion technology of gas turbine can make the air volume for combustion deviate from the theoretical air volume, which is the main technology to reduce  $\text{NO}_x$  emission at present. At the same time, by mixing hydrogen in natural gas when combusting, it can effectively reduce the consumption of fossil energy and reduce carbon emissions. [Method] In this paper, a one-dimensional premixed free propagation flame model was established by Chemkin-Pro software, and the effects of different equivalent ratios, initial temperatures, initial pressures, and hydrogen-blended ratios on combustion temperatures, combustion rates, pollutant generation concentration, combustion free radicals, and chain reactions were compared. The temperature distribution, fuel component change and emission characteristics of combustion process were simulated. [Result] It is found that by mixing hydrogen in natural gas when combusting, fossil energy consumption and carbon emissions can be effectively reduced. However, the higher flame temperature brought by the lean premixed combustion of natural gas mixed with hydrogen will promote the generation of  $\text{NO}_x$ , and at the same time, more CO will be produced at a lower equivalent ratio. [Conclusion] Based on the above research, the key data of hydrogen-blended combustion are obtained, which lays a foundation for the completion of hydrogen-blended combustion technology route.

**Key words:** hydrogen-blended;  $\text{NO}_x$  emission; premixed combustion; equivalence ratio; laminar burning velocity

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-04-23 修回日期: 2023-07-28

基金项目: 中国能建广东院科技项目“天然气管道掺氢及掺氢燃烧应用研究”(EV10231W); 中国能建广东院科技项目“天然气掺氢技术研究”(EV06181W)

## 0 引言

在全球温室气体的诸多来源中, 电力尤其是发电行业无疑是温室气体排放的主要来源。由此, 发电行业被普遍认为是降低二氧化碳排放的重点行业之一。一场脱碳引发的变革正在电力行业中如火如荼地进行。电网电源每千瓦时的碳强度<sup>[1]</sup>如图 1 所示。然而, 在未来的几十年, 发电行业的主要能源来源仍将依赖于传统的化石能源燃料和以碳氢化合物燃料为主的生物能源。根据伍德麦肯兹公司的预测: 即使到 2040 年, 通过燃烧化石燃料的方式获取的能源数量仍占世界能源总需求量的 85%。到目前为止, 总装机量约 1 TW 的风电以及太阳能仅占世界总发电量的 8% 左右。同时, 考虑到发展中国家经济增长和人口膨胀的情况, 电力总需求量上升, 而发展中国家必然会选择较便宜及更稳定的化石燃料作为首选能源, 这抵消了可再生能源的增加幅度。随着化石燃料的短缺和《巴黎协定》等严格排放法规的颁布, 减少污染物气体排放, 提高电厂的发电效率, 已经成为燃烧领域越来越多学者的主要研究方向<sup>[2]</sup>。

与煤炭、石油等传统燃料相比, 天然气被视为最清洁的替代能源。但天然气依旧具有着火温度高、火焰传播速度慢的缺点。依旧无法摆脱化石能源的

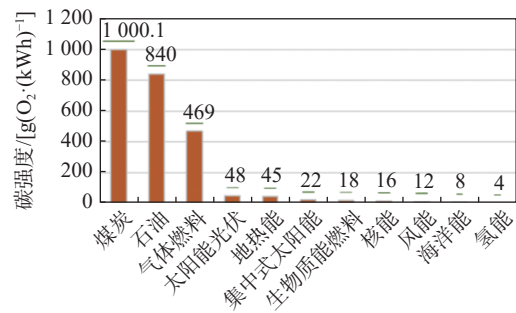


图 1 电网电源每千瓦时的碳强度<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Carbon intensity of grid power supply per kWh<sup>[1]</sup>

身份, 碳排放量依旧很高。因此, 有必要探索燃气轮机燃料的灵活性, 探索掺氢燃烧对燃气轮机燃料的燃烧和排放特性的影响<sup>[3]</sup>。这是利用掺氢减少碳排放的关键技术路径。

氢气的反应活性高, 能量容量大, 氢气的加入可以显著提高甲烷-氢气混合物的燃烧效率, 它被认为是一种很好的甲烷燃气轮机燃料添加剂<sup>[4-5]</sup>。并且, 氢气可从可再生能源中制取, 其制取技术路线如图 2 所示<sup>[6]</sup>。利用可再生能源产生的电能, 可以用于制造氢气。

迄今为止, 重型以及航改型燃气轮机(用于发电)主要使用的燃料多为天然气或轻油等。近些年来, 越来越多燃气轮机方面的专家与学者对拓宽燃气轮

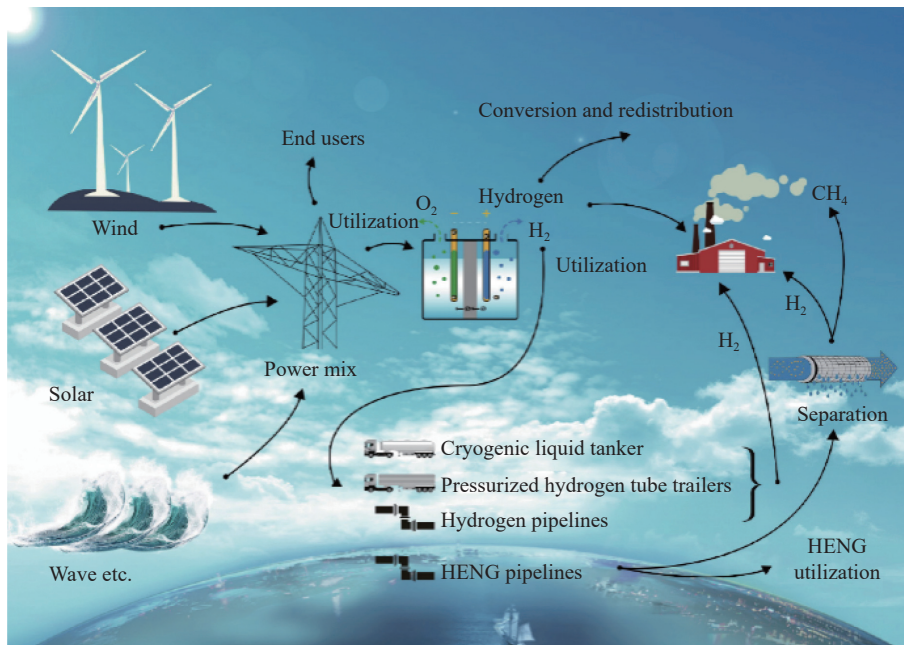


图 2 制取氢气的技术路线<sup>[6]</sup>

Fig. 2 The technology route of hydrogen production<sup>[6]</sup>

机多燃料的适应性进行了深入地研究。其中,对燃气轮机进行掺氢燃烧直到燃用纯氢和集成气化联合循环(IGCC)是拓宽燃料性能的重点方向。有着操作灵活、过程可控、零碳排放等优点的掺氢燃烧燃气轮机必将成为国家“双碳”战略中改造新型电网的重要组成,图 3 详细描述了氢气与空气微混合的燃烧原理<sup>[7]</sup>。

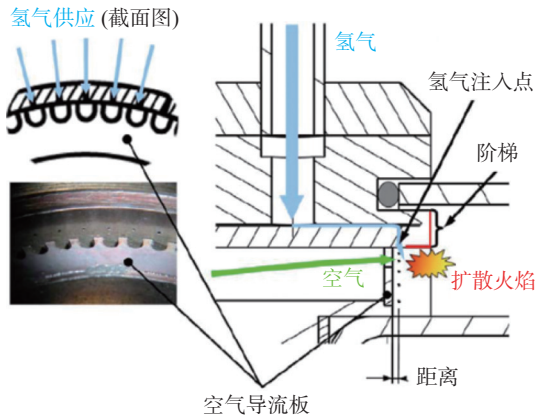
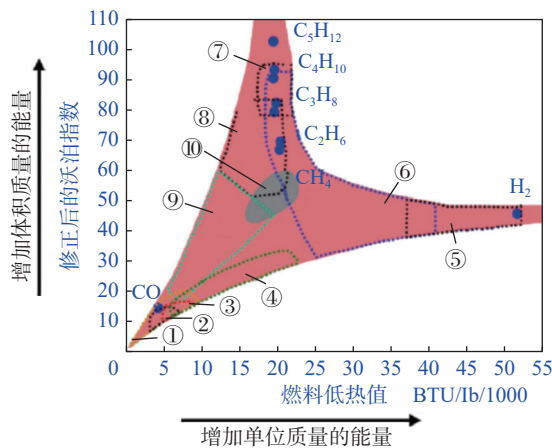


图 3 加入氢气的微混合气燃烧原理图<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Schematic of micro-mixing gas combustion with hydrogen added<sup>[7]</sup>

由于甲烷和氢气的化学属性与物理特性差异较大,对燃气轮机燃烧室影响较大的是氢气和甲烷的沃泊指数,氢气和甲烷的沃泊指数如图 4 所示<sup>[8]</sup>,如果需要提供与天然气相同的热负荷,掺氢气天然气需要更大的体积流量。同时,因为氢气具有较高的



注: ① 1-BFG/COG; ② 2-Air Blown Syngas; ③ 3-O<sub>2</sub> Blown Syngas; ④ 4-CO<sub>2</sub> Capture; ⑤ 5-High H<sub>2</sub>; ⑥ 6-Refinery Off-gas; ⑦ 7-LPG; ⑧ 8-LNG Field (High C<sub>2</sub>); ⑨ 9-LNG Field (High inert); ⑩ 10-NG/LNG Wide Wobbe

图 4 修正的所有已知气体燃料的沃泊指数<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Modified Wobbe index for all known gaseous fuels<sup>[8]</sup>

扩散系数、火焰速度以及绝热火焰温度,这些都给燃烧室的安全稳定运行带来挑战,这些挑战包括燃料自燃、回火、火焰不稳定特性以及更高的污染物排放等。

燃气轮机低污染燃烧技术实现的主要途径是通过降低火焰温度以达到减小 NO<sub>x</sub> 生成的目的,降低火焰温度的方法又可以分成 2 类:第一种是将燃料和稀释剂分别喷入燃烧区的扩散燃烧(以下简称“扩散燃烧”);第二种是将空气与燃料先按一定比例混合后再进入燃烧区的预混燃烧,其原理图分别如图 5 和图 6 所示。由于扩散燃烧技术具有工作稳定、燃料调节策略简单等优势,早期的燃气轮机一直采用扩散燃烧方式来控制 NO<sub>x</sub> 的排放。但是,随着国家排放标准的提高,为了使 NO<sub>x</sub> 排放降到 50 mg/Nm<sup>3</sup>

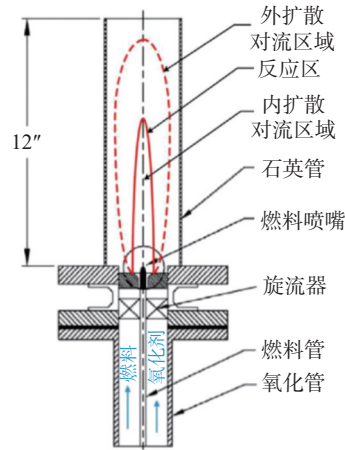


图 5 扩散燃烧<sup>[9]</sup>

Fig. 5 Diffusive combustion<sup>[9]</sup>

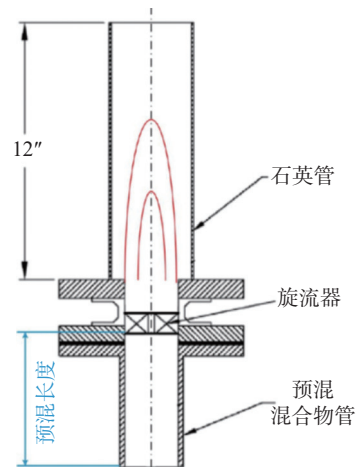


图 6 预混燃烧<sup>[9]</sup>

Fig. 6 Premixed combustion<sup>[9]</sup>



以下, 需要向燃烧室内注入与燃料体积流量相当的稀释剂。这样做无疑增加了发电设备以及系统的复杂性, 抬高了发电设备的造价, 还严重影响了发电机组的效率。

不需要加入稀释剂的干式低污染燃烧, 采用贫燃料预混燃烧方式(即当量比小于 1 的预混燃烧), 使燃烧偏离理论空气量的贫预混燃烧, 是干式低污染燃烧技术的主流, 能使  $\text{NO}_x$  的排放远低于排放标准, 目前已经广泛应用于燃用天然气燃料的燃气轮机, 然而预混燃烧技术中的火焰不稳定性是其最主要的问题之一。并且氢气与天然气混合后较高的扩散系数、绝热火焰温度以及火焰速度都给燃烧室的安全稳定运行带来了挑战<sup>[9]</sup>。

贫预混燃烧能有效控制  $\text{NO}_x$  的排放, 但掺氢气贫预混燃烧会迎来 2 个新的问题: (1) 掺氢气燃料, 尤其是富氢燃料燃烧导致更高的绝热火焰温度反而会促进  $\text{NO}_x$  的生成, 正如图 7 中 Lieuwen<sup>[10]</sup> 等简化的  $\text{NO}_x$  生成机制所示, 热  $\text{NO}-\text{N}_2$  与在高温下与氧反应促进  $\text{NO}$  的生成; (2) 在当量比较低时,  $\text{CO}$  氧化为  $\text{CO}_2$  的能力有限, 将会产生更多的  $\text{CO}$ , 如图 8 所示的富氢合成气在贫预混燃烧时  $\text{CO}$  呈现出显著上升的趋势。



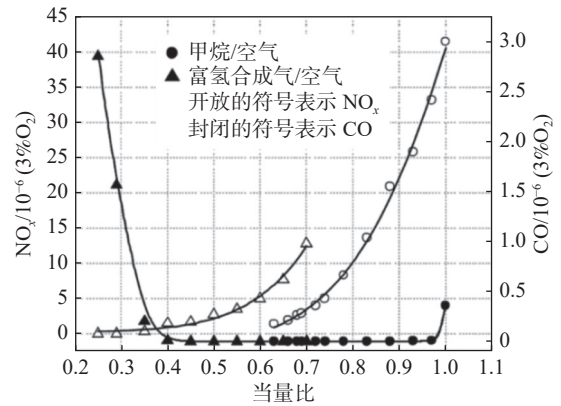
图 7  $\text{NO}_x$  形成机制的简化示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 7 Simplified schematic diagram of  $\text{NO}_x$  formation mechanism<sup>[10]</sup>

### 1 Chemkin Pro 层流预混燃烧模型介绍

层流燃烧速度是燃烧火焰的基本特性之一, 是紊流燃烧的基础。层流预混燃烧与排放特性的研究可为湍流预混火焰的研究提供理论数据。本文采用了 Chemkin Pro 中的 Premix Code 的一维层流预混式自由传播火焰模型, 原理示意图如图 9 所示。

计算过程中, 混合气体流量的初值保持在  $0.04 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。计算域的距离为  $0 \sim 1 \text{ cm}$ 。网格细化标准设置为  $\text{GRAD} = 0.1, \text{curv} = 0.2$ 。最终得到的网



注: 图中开放的符号指空心的符号, 封闭的符号指实心的符号。

图 8 甲烷和富氢合成气贫燃烧时的  $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}$  排放<sup>[8]</sup>  
Fig. 8 Emissions of  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}$  during lean combustion of methane and hydrogen-rich syngas<sup>[8]</sup>

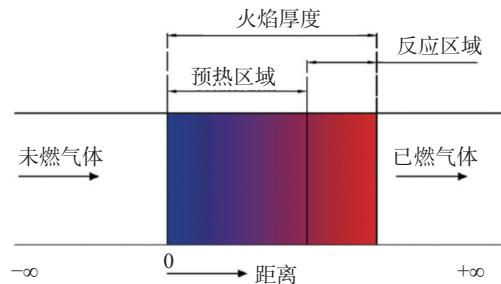


图 9 层流预混火焰示意图

Fig. 9 Schematic diagram of laminar premixed flame

格总数约为 150 个, 自适应网格为 50 个。迭代过程中的相对误差和绝对误差分别设为  $10^{-4}$  和  $10^{-9}$ , 当初始温度升高到  $T = 723 \text{ K}$ , 固定温度设置  $1\ 000 \text{ K}$ 。对流项采用逆风差分法离散, 采用平均法来计算混合物扩散系数。此外, Soret 效应被考虑在所有的计算条件当中<sup>[11]</sup>。

### 2 化学反应动力学机理的选择及模型验证

为了在前人研究成果的基础上得到最精确的层流预混燃烧模型, 选取了 3 种被广泛接受和使用的化学反应机理<sup>[12-14]</sup>。GRI-mech 3.0 用于预测天然气的燃烧化学性质, 还考虑了与丙烷和  $\text{NO}_x$  化学有关的反应, 共考虑 53 种物质和 325 种基元反应; USC-Mech II 是一种广泛用于预测  $\text{H}_2/\text{CO}/\text{C}_1-\text{C}_4$  燃烧化学的反应机理。该机制包括 111 种反应和 784 种基元反应; San Diego Mechanism 用于模拟多达  $\text{C}_4$  火焰的燃烧化学, 考虑了 57 个组分和 268 个基本反应。

图 10 ~ 图 13, 进行了掺氢比例分别为 0, 20%, 50%,

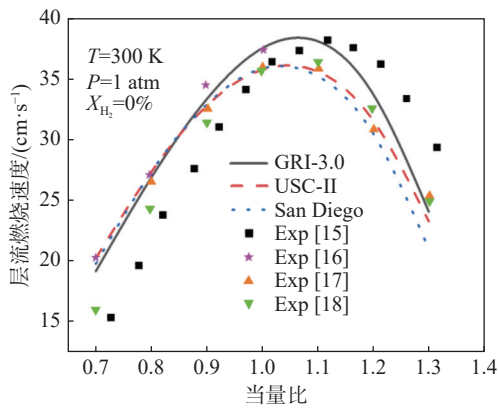


图 10 掺氢比例为 0 时的层流燃烧速度曲线

Fig. 10 Laminar combustion velocity curve when hydrogen doping ratio is 0

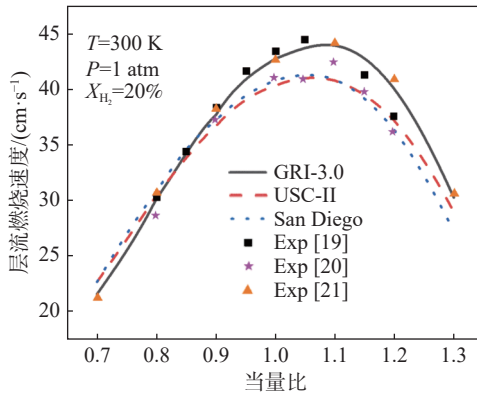


图 11 掺氢比例为 20% 时的层流燃烧速度曲线

Fig. 11 Laminar combustion velocity curve when hydrogen doping ratio is 20%

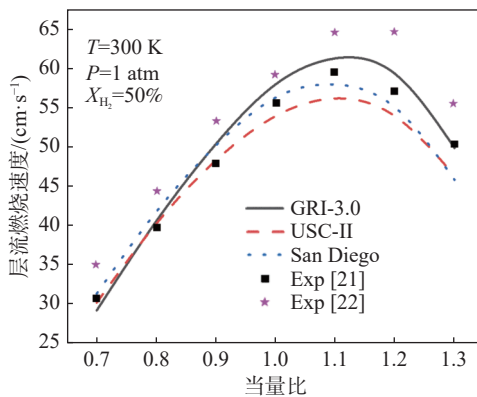


图 12 掺氢比例为 50% 时的层流燃烧速度曲线

Fig. 12 Laminar combustion velocity curve when hydrogen doping ratio is 50%

100%, 采用以上 3 个化学动力学机理对层流燃烧速度模拟计算。为了验证所选化学动力学模型的准确性, 将 3 种机制计算的层流燃烧速度(Laminar Burning

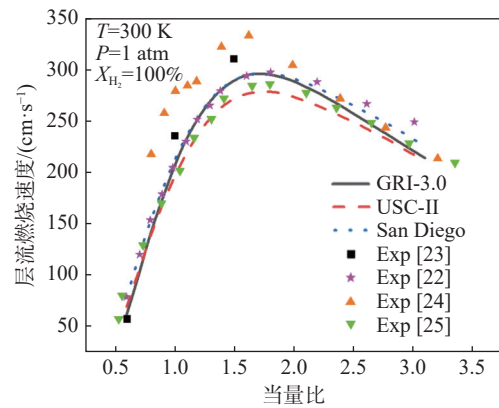


图 13 掺氢比例为 100% 时的层流燃烧速度曲线

Fig. 13 Laminar combustion velocity curve when hydrogen doping ratio is 100%

Velocity, LBV) 值与相关文献的值进行了比较<sup>[15-25]</sup>。

从图 10 ~ 图 12 可以看出, 从 GRI Mech 3.0 得到的层流燃烧速度与 USC Mech 2.0 和 San Diego 的结果相比, GRI Mech 3.0 与实验值的一致性更好, 特别是当量比大于 0.9 时。USC Mech 2.0 和 San Diego 的预测结果与贫燃料实验值 ( $\phi < 1$ ) 基本一致, 对于化学计量学和富燃料条件 ( $\phi > 1$ ), 计算值远低于实验值。对于掺氢燃料, GRI Mech 3.0 和 San Diego 机制在整个当量比范围内对层流燃烧速度都有很好的预测。此外, GRI Mech 3.0 是 3 种机制中唯一包含 NO 生成反应的机制, 在接下来的模拟中选择 GRI Mech 3.0。

### 3 不同初始温度下的层流燃烧速度 (LBV)、NO<sub>x</sub> 和 CO 排放

图 14 ~ 图 16 显示了不同初始温度 ( $T = 298 \text{ K}$  和  $T = 723 \text{ K}$ ) 下 LBV、NO 和 CO 排放的变化, 与  $T = 298 \text{ K}$  相比,  $T = 723 \text{ K}$ <sup>[26]</sup> 时 LBV、NO 和 CO 排放要高得多。根据 Arrhenius 方程可知, 反应的速率与反应的温度呈指数关系。可燃混合物初始温度的升高可以极大地促进反应速率, 导致层流燃烧速度的增加。燃烧过程中 NO 的形成主要通过热途径, 其他途径不太重要。随着初始温度的升高, 热路线反应增强, 促进 NO 排放的形成。此外, CO<sub>2</sub> 在高温下的解离反应导致 CO 产量的增加。因此, 初始温度越高, LBV 越高, NO<sub>x</sub> 和 CO 排放也越高。同时, 可以看出, 在相同的初设温度下, LBV 随着掺氢比例的增加而增大, NO<sub>x</sub> 排放随着掺氢比例的增加而增大, CO 排放随着掺氢比例的增加而减小。

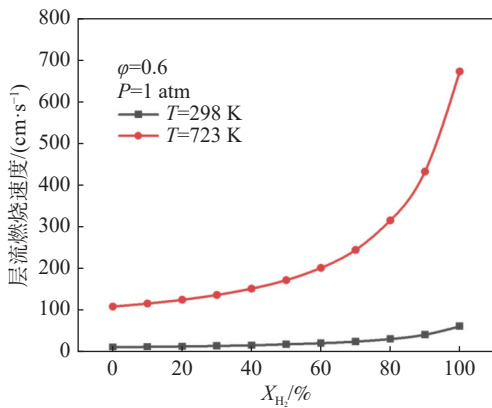


图 14 不同初始温度对流燃烧速度影响

Fig. 14 Effect on convective combustion velocity with different initial temperature

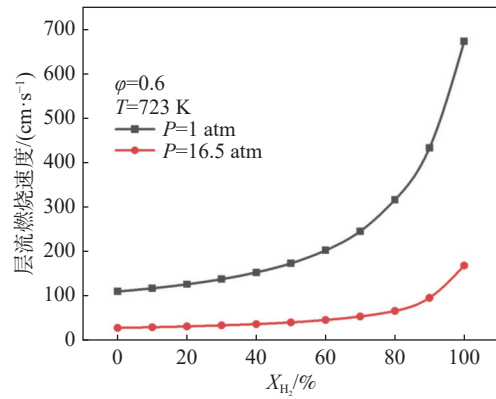


图 17 不同压力对流燃烧速度影响

Fig. 17 Effect on convective combustion velocity with different pressure

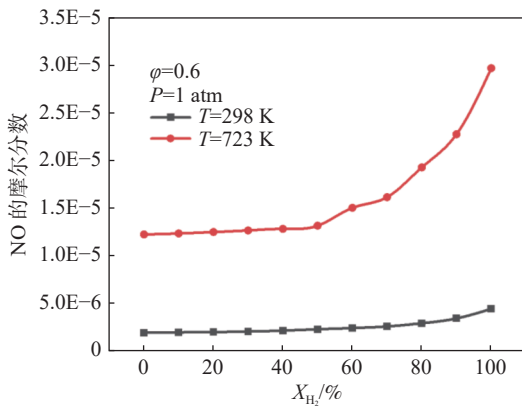


图 15 不同初始温度对 NO<sub>x</sub> 排放影响

Fig. 15 Effect on NO<sub>x</sub> emission with different initial temperature

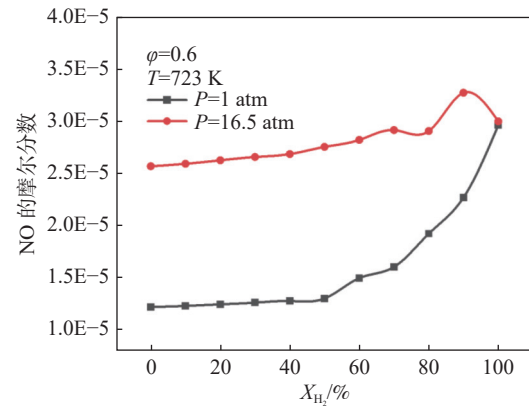


图 18 不同压力对 NO<sub>x</sub> 排放影响

Fig. 18 Effect on NO<sub>x</sub> emission with different pressure

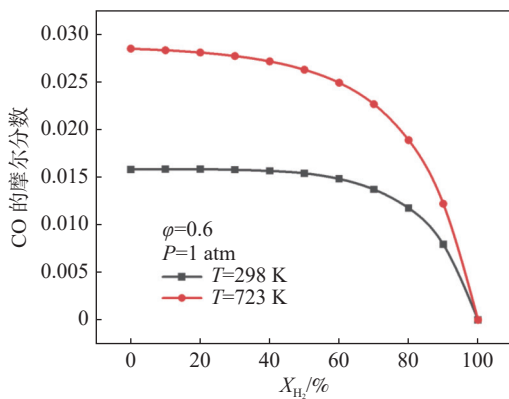


图 16 不同初始温度对 CO 排放影响

Fig. 16 Effect on CO emission with different initial temperature

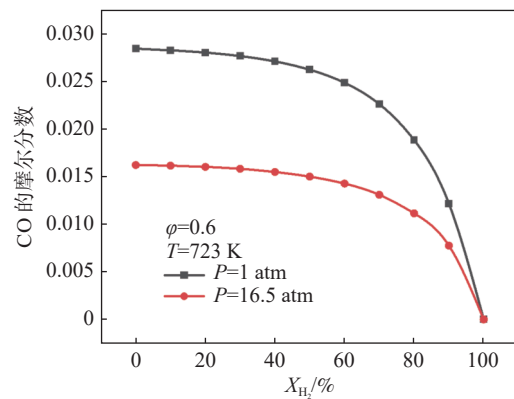


图 19 不同压力对 CO 排放影响

Fig. 19 Effect on CO emission with different pressure

#### 4 不同压力下的层流燃烧速度 (LBV)、NO<sub>x</sub> 和 CO 排放

图 17 ~ 图 19 为不同初始压力 ( $P = 1.0 \text{ atm}$  和  $P =$

$16.5 \text{ atm}$ ) 下 LBV、NO 和 CO 的变化。压力的增加导致 LBV 和 CO 的降低, 但促进 NO 的形成。随着压力的增加, LBV 的降低是由于三体重组反应的增

强。从本质上讲,分子碰撞的平均自由程度会随着物质的压力增大而减小,这反过来又增加了分子的碰撞频率,导致三体重组反应增强。初始压力的增加,增加了燃烧的反应速率,从而导致 CO 产量的减少。燃烧后区域 NO 的生成主要由热路主导。随着初始压力的增加,热路线反应增强,促进总 NO 的生成。因此,初始压力对 LBV、NO<sub>x</sub> 排放、CO 排放的作用是不同的。同时,可以看出,在相同的初设压力下, LBV 随着掺氢比例的增加而增大。NO<sub>x</sub> 排放随着掺氢比例的增加而增大,但压力越高,这种作用越不明显。CO 排放随着掺氢比例的增加而减小。

## 5 掺氢对绝热火焰温度 (AFT) 和层流燃烧速度 (LBV) 的影响

绝热火焰温度 (Adiabatic Flame Temperature, AFT) 是气体在绝热条件下燃烧时的最高温度。AFT 随当量比 (0.6 ~ 1.4) 的变化如图 20 所示。AFT 在当量比处于 (0.6 ~ 1.05) 时增加,在  $\varphi = 1.05$  左右达到峰值,然后随着当量比的增加开始下降。当  $\varphi > 1$  时,燃烧产物的比热值下降速度快于放热速率。虽然放热不如  $\varphi = 1$  的情况,机组释放的热量可以提高更多的温度。因此,绝热火焰温度最高出现在  $\varphi = 1.05$  附近。氢的加入使绝热火焰温度略有升高。当  $X_{H_2}$  从 0 增加到 100% 时,混合物绝热火焰温度峰值提高了 7.3%。此外, Arrhenius 公式的反应速率系数具有较强的温度依赖性。因此,氢的加入加速了反应速率,导致 AFT 增加。

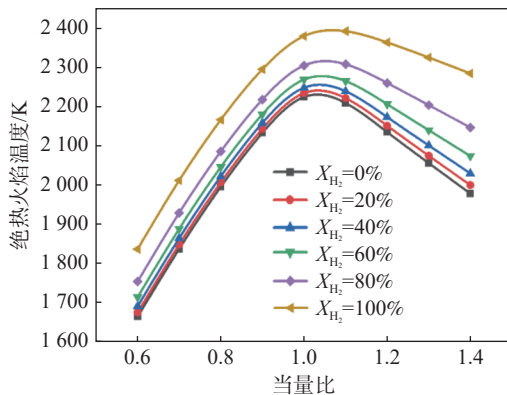


图 20 绝热火焰温度曲线

Fig. 20 Adiabatic flame temperature curve

LBV 是表征火焰反应活性的重要指标之一。图 21 显示了 LBV 随  $\varphi$  (0.6 ~ 1.4) 的变化情况。可以

看出,随着  $\varphi$  的增加, LBV 先增大后减小。当  $X_{H_2}$  从 0 增加到 100% 时,甲烷氢混合物的 LBV 在  $\varphi > 1$  时从 37.6 cm/s 增加到 229.2 cm/s。

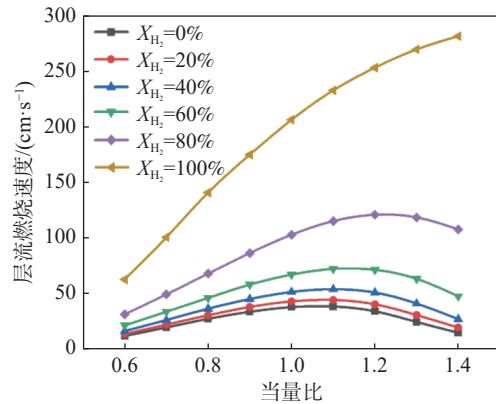


图 21 层流燃烧速度曲线

Fig. 21 Laminar combustion rate curve

由以上分析可知,掺氢能提高绝热火焰温度 (AFT) 和层流燃烧速度 (LBV), 促进了燃烧发生的活性。

## 6 掺氢对 H、O 和 OH 自由基的影响

自由基 (H、O 和 OH) 的研究有助于理解化学反应动力学和整个燃烧过程。图 22 ~ 图 27 分别显示了在当量比为 0.6 和 0.8 时,加氢对 H、O、OH 摩尔分数的影响。氢的加入不仅使这三种自由基的摩尔分数增加,而且使这三种自由基的形成更早。此外,当  $\varphi$  从 0.6 增加到 0.8 时, H、O 和 OH 的形成显著增加。无论当量比或氢掺杂程度如何,达到峰值后 H 和 O 自由基的摩尔分数都比 OH 自由基的摩尔分数下降快得多。

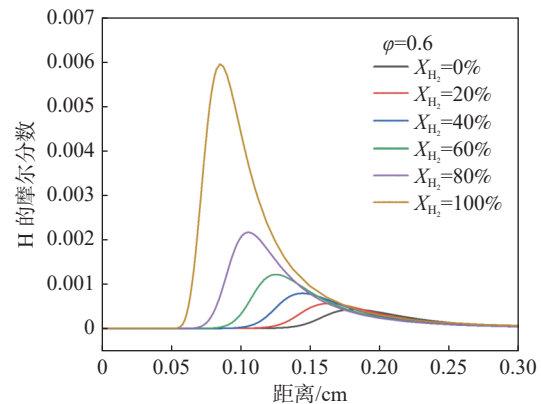
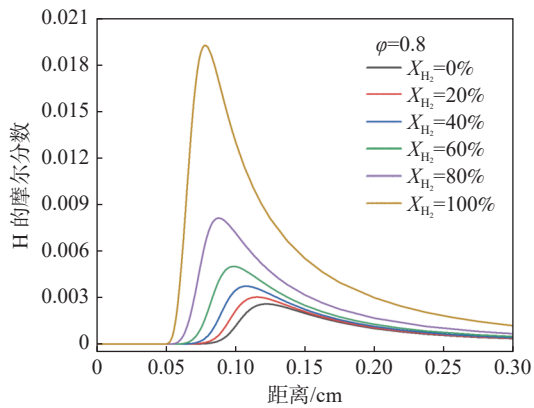
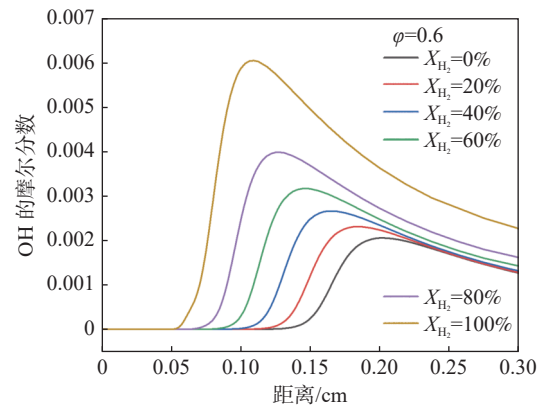
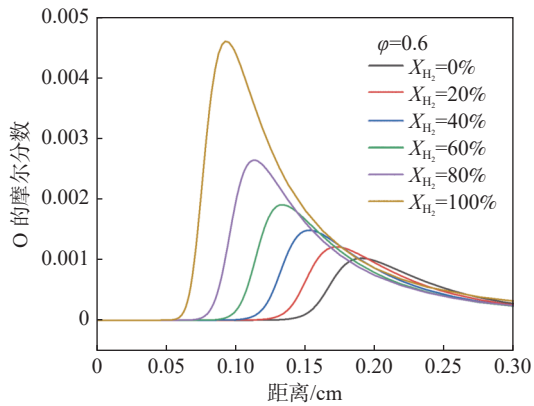
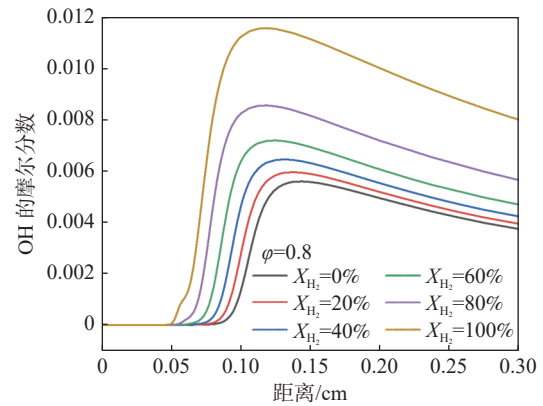
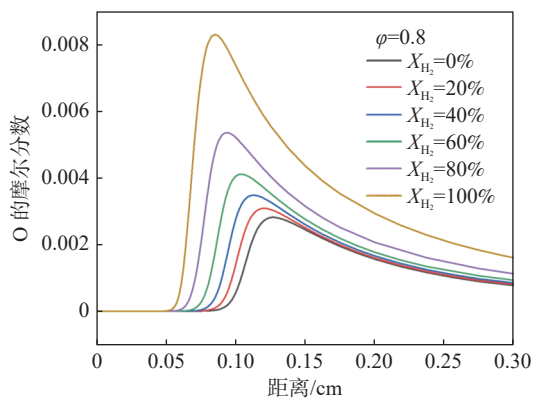


图 22 掺氢对 H 自由基的影响 ( $\varphi=0.6$ )

Fig. 22 Effect on H radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.6$ )



图 23 掺氢对 H 自由基的影响( $\varphi=0.8$ )Fig. 23 Effect on H radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.8$ )图 26 掺氢对 OH 自由基的影响( $\varphi=0.6$ )Fig. 26 Effect on OH radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.6$ )图 24 掺氢对 O 自由基的影响( $\varphi=0.6$ )Fig. 24 Effect on O radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.6$ )图 27 掺氢对 OH 自由基的影响( $\varphi=0.8$ )Fig. 27 Effect on OH radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.8$ )图 25 掺氢对 O 自由基的影响( $\varphi=0.8$ )Fig. 25 Effect on O radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.8$ )

此外, 反应速率系数对温度有很强的依赖性。因此, 反应速率随着等当比或氢含量的增加而增加, 促进 H、O 和 OH 自由基的形成。

同时, 可以明显看出, 提高掺氢比例, 能促进 H、

O 和 OH 自由基的形成。

## 7 掺氢对温度分布的影响

图 28 和图 29 研究了加氢对甲烷-氢气燃烧火焰温度的影响。当  $X_{H_2}$  从 0 升高到 100% 时, 混合物的反应活性增强, 火焰温度升高。此外,  $X_{H_2}$  的增加 (0% ~ 100%) 增强了火焰前缘区域的温度梯度。快速温升区域为 0.05 ~ 0.15 cm, 这也是 H、O、OH 自由基摩尔分数快速增加的区域, 说明氢对火焰温度梯度的影响与 H、O、OH 自由基摩尔分数的影响是一致的。综上所述, 提高当量比 (0.6 ~ 0.8) 可以促进甲烷-氢混合物的燃烧速率, 导致  $\varphi = 0.8$  的火焰温度高于  $\varphi = 0.6$ 。同时可以看出, 提高掺氢的比例, 火焰温度也会增加。

## 8 支链反应和链生长反应分析

由 H、O 和 OH 引发的支链反应和链生长反应



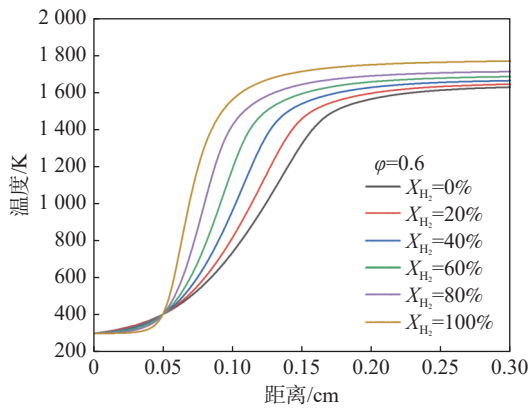


图 28 掺氢对温度分布的影响( $\varphi=0.6$ )

Fig. 28 Effect on distribution of temperature with hydrogen blending ( $\varphi=0.6$ )

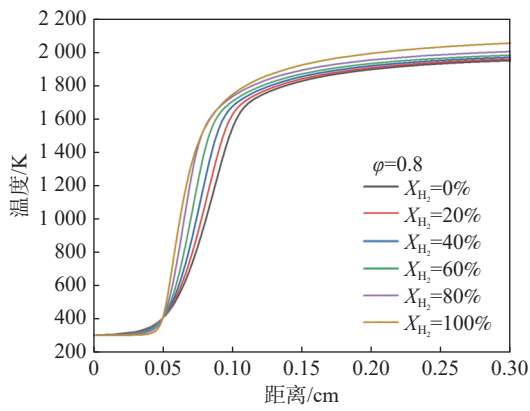


图 29 掺氢对温度分布的影响( $\varphi=0.8$ )

Fig. 29 Effect on distribution of temperature with hydrogen blending ( $\varphi=0.8$ )

在化学反应中起着最重要的作用。图 30 ~ 图 35 显示了加氢 ( $X_{H_2} = 0\%$ 、 $40\%$ 、 $80\%$ 、 $100\%$ ) 对 H、O、

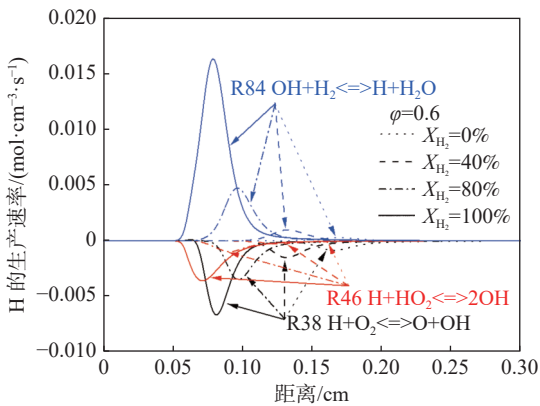


图 30 掺氢对 H 自由基生成速率的影响( $\varphi=0.6$ )

Fig. 30 Effect on production rate of H radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.6$ )

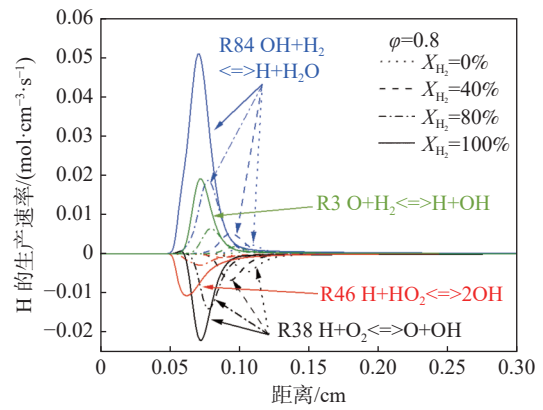


图 31 掺氢对 H 自由基生成速率的影响( $\varphi=0.8$ )

Fig. 31 Effect on production rate of H radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.8$ )

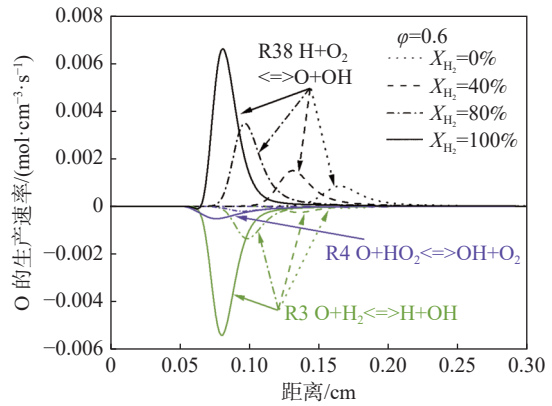


图 32 掺氢对 O 自由基生成速率的影响( $\varphi=0.6$ )

Fig. 32 Effect on production rate of O radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.6$ )

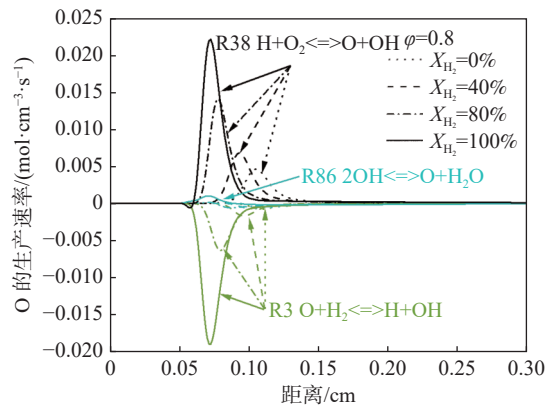
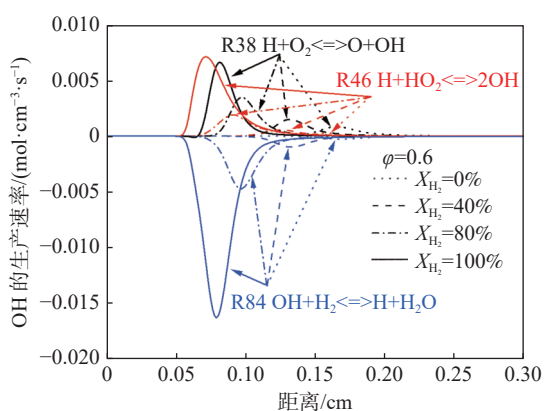
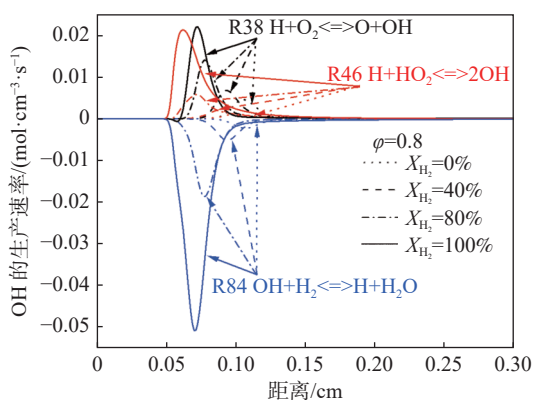
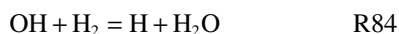


图 33 掺氢对 O 自由基生成速率的影响( $\varphi=0.8$ )

Fig. 33 Effect on production rate of O radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.8$ )

OH 自由基生成率的影响。可以看出形成 H、O 和 OH 的主要反应有:

图 34 掺氢对 OH 自由基生成速率的影响( $\varphi=0.6$ )Fig. 34 Effect on production rate of OH radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.6$ )图 35 掺氢对 OH 自由基生成速率的影响( $\varphi=0.8$ )Fig. 35 Effect on production rate of OH radical with hydrogen blending ( $\varphi=0.8$ )

从图中分析可得燃烧过程的主要反应区域位于自由基浓度峰值发生的位置。随着氢含量 ( $X_{\text{H}_2} = 0\%、40\%、80\%、100\%$ ) 和等效比 ( $0.6 \sim 0.8$ ) 的增加, 自由基生成率显著增加。此外, 随着氢的加入, H、O 和 OH 生成速率的峰位向上移动。 $X_{\text{H}_2}$  的增加可以加速 (R84) 的反应, 产生更多的 H 自由基, 从而进一步促进 (R38) 的反应。

## 9 结论

燃气轮机的贫预混燃烧技术能使燃烧偏离理论空气量, 是目前降低  $\text{NO}_x$  排放主要技术, 通过在天然气中掺混氢气燃烧, 能够有效降低化石能源的消耗以及降低碳排放量。但天然气掺氢的贫预混燃烧所

带来的较高的火焰温度反而会促进  $\text{NO}_x$  的生成, 同时, 在较低的当量比下将会产生更多的 CO。

我们通过分析不同初试温度和压力的层流燃烧速度、 $\text{NO}_x$  和 CO 排放; 不同掺氢比例对绝热火焰温度和层流燃烧速度的影响; 不同掺氢比例 H、O 和 OH 自由基的影响; 不同掺氢比例对温度分布的影响以及掺氢比例对支链反应和链生长反应的分析, 掌握了天然气掺氢由贫到富燃烧的基本规律。可以得出以下主要结论:

1) 层流燃烧速度 (LBV) 与绝热火焰温度 (AFT) 有很大的相关性, 除纯氢燃料外, LBV 和 AFT 随当量比  $\varphi$  先增大后减小。它们在大约  $\varphi = 1.05$  处达到峰值。在相同当量比下, 随着  $X_{\text{H}_2}$  的增加, LBV 和 AFT 逐渐增大。

2) 随着  $X_{\text{H}_2}$  ( $0\% \sim 100\%$ ) 和  $\varphi$  ( $0.6 \sim 0.8$ ) 的增加, H、O 和 OH 自由基的摩尔分数和生成率都有所增加。形成 H、O 和 OH 自由基的主要反应是  $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$  和  $\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ 。此外, 氢的加入促进了火焰温度的升高, 也增强了火焰区域的温度梯度。

3) 降低当量比 (从 1.2 到 0.6) 可以显著降低  $\text{NO}$  排放。添加氢气可以提高燃料稀薄条件下的燃烧稳定性。可以为燃气轮机掺氢贫预混燃烧提供一定的理论经验。

## 参考文献:

- [1] AL-SHETWI A Q. Sustainable development of renewable energy integrated power sector: trends, environmental impacts, and recent challenges [J]. *Science of the total environment*, 2022, 822: 153645. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.153645](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645).
- [2] BAGHERI G, RANZI E, PELUCCHI M, et al. Comprehensive kinetic study of combustion technologies for low environmental impact: MILD and OXY-fuel combustion of methane [J]. *Combustion and flame*, 2020, 212: 142-155. DOI: [10.1016/j.combustflame.2019.10.014](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.014).
- [3] 胡尔江, 黄佐华, 郑建军, 等. 甲烷-氢气-空气预混火焰层流燃烧速度及 NO 生成的数值研究 [J]. *国际氢能杂志*, 2009, 34(15): 6545-6557. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.05.080](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.080).  
HU E J, HUANG Z H, ZHENG J J, et al. Numerical study on laminar burning velocity and NO formation of premixed methane-hydrogen-air flames [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2009, 34(15): 6545-6557. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.05.080](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.080).
- [4] 何易团, 梁孟清, 刘春志, 等. 甲烷/空气非混合层流火焰加氢动

- 力学激励 [J]. *国际氢能杂志*, 2021, 46(27): 14813-14823. DOI: [10.1016/J.IJHYDENE.2021.01.230](https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.01.230).
- HE Y T, LIANG M Q, LIU C Z, et al. Kinetic incentive of hydrogen addition on nonpremixed laminar methane/air flames [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2021, 46( 27) : 14813-14823. DOI: [10.1016/J.IJHYDENE.2021.01.230](https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.01.230).
- [5] 魏志龙, 何震, 甄海生, 等. H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 添加对富氢沼气混合物层流火焰速度耦合影响的动力学建模研究 [J]. *国际氢能杂志*, 2020, 45( 51) : 27891-27903. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.07.119](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.119).
- WEI Z L, HE Z, ZHEN H S, et al. Kinetic modeling investigation on the coupling effects of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> addition on the laminar flame speed of hydrogen enriched biogas mixture [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2020, 45(51) : 27891-27903. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.07.119](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.119).
- [6] 胡国平, 陈超, 陆海顺, 等. 电气路线图的技术进展、障碍和解决方案综述 [J]. *工程*, 2020, 6(12): 1364-1380. DOI: [10.1016/j.eng.2020.04.016](https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.04.016).
- HU G P, CHEN C, LU H S, et al. A review of technical advances, barriers, and solutions in the power to hydrogen (P<sub>2</sub>H) roadmap [J]. *Engineering*, 2020, 6( 12) : 1364-1380. DOI: [10.1016/j.eng.2020.04.016](https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.04.016).
- [7] ROBINSON A E, FUNKE H H W, HENDRICK P, et al. Development of a hydrogen fuelled 1 kW ultra micro gas turbine with special respect to designing, testing and mapping of the  $\mu$ -scale combustor [C]//2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, November 24-27, 2008. Singapore: IEEE, 2008: 656-660. DOI: [10.1109/ICSET.2008.4747088](https://doi.org/10.1109/ICSET.2008.4747088).
- [8] TAAMALLAH S, VOGIATZAKI K, ALZHRANI F M, et al. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: technology, fundamentals, and numerical simulations [J]. *Applied energy*, 2015, 154: 1020-1047. DOI: [10.1016/j.apenergy.2015.04.044](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.044).
- [9] RASHWAN S S, NEMITALLAH M A, HABIB M A. Review on premixed combustion technology: stability, emission control, applications, and numerical case study [J]. *Energy & fuels*, 2016, 30(12): 9981-10014. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.6b02386](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02386).
- [10] LIEUWEN T, YANG V, YETTER R. Synthesis gas combustion: fundamentals and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009. DOI: [10.1201/9781420085358](https://doi.org/10.1201/9781420085358).
- [11] 任飞, 储华强, 项龙凯, 等. 氢气添加对天然气主要组分层流预混燃烧特性的影响 [J]. *能源研究学报*, 2019, 92(4): 1178-1190 DOI: [10.1016/j.joei.2018.05.011](https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.05.011).
- REN F, CHU H Q, XIANG L K, et al. Effect of hydrogen addition on the laminar premixed combustion characteristics the main components of natural gas [J]. *Journal of the energy institute*, 2019, 92(4) : 1178-1190. DOI: [10.1016/j.joei.2018.05.011](https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.05.011).
- [12] SMITH G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. GRI-mech 3.0 [EB/OL]. (1999) [2023-04-23]. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>.
- [13] Combustion Research Group. Combustion research at UC San Diego [EB/OL]. [2023-04-23]. <https://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion>.
- [14] 吴志军, 赵文伯, 张青, 等. 基于热氛围燃烧器的湍流射流起升火焰基础研究进展 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(6): 1881-1891. DOI: [10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606017](https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606017).
- WU Z J, ZHAO W B, ZHANG Q, et al. Progress in basic research of turbulent spray lifted flame based on controllable active thermos-atmosphere combustor [J]. *Journal of Jilin University (engineering and technology edition)*, 2016, 46( 6) : 1881-1891. DOI: [10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606017](https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606017).
- [15] DIRRENBARGER P, GLAUDE P A, GALL H L, et al. Laminar flame velocity of components of natural gas [C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, Canada, June 6-10, 2011. Vancouver: ASME, 2011. DOI: [10.1115/GT2011-46312](https://doi.org/10.1115/GT2011-46312).
- [16] 何勇, 王志华, 杨丽, 等. 基于激光本生法和动力学模拟的典型合成气层流火焰速度研究 [J]. *燃料*, 2012, 95: 206-213 DOI: [10.1016/j.fuel.2011.09.056](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.056).
- HE Y, WANG Z H, YANG L, et al. Investigation of laminar flame speeds of typical syngas using laser based Bunsen method and kinetic simulation [J]. *Fuel*, 2012, 95: 206-213. DOI: [10.1016/j.fuel.2011.09.056](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.056).
- [17] GOSWAMI M, DERKS S C R, COUMANS K, et al. The effect of elevated pressures on the laminar burning velocity of methane + air mixtures [J]. *Combustion and flame*, 2013, 160(9): 1627-1635. DOI: [10.1016/j.combustflame.2013.03.032](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.03.032).
- [18] NONAKA H O B, PEREIRA F M. Experimental and numerical study of CO<sub>2</sub> content effects on the laminar burning velocity of biogas [J]. *Fuel*, 2016, 182: 382-390. DOI: [10.1016/j.fuel.2016.05.098](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.098).
- [19] BOUSHAKI T, DHUÉ Y, SELLE L, et al. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: experimental and numerical analysis [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2012, 37( 11) : 9412-9422. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2012.03.037](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.037).
- [20] HALTER F, CHAUVEAU C, DJEBAÏLI-CHAUMEIX N, et al. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures [J]. *Proceedings of the combustion institute*, 2005, 30(1): 201-208. DOI: [10.1016/j.proci.2004.08.195](https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.195).

- [21] BERWAL P, SOLAGAR S, KUMAR S. Experimental investigations on laminar burning velocity variation of  $\text{CH}_4+\text{H}_2+\text{air}$  mixtures at elevated temperatures [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2022, 47(37): 16686-16697. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.155.
- [22] 胡尔江, 黄佐华, 何佳佳, 等. 甲烷-氢气-空气预混火焰层流燃烧特性的实验与数值研究 [J]. *国际氢能杂志*, 2009, 34(11): 4876-4888 DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.058.
- HU E J, HUANG Z H, HE J 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. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.058.
- [23] DI SARLI V, DI BENEDETTO A. Laminar burning velocity of hydrogen-methane/air premixed flames [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2007, 32(5): 637-646. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.016.
- [24] ILBAS M, CRAYFORD A P, YILMAZ I, 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. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2005.12.007.
- [25] TSE S D, ZHU D L, LAW C K. Morphology and burning rates of expanding spherical flames in  $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{inert}$  mixtures up to 60 atmospheres [J]. *Proceedings of the combustion institute*, 2000, 28(2): 1793-1800. DOI: 10.1016/S0082-0784(00)80581-0.
- [26] CAVANA M, LEONE P. Solar hydrogen from North Africa to Europe through greenstream: a simulation-based analysis of blending scenarios and production plant sizing [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2021, 46(43): 22618-22637. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.065.

---

 作者简介:


李小龙

李小龙 (通信作者)

1979-, 男, 正高级工程师, 热动专业、通信专业双学士, 主要从事燃煤电厂、燃机电厂的勘察设计工作(e-mail)lixiaolong@gedi.com.cn。

洪小飞

1982-, 男, 高级工程师, 热能动力专业, 硕士学位, 主要从事机务专业研究维护工作(e-mail)hongxiaofei@gdyd.com。

陈宇卿

1990-, 男, 工程师, 热能动力专业, 硕士学位, 主要从事燃机电厂的勘察设计工作(e-mail)chenyuqing@gedi.com.cn。

---

 项目简介:

**项目名称** 中国能建广东院科技项目“天然气管道掺氢及掺氢燃烧应用研究”(EV10231W)

**承担单位** 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

**项目概述** 围绕掺氢管道运输特性和防护措施、面向燃机电站的掺氢调压工艺设计与系统优化、掺氢燃气轮机联合循环系统优化的三个方面开展研究。通过天然气管道掺氢、输运及掺氢应用研究的模拟试验及技术支持采购的实施, 目标以获得天然气掺氢调压站背景下管道及其连接件的运行特性、氢脆引发及抑制机制、管材遴选标准以及多准则权衡的设计原则。

**主要创新点** (1) 采用模拟和实验相结合的方法, 获得不同掺氢比下燃料燃烧及其烟气传热流动特性;(2) 提出适应不同掺氢燃烧比例的燃气轮机及其余热锅炉等部件的设计改进措施;(3) 建立综合气源特性的集成调压系统的燃气轮机联合循环装置设计与工艺参数优化方法。

(编辑 赵琪)