

氨气在内燃机中的应用与 NO_x 排放控制技术

田杰¹, 熊勇², 程勇^{1*}, 王兆宇³

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061;
2. 比亚迪汽车工业有限公司汽车工程研究院, 广东 深圳 518119;
3. 龙口中宇热管理系统科技有限公司, 山东 龙口 265700

摘要:针对氨气燃烧时存在的点火困难、火焰速度低、可燃性范围窄、 NO_x 排放高的问题,综述氨燃料特性及制备方法,总结氨气在内燃机上的应用,分析氨气燃烧产生 NO_x 排放的机理,探讨降低 NO_x 排放的措施,并提出氨燃料内燃机的发展方向。结果表明:氨燃料的自然温度较高,火焰传播速度较慢,点火延迟较长,通过优化燃烧控制以及与其他燃料的混合,能够提高其燃烧性能并减少环境污染;氨气可以通过化学合成、生物质转化和水的电解等多种方法生产,电化学合成氨是目前最有前途的合成氨气途径之一;混合燃烧和富氧燃料可以提高氨气的燃烧速度;氨燃烧时产生的 NO_x 主要来自氨气中的氮元素,通过选择性催化还原、分级燃烧、中度或高强度低氧稀释燃烧等技术,可以显著减少氨燃料燃烧过程中 NO_x 排放,改善氨气燃烧对环境的影响。

关键词:氨燃烧;内燃机;燃烧特性; NO_x 排放

中图分类号:TK401

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0001-15

引用格式:田杰,熊勇,程勇,等.氨气在内燃机中的应用与 NO_x 排放控制技术[J].内燃机与动力装置,2025,42(4):1-15.

TIAN Jie, XIONG Yong, CHENG Yong, et al. Overview of the application of ammonia in internal combustion engines and NO_x emission control technologies[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025,42(4):1-15.

0 引言

随着全球人口增长、科技进步和工业发展,能源需求持续上升。当前,全球能源消耗的 90% 以上依赖于不可再生能源,其中石油约占 40%,煤炭约占 35%,天然气约占 20%。虽然化石燃料的使用推动了人类社会的发展,但其燃烧产生的污染物(如 CO 、 NO_x 、HC)和温室气体(如 CO_2)对环境 and 人类健康构成了严峻挑战^[1]。研究表明:到 2050 年,全球平均气温将升高约 1.0 °C,若温室气体排放继续增加,升温幅度可能达到 1.5 °C^[2]。为应对气候变化,2016 年《巴黎协定》的目标是将本世纪全球气温上升控制在 2 °C 以内,并力争将温度上升幅度限制在 1.5 °C 以内^[3]。中国承诺到 2030 年实现碳排放峰值,2060 年实现碳中和^[4]。

当前内燃机仍依赖石油、天然气等不可再生能源^[5]。自 1973 年石油危机以来,全球石油储量日益减少,但需求持续增加^[6]。我国的可再生能源仅占一次能源消耗的 4.53%,煤炭和石油等化石燃料的消费比例超过 77.34%。内燃机的燃料从化石燃料向可再生能源过渡面临诸多挑战。为实现节能减排,开发无碳替代燃料、减少一次能源消耗已成为全球发展趋势^[7-8]。因此,寻找取代汽油和柴油的替代燃料尤

收稿日期:2024-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52376118)

第一作者简介:田杰(1996—),男,河南周口人,博士研究生,主要研究方向为等离子体辅助燃烧,E-mail:tianj96t@163.com。

*通信作者简介:程勇(1963—),男,石家庄人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机工作过程测试及控制技术、等离子体辅助燃烧等,E-mail:cysgd@sdu.edu.cn。

为重要^[9]。选择替代燃料时,应综合考虑其在内燃机中的高输出、高效率、安全性、成本、质量和体积等因素^[10]。探索清洁高效的能源和改善化石燃料燃烧,成为当前研究重点^[11-12]。

氢气和氨气被广泛认为是零碳替代燃料^[13]。氢气具有单位质量热值高、无污染、可循环利用等优点,是理想的清洁能源^[14]。然而,氢气存在能量密度低、储存和运输困难等问题^[15-16]。为确保高效稳定供应氢气,需要先进技术进行氢气的储存和运输^[17]。尽管氢具有巨大潜力,但若实现大规模应用,仍需解决诸多挑战。氨气是一种无碳化合物,纯氨燃料燃烧时不产生 CO_2 ^[18]。氨气作为燃料的研究始于 21 世纪初,氨气适用于压缩点火 (compression ignition, CI) 或火花点火 (spark ignition, SI) 内燃机^[19]。作为氢气的载体,氨气提供更高的储氢密度,并可通过成熟的 Haber-Bosch 法生产^[20]。氨气的生产和运输技术已得到充分发展,全球每年生产和运输的氨气约为 1.8 亿 t,确保了其供应的稳定性。与氢气相比,氨气更易液化、储存和运输,成本较低,氨气作为替代燃料,在内燃机中的应用潜力巨大^[21]。虽然氨燃料的研究取得了显著进展^[22-23],但氨气作为燃料的应用仍面临一些挑战:首先,氨气燃烧需要较高的点火能量,这增加了系统的复杂性和成本^[24];其次,氨气燃烧时可能产生较高的 NO_x 排放,需进一步研究减少 NO_x 排放的技术^[25];此外,氨气燃烧速度低也限制了其在高功率内燃机中的广泛应用^[26]。因此,实现可靠引燃、提高氨混合气的燃烧速度、降低 NO_x 排放,是当前研究的重点^[27]。

本文中综述氨气的物理化学特性、燃烧特性以及制备、储存和运输的最新进展;重点分析氨燃料在内燃机行业的应用和面临的挑战,特别是 NO_x 排放和燃烧速度等问题;讨论降低 NO_x 排放的有效措施,展望氨燃料内燃机的未来发展方向,为氨燃料在内燃机上的应用提供参考。

1 氨燃料特性

1.1 氨气燃料理化特性

氨气是一种无色、有毒且具有强烈刺激性气味的气体,空气中氨的体积分数为 $5 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 时即可被察觉,液氨接触皮肤会引起刺激和严重烧伤^[28]。氨气的自燃温度为 924 K,辛烷值为 110,汽化潜热高,具有优于汽油的抗爆性能^[29]。氨气作为内燃机燃料时,通过提高压缩比,可使内燃机热效率超过 50%,并可以避免爆震^[30]。与传统汽油和柴油相比,氨燃料的体积能量密度较低,约为传统燃料的 1/3,但与氢气和天然气相比,其能量密度至少高 25%,氨气作为燃料可存储更多能量。与氢气相比,氨气的能量密度大(是液氢的 1.5 倍)、易液化(氨在常压下液化温度为 $-33\text{ }^\circ\text{C}$ 或常温下液化压力为 0.9 MPa,氢在常压下液化温度为 $-240\text{ }^\circ\text{C}$)以及储运更为方便(普通液化钢瓶即可,氢气需特殊材料和设备),使用氨气作为燃料时的技术要求大大降低^[31]。此外液氨在汽化过程中吸收大量热量,车辆可利用这一特性实现空调效果^[30]。氨气与其他燃料的性能对比如表 1 所示^[23,32-33]。

表 1 氨气和其他燃料的性能

燃料	储存方法	储存温度/K	储存压力/kPa	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	自燃温度/K	汽化潜热 值/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	低热值/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	辛烷值	爆炸极限 ^① / %	能量密度/ ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	最小点火能 量/mJ
氨气	压缩液体	298	1 030.0	0.602 8	924	1 370.0	18 610	110	16.0~25.0	11 333.0	680.00
氢气	压缩液体	20	102.0	0.071 0						8 539.0	
	压缩气体	298	24 821.0	17.500 0	844	461.0	120 000	130	4.5~75.0	2 101.0	0.02
柴油	液体	298	101.3	0.838 8	503	232.4	42 700		0.7~7.5	36 403.0	0.63
汽油	液体	298	101.3	0.698 3	573	275.0	43 500	90~98	1.4~7.6	31 074.0	0.25
天然气	压缩液体	298	24 821.0	0.187 2	723	522.0	38 100	107	5.0~15.0	8 517.0	0.32
甲醇	液体	298	101.3	0.792 0	723	1 168.0	22.7	109	6.7~36.0	16.0	0.14
二甲醚	压缩液体	298	606.3	0.792 0	508	468.0	28.8	30	2.7~32.0	23.8	0.30

①混合物中燃料的体积分数。

1.2 氨气的燃烧特性

与柴油、汽油、氢气、天然气等常见燃料相比,氨燃料的自燃温度更高,要求在压燃式内燃机中使用更高的压缩比。此外,氨燃料的最小点火能量也较高,必须采用高能点火方式才能在点燃式内燃机中有效点燃。氨气的爆炸极限为16%~25%(体积分数)^[23],相比氢燃料,其可燃范围较窄,不利于内燃机的稀薄燃烧。氨气的火焰传播速度缓慢,仅为汽油的1/6左右,这可能导致发动机燃烧不完全。由于氨气具有较高的汽化潜热,液氨在内燃机内燃烧时吸收大量热量,显著降低燃烧温度,恶化燃烧状态。因此,采用适当的燃烧控制技术确保有效燃烧是利用氨燃料能量的关键。

氨气的层流火焰燃烧速度(laminar burning velocity, LBV)直接影响燃烧效率和稳定性,是评估其燃烧特性的重要参数之一^[34]。氨气的低层流火焰燃烧速度容易导致吹熄现象,抑制了气缸内温度扩散,进而降低内燃机功率。Hayakawa等^[35]研究发现:在不添加任何添加剂的旋流燃烧器中,氨气的层流燃烧速度较慢。Mei等^[36]研究发现:富氧条件下,层流火焰传播速度得到加速,氧含量的增加有助于减小浮力效应,并加速火焰传播。标准大气压(101.3 kPa)、热力学温度为298 K时,不同当量比 φ 下 $\text{NH}_3/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合物的LBV结果如图1所示^[36-39]。

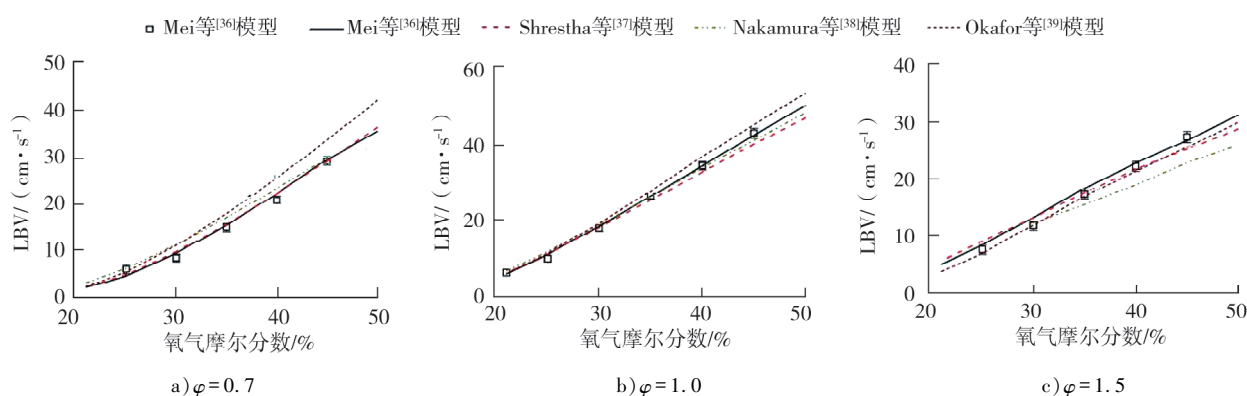


图1 不同当量比下 $\text{NH}_3/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合物的LBV结果

为了改善氨气的燃烧特性,常将其与氢气、甲烷等燃料混合。燃料混合可以克服氨气的可燃性范围窄、点火能量高、火焰传播速度慢等问题,同时减少碳氢燃料产生的 CO_2 排放。Wu等^[40]研究了 NH_3/H_2 混合气的层流燃烧速度,结果表明:氢气比例增加时,火焰速度呈指数级增加。Li等^[41]在中等压力下也发现,增大混合气中氢气比例使层流燃烧速度增大。Bao等^[42]对 NH_3 、 NH_3/H_2 和 NH_3/CH_4 的燃烧速度进行了数值模拟,发现加入氢气和甲烷显著提高了氨混合气的燃烧速度。Elbaz等^[43]研究了 $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_6$ 混合物的层流燃烧速度,发现丙烯有助于促进自由基的生成,提高氨气的燃烧速度。在不同的燃料混合物和条件下,精确计算和测量层流燃烧速度是一个复杂的过程。Üstün等^[44]提出通过机器学习方法可预测 NH_3/H_2 混合气的层流火焰速度,利用高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)和神经网络(neural network, NN)能够以较高精度预测氨燃料的燃烧特性。

除了层流火焰速度,氨气的点火延迟时间(ignition delay time, IDT)也是其燃烧特性的重要参数。点火延迟受温度、压力、混合气浓度等因素的影响,直接影响燃烧过程的控制和燃烧效率。较短的IDT有助于提高燃烧效率和功率输出,较长的IDT可能导致燃烧不完全,降低燃烧效率。为了降低氨混合气的IDT,通常将氨气与其他燃料混合。

Da Rocha等^[45]发现,氨燃料的火焰传播速度较慢,但通过添加氢气,火焰传播速度可显著提高,但导致 NO_x 排放增加。Lu等^[46]通过数值模拟研究了甲醇对氨混合气燃烧和排放的影响,发现甲醇的加入大大提高了氨燃料的化学反应性,并显著缩短了IDT。Jin等^[47]在不同压力和温度条件下研究了二甲醚(dimethyl ether, DME)和 NH_3 混合燃料的IDT,结果表明,随着混合燃料中DME比例的增加,不同DME含量和压力下 $\text{NH}_3/\text{DME}/\text{O}_2/\text{Ar}$ 混合物的IDT显著缩短。Pochet等^[48]通过试验研究发现,当氢气摩尔分

数大于 10% 时,氨氢混合燃料的 IDT 显著缩短。Liao 等^[49]的研究也证实,氢气有助于加速氨气的点火过程。

综上所述,氨气作为内燃机燃料具有独特的燃烧特性,尽管存在火焰传播速度慢、点火延迟长等挑战,但通过优化燃烧控制以及与其他燃料的混合,能够有效提高其燃烧性能并减少环境污染,为氨气作为绿色燃料的应用提供了可行性。

1.3 氨气的制备与储存

1.3.1 氨气制备

氨气可通过多种方式以可承受的成本生产,既可以利用化石能源(如天然气和煤炭)、生物质,也可使用风能、太阳能等可再生能源生产^[50]。目前最常见的制氨方法是 Haber-Bosch 工艺,该工艺将氮气和氢气(主要通过天然气热分解获得)在高温高压(温度 723~823 K、压力为 15~20 MPa)条件下催化生成氨气^[22]。该工艺使用铁基催化剂,反应物以 3:1 的比例结合生成氨气。尽管单次反应效率仅为 15%~25%,但未反应气体可循环利用,最终转化率可达 97%^[23]。

Haber-Bosch 工艺的难点在于氮分子稳定性极高, $N \equiv N$ 的键能达到 911 kJ/mol,需要高温才能裂解^[51]。尽管如此,高压环境有助于推动反应向生成氨气的方向进行。为了提高催化效率,研究者开发了碳支撑的钌(Ru)催化剂,这种催化剂在较低温度下具有更高的反应活性,且节能效果显著^[52]。目前,氨气可分为棕氨、蓝氨和绿氨三种类型^[53]。棕氨通过化石能源制备,蓝氨通过碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)技术减少 CO_2 排放。绿氨使用风能和太阳能等可再生能源,通过电解水生产氢气与氮气进行合成,能够实现零碳排放^[54]。

近年来,电化学合成氨气、光催化合成氨气等绿色制氨方法获得了广泛关注。利用可再生能源生产氢气后与氮气反应合成氨或者直接由氮气与水反应生成氨的技术路线,可再生能源合成氨气路线示意如图 2 所示。电化学合成氨气方法虽然还处于初步阶段,但其能效比 Haber-Bosch 工艺提高约 20%^[55],有望在未来取代传统工艺。

1.3.2 氨气的储存与运输

氨气可在低温或高压下储存。在常温下,氨气可在压力大于 860 kPa 的条件下液化。低温液化氨可减少储存空间,单位容积的储氨量约为加压储存的 15 倍^[56]。因此,低温储存方法在大规模储氨时更加高效。储存氨气的容器通常采用碳钢内衬,并在容器外部配置钢材或混凝土保护层,能够有效应对氨气的腐蚀性。此外,隔热层有助于维持储存温度的稳定,减少环境影响。

氨气还可储存在塑料油箱中,便于运输。现有的加油站设施经简单改造即可满足液氨加注需求^[57]。氨气的能量密度高于氢气和天然气,同等工况下氨气储存箱可以更小,节省空间并增加装载质量。这使得氨气在作为燃料时具有明显的优势。氨气作为一种零碳燃料,正受到越来越多的关注,全球氨气市场预计将在未来几年内增长约 3%^[58]。此外,氨气运输已得到良好的基础设施支持,多国已建立公路、铁路或管道运输网络。因此,氨气不仅在储存和运输上具有便利性,还具备较高的能量密度和成熟的安全处理技术,成为备受关注的绿色燃料选项。

综上所述,氨气作为燃料具有储存方便、无需改造基础设施、高能量密度、成熟的安全处理程序等优点,成为一种具有产业化潜力的无碳燃料。

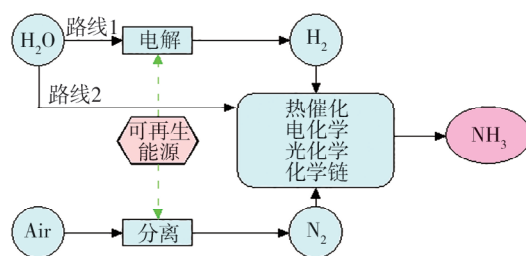


图 2 可再生能源合成氨气路线

2 氨气在内燃机上的应用

目前关于氨气作为内燃机燃料的研究,主要集中在以下三个方向:氨气及其混合燃料燃烧的化学反应动力学、氨气在内燃机中的燃烧试验研究以及氨气燃烧产生的排放物研究。

2.1 纯氨燃料内燃机

氨气作为内燃机单一燃料有诸多燃烧问题:如高自燃温度(点火困难)、低火焰传播速度、窄可燃性极限和高汽化潜热等。因此,研究工作主要集中在提高内燃机的压缩比。早在1965年,Cornelius等^[59]研究了氨气在SI内燃机中的燃烧,纯氨燃料内燃机的主要缺点包括燃烧温度低、不稳定性高、燃烧室腐蚀等。Uddeen等^[60]发现,单火花点火时存在较低的缸内压力和较长的燃烧持续时间,增加了燃烧不稳定性,多个点火点可以显著提高燃烧稳定性和输出功率,然而,这也导致 NO_x 排放较高。不同火花塞位置及起火示意如图3所示,不同火花点火情况下指示平均有效压力 p_{IME} 和指示平均有效压力循环波动率 V_{CO} 和峰值压力 p_{max} 如图4所示,不同点火情况下、不同时刻火花点火产生的图像如图5~9所示。Mounaim-Rousselle等^[61]研究了氨气在高压压缩比火花辅助压燃单缸内燃机中的表现,结果表明:氨气可在较大工作范围内使用,但实际应用中仍需解决燃烧稳定性、排放控制、燃料成本等问题。

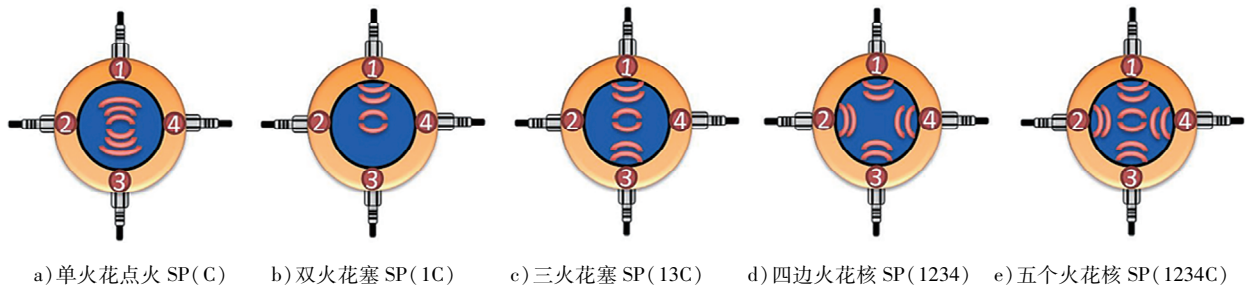


图3 不同火花塞位置及起火示意图

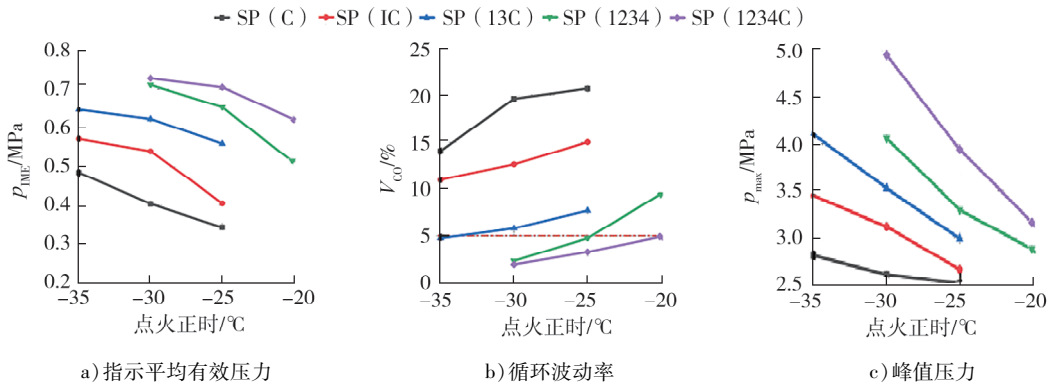


图4 不同火花点火情况下的指示平均有效压力、指示平均有效压力循环波动率、峰值压力随点火时刻的变化

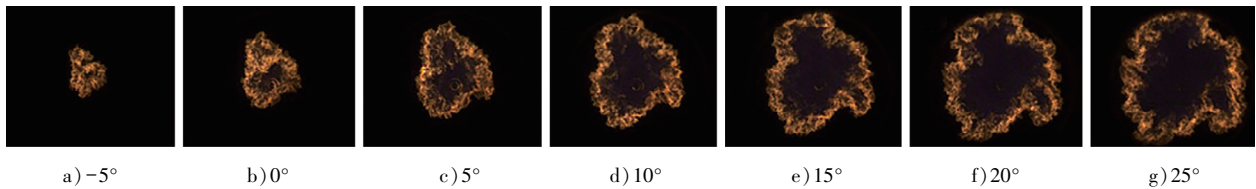


图5 SP(C)在不同时刻的火花图像

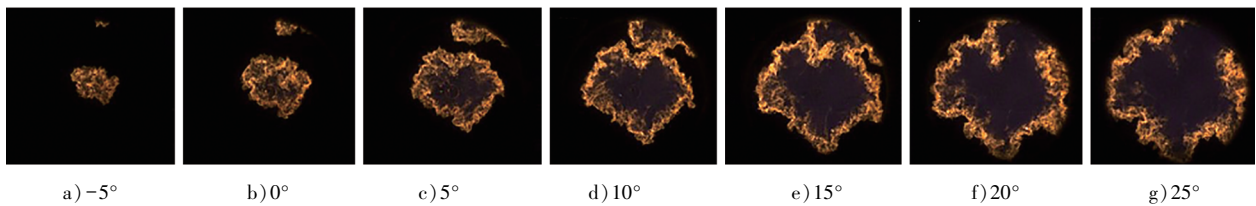


图6 SP(1C)在不同时刻的火花图像

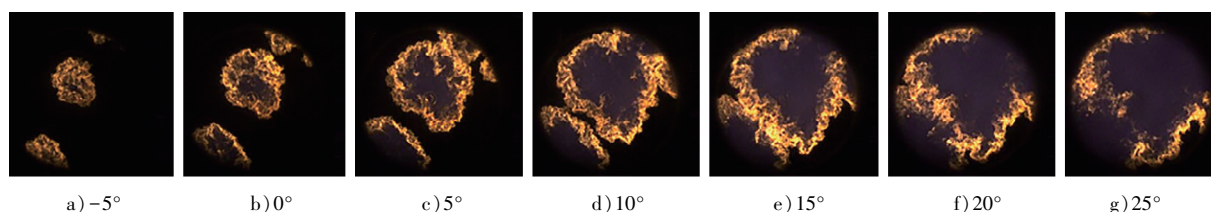


图 7 SP(13C)在不同时刻的火花图像

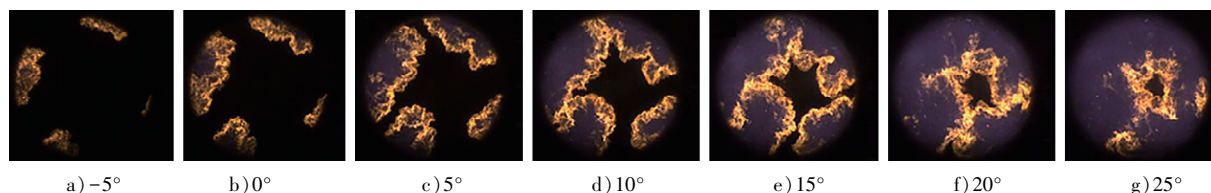


图 8 SP(1234)在不同时刻的火花图像

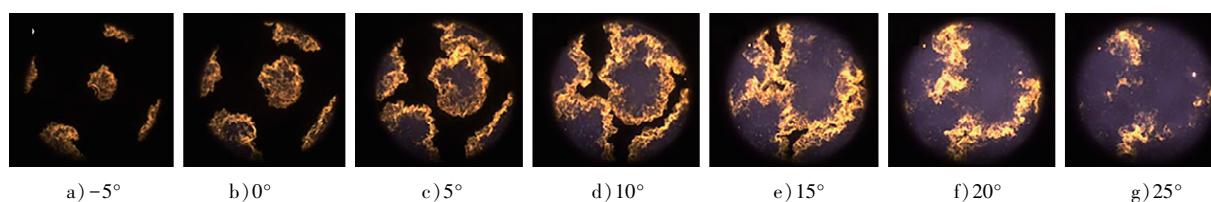


图 9 SP(1234C)在不同时刻的火花图像

由于氨气不适合压缩点火,关于纯氨气压缩点火内燃机的研究较少。尽管在特定条件下可以实现纯氨燃烧,如 Meng 等^[62]研究了定容燃烧室中的三维计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模型,但要求内燃机有非常高的压缩比,实际应用挑战较大。总体而言,氨气燃烧的挑战包括点燃难度和高压比带来的爆震风险,提高氧气浓度导致 NO_x 排放增加。因此,纯氨燃料内燃机主要集中在实验室研究阶段,实际应用需要进一步优化燃烧系统。

2.2 混合氨燃料内燃机

氨气与其他助燃燃料混合燃烧是提高氨气内燃机性能的有效途径。研究表明,使用氨气与柴油、汽油、天然气等混合燃烧可改善氨气的燃烧特性。Zamfirescu 等^[30]分析了氨气作为内燃机燃料的可行性,认为氨气可以与柴油、汽油、氢气、天然气等混合使用,从而实现较好的燃烧性能。

2.2.1 氨气-柴油混合燃料内燃机

氨气与柴油或生物柴油混合燃烧被认为是替代碳基燃料的良好选择,能够减少温室气体(如 CO_2)排放,同时保持较高的动力性能。Reiter 等^[63]研究了氨-柴油混合燃料内燃机,发现该混合燃料能够达到与纯柴油相当的动力输出。Nadimi 等^[64]研究了氨气替代比对氨气/柴油双燃料内燃机的影响。研究结果表明:增加氨气比例可减少 CO_2 、 CO 和颗粒物(particulate matter, PM)排放,但 NO_x 排放有所增加。Mi 等^[65]在氨气-柴油双燃料内燃机中采用一种柴油引燃喷射策略,研究结果表明:该策略可以改善燃烧和排放特性,降低氨气排放、减少温室气体排放。Jin 等^[66]通过仿真和试验研究发现,优化柴油喷射策略可以在 50%氨气替代比例下实现高热效率和低温室气体排放。

尽管氨气能够改善燃烧特性和减少温室气体排放,但是增加混合燃料中氨气的比例导致 NO_x 排放增加。如何在氨气与柴油/生物柴油的混合燃料中找到最佳比例,确保燃烧稳定性,是当前研究的重点。

2.2.2 氨气-汽油混合燃料内燃机

提高汽油机的压缩比可以提高燃油经济性,但过高的压缩比会增加爆震风险。氨气作为无碳燃料,具有较强的抗爆性能,能有效抑制汽油机的爆震。Liu 等^[67]在单缸汽油机火花诱导压缩点火模式下进行试验,研究了氨气添加对爆震抑制、燃烧特性、热效率和排放性能的影响,研究表明:氨气混合汽油可以提高内燃机热效率并抑制爆震,但同时 NO_x 排放有所增加。Ryu 等^[68]发现,氨气-汽油混合燃料的 NO_x 排

放明显高于纯汽油,但 CO 排放降低。氨气在汽油中的溶解度较低,容易导致燃料分层,可能影响混合燃料的性能。受乙醇-汽油内燃机的启发,Haputhanthri等^[69]尝试使用乙醇和甲醇提高氨气在汽油中的溶解度,探讨了氨气/汽油混合燃料的排放性能,结果表明:混合燃料中乙醇或甲醇的体积分数为10%时,氨气的溶解度可提高到11%。

2.2.3 氨气-甲烷混合燃料内燃机

天然气的主要成分是甲烷(CH_4),氨气和甲烷具有相似的密度、黏度、热容等特性,因此在混合燃烧应用中很容易将它们结合。氨气和甲烷的混合燃烧在清洁能源研究中具有潜力。Wu等^[70]研究了氨气-天然气双燃料内燃机,提出了一种预燃室点火系统与稀燃技术相结合的方法,用于研究氨气在高压中速四冲程船用天然气内燃机上的可行性,结果表明:预燃室中氨混合物的热解促进了射流火焰的形成,增强了贫燃条件下的火焰传播,但导致 N_2O 排放增加。Kurien等^[71]在气体燃料火花内燃机中进行了氨气-甲烷燃烧试验,研究了氨气质量分数(从0增加到60%)、内燃机负荷(从 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 到 $16\text{ N}\cdot\text{m}$)对内燃机特性和燃烧稳定性的影响,研究结果发现:当燃料中的氨气增加时,燃料低热值和火焰传播速度降低,但在较高负荷下,氨气替代甲烷能够改善燃烧稳定性和内燃机性能。因此,氨气-甲烷混合燃料在火花点火内燃机中具有一定的应用前景。

未来的研究应进一步探索减少氨气燃烧过程中 N_2O 排放的方法以及氨气和甲烷混合燃料在不同负荷和质量分数下的燃烧特性,并寻找最佳的组合方式以实现更高效、更可持续的燃烧过程。这将有助于推动氨气和甲烷混合燃料在火花点火内燃机等领域的应用,并为清洁能源技术的发展做出贡献。

2.2.4 氨气-二甲醚混合燃料内燃机

二甲醚(DME)是一种结构简单的醚,在常温常压下呈气态,属于可再生能源。DME具有高的十六烷值(55~60)、低点火温度和短点火延迟时间等特点,是替代柴油等不可再生能源的理想选择^[72]。DME对低活性燃料有促进作用,尤其对氨燃烧具有良好的促进效果。此外,DME与氨气的混合物具有较高的稳定性^[47]。因此,氨气-DME混合燃料是一种前景广阔的内燃机替代燃料^[73]。

Ryu等^[74]研究了不同混合比的氨气和二甲醚混合气(包括100% DME、DME的质量分数60%- NH_3 的质量分数40%和DME的质量分数40%- NH_3 的质量分数60%) 在压燃式内燃机的燃烧和排放特性,研究结果表明:氨气与DME混合可以改善内燃机的燃烧特性,但加入氨气可能导致 CO 、 HC 和 NO_x 排放增加。

Gross等^[75]开发了一种高压混合系统,将液态氨与DME混合,研究了在压燃式内燃机上使用氨与DME混合物(NH_3 的质量分数20%-DME的质量分数80%和 NH_3 的质量分数40%-DME的质量分数60%)的燃烧和排放特性,研究结果表明:由于氨具有高自燃特性和低燃烧速率,导致点火延迟增加,使得内燃机无法在高负荷下稳定运行。此外,加入氨降低了燃烧压力和温度,导致 CO 和 HC 排放增加,同时 NO_x 排放也有所升高,但是碳烟排放非常低。

二甲醚的爆炸极限较低,易发生爆炸,并且需要特质钢瓶进行储存;氨气与二甲醚的混合燃烧导致 CO 和 HC 排放较高,这些问题限制了二甲醚的应用。未来的研究可以致力于解决二甲醚爆炸和储存问题,以及开发有效的后处理技术来降低 CO 和 HC 排放。

2.2.5 氨气-氢气混合燃料内燃机

氨气燃烧速度较慢,存在燃烧效率低和火焰不稳定等问题。氢气是一种清洁能源,燃烧产物仅为水,其热值是汽油的3倍,与氨气混合时能够改善氨气的燃烧特性。为了提高氨燃料的燃烧速率、火焰传播性能和点火性能,氢气常被用作助燃剂。氨气和氢气的混合燃烧不产生 CO_2 ,但氨气中的氮元素会增加 NO_x 排放。尽管如此,氢气的加入能有效提高燃烧速度,拓宽燃烧极限,且对提高氨燃料内燃机的性能有显著效果。

Lhuillier等^[76]在一台火花点火内燃机上研究了不同当量比和进气压力对氨气燃烧的影响,研究表明:适量添加氢气可以提高氨燃料内燃机的指示压力和燃烧效率;氢气作为点火助燃剂,在提高燃烧稳定性和发动机性能方面效果显著,但加入氢气导致 NO_x 排放增加,需要进一步研究减排措施。Dinesh等^[77]

的研究发现,添加氢气增加了缸内压力和温度,提高了燃烧效率,但 NO_x 排放增加。

Khateeb 等^[78]使用 Chemkin 软件研究了不同氢气比例对氨气 IDT 的影响,结果显示:增加混合气中氢气的比例能显著降低 IDT,通过增加 H 和 OH 自由基浓度,加速氨气消耗。这表明氢气能够有效改善氨气的点火特性。Zhang 等^[79]研究了富氢重整油对氨燃烧的影响,发现富氢重整油能提高缸内压力和燃烧效率,增强燃烧稳定性。Li 等^[80]在高压压缩比的光学火花点火内燃机中,研究了添加氢气对氨燃料特性的影响,结果表明:随着氢氨质量比 χ 增加,指示热效率先增大后减小;当 $\chi \approx 7.5\%$ 时,指示效率最高;当 $\chi < 10\%$ 时,内燃机的燃烧稳定性得到改善。证明了适当的氨氢比对内燃机燃烧温度和提高热效率有积极的影响。

引入氢气改善了内燃机燃烧,但如果采用氢瓶储氢,增加了整车布置及车辆使用复杂性。氢气作为清洁的能源载体和燃料,可以轻松转化为氢气和氮气,形成无碳的氢源^[81],燃烧后只排放水和氮气。因此,在车辆应用的情况下,氢气可以在车上合成并与氨气一起直接注入到内燃机中。针对纯氨技术路线,可以利用排气余热将氨气热解为氢气和氮气,再供给内燃机燃烧,实现废热高效利用。或者利用温差发电进行电解氨气制氢。温差发电技术利用温度差异产生的热电效应生成电能,可以将废热转化为可用的电力,并用于电解氨气制取氢气。

综上所述,适量添加氢气能够显著提高氨燃料内燃机的燃烧速度、火焰温度及稳定性。氨-氢系统中氢气的生产、储运成本较高,并存在一定的安全隐患,这在一定程度上制约了氢气在氨燃料内燃机中的应用。通过车载氨裂解技术,仅需携带氨燃料即可现场制氢,显著简化了氢瓶储氢带来的整车布置和使用复杂性。尽管氢气在提高燃烧性能方面具有巨大潜力,但仍需解决成本和安全问题,才能推动氨燃料内燃机技术的实际应用。

2.2.6 氨气与其他替代燃料混合内燃机

为了进一步提高氨燃料的燃烧效率并减少 NO_x 排放,研究者尝试将氨气与其他替代燃料混合。Wang 等^[82]通过数值模拟研究了氨气-甲醇混合燃料的燃烧特性,结果显示:加入甲醇能够降低废气中的未燃烧氨气和 N_2O 排放,提高燃烧效率。Lu 等^[45]研究发现,添加甲醇可以显著提高氨气的化学反应活性,并降低 NO_x 排放,当量比从 0.8 增至 1.4 时, NO_x 排放可减少约 80%。Pelé 等^[83]在火花点火缸内乙醇喷射内燃机上研究了不同进气压力下的均质喷射和分层喷射策略对乙醇-氨气混合燃料的燃烧和排放特性的影响,研究表明:乙醇能提高燃烧效率和稳定性,但增加 NO_x 排放;与分层喷射策略相比,均质喷射可以显著降低 NO_x 排放。

2.3 氨气燃烧的化学反应动力学

氨气燃烧的化学反应机理也是研究的关键之一。Singh 等^[84]提出了一种包含 32 种组分和 259 个反应的氨-氢-空气反应模型,对氨-氢-空气混合物的热释放速率、火焰速度、OH 敏感性、反应途径分析以及排放特性进行了化学动力学建模研究,结果表明:氨燃料中加入氢气能够增加自由基 H、O 和 OH 的浓度,加速氨气的燃烧过程,改善燃烧和排放特性。Vijrumbana 等^[85]通过比较不同反应模型,发现燃料分级能够有效降低 NO_x 和 CO 的排放。研究者还通过模拟研究氨气与甲烷、乙醇等燃料的混合燃烧,进一步揭示了其燃烧反应机理,为优化燃烧过程和减少污染物排放提供了理论依据。

氨气作为内燃机燃料在提高燃烧效率、减少温室气体排放方面具有巨大潜力。通过与其他燃料的混合,氨气可以克服其在纯燃烧中存在的一些技术难题。然而,氨气燃料内燃机的推广仍面临燃烧稳定性、 NO_x 排放控制和燃料供应等挑战。未来的研究应集中在优化燃烧系统、提高混合燃料的性能、开发排放控制技术等方面,推动氨气在内燃机中的应用。

3 氨燃料发机机的 NO_x 生成机理与解决措施

因为氨气不含碳元素,氨气作为内燃机燃料的主要目标是减少 CO_2 排放。然而,氨气的含氮量较高,导致 NO_x 排放增加^[86],氨气燃烧过程中产生的 N_2O 的全球升温潜力约为 CO_2 的 265~298 倍,其排放可

能抵消 CO_2 的减排效应^[70,87]。此外, NO_x 引发光化学烟雾、雾霾、酸雨等现象,对环境和人体健康产生负面影响。因此,研究 NO_x 生成机理并采取有效措施降低 NO_x 排放,具有重要的环保意义。

3.1 氨燃料氮氧化物生成机理

氨气作为燃料燃烧时产生的 NO_x 主要来自氨气中的氮元素^[88]。 NO_x 的排放通常包括 N_2O 、 NO 和 NO_2 ,氨作为燃料时, NO_x 的生成机理以燃料型为主导。燃烧过程中的 NO_x 生成可以分为3种途径。

3.1.1 热力型 NO_x 生成途径

在高温环境下(温度高于1 800 K), N_2 与 O_2 反应生成 NO 。这是传统碳氢燃料(如柴油、汽油)燃烧时的主要 NO_x 生成途径。

3.1.2 快速型 NO_x 生成途径

在燃烧过程中,碳氢化合物(如 CH_x)与空气中的氮气发生反应,形成氢氰酸(HCN),进而生成 NO_x 。这种途径通常发生在燃烧温度较低的区域,如内燃机的冷启动阶段。

3.1.3 燃料型 NO_x 生成途径

氨气等含氮燃料在高温下燃烧时,氮元素与氧气反应,生成 NO 和 NO_2 。氨气燃烧的火焰温度较低,且缺乏 CH 基团,热力型 NO_x 和快速型 NO_x 几乎可以忽略不计。氨气燃烧产生的 NO_x 主要来自燃料中的氮。气相氧化和非均匀氧化过程会产生氮化合物,如 HCN 和 NH_3 ,最终转化为 NO_x 。

氨燃料的燃烧机制中,氮元素在氧化过程中生成 NO 和 NO_2 ,且此过程受燃烧条件 and 环境因素的影响。为了降低 NO_x 排放,需优化燃烧过程或采用催化转化等手段。

3.2 氨燃料氮氧化物排放控制措施

3.2.1 选择性催化还原

选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术是减少 NO_x 排放的有效方法之一。通过催化剂在温度为300~420℃时将 NO_x 还原为无害的氮气和水蒸气。SCR技术在减少 NO_x 排放方面具有高效性,且可以利用氨燃料中未燃烧的氨气作为还原剂。

Sun等^[7]通过模拟方法研究了SCR后处理技术在降低氨气-柴油双燃料内燃机中 NO_x 和氨气排放性能,研究发现,通过调整SCR的操作条件(如添加氧气或空气),可以显著降低 NO_x 和未燃氨气的排放。Oh等^[89]在一台氨气-天然气双燃料内燃机上研究了使用SCR来减少 NO_x 的可行性,结果表明,未燃氨气被完全用于减少内燃机排气中剩余的 NO 。

3.2.2 燃烧过程分级

分级燃烧是一种有效的低 NO_x 排放技术,其通过两阶段燃烧控制来减少 NO_x 排放。第一阶段在富燃条件下进行,以抑制 NO_x 生成;第二阶段提供额外空气,确保第一阶段燃烧产生的氢气完全燃烧。研究显示,分级燃烧能够显著减少 NO_x 排放,并提高燃烧效率;多项试验表明,采用分级燃烧技术能有效减少 NO_x 的生成^[90-93]。

3.2.3 中度或高强度低氧稀释燃烧技术

中度或高强度低氧稀释(moderate or intense low-oxygen dilution, MILD)燃烧技术是一种在中度或高强度低氧稀释条件下运行富氧燃烧过程的新技术。MILD燃烧技术通过强烈的缸内再循环稀释反应物,保持温度场均匀分布,有效降低 NO_x 排放^[94]。MILD燃烧在低氧稀释条件下运行,能够提高火焰稳定性和燃烧效率。研究发现:MILD燃烧技术能显著降低氨燃料的 NO_x 排放,尤其是在添加水蒸气的情况下, NO_x 排放进一步减少^[95]。这项技术在氨气燃烧中具有广泛的应用前景。

3.2.4 其他方法

除了上述技术,还可以通过调节燃烧条件和预热温度来降低 NO_x 排放。适当提高氨气的预热温度有助于降低 NO_x 排放,并改善燃烧稳定性^[96]。在高压条件下,羟基自由基浓度降低, NO 生成速率也随之减缓^[97]。此外,增加氨气流量也能优化燃烧过程,从而降低 NO_x 的排放。

综上所述,通过选择性催化还原、分级燃烧、MILD燃烧等技术,可以显著减少氨燃料燃烧过程中 NO_x 的排放,改善氨气燃烧对环境的影响。这些技术在未来的氨燃料应用中具有重要的实际意义,有助于推

动清洁能源的可持续发展。

4 氨气作为燃料面临的挑战

氨气作为燃料具备一定的优势和发展潜力,尤其在与其他传统燃料(如汽油、柴油)混合使用时,能够有效降低碳排放。然而,氨气在全面推广应用过程中仍面临许多挑战。

首先,氨气的点火和燃烧性能较差。与传统燃料相比,氨气需要更高的点火温度和压力才能点燃,且燃烧速度较慢,可能导致内燃机效率降低。虽然氨气燃烧后的主要产物为氮气和水,对环境影响较小,但高温下燃烧可能产生较多的 NO_x ,对大气环境造成污染,可能引发酸雨、臭氧空洞等问题。降低氨气燃烧的 NO_x 排放是亟待解决的技术难题。

其次,氨气具有毒性和腐蚀性,对人体和生态环境带来潜在危害。高浓度的氨气对呼吸系统有毒,长时间暴露可能导致咳嗽、急性肺水肿,甚至致命。氨气还对水生生物有毒,溶于水后可使水的 pH 值升高,并形成铵离子,增加环境污染风险。此外,氨气的腐蚀性可能损害内燃机部件,影响其寿命和安全性。

氨气的爆炸风险也是一大挑战。空气中氨气浓度达到 16%~25% 时,遇火源可能发生爆炸。液态氨易于气化,储存和运输过程中存在物理爆炸的风险。因此,安全的氨气储存、运输和使用体系亟需完善。

最后,氨气的生产目前主要依赖于煤化气制氢工艺,产生大量 CO_2 。尽管“绿氢”技术为绿色氨气生产提供了可能,但其高成本仍使得“绿氨”在经济上难以普及。

综上所述,氨气作为燃料的推广面临许多安全性、环境影响以及技术成本等方面的挑战,亟待相关技术的进一步突破。

5 结论与展望

1) 氨气作为一种零碳燃料,在可持续能源领域具有巨大潜力,能够应用于交通工具和工业燃烧等多个领域。通过对氨气的理化性质、燃烧特性、生产方法及储运方式的研究发现,虽然氨气具有较低的燃烧效率和较长的点火延迟,但与其他燃料(如氢气)混合使用可以改善燃烧性能。

氨气在内燃机上的应用包括纯氨内燃机、氨氢混合燃料内燃机等。通过优化混合燃料比例和改进内燃机设计,可以提高燃烧效率并减少排放。尽管氨气燃烧可能产生 NO_x 排放,但采用 SCR 技术、分布式燃烧方式和 MILD 燃烧技术等能够有效降低 NO_x 排放。

然而,氨气的毒性、腐蚀性及燃烧不稳定性等问题依然限制其在内燃机中的广泛应用。因此,解决这些技术难题并提高氨气的燃烧效率是未来研究的重点。

2) 尽管氨气燃料具有高能量密度和较低的环境影响,但其推广仍面临不少技术瓶颈。氨氢混合燃料内燃机的喷射策略、裂解系统的开发及燃烧稳定性等问题,仍需解决。未来的研究应关注氨气的点火特性、燃烧过程中的 NO_x 生成及其优化技术,同时加强尾气处理和氨气混合燃烧的动力学研究。

随着技术进步,氨气作为一种绿色、可持续的替代燃料,有望在解决能源危机和环境污染方面发挥重要作用。通过持续创新和技术改进,未来氨气燃料内燃机将在交通、工业等领域广泛应用,推动“氨经济”的发展。

参考文献:

- [1] YANG R M, LIU Z T, LIU J L. The methodology of decoupling fuel and thermal nitrogen oxides in multi-dimensional computational fluid dynamics combustion simulation of ammonia-hydrogen spark ignition engines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 55: 300–318.
- [2] 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.
- [3] HUANG M T, ZHAI P M. Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with

- far-reaching transitions in the whole society[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(2): 281–286.
- [4] LIU Y, DONG X C, DONG K Y. Pathway to prosperity? The impact of low-carbon energy transition on China's common prosperity[J]. *Energy Economics*, 2023, 124: 106819.
- [5] ZHANG B X, RUBIO M, EGOLFOPOULOS F, et al. Stable combustion of ammonia in an internal combustion engine: a single fuel approach enabled by multi-pulse transient plasma ignition[J]. *Fuel*, 2025, 381: 133502.
- [6] WANG H Y, JI C W, SHI C, et al. Comparison and evaluation of advanced machine learning methods for performance and emissions prediction of a gasoline Wankel rotary engine[J]. *Energy*, 2022, 248: 123611.
- [7] SUN X Y, LI M J, LI J C, et al. Nitrogen oxides and ammonia removal analysis based on three-dimensional ammonia-diesel dual fuel engine coupled with one-dimensional SCR model[J]. *Energies*, 2023, 16(2): 908.
- [8] FAN L L, CHENG F K, ZHANG T T, et al. Visible-light photoredox-promoted desilylative allylation of α -silylamines: an efficient route to synthesis of homoallylic amines[J]. *Tetrahedron Letters*, 2021, 81: 153357.
- [9] LIU Z Y, LIANG X Y, ZHU S H, et al. Numerical study of lubricant film combustion characteristics under ammonia and ethylene premixed environment[J]. *Fuel*, 2025, 381: 133478.
- [10] WANG H Y, JI C W, SHI C, et al. Multi-objective optimization of a hydrogen-fueled Wankel rotary engine based on machine learning and genetic algorithm[J]. *Energy*, 2023, 263: 125961.
- [11] PUGAZHENDHI A, SHARMA A. A detailed survey of recyclable food discards for the production of alternative fuels-present and future aspects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 208: 115005.
- [12] WU P W, XUAN T M, HE Z X, et al. A comparative study on combustion characteristics of PPC and RCCI combustion modes in an optical engine with renewable fuels[J]. *Fuel*, 2025, 381: 133361.
- [13] GUO Q, LIU J, ZHANG L, et al. Explosion limits of binary mixtures of ammonia and additives (hydrogen, natural gas, and diethyl ether)[J]. *Fuel*, 2025, 381: 133519.
- [14] WU Y J, DEVI P B, ANBARASU A, et al. Estimation of the engine performance and emission characteristics of hydrogen feed vehicles with modified injection fuel system[J]. *Fuel*, 2022, 329: 125339.
- [15] WIJAYANTA A T, ODA T, PURNOMO C W, et al. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: comparison review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(29): 15026–15044.
- [16] JANG D, KIM J, KIM D, et al. Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through various water electrolysis technologies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 258: 115499.
- [17] TEOH Y H, HOW H G, LE T D, et al. A review on production and implementation of hydrogen as a green fuel in internal combustion engines[J]. *Fuel*, 2023, 333: 126525.
- [18] CAI T, ZHAO D, GUTMARK E. Overview of fundamental kinetic mechanisms and emission mitigation in ammonia combustion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 458: 141391.
- [19] SONKER M, TIWARY S K, SHREYASH N, et al. Ammonia as an alternative fuel for vehicular applications: paving the way for adsorbed ammonia and direct ammonia fuel cells[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 133960.
- [20] SPATOLISANO E, PELLEGRINI L A, DE ANGELIS A R, et al. Ammonia as a carbon-free energy carrier: NH₃ cracking to H₂[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(28): 10813–10827.
- [21] MACFARLANE D R, CHEREPANOV P V, CHOI J, et al. A roadmap to the ammonia economy[J]. *Joule*, 2020, 4(6): 1186–1205.
- [22] YAPICIOGLU A, DINCER I. A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 103: 96–108.
- [23] 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.
- [24] PANDEY J K, DINESH M H, KUMAR G N. A comparative study of NO_x mitigating techniques EGR and spark delay on combustion and NO_x emission of ammonia/hydrogen and hydrogen fuelled SI engine[J]. *Energy*, 2023, 276: 127611.
- [25] DEVKOTA S, SHIN B J, MUN J H, et al. Process design and optimization of onsite hydrogen production from ammonia: reactor design, energy saving and NO_x control[J]. *Fuel*, 2023, 342: 127879.
- [26] 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.

- [27] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1):109–133.
- [28] CHOROWSKI M, LEPSZY M, MACHAJ K, et al. Challenges of application of green ammonia as fuel in onshore transportation[J]. Energies, 2023, 16(13):4898.
- [29] KAKAVAND A, SAYADI S, TSATSARONIS G, et al. Techno-economic assessment of green hydrogen and ammonia production from wind and solar energy in Iran [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(38):14170–14191.
- [30] ZAMFIRESCU C, DINCER I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(5):729–737.
- [31] WANG M, KHAN M A, MOHSIN I, et al. Can sustainable ammonia synthesis pathways compete with fossil-fuel based Haber-Bosch processes[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(5):2535–2548.
- [32] SALAH M M, MAHMOUDZADEH ANDWARI A, et al. Hydrogen and ammonia fuelled internal combustion engines, a pathway to carbon-neutral fuels future[J]. Future Technology, 2023, 2(2):32–35.
- [33] TEOH Y H, HOW H G, LE T D, et al. A review on production and implementation of hydrogen as a green fuel in internal combustion engines[J]. Fuel, 2023, 333:126525.
- [34] ZHU R F, HAN X L, ZHANG Z Y, et al. Experimental and kinetic study on laminar burning velocities of $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{S}/\text{air}$ flames[J]. Fuel, 2023, 332:126174.
- [35] HAYAKAWA A, ARAKAWA Y, MIMOTO R, et al. Experimental investigation of stabilization and emission characteristics of ammonia/air premixed flames in a swirl combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(19):14010–14018.
- [36] MEI B W, ZHANG X Y, MA S Y, et al. Experimental and kinetic modeling investigation on the laminar flame propagation of ammonia under oxygen enrichment and elevated pressure conditions[J]. Combustion and Flame, 2019, 210:236–246.
- [37] SHRESTHA K P, SEIDEL L, ZEUCH T, et al. Detailed kinetic mechanism for the oxidation of ammonia including the formation and reduction of nitrogen oxides[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(10):10202–10217.
- [38] NAKAMURA H, HASEGAWA S, TEZUKA T. Kinetic modeling of ammonia/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile [J]. Combustion and Flame, 2017, 185:16–27.
- [39] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, et al. Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism [J]. Combustion and Flame, 2019, 204:162–175.
- [40] WU Z T, LV J W, LIU X Y, et al. Adiabatic laminar burning velocities and NO generation paths of NH_3/H_2 premixed flames[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 108:101225.
- [41] LI H Z, XIAO H H, SUN J H. Laminar burning velocity, Markstein length, and cellular instability of spherically propagating $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{Air}$ premixed flames at moderate pressures[J]. Combustion and Flame, 2022, 241:112079.
- [42] BAO Y L, DU H, CHAI W S, et al. Numerical investigation and optimization on laminar burning velocity of ammonia-based fuels based on GRI3.0 mechanism[J]. Fuel, 2022, 318:123681.
- [43] ELBAZ A M, GIRI B R, SHRESTHA K P, et al. A comprehensive experimental and kinetic modeling study of laminar flame propagation of ammonia blended with propene[J]. Combustion and Flame, 2023, 253:112791.
- [44] ÜSTÜN C E, HERFATMANESH M R, VALERA-MEDINA A, et al. Applying machine learning techniques to predict laminar burning velocity for ammonia/hydrogen/air mixtures[J]. Energy and AI, 2023, 13:100270.
- [45] DA ROCHA R C, COSTA M, BAI X. Chemical kinetic modelling of ammonia/hydrogen/air ignition, premixed flame propagation and NO emission[J]. Fuel, 2019, 246:24–33.
- [46] LU M F, DONG D S, WEI F X, et al. Chemical mechanism of ammonia-methanol combustion and chemical reaction kinetics analysis for different methanol blends[J]. Fuel, 2023, 341:127697.
- [47] JIN Y F, LI X, WANG X, et al. Effect of dimethyl ether on ignition characteristics of ammonia and chemical kinetics[J]. Fuel, 2023, 343:127885.
- [48] POCHET M, DIAS V, MOREAU B, et al. Experimental and numerical study, under LTC conditions, of ammonia ignition delay with and without hydrogen addition[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1):621–629.

- [49] LIAO W X, WANG Y R, CHU Z H, et al. Chemical insights into the two-stage ignition behavior of NH_3/H_2 mixtures in an RCM[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 256:112985.
- [50] PFROMM P H, AFRAMEHR W. Green ammonia from air, water, and renewable electricity: energy costs using natural gas reforming, solid oxide electrolysis, liquid water electrolysis, chemical looping, or a Haber-Bosch loop[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2022, 14(5):054701.
- [51] CHEBROLU V T, JANG D, RANI G M, et al. Overview of emerging catalytic materials for electrochemical green ammonia synthesis and process[J]. *Carbon Energy*, 2023, 5(12):e361.
- [52] DAHL S, LOGADOTTIR A, JACOBSEN C J H, et al. Electronic factors in catalysis: the volcano curve and the effect of promotion in catalytic ammonia synthesis[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2001, 222(1/2):19–29.
- [53] LANGELLA G, DE JOANNON M, SABIA P, et al. Ammonia as a fuel for internal combustion engines: latest advances and future challenges[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2385(1):012036.
- [54] ARNAIZ DEL POZO C, CLOETE S. Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 255:115312.
- [55] FOSTER S L, BAKOVIC S I P, DUDA R D, et al. Catalysts for nitrogen reduction to ammonia[J]. *Nature Catalysis*, 2018, 1(7):490–500.
- [56] DINCER I, ERDEMIR D, AYDIN M I, et al. Ammonia energy technologies[J]. *Lecture Notes in Energy*, 2022, 91:39–40.
- [57] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69:63–102.
- [58] CHIONG M C, CHONG C T, NG J H, et al. Advancements of combustion technologies in the ammonia-fuelled engines[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244:114460.
- [59] CORNELIUS W, HUELLMANTEL L W, MITCHELL H R. Ammonia as an engine fuel[C]//*Proceedings of 1965 International Automotive Engineering Congress and Exposition*. Detroit, USA: SAE International, 1965.
- [60] UDDEEN K, TANG Q L, SHI H, et al. A novel multiple spark ignition strategy to achieve pure ammonia combustion in an optical spark-ignition engine[J]. *Fuel*, 2023, 349:128741.
- [61] MOUNAÏM-ROUSSELLE C, MERCIER A, BREQUIGNY P, et al. Performance of ammonia fuel in a spark assisted compression Ignition engine[J]. *International Journal of Engine Research*, 2022, 23(5):781–792.
- [62] MENG X Y, ZHAO C H, CUI Z C, et al. Understanding of combustion characteristics and NO generation process with pure ammonia in the pre-chamber jet-induced ignition system[J]. *Fuel*, 2023, 331:125743.
- [63] REITER A J, KONG S C. Demonstration of compression-ignition engine combustion using ammonia in reducing greenhouse gas emissions[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(5):2963–2971.
- [64] NADIMI E, PRZYBYŁA G, LEWANDOWSKI M T, et al. Effects of ammonia on combustion, emissions, and performance of the ammonia/diesel dual-fuel compression ignition engine[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2023, 107:101158.
- [65] MI S J, WU H Q, PEI X Z, et al. Potential of ammonia energy fraction and diesel pilot-injection strategy on improving combustion and emission performance in an ammonia-diesel dual fuel engine[J]. *Fuel*, 2023, 343:127889.
- [66] JIN S Y, WU B Y, ZI Z Y, et al. Effects of fuel injection strategy and ammonia energy ratio on combustion and emissions of ammonia-diesel dual-fuel engine[J]. *Fuel*, 2023, 341:127668.
- [67] LIU S, LIN Z L, ZHANG H, et al. Impact of ammonia addition on knock resistance and combustion performance in a gasoline engine with high compression ratio[J]. *Energy*, 2023, 262:125458.
- [68] RYU K, ZACHARAKIS-JUTZ G E, KONG S C. Effects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-ignition engine[J]. *Applied Energy*, 2014, 116:206–215.
- [69] HAPUTHANTHRI S O. Ammonia gasoline fuel blends: feasibility study of commercially available emulsifiers and effects on stability and engine performance[C]//*Proceedings of SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting*. Detroit, USA: SAE International, 2014:2759.
- [70] WU Y J, ZHANG Y N, XIA C L, et al. Assessing the effects of ammonia (NH_3) as the secondary fuel on the combustion and emission characteristics with nano-additives[J]. *Fuel*, 2023, 336:126831.
- [71] KURIEN C, VARMA P S, MITTAL M. Effect of ammonia energy fractions on combustion stability and engine

- characteristics of gaseous (ammonia/methane) fuelled spark ignition engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(4) :1391–1400.
- [72] LUO Y, HE Y T, LIU C Z, et al. Combustion characteristics of biodiesel with different dimethyl ether blending strategies [J]. *Fuel*, 2023, 332:126078.
- [73] ZHU S S, XU Q, TANG R Y, et al. A comparative study of oxidation of pure ammonia and ammonia/dimethyl ether mixtures in a jet-stirred reactor using SVUV-PIMS [J]. *Combustion and Flame*, 2023, 250:112643.
- [74] RYU K, ZACHARAKIS-JUTZ G E, KONG S C. Performance characteristics of compression-ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether [J]. *Applied Energy*, 2014, 113:488–499.
- [75] GROSS C W, KONG S C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures [J]. *Fuel*, 2013, 103:1069–1079.
- [76] 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.
- [77] DINESH M H, PANDEY J K, KUMAR G N. Study of performance, combustion, and NO_x 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.
- [78] KHATEEB A A, GUIBERTI T F, WANG G Q, et al. Stability limits and NO emissions of premixed swirl ammonia-air flames enriched with hydrogen or methane at elevated pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(21) :11969–11981.
- [79] ZHANG H, LI G S, LONG Y X, et al. Numerical study on combustion and emission characteristics of a spark-ignition ammonia engine added with hydrogen-rich gas from exhaust-fuel reforming [J]. *Fuel*, 2023, 332:125939.
- [80] LI J G, ZHANG R, PAN J Y, et al. Ammonia and hydrogen blending effects on combustion stabilities in optical SI engines [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 280:116827.
- [81] MADADI AVARGANI V, ZENDEHBOUDI S, CATA SAADY N M, et al. A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America:prospects and challenges [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 269:115927.
- [82] WANG B B, WANG H C, YANG C L, et al. Effect of different ammonia/methanol ratios on engine combustion and emission performance [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236:121519.
- [83] PELÉ R, BREQUIGNY P, BELLETTRE J, et al. Performances and pollutant emissions of spark ignition engine using direct injection for blends of ethanol/ammonia and pure ammonia [J]. *International Journal of Engine Research*, 2024, 25(2) :320–333.
- [84] SINGH A S, DASH S K, REDDY V M. Chemical kinetic analysis on influence of hydrogen enrichment on the combustion characteristics of ammonia air using newly proposed reaction model [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(5) :6144–6163.
- [85] VIJUMBANA Y, SHANKAR SINGH A, LEE B J, et al. Chemical kinetic analysis to study the potential of fuel staging in reducing the emissions from NH₃/CH₄-air combustion at different pressures [J]. *Fuel*, 2023, 339:127404.
- [86] OKAFOR E C, SOMARATHNE K D A, RATTHANAN R, et al. Control of NO_x and other emissions in micro gas turbine combustors fuelled with mixtures of methane and ammonia [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 211:406–416.
- [87] WOLFRAM P, KYLE P, ZHANG X, et al. Using ammonia as a shipping fuel could disturb the nitrogen cycle [J]. *Nature Energy*, 2022, 7(12) :1112–1114.
- [88] OTOMO J, KOSHI M, MITSUMORI T, et al. Chemical kinetic modeling of ammonia oxidation with improved reaction mechanism for ammonia/air and ammonia/hydrogen/air combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(5) :3004–3014.
- [89] OH S, PARK C, AHN M, et al. Experimental approach for reducing nitrogen oxides emissions from ammonia-natural gas dual-fuel spark-ignition engine [J]. *Fuel*, 2023, 332:126065.
- [90] ALNASIF A, MASHRUK S, SHI H, et al. Evolution of ammonia reaction mechanisms and modeling parameters;a review [J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, 15:100175.
- [91] LI S, ZHANG S S, ZHOU H, et al. Analysis of air-staged combustion of NH₃/CH₄ mixture with low NO_x emission at gas turbine conditions in model combustors [J]. *Fuel*, 2019, 237:50–59.

- [92] LI Z X, LI S H. Effects of inter-stage mixing on the NO_x emission of staged ammonia combustion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(16):9791–9799.
- [93] KURATA O, IKI N, INOUE T, et al. Development of a wide range-operable, rich-lean low- NO_x combustor for NH_3 fuel gas-turbine power generation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4):4587–4595.
- [94] CAVALIERE A, DE JOANNON M. MILD combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(4):329–366.
- [95] ZHARFA M, KATIMI N. Intensification of MILD combustion of methane and hydrogen blend by the application of a magnetic field-a numerical study[J]. Acta Astronautica, 2021, 184:259–268.
- [96] CHEN Y F, ZHANG B, SU Y, et al. Effect and mechanism of combustion enhancement and emission reduction for non-premixed pure ammonia combustion based on fuel preheating[J]. Fuel, 2022, 308:122017.
- [97] SOMARATHNE K D K A, COLSON S, HAYAKAWA A, et al. Modelling of ammonia/air non-premixed turbulent swirling flames in a gas turbine-like combustor at various pressures [J]. Combustion Theory and Modelling, 2018, 22(5):973–997.

Overview of the application of ammonia in internal combustion engines and NO_x emission control technologies

TIAN Jie¹, XIONG Yong², CHENG Yong^{1*}, WANG Zhaoyu³

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Jinan 250061, China;

2. BYD Automotive Industry Co., Ltd., Shenzhen 518119, China;

3. Longkou Zhongyu Thermotech Co., Ltd., Longkou 265700, China

Abstract: In response to the problems of ignition difficulty, low flame speed, narrow flammability range, and high NO_x emission during ammonia combustion, this paper reviews the characteristics and preparation methods of ammonia fuel, summarizes the application of ammonia in internal combustion engines, analyzes the mechanism of NO_x emission generated by ammonia combustion, explores measures to reduce NO_x emission, and proposes the development direction of ammonia fuel internal combustion engines. The results show that ammonia fuel has a higher self-ignition temperature, slower flame propagation speed, and longer ignition delay. By optimizing combustion control and mixing with other fuels, the combustion performance can be improved, and environmental pollution can be reduced. Ammonia can be produced through various methods, such as chemical synthesis, biomass conversion, and water electrolysis. Electrochemical synthesis of ammonia is currently one of the most promising pathways for ammonia synthesis. Mixing combustion and oxygen-enriched fuel can increase the combustion rate of ammonia. The NO_x generated during ammonia combustion mainly comes from the nitrogen element in ammonia gas. Through technologies such as selective catalytic reduction, staged combustion, moderate or intense low-oxygen dilution combustion, NO_x emission during ammonia fuel combustion can be significantly reduced, and the environmental impact of ammonia combustion can be improved.

Keywords: ammonia combustion; internal-combustion engine; combustion characteristics; NO_x emission

(责任编辑:刘丽君)