

醇类燃料在发动机和燃料电池上的应用

马宗正¹,袁月龙^{1,2},王赛飞³

1. 河南工程学院机械工程学院,河南 郑州 451191; 2. 中原工学院智能机电工程学院,河南 郑州 450007;
3. 郑州工业应用技术学院机电工程学院,河南 郑州 451150

摘要:为提高发动机燃烧效率并有效降低污染物排放,总结甲醇、乙醇、丁醇等醇类燃料的理化特性,综述醇类燃料对发动机及燃料电池性能的影响。分析结果表明:醇类燃料能有效降低发动机污染物排放、提高燃烧效率;醇类燃料对双燃料发动机性能的影响因工况而异,通过协同优化燃料喷射策略与废气再循环率,可有效提高发动机综合性能;当甲醇、乙醇用作燃料电池燃料时,需改善质子交换膜的渗透率;采用重整制氢技术时,应综合考量催化剂成本。

关键词:醇类燃料;燃料电池;代用燃料;双燃料发动机

中图分类号:TK46

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)05-0001-11

引用格式:马宗正,袁月龙,王赛飞. 醇类燃料在发动机和燃料电池上的应用[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(5):1-11.

MA Zongzheng, YUAN Yuelong, WANG Saifei. Applications of alcohol fuels in engines and fuel cells[J].

Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5):1-11.

0 引言

化石能源的大规模消耗导致碳排放显著升高,开发兼具可持续性与低污染特性的替代能源已成为全球能源领域的研究重点^[1]。醇类燃料作为替代化石能源的重要品类,相较于传统柴油和汽油,具有可再生性强、含氧量高的优势,燃烧过程更清洁,有助于减少污染物排放并提高燃烧效率,因此受到广泛关注^[2-4]。醇类燃料主要包括甲醇、乙醇、丁醇等,其原料来源广泛,与发动机技术适配性良好,具备优异的燃烧性能与较高的应用潜力。然而,醇类燃料存在蒸汽压较低、汽化潜热较高等问题,易导致发动机冷启动困难。

本文中综述醇类燃料的理化特性,系统分析醇类燃料对发动机热效率、污染物排放及燃料电池效率等性能的影响,归纳改善各类醇类发动机与燃料电池性能的方法,旨在为醇类燃料在发动机和燃料电池中的应用提供参考。

1 醇类燃料与柴油、汽油的理化特性

燃料的理化特性直接影响燃料燃烧过程,进而影响污染物排放,相比柴油和汽油等化石燃料,醇类燃料的辛烷值较高,有利于增大发动机的压缩比,从而优化燃烧效率并降低污染物排放。但醇类燃料能量密度较低,储存与运输成本较高。此外,醇类燃料含羟基(—OH)官能团,若燃烧不完全,部分羟基化合物在高温下分解为甲醛(CH_2O)、乙醛($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$)等非常规污染物^[5]。醇类燃料、柴油、汽油的理化特性对比

收稿日期:2025-03-03

基金项目:河南省科技攻关项目(212102210332)

第一作者简介:马宗正(1981—),男,济南人,工学博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为新能源汽车节能减排技术及机电一体化控制技术,E-mail:zongzhengma@haue.edu.cn。

如表 1 所示。

表 1 醇类燃料、柴油、汽油的理化特性

燃料类型	主要成分	能量密度/ (MJ·L ⁻¹)	汽化潜热/ (kJ·kg ⁻¹)	辛烷值	十六烷值	低热值/ (kJ·kg ⁻¹)	蒸气压 ^① /kPa
汽油	C ₈ H ₁₈ 、C ₇ H ₁₆	31.0~33.0	290~350	87.0~98.0	5~15	43 030	45.0~80.0
柴油	C ₁₅ H ₃₂ 、C ₁₆ H ₃₄	35.8~37.8	250~300	40.0~50.0	40~55	42 500	<0.3
甲醇	CH ₃ OH	15.7	1 100	108.7	5	19 930	12.0
乙醇	C ₂ H ₅ OH	23.5	840	108.0	8	26 800	5.0~6.0
正丁醇	CH ₃ (CH ₂) ₃ OH	26.9	585	96.0~100.0	17~20	33 000	0.7~1.0
异丁醇	CH ₃ CH(CH ₃)CH ₂ OH	29.2	582	102.0~110.0	14~16	33 100	1.3~1.6

①温度为 25 ℃。

2 甲醇燃料的应用

甲醇燃料主要通过煤炭衍生的焦炉煤气制取,也可利用天然气、生物质等原料生产^[6],其辛烷值与汽化潜热高于汽油、柴油,因此抗爆性良好,可减少发动机爆震,既能作为汽油替代燃料,也可用于柴油机与天然气发动机。但甲醇燃烧时产生大量非常规污染物,且甲醇发动机存在冷起动困难的问题^[7-8]。由于甲醇与柴油互溶性较差,且低温下难以点燃,甲醇用作柴油机燃料时通常采用双燃料模式,需对发动机喷射系统进行改造,将甲醇喷入进气道^[9-10];甲醇应用于天然气发动机时,同样需与天然气组成双燃料使用^[11]。

根据燃料使用方式,甲醇燃料电池可分为直接甲醇燃料电池(direct methanol fuel cell,DMFC)与重整型甲醇燃料电池(reformed methanol fuel cell, RMFC)两类,前者直接以甲醇为燃料发电,后者通过甲醇重整制氢,利用生成的氢气发电。

2.1 甲醇燃料发动机

甲醇的能量密度和低热值仅为汽油、柴油的一半,燃烧时释放的能量少、燃烧性能较差。为提高燃烧效率并降低排放,Wang 等^[12]在一台四缸四冲程直喷点燃式发动机上分析了废气再循环(exhaust gas recirculation,EGR)和喷射压力对发动机燃烧和排放特性的影响,结果表明:提高 EGR 率和喷射压力能够有效提高甲醇燃烧效率,将 EGR 率增大至 25%,NO_x 排放可降低 76.2%~87.5%。

甲醇的辛烷值远大于汽油,具有更好的抗爆性。冯浩等^[13]采用高压直喷与高压压缩相结合的方式提高发动机性能,将活塞顶面突出高度由 0 增至 1.9 mm,凹坑球面半径由 98.5 mm 增至 225.0 mm,从而将压缩比由 11.5 增至 13.8,研究表明:各工况下,甲醇直喷技术均有助于降低污染物排放,且使燃烧热效率由 37.4%提高至 42.6%,不同压缩比的活塞剖面如图 1 所示。

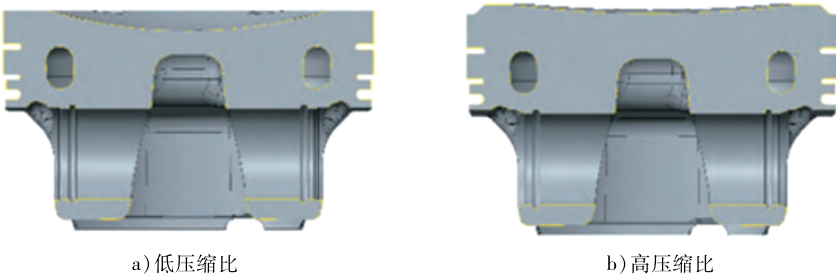


图 1 不同压缩比的活塞剖面示意图

Shen^[14]等研究表明:通过优化甲醇喷射时刻与喷射量,可抑制爆震,进一步改善燃烧特性并降低污

染物排放。

甲醇的汽化潜热较高、蒸气压较低,在低温环境下难以蒸发,导致混合气形成不均匀、点火稳定性下降,严重时甚至造成发动机无法启动。为解决甲醇燃料发动机低温启动问题,宫长明等^[15]分析了甲醇在低温环境下的着火边界,结果表明:甲醇的最低自燃极限温度约为 16 °C,低于此温度时,无论怎样改变甲醇喷射正时和甲醇循环喷射量,都无法实现甲醇发动机启动,须使用辅助启动措施才能启动发动机,如图 2 所示(图中喷油正时曲轴转角为上止点前曲轴转角);Gong 等^[16]仿真分析了直喷双活塞发动机同步点火特性,发现甲醇喷射正时、点火正时、进气温度等参数,对冷启动时甲醇-空气混合物的浓度分布、流动速度及火焰表面密度具有重要影响。Wen 等^[17]分析了喷射策略、进气温度、冷却液温度对某纯甲醇压燃式发动机冷启动的影响,研究表明,预喷射加主喷射策略是最佳的启动策略,在冷却液温度为 80 °C、进气温度为 120~200 °C 时,可实现发动机稳定点火。

柴油和甲醇的互溶性比汽油差,且甲醇的十六烷值低于柴油,不易自燃,一般需通过柴油引燃。为研究甲醇在柴油机中的燃烧特性,申立忠等^[18]在某增压中冷高压共轨电控柴油机的进气歧管处安装了一套甲醇喷射系统构成双燃料发动机,研究表明:在低负荷工况下,发动机的热效率低于纯柴油机模式,且随着甲醇替代率的增大,未燃 THC、CO、未燃甲醇和甲醛排放升高;在中负荷工况下,随甲醇替代率增大,发动机热效率呈现先升高后降低的趋势。优化喷射策略是提高甲醇-柴油双燃料发动机热效率的关键,Shi 等^[19]结合单孔喷射与直接双燃料分层燃烧技术,通过调整甲醇的喷射时刻,将发动机指示热效率提高至 51.95%。为探索引燃燃料对发动机热效率的影响,Long 等^[20]将柴油喷射持续时间对应的曲轴转角由 6°增大至 20°,显著改善了甲醇点火均匀性,发动机燃烧效率提高 2.5%,污染物排放降低 90%,最大指示热效率提高至 50%。

甲醇喷射器孔位置对发动机效率的影响更显著,研究表明:在甲醇-柴油双燃料发动机中,优化甲醇喷射器孔位置能够加速扩散燃烧,提高燃油经济性并降低 HC、CO 排放^[21]。除了改变喷射策略或调整喷射器位置外,还可通过掺水降低排放。Cesur^[22]在甲醇-汽油混合燃料中掺水进行发动机试验,研究表明:适量掺水可使 HC 排放降低 16%,NO_x 排放减少 12%。Ma 等^[23]对船用甲醇-柴油混合燃料发动机的仿真分析结果表明:提高混合燃料中水的体积分数可改善燃料雾化特性,提高燃烧完全度,当水的体积分数为 0~20%时,水的体积分数每增加 5%,NO 排放减少约 1.54%~1.56%。

综上所述,甲醇的低能量密度导致燃烧效率下降,但其高辛烷值允许更大的压缩比,既可以提高其燃烧效率,也能改善汽油的燃烧爆震现象;甲醇可替代传统燃料,降低 HC、CO、NO_x 等污染物排放,但在低温时需要加装辅助启动装置。通过改变燃料喷射方式、EGR 率等手段可解决发动机的启动、燃烧效率、排放问题,掺水能够减少非常规污染物排放。

2.2 甲醇燃料电池

甲醇应用于 DMFC 时,因渗透率较高,甲醇分子会通过质子交换膜渗透至阴极,与氧气直接反应生成 CO₂ 和 H₂O,这一过程会降低燃料利用率、导致阴极电位下降,进而降低电池整体电压。为改善该问题,通常采用优化交换膜材料的方案。程海龙等^[24]开发了一系列磺化聚苯乙烯/侧链交联型磺化聚芳醚酮磺交联复合膜,利用交联网络结构有效抑制甲醇分子渗透。Asghar 等^[25]采用质量分数为 60%的聚偏二氟乙烯与质量分数为 40%的醋酸纤维素制备交换膜,在增强吸水率的同时减少甲醇交叉渗透。

甲醇重整制氢过程中,催化剂对其性能影响较大,Cu-Cl-Al、Cu-Zn-Al 等催化剂的催化效率直接影响燃料电池的整体性能^[26-27]。RMFC 在工作过程中,部分未完全反应的甲醇也可能进入阳极,从而降低氢气的利用效率;RMFC 可能无法完全隔绝反应过程中生成的 CO,导致催化剂中毒,使得燃料电池的性能下降,甚至导致燃料电池无法正常工作^[28]。

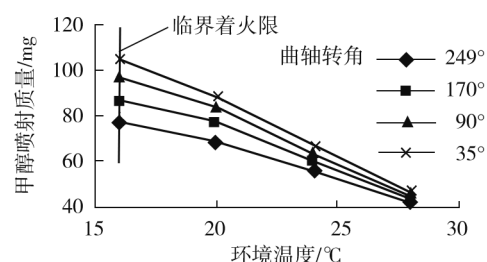


图2 甲醇发动机临界着火时最小循环喷射质量与环境温度的关系

3 乙醇燃料的应用

乙醇通过植物原料发酵生产。我国的乙醇燃料主要以甘蔗、甜菜、小麦、玉米等作为原材料^[29],从理化特性来看,乙醇的低热值、能量密度均低于汽油和柴油,蒸气压低于汽油但远高于柴油;且乙醇的辛烷值比汽油高,约为柴油的 3~5 倍,其抗爆性能优于汽油、柴油,允许发动机使用更高压缩比,提高发动机的燃烧效率。乙醇燃料的燃烧产物主要是 CO_2 和 H_2O ,相比传统化石燃料,其碳排放相对较低^[30]。但乙醇燃烧过程中会生成乙酸、甲醛等非常规污染物,其中乙酸可能对发动机部分金属部件产生腐蚀作用,影响发动机的使用寿命,因此,当乙醇掺混比例较高时,应对发动机关键部件进行防腐设计并改进润滑油,以提高发动机的耐久性和可靠性^[31-32]。

3.1 乙醇燃料发动机

乙醇发动机通常使用乙醇和汽油的混合燃料,燃料的混合比例影响发动机的燃烧效率和排放^[30]。相关研究表明:随着混合燃料中乙醇比例的增加,燃料的含氧量增大,燃烧更充分,可以降低各种非常规污染物排放和燃油消耗率,同时导致 CO_2 排放增加^[33-34]。乙醇使燃烧速度更快、火焰传播提前,混合燃料中增加乙醇导致峰值压力提前出现,因此需要延迟点火时刻以防止爆震^[35]。为了进一步研究影响发动机性能的因素,李庆宇等^[36]在一台排量为 2.0 L 的直列四缸涡轮增压汽油缸内直喷 (gasoline direct injection, GDI) 发动机上利用不同乙醇掺混比,对比了不同喷射策略对发动机性能和排放的影响,研究表明:当混合燃料中乙醇的体积分数为 10% 时,单次喷射和多次喷射对发动机性能几乎没有影响;通过对比燃料中乙醇体积分数分别为 0 (记为 E0)、30% (记为 E30)、85% (记为 E85) 时不同喷射次数对颗粒物排放的影响发现,随着乙醇掺混比例增加并结合多次喷射策略,在瞬态工况下颗粒物排放显著改善;但在冷起动初期,由于气缸温度较低,乙醇挥发性不足, E30 的粒子数密度短暂高于 E0,随着温度升高、燃烧趋于平稳后,粒子数密度迅速下降,如图 3 所示。

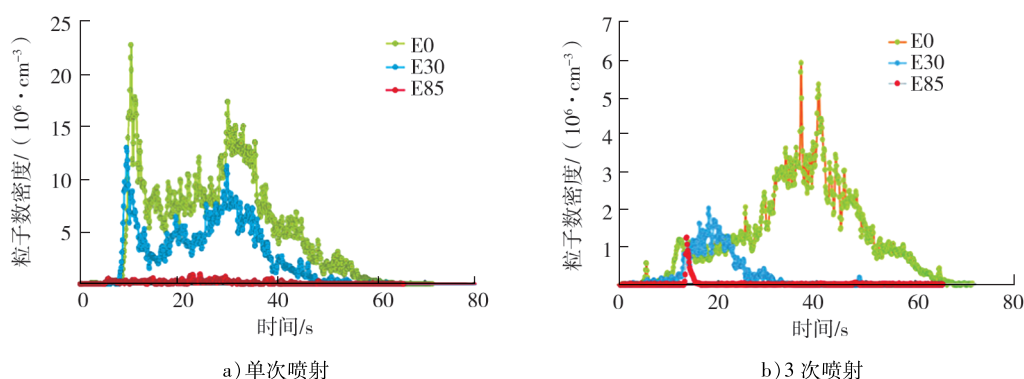


图 3 瞬态工况单次和 3 次喷射下 E0、E30 和 E85 的颗粒物分布对比

乙醇的辛烷值和汽化潜热较高,而汽油能量密度高。由于单一的喷射系统无法精准调节乙醇占比,结合这两种燃料的优点,赵乐文等^[31,37]在某排量为 2.0 L 增压 GDI 汽油机上加装了一套进气道乙醇喷射 (ethanol port injection, EPI) 系统,利用双电子控制单元开环控制实时调节混合燃料中乙醇的比例,研究双喷射系统对发动机性能的影响,结果表明:随着燃料中乙醇质量分数的增加,排放中微粒数量减少,CO 排放呈现先降低后升高的趋势;随后,将燃料喷射方式由 GDI-EPI 变更为缸内直喷乙醇 (ethanol direct injection, EDI)-进气道喷射汽油 (gasoline port injection, GPI) 后发现,EDI-GPI 模式能够吸收更多的热量,使得发动机燃烧效率更高,燃油经济性较好,但排放增加。Li 等^[38]通过在 EDI 发动机上改变喷射正时和喷射压力以改善排放性能,结果表明:喷射压力由 5.5 MPa 增大到 13.0 MPa 可以增强二次喷雾的效果,促进液滴蒸发,使颗粒物数量和粒子数密度分别下降 51.15%、22.64%。

柴油发动机通常在重负荷工况下运行,引入乙醇能够改善其燃烧和排放性能,在保持柴油机高效运

行的同时降低颗粒物排放^[39]。燃料中增加乙醇的比例虽能降低柴油机排放,但乙醇的低十六烷值易造成燃烧集中,导致燃烧不稳定。Wei等^[40]在某涡轮增压发动机上引入EGR技术,通过改变乙醇替代率(ethanol substitution rate, ESR)对柴油机高负荷工况下的燃烧和排放进行研究,结果表明:ESR增加使缸内压力、缸内气体温度和最大压力的上升速率加快,导致爆震倾向迅速增加;当ESR为40%时引入EGR能够降低热效率、抑制发动机爆震,大幅降低 NO_x 排放,但导致颗粒物、HC、CO排放增加。先导喷射策略可缩短着火延迟,降低燃烧不稳定现象。Yang等^[41]在某四缸四冲程高压共轨直喷柴油机上分析先导喷射策略对发动机性能和排放的影响,研究表明:先导喷射时间增加使燃料有足够的时间在气缸中雾化和汽化,从而使燃料和空气的混合更充分,提高燃烧稳定性;预喷时刻提前可使颗粒物、 NO_x 、CO排放呈下降趋势。Müller等^[42]对比了预混合充气模式和预混合燃料模式,研究表明:在预混合充气模式下,柴油机低负荷运行时的乙醇替代率可达到70%,但容易产生较高的CO和THC排放;相比之下,预混合燃料模式在高负荷工况下表现更优,CO和THC排放较低,且乙醇替代率更高。但柴油为非极性物质,不易与乙醇等极性物质互溶,柴油与乙醇混合时需要添加助溶剂,但助溶剂成本较高且低温性能较差,所以柴油和乙醇一般采用双燃料模式^[43-44]。

除改变乙醇比例外,乙醇掺水也能使发动机燃烧更平稳,减少爆震现象,并且减少 NO_x 排放。Voriss等^[45]在GDI发动机上研究了乙醇掺水对排放的影响,研究表明:掺水可以有效降低 NO_x 排放,燃料中水的体积分数为20%时, NO_x 排放可减少约40%,且对燃烧效率的影响较小;此外,随着掺水比例增加,未燃烧HC排放增加。Dos Santos等^[46]研究结果表明,掺水过多会导致CO和未燃烧HC排放增加。

综上所述,乙醇的高辛烷值能够改善汽油机的抗爆性,改变喷射方式、喷射策略、延迟点火时刻等技术可以在提高发动机燃烧效率的同时减少排放,此外适当掺水可以降低 NO_x 排放;在柴油发动机中掺入乙醇能够显著降低 NO_x 排放,通过改变ESR、提前喷射时刻、预混合等措施能够改善柴油机的燃烧稳定性,为乙醇在柴油机上的应用提供了参考依据。

3.2 乙醇燃料电池

乙醇燃料电池分为直接乙醇燃料电池(direct ethanol fuel cell, DEFC)和重整乙醇燃料电池(reformed ethanol fuel cell, REFC)^[47-49]。根据电解质的不同,DEFC可进一步分为酸性DEFC和碱性DEFC。由于乙醇分子相对较小,易通过质子交换膜渗透,导致燃料电池性能下降^[50]。此外,乙醇在氧化反应过程中产生的CO吸附在催化剂表面导致催化剂中毒,降低电池性能。目前减少CO形成和吸附可采用提高催化剂的氧化效率和改进电解质膜两种办法^[51]。

Alqdeimat等^[52]研究表明:采用多元醇法合成的 PtNi_x/C 催化剂具有更优异的催化性能,对CO的吸附毒性较低,可有效提高催化剂的稳定性和耐久性。Firouz等^[53]研究表明:铁基电催化剂在碱性介质中具有良好的氧化还原反应活性和稳定性,在直接乙醇燃料电池中,Fe-NPC的开路电压为0.89 V,最大功率密度为 $1 \text{ mW}/\text{m}^2$ 级别。 $\text{Pd}_3\text{RE}/\text{C}$ 双功能催化剂可将乙醇氧化反应和氧化还原反应的活性分别提高1.8倍和3.1倍,表现出优异的电催化性能^[54]。

在电解质膜表面覆盖铂、钯双金属材料可有效降低乙醇渗透,提高峰值功率密度和开路电压,减少燃料损耗^[55]。Ahmad Wani等^[56]开发了一种新型可生物降解聚合物电解质膜,该膜的最大功率密度达到 $19.52 \text{ mW}/\text{m}^2$,并可在温度为 90°C 时稳定运行1000 h,具有优异的耐久性。Hren等^[57]制备的多糖阴离子交换膜,在温度为 80°C 时的功率密度可达到 $65.1 \text{ mW}/\text{cm}^2$,相比商用膜,其功率密度提高了86%。

乙醇燃料电池的运行需要催化剂促进反应,目前主流催化剂主要由铂、钯等贵金属组成,但贵金属成本较高,也可通过金属合金化或者非贵金属(如镍、铜)等降低材料成本^[29]。

4 丁醇燃料的应用

丁醇可通过木质纤维素水解产生的糖发酵制备^[58],制备过程中需要高温、高压和催化剂,丁醇的生产成本比甲醇、乙醇高^[59],丁醇主要包括正丁醇和异丁醇两种结构。正丁醇是四碳直链醇,其汽化潜热

低于甲醇、乙醇,在低温环境下燃烧更稳定,有利于减少 CO、HC 等污染物排放;异丁醇是四碳支链结构,其蒸汽压较低,挥发性小,在相同体积下能够储存更多的能量,并且更容易与化石燃料混合^[60]。相对于甲醇和乙醇,丁醇的能量密度和低热值较高,在低温环境的燃烧特性好,但其十六烷值比柴油低,点火延迟长。

相比于其他低碳醇,丁醇的腐蚀性较低,在燃料应用中对发动机材料的适配性较强,只需对塑料和橡胶材料改进,防止溶胀现象发生^[61]。丁醇的辛烷值比汽油和柴油高,在燃烧过程中可允许更高的压缩比,但可能导致燃烧温度更高,加速 NO_x 等污染物生成^[62-63]。因此,在实际应用中,需要结合燃烧优化策略以降低污染物排放。

4.1 正丁醇发动机

相比甲醇、乙醇发动机,正丁醇发动机冷起动性能较好,由于正丁醇的黏度较高,可以降低发动机关键运动部件的磨损,但导致燃料雾化性能较差,可能引起混合气不均匀,影响燃烧稳定性^[61]。Yanai 等^[64]对比了进气压力对进气歧管喷射(port fuel injection, PFI)和缸内直喷(direct injection, DI)两种喷射方式时,在不同平均指示有效压力(indicated mean effective pressure, IMEP)下正丁醇发动机排放性能,结果表明:PFI 方式下进气压力为 30 kPa,DI 方式下进气压力为 75 kPa 时,可实现稳定自燃,且低负荷工况的 NO_x 和碳烟排放比柴油低,但 THC、甲醛、CO 排放均高于柴油,主要原因是点火延迟时间较长导致燃烧温度较低,如图 4 所示。

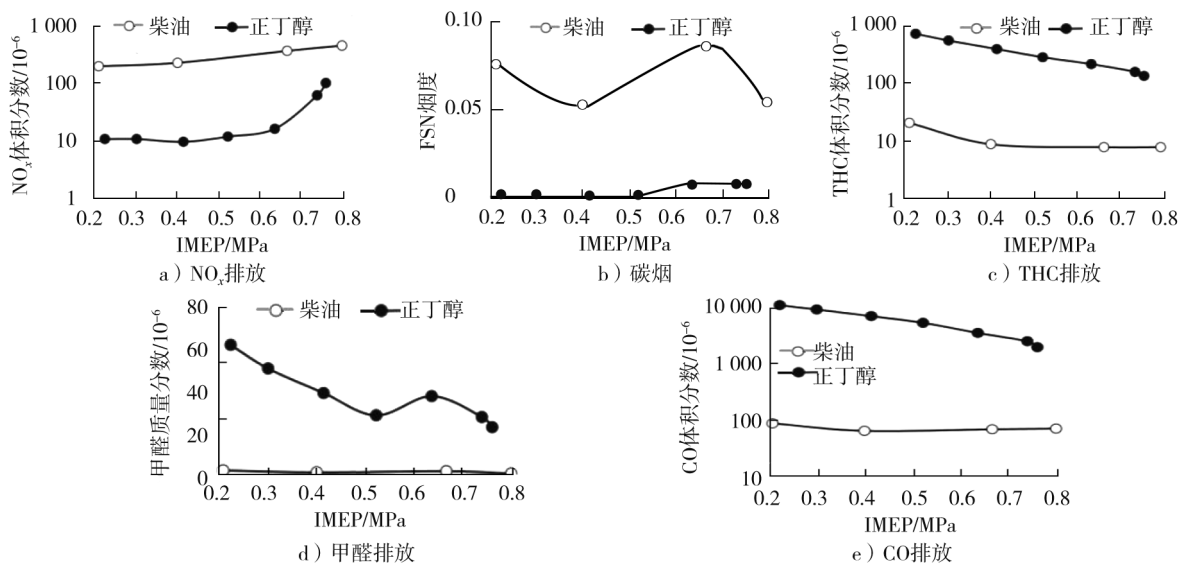


图4 发动机负荷对 NO_x、碳烟、THC、甲醛、CO 排放特性的影响

喷射策略优化可改善以上缺陷。使用汽油-正丁醇掺混燃料,在缸内直喷发动机上将喷射压力提高至 20 MPa 时,可提高燃烧压力并减少 CO、颗粒物、HC 排放,但喷射压力超过 20 MPa 后改善效果减弱,且 NO_x 排放增加^[61]。提前喷射可显著优化正丁醇的燃烧和排放性能,尤其在压缩上止点前曲轴转角为 300°时喷射,可实现较高的燃烧效率并降低污染物排放^[65]。Yu 等^[66]使用纯正丁醇在四缸点火发动机上研究二次喷射的影响,研究表明:在压缩上止点前曲轴转角为 100°或 125°时进行喷射,且第二次喷射燃料的体积分数为总燃料的 20%或 40%时,分层燃烧效果更好,可以提高缸内压力与燃烧温度,同时减少 CO 和 HC 排放;但二次喷射比例超过 60%时,导致不完全燃烧现象加剧,排放增加。

正丁醇的氧含量较高,与柴油混合使用可促进燃烧,提高热效率并降低排放^[67]。Xu 等^[68]在四缸增压柴油机上采用双直喷方式分析了丁醇替代的可行性,研究表明:随着混合燃料中丁醇含量增加,发动机在各工况下的最大缸内压力和最大压力升高率分别降低 9%~12%、1%~21%,平均有效压力和指示热效率分别提高 5%~11%和 6%~7%,NO_x、CO、HC 排放分别减少 32%~54%、4%~10%、3%~4%。为了进一

步改善正丁醇发动机的排放特性,Song 等^[69]在双缸直喷柴油机上研究了进气温度对排放的影响,结果表明:当混合燃料中丁醇的体积分数为 50% 和 90% 时,随着进气温度升高,CO 和 HC 排放均有所降低;相同进气温度下,丁醇的体积分数为 90% 的燃料的减排效果优于体积分数为 50% 的减排效果。

正丁醇还可作为辅助燃料燃烧^[70]。Ahmad 等^[71]在柴油发动机中验证了三元混合物(微藻生物柴油、正丁醇添加剂和柴油)燃料的可行性,结果表明:使用该燃料可将发动机有效热效率提高 6.25%,燃油消耗降低 2.14%, NO_x 和碳烟排放分别降低 58.22%、54.59%,但相比柴油,HC 和 CO 排放增加。

综上所述,正丁醇可以作为柴油和汽油的替代燃料,但应解决正丁醇的点火稳定性和非常规污染物的排放问题,通过优化喷射策略、改变喷射方式、提高压缩比等方式,可以改善其燃烧状况。此外,正丁醇以一定比例与柴油掺混形成混合燃料,可有效改善发动机的排放特性。

4.2 异丁醇发动机

异丁醇一般作为辅助燃料使用,可有效改善发动机性能。Gowthama Krishnan 等^[72]研究了不同比例异丁醇掺混燃料对双燃料柴油发动机的影响,其中混合燃料中异丁醇的预混体积分数 φ 分别为 10%、20%、30% 时采用进气歧管喷射,柴油、B20(生物柴油的体积分数为 20%) 进行缸内喷射,并对比 B20-CCM(传统燃烧模式,即将 B20 燃料直接喷射到气缸内)在不同制动平均有效压力(brake mean effective pressure, BMEP)下的排放特性,研究结果表明:相比于传统进气方式,采用混合不同异丁醇预混比的柴油、B20 发动机在所有负荷下热效率均提高,这是因为异丁醇的高含氧量使得燃烧完全,但低负荷时,由于异丁醇蒸发不完全,导致 CO 比排放增加;中低负荷工况下, NO_x 比排放降低。不同 BMEP、不同预混燃料发动机的 CO 和 NO_x 比排放如图 5 所示。

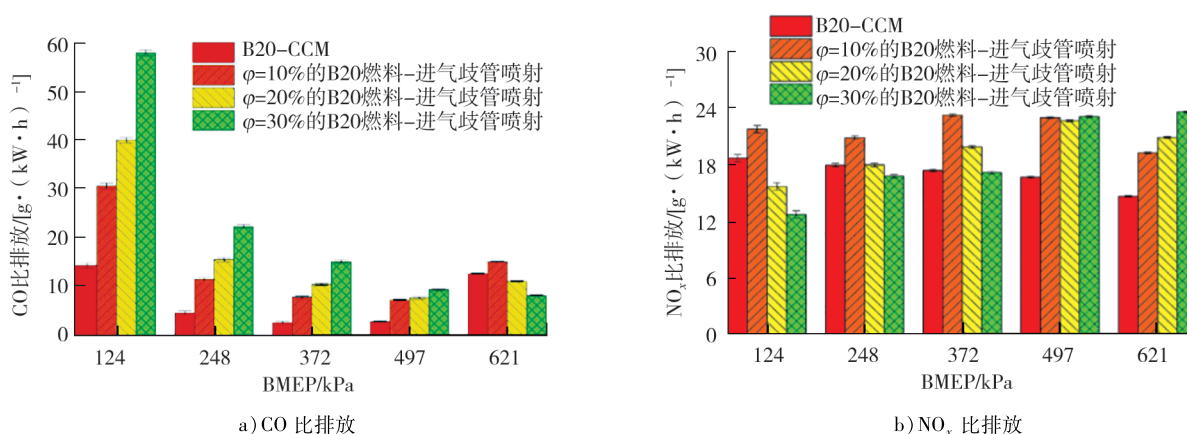


图5 不同 BMEP 下、不同预混燃料发动机的 CO 和 NO_x 排放

Gowthama Krishnan 等^[73]进一步研究发现,在高负荷工况下,将燃油喷射时刻设为压缩上止点后曲轴转角为 25°、EGR 率为 10%,可实现最佳的性能与排放平衡。

综上所述,异丁醇的含氧量较高,可以在中高负荷工况下提高柴油的燃烧效率,并降低 NO_x 等污染物排放;但低负荷工况下,使用异丁醇辅助燃烧使得排放增加,但可以通过 EGR 等技术进一步降低 NO_x 的排放。

5 结论

1) 醇类燃料应用于发动机能够有效降低污染物排放并提高燃烧效率,但需对发动机的材料和结构进行相应改进;甲醇和乙醇更适用于汽油机,正丁醇和异丁醇对汽油机和柴油机都适用;优化发动机喷射方式、调整混合燃料中醇类燃料的比例、采用 EGR 技术等对发动机的性能和排放具有显著影响。

2) 在中高负荷工况下,甲醇双燃料发动机性能优异;在低负荷时需要调整喷射策略和采用分层燃烧技术提高热效率、降低排放;优化喷射策略和 EGR 率是解决乙醇双燃料发动机在高负荷下的爆震风险和

排放问题的关键路径;丁醇双燃料发动机的 NO_x 和颗粒物排放明显下降,但在高负荷工况下,为平衡发动机的性能和污染物的排放,应调整燃料混合比例。

3) 甲醇和乙醇可以用于燃料电池,既可直接作为燃料电池燃料,也可采用重整制氢的方式;直接作为燃料电池燃料时存在燃料和 CO 通过质子交换膜渗透问题,特别是 CO 导致催化剂中毒,因而需要改善质子交换膜的渗透率;重整制氢时需要利用催化剂,主流催化剂主要为铂、钯等贵金属,成本较高,应研究低成本的催化剂。

参考文献:

- [1] HEIDARI E, BIKDELI S, MANSOURI DANESHVAR M R. A dynamic model for CO_2 emissions induced by urban transportation during 2005–2030: a case study of Mashhad, Iran[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(5): 4217–4236.
- [2] ÇELEBI Y, AYDIN H. An overview on the light alcohol fuels in diesel engines[J]. *Fuel*, 2019, 236: 890–911.
- [3] 田林,王磊,陈亚雷,等. 含醇燃料对 GDI 发动机气体排放的影响[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2019, 32(1): 74–78.
- [4] ZHAO H, GE Y S, TAN J W, et al. Effects of different mixing ratios on emissions from passenger cars fueled with methanol/gasoline blends[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(11): 1831–1838.
- [5] 刘辉,宋应柱,宋应金. 醇燃料使用性能研究[J]. *石油商技*, 2008, 26(4): 31–33.
- [6] 姚春德,姚安仁. 甲醇燃料的应用现状及其展望[J]. *汽车安全与节能学报*, 2023, 14(5): 521–535.
- [7] 郭啸峰,孙建军,刘义强,等. 甲醇发动机低温冷启动策略研究[J]. *小型内燃机与车辆技术*, 2024, 53(2): 65–68.
- [8] KOWALEWICZ A. Methanol as a fuel for spark ignition engines: a review and analysis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 1993, 207(1): 43–52.
- [9] REITZ R D, DURAISAMY G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 46: 12–71.
- [10] LI Y P, JIA M, CHANG Y C, et al. Towards a comprehensive understanding of the influence of fuel properties on the combustion characteristics of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine[J]. *Energy*, 2016, 99: 69–82.
- [11] NING L, DUAN Q M, CHEN Z M, et al. 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[J]. *Fuel*, 2020, 266: 117034.
- [12] WANG X Y, LIU Y, HAN L H, et al. The influence of exhaust gas recirculation coupling with fuel injection pressure on the combustion and emission characteristics of engine fueled with methanol-gasoline blends[J]. *Fuel Processing Technology*, 2024, 255: 108048.
- [13] 冯浩,吴翔,林思聪,等. 甲醇直喷及高压压缩比对点燃式发动机性能的影响[J]. *内燃机学报*, 2023, 41(6): 490–497.
- [14] SHEN B, SU Y, YU H, et al. Experimental study on the effect of injection strategies on the combustion and emissions characteristics of gasoline/methanol dual-fuel turbocharged engine under high load[J]. *Energy*, 2023, 282: 128925.
- [15] 宫长明,李朝晖,屈翔,等. 点燃式甲醇发动机冷启动临界着火边界[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(4): 1118–1123.
- [16] GONG C M, SUN J Z, CHEN Y L, et al. Numerical study of cold-start performances of a medium compression ratio direct-injection twin-spark plug synchronous ignition engine fueled with methanol[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119235.
- [17] WEN M S, WANG C, ZHANG Z, et al. Effects of operating parameters on start performance of compression ignition engine by using high-pressure direct-injection pure methanol fuel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 249: 123352.
- [18] 申立忠,赵静平,黄粉莲,等. 甲醇/柴油双燃料发动机燃烧与排放特性研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(9): 1183–1190.
- [19] SHI M S, WU B Y, WANG J Y, et al. Optimization of methanol/diesel dual-fuel engines at low load condition for heavy-duty vehicles to operate at high substitution ratio by using single-hole injector for direct injection of methanol[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 246: 122854.
- [20] LONG W Q, YANG Y, DONG P B, et al. Study of fuel injection strategy for a methanol and diesel dual-fuel large-bore and

- medium-speed marine engine[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2024, 150(6): 04024033.
- [21] JIANG M Q, SUN W C, GUO L, et al. Numerical optimization of injector hole arrangement for marine methanol/diesel direct dual fuel stratification engines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257: 124456.
- [22] CESUR I. Investigation of the effects of water injection into an SI engine running on M15 methanol fuel on engine performance and exhaust emissions[J]. *Energy*, 2022, 261: 125203.
- [23] MA J, LI C J, LI L, et al. Combustion characteristics of diesel methanol blended fuel ship engines[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2529(1): 012019.
- [24] 程海龙, 韩康辉, 李奥, 等. 磺化聚苯乙烯/侧链交联型磺化聚芳醚酮砜复合质子交换膜的制备与性能[J]. *高等学校化学学报*, 2024, 45(8): 153-163.
- [25] ASGHAR M R, YU W B, ZHANG W Q, et al. Improving the performance of polyvinylidene fluoride (PVDF)-based proton exchange membranes with the addition of cellulose acetate for direct methanol fuel cells[J]. *Journal of Polymer Research*, 2024, 31(9): 277.
- [26] LIU T X, HAN X, LI T X, et al. Methanol steam reforming using Ce and La modified low-Cu catalysts for On-board hydrogen production[J]. *Molecular Catalysis*, 2025, 570: 114663.
- [27] SŁOWIK G, ROTKO M, RYCZKOWSKI J, et al. Hydrogen production from methanol steam reforming over Fe-modified Cu/CeO₂ catalysts[J]. *Molecules*, 2024, 29(16): 3963.
- [28] AKAY R G, YURTCAN A B. Direct liquid fuel cells: fundamentals, advances and future[M]. Miami, USA: Academic Press, 2020.
- [29] 宁艳春, 马迎雪, 伊凤, 等. 燃料乙醇技术发展现状及建议[J]. *化学工业*, 2024, 42(3): 58-61.
- [30] 张传奇, 文铭升, 董芳, 等. 乙醇汽油燃料特性对直喷增压乘用车性能影响研究[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(5): 54-61.
- [31] 赵乐文, 裴毅强, 李翔. 乙醇汽油双燃料双喷射系统发动机经济性和排放特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(2): 485-492.
- [32] ORAL F. Effect of using gasoline and gasoline-ethanol fuel mixture on performance and emissions in a hydrogen generator supported SI engine[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 55: 104192.
- [33] KURJI H J, IMRAN M S, BDED A S. The impact of using pure ethanol additives on gasoline fuel with respect to SI engine emissions[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1067(1): 012090.
- [34] SCHIFTER I, DIAZ L, RODRIGUEZ R, et al. Combustion and emissions behavior for ethanol-gasoline blends in a single cylinder engine[J]. *Fuel*, 2011, 90(12): 3586-3592.
- [35] NWUFO O C, NWAIWU C F, ONONOGBO C, et al. Performance, emission and combustion characteristics of a single cylinder spark ignition engine using ethanol-petrol-blended fuels[J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2018, 39(8): 792-801.
- [36] 李庆宇, 付建勤, 刘敬平, 等. 喷射策略对乙醇汽油发动机颗粒物排放的影响[J]. *内燃机学报*, 2023, 41(5): 450-457.
- [37] 赵乐文, 裴毅强, 李翔. 乙醇汽油双燃料双喷射系统发动机燃油互换的对比研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(5): 1254-1264.
- [38] LI X, LI D Y, LIU J Y, et al. Exploring the potential benefits of ethanol direct injection (EDI) timing and pressure on particulate emission characteristics in a dual-fuel spark ignition (DFSI) engine[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 357: 131938.
- [39] SHADIDI B, ALIZADE H H A, NAJAFI G. The influence of diesel-ethanol fuel blends on performance parameters and exhaust emissions: experimental investigation and multi-objective optimization of a diesel engine[J]. *Sustainability*, 2021, 13(10): 5379.
- [40] WEI Z N, ZHANG Y X, XIA Q, et al. A simulation of ethanol substitution rate and EGR effect on combustion and emissions from a high-loaded diesel/ethanol dual-fuel engine[J]. *Fuel*, 2022, 310: 122310.
- [41] YANG T T, CHEN D D, LIU L, et al. Effect of pilot injection strategy on performance of diesel engine under ethanol/F-T diesel dual-fuel combustion mode[J]. *Processes*, 2023, 11(7): 1919.
- [42] MÜLLER F, GÜNTNER M. A detailed comparison of ethanol-diesel direct fuel blending to conventional ethanol-diesel

- dual-fuel combustion[J]. *Automotive and Engine Technology*, 2024, 10(1): 1–17.
- [43] 孙瑞,陈振斌,李开锦. 乙醇柴油配比优化及其用于发动机的性能试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(9): 55–63.
- [44] 陈庆涛,刘军恒,孙平,等. 预喷参数对乙醇/柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响[J]. *石油学报(石油加工)*, 2024, 40(1): 115–125.
- [45] VORIS A R, LUNDBERG M, PUZINAUSKAS P V. Effect of ethanol content, water injection, and compression ratio on combustion and detailed emissions in an SI-GDI engine[J]. *Fuel*, 2025, 381: 133200.
- [46] DOS SANTOS F A, LEIROZ A J K. A computational study on the influence of the hydrous ethanol water content in spark-ignition engine performance and in flame development[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2024, 45(2): 194–210.
- [47] NOBREGA S D, GALESKO M V, GIRONA K, et al. Direct ethanol solid oxide fuel cell operating in gradual internal reforming[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 213: 156–159.
- [48] MESSA MOREIRA T F, NETO S A, LEMOINE C, et al. Rhodium effects on Pt anode materials in a direct alkaline ethanol fuel cell[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(58): 35310–35317.
- [49] ZAKARIA Z, KAMARUDIN S K, TIMMIATI S N, et al. New composite membrane poly(vinyl alcohol)/graphene oxide for direct ethanol-proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(2): 46928.
- [50] ÇALI A, AR İ. The chemical crosslinking effect of polybenzimidazole/polyvinyl alcohol blend membranes for proton exchange membrane fuel cells: an experimental study[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(43): e56134.
- [51] 朱科,陈延禧,张继炎. 直接乙醇燃料电池的研究现状及前景[J]. *电源技术*, 2004, 28(3): 187–190.
- [52] ALQDEIMAT D, PICKUP P G. PtNi_x/C catalysts for improved performance in ethanol fuel cells[J]. *ECS Transactions*, 2020, 97(7): 893–900.
- [53] FIROUZ TADAVANI K, ZHIANI M, GHARIBI H, et al. Effective MOF-derived electrocatalysts based on nitrogen and different transient metal doped (M: Ni, Co, and Fe) for oxygen reduction reaction toward direct ethanol fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 91: 1343–1354.
- [54] LI Q Q, SUN C, SUN X L, et al. Synthesis of palladium-rare earth alloy as a high-performance bifunctional catalyst for direct ethanol fuel cells[J]. *Nano Research*, 2024, 17(11): 9525–9531.
- [55] PETHAIAH S S, ARUNKUMAR J, RAMOS M, et al. The impact of anode design on fuel crossover of direct ethanol fuel cell[J]. *Bulletin of Materials Science*, 2016, 39(1): 273–278.
- [56] AHMAD WANI A, ZAKARIA Z, OTHMAN N, et al. Improving durability and efficiency in passive direct ethanol fuel cells using a biodegradable polyvinyl alcohol/epoxidized natural rubber membrane[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(41): e56083.
- [57] HREN M, ROSCHGER M, HACKER V, et al. High performance chitosan/nanocellulose-based composite membrane for alkaline direct ethanol fuel cells[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127693.
- [58] ABO B O, GAO M, WANG Y L, et al. Production of butanol from biomass: recent advances and future prospects[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(20): 20164–20182.
- [59] 贾玉庆,孙清,缪长喜. 乙醇催化转化制备正丁醇的研究进展[J]. *化学世界*, 2019, 60(8): 476–484.
- [60] 顾小磊,俞建达,黄佐华,等. 正丁醇和异丁醇对柴油机燃烧与排放特性的影响[J]. *内燃机学报*, 2014, 32(2): 131–137.
- [61] 刘增斌. 喷油策略对正丁醇 DISI 发动机燃烧与排放特性研究[D]. 天津:天津职业技术师范大学, 2024.
- [62] 何浪. 喷油时刻对汽油-丁醇混合燃料 GDI 发动机燃烧特性的影响[J]. *现代机械*, 2022(4): 73–75.
- [63] GÜLCAN H E. Effect of intake valve lift and binary alcohol (bioethanol+isobutanol) addition on energy, exergy, sustainability, greenhouse gas impact and cost analysis in a hydrogen/diesel dual fuel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 77: 450–471.
- [64] YANAI T, BRYDEN G, DEV S, et al. Investigation of ignition characteristics and performance of a neat n-butanol direct injection compression ignition engine at low load[J]. *Fuel*, 2017, 208: 137–148.
- [65] LIU Z B, ZHEN X D, GENG J, et al. Effects of injection timing on mixture formation, combustion, and emission characteristics in a n-butanol direct injection spark ignition engine[J]. *Energy*, 2024, 295: 131059.
- [66] YU X M, WANG T Q, DU Y D, et al. Study on the effect of secondary injection on the combustion and emission of n-butanol engines[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(38): 34908–34918.

- [67] SANDU C, PANĂ C, NEGURESCU N, et al. The study on the engine pressure variation of utilizing n-butanol-gasoline blends at fueling spark ignition engines [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2024, 1311(1):012015.
- [68] XU X F, XIA Q, XU Y L, et al. Simulation of combustion process in diesel/butanol dual fuel engine [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(1):1485–1498.
- [69] SONG J T, ZHU C H, SHI Y F, et al. Experimental studies on the exhaust emissions of a n-butanol/diesel dual-fuel HCCI engine under different intake temperature [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2879(1):012031.
- [70] JAYARAMAN K, ANBUCHIZHIYAN G, MUBARAK N M, et al. Exploring the combustion, emission and performance of n-Butanol with Deccan hemp oil methyl ester on dual fuel diesel engine [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):28015.
- [71] AHMAD A, YADAV A K, SINGH A, et al. Enhancement of biogas yield from dual organic waste using hybrid statistical approach and its effects on ternary fuel blend (biodiesel/n-butanol/diesel) powered diesel engine [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2023, 42(5):e14163.
- [72] GOWTHAMA KRISHNAN M, RAJKUMAR S. Effects of dual fuel combustion on performance, emission and energy-exergy characteristics of diesel engine fuelled with diesel-isobutanol and biodiesel-isobutanol [J]. Energy, 2022, 252: 124022.
- [73] GOWTHAMA KRISHNAN M, RAJKUMAR S. Effects of start of injection and exhaust gas recirculation on dual fuel combustion of isobutanol with diesel and waste cooking oil biodiesel in a diesel engine at higher loads [J]. Fuel, 2022, 327:125097.

Applications of alcohol fuels in engines and fuel cells

MA Zongzheng¹, YUAN Yuelong^{1,2}, WANG Saifei³

1. School of Mechanical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. School of Intelligent Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

3. School of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 451150, China

Abstract: To improve engine combustion efficiency and effectively reduce pollutant emissions, the physicochemical properties of alcohol fuels, such as methanol, ethanol, and butanol, and the impacts of alcohol fuels on the performance of engines and fuel cells are summarized. The analysis results show that alcohol fuels can reduce engine pollutant emissions and improve combustion efficiency. And the impact of alcohol fuels on the performance of dual-fuel engines varies with operating conditions, and the comprehensive performance of engines can be effectively improved by synergistically optimizing the fuel injection strategy and EGR rate. When methanol and ethanol are used as fuel cell fuels, the permeability of the proton exchange membrane needs to be improved. The cost of catalysts should be comprehensively considered when the reformed methanol fuel cell is used.

Keywords: alcohol fuel; fuel cell; alternative fuel; dual-fuel engine

(责任编辑:刘丽君)