

轻型氢内燃机关键技术研究进展综述

吕阳¹, 锥晶¹, 葛晓成³, 胡发跃³, 康哲^{1,2,*}

(1. 重庆大学, 机械与运载工程学院, 重庆, 400044 ; 2. 重庆大学, 机械传动国家重点实验室, 重庆, 400044; 3. 重庆凯瑞动力科技有限公司, 重庆, 401122)

摘要: 氢能被公认为是实现零碳排放最具潜力的理想能源, 是实现“双碳”目标的重要技术方案。当前, 氢内燃机与氢燃料电池相比具有续航里程长、燃料适应性好、成本低等诸多优势, 并且可利用现有内燃机成熟产业链。因此, 氢内燃机是短期实现零碳排放最可行的技术方案之一。首先分析了氢气的物理化学特性, 以及对近年来国内外氢内燃机样机的技术特点进行了对比, 还通过整理国内外氢内燃机的相关研究进展, 对其技术发展趋势进行了总结。

关键词: 氢气; 内燃机; 关键技术; 研究进展

中图分类号: TK46+3 **文献标识码:** A

A Brief Review of Research Progress on Key Technologies of Light Duty Hydrogen Internal Combustion Engine

Lv Yang¹, Luo Jing¹, Ge Xiaocheng³, Hu Fayue, Kang Zhe^{1,2,*}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044; 3. Chongqing CAERI Power Technology Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract : Hydrogen energy is widely recognized as an ideal energy source with the most potential for achieving zero carbon emissions and is regarded as an important technical solution for accomplishing the "dual carbon" goal. In comparison with hydrogen fuel cells, hydrogen internal combustion engines possess numerous advantages, including long driving range, good fuel adaptability, and low cost. Additionally, the mature industry chain of existing engines can be utilized. Therefore, one of the most feasible technical solutions for achieving zero carbon emissions in the short term is hydrogen internal combustion engines. In this article, the physical and chemical properties of hydrogen gas are analyzed first, and the technical characteristics of hydrogen internal combustion engine prototypes at home and abroad in recent years are compared. The relevant domestic and abroad research progress of hydrogen internal combustion engines is summarized, and the development trend of hydrogen internal combustion engine technology is concluded.

Keywords : hydrogen, internal combustion engine, key technologies, research progress

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(No.CSTB2022TIAD-KPX0044); 中央高校基本科研业务费专项 (No.2022CDJDX-004、2022CDJXY-006)

引言

2020年9月22日，中国在第七十五届联合国大会中提出二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。双碳战略的提出对我国能源高效利用提出了更高的要求，其中交通运输业所产生的二氧化碳排放约占在我国二氧化碳总排放的10%。因此，寻找一种低碳绿色可再生能源对于我国实现双碳目标具有重要意义。氢燃料作为一种零碳燃料满足我国现阶段交通运输业对替代燃料的需求。

目前，氢燃料将化学能转化为可以直接使用的机械能或电能的方式主要有两种，一种是氢燃料电池系统，另一种是氢内燃机系统。氢燃料电池系统具有效率高和无尾气排放的优点，但其有耐久性较低、瞬态响应性较差及制造成本高^[1-4]等问题。与氢燃料电池相比氢内燃机在可靠性和经济性以及对氢气纯度要求等方面都具有一定的优势。同时，氢内燃机还可以应用现有的产业链与供应链资源^[5]，使氢内燃机具备短期内实现产业化利用的零碳排放车用动力总成技术方案，以支撑我国实现3060双碳目标。

鉴于氢气在内燃机中作为可再生和清洁能源的重要性。本文首先介绍了氢气的物理化学特性，其次列举了近年来国内外主要研究机构所开发的氢内燃机样机、参数、关键技术及其重要试验结论等研究进展，最后通过分析上述理论与试验研究结论，对未来氢内燃机的技术发展趋势进行了展望。

1. 氢气物理化学特性分析

1.1 可燃性极限广泛

表1 氢的性质与甲烷和异辛烷性质的比较(300K,1atm)^[1-4]

Tab.1 Comparison of the properties of hydrogen with those of methane and isoctane (300 K, 1 atm)

属性	氢气	甲烷	异辛烷
摩尔质量/g/mol	2.016	16.043	114.236
密度/kg/m ³	0.08	0.65	692
空气中的质量扩散率/cm ² /s	0.61	0.16	~0.07
最小点火能量/mJ	0.02	0.28	0.28
最小淬熄距离/mm	0.64	2.03	3.5
空气中的可燃性极限/vol%	4-75	5-15	1.1-6
可燃性限制(λ)	10-0.14	2-0.6	1.51-0.26
可燃性限制(ϕ)	0.1-7.1	0.5-1.67	0.66-3.85
低热值/MJ/kg	120	50	44.3
在空气中自燃温度/K	858	723	550
火焰速度/ms ⁻¹	1.85	0.38	0.37-0.43

可燃性极限定义了燃料与空气混合后形成可燃气体所需要达到的比例。从表1可以看出，氢气在空气中的可燃性极限为4~75%，与甲烷(5-15%)和异辛烷(1.1-6%)相比，氢气的可燃性范围很宽^[6]。这一特性使得氢内燃机可以在极其稀薄的工况下燃烧，从而实现更高循环效率、更优燃烧经济性等突出优势^[8]。然而，在稀燃工况下，需要重点考量氮氧化物(NO_x)的生成。从表2中还可以看出，稀薄工况与标准工况相比层流火焰速度降低为12cm/s(标准工况为290cm/s)，导致其燃烧温度降低。这有助于减少NO_x等排放污染物的数量^[9]。

1.2 最小点火能量低

最小点火能量是指点燃可燃混合气所需的最小能量。在常温常压下，氢-空混合气的最小点火能量比异辛烷-空气和甲烷-空气的最小点火能量低一个数量级，并且氢气浓度在10%-50%之间最小点火能量趋于稳定。最小点火能量低有助于氢内燃机在稀薄工况下保持稳定的工作状态^[10]。但是，氢-空混合气最小点火能量较低也导致燃烧室中的混合气极易被其他高温来源(如缸内热点等)点燃，因此，其存在较高的早燃风险^[11]。

1.3 淬熄距离小

从表1中可得，氢气的淬熄距离约为0.64mm，与其相比甲烷和异辛烷分别是2.03mm和3.5mm，可以看出氢气的淬熄距离较小。淬熄距离是衡量氢气火焰在熄灭之前能够接近气缸壁的程度。随着淬熄距离减小，回火趋势将随之增大。

高热值/MJ/kg	142	55.5	47.8
化学计量空燃比/kg/kg	34.2	17.1	15.0
化学计量空燃比/kmol/kmol	2.387	9.547	59.666

1.4 自燃温度高

从表 1 中还可以看出, 氢气与甲烷和异辛烷相比, 其自燃温度较高为 858K。自燃温度是影响内燃机压缩比设计的重要参数, 因为在压缩过程中, 考虑奥托循环的温升与压缩比关系, 如下式(1)所示。

$$T_2 = T_1(r^c)^{k-1} \quad (1)$$

式中: T_1 为进气温度 (K); T_2 为压缩终了温度 (K); r^c 为压缩比; k 为绝热指数。

由此式可以看出, 压缩比和 T_2 呈正相关关系。同时, 为了规避爆燃燃烧, T_2 的高低主要受限于燃料的自燃温度。因此, 燃料的自燃温度越高, 即允许的 T_2 越高, 许用压缩比越高, 较高的压缩比对提高循环热效率具

有重要意义^[12]。

1.5 火焰速度快, 扩散率高, 密度小

如表 2 所示, 氢气的火焰速度 (约为 1.85ms^{-1}) 与甲烷 (约为 0.38ms^{-1}) 和异辛烷 (约 $0.37 \sim 0.43\text{ms}^{-1}$) 相比较。因此, 氢气具有更快燃烧速度, 从而在工作过程中实现较高的等容度。但是, 在稀薄工况中氢气的火焰速度会明显下降^[10]。同时, 氢气也具有非常高的扩散率, 这意味着氢气比甲烷和异辛烷更容易在空气中扩散, 该特性决定氢气可以和空气更快的形成均匀的混合物。此外, 氢气密度低会导致氢内燃机需要更大的氢气储存罐, 以提供足够的行驶里程并改善输出功率^[13]。

表 2 氢-空气, 甲烷-空气和异辛烷-空气的混合物性质(300K, 1atm)[14]

Tab.2 Properties of hydrogen-air, methane-air and isoctane-air mixtures (300 K, 1 atm)

属性	H2-air	H2-air	CH4-air	C8H18-air
	$\lambda = 1$	$\lambda = 4$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$
	$\varphi = 1$	$\varphi = 0.25$	$\varphi = 1$	$\varphi = 1$
燃料体积分数/%	29.5	9.5	9.5	1.65
混合物密度/kg/m ³	0.850	1.068	1.123	1.229
运动粘度/mm ² /s	21.6	17.4	16	15.2
自燃温度/K	858	>858	813	690
绝热火焰温度/K	2390	1061	2226	2276
导热系数/10 ⁻² W/mK	4.97	3.17	2.42	2.36
热扩散率/mm ² /s	42.1	26.8	20.1	18.3
比热比	1.401	1.400	1.354	1.389
燃烧速度/m/s	408.6	364.3	353.9	334.0
空燃比/kg/kg	34.2	136.6	17.1	15.1
燃烧前后的摩尔比	0.86	0.95	1.01	1.07
层流燃烧速度, ~360K/cm/s	290	12	48	45
重量能量含量/kJ/kg	3758	959	3028	3013
体积能量含量/kJ/m ³	3189	1024	3041	3704

2. 氢内燃机试验研究与进展分析

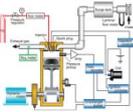
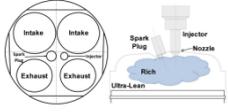
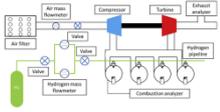
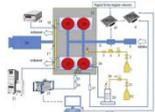
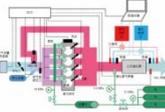
2.1 氢内燃机研究进展汇总

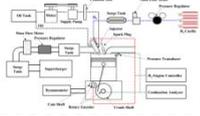
氢内燃机的发展至今已有百年历史, 最早在 1820 年 Rev. W. Cecil^[14]就报道了氢内燃机的相关尝试, 在此后两百年左右的时间里, 陆陆续续有相关学者和机构对氢内燃机进行探索。由于全球气候变暖以及能源安全

等原因, 氢内燃机的研究在近十几年迎来了爆发性增长, 表 3 总结了国内外机构开发的轻型氢内燃机机型和技术特点, 从中我们可以发现轻型氢内燃机的技术发展趋势主要有稀薄燃烧、增压、废弃在循环(Exhaust Gas Recirculation, EGR)、高压压缩、缸内直喷以及喷水。

表 3 轻型氢内燃机样机参数及应用技术

Tabl.3 Parameters of the lightweight hydrogen internal combustion engine prototype and applied technologies

序号	研究机构	年份	参数	技术特点	性能指标	样机及系统示意图
1	福特科学研究实验室 ^[16]	2003	四缸 2.0L	变压缩比+增压+EGR	最高有效热效率 37%	
2	宝马汽车公司 ^[17]	2004	单缸 0.5L	合适点火、压缩比 12	有效热效率 30%	
3	丰田汽车公司 ^[18]	2006	单缸 0.85L	优化喷射相位	最高有效热效率 38.9%	
4	丰田汽车公司 ^[19]	2010	四缸 2.2L	分层扩散燃烧+ EGR+高压缩比 (15.0~15.8)	有效热效率 43.8%	/
5	长安汽车 ^[20]	2011	四缸 2.0L	稀薄燃烧	/	/
6	美国阿贡国家实验室 ^[21]	2012	单缸 0.66L	喷嘴 CFD 优化+压缩比 12.9+机械增压	最高有效热效率 45%	
7	日本可持续能源研究中心 ^[22]	2019	单缸 1.3L	EGR+压缩比 12.9+机械增压	指示热效率 50%	/
8	北京理工大学 ^[23]	2019	四缸 2.3L	涡轮增压	/	
9	博世公司 ^[24]	2020	四缸 2.0L	涡轮增压+稀薄燃烧	有效热效率 39%	/
10	北京工业大学 ^[25]	2020	四缸 1.6L	缸内喷水	指示热效率 27.7%	
11	北京理工大学 ^[26]	2021	四缸 2.0L	稀薄燃烧+优化喷射相位	最高指示热效率 39%	

12	一汽	2021	四缸 2.0L	/	有效热效率 42%	
13	长城	2021	四缸 2.0L	稀薄燃烧+高压直喷+增压+高压耐腐蚀氢气供给系统	有效热效率 42%	
14	苏拉特卡尔国家理工学院 ^[27]	2022	单缸 0.667L	稀薄燃烧+直喷+增压+分层燃烧+可变压缩比 8~15	最高指示热效率接近 50%	
15	吉利	2022	/	/	有效热效率 44%	
16	广汽集团	2022	四缸 1.5L	/	有效热效率 44%	
17	北汽	2022	四缸 1.5L	增压+高压直喷	有效热效率 43%	

2.2 氢内燃机技术试验研究及发展现状

氢内燃机目前的研究工作主要集中在热效率与动力性以及改善 NO_x 排放等方向。国内外学者针对上述问题开展了很多研究工作。下文对近年来氢内燃机的相关主要研究进展进行了分析。

2.2.1 稀薄燃烧

东京都市大学 Yasuo Takagi 等人^[28]试验研究了分层燃烧中喷射正时对氢内燃机高

效和 NO_x 排放的影响,相关试验结果如图 1 所示。在稀薄和低负荷工况下与均匀混合气未延迟喷射的燃烧相比,延迟喷射明显减少未燃烧氢气排放的形成并大幅提高热效率,并且在稀薄燃烧工况下该效应更为明显。如图 2 所示,在较为稀薄的条件下,喷射正时对氢内燃机 NO_x 排放的影响较小。综上,为了降低未燃氢气和 NO_x 排放,采用延迟喷射和稀薄燃烧是一种可行策略。

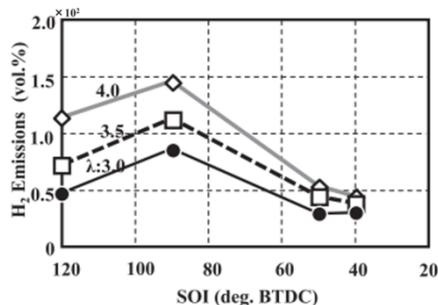


图 1 喷射正时对未燃 H₂ 的影响^[28]

Fig. 1 Effect of injection timing on unburned H₂

韩国机械材料研究所的 Yongrae Kim^[29]基于一台 2.0L 四缸火花点火、压缩比 14 的氢内燃机,试验研究了过量空气系数对其性能、效率的影响规律。试验数据如图 3 所示,

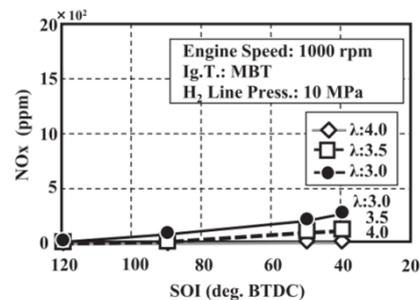


图 2 喷射正时对 NO_x 排放的影响^[28]

Fig. 2 Effect of injection timing on NO_x emission 在过量空气系数为 2.0 时,可实现 39.6% 的最高有效热效率。此外,当过量空气系数由 1.4 变为 2.0 时,热损失逐步降低至最大值的三分之一(如图 4 所示)。同时,在稀混合

气条件下，最大缸内温度从 2059 降低到 1711K。因此，稀薄燃烧在较高过量空气系

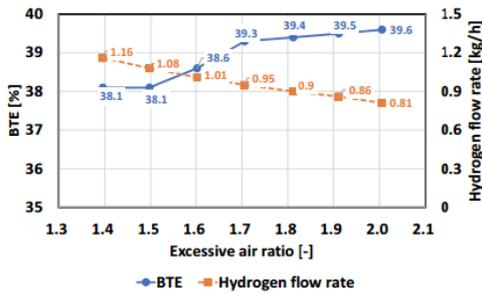


图 3 有效热效率和过量空气系数的关系^[29]

Fig. 3 Relationship between effective thermal efficiency and excess air coefficient

2.2.2 增压

福特公司的 Robert J. Natkin^[30]等人在一台 2.3L 的氢内燃机上试验研究了增压对其动力性影响。试验结果如图 5 所示，以恒定当量比（当量比=0.5）以及使用空空中冷器增压时，其峰值转矩与汽油机相比相差约为 28%。当增大当量比后，峰值转矩差值可以降低为 7%左右。在此基础上增加中冷器，氢内燃机在 4000 r·min⁻¹ 的转矩与同排量汽

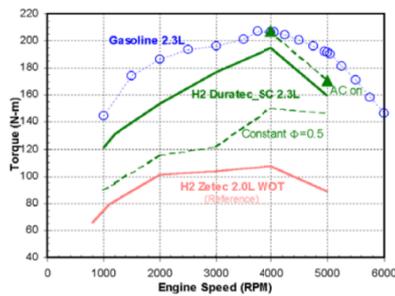
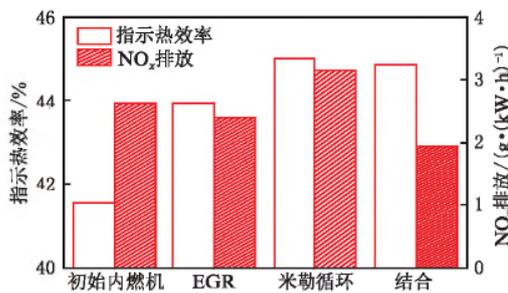


图 5 轻型内燃机转矩特性^[30]

Fig. 5 Torque characteristics of light internal combustion engine

2.2.3 EGR

北京理工大学的孙柏刚^[31]分析了在氢内燃机中应用 EGR 和米勒循环以实现爆燃抑制及 NO_x 排放优化的潜力。图 7 是相关的主要试验研究结果，可以看出，使用 EGR



数下，传热损失的降低可以大幅改善热效率。

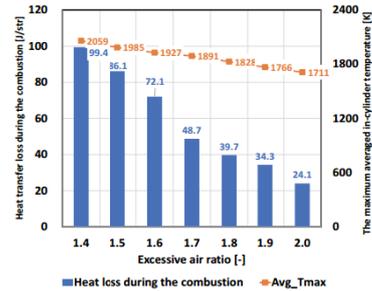


图 4 传热损失和最大平均缸内温度的关系^[29]

Fig. 4 Relationship between heat transfer loss and maximum average in-cylinder temperature

油机相当。

东京都市大学 Masakuni Oikawa^[27]等人在 Yasuo Takagi 等人研究的基础上通过使用增压技术，对稀薄工况下 PCC (Plume Ignition Combustion Concept) 燃烧技术导致的功率降低进行了恢复。除此之外，还通过优化喷射正时和当量比，在热效率接近 50% 的情况下实现了个位数的 NO_x 排放，相关试验数据如如图 6 所示。

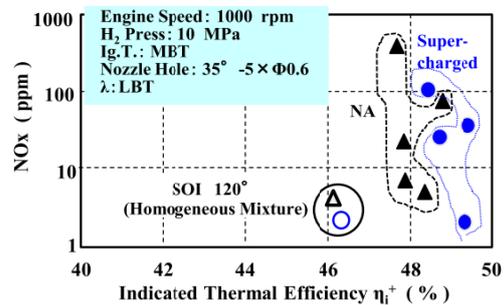


图 6 不同策略下 NO_x 排放和热效率关系^[27]

Fig. 6 Relationship between NO_x emission and thermal efficiency under different strategies

可显著抑制 NO_x 排放，而采用米勒循环可大幅度改善爆燃倾向。通过上述方法，实现了氢内燃机压缩比从 10.0 提升至 18.4，指示热效率提升了 8.0%，达到 44.87%，同时 NO_x 排放减少了 26.2%，达到 1.937g/(kW·h)。

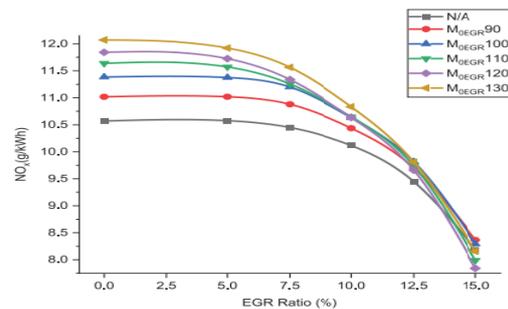


图 7 不同技术方案的性能参数对比^[31]
Fig. 7 Comparison of performance parameters of different technical solutions

印度国立卡纳塔克邦技术学院的 Jayashish Kumar Pandey^[32]基于一台缸内直喷、压缩比 14.0 的氢内燃机，试验研究了进气压力和 EGR 对 NO_x 排放的影响。该研究表明在进气压力为 0.13MPa、EGR 5%时，NO_x 可降低 1.24%。随着 EGR 率增大到 15%，NO_x 降幅增加至 32.5%。另一方面，EGR 增加导致燃烧不稳定性增强，使得其应用潜力受到限制。

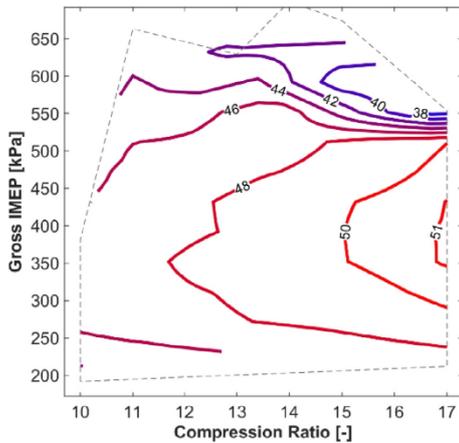
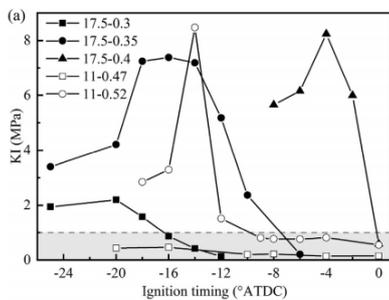


图 9 指示热效率随平均指示压力和压缩比的变化趋势^[33]

Fig. 9 Trend of indicated thermal efficiency with mean indicated pressure and compression ratio

天津大学的 Yong Li^[34]等人基于 Converge 软件仿真研究了不同压缩比下当量比对氢气直喷内燃机爆燃倾向和性能的影响。仿真结果表明，增大压缩比可以显著放大当量比对燃烧和爆燃倾向的影响。当压缩比为 17.5 时，随着当量比的增加，爆燃强度对点火正时的敏感程度也增强，特别是在



(a)

图 8 不同进气压力下 NO_x 随 EGR 的变化^[32]
Fig. 8 Variation of NO_x with EGR at different inlet pressures

2.2.4 高压压缩比

韩国机械材料研究所的 Seungmook Oh^[33]等人基于一台单缸直喷、可变压缩比 (10-17) 的氢内燃机，试验研究了不同压缩比其热效率和 NO_x 排放的影响。试验结果如图 9 和 10 所示，中等负荷、压缩比 17 时，得到最大的指示热效率为 51%；同时，负荷在 25MPa 以下，可以得到最低的 NO_x 排放为 0.02 g/kWh。

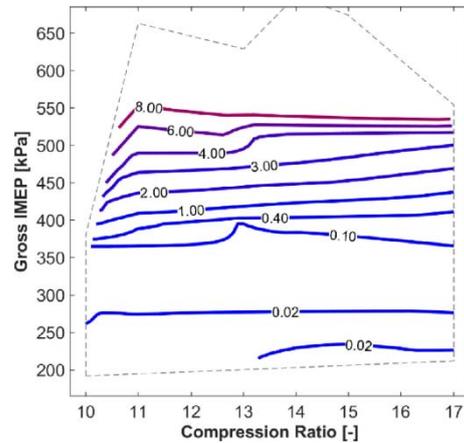
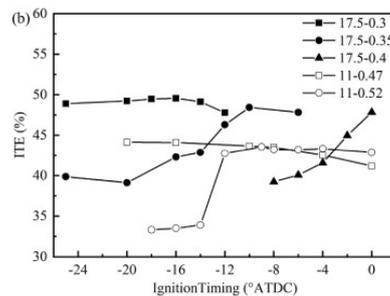


图 10 NO_x 排放随平均指示压力和压缩比的变化趋势^[33]

Fig. 10 Trend of NO_x emission with mean indicated pressure and compression ratio

压缩比为 17.0、当量比为 0.4 的情况下，点火正时从 0 提前至 -2°CA ATDC 爆燃强度从 0.6MPa 迅速增加到 6.0MPa；另一方面，当爆燃强度高于 1MPa（点火正时：-12°CA ATDC），会导致氢内燃机性能出现严重衰减，其输出功率降低了 20.6%，相关仿真计算结果如图 11 所示。



(b)

图 11 爆燃强度 (a) 和指示热效率 (b) 对不同当量比和压缩比随不同点火正时的变化趋势^[34]
Fig. 11 Trends of deflagration intensity (a) and indicated thermal efficiency (b) for different equivalence ratios and compression ratios with different ignition timing

2.2.5 缸内直喷

奥地利格拉茨工业大学和宝马开展的联合研究^[35]了氢气直喷对氢内燃机效率的影响。试验研究发现壁面热损失是总损失的主要组成部分，它们主要取决于燃烧室壁附近的温度、压力、湍流和速度。因此，可以通过氢气直喷使混合物分层从而影响壁热通量，以减少总损失来提高热效率。例如，在中等负荷（IMEP=0.6MPa；图 12 所示）通过对氢气气体喷嘴优化，可以使得氢内燃机热效率提高到 40% 以上。

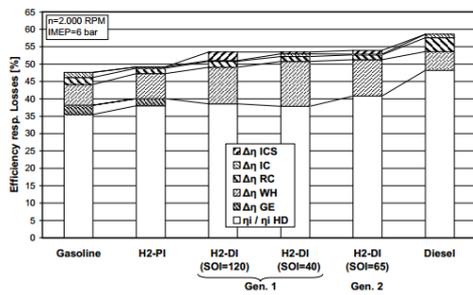


图 12 中等负荷下氢内燃机的各部分损失^[35]

Fig. 12 Losses in various parts of a hydrogen internal combustion engine at moderate loads

2.2.6 喷水技术

美国密歇根大学的 Matthew Younkins^[37]等人研究了进气道喷水技术对缸内直喷氢内燃机热效率及 NO_x 排放的影响。研究表明在 NO_x 排放为 90 μmol/mol 时，喷水时的平均指示压力（0.792MPa）比不喷水时的平均指示压力（0.639MPa）提升了 23.9%（如

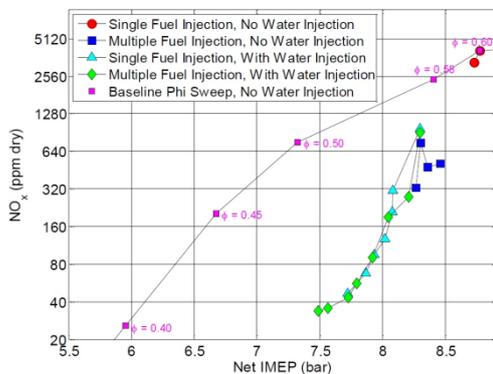


图 14 不同 IMEP 下喷水对 NO_x 排放的影响^[37]

Fig. 14 Effect of water injection on NO_x emission under different IMEP

北京工业大学的纪常伟^[38]试验研究了

北京理工大学的孙柏刚^[36]基于一台 2.0L 的氢内燃机研究了增压和喷射压力对其动力性的影响。研究表明与自然吸气内燃机相比配置合适涡轮增压和 14MPa 的喷射压力，可以使 BMEP 提高 2.5 倍以上，达到 1.2MPa，有效热效率也从 30% 大幅上升到 40.4%，上升幅度达到 10.4%。在同等增压条件下，高喷射压力相较于低喷射压力有效热效率提升约为 3% 左右。相关结果如图 13 所示。

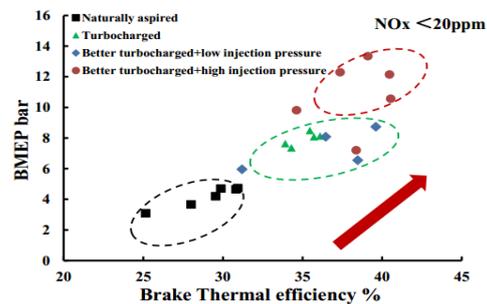


图 13 近零排放下不同技术的有效热效率和平均有效压力^[36]

Fig. 13 Effective thermal efficiency and average effective pressure of different technologies under near-zero emissions

图 14 所示)。此外相关实验数据如图 15 所示，与其它三种策略相比，单次燃料喷射和不喷水热效率最高，但是其 NO_x 达到 4500 μmol/mol。为了满足排放要求，使用单次燃料喷射和喷水是最为有效的策略，与多次燃料喷射和不喷水策略相比，该策略将 NO_x 排放减少了大约 75%。

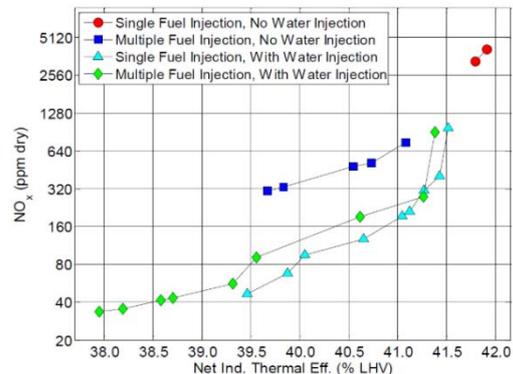


图 15 不同 ITE 下喷水对 NO_x 排放的影响^[37]

Fig. 15 Effect of water spray on NO_x emission at different ITE

不同过量空气系数和火花正时下，缸内喷水对氢内燃机性能与排放的影响，试验研究发

现缸内喷水是降低氢内燃机 NO_x 排放的有效方法。如图 16 所示,在过量空气系数 1.15 的工况下,喷水量与进气量的比值增加到 1.87%,与原机排放相比,可实现 NO_x 排放降低 36.9%;与此同时如图 17 所示,点火正时不变, NO_x 排放随着喷水量与进气量比

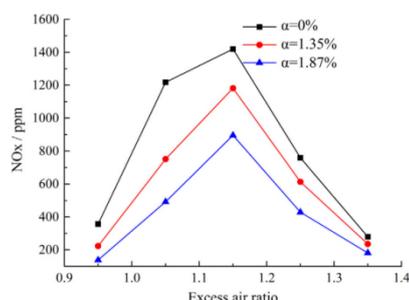


图 16 喷水工况下过量空气系数与 NO_x 的关系^[38]
Fig. 16 Relationship between excess air coefficient and NO_x under water injection conditions

3. 总结

(1) 氢气作为内燃机燃料具有可燃性极限范围广泛(约为 4~75%)、最小点火能量低(约为 0.02MJ)、淬熄距离小(约为 0.64mm)、自燃温度高(约为 858K)、火焰传播速度快(约为 1.85ms^{-1})、扩散率高(约为 $0.61\text{cm}^2/\text{s}$)以及密度小(约为 $0.08\text{kg}/\text{m}^3$)等物理化学特性。

(2) 可燃极限广泛、最小点火能量低、自燃温度高以及稀薄状态下燃烧速度降低都有助于氢内燃机的效率和排在稀薄策略中有更好表现。同时,由于氢气扩散率高使得其能更快的与空气形成混合气。但是,氢气淬熄距离小这一特性会增加内燃机回火的趋势,不利于内燃机稳定运行。

(3) 氢内燃机与同排量汽油机相比增压、加浓混合气以及使用增压中冷器增压可以将转矩不足从 28%降低到 7%,同时使用增压中冷还可以进一步对稀薄燃烧工况导致的输出功率损失进行恢复。

(4) 对于氢内燃机存在的 NO_x 排放问题,可以使用 EGR、燃烧策略优化、进气道/缸内喷水等技术进行规避。其中, EGR 可以使采用米勒循环的氢内燃机热效率达到 44.87%, NO_x 排放也能降低至 $1.937\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。此外,采用稀薄燃烧技术并通过优化喷射正时也可以在不降低热效率的情况下抑制

值的增加而显著减少,并且喷水越多, NO_x 排放越少。例如,点火正时为 15°CA BTDC 、喷水量与进气量的比值从 1.35%增加到 1.87%时, NO_x 排放从 $1841\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 减少到 $822\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

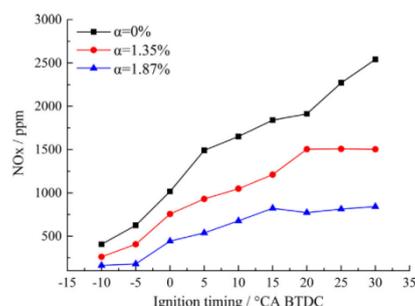


图 17 喷水工况下点火正时与 NO_x 的关系^[38]
Fig. 17 Relationship between ignition timing and NO_x under water injection condition

NO_x 排放。同时,使用单次燃料喷射和喷水与多次燃料喷射和不喷水策略相比,可以使 NO_x 排放减少 75%左右。

(5) 氢内燃机中,壁面热损失作为总损失的主要组成部分,其限制了热效率的优化潜力。当前可以通过应用氢气直喷技术形成分层混合气来降低壁面热损失,从而提升热效率。例如,通过优化氢气喷嘴以及采用高压喷射技术,可以将氢内燃机的热效率提高到 43%以上。

(6) 综上所述,氢燃料内燃机是一种可行的替代方案,其工作过程中不会产生 CO_2 排放,有助于我国快速实现双碳目标。同时,其还具有可靠性高以及经济性好等优势。但是,氢内燃机与氢燃料电池相比依旧存在着效率低以及 NO_x 排放等缺点,因此在氢内燃机走向大众视野的过程中上述问题都需要广大研究人员进一步研究探索。

参考文献

- [1] Kurtz J M, Sprik S, Saur G, et al. Fuel cell electric vehicle durability and fuel cell performance[R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2019.
- [2] Göhring E, von Glasner E C, Povel R. Engine braking systems and retarders-an overview from an european standpoint[J]. 1992.

- [3] Thompson S T, James B D, Huya-Kouadio J M, et al. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 39(9): 304-313.
- [4] Cox B, Bauer C, Beltran A M, et al. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios[J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 115021.
- [5] 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.
- [6] Bauer C G, Forest T W. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on SI engine performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26(1): 55-70.
- [7] Wierzba I, Kilchyk V. Flammability limits of hydrogen-carbon monoxide mixtures at moderately elevated temperatures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26(6): 639-643.
- [8] Roy M M, Tomita E, Kawahara N, et al. An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H₂-diesel dual-fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(2): 844-853.
- [9] Midilli A, Ay M, Dincer I, et al. On hydrogen and hydrogen energy strategies II: future projections affecting global stability and unrest[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005, 9(3): 273-287.
- [10] White C M, Steeper R R, Lutz A E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2006, 31(10): 1292-1305.
- [11] Momirlan M, Veziroglu T N. Current status of hydrogen energy[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2002, 6(1-2): 141-179.
- [12] Al-Baghdadi M A R S. Effect of compression ratio, equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel[J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(15): 2245-2260.
- [13] Balat M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2008, 33(15): 4013-4029.
- [14] Sebastian Verhelst, Thomas Wallner. Hydrogen-fueled internal combustion engines [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(6):490-527.
- [15] Das L M. Hydrogen engines: a view of the past and a look into the future[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1990, 15(6): 425-443.
- [16] Natkin R J, Tang X, Boyer B, et al. Hydrogen IC engine boosting performance and NO_x study[J]. *SAE transactions*, 2003: 865-875.
- [17] Rottengruber H, Berckmüller M, Elsässer G, et al. Direct-injection hydrogen SI-engine-operation strategy and power density potentials[J]. *SAE transactions*, 2004: 1749-1761.
- [18] Mohammadi A, Shioji M, Nakai Y, et al. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(2): 296-304.
- [19] Tanno S, Ito Y, Michikawauchi R, et al. High-efficiency and low-NO_x hydrogen combustion by high pressure direct injection[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2010, 3(2): 259-268.
- [20] 孙柏刚, 赵建辉, 赵陆明, 等. 氢内燃机 NO_x 排放特性的试验研究[J]. *内燃机工程*, 2011, 32(2): 53-56.
- [21] Matthias N S, Wallner T, Scarcelli R. A hydrogen direct injection engine concept that exceeds US DOE light-duty efficiency targets[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2012, 5(3): 838-849.
- [22] Tsujimura T, Suzuki Y. Development of a large-sized direct injection hydrogen engine for

- a stationary power generator[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(22): 11355-11369. 1
- [23] Luo Q, Hu J B, Sun B, et al. Experimental investigation of combustion characteristics and NOx emission of a turbocharged hydrogen internal combustion engine[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2019, 44(11): 5573-5584.
- [24] Pauer T, Weller H, Schünemann E, et al. H2 ICE for future passenger cars and light commercial vehicles[C]//*Proceedings of the 41th International Vienna Motor Symposium*, Vienna, Austria. 2020: 22-24.
- [25] Xu P, Ji C, Wang S, et al. Effects of direct water injection on engine performance in a hydrogen (H₂)-fueled engine at varied amounts of injected water and water injection timing [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(24): 13523-13534.
- [26] 包凌志, 孙柏刚, 汪熙. 直喷氢内燃机实现 NO_x 近零排放的试验研究[J]. *汽车安全与节能学报*, 2021, 12(2): 257.
- [27] Oikawa M, Kojiya Y, Sato R, et al. Effect of supercharging on improving thermal efficiency and modifying combustion characteristics in lean-burn direct-injection near-zero-emission hydrogen engines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(2): 1319-1327.
- [28] Takagi Y, Mori H, Mihara Y, et al. Improvement of thermal efficiency and reduction of NO_x emissions by burning a controlled jet plume in high-pressure direct-injection hydrogen engines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(41): 26114-26122.
- [29] Kim Y, Park C, Oh J, et al. Effect of Excessive Air Ratio on Hydrogen-Fueled Spark Ignition Engine with High Compression Ratio Using Direct Injection System Toward Higher Brake Power and Thermal Efficiency[J]. Available at SSRN 4012806, 2023.
- [30] Natkin R J, Tang X, Boyer B, et al. Hydrogen IC engine boosting performance and NO_x study[J]. *SAE transactions*, 2003: 865-875.
- [31] 郝嘉田,孙柏刚.利用废气再循环与米勒循环提高氢内燃机压缩比的研究[J]. *内燃机工程*,2021,42(5):52-59
- [32] Pandey J K, GN K. Studying the effects of manifold pressure boosting and EGR on combustion and NO_x emission of hydrogen-fueled SI engine[J]. *International Journal of Engine Research*, 2023: 14680874231153209.
- [33] Oh S, Kim C, Lee Y, et al. Experimental investigation of the hydrogen-rich offgas spark ignition engine under the various compression ratios[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 201: 112136.
- [34] Li Y, Gao W, Zhang P, et al. Influence of the equivalence ratio on the knock and performance of a hydrogen direct injection internal combustion engine under different compression ratios[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(21): 11982-11993.
- [35] Wimmer A, Wallner T, Ringler J, et al. H₂-direct injection—a highly promising combustion concept[R]. *SAE Technical Paper*, 2005.
- [36] Bao L, Sun B, Luo Q. Experimental investigation of the achieving methods and the working characteristics of a near-zero NO_x emission turbocharged direct-injection hydrogen engine[J]. *Fuel*, 2022, 319: 123746.
- [37] Younkins M, Wooldridge M S, Boyer B A. Port injection of water into a DI hydrogen engine[R]. *SAE Technical Paper*, 2015.
- [38] Xu P, Ji C, Wang S, et al. Effects of direct water injection on engine performance in engine fueled with hydrogen at varied excess air ratios and spark timing[J]. *Fuel*, 2020, 269: 117209.