

氨气-柴油双燃料发动机燃烧与排放特性研究

崔 健, 聂学选, 毕玉华, 申立忠, 雷基林, 万明定, 张 凯
(昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500)

Study on Combustion and Emission Characteristics of an Ammonia-Diesel Dual-Fuel Engine

CUI Jian, NIE Xuexuan, BI Yuhua, SHEN Lizhong, LEI Jilin, WAN Mingding, ZHANG Kai
(Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: An ammonia injection system was designed for a four-cylinder high-pressure common-rail diesel engine with a displacement of 3.0 L. A self-developed ammonia-diesel dual-fuel engine control unit (ECU) was utilized to control the injection of four ammonia nozzles in the intake manifold. By adjusting the injection pulse width, the opening time of the ammonia nozzles and the amount of ammonia injected were changed. Performance tests of the ammonia-diesel dual-fuel engine at different substitution rates were conducted under simulated flatland conditions. The impact of different ammonia substitution rates on cylinder pressure, heat release rate, combustion temperature, ignition delay, combustion center of gravity, and combustion duration was analyzed. Additionally, the effects of different ammonia energy substitution rates on HC, CO, NO_x, NH₃, CO₂ and particle number were investigated. The results showed that when the ammonia substitution rate increased from 0 to 30%, the cylinder pressure, heat release rate and combustion temperature decreased by 0.42 MPa, 9 J/(°), and 34.9 K, respectively. Additionally, the ignition delay and combustion duration were extended by 0.9° and 4.5°, respectively, and the combustion center was delayed by 1.5°. As the ammonia substitution rate increased, HC and CO emissions showed a slight increase, while CO₂ and NO_x emissions were significantly reduced, and unburned NH₃ emissions increased markedly. For every 10% increase in the ammonia substitution rate, CO₂ and NO_x emissions decreased by 3.343×10^{-6} and 65×10^{-6} , respectively, HC and CO emissions increased by 6×10^{-6} and 8×10^{-6} , respectively, and unburned NH₃ emissions rose by 87.3×10^{-6} . Although the use of ammonia helped to reduce carbon emissions, it also led to a decrease in fuel economy. At an ammonia substitution rate of 30%, the equivalent fuel consumption rate increased to 37.9 g/(kW·h), and the thermal efficiency reduced to 35.9%.

摘要: 以一台排量为 3.0 L 的 4 缸高压共轨柴油机为研究对象, 设计了进气道喷氨系统, 并利用自主开发的双燃料发动机电子控制单元(engine control unit, ECU)来控制进气歧管中的 4 个氨气喷嘴的喷射。通过调节喷射脉宽来改变氨气喷嘴的开启时刻与氨的喷射量, 在模拟平原环境下进行了不同替代率下的氨柴油双燃料发动机性能试验。研究分析不同氨替代率对缸压、燃烧放热率、燃烧温度、滞燃期、燃烧重心和燃烧持续期的影响, 同时还研究了不同氨

收稿日期: 2024-05-29

修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52066008)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (52066008)

作者简介: 崔 健(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制, E-mail: 20222106010@stu.kust.edu.cn;

毕玉华(通信作者), E-mail: 815569621@qq.com。

替代率对 HC、CO、NO_x、NH₃、CO₂ 及 PN 等排放的影响。研究表明,氨替代率由 0 增加到 30% 时,缸压、燃烧放热率与燃烧温度分别下降了 0.42 MPa、9 J/(°)与 34.9 K,且滞燃期与燃烧持续期分别延长了 0.9°与 4.5°,燃烧重心推迟了 1.5°。随着氨替代率增加,HC 与 CO 排放小幅度增加,CO₂ 和 NO_x 排放显著减少,未燃 NH₃ 排放显著增加。替代率每增加 10%,CO₂ 与 NO_x 排放分别降低 $3\,343\times 10^{-6}$ 与 65×10^{-6} ;HC 与 CO 分别增加 6×10^{-6} 与 8×10^{-6} ,未燃 NH₃ 排放增加 87.3×10^{-6} 。尽管氨替代燃料有助于减少碳排放,但同时也导致燃油经济性下降。在 30% 的氨替代率下,当量燃油消耗率上升至 37.9 g/(kW·h),热效率降低至 35.9%。

关键词: 氨气;柴油;发动机;双燃料;燃烧;排放

Key words: ammonia; diesel; engine; dual-fuel; combustion; emission

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.02.005

中图分类号: TK427

0 概述

为了实现碳中和目标,使用低碳和零碳燃料已经成为发动机的未来趋势。氢(H₂)和氨(NH₃)被认为是最具潜力的零碳燃料^[1-3]。氢能作为一种广泛的来源清洁能源,具有单位质量热值高、无碳排放、环保、可循环利用等特点,被认为是理想的清洁能源之一^[4-5]。然而,氢的储存、运输安全等问题一直是制约 H₂ 利用的技术瓶颈^[6]。氨具有相对较高的氢含量,被认为是更安全经济的氢储运手段,逐渐受到关注。此外,氨的体积能量密度与压缩天然气(compressed natural gas, CNG)、甲醇等相近^[7],且完全燃烧时理想产物仅为水(H₂O)和氮气(N₂),是一种清洁的可再生能源。

近年来,氨-柴油双燃料发动机燃烧与排放成为研究热点,但由于氨燃料的供给系统复杂,目前国内外研究大多以数值模拟为主。文献[8]中采用 CONVERGE 开展了氨-柴油双燃料发动机燃烧策略优化的数值模拟研究,研究结果表明与纯柴油燃烧相比,双燃料模式的指示效率提高了 11.04%,温室气体减少了体积分数 80.6%。文献[9]中基于柴油喷射控制压缩点火(jet controlled compression ignition, JCCI)的概念,探究了氨-柴油直喷对单缸二冲程低速发动机的性能与排放的影响。文献[10]中比较了柴油引燃氨内燃机在低压喷射双燃料(low-pressure injection dual-fuel, LPDF)模式和高压喷射双燃料(high-pressure injection dual-fuel, HPDF)模式下的性能,结果表明 HPDF 模式有可能实现 97% 的柴油替代率,与纯柴油模式相比,LPDF 模式有可能实现更高的指示热效率。文献[11]中研究了氨能量比(ammonia energy ratio, AER)和柴油喷射正时对氨-柴油双燃料(ammonia-diesel dual-fuel, ADDF)发动机燃烧和排放性能的影响,结果表明 AER 的增加会导致发动机有效热效率降低,但能够有效降低 NO_x 排放。文献[12]中研究了氨-空气预混增压点火

(premixed charge compression ignition, PCCI)燃烧和氨燃料气相端口喷射(gas phase port injection, GPPI)两种策略对 ADDF 发动机排放性能的影响,结果表明氨流量从 0 增加到 4 L/min 时 NO 排放从 925×10^{-6} 上升至 $1\,080\times 10^{-6}$,氨喷射脉宽由 0 增加到 20 ms 时 NO 排放达到了最大值 $1\,000\times 10^{-6}$ 。文献[13]中在一台经过改装的 4 缸柴油机上研究了不同预喷燃油能量比(pilot-injection energy ratio, PER)对排放特性的影响,结果表明:随着柴油预喷油量的增加,NH₃ 的排放会显著降低,PER 由 0 增加到 100% 时,NH₃ 的排放从 $7\,000\times 10^{-6}$ 降低至 $1\,000\times 10^{-6}$;在中等负荷下,中等 PER(40%~60%)具有较好的燃烧性能,而较高的 PER(约 80%)可以使发动机达到较好的燃烧和排放特性。

文献[14]中通过仿真分析对发动机的双喷射策略开展研究,以优化柴油引燃氨、氢混合燃料发动机的燃烧和排放性能,结果表明:随着燃油喷射正时的延迟,发动机的功率和经济性逐渐下降,排气中的 HC、碳烟、CO 和 N₂O 排放逐渐增加,而 NO_x 排放显著降低。文献[15]中研究了不同工况下的 PCCI 燃烧和柴油引燃燃烧模式,还探讨了柴油喷射策略和进气压力对燃烧、气体和颗粒排放的影响,结果表明:在低负荷工况下,采用 PCCI 模式并提前喷射柴油与氨形成均匀混合物能有效提升热效率。文献[16]中基于火焰化学发光的氨-柴油双燃料发动机开展了燃烧与火焰发展光学研究,结果表明:在氨-柴油双燃料燃烧(ammonia-diesel dual-fuel combustion, ADDC)模式下,氨的燃烧惯性和较低的火焰温度会抑制燃烧,导致循环放热与指示平均有效压力(indicated mean effective pressure, IMEP)降低。此外,文献[17]中通过光学诊断和化学动力学分析发现,提高压缩比是提高氨-正庚烷双燃料燃烧稳定性的有效途径。文献[18]中基于一台光学发动机研究了喷油压力和进气温度对氨-正十二烷双燃料发动机缸内燃烧的影响,结果表明降低燃料喷射压力并提高进气温度有利于提高氨燃烧稳定性与替代率。

综上,由于液氨汽化速度慢,且氨气喷嘴流量低,因此氨气替代率受限。本文中以一台 3.0 L 的 4 缸柴油机为研究对象,通过改造进气歧管,在进气歧管喷射氨气,利用双燃料发动机电子控制单元(engine control unit, ECU)进行氨气-柴油双燃料喷射控制,研究了不同氨气替代率对氨-柴油双燃料发动机燃烧与排放特性的影响,本研究可为探究氨的燃烧特性提供理论依据。

1 试验设计

1.1 试验设备

试验用发动机是一台 3.0 L 的 4 缸高压共轨增压柴油机,其主要技术参数如表 1 所示。氨柴发动机试验设备主要有 AVL 电力测功机、AVL AMA i60 排放设备、NH₃激光分析仪(湖北锐意自控有限公司生产,量程 0~10 000×10⁻⁶)、AVL622 燃烧分析仪、AVL735 油耗仪、科里奥利氨气流量计(量程 0~30 kg/h)、AVL 进气流量计、AVL 489 颗粒计数器。台架布置示意图如图 1 所示,试验台架照片如图 2 所示。

表 1 发动机基本参数

Table 1 Basic engine parameters

项目	参数
发动机型号	D30TCI
缸径/mm	95
行程/mm	105
发动机排量/L	3.0
压缩比	16.6
标定功率/kW	115(3 200 r/min)
最大转矩/(N·m)	400(1 400~2 600 r/min)

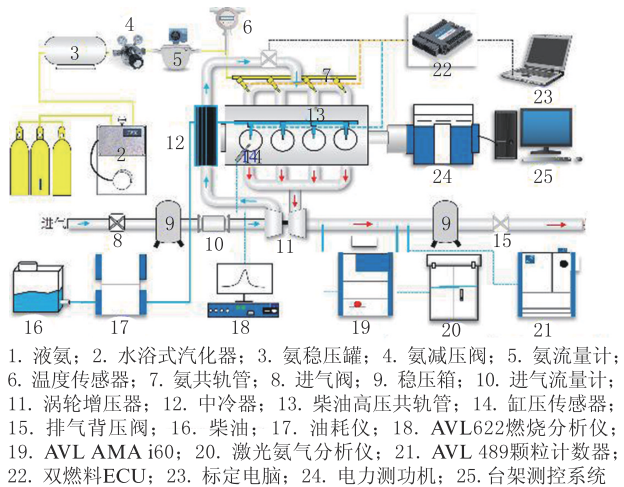


图 1 试验台架布置示意图

Figure 1 Schematic of engine bench



图 2 氨柴发动机试验台架实物图

Figure 2 Ammonia-diesel engine test bench

1.2 试验方法

氨气与柴油的燃料属性如表 2 所示。为了研究不同氨替代率对双燃料发动机性能的影响,试验采用恒定转速和转矩的方法。试验工况如表 3 所示。定义压缩上止点对应曲轴转角为 0°,上止点前曲轴转角为负,上止点后曲轴转角为正。在试验过程中,为了防止喷油和进气参数的干扰,利用 INCA(intelligent network centric architecture)将主喷正时、预喷油量、预喷正时、轨压等参数锁定,同时保持废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)阀全关,节气门全开状态。

表 2 燃料属性

Table 2 Fuel property

项目	参数	
燃料	柴油	氨气
辛烷值	—	130
十六烷值	52.8	—
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	3.0	18.5
密度/(kg·m ⁻³)	16.6	0.7
理论空燃比	15.14	6.06
最小点火能量/MJ	0.63	8
层流火焰速度/(m·s ⁻¹)	0.33	0.07
可燃性极限(体积分数)/%	0.6~7.5	16.0~25.0

研究在 1 400 r/min、200 N·m 工况下进行。通过双燃料集成控制 ECU 来控制氨气喷嘴的脉宽开启以控制氨气喷射量,氨的喷射压力控制在 0.6 MPa,氨气喷射时刻在-300°。由于液氨汽化速度慢且密度小,氨气的质量流量受限,因此氨的替代率受限。本研究中氨替代率控制在 0、10%、20% 和 30%。

1.3 参数定义

定义氨替代率 γ_A 为每循环喷入缸内的氨热值

表 3 试验工况
Table 3 Test conditions

项目	参数
转速/(r·min ⁻¹)	1 400
转矩/(N·m)	200
每循环柴油预喷油量/mg	1.5
柴油预喷正时/(°)	-10
柴油主喷正时/(°)	0
柴油喷射压力/MPa	90
氨气喷射压力/MPa	0.6
氨气喷射时刻/(°)	-300

占循环供油量总热值的比例,按式(1)计算。

$$\gamma_A = \frac{m_A h_A}{m_A h_A + m_D h_D} \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_D 为反应可控压缩着火 (reactivity controlled compression ignition, RCCI) 模式下的柴油喷射量, kg/h; m_A 为 RCCI 模式下的氨喷射量, kg/h; h_A 为氨的低热值, $h_A = 18.6 \text{ MJ/kg}$; h_D 为柴油的低热值, $h_D = 42.5 \text{ MJ/kg}$ 。

当量燃油消耗率表示在双燃料模式下把氨消耗率等热值转化为柴油后计算得到的总的有效燃油消耗率,按式(2)计算。

$$b_e = (m_{\text{Dual}} / P_e) \times 10^3 \quad (2)$$

式中, m_{Dual} 为按等热值将氨折合为柴油后的当量燃油消耗量, kg/h; b_e 为发动机的有效燃油消耗率, g/(kW·h); P_e 为发动机功率, kW。

当量燃油消耗量按等热值将氨折合为柴油,如式(3)所示。

$$m_{\text{Dual}} = m_D + \frac{h_A}{h_D} m_A \quad (3)$$

有效热效率是衡量发动机将化学能转化为机械能的效率,双燃料模式下有效热效率 η_{et} 按式(4)计算。

$$\eta_{\text{et}} = \frac{3.6 \times 10^3 P_e}{m_{\text{Dual}} h_D} \quad (4)$$

2 试验结果及分析

2.1 不同氨替代率下的油耗特性

在恒定转速和转矩下,研究了不同氨替代率对发动机综合油耗的影响。图 3 显示了不同氨替代率下的油耗特性。在保持转矩恒定的情况下,随着氨替代率的增加,氨油耗增加,而柴油油耗降低,以保持总能量平衡。当氨替代率从 0 增加至 30% 时,氨的喷射量达到 4.4 kg/h,柴油的油耗从 6.1 kg/h 下降至

5.3 kg/h,对应的当量燃油消耗率从 209 g/(kW·h)增加至 246.9 g/(kW·h)。从图中可以看出,在该工况下,随着氨替代率的增加,整体燃油经济性一直在下降,但当替代率从 20% 增加至 30% 时,当量燃油消耗率的下降趋势变得缓慢。这表明虽然氨替代率的增加对燃油经济性有负面影响,但这种影响并不是线性增长的,而是随着替代率的提高而逐渐减弱。

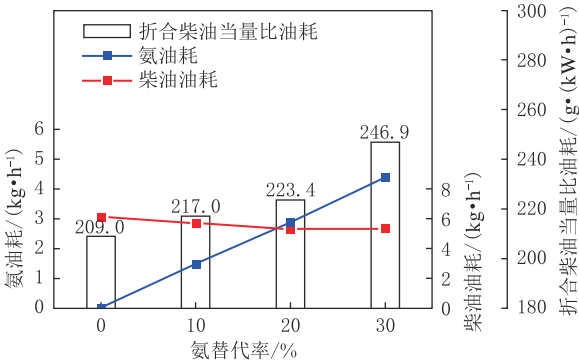


图 3 不同氨替代率下的油耗特性

Figure 3 Fuel consumption characteristics at different ammonia substitution rates

图 4 展示了不同氨替代率下的发动机有效热效率。在纯柴油模式下,发动机热效率达到 39.1%。但是,随着氨替代率的增加,热效率逐渐降低,当氨替代率增加至 30% 时,发动机热效率降低至 35.9%。氨具有较低的热值和较慢的燃烧速度,这些燃料特性导致 NH_3 在发动机中未能完全燃烧以产生动力。因此,随着氨替代率的增加,氨-柴油双燃料发动机的热效率逐渐降低。为了提高氨-柴油双燃料发动机的热效率,一方面需要提高氨气的燃烧速度,另一方面需要合理组织燃烧过程,确保进气和喷射在最佳时机进行。

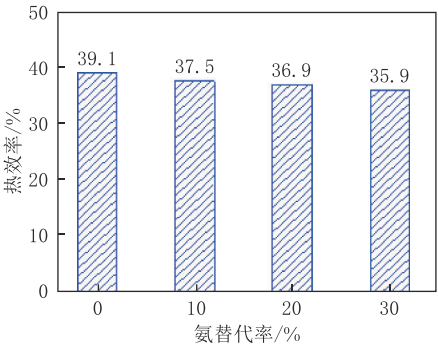


图 4 不同氨替代率下的有效热效率

Figure 4 Effective thermal efficiencies at different ammonia substitution rates

2.2 不同氨替代率下的燃烧特性

图 5 为不同氨替代率下的缸压变化曲线和最大缸压对比。从图 5(a)可知,在此工况下,由于喷射正时在上止点后,缸压显现出两个峰,随着氨替代率的增加,第一个峰的缸压上升,第二个峰的缸压下降。图 5(b)为不同替代率下的缸压最大值,该最大值为采集 200 组循环的平均值。由图易知,氨替代率在 0、10%、20%、30% 下的最大缸压分别为 9.09 MPa、8.94 MPa、8.78 MPa、8.67 MPa,氨燃烧后的缸压明显下降。

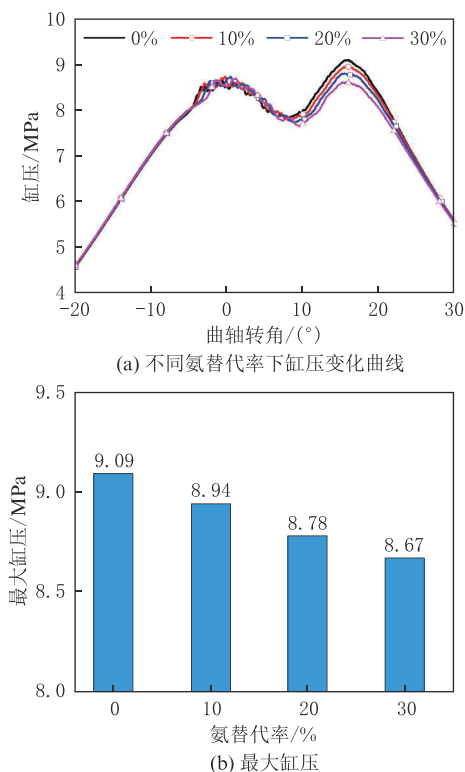


图 5 不同氨替代率下的缸压和最大缸压对比

Figure 5 Cylinder pressures at different ammonia substitution rates and maximum cylinder pressures

图 6 为不同氨替代率下的燃烧放热率的变化曲线和最高燃烧放热率对比。从图 6(a)可知,随着氨的替代率增加,燃烧放热率的峰值开始下降,在曲轴转角 18°后,替代率增加,放热率开始上升。这说明在 18°前柴油燃烧占据主导,18°后 NH_3 燃烧占据主导。图 6(b)为不同替代率下的最大燃烧放热率。氨替代率在 0、10%、20%、30% 下的最高燃烧放热率分别为 109.1 J/(°)、107.8 J/(°)、105.2 J/(°)、100.8 J/(°)。由此可见,随着氨替代率的增加,燃烧放热率峰值逐渐降低。这是因为随着替代率的增加,缸内柴油喷射量减少,缸内点火能量不足,导致燃烧放热率峰值下降。

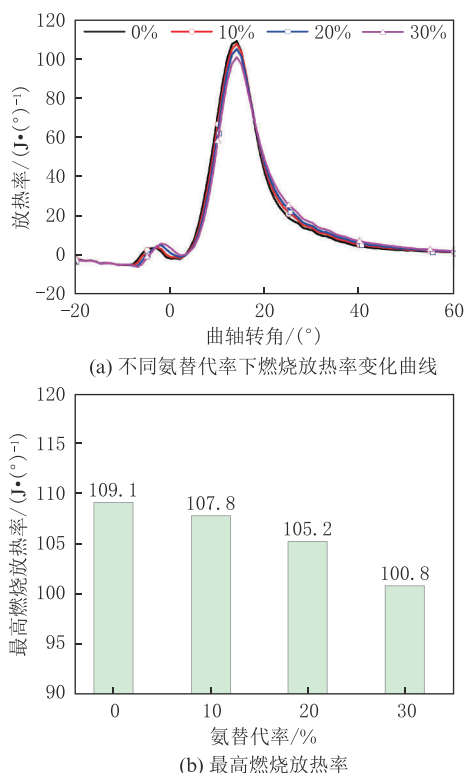


图 6 不同氨替代率下的燃烧放热率和最高燃烧放热率对比

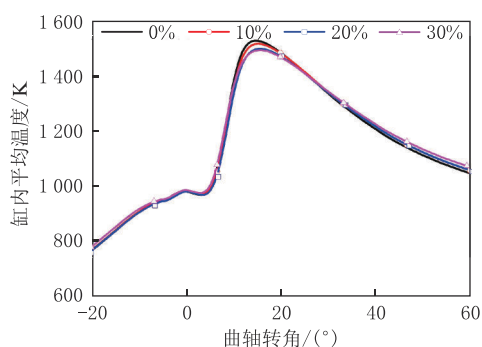
Figure 6 Heat release rate at different ammonia substitution rates and maximum heat release rates

图 7 为不同氨替代率下的缸内平均温度的变化曲线和最高燃烧温度对比。从图 7(a)可知,随着氨的替代率增加,缸内平均温度上升拐点延迟,峰值温度逐渐降低,但在曲轴转角 36°后,随着氨替代率增加,燃烧温度开始上升。这主要是因为随着氨替代率的增加,燃烧重心推迟,并且滞燃期延长。图 7(b)为不同替代率下的最高燃烧温度。氨替代率在 0、10%、20%、30% 下的最高燃烧温度分别为 1529.0 K、1517.8 K、1499.8 K、1294.1 K。

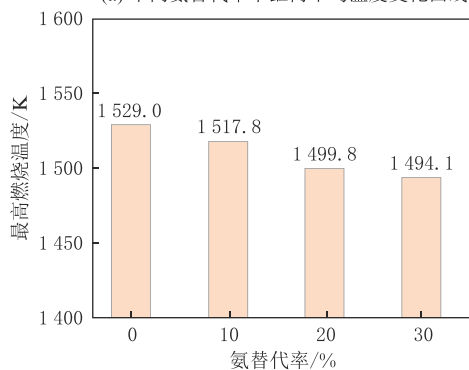
图 8 为不同氨替代率下的压力升高率曲线。如图所示,压力升高率随着氨替代率的提高而逐渐降低。这是因为氨替代率的增加导致滞燃期延长,预混燃烧的比例增加。同时,由于氨的火焰传播速度低于柴油,导致压力升高率下降。

图 9 为不同氨替代率下的滞燃期、燃烧重心与燃烧持续期的变化规律。定义燃烧始点为 CA05,燃烧重心为 CA50。滞燃期为喷油始点至 CA05 之间的曲轴转角,燃烧持续期为 CA05 至 CA90 之间的曲轴转角。其中 CA05、CA50 和 CA90 分别代表累计放热量占总放热量的 5%、50% 和 90% 所对应的曲轴转角。

受氨燃烧特性的影响,随着氨替代率的增加,发动机的燃烧重心向后推迟,滞燃期和燃烧持续期均



(a) 不同氨替代率下缸内平均温度变化曲线



(b) 最高燃烧温度

图7 不同氨替代率下的缸内平均温度和最高燃烧温度对比
Figure 7 In-cylinder average temperatures at different ammonia substitution rates and maximum combustion temperatures

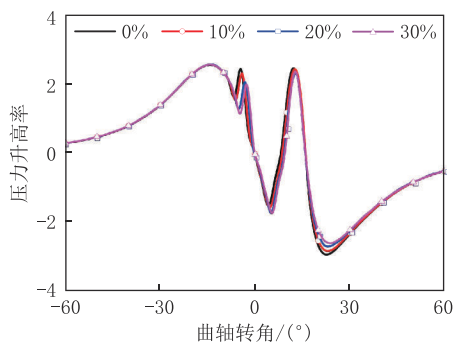


图8 不同氨替代率下的压力升高率

Figure 8 Rates of pressure increase at different ammonia substitution rates

有所延长。氨替代率每增加10%，滞燃期延长0.3°，燃烧重心推迟0.5°，燃烧持续期延长1.5°。这些现象充分说明，随着氨替代率的增加，氨气燃烧速率会逐渐减慢。

2.3 不同氨替代率的排放特性

图10为不同氨替代率下的HC与CO排放。如图所示，随着氨替代率的增加，HC和CO排放出现增加的趋势，但是该增长趋势并不显著。每当氨替代率增加10%，HC和CO的排放分别平均增加 6.0×10^{-6} 和 8.0×10^{-6} 。

图11为不同氨替代率对 NO_x 和 NH_3 排放的影

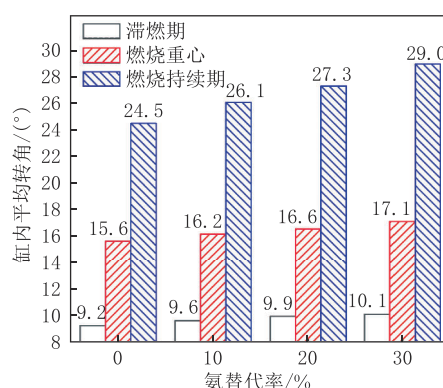


图9 不同氨替代率下的燃烧重心与燃烧持续期

Figure 9 Combustion center of gravity and duration at different ammonia substitution rates

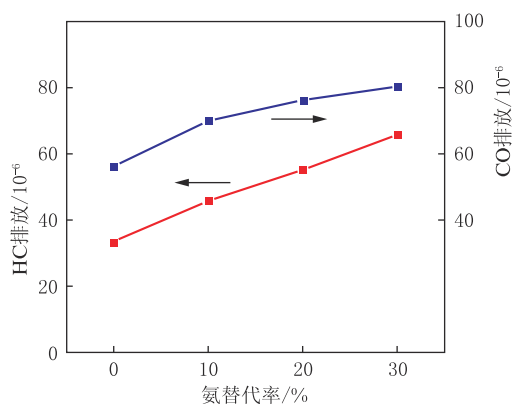


图10 不同氨替代率下的HC与CO排放

Figure 10 HC and CO emissions at different ammonia substitution rates

响。从图中可以观察到，随着氨替代率的提高， NO_x 排放量减少而 NH_3 排放量增加。 NO_x 排放减少的原因在于：在中等负荷下气缸内的燃烧温度较低，导致热力型 NO_x 的生成减少；同时，气缸内 NH_3 与 NO_x 发生脱硝反应，导致高温条件下，部分 NO_x 被还原为 N_2 或 N_2O 。氨替代率每增加10%， NO_x 排放平均降低 65.0×10^{-6} 。另一方面，受氨燃烧特性的影响，氨无法在缸内完全燃烧，燃烧效率较低，且随着氨替代率的增加，部分 NH_3 在未完全燃烧的情况下随尾气排出，导致未燃 NH_3 排放量上升。氨替代率每增加10%，未燃 NH_3 排放平均增加 87.3×10^{-6} 。当氨替代率达到30%时，未燃 NH_3 排放可高达 $13\,000.0 \times 10^{-6}$ 。该发动机 NH_3 排放高的主要原因是该工况下的过量空气系数较大。通常，柴油机运行需要较稀薄的混合气，而氨燃烧则需要较浓的混合气。氨的理论空燃比为6.14，与柴油机相比，氨燃烧不需要过多的进气量。氨气在当量比介于0.8~1.1时火焰传播速度最快，然而混合气的当量比仅为0.4左右，过大的空气系数导致了较高的未燃 NH_3 排放。

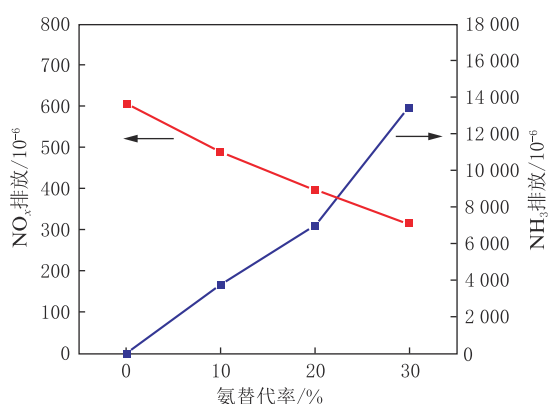
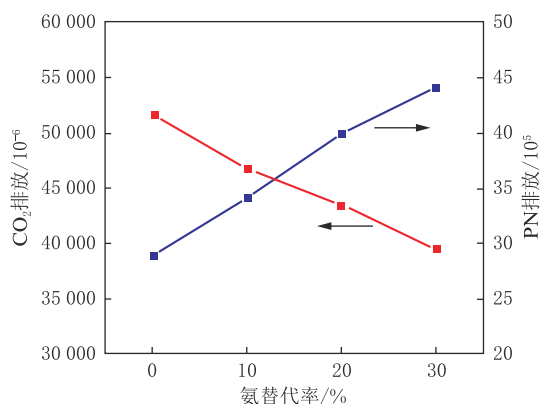
图 11 不同氨替代率下的 NO_x与 NH₃排放Figure 11 NO_x and NH₃ emissions at different ammonia substitution rates

图 12 为不同氨替代率下的 CO₂与颗粒物数量 (particle number, PN)排放。如图所示,随着氨替代率的增加,CO₂排放下降十分明显,这表明氨燃烧在降低碳排放方面具有显著效果。氨替代率每增加 10%,CO₂排放平均降低 $3\,343.0 \times 10^{-6}$,这一结果证实了氨作为燃料替代品在减少温室气体排放方面的潜力。在 PN 排放方面,燃烧温度是影响颗粒物生成量的关键因素^[19]。由于氨气参与燃烧导致气缸内燃烧温度下降,这不仅降低了热效率,而且也影响了燃料的深度氧化和分解。在较低的燃烧温度下,颗粒物的生成和氧化不完全,从而导致 PN 排放增加。氨替代率每增加 10%,PN 排放平均增加 279 920.0。

图 12 不同氨替代率下的 CO₂与 PN 排放Figure 12 CO₂ and PN emissions at different ammonia substitution rates

3 结论

(1) 由于氨的热值低,能量密度小,随着氨的替代率增加,氨的油耗增加,柴油油耗下降,当量有效燃油消耗率上升,经济性下降。同时氨的燃烧火焰

传播速度慢,导致氨燃烧后的热效率降低。

(2) 由于氨的燃烧速度慢,并且具有较高的汽化潜热,随着氨的替代率增加,缸压、燃烧放热率、燃烧温度都随之下降,同时滞燃期延长,燃烧重心推迟,燃烧持续期延长。

(3) 由于氨的燃烧温度低,燃烧速度慢,随氨替代率增加,燃烧后产生的未燃 NH₃排放增加,HC 和 CO 排放有小幅增加,PN 排放也有所增加,而 CO₂与 NO_x排放下降,CO₂排放下降尤为明显,氨替代率每增加 10%,CO₂排放平均降低 $3\,343.0 \times 10^{-6}$ 。

参考文献:

- [1] 蔡开源,王巍,赵自庆,等. 氨-生物燃料双燃料发动机的燃烧与排放特性[J]. 汽车工程, 2024, 46(4): 626 - 633.
CAI K Y, WANG W, ZHAO Z Q, et al. Combustion and emission characteristics of an ammonia-biofuel dual-fuel engine [J]. Automotive Engineering, 2024, 46(4): 626 - 633.
- [2] 王罗玺,任飞,李卓航,等. 预燃室氢射流火焰引燃氨预混气火焰发展及着火特性数值研究[J]. 内燃机工程, 2023, 44(5): 24 - 32.
WANG L X, REN F, LI Z H, et al. Numerical investigation on the flame development and ignition characteristics of ammonia premixed gas ignited by hydrogen jet flame in a pre-chamber[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2023, 44(5): 24 - 32.
- [3] CHAI W S, BAO Y L, JIN P F, et al. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels[J/OL]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147: 111254 (2021-05-28) [2024-04-30]. DOI:10.1016/j.rser.2021.111254.
- [4] ABE J O, POPOOLA A P I, AJENIFUJA E, et al. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(29): 15072 - 15086.
- [5] WANG M J, WANG G Z, SUN Z X, et al. Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation [J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 436 - 443.
- [6] 许焕焕,葛一,李强,等. 氨燃料及应用技术研究进展[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(2): 1 - 13.
XU H H, GE Y, LI Q, et al. Research progress of ammonia fuel and application technology[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(2): 1 - 13.
- [7] ZAMFIRESCU C, DINCER I. Using ammonia as a sustainable fuel[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(1): 459 - 465.
- [8] SHIN J, PARK S. Numerical analysis for optimizing combustion strategy in an ammonia-diesel dual-fuel engine [J/OL]. Energy Conversion and Management, 2023, 284: 116980 (2023-04-03) [2024-04-30]. DOI:10.1016/j.enconman.2023.116980.
- [9] ZHANG Z X, LONG W Q, DONG P B, et al. Performance characteristics of a two-stroke low speed engine applying ammonia/diesel dual direct injection strategy[J/OL]. Fuel, 2023, 332: 126086

- (2022-10-16)[2024-04-30]. DOI:10.1016/j.fuel.2022.126086.
- [10] LI T, ZHOU X Y, WANG N, et al. A comparison between low and high-pressure injection dual-fuel modes of diesel-pilot-ignition ammonia combustion engines [J]. Journal of the Energy Institute, 2022, 102:362 - 373.
- [11] YOUSEFI A, GUO H, DEV S, et al. Effects of ammonia energy fraction and diesel injection timing on combustion and emissions of an ammonia/diesel dual-fuel engine[J/OL]. Fuel, 2022, 314: 122723 (2021-12-02) [2024-04-30]. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122723.
- [12] LI P, LI X, WANG H, et al. A comparative experimental study on emission characteristics and ammonia energy ratio of diesel generator operating in ammonia/diesel dual fuel mode by premixed and port injection[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 176: 402 - 410.
- [13] 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/OL]. Fuel, 2023, 343: 127889 (2023-02-25) [2024-04-30]. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127889.
- [14] WANG H C, WANG B C, YANG C L, et al. Study on dual injection strategy of diesel ignition ammonia/hydrogen mixture fuel engine [J/OL]. Fuel, 2023, 348 (2023-05-08) [2024-04-30]. DOI:10.1016/j.fuel.2023.128526.
- [15] PEI Y Q, WANG D C, JIN S Y, et al. A quantitative study on the combustion and emission characteristics of an ammonia-diesel dual-fuel (ADDF) engine [J/OL]. Fuel Processing Technology, 2023, 250: 107906 (2023-06-29) [2024-04-30]. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107906.
- [16] SUN W C, ZENG W P, GUO L, et al. An optical study of the combustion and flame development of ammonia-diesel dual-fuel engine based on flame chemiluminescence [J/OL]. Fuel, 2023, 349: 128507 (2023-05-18) [2024-04-30]. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128507.
- [17] WEN M S, LIU H F, CUI Y Q, et al. Study on combustion stability and flame development of ammonia/*n*-heptane dual fuel using multiple optical diagnostics and chemical kinetic analyses [J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139412 (2023-10-29) [2024-04-30]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139412.
- [18] 刘海峰,王冠月,文铭升,等. 喷油压力和进气温度对氨/正十二烷双燃料发动机燃烧稳定性影响研究[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(1): 1 - 8.
- LIU H F, WANG G Y, WEN M S, et al. Influence of injection pressure and intake temperature on combustion stability of ammonia/*n*-dodecane dual-fuel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2024, 30(1): 1 - 8.
- [19] WANG C, YUE Z Y, ZHAO Y Y, et al. Numerical simulation of the high-boosting influence on mixing, combustion and emissions of high-power-density engine [J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(3): 933 - 946.