

# 基于喷射策略的氨柴双燃料发动机燃烧和排放优化研究

陈清楚<sup>1</sup>, 蔡开源<sup>1</sup>, 刘奕<sup>1</sup>, 齐运亮<sup>1</sup>, 王志<sup>1,\*</sup>

(1. 清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084; )

## Optimization Study of Combustion and Emissions in an Ammonia-Diesel Dual-Fuel Engine Based on Injection Strategy

CHEN Qingchu<sup>1</sup>, CAI Kaiyuan<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, QI Yunliang<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>1,\*</sup>

(1. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China;)

**Abstract:** This study involves the modification of a dual-fuel engine, using ammonia and diesel, based on a heavy-duty diesel engine experimental platform. A set of electronic control ammonia injection systems was installed, with ammonia injected into the intake manifold and diesel directly injected into the diesel cylinders. By varying the diesel injection strategy, combustion and emission characteristics of the ammonia-diesel dual-fuel engine were optimized under medium loads with a 50% ammonia energy ratio. Experimental results showed that the heat release curve of a single diesel injection exhibited a double-peak pattern. However, by employing a dual diesel injection strategy, it was possible to merge the double-peak heat release curve into a single-peak curve, reducing unburned ammonia emissions and increasing ammonia combustion efficiency by 10%. Under the dual injection strategy, thermal efficiency followed an inverted "U" shape curve with increasing pilot injection quantity. In the experimental conditions of this study, a pilot injection quantity of 20% to 30% resulted in the highest indicated thermal efficiency of 49.1%.

**摘要:** 本文在一台重型柴油发动机试验平台的基础上改造氨柴双燃料发动机, 加装了一套电控喷氨系统, 采用氨气进气道喷射, 柴油缸内直喷方式, 通过柴油喷射策略的变化, 在中高负荷, 50%氨能占比的工况下, 开展了氨柴双燃料发动机的燃烧和排放特性优化研究。试验结果表明: 柴油单次喷射的放热曲线呈现双峰放热曲线, 通过采用柴油双喷策略, 能够将双峰放热曲线融合成单峰放热, 能够减低未燃氨排放, 将氨燃烧效率提升 10%; 在双喷策略下, 热效率随预喷量的增加呈现先增大后减小的倒“U”型曲线, 在本文试验工况下, 20%~30%预喷油量的策略, 能达到最高 49.1% 的指示热效率。

**关键词:** 氨-柴双燃料, 燃烧, 喷射策略, 双喷

**Key words:** Ammonia-diesel dual-fuel; combustion, Injection strategy, Dual diesel injection strategy

中图分类号: TK46+4

文献标识码: A

## 0 概述

内燃机作为目前广泛应用于交通运输和工业领域的主要动力装置, 其燃料的选择对能源效率和环境影响至关重要。然而, 传统燃料的使用导致了空气污染和温室气体排放等环境问题。随着我国碳中和、碳达峰的目标制定, 推动了对可再生能源和环保降碳燃料的需求<sup>[1]</sup>。

虽然小型乘用车的电动化趋势发展迅速, 但是在重型商用车、船舶和大型工程机械等领域, 柴油内燃机依然发挥着难以替代的作用。因此, 针对传统柴油内燃机的降碳对我国双碳目标的达成至关重要。一方面可以通过高效燃烧技术提高热效率降低排放<sup>[2-4]</sup>; 另一方面, 通过低碳/零碳等替代燃料的掺混, 以达到降碳目标。可选用的低碳燃料有天

收稿日期: xxxx-xx-xx

作者简介: 陈清楚 (1991), 男, 博士后, 主要研究方向为氨柴发动机燃烧和排放, E-mail: chenqcseven@tsinghua.edu.cn;

王志 (联系人), E-mail: wangzhi@tsinghua.edu.cn。

然气、甲醇、二甲醚、氨、氢等<sup>[5-10]</sup>。其中，氨和氢作为零碳燃料尤为引起业界关注，而且氨相比于氢，制备储运技术更加成熟，更具有替代柴油等传统碳氢石化燃料的潜力。近几年以来，世界各国对氨燃料的研究与应用的重视程度日益提高，Li<sup>[11]</sup>等人，研究了不同液氨喷射压力对柴油引燃液氨燃烧模式的影响，发现低压喷射模式下最少需用 20% 的柴油才能稳定引燃液氨，而在高压喷射模式下，只需 3% 的柴油就能是氨稳定燃烧。Sun<sup>[12]</sup>等人在光学发动机中研究了氨柴双燃料的燃烧和火焰发展情况，发现相比于纯柴油的炽白色高温火焰，掺氨后的燃烧火焰颜色呈现橘黄色，在 80% 掺氨率下，火焰亮度下降了 92%。也同时研究了柴油喷射时刻对氨柴燃烧火焰的发展影响，发现当提前喷射时刻能够形成更多的均质混合气，从而增大了火焰面积。Nadimi<sup>[13]</sup>等人通过试验和一维仿真研究了氨柴双燃料的燃烧和排放性能，增加氨能量占比能够减低排气温度，显著减少一氧化碳、二氧化碳排放，但是会增加氮氧化物排放。Jin<sup>[14]</sup>等人在小负荷工况下研究了氨柴双燃料燃烧和排放规律，发现在 1000 转小负荷时，提升氨能占比能够减低一氧化氮和二氧化氮的排放，但氧化亚氮的排放将增多。试验结果表明氨能占比 50% 时，温室气体排放能够减少 14.5%。Niki<sup>[15]</sup>等人在柴油单缸机上进行掺氨试验，发现尾气中有未燃氨和氧化亚氮的存在，当提升氨气的进气量后，会使缸压有所降低。通过仿真计算，采用柴油多次喷射和氨的缸内直喷能够有效降低氨和氧化亚氮的排放。

当前氨柴双燃料发动机的研究主要集中在中小负荷，根据柴油机的高效区域点在中高负荷特性，为了探究氨柴双燃料在中高负荷的燃烧和排放特征，本文将主要针对发动机在中高负荷工况下的燃烧和排放进行试验研究，通过控制柴油的喷射策略优化燃烧和排放特性。

## 1 试验台架

图 1 为发动机台架系统图，该试验台架是柴油机改造，氨气供给及喷射系统包括氨气瓶组，减压阀，氨气流量计和气动喷嘴等部件，通过 ECU 控制喷射脉宽以及喷射频率。柴油的燃油消耗量通过普联公司的 FC2212L 型油耗仪测量进行测量；测功机为湘仪公司的 CAC380 电力测功机，用于测量扭矩以及功率，转速测量精度为 1 r/min，扭矩测量精度为 0.1%；排放测试设备使用的是 AVL 公司的傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)，用于测量排气中的未燃氨、NO<sub>x</sub> 及一氧化二氮 (Nitrous Oxide, N<sub>2</sub>O) 等排放物浓度，测试精度为  $1 \times 10^{-6}$  体积分数，在发动机排气出口和箱式后处理系统后均设有采样点。

## 2 试验方法与内容

如图 1 台架系统所示，试验过程中，氨气通过进气道与新鲜空气混合进入气缸内，通过减压阀控制保持氨气瓶压力为 5bar，ECU 控制氨喷嘴的喷射脉宽和时刻，氨流量计记录氨气流量。进气道调压阀控制进气压，同时通过 ECU 控制柴油喷嘴的喷射时刻和喷射脉宽。通过燃烧分析仪记录缸压传感器的缸内压力变化，FTIR 测量尾气排放中的未燃氨和氮氧化物等排放。在 1200 r/min 的转速下分别开展了单次喷射和两次喷射（双喷）试验。

具体试验工况如表 1 所示。其中柴油分别采用单次喷射策略和两次喷射（双喷）策略，通过调整氨气和柴油喷射脉宽达到指定中高负荷，且保持氨能量占比为 50%。在整个试验过程中保持发动机转速 1200 r/min、柴油高压共轨压力为 1800bar、进气压力 1.5bar。通过改变两次喷射策略中预喷时刻和预喷量，探究和优化氨柴双燃料的燃烧和排放。每个试验工况点采集 300 个循环数据。

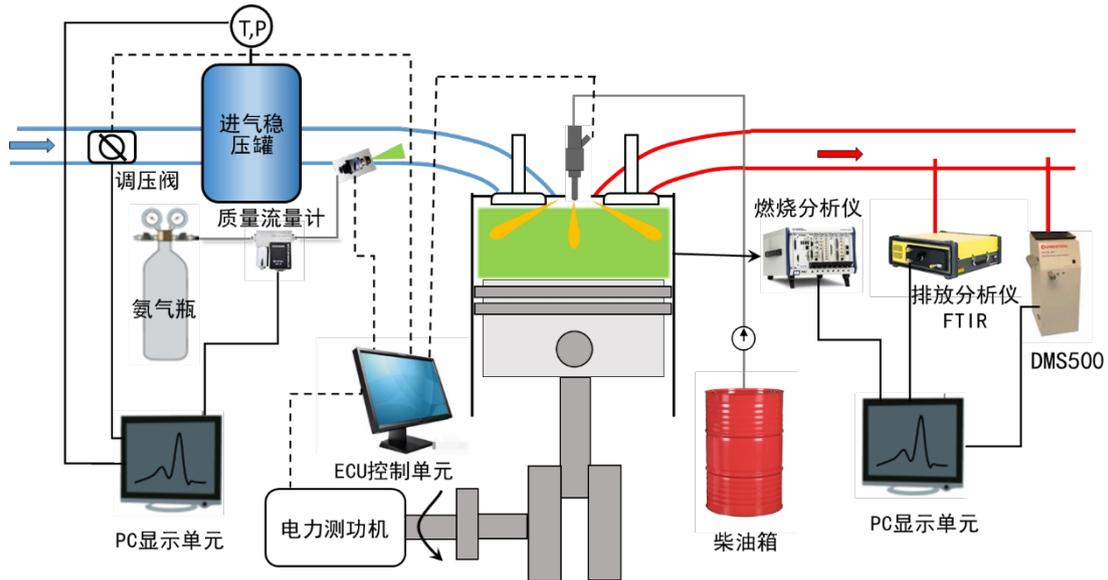


图1 试验台架设备示意图

表1 试验工况

参数	试验一（喷射策略）	试验二（预喷时刻）	试验三（预喷量）
转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1200	1200	1200
氨能占比	50%	50%	50%
IMEP/MPa	1.62	1.62	1.62
进气压/bar	1.5	1.5	1.5
共轨压力/bar	1800	1800	1800
喷射策略	单次喷射/双喷	双喷（预喷射+主喷射）	双喷（预喷射+主喷射）
喷射时刻/ATDC	$-9.5^\circ \text{CA} / -24^\circ \text{CA} + 2^\circ \text{CA}$	$-64^\circ \sim -24^\circ \text{CA} + 2^\circ \text{CA}$	$-64^\circ \text{CA} + 2^\circ \text{CA}$
喷射量/mg/cyc	105/20+85	20+85	5~35+100~70

### 3 试验试验结果与讨论

#### 3.1 喷射策略

图2所示为试验一的缸压和放热率数据，黑色实线为单次喷射，喷射时刻为上止点前 $9.5^\circ \text{CA}$ ，柴油喷射量为每循环105mg，蓝色虚线为两次喷射，预喷时刻为上止点前 $24^\circ \text{CA}$ ，喷射量为每循环20mg，主喷时刻为上止点前 $2^\circ \text{CA}$ ，喷射量为每循环85mg，保持总喷射量与单次喷射策略相同。通过放热率可以发现，氨柴燃烧模式中，放热率会出现两个峰值，这是因为柴油和氨的起燃温度不同，第

一个峰值为喷入缸内的柴油自燃，随后剧烈燃烧的柴油引燃氨气，从而出现了第二个放热波峰。对比单次喷射和两次喷射策略，将柴油分两次喷射进缸内，可以发现两次放热波峰间隔时长延长，第一次少量柴油喷入缸内后发生自燃，出现第一个放热波峰，第二次柴油喷入缸内后出现第二个放热波峰，因此，第一次的柴油喷入能调节缸内的温度和活化热氛围。通过图3氨燃烧效率来看，采用双喷策略下，柴油分两次喷入缸内，增加了柴油和混合气的混合时间，是更多的氨气能够燃烧，氨气的燃烧效率提升了10%。图4为不同喷射策略下的排放组分分析结果，通过对比图4(a)和(b)发现，双喷策略的

NO<sub>x</sub> 略高于单喷,但氧化亚氮 N<sub>2</sub>O 排放只有单喷策略的一半,此时 NO<sub>x</sub> 主要来源是氨的燃烧分解。图 4(c),(d)分别展示了不同喷射策略下的 CO 和 THC 排放,其中 CO 排放主要是由于柴油的不完全燃烧导致的。可以发现,在此双喷策略的喷射时刻下,CO 和 THC 的排放要高于单喷策略,因此将双喷策略的预喷时刻进行调整,探究并优化预喷的喷射时刻。

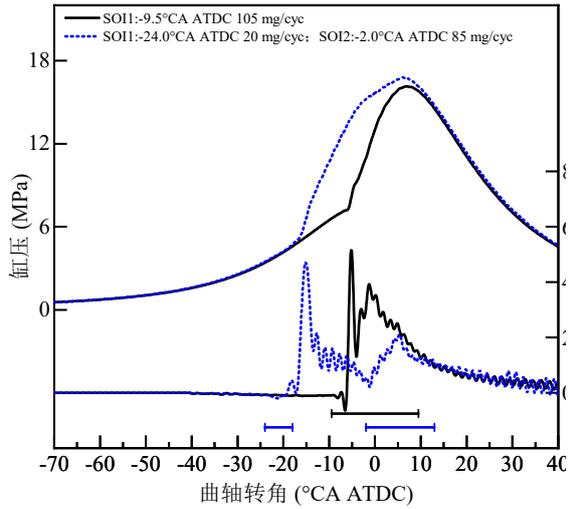


图 2 单/双喷策略缸压和放热率

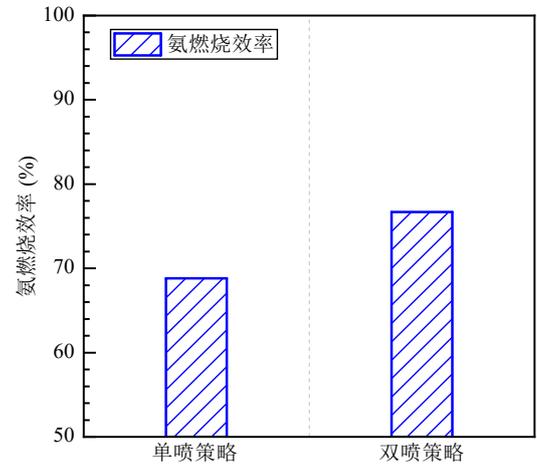
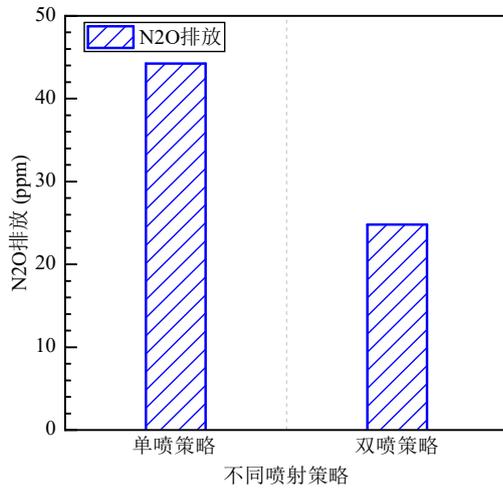
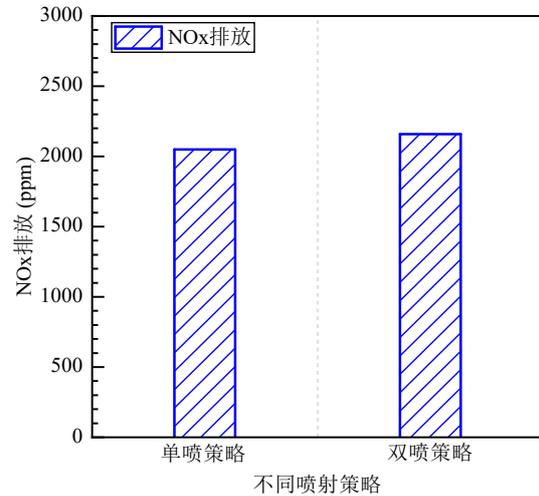


图 3 单/双喷策略未燃氨排放



a. 氧化亚氮排放



b. 氮氧化物排放

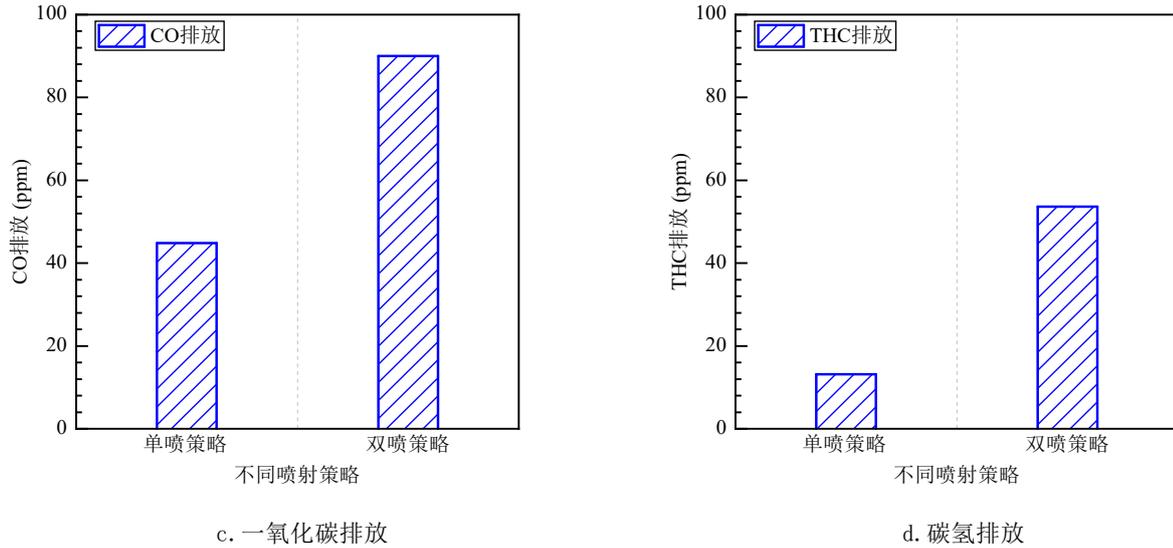


图4 单/双喷策略尾气排放物对比

### 3.2 预喷时刻

图5给出了预喷时刻探究试验的缸压和放热率曲线,通过缸压曲线可以发现,随着预喷时刻的提前,起燃时刻将推迟,最大爆压也逐渐降低,而最大爆压的出现时刻变化不大。可见,靠近上止点时缸内温度和压力较高,喷入的柴油的滞燃期短,可迅速燃烧。从放热率的曲线可以发现,随着预喷时刻的提前,原本双峰放热的曲线变成单峰放热,这是由于预喷的柴油的燃烧提升了缸内的温度和燃料活化热氛围,从而引燃了氨,接着第二次喷射的柴油的燃烧与氨燃烧时间上重合,因此,原来双峰放热的曲线融合成单峰放热,这其中包括柴油和氨的燃烧放热。

图6为不同预喷时刻下氨柴油发动机的指示热效率对比图。随着预喷时刻向上止点靠近,指示热效率呈现先增加后减小然后再增加再减小的“M”型曲线,在 $-39^{\circ}$  CA ATDC时达到最高指示热效率。在 $-44^{\circ}$  CA ATDC时出现热效率下降是由于喷入的柴油会有部分进入活塞凹坑内,甚至撞壁,导致火焰淬熄,无法正常传播,从而导致热效率降低。在靠近上止点的 $-24^{\circ}$  CA ATDC为预喷角度时,第一段放热大于第二段放热,导致上止点点发动机做负工较多,从而使得发动机指示热效率的降低。

图7展示了不同预喷时刻下发动机的排放结果,随着预喷时刻向上止点靠近,CO和THC的排放逐渐降低,CO的排放主要是柴油不完全燃烧造成的。当活塞向上止点运行时,缸内的压力的温度升高,

此时喷入的柴油燃烧更加完全。而当预喷时刻在 $-24^{\circ}$  CA ATDC时,第一次喷射将会喷入在活塞凹坑内,使凹坑内的氧气被消耗完,造成主喷时燃料过浓区域增加,从而导致了柴油的不完全燃烧。而 $\text{NO}_x$ 的排放主要是两个来源,一个是由于高温高压的氮气与氧气生成氮氧化物,另一个是氨的不完全燃烧产物。从 $\text{NO}_x$ 排放可以看出,随着第一次喷射时刻的提前, $\text{NO}_x$ 排放先增大后减小。第一次喷射时刻提前,氨燃烧效率大幅提升,总放热量增大与燃烧相位靠近上止点导致了燃烧温度上升,热 $\text{NO}_x$ 排放增加,但第一次喷射时刻进一步提前后,燃烧室凹坑外过度预混程度增加,局部燃烧温度降低,大幅降低了热 $\text{NO}_x$ 排放。

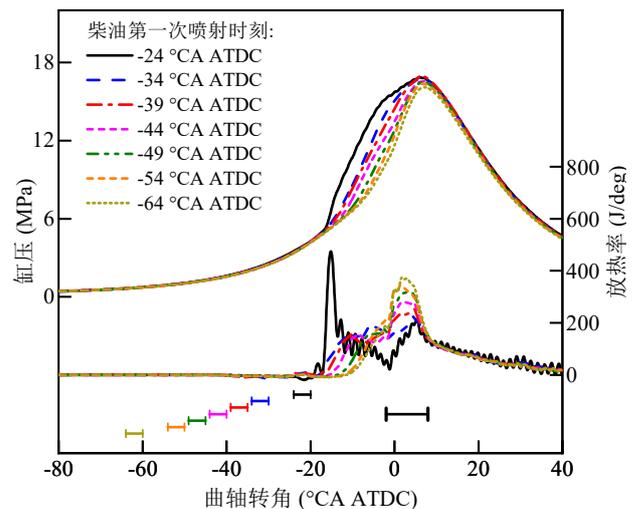


图5 不同预喷时刻的缸压和放热率

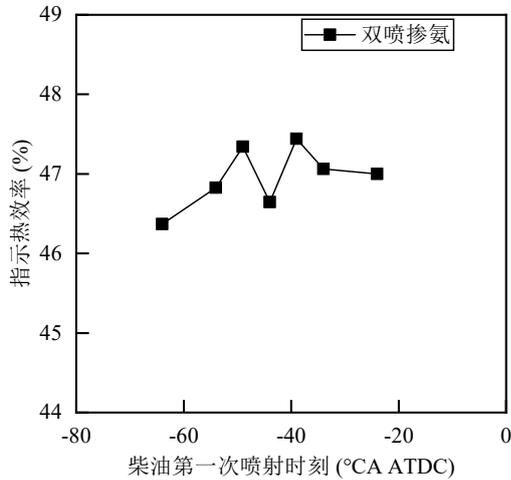


图6 不同预喷时刻的热效率

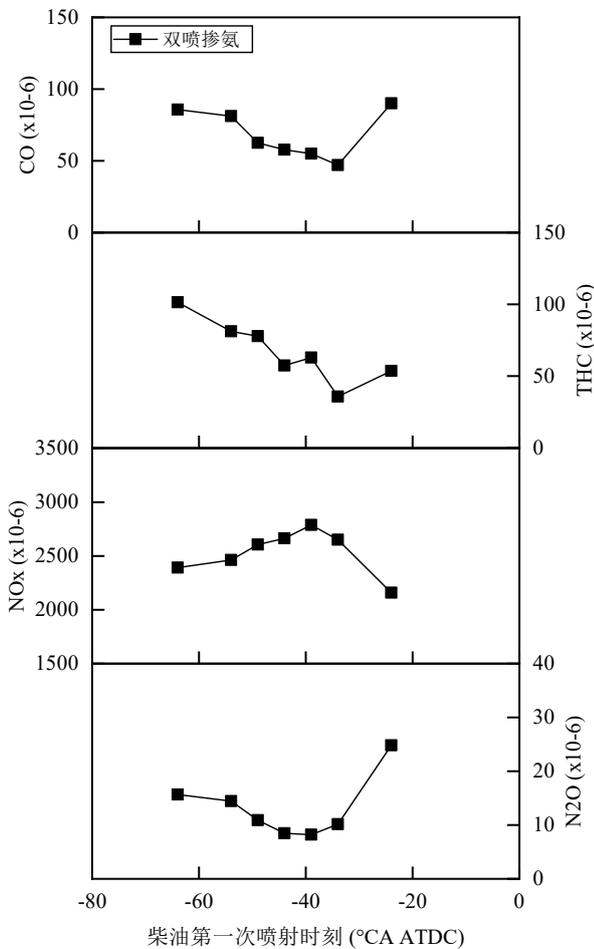


图7 不同预喷时刻下的排放特性

### 3.3 预喷量

图8是对预喷量进行优化探究的缸压和放热率结果。试验过程中固定预喷和主喷的喷油时刻,改变预喷的喷射量,保持柴油总喷射量一定。其中预喷量占比为预喷量与总喷油量的比值。研究表明,预喷量对发动机缸压的变化非常敏感,增加预喷量可显著增加最大爆压,并且增加预喷量也会缩短滞燃期,使得燃烧起始提前。通过放热率曲线可以发现,预喷油量在30%以上时,呈现“双峰放热”的放热率曲线,第一次放热在上止点之前并且高于第二次放热,当预喷油量低于30%时,双峰放热曲线逐渐融合成单峰放热,且放热峰值逐渐推迟,由上止点前向上止点后推进,在预喷油量占总油量的24%时,呈现单峰放热模式,且放热峰值在上止点之后,但在继续减少预喷油量会导致放热峰值继续靠后,并且放热减少,当预喷油量只占总喷油量的5%时,放热峰值低并且放热过程中,放热速率降低。通过图9热效率曲线来看,也对应了上述结果,预喷量在20%~30%之间时发动机处于高热效率区域。

图10氨燃烧效率可以看出,随着预喷量占比的提升,第一段燃烧放热增加,提前了起燃时刻,有利于氨气的燃烧,使得氨燃烧效率有所提升,在预喷油量占比超过总喷油量的30%后,继续增加预喷油量,由于燃烧放热峰值已在上止点后,燃烧峰值逐渐降低,使得氨燃烧效率提升不明显,达到饱和的90%燃烧效率。从图11的未燃氨排放的来看,增加预喷油量,增加了柴油和混合气的预混时间,使得燃烧初期缸内压力迅速上升,燃烧温度高,能将混合气中的氨大量引燃,故未燃氨排放减低。

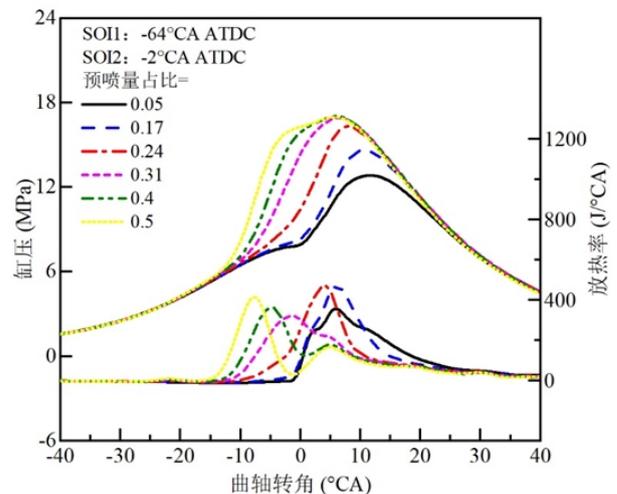


图8 不同预喷量的缸压和放热率

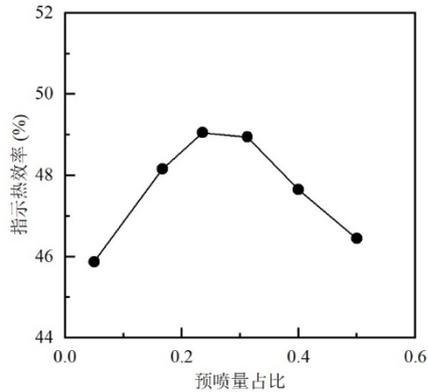


图 9 不同预喷量的热效率

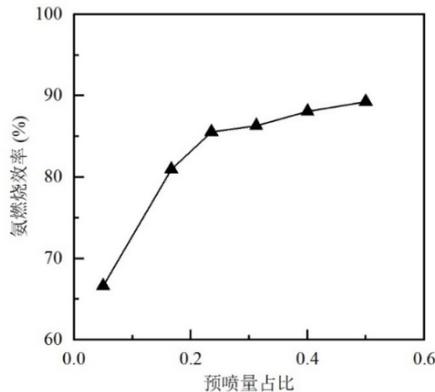


图 10 不同预喷量下的氨燃烧效率

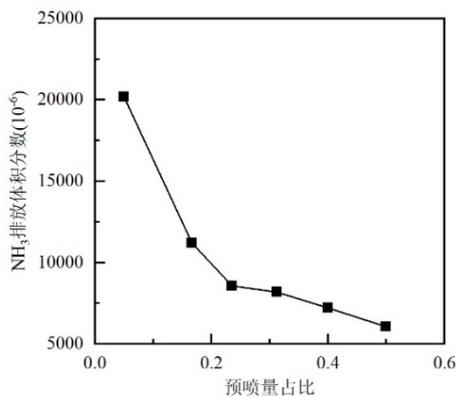


图 11 不同预喷量下的未燃氨排放

## 4 结论

本文在一台重型氨柴双燃料发动机上进行台架试验, 试验工况在 1200r/min、中高负荷和 50%氨能占比下进行, 通过改变单次喷射和双喷策略, 以及预喷量和预喷时刻, 探究和优化柴油喷射策略对氨柴双燃料燃烧和排放特性的影响。主要结论如下:

- (1) 在氨柴双燃料模式下, 由于氨燃料燃烧速度慢, 起燃温度高等特性, 燃烧不与柴油同步, 因此燃烧放热率呈现“双峰放热”曲线。采用双喷策略, 将柴油分两次喷入缸内, 可将氨燃烧效率提升 10%, 降低未燃氨和氧化亚氮排放。
- (2) 在双喷策略下, 提前预喷角度, 可推迟柴油起燃时间, 可将柴油和氨燃烧同步, 从而将“双峰放热”曲线变成“单峰放热”, 进一步降低未燃氨排放, 将氨燃烧效率提升至 94%。
- (3) 在双喷策略下, 预喷油量对最大爆压的敏感度要高于预喷角度, 保持循环喷油量一致的情况下, 增加预喷油量会导致最高爆压升高。同时, 随着预喷油量的增加, 热效率呈现先增大后减小的倒“U”型曲线, 在本文试验工况下, 20%~30%预喷油量的策略, 最高指示热效率达 49.1%。

### 参考文献:

- [1] 安永碳中和课题组著. 一本书读懂碳中和[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [2] 帅石金, 王志, 马骁, 徐宏明, 何鑫, 王建昕. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术. 汽车安全与节能学报 2021;12(4):417-439.
- [3] Ming Zheng, et al: Advanced Ignition Systems for Future Clean Combustion Engines: Review. Journal Automotive Safety and Energy, Vol. 6, No. 4. 2015
- [4] Shiraishi, Taisuke, Atsushi Teraji, and Yasuo Moriyoshi. "The effects of ignition environment and discharge waveform characteristics on spark channel formation and relationship between the discharge parameters and the EGR combustion limit." SAE International Journal of Engines 9.1 (2016): 171-178.
- [5] Wei W, Li G, Zhang Z, et al. Effects of ammonia addition on the performance and emissions for a spark-ignition marine natural gas engine[J]. Energy, 2023, 272:127092.
- [6] Ronan P, Pierre B, Christine M-R, Guillaume D, Fabien H. Laminar flame speed of ethanol/ammonia blends—An experimental and kinetic study[J]. Fuel Communications,

---

2022, 10:100052.

- [7] Li X, Chu X, Ma Z, Jin Y, Wang X, Xi Z, et al. An experimental and kinetic modeling study on the ignition characteristics of ammonia/ethanol under high temperatures[J]. *Fuel*, 2023, 352:129074.
- [8] Wang Z, Han X, He Y, Zhu R, Zhu Y, Zhou Z, et al. Experimental and kinetic study on the laminar burning velocities of NH<sub>3</sub> mixing with CH<sub>3</sub>OH and C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH in premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 229:111392.
- [9] Xu H, Wang J, Zhang C, Dai L, He Z, Wang Q. Numerical study on laminar burning velocity of ammonia flame with methanol addition[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(65):28152–64.
- [10] Li J, Huang H, Deng L, He Z, Osaka Y, Kobayashi N. Effect of hydrogen addition on combustion and heat release characteristics of ammonia flame[J]. *Energy*, 2019, 175:604-17.
- [11] Li, T., Zhou, X., Wang, N., Wang, X., Chen, R., Li, S., Yi, P. (2022). A comparison between low-and high-pressure injection dual-fuel modes of diesel-pilot-ignition ammonia combustion engines[J]. *Journal of the Energy Institute*, 102, 362-373.
- [12] Sun W, Zeng W, Guo L, et al. An optical study of the combustion and flame development of ammonia-diesel dual-fuel engine based on flame chemiluminescence[J]. *Fuel*, 2023, 349: 128507.
- [13] 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.
- [14] Jin S, Wu B, Zi Z, 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.
- [15] Niki Y, Nitta Y, Sekiguchi H, et al. Emission and combustion characteristics of diesel engine fumigated with ammonia[C]//Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51982: V001T03A016.