燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2017，23(2)：104-110
DOI 10.11715/rskxjs.R201510005

生物柴油/DMF 混合燃料对柴油机低温燃烧的影响

郑尊清，钟小凡，刘海峰，王小峰，胡　斌
（天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室，天津 300072）

摘　要：在生物柴油中分别掺入体积分数 20% 和 50% 的 2，5-二甲基呋喃（DMF）组成 DMF20 和 DMF50 混合燃料，在一台单缸柴油机上对柴油、生物柴油和生物柴油/DMF 混合燃料开展低温燃烧试验研究．结果表明，生物柴油和柴油燃烧特性相近，生物柴油含氧特性在一定程度上可以改善低温燃烧的碳烟排放；增大生物柴油中 DMF 掺混比例，混合燃料十六烷值降低，滞燃期延长，燃烧速率加快，预混放热峰值升高，最大压力升高率增大，DMF50 即使在高负荷下也呈现典型的预混单峰放热．在低负荷时，掺混燃料热效率并没有优势，随负荷增大，掺混燃料在热效率方面逐渐表现出优势，特别是 DMF50 在高负荷时优势明显，指示热效率提高到 46.5%（此时柴油和生物柴油分别为 43% 和 43.3%）．掺混 DMF 对碳烟改善明显，在高负荷、低温燃烧、低氧浓度条件下 DMF50 仍可基本实现无碳烟排放，同时提高 DMF 掺混比例对改善高负荷低温燃烧的 CO 和 HC 排放作用显著．

关键词：低温燃烧；生物柴油；DMF；掺混比例；负荷；碳烟
中图分类号：TK421　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740（2017）02-0104-07

Effect of Biodiesel/DMF Blended Fuel on Low Temperature Combustion in a Diesel Engine

Zheng Zunqing，Zhong Xiaofan，Liu Haifeng，Wang Xiaofeng，Hu Bin
（State Key Laboratory of Engines，Tianjin University，Tianjin 300072，China）

Abstract：Low temperature combustions of diesel，biodiesel and biodiesel/DMF blends were investigated on a single-cylinder diesel engine. Blended fuels including DMF20 and DMF50 were formulated by blending DMF with biodiesel at 20% and 50% volume ratios，separately. The results show that the combustion characteristic of biodiesel is similar to that of diesel and its fuel oxygen can improve the soot emission of low temperature combustion to some extent. With the increase of blending ratio，the cetane number of blended fuel is reduced and the ignition delay is prolonged，which results in higher burning rate and higher premixed heat release rate，and the maximum pressure rise rate is also increased. For DMF50，the typical premixed mono-peak heat release is presented even under high load condition. At low load，no advantage in thermal efficiency is shown for fuel blends，while as load increases，the fuel blends gradually show the advantage in thermal efficiency. And at high load，the indicated thermal efficiency can be increased up to 46.5% for DMF50，while the indicated thermal efficiency of diesel and biodiesel are 43% and 43.3%，respectively. The soot emission can be obviously improved by the fuel blends and smoke-free operation can still be realized for DMF50 even under high load low temperature combustion condition with relatively low oxygen concentration. Meanwhile，the CO and HC emissions of low temperature combustion at high load can also be significantly improved by increasing the blending ratio of DMF.

收稿日期：2015-11-23.
基金项目：国家重点基础研究发展计划（973 计划）资助项目（2013CB228402）；国家自然科学基金资助项目（51176140）.
作者简介：郑尊清（1973—　　），男，博士，副研究员.
通讯作者：郑尊清，zhengzunqing@tju.edu.cn.

Keywords: low temperature combustion; biodiesel; DMF; blending ratio; load; soot

随着化石能源的不断消耗以及排放法规的日益严格,生物质燃料的研究受到广泛关注,其中在发动机上研究较多的是生物柴油和生物乙醇. 生物柴油是以油料作物、野生油料植物和工程微藻等水生植物以及动物油脂、餐饮垃圾油等为原料通过酯交换工艺制成,美国和欧洲国家已建立了商品化生物柴油生产基地,并将生物柴油作为代用燃料广泛使用.

与传统化石柴油相比,生物柴油含氧、芳香烃和硫含量低、无毒性且具有生物降解能力,具有很好的环境友好性,但同时生物柴油黏度很高,雾化特性较差,在发动机上一般采取与柴油或乙醇等小比例混合来改善喷雾和燃烧特性[1-2]. Zhu 等[3]研究了生物柴油-乙醇混合燃料对直喷柴油机性能和排放的影响,结果表明,混合燃料能改善发动机热效率,同时降低 NO_x 和颗粒物排放.

近年来,随着生产工艺的改进,新型生物燃料 2,5-二甲基呋喃(DMF)逐渐受到人们的重视[4-5]. 相比于乙醇,DMF 具有能量密度高、沸点高、不溶于水和辛烷值高等优点,可从自然界含量丰富的葡萄糖、纤维素经过较简单的几步反应得到. 同时研究表明,DMF的制备能量消耗相对乙醇可降低60%以上,DMF在未来具有巨大的应用潜力. 研究者最初在汽油机上开展了DMF的研究,结果表明,DMF是一种理想的汽油替代燃料[6-7]. 近几年来,DMF 在柴油机上应用的相关研究也逐渐被报道. Liu 等[8]将 2,5-二甲基呋喃(DMF)和柴油掺混进行试验,发现混合燃料由于较低的十六烷值和含氧特性,大幅降低了碳烟排放.

低温燃烧是一种具有实现高效和低排放潜力的新型燃烧方式. 柴油机低温燃烧主要采用大比例废气再循环(EGR)延长滞燃期和降低燃烧温度,从而改变缸内燃烧反应过程的混合气浓度和温度发展历程,实现超低的碳烟和 NO_x 排放[9]. 研究表明,EGR 对碳烟的影响也比较复杂,在中高 EGR 率下存在 Soot-bump 区域,进一步增大 EGR,虽然会降低碳烟,但燃油经济性会恶化,HC 和 CO 排放也急剧增加[10-11]. 本课题组前期研究表明,在传统柴油机低温燃烧中掺入部分含氧生物燃料来改变燃料的理化特性,是改善低温燃烧性能和排放的重要途径[12].

本文将重点针对生物柴油/DMF 混合燃料对低温燃烧的影响开展研究,针对柴油、生物柴油、DMF20(在生物柴油中掺混体积分数 20% 的 DMF)和 DMF50(在生物柴油中掺混体积分数 50% 的 DMF)4 种燃料,在不同负荷和高 EGR 率(50%)条件下,研究低温燃烧的燃烧特性和排放特性,探索通过燃料特性优化改善低温燃烧过程的途径.

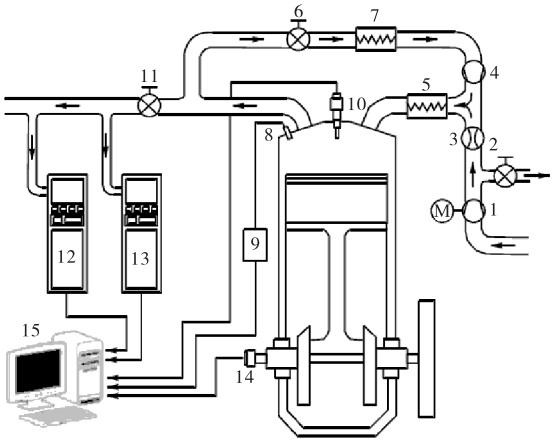
1 试验系统及研究方法

1.1 试验系统

试验在一台由六缸机改造的单缸柴油机上进行,试验缸有独立的进/排气、EGR 和高压共轨燃油喷射系统. 发动机的主要技术参数见表 1,图 1 是试验台架示意. 进气增压由外部压气机模拟,通过调节排气背压阀和 EGR 阀改变 EGR 率,喷油量、喷油次数、喷油时刻、喷油压力等参数通过电控系统可以灵活控制. 气缸压力由 Kistler6125C 传感器测量,采样间隔为 0.5° CA,每个工况点采集 50 个循环的气缸压力用于燃烧分析. 气体排放及 EGR 率的测量由 Horiba MEXA 7100 DEGR 排气分析仪完成,采用 AVL 415 S 滤纸式烟度计测量烟度,烟度单位为 FSN.

表 1 发动机主要参数

参 数	指 标
标定转速/(r·min^{-1})	2 500
缸径/mm	105
行程/mm	125
压缩比	16∶1
单缸排量/ L	1.081 8
燃烧室形状	ω 型
喷油系统	高压共轨
喷孔数	8
喷孔直径/ mm	0.15
喷束锥角/(°)	150



1—压气机; 2—旁通阀; 3—流量计; 4—单向阀; 5—进气冷却器; 6—EGR 阀; 7—EGR 冷却器; 8—压力传感器; 9—电荷放大器; 10—喷油器; 11—背压阀; 12—排气分析仪; 13—烟度计; 14—光电编码器; 15—采集控制系统

图 1 试验台架示意

EGR 率的定义为进气 CO_2 体积分数与排气 CO_2 体积分数的比值，公式如下：

$$R = (\varphi(CO_2)_{in}/\varphi(CO_2)_{ex}) \times 100\% \quad (1)$$

其中 $\varphi(CO_2)_{in}$ 与 $\varphi(CO_2)_{ex}$ 分别为进气和排气中 CO_2 体积分数.

1.2　研究方法

本试验选用燃料为国 V 柴油、生物柴油和 DMF，3 种燃料的理化特性见表 2. 在生物柴油中添加体积分数 20% 和 50% 的 DMF，形成两种混合燃料，分别记为 DMF20 和 DMF50. 针对柴油、生物柴油、DMF20 和 DMF50 等4 种燃料，在高EGR率(50%)条件下进行了燃烧及排放特性的对比研究，重点分析了生物柴油/DMF 混合燃料对低温燃烧的影响.

表 2　燃料理化特性

参　数	柴油	生物柴油	DMF
分子式	C12 ~ C25	C12 ~ C24	C_6H_8O
十六烷值	40 ~ 55	47 ~ 52	—
研究法辛烷值	20 ~ 30	—	119
氧质量分数/%	—	10	16.67
密度/(g · mL^{-1})	0.82	0.88	0.89
自燃温度/℃	210	363	286
低热值/(MJ · kg^{-1})	42.8	38	33.7
沸点/℃	180 ~ 360	262 ~ 359	92 ~ 94
化学当量比	14.3	12.5	10.79
汽化潜热/(kJ · kg^{-1})	180 ~ 360	320	333
黏度(40 ℃)/(mm^2 · s^{-1})	1.9 ~ 4.0	4	0.65

试验过程中发动机转速固定在 1 500 r/min，在低、中、高 3 个负荷下进行了研究，分别对应 20 mg、40 mg 和 60 mg 的等热值柴油循环喷油量. 3 个负荷条件下对应的进气压力分别为 0.15 MPa、0.18 MPa 和 0.20 MPa，进气温度为 40 ℃，喷油压力固定为 80 MPa，最大压力升高率以 1.5 MPa/(° CA) 为限.

2　试验结果及分析

2.1　生物柴油/DMF 混合燃料对低温燃烧的燃烧特性影响

图 2 是不同负荷下 4 种燃料 CA50 随喷油时刻的变化规律，CA50 定义为累计放热 50% 所对应的曲轴转角. 从图中可以看出，不同燃料的 CA50 均随着喷油时刻的提前而提前，且近似呈线性趋势. 在相同 CA50 下，柴油和生物柴油的喷油时刻基本相同，而掺混燃料则需要提前喷油时刻来维持同样的 CA50，特别是 DMF50 更为明显. 这是因为柴油和生物柴油的十六烷值比较接近，而在生物柴油中掺混 DMF 后降低了燃料十六烷值，使得着火时刻推迟，掺混比例越高，燃料十六烷值降低越多，着火越靠后. 在本试验中，CA50 过于提前时，会使得最大压力升高率过高，CA50 过于推迟则会使燃烧恶化、热效率急剧下降，因此试验过程中，通过改变喷油时刻控制 CA50 在上止点后 2° CA 到 14° CA 之间，以保证稳定、可控的燃烧. 值得注意的是，低负荷工况、50% EGR 率下，由于缸内温度较低，废气的稀释作用较强，而 DMF50 十六烷值降低过多，不能实现稳定着火和燃烧，因此在低负荷下没有 DMF50 的数据.

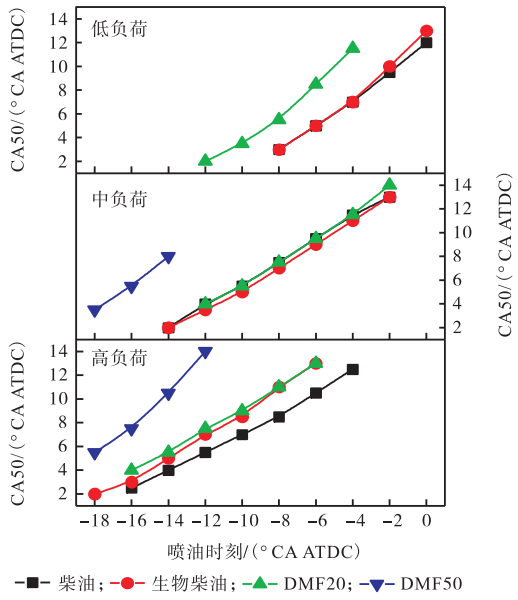
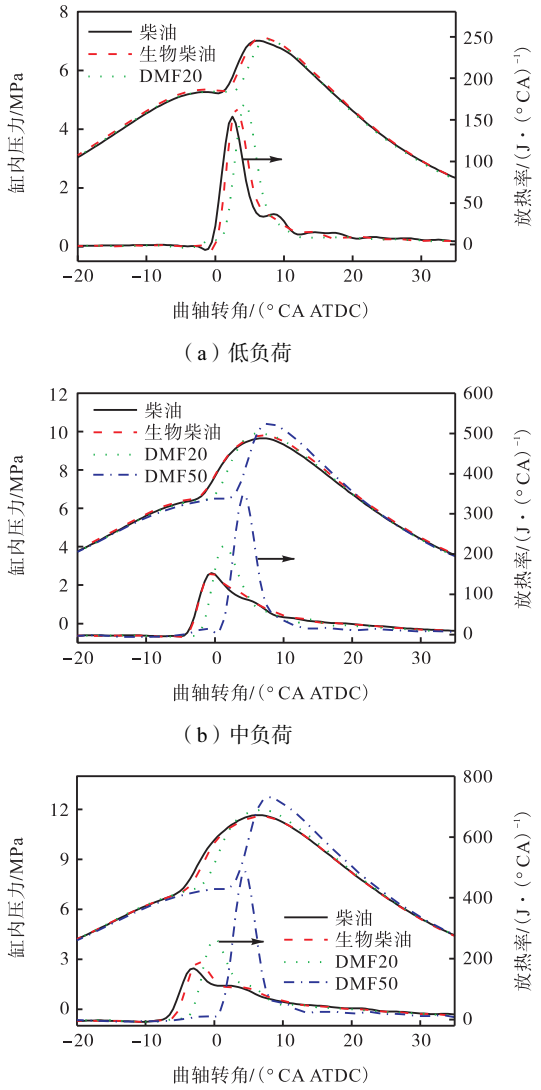


图 2　不同负荷下 4 种燃料 CA50 随喷油时刻的变化

图 3 是不同负荷下 4 种燃料的缸压和放热率曲线. 可以看出，在 CA50 固定的条件下，对于柴油和生物柴油，由于它们的十六烷值比较接近，不同负荷下缸压和放热率曲线都比较接近，生物柴油相对柴油放热率略有增大. 而掺混 DMF 后，由于十六烷值降低并且挥发性得到改善，虽然放热开始时刻推迟，但燃烧反应速度加快，预混放热峰值提高，最大爆发压力也有所增大. 随负荷增大和掺混比例的提高，这种趋势更为明显，各燃料之间的差别增大. 在高 EGR 率及高 DMF 掺混比例的作用下，DMF50 即使在中高负荷也表现出了较明显的单峰预混放热特征.

图 4 是不同负荷下 4 种燃料的滞燃期. 本文定义的滞燃期是从喷油开始到累计放热 5% 所对应的曲轴转角. 可以看出，在不同负荷条件下，不同燃料之间滞燃期的大小都呈现相似的规律，从大到小依次为 DMF50＞DMF20＞生物柴油＞柴油，这主要是由燃料的十六烷值决定. 本试验所用的生物柴油十六烷值比柴油略低，因此滞燃期相比柴油略长. 从表 2 中可以看出 DMF 辛烷值很高，其十六烷值远低于柴

油和生物柴油,因此掺混 20% 比例的 DMF 后,燃料十六烷值降低,使得 DMF20 滞燃期延长,当掺混比例提高到 50%,燃料十六烷值进一步降低,这种低十六烷值与高 EGR 率作用相耦合,使得 DMF50 滞燃期延长更加明显. 在试验的 CA50 范围内,相同 EGR 率下燃料的滞燃期随 CA50 变化不大.



(a) 低负荷

(b) 中负荷

(c) 高负荷

图 3 不同负荷下 4 种燃料的缸压和放热率

图 5 是不同负荷条件下 4 种燃料的最大压力升高率. 可以看出,随着 CA50 提前,不同燃料的最大压力升高率都几乎呈线性增加. 生物柴油由于滞燃期略长且含氧,燃烧反应速度略高于柴油,因此其最大压力升高率也稍高. 在低负荷,相同 CA50 下、不同燃料之间放热率接近,最大压力升高率差别较小;在中高负荷,相比于生物柴油,DMF20 由于预混燃烧比例增大使得最大压力升高率有所升高,当掺混比例进一步增大到 50% 时,DMF50 由于滞燃期延长较多,快速的预混放热使得最大压力升高率迅速升高. 并且随负荷增大,不同燃料之间最大压力升高率的差别也增大,在高负荷CA50 为 5.5° CA ATDC 时,DMF50 最大压力升高率已经达到 0.15 MPa/(° CA) 左右,此时发动机工作较为粗暴. 可见,掺混高辛烷值的 DMF 有利于实现快速的预混燃烧,这将有利于提高低温燃烧热效率,但过快的预混燃烧带来的高压力升高率是其面临的一个问题.

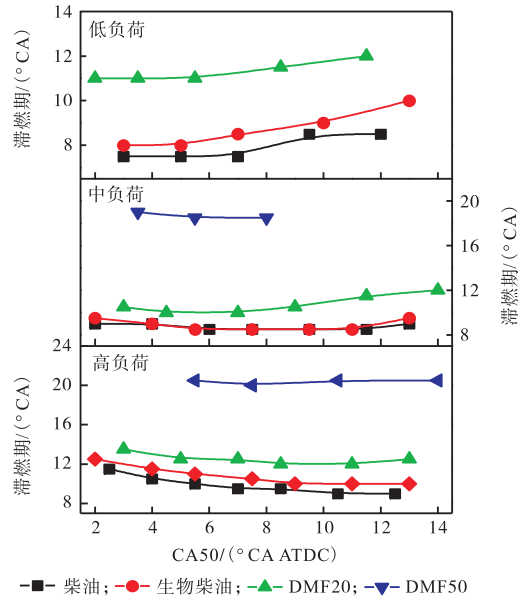


图 4 不同负荷下 4 种燃料的滞燃期

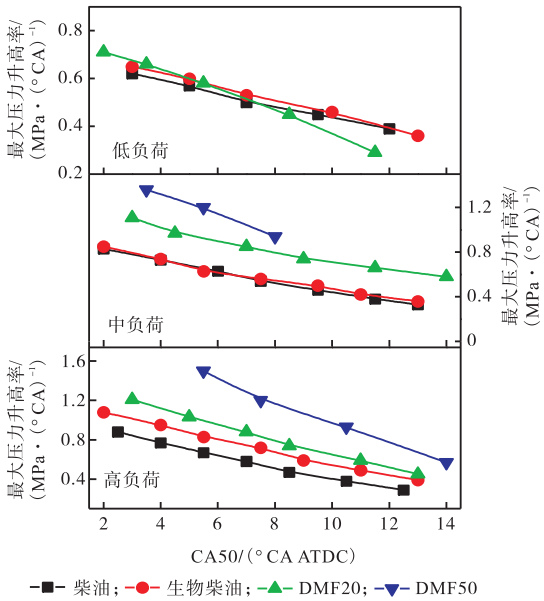


图 5 不同负荷下 4 种燃料的最大压力升高率

图 6 是不同负荷下 4 种燃料的指示热效率. 从图中可以看出,在低负荷条件下,生物柴油/DMF 混合燃料热效率并没有表现出优势,反而比纯柴油低,这是由于低负荷时缸内温度较低,掺混燃料较低的十六烷值使滞燃期进一步延长,更多油气进入狭隙区

域，燃烧效率降低，使得指示热效率下降；在中等负荷，不同燃料均能保持较高的热效率，并且差别不大；随着工况提升到高负荷，生物柴油及其掺混燃料的热效率表现出优势，生物柴油的热效率比柴油略高，而掺混 DMF 后，热效率进一步提高. 这主要是因为生物柴油含氧使得缸内燃烧更加充分，燃烧效率较高，而随着生物柴油中 DMF 掺混比例的提高，一方面通过延长滞燃期改善了混合，另一方面燃料的含氧量也提高，这对于改善高 EGR 率低氧浓度下的燃烧效率非常有效，同时，从放热率图可以看出掺混燃料燃烧持续期较短，使得燃烧定容度增大，因此在高负荷下随 DMF 掺混比例加大，热效率有明显改善. 在 60 mg 喷油量下，DMF50 在 CA50 为 5.5° CA ATDC 时指示热效率可以达到 46.5%，而此时柴油和生物柴油的指示热效率分别只有 43% 和 43.3%. 另外从图中还可以看出，在高负荷条件下，随着 CA50 的提前，不同燃料的热效率均会显著增加，由图 5 可见，此时最大压力升高率上升比较明显，在燃烧相位优化时要加以考虑.

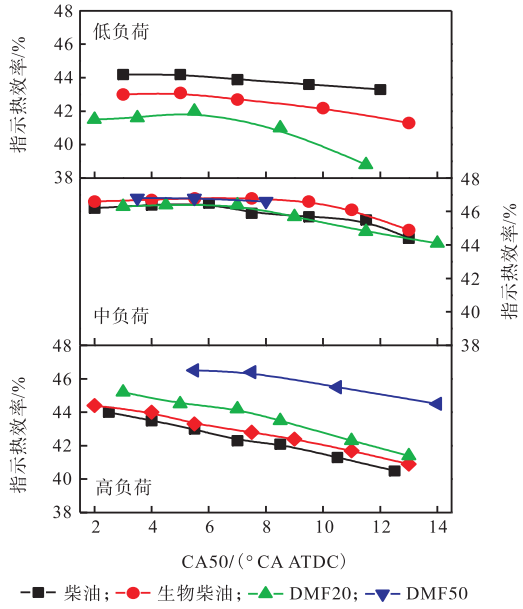


图 6　不同负荷下 4 种燃料的指示热效率

2.2　生物柴油/DMF 混合燃料对低温燃烧排放特性的影响

图 7 是不同负荷条件下 4 种燃料的烟度. 在不同负荷条件下，4 种燃料的烟度排放从高到低依次为柴油＞生物柴油＞DMF20＞DMF50，即 DMF50 降低烟度的能力最强，其次是 DMF20. 生物柴油降低烟度主要是燃料含氧的作用，随着生物柴油中 DMF 掺混比例的提高，烟度排放进一步下降，这是燃料含氧和滞燃期延长共同作用的结果. 在中、低负荷时，DMF20 已经能实现极低的烟度排放，而在高负荷时 DMF20 烟度排放依旧较高（烟度在 3 FSN 以上），将掺混比例进一步提高到 50%，DMF50 基本实现了无烟排放，并且还能保证较高的热效率，不过同时还需要结合合适的喷油策略来控制压力升高率.

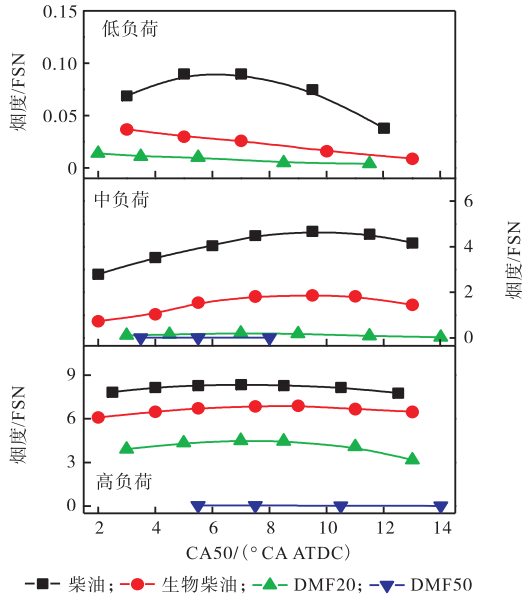


图 7　不同负荷下 4 种燃料的烟度

图 8 是不同负荷条件下 4 种燃料的 NO_x 排放. 不同负荷下，通过高 EGR 率都可以将 NO_x 排放控制在较低的范围，高负荷时可控制在 0.4 g/(kW・h) 以内. 对比不同燃料可以发现，生物柴油 NO_x 排放比柴油稍高，这是由于生物柴油含氧，并且燃烧反应速度较快. 而随着生物柴油中 DMF 掺混比例的提高，NO_x 排放进一步增加，除了燃料含氧的因素外，另一个重要因素是掺混燃料滞燃期延长，预混燃烧比例增大，放热更为集中，使得缸内温度有所升高.

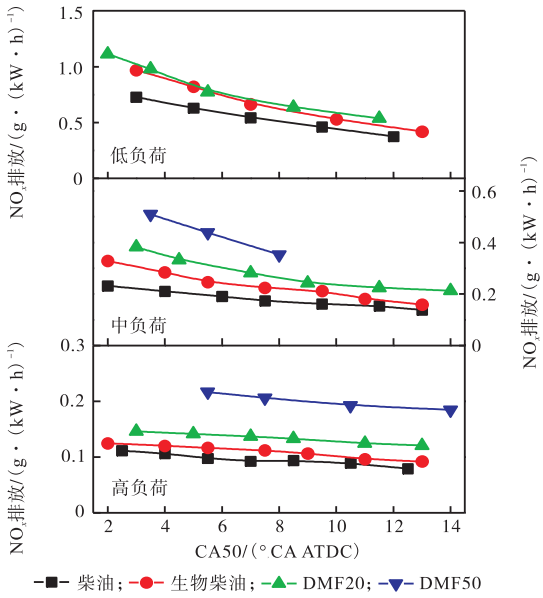


图 8　不同负荷下 4 种燃料的 NO_x 排放

从图中也可以看出,在高 EGR 率条件下,4 种燃料在低负荷时 NO_x 排放稍高,而在中、高负荷时整体都很低,这主要是随负荷增大,缸内氧浓度下降抑制了 NO_x 的生成. 随着 CA50 的提前,不同燃料的 NO_x 排放都呈升高趋势,这是因为燃烧更接近上止点,缸内温度提高. 相比于 EGR 率的作用,燃料特性的改变对 NO_x 影响作用较小,掺混高辛烷值含氧燃料带来的 NO_x 升高可通过进一步提升 EGR 率来控制.

图 9 和图 10 是不同负荷下 4 种燃料的 CO 和 HC 排放. CO 和 HC 是不完全燃烧的产物,从图中可以看出,在低负荷时,DMF20 的 CO 和 HC 排放较柴油和生物柴油高,这是因为在低负荷时 DMF20 较长的滞燃期会使得更多油气进入狭隙区域,燃烧效率较低. 而随着负荷增大,相对于纯柴油或生物柴油,掺混燃料对 CO 和 HC 排放逐渐发挥出改善作用,这一方面是因为高 EGR 率低氧浓度的缸内氛围下,燃料中的氧促进了燃烧,另一方面是较长的滞燃期改善了油气混合,燃烧反应速度加快,燃烧温度升高,有利于 CO 和 HC 的氧化.

另外从图中也可以看出,在中等负荷下,DMF20 对 CO 和 HC 排放具有更好的改善作用,而 DMF50 则由于滞燃期长,进入狭隙区域的燃油多,使 HC 排放高于柴油和生物柴油,CO 排放与柴油相当(高于生物柴油). 而在高负荷、高 EGR 时,由于当量比高,掺混燃料较好的挥发性以及含氧特性对燃烧的改善更为显著,较好的挥发性使得油气混合更加均匀,加快了燃烧速度,提高了缸内温度,而含氧特性则提高了缸内氧浓度,这都有利于 CO 和 HC 的氧化,特别是 DMF50 由于挥发性更好、含氧量更高,因此相对其他燃料显著改善了 CO 和 HC 排放. 不完全燃烧产物与上面分析的指示热效率有较好的对应关系,即低的 HC 和 CO 排放对应的热效率较高,这也说明了 CO 和 HC 排放是影响图 6 中热效率的关键因素之一. 随着 CA50 提前,不同燃料的 CO 和 HC 排放都有所下降,这是由于燃烧更接近上止点,缸内温度升高促进了 CO 和 HC 氧化. 同时,从图中也可以发现,生物柴油在中、高负荷,相对于柴油也可以在一定程度上减少 CO 和 HC 排放,提高燃烧效率. 由此可见,掺混 DMF 对改善高负荷、低氧浓度下的燃烧具有明显作用,随掺混比例提高,改善作用增大.

综上所述,生物柴油/DMF 混合燃料对于高负荷条件下的低温燃烧具有明显的改善作用,并且随着生物柴油中 DMF 掺混比例的提高,这种改善作用更为明显,但过快的预混燃烧带来的高压力升高率是其面临的一个问题.

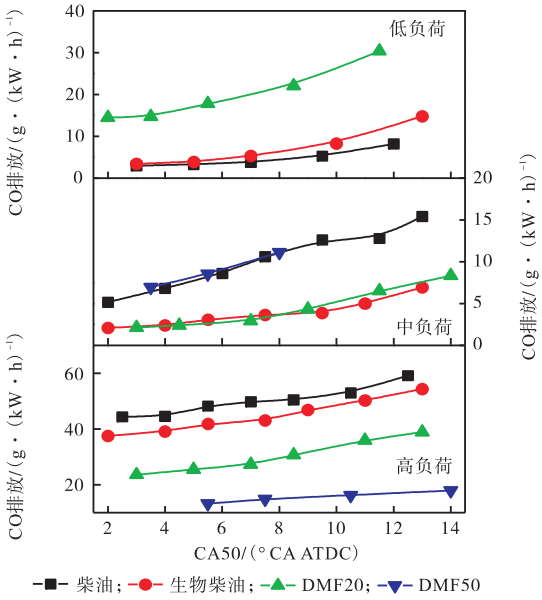


图 9 不同负荷下 4 种燃料的 CO 排放

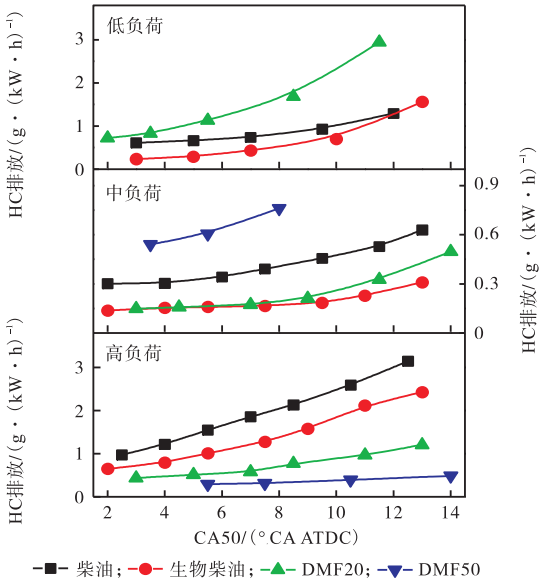


图 10 不同负荷下 4 种燃料的 HC 排放

3 结 论

(1) 在固定 CA50 条件下,燃用柴油和生物柴油时,由于其十六烷值相近,缸压和放热率差别较小(生物柴油放热率略高于柴油). 在生物柴油中添加 DMF 能够降低燃料十六烷值和延长滞燃期,改善挥发性,使得燃烧速率加快,预混放热峰值升高,最大爆发压力增大,随着负荷增加和 DMF 掺混比例增大,不同燃料之间缸压和放热率的差异逐渐变得明显,在较大掺混比例下存在压力升高率高的问题.

(2) 在低负荷时,相比于柴油和生物柴油,掺混燃料热效率并没有表现出优势;在中等负荷,不同燃

料均能保持较高的热效率，并且差别较小；随着工况进一步提高到高负荷，生物柴油及其掺混燃料热效率逐渐表现出优势，特别是高比例的掺混燃料 DMF50 对热效率的提升更为明显，在 CA50 为 5.5° CA ATDC 时，指示热效率可以达到 46.5%，而此时柴油和生物柴油的指示热效率分别只有 43% 和 43.3%.

(3) 相对于柴油，不同燃料降低烟度的能力依次为 DMF50＞DMF20＞生物柴油. 在中、低负荷时，掺混 20% 的 DMF 即可实现极低的烟度，在高负荷时，DMF20 烟度依旧较高，而采用 DMF50 基本可实现无碳烟排放. 虽然掺混 DMF 会导致 NO_x 排放有所升高，但在高 EGR 率条件下，NO_x 排放都可以被控制在低排放范围(高负荷低于 0.4 g/(kW・h)). 掺混 DMF 能够显著改善高负荷工况、高 EGR 率、低氧浓度下的 CO 和 HC 排放，这是其改善低温燃烧热效率的重要因素.

参考文献：

[1] 何 超，葛蕴珊，韩秀坤，等. 直喷式柴油机燃用生物柴油的燃烧特性[J]. 内燃机工程，2007，28(6)：7-10.
He Chao，Ge Yunshan，Han Xiukun，et al. Combustion characteristics of direct injection diesel engine fueled with biodiesel [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*，2007，28(6)：7-10(in Chinese).

[2] 覃 军，刘海峰，尧命发，等. 柴油机掺烧不同比例生物柴油的试验研究[J]. 燃烧科学与技术，2007，13(4)：335-340.
Qin Jun，Liu Haifeng，Yao Mingfa，et al. Experiment study on diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*，2007，13(4)：335-340(in Chinese).

[3] Zhu L，Cheung C S，Zhang W G，et al. Combustion，performance and emission characteristics of a DI diesel engine fuelled with ethanol-biodiesel blends[J]. *Fuel*，2011，90：1743-1750.

[4] Roman-Leshkov Y，Barrett C J，Liu Z Y，et al. Production of dimethylfuran for liquid fuels from biomass-derived carbohydrates[J]. *Nature*，2007，447：982-985.

[5] Zhao H B，Holladay J E，Brown H，et al. Metal chlorides in ionic liquid solvents convert sugars to 5-hydroxymethylfurfural[J]. *Science*，2007，316(5831)：1597-1600.

[6] 马志炎，李孝禄，魏建勤，等. 汽油机燃用 2，5-二甲基呋喃的试验研究[J]. 车用发动机，2012，198(1)：46-50.
Ma Zhiyan，Li Xiaolu，Wei Jianqin，et al. Experimental study on gasoline engine fueled with 2，5-dimethyfuran [J]. *Vehicle Engine*，2012，198(1)：46-50(in Chinese).

[7] Zhong S，Daniel R，Xu H，et al. Combustion and emissions of 2，5-dimethyfuran spark-ignition engine [J]. *Energy & Fuels*，2010，24(5)：2891-2899.

[8] Liu Haifeng，Xu Jia，Zheng Zunqing，et al. Effects of fuel properties on combustion and emissions under both conventional and low temperature combustion mode fueling 2，5-dimethylfuran/diesel blends [J]. *Energy*，2013，62：215-223.

[9] 韩 东，吕兴才，黄 震，等. 柴油机低温燃烧的研究进展[J]. 车用发动机，2008，174(2)：5-13.
Han Dong，Lü Xingcai，Huang Zhen，et al. Research progress of low temperature combustion of diesel engine [J]. *Vehicle Engine*，2008，174(2)：5-13(in Chinese).

[10] 郑尊清，孔令存，刘海峰，等. 宽馏分燃料对柴油机低温燃烧影响的试验研究[J]. 燃烧科学与技术，2014，20(2)：95-100.
Zheng Zunqing，Kong Lingcun，Liu Haifeng，et al. Experimental study on effects of wide-distillation fuel properties on low temperature combustion in a diesel engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*，2014，20(2)：95-100(in Chinese).

[11] Alriksson M，Denbratt I. Low temperature combustion in a heavy duty diesel engine using high levels of EGR [C]//*SAE Paper*. Detroit，MI，USA，2006，2006-01-0075.

[12] 郑尊清，李善举，刘海峰，等. 正丁醇燃料特性对柴油机低温燃烧影响的机理[J]. 内燃机学报，2013，31(2)：97-102.
Zheng Zunqing，Li Shanju，Liu Haifeng，et al. Effects of n-butanol fuel properties on low temperature combustion of diesel engine [J]. *Transactions of CSICE*，2013，31(2)：97-102(in Chinese).