

压燃式甲醇发动机技术发展综述

韦虹¹, 马瑞博¹, 文远超¹, 马学建¹, 沈航², 王河缘^{3*}

¹极光湾(宁波)智能科技有限公司, 浙江 宁波

²宁波智能机床研究院有限公司, 浙江 宁波

³宁波工程学院机械与汽车工程学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年4月9日; 发布日期: 2026年4月23日

摘要

甲醇作为一种多种途径大规模生产的液态燃料, 应用于技术成熟、热效率高的压燃式发动机, 是实现交通领域深度脱碳的重要技术路径之一。然而, 甲醇的理化性质与传统柴油存在显著差异, 尤其是其极低的十六烷值、高汽化潜热、与柴油有限的互溶性等问题, 直接应用于传统压燃式发动机面临自燃困难、特定污染物控制等一系列技术瓶颈。本文对近几年压燃式甲醇发动机的性能、燃烧、排放三个方面进行全面的梳理与综述。

关键词

甲醇, 压燃式发动机, 燃烧优化, 排放控制, 技术综述

A Review of the Development of Compression Ignition Methanol Engine Technology

Hong Wei¹, Ruibo Ma¹, Yuanchao Wen¹, Xuejian Ma¹, Hang Shen², Heyuan Wang^{3*}

¹Ningbo Aurobay Intelligent Technology Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

³College of Mechanical and Automotive Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo Zhejiang

Received: March 16, 2026; accepted: April 9, 2026; published: April 23, 2026

Abstract

Methanol, as a liquid fuel produced on a large scale through multiple methods, is applied in mature

*通讯作者。

文章引用: 韦虹, 马瑞博, 文远超, 马学建, 沈航, 王河缘. 压燃式甲醇发动机技术发展综述[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(2): 213-223. DOI: 10.12677/met.2026.152023

and highly efficient compression ignition engines. It is one of the important technical paths for achieving deep decarbonization in the transportation sector. However, the physical and chemical properties of methanol differ significantly from those of traditional diesel. In particular, its extremely low cetane number, high vaporization latent heat, and limited miscibility with diesel all pose direct technical challenges when applied to traditional compression ignition engines, such as difficulties in self-ignition and control of specific pollutants. This paper comprehensively reviews and summarizes the performance, combustion, and emissions of compression ignition engines fueled with methanol in recent years.

Keywords

Methanol, Compression Ignition Engine, Combustion Optimization, Emission Control, Technical Review

Copyright © 2026 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/>



Open Access

1. 引言

近年来,世界严格的排放法规旨在保护全球免受有害排放的负面影响,发达国家正积极寻找并推广新能源资源的开发[1][2]。各种液态、气态燃料如丁醇、丙醇、乙醇、纳米流体、甲醇、酯类燃料、氢气等正被大规模应用于内燃机领域[3]-[5]。其中,甲醇燃料具有低沸点、高氧含量和低粘度等优势特性,已成功应用于压燃式发动机,并凭借优秀的扭矩输出、热效率和低污染排放等优势备受商用车和乘用车领域的青睐[6][7]。

但是,压燃式甲醇发动机还存在诸多不足。尽管压燃式甲醇发动机的整体排放量呈下降趋势,但一氧化碳和碳氢化合物排放量却明显上升。为提高制动热效率和制动比油耗等性能参数,各研究团队已对热释放率、点火延迟、燃烧持续时间等多种方法进行了研究;为解决甲醇与柴油混合存在相分离以及甲醇燃料相稳定性和理化性质等问题,科研人员对酯类及表面活性剂、多种燃料混合物与甲醇结合等方面进行了探索;为提升十六烷值并解决纯甲醇燃烧特性难题,研究人员将不同比例的甲醇燃料混合物引入了压燃式甲醇发动机。

本文梳理了甲醇燃料在压燃式发动机中的应用现状,概述了压燃式甲醇发动机的技术突破,随后解析了燃烧特性及技术实现方案,再对排放指标进行评估并提出了优化建议。

2. 性能分析

2.1. 制动油耗

Hassan、Kumar、El-Seesy 以及潘锁柱等著名研究者已针对制动油耗开展了全面研究[8]-[11]。这些研究通过添加剂和压燃式发动机的技术改进,对甲醇-柴油混合物进行了优化改良,从而显著提升了压燃式发动机的燃油消耗效率。

甲醇/柴油双燃料技术为发动机配备两套独立的燃料系统进行分开喷射,而甲醇-柴油混合燃料技术是将两种燃料预混合后单路供油。潘锁柱等人研究了在不同发动机运行模式下,通过在甲醇-柴油混合物中添加氧化铈纳米颗粒来改善制动比油耗的效果[8]。实验过程显示,采用柴油直喷和甲醇基氧化铈燃料进气歧管喷射模式相结合的方式,相比纯柴油直喷的方式,峰值热释放率和峰值气缸气体压力分别提

高了 7.9%和 4.3%；相比甲醇进气歧管喷射的方式，可有效降低制动比能耗最高达 8.1%，并使制动热效率提升至 10.8%，如图 1、图 2 所示。研究表明制动油耗下降归因于氧化铈纳米颗粒的添加，并且随着制动平均有效压力的提升，通过特定燃料配方调整和发动机技术改进，制动比能耗得以进一步降低。

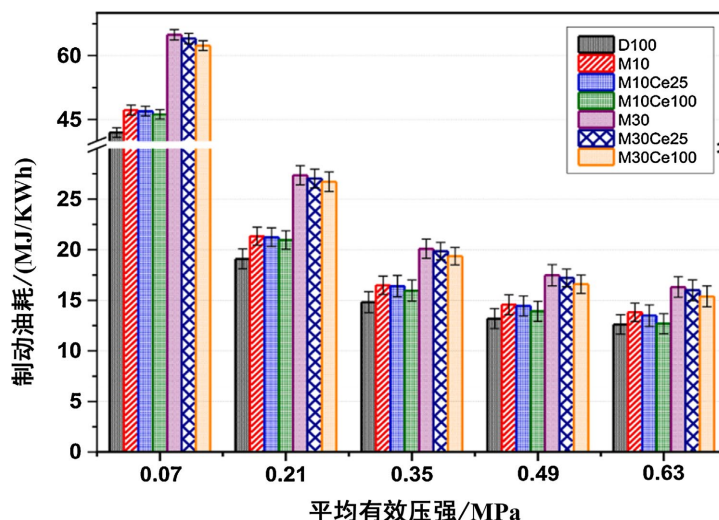


Figure 1. Braking fuel consumption varies with the average effective pressure

图 1. 制动油耗随平均有效压强变化柱状图

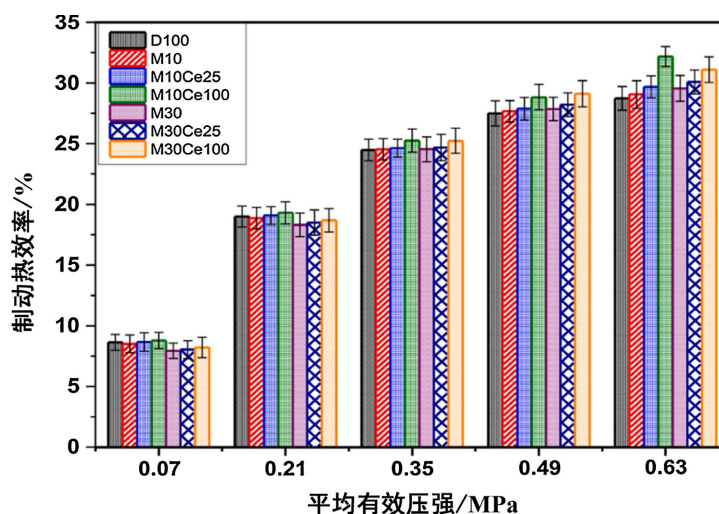


Figure 2. Brake thermal efficiency varies with the average effective pressure

图 2. 制动热效率随平均有效压强变化柱状图

Hassan 等人研究了柴油 - 甲醇混合燃料对四冲程压燃式发动机性能的影响[9]。在特定工况下，将甲醇燃料按体积分数 7%、14%和 21%掺入柴油，并与纯柴油发动机进行对比。该发动机在 2000 r/min 恒定转速下，分别在 2 N·m、4 N·m 和 6 N·m 工况下运行，测试结果如图 3 所示，由于甲醇拥有较高的含氧量及较低的汽化热，将 14%甲醇与柴油混合的配比，可明显减少发动机气缸上方的热量损失，进而延长并优化燃烧周期。此外，甲醇与柴油的混合还能降低排气温度，从而减少污染物的生成。

Thiyagarajan 等人对红花生物柴油压燃式发动机中的正戊醇 - 甲醇混合喷射影响进行了研究[12]。结果显示，在特定甲醇和正戊醇燃料配比下，制动热效率超过了红花生物柴油。在质量分数为 10%的条件

下, 正戊醇发动机的效率高于甲醇; 而当正戊醇质量分数为 30% 时, 由于甲醇的汽化潜热最高, 其热释放量更大, 甲醇发动机的制动热效率则高于正戊醇。

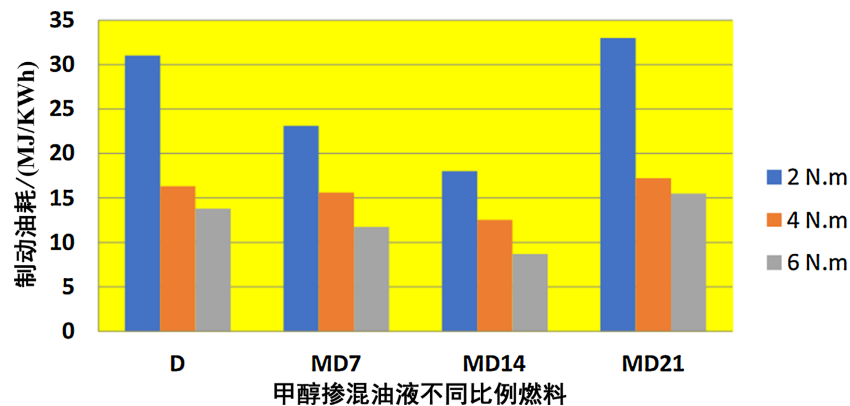


Figure 3. The influence of different methanol blending ratios on the braking fuel consumption of diesel engines at 2000 r/min and under various loads

图 3. 甲醇不同掺混比对柴油机在 2000 r/min 及不同负荷下制动油耗的影响

同样, 从大量研究文章中可以明显看出[8][11][13], 通过甲醇/甲醇-柴油混合燃料中使用燃料添加剂(如氧化铈、二氧化硅等)的纳米颗粒, 以及各种喷射方法(如直喷、歧管喷射、多孔喷射)、缸内压力值的提高, 燃料添加剂的加入有助于改善燃烧过程, 从而降低压燃式甲醇发动机的制动比燃料消耗。此外, 纳米颗粒等新型燃料添加剂及替代燃料已被研发成功, 通过使用燃料添加剂可提升甲醇燃料混合物的十六烷值, 有助于进一步燃烧过程, 从而降低压燃式甲醇发动机的制动油耗。

2.2. 制动热效率

制动热效率是衡量发动机能量转换能力的关键指标。Thiyagarajan、Hason、Murry、Kumar、Dierickx、潘锁柱等研究人员在不牺牲燃烧特性与排放等关键参数的前提下, 致力于提升压燃式甲醇发动机的制动热效率[9][10][12][14][15]。

Thiyagarajan 探讨了甲醇和正戊醇预注入进气歧管对以红花油生物柴油(B100)为基质燃料替代柴油的影响[12]。实验中甲醇和正戊醇分别以 10% 和 30% 质量分数与红花油生物柴油(B100)混合预注入。相较于纯生物柴油工况, 甲醇和正戊醇预注入可显著提升制动热效率。如图 4 所示, 当质量分数为 10% 时, 正戊醇发动机的热效率高于甲醇; 而当酒精质量分数达 30% 时, 由于甲醇具有最高的汽化潜热, 其热释放量更大, 导致正戊醇发动机热效率反而更高。Hassan 采用 TD 212 实验室型内燃机(单缸四冲程、气动冷却)对不同比例甲醇掺混柴油的性能影响进行测试[9]。实验使用甲醇体积百分比为 7%、14% 和 21% 的柴油混合燃料, 并与纯柴油进行对比。结果显示, 将甲醇掺入柴油比例达 14% 时, 通过提升制动油耗、制动热效率, 同时降低排气温度, 从而改善燃料性能。这是因为添加甲醇提高了燃料的氧含量, 从而降低了燃料的密度和粘度, 进而提高了燃料燃烧效率。

2.3. 小结

综合来看, 甲醇燃料的制动油耗与制动热效率是衡量其经济性的核心指标。通过向甲醇-柴油混合物中添加纳米颗粒(如氧化铈)或优化喷射模式(如歧管喷射与直喷结合), 能有效降低制动油耗并提升制动热效率。通过燃料配方优化(添加剂、掺混比)与发动机技术改进(喷射策略)的协同作用, 是提升压燃式甲醇发动机经济性的有效途径。

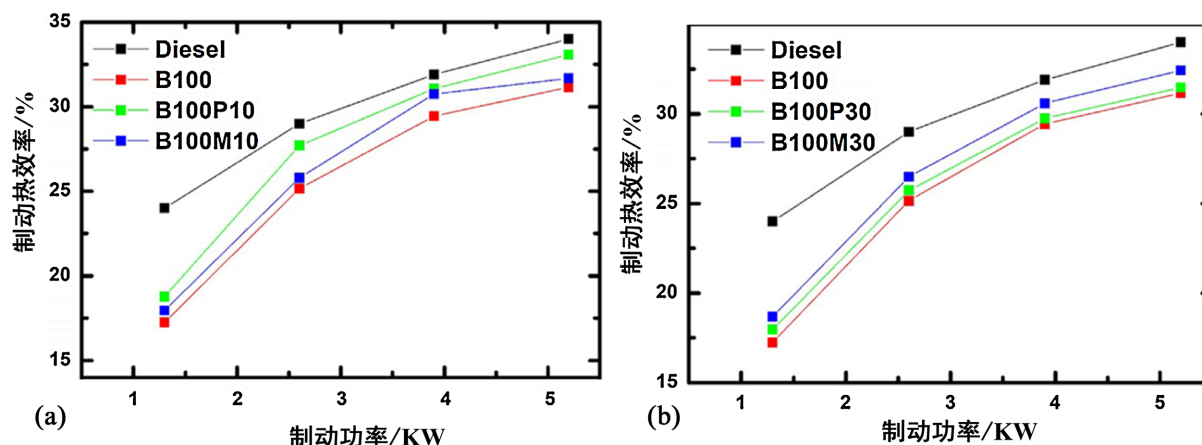


Figure 4. The influence of dual-fuel mode engine operation on braking thermal efficiency. (a) 10% mass fraction methanol and n-hexanol are mixed with safflower oil biodiesel; (b) 30% mass fraction methanol and n-hexanol are mixed with safflower oil biodiesel

图 4. 双燃料模式发动机运行对制动热效率的影响。(a) 10%质量分数甲醇和正戊醇与红花油生物柴油混合；(b) 30%质量分数甲醇和正戊醇与红花油生物柴油混合

3. 燃烧分析

为了实现压燃发动机平稳、高效且可控的着火与燃烧,优化燃烧过程是解决甲醇压燃应用的核心难题。

3.1. 点火延迟

点火延迟是指从喷射开始到燃烧开始之间的间隔时间,在此期间会发生雾化、湍流混合、液滴破碎、化学反应和蒸发等多种物理化学过程。缩短点火延迟时间可以改善甲醇燃烧稳定性、降低压力升高率、抑制爆震。其中,燃料的十六烷值是影响点火延迟的关键因素,它是衡量燃料的化学反应活性的指标,数值越高表明反应性越强[16]。近年来,甲醇被引入压燃式发动机,与柴油及其他燃料添加剂配合使用。当甲醇与柴油混合时,混合燃料的十六烷值通常低于纯柴油,这种较低的十六烷值会导致点火延迟增加。实际应用中,这意味着混合燃料在喷射后需要比纯柴油更长时间才能点燃,从而影响压燃式发动机的整体燃烧特性。为缓解点火延迟并提升甲醇燃料压燃式发动机的综合效率。

卫将军等人在甲醇-柴油混合燃料(M10, M30, M50)中进行了实验,使用了不同纳米颗粒添加剂(二氧化硅、氧化铝、氧化铈),添加量为 100 ppm [17]。在 M10 (含 10%甲醇)中,当纳米颗粒添加量超过 25 ppm 时,10%负荷下可观察到点火延迟的轻微降低。在 M50 燃料中,随着纳米颗粒添加量在 10%~50% 发动机负荷范围内增加(超过 25 ppm),点火延迟进一步降低。可以得到结论:将纳米颗粒掺入甲醇-柴油混合燃料可有效缓解点火延迟问题,且在中等发动机负荷(10%~50%)下效果更为显著。与二氧化硅纳米颗粒相比,氧化铝和氧化铈纳米颗粒在点火延迟降低方面表现更优,尤其在低负荷条件下效果更明显。

3.2. 热释放率

理想的放热规律和较短的燃烧持续期有助于提高热效率和降低排放。潘锁柱等人研究了在 90%负荷下多种燃烧模式和不同曲轴角度下的热释放率,说明了每种运行模式下的燃烧都经历了扩散过程和预混燃烧过程[8]。在最大负荷(90%)下,随着甲醇中纳米颗粒(氧化铈; 25~100 ppm)的积累,热释放值有所提高(M10, M30)。这种增强归因于混合物可燃特性的改善,因为纳米颗粒和甲醇的热性能均优于纯柴油。此外,纳米颗粒氧化铈被引入甲醇中,表现出强催化活性、更高的热导率以及更高的表面积/体积比。这些特性促进了燃料蒸发和扩散的增加,从而提高了峰值热释放率。在更高负荷下,氧化铈显示出优异的

热释放率峰值。纳米颗粒在高负荷和高温条件下表现良好,促进完全燃烧,含有甲醇、柴油和纳米颗粒添加剂等的混合物表现出燃烧特性增强,热释放率提高。

刘军恒对甲醇-柴油压燃式甲醇发动机在不同甲醇替代比下的热释放速率进行了实验研究[18]。在低或中负荷时,点火延迟增加,导致压缩压力逐渐下降,从而显著延迟热释放起始点并降低燃油经济性。随着负荷增加,热释放率和燃烧效率显著提升。在平均有效压强为 0.86 MPa 和 MSR40 条件下,通过甲醇进气熏蒸、PODE 直接喷射、优化喷射正时以及将甲醇进气温度提升至 65°C,可显著提升热释放率至 44.6%。

3.3. 燃烧持续期

燃烧持续时间是指从压燃式甲醇发动机开始燃烧起,释放约 90%热能所需的时间。压燃式发动机的燃烧过程通常包含三个明显阶段:第一阶段为预混燃烧,此时在点火延迟时间内形成的空燃混合气会快速燃烧;第二阶段为混合控制燃烧,此时空气/燃料混合气体的形成速率直接影响燃烧室内的燃烧过程;第三阶段则是剩余的空气/燃料混合气体在膨胀冲程中缓慢燃烧。研究表明,添加特定添加剂的柴油-甲醇混合燃料相较于纯柴油压燃发动机的燃烧持续时间有所缩短。

卫将军等人通过测量从燃烧起始到 CA50 (50%热释放)的曲轴转角来确定燃烧持续时间[6]。实验结果如图 5 所示,与纯柴油相比,随着甲醇添加量的增加,燃烧持续时间呈现递减趋势,且会随着甲醇浓度的升高而加剧。这种现象归因于甲醇的氧化与汽化特性,这些特性不仅缩短了燃烧持续时间,还提升了燃烧质量。在混合燃料中添加纳米颗粒会影响燃烧持续时间,某些工况和浓度下会导致燃烧时间缩短,但其他工况可能存在差异。不过,通过优化甲醇-柴油混合燃料中的特定纳米颗粒添加比例,可有效提升其氧合与汽化性能,从而获得理想效果。

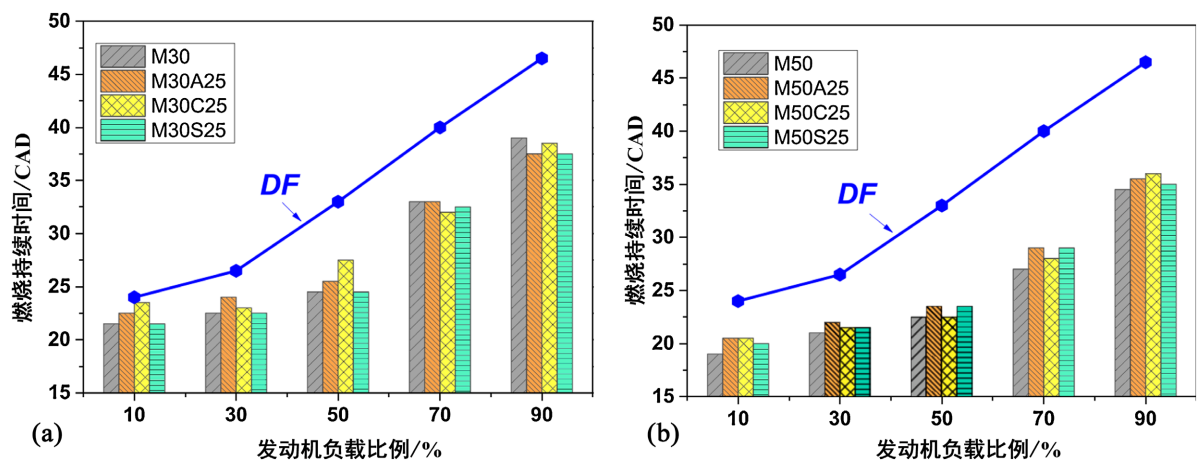


Figure 5. The influence of nanoparticle additives on the 1/2 combustion duration. (a) 30% methanol with different nanoparticle additives; (b) 50% methanol with different nanoparticle additives

图 5. 纳米粒子添加剂对 1/2 燃烧持续时间的影响。(a) 30%甲醇中不同纳米颗粒添加剂; (b) 50%甲醇中不同纳米颗粒添加剂

Kumar 研究了甲醇熏蒸与空气预热温度对燃烧持续时间的的影响趋势,如图 6 所示[19]。与高负荷相比,低负荷和中负荷表现出燃烧持续时间明显缩短的特征。50%浓度的甲醇配合空气预热被证实对缩短燃烧持续时间具有显著效果,且该趋势在高负荷条件下仍持续存在。

3.4. 小结

燃烧过程的优化是克服甲醇低十六烷值、实现高效稳定压燃的关键。缩短点火延迟是首要任务。

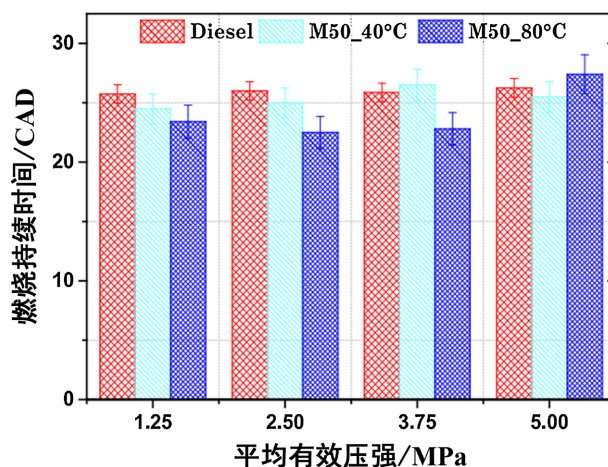


Figure 6. The variation of combustion duration under different engine loads

图 6. 不同发动机负载下的燃烧持续时间变化

研究表明在甲醇-柴油混合燃料中添加纳米颗粒(尤其是氧化铝和氧化铈)能有效缓解点火延迟,且在中低负荷下效果更显著。在热释放率方面,纳米颗粒的添加因其催化活性和高热导率,有助于在高负荷下提升峰值热释放率,促进完全燃烧。燃烧持续期则受到甲醇掺混比例和添加剂的共同影响,增加甲醇比例或优化纳米颗粒添加比例可以缩短燃烧持续时间,改善燃烧质量,并且采用空气预热等措施也能有效缩短燃烧持续时间。综合来看,通过引入纳米添加剂、优化掺混比并辅以进气预热等技术,可以系统性地改善甲醇的燃烧特性,使其更适应压燃式发动机的要求。

4. 排放分析

4.1. 一氧化碳和碳氢化合物

这两种排放物主要源于不完全燃烧,在甲醇发动机冷启动、低负荷或混合气过稀时可能较为突出。

卫将军等人研究了向甲醇-柴油混合燃料中添加纳米颗粒(二氧化硅)来减少一氧化碳的排放[20]。该研究强调,在三种运行模式(甲醇基二氧化硅纳米流体(MSN)-柴油模式、柴油直喷模式以及 MSN 燃料进气歧管喷射模式)中,CO、HC、NO_x和烟雾不透明度分别降低了38.5%、55.4%、5.2%和55.6%。这一排放减少归因于纳米颗粒(二氧化硅)的添加,其增强了所用燃料的整体催化性能。通过改进喷射模式将甲醇基二氧化硅纳米流体和柴油正确引入发动机气缸,也减少了一氧化碳、碳氢化合物的排放,如图7与图8所示。

Agarwal、WyseMason、Hasan、王杨等人也开展了大量工作,以减少甲醇燃料压燃发动机中的一氧化碳排放[10][21][22]。废气再循环被确认为一种有助于燃烧推进的技术,从而减少一氧化碳排放。在甲醇混合物中添加氧化铈、二氧化硅等纳米颗粒已被证明可以减少点火延迟并缩短燃烧持续时间,从而降低一氧化碳排放。利用多种燃烧模式和喷射技术,包括进气口燃油喷射和歧管喷射,也被证明可以有效减少一氧化碳排放。

Thiyagarajan、Agarwal、潘锁柱等研究者针对甲醇压燃式发动机开展了大量研究,致力于实现HC排放的最小化[8][9][12]。刘军恒通过预喷射策略实现柴油喷射提前,显著降低了直喷发动机的碳氢化合物排放[23]。当发动机转速达到1800 r/min、负荷为30%时,从两级喷射系统升级为单级喷射系统,同时将甲醇比例从40%提升至60%,不仅提高了热释放率,缩短了燃烧持续时间,还降低了循环变异系数,实现了碳氢化合物排放的大幅降低。

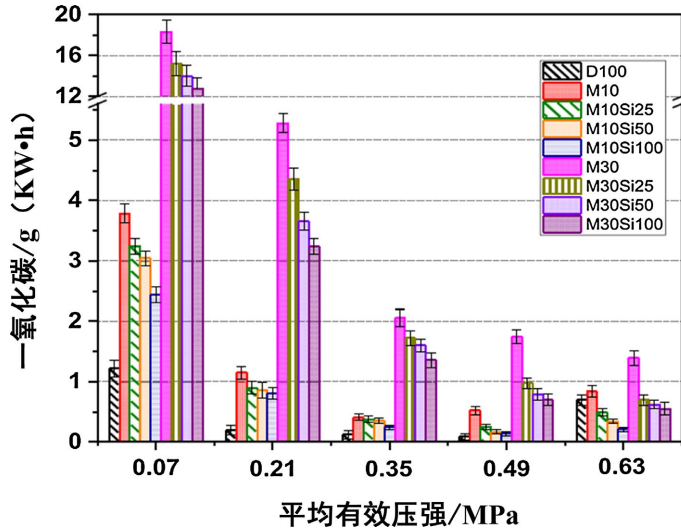


Figure 7. CO emissions under different engine loads
图 7. 不同发动机负载下一氧化碳排放

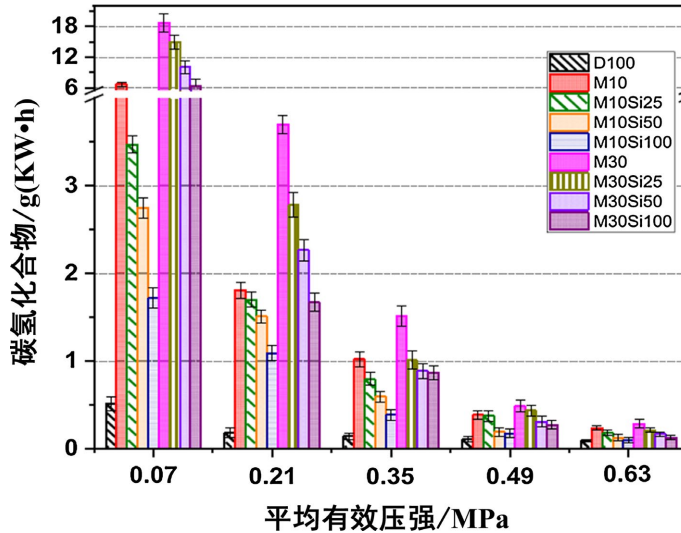


Figure 8. Hydrocarbon emissions under different engine loads
图 8. 不同发动机负载下碳氢化合物排放

4.2. 氮氧化物

Thiyagarajan、Murray 和 Wyse-Mason、Ahmad、EI-Seesy、王杨、卫将军等研究者们已在降低氮氧化物排放方面取得了显著成效,充分证明了各类技术改进措施在实现该目标方面的有效性[11][12][22][24]-[26]。

周遊等人在甲醇-氮氧化物燃料的压燃式发动机中采用了进气口燃油喷射和废气再循环技术,两种技术的结合提升了燃烧稳定性,从而大幅降低了氮氧化物的排放[27]。此外,通过精确调控提高压缩比,氮氧化物排放的抑制作用尤为明显。在废气再循环率达到 36%时,氮氧化物排放几乎达到零排放水平。

4.3. 小结

压燃式甲醇发动机的排放控制,特别是对一氧化碳、碳氢化合物和氮氧化物的减排,采用废气再循

环、添加纳米颗粒(如二氧化硅、氧化铈)以及优化喷射技术(如预喷射、进气口喷射)均可有效降低其排放。排放控制策略呈现出多技术融合的特点,通过燃料改性、燃烧过程优化以及后处理技术的综合应用,能够在提升发动机性能的同时,有效控制各类污染物排放。

5. 结论

Table 1. Comparative table of research on compression ignition methanol engine technology

表 1. 压燃式甲醇发动机技术研究对比表

研究者	添加剂/燃料类型	喷射策略	点火延迟影响	热效率影响	排放影响
潘锁柱等	氧化纳米颗粒	柴油直喷 + 甲醇基燃料进气歧管喷射	/	制动热效率提升 / 10.8%	
Hassan 等	无添加剂	单路供油(预混合)	/	14% 甲醇掺混时 / 热效率提升, 排气温度降低	
Thiyagarajan 等	正戊醇与甲醇	进气歧管预注入	/	30% 甲醇时热效 / 率高于正戊醇	
卫将军等	二氧化硅、氧化铝、氧化铈	/	中低负荷下点火延迟显著降低(尤其氧化铝、氧化铈)	/	CO、HC、NO _x 、烟雾分别降低 38.5%、55.4%、5.2%、55.6%
刘军恒等	PODE (聚甲基二甲醚)	甲醇进气熏蒸 + PODE 直喷 + 喷射正时优化进气预热 65°C	热释放起始点延迟改善	热释放率提升至 44.6%	HC 排放显著降低
Kumar 等	甲醇重蒸 + 空气预热	进气口喷射	/	/	缩短燃烧持续时间, 改善燃烧质量
周遊等	EGR (废气再循环)	进气口燃油喷射 + EGR	/	提高压缩比提升燃烧稳定性	NO _x 排放接近零 (EGR 率 36%时)
Agarwal 等	纳米颗粒(二氧化硅等)	多种喷射模式(直喷、进气口喷射等)	点火延迟缩短	/	CO、HC 排放显著降低

压燃式甲醇发动机技术的发展,集中体现了全球研究者围绕燃料特性与燃烧系统协同机制所开展的系统探索与持续创新。甲醇凭借其高含氧、来源广泛及可再生潜力等优势,已成为替代柴油的重要候选燃料,但其十六烷值低、汽化潜热高以及与柴油互溶性有限等固有属性,对压燃式发动机着火稳定性及燃烧过程控制提出了显著挑战。通过引入纳米颗粒添加剂、优化甲醇掺混比例与喷射方式、结合废气再循环及进气预热等手段,有效缩短了点火延迟,提升了热释放率与制动热效率,并在氮氧化物、颗粒物及非常规排放物控制方面实现显著优化,详细见表 1。特别是反应活性控制压燃与汽油部分压燃等先进燃烧模式的引入,为甲醇高效清洁燃烧开辟了新的技术路径。

总体而言,压燃式甲醇发动机技术已从可行性验证阶段逐步迈向系统集成与性能优化阶段。未来研究应在现有基础上,进一步聚焦甲醇燃料与新型燃烧模式的深度融合、低成本高稳定性添加剂的开发、智能控制策略的应用,以及整车适配与耐久性验证等方面,推动该技术在商用车与乘用车领域的工程化落地。在全球能源转型与碳减排目标驱动下,压燃式甲醇发动机有望成为交通领域绿色动力系统的重要技术支撑之一。

基金项目

项目等级：市科技局/重大(重点)择优委托科技攻关；项目名称：新一代甲醇高效混合动力关键技术及工程应用；项目编号：2024Z250。

参考文献

- [1] Wei, J., Yin, Z., Wang, C., Lv, G., Zhuang, Y., Li, X., *et al.* (2021) Impact of Aluminium Oxide Nanoparticles as an Additive in Diesel-Methanol Blends on a Modern DI Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*, **185**, Article 116372. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116372>
- [2] Gong, C., Si, X. and Liu, F. (2021) Combined Effects of Excess Air Ratio and EGR Rate on Combustion and Emissions Behaviors of a GDI Engine with CO₂ as Simulated EGR (CO₂) at Low Load. *Fuel*, **293**, Article 120442. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120442>
- [3] Gong, C., Zhang, Z., Sun, J., Chen, Y. and Liu, F. (2020) Computational Study of Nozzle Spray-Line Distribution Effects on Stratified Mixture Formation, Combustion and Emissions of a High Compression Ratio DISI Methanol Engine under Lean-Burn Condition. *Energy*, **205**, Article 118080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118080>
- [4] Szwaja, S. and Naber, J.D. (2010) Combustion of N-Butanol in a Spark-Ignition IC Engine. *Fuel*, **89**, 1573-1582. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.043>
- [5] Qian, Y., Guo, J., Zhang, Y., Tao, W. and Lu, X. (2018) Combustion and Emission Behavior of N-Propanol as Partially Alternative Fuel in a Direct Injection Spark Ignition Engine. *Applied Thermal Engineering*, **144**, 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.044>
- [6] Wei, J., He, C., Fan, C., Pan, S., Wei, M. and Wang, C. (2021) Comparison in the Effects of Alumina, Ceria and Silica Nanoparticle Additives on the Combustion and Emission Characteristics of a Modern Methanol-Diesel Dual-Fuel CI Engine. *Energy Conversion and Management*, **238**, Article 114121. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114121>
- [7] Wei, J., Zeng, Y., Pan, M., Zhuang, Y., Qiu, L., Zhou, T., *et al.* (2020) Morphology Analysis of Soot Particles from a Modern Diesel Engine Fueled with Different Types of Oxygenated Fuels. *Fuel*, **267**, Article 117248. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117248>
- [8] Pan, S., Wei, J., Tao, C., Lv, G., Qian, Y., Liu, Q., *et al.* (2021) Discussion on the Combustion, Performance and Emissions of a Dual Fuel Diesel Engine Fuelled with Methanol-Based CeO₂ Nanofluids. *Fuel*, **302**, Article 121096. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121096>
- [9] Hassan, Q.H., Shaker Abdul Ridha, G., Hafedh, K.A.H. and Alalwan, H.A. (2021) The Impact of Methanol-Diesel Compound on the Performance of a Four-Stroke CI Engine. *Materials Today: Proceedings*, **42**, 1993-1999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.247>
- [10] Kumar, N. and Singh, K. (2022) Study of Combustion, Performance and Emissions Characteristics of Oxygenated Constituents and Methanol Fumigation in the Inlet Manifold of a Diesel Engine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **49**, Article 101748. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101748>
- [11] EL-Seesy, A.I., Waly, M.S., He, Z., El-Batsh, H.M., Nasser, A. and El-Zoheiry, R.M. (2022) Enhancement of the Combustion and Stability Aspects of Diesel-Methanol-Hydrous Methanol Blends Utilizing N-Octanol, Diethyl Ether, and Nanoparticle Additives. *Journal of Cleaner Production*, **371**, Article 133673. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133673>
- [12] Thiyagarajan, S., Sonthalia, A., Edwin Geo, V., Prakash, T., Karthickeyan, V., Ashok, B., *et al.* (2020) Effect of Manifold Injection of Methanol/n-Pentanol in Safflower Biodiesel Fuelled CI Engine. *Fuel*, **261**, Article 116378. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116378>
- [13] Boopathi, M., Sathiskumar, S., Manideep, B., Jayakrishnan, S., Praveen, S.B., Gokul, V., *et al.* (2023) Experimental Investigation on Performance and Emission Characteristics of Algae Oil Biodiesel with Methanol Additive in CI Engine. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.405>
- [14] Murray, R. and Wyse-Mason, R. (2018) Investigation of Methanol-Biodiesel-Coconut Oil Ternary Blends as an Alternative Fuel for CI Engines. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **21**, 1056-1066. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.009>
- [15] Dierickx, J., Dejaegere, Q., Peeters, J., Sileghem, L. and Verhelst, S. (2023) Performance and Emissions of a High-Speed Marine Dual-Fuel Engine Operating with Methanol-Water Blends as a Fuel. *Fuel*, **333**, Article 126349. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126349>
- [16] Ning, L., Duan, Q., Chen, Z., Kou, H., Liu, B., Yang, B., *et al.* (2020) A Comparative Study on the Combustion and Emissions of a Non-Road Common Rail Diesel Engine Fueled with Primary Alcohol Fuels (Methanol, Ethanol, and N-

- Butanol)/Diesel Dual Fuel. *Fuel*, **266**, Article 117034. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117034>
- [17] Li, J., Wei, J., Chen, H., Xu, Y., Liu, Y. and Dai, Q. (2025) Study on the Combustion and Emission Characteristics of a Compression Ignition Engine Using Diesel/Ethanol Blend with Carbon Nanoadditives. *Renewable Energy*, **246**, Article 122941. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122941>
- [18] Liu, J., Ma, H., Liang, W., Yang, J., Sun, P., Wang, X., *et al.* (2022) Experimental Investigation on Combustion Characteristics and Influencing Factors of PODE/Methanol Dual-Fuel Engine. *Energy*, **260**, Article 125131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125131>
- [19] Kumar, D., Sonawane, U., Chandra, K. and Agarwal, A.K. (2022) Experimental Investigations of Methanol Fumigation via Port Fuel Injection in Preheated Intake Air in a Single Cylinder Dual-Fuel Diesel Engine. *Fuel*, **324**, Article 124340. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124340>
- [20] Wei, J., He, C., Lv, G., Zhuang, Y., Qian, Y. and Pan, S. (2021) The Combustion, Performance and Emissions Investigation of a Dual-Fuel Diesel Engine Using Silicon Dioxide Nanoparticle Additives to Methanol. *Energy*, **230**, Article 120734. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120734>
- [21] Agarwal, A.K., Kumar, V., Jena, A. and Kalwar, A. (2022) Fuel Injection Strategy Optimisation and Experimental Performance and Emissions Evaluation of Diesel Displacement by Port Fuel Injected Methanol in a Retrofitted Mid-Size Genset Engine Prototype. *Energy*, **248**, Article 123593. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593>
- [22] Murray, R., King, G., Muse-Mason, R. (2021) Micro-Emulsification vs. Transesterification: An Investigation of the Efficacy of Methanol Use in Improving Vegetable Oil Engine Performance. *Biofuels*, **12**, 1165-1174. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1598316>
- [23] Liu, J., Wu, P., Ji, Q., Sun, P., Wang, P., Meng, Z., *et al.* (2022) Experimental Study on Effects of Pilot Injection Strategy on Combustion and Emission Characteristics of Diesel/Methanol Dual-Fuel Engine under Low Load. *Energy*, **247**, Article 123464. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123464>
- [24] Ahmad, Z., Kaario, O., Qiang, C. and Larmi, M. (2022) Effect of Negative Valve Overlap in a Heavy-Duty Methanol-Diesel Dual-Fuel Engine: A Pathway to Improve Efficiency. *Fuel*, **317**, Article 123522. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123522>
- [25] Wang, Y., Xiao, G., Li, B., Tian, H., Leng, X., Wang, Y., *et al.* (2022) Study on the Performance of Diesel-Methanol Diffusion Combustion with Dual-Direct Injection System on a High-Speed Light-Duty Engine. *Fuel*, **317**, Article 123414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123414>
- [26] Valera, H., Kumar, D. and Agarwal, A.K. (2022) Evaluating the Effect of Variable Methanol Injection Timings in a Novel Co-Axial Fuel Injection System Equipped Locomotive Engine. *Journal of Cleaner Production*, **349**, Article 131452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131452>
- [27] Zhou, Y., Hong, W., Xie, F., Li, X., Su, Y., Hu, Y., *et al.* (2022) Potential of Compression Ratio and Exhaust Gas Dilution on Improving Combustion and Nitrogen Oxides Emission Performance on a PFI Engine Fueled with Methanol. *Fuel*, **323**, Article 124197. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124197>