

氨气及氨/氢掺混燃烧技术发展综述

雒晶¹, 吕阳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】氨和氢都是零碳燃料, 且氨可以作为氢载体。氨的能量密度高且制备及运输技术成熟但最小点火能量高; 氢的燃烧速度快, 最小点火能量低, 可燃范围广但不易运输储存。氢和氨的对立性和潜在的互补性为发动机提供了新的研究方向。本文总结了氨气及氨/氢掺混燃烧技术的最新进展, 为以后更好地发展氨燃料燃烧提供理论依据。

【关键词】氨气; 氨/氢掺混; 内燃机; 燃烧性能; 排放

Review on the development of ammonia and ammonia/hydrogen blended combustion technology

Luo Jing¹, Lv Yang¹, 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., Chongqing401122, China)

Abstract: Ammonia and hydrogen are both zero carbon fuels and ammonia can be used as a hydrogen carrier. Ammonia has a high energy density and mature preparation and transport technology but a high minimum ignition energy; hydrogen has a fast combustion rate, a low minimum ignition energy, a wide flammable range but is not easily transported for storage. The opposing and potentially complementary nature of hydrogen and ammonia offers new research directions for engines. This paper summarises the latest advances in ammonia and ammonia/hydrogen blended combustion technology to provide a theoretical basis for better development of ammonia fuel combustion in the future.

Keywords: Ammonia; ammonia/hydrogen blending; internal combustion engines; combustion performance; emissions

引言

2020年9月,我国提出了“碳达峰,碳中和”的双碳目标,即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^[1]。同年10月,中国汽车工程学会发布《中国节能与新能源汽车路线图2.0》,进一步确认了全球汽车技术“低碳化、信息化、智能化”发展方向^[2]。交通领域是碳排放的主要来源之一,传统燃料的燃烧导致空气污染问题严重,对自然环境造成了影响^[3]。为了降低二氧化碳排放,减少温室效应,实现我国的“双碳”目标,内燃机有两条途径可走,一条是低碳技术路线,另外一条是零碳技术路线^[4]。低碳技术路线可以通过提高内燃机的热效率来实现。对于混动专用汽油机,可采用高压压缩比、超膨胀循环、冷却EGR、稀燃^[4],预燃室等技术来实现。而实现零碳技术路线,可使用零碳燃料来达成。

氢是最受欢迎的零碳燃料之一,由于其燃烧产物不含碳和高燃料性能,目前已经在燃料电池领域得到了广泛的应用^[5],但是其有一个显著的缺点是储存和运输非常困难^[6]。氨是一种高效的氢载体^[7],被认为是氢的替代品,同时氨也是零碳燃料。氨的体积能量密度几乎是液态氢的两倍,更加证明氨是一种可行的绿色燃料替代方案^[8]。与纯氢相比,氨容易液化,这在很大程度上降低了运输成本^[9]。且目前氨的大规模生产非常稳定^[10]。在内燃机中,氢是辅助氨燃烧最常用的添加剂^[11]。有研究表明,在氨中添加燃烧性能较好的氢气能有效改善氨燃料的燃烧性能、提高燃烧速度及拓宽可燃性极限^[12],而在氨中添加氨主要是为了抑制爆震。内燃机中纯氨及氨/氢燃烧成为未来内燃机低碳排放解决方案中最热门的研究课题之一。

1 氨/氢燃料物理化学性质

表1 氨气、氢气、二甲醚、乙醇,汽油和柴油燃料的热力学和燃烧特性^[4,13]

	氨气	氢气	二甲醚	乙醇	汽油	柴油
分子式	NH ₃	H ₂	CH ₃ OCH ₃	C ₂ H ₆ O	C _n H _{1.87n}	C _n H _{1.8n}
含氢质量分数	17.8	100	13.0	13.0	14.5	12.6
沸点(°C)	-33.4	-253.0	-29.5	78.0	20-215	180-360
汽化潜热(kJ·kg ⁻¹)	1370	445.6	467	840	305	270
化学计量空燃比	6.06	34.3	9.0	9.0	14.6	14.5
低热值(MJ·kg ⁻¹)	18.5	120.0	27.6	26.9	44.0	42.5
高热值(MJ·kg ⁻¹)	22.5	141.9	31.7	29.7	47.3	44.8
体积能量密度(MJ·L ⁻¹)	11.2	8.4	18.5	21.3	33.0	36.6
在空气中的可燃性极限(%vol)	15.0-28.0	4.1-74.8	3.4-18.6	3.3-19	1.3-7.1	0.6-6.5
自燃温度(°C)	651	585	235	363	248-412	226-233
层流火焰速度(ms ⁻¹)	0.07	1.60	0.43	0.40	0.43	-
最小点火能量(mJ)	680	0.011	0.29	-	0.8	-
辛烷值(RON)	130	≥100, 130	0	108	90-106	15-25

表 1 展示了氨气、氢气、二甲醚、乙醇，汽油和柴油燃料的热力学和燃烧特性。对比氢气和氨气，可以发现氢气具有燃烧速度快、最小点火能量低，可燃范围广等优点^[14-17]，但是氢气功率密度低，不易存储且容易失火；而氨气的能量密度高、辛烷值高且制备及运输技术成熟^[18,19]，但氨气也表现出火焰传播速度低、最小点火能量高、自燃温度高、可燃性极限窄^[20-22]以及潜在的高氮氧化物排放等缺点。氨气与汽油相比，其热值稍低，但其辛烷值高于汽油，从而可以通过增大压缩比来提高发动机的热效率^[23]。氨气与其他燃料相比，虽然储存氨的能量密度比汽油和柴油低，但它比气态或液态氢的能量密度高^[24]。并且氨气的氢含量很高，氨含有 1.5 分子氢，相当于每单位重量氨的氢含量约为 17.8 wt.%^[25]。液态氨的体积能量密度为 11.2 MJ·L⁻¹，与二甲醚等替代液体燃料相当^[13]。二甲醚是也一种具有良好燃烧性能的替代燃料，但其昂贵的价格限制了它的应用^[26]。

2 氨/氢内燃机研究进展

关于氨作为发动机的燃料的研究并被广泛应用，可以追溯到 1941 年，比利时的 A. Macq 第一次提出了将氨作为燃料应用于发动机^[27]。此后，很多学者陆续对氨发动机进行研究。按照时间发展可将氨作发动机燃料的研究大致分为两个时期：20 世纪 60 年代，第二次世界大战后，为应对潜在的石油危机并探寻可行的替代燃料，进而开展氨/氢内燃机研究；21 世纪初，由于温室效应及碳排放问题，为了寻找可替代的无碳燃料而开展氨/氢发动机研究^[28]。

2.1 纯氨燃烧

纯氨在内燃机中的燃烧是一项具有挑战性的任务，主要是由于其存在自燃温度高，可燃性范围窄，火焰传播速度低等缺点，因此，只有少数研究探索了使用纯氨作为发动机燃料的可能性。

1966 年，Cornelius W^[29]等人使用一台单缸火花点火的往复式发动机来评估氨发动机的性能。试验数据显示，氨发动机性能很差，在 2000 r/min 下获得的最大功率仅为汽油机在 4000 r/min 下获得最大功率的 17.5%。此外，氨燃料发动机的最大指示热效率仅为 21%，而汽油机为 38%。通过改进点火系统，可以提高发动机性能，但发现氨燃料和汽油之间的功率差异仍然大于理论差异。试验还发现通过增加压缩比也可以使得发动机最大功率增加。

1967 年，Gray^[30]等人也进行了氨发动机试验研究，结果发现纯氨燃烧比较困难，需要高压压缩比和温度(35:1 压缩比，422 K 空气和冷却剂)。

2011 年，Duynsleghe^[31]等人使用液氨直喷系统在火花点火发动机上研究了不同压缩比、火花正时和当量比对发动机性能和排放性能的影响。试验结果表明，该发动机最佳运行条件是，压缩比为 15，火花正时在上止点前 20° -22°，当量比在 0.95-1 之间。该条件是性能与减少废气排放的最佳折衷，同时通过减少摩擦损失和提高有效热效率(可达 39%)从而达到最佳发动机性能。

2018 年，D Lee^[32]等人提出了一种新的氨燃烧策略(如图 1 所示)，通过仿真分析了该燃烧策略在发动机中的运行特性，并进行了参数化研究。结果表明，随着先导喷射量的增加，平均制动有效压力总体呈增加趋

势。在固定先导喷射量的条件下，主喷射量增加，可操作初始喷射时间范围变窄。当总燃料量增加到 46.2 mg，等效比为 0.8 时，可操作初始喷射范围将减少到 8 °CAD，并且发动机将难以运行。固定总燃油量为 46.2 mg 时，不同先导喷射与 IMEPg 关系如图 2 所示。

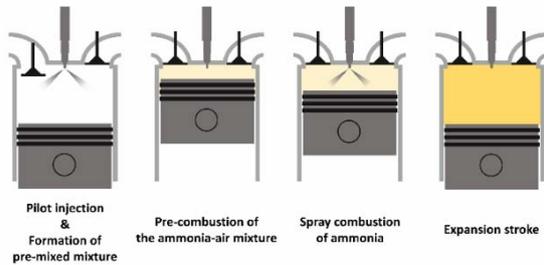


图 1 氨发动机的燃烧策略^[32]

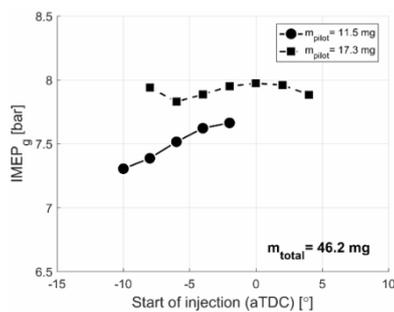


图 2 不同先导喷射与 IMEPg 关系图，固定总燃油量为 46.2 mg^[32]

2019 年 Lhuillier C^[33]等人在一台单缸火花点火上，分析了不同当量比和进气压力的下以气态氨/空气混合物为燃料的发动机性能。结果表明，氨发动机通过增加进气压力可以获得高功率输出；氨发动机的性能与甲烷发动机的性能相当；在稀薄氨/空气混合物中，指示效率的最大值接近 37%，在某些情况下甚至超过了甲烷的指示效率。

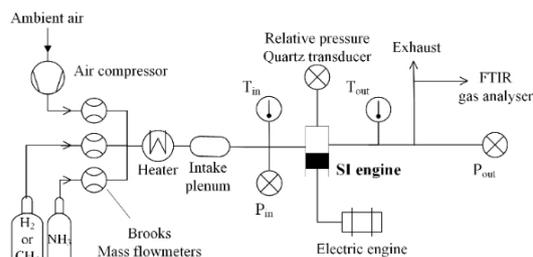


图 3 实验装置布局图^[33]

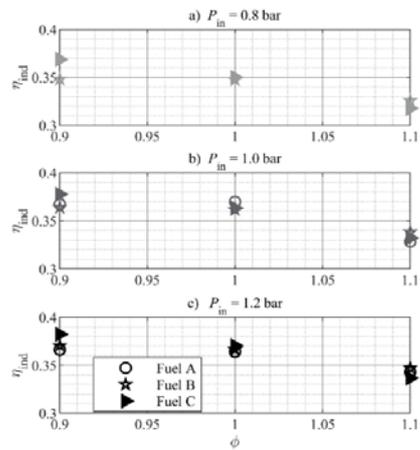


图 4 不同燃料和进气压力下的效率(燃料 A: 纯氨、燃料 B: 富氢氨, 燃料 C: 甲烷)^[33]

2021 年, Mounaïm-Roussel^[34]等人在一台四缸汽油直喷火花点火发动机上进行了发动机试验。结果表明, 对于纯氨发动机来说, 可以在怠速(即 650 r·min⁻¹)下获得低负荷。但是无法确保其在 2000 r·min⁻¹下稳定运行, 在稀燃条件下获得稳定燃烧也会更加困难。

2.2 氨/氢燃烧

通过以上纯氨燃料燃烧的试验结果发现, 在发动机中使用纯氨燃料是可行的, 但是其性能与普通汽油机或柴油机有较大差距。为了克服氨燃料燃烧发动机的缺点从而提高氨发动机的性能, 可以通过提高点火能量、多重点火、提高压缩比、增压、提高进气温度, 预燃室点火和采取高活性燃料掺混燃烧等措施^[4,35,36]。目前氨气作为发动机燃料的试验研究多采用与高活性燃料掺混燃烧的方法, 以获得氨发动机优良的燃烧性能和排放性能。可以通过采用高活性燃料引燃的方式^[4]实现氨与高活性燃料的掺混燃烧, 该示意图如图 5 所示。其中最常用的高活性燃料是氢。

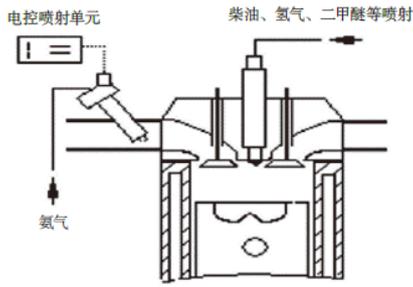
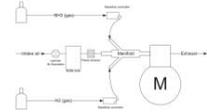
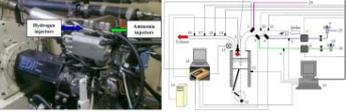
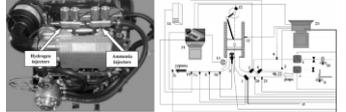
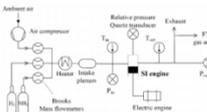
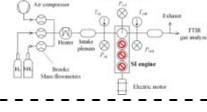
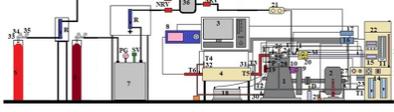
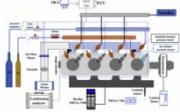


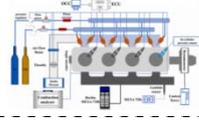
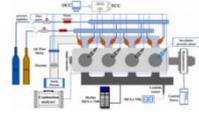
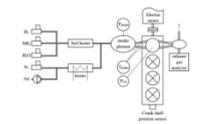
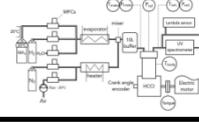
图 5 氨内燃机引燃燃烧模式示意图^[4]

氢发动机在火花点火发动机(SI)和均质压燃发动机(HCCI)上都进行了试验研究,其中主要集中在 SI 发动机。以氨/氢为燃料的发动机主要有在氨发动机添加氢以及在氢发动机添加氨两种。在氨发动机中添加氢是为了改善氨发动机的性能,而在氢发动机中添加氨主要是为了抑制爆震,研究中前者居多。

本节重点总结了国内外关于氨/氢燃料发动机的试验研究现状,如表 2 所示。氨/

表 2 国内外以氨/氢为燃料的发动机研究现状^[22,37-47]

序号	作者	年份	发动机类型	性能	发动机/试验装置示意图
1	Morch ^[37] 等人	2011	SI	压缩比为 13.58, H ₂ 体积分数为 10%时, 平均有效压力达最大值 725 kPa	
2	Frigo S ^[38] 等人	2012	SI	在半负荷、4500 r/min 时, 最大 NOx 排放量为 11.5 g/kWh	
3	Frigo S ^[39] 等人	2013	SI	最小氢/氨能比在全负荷时约为 7%, 在半负荷时约为 11% 时, 可以获得良好的发动机性能	
4	Lhuillier ^[40] 等人	2019	SI	在氢体积分数小于 10% 的接近化学计量的稀薄混合物时, 在全负荷下指示效率达到 37%	
5	Lhuillier ^[22] 等人	2020	SI	在略富氢的近化学计量稀薄混合物的情况下, 指示效率最优值接近 39%	
6	Dinesh ^[41] 等人	2022	SI	在 1400 r/min 时获得的最大制动热效率为 31.13%, 在 1800 r/min 时获得的最大制动热效率为 30.14%	
7	Ji ^[42] 等人	2021	SI	与纯氢发动机相比, 氨的加入提高了指示平均有效压力和指示热效率	
8	Xin ^[43] 等人	2022	SI	在最大制动转矩的点火时刻, 随着氨体积分数的增加, 指示平均有效压力和指示热效率都增加	

9	Xin ^[44] 等人	2023	SI	在化学计量条件下，最高制动热效率 31%；稀燃条件下，最高制动热效率 29.8%	
10	Xin ^[45] 等人	2023	SI	节气门负荷下，MAP=100 时热效率为 37%左右；过量空气系数负荷下，最大制动热效率可接近 40%；可变气门正时负荷的制动热效率维持在 33%以上	
11	Pochet ^[46] 等人	2017	HCCI	将进气压力，进气温度和当量比分别提高到 1.5 bar，475 K 和 0.28，在氨气体积分数为 70%时实现了稳定燃烧	
12	Pochet ^[47] 等人	2020	HCCI	与纯氢相比，氨可以使 IMEP 增加 50%，同时保持相同的燃烧效率	

2.2.1 氨/氢燃料在 SI 发动机上的试验研究

2011 年，Mørch^[37]等人在 SI 发动机中使用氨/氢混合物作为燃料，对发动机的性能进行了试验研究。结果表明，增加压缩比可以提高指示效率和平均有效压力。当压缩比为 13.58，H₂ 体积分数为 10%时，平均有效压力达到最大值 725 kPa。可以发现，氢含量为 10%的燃料混合物可以获得最大的效率和平均有效压力。文章还建议使用 SCR 来降低 NO_x 的排放。

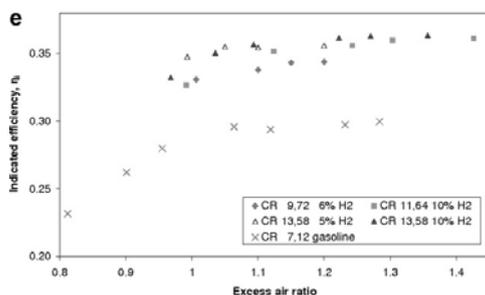


图 6 指示效率与过量空气系数和氨/氢混合物的关系图(η_i , 变 CR, 1200rpm)^[37]

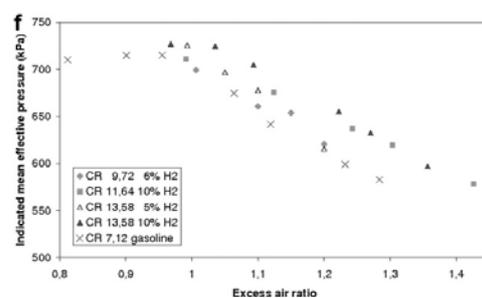


图 7 指示平均有效压力与过量空气系数和氨/氢混合物的关系图(η_i , 变 CR, 1200rpm)^[37]

2012 年，Frigo S^[38]等人在一台 505 cm³ 的双缸 SI 发动机上，分析确定发动机的实际运行速度和适当的空气/氨/氢混合物分数。试验结果证实，在空气/氨混合气中加入氢气可以改善点火和提高燃烧速度，其比例主要取决于负荷。在化学计量条件下，发动机稳定性随氨/氢能量比的增加而增加。空气/氨/氢燃料发动机制动功率小于汽油机。在没有催化还原的情况下，在半负荷、4500 r/min 时，最大 NO_x 排放量为 11.5 g/kWh。最后还指出文章中设计的氨和氢喷射系统的长期可靠性有待验证。

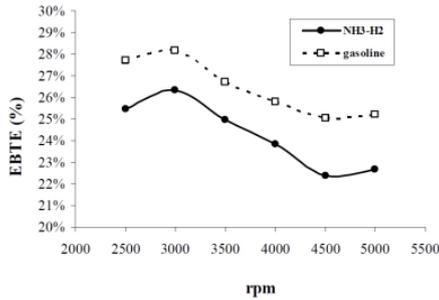


图 8 在节气门全开、化学计量下，发动机制动热效率与氨/氢发动机转速的关系^[38]

2013 年, Frigo S^[39]等人继续研究了上述 SI 发动机的性能。试验结果同样表明, 在氨/空气混合气中加入氢可以改善点火, 提高燃烧速度; 氢/氨能量比主要取决于发动机的负荷; 在全负荷时最小氢/氨能量比约为 7%, 在半负荷时约为 11% 的氢/氨能量比时, 可以获得良好的发动机性能 (即 $COV_{imep} < 10\%$); 保持 $\lambda = 1$ 时, 发动机的稳定性会随着氢/氨能量比的增加而增加; 发动机的性能比原来的汽油机普遍下降; NO_x 排放低, 在全负荷, 转速为 3000 r/min 时最高可达 1700 ppm。

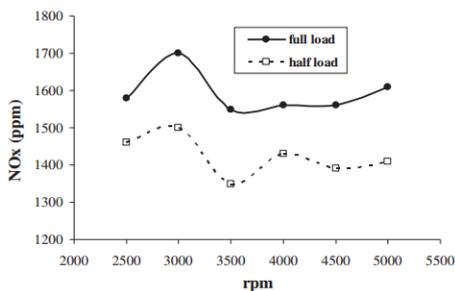


图 9 全负荷和半负荷下氮氧化物与氨加氢发动机转速的关系^[39]

2019 年, Lhuillier C^[40]等人在一台压缩比为 10.5:1, 恒定转速为 1500 rpm 的新型单缸火花点火发动机上, 以氨/氢/空气混合物为燃料, 研究了不同进气压力、当量比和燃料中氢的体积分数(5%-15%)对发动机性能和排放的影响。试验结果证实并拓展了前人

关于氨/氢在 SI 发动机的研究。试验发现, 增压可以提高功率输出, 在增压条件下与汽油全负荷运行的水平相当。指示效率 η_{ind} 结果如图 10 所示, 可以发现进气压力的增加对指示效率有有益的影响, 在氢体积分数小于 10% 的接近化学计量的稀薄混合物时效率最高, 在全负荷下指示效率达到 37%。在氢体积分数 10% 左右时, 表现出良好的燃烧性能和排放性能。此外还要考虑污染物排放问题, 需要进一步研究和开发燃烧和污染物形成模型, 寻找解决方案, 如 SCR 或 SNCR 后处理系统。

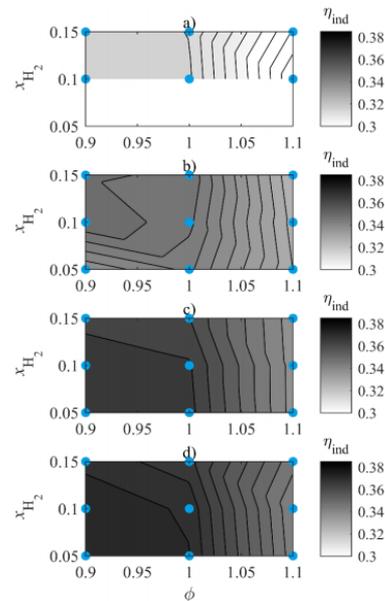


图 10 a) $P_{in} = 0.6$ bar, b) $P_{in} = 0.8$ bar, c) $P_{in} = 1.0$ bar, d) $P_{in} = 1.2$ bar 时, 效率随混合物成分的变化^[40]

2020, Lhuillier^[22]等人在一台四冲程四缸火花点火发动机上分析了不同氢分数、当量比, 进气压力对氨/氢/空气发动机的性能, 燃烧特性和排放性能的影响。试验结果发现, 在燃料中掺入 20% 体积分数的氢可以提高循环稳定性并避免失火, 同时可以获得最佳的功率输出和接近化学计量的指示效率; 超过 20% 的氢体积分数则会导致效率降低。指

示效率的变化情况如图 11 所示, 在略富氢的近化学计量稀薄混合物的情况下, 其最优值接近 39%。

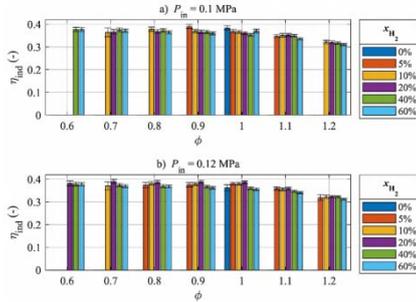


图 11 指示热效率^[22]

2022 年, Dinesh^[41]等人在一台单缸水冷 SI 发动机上, 研究了以氨/氢为燃料的发动机的性能。试验在节气门全开, 不同的压缩比(CR), 不同氢能量分数(5%-21%)和不同转速(1400&1800 r/min)条件下进行。试验结果表明, 随着 CR 的增大, 火焰发展速度加快, 火焰传播速度加快, 燃烧周期缩短。增加氢气部分的压缩比可以很好地改善氨燃烧质量, 可使 CA10 降低 17.68%, CA10-90 降低 12.93%。在 1400 和 1800 r/min 时, 氢能量分数从 5%到 21%, 体积效率降低了 13.64%, 但制动功率(BP)和制动热效率(BTE)分别增加了 16.89%和 33%。在 1400 r/min 时, CR 从 12 提高到 15, 在氢能量分数为 21%时, BTE 提高了 6.42%, 而在氢能量分数为 5%时, BTE 仅提高了 5.93%。在 1400 r/min 时获得的最大 BTE 为 31.13%, 在 1800 r/min 时获得的最大 BTE 为 30.14%。随着氢能量分数的增加, 由氨引起的 NO_x 生成减少, 而由氢燃烧的峰值温度升高而引起的 NO_x 生成迅速增加。而控制氨/氢混合物产生的 NO_x 的一个实用解决方案是选择性催化还原(SCR)。总体来说, 在 1400 r/min 时, 氢能量分数为 21%和

CR 为 15 时是发动机性能的最佳方案。

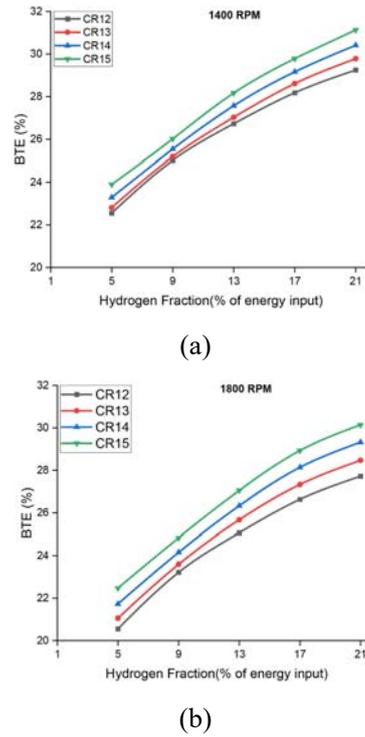


图 12 在 1400&1800 r/min 时 BTE 随 CR 和氢能量分数的变化^[41]

2021 年, Ji^[42]等人在一台 4 缸火花点火 (SI) 发动机上分析了不同点火时刻对氨/氢/空气燃料发动机的燃烧性能和排放特性的影响。在歧管绝对压力为 61 kPa, 发动机转速为 1300 r/min 的条件下对比分析了氨体积分数为 2.2%的混合气与纯氢燃料的区别。试验结果表明, 氨的加入延长了点火延迟和火焰发展周期, 降低了缸内峰值温度和压力。与纯氢发动机相比, 氨的加入提高了指示平均有效压力和指示热效率。但是由于氨的加入, NO_x 的排放量也相应增加。总体而言, 氨可以作为阻燃剂使用。该试验研究为氢燃料发动机的发展提供了新的参考依据。

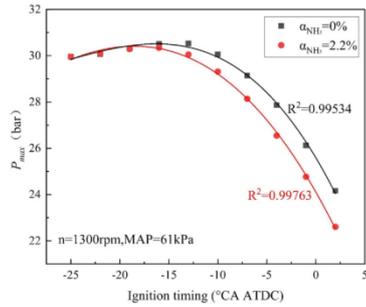


图 13 不同氨体积分分数下缸内峰值压力随点火时刻的变化^[42]

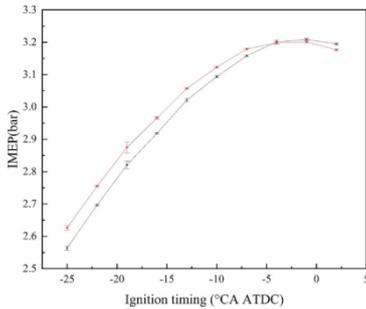


图 14 不同氨体积分分数下指示平均有效压力随点火时刻的影响^[42]

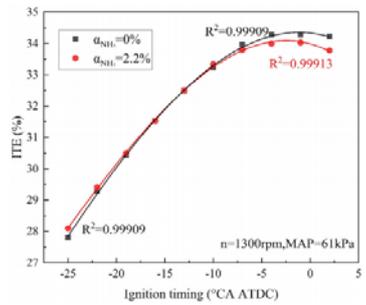


图 15 不同氨体积分分数下指示热效率随点火时刻的变化^[42]

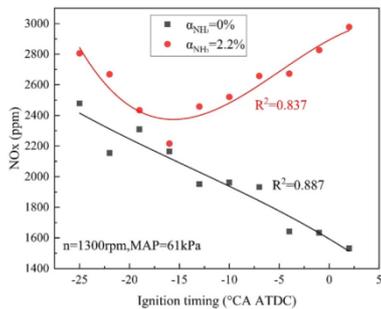


图 16 不同氨体积分分数下 NOx 排放随点火时刻的变化^[42]

2022 年, Xin^[43]等人在一台 4 缸四冲程火花点火(SI)发动机上进行了试验研究,在上述研究的基础上进一步分析了在部分负

荷工况下,不同氨体积分分数(5.2%、7.96%和 10.68%)的添加对氢发动机燃烧性能和排放特性的影响。该研究的目的是利用氨的低反应特性控制氢燃料发动机爆震。试验结果表明,随着氨体积分数的增加峰值放热速率降低;氨的加入增加了发动机的功率,降低了指示热效率;在最大制动转矩的点火时刻,随着氨体积分数的增加,指示平均有效压力和指示热效率都增加;添加氨体积分数对氮氧化物(NOx)排放量影响不大,但随着点火时刻的延迟逐渐增加。

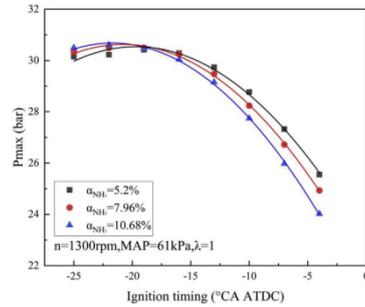


图 17 不同氨体积分分数下缸内峰值压力随点火时刻的变化^[43]

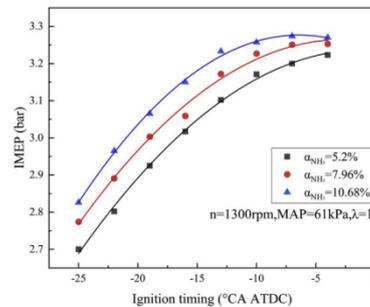


图 18 不同氨体积分分数下指示平均有效压力随点火时刻的影响^[43]

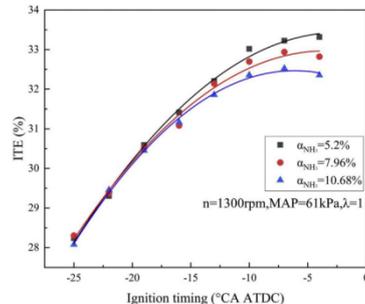


图 19 不同氨体积分分数下指示热效率随点火时刻的变化^[43]

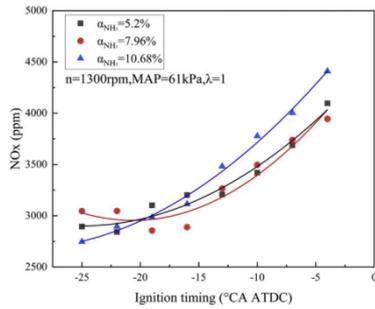


图 20 不同氨体积分数下 NO_x 排放随点火时刻的变化^[43]

2023 年, Xin^[44]等人在一台米勒循环 4 缸火花点火发动机上对氨/氢燃料的燃烧性能和排放特性进行了试验研究, 比较了在不同氨比例和过量空气系数下的发动机性能变化趋势。发动机在转速为 1500 r/min, 歧管绝对压力(MAP)保持为 60 kPa 的条件下进行试验。试验结果表明, 在化学计量比条件下, 提高氨比例可显著提高发动机的制动平均有效压力(BMEP)和制动热效率(BTE)。在化学计量比条件下, BTE 随着少量氨的加入而略有下降, 随着氨比例的增加而显著增加, 但当氨比例超过 60%时, BTE 开始迅速恶化, 最高 BTE 为 31%。稀燃条件下, 随着氨比例的增加, BMEP 和 BTE 的变化较小, 最高 BTE 为 29.8%。氨的体积比超过 80%会导致发动机运行不稳定甚至失火。氨/氢混合燃料会导致更高的氮氧化物(NO_x)排放。文章还指出氨/氢发动机排气温度相对较低, 可以考虑配套小惯量涡轮增压器。

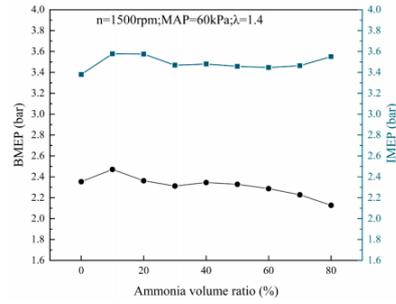
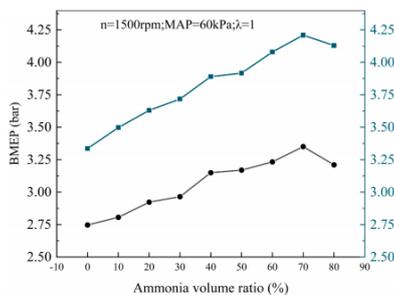


图 21 化学计量和稀薄燃烧条件下 IMEP 和 BMEP 随氨添加比例的关系^[44]

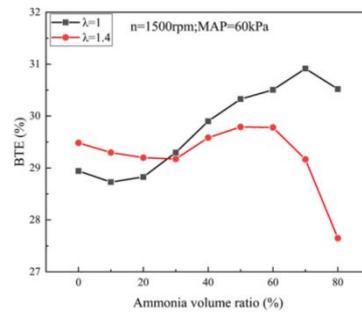


图 22 在化学计量和稀薄燃烧条件下 BTE 随氨添加比例的变化^[44]

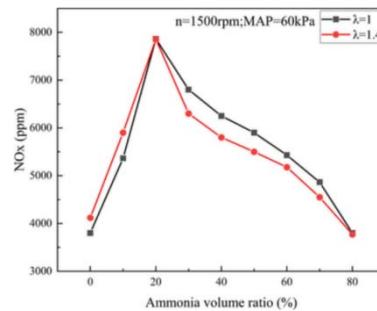


图 23 氮氧化物排放量随氨比例增加的变化趋势^[44]

2023 年, Xin^[45]等人在一台米勒循环 4 缸火花点火发动机上, 采用节气门、氨/氢混合比、过量空气系数、可变气门正时四种负荷控制策略对氨/氢发动机进行了试验研究。试验结果表明, 节气门策略可以使制动平均有效压力(BMEP)从最小的 1 bar 提高到 7.4 bar; 发动机热效率也受到节气门的影响, 并且随着 MAP 的增加而呈线性增加, 从 MAP=50 时的 16%增加到 MAP=100 时的 37% 左右。氨/氢混合比策略适用于冷启动条件。对于过量空气系数策略, 当过量空气系数从

1.1 增加到 1.7 时, BMEP 从 5.2 bar 降低到 3.7 bar 左右; 随着过量空气系数的增大, 发动机的热效率先增大后减小, 最大可以获得接近 40% 的制动热效率。可变气门正时策略可实现 BMEP 在 3.5 bar 和 6.5 bar 之间的切换并且保持 BTE 在 33% 以上。最后, 根据四种负荷控制策略的实施效果, 提出了一种用于混合动力系统的氨/氢双燃料发动机的控制策略, 称为“燃料与工况协调控制策略”。

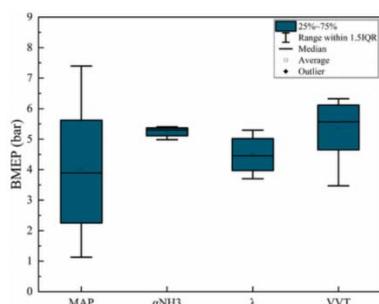


图 24 不同调整方法下的 BMEP 范围^[45]

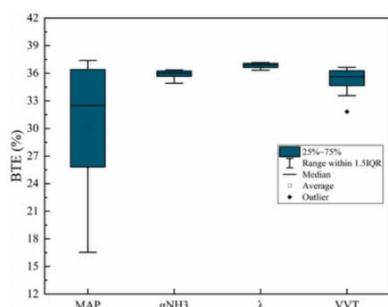


图 25 采用不同调整方法的 BTE 范围^[45]

2.2.2 氨/氢燃料在 HCCI 发动机上的试验研究

2017 年, Pochet^[46]等人在一台压缩比为 16:1 的单缸发动机上研究了不同氨氢混合比的 HCCI 燃烧。试验结果表明, 通过将进气压力, 进气温度和当量比分别提高到 1.5

3 总结与展望

(1) 与氢气相比, 氨的能量密度高(11.2 MJ·L⁻¹)且制备及运输技术成熟但最小点火能量高(680 mJ); 氢的燃烧速度快, 最小点

bar, 475 K 和 0.28, 在氨气体积分数为 70% 时实现了稳定燃烧; 为了防止爆震, 将纯氢指示平均有效压力(IMEP)限制在 2.7 bar, 但在与氨混合后, 发现 IMEP 可以达到 3.1 bar; 氨氢混合物的 NO_x 排放量 (在 750 到 2000 ppm 之间) 高于纯氢的氮氧化物排放量 (低于 6 ppm)。此外, 在使用 EGR 来降低 NO_x 排放时, 需要将燃烧温度保持在 1400 K 以上, 以保持良好的燃烧效率并避免 N₂O 的产生。作者在文章最后表示, 未来的工作将集中在对未燃烧的氢和氨以及 NO_x 和 N₂O 排放的精确测量上, 以及探索适合 HCCI 条件的活塞几何形状。

2020 年, Pochet^[47]等人在一台有效压缩比为 22:1 的 HCCI 发动机上进行了氨/氢燃烧, 分析了氨燃料混合比(0-94%)、当量比(0.1-0.6), 进气温度(50-240° C)和废气再循环对发动机性能和排放的影响。与纯氢相比, 氨可以使 IMEP 增加 50%, 同时保持相同的燃烧效率。高压对比纯氢性能没有影响。NO_x 的排放随着氨分数的增加而线性增加。低于 1400 K 的燃烧温度会产生大量的 N₂O, 与上文得出的结论一致, 因此需要 1800 K 的燃烧温度来确保大量氨的完全燃烧。文章最后指出应该以最大的冲程-内径比的增压条件为目标, 以便在保持燃烧温度的情况下获得更高的 EGR 率。

火能量低(0.011 mJ), 可燃范围广但不易运输储存。氢和氨的对立性和潜在的互补性为发动机提供了新的研究方向。

(2) 纯氨燃料燃烧时, 试验结果显示, 氨发动机性能很差, 在 2000 r/min 下获得的

最大功率仅为汽油机在 4000 r/min 下获得最大功率的 17.5%。此外,氨燃料发动机的最大指示热效率仅为 21%,而汽油机为 38%^[29]。因此必须通过提高点火能量、使用多重点火、提高压缩比、增压、提高进气温度,采用预燃室点火和掺氢等策略提高氨发动机的性能。

(3) 氨/氢燃料燃烧时,无论是在氨发动机添加氢还是在氢发动机添加氨,氨/氢发动机不仅能够实现稳定燃烧,并且都表现出良好的燃烧性能和排放性能。有试验结果显示,氨/氢发动机的指示效率最优值接近 39%^[22]。

(4) 用氨代替化石燃料可显著降低二氧化碳的排放。但是一般情况下,由于氨的可燃性差,燃料中氨含量越高,未燃烧氨的排放量就会增加。除此之外氨/氢发动机还有 NO_x 排放的问题。可以通过优化燃烧策略和考虑采用适当的废气后处理(如 SCR)等方法来减少未燃烧氨和 NO_x 的排放。

参考文献

- [1] 王灿,张雅欣.碳中和愿景的实现路径与政策体系[J].中国环境管理,2020,12(06):58-64.DOI:10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.06.058.
- [2] 高驰.一文读懂《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》:2035 年新能源市场占比超 50%[J].汽车与配件,2020,No.1291(21):40-41.
- [3] Chai W S, Bao Y, Jin P, et al. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147: 111254.
- [4] 帅石金,王志,马骁等.碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J].汽车安全与节能学报,2021,12(04):417-439.
- [5] 朱明原,刘文博,刘杨等.氢能与燃料电池关键科学技术:挑战与前景[J].上海大学学报(自然科学版),2021,27(03):411-443.
- [6] Lesmana H, Zhang Z, Li X, et al. NH₃ as a transport fuel in internal combustion engines: a technical review[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2019, 141(7): 070703.
- [7] Dutta S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(4): 1148-1156.
- [8] Service RF. Liquid sunshine. Science 2018;361:120-3. <https://doi.org/10.1126/science.361.6398.120>.
- [9] Kobayashi H, Hayakawa A, Somarathne KDKA, Okafor EC. Science and technology of ammonia combustion. Proc Combust Inst 2019;37:109-33.
- [10] Kandemir T, Schuster ME, Senyshyn A, et al. The Haber-Bosch process revisited: on the real structure and stability of "ammonia iron" under working conditions. Angew Chem Int Ed 2013;52:12723-6.
- [11] Chiong M C, Chong C T, Ng J H, et al. Advancements of combustion technologies in the ammonia-fueled engines[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114460.
- [12] 陈达南,李军,黄宏宇等.氨燃烧及反应机理研究进展[J].化学通报,2020,83(06):508-515.DOI:10.14159/j.cnki.0441-3776.2020.06.004.
- [13] Lesmana, H., Zhang, Z., Li, X., et, al. NH₃ as a Transport Fuel in Internal Combustion Engines: A Technical Review[J]. ASME. Energy Resour. Technol. July 2019; 141(7): 070703.
- [14] Luo Q, Hu J B, Sun B, et al. Effect of equivalence ratios on the power, combustion stability and NO_x controlling strategy for the turbocharged hydrogen engine at low engine speeds[J]. international journal of hydrogen energy, 2019, 44(31): 17095-17102.
- [15] Dimitriou P, Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(38): 24470-24486.
- [16] Zuo-Yu Sun. Experimental studies on the explosion indices in turbulent stoichiometric H₂/CH₄/air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44:469-476.
- [17] Wang Z, Zhu Y, Zhu Y, et al. Energy structure change and carbon emission trends in China[J]. Energy, 2016, 115: 369-377.

- [18] Kandemir T, Schuster M E, Senyshyn A, et al. The Haber–Bosch process revisited: on the real structure and stability of “ammonia iron” under working conditions[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(48): 12723-12726.
- [19] Božo M G, Mashruk S, Zitouni S, et al. Humidified ammonia/hydrogen RQL combustion in a trigeneration gas turbine cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 227: 113625.
- [20] Service R. Ammonia—a renewable fuel made from sun, air, and water—could power the globe without carbon. *Science* 2018.
- [21] João Sousa Cardoso, Valter Silva, Rodolfo C. Rocha, et al. Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines, [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126562.
- [22] 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.
- [23] 郭朋彦,刘子川,邵方阁等. 氨氢清洁无污染无碳燃料在发动机上的应用分析[J]. *汽车实用技术*, 2016, No.223(04):81-84. DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2016.04.028.
- [24] Dimitriou P, Javaid R. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11): 7098-7118.
- [25] Comotti M, Frigo S. Hydrogen generation system for ammonia–hydrogen fuelled internal combustion engines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(33): 10673-10686.
- [26] 陈达南,李军,黄宏宇等. 氨燃烧及反应机理研究进展[J]. *化学通报*, 2020, 83(06):508-515. DOI:10.14159/j.cnki.0441-3776.2020.06.004.
- [27] 郭朋彦,申方,王丽君等. 氨燃料发动机研究现状及发展趋势[J]. *车用发动机*, 2016, No.224(03):1-5+13.
- [28] 夏鑫, 蔺建民, 李妍等. 氨混合燃料体系的性能研究现状[J]. *化工进展*, 2022, 41(05):2332-2339. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1131.
- [29] Cornelius W, Huellmantel L W, Mitchell H R. Ammonia as an engine fuel[J]. *SAE Transactions*, 1966: 300-326.
- [30] Gray Jr J T, Dimitroff E, Meckel N T, et al. Ammonia fuel—engine compatibility and combustion[J]. *SAE Transactions*, 1967: 785-807.
- [31] Duynslaegher C. Experimental and numerical study of ammonia combustion[J]. University of Leuven, 2011: 1-314.
- [32] Lee D, Song H H. Development of combustion strategy for the internal combustion engine fueled by ammonia and its operating characteristics[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32: 1905-1925.
- [33] Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Combustion characteristics of ammonia in a modern spark-ignition engine[R]. *SAE Technical Paper*, 2019.
- [34] Mounaïm-Rousselle C, Bréquigny P, Dumand C, et al. Operating limits for ammonia fuel spark-ignition engine[J]. *Energies*, 2021, 14(14): 4141.
- [35] Zhu D, Shu B. Recent Progress on Combustion Characteristics of Ammonia-Based Fuel Blends and Their Potential in Internal Combustion Engines[J]. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*, 2023: 20-20.
- [36] Valera-Medina A, Amer-Hatem F, Azad A K, et al. Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(9): 6964-7029.
- [37] Mørch C S, Bjerre A, Gøttrup M P, et al. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system[J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 854-864.
- [38] Frigo, S., Gentili, R., Doveri, N., Ammonia Plus Hydrogen as Fuel in a S.I. Engine Experimental Results [J], *SAE Technical Paper*, 2012, 2012-32-0019.
- [39] Frigo S, Gentili R. Analysis of the behaviour of a 4-stroke Si engine fuelled with ammonia and hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(3): 1607-1615.
- [40] Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Performance and emissions of an ammonia-fueled SI engine with hydrogen enrichment[R]. *SAE Technical Paper*, 2019.
- [41] Dinesh M H, Pandey J K, Kumar G N. Study of performance, combustion, and NOx emission behavior of an SI engine fuelled with ammonia/hydrogen blends

- at various compression ratio[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(60): 25391-25403.
- [42] Ji C, Xin G, Wang S, et al. Effect of ammonia addition on combustion and emissions performance of a hydrogen engine at part load and stoichiometric conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(80): 40143-40153.
- [43] Gu Xin, Changwei Ji, Shuofeng Wang, et al. Effect of different volume fractions of ammonia on the combustion and emission characteristics of the hydrogen-fueled engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(36): 16297-16308.
- [44] Xin G, Ji C, Wang S, et al. Experimental study on the effect of hydrogen substitution rate on combustion and emission characteristics of ammonia internal combustion engine under different excess air ratio[J]. *Fuel*, 2023, 343: 127992.
- [45] Gu Xin, Changwei Ji, Shuofeng Wang, et al. Experimental study on the load control strategy of ammonia-hydrogen dual-fuel internal combustion engine for hybrid power system[J]. *Fuel*, 2023, 347: 128396.
- [46] Pochet M, Truedsson I, Foucher F, et al. Ammonia-Hydrogen Blends in Homogeneous-Charge Compression-Ignition Engine[J]. *SAE Tech. Pap*, 2017: 24-0087.
- [47] Pochet M, Jeanmart H, Contino F. A 22: 1 compression ratio ammonia-hydrogen HCCI engine: combustion, load, and emission performances[J]. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2020, 6: 43.