

高压缩比氨/醇火花点火发动机燃烧排放特性研究

林哲龙, 刘尚, 齐运亮, 陈清楚, 王志*

(清华大学车辆与运载学院, 北京 100084)

Investigation of combustion and emission characteristics of a high compression ratio spark ignition engine using alcohol/ammonia fuel

LIN Zhelong, LIU Shang, QI Yunliang, CHEN Qingchu, WANG Zhi

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

Abstract: Ammonia, ethanol, and methanol are promising carbon-neutral fuels in the future. Therefore, the use of alcohol fuels to enhance ammonia combustion in engines deserves study. In this paper, ethanol and methanol are selected as the primary fuels, which are blended and combusted with ammonia injected in the intake port, to investigate the effect of ammonia-alcohol fuels on the combustion and emission characteristics of a high-compression-ratio spark ignition engine under different loads. The results show that under low load and large ammonia blending ratio conditions, due to the high oxygen content of methanol, the ammonia-methanol fuel mode exhibits a better combustion duration and achieves a higher indicated thermal efficiency than the ammonia-ethanol mode. The use of ethanol and methanol to replace gasoline significantly reduces greenhouse gas emissions under similar NO_x emission conditions, and the reduction of greenhouse gas emissions is even more significant at high loads and ammonia blending ratios compared with low loads, regardless of gasoline or alcohol fuels.

摘要: 氨、乙醇和甲醇都是未来具有碳中和潜力的燃料, 在发动机上利用醇类燃料增强氨的燃烧性能值得研究。本文分别选取乙醇、甲醇作为主燃料, 与进气道喷射的氨气掺混燃烧, 研究不同负荷下氨醇燃料在高压压缩比条件下点燃式发动机中的燃烧排放特性。结果表明, 小负荷、大掺氨比例工况下, 得益于甲醇的高含氧率, 氨-甲醇模式显示出较佳的燃烧持续期, 实现了比氨-乙醇模式更高的指示热效率。使用乙醇、甲醇替代汽油在相近的 NO_x 排放条件下, 能显著降低温室气体排放, 无论汽油还是醇类燃料, 在大负荷、大掺氨比例工况下降低温室气体排放较小时更显著。

关键词: 氨燃烧; 乙醇; 甲醇; 双燃料发动机; 排放

Key words: ammonia combustion; ethanol; methanol; dual-fuel engine; emissions

中图分类号: TK417.5 文献标识码: A

0 概述

化石燃料因其高能量密度、易于储存运输被广泛应用于交通和能源领域。然而, 化石燃料的过量使用导致温室气体排放超标, 对人类社会和自然环境造成危害。同时, 高度依赖化石燃料的单一能源结构也不利于能源安全。目前, 寻找更加绿色低碳甚至零碳的燃料对传统化石燃料进行逐步替代, 是

内燃机行业的重要研究方向^[1]。

在零碳燃料中, 氨是氢的优良载体, 且相比氢更易于液化, 因此氨的储存和运输成本更低, 使用更快捷方便, 储存时的体积能量密度更高^[2]; 同时, 氨作为农业、工业领域的常用产品, 已经具有高度成熟的制、储、运基础设施^[3]; 此外, 氨可以利用可再生能源合成, 实现全生命周期零碳排放^[4]。总

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (T2241003、T2341002)。

作者简介: 林哲龙 (2000-), 男, 博士生, 主要研究方向为氨发动机, E-mail: linzl22@mails.tsinghua.edu.cn;

王志 (通信作者), E-mail: wangzhi@tsinghua.edu.cn。

之，将氨作为零碳燃料进行推广具有可行性和实用价值。

另一方面，氨的燃烧速度慢，点火能量高，可燃范围窄，纯氨难以在现有内燃机燃烧系统上直接应用^[5,6]。为提升氨的使用效果，将氨与活性更强的燃料混烧是一种常见的改进思路^[7-10]。例如，使用汽油^[7]、柴油^[8]、天然气^[9]、二甲醚^[10]等传统发动机燃料作为氨的引燃剂，能够极大提升氨的燃烧特性。

低碳燃料中，乙醇和甲醇具有代表性^[11,12]。乙醇在发动机上有很广泛的应用基础，是目前唯一拥有完整配送基础设施的液体生物燃料^[11]。同时，甲醇由于其易于合成、来源广泛等“可持续燃料”特性，也越来越多地应用于能源领域^[12]。这两种燃料辛烷值高，抗爆震能力强，适用于高压比发动机，加之含氧量高，燃烧性能好，适用于稀燃工况^[11,12]。

近年来，随着全球范围内利用醇类燃料和氨燃料降低碳排放共识的达成，有学者对乙醇/氨^[13,14]、甲醇/氨^[15,16]的混烧进行了初步的基础研究。Ronan等^[13]利用球形火焰法测量了 423 K 常压条件下乙醇/氨混合燃料的层流火焰速度，提出乙醇掺混改变了敏感反应。Li等^[14]在激波管中测量了 0.14 MPa 和 1.0 MPa 不同初始压力下乙醇/氨混合燃料的滞燃期，发现乙醇掺混显著促进了氨的燃烧，且增加压力可以进一步促进点火。试验与数值计算也表明，甲醇掺混同样显著改善了氨的燃烧性能^[15,16]。Wang等^[15]用热流量法获取了甲醇/氨混合物的层流火焰速度，并建立了 CEU-NH₃ 机理。Xu等^[16]在多种化学反应机理的基础上开发了 DNO-NH₃ 机理，指出压力增加会显著减小 NO 主要生成区的宽度，从而降低 NO_x 的总排放量。

可见，利用高活性燃料改善氨的燃烧效果是有效方法。本文在一台进气道喷射的高压缩比点燃式（SI）发动机上开展试验研究，分别使用乙醇、甲醇作为主燃料，同时与汽油进行对照，通过氨掺混燃烧，探究氨-乙醇、氨-乙醇模式的燃烧排放特性，旨在为低碳内燃机的研发提供依据。

1 试验方法

图 1 为试验系统的示意图。试验在一台四缸、四冲程点燃式发动机上开展。原机为进气道喷射发动机，在此基础上，对进气管路进行改造，在节气门前添加一个气态氨喷射器以确保氨与空气在进入

气缸之前混合均匀，氨喷射器的工作状态由专用电控单元（ECU）独立控制。发动机的更多参数如表 1 所示。

本研究使用汽油，乙醇，和甲醇三种液态碳氢燃料作为主燃料，其中，汽油作为对照组。三种主燃料单独使用时，调节节气门开度使最大扭矩点对应的平均指示压力（IMEP）在 0.50 MPa、0.87 MPa 附近，并以此作为试验基础负荷点。试验中每个工况连续记录 200 个循环的缸内压力和不少于 1 min 的燃料流量、污染物浓度、进排气温度等稳态数据。用 X 表示氨在混合燃料中的能量占比。表 2 列出了详细的试验工况。

表 1 发动机参数

项目	参数
排量 (L)	1.5
点火能量 (mJ)	90
压缩比 (#)	16
氨气喷射压力 (MPa)	0.45

表 2 试验工况

项目	参数
发动机转速 (r/min)	2000
进气压力 (MPa)	0.1
进气温度 (K)	303
过量空气系数 (#)	1.0
EGR 率 (%)	0
IMEP _{MBT @ X=0} (MPa)	0.50, 0.87
氨能量比例 X (%)	0, 10, 20, 30

2 结果与讨论

2.1 燃烧特性

图 2 给出了汽油、乙醇、甲醇分别与不同量氨气掺混时，最大扭矩点处的缸压和放热率曲线。对于大负荷汽油工况，不掺氨时，由于爆震限制，点火时刻不得不推迟，燃烧相位滞后；氨气掺混后，爆震倾向大幅降低，燃烧重心逐渐靠近上止点。乙醇和甲醇作为主燃料的工况无论是否掺混氨气均无爆震出现，能够实现较为理想的燃烧相位，但由于氨的燃烧速度慢、反应活性低，为了维持燃烧等容度，在掺混氨气后需要进一步提前点火时刻，确保发动机运行稳定。

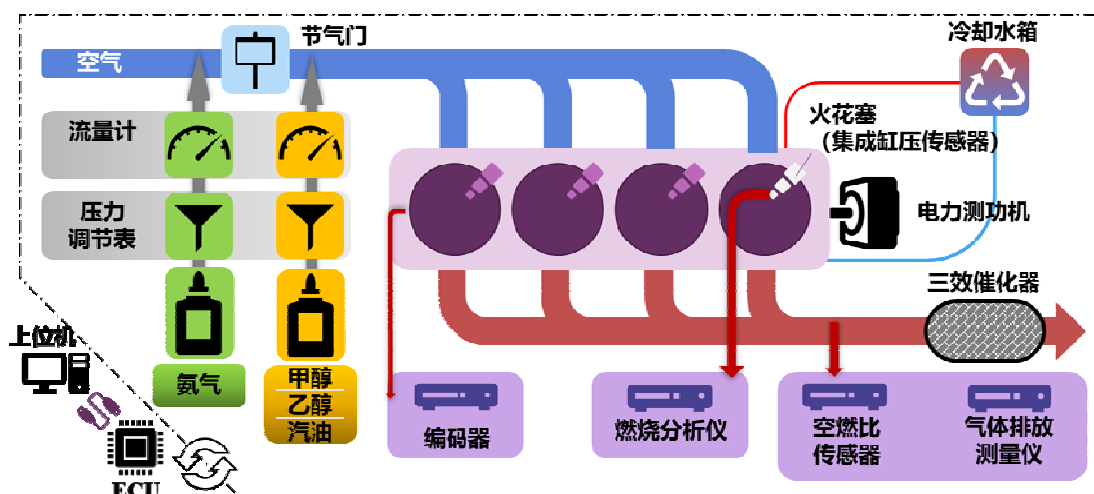


图1 测试台架示意图

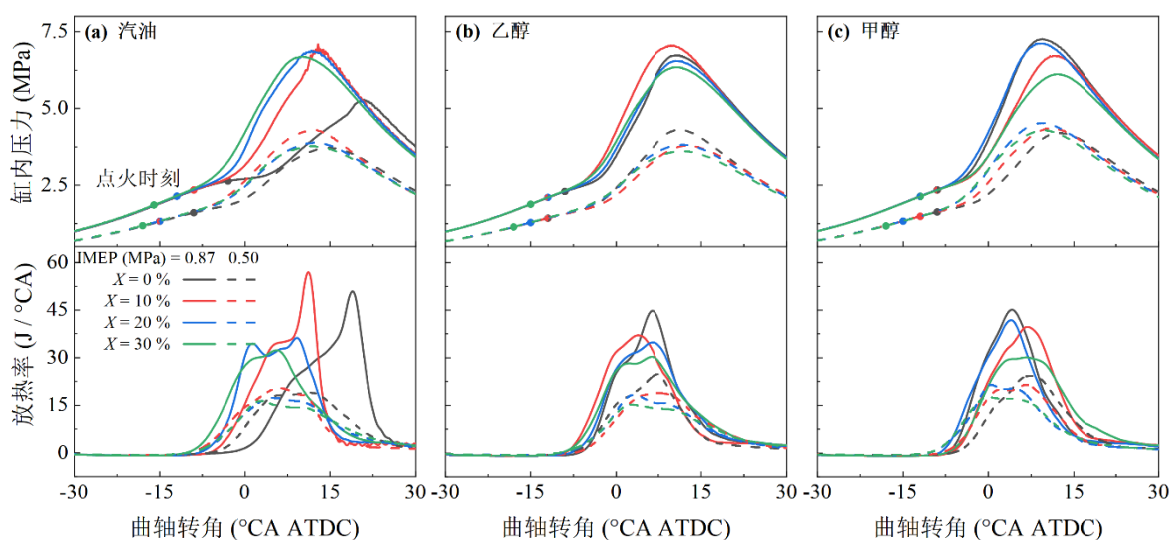


图2 燃料成分和氨能量占比对缸压、放热率的影响（最大扭矩点）

图3展示了不同工况下的压力峰值及相应的曲轴转角。通过提前点火时刻，掺氨前后可以获得相同甚至更高的压力峰值，但提前点火也会导致峰值相位进一步提前。考虑到未掺氨时最大压力出现相位已接近上止点，因此，掺氨并过量提前点火时刻会造成上止点前出现明显的压缩负功，反而不利于热效率提高。

图4示出了不同燃料下，氨能量占比和负荷对燃烧持续期（CA90-CA10）的影响。小负荷时，随着点火时刻提前，CA90-CA10逐渐减小，且减小趋势放缓。大负荷时的规律则与小负荷时相反。整体而言，甲醇相较于乙醇能更显著缩短燃烧持续期，特别是在大的掺氨比例、晚的点火时刻等不利于充分燃烧的工况下，这也反映出甲醇更适用于稀燃等不利于稳定燃烧的工况^[12]。

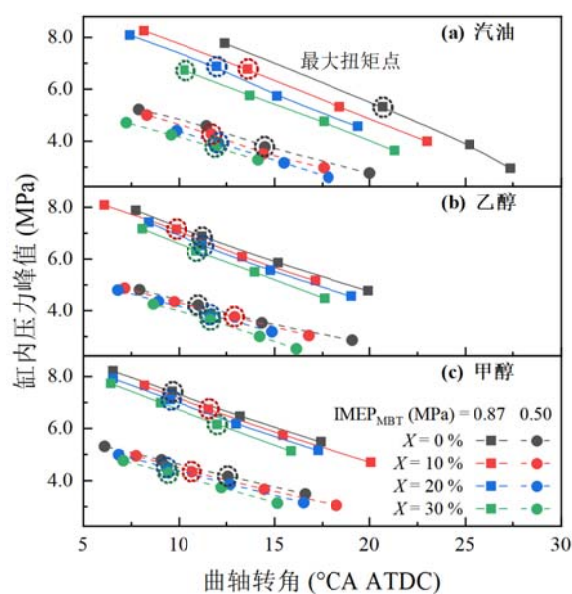


图3 燃料、氨能量占比和点火时刻对缸压峰值的影响

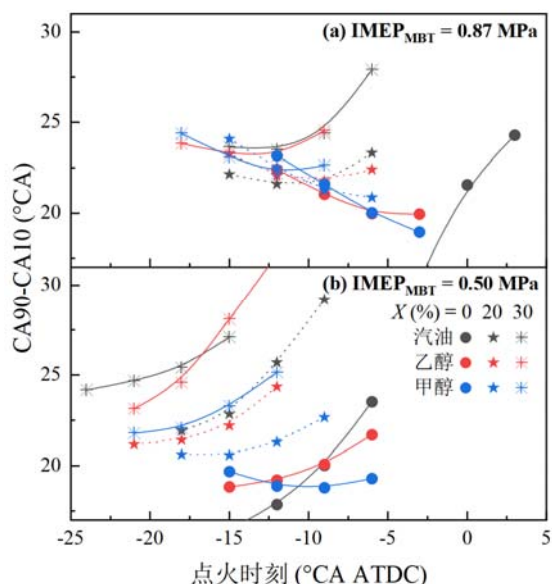


图4 燃料、氨能量占比和点火时刻对燃烧持续期的影响

2.2 动力特性与燃油经济性

图5给出了IMEP、循环变动系数(COV)、指

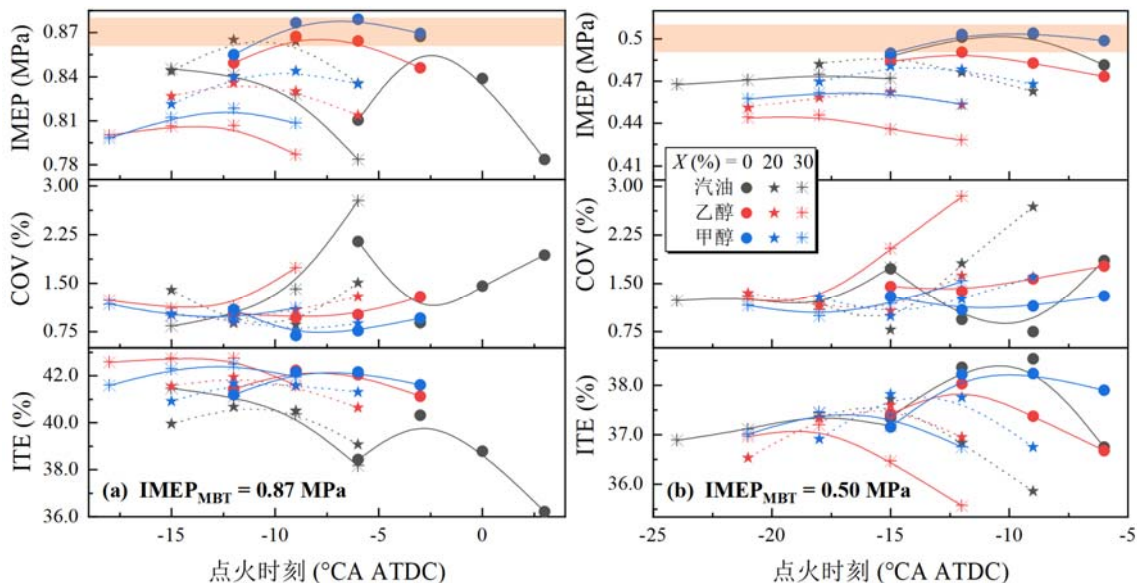


图5 燃料、氨能量占比和点火时刻对IMEP、COV、ITE的影响

2.3 排放特性

图6给出了不同工况下氮基污染物的排放特性。对于汽油、乙醇、甲醇三种主燃料, X 对 NH_3 与 NO_x 的影响在两种负荷下均表现出类似的规律。随着 X 增大, NO_x 排放先升高, 后趋近不变, 这一方面是因为氨掺混在引入更多燃料型 NO_x 的同时降低了燃烧温度, 从而抑制了高温型 NO_x 的生成^[5,17]。从点火时刻的影响看, 未掺氨时, 提前点火时刻增加燃烧过程温度, 有利于高温型 NO_x 生成, NO_x 随点火

时刻提前而增加; 但掺氨后, 燃料型 NO_x 的压力生成特性反而使提前点火时刻工况下的 NO_x 的浓度更低, NO_x 生成趋势与未掺氨工况相反^[17, 18]。随着 X 增大, 未燃氨排放增加, 提前点火时刻造成了更高的 NH_3 排放, 这一方面是由于提前点火时刻产生了更高的峰值压力(图3), 造成了更明显的狭隙效应^[19], 在燃烧后期更多 NH_3 从燃烧室的缝隙中窜出, 恶化了 NH_3 排放; 另一方面, 与掺混燃料的化学动力学过程有关。图7给出了基于 Glarborg 2018

示热效率(ITE)在不同工况下的数值。大负荷时, 汽油组的部分工况 COV 更高, 这主要是由于过早点火引起的爆震或过晚点火导致的不稳定燃烧。小负荷时缸内温度低, 氨燃烧相对不充分, 小负荷掺氨的工况表现出了比对应燃料组合的大负荷工况略高的 COV, 特别是点火时刻较晚的条件下。甲醇燃料体现出了整体最低的 COV, 表明最强的掺氨耐受力。对于大负荷工况, 如图5(a)所示, 三种氨能量比例(X)条件下乙醇和甲醇组的 ITE 均比汽油组更高, 乙醇组和甲醇组之间的 ITE 相近。甲醇含氧率高更有利于其在稀燃^[14]、大掺氨比例、小负荷(图5(b))等不利于充分燃烧的工况下依然保持可接受的燃烧持续期(图4(b)), 实现更稳定的燃烧和更低的 COV(图5), 从而在这些恶劣工况下依然保持较高的 ITE 下限。

时刻提前而增加; 但掺氨后, 燃料型 NO_x 的压力生成特性反而使提前点火时刻工况下的 NO_x 的浓度更低, NO_x 生成趋势与未掺氨工况相反^[17, 18]。随着 X 增大, 未燃氨排放增加, 提前点火时刻造成了更高的 NH_3 排放, 这一方面是由于提前点火时刻产生了更高的峰值压力(图3), 造成了更明显的狭隙效应^[19], 在燃烧后期更多 NH_3 从燃烧室的缝隙中窜出, 恶化了 NH_3 排放; 另一方面, 与掺混燃料的化学动力学过程有关。图7给出了基于 Glarborg 2018

化学反应动力学机理^[20]的模拟计算结果, 碳基燃料在燃烧早期被快速消耗, 燃烧后期的氧浓度和燃烧强度均降低, 燃烧缓慢的 NH_3 在后期失去活性助燃组分, 因此提前点火时刻使未燃氨排放升高。同时, 如图 7 所示, 相比氨-甲醇模式, 氨-乙醇模式使氨燃烧相对于碳基燃料燃烧滞后更加明显, 这与氨-乙醇模式具有最高的未燃氨排放相对应 (图 6)。

高掺氨比例和大幅提前点火时刻的工况下未燃 NH_3 多, 一定程度上有利于 De-NO_x 反应^[20]。具体地, 在膨胀冲程 1100 - 1400 K 的温度范围内, NH_3 与 OH 基发生反应, 并进一步与对 NO 进行消耗。因此, 对于 $X = 20 - 30\%$ 比例工况, NO_x 排放几乎不再随 X 增大而增大。相对于大负荷工况, 虽然小负荷工况燃烧温度较低, 有利于减少 NO_x 生成, 但小负荷工况的缸内压力也更低, 不利于限制 NO_x 浓度。并且, 小负荷工况热效率更低, 因此计算排放率后, 小负荷的 NO_x 排放率表现出略微的劣势。

图 8 展示了不同工况下的温室气体排放特性。随着零碳氨燃料对含碳燃料的替代, CO_2 排放率显著下降, 但 N_2O 排放提高, 这主要是由于更多的 NH_3 氧化成 N_2O ^[21]。对于掺氨混烧的工况, 主要的温室气体排放有 CO_2 和 N_2O 。其中, N_2O 在一个世

纪时间尺度下对温室效应的贡献被认为是 CO_2 的约 300 倍^[22]。因此, 本文引入式 (1) 对温室气体等效质量排放率 (GHG) 进行统计:

$$\text{GHG} = m_{\text{CO}_2} + 300 \cdot m_{\text{N}_2\text{O}} \quad (1)$$

其中, m_{CO_2} 和 $m_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别是两种温室气体的质量排放率, 单位为 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

随着点火提前, 缸内峰值温度提高, 促进 N_2O 热解^[23], N_2O 排放降低。对于 N_2O 排放率相对较高的小负荷工况, 汽油掺氨后 GHG 排放率在某些工况甚至反而上升, 加之三种主燃料在 N_2O 排放性能上未表现出显著区别, 因此, 乙醇和甲醇在降低 CO_2 排放上的优势最终转化为降低 GHG 排放的优势。

图 9 对三种主燃料分别与不同比例氨气掺混时的燃油经济性和排放特性进行了汇总。整体而言, 相比小负荷工况, 三种主燃料均在大负荷工况下获得更优的燃油经济性和排放性能。大负荷下, 主燃料使用乙醇、甲醇替代汽油进一步提升了 ITE, 而甲醇在小负荷工况下相对于乙醇更具有提升 ITE 的优势。使用乙醇、甲醇替代汽油在相近的 NO_x 、 NH_3 排放下能够显著降低 GHG, 无论汽油还是醇类燃料, 在大负荷、大掺氨比例工况下降低 GHG 更为显著。

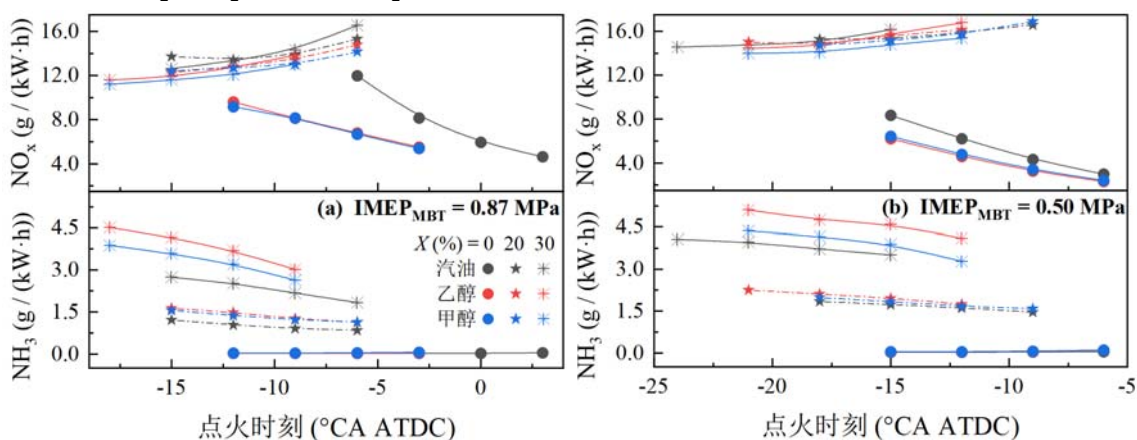


图 6 燃料、氨能量占比和点火时刻对 NO_x 和 NH_3 排放的影响

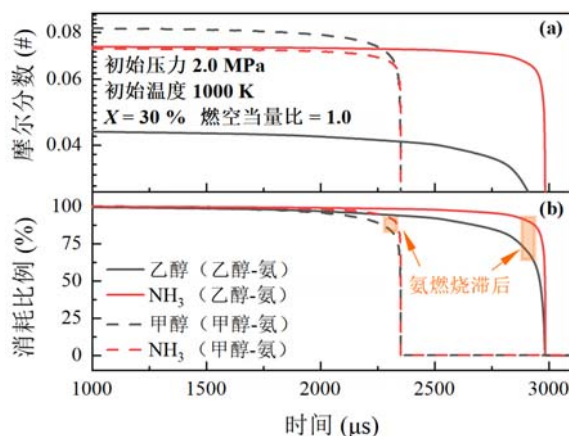


图7 燃料摩尔分数及消耗比例

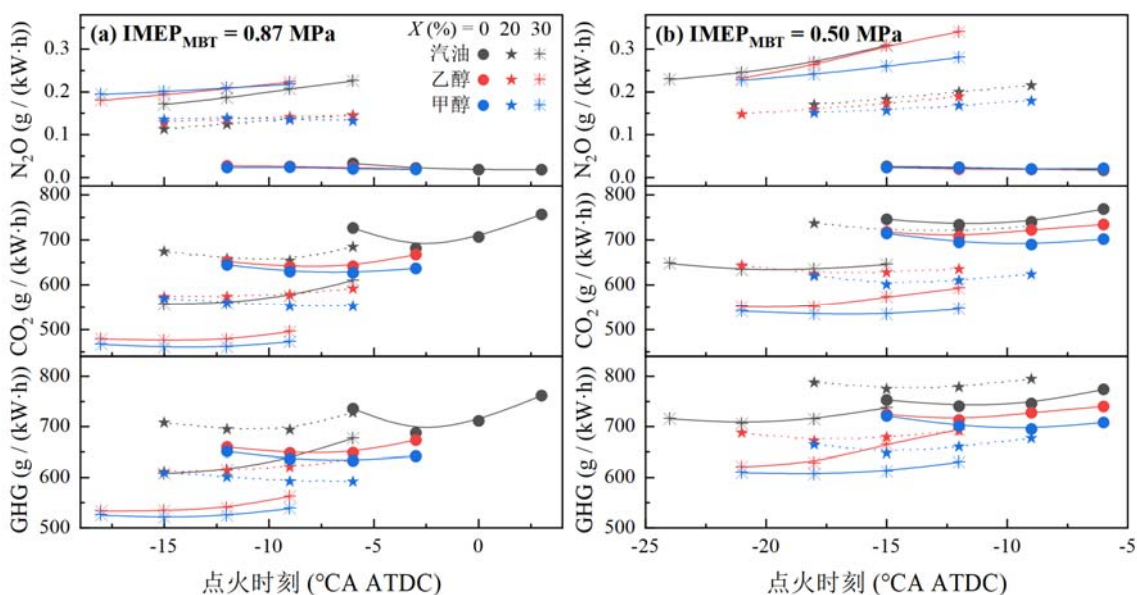
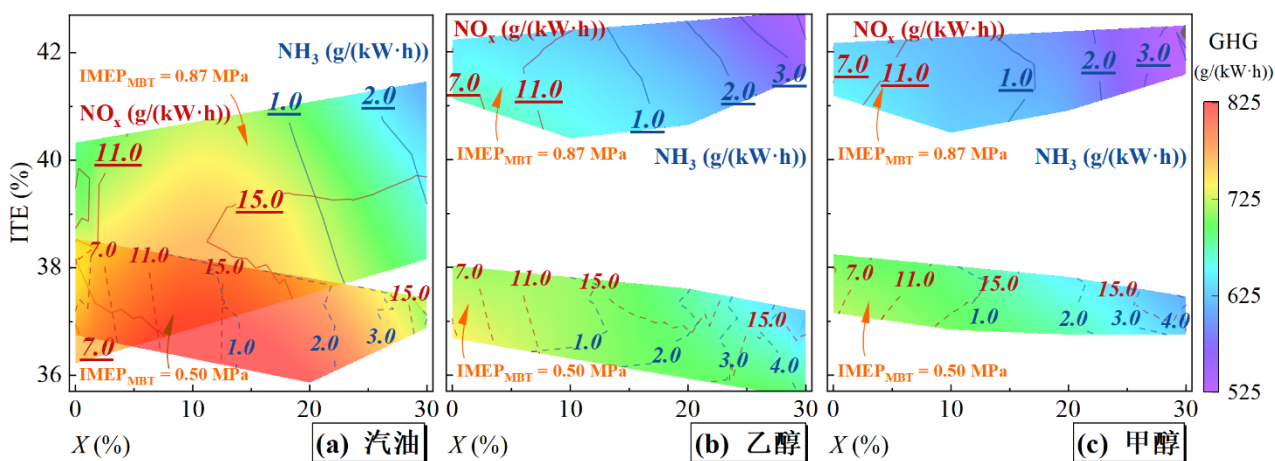
图8 燃料、氨能量占比和点火时刻对 N_2O 、 CO_2 和 GHG 排放的影响

图9 三种燃料掺氨混烧的燃油经济性与排放特性

3 结论

- 1) 得益于甲醇的高含氧率和掺氨耐受性，氨-甲醇
- 2) 使用乙醇、甲醇替代汽油主要通过降低 CO_2 进

模式相较于氨-乙醇模式在指示热效率上的优势集中在小负荷工况，大负荷时两种模式差异较小，但均优于氨-汽油模式。

而降低温室气体 (GHG) 排放, 大负荷时 GHG 降低程度更加显著。小负荷、小氨掺混比例情况下, 由于 N_2O 排放较高, 氨-汽油模式可能导致 GHG 排放比未掺氨时更高。

- 3) 同一燃料掺氨燃烧后同时增加 NH_3 与 NO_x 排放, 相较于氨-汽油模式, 氨-醇模式能够降低 NO_x 排放, 但更强的狭隙效应和氨燃料惰性效应导致 NH_3 排放恶化。大负荷工况时氨基污染物的排放特性全面优于小负荷工况。

参考文献:

- [1] Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, David WIF, Bowen PJ. Ammonia for power[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69:63-102.
- [2] Ezzat M, Dincer I. Development and assessment of a new hybrid vehicle with ammonia and hydrogen[J]. *Applied Energy*, 2018, 219:226-39.
- [3] 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.
- [4] MacFarlane DR, Cherepanov PV, Choi J, Suryanto BHR, Hodgetts RY, Bakker JM, et al. A roadmap to the ammonia economy[J]. *Joule*, 2020, 4:1186-205.
- [5] Reiter AJ, Kong S-C. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel[J]. *Fuel*, 2011, 90:87-97.
- [6] Chiong M-C, Chong CT, Ng J-H, Mashruk S, Chong WWF, Samiran NA, et al. Advancements of combustion technologies in the ammonia-fuelled engines[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244(1):114460.
- [7] Liu S, Lin Z, Zhang H, Lei N, Qi Y, Wang Z. Impact of ammonia addition on knock resistance and combustion performance in a gasoline engine with high compression ratio[J]. *Energy*, 2023, 262:125458.
- [8] Yousef A, Guo H, Dev S, Liko B, Lafrance S. Effects of ammonia energy fraction and diesel injection timing on combustion and emissions of an ammonia/diesel dual-fuel engine[J]. *Fuel*, 2022, 314:122723.
- [9] Oh S, Park C, Oh J, Kim S, Kim Y, Choi Y, Kim C. Combustion, emissions, and performance of natural gas-ammonia dual-fuel spark-ignited engine at full-load condition[J]. *Energy*, 2022, 258:124837.
- [10] Cai T, Zhao D. Enhancing and assessing ammonia-air combustion performance by blending with dimethyl ether[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 156:112003.
- [11] Mendiburu AZ, Lauermaun CH, Hayashi TC, Marinos DJ, Rodrigues da Costa RB, Coronado CJR, et al. Ethanol as a renewable biofuel: combustion characteristics and application in engines[J]. *Energy*, 2022, 257:124688.
- [12] Tian Z, Wang Y, Zhen X, Liu Z. The effect of methanol production and application in internal combustion engines on emissions in the context of carbon neutrality: a review[J]. *Fuel*, 2022, 320:123902.
- [13] 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.
- [14] 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 at high temperatures[J]. *Fuel*, 2023, 352:129074.
- [15] 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_3 mixing with CH_3OH and C_2H_5OH in premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 229:111392.
- [16] 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]. *Int J Hydrogen Energy*, 2022, 47(65):28152-64.
- [17] Kobayashi H, Hayakawa A, Somarathne KDKunkuma A, Okafor Ekenechukwu C. Science and technology of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1):109-33.
- [18] Duynslaegher C, Jeanmart H, Vandooren J. Ammonia combustion at elevated pressure and temperature conditions[J]. *Fuel*, 2010, 89(11):3540-5.
- [19] Westlye FR, Ivarsson A, Schramm J. Experimental investigation of nitrogen based emissions from an ammonia fueled SI-engine[J]. *Fuel*, 2013, 111(1):239-47.
- [20] Glarborg P, Miller JA, Ruscic B, Klippenstein SJ. Modeling nitrogen chemistry in combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67:31-68.
- [21] Hayakawa A, Goto T, Mimoto R, Kudo T, Kobayashi H. NO formation/reduction mechanisms of ammonia/air premixed flames at various equivalence ratios and pressures[J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2015, 2:14-00402.

-
- [22] Li T, Zhou X, Wang N, Wang X, Chen R, Li S, et al. A comparison between low-and high-pressure injection dual-fuel modes of diesel-pilot-ignition ammonia combustion engines. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 102:362-73.
- [23] Galle M, Agar D, Watzenberger O. Thermal N_2O decomposition in regenerative heat exchanger reactors[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(4):1587-95.