

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-615-08

掺氢天然气燃烧特性与民用安全性研究

郭永超¹ 高甲艳¹ 郭浩¹ 张猛²

(1.陕西省天然气股份有限公司 西安 710018;

2.西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

【摘要】 在“双碳”目标背景下,天然气掺氢是实现零碳燃料过渡的一种有效方案。然而,氢气的高反应活性和高扩散性可能对掺氢天然气燃烧行为及终端用户用气安全产生影响,有必要对其燃烧特性及安全风险开展系统研究。因此,研究首先基于掺氢天然气燃烧特性参数理论分析计算,给出了国内天然气掺氢的理论极限值,随后在此基础上开展安全性实验测试和灶具燃烧特性数值模拟,对其安全性和灶具燃烧特性进行了评估,进一步论证掺氢极限合理性,以期天然气掺氢的工业化应用提供参考。

【关键词】 天然气掺氢; 互换性; 燃烧特性; 安全性

中图分类号 TK16 文献标志码 A

Study on Combustion Characteristics and Safety of Hydrogen-Enriched Natural Gas

Guo Yongchao¹ Gao Jiayan¹ Guo Hao¹ Zhang Meng²

(1.Shaanxi Provincial Natural Gas Co., Ltd, Xi'an, 710018;

2.School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

【Abstract】 Under the background of the "dual carbon" targets, hydrogen-enriched natural gas serves as an effective solution for transitioning to zero-carbon fuels. However, the high reactivity and diffusivity of hydrogen may impact the combustion behavior of hydrogen-enriched natural gas and the safety of end-users, necessitating systematic research on its combustion characteristics and safety risks. Therefore, this study first calculates the theoretical limit of hydrogen enrichment in domestic natural gas based on theoretical analysis of combustion characteristic parameters, then conducts safety experiments and numerical simulations of burner combustion characteristics to evaluate its safety and burner performance, further demonstrating the rationality of the hydrogen enrichment limit, with the aim of providing references for the industrial application of hydrogen-enriched natural gas.

【Keywords】 Hydrogen-enriched natural gas; Interchangeability; Combustion characteristics; Safety

0 引言

为应对全球气候变化的挑战及实现碳减排目标,风能、太阳能及水能等可再生能源得到了迅猛发展^[1-3]。相较于传统化石燃料,氢气在燃烧后的产物仅为水,因此被视为一种理想的清洁能源,能

够满足低碳能源体系的建设需求^[4-6]。但由于氢气与天然气的主要成分甲烷在燃烧特性及理化性质方面具有明显区别^[7-9],当向天然气中掺入不同比例的氢气时,天然气的燃烧机理、火焰传播特性以及可燃极限范围等燃烧特性可能发生显著改变,从

基金项目: 2023 年度省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目“氢能产业制储运加用关键技术研究及示范应用子课题-在役天然气管道掺氢适应性关键技术研究”; 国家自然科学基金面上项目(52176130)

作者简介: 郭永超(1987-),男,本科,高级工程师, E-mail: 710005283@qq.com

通讯作者: 张猛(1988-),男,博士,副教授, E-mail: mengz8851@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-03-05

而对燃气系统运行安全带来潜在影响^[10]。因此,在推进天然气掺氢应用之前,必须将不同掺氢比带来的燃气互换性问题纳入考量,对天然气掺氢的理论极限以及不同掺氢比下的燃烧特性和安全性进行系统、深入的研究。

国内外在燃气互换性层面均已开展了大量研究,分析了掺氢天然气中理论掺混氢气的极限值,但考虑到各国及地区天然气的组分与性质存在差异,基于燃气互换性判定所得结果也会有所不同^[11]: R Judd 等^[12]研究表明,该国天然气系统中的多数部件能较好地适应掺氢比例低于 10% 的混合气; Dries Haeseldonckx 等^[13]通过计算华白数得到,在该国使用的天然气中,当掺氢比例在 17% 以内时,所得到的混合气体可直接用于家用及商用燃具,无需对现有设备进行改造。此外,在天然气掺氢燃烧特性层面,相关研究主要从理论分析和实验测试等角度开展工作。大部分研究表明,氢气的掺入能够显著降低 CO₂ 排放,并通过增强自由基反应链,加快燃烧反应速率,提高火焰传播速度^[14-16]。然而,不同研究在实验条件、掺氢比例及评价方法等方面存在差异,相关结论尚未形成统一认识。在安全性层面,掺氢对天然气爆炸极限和燃爆特性的影响是当前研究的重点之一,部分研究指出,随着掺氢比例的提高,混合气体的可燃范围有所扩展^[17],同时最大爆发压力升高^[18]。但针对掺氢天然气安全性的相关研究仍缺乏系统的定量分析,且多数通过数值模拟展开,实验验证较少。总体来看,现有关于天然气掺氢的研究多集中于单一层面,缺乏将理论分析、数值模拟与燃烧及爆炸安全实验相结合的系统性研究。因此,有必要在统一研究框架下,对天然气掺氢条件下的燃烧特性及安全特性进行综合分析,以更全面地揭示掺氢比例变化对天然气燃烧与安全性的影响,并论证理论掺氢极限的合理性。

基于此,本研究首先通过掺氢天然气燃烧特性参数的理论分析计算,初步确定了国内天然气掺氢的理论上限,随后在此基础上,优先开展定容燃烧弹爆炸特性实验,定量分析掺氢比例对爆炸特性的影响,从安全性角度对理论极限进行约束与初步验证;最后根据实验验证的安全边界,选取典型工况开展三维灶具燃烧数值模拟,评估理论上限内掺氢天然气在真实灶具上的燃烧特性,进一步论证掺氢

极限合理性,以期为天然气掺氢的工业化应用提供参考。

1 掺氢天然气燃烧特性理论分析

1.1 燃气互换性评价参数概念

任何燃具在设计时均针对特定的燃气组分,而当燃气成分发生改变时,其热值、密度及燃烧特性等基础参数的变化,将直接影响燃烧器的热负荷、燃烧稳定性等运行指标^[19]。故在进行燃气气源替换时,需系统评估其互换性^[20]。我国自 1982 年起引入法国德尔布燃气互换性判定方法,开始将华白数与燃烧势作为判断燃气互换性的核心指标。而在其更新的 2018 年版标准《城镇燃气分类和基本特性》(GB/T 13611-2018)中,评价体系则有所调整,将高华白数和高热值作为评价燃气互换性的主要评价指标。然而,考虑到氢气的高火焰传播速度会显著影响燃烧稳定性,仅以高华白数和高热值难以充分评估其回火、脱火等燃烧稳定性风险,为此,额外引入现行标准在附录“试验用气的配制方法”中提到的重要参数:燃烧速度指数 S_F ,作为补充约束,该指数在物理内涵、计算方法层面均与旧版标准 GB/T 13611-2006 中的燃烧势具有一致性,能够反映火焰产生离焰、黄焰、回火和不完全燃烧的倾向性,引入该参数作为重要约束,可以更好地分析燃气燃烧速度对燃烧稳定性的影响,全面评估掺氢天然气的互换性。

1.2 计算方法

由于我国大部分地区天然气管道均供应 12T 天然气。本文选取 12T 天然气在标准条件下对应的高华白数、高热值以及燃烧势的允许区间作为评价基准,对掺氢天然气的燃烧互换性进行系统判定,并在此基础上推导天然气中氢气掺混比例的理论极限。需要说明的是,我国实际管输 12T 天然气虽以甲烷为主,但不同地区气质存在差异,难以对实验气进行各组分定量配置,为获得具有普适性的掺氢极限,本文选择以表 1 所列纯甲烷作为基础气进行研究,该处理方式是相关领域常见的简化处理方法,可排除其他组分干扰,聚焦掺氢比例这一单一变量对关键参数的影响规律,为不同地区天然气掺氢极限的确定提供参考。基于高华白数、高热值及燃烧势的计算公式,分析得到了试验气关键参数与掺氢比例之间的对应关系。

表 1 试验气种类和性质

Table 1 Types and properties of test gases					
类别	成分	相对密度	高位热值 /(MJ/Nm ³)	高华白数 /(MJ/Nm ³)	燃烧势
基础气	99.9%CH ₄	0.555	37.78	50.72	40.3
氢气	99.9%H ₂	0.0695	12.089	45.86	379.32

在理论分析部分,本研究选用 CHEMKIN 软件作为计算工具,对掺氢天然气的高华白数及燃烧势进行了系统计算与分析。该部分首先在 CHEMKIN 软件中构建了模型结构,为检验模型准确性,选择采用国家标准测试气体对模拟结果进行验证。验证结果显示:计算得到的华白数与标准气体参考值吻合度较高,表明所建模型可靠。在此基础上,利用该模型进一步计算了不同掺氢比例下混合气的华白数与燃烧势,具体计算结果及相关分析将在下一节中详细阐述。

1.3 燃烧特性理论分析结果

以 12T 测试气为基准,对不同氢气掺混比例下的高华白数、高热值及燃烧势进行计算,得到试验气上述参数随氢气掺混比例的变化趋势如图 1 所示。依据国家标准 GB/T 13611-2018,我国典型燃气灶具适用的 12T 天然气的高华白数允许范围应为 45.66~54.77MJ/Nm³,高热值允许范围应为 31.97~43.57MJ/Nm³;同时,依据 GB/T 13611-2006《城镇燃气分类和基本特性》中的规定,12T 天然气的燃烧势允许范围为 36.3~69.3。由图 1 可知,单以高华白数作为互换性判据时,掺氢比例达到 30%仍能满足要求;同时,若仅以高热值为互换性判据,掺氢比例在 23%时仍具有互换性。此外,燃气互换性需同时满足燃烧势的要求。图 1 显示,只有当氢气掺混比例低于 21%时,混合气的燃烧势低于燃烧势上限 69.3,处于标准规定的范围内。综上,若将高华白数、高热值与燃烧势三项指标一并考虑,混合气在掺氢比例不超过 21%的条件下可与基准的 12T 天然气相互替代。但需要注意的是,理论分析虽然具有一定的参考价值,但掺氢天然气在不同掺氢比例下的燃烧特性复杂、实际燃气灶具结构复杂,且氢气的高反应活性和高扩散性会对终端用户用气安全产生影响,故要想得到可靠掺氢极限,还需进一步深入分析的支撑和论证。

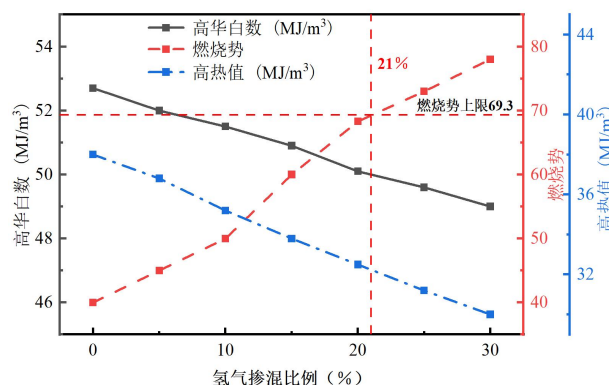


图 1 高华白数、高热值与氢气掺混比例关系

Fig.1 Relationship between higher Wobbe index, higher heating value, and hydrogen blending ratio

2 掺氢天然气安全性实验分析

氢气与甲烷相比,具有点火能低、扩散速度快和燃烧范围宽等特点,天然气中氢气的掺入可能导致混合气体的爆炸极限范围、爆炸压力峰值等参数发生变化,从而对用气安全构成潜在影响。因此,在理论分析的基础上,有必要进一步开展系统的安全性实验研究,对掺氢天然气在不同掺氢比例条件下的燃烧与爆炸安全特性进行定量评估。基于上述考虑,本章以不同掺氢比掺氢天然气为研究对象,通过在定容燃烧弹实验平台开展爆炸特性实验,系统分析掺氢比例变化对天然气安全特性的影响规律,提供实验依据,进而验证极限掺氢比例选取的合理性。

2.1 实验平台介绍

爆炸极限及爆炸特性参数测试平台为定容燃烧弹实验平台,如图 2 所示,主要包含以下系统:温度控制系统:制冷工质为乙醇,制冷温度最低可达 -80℃,制热工质为水,制热温度最高可达到 100℃;容弹主体:容积 5L,耐压 10MPa;配气系统:燃料气、氧气和氮气通过一个进气管进入到容弹中,使用的压力传感器量程为 0~120kPa,精度为 0.1%。容弹内的温度通过铂电阻温度传感器采集,压力和温度传感器得到的电信号由高精度万用表测得;点火系统:使用熔断丝进行点火,点火能量约为 10J;数据采集系统:压力传感器和温度传感器得到的电信号通过万用表后,再传输至电脑上转换为压力和温度信号。

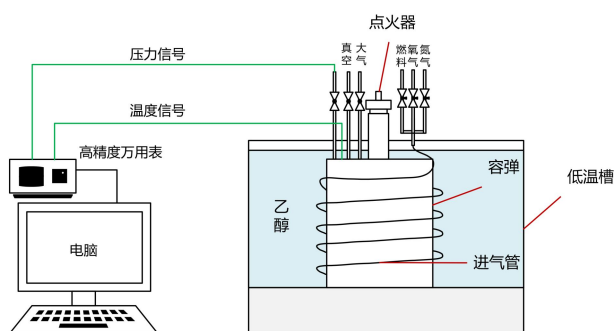


图2 定容燃烧弹实验平台结构简图

Fig.2 Schematic diagram of the constant volume combustion bomb test platform

2.2 爆炸特性实验研究

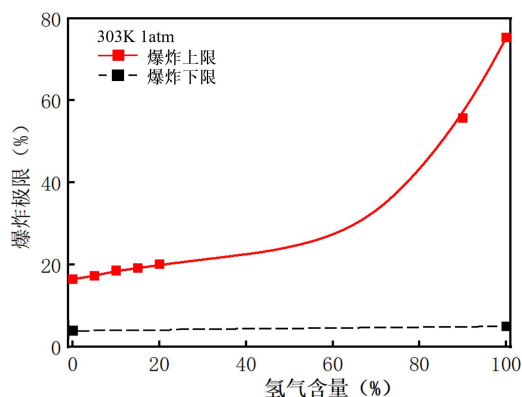


图3 掺氢天然气爆炸极限随氢气含量的变化

Fig.3 Variation of explosion limits of hydrogen-enriched natural gas with hydrogen content

爆炸极限是体现物质燃烧爆炸特性的关键安全参数,具体分为爆炸下限和爆炸上限。密闭空间下,氢气的爆炸极限大约为4~76vol%,甲烷的爆炸极限大约为5~15vol%,以甲烷为主的天然气与氢气进行掺混,其爆炸下限在4~5vol%波动,受气体组分影响不明显,爆炸下限的变化通常相对有限,因此爆炸特性研究部分对爆炸下限的评估仅进行定性分析,不作为主要研究结论,本实验以测试爆炸上限为主。考虑到天然气成分复杂多变,本实验选用甲烷代替天然气开展,掺氢比例从0到100vol%变化,并密集测试了0~20vol%掺氢下混合气的爆炸极限,在该范围内,为系统分析掺氢比例对混合气爆炸特性的影响规律,本研究采用等步长取点的方式设置掺氢比例,分别选取0%、5%、15%和20%作为典型工况,该设置能够保证各工况之间具有良好的可比性,并有利于揭示关键爆炸参数随

掺氢比例变化的趋势。需要说明的是,理论计算得到的掺氢极限为21%,而本实验除纯氢对比组外,最大掺氢比例选取为20%,考虑到20%已接近理论极限,能够表征极限附近的爆炸特性变化行为,同时实验研究侧重于规律分析而非对极限点燃烧特性数值的精确测定,因此未单独设置21%工况。实验条件为室温(约25℃)、常压(101.3kPa)。实验结果如图3所示。

可以看出,混合气中随着氢气添加量增加,爆炸上限在氢气含量较小时增加缓慢,但当氢气含量超过60%时,爆炸上限才随氢气含量的增加而大幅升高。由表2定量数据得,在20vol%氢含量内,氢气/甲烷混合气的爆炸上限仅仅从纯甲烷的16.5%增长到20.1%。同时,基于甲烷与氢气爆炸下限接近的特性,在中低掺氢比例范围内,分析得到混合气爆炸下限对掺氢比例不敏感,其变化对整体安全边界影响有限。所以在理论分析得到的最大掺氢比21%条件下,掺氢天然气的爆炸极限与纯天然天然气爆炸极限相比变化并不显著。

表2 氢含量0~20%爆炸上限测试定量数据表

Table 2 Quantitative data of upper explosion limit tests for hydrogen content of 0~20%

天然气掺氢比例	0	5%	10%	15%	20%
爆炸上限	16.50%	17.20%	18.53%	19.10%	20.10%

根据爆炸极限测量结果可知,少量氢气掺混对氢气/甲烷混合物的爆炸极限影响不显著。然而,由于氢气本身燃烧速度较快,在密闭空间中会引发压力在极短时间内迅速升高,从而可能造成较强的破坏。因此,在掺氢天然气的安全性评估中,系统研究其除爆炸极限外的爆炸特性同样具有必要性。通常,用于表征爆炸特性的关键参数还包括爆炸压力峰值、爆炸压力升高率以及爆炸因子等。

掺氢天然气爆炸特性参数实验研究同样利用定容燃烧弹实验平台,进行单位当量比下氢混合物爆炸特性分析,明确掺氢比例对爆炸特性的影响。实验工况与爆炸极限实验工况相同,测量参数中,爆炸压力峰值指容器内爆炸过程中,相对于点火时压力的最大超压值,其反映了爆炸所能达到的最大压力;压力升高率(dP/dt)指容器内爆炸过程中,压力升高的速率,而最大压力升高率反映了爆炸的剧烈程度;爆炸因子 $K = (dP/dt)_{\max} \sqrt{V}$ 在最大压

力升高率的基础上, 考虑了容器体积 V 的影响, 更准确地衡量爆炸的剧烈程度。

图 4 是最大爆发压力 (即压力峰值) 随掺氢比的变化趋势, 本研究中还添加了纯氢气的爆炸压力峰值作为对比。可以看出, 在 20% 掺氢比内, 随着氢含量的增加, 掺氢天然气的压力峰值最大变化范围为 6.04471~6.11908bar, 与纯甲烷相比, 少量氢气的添加使混合气最大爆炸压力略有增加, 但相比于纯氢气的峰值压力 7.23065bar, 20% 以内氢含量带来的压力峰值升高量可忽略不计。

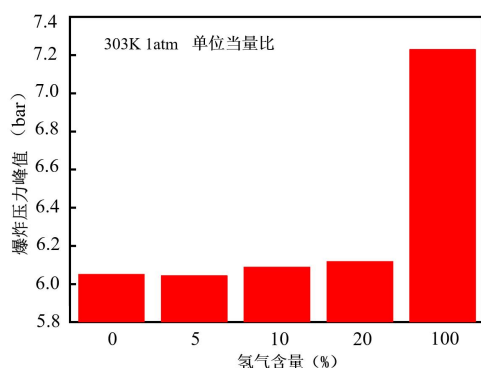


图 4 掺氢天然气爆炸压力峰值随氢气含量的变化

Fig.4 Variation of peak explosion pressure of hydrogen-enriched natural gas with hydrogen content

图 5 为不同掺氢比下甲烷氢气混合物的压力变化曲线。可以看出 0~20% 掺氢比内的压力变化曲线基本重合, 最大压力升高率等爆炸特性参数差别较小, 说明在 20% 掺氢比内, 掺氢天然气的爆炸特性与纯甲烷几乎一致。

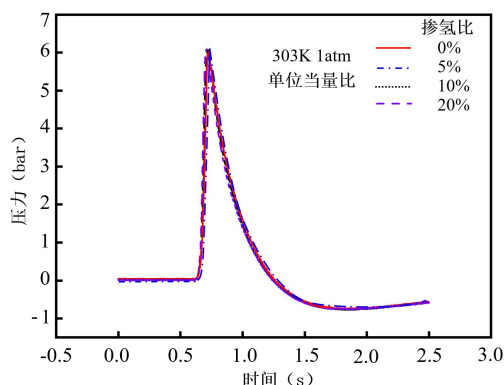


图 5 掺氢天然气压力变化曲线随氢气含量的变化

Fig.5 Variation of pressure profile of hydrogen-enriched natural gas with hydrogen content

图 6 显示了氢气甲烷混合气的爆炸因子随掺氢比例的变化规律。可以看出, 随着混合气中氢气

比例的提升, 爆炸因子呈现上升趋势。具体而言, 从纯甲烷状态到掺氢比为 20% 的混合气, 爆炸因子由 469bar·(m/s) 增至 517bar·(m/s), 相比纯甲烷仅升高约 10%, 增幅较为有限。

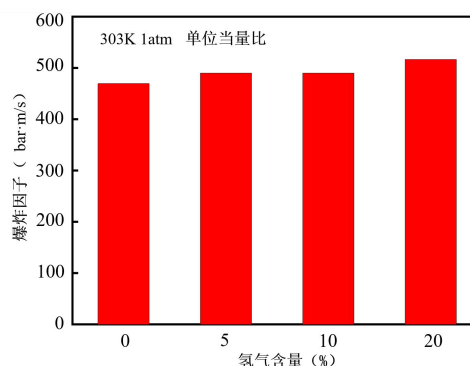


图 6 掺氢天然气爆炸因子变化曲线随氢气含量的变化

Fig.6 Variation of explosion factor of hydrogen-enriched natural gas with hydrogen content.

根据实验得到的上述关键参数可知, 在 20% 掺氢比以内, 氢气/甲烷混合物的爆炸特性与纯甲烷极为接近, 其爆炸危险性并未因氢气的掺入而发生实质性升高。本研究实验结果从爆炸学层面有力地支持了前期理论计算给出的 21% 掺氢极限值, 证实了在此比例下进行天然气掺氢, 其爆炸风险可控, 与甲烷基准情景相比, 未引入显著额外风险。这为掺氢天然气的工程应用安全评估提供了重要的实验依据, 也为理论掺氢极限值的可靠性提供了有力的实验佐证。

3 掺氢天然气灶具燃烧特性数值模拟

在安全边界已得到实验验证的前提下, 为了进一步验证理论分析中给出的 21% 掺氢极限的正确性, 本研究进一步开展了针对真实灶具的三维数值模拟研究。

3.1 数值模拟方法介绍

研究中采用的数值模拟工具为 ANSYS Fluent。火焰面模型选取方面, 由于本文计算的预混火焰中没有燃料分层, 因此可以采用二维火焰面生成流型模型 (Flamelet Generated Manifold, FGM) 进行计算; 辐射模型选取方面, 本研究使用了适用范围广泛的 DO 辐射模型。燃烧模型选取方面, 选用涡耗散概念模型 (Eddy-Dissipation Concept, EDC) 进行求解, 该模型是涡耗散模型 (Eddy-Dissipation Model, EDM) 的拓展模型, 在

湍流流动中包含了详细的化学反应机理；由于燃烧过程中涉及极其复杂的化学反应，需要将详细化学反应动力学与湍流燃烧数值模拟进行耦合，故需要选择合适的反应机理。本文选取的化学机理耦合了甲烷氢气五步反应机理，实现了计算精度和效率之间的权衡。

3.2 物理模型绘制图纸及网格划分

本研究掺氢天然气灶具选用美的某型号灶具，实物图如图 7 (a) 所示，通过 SolidWorks 对实物进行测绘并建模，绘制 1:1 的数字模型，用于后续的计算，建模结果如图 7 (b) 所示。灶具关键部件分为火盘、火孔，这些部件决定了灶具的火焰形态和燃烧特性。

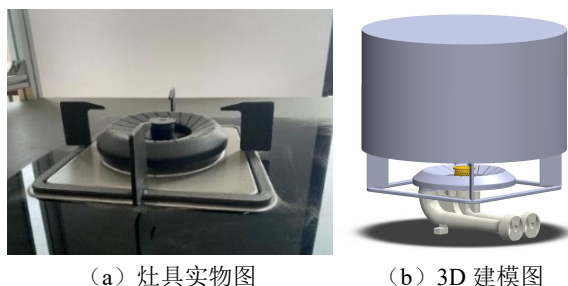


图 7 掺氢天然气灶具结构

Fig.7 Structure of hydrogen-blended natural gas cooker

建模后需要对模型进行流体区域抽取和网格划分，本研究采用 Meshing 进行网格划分，网格细节如图 8 所示。由于内外火孔及燃烧区域结构尺寸较小，在保证网格质量的前提下，对此区域进行非结构化网格的划分。

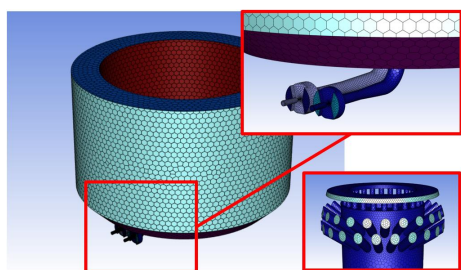


图 8 网格划分图

Fig.8 Mesh diagram

3.3 结果分析

由于数值模拟研究是为了进一步验证理论分析中给出的 21%掺混极限的正确性，并且在上一章的安全性研究中已经证明 21%掺氢极限值爆炸风险可控，故本研究选取氢气掺混比为 0 和掺混比为 21%两种工况进行模拟，以对比不掺氢天然气与掺

氢天然气掺氢比达到理论最大值时二者的差异，进而验证理论分析得出的掺氢极限的合理性。边界条件设置采用压力入口作为燃料的边界条件，给定压力为 1800Pa、总温为室温 300K。本研究选用的美的某型号家用燃气灶额定燃气压力为 2000Pa，模拟中将入口压力设置为 1800Pa，约为额定压力的 90%，属于正常工况范围内，能够对应民用灶具常见的燃气供气压力，入口总温设为 300K，为室温环境条件，可以用于表征典型民用使用场景。

首先，对比了不同掺氢比下灶具的火焰形态结构，本研究中近似以温度表征火焰形态。图 9 (a) 展示了天然气基准工况的温度云图，图 9 (b) 展示了天然气掺混 21%氢气工况的温度云图。通过对比可以发现，在理论掺氢比 21%上限时，灶具依然可以正常工作，与不掺氢天然气相比主要有以下差别：首先，21%掺氢工况的火焰更贴近于外火盘，这是由于掺混氢气增加了火焰传播速度，导致回火趋势明显，所以火焰将更加贴近于外火盘。但是由于中心盖处内火孔为小孔结构，所以在掺氢与不掺氢工况下，中心处的火焰结构较为一致；此外，由于掺混氢气后，火焰的燃烧强度提升，所以 21%掺氢工况的热释放区域较大，从云图上可以直观看出，掺氢之后，温度较高的区域显著增大。

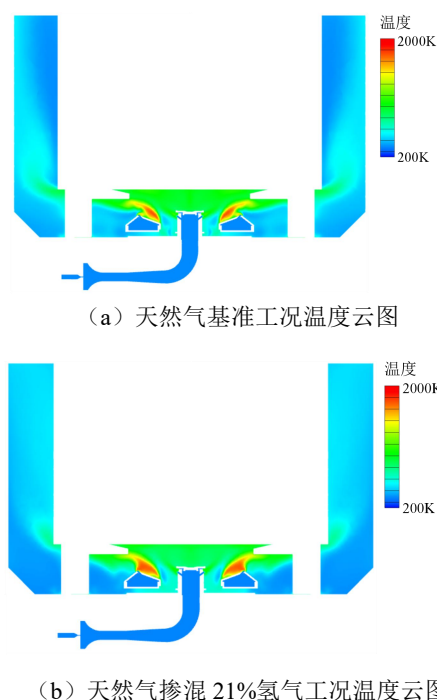
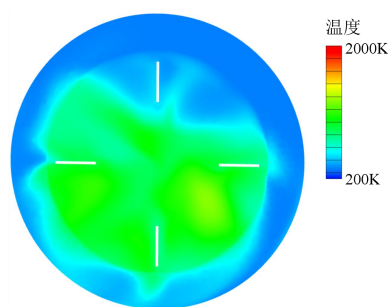


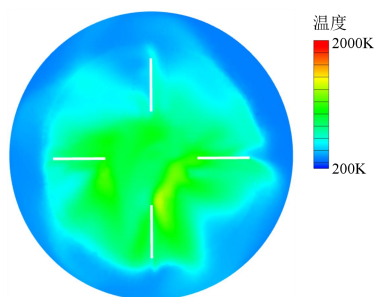
图 9 温度云图

Fig.9 Temperature contours

为了进一步探究天然气掺混 21% 氢气之后灶具的适应性, 图 10 对比了未掺混工况和掺混 21% 氢气工况下标准锅锅底的温度云图。其中图 10 (a) 为天然气基准工况, 图 10 (b) 为掺混 21% 氢气工况, 对比两工况温度云图可以发现, 掺混 21% 氢气工况的锅底温度整体要小于未掺混工况, 且在标准锅周围温度较低, 并且火焰延伸出标准锅的距离缩短。分析这是由于氢气火焰传播速度较大、火焰长度缩短所导致的。这种情况下, 火焰集中在锅底, 将减少不必要的热量损失, 更大限度地实现热量交换, 这也是天然气掺混氢气之后的优势之一。但同时也需注意, 由于火焰长度缩短导致的锅底温度较低的情况, 将影响灶具的正常加热能力, 这一点还需实际实验加以验证, 以评估温度降低对实际灶具加热过程的影响。



(a) 天然气基准工况标准锅锅底温度云图



(b) 掺混 21% 氢气工况标准锅锅底温度云图

图 10 标准锅锅底温度云图

Fig.10 Temperature contours at the bottom of the standard pot

最后, 在灶具应用场景中, 二氧化碳 (CO_2) 排放是评估其环保性能的关键指标之一。本研究通过向天然气中掺入一定比例的氢气, 利用氢元素替代部分碳元素, 理论上预期能够减少 CO_2 的生成。数值模拟结果证实, 在掺混 21% 氢气的工况下, CO_2 排放量显著减少。其中, 图 11 (a) 为纯天然

气基准工况的 CO_2 分布, 图 11 (b) 为掺混 21% 氢气后的 CO_2 分布。对比二者可清晰看出, 掺氢后 CO_2 排放整体下降, 且在灶具中心区域减排效果尤为明显。因此, 在民用灶具中使用掺混 21% 氢气的天然气, 不仅能够维持正常燃烧, 还可有效降低 CO_2 排放。



(a) 天然气基准工况 CO_2 分布云图



(b) 掺混 21% 氢气工况 CO_2 分布云图

图 11 CO_2 分布云图

Fig.11 CO_2 distribution contours

综上, 本节采用数值模拟的方法, 对美的天然气灶具燃用理论最高掺氢比下的掺氢天然气燃烧特性进行了研究。通过与纯天然气工况的对比, 全面评估了灶具在掺氢后的燃烧性能。模拟结果表明, 在现有灶具结构不变的条件下, 掺入 21% 的氢气未对灶具使用性能产生显著负面影响, 进一步验证了掺氢极限选取的合理性。

4 结论

本研究通过理论分析、数值模拟与实验验证相结合的系统性方法, 重点探讨了不同掺氢比例对天然气燃烧特性及安全性能的影响, 并给出国内天然气掺氢的理论极限值, 旨在为掺氢天然气的实际应用提供参考。主要研究内容与结论如下:

(1) 基于燃气互换性理论, 以国家标准 GB/T 13611-2018 为依据, 通过 CHEMKIN 软件计算了掺氢天然气的高华白数、高热值与燃烧势等关键互换性参数。结果表明, 当掺氢比例不超过 21% 时,

掺氢天然气仍能满足 12T 类燃气的互换性要求,确定了国内天然气掺氢的理论极限值;

(2) 通过定容燃烧弹实验平台系统测试了掺氢比例在 0~20% 范围内的掺氢天然气爆炸极限与爆炸特性参数,验证掺氢天然气的爆炸安全性。实验表明,该掺氢范围内混合气的爆炸上限仅由 16.5% 缓慢升至 20.1%。爆炸压力峰值、压力升高率及爆炸因子等关键参数变化均不显著,证明掺氢比例在理论极限值附近时,混合气体的爆炸风险与纯甲烷相当,未引入明显额外风险;

(3) 利用 ANSYS Fluent 对典型家用灶具在纯甲烷与 21% 掺氢比例工况下进行三维燃烧模拟,验证灶具在极限掺氢比下的适用性,结果显示:掺氢后火焰传播速度加快,热释放区域扩大,锅底温度略微降低,但灶具仍可稳定燃烧,且 CO₂ 排放显著降低,表明在现有灶具结构下 21% 掺氢比例具有可行性。

参考文献:

- [1] 韩芳.我国可再生能源发展现状和前景展望[J].可再生能源,2010,28(4):137-140.
- [2] 温源远,蓝艳,于晓龙,等.可再生能源的发展现状及趋势[J].环境保护,2024,52(5):68-72.
- [3] Islam MT, Shahir SA, Uddin TMI, et al. Current energy scenario and future prospect of renewable energy in Bangladesh[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,39:1074-1088.
- [4] Xiangyu M, Mingyun C, Alun G, et al. China's hydrogen development strategy in the context of double carbon targets[J]. Natural Gas Industry B, 2022,9(6):521-547.
- [5] Ying H, Yi Z, Ruohan Z, et al. Hydrogen energy development in China: Potential assessment and policy implications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024,49(PD):659-669.
- [6] Zuoyu S. Hydrogen Energy: Development Prospects, Current Obstacles and Policy Suggestions under China's "Dual Carbon" Goals[J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2023,11(1):2350006.
- [7] Tabkhi F, Azzaro-Pantel C, Pibouleau 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.
- [8] 郭开华,王冠培,皇甫立霞,等.中国天然气气质规格及互换性标准问题[J].天然气工业,2011,31(3):97-101, 117-118.
- [9] De Vries H, Levinsky HB. Flashback, burning velocities and hydrogen admixture: Domestic appliance approval, gas regulation and appliance development[J]. Applied Energy, 2020,259:114116.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Judd R, Pinchbeck D. Hydrogen admixture to the natural gas grid[J]. Compendium of Hydrogen Energy, 2016:165-192.
- [13] Haeseldonckx D, D'haeseleer W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007,32(10-11):1381-1386.
- [14] 邢永杰,冯浩男,鲁军辉,等.燃气锅炉掺氢燃烧、排放及运行特性研究[J].暖通空调,2026,56(1):70-77.
- [15] 王珂.天然气掺氢燃烧特性研究[D].荆州:长江大学,2021.
- [16] 张勇,黄佐华,廖世勇,等.天然气/氢气燃烧特性研究[J].内燃机学报,2006,(3):200-205.
- [17] 卢欣,赵俊,赵延芳,等.掺氢天然气可燃极限动力学特性与机理研究[J].热能动力工程,2025,40(5):75-82,91.
- [18] 陈洪强,李俊磊,张成龙,等.掺氢可燃气体燃爆特性研究进展[J].力学与实践,2023,45(2):345-361.
- [19] 徐宏伟.燃气燃烧器发展现状研究[J].现代制造技术与装备,2009,(3):30-31.
- [20] 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.