

零碳及碳中和燃料内燃机应用进展

纪常伟, 辛 固, 汪硕峰, 杨金鑫, 孟 昊, 常 珂
(北京工业大学能源与动力工程学院, 北京 100124)

摘要: 随着交通领域日益增长的能源需求, 气候变化以及能源安全问题不断凸显, 发展可再生燃料受到关注. 氢和氨的生产来源广泛, 本身不含碳, 在未来的脱碳进程中将会扮演重要角色. 各类醇、醚和生物燃料可通过合成捕集的二氧化碳和氢气及利用生物材料获得, 是实现碳中和的有效途径, 其本身具有类似于汽油或柴油的燃烧特性. 回顾了各类替代燃料在点燃式 (spark ignition, SI) 和压燃式 (compression ignition, CI) 内燃机中的应用, 并分析了它们对发动机性能及排放特性的影响. 零碳燃料氢气具有良好的燃烧特性, 单独使用可以实现零碳排放, 作为添加剂可以促进主燃料的燃烧, 降低碳排放. 零碳燃料氨的抗爆性能优良, 可与氢气混合使用, 但需要考虑较高的氮氧化物 (NO_x) 排放. 碳中和燃料能够单独在发动机中使用, 也可与零碳燃料氢气混合使用, 实现发动机高效、低排放.

关键词: 替代燃料; 碳中和; 内燃机; 燃烧; 排放; 混合燃料

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2022)03-0273-19

doi: 10.11936/bjtxb2021100007

Application Progress of Zero Carbon and Carbon-neutral Fuel Internal Combustion Engines

Ji Changwei, Xin Gu, Wang Shuofeng, Yang Jinxin, Meng Hao, Chang Ke
(College of Energy and Power Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: With the growing energy demand in transportation, climate change, and energy security issues coming to the fore, the development of renewable fuels is becoming urgent. Hydrogen and ammonia, which are produced from a wide range of sources and do not contain carbon themselves, will play an important role in the future decarbonization process. Various types of alcohols and ethers, which can be obtained from synthesizing the captured CO_2 and H_2 and biofuels from biomaterials, are effective ways to achieve carbon neutrality and have inherent combustion properties similar to those of gasoline or diesel. The applications of various zero carbon and carbon neutral fuels in the spark ignition (SI) and compression ignition (CI) internal combustion engines were reviewed and their effects on engine performance and emission characteristics were analyzed. Hydrogen, a zero-carbon fuel, has good combustion characteristics and can be used alone to achieve zero carbon emissions, and can be an additive to promoting the combustion of the main fuel to reduce carbon emissions. Ammonia, another zero-carbon fuel, has excellent anti-knock properties and can be mixed with hydrogen in engines, however, higher nitrogen oxide (NO_x) emissions need to be concerned. Various types of carbon-neutral fuels can be used alone or mixed with hydrogen in engines to attain engine high efficiency and low emissions.

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51976003); 北京新能源汽车实验室基金资助项目 (JF005015201901, JF005015201801)

作者简介: 纪常伟 (1965—), 男, 教授, 主要从事替代燃料内燃机、动力电池安全及燃料电池方面的研究, E-mail: chwji@bjut.edu.cn

Key words: alternative fuels; carbon neutrality; internal combustion engine; combustion; emissions; fuel blends

据统计,汽油和柴油等常规燃料约占世界一次能源消耗的50%^[1]以上.2019年,中国原油进口量达到5.0572亿t,石油进口率超过70%,远超50%的国际能源安全警戒线^[2].道路车辆能源消耗不仅是能源消耗的重要组成部分,也是温室气体排放的最重要的驱动因素之一^[3].

2016年通过的《巴黎协定》制定了具体的减排目标,即到2030年,将全球温度上升限制在2℃以内,并争取控制在1.5℃以内^[4].在《巴黎协定》中,中国国家自主贡献承诺在2030年左右实现CO₂排放达峰,并力争早日达峰;将单位国内生产总值的CO₂排放量比2005年降低60%~65%;并将石化燃料在一次能源消费中的比重提高到20%左右.我国能源消耗和CO₂排放分别占全球的23%和27%,低碳能源转型和CO₂减排对实现《巴黎协定》的目标至关重要^[5].

可再生能源在我国一次能源消费结构中占比仅为4.53%,煤炭和石油等化石能源的消费比例仍然超过77.34%.向可再生能源系统过渡是一个复杂的过程,面临着诸多挑战,为了实现既定目标,应同时包括几个步骤,包括提高能源利用效率,减少一次能源消耗,最后使用可再生能源^[6].风能和太阳能等间歇性可再生能源会对电力系统造成冲击,将剩余电能转化为可再生燃料是一种有前景的解决方案,它们既可以作为能源,也可以作为载体进行长期存储和运输.尽管面临诸多挑战,也不应低估内燃机的潜力,以及在某些应用场景下的独特优势^[7].

当前,绝大部分车用燃料仍然来自于成熟技术生产的化石燃料,即化石能源在一次能源消费中占

比较高.碳中和燃料是以太阳光、风能等可再生能源为主要能量制取,包括各类醇、醚和生物柴油等合成燃料等.零碳燃料可以通过可再生能源直接电解制取.基于零碳电力的可再生燃料制取及推广,可以提高可再生能源在一次能源消费中的占比,从而使车辆动力系统减少化石能源消耗,甚至可以脱离化石能源,实现燃料净零碳排放.可再生燃料是利用可再生能源通过电催化、光催化、热催化等技术还原CO₂,以合成碳中和燃料.

内燃机可以使用的零碳燃料是氢气和氨气,碳中和燃料是甲醇、乙醇、丁醇、二甲醚及生物燃料等.本文简要介绍了具有代表性的各类零碳及碳中和燃料的发展背景及应用现状,重点介绍了它们在压燃式发动机和点燃式内燃机中的应用技术,为内燃机使用零碳及碳中和燃料提供了基本参考.

1 零碳燃料在内燃机的应用

1.1 氢的燃烧特性及在内燃机中的应用

燃料的物化特性直接决定了其适用于发动机的类型,其中可燃极限、最小点火能量、淬灭距离、自燃温度和火焰速度等燃料特性直接决定了发动机的各项性能.

可燃极限给出了混合物中可燃气体的比例.空气中4%的氢气仍可以燃烧,与其他燃料相比,氢气具有更广的可燃性,这允许氢发动机以稀混合气工作,从而获得更好的经济性.同时由于稀燃条件下较低的燃烧速度,缸内峰值温度也会降低,因而以稀混合气运行的氢发动机NO_x排放减少.表1总结了氢气及其他常用替代燃料的物化性质.

表1 各类燃料的物化性质
Table 1 Properties of various fuels

参数	氢	氨	甲醇	乙醇	丁醇	二甲醚	汽油	柴油
化学式	H ₂	NH ₃	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₄ H ₉ OH	CH ₃ OCH ₃	C ₅₋₁₂	C ₁₀₋₂₆
密度/(kg·m ⁻³)	39	600	791	785	809	660	≈740	838.8
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	120.0	18.8	19.7	26.8	33.1	28.8	44.5	42.5
汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)			1109	904	584	460	290~315	230~250
层流火焰速度/(m·s ⁻¹)	3.51	0.07	0.52	0.54	0.50	0.45	0.58	
自燃温度/K	773~850	930	742	690	614	506	573	503
辛烷值	>100	130	112	110	96		90~98	
空燃比	34.6	6.1	6.5	9.0	11.2	9.0	15.0	14.5
可燃极限/%	4.0~75.0	15.0~28.0	6.7~36.0	4.3~19.0	1.4~11.2	3.4~17.0	0.6~8.0	1.9~8.2

最小点火能量是点燃气体混合物所需的最小能量. 在大气条件下, 氢/空气混合物的最小点火能量比异辛烷/空气和甲烷/空气的混合物低一个数量级. 空气中 22% ~ 26% 的氢气仅需要 0.017 mJ 即可点燃^[8]. 具有较低的最小点火能量使氢发动机能够点燃稀混合气并确保迅速启动. 但是较低的最小点火能量也会增加燃烧室中的混合气被其他热源点燃的风险.

淬火距离是可燃混合气火焰在熄灭前可以靠近气缸壁的距离, 距离越小, 火焰越难熄灭. 氢气的淬火距离为 0.64 mm, 而甲烷是 2.03 mm, 异辛烷是 3.50 mm^[9].

自燃温度是确定发动机压缩比的重要参数, 奥托循环中压缩之后的温升与压缩比有关, 并且受到压缩比的限制, 氢气较高的自燃温度允许更高的压缩比, 为进一步提升热效率提供了可能.

在化学计量条件下氢气的火焰速度更快, 与甲烷和异辛烷分别为 0.38 m/s、0.38 ~ 0.43 m/s 相比, 氢气的火焰速度为 1.85 m/s^[10], 高火焰速度使氢发动机更接近于理想的热力循环.

1.1.1 氢在 SI 发动机中的应用

受益于现有发动机成熟的制造工艺和成本优势, 大多数氢内燃机使用进气道燃料喷射系统 (port fuel injection, PFI). 福特公司^[11]研究了 6.8L V10 和 2.3L I4 氢发动机. 结果表明, 增压氢发动机可以达到压缩天然气发动机的水平. Verhelst 等^[12]开

发的 GM 7.4L V8 增压氢发动机的最大扭矩相较于自然吸气氢发动机提高了 60%. 他们还探索了化学计量条件下废气再循环 (exhaust gas recirculation, EGR) 技术的效果, 结果发现相较于自然吸气汽油发动机, 峰值功率提高 30%^[13].

国内学者针对氢发动机同样进行了较多研究. 杨振中等^[14]针对氢发动机的异常燃烧问题进行了研究, 提出了针对回火的控制策略. Ma 等^[15]对氢发动机进行了研究, 他们发现点火正时和喷射策略对氢发动机的性能及氮氧化物 (oxides of nitrogen, NO_x) 排放影响较大. Xu 等^[16]研究了进气加湿和缸内喷水对氢发动机的影响, 结果发现进气加湿和缸内喷水可以显著降低 NO_x 排放.

容积效率和异常燃烧限制了氢发动机的峰值功率输出, 表 2 对比了氢气与汽油的能量及容积效率. PFI 氢发动机进气混合物中大量氢气置换空气, 导致容积效率下降. 若按体积计算化学计量条件下氢气和汽油混合物, 其中氢气占据 30% 的空气体积, 而汽油仅占 2%, 因此, 相较于相同运行条件的汽油发动机, PFI 氢发动机的最大功率仅为汽油机的 83%. 受异常燃烧的限制, 氢发动机的实际运行功率将显著低于 83%. 对于直喷氢发动机, 在进气门关闭后将氢气与空气混合, 氢发动机的峰值输出功率可比汽油发动机提高 15%. 然而, 受制于缸内直喷氢气喷嘴的限制, 直喷系统仍处于研究阶段.

表 2 氢气和汽油的能量和容积效率比较^[16]

Table 2 Energy and volumetric efficiency comparison of hydrogen and gasoline^[16]

项目	流体汽油	汽油氢气预混	液氢预混	高压氢气喷射
示意图				
燃料/mL	17	300	405	420
空气/mL	983	983	965	1 000
能量/kJ	3.5	3.5	4.0	4.2
相对能量/%	100	100	115	120

1.1.2 氢在转子机中的应用

转子机是一种特殊结构的内燃机, 设计紧凑, 功重比高, 在某些领域具有广泛的应用前景. 日本马

自达公司对转子机进行了商业化生产. 由于转子机狭长的燃烧室导致其面容比大, 燃烧效率低和污染物排放高. 然而, 由于氢气较快的燃烧速度及宽泛

的燃烧界限,使得转子机更适合使用氢气,这可以明显改善发动机的稀燃极限及污染物排放水平.马自达自20世纪90年代开始研制氢转子机,为了实现高功率密度,使用了缸内直喷和进气道喷射相结合的方式,实现了高功率和低 NO_x 排放,同时提高了热效率. Wakayama等^[17]采用了稀燃、三元催化器和废气再循环等策略. Salanki等^[18]提出了将转子机应用于混合动力汽车的设想,并对混合动力汽车应用的氢转子机进行了研究.

近年来,Chen等^[19]和Fan等^[20]采用数据模拟的方法研究了转子机的燃烧过程.研究发现掺氢可以加快火焰传播速度,提高缸内压力. Ji等^[21]和Yang等^[22]对纯氢和掺氢正丁醇转子机进行了实验和数值模拟的研究.他们发现,氢气的添加明显提高了混合燃料的燃烧速度,改善了循环变动,降低了CO和HC排放水平,同时拓宽了稀燃极限,提高了发动机的热效率.

1.1.3 氢在CI发动机中的应用

压燃式发动机由于其压缩比高、无节流损失等特点,具有热效率高、功重比大等优良特性.然而,由于氢气的自燃温度较高,在常规压燃式发动机中无法稳定工作.长期以来,将氢应用于CI发动机的研究从未中断.早在1978年,Homan等^[23]就试图将纯氢应用于CI发动机,受限于氢气较高的自燃温度,发动机仅能在极窄的范围内运转,即使压缩比达到29:1,也无法解决工作范围受限的问题.

如图1所示,通过喷入柴油并引燃氢/空气混合物的方式,使氢气应用于CI发动机成为可能. Varde等^[25]将少量氢气供入进气道,用以减少柴油机的碳烟排放.结果表明,在部分负荷时,发动机的碳烟排放降低50%;在全负荷时,碳烟排放降低了17%. Lilik等^[26]观察到氢/柴油混合燃料运行时 NO_x 排放增加,其中NO排放减少, NO_2 排放增加了,原因是主燃烧过程中存在未燃烧的氢气,这增强了NO向 NO_2 的转化^[27];此外,氢气添加显著减少了HC、CO和 CO_2 ^[28].在较高负荷时,氢气的添加对柴油的燃烧过程有明显的影响,峰值缸压和峰值放热率急剧增加,相较于柴油,这有利于提高发动机的热效率^[29].通过双燃料技术,可以将氢气应用于高效的压燃式发动机中,这也为使用二甲醚和生物柴油等碳中和燃料与氢气混合使用提供了参考.

废气再循环是一种有效降低 NO_x 排放的技术,也是抑制氢/柴油双燃料发动机爆震的一种实用方法^[30].但是,EGR的使用可能会导致发动机效率的

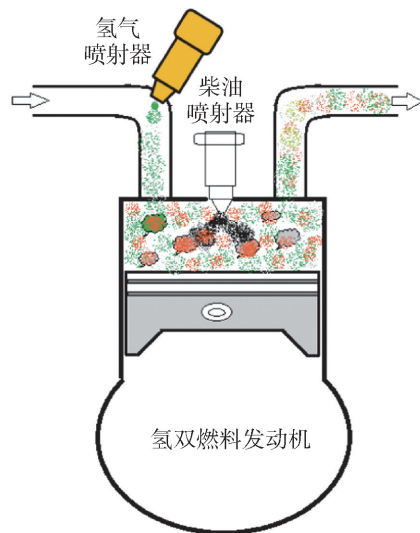


图1 CI发动机中应用氢和柴油^[24]

Fig. 1 Use of diesel and hydrogen fuels in a CI engine^[24]

降低,并且这种影响随着EGR率的增加而增加;此外,增加EGR率还可能造成CO、HC和碳烟排放的增加.与柴油相比,氢气添加及EGR的双燃料运行仍能降低排放并提高发动机性能.

研究人员对将氢/柴油双燃料实现均质压燃(homogeneous charge compression ignition, HCCI)具有浓厚的兴趣. Guo等^[31]研究了掺氢柴油实现HCCI的效果.结果发现,掺氢缩短了燃烧持续期,提高了发动机的功率和效率.在较低EGR率和稀燃条件下的热效率明显高于高EGR率及化学计量比下发动机的热效率. Park等^[32]研究了氢气添加和EGR对柴油发动机的影响,并与柴油预混充量压缩点火(premixed charge compression ignition, PCCI)发动机进行了对比.结果发现,较高氢气比例推迟了燃烧相位,氢气比例为70%时,HC和CO的排放显著降低, NO_x 的排放与PCCI模式的排放水平相近.

1.2 氢在内燃机中的应用

氢是一种无色气体,有强烈的刺激性气味.大气条件下的自燃温度为930 K,辛烷值为130,汽化潜热很高.图2展示了各种可燃物及电池的能量密度,作为一种零碳燃料,氢的能量密度比液氢高出70%,比70 MPa的压缩氢气高出2倍多.氢的挑战在于其并不易燃,燃烧速度极慢.氢正在逐渐受到关注,尤其是在船舶动力系统中具有潜在前景.

图3展示了氢在点燃式和压燃式发动机中应用的形式.早在1822年,Goldswor和Gureney等提出开发一种氢内燃机用于驱动小型汽车的想法^[33].

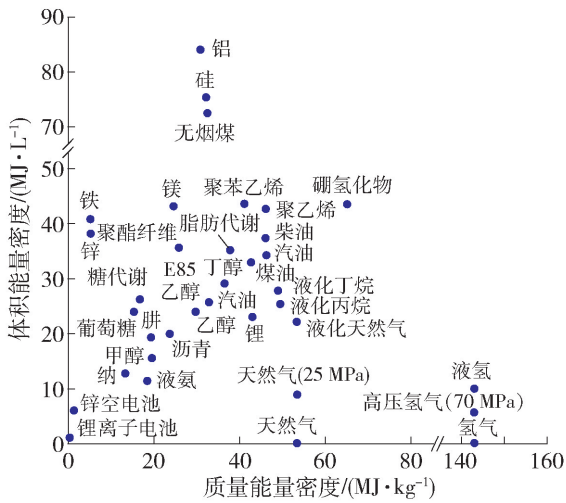
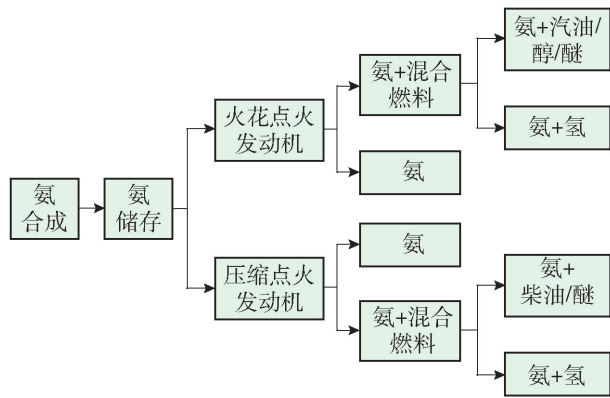
图2 可燃物及电池的体积及质量能量密度^[25]Fig. 2 Gravimetric and volumetric energy density of combustible materials and batteries^[25]

图3 发动机中应用氨的形式

Fig. 3 Forms of ammonia used in engines

意大利的Amonia Casle公司将该设想变成现实,并于1935—1936年间申请了相关专利。第二次世界大战期间,由于柴油供应紧张,比利时工程师^[34]将氨/煤气混合气应用于CI发动机,这次成功的应用说明了氨作为燃料的可能性。20世纪60年代,美国通用汽车公司^[35]对氨在SI内燃机上的应用进行了详细的研究,对比研究了汽油和氨在相同工况下的性能。研究发现,氨燃烧的性能明显低于汽油燃烧性能,最大功率仅为汽油的17.5%,最大热效率仅为汽油的38%,主要原因是氨的火焰速度较慢。针对氨的燃烧特性,通用汽车公司对发动机进行了改造。首先,针对氨最小着火能量高的问题,改进了点火系统以实现多次点火,增加压缩比并使用增压技术,最后向燃料中添加促进剂改善燃烧。最终实现了氨发动机的指示功率超过自然吸气汽油机。

Starkman等^[36]对氨燃料应用于CI内燃机的性

能进行了探究。由于氨极高的自燃温度,即使在压缩比为30:1、转速超过1200 r/min时也无法实现持续压燃,因此必须借助火花塞辅助点燃^[37]。美国西南研究院的Gray等^[38]通过提高进气和冷却水温度,并增大压缩比至35:1,实现了较大范围的氨压燃。为了实现正常压缩比下氨燃烧,他们提出了若干技术路线:

- 1) 喷射燃料引燃预混氨/空气;
- 2) 使用燃料添加剂;
- 3) 进气道引入其他不同的气体;
- 4) 在内燃机上安装其他机械装置。

后续基于氨为主燃料的研究基本都沿着Gray等提出的技术路线进行。由于氨在内燃机中的表现,在20世纪80年代针对氨作为内燃机燃料的研究陷入低潮。直到21世纪初,随着能源紧缺、环境污染、温室效应等问题的困扰,作为无碳燃料的氨再次引起研究者的兴趣。与早期研究不同,民用领域受制于日益严格的排放法规,不仅关注氨内燃机的性能,更关注于其排放性能。

2008年Reiter等^[39]对柴油引燃进气道喷氨的内燃机进行了研究。研究发现,在氨能量占比在40%~80%时,能够获得合理的燃料经济性和95%的燃烧效率。氨掺混比例超过60%后,NO_x排放物相对于柴油有所降低。作者认为,引入氨降低了缸内燃烧温度,尽管这会增加燃料型NO_x的生成,但会显著降低热力型NO_x的生成;缸内温度的降低导致了较高的HC和NH₃排放。Niki等^[40]在一台压缩比为20:1的柴油机上进行了掺氨研究,结果证实了Reiter等的结论,同时认为氨燃烧的N₂O排放可以通过提高缸内温度来促进其分解。同时,他们认为可以通过燃料多次喷射控制NO和NH₃排放处于同一水平,从而使其在选择性催化还原器(selective catalytic reactor, SCR)中发生化学反应,不过N₂O不能在SCR反应中消除^[41]。

经过多年发展,单独使用氨作为内燃机的主燃料仍无法实现,必须引入添加剂来提升氨的燃烧性能^[42]。

2011年Mørch等^[43]使用多燃料研究(cooperative fuel research, CFR)发动机对掺氨摩尔分数为5%~100%、过量空气系数0.85~1.35和压缩比6.23~13.58的掺氨氨的燃烧性能进行了详细研究。结果表明由于混合气的抗爆性远高于汽油,可以通过提高压缩比提升输出功率和热效率,并且在掺混10%的氢气时得到最好的性能。NO_x排放随着当量比的变化而变化,高掺氨比、过量空气系数

在 1.3~1.4 时 NO_x 排放最高. 作者认为这是由于氢气燃烧产生较高的温度从而提升了热力型 NO_x 的生成, 点火角对 NO_x 的排放影响较小, 这说明燃料型 NO_x 占据主导地位^[44].

另外, 有研究者提出利用发动机的尾气余热对氨进行裂解, 实现车载制氢. Ezzat 等^[45] 提出了一种车载制氢方案, 利用尾气余热驱动温差发电机, 产生电能供给氨电解电池, 从而产生氢气供应给氨/氢发动机, 其最高效率能够达到 31.1%. 比萨大学的 Frigo 等^[46] 开发出了一套可以利用尾气余热将 NH_3 进行热解的催化反应器, 使用化学计量比的 NH_3/H_2 燃料, 发动机可以在 3 000 r/min 以上, 在低负荷和高负荷下的热效率高于汽油燃料, 并且 NO_x 排放低于汽油燃料^[47].

近期, Lhuillier 等^[48] 在一台改装的 SI 发动机上进行了 NH_3/H_2 的研究. 图 4 展示了不同工况下的指示平均有效压力 (indicated mean effective pressure, IMEP). 研究发现, 15% 掺氢分数的 NH_3/H_2 燃料的指示热效率、循环变动和 NO_x 排放与 CH_4 燃料接近. 当量比偏稀附近燃烧可以使 NO_x 和 NH_3 排放处于一个数量级, 有助于使用现有的后处理系统进行处理. Ji 等^[49] 研究了少量氨气对氢发动机的影响, 结果表明, 氨气能够显著降低氢气燃烧速率, 并提高其输出功率.

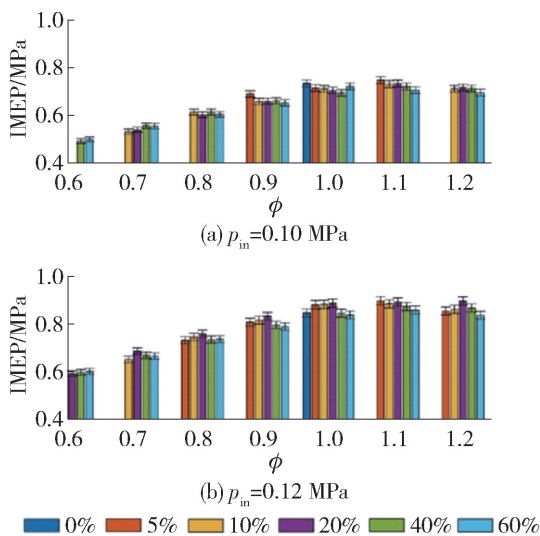


图 4 指示平均有效压力^[48]

Fig. 4 Net indicated mean effective pressure^[48]

2 碳中和燃料在内燃机的应用

碳中和燃料是指利用捕集的二氧化碳与氢气经化学合成制取的甲醇、乙醇、丁醇、二甲醚等燃料, 同

时也包括利用生物质制取的生物燃料. 生物燃料在生产过程中消耗了 CO_2 , 从而实现了全生命周期过程中的碳中和, 因此也可以成为碳中和燃料, 如图 5 所示.

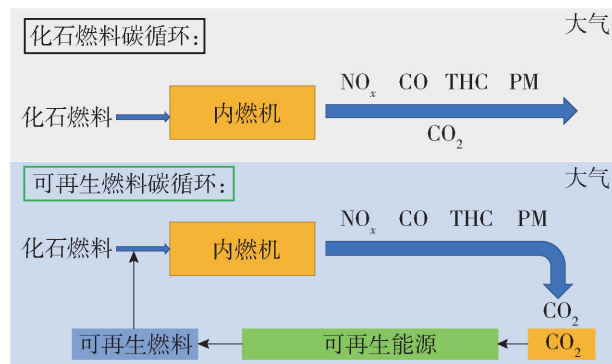


图 5 内燃机使用碳中和燃料的排放

Fig. 5 Emissions from the use of carbon neutral fuels in internal combustion engines

2.1 甲醇及掺氢甲醇内燃机

甲醇是使用最广泛的化学品之一, 已经具备大规模的生产能力和基础设施. 近年来, 甲醇越来越多地应用于能源领域, 每年大约有 2 000 万 t 甲醇用作燃料或燃料混合物^[50]. 我国煤炭资源丰富, 石油资源匮乏, 因此促进了甲醇的生产和推广. 研究表明, 我国甲醇生产能力可以满足我国一半的道路运输燃料需求. 我国在多个城市进行了甲醇汽车的试点推广, 表 3 具体展示了在各个城市试运营的车辆及行驶里程.

表 3 甲醇汽车试点项目^[51]

Table 3 Summary of methanol vehicle pilot projects^[51]

地点	时期	数据	行驶距离/(10^3 km)
晋中	2013—2016 年	300 辆出租车	21 290
长治	2014—2017 年	96 路公交车	24 100
上海	2013—2017 年	56 辆出租车	5 572
榆林	2014—2017 年	5 辆卡车	415
西安	2014—2017 年	20 辆出租车	
宝鸡	2013—2017 年	215 辆出租车	
汉中	2015—2018 年	20 辆出租车	287
兰州	2015—2017 年	150 辆出租车	
平凉	2015—2017 年	150 辆出租车	24 432
贵阳	2015—2017 年	300 辆出租车	72 090

甲醇具有的理化性质使其非常适用于火花点火发动机, 例如: 汽化潜热高、能量密度大、化学计量空

燃比低、火焰速度快、燃烧温度低、高氢碳比、标准状态下为液态^[52]。研究表明,单位体积的甲醇中的氢含量比液氢多40%,而液氢的密度大约是70 MPa氢气的2倍,并且甲醇不存在运输及存储方面的问题,使其成为具有前途的代用燃料^[53]。

2.1.1 纯甲醇燃料发动机

20世纪90年代,美国西南研究院提出了高压压缩比方案,为甲醇发动机的发展开辟了新思路。研究发现,甲醇发动机的峰值效率达到43%,与柴油发动机相比,在更宽的速度和负载范围内保持超过40%的效率^[54]。Nakata等^[55]在使用甲醇在高压压缩比(13:1)的汽油机上进行了试验,相较于汽油,峰值扭矩提升20%,全负荷热效率从31.7%提升到39.6%。

甲醇更高的燃烧速度和更宽的燃烧极限为采用更灵活的负荷控制提供了可能。研究人员针对涡轮增压发动机进行了稀燃操作,结果表明相对于化学计量的燃料,稀燃条件下的热效率提升了14%。采用EGR配合无节气门操作(wide-open throttle, WOT),也可以获得较高的热效率^[55]。根特大学的研究人员将一台1.9 T的柴油机改装为火花点火甲醇发动机,比较了冷却EGR对其性能的影响。研究结果表明,无论是峰值热效率还是部分负荷的热效率,使用EGR+WOT操作时的热效率明显高于使用节流的化学计量策略^[56]。

由于甲醇具有吸水性,如果允许甲醇燃料含水,在经济上具有一定的吸引力。Sileghem等^[57]研究了含水甲醇对发动机性能的影响,结果表明含水甲醇与纯甲醇具有基本相同的有效热效率,略高于汽油燃料。与纯甲醇相比,含水混合燃料的NO_x排放降低。

2.1.2 甲醇/汽油发动机

甲醇是一种良好的辛烷值促进剂,这为使用低辛烷值碳氢燃料提供了可能,并使整个运行区间的碳排放减少。

Xie等^[58]对柴油机进行了改装,并进行了试验研究。研究表明,在1400 r/min、满负荷时,调整点火正时为上止点前(before top dead centre, BTDC)18°、15°和12°,甲醇发动机均能稳定运行而不发生爆震。Gong等^[59-60]研究了喷射和点火正时、发动机转速和负载等对直喷甲醇发动机循环变动的影响。结果表明,这些因素显著影响了甲醇燃烧,并且循环变化系数在最佳喷射和点火时刻达到最小。Gong等^[61]还研究了压缩比对发动机性能及排放的影响,

压缩比由14:1增加到16:1时,有效热效率提高了16%;他们还发现了甲醇发动机可以实现无烟燃烧。Li等^[62]研究了喷射和点火正时对甲醇发动机的性能和排放的影响。结果表明,直喷式甲醇发动机能够形成分层分布的非均匀混合气,具有最佳的喷射和点火正时,可以获得良好的性能和较低的排放。Zhen等^[63-64]采用数值模拟的方法研究了甲醇发动机,研究发现,采用高的EGR率和较早的点火正时,表现出较好的热效率。

2.1.3 甲醇/柴油发动机

较高的自燃温度限制了甲醇在CI发动机上的应用,通过使用双燃料策略可以将其运用于CI发动机。使用甲醇/柴油混合物的方式具有吸引力,但需要克服甲醇与柴油的互溶问题^[65],尤其是较高馏分的甲醇混合燃料,需要添加乳化剂或者助溶剂。为了改善甲醇较低的体积能量密度,还需要对燃料供给系统进行优化。

房晟等^[66]研究了不同海拔下掺醇比例对发动机循环变动的影响,如图6所示,在高海拔下,较高的替代率在高海拔下的循环变动更小,说明含氧燃料在高海拔条件下的优势,然而在低海拔下,甲醇较小的能量密度及混合均匀性等问题,导致其循环波动较高。

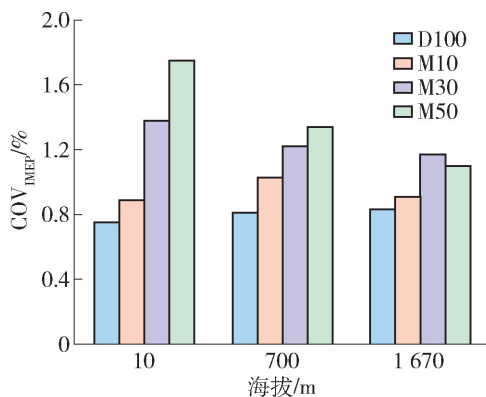


图6 甲醇替代率对指示平均有效压力循环变动的影晌^[66]

Fig. 6 Effect of methanol substitution rate on engine COV_{IMEP}^[66]

研究结果表明,相较于柴油,在低负荷时双燃料的热效率略有下降,高负荷时略有增加^[67]。针对柴油发动机较高的NO_x和PM排放,人们更关注添加甲醇对其排放的影响。Wei等^[68]研究发现,在整个负荷和运行转速范围内,双燃料策略都减少了发动机的NO_x排放,并且随着甲醇添加比例的增加,最

高降幅达到了50%。添加甲醇对于改善颗粒物排放同样具有较好的效果,因为甲醇不含芳烃,没有C—C键,并且甲醇通过预混方式供给,不存在局部富集区。甲醇较高的汽化潜热,导致点火延迟增加,使柴油有更多的时间蒸发并与空气混合,使得碳烟降幅达到80%。不幸的是,随着甲醇比例的增加,CO和HC的排放增加^[69]。

2.1.4 甲醇掺氢发动机

氢气具有较高的扩散速度、火焰速度和宽的可燃极限,因此,富氢燃烧对于改善甲醇发动机的性能是有利的。Ji等^[70]研究了部分负荷条件下加氢对甲醇发动机性能的影响,结果表明,加氢后,循环变动得到改善,有效热效率得到提升,HC和CO排放降低,NO_x在稀薄条件下有效减少。

2.1.5 甲醇燃料面临的挑战及改进方向

尽管甲醇具有诸多益处,但是它的毒性和安全问题成为阻碍其使用的主要障碍之一。研究表明,醇类毒性基本相当,致命计量为1~2 mL/kg,正常体质量范围,相当于60~240 mL,可以通过混合添加剂,避免意外摄入甲醇。

另一个挑战来自于甲醇的材料兼容性,在所有的醇类中,甲醇的腐蚀性最强。通常轻质醇对镁、铝、铜具有极强的腐蚀性,对钢铁和其他黑色金属的影响较小^[71]。这需要对发动机燃料系统进行修改,避免金属及橡胶密封件等可能受到甲醇腐蚀的影响。

混合较高比例的甲醇汽油的冷启动长期以来具有挑战性。针对甲醇燃料的冷启动性,最新的解决方案是优化发动机运行,包括进气加热、优化气门正时、提高启动转速、多火花塞点火、分层燃烧等^[72-73]。

2.2 乙醇及掺氢乙醇内燃机

2.2.1 乙醇在SI发动机中的应用

醇类的抗爆性是相对于其他烃类燃料的主要优势之一,这允许醇类燃料以更高的压缩比运行,从而提高发动机的输出功率,相较于汽油,乙醇具有更高的汽化潜热和火焰速度,这有利于提高发动机的效率。巴西凭借良好的产业条件率先推广了乙醇汽油,美国以及欧洲部分国家也在逐步推广,表4展示了主要国家推广的乙醇汽油。

Celik^[74]研究了乙醇汽油发动机的性能,发现对于10:1的压缩比,即使在全负荷条件下使用E50也不会发生爆震,并且提高了热效率。Park等^[75]研究了使用乙醇及乙醇重整气体的发动机性能,结果表明由于乙醇的汽化潜热较高,进气歧管温度降低,排

表4 推广使用乙醇汽油的国家

Table 4 Countries promoting the use of ethanol gasoline

国家	混合形式	混合比例
巴西	乙醇+汽油	E72.5~E82/E100
美国	乙醇+汽油	E10/E15/E85
瑞典	乙醇+汽油	E85
加拿大	乙醇+汽油	E85
芬兰	乙醇+汽油	E85

气温度降低,冷却损失减少了。Ozsezen等^[76]研究了WOT条件下的乙醇汽油发动机的燃烧特性,发现与汽油相比,乙醇汽油提高了燃烧效率。他们还发现低含量乙醇汽油没有显示任何冷启动及运行不稳定等问题。Turner等^[77]研究了乙醇汽油在直喷发动机中的燃烧特性。他们发现乙醇的加入改变了混合燃料的蒸发特性,乙醇有助于提高火焰速度,增强了燃烧的稳定性,提高了发动机效率。Schifter等^[78]研究了含水乙醇与汽油混合燃料的燃烧特性,结果表明,含水乙醇可以提高缸内压力并降低进气温度,燃烧效率未受到含水量的影响。Venugopal等^[79]在PFI发动机中进行了含水乙醇汽油混合物(E10)的实验研究。结果表明在部分负荷下提升了功率输出,由于较高的火焰速度和更宽的可燃极限,循环变动降低了。Yoon等^[80]研究了乙醇汽油在增压发动机中的燃烧特性。结果表明乙醇的添加增加了容积效率,提高了缸内压力,降低循环变动系数。

研究表明^[81],添加乙醇降低了发动机的CO排放,有研究人员^[82]报道E60相较于E10,CO降低了80%,此外,含水乙醇燃料导致CO排放略有增加。针对NO_x排放的研究没有一致性,可以确定的是含水乙醇可以有效降低NO_x排放^[83]。很显然,添加乙醇降低了发动机的未燃碳氢的排放^[84]。对于非常规污染物排放,乙醇燃料的乙醛和甲醛的排放量随着水含量的增加而增加,随着负荷的增加而减少,而芳烃、苯、甲苯、乙苯和二甲苯等污染物的排放降低^[85]。

2.2.2 乙醇在CI发动机中的应用

乙醇应用于柴油机面临着几个问题:

- 1) 乙醇的低热值比柴油低;
- 2) 难以将大量乙醇与柴油混合,并且长时间放置不稳定;
- 3) 乙醇的十六烷值非常低,启动困难;
- 4) 乙醇的润滑性较差。

由于乙醇的低热值远低于柴油,因而掺入乙醇的混合燃料的能量降低,随着混合燃料中乙醇含量的增加,在相同的输出功率时,发动机需要消耗更多的燃料^[86-87]。

Parthasarathi 等^[86]对使用柴油和乙醇柴油的发动机进行了测试,结果发现相较于柴油,使用 E05 燃料增加了发动机的有效热效率,随着乙醇的进一步增加,有效热效率降低,但仍高于纯柴油。他们还发现,纯柴油与混合燃料的有效热效率随着负荷的增加而增大。这是由于乙醇的十六烷值较低,增加了点火延迟,导致更多的燃料可以蒸发,促进了热量的释放,从而提高了有效热效率^[88]。

Taghizadeh-Alisaraei 等^[89]在直喷发动机上进行了研究,结果表明,发动机的有效功率随着乙醇含量的增加而增大。这是因为乙醇中的氧促进了燃烧,同时,乙醇较高的汽化潜热增加了容积效率。

CI 发动机的 NO_x 排放是最重要的限制因素,其形成主要取决于缸内温度和氧气浓度。Parthasarathi 等^[86]研究发现乙醇柴油的 NO_x 排放与柴油基本相同或者略低。乙醇-柴油乳化燃料的 NO_x 排放减少,并随着乙醇的增加而降低。 NO_x 排放减少的原因在于乙醇的低热值产生了降温效果,但是这种效果因乙醇中氧的存在而削弱,并且点火延迟的增加导致了更长的时间形成 NO_x 。

He 等^[90]研究发现,与柴油相比,乙醇柴油的 CO 排放增加了,这是由于乙醇较高的汽化潜热和较低的燃烧温度造成的。

几乎所有的研究者均得出结论,乙醇柴油增加了 HC 的排放。由于乙醇较高的汽化潜热,降低了循环温度,造成更多的燃料未燃烧,并且随着转速的增加而增加^[91-92]。

2.3 丁醇及掺氢丁醇内燃机

丁醇的腐蚀性很小,因而可以利用现有的基础设施进行运输和储存,对于发动机的改造更少。长期以来,由于长链醇的生产工艺复杂而难以推广,然而随着技术进步使得丁醇的生产更加方便,使用丁醇作为代用燃料成为可能。

2.3.1 丁醇在 SI 发动机中的应用

Elfaskhany 等^[93]在 SI 发动机中使用 0%、3%、7% 和 10% 的正丁醇-汽油混合燃料。研究结果表明添加丁醇显著增强了燃烧。但是正丁醇的加入使缸内压力和废气温度略有降低,因为正丁醇的热值和饱和压力低于汽油。Singh 等^[94]使用 5%~70% 等不同比例的丁醇混合物与汽油进行了对比。研究

发现,混合燃料的放热更晚,燃烧持续期相较于汽油更长,但是在较高负荷时持续时间缩短。Sayin 等^[95]还对使用异丁醇燃料的发动机进行了研究。结果表明,随着异丁醇比例的增加,缸内压力增大,异丁醇的加入使缸内压力和瞬时放热比汽油更早。He 等^[96]采用独立的进气道喷射和缸内直喷系统对丁醇混合燃料进行了研究。结果表明喷射方式影响燃烧过程,总体上高丁醇比例提高了燃烧稳定性。陈征等^[97]研究了正丁醇掺混比对发动机爆震强度的影响,如图 7 所示,随着正丁醇比例的增加,平均爆震强度也随之增加。Wei 等^[98]在直喷汽油机中使用正丁醇混合燃料进行了爆震研究。研究发现正丁醇具有更好的耐爆震性,将爆震限制点火正时从 27° 提前到 32° ,爆震振荡频率取决于燃烧室共振模式。他们还研究了 EGR 对正丁醇爆震燃烧的影响。结果表明,EGR 可以降低爆震强度和延迟爆震开始时间,并且对缸内压力的影响可以忽略不计,这表明在高进气压力和高压压缩比的直喷式发动机中使用 EGR 可以有效抑制爆震并稳定燃烧。Zhang 等^[99]对比分析了乙醇-汽油和丁醇-汽油的抗爆性,结果表明乙醇的抗爆性高于丁醇。

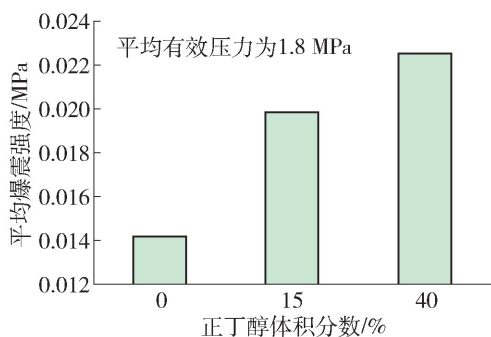


图 7 正丁醇体积分数对平均爆震强度的影响^[97]

Fig. 7 Effect of n-butanol volume fraction on average knock intensity^[97]

Gravalos 等^[100]研究了醇类燃料的排放性。结果表明,醇类汽油混合物可以减少 CO 排放。这是由于醇类燃料增强了燃烧,使 CO 更多地转化为 CO_2 ,从而降低了 CO。HC 的排放随着丁醇比例的增加同样减少,这也得益于醇类中氧的存在促进了燃烧过程^[101]。研究表明,丁醇或者其他醇类的加入,同样降低了 NO_x 排放,这是因为较高的汽化潜热产生了降温效果,降低了缸内温度,从而抑制了 NO_x 的生成^[102-103]。

2.3.2 丁醇在 CI 发动机中的应用

在柴油发动机中使用丁醇具有多种方式,例如

纯丁醇、进气道喷射与直喷相结合的双喷射、丁醇与柴油混合直喷等。

丁醇进气道喷射结合柴油直喷,并配以 EGR 策略^[104],可以有效地控制碳烟排放水平,但是较高比例丁醇会增加 HC 和 CO 的排放,并导致热效率的降低^[105]. 李临蓬等^[106]研究了汽油和正丁醇掺混柴油对部分预混压燃发动机的影响,结果如图 8 所示,碳烟和 NO_x 排放之间存在较强的 trade-off 关系. 研究发现^[107],丁醇含量的增加降低了十六烷值,从而延长了点火延迟,这增加了预混燃烧阶段,峰值放热率和峰值缸压均略有增加. 随着丁醇比例的提高,由于其较快的燃烧速度,有效热效率增加,但是因为丁醇的低热值小于柴油,混合燃料的比油耗增加^[108]. 与柴油相比,由于丁醇中氧的存在,混合燃料的碳烟排放降低,混合燃料会增加未燃 HC 和 CO 的排放^[109],这是因为丁醇黏度小于柴油,可能造成撞壁^[110].

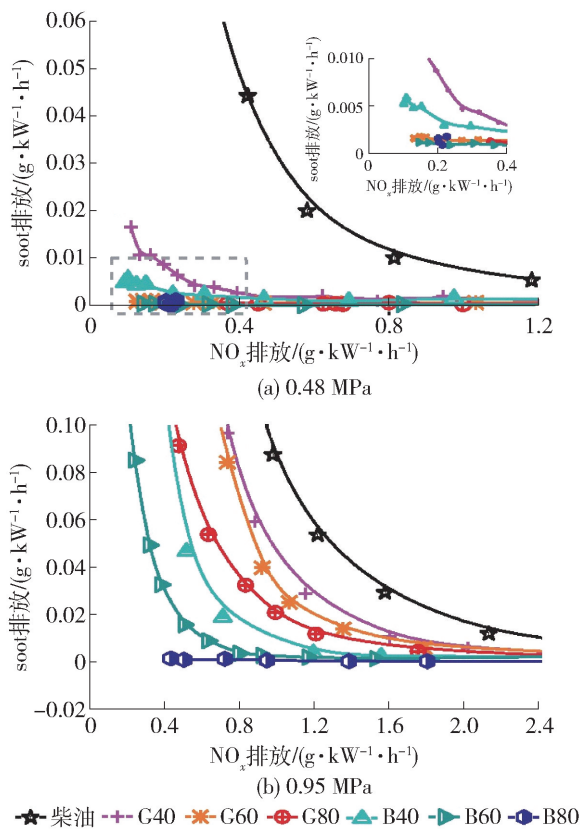


图 8 不同负荷下掺丁醇对 soot- NO_x 的 trade-off 关系的影响^[106]

Fig. 8 Effects of blending fuels on soot- NO_x trade-off trend under different BMEP loads^[106]

纯丁醇可以作为 HCCI 发动机的燃料^[111],它的氧含量有助于抑制碳烟的形成,较高的汽化潜热降

低了缸内温度,从而降低 NO_x 的形成. 在中低负荷下,不使用 EGR 即可实现超低的 NO_x 和碳烟排放. 使用适度的 EGR 稀释可以进一步降低 NO_x 排放. 相较于柴油,丁醇的负载范围可以扩大 25%,但是相较于汽油,其运行范围略小^[112].

2.4 二甲醚及掺氢二甲醚内燃机

二甲醚(dimethyl ether, DME)是乙醇的同分异构体,常温常压下为无色、轻微醚香味、对金属无腐蚀性的气体. 作为燃料,二甲醚具有自燃温度低、十六烷值高、最小点火能量低等优势,具有良好的着火特性.

2.4.1 二甲醚在 SI 发动机中的应用

Liang 等^[113]研究了纯二甲醚的燃烧特性. 结果表明,二甲醚可以在 SI 内燃机中实现冷启动和稳定的怠速. 因为二甲醚高十六烷值、较低的饱和蒸气压改善了冷启动过程,降低了冷启动过程的燃料消耗量. 但是由于二甲醚高的十六烷值和较低的自然温度增加了 SI 内燃机的爆震趋势,这造成了二甲醚在 SI 内燃机中无法全工况运行. 何邦全等^[114]利用高速摄像研究了直喷二甲醚在汽油机中的压缩自然特性. 图 9、10 展示了内部 EGR (iEGR) 率为 32% 时,二甲醚起始喷射时刻分别为 20° BTDC 和 30° BTDC 时的自燃图像,从图中可以看出,随着起始喷射时刻靠近上止点,发光区域更集中于缸内中心区域,提前燃料喷射时刻,则初始自燃区域更为分散,发光面积和发光强度相对更大.

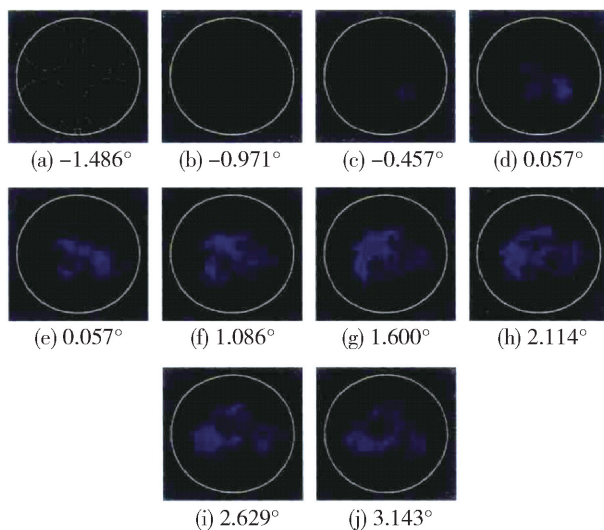


图 9 iEGR = 32%、SOI = -20° 工况下不同时刻的自燃火焰图像^[114]

Fig. 9 Spontaneous combustion flame images at different times under the working conditions of iEGR = 32% and SOI = -20° ^[114]

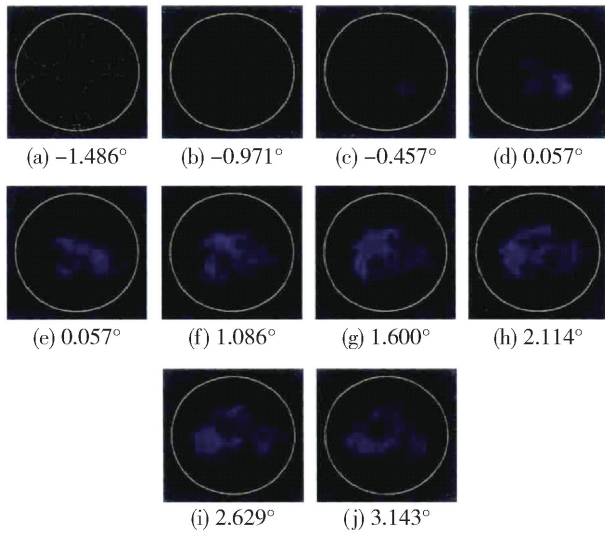


图10 iEGR = 32%、SOI = -30°工况下不同时刻的自燃火焰图像^[114]

Fig. 10 Spontaneous combustion flame images at different times under the working conditions of iEGR = 32% and SOI = -30°^[114]

二甲醚可以作为混合燃料掺入 SI 发动机,用以调节燃料的辛烷值,改善 SI 发动机的稀燃特性. Shi 等^[115]研究了掺二甲醚对汽油机的影响. 研究发现,进气中掺入二甲醚可以提高内燃机的燃烧定容度,改善发动机的有效热效率、降低燃料消耗率. 如图 11 所示,由于二甲醚中不存在 C—C 键,因此,掺入二甲醚降低了颗粒物排放. 纪常伟等^[116]对醇类燃料中掺入二甲醚的燃烧特性进行了研究. 结果发现,凭借二甲醚的低温氧化放热过程可以促进醇类燃料的蒸发及燃料与空气的混合,加快混合气的燃烧速度,从而降低燃料消耗率,提高有效热效率. Shi 等^[115]研究了掺氢二甲醚的燃烧特性. 结果表明,掺氢提高了可燃混合气的燃烧速度,改善了发动机的热效率,同时降低了 NO_x 排放水平.

2.4.2 二甲醚在 CI 发动机中的应用

二甲醚的燃烧特性与柴油相近,使其成为 CI 内燃机的可替代燃料. 二甲醚和柴油可以分别通过进气管和直喷方式供入气缸,通过二甲醚的燃烧特性改变传统柴油机的燃烧模式. Chapman 等^[117]研究了气道喷射二甲醚对柴油发动机的影响. 结果表明,预混二甲醚-空气混合气的起燃过程是自发的,并且二甲醚的自燃作用增加了柴油机的峰值缸压,提高了发动机的热效率,降低了 NO_x 排放,但是 CO、HC 和 PM 的排放增加;此外,EGR 可以控制二甲醚的自燃过程. 李东昌等^[118]针对上述模式进行

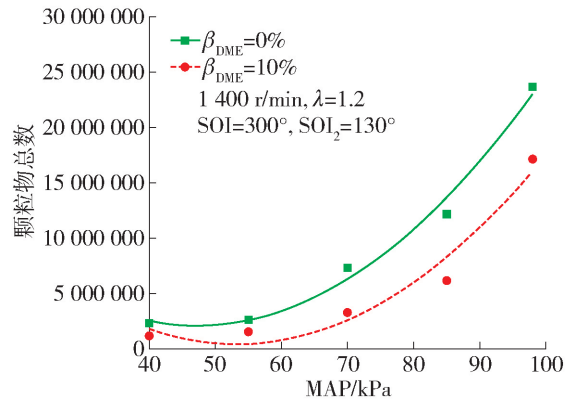


图11 二甲醚/汽油复合喷射内燃机颗粒物总数排放随负荷的变化^[115]

Fig. 11 Total particle number emissions versus MAP for gasoline engines blended with DME^[115]

了系统研究,并发现在较高的二甲醚掺混比下,内燃机的燃烧过程呈现出3次放热现象;其中前2次分别为低温放热和高温放热,第3次放热主要由柴油的燃烧所致;在中低负荷下掺入二甲醚有助于降低柴油机的燃油消耗率、提高热效率,同时还可降低 NO_x 与颗粒物排放. EGR 可推迟燃烧起始时刻并延长燃烧持续期,进而降低内燃机的峰值缸压、峰值放热率和最大压升率^[119].

西安交通大学周龙宝课题组^[120-122]对燃用二甲醚/柴油混合燃料的发动机进行了研究. 他们的研究指出,二甲醚的掺入降低了混合燃料的饱和蒸气压,减小了燃料发生气阻的概率. 二甲醚较易气化,这有利于燃料与空气的混合,促进了燃料的更充分燃烧. 在较高负荷下,掺二甲醚使柴油机的颗粒物和 NO_x 排放降低. 随着生物柴油的推广及应用,研究人员研究了生物柴油中掺入二甲醚对发动机性能的影响. Hou 等^[123]研究了二甲醚/生物柴油混合燃料的燃烧及排放特性. 结果表明,随着二甲醚的增加,混合燃料的点火延迟、峰值缸压、峰值放热率以及峰值缸内温度均下降,各个峰值随曲轴转角均推迟,同时,NO_x 排放降低;随着二甲醚的增加,HC 和 CO 的排放急剧升高. Sun 等^[124]研究了 EGR 对二甲醚/生物柴油混合燃料发动机的影响. 结果显示,EGR 改变了缸内混合气的反应活性,增加了点火延迟、燃烧持续期,推迟了燃烧相位;同时,颗粒物排放呈现为核态,随着生物柴油和 EGR 率的增加而增加.

二甲醚十六烷值高、扩散速度快,是一种适合 HCCI 燃烧模式的燃料. 国内研究学者对 HCCI 燃烧模式进行了较为全面的研究. Yao 等^[125]的研究显

示,可以通过甲醇对二甲醚发动机的 HCCI 燃烧过程进行控制,拓展 HCCI 燃烧模式的工况上限;掺入甲醇后发动机的热效率降低,HC 和 CO 排放升高.无论是采用 EGR 策略还是燃料控制策略,HCCI 燃烧模式均呈现出较高的热效率;相较于 EGR,燃料控制策略可使发动机具有更宽的稳定运行范围.天津大学尧命发、郑尊清等以及上海交通大学黄震、李德钢等均对纯二甲醚内燃机采用 HCCI 燃烧模式下的燃烧与排放特性进行了研究^[126-129].他们的研究表明,纯二甲内燃机在 HCCI 燃烧模式下呈现出明显的二次放热特征,其第 1 阶段(低温)放热过程出现在缸内温度为 700 K 左右的热力学条件下,第 2 阶段(高温)放热过程出现在缸内温度为 900 K 左右的热力学条件下,且整体燃烧持续期很短.但由于二甲醚十六烷值高,高压压缩比内燃机燃用纯二甲醚仅可在中低负荷较小的范围内对 HCCI 燃烧过程进行控制.

2.5 生物柴油内燃机

1977 年,巴西科学家 Expedito 申请了生产生物柴油的第一种工业工艺专利^[130].该方法得到汽车行业的广泛认可,根据该工艺所制成的燃料被定义为生物柴油.

生物柴油因其无毒、可降解、较高的闪点、氧化性质带来的清洁燃烧能力、有害排放减少、零硫含量以及易于制造而变得越来越受关注.生物柴油的概念最早由柴油机的发明者鲁道夫·迪塞尔首先提出,并使用了纯花生油驱动发动机.随着技术进步,多种油被提议作为柴油的替代品.生物柴油的大多数性质接近柴油,因而可以与柴油以任意比例混合.生产生物柴油的原料主要分为四大类.

1) 植物油,分为食用植物油和非食用植物油.食用植物油包括:向日葵、油菜籽、米糠、大豆、椰子、玉米、棕榈、橄榄、芝麻、花生、红油果等;非食用植物油包括:麻风树、棉花籽、亚麻籽、橡胶籽等.

2) 动物脂肪,包括牛脂、鸡油、鱼油副产品等.

3) 废气或回收的食用油.

4) 藻类.

我国研究学者从喷雾特性和燃烧特性等各方面对生物柴油进行了研究.高东志等^[131]对比了不同压力下生物柴油和柴油的喷雾特性,图 12 展示了在 120 MPa 喷油压力下 B5 生物柴油和京标 10 号柴油的喷雾发展过程,研究表明,B5 生物柴油油束蒸发时间更长,喷雾锥角更小,表明 B5 生物柴油的黏性和沸点相对更高.米永刚等^[132]对生物柴油的喷雾

燃烧特性进行了研究,结果表明生物柴油的十六烷值较高,导致生物柴油的点火延迟期小于纯柴油.

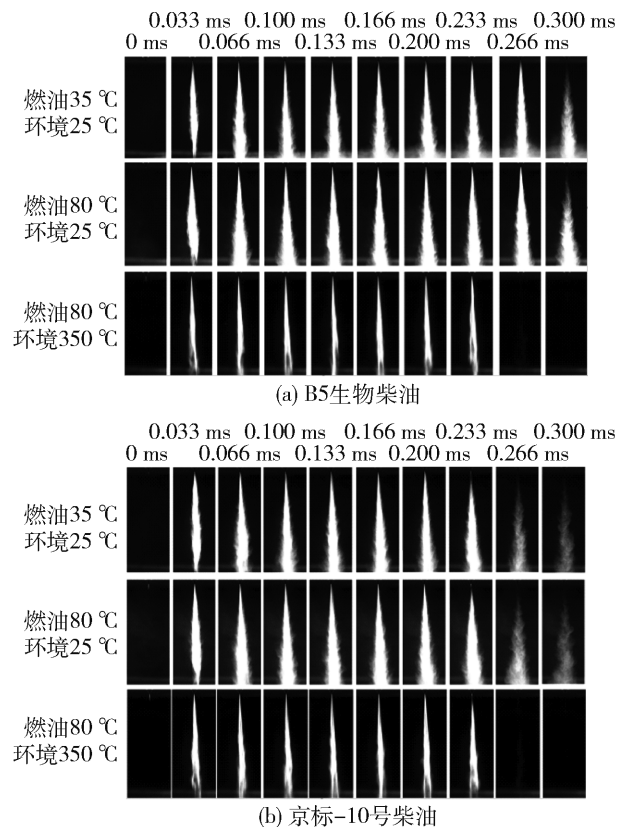


图 12 120 MPa 喷油压力下的喷雾发展照片^[131]

Fig. 12 Development of spray under an injection pressure 120 MPa^[131]

Ong 等^[133]研究了使用麻风树油甲酯混合物的发动机的性能.结果显示 B10 燃料的扭矩略有增加,功率和平均燃料消耗率明显改善;他们发现 HC、CO₂、碳烟降低了,但是 CO 和 NO_x 增加了. Remadhas 等^[134]研究了使用橡胶籽油发动机的性能.他们发现 B10 的有效热效率明显改善;此外,在所有负载条件下,较低掺混比时的平均燃料消耗率均低于柴油. An 等^[135]对使用回收食用油的共轨发动机进行了研究.结果表明,相较于柴油,在较高负载时 B100 的峰值扭矩提高了 5.1%,但是在低负载时降低了 10.7%;随着掺混比例的增加,排气温度降低;由于氧的存在,降低了 CO₂ 和 HC 的排放. Aydin 等^[136]研究了棉花籽油对发动机排放特性的影响.结果表明,B5 产生的扭矩略高于其他掺混比的燃料;随着掺混比例的增加,扭矩降低,可能的原因是棉花籽油较高的黏性及较低的热值;他们还发现 CO 减少了. Buyukkaya 等^[137]研究了菜籽油的燃烧及排放特性.结果显示,所有混合燃料的有效热

效率均高于柴油。Qi等^[138]测试了大豆油在发动机的燃烧及排放特性。结果表明,NO_x减少5%,CO减少27%,HC减少27%,碳烟减少52%。

总体而言,生物柴油的功率输出取决于其混合质量和燃烧燃料的负载条件。燃料的热效率基于燃料特性,并且这些特性将随着掺混物以及生物柴油质量的变化而变化。

3 结论

1) 氢气具有良好的燃烧特性,能以多种方式应用于内燃机中,并将在未来的内燃机脱碳进程中扮演重要角色。

2) 氨的燃烧特性稍差,并且存在毒性和安全问题,仍需要继续研究以克服其较低的燃烧效率及NO_x排放问题,但是作为零碳燃料正在受到关注,通过掺氢可以改善燃烧,推动其在内燃机的应用。

3) 醇醚类燃料具有较好的燃烧和排放特性,可以单独亦可掺氢使用,但只有使用捕集的二氧化碳与氢气合成制取,才具有碳中和特征。内燃机车作为移动排放源,其二氧化碳排放捕集困难。

4) 生物燃料的生产原料来源广泛,是具有广泛应用前景的碳中和燃料,普遍具有较好的燃烧特性,能够减少碳排放,对于实现碳循环具有重要意义。

参考文献:

[1] SHAFIEE S, TOPAL E. When will fossil fuel reserves be diminished? [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(1): 181-189.

[2] OIL E. Gas industry development report at home and abroad in 2019 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.

[3] GIELEN D, BENNACEUR K, BJERG J, et al. Energy technology perspective 2008: scenarios & strategies to 2050[M]. Paris: International Energy Agency, 2010.

[4] ZHOU S, TONG Q, PAN X, et al. Research on low-carbon energy transformation of China necessary to achieve the Paris agreement goals: a global perspective [J]. *Energy Economics*, 2021, 95: 105137.

[5] HUANG M T, ZHAI P M. Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(2): 281-286.

[6] LUND H, ØSTERGAARD P A, CONNOLLY D, et al. Smart energy and smart energy systems [J]. *Energy*, 2017, 137: 556-565.

[7] WEI Y, WANG Z, WANG H, et al. Compositional data techniques for forecasting dynamic change in China's energy consumption structure by 2020 and 2030 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284: 124702.

[8] WANG D, JI C, WANG S, et al. Numerical study of the premixed ammonia-hydrogen combustion under engine-relevant conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(2): 2667-2683.

[9] JUNG Y, LEE M J, KIM N I. Direct prediction of laminar burning velocity and quenching distance of hydrogen-air flames using an annular stepwise diverging tube (ASDT) [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 164: 397-399.

[10] LIU F, AKRAM M Z, WU H. Hydrogen effect on lean flammability limits and burning characteristics of an iso-octane-air mixture [J]. *Fuel*, 2020, 266: 117144.

[11] LOHSE-BUSCH H, WALLNER T, SHIDORE N. Efficiency-optimized operating strategy of a supercharged hydrogen-powered four-cylinder engine for hybrid environments [C] // SAE Technical Paper. Detroit: SAE International, 2007: 2007-01-2046.

[12] VERHELST S, WALLNER T. Hydrogen-fueled internal combustion engines [J]. *Progress in Energy Combustion Science*, 2009, 35(6): 490-527.

[13] VERHELST S, MAESSCHALCK P, ROMBAUT N, et al. Increasing the power output of hydrogen internal combustion engines by means of supercharging and exhaust gas recirculation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(10): 4406-4412.

[14] 杨振中, 秦朝举, 张卫正, 等. 柴油引燃直列氢内燃机稀薄燃烧特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(5): 31-36.

YANG Z Z, QIN C J, ZHANG W Z, et al. Diesel pilot-ignited lean combustion characteristics of a linear hydrogen engine [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(5): 31-36. (in Chinese)

[15] MA F, LIU H, WANG Y, et al. Combustion and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition timings [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(2): 816-822.

[16] XU P, JI C, WANG S, et al. Effects of direct water injection on engine performance in engine fueled with hydrogen at varied excess air ratios and spark timing [J]. *Fuel*, 2020, 269: 117209.

[17] WAKAYAMA N, MORIMOTO K, KASHIWAGI A, et al. Development of hydrogen rotary engine vehicle [C] // 16th World Hydrogen Energy Conference. Lyon: Sevanova, 2006: 13-17.

[18] SALANKI P A, WALLACE J S. Evaluation of the

- hydrogen-fueled rotary engine for hybrid vehicle applications [C] // SAE Technical Paper. Detroit: SAE International, 1996; 960232.
- [19] CHEN W, PAN J, LIU Y, et al. Numerical investigation of direct injection stratified charge combustion in a naturalgas-diesel rotary engine [J]. Applied Energy, 2019, 233: 453-467.
- [20] FAN B, PAN J, YANG W, et al. Effects of hydrogen blending mode on combustion process of a rotary engine fueled with natural gas/hydrogen blends [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(6): 4039-4053.
- [21] JI C, SU T, WANG S, et al. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a gasoline rotary engine at part load and stoichiometric conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 121: 272-280.
- [22] YANG J, JI C, WANG S, et al. Numerical investigation on the mixture formation and combustion processes of a gasoline rotary engine with direct injected hydrogen enrichment [J]. Applied Energy, 2018, 224: 34-41.
- [23] HOMAN H, REYNOLDS R, DE BOER P, et al. Hydrogen-fueled diesel engine without timed ignition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1979, 4(4): 315-325.
- [24] CHINTALA V, SUBRAMANIAN K. A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode [J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 472-491.
- [25] VARDE K, FRAME G. Hydrogen aspiration in a direct injection type diesel engine-its effects on smoke and other engine performance parameters [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1983, 8(7): 549-555.
- [26] LILIK G K, ZHANG H, HERREROS J M, et al. Hydrogen assisted diesel combustion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(9): 4382-4398.
- [27] LIU S, LI H, LIEW C, et al. An experimental investigation of NO₂ emission characteristics of a heavy-duty H₂-diesel dual fuel engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(18): 12015-12024.
- [28] KÖSE H, CINIVIZ M. An experimental investigation of effect on diesel engine performance and exhaust emissions of addition at dual fuel mode of hydrogen [J]. Fuel Processing Technology, 2013, 114: 26-34.
- [29] DE MORAIS A M, JUSTINO M A M, VALENTE O S, et al. Hydrogen impacts on performance and CO₂ emissions from a diesel power generator [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(16): 6857-6864.
- [30] LIEW C, LI H, LIU S, et al. Exhaust emissions of a H₂-enriched heavy-duty diesel engine equipped with cooled EGR and variable geometry turbocharger [J]. Fuel, 2012, 91(1): 155-163.
- [31] GUO H, HOSSEINI V, NEILL W S, et al. An experimental study on the effect of hydrogen enrichment on diesel fueled HCCI combustion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(21): 13820-13830.
- [32] PARK H, KIM J, BAE C. Effects of hydrogen ratio and egr on combustion and emissions in a hydrogen/diesel dual-fuel PCCI engine [C] // SAE Technical Paper. Detroit: SAE International, 2015: 2015-01-1815.
- [33] GURNEY G, PORTER D H, BRACK G W, et al. The life and times of sir goldsworthy gurney: gentleman scientist and inventor, 1793 - 1875 [M]. Bethlehem: Lehigh University Press, 1998.
- [34] KOCH E. Ammonia—a fuel for motor buses [J]. J Inst Pet, 1945, 31: 213.
- [35] CORNELIUS W, HUELLMANTEL L W, MITCHELL H R. Ammonia as an engine fuel [J]. SAE Transactions, 1966, 74(1): 300-326.
- [36] STARKMAN E S, JAMES G, NEWHALL H. Ammonia as a diesel engine fuel: theory and application [J]. SAE Transactions, 1968, 76(4): 3193-3212.
- [37] PEARSALL T J, GARABEDIAN C G. Combustion of anhydrous ammonia in diesel engines [J]. SAE Transactions, 1968, 76(4): 3213-3221.
- [38] GRAY JR J T, DIMITROFF E, MECKEL N T, et al. Ammonia fuel-engine compatibility and combustion [J]. SAE Transactions, 1967, 75(1): 785-807.
- [39] REITER A J, KONG S C. Demonstration of compression-ignition engine combustion using ammonia in reducing greenhouse gas emissions [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(5): 2963-2971.
- [40] NIKI Y, YOO D H, HIRATA K, et al. Effects of ammonia gas mixed into intake air on combustion and emissions characteristics in diesel engine [C] // Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Greenville: American Society of Mechanical Engineers, 2016: V001T03A004.
- [41] LEE D, SONG H H. Development of combustion strategy for the internal combustion engine fueled by ammonia and its operating characteristics [J]. Journal of Mechanical Science Technology, 2018, 32(4): 1905-1925.
- [42] VELTMAN M, KONG S C. Developing fuel injection strategies for using ammonia in direct injection diesel engines [C/OL] // 2010 Annual NH₃ Fuel Conference.

- [2021-10-01]. https://nh3fuelassociation.org/wp-content/uploads/2012/05/veltman_kong.pdf.
- [43] MØRCH C S, BJERRE A, GØTTRUP M P, et al. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine; Engineperformance and analysis of a proposed fuel system [J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 854-864.
- [44] WESTLYE F R, IVARSSON A, SCHRAMM J. Experimental investigation of nitrogen based emissions from an ammonia fueled SI-engine [J]. *Fuel*, 2013, 111: 239-247.
- [45] EZZAT M, DINCER I. Development and assessment of a new hybrid vehicle with ammonia and hydrogen [J]. *Applied Energy*, 2018, 219: 226-239.
- [46] FRIGO S, GENTILI R, DOVERI N. Ammonia plus hydrogen as fuel in a SI engine; experimental results[C]// SAE Technical Paper. Detroit: SAE International, 2012; 2012-32-0019.
- [47] KOIKE M, SUZUOKI T. In-line adsorption system for reducing cold-start ammonia emissions from engines fueled with ammonia and hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44 (60): 32271-32279.
- [48] LHUILLIER C, BREQUIGNY P, CONTINO F, et al. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions [J]. *Fuel*, 2020, 269: 117448.
- [49] JI C, XIN G, WANG S, et al. Effect of ammonia addition on combustion and emissions performance of a hydrogen engine at part load and stoichiometric conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (80): 40143-40153.
- [50] LANDÄLV I. Methanol as a renewable fuel-a knowledge synthesis [R/OL]. [2021-10-01]. https://platformduurzamebiobrandstoffen.nl/wp-content/uploads/2017/09/2017_F3_Methanol-as-a-renewable-fuel.pdf.
- [51] LI C, NEGNEVITSKY M, WANG X. Review of methanol vehicle policies in China: current status and future implications[J]. *Energy Procedia*, 2019, 160: 324-331.
- [52] VERHELST S, TURNER J W G, SILEGHEM L, et al. Methanol as a fuel for internal combustion engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 70: 43-88.
- [53] GARDINER M. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs[R]. Washington: DOE of USA, 2009: 9013.
- [54] BRUSSTAR M, STUHLREHER M, SWAIN D, et al. High efficiency and low emissions from a port-injected engine with neat alcohol fuels [J]. *SAE Transactions*, 2002, 111(4): 1445-1451.
- [55] NAKATA K, UTSUMI S, OTA A, et al. The effect of ethanol fuel on a spark ignition engine [C] // SAE Technical Paper. Detroit: SAE International, 2006;2006-01-3380.
- [56] VANCOILLIE J, DEMUYNCK J, SILEGHEM L, et al. The potential of methanol as a fuel for flex-fuel and dedicated spark-ignition engines [J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 140-149.
- [57] SILEGHEM L, HUYLEBROECK T, VAN DEN BULCKE A, et al. Performance and emissions of a SI engine using methanol-water blends [C] // SAE Technical Paper. Detroit: SAE International, 2013; 2013-01-1319.
- [58] XIE F X, LI X P, WANG X C, et al. Research on using EGR and ignition timing to control load of a spark-ignition engine fueled with methanol [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 1084-1091.
- [59] GONG C, HUANG K, CHEN Y, et al. Cycle-by-cycle combustion variation in a DISI engine fueled with methanol[J]. *Fuel*, 2011, 90(8): 2817-2819.
- [60] 彭乐高, 宫长明, 宫宝利, 等. 富氧下甲醇发动机冷启动燃烧及非法排放 [J]. *内燃机学报*, 2017, 35 (5): 423-428.
- PENG L G, GONG C M, GONG B L, et al. Combustion and unregulated emissions in a methanol engine during cold start under oxygen-enriched condition [J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35 (5): 423-428. (in Chinese)
- [61] GONG C M, HUANG K, JIA J L, et al. Regulated emissions from a direct-injection spark-ignition methanol engine[J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3379-3387.
- [62] LI J, GONG C M, SU Y, et al. Effect of injection and ignition timings on performance and emissions from a spark-ignition engine fueled with methanol [J]. *Fuel*, 2010, 89(12): 3919-3925.
- [63] ZHEN X, WANG Y, XU S, et al. Study of knock in a high compression ratio spark-ignition methanol engine by multi-dimensional simulation [J]. *Energy*, 2013, 50: 150-159.
- [64] ZHEN X, WANG Y, ZHU Y. Study of knock in a high compression ratio SI methanol engine using LES with detailed chemical kinetics [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 75: 523-531.
- [65] 冯是全, 胡以怀, 金浩. 甲醇柴油双燃料发动机的燃烧特性分析 [J]. *环境工程*, 2016, 34(增刊1): 593-596.
- FENG S Q, HU Y H, JIN H. Analysis of combustion characteristics of methanol and diesel dual fuel engine

- [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34 (Suppl 1): 593-596. (in Chinese)
- [66] 房晟, 周德峰, 王斌. 不同海拔下甲醇-柴油双燃料发动机的燃烧循环波动研究 [J]. *车用发动机*, 2021 (4): 22-28.
FANG S, ZHOU D F, WANG B. Cyclic variation of dual fuel engine fueled with diesel and methanol at different altitudes [J]. *Vehicle Engine*, 2021 (4): 22-28. (in Chinese)
- [67] YAO C, CHEUNG C S, CHENG C, et al. Effect of diesel/methanol compound combustion on diesel engine combustion and emissions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(6): 1696-1704.
- [68] WEI L, YAO C, WANG Q, et al. Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel [J]. *Fuel*, 2015, 140: 156-163.
- [69] CHEUNG C S, ZHANG Z H, CHAN T L, et al. Investigation on the effect of port-injected methanol on the performance and emissions of a diesel engine at different engine speeds [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23 (11): 5684-5694.
- [70] JI C, ZHANG B, WANG S. Enhancing the performance of a spark-ignition methanol engine with hydrogen addition [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38 (18): 7490-7498.
- [71] YUEN P, VILLAIRE W, BECKETT J. Automotive materials engineering challenges and solutions for the use of ethanol and methanol blended fuels [C] // SAE Technical Paper. Detroit: SAE International, 2010: 2010-01-0729.
- [72] MARRIOTT C D, WILES M A, GWIDT J M, et al. Development of a naturally aspirated spark ignition direct-injection flex-fuel engine [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2009, 1(1): 267-295.
- [73] COLPIN C, LEONE T, LHUILLERY M, et al. Key parameters for startability improvement applied to ethanol engines [J]. *SAE International Journal of Fuels*, 2009, 2(1): 180-188.
- [74] CELIK M B. Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5/6): 396-404.
- [75] PARK C, CHOI Y, KIM C, et al. Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas [J]. *Fuel*, 2010, 89(8): 2118-2125.
- [76] OZSEZEN A N, CANAKCI M. Performance and combustion characteristics of alcohol-gasoline blends at wide-open throttle [J]. *Energy*, 2011, 36 (5): 2747-2752.
- [77] TURNER D, XU H, CRACKNELL R F, et al. Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine [J]. *Fuel*, 2011, 90(5): 1999-2006.
- [78] 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.
- [79] VENUGOPAL T, SHARMA A, SATAPATHY S, et al. Experimental study of hydrous ethanol gasoline blend (E10) in a four stroke port fuel - injected spark ignition engine [J]. *International Journal of Energy Research*, 2013, 37(6): 638-644.
- [80] YOON S H, LEE C S. Effect of undiluted bioethanol on combustion and emissions reduction in a SI engine at various charge air conditions [J]. *Fuel*, 2012, 97: 887-890.
- [81] MUNSIN R, LAONUAL Y, JUGJAI S, et al. An experimental study on performance and emissions of a small SI engine generator set fuelled by hydrous ethanol with high water contents up to 40% [J]. *Fuel*, 2013, 106: 586-592.
- [82] JIA L W, SHEN M Q, WANG J, et al. Influence of ethanol-gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 123(1/2/3): 29-34.
- [83] PANG X, MU Y, YUAN J, et al. Carbonyls emission from ethanol-blended gasoline and biodiesel-ethanol-diesel used in engines [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(6): 1349-1358.
- [84] YAO Y C, TSAI J H, WANG I T. Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol-gasoline blend [J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 93-100.
- [85] DE MELO T C C, MACHADO G B, BELCHIOR C R, et al. Hydrous ethanol-gasoline blends-combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine [J]. *Fuel*, 2012, 97: 796-804.
- [86] PARTHASARATHI R, GOWRI S, SARAVANAN C G. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of kirloskar TV-I DI diesel engine using diesel-ethanol-surfactant as fuel [J]. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2012, 7 (11): 1468-1472.
- [87] SAYIN C. Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol-diesel blends [J]. *Fuel*, 2010,

- 89(11): 3410-3415.
- [88] RAKOPOULOS D C, RAKOPOULOS C D, GIAKOURIS E G, et al. Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(10): 1989-1997.
- [89] TAGHIZADEH-ALISARAEI A, REZAEI-ASL A. The effect of added ethanol to diesel fuel on performance, vibration, combustion and knocking of a CI engine[J]. *Fuel*, 2016, 185: 718-733.
- [90] HE B Q, SHUAI S J, WANG J X, et al. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(35): 4965-4971.
- [91] TUTAK W, JAMROZIK A, PYRC M, et al. A comparative study of co-combustion process of diesel-ethanol and biodiesel-ethanol blends in the direct injection diesel engine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117: 155-163.
- [92] BANUGOPAN V N, PRABHAKAR S, ANNAMALAI K, et al. Experimental investigation on DI diesel engine fuelled by ethanol diesel blend with varying inlet air temperature [C] // *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering-2010*. Piscataway: IEEE, 2010: 128-134.
- [93] ELFASAKHANY A. Experimental study on emissions and performance of an internal combustion engine fueled with gasoline and gasoline/n-butanol blends [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 88: 277-283.
- [94] SINGH S B, DHAR A, AGARWAL A K. Technical feasibility study of butanol-gasoline blends for powering medium-duty transportation spark ignition engine [J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 706-716.
- [95] SAYIN C, BALKI M K. Effect of compression ratio on the emission, performance and combustion characteristics of a gasoline engine fueled with iso-butanol/gasoline blends[J]. *Energy*, 2015, 82: 550-555.
- [96] HE B Q, CHEN X, LIN C L, et al. Combustion characteristics of a gasoline engine with independent intake port injection and direct injection systems for n-butanol and gasoline [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 124: 556-565.
- [97] 陈征, 杨峰, 薛硕, 等. 直喷汽油机燃用高比例正丁醇-汽油混合燃料的燃烧特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 2015, 21(5): 403-407.
- CHEN Z, YANG F, XUE S, et al. Combustion characteristics of gasoline direct injection engine fuelled with gasoline blend fuel of high n-butanol ratio [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2015, 21(5): 403-407. (in Chinese)
- [98] WEI H, FENG D, PAN J, et al. Knock characteristics of SI engine fueled with n-butanol in combination with different EGR rate[J]. *Energy*, 2017, 118: 190-196.
- [99] ZHANG Z, WANG T, JIA M, et al. Combustion and particle number emissions of a direct injection spark ignition engine operating on ethanol/gasoline and n-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation [J]. *Fuel*, 2014, 130: 177-188.
- [100] GRAVALOS I, MOSHOUS D, GIALAMAS T, et al. Emissions characteristics of spark ignition engine operating on lower-higher molecular mass alcohol blended gasoline fuels [J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 27-32.
- [101] FENG R, YANG J, ZHANG D, et al. Experimental study on SI engine fuelled with butanol-gasoline blend and H₂O addition [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 74: 192-200.
- [102] FENG R, FU J, YANG J, et al. Combustion and emissions study on motorcycle engine fueled with butanol-gasoline blend [J]. *Renewable Energy*, 2015, 81: 113-122.
- [103] CAIRNS A, ZHAO H, TODD A, et al. A study of mechanical variable valve operation with gasoline-alcohol fuels in a spark ignition engine [J]. *Fuel*, 2013, 106: 802-813.
- [104] CHEN Z, LIU J, WU Z, et al. Effects of port fuel injection (PFI) of n-butanol and EGR on combustion and emissions of a direct injection diesel engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 76: 725-731.
- [105] MICHIKAWAUCHI R, TANNO S, ITO Y, et al. Combustion improvement of diesel engine by alcohol addition-investigation of port injection method and blended fuel method [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2011, 4(1): 48-57.
- [106] 李临蓬, 毛斌, 郑尊清, 等. 汽油、正丁醇掺混柴油对部分预混压燃的燃烧和排放影响 [J]. *内燃机学报*, 2020, 38(4): 289-297.
- LI L P, MAO B, ZHENG Z Q, et al. Effect of gasoline/diesel and n-butanol/diesel blends on combustion and emissions of PPCI [J]. *Transactions of CSICE*, 2020, 38(4): 289-297. (in Chinese)
- [107] CHEN Z, WU Z, LIU J, et al. Combustion and emissions characteristics of high n-butanol/diesel ratio blend in a heavy-duty diesel engine and EGR impact [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78:

- 787-795.
- [108] ZHANG Q, YAO M, ZHENG Z, et al. Experimental study of n-butanol addition on performance and emissions with diesel low temperature combustion [J]. *Energy*, 2012, 47(1): 515-521.
- [109] RAKOPOULOS D C, RAKOPOULOS C D, GIAKOUMIS E G, et al. Influence of properties of various common bio-fuels on the combustion and emission characteristics of high-speed DI (direct injection) diesel engine: vegetable oil, bio-diesel, ethanol, n-butanol, diethyl ether [J]. *Energy*, 2014, 73: 354-366.
- [110] RAJESH KUMAR B, SARAVANAN S. Effect of iso-butanol addition to diesel fuel on performance and emissions of a DI diesel engine with exhaust gas recirculation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2016, 230(1): 112-125.
- [111] 柳茂斌, 何邦全, 赵华. 正丁醇/乙醇-汽油 HCCI 发动机的低温燃烧与排放特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 2018, 24(5): 424-432.
- LIU M B, HE B Q, ZHAO H. Combustion and emission characteristics of a HCCI engine fuelled with n-butanol/ethanol-gasoline blend [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2018, 24(5): 424-432. (in Chinese)
- [112] ZHENG M, HAN X, ASAD U, et al. Investigation of butanol-fuelled HCCI combustion on a high efficiency diesel engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 98: 215-224.
- [113] LIANG C, JI C, LIU X. Combustion and emissions performance of a DME-enriched spark-ignited methanol engine at idle condition [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11): 3704-3711.
- [114] 何邦全, 赵国兴, 李晓, 等. 直喷二甲醚在汽油机中压缩自燃特性的试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2019, 40(4): 85-92.
- HE B Q, ZHAO G X, LI X, et al. Experimental study on auto-ignition characteristics of direct-injected dimethyl ether in a gasoline engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2019, 40(4): 85-92. (in Chinese)
- [115] SHI L, JI C, WANG S, et al. Impacts of dimethyl ether enrichment and various injection strategies on combustion and emissions of direct injection gasoline engines in the lean-burn condition [J]. *Fuel*, 2019, 254: 115636.
- [116] 纪常伟, 石磊, 张擘, 等. 二甲醚对乙醇内燃机性能的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(5): 763-768.
- JI C W, SHI L, ZHANG B, et al. Effect of dimethyl ether addition on the performance of spark-ignition ethanol engine [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(5): 763-768. (in Chinese)
- [117] CHAPMAN E M, BOEHMAN A L. Pilot ignited premixed combustion of dimethyl ether in a turbodiesel engine [J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(12): 1262-1271.
- [118] 李东昌, 汪映, 赵玉伟, 等. DME 预混比和柴油供油提前角对 PCCI 发动机性能影响 [J]. *内燃机工程*, 2014, 35(4): 40-44, 50.
- LI D C, WANG Y, ZHAO Y W, et al. Effect of DME premixed ratio and diesel injection advanced angle on PCCI engine performance [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2014, 35(4): 40-44, 50. (in Chinese)
- [119] WANG Y, XIAO F, ZHAO Y, et al. Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel [J]. *Applied Energy*, 2015, 143: 58-70.
- [120] WANG Y, LI G B, ZHAO Y W, et al. Study on the application of DME/diesel blends in a diesel engine [J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(12): 1272-1280.
- [121] 宋清双, 李跟宝, 周龙保, 等. 柴油机燃用二甲醚/柴油混合燃料时的性能与排放研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(3): 294-297.
- SONG Q S, LI G B, ZHOU L B, et al. Study on performance and emission characteristics of direct injection diesel engine fueled with blend of dimethyl ether/diesel fuel mixture [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(3): 294-297. (in Chinese)
- [122] 李跟宝, 周龙保. 柴油机燃用二甲醚/柴油混合燃料时的特性研究 [J]. *内燃机工程*, 2010, 31(1): 13-16.
- LI G B, ZHOU L B. Research on characteristics of compression ignition engine fueled with dimethyl ether/diesel blend [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*. 2010, 31(1): 13-16. (in Chinese)
- [123] HOU J, WEN Z, JIANG Z, et al. Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2014, 87(2): 102-113.
- [124] SUN C, LIU Y, QIAO X, et al. Experimental study of effects of exhaust gas recirculation on combustion,

- performance, and emissions of DME-biodiesel fueled engine[J]. *Energy*, 2020, 197: 117233.
- [125] YAO M, CHEN Z, ZHENG Z, et al. Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol[J]. *Fuel*, 2006, 85(14/15): 2046-2056.
- [126] 陈征, 尧命发, 郑尊清, 等. 甲醇/二甲醚双燃料发动机全负荷范围优化策略的研究[J]. *内燃机学报*, 2008, 26(6): 493-498.
- CHEN Z, YAO M F, ZHENG Z Q, et al. Optimal strategy for methanol/DME dual-fuel engine over whole load ranges[J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(6): 493-498. (in Chinese)
- [127] YAO M, ZHENG Z, CHEN Z, et al. Experimental study on homogeneous charge compression ignition operation by burning dimethyl ether and methanol[J]. *International Journal of Green Energy*, 2007, 4(3): 283-300.
- [128] 李德钢, 黄震, 乔信起, 等. 压缩比和 CO₂ 对二甲醚燃料均质压燃燃烧的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2005, 39(2): 169-172.
- LI D G, HUANG Z, QIAO X Q, et al. Effects of compression ratio and CO₂ on the process HCCI combustion fueled with DME[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(2): 169-172. (in Chinese)
- [129] ZHANG J, QIAO X, WANG Z, et al. Experimental investigation of low-temperature combustion (LTC) in an engine fueled with dimethyl ether (DME) [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(1): 170-174.
- [130] OLIVEIRA J F G, LUCENA I L, SABOYA R M A, et al. Biodiesel production from waste coconut oil by esterification with ethanol; the effect of water removal by adsorption[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(11): 2581-2584.
- [131] 高东志, 秦建芸, 许丹丹, 等. 生物柴油和柴油直喷喷雾特性试验研究[J]. *车用发动机*, 2021(4): 36-41.
- GAO D Z, QIN J Y, XU D D, et al. Spray characteristic of direct injection for biodiesel and diesel [J]. *Vehicle Engine*, 2021(4): 36-41. (in Chinese)
- [132] 米永刚, 玄铁民, 何志霞, 等. 加氢催化生物柴油-柴油的喷雾燃烧特性[J]. *内燃机学报*, 2021, 39(4): 314-319.
- MI Y G, XUAN T M, HE Z X, et al. Study on reacting spray characteristics of a blend fuel with hydrogenation catalytic biodiesel and diesel [J]. *Transactions of CSICE*, 2021, 39(4): 314-319. (in Chinese)
- [133] ONG H C, MASJUKI H H, MAHLIA T M I, et al. Engine performance and emissions using *Jatropha curcas*, *Ceiba pentandra* and *Calophyllum inophyllum* biodiesel in a CI diesel engine[J]. *Energy*, 2014, 69: 427-445.
- [134] RAMADHAS A S, MURALEEDHARAN C, JAYARAJ S. Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil[J]. *Renewable Energy*, 2005, 30(12): 1789-1800.
- [135] AN H, YANG W M, CHOU S K, et al. Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions[J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 363-371.
- [136] AYDIN H, BAYINDIR H. Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(3): 588-592.
- [137] BUYUKKAYA E. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics[J]. *Fuel*, 2010, 89(10): 3099-3105.
- [138] QI D H, GENG L M, CHEN H, et al. Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(12): 2706-2713.

(责任编辑 张 蕾)