

引文: 胡国华, 陈石义, 何松, 等. 城镇终端天然气掺氢燃烧技术现状及展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(8): 145-157.

HU Guohua, CHEN Shiyi, HE Song, et al. Research status and prospect of hydrogen-blended combustion technology of urban terminal natural gas[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(8): 145-157.

城镇终端天然气掺氢燃烧技术现状及展望

胡国华¹ 陈石义¹ 何松² 肖娟² 王斯民² 李天雷³

1. 浙江能源天然气集团有限公司 2. 西安交通大学化学工程与技术学院 3. 中国石油工程建设有限公司西南分公司

摘要: 天然气掺氢是降低城镇终端燃具碳排放的有效途径之一, 对于实现“双碳”目标具有重要意义。掺氢天然气在民用燃具领域具有巨大应用潜力, 为加快城镇终端掺氢天然气利用的进程, 分别从燃气互换性理论、应用实验及数值模拟等方面开展研究, 阐述了天然气掺氢燃烧的可行性, 探讨了掺氢对燃气灶及热水器燃烧性能、热效率以及污染物排放的影响, 对比了天然气燃烧反应机理的特点和适用范围。最后结合我国城镇天然气的相关标准、掺氢安全性及经济性等方面, 指出了限制城镇终端天然气掺氢燃烧技术应用的主要因素以及未来发展趋势。研究结果表明: ①天然气与氢气互换性主要受燃气组分和互换性指标的影响, 天然气适宜的掺氢范围为 0~20%; ②掺氢能够显著降低天然气的碳排放, 但燃具的热效率、氮氧化物排放以及适应性仍需进一步深入研究; ③需要进一步采用量子化学、机器学习等先进手段探究天然气掺氢数值模拟的燃烧反应机理。结论认为, 随着天然气掺氢管道的建设和发展, 掺氢天然气在终端利用领域将展现出巨大潜力, 与此同时掺氢天然气在终端实际应用中仍面临着诸多限制和技术挑战, 天然气掺氢燃烧技术研究现状的系统梳理对推动氢能的安全高效应用具有重要现实意义, 同时也为天然气掺氢燃烧技术的发展提供了研究思路和攻关方向。

关键词: 天然气掺氢; 燃气具; 燃气互换性; 燃烧反应机理; 燃烧特性; 污染物排放; 掺氢比例

中图分类号: TK91 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.08.013

Research status and prospect of hydrogen-blended combustion technology of urban terminal natural gas

HU Guohua¹, CHEN Shiyi¹, HE Song², XIAO Juan², WANG Simin², LI Tianlei³

(1. Zhejiang Energy Natural Gas Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 3. Southwest Branch, China Petroleum Engineering & Construction Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.8, p.145-157, 8/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Blending hydrogen into natural gas is an effective approach to reduce carbon emissions from urban gas appliances and is of great significance for the achievement of "dual carbon" goal. Hydrogen-blended natural gas has huge application potential in the field of civilian gas appliances. To accelerate the utilization process of hydrogen-blended natural gas at urban terminals, this paper conducts research from the aspects of gas interchangeability theory, application experiment and numerical simulation. Then the feasibility of hydrogen-blended natural gas combustion is elaborated, and the impact of hydrogen blending on the combustion performance, thermal efficiency and pollutant emission of gas stoves and water heaters is discussed. Moreover, the characteristics and application scopes of the combustion reaction mechanism of natural gas are compared. Finally, the main factors restricting the application of hydrogen-blended natural gas combustion technology at urban terminals and the future development trends are pointed out from the aspects of relevant standard and hydrogen blending safety and economy of urban natural gas in China. The following results are obtained. First, the interchangeability between natural gas and hydrogen is primarily influenced by the gas composition and interchangeability index, and the suitable hydrogen blending range of natural gas is 0-20%. Second, hydrogen blending can significantly reduce the carbon emission of natural gas, but further research is required to fully understand the effects on the thermal efficiency, nitrogen oxide emission and adaptability of combustion appliance. Third, furthermore, advanced techniques such as quantum chemistry and machine learning are adopted to understand the mechanism of combustion reaction in numerical simulation of natural gas hydrogen blending. In conclusion, with the construction and development of hydrogen-blended natural gas pipeline, the hydrogen-blended natural gas will exhibit huge potential in the field of end utilization, but meanwhile face many limitations and technical challenges. What's more, a systematic review of the research status of hydrogen-blended natural gas combustion technology is of important and practical significance in promoting the safe and efficient application of hydrogen energy, and provides research ideas and directions for the development of hydrogen-blended natural gas combustion technology.

Keywords: Natural gas-hydrogen blending; Gas appliance; Gas interchangeability; Combustion reaction mechanism; Combustion characteristics; Pollutant emission; Hydrogen blending ratio

基金项目: 浙江能源天然气集团有限公司支撑课题“天然气管道掺氢、输送、分离应用技术研究及浙能先导示范项目”(编号: ZNKJ-2021-108)。

作者简介: 胡国华, 1968年生, 高级经济师; 主要从事企业管理与能源规划研究工作; 地址: (310012) 浙江省杭州市上城区望江街道钱江路639号。ORCID: 0009-0007-0841-1292。E-mail: huguohua@zjenergy.com.cn

通信作者: 肖娟, 女, 1992年生, 助理教授, 硕士研究生导师, 博士; 主要从事富氢燃料燃烧的教学与研究工作。地址: (710049) 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号。ORCID: 0000-0001-7378-9522。E-mail: juanxiao@xjtu.edu.cn

0 引言

在实现“碳达峰、碳中和”的“双碳”目标背景下，加强清洁能源的开发与利用，推动能源结构的转型升级，是我国实现可持续发展的关键举措^[1-2]。太阳能和风能作为主要的可再生能源，因其具有分布广泛、资源丰富、清洁环保等特点，受到各国的广泛关注，然而太阳能、风能发电存在较大的波动性和随机性，易造成弃风、弃光现象^[3-4]。2021 年我国风电、光电平均利用率为 96.9% 和 98.0%^[5-6]，仍有超过 250 亿千瓦时电能无法利用。通过可再生能源电解水制氢（电转气）进行储存和利用，不仅可以消纳多余的可再生能源电力，还能增强电网的调峰能力，提高能源利用率^[7-8]。

氢气作为一种零碳排放、清洁高效、能量密度高的能源，被视为未来能源体系的重要组成部分，其发展有助于解决环境污染、能源枯竭等问题^[9-11]。然而，我国氢气储运系统尚不完善，限制了氢气的规模化发展^[12-13]。目前，我国城镇与工业用气主要依赖天然气，并已拥有较为完善的管网系统和终端利用设备，将氢气掺混在天然气中可以实现大规模、低成本的运输和消纳氢气，但氢气的掺入也会导致管道材料的塑性、韧性等力学性能降低，诱发氢脆问题^[14-15]。此外，氢气易在法兰、焊缝等区域发生泄漏，给管网的运行安全带来隐患，因此当前天然气管道掺氢项目的氢气比例相对较低^[16]。尽管如此，掺氢天然气能够有效降低燃气污染物排放，并且在适宜掺氢比例下可以直接在现有燃具上使用^[17-18]。因此，随着管道输运技术的不断进步，掺氢天然气将成为实现纯氢利用的一种有效过渡方式。

氢气燃烧具有点火能量低、可燃极限宽、燃烧

速度快等特点^[19-20]，与天然气掺混后，可提高天然气的燃烧效率和火焰温度，并拓宽火焰的稳定范围，从而改善天然气的燃烧性能^[21]。城镇燃气作为天然气终端利用的主要领域之一，约占天然气总需求的 40%。由此可见，掺氢天然气在民用燃具领域具有巨大应用潜力。目前已有众多研究者对民用燃具掺氢燃烧进行了研究，但缺乏系统性的论述和总结。本文主要针对城镇终端燃具，探讨了天然气与氢气的互换性，并对天然气掺氢燃烧技术的燃烧机理与实验方法进行了梳理、总结和分析，同时指出了掺氢天然气的未来发展趋势，为天然气掺氢燃烧技术的研究提供参考。

1 天然气掺氢燃烧可行性理论分析

由于天然气与氢气的物理化学性质不同，掺混氢气将改变天然气的热负荷、燃烧稳定性和一次空气系数等燃气特性，从而影响终端设备的使用。因此必须首先考虑天然气与氢气的互换性，以确保燃具正常工作^[22-24]。互换性是指一种燃气替换另一种燃气而不会明显影响燃具的运行安全、效率、性能以及污染物排放水平的能力，其中被替换的燃气通常称为基准气，而替换基准气的燃气称为置换气^[25]。

1.1 国内互换性参数

燃气互换性的评价方法有很多种，各国家、地区因天然气成分的差异采用的评判标准和方法不同。中国主要是依据高热值、华白数（沃泊指数）和燃烧势等参数对燃气的互换性进行分析判断^[26-28]。表 1 为高热值、华白数和燃烧势的计算公式及各学者计算得到的极限掺氢比。

表 1 互换性参数表

互换指标	计算公式	吴婷 ^[29]	朱睿 ^[30]	陈豪杰 ^[31]	乔佳等 ^[32]	Sun 等 ^[33]	Xin 等 ^[34]	王西明等 ^[35]	杨沐村等 ^[36]
高热值 ^①	$H_s = \sum_{i=1}^n H_i r_i$	—	—	—	23.00%	27.15%	24.70%	23.00%	23.00%
华白数 ^②	$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{d}}$	65.0%	47.2%	22.0%	42.0%	47.2%	38.2%	21.0% ~ 41.0%	30.0%
燃烧势 ^③	$CP = K \times \frac{r_{H_2} + 0.6(r_{C_mH_n} + r_{CO}) + 0.3r_{CH_4}}{\sqrt{d}}$	24%	24%	25%	—	—	—	23%	21%
相应文献给出的适宜掺氢范围		0 ~ 24%	0 ~ 24%	0 ~ 22%	0 ~ 23%	0 ~ 23%	0 ~ 25%	0 ~ 23%	0 ~ 21%

注：① 高热值为 1 m³ 的燃气完全燃烧且烟气中水蒸气凝结为水时释放出的热量；② 华白数即热负荷指数，可以反映燃具的热负荷情况，其定义为在燃具喷嘴压力不变下燃气热值与燃气相对密度平方根的比值；③ 燃烧势也称为燃烧速度指数，是表征燃烧稳定状态的参数，可以反映燃烧火焰产生离焰、回火和不完全燃烧的倾向性。式中：H_s 表示燃气的高热值，MJ/m³；H_i 表示燃气各组分的高热值，MJ/m³；r_i 表示燃气各组分的体积分数；W_s 表示燃气的华白数，MJ/m³；d 表示燃气的相对密度；CP 表示燃烧势；K 表示燃气中氧的修正系数。

根据 GB/T 13611—2018《城镇燃气分类和基本特性》^[37],我国最初主要通过华白数与燃烧势对城镇天然气进行分类,其中华白数能够反应燃气的热负荷,燃烧势则可以表征离焰、回火、不完全燃烧特性^[38]。城镇燃气灶具适用的天然气多为 12T 天然气,其华白数范围为 45.67 ~ 54.78 MJ/m³、燃烧势范围为 36.3 ~ 69.3。对此,黄明等^[12]以华白数、燃烧势为互换性指标,计算出 12T 天然气基准气(100% CH₄)的掺氢极限为 23%,马向阳等^[39]也得到同样的结果。吴嫦^[29]在 CH₄ 与氢气的互换性研究中发现,随着氢气体积分数的增加,燃烧势不断增大,而华白数则是呈先降低后升高趋势,此外其研究显示华白数的掺氢极限远大于燃烧势,这与朱睿^[30]的研究结果一致。但是,陈豪杰^[31]通过华白数得出的临界氢气比却小于燃烧势的计算结果,这是由于作者将华白数变化范围限制在标准值的 ±5% 以内,低于《城镇燃气分类和基本特性》所规定的华白数波动范围(−9.97% ~ 7.98%)^[40-41]。

热负荷相近是燃气能够进行互换的前提,然而对于某些特殊类型的燃气,单纯依赖华白数并不能全面评估其热负荷特性^[42-43]。例如甲烷的华白数为 50.71 MJ/m³、高热值为 37.77 MJ/m³,而氢气的华白数为 45.78 MJ/m³、高热值为 12.09 MJ/m³。尽管两者的华白数较为相近,但氢气热值仅为甲烷的 1/3。因此,美国和部分欧洲国家将高热值也作为燃气分类的指标。此外,由于不同种类天然气之间燃烧势变化范围较小,所以许多国家并没有采用燃烧势。对此,我国在 2018 年修订的《城镇燃气分类和基本特性》^[44]中也去除了燃烧势,改用华白数、高热值来分类天然气,并将 12T 天然气的华白数范围改为 45.66 ~ 54.77 MJ/m³、高热值范围定为 31.97 ~ 43.57 MJ/m³。基于新国标,赵伟等^[45]计算某工业园区天然气的掺氢极限为 29.6%,王玮等^[46]得出某管道天然气的最大掺氢比为 27%。

2021 年中国城市燃气氢能发展创新联盟制订了 T/CHAG 1—2021《富氢天然气燃气分类和基本特性》^[47],该标准规定 12T 天然气以及 10S(掺氢 10%)、20S(掺氢 20%)富氢天然气的华白数、高热值、燃烧势需在相应的波动范围内,同时该标准明确了富氢天然气的各种试验气组分及测试要求,进一步推动了掺氢天然气试验的规范化和标准化进程。王西明等^[35]分析比较了不同燃气的掺氢极限,发现由华白数得到的各气源适宜掺氢范围有较大差异,而通过高热值、燃烧势得到的掺氢极限均接近 23%。

杨沐村等^[36]采用 GRI Mech 3.0 甲烷燃烧机理计算掺氢燃气的热值、相对密度等物性参数,从而确定甲烷的适宜掺氢范围。

综上,华白数在掺氢方面具有较宽广的极限范围,燃气组分对其影响较为显著。相比之下,高热值和燃烧势对于掺氢的范围限制则较为严格,但受燃气组分的影响较小。由此可见,在互换性计算时,限制天然气掺氢比例的互换性参数主要为高热值或燃烧势。

1.2 国外互换性参数

国外常用的互换性判定方法主要有 A.G.A 指数法和 Weave 指数法。A.G.A 指数法由美国燃气协会提出,其包括离焰指数(I_L)、回火指数(I_F)和黄焰指数(I_Y),当 3 个指数同时符合指标时,燃气才能进行互换^[48]。Weave 指数法是根据美国燃气协会 36 号公告法改进得到的,其主要由热负荷指数(J_H)、引射指数(J_A)、回火指数(J_F)、脱火指数(J_L)、CO 指数(J_I)和黄焰指数(J_Y)组成^[49-50]。A.G.A 各指数以及 Weave 各指数的公式、参考范围如表 2 所示。

A.G.A 指数法是专门针对天然气推导提出的一种方法,其在预测天然气的互换性上具备优势^[28]。有研究表明^[29,31],随着氢气掺混比的增加,回火指数与黄焰指数逐渐升高,而离焰指数呈逐渐下降趋势,其中黄焰指数与离焰指数始终满足互换要求,即理论上任意掺氢比的燃气均不会出现黄焰与脱火现象。因此,影响燃气互换性的主要是回火指数。陈豪杰^[31]对陕甘宁天然气掺氢后的 A.G.A 指数进行分析,发现当氢气比例小于 28% 时,回火指数处于合适区间。吴嫦^[29]、Sun 等^[33]基于 A.G.A 指数得到重庆天然气的适宜掺氢范围在 0 ~ 23%,而周军等^[51]计算出某管网天然气允许的掺氢比例不超过 20%。王西明等^[35]研究了各气源 A.G.A 指数的变化趋势,发现各气源之间离焰、黄焰指数差异较为明显,而回火指数基本不受气质组分的影响,因此各燃气掺氢范围比较相近。

Weave 指数可反映燃气发生离焰、黄焰、回火和不完全燃烧的倾向性,适用于天然气、液化石油气、人工煤气等多种燃气的互换性判定。Weave 指数一部分是由理论推导而得,另一部分则来源于实验研究^[28,52]。当燃气中氢气体积分数逐渐增大时,其热负荷指数先减小后增大,CO 指数、引射指数、脱火指数以及黄焰指数均逐渐降低,而回火指数则逐渐增加。赵伟等^[45]、周军等^[51]和吴嫦^[29]等由 Weave 指

表 2 两种指数公式及判定范围表

指数	公式	合适 / 完全互换	勉强合适 / 基本互换
A.G.A	$I_L = \frac{K_a}{\frac{f_a}{f_s} \frac{\alpha_s}{\alpha_a} \left(K_s - \lg \frac{f_a}{f_s} \right)}$	< 1.0	1.00 ~ 1.06
	$I_F = \frac{K_s}{K_a} \frac{f_s}{f_a} \sqrt{\frac{H_s}{39\,940}}$	< 1.18	1.18 ~ 1.20
	$I_Y = \frac{f_s \alpha_a \alpha'_{ay}}{f_a \alpha_s \alpha'_{sy}}$	> 1.0	1.0 ~ 0.8
Weave	$J_H = \frac{H_s}{H_a} \sqrt{\frac{d_a}{d_s}}$	1	0.90 ~ 1.05
	$J_A = \frac{V_s}{V_a} \sqrt{\frac{d_a}{d_s}}$	1	0.8 ~ 1.2
	$J_F = \frac{S_s}{S_a} - 1.4 J_A + 0.4$	0	≤ 0.26
	$J_L = J_A \frac{S_s}{S_a} \frac{1-r_{O_2}}{1-r_{O_2}}$	1	≥ 0.64
	$J_i = J_A - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634$	0	≤ 0.05
	$J_Y = J_A + \frac{N_s - N_a}{100} - 1$	0	≥ 0.3

注： K_a 、 K_s 分别表示基准气和置换气的离焰极限常数； f_a 、 f_s 分别表示基准气和置换气的一次空气因数； α_a 、 α_s 分别表示基准气和置换气完全燃烧每释放 105 kJ 热量所需消耗的理论空气量， m^3 ； α'_{ay} 、 α'_{sy} 分别表示基准气和置换气的黄焰极限一次空气系数； d_a 、 d_s 分别表示基准气和置换气的相对密度； V_a 、 V_s 分别表示单位体积基准气和置换气完全燃烧所需的理论空气量， m^3 ； S_a 、 S_s 分别表示基准气和置换气的火焰速度指数； R_a 、 R_s 分别表示基准气和置换气中氢原子数与烃类组分中碳原子数的比值； N_a 、 N_s 分别表示基准气和置换气 100 个燃气分子完全燃烧析出的碳原子数。

数计算的最大氢气掺混比均在 9% 左右，这与 A.G.A 指数法的判定结果具有较大差异，主要原因在于 Weave 指数法对回火指数的判定更为严格。

综上所述，天然气与氢气的互换性受多方面因素综合影响，不同的燃气组分、互换性指标、参考标准以及计算方法均可能导致燃气掺氢范围的差异。总的来看，0 ~ 20% 是一个基于理论互换的适宜掺氢范围。目前，国内大多研究者主要还是依据国标推荐的高热值及华白数来评估天然气与氢气的互换性，然而其没有考虑回火、离焰、黄焰等燃烧特性。因此，有必要在满足高热值、华白数的基础上，结合 A.G.A 指数或燃烧势综合评估掺氢天然气的互换性。然而，基于燃气互换性理论分析的掺氢范围仅能作为掺氢天然气可行性的初步探讨，要想更准确地评估天然气掺氢后的变化，还需通过实验或模拟进一步研究掺氢天然气的实际燃烧特性。

2 天然气掺氢燃烧城镇终端利用实验研究

氢气虽然可以改善天然气燃烧性能，但由于氢气层流燃烧速度较快，容易导致回火等燃烧不稳定现象，从而危及原有燃气系统的安全运行。因此，许多研究者开展了针对城镇燃气民用燃具的掺氢燃烧实验，以深入分析氢气对天然气燃烧性能的影响。民用燃具作为连接天然气供应与民众日常生活的纽带，其种类繁多，主要包括燃气灶具、燃气热水器等。家用燃气具的性能要求及测试方法主要依据 GB 16410—2020《家用燃气灶》^[53]、GB 6932—2015《家用燃气快速热水器》^[54] 以及 GB/T 16411—2023《家用燃气用具通用试验方法》^[55] 等国家标准。

2.1 燃气灶具

燃气灶具作为一种常见的家用燃具，其燃烧稳定性备受瞩目。陈豪杰^[31]基于煤制天然气对 3 种不同的燃气灶进行了掺氢燃烧测试，发现掺氢比例达到 5% 时，燃气灶的实际热负荷与额定热负荷的最大偏差为 9.3%，满足国家标准（±10% 以内）的要求^[53]，并且燃烧过程中未出现回火、脱火等不稳定现象。罗子萱等^[40]在燃气灶上测试了 12T 天然气基准气掺混 0 ~ 20% 内氢气的燃烧情况，发现其点火率、火焰稳定性以及热效率均满足相关要求，表明掺氢比例低于 20% 的天然气可直接在常规天然气燃气灶上使用，这与杨沐村等^[36]、严荣松等^[41]研究结果一致。此外，刘方等^[56]通过实验尝试将掺氢比例提升至 50%，结果显示全预混与部分预混燃气灶燃烧火焰均为正常状态，但热水器、壁挂炉以及大锅灶等家用燃具出现了黄焰、回火等异常现象，说明不同燃具适应的掺氢范围不同。

吴嫦^[29]、马向阳等^[39]进一步研究了不同灶前压力下甲烷掺氢对大气式燃气灶燃烧特性的影响。实验表明，在灶前压力保持不变时，随着掺氢比例的增加，燃气的一次空气系数逐渐升高。当灶前压力发生变化时，燃气灶的热效率随着氢气体积分数的增大呈上升趋势，并在额定压力 2 kPa 下热效率提升最为显著。其原因在于氢气具有较高的燃烧速度和扩散系数，氢气的加入有利于增强换热。此外，氢气含量的增加一方面降低了 C/H 比例，另一方面能够增加 OH 自由基的生成，从而促进 CO 氧化成 CO₂，进而减少 CO 的排放。Sun 等^[33]的研究也观察到相似的热效率与 CO 变化规律。然而，掺氢也会导致火焰高度缩短，

热量损失增大,对火焰与烹饪器具之间的热交换产生不利影响。朱宏丹等^[57]测得某管道天然气在掺氢10%、20%、30%、40%时,燃气灶实测热效率逐渐降低,且当掺氢比大于20%时,下降趋势更为显著。

天然气燃烧过程中,氮氧化物的生成路径主要包括热力型 NO_x 以及快速型 NO_x 。热力型 NO_x 主要是氮气在高温下氧化生成,同时还受氧气浓度、停留时间等因素的影响。而快速型 NO_x 则是由富燃料燃烧区域生成的碳氢自由基与 N_2 、 O_2 结合生成的,其主要与空气系数有关^[58-61]。随着掺氢比例的提升,燃烧温度升高,促进了热力型 NO_x 生成,但同时燃烧扩散速度加快,导致氧和氮在高温区的停留时间缩短,从而抑制热力型 NO_x 的生成。此外,由于氢气的化学当量(ϕ)比较小,氢气掺入天然气使得一次空气系数增大,进而影响快速型 NO_x 的生成。由此可知,氮氧化物的排放受上述各种因素的综合影响。图1展示了各研究者针对燃气灶 NO_x 排放浓度的测试结果,随着掺氢比的增大,吴嫦^[29]实验结果显示污染物中的 NO_x 的含量呈下降趋势,其认为停留时间对 NO_x 的生成起主导作用。而朱宏丹等^[57]、Fang等^[62]则发现 NO_x 排放浓度基本保持不变。Zhao等^[63]测得掺氢20%天然气相比于甲烷,其 NO_x 排放浓度降低约23%。罗子萱等^[40]的研究显示 NO_x 排放浓度随掺氢比的增大呈波动状态。各学者得到 NO_x 排放水平存在较大差异,可能是由于采用的燃气灶型号、燃气成分、测试工况以及污染物测试手段的不同所导致。

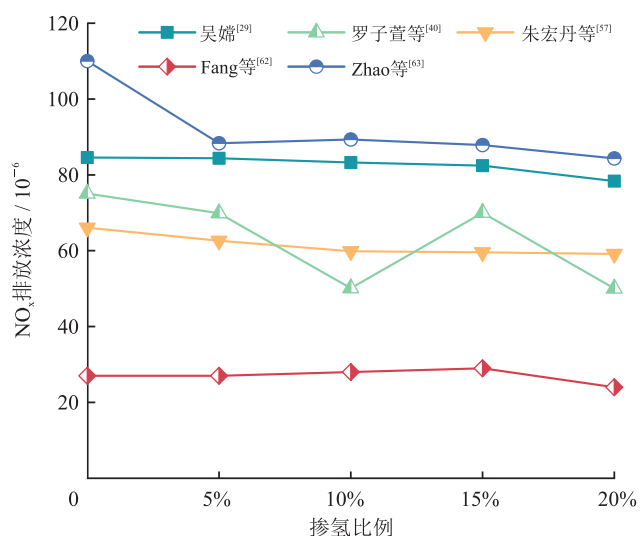


图1 不同学者测试燃气灶在不同掺氢比下的 NO_x 排放浓度对比图

Zhao等^[63]建立灶台燃烧器测试装置(图2),其研究了加氢对灶具燃烧和烹饪性能的影响。研究

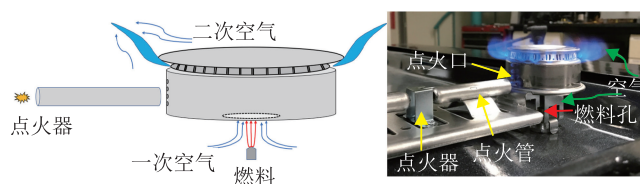


图2 灶台燃烧器测试装置示意图

(资料来源:据本文参考文献[63])

发现氢气含量的增大会缩短点火时间,提高燃烧噪声及燃烧器温度,从而影响燃烧器的使用寿命。当掺氢比例在75%左右时燃烧器会出现回火,而在加热烹饪锅具时,回火极限会降至55%。作者还采用了12% CO_2 、3% O_2 以及热值校正法对烟气测试结果进行了修正,以减小周围空气稀释烟气所造成的测量误差。结果表明, O_2 与热值校正法的结果有相似的变化趋势,但由于热值校正法将 NO 转化为 NO_2 ,因此两种方法得到的 NO 与 NO_x 含量存在较大差异。而 CO_2 校正法计算的 CO 、 NO 、 NO_x 的变化趋势与前两者相反,不适用于富氢燃气排放量的校正。

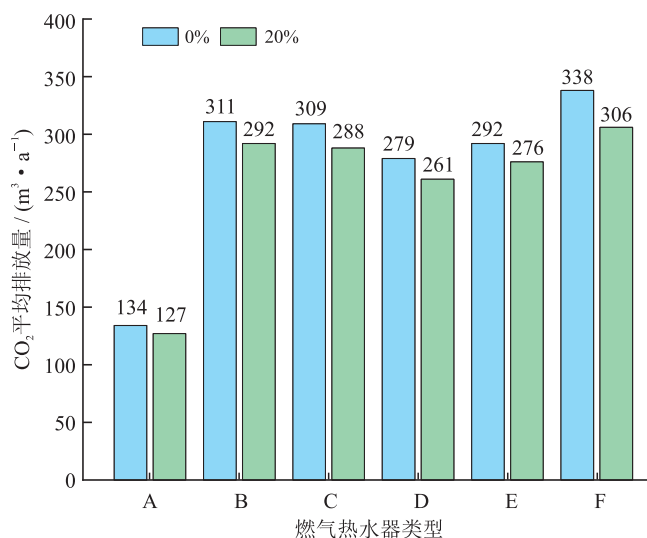
综上所述,众多研究表明对天然气掺混少量的氢气后(不超过20%),燃气灶的燃烧稳定性及燃烧性能并未受到明显影响,而氢气的加入可以改善污染物的排放,因此在现有灶具上直接使用混氢天然气具有一定的可行性。

2.2 热水器

作为重要的家用热水供应设备,热水器在掺氢天然气推广应用中日益受到关注。陈豪杰^[31]测试了冷凝式、强排式和烟道式3种类型热水器掺氢后的燃烧性能,实验表明3种热水器的热负荷偏差均符合国标10%的规定。其中冷凝式与强排式热水器在掺氢20%时可以正常燃烧,甚至在掺氢50%时仍未出现回火、脱火等异常现象,而烟道式热水器由于燃烧强度低,当掺氢比例达40%时即发生回火。同时,随着掺氢比的增大,热水器的 CO 排放有降低的趋势,但 NO_x 排放变化不明显,罗子萱等^[40]通过烟气排放测试发现类似的结论。Choudhury等^[64]则对比了低 NO_x 与传统储水式热水器的性能,发现两种热水器在掺氢10%内可以安全可靠运行。但随着掺氢比的增加,低 NO_x 热水器的 NO_x 排放浓度下降,传统热水器的 NO_x 排放浓度则略有增加。

Sun等^[33]针对6种燃气热水器,开展了掺氢天然气(0~20%)对热水器性能影响的研究。结果显示,随着加氢量的提升,过量空气系数逐渐升高,燃烧产物中水蒸气含量增大,烟气与水蒸气换热时可利

用的汽化潜热相应增加,因此在满负荷以及50%额定功率运行下其热效率呈现出逐步升高的趋势。同时,作者还统计了6种热水器在掺氢0%和20%时CO₂的年平均排放量(图3)。由图可知,当使用20%掺氢天然气时,热水器CO₂年排放量可降低5%,其中直流鼓风机全预混冷凝式热水器F碳减排潜力可达9.47%。但是氢气单位体积热值低,用户需消耗更多掺氢天然气以满足相同的热负荷需求。并且,Sun等^[33]指出由于电解水制氢技术的限制,目前每立方米氢气的生产成本约为4元,几乎是天然气价格(2.34元/m³)的两倍,因此使用20%掺氢天然气将导致燃气成本增加32.7%左右。



A. 天然气热水器; B. 交流鼓风机强排式热水器; C. 直流鼓风机式强排式热水器; D. 交流鼓风机冷凝式热水器; E. 直流鼓风机冷凝式热水器; F. 直流鼓风机全预混冷凝式热水器。

图3 不同类型热水器掺氢0%、20%时CO₂年平均排放量图

(资料来源:据本文参考文献[33])

Zhan等^[65]探讨了在不同热负荷下热水器掺氢0~40%的燃烧特性。研究发现,使用纯天然气燃烧时,燃烧器内焰高度依次递减,而在掺入氢气后内焰分布趋于均匀。同时,在同一热负荷下,火焰高度随着掺氢比的增加先变长后缩短,这是因为氢气的燃烧速度快,导致火孔流出速度增大,从而致使火焰变长。当氢气含量较高时,火焰高度主要取决于火焰的传播速度,而火焰传播速度的增大会导致火焰高度降低。此外,研究显示火焰高度与燃烧器的表面温度呈负相关,随着掺氢比的增加,燃烧器温度表现为先下降后上升的趋势,当掺氢比达40%时,燃烧器会出现过热变红现象。万和电气公司^[66]以80%CH₄、20%H₂为基准气设计了一款家用燃气热水器,谢依

桐等^[67]基于该热水器进行了实验测试,发现天然气与基准气在该热水器上均未发生不稳定燃烧现象,甚至掺氢40%时仍然能稳定工作,这表明该热水器具有良好的稳定性。

总的来看,绝大部分家用燃气具可在不改变原有燃烧器结构的情况下,直接使用氢气含量低于20%的混氢天然气。然而,一些研究指出掺氢对燃具的热效率及使用寿命会产生影响,亟须进一步改进或开发适用于掺氢天然气的燃具结构。同时,由于目前制备和输运氢气成本的限制,虽然掺氢天然气可以降低碳排放,但其经济性仍需综合考量。此外,现有研究中关于掺氢天然气的测试大多停留在实验室阶段,对燃具设备的可靠性和材料的适应性有待进一步探究,因此有必要开展掺氢天然气在城镇终端燃具的长周期应用测试。

3 天然气掺氢燃烧数值模拟研究

实验研究是分析天然气掺氢燃烧特性的有力手段,但其通常需要投入大量的时间资源以及精密仪器。由于燃烧过程的多样性和复杂性,单凭实验难以揭示天然气掺氢燃烧的内在机理。相比之下,数值模拟能够详细描述整个燃烧过程,深入分析燃烧的流场特性、温度分布及污染物排放等重要参数,有助于更全面地理解燃烧背后的机理。在燃烧数值模拟中,化学反应动力学机理是构建燃烧模型和预测燃烧行为的基础,它可以模拟不同组分之间相互作用和反应过程。因此,选择合理的化学反应机理对于天然气掺氢燃烧数值模拟的准确性和可靠性至关重要。燃烧反应机理包括详细反应机理、全局(总包)反应机理以及简化反应机理。

3.1 详细反应机理

详细反应机理包含数百种组分和数千个基元反应,能够准确描述燃料和所有中间体各种可能的反应^[68]。目前,较为全面的天然气燃烧反应机理为NUI Galway燃烧化学中心开发的Aramco Mech 2.0机理,其适用于C₁—C₄碳氢化合物和含氧燃料^[68-69],该机理已通过大量的实验测量及验证,对于高压下点火延迟的预测较为精准。在Aramco Mech 2.0基础上,Zhou等^[70]基于Kéromnès^[71]、Metcalfé^[72]、Burke^[73]等的碳氢化合物子机理,建立了用于描述1,3-丁二烯燃烧的详细化学动力学机制(Aramco Mech 3.0),其包括581个物种和3 037个反应。

美国劳伦斯伯克利国家实验室针对天然气燃烧

开发了 GRI Mech 反应机理, 并持续对其进行优化和更新, 当前最新的版本为 GRI Mech 3.0, 包含 53 个组分和 325 个基元反应^[74]。相较于 GRI Mech 2.11, GRI Mech 3.0 添加了乙醛和乙烯氧基等化学组分, 能够更好地模拟乙烯与丙烷的燃烧过程, 同时 GRI Mech 3.0 适用的温度及压力范围也更广^[75-76]。此外, 由于 GRI Mech 系列反应机理包含氮氧化物, 可用于预测污染物排放, 因此被广泛用于天然气及甲烷燃烧的数值模拟。冯帅明等^[77-78]基于 GRI Mech 2.11, 采用涡耗散概念模型 (Eddy dissipation combustion model, EDC) 对家用燃烧器进行了数值模拟研究, 结果表明随掺氢比的增加, 火焰峰值温度升高, 高温区位置提前, 污染物中 CO 浓度降低, 而 NO_x 浓度上升。Lamioni^[79]则是使用 GRI Mech 3.0 机理模拟分析了加氢对冷凝锅炉多孔燃烧器燃烧性能的影响。

USC Mech 2.0 (USC II) 作为一种描述 H₂、CO 以及 C₁—C₄ 碳氢化合物的详细反应机理, 包括 111 种组分以及 784 个基元反应, 该机理由南加利福尼亚大学基于 GRI Mech 系列子机理开发, 其对甲烷燃烧

火焰速度的预测与实验结果吻合较好^[80]。Zhang 等^[81]通过激波管实验测试了掺氢甲烷在 1.8 MPa 压力下的点火延迟时间, 并与 USC Mech 2.0、UBC Mech 2.1、GRI Mech 3.0 以及 NUI Galway Mech 的模拟结果进行了对比, 结果如图 4 所示。图 4-a 显示了上述 4 种机理对纯甲烷点火延迟时间的预测情况, 从图中可以看出 USC Mech 2.0 的预测结果与实验数据高度吻合, 其他 3 种机理的预测与之相差不大。由图 4-b 可知, UBC Mech 2.1 机理在预测纯氢点火延迟时间方面表现不佳, 而 USC Mech 2.0 和 NUI Galway Mech 机理的预测精度则相对较高, 因此 USC Mech 2.0 更适用于模拟掺氢甲烷混合燃料的点火过程^[82]。斯坦福大学的 Wang 以及 SRI 国际研究所的 Gregory Smith 针对小烃燃料的燃烧建立了 FFCM (Foundational Fuel Chemistry Model) 机理^[83], 并通过对燃烧数据集进行全面不确定性量化分析来优化模型, 从而降低了模型预测的不确定性^[84-85]。但 FFCM—1 机理仅包含 38 种组分以及 291 步基元反应, 只适用于预测 H₂、H₂O₂、CO、CH₂O 以及 CH₄ 的燃烧。

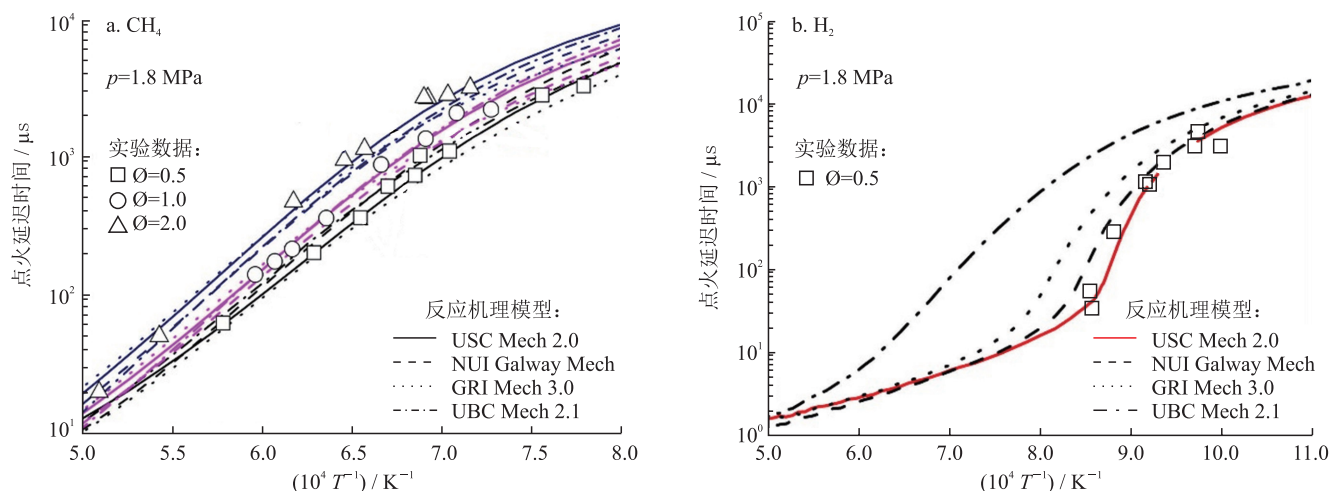


图4 不同反应机理计算的甲烷和氢气的点火延迟图

(资料来源: 据本文参考文献 [81])

3.2 全局反应机理

详细反应机理虽然能够精准地模拟天然气的燃烧过程, 但其往往包含大量的组分及反应, 导致计算成本高昂, 难以应用于复杂的燃烧模型。相比之下, 全局反应机理忽略中间产物, 只考虑主要的化学反应, 可用于计算燃烧温度及主要污染物排放等。Williams 等^[86]首先建立了 CH₄ 的两步反应机理 (CH₄ → CO+H₂O, CO → CO₂), 随后 Westbrook 和 Drger^[87]通过层流火焰数值模拟确定了 C₁—C₁₀ 常

见烃类燃料的一步 (WD1) 及二步 (WD2) 反应机理的反应速率参数。Fernández 等^[88]则是在 WD1 反应机理的基础上考虑了反应的反应热、活化温度及指数因子, 从而改善了该机理对于火焰温度及预混燃烧速度的预测, 但仅适用于常压工况。Jones 和 Lindstedt^[89]进一步在甲烷扩散火焰中考虑了甲烷氧化生成氢气及氢气氧化的反应, 开发了甲烷的四步反应机制 (JL4), 且该机理模拟的层流燃烧温度与详细机理较为接近, 因此 JL4 总包反应备受研究者的青睐。

Hu 等^[90] 则对 JL4 机理中 H_2 氧化的活化能及指前因子进行调整, 以提高四步反应机理对 MILD (Moderate and Intense Low Oxygen Dilution) 燃烧产物的预测精度。在实际燃烧过程中, 燃料通常为混合气体而非单一组分。Nikolaou 等^[91-92] 基于 GRI Mech 3.0 的骨架机理通过敏感性分析简化得到了五步反应机理。经过实验验证, 该机理对于层流火焰速度、火焰结构和点火延迟时间的预测与实验较为一致, 适用于分析含有 CO 、 H_2 、 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 合成气的燃烧。

3.3 简化反应机理

全局反应机理在使用的过程通常因温度、压力和组分的限制, 只能用于特定的燃烧场景, 而且全局反应机理可以分析的燃烧特性也十分有限。因此, 大量学者结合敏感性分析在详细化学反应机理的基础上简化得到适用范围广且精度高的小型反应机理。乔瑜等^[93-94] 采用敏感性分析及最优简化法对 GRI Mech 3.0 进行了简化, 简化机理的计算结果与 GRI Mech 3.0 基本一致。Kazakov 等^[95] 将 GRI Mech 1.2 系列机理简化到 22 个组分和 104 个基元反应, 形成了 DRM22 机理, 该机理对层流火焰特性的预测与 GRI Mech 1.2 的误差在 10% 以内。董刚等^[96] 基于 GRI Mech 2.11 对 NO 进行敏感性分析, 得到 14 步含氮 CH_4 燃烧简化机理, 由于其忽略了快速型 NO_x 的生成, 导致该机理对于常压及低压 NO 的预测值偏高。董清丽等^[97] 针对甲烷燃烧, 通过元素流通法及浓度敏感性分析法对 GRI Mech 3.0 进行简化, 并运用遗传算法对基元反应参数进行优化, 最后得到 24 步简化反应机理。而朱睿^[30] 及刘效洲等^[98] 通过掺氢火焰温度及关键组分的敏感性分析, 简化得到 17 种组分和 8 步反应的反应机理, 并基于该简化机理模拟了旋流燃气灶的掺氢燃烧。田雨师^[99] 基于路径敏感性分析 (Path and Sensitivity Analysis, PSA) 及生成速率分析 (Rate of Production, ROP) 将 Aramco Mech 简化至 40 个组分、189 个反应, 数值模拟结果显示, 简化后的机理对天然气燃烧主要组分浓度及温度的预测较好, 但对于 NO 、 NO_2 的预测值与试验值误差较大。综上所述, 简化反应机理在保留燃烧主要反应的基础上降低了反应的复杂程度, 对于燃烧特性的模拟精度与详细化学反应机理的误差在可接受范围内。

总体而言, 在众多天然气燃烧机理中, GRI Mech 3.0 及其简化机理在学术界得到了广泛的应用及认可。然而, 尽管简化反应机理在某些工况下表现良好, 但其适用范围仍然有限, 难以全面预测

燃烧过程的各种特性。因此需要进一步优化和改进机理简化的方法, 以提高其适用性和准确性。目前尚无专门针对掺氢天然气的反应机理, 且燃烧机理的开发主要依赖于实验数据。未来, 可以基于当前燃烧数据库结合机器学习、分子动力学模拟以及量子化学等方法, 开发详细的掺氢天然气燃烧机理模型。

4 总结及展望

未来随着天然气掺氢管道的建设和发展, 掺氢天然气在终端利用领域将展现出巨大潜力。本文围绕掺氢天然气, 综合国内外互换性参数, 详细阐述了天然气与氢气的互换性情况, 分析了掺氢对燃气灶、热水器等燃具燃烧性能的影响, 同时对天然气燃烧数值模拟常用的化学反应机理进行了介绍。当前的互换性计算及相关燃烧实验均表明, 掺氢 0 ~ 20% 的天然气可直接应用于现有燃具, 然而掺氢天然气在终端实际应用中仍面临着诸多限制和技术挑战。

1) 基于国标计算的天然气掺氢范围存在一定的局限性, 许多掺氢实验表明天然气可掺入更高比例的氢气, 且采用不同组合判定指标所计算的结果差异较为显著。此外, 掺氢天然气的燃具试验研究尚处于初步探索阶段, 亟须对天然气与氢气的互换性以及回火、吹熄等试验开展更加广泛的研究, 并制订统一的评价标准和试验方法, 推动掺氢天然气互换性计算及燃具试验的标准化和规范化进程。

2) 当前天然气掺氢燃烧技术主要是针对现有成熟燃具, 但掺氢可能会导致燃烧稳定性下降、 NO_x 排放增加等问题, 因此有必要对天然气燃具进行优化改进。未来应进一步设计优化燃具喷嘴结构, 调整喷气压力、空气系数和燃烧方式, 以适应高掺氢比天然气燃烧需求。同时需要在终端燃具上开展长期的应用实验, 全面评估掺氢天然气的稳定性和燃烧特性, 以加快氢能在城镇终端的应用进程。

3) 化学反应机理是数值模拟研究中分析宏观燃烧现象及内在机理的关键基础, 其适用性及准确性至关重要。目前掺氢天然气燃烧模拟主要以甲烷为对象, 针对天然气多组分问题, 通过量子化学计算、分子动力学模拟等微观研究手段获取关键基元反应的热力学及动力学参数, 寻求构建反映真实掺氢天然气燃烧的化学反应机理, 从而更深入地揭示天然气掺氢燃烧过程及其内在机理。

4) 管道输送技术及氢气成本是大规模使用掺氢天然气的前提条件, 目前天然气管道仍存在掺氢比例

低和安全保障不足等问题。因此,亟须解决材料氢脆和设备兼容性问题,逐步提高管道掺氢比例,综合优化天然气管网系统,确保掺氢天然气的安全输送。同时应加快低成本高效制氢技术的研发,提高掺氢天然气的经济性,为其大规模应用奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战[J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5499-5505.
SHANG Juan, LU Yanghui, ZHENG Jinyang, et al. Research status-in-situ and key challenges in pipeline transportation of hydrogen-natural gas mixtures[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10): 5499-5505.
- [2] 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): 491-502.
YU Zilong, ZHANG Liye, NING Chen, et al. Natural gas hydrogen mixing pipeline transportation and terminal application[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(3): 491-502.
- [3] 张正陵. 中国“十三五”新能源并网消纳形势、对策研究及多情景运行模拟分析[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 2-9.
ZHANG Zhengling. Research on situation and countermeasures of new energy integration in the 13th Five-Year Plan period and its multi-scenario simulation[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 2-9.
- [4] JUDD R, PINCHBECK D. 8-Hydrogen admixture to the natural gas grid[M]//BALL M, BASILE A, VEZIROĞLU T N. Compendium of Hydrogen Energy. Oxford: Woodhead Publishing, 2016: 165-192.
- [5] 国家能源局. 国家能源局关于2021年度全国可再生能源电力发展监测评价结果的通报[EB/OL]. (2022-09-16)[2024-03-14]. https://www.nea.gov.cn/2022-09/16/c_1310663387.htm.
National Energy Administration. Notice of the National Energy Administration on the monitoring and evaluation results of national renewable energy power development in 2021[EB/OL]. (2022-09-16)[2024-03-14]. https://www.nea.gov.cn/2022-09/16/c_1310663387.htm.
- [6] YANG Yu, XIA Siyou. China must balance renewable energy sites[J]. Science, 2022, 378(6620): 609.
- [7] 丛琳, 王楠, 李志远, 等. 电解水制氢储能技术现状与展望[J]. 电器与能效管理技术, 2021(7): 1-7.
CONG Lin, WANG Nan, LI Zhiyuan, et al. Current status and prospect of energy storage technology by hydrogen production based on water electrolysis[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(7): 1-7.
- [8] MORADI R, GROTH K M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(23): 12254-12269.
- [9] 张佩颖, 罗勤, 周理, 等. 国内天然气分析测试标准掺氢适应性探讨[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(3): 103-106.
ZHANG Peiying, LUO Qin, ZHOU Li, et al. Applicability analysis of China's natural gas analysis and testing standards under hydrogen-blended conditions[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2023, 52(3): 103-106.
- [10] YANG Fuyuan, WANG Tianze, DENG Xintao, et al. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(61): 31467-31488.
- [11] 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, 24(3): 100-107.
ZHONG Bing, ZHANG Xuexiu, ZHANG Bo, et al. Industrial development of hydrogen blending in natural gas pipelines in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 100-107.
- [12] 黄明, 吴勇, 文习之, 等. 利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析[J]. 煤气与热力, 2013, 33(4): 39-42.
HUANG Ming, WU Yong, WEN Xizhi, et al. Feasibility analysis of hydrogen transport in natural gas pipeline[J]. Gas & Heat, 2013, 33(4): 39-42.
- [13] 李敬法, 苏越, 张衡, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 137-152.
LI Jingfa, SU Yue, ZHANG Heng, et al. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 137-152.
- [14] 李敬法, 李建立, 王玉生, 等. 氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 856-871.
LI Jingfa, LI Jianli, WANG Yusheng, et al. Research progress and development trends of key technologies for hydrogen energy storage and transportation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 856-871.
- [15] 张焜玮, 赵杰, 李敬法, 等. 天然气掺氢输送环境下的腐蚀与氢脆研究进展[J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 126-138.
ZHANG Hongwei, ZHAO Jie, LI Jingfa, et al. Research progress on corrosion and hydrogen embrittlement in hydrogen-natural gas pipeline transportation[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6): 126-138.
- [16] 刘啸奔, 张东, 武学健, 等. 掺氢天然气管道完整性评价技术的进展与挑战[J]. 力学与实践, 2023, 45(2): 245-259.
LIU Xiaoben, ZHANG Dong, WU Xuejian, et al. Advances and challenges of hydrogen-blended natural gas pipeline integrity assessment technology[J]. Mechanics in Engineering, 2023, 45(2): 245-259.
- [17] GLANVILLE P, FRIDLYAND A, SUTHERLAND B, et al. Impact of hydrogen/natural gas blends on partially premixed combustion equipment: NO_x emission and operational performance[J]. Energies, 2022, 15(5): 1706.
- [18] JONES D R, AL-MASRY W A, DUNNILL C W. Hydrogen-enriched natural gas as a domestic fuel: an analysis based on flash-back and blow-off limits for domestic natural gas appliances within the UK[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2018, 2(4): 710-723.
- [19] 安振华, 张猛, 毛润泽, 等. 钝体甲烷火焰高掺氢比吹熄机理的大涡模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2021, 27(4): 443-450.
AN Zhenhua, ZHANG Meng, MAO Runze, et al. Blow-off mechanism of high hydrogen ratio bluff body methane flame by large eddy simulation[J]. Journal of Combustion Science and

- Technology, 2021, 27(4): 443-450.
- [20] 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): 1173-1179.
- SHANG Rongxue, YANG Yue, LI Gang. Propagation of laminar premixed flames of $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ mixtures at elevated temperatures[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(8): 1173-1179.
- [21] YON S, SAUTET J C. Flame lift-off height, velocity flow and mixing of hythane in oxy-combustion in a burner with two separated jets[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 32: 83-92.
- [22] 崔德春, 熊亮, 于广欣, 等. 掺氢天然气作燃料的掺氢比例与互换性要求[J]. 天然气工业, 2022, 42(增刊1): 181-185.
- CUI Dechun, XIONG Liang, YU Guangxin, et al. Hydrogen blending ratios and interchangeability requirements for hydrogen-doped natural gas as a fuel[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(S1): 181-185.
- [23] 赵钦新, 王宗一, 邓世丰, 等. 氢气燃烧技术及其进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 15870-15880.
- ZHAO Qinxin, WANG Zongyi, DENG Shifeng, et al. Hydrogen combustion technology and progress[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(36): 15870-15880.
- [24] 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): 29-35.
- PAN Gengyu, ZANG Zixuan, HUANG Xiaomei, et al. Review of research on transportation and application safety of hydrogen-blended natural gas[J]. Gas & Heat, 2021, 41(9): 29-35.
- [25] 孙秀丽, 秦朝葵, 郭甲生. 浅谈天然气互换性的对策研究[J]. 上海煤气, 2008(4): 20-23.
- SUN Xiuli, QIN Chaokui, GUO Jiasheng. Briefly analysis on countermeasures of natural gas interchangeability[J]. Shanghai Gas, 2008(4): 20-23.
- [26] 刘京京, 李志军, 何宏凯. 天然气掺氢技术发展现状及相关标准体系[J]. 上海煤气, 2022(1): 28-31.
- LIU Jingjing, LI Zhijun, HE Hongkai. Development status and related standard system of natural gas hydrogen blending technology[J]. Shanghai Gas, 2022(1): 28-31.
- [27] 韩一学. 城市燃气互换性理论的实验研究与应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- HAN Yixue. Experimental research and application on city gas interchangeability theory[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [28] 高文学. 城市燃气互换性理论及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- GAO Wenxue. Research on city gas interchangeability theory and application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [29] 吴嫦. 天然气掺混氢气使用的可行性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- WU Chang. Feasibility study on blending hydrogen into natural gas distribution networks[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [30] 朱睿. 旋流燃气灶掺氢燃烧特性的数值模拟及实验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- ZHU Rui. Numerical simulation and experimental research on the combustion characteristics of swirling gas stoves mixed with hydrogen[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [31] 陈豪杰. 天然气中含氢量对燃烧设备影响的实验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- CHEN Haojie. A experimental study on the influence of hydrogen content in natural gas on combustion appliances[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [32] 乔佳, 闫松, 郭保玲, 等. 天然气掺氢对城市燃气用户的影响[J]. 煤气与热力, 2022, 42(8): 36-39.
- QIAO Jia, YAN Song, GUO Baoling, et al. Influence of blending hydrogen into natural gas on urban gas users[J]. Gas & Heat, 2022, 42(8): 36-39.
- [33] SUN Mengxiao, HUANG Xiaomei, HU Yelong, et al. Effects on the performance of domestic gas appliances operated on natural gas mixed with hydrogen[J]. Energy, 2022, 244(Part A): 122557.
- [34] XIN Yue, WANG Ke, ZHANG Yindi, et al. Numerical simulation of combustion of natural gas mixed with hydrogen in gas boilers[J]. Energies, 2021, 14(21): 6883.
- [35] 王西明, 雪小峰, 王小荣, 等. 混氢燃气的互换性理论分析[J]. 山东化工, 2022, 51(12): 196-198.
- WANG Ximing, XUE Xiaofeng, WANG Xiaorong, et al. Theoretical analysis of interchangeability of mixed hydrogen gas[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(12): 196-198.
- [36] 杨沐村, 刘伟, 孙晨, 等. 家用燃气具对掺氢天然气的适用性评估与示范应用[J]. 力学与实践, 2022, 44(4): 794-800.
- YANG Mucun, LIU Wei, SUN Chen, et al. Applicability evaluation and demonstration of domestic gas appliance using natural gas-hydrogen mixture[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(4): 794-800.
- [37] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城镇燃气分类和基本特性: GB/T 13611—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification and essential property of city gas: GB/T 13611-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [38] 金志刚. 燃气互换性、燃具适应性及燃气分类[C]// 第二届中国城市燃气论坛——燃气青年工程师论坛论文集. 天津: 中国土木工程学会, 2009: 215-230.
- JIN Zhigang. Gas interchangeability, flexibility of gas appliance and gas classification[C]// Collected Papers of the 2nd China Urban Gas Forum Gas Youth Engineer Forum. Tianjin: China Civil Engineering Society, 2009: 215-230.
- [39] 马向阳, 黄小美, 吴嫦. 天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性的影响研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1746-1751.
- MA Xiangyang, HUANG Xiaomei, WU Chang. Study on the influence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(12): 1746-1751.
- [40] 罗子萱, 徐华池, 袁满. 天然气掺混氢气在家用燃气具上燃烧的安全性及排放性能测试与评价[J]. 石油与天然气化工,

- 2019, 48(2): 50-56.
- LUO Zixuan, XU Huachi, YUAN Man. Safety and emission performance test and evaluation of natural gas mixed with hydrogen combustion on domestic gas appliances[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48(2): 50-56.
- [41] 严荣松, 高文学, 张杨竣, 等. 含氢天然气在家用天然气燃具上的燃烧性能测试[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 119-124.
- YAN Rongsong, GAO Wenxue, ZHANG Yangjun, et al. Combustion performance tests of hydrogen-natural gas mixtures as fuels in domestic gas appliances[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 119-124.
- [42] 李猷嘉. 燃气互换性与燃气分类的关系[J]. 城市燃气, 2008(9): 3-13.
- LI Youjia. On relations of gas classification to interchangeability of gases[J]. Urban Gas, 2008(9): 3-13.
- [43] 李猷嘉. 欧美燃气质量和互换性问题研究的近期进展(一)[J]. 城市燃气, 2014(11): 4-16.
- LI Youjia. Recent progress in the study of gas quality and interchangeability issues in Europe and the United States (I)[J]. Urban Gas, 2014(11): 4-16.
- [44] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城镇燃气分类和基本特性: GB/T 13611—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification and basic characteristics of city gas: GB/T 13611-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [45] 赵伟, 左川, 李澜, 等. 氢气与城镇天然气掺混的互换性分析[J]. 煤气与热力, 2021, 41(9): 1-7.
- ZHAO Wei, ZUO Chuan, LI Lan, et al. Analysis on interchangeability of blending of hydrogen and urban natural gas[J]. Gas & Heat, 2021, 41(9): 1-7.
- [46] 王玮, 王秋岩, 邓海全, 等. 天然气管道输送混氢天然气的可行性[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 130-136.
- WANG Wei, WANG Qiuyan, DENG Haiquan, et al. Feasibility analysis on the transportation of hydrogen-natural gas mixtures in natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 130-136.
- [47] 中国城市燃气氢能发展创新联盟. 富氢天然气燃气分类和基本特性: T/CHAG 1—2021[S]. 广州: 中国城市燃气氢能发展创新联盟, 2021.
- China Hydrogen Development and Innovation Alliance for Urban Gas. Hydrogen enriched natural gas classification and basic characteristics: T/CHAG 1-2021[S]. Guangzhou: China Hydrogen Development and Innovation Alliance for Urban Gas, 2021.
- [48] CHEN Zhiguang, QIN Chaokui, DUAN Pengfei. Lifted flame property and interchangeability of natural gas on partially premixed gas burners[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 12: 333-339.
- [49] 张杨竣, 秦朝葵, 肖利涛. AGA 和 Weaver 指数法的适用性研究[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(1): 30-36.
- ZHANG Yangjun, QIN Chaokui, XIAO Litao. Applicability of AGA and Weaver indices for natural gas interchangeability in China[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2013, 42(1): 30-36.
- [50] CHEN Zhiguang, QIN Chaokui, ZHANG Yangjun, et al. Analysis of Chinese natural gas interchangeability predicted by weaver indices[J]. Advanced Materials Research, 2013, 724/725: 1017-1020.
- [51] 周军, 李帅帅, 周轩, 等. 多气源天然气管网掺氢位置研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(3): 291-297.
- ZHOU Jun, LI Shuaishuai, ZHOU Xuan, et al. Research on the location of hydrogen mixing in multi-source natural gas pipeline networks[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(3): 291-297.
- [52] WEAVER E. Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1951, 46(3): 213-245.
- [53] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 家用燃气灶具: GB 16410—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Domestic gas cooking appliances: GB 16410-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [54] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 家用燃气快速热水器: GB 6932—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Domestic gas instantaneous water heater: GB 6932-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [55] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 家用燃气用具通用试验方法: GB/T 16411—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Universal test methods of gas burning appliances for domestic use: GB/T 16411-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [56] 刘方, 杨宏伟, 韩银杉, 等. 天然气掺氢比对终端用气设备使用性能的影响[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(2): 174-178.
- LIU Fang, YANG Hongwei, HAN Yinsha, et al. Effect of hydrogen-blending ratio of natural gas on performance of terminal gas equipment[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 48(2): 174-178.
- [57] 朱宏丹, 秦朝葵, 李晖, 等. 家用燃气灶燃用掺氢天然气的实验研究[J]. 煤气与热力, 2022, 42(10): 26-29.
- ZHU Hongdan, QIN Chaokui, LI Hui, et al. Experimental study on domestic gas stove burning hydrogen-blended natural gas[J]. Gas & Heat, 2022, 42(10): 26-29.
- [58] 陈聪, 秦朝葵, 陈志光. 民用燃具低 NO_x 燃烧技术研究进展与展望[J]. 煤气与热力, 2022, 42(7): 32-36.
- CHEN Cong, QIN Chaokui, CHEN Zhiguang. Research progress and prospect of low NO_x combustion technologies for domestic

- gas appliances[J]. *Gas & Heat*, 2022, 42(7): 32-36.
- [59] ZELDOVICH J. The oxidation of nitrogen in combustion and explosions[J]. *European Physical Journal A. Hadrons and Nuclei*, 1946, 21: 577-628.
- [60] TURNS S R. Understanding NO_x formation in nonpremixed flames: Experiments and modeling[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1995, 21(5): 361-385.
- [61] 王杰. 天然气低氮燃烧技术研究现状与进展[J]. *现代化工*, 2022, 42(增刊 2): 47-50.
- WANG Jie. Research status and progress of natural gas low-nitrogen combustion technology[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(S2): 47-50.
- [62] FANG Zhicong, ZHANG Shuhao, HUANG Xiaomei, et al. Performance of three typical domestic gas stoves operated with methane-hydrogen mixture[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 41: 102631.
- [63] ZHAO Yan, MCDONELL V, SAMUELSEN S. Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(23): 12239-12253.
- [64] CHOUDHURY S, MCDONELL V G, SAMUELSEN S. Combustion performance of low- NO_x and conventional storage water heaters operated on hydrogen enriched natural gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(3): 2405-2417.
- [65] ZHAN Xinyi, CHEN Zhiguang, QIN Chaokui. Effect of hydrogen-blended natural gas on combustion stability and emission of water heater burner[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 37: 102246.
- [66] 黄波, 黄逊青, 莫志邦, 等. 燃气灶具适配富氢天然气试验研究[J]. *城市燃气*, 2021(10): 1-5.
- HUANG Bo, HUANG Xunqing, MO Zhibang, et al. The experimental study on flexibility of gas cookers to hydrogen enriched natural gas (HENG)[J]. *Urban Gas*, 2021(10): 1-5.
- [67] 谢依桐, 秦朝葵, 黄逊青, 等. 民用燃气热水器对掺氢天然气的适应性研究[J]. *城市燃气*, 2021(11): 1-5.
- XIE Yitong, QIN Chaokui, HUANG Xunqing, et al. The research on flexibility of domestic gas water heater to hydrogen-enriched natural gas[J]. *Urban Gas*, 2021(11): 1-5.
- [68] HILBERT R, TAP F, EL-RABII H, et al. Impact of detailed chemistry and transport models on turbulent combustion simulations[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(1): 61-117.
- [69] LI Yang, ZHOU Chongwen, SOMERS K P, et al. The oxidation of 2-butene: A high pressure ignition delay, kinetic modeling study and reactivity comparison with isobutene and 1-butene[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(1): 403-411.
- [70] ZHOU Chongwen, LI Yang, BURKE U, et al. An experimental and chemical kinetic modeling study of 1,3-butadiene combustion: Ignition delay time and laminar flame speed measurements[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 197: 423-438.
- [71] KÉROMNÈS A, METCALFE W K, HEUFER K A, et al. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(6): 995-1011.
- [72] METCALFE W K, BURKE S M, AHMED S S, et al. A hierarchical and comparative kinetic modeling study of $\text{C}_1\text{-C}_2$ hydrocarbon and oxygenated fuels[J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2013, 45(10): 638-675.
- [73] BURKE U, SOMERS K P, O'TOOLE P, et al. An ignition delay and kinetic modeling study of methane, dimethyl ether, and their mixtures at high pressures[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(2): 315-330.
- [74] SMITH P G, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. GRI-Mech 3.0[EB/OL]. [2024-03-14]. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech.
- [75] FISCHER M, JIANG X. A chemical kinetic modelling study of the combustion of $\text{CH}_4\text{-CO-H}_2\text{-CO}_2$ fuel mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 167: 274-293.
- [76] HU Erjiang, LI Xiaotian, MENG Xin, et al. Laminar flame speeds and ignition delay times of methane-air mixtures at elevated temperatures and pressures[J]. *Fuel*, 2015, 158: 1-10.
- [77] 冯帅明, 杜伟, 夏起, 等. 掺氢天然气在家用燃烧器中的燃烧特性[J]. *过程工程学报*, 2022, 22(7): 873-881.
- FENG Shuaiming, DU Wei, XIA Qi, et al. Combustion characteristics of natural gas mixed with hydrogen in domestic burners[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2022, 22(7): 873-881.
- [78] 冯帅明. 掺氢天然气在部分预混式家用燃烧器中的燃烧特性分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2022.
- FENG Shuaiming. Analysis of combustion characteristics of hydrogen-admixed natural gas in partial premixed domestic burners[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2022.
- [79] LAMIONI R, BRONZONI C, FOLLI M, et al. Feeding H_2 -admixture to domestic condensing boilers: Numerical simulations of combustion and pollutant formation in multi-hole burners[J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 118379.
- [80] JI Changwei, WANG Du, YANG Jinxin, et al. A comprehensive study of light hydrocarbon mechanisms performance in predicting methane/hydrogen/air laminar burning velocities[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(27): 17260-17274.
- [81] ZHANG Yingjia, JIANG Xue, WEI Liangjie, et al. Experimental and modeling study on auto-ignition characteristics of methane/hydrogen blends under engine relevant pressure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(24): 19168-19176.
- [82] ZHANG Yingjia, HUANG Zuohua, WEI Liangjie, et al. Experimental and modeling study on ignition delays of lean mixtures of methane, hydrogen, oxygen, and argon at elevated pressures[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(3): 918-931.
- [83] SMITH G P, TAO Y, WANG H. Foundational fuel chemistry model version 1.0 (FFCM-1)[EB/OL]. [2024-03-14]. <http://nanoenergy.stanford.edu/ffcm1>.
- [84] SHEEN D A, YOU Xiaoqing, WANG Hai, et al. Spectral uncertainty quantification, propagation and optimization of a detailed kinetic model for ethylene combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 535-542.

- [85] SHEEN D A, WANG Hai. Combustion kinetic modeling using multispecies time histories in shock-tube oxidation of heptane[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(4): 645-656.
- [86] WILLIAMS G C, HOTTEL H C, MORGAN A C. The combustion of methane in a jet-mixed reactor[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1969, 12(1): 913-925.
- [87] WESTBROOK C K, DRYER F L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1981, 27(1/2): 31-43.
- [88] FERNÁNDEZ-TARRAZO E, SÁNCHEZ A L, LIÑÁN A, et al. A simple one-step chemistry model for partially premixed hydrocarbon combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 147(1/2): 32-38.
- [89] JONES W P, LINDSTEDT R P. Global reaction schemes for hydrocarbon combustion[J]. *Combustion and Flame*, 1988, 73(3): 233-249.
- [90] HU Fan, LI Pengfei, GUO Junjun, et al. Global reaction mechanisms for MILD oxy-combustion of methane[J]. *Energy*, 2018, 147: 839-857.
- [91] NIKOLAOU Z M, CHEN J Y, SWAMINATHAN N. A 5-step reduced mechanism for combustion of CO/H₂/H₂O/CH₄/CO₂ mixtures with low hydrogen/methane and high H₂O content[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(1): 56-75.
- [92] NIKOLAOU Z M, SWAMINATHAN N, CHEN J Y. Evaluation of a reduced mechanism for turbulent premixed combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(12): 3085-3099.
- [93] 乔瑜, 徐明厚, GREEN W H. 基于敏感性分析的甲烷反应机理最优简化 [C]// 中国工程热物理学会第十一届年会论文集燃烧学 (上册). 北京: 中国工程热物理学会, 2005: 1-8.
- QIAO Yu, XU Minghou, GREEN W H. Optimally-reduced kinetic models for GRI-Mech 3.0 combustion mechanism based on sensitivity analysis[C]//Proceedings of the 11th Annual Conference of the Chinese Society of Engineering Thermophysics, *Combustion Science (Volume 1)*. Beijing: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2005: 1-8.
- [94] 乔瑜, 徐明厚, 姚洪. 基于敏感性分析的甲烷反应机理优化简化 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2007, 35(5): 85-87.
- QIAO Yu, XU Minghou, YAO Hong. Optimally-reduced kinetic models for gri-mech 3.0 combustion mechanism based on sensitivity analysis[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, 35(5): 85-87.
- [95] KAZAKOV A, FRENKLACH F. Reduced reaction sets based on GRI-Mech 1.2[EB/OL]. [2024-03-14]. <http://combustion.berkeley.edu/drm>.
- [96] 董刚, 任祝寅, 陈义良. CH₄/空气含氮燃烧的14步简化机理 [J]. *燃料化学学报*, 2003, 31(1): 39-43.
- DONG Gang, REN Zhuyin, CHEN Yiliang. A 14-step reduced mechanism for methane/air combustion with NO formation[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2003, 31(1): 39-43.
- [97] 董清丽, 蒋勇, 邱榕. 基于浓度敏感性分析和遗传算法的甲烷燃烧机理简化与优化 [J]. *火灾科学*, 2014, 23(1): 41-49.
- DONG Qingli, JIANG Yong, QIU Rong. Reduction and optimization of methane combustion mechanism based on PCAS and genetic algorithm[J]. *Fire Safety Science*, 2014, 23(1): 41-49.
- [98] 刘效洲, 朱睿, 朱光羽. 天然气掺氢燃烧技术在旋流式燃气灶上的数值模拟研究 [J]. *广东工业大学学报*, 2023, 40(1): 113-121.
- LIU Xiaozhou, ZHU Rui, ZHU Guangyu. Numerical simulation and experimental research of methane-hydrogen combustion technology on swirl gas stove[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2023, 40(1): 113-121.
- [99] 田雨师. 天然气预混与扩散燃烧中主要污染物生成特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022.
- TIAN Yushi. Study on the formation characteristics of main pollutants in premixed and diffusion combustion of natural gas[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2022.

(修改回稿日期 2024-05-27 编辑 张娟)



本文互动