

掺氢发动机燃烧调控技术研究进展

骆洪亮¹, 马嘉骏¹, 温建², 刘科研³, 于美琪^{4,*}, 刘龙¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 山东省农业机械技术推广站, 山东 济南 250013; 3. 哈尔滨东安汽车动力股份有限公司 增程动力系统研究院, 黑龙江 哈尔滨 150060; 4. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 掺氢发动机是实现能源系统低碳化的关键过渡技术。通过氢气与传统或可再生燃料的协同燃烧, 可以显著提升热效率并降低碳排放, 为内燃机低碳转型提供可行的路径。本文系统综述了氢气与柴油、汽油、天然气、氨气等主流燃料组合的燃烧特性、排放控制及工程应用, 重点对比了不同技术路径下的燃烧调控策略、性能提升与场景适配性, 揭示了各方案的核心矛盾与协同优化规律, 弥补了现有综述中对技术路径横向整合分析不足的短板。研究表明, 氢气掺混可将发动机循环波动控制在 2% 以内, 7.5% 的掺氢量可使柴油机满负荷时的平均制动热效率提升 23%。汽油掺氢可将稀燃极限从 $\lambda=1.45$ 拓展至 $\lambda=2.55$, 同时碳氢化合物和一氧化碳的排放最高降幅超过 90%。然而, 该技术仍面临氮氧化物排放增加和回火早燃等异常燃烧风险。未来需构建基于缸压反馈的异常燃烧智能预测与防控体系, 同时同步开展掺氢比例工况的动态匹配及多污染物协同减排研究, 以推动绿氢产业的发展和全生命周期碳排放管控, 助力该技术的规模化应用。

关键词: 掺氢发动机; 绿色低碳能源; 排放控制; 燃烧策略优化; 发动机性能提升

中图分类号: X505; TK46 文献标识码: A

Research Progress on Combustion Control Technologies for Hydrogen-Blended Engines

LUO Hongliang¹, MA Jiajun¹, WEN Jian², LIU Keyan³, YU Meiqi^{4,*}, LIU Long¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Shandong Provincial Agricultural Machinery Technology Extension Station, Jinan 250013, China; 3. Extended-Range Power System Research Institute, Harbin Dongan Auto Engine Co., Ltd., Harbin 150060, China; 4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: As a key transitional technology for the low-carbon transformation of energy systems, hydrogen dual-fuel engine technology utilizes the co-combustion of hydrogen with conventional or renewable fuels and demonstrates significant potential for improving thermal efficiency and reducing carbon emissions. This paper systematically reviews the combustion characteristics, performance impacts, emission control strategies, and engineering applications of hydrogen blended with diesel, gasoline, natural gas, and ammonia. A comparative analysis highlights differences in combustion regulation mechanisms among these fuel combinations, revealing a principle of "common synergy with individual adaptation" for hydrogen across various technical pathways. For hydrogen-diesel engines, hydrogen enhances premixed combustion and improves thermal efficiency; a hydrogen blending ratio of 7.5% increases power output by 17.2% and brake thermal efficiency by 23%. The NO_x-soot trade-off

收稿日期: 2026-01-26

修回日期: 2026-04-13

接受日期: 2026-04-15

DOI: 10.20078/j.ep.20260408

基金项目: 黑龙江省重点研发计划(2024ZX03B07); 中央高校基本科研业务费资助项目(30720205GH0301、3072025CFJ0703)

第一作者: 骆洪亮(1988—), 男, 河北廊坊人, 教授, 主要研究方向为发动机低碳燃烧。E-mail: luohl@hrbeu.edu.cn

*通讯作者: 于美琪(1990—), 女, 河北秦皇岛人, 副教授, 主要研究方向为燃料雾化与清洁燃烧。E-mail: meiqiyu@hrbeu.edu.cn

necessitates synergistic optimization through exhaust gas recirculation, water injection, and advanced injection strategies. In hydrogen–gasoline engines, hydrogen extends the lean-burn limit from $\lambda=1.45$ to 2.55 and improves cold-start performance. With a hydrogen blending ratio of 20%, brake thermal efficiency reaches 34.2%, while HC and CO emissions are reduced by 40.0%–58.3%. Split-injection strategies enable active control of mixture stratification, thereby enhancing combustion stability under ultra-lean conditions. For hydrogen–natural gas engines, hydrogen accelerates flame propagation and broadens the lean-burn limit. Hydrogen injection timing has been identified as an independent parameter with a more pronounced effect on combustion than the blending ratio. In hydrogen–ammonia engines, hydrogen acts as an effective combustion promoter for ammonia. Increasing the compression ratio significantly reduces hydrogen consumption, while pre-chamber combustion and active hydrogen jet ignition enable stable combustion with a hydrogen energy fraction as low as 2.9%, achieving an indicated thermal efficiency of 42.5%. Despite these benefits, the high reactivity of hydrogen intensifies thermal NO_x formation, particularly under medium to high loads. Its wide flammability range and low ignition energy introduce risks of backfire, pre-ignition, and knocking. Engineering challenges such as hydrogen storage, transportation safety, and system cost remain critical barriers to large-scale deployment. Future research should shift from static optimization to dynamic, multi-parameter coordinated control. To prevent abnormal combustion, active control systems based on precise injection timing, real-time in-cylinder pressure monitoring, and artificial intelligence are required. For safe storage and transportation, breakthroughs in hydrogen carriers that are stable under ambient conditions, such as ammonia and liquid organic hydrogen carriers, are essential. Advancing the green hydrogen industrial chain with full life-cycle carbon emission management will support large-scale applications in transportation, shipping, and power generation, positioning hydrogen dual-fuel technology as a key pathway toward carbon neutrality.

Keywords: Hydrogen-blended engine; Green and low-carbon energy; Emission control; Combustion strategy optimization; Engine performance improvement

0 引 言

在全球能源结构转型与“双碳”目标深入推进的背景下,交通运输领域作为碳排放的主要来源之一,其动力系统的低碳零碳化已成为至关重要的战略任务^[1]。目前,全球超过 80% 的能源供应来自化石燃料^[2],这些化石燃料主要通过内燃机 (Internal Combustion Engine, ICE) 转化为能量,是导致温室气体排放与环境污染的关键因素^[3]。内燃机因可靠性高、能量密度大、基础设施完善,在重载运输、船舶动力、工程机械等领域具有重要地位,因此,发展兼容现有能源基础设施、显著降低碳排放的清洁燃料技术,成为兼顾能源安全与气候治理的迫切需求,也是未来内燃机技术的重要发展方向^[4]。在此背景下,寻找清洁、高效的替代能源及动力技术成为当务之急。

在众多替代能源中,氢气具有诸多优势,其燃烧产物仅为水,是一种真正意义上的零碳燃料。

同时,氢气的质量能量密度高,远超传统化石燃料。氢气的制取来源广泛,如可再生能源电解水、生物质气化等,为其大规模应用提供了可能,被视为最具潜力的清洁能源载体之一^[5]。然而,在内燃机中直接应用氢能将面临一系列固有的燃烧控制难题^[6],其极高的火焰传播速度与极低的点火能量使得发动机在运行时极易发生回火、早燃与爆震等异常燃烧现象^[7];同时,以往研究指出氢气高温燃烧会加剧氮氧化物(NO_x)的生成^[8]。这些问题限制了氢气在内燃机中的单独使用,严重制约了纯氢内燃机的可行性、性能与排放表现,阻碍了其规模化商业应用。

为有效解决上述难题,氢双燃料技术得到发展,并逐渐发展为一种重要的过渡路径^[9-10]。该技术通过将氢气与传统化石燃料或可再生、低碳燃料进行科学配比协同燃烧,旨在借助氢气的高活性改善另一种燃料的燃烧效率、拓展稀燃边界,同时依托另一种燃料的高能量密度及相对成熟的储

运基础设施,保障动力输出的平稳性与系统的实用性。

氢双燃料技术的发展始于20世纪70年代,是由石油危机引发的替代能源探索。早期研究由于纯氢发动机存在排放和爆震问题,转向掺氢双燃料技术研究,如1974年首篇汽油掺氢SAE(Society of Automotive Engineers)论文旨在通过添加氢扩展汽油稀燃极限,以控制 NO_x 的生成^[11]。21世纪开始聚焦天然气、柴油掺氢的燃烧优化与减排。近年来,随着绿色氢能产业的兴起^[12],氢双燃料技术研究进一步向精细化、场景化深入,量化掺氢比例的影响,并结合废气再循环(Exhaust Gas Recirculation, EGR)、稀薄燃烧等协同技术。在欧盟及中国等氢能战略的驱动下加速工程应用进程,氢双燃料技术已在多个应用场景展现出显著的减排潜力和适应性。

将氢气与不同燃料组合能够有效弥补单独使用氢气时的不足,针对特定场景发挥互补优势。不同燃料组合在燃烧特性调控方面展现出差异化优势。李星国^[13]指出,在一定比例范围内,氢气与天然气混合使用能有效提升发动机性能,减少排放。氢气-柴油双燃料技术则兼顾柴油的高能量密度和氢气的高效燃烧特点,在提高发动机效率的同时,减少污染物排放。氢气-汽油组合可利用氢气可燃极限较宽的性质实现汽油发动机稀燃条件下稳定燃烧^[14];氢气-氨气组合中,氢气高活性能够有效弥补氨燃料点火困难、燃烧不稳定的缺点,从而显著增强火焰稳定性和点火特性,与氨具有的高氢含量及易于储存运输的优势形成互补,使得氢-氨双燃料系统在能源应用领域展现出重要潜力^[15-16]。

氢双燃料已得到部分实际应用。氢内燃机汽车在动力性、经济性和实用性方面表现良好,部分汽车品牌已推出相关车型^[17]。

尽管氢双燃料技术展现出巨大的潜力,但目前仍面临一些挑战。从技术层面来看,氢双燃料发动机的燃烧稳定性、排放控制等问题仍需进一步优化。高比例氢燃料燃烧时容易出现回火、早燃等异常燃烧现象,影响发动机的性能和可靠性^[18]。同时, NO_x 排放问题在部分工况下依然较为突出,需要更有效的排放控制技术^[19]。在经济方面,氢气的制取、储存和运输成本较高,这使得氢双燃料的应用成本相对较高,限制了其大规模推广^[20]。

随着研究的深入,氢双燃料技术已从早期的

燃料替代探索,发展为以燃烧过程主动调控为核心的系统性技术体系。其内涵不再局限于燃料的简单混合,而是通过燃料供给方式(进气道喷射/缸内直喷)、喷射正时与压力、点火策略、废气再循环(EGR)等多维度的协同控制,实现氢气与主燃料在燃烧过程中的优势互补。不同燃料组合的本质差异在于燃烧调控手段的适配性,而非仅仅燃料种类的选择。目前,尽管针对氢气-柴油、氢气-汽油、氢气-天然气、氢气-氨气等不同燃料组合的已展开大量研究,但在系统对比不同技术路径的燃烧调控策略、适用场景与优化方法方面仍缺乏整合分析。为此,本文围绕氢气与柴油、汽油、天然气、氨等燃料的组合,系统综述国内外氢双燃料发动机的外特性研究现状,横向分析不同燃料组合在燃烧特性、性能、排放与控制策略上的差异,明确各技术路径的适用场景,为面向实际工程应用的下一代氢双燃料发动机设计与低碳化应用提供理论参考,助力交通动力系统迈向近零碳排放。

1 氢双燃料发动机概述

氢双燃料发动机是指将氢气与传统化石燃料或可再生燃料按一定比例混合燃烧的内燃机。氢双燃料发动机涵盖多种燃料组合,但其核心均基于氢气与其他燃料的特性互补,旨在实现发动机性能提升与排放控制的协同优化。氢双燃料技术的核心目标如图1所示,即满足未来对于活性可控、能量灵活存储与利用的低零碳动力模式。

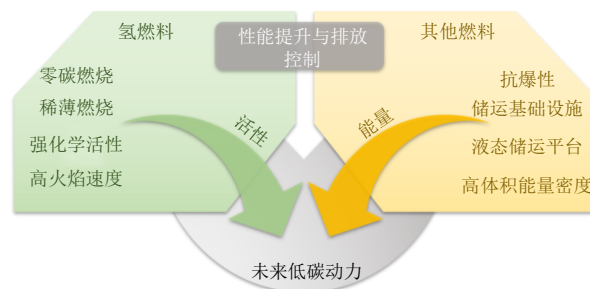


图1 氢双燃料协同作用机理示意图

Fig. 1 Synergistic mechanism of hydrogen dual-fuel

从能源系统的角度分析,氢双燃料技术实现了从可再生能源到内燃机能量的高效转化与利用。图2展示了可再生能源制氢、氢在传统或新型内燃机中与其他燃料协同利用的能量流动路径。该技术不仅可利用现有内燃机平台与燃料储运设施,还可通过逐步提高掺氢比例进一步降低

温室气体排放,提升能源利用效率。氢双燃料技术的发展经历了多个阶段,其核心目标与技术焦点随时代需求不断演进,见表1。从早期以替代石油为目标的氢气-汽油探索,到为满足排放法规而聚焦于EGR与喷射控制的氢气-柴油系统,再到近年来面向绿氢利用与场景定制化的氢气-氨气等组合,该技术正向更精细化、多元化发展。

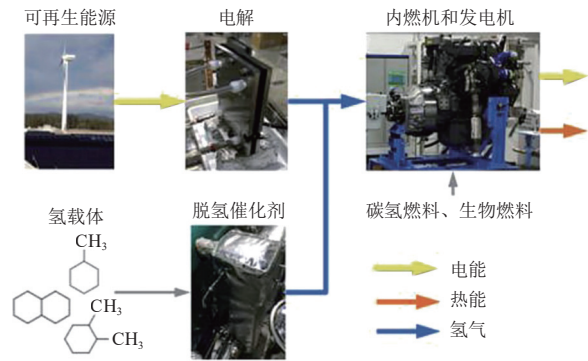


图2 从可再生能源到内燃机中氢气利用能量流概念图^[21]
 Fig. 2 Conceptual diagram of hydrogen energy flow from renewable sources to ICE^[21]

氢气作为一种高活性燃料,其独特的物化特性对发动机燃烧过程与工程应用带来一定影响,

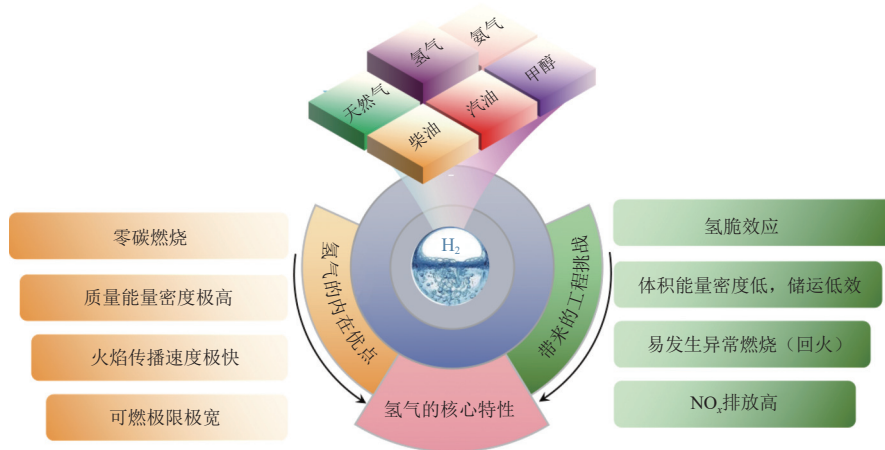


图3 氢气的特性及工程影响
 Fig. 3 Hydrogen properties and their engineering implications

表2 不同氢双燃料技术对比与展望

Table 2 Comparison and prospects of various hydrogen dual-fuel technologies

燃料组合	核心优势	典型喷射方式	点火/引燃策略	适用场景
氢气-柴油	热效率提升显著, 兼容现有设施	进气道氢喷射+缸内柴油直喷; 双直喷	柴油压燃引燃	重载运输、工程机械
氢气-汽油	改善冷启动, 拓宽稀燃极限	进气道汽油喷射+缸内氢直喷	火花点火, 可变点火正时	乘用车、寒区交通
氢气-天然气	基础设施完善, 燃烧稳定	进气道混合喷射; 进气道氢+天然气直喷	火花点火, 高能点火	城市公交、出租车
氢气-氨气	零碳储运便利, 船舶脱碳潜力大	双直喷	火花点火或预燃室射流点火	船用动力、固定发电

表1 混氢燃料阶段对比表

Table 1 Comparison of hydrogen-blended fuel stages

时期	核心目标	技术焦点	代表燃料
1970—1990	替代石油	纯氢燃烧可行性	氢气-汽油
2000—2015	满足排放法规	EGR、喷射控制	氢气-柴油
2015—2020	绿氢利用	稀燃、掺氢比例	氢气-天然气
2020至今	场景定制	动态优化	氢气-氨气

为大气、水环境等跨介质动力系统提供新的燃料解决方案^[22]。图3系统归纳了氢气的核心特性及其在工程应用中带来的性能提升与挑战。因物化特性差异,不同燃料与氢气的燃料组合在燃烧机制、技术成熟度、适用场景等方面表现出显著区别,表2横向对比了典型氢双燃料组合的技术特点与发展前景。为进一步比较各燃料的物化参数,表3列举了氢气、氨、柴油、汽油、天然气及甲醇的关键特性,为理解不同组合的特点提供数据基础。

2 氢双燃料发动机燃烧调控研究

2.1 氢气-柴油发动机

表 3 不同燃料特性

Table 3 Different fuel characteristics

参数	氢气	氨(液)	柴油	汽油	天然气(液)
存储温度/°C	25	25	25	25	-162
存储压力/kPa	35 000.0	1 030.0	101.3	101.3	101.3
质量低热值/(MJ·kg ⁻¹)	120.1	18.8	435.0	42.5	50.0
体积低热值/(kJ·L ⁻¹)	2 786.3	11 332.6	35 572.5	31 811.5	21 500.0
自燃温度/°C	570	651	230	440	540
最低点火能量/MJ	0.02	8.00	—	0.14	0.28
火焰传播速度/(m·s ⁻¹)	2.90	0.07	—	0.37~0.43	—
可燃极限(体积分数)/%	4.0~75.0	16.0~25.0	0.6~5.5	1.4~7.6	5.0~15.0
气化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	454.20	1 369.00	47.86	71.78	104.80
火焰温度/°C	2 100	1 850	2 053	2 197	1 884
辛烷值	>130	110	—	90~98	107
理论空燃比	34.30	6.06	14.50	14.70	17.20
密度/(kg·m ⁻³)	0.089	602.800	837.000	745.000	430.000

在氢气-柴油双燃料系统中,氢气在燃料喷雾中的高扩散性使可燃混合物与进气充分混合,可改善柴油的雾化效果,从而推动燃烧过程完成,降低颗粒物排放^[23]。然而高火焰速度易引发回火现象,即未燃混合气逆流至进气道提前点燃,需通过优化气门正时或采用分层喷射技术加以抑制^[24]。此外,氢气燃烧的核心链式反应路径包括: $H_2 \rightarrow H \cdot + H \cdot$, $H \cdot + O_2 \rightarrow OH \cdot + O \cdot$, $OH \cdot + H_2 \rightarrow H_2O + H \cdot$ 。氢气燃烧释放的 $H \cdot$ 和 $OH \cdot$ 能够加速燃料的氧化反应,缩短点火延迟期并提升燃烧效率^[25],然而高温条件下 NO_x 的生成问题依然突出,需结合 EGR 技术或低温燃烧策略进行调控^[26]。氢气-柴油双燃料发动机通过将氢气与柴油协同燃烧,在保留柴油高能量密度优势的同时,借助氢气的无碳特性和高火焰速度改善燃烧效率、降低碳排放,成为内燃机低碳化改造的核心方向,其缸内工作过程如

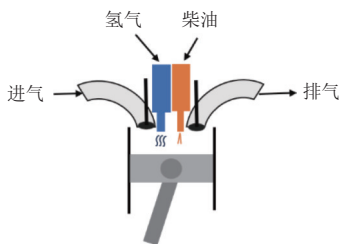


图 4 氢气-柴油双燃料直喷发动机缸内示意图

Fig. 4 In-cylinder schematic of a hydrogen-diesel dual-fuel direct injection engine

图 4 所示。

国内外研究围绕动力提升、排放控制及系统适配展开了持续探索,形成了从基础实验到工程应用的技术积累。大量研究表明,氢气掺入柴油能够显著改善发动机的热效率。KÖSE 等^[27]在满负荷工况下掺入 7.5% 的氢气使发动机功率提升 17.2%,制动热效率平均提高 23%,同时一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)和碳氢化合物(HC)排放量显著降低。如图 5 所示,氢气添加对发动机热效率的提升作用具有普遍性。JAMROZIK、NAG 及 DHOLE 等^[28-30]的研究也得到相似结论:在高负荷

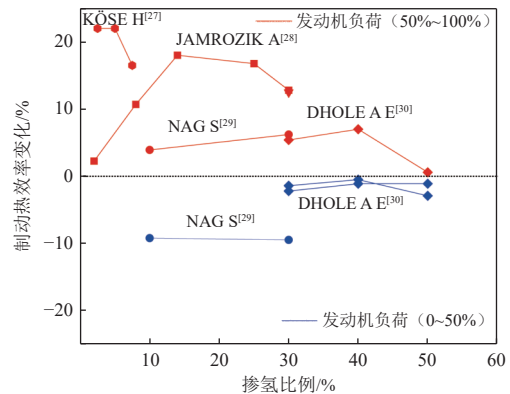


图 5 掺氢含量对于氢-柴双燃料发动机制动热效率影响^[27-30]

Fig. 5 Effect of hydrogen blending ratio on brake thermal efficiency of hydrogen-diesel dual-fuel engine^[27-30]

下,制动热效率(Brake Thermal Efficiency, BTE)随掺氢比例增加而普遍上升。该现象主要归因于氢气的高火焰速度和强扩散性,它优化了柴油喷雾的预混燃烧,缩短了燃烧持续期,从而提升了燃料转换效率。然而,掺氢对热效率的提升并非线性,而是存在最优窗口。由图5可知,在过高掺氢比例下,热效率提升曲线趋于平缓甚至下降。这主要是氢气占比过高导致进气量不足、容积效率下降,以及混合气形成质量恶化,表明掺氢比例需根据燃烧室设计和进气条件精细化匹配。

在排放特性方面,掺氢对常规气态污染物的抑制效果较为明确,但对 NO_x 的影响较为复杂。LILIK等^[31]早期通过计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真发现,氢气添加显著增加了缸内超氧化氢(HO_2)浓度,而 HO_2 可促进一氧化氮(NO)向二氧化氮(NO_2)的转化,从而改变 NO_x 的组成。LI等^[32]实验进一步证实,随着氢气替代率(Hydrogen Substitution Ratio, HSR)的增加, NO_x 排放呈先降后升的趋势,当HSR较低时, HO_2 参与的 NO 转化占主导,使 NO_x 排放量下降;而当HSR继续升高,燃烧温度急剧上升,热力型 NO_x 生成机制重新占据优势,导致 NO_x 排放量反弹。该发现揭示了 NO_x 排放调控的关键在于平衡 HO_2 的转化作用与燃烧温度的控制,为后续结合EGR、喷射策略等协同优化提供了理论基础。

掺氢效果与发动机负荷密切相关,不同负荷下氢气的作用机制和最优策略呈现显著差异。发动机低负荷工况下,掺氢效果较为复杂。SANTOSO等^[33]指出,发动机低负载时增加氢气流量虽可提高柴油替代率,但会导致发动机效率降低,气缸压力峰值下降,这主要由于低负荷时缸内温度较低,氢气燃烧不充分。然而,DIMITRIOU等^[34]发现,在发动机极低负荷下将氢气占比提升至98%时,发电机仍能平稳运行,且 NO_x 排放减少超90%,碳烟(soot)降低85%。该差异表明,当氢气比例极高时,燃烧模式已从柴油引燃转变为氢气主导的预混燃烧,低温反应路径占优势,从而抑制了 NO_x 生成;而添加中等比例氢气则可能因燃烧相位不当导致效率损失。中高负荷工况下,ZHOU等^[35]发现添加氢气可提升缸内峰值压力和热释放率,但 NO_x 排放量因 NO_2 剧增而上升,同时颗粒物(Particulate Matter, PM)的大小和数量减少。SUZUKI等^[36]在多缸发动机研究中,通过掺混高比例氢气将制动热效率提升至40%,并借助EGR将 NO_x 排放降至

传统柴油机水平,但高EGR导致soot排放恶化,且混合气不均问题限制了氢气比例的进一步提升。SUBRAMANIAN等^[37]研究同样证实,高负载下单纯依靠优化掺氢比例难以兼顾所有排放指标,需要引入EGR等辅助技术。上述研究表明,氢气-柴油双燃料技术的优化必须考虑负荷因素的动态影响。

为平衡 NO_x 与soot的排放量,EGR是有效的协同调控手段。刘少华等^[38]系统研究了EGR对氢气-柴油双燃料发动机的影响,发现随着EGR增加,缸压及放热率峰值减小, NO_x 排放降低75%,但高EGR会加剧soot排放。通过优化参数,该研究确定了35%掺氢比例与15% EGR可实现多污染物协同控制。与EGR稀释进气降低燃烧温度不同,水喷射技术利用水的高汽化潜热直接吸收缸内热量,为 NO_x 控制提供了另一条可行路径。SHARKEY等^[39]验证了注射进气歧管水与氢气-柴油双燃料燃烧技术的协同效应,发现该方案可避免EGR导致的发动机性能损失,在氢气比为90%时,CO和 CO_2 排放分别降低94%和96%,通过水冷却抑制约30% NO_x 排放。该研究揭示了水喷射可在保持高氢比例优势的同时缓解其负面效应,尤其适用于对功率密度要求较高的应用场景。图6为在内燃机中使用氢气的主要问题和推荐解决方案。

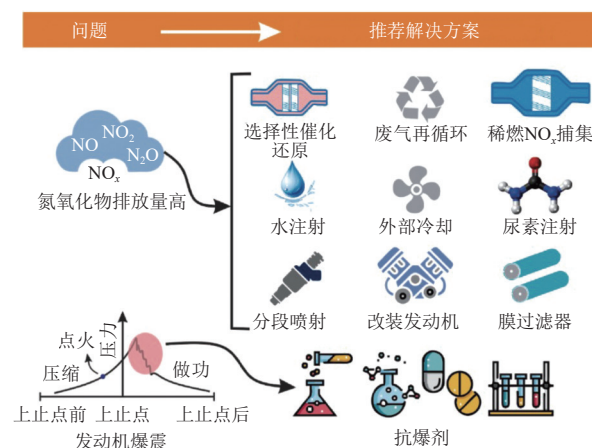


图6 在内燃机中使用氢气的主要问题和推荐解决方案^[23]
Fig. 6 Key issues and proposed solutions for hydrogen utilization in internal combustion engines^[23]

EGR、掺氢比例、发动机负荷等参数调控改变了燃烧的宏观热力学环境,但燃烧过程也与燃料与空气在缸内的混合状态有关。近年来,研究者将研究方向转向喷射策略的精细化设计,通过控制喷射正时、喷射次数、喷射压力等参数,实现对

燃烧过程的直接干预。优化燃烧策略的核心在于电子控制系统对燃料供给的精准调控,董浩川^[40]通过构建氢气-柴油化学动力学机理并耦合 CFD 模型,系统研究了柴油预喷策略对燃烧特性的影响。结果表明,提前预喷起始角可优化缸内混合气分布、提升缸压均匀性;增加预喷油量则使缸压和缸内平均温度升高。图 7 为不同预喷起始角下缸内内能分布随曲轴转角的变化,其中 SOP 表示预喷起始角,ATDC 表示上止点后。随着预喷起始角延后,缸内着火提前,内能大量释放随之提前且分布更均匀,直接导致缸压、放热率和温度上升。该发现证实,通过改变预喷时刻可主动控制内能释放的时机与空间分布,从而实现对燃烧速率与能量释放的精准调节。预喷策略主要影响燃烧的起始阶段,主喷正时则直接决定主燃烧过程的相位和强度。刘少华等^[41]在高原缺氧环境下系统研究了柴油主喷正时对燃烧与排放的调控作用。结果表明,随着主喷正时推迟,缸内燃烧温度下降,NO_x 排放显著降低,30%、50%、70% 负荷下最大降幅分别达 53.9%、57.9% 和 40.0%,但碳烟与 CO 排放因燃烧温度降低、氧化不充分而上升。该研究揭示了主喷正时作为关键调控参数,可通过改变燃烧相位,在 NO_x 与碳烟、CO 排放之间实现平衡控制,为双燃料发动机的喷射策略优化提供了重要依据。

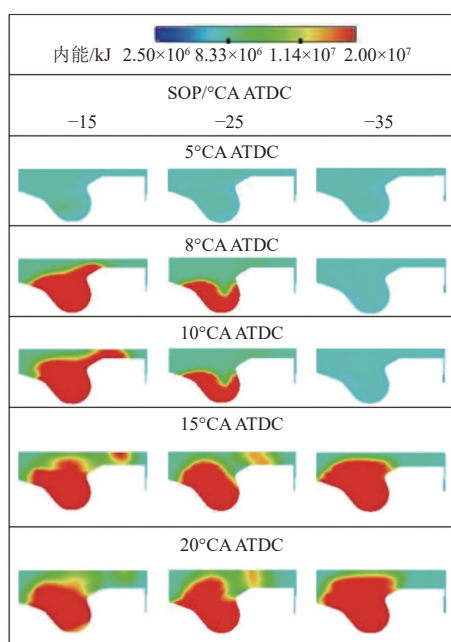


图 7 不同预喷起始角下缸内内能分布随曲轴转角的变化^[40]
 Fig. 7 In-cylinder internal energy distribution vs. crank angle at different start of pilot injection timings^[40]

在分别探索柴油侧预喷和主喷策略的基础上,研究者进一步转向氢、柴双侧喷射的协同调控,双直喷技术为氢气-柴油燃烧提供了更灵活的调控维度。LIU 等^[42]引入氢气-柴油双直喷(H2DDI)技术,通过独立调节氢气喷射时刻,揭示了氢气混合气分层程度对燃烧模式的调控机制:早期喷射(180°~90°CA BTDC)以预混燃烧为主,放热率峰值高但 NO_x 排放量增加;中期喷射(60°~40°CA BTDC)形成适度分层,实现了高效低噪燃烧;晚期喷射(20°CA BTDC)则转为混合控制燃烧,虽牺牲部分效率但显著抑制 NO_x 生成。该研究将氢气喷射正时确立为独立的调控维度,实现了在预混与扩散燃烧模式间的连续调节,为全工况优化提供了技术路径。

喷射策略的精细化调控推动了氢气-柴油双燃料技术从“掺氢比例”宏观掺混参数的研究,转向“喷射正时与喷射模式”等微观控制要素的深入探讨。在此基础上,结合前文所述的 EGR、水喷射等热力学环境调控手段,未来研究需进一步揭示各控制参数之间的动态耦合机制,并借助人工智能技术,实现对复杂运行工况下燃烧过程的实时优化。

2.2 氢气-汽油发动机

氢气-汽油双燃料技术作为点燃式发动机低碳化转型的核心路径,通过氢气与汽油的混合燃烧,在优化火花点火发动机(Spark Ignition Engine, SI)、拓宽稀燃边界及降低碳氢化合物排放方面展现出技术潜力。

掺氢比例与稀燃极限调控是氢气-汽油双燃料技术的基础。JI 团队^[43-45]通过一系列单缸汽油机实验,系统量化了氢气添加对稀燃特性的影响。结果表明,进气中掺入 4.5%(体积分数)的氢气,可将发动机的稀燃极限从 $\lambda=1.45$ 扩展至 $\lambda=2.55$,该拓展源于氢气的宽可燃极限,即使在极稀混合气中,氢气也能形成局部可燃区域,维持稳定点火。同时,氢气的高火焰速度加速了火焰传播,缩短燃烧持续期,循环波动显著降低。如图 8 所示,在怠速和正常工况下,掺氢均使指示热效率有所提升。

在明确稀燃拓展能力的基础上,研究者进一步探索了掺氢比例与热效率的量化关系。SHIVAPRASAD 等^[46]在 2 000~4 000 r/min 转速范围内研究了 0~25% 掺氢比例的影响,发现掺氢比例为 20% 时制动热效率达峰值 34.2%,较纯汽

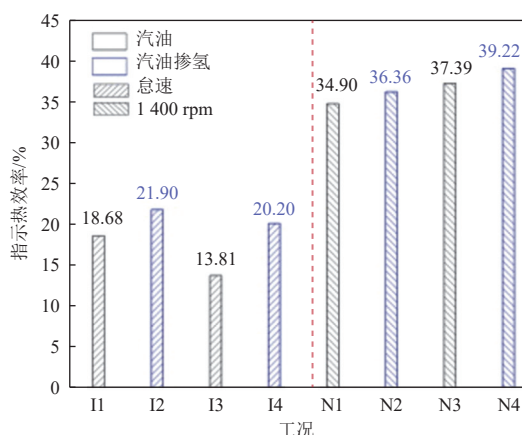


图 8 指示热效率直方图^[44]

Fig. 8 Histogram of indicated thermal efficiency^[44]

油(27.5%)提升 6.7%。该结果揭示了低比例掺氢在优化发动机热效率方面的潜力。ELSEMARY 等^[47]在此基础上将掺氢比例上限提升至 49%，观察到掺氢比例为 31% 时热效率达最大值，较纯汽油提升 18%。如图 9 所示，掺氢比例超过 31% 后因空气不足导致燃烧恶化，热效率下降，HC 和 CO 排放回升但仍低于纯汽油工况。该实验还明确了更高掺氢比例下的性能拐点^[46]。这 2 项研究共同揭示了掺氢对热效率的提升存在最优窗口，过低则效果不足，过高则因容积效率下降和混合气质量降低而恶化。最优比例随工况变化，在 20%~30% 范围内。

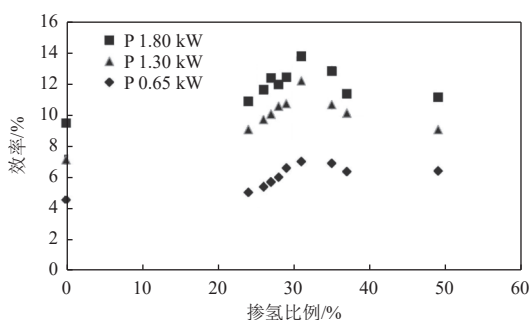


图 9 掺氢比例对不同负载下热效率的影响^[47]

Fig. 9 Effect of hydrogen blending ratio on thermal efficiency under various engine loads^[47]

掺氢对燃烧过程的改善不仅体现在宏观性能指标上，更反映在能量转换品质的提升。YU 等^[48]采用如图 10 所示的燃烧室结构，基于能量与焓平衡分析方法，系统对比了进气道汽油喷射+缸内直喷(GPI+GDI)与进气道汽油喷射+缸内氢气直喷(GPI+HDI)2 种模式在稀燃条件下的能量流分布。结果表明，在 20% 直喷比例、 $\lambda=1.1$ 的优化工况下，HDI 模式使制动热效率较原机平均提升

1.15%，而 GDI 模式仅提升 0.49%；同时，HDI 模式使焓损失平均降低 1.98%，排气焓增加 0.72%。该研究揭示了氢气掺混的根本优势：氢气的高火焰温度与宽可燃极限不仅加速了燃烧、提高了热效率，还通过降低燃烧过程的不可逆性减少了焓损失；同时，氢气的短淬熄距离降低了壁面传热损失，使更多能量以高温排气形式存在，为余热回收提供了潜力。能量品质视角的分析，为理解氢气-汽油双燃料技术的综合优势提供了理论支撑

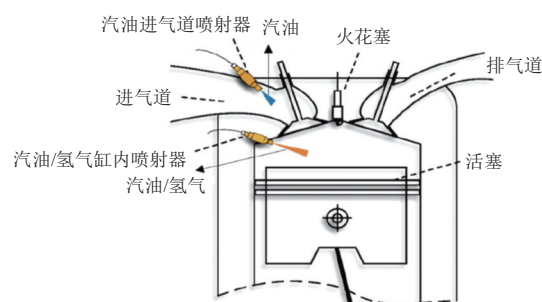


图 10 发动机燃烧室的纵向剖面^[48]

Fig. 10 Longitudinal section of the engine combustion chamber^[48]

汽油发动机在冷启动工况下面临燃油蒸发困难、混合气形成质量差、点火可靠性低等问题，导致 HC 排放升高、燃烧循环波动增大。氢气的添加为改善冷启动性能提供了有效途径，其中点火提前角是影响冷启动性能的关键参数。冀相斌^[49]在氢气-汽油双燃料发动机冷启动试验中发现，纯氢缸内直喷结合汽油进气道喷射可实现首循环有效点火，纯汽油启动则难以实现。通过优化点火提前角，双燃料模式的最佳点火时刻为上止点前 15°(15°CA BTDC)，且点火范围较纯汽油更宽。图 11 展示了不同点火提前角对发动机启动转速的影响。采用 15°CA BTDC 的点火提前角时，发动机转速上升最迅速且稳定，启动时间最短。该结果表明，氢气掺混与点火策略的协同优化可显著改善极端工况下的冷启动性能。WU 等^[50]进一步对比了氢气直喷与纯汽油模式的冷启动特性，发现氢气、汽油联合喷射可在首循环即成功点火，且点火提前角适应范围从纯汽油的 25°CA BTDC 拓宽至 30°~10°CA BTDC。在优化点火正时(15°CA BTDC)下，发动机可在 1.4 s 内达到怠速转速，较纯汽油缩短 57.6%；同时，CO 排放降低 40%，HC 排放降低 58.3%。然而，由于氢气添加提升了缸内燃烧温度，NO_x 排放较纯汽油明显升高，需要在后续运行中通过其他手段加以控制。

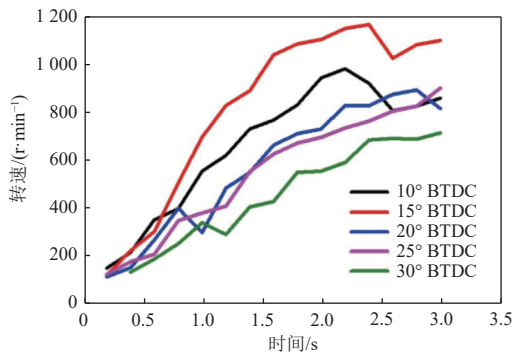


图 11 不同点火提前角下发动机起动转速图^[49]

Fig. 11 Engine cranking speed curves at different ignition advance angles^[49]

研究者对燃料供给方式的精细化调控进行进一步分析。喷射策略直接影响缸内混合气的时空分布,进而决定点火可靠性、火焰传播速率及燃烧稳定性,分层喷射策略为混合气主动控制提供了新思路。LI 等^[51]提出“二次分层氢气直喷”策略,通过将氢气喷射分为早喷与晚喷 2 次独立控制,实现了对缸内混合气分层的主动调控。优化后的喷射参数(早喷比例 33%、第二次喷射正时 120°CA BTDC)可在火花塞周围形成富氢区域确保点火稳定性,同时早喷形成的均质稀混合气加速中后期燃烧。与单次直喷相比,该策略在过量空气系数 $\lambda=2.8$ 工况下使扭矩平均提升 1.13%, HC 排放降低 35.8%, NO_x 排放降低 7.3%,并将稀燃极限拓展至传统汽油的 1.7 倍。分层喷射通过改善混合气均匀性,降低了缸壁淬熄距离和局部高温区,实现了 HC 与 NO_x 的双重抑制,突破了单次直喷难以兼顾燃烧效率与排放控制的局限。

喷射方式的系统对比从更宏观的层面揭示了氢气供给方式的影响, PURAYIL 团队^[52-54]系统比较了氢气直喷与进气道喷射对发动机性能的影响。结果表明,氢气直喷相比进气道喷射可输出更高功率,指示热效率提升 2%,且实现 CO_2 、CO 和 HC 近零排放,但 NO_x 排放需通过 EGR 技术调控。在此基础上,该团队进一步系统研究了氢直喷与进气道喷射组合的方案,发现氢气直喷可提升缸内压力 52.04%,扭矩提升 95.53%,18% EGR 可降低 NO_x 排放 77.8%。后续该团队将研究拓展至汽油喷射压力的影响,证实汽油喷射压力提升至 14 MPa 可扩展氢气爆震极限至 16 LPM,但 CO 排放因燃油壁面附着增加 15%~20%。这一系列研究揭示了喷射方式选择的复杂性:氢气直喷在制动功率和制动热效率方面优势明显,但带来

NO_x 排放控制和爆震控制的新挑战;进气道喷射虽相对平稳,但难以充分发挥氢气潜力。未来需根据工况动态切换或组合不同喷射模式。

水喷射等辅助技术同样可用于氢气-汽油双燃料发动机,为拓展氢气-汽油双燃料技术的优化空间提供了新方向。SALEK 等^[55]将水喷射与燃烧起始正时优化相结合,在部分掺氢比例下使制动平均有效压力(BMEP)超过纯汽油机, NO_x 排放减少 59%,CO 排放降低 25%。点火系统升级则为稀燃极限的进一步拓展提供了支撑,FAN 等^[56]发现氢气耦合高能点火技术使稀燃极限扩展 66.2%,指示热效率提升 6.5%, NO_x 排放在 $\lambda>1.6$ 时显著低于化学计量比燃烧工况,该结果表明,高能点火与氢气掺混在稀燃条件下具有协同增效作用,共同支撑了超稀薄燃烧的实现。异常燃烧的主动抑制是保障高比例氢气安全运行的前提。DANG 等^[57]提出基于 ACO-BP 算法的氢发动机点火系统优化控制策略,通过不同转速与负荷条件下的实验数据训练,建立从工况到最优点火提前角的非线性映射模型,预测并动态调整点火提前角,从而有效避免早燃等异常燃烧。该研究将点火控制从传统开环标定推进到智能优化闭环层面,为氢发动机的安全运行提供了技术基础。

上述研究表明,氢气-汽油双燃料技术的优化已超越单一参数寻优的阶段,进入多技术协同的系统工程层面。水喷射、高能点火与主动控制等手段与掺氢策略、喷射策略耦合,共同构成了覆盖气路、燃烧、控制全链条的技术体系。未来研究需进一步探索辅助技术之间的协同机制,以及与工况、燃料比例的动态匹配关系。

2.3 氢气-天然气发动机

氢气-天然气双燃料燃烧技术作为清洁能源利用的重要方向,核心在于利用氢气的高火焰传播速度和宽可燃极限,弥补天然气燃烧速度慢、稀燃极限窄的固有缺陷。国内外研究围绕掺氢比例、稀燃极限、喷射策略及燃烧机理展开了持续探索,逐步形成了从基础认知到前沿创新的完整技术脉络。

早期研究系统揭示了氢气添加对天然气发动机性能的影响规律,DE SIMIO 等^[58]研究结果表明,添加氢气可显著降低 CO、 CH_4 与 CO_2 排放量,同时燃烧效率略有提升,明确了掺氢比例与排放特性及燃烧效率之间的关联。如图 12 所示,WANG 等^[59]通过实验发现,添加氢气可提升稀薄

混合气下的气缸压力峰值和热效率,稀燃极限随氢含量增加而拓宽,指示平均有效压力变异系数显著降低。在稀薄燃烧工况下,天然气易出现失火,而随着掺氢比例的增加,失火情况会减少或消失,证实氢气的高火焰速度有效弥补了天然气燃烧速度慢的缺陷,表明氢气添加能有效改善天然气燃烧稳定性。如图 13 所示,MA 等^[60]针对富氢压缩天然气发动机的研究表明,氢气的添加可以显著延长稀薄燃烧极限,产生更高的热效率,并指出稀燃条件更有利于氢气-天然气发动机排放性能。这些早期研究共同奠定了对氢气-天然气双燃料技术的基本认知:氢气通过加速燃烧、拓宽稀燃限,在提升效率的同时降低碳基排放,但 NO_x 控制需结合稀燃策略。

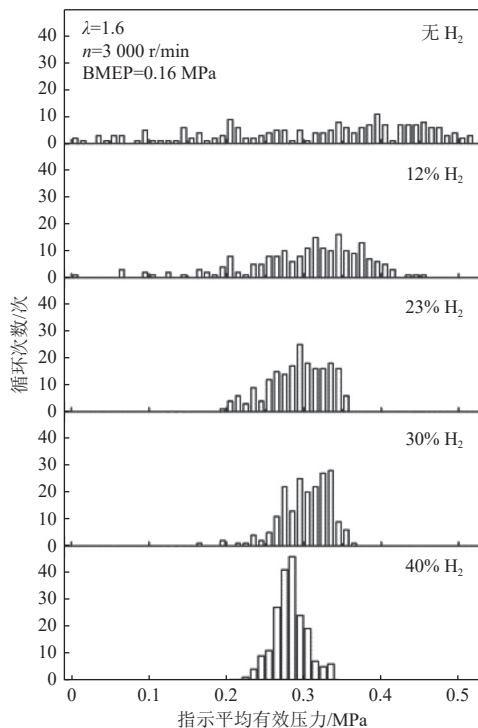


图 12 指示平均有效压力的分布^[58]

Fig. 12 Distribution of indicated mean effective pressure^[58]

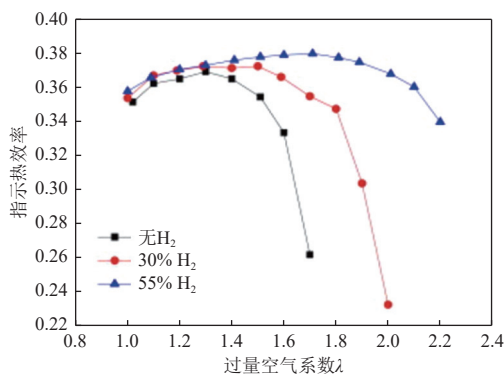


图 13 指示热效率随过量空气系数的变化^[60]

Fig. 13 Variation of indicated thermal efficiency with excess air ratio^[60]

在此基础上,近年研究开始聚焦于定量协同优化的探索。CHEN 等^[61]在高压压缩比液态甲烷发动机上,将氢能占比(HEF)提升至 50%、过量空气系数拓展至 2.4 的极端工况,系统研究了二者的交互作用。研究发现,一方面,50% 氢掺混可使 $\lambda=2.1$ 工况下的燃烧持续期延长幅度降低 56%,证实了氢气对超稀燃的支撑作用;另一方面,高氢掺混本身会带来爆震风险,50% 氢能占比、 $\lambda \leq 1.2$ 时最大压力升高率(Max PRR)超过爆震阈值,需通过稀薄燃烧加以抑制,当 λ 提高至 1.5 以上时爆震风险显著降低。该研究进一步量化了二者协同优化的最佳窗口:在 1400 r/min、50% 氢能占比、 $\lambda=1.5$ 工况下,指示热效率达 37.5%,平均指示有效压力(IMEP)较平均水平提高 5.7%, NO_x 排放浓度为 4725 mg/m^3 (标准状况,以 NO_2 计),实现了性能与排放的平衡。该具体工况为天然气发动机的低碳化运行提供了可操作的优化方向。除掺氢比例外,氢气喷射正时被证实是独立影响燃烧的关键参数。ZHANG 等^[62]在一台高压压缩比单缸机上系统研究了氢气直喷正时对天然气稀薄燃烧特性的影响。研究发现,推迟氢气喷射正时(从 -250°CA BTDC 推迟至 -100°CA BTDC)可使火焰传播速度提升约 50%,指示热效率提高 0.3%~0.9%,且最佳点火正时相应推迟。进一步分析表明,推迟喷射正时改善燃烧的机理主要来自两方面:一是进气门关闭后喷射提高了容积效率(最大增幅约 3%);二是高压射流增强了缸内湍流强度,进而加速火焰传播。该研究证实,氢气喷射正时对燃烧的影响甚至超过掺氢比例,为基于湍流调控的燃烧优化提供了新的思路。

随着研究深入,学者开始从更基础的层面理解氢气-天然气的燃烧特性,并探索热力循环层面的创新可能。刘晓佩^[63]通过贫预混旋流燃烧实验,研究了氢气-天然气混合燃料中掺氢比例对燃烧特性的影响。结果表明,随着掺氢比例的增加,层流火焰传播速度显著提高,其变化随掺氢比例不同可分为甲烷控制燃烧区(0~50%)、转变区(50%~90%)和甲烷抑制氢气燃烧区(>90%)3 个阶段。同时,由于氢气掺混降低了燃料中的碳浓度,燃烧产生的 CO_2 随氢含量增加而逐渐减少。该研究反映了氢气掺混不仅可优化甲烷的燃烧过程、提升火焰稳定性,还有助于降低燃烧过程中的最

终碳排放。在热力循环层面, NADALETI 等^[64]将氢气-甲烷双燃料与六冲程循环及水喷射技术相结合, 提出了一种新型高效低排放动力系统方案。基于 60% H₂+40% CH₄(体积分数)混合燃料的实验数据, 通过热力学模拟分析了六冲程循环的潜力。结果表明, 在过量空气系数 $\lambda=2.5$ 、水喷射量为膨胀工质质量 30% 的优化条件下, 六冲程循环的热效率较传统四冲程可提升 8%~18%。该研究揭示了热力循环创新与燃料特性协同的潜力, 为氢气-天然气双燃料技术从燃烧优化走向循环创新提供了新思路。

综上, 氢气-天然气双燃料技术的研究已从早期的定性认知, 发展到定量协同窗口的探索, 并进一步拓展至喷射正时调控、燃烧分区机理和热力循环创新等前沿领域。未来研究需在已有定量优化窗口的基础上, 进一步探索掺氢比例、喷射策略的动态匹配, 推动该技术在城市燃气动力和分布式发电等场景的规模化应用。

2.4 氢气-氨气发动机

氨作为零碳燃料, 具有储运便利、能量密度较高等优势, 氨在内燃机中的应用对实现“双碳”目标具有重要作用^[65]。然而与传统燃料相比, 火焰传播速度较慢, 点火能量较高, 单独作为发动机燃料时燃烧性能较差。目前常采用高活性助燃剂(如氢气)引燃氨气从而改善燃烧^[66], 其技术关键在于喷射正时优化、点火模式选择及压缩比匹配。

层流燃烧速度研究表明, 氢气是提升氨燃烧速度最有效的助燃剂, 效果远优于甲烷或一氧化碳^[67]。LHUILIER 等^[68]在火花点火发动机下的研究进一步补充了氢比例的临界阈值, 如图 14 所示。进气压力为 0.12 MPa 时, 掺氢比例小于 20% 可有效改善循环稳定性、避免失火, 在近化学计量比燃烧条件下指示热效率最高达 39%, 同时证实掺氢比例过高会因壁面换热损失增加导致热效率下降, 为后续实验提供了参考。

后续研究进一步探索了通过压缩比优化来降低氢耗的可行性。DINESH 等^[69]实验表明, 压缩比从 14 提升至 16、点火正时从 18°CA BTDC 提前至 28°CA BTDC 时, 制动功率可提升 36.82%, 制动热效率提升 25.11%; 21% 掺氢比例为最佳掺混比例。TUTAK^[70]进一步指出压缩比与掺氢比例之间存在替代关系, 提升压缩比可降低掺氢需求。压缩比为 8 时, 需 12% 掺氢比例才能稳定燃烧, 而压缩比为 10 时, 仅需 7% 掺氢比例, 压缩比为

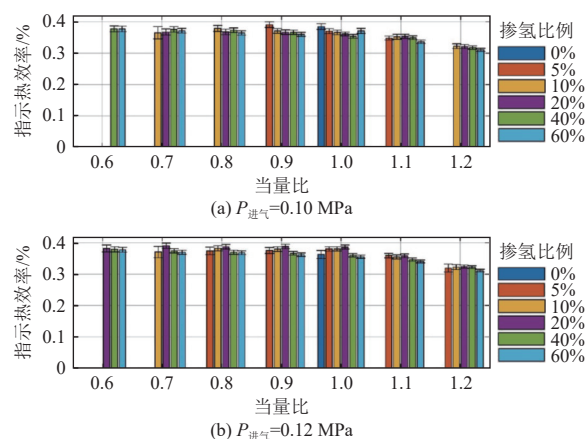


图 14 指示热效率与当量比、掺氢比例及进气压力的关系^[68]

Fig. 14 Relationship between indicated thermal efficiency, equivalence ratio, hydrogen blending ratio, and intake pressure^[68]

14 时, 甚至可实现纯氨稳定燃烧。WANG 等^[71]在单缸机上系统研究了压缩比与氨气-氢气混合燃料喷射正时(12°~24°CA BTDC)的耦合效应。研究发现推迟喷射正时虽可降低 NO_x 排放但牺牲动力性, 提高压缩比则可显著提升功率并降低燃油消耗率, 但同时导致 NO_x 和 N₂O 排放上升。这些研究共同表明, 通过优化压缩比可在较低氢耗下实现稳定燃烧, 为降低系统氢耗提供了可行路径。

除压缩比外, 燃烧模式的选择也对氢气-氨气发动机的性能产生重要影响, 尤其针对船用发动机等特殊场景。SUN 等^[72]对比了不同喷油器布置与点火模式的效果, 具体布置方案如图 15 所示, 图 (a) 和 (b) 分别为氢气-氨气阀近距离

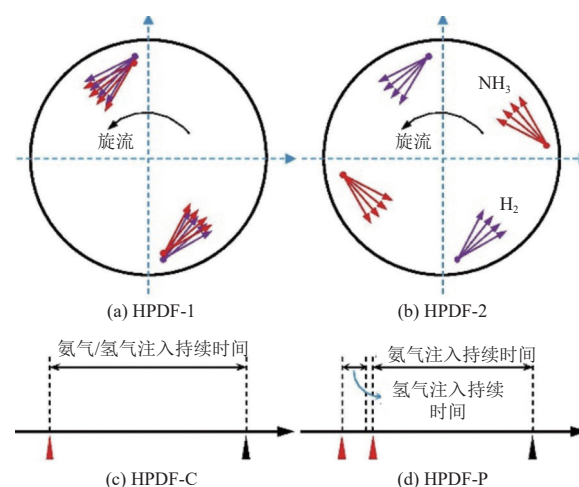


图 15 HPDF 模式下氨气和氢气气阀的布置和点火^[72]
Fig. 15 Valve layout and ignition strategy for ammonia and hydrogen in hydrogen-piloted dual-fuel mode^[72]

(HPDF-1)与远距离(HPDF-2)2种布置方案,图(c)和图(d)分别为氢气、氨气同时喷射压燃(C模式)与氢气先喷引燃氨(P模式)2种点火模式下的喷射相位。研究发现氢引燃氨较氢氨混合压燃模式的指示功率提升,但 NO_x 增加,而氢氨混合压燃模式在低 NO_x 需求场景下更具优势。该研究明确了气阀布局与点火模式的匹配关系,为船机等大负荷动力装置的燃烧系统设计提供了参考。

近年来,先进点火技术的引入和负荷控制策略为氢气-氨气发动机的性能突破提供了新路径。预燃室射流点火和主动式射流点火等技术可有效解决氨燃烧惰性问题,为氢气-氨气发动机提供了新的优化方向。QIANG等^[73]在米勒循环发动机上,采用被动式预燃室射流点火,对比研究了纯氢与10%(体积分)氨掺混2种燃料在不同进气歧管绝对压力(MAP)下的燃烧特性。结果表明,预燃室射流点火可有效解决氨掺混带来的燃烧劣化问题。10%氨掺混对火焰发展期影响甚微,但值得注意的是,受益于氨的高汽化潜热和低绝热火焰温度带来的热损失降低,10%氨掺混发动机在全负荷工况下制动热效率达40.25%,高于纯氢发动机的39.83%,证实了适量氨掺混在预燃室射流点火条件下可兼顾爆震抑制与热效率提升。WANG等^[74]进一步引入氢气主动式射流点火(AHJI)系统与多次喷射策略,具体结构如图16所示。射流室内氢气被火花塞点燃后形成高温射流,通过喷射孔进入主燃烧室引燃氨气-空气混合气。结果表明,主动式射流点火可显著降低氢耗,被动式预燃室模式下稳定运行需15%氢能掺混,而主动式射流点火在7.5%氢能掺混、过量空气系数1.74的超稀薄工况下仍可稳定燃烧,循环变动

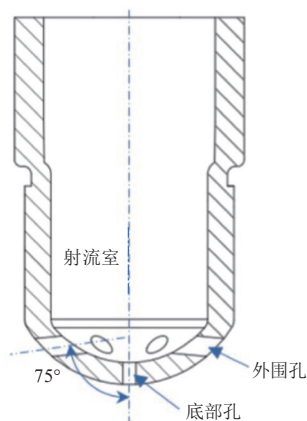


图16 喷气点火燃烧系统^[74]

Fig. 16 Jet ignition combustion system^[74]

系数(Coefficient of Variation, COV)小于2%。结合氢气多次喷射策略优化,3次喷射在氢能占比仅2.9%的条件下实现42.5%的指示热效率,显著降低了系统氢耗。该研究充分证明了主动式射流点火与多次喷射策略在降低氢耗、提升热效率方面的巨大潜力,为氢气-氨气发动机从实验室走向工程应用提供了关键技术支撑。在负荷控制层面,HONG等^[75]系统对比了4种负荷控制策略的适用性,发现改变空燃比与可变气门正时(Variable Valve Timing, VVT)策略兼顾了负荷调节范围与热效率保持能力,是氢气-氨气双燃料发动机较优的负荷控制方式。

综上,氢气-氨气双燃料技术的研究已从氢助燃的基础认知,深入到压缩比匹配、燃烧模式选择、先进点火技术等工程优化层面。凭借氨气的易储运特性与氢气的高反应活性互补,该技术在船用动力、固定发电等场景展现出应用潜力。未来需围绕低温启动、未燃氨排放控制等问题,结合预燃室点火、多点点火等先进技术,进一步提升系统效率与可靠性。

3 结 论

(1)氢双燃料技术的核心在于利用氢气的高反应活性弥补主燃料的燃烧缺陷,实现燃烧过程的主动调控。在氢气-柴油发动机中,氢气通过优化柴油喷雾的预混合燃烧提升热效率,但 NO_x 与soot的平衡控制需依赖EGR、水喷射及喷射策略的协同优化;在氢气-汽油发动机中,氢气拓宽稀燃极限、改善冷启动性能;在氢气-天然气发动机中,氢气加速火焰传播、拓展稀燃极限,喷射正时被证实具有独立于掺氢比例的影响;在氢气-氨气发动机中,氢气作为最有效的氨燃烧助燃剂,压缩比提升可显著降低氢耗。

(2)上述技术路径面临共性的核心挑战。氢气的高活性在提升燃烧效率的同时,普遍加剧了热力型 NO_x 的生成,尤其在中等及以上负荷时更为突出。氢气的宽可燃极限和低点火能量带来回火、早燃、爆震等异常燃烧风险。此外,储运安全、系统成本、材料氢脆等工程问题仍是规模化应用的重要制约。

(3)当前研究的核心在于实现掺氢比例、喷射策略、点火参数与辅助技术之间的多目标优化匹配。废气再循环与水喷射虽能有效抑制氮氧化物生成,但需防止其引发碳烟排放恶化或热效率损

失;喷射策略的优化则实现了混合气分布由被动响应向主动设计的转变,推动燃烧控制从“掺氢比例”的宏观调配走向“喷射正时与喷射位置”的微观定向调控。预燃室射流点火等新型点火技术的引入进一步丰富了调控维度,多参数协同优化已成为该领域的共识方向。

(4)氢气掺混使稀薄燃烧、低温燃烧等先进模式更易实现,而直喷技术、智能控制的发展也推动了氢双燃料技术的进步。不同燃料组合精准对应了不同场景的差异化需求:氢气-柴油适配重载运输对功率密度的要求,氢气-汽油面向乘用车对冷启动和稀燃的挑战,氢气-天然气依托成熟基础设施服务城市燃气动力,氢气-氨气则凭借储运优势瞄准船用脱碳。这种场景定制化的技术谱系,在多元化的双碳进程中具有重要战略意义。

未来,针对异常燃烧防控,需结合不同燃料组合的燃烧特性,重点通过喷射与点火策略优化、缸内混合气分布调控等方面完成源头防控设计,同时建立异常燃烧的实时识别与动态调控方法,兼顾燃烧效率、排放控制与运行可靠性;针对储运安全,需推动氨、有机液态储氢等常温常压氢载体技术攻关。在此基础上,掺氢发动机技术需从静态走向动态协同,进一步完成掺氢比例与全工况的动态匹配优化、构建多污染物协同减排方案,推动绿氢产业链成熟与全生命周期碳排放管控,促进该技术在重载交通、船舶航运、固定发电等场景的规模化应用。

参考文献 (References):

- [1] Jiang Peng, Sonne C, You Siming. Dynamic carbon-neutrality assessment needed to tackle the impacts of global crises[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(14): 9851–9853.
- [2] Shao Tianming, Peng Tianduo, Zhu Lijing, et al. China's transportation decarbonization in the context of carbon neutrality: A segment-mode analysis using integrated modelling[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 105: 107392.
- [3] Onorati A, Payri R, Vaglieco B M, et al. The role of hydrogen for future internal combustion engines[J]. *International Journal of Engine Research*, 2022, 23(4): 529–540.
- [4] Zhang Zhiqing, Song Zihao, Wang Yuguo, et al. A comprehensive review of hydrogen production technology and the performance, combustion, and emissions of hydrogen-fueled internal combustion engines[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2025, 122: 102229.
- [5] 徐江荣, 宋奥, 洪佳璇, 等. 低碳背景下氢应用现状与前景展望 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37(1): 65–73.
- [6] Xu Jiangrong, Song Ao, Hong Jiaxuan, et al. Application status and prospect of hydrogen under low carbon background[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(1): 65–73.
- [7] Hren R, Vujanović A, Van Fan Y, et al. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113113.
- [8] 帅石金, 马骁, 李雁飞, 等. 氢内燃机产业化关键技术研究现状 & 展望 [J]. *内燃机工程*, 2025, 46(4): 108–120+128.
- [9] Shuai Shijin, Ma Xiao, Li Yanfei, et al. State of the art and outlook for the key technologies of hydrogen internal combustion engines[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2025, 46(4): 108–120+128.
- [10] Fumey B, Buetler T, Vogt U F. Ultra-low NO_x emissions from catalytic hydrogen combustion[J]. *Applied Energy*, 2018, 213: 334–342.
- [11] Bhagat R N, Sahu K B, Ghadai S K, et al. A review of performance and emissions of diesel engine operating on dual fuel mode with hydrogen as gaseous fuel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(70): 27394–27407.
- [12] Bakar R A, Widudo, Kadrigama K, et al. Experimental analysis on the performance, combustion/emission characteristics of a DI diesel engine using hydrogen in dual fuel mode[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52: 843–860.
- [13] Stebar R F, Parks F B. Emission control with lean operation using hydrogen-supplemented fuel[J]. *SAE Technical Paper Series*, 1974, 1: 740187.
- [14] Zou Caineng, Li Jianming, Zhang Xi, et al. Industrial status, technological progress, challenges, and prospects of hydrogen energy[J]. *Natural Gas Industry B*, 2022, 9(5): 427–447.
- [15] 李星国. 氢燃烧特性对氢内燃机性能的影响 [J]. *自然杂志*, 2023, 45(1): 57–67.
- [16] Li Xingguo. Effect of hydrogen combustion characteristics on the performance of hydrogen internal combustion engine[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2023, 45(1): 57–67.
- [17] Sun Ping, Liu Ze, Yu Xiumin, et al. Experimental study on heat and exergy balance of a dual-fuel combined injection engine with hydrogen and gasoline[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(39): 22301–22315.
- [18] Tornatore C, Sementa P, Catapano F. Ammonia-hydrogen dual-fuel combustion: Strategies for optimizing performance and reducing emissions in internal combustion engines[J]. *Energies*, 2025, 18(12): 3159.
- [19] Kurien C, Mittal M. Review on the production and utilization of green ammonia as an alternate fuel in dual-fuel

- compression ignition engines[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 251: 114990.
- [17] Wróbel K, Wróbel J, Tokarz W, et al. Hydrogen internal combustion engine vehicles: A review[J]. *Energies*, 2022, 15(23): 8937.
- [18] Stępień Z. A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges[J]. *Energies*, 2021, 14(20): 6504.
- [19] Rueda-Vázquez J M, Serrano J, Pinzi S, et al. A review of the use of hydrogen in compression ignition engines with dual-fuel technology and techniques for reducing NO_x emissions[J]. *Sustainability*, 2024, 16(8): 3462.
- [20] Karimi M, Wang Xiaolin, Hamilton J, et al. Status, challenges and opportunities of dual fuel hybrid approaches-a review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(70): 34924–34957.
- [21] Tsujimura T, Suzuki Y. The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 14019–14029.
- [22] 刘梦莹, 熊栋, 黄河峡, 等. 跨介质动力系统方案发展现状 & 关键技术分析 [J]. *海军航空大学学报*, 2025, 40(3): 370+383–394+472.
- Liu Mengying, Xiong Li, Huang Hexia, et al. Program development status and key technology analysis of trans-media power system[J]. *Journal of Naval Aviation University*, 2025, 40(3): 370+383–394+472.
- [23] Hosseini S H, Tsolakis A, Alagumalai A, et al. Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023, 98: 101100.
- [24] Menaa A, Lounici M S, Amrouche F, et al. CFD analysis of hydrogen injection pressure and valve profile law effects on backfire and pre-ignition phenomena in hydrogen-diesel dual fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(18): 9408–9422.
- [25] Fu Zhen, Li Yuhuai, Chen Hong, et al. Effect of hydrogen blending on the combustion performance of a gasoline direct injection engine[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(15): 13022–13030.
- [26] Krishnamoorthi M, Malayalamurthi R, He Zhixia, et al. A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116: 109404.
- [27] Köse H, Ciniviz M. An experimental investigation of effect on diesel engine performance and exhaust emissions of addition at dual fuel mode of hydrogen[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 114: 26–34.
- [28] Jamrozik A, Grab Rogaliński K, Tutak W. Hydrogen effects on combustion stability, performance and emission of diesel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(38): 19936–19947.
- [29] Nag S, Sharma P, Gupta A, et al. Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(23): 12163–12175.
- [30] Dhole A E, Yarasu R B, Lata D B, et al. Effect on performance and emissions of a dual fuel diesel engine using hydrogen and producer gas as secondary fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(15): 8087–8097.
- [31] Lilik G K, Zhang Hedan, Herreros J M, et al. Hydrogen assisted diesel combustion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(9): 4382–4398.
- [32] Li Zhipeng, Liu Junheng, Ji Qian, et al. Influence of hydrogen fraction and injection timing on in-cylinder combustion and emission characteristics of hydrogen-diesel dual-fuel engine[J]. *Fuel Processing Technology*, 2023, 252: 107990.
- [33] Santoso W B, Bakar R A, Nur A. Combustion characteristics of diesel-hydrogen dual fuel engine at low load[J]. *Energy Procedia*, 2013, 32: 3–10.
- [34] Dimitriou P, Kumar M, Tsujimura T, et al. Combustion and emission characteristics of a hydrogen-diesel dual-fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(29): 13605–13617.
- [35] Zhou J H, Cheung C S, Zhao W Z, et al. Diesel–hydrogen dual-fuel combustion and its impact on unregulated gaseous emissions and particulate emissions under different engine loads and engine speeds[J]. *Energy*, 2016, 94: 110–123.
- [36] Suzuki Y, Tsujimura T, Mita T. The performance of multi-cylinder hydrogen/diesel dual fuel engine[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2015, 8(5): 2240–2252.
- [37] Subramanian B, Thangavel V. Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of diesel-hydrogen and diesel-HHO gas in a dual fuel CI engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(46): 25479–25492.
- [38] 刘少华, 刘晓乐, 申立中, 等. EGR 对氢气/柴油双燃料发动机燃烧与排放的影响 [J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 50(1): 106–115.
- Liu Shaohua, Liu Xiaole, Shen Lizhong, et al. Effects of EGR on combustion and emissions in hydrogen/diesel dual-fuel engines[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2025, 50(1): 106–115.
- [39] Sharkey A, Zare A. The impact of water injection and hydrogen fuel on performance and emissions in a hydrogen/diesel dual-fuel engine[J]. *Energies*, 2024, 17(23): 5838.
- [40] 董浩川. 氢气-柴油双燃料发动机的燃烧特性与机理研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023: 68–69.
- Dong Haochuan. Development of a chemical mechanism and study on the combustion characteristics of a hydrogen/diesel dual fuel engine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023: 68–69.
- [41] 刘少华, 黄楚溪, 毕玉华, 等. 高原缺氧环境下柴油主喷

- 正时对氢气/柴油双燃料发动机燃烧与排放的影响 [J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 49(3): 179–187.
- Liu Shaohua, Huang Chuxi, Bi Yuhua, et al. Effects of diesel main injection timing on combustion and emission of hydrogen/diesel dual-fuel engine under highland hypoxia environment[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 49(3): 179–187.
- [42] Liu Xinyu, Srna A, Yip H L, et al. Performance and emissions of hydrogen-diesel dual direct injection (H2DDI) in a single-cylinder compression-ignition engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(1): 1302–1314.
- [43] Ji Changwei, Wang Shuofeng, Zhang Bo. Combustion and emissions characteristics of a hybrid hydrogen-gasoline engine under various loads and lean conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(11) : 5714–5722.
- [44] Ji Changwei, Wang Shuofeng, Zhang Bo. Performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine under various operating conditions[J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 584–589.
- [45] Ji Changwei, Wang Shuofeng. Experimental study on combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at lean burn limits[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(3): 1453–1462.
- [46] Shivaprasad K V, Raviteja S, Chitragar P, et al. Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on combustion performance and emissions characteristics of a spark ignition high speed gasoline engine[J]. *Procedia Technology*, 2014, 14: 141–148.
- [47] Elsemary I M M, Attia A A A, Elnagar K H, et al. Experimental investigation on performance of single cylinder spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline mixture[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 850–854.
- [48] Yu Xiumin, Li Decheng, Sun Ping, et al. Energy and exergy analysis of a combined injection engine using gasoline port injection coupled with gasoline or hydrogen direct injection under lean-burn conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(11): 8253–8268.
- [49] 冀相斌. 氢气/汽油双燃料发动机冷启动试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015: 56–57.
- Ji Xiangbin. Study on experiment of cold-start in hydrogen-gasoline ignition engine[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 56–57.
- [50] Wu Haiming, Yu Xiumin, Du Yaodong, et al. Study on cold start characteristics of dual fuel SI engine with hydrogen direct-injection[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 829–839.
- [51] Li Guanting, Yu Xiumin, Shi Weibo, et al. Effects of split injection proportion and the second injection timings on the combustion and emissions of a dual fuel SI engine with split hydrogen direct injection[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(21): 11194–11204.
- [52] Purayil S T P, Hamdan M O, Al Omari S A B, et al. Review of hydrogen-gasoline SI dual fuel engines: Engine performance and emission[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 4547–4573.
- [53] Purayil S T P, Al Omari S, Elnajjar E. Effect of hydrogen blending on the combustion performance, emission, and cycle-to-cycle variation characteristics of a single-cylinder GDI spark ignition dual-fuel engine[J]. *International Journal of Thermofluids*, 2023, 20: 100403.
- [54] Purayil S T P, Al Omari S A B, Elnajjar E. Experimental investigation on the influence of gasoline injection pressure on the hydrogen knock limit and performance of a hydrogen-gasoline dual fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 81: 1385–1393.
- [55] Salek F, Babaie M, Hosseini S V, et al. Multi-objective optimization of the engine performance and emissions for a hydrogen/gasoline dual-fuel engine equipped with the port water injection system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(17): 10535–10547.
- [56] Fan Guangtao, Zheng Zhaolei, Li Lezhen. Effect of hydrogen injection coupled with high-energy ignition on the combustion stability of a lean-burn gasoline engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 602–620.
- [57] Dang Jinjin, Wang Lijun. Optimization control of hydrogen engine ignition system based on ACO-BP[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(78) : 38903–38912.
- [58] De Simio L, Iannaccone S, Guido C, et al. Natural gas/hydrogen blends for heavy-duty spark ignition engines: Performance and emissions analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50: 743–757.
- [59] Wang Jinhua, Chen Hao, Liu Bing, et al. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(18): 4876–4883.
- [60] Ma Fanhua, Wang Mingyue, Jiang Long, et al. Performance and emission characteristics of a turbocharged spark-ignition hydrogen-enriched compressed natural gas engine under wide open throttle operating conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(22) : 12502–12509.
- [61] Chen Peichen, Wu Chenghao, Zhou Feng, et al. Effects of ultra-lean combustion coupled with high-hydrogen blending on combustion, thermodynamics and emissions in a high-compression-ratio liquid methane engine[J]. *Energy*, 2025, 339: 139013.
- [62] Zhang Ren, Chen Lin, Wei Haiqiao, et al. Optical study on the effects of the hydrogen injection timing on lean combustion characteristics using a natural gas/hydrogen dual-fuel injected spark-ignition engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(39): 20777–20789.
- [63] 刘晓佩. 氢气/天然气混合燃料贫预混旋流燃烧特性研究

- [D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016: 14–15.
- Liu Xiaopei. Investigation on the combustion characteristics of hydrogen/natural gas hybrid fuel of lean-premixed swirl flame[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 14–15.
- [64] Nadaleti W C, Przybyla G, Szczygieł I. Thermodynamic simulation of an innovative six-stroke hydrogen-methane dual-fuel engine based on experimentally derived combustion parameters—Part A: Fostering Brazil's energy transition[J]. *Energy Conversion and Management*, 2026, 349: 120808.
- [65] 潘耕龙, 丁颖, 卢安, 等. 可变气门正时对汽油-氨双燃料发动机燃烧与排放特性的影响 [J]. *能源环境保护*, 2025, 39(5): 134–142.
- Pan Genglong, Ding Ying, Lu An, et al. Effects of variable valve timing on combustion and emission characteristics of gasoline/ammonia dual-fuel engines[J]. *Energy Environmental Protection*, 2025, 39(5): 134–142.
- [66] 周镇港, 伍致承, 柳伟杰, 等. 船舶碳减排关键技术与应用研究进展 [J]. *能源环境保护*, 2025, 39(5): 1–16.
- Zhou Zhengang, Wu Zhicheng, Liu Weijie, et al. Advances in key technologies and applications for ship carbon emission reduction[J]. *Energy Environmental Protection*, 2025, 39(5): 1–16.
- [67] Han Xinlu, Wang Zhihua, Costa M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH_3/air , $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{air}$, $\text{NH}_3/\text{CO}/\text{air}$ and $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$ premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 206: 214–226.
- [68] Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions[J]. *Fuel*, 2020, 269: 117448.
- [69] Dinesh M H, Kumar G N. Experimental investigation of variable compression ratio and ignition timing effects on performance, combustion, and Nox emission of an ammonia/hydrogen-fuelled Si engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(90): 35139–35152.
- [70] Tutak W. Co-combustion of ammonia and hydrogen in spark ignition engines—State-of-the-art and challenges[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 80: 188–205.
- [71] Wang Binbin, Yang Chuanlei, Wang Hechun, et al. Study on injection strategy of ammonia/hydrogen dual fuel engine under different compression ratios[J]. *Fuel*, 2023, 334: 126666.
- [72] Sun Xiuxiu, Jiang Yichen, Zhao Peixin, et al. Effect of ammonia/hydrogen blending and injection modes on combustion emission and performance of marine engine[J]. *Fuel*, 2024, 371: 131894.
- [73] Qiang Yanfei, Ma Dandan, Wu Ziyue, et al. Application exploration of pre-chamber jet ignition system in load control of hydrogen engines and hydrogen-ammonia dual-fuel engines[J]. *Fuel*, 2025, 400: 135807.
- [74] Wang Zhi, Qi Yunliang, Sun Qiyang, et al. Ammonia combustion using hydrogen jet ignition (AHJI) in internal combustion engines[J]. *Energy*, 2024, 291: 130407.
- [75] Hong Chen, Ji Changwei, Wang Shuofeng, et al. An experimental study of various load control strategies for an ammonia/hydrogen dual-fuel engine with the Miller cycle[J]. *Fuel Processing Technology*, 2023, 247: 107780.