

掺氨对甲醇发动机燃烧性能的仿真模拟

康娇娇, 崔新娟

济南市生态环境局机动车污染防治中心, 山东 济南

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

氨气是重要的零碳替代能源之一, 当前对氨气的研究限于机理和着火性质的探究, 缺乏对发动机的应用研究。本文搭建了甲醇发动机模型, 并通过缸内压力和放热率验证了模型的准确性。在此基础上引入不同浓度(0%, 5%和10%)的氨气分析了缸内压力、放热率、滞燃期、燃烧持续期和缸内温度的变化。研究发现, 添加氨气后, 缸内压力和放热率增大, 滞燃期和燃烧持续期减少, 缸内最大温度升高。

关键词

甲醇, 氨气, 燃烧性能, 仿真

Combustion Performance Simulation of Methanol Engines with Ammonia Blending

Jiaojiao Kang, Xinjuan Cui

Motor Vehicle Pollution Prevention and Control Center, Jinan Municipal Ecological Environment Bureau, Jinan Shandong

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Ammonia is one of the important zero-carbon alternative energy sources. The current research on ammonia is limited to the exploration of mechanism and ignition properties, and there is a lack of application research on engines. In this paper, a methanol engine model was built, and the accuracy of the model was verified by the pressure in the cylinder and the heat release rate. On this basis, different concentrations of ammonia (0%, 5% and 10%) were introduced to analyze the changes of cylinder pressure, heat release rate, ignition delay period, combustion duration and temperature in the cylinder. It was found that after adding ammonia gas, the pressure and heat release rate in the cylinder increased, the combustion delay period and combustion duration decreased, and the maximum temperature in the cylinder increased.

Keywords

Methanol, Ammonia Gas, Combustion Performance, Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 概述

重型发动机由于其功率大、扭矩高等特点,是远洋运输、重型机械不可替代的重要动力来源。但是,其排放物如碳烟对人体有严重的危害,而氮氧化物会造成酸雨或者腐蚀现象。此外,习总书记提出碳达峰和碳中和的战略目标。因此,减少发动机排放实现清洁燃烧迫在眉睫。甲醇作为一种低碳燃料,具有49.93%的氧浓度,能够减少发动机局部氧气浓度低的特点,进而减少不完全燃烧。同时其分子中不含有C-C键结构,同样减少了碳烟前驱物的生成,因此,选用甲醇发动机是实现碳达峰碳中和的重要方法之一。

当前,甲醇发动机的应用研究较为广泛,如 Bilgin 等人[1]研究了添加甲醇对汽油点火发动机的影响,研究发现使用5%的甲醇提高了制动平均有效压力和有效热效率。Zhou 等人[2]研究了添加甲醇对生物柴油发动机的燃烧和排放的影响,研究发现,使用甲醇令一氧化碳排放减少,氮氧化物排放有少部分增大。高等人[3]研究了供油提前角对甲醇发动机的性能影响,研究发现,增大供油提前角使得碳氢化合物和一氧化碳减少。氨气是一种非碳类燃料,使用氨气不会产生一氧化碳、二氧化碳和碳烟等排放物,被认为是实现零碳排放的重要能源之一。但是,氨气具有自燃温度高、火焰传播速度低、可燃极限窄和汽化潜热高的特点[4],因此,其着火性质较差。当前对氨气的研究限于机理和着火性质的探究。缺乏对发动机的应用研究。因此,本文为研究氨气对发动机性质的影响,以甲醇发动机为研究对象,搭建了甲醇发动机模型,研究了添加氨气对甲醇发动机燃烧性能的影响,为氨气应用于发动机提供参考数据。

2. 试验及模型搭建

2.1. 发动机台架基本参数及控制参数

Table 1. Basic parameters of the methanol engine
表 1. 甲醇发动机基本参数

项目	参数
发动机型式	直列、水冷、四缸、增压
缸径/mm × 行程/mm	94 × 100
排量/L	2.776
连杆长度/mm	115
燃烧室类型	ω 型
压缩比	11.5

本文台架基于天然气发动机进行改装,发动机参数如表 1 所示,该发动机为直列水冷四缸增压发动机,排量为 2.776L,压缩比为 11.5。同时采用凯迈 CW-160B 测功机获得发动机实时扭矩和功率,采用 AVL1000 型空气流量计进行空气质量流量测量,采用 GREGORY Flowtronic S8005C 进行发动机油耗测

量, 采用 Kistler 6052C 缸压传感器采集缸压, 采用 Labview 平台进行发动机参数控制。

2.2. 试验运行参数

试验中控制发动机转速为 1600 rpm, 50%负荷, 功率为 28.6 kW, 扭矩 170.7 Nm, 进气压力 140 kPa, 进气温度 46.1℃, 点火正时为 23° BTDC, 进气道喷油正时为 100° BTDC, 燃料为甲醇。

2.3. 甲醇-氨气模型构建

本文为研究氨气对甲醇发动机性能的影响, 搭建了甲醇-氨气机理模型, 该模型中甲醇机理选用 Li 等人[5]构建的模型, 氨气机理选用 Glarborg 等人[6]搭建的模型, 最终, 该模型共包含 251 个物种、1794 个化学反应。

2.4. 发动机仿真模型

本文选用 Converge 对发动机进行几何模型的构建及燃烧性能模拟。仿真模型仅包含整缸部分, 仿真起始时刻为-60° ATDC, 终点为 140° ATDC。基础网格 4 mm, 采用温度速度 3 级加密。燃烧模型选用 SAGE 详细模型[7], 氮氧化物排放模型选用 Extended Zeldovich 模型[8], 颗粒排放选用 Hiroyasu-NSC soot 模型[9], 湍流模型选用 RHG k- ε [10]模型, 总网格数 1,000,000 个, 模型如下图 1 所示。

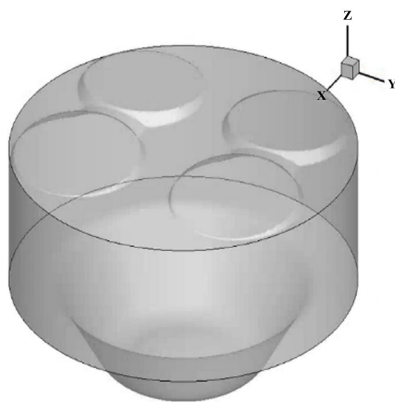


Figure 1. Methanol engine model
图 1. 甲醇发动机模型

2.5. 模型验证

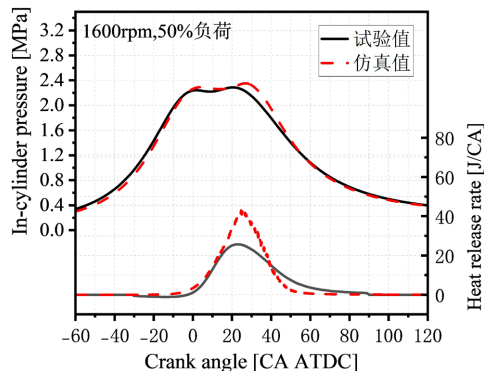


Figure 2. Verification of the cylinder pressure and heat release rate
图 2. 缸压和放热率验证

为保证发动机数值模拟的准确性, 需要标定发动机缸压和放热率等参数。由 Shi 等人[11][12]的研究表明, 在保证燃料化学特性的基础上, 通过对比发动机缸压和放热率就可以复现发动机的燃烧效果, 进而保证数值模拟准确性。图 2 给出了 1600 转速下, 100% 负荷时发动机的试验和仿真缸压与放热率曲线。可知, 在工况下, 模型可较为准确地吻合试验缸压曲线。而模型获得的放热率高于试验放热率。这是由于模型未计入机械和摩擦损失等引起的。根据 Lv 等人[13]的研究发现, 在发动机仿真过程中, 放热率的模拟值略高于试验值。因此, 数值模拟过程可认为是准确的。

3. 结果与讨论

通过上述试验与模型验证, 保证了模型的准确性, 下面将在燃料中分别添加 5% 与 10% 的氨气, 记为 CN5 和 CN10, 纯甲醇燃料作为参考, 记为 CN0。下面将通过缸压与放热率、滞燃期、燃烧持续期、缸内最大温度等参数, 研究氨气对甲醇发动机燃烧性能的影响。

3.1. 氨气对甲醇发动机缸压和放热率的影响

图 3 给出了 1600 转速、50% 负荷工况下, 缸压和放热率图, 由图可知, 使用 5% 和 10% 氨气后, 缸内压力相对于未使用氨气时提高。同时随着氨气浓度的增大, 缸内压力和放热率减少。相对于未使用氨气, 使用氨气后, 放热率峰值提高, 对应峰值的曲轴转角减小。最大放热率 45 J/CA, 最大缸内压力峰值为 2.8 MPa。但是进一步增加氨浓度导致缸内压力和放热率减小。这是由于缸内的高温导致掺混的氨发生解离引起的。氨在高温下解离产生氢离子, 促进了混合燃料的燃烧, 进而导致放热率和放热速率增加。但是, 进一步增加氨浓度并未产生更多的氢离子, 此时, 氨的解离达到平衡点。进而由于氨本身的高自燃温度特性和低热值导致缸内压力和放热率降低。因此, 掺混 5% 氨的工况相对于 10% 氨的工况获得更高的放热率和缸内压力。

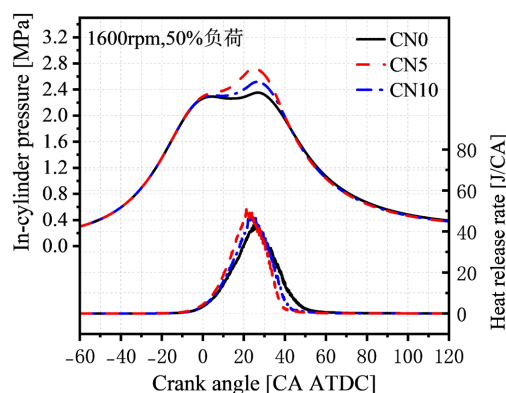


Figure 3. Verification of the cylinder pressure and heat release rate

图 3. 缸压和放热率验证

3.2. 滞燃期和燃烧持续期

图 4 给出了不同燃料下的滞燃期和燃烧持续期图。由图可知, 使用 5% 的氨气减少了滞燃期, 但是随着氨气浓度的增大, 滞燃期有所提高。同时, 燃烧持续期同样随着氨气的使用减少, 而随着氨气浓度的增加有所增加。这同样是由于氨在高温下解离出氢离子引起的, 氢的参与使得着火速率增大。但是进一步添加氨并未解离出更多的氢离子, 反而由于氨本身潜热高的物理特性增大了混合燃料的着火滞燃期, 因此, 添加 5% 的氨可获得最短的混合燃料滞燃期。

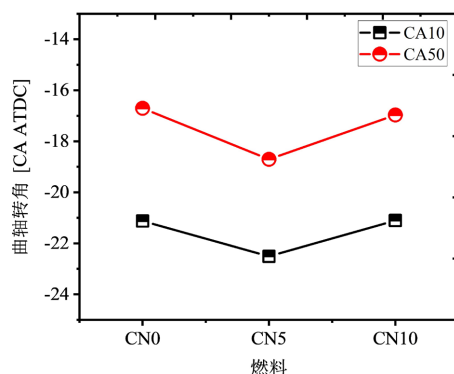


Figure 4. Burame period and combustion duration

图 4. 滞燃期和燃烧持续期

3.3. 缸内最大温度

图 5 给出了不同氨气浓度下缸内最大温度及其对应的曲轴转角。由图可知, 使用氨气令缸内最大温度升高, 对应曲轴转角提前。相对于未使用氨气, 使用少量的氨气令缸内最大温度从 1970 K 上升至 2080 K, 上升了 5.58%。上述结果进一步验证了缸内压力、放热率和滞燃期减小的原因。较高的温度更利于氨的燃烧, 进而产生最佳的燃烧效果。因此, 由上述结果可知, 添加 5% 的氨可获得最佳的燃烧工况。

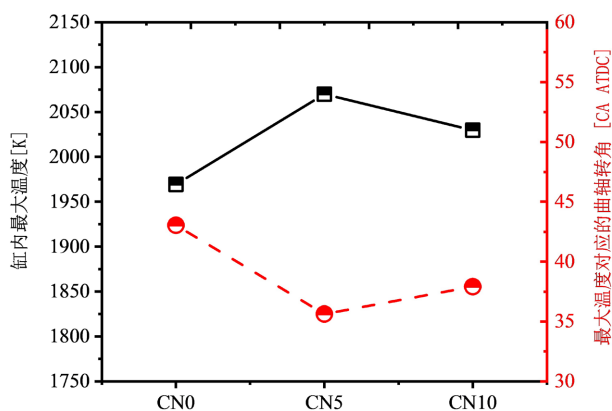


Figure 5. Maximum temperature in the cylinder and its crankshaft rotation angle

图 5. 缸内最大温度及其曲轴转角

4. 结论

1) 本文搭建了甲醇发动机模型, 并通过试验的缸压和放热率验证了模型的准确性。在此基础上, 引入了氨气, 分析了氨气对甲醇发动机燃烧性能的影响。

2) 在甲醇燃料中添加氨气后, 令缸压放热率峰值增大。滞燃期和燃烧持续期减少。缸内最大温度增大, 最大增加了约 5.58%。

3) 氨的添加使得发动机缸内压力、放热率、最大温度先增大后减少, 使得滞燃期先减少后增大。因此在使用 5% 的氨后, 发动机获得最佳的燃烧性能。

参考文献

- [1] Bilgin, A. and Sezer, İ. (2008) Effects of Methanol Addition to Gasoline on the Performance and Fuel Cost of a Spark

- Ignition Engine. *Energy & Fuels*, **22**, 2782-2788. <https://doi.org/10.1021/ef8001026>
- [2] Zhou, D.Z., Yang, W.M., An, H., Li, J. and Shu, C. (2015) A Numerical Study on RCCI Engine Fueled by Biodiesel/Methanol. *Energy Conversion and Management*, **89**, 798-807. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.054>
- [3] 高聪慧, 朱建军, 王晋, 等. 供油提前角对甲醇发动机燃烧过程及排放的影响[J]. 中国农机化学报, 2014, 22(36): 57-60.
- [4] Yin, G., Li, J., Zhou, M., Li, J., Wang, C., Hu, E., *et al.* (2022) Experimental and Kinetic Study on Laminar Flame Speeds of Ammonia/Dimethyl Ether/Air under High Temperature and Elevated Pressure. *Combustion and Flame*, **238**, Article 111915. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111915>
- [5] Li, J., Zhao, Z., Kazakov, A., Chaos, M., Dryer, F.L. and Scire, J.J. (2007) A Comprehensive Kinetic Mechanism for CO, CH₂O, and CH₃OH Combustion. *International Journal of Chemical Kinetics*, **39**, 109-136. <https://doi.org/10.1002/kin.20218>
- [6] Glarborg, P., Miller, J.A., Ruscic, B. and Klippenstein, S.J. (2018) Modeling Nitrogen Chemistry in Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, **67**, 31-68. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.01.002>
- [7] Sun, X., Liang, X., Shu, G., Wang, Y., Wang, Y. and Yu, H. (2017) Effect of Different Combustion Models and Alternative Fuels on Two-Stroke Marine Diesel Engine Performance. *Applied Thermal Engineering*, **115**, 597-606. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.093>
- [8] Anetor, L., Odetunde, C. and Osakue, E.E. (2014) Computational Analysis of the Extended Zeldovich Mechanism. *Ara-bian Journal for Science and Engineering*, **39**, 8287-8305. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1398-7>
- [9] Ibrahim, F., Wan Mahmood, W.M.F., Abdullah, S. and Mansor, M.R.A. (2017) Comparison of Simple and Detailed Soot Models in the Study of Soot Formation in a Compression Ignition Diesel Engine. SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1006>
- [10] Yan, X., Mohammadian, A. and Chen, X. (2019) Three-Dimensional Numerical Simulations of Buoyant Jets Discharged from a Rosette-Type Multiport Diffuser. *Journal of Marine Science and Engineering*, **7**, Article 409. <https://doi.org/10.3390/jmse7110409>
- [11] Shi, X., Qian, W., Wang, Q., Luo, H., Kang, Y. and Ni, J. (2021) Effect of Water Content of Hydrous Ethanol on Chemical Kinetic Characteristics Based on the New Developed Reduced Ethanol-Toluene Reference Fuels Mechanism. *Fuel*, **303**, Article 121201. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121201>
- [12] Shi, X., Qian, W., Wang, H., Pan, M., Wang, Q. and Ni, J. (2022) Development and Verification of a Reduced Dimethoxymethane/n-Heptane/Toluene Kinetic Mechanism and Modelling for CI Engines. *Applied Thermal Engineering*, **214**, Article 118855. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118855>
- [13] Lv, D., Chen, Y., Chen, Y., Guo, X., Chen, H. and Huang, H. (2019) Development of a Reduced Diesel/Poden Mechanism for Diesel Engine Application. *Energy Conversion and Management*, **199**, Article 112070. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112070>