

船用柴油机应用柴油/甲醇二元燃料的性能特性研究

王 辉¹, 辛强之², 姚安仁¹, 窦站成¹, 姚春德¹

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 淄柴动力有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要: 在柴油/甲醇二元燃料(DMDF)燃烧模式下, 研究了不同负荷下甲醇替代率对船用柴油机性能的影响, 以及不同喷油时刻对 DMDF 燃烧的影响。试验结果表明: 不改变原机喷油定时的情况下, 发动机 25% 负荷率时最大替代率为 57.8%, 50% 负荷率时最大替代率为 59.6%, 100% 负荷率时最大替代率为 36.7%; 受喷醇流量的限制, 在 75% 和 90% 负荷率时, 甲醇替代率分别只做到 49.1% 和 39%。据试验情况分析, 限制甲醇替代率提高的因素有发动机失火和发动机最高燃烧压力过高等, 因此, 除受试验条件限制的负荷区域(50% ~ 90% 负荷率)外, 将 DMDF 在船用柴油机上的非稳定运行的区间分为失火限制区和最高燃烧压力限制区, 分别对应的负荷率范围大致为 0 ~ 50% 和 90% ~ 100%。另, 喷油时刻太靠后会限制甲醇替代率提升, 其主要原因是发动机易失火; 而喷油时刻太靠前则因最高燃烧压力升高限制了甲醇替代率的提升。

关键词: 船用柴油机; 柴油/甲醇二元燃料; 性能; 替代率

中图分类号: TK421. +5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2019)01-0001-06

Performance Study About Marine Engines With Diesel-Methanol Dual Fuel

Wang Hui¹, Xin Qiangzhi², Yao Anren¹, Dou Zhancheng¹, Yao Chunde¹

(1. Tianjin University State Key Laboratory of Engines, Tianjin 300072;

2. Zi Chai Power Co., Ltd., Shandong Zibo 255000)

Abstract: Under the combustion mode of diesel-methanol dual fuel, researches were carried out on the influence of methanol substitution rate to marine engine performance at different load factors and the influence of different injection timing to DMDF combustion. The test results show that, the maximum methanol substitution rate is 57.8% on 25% load factor, 59.6% on 50% load factor, 36.7% on 100% load factor without changing the injection timing of original engine, and due to the limitation of methanol flow, the number is 49.1% and 39% on 75% and 90% respectively. According to the test data analysis, there are several reasons which limit the increase of methanol substitution rate, including fire-missing, excess peak pressure, etc. Therefore, except the load range (50% ~ 90%) limited by test conditions, the unstable operation areas are divided into fire-missing restriction area and peak pressure restriction area, corresponding respectively to 0% ~ 50% load factor and 90% ~ 100% load factor. When injection timing is too late, fire-missing limits the increase of the substitution rate, while the limiting factor is peak pressure when injection timing is too early.

Key words: marine diesel engine; diesel-methanol dual fuel; performance; substitution rate

0 引 言

由于船用发动机的排放对环境污染较严重,国际上对船机的排放标准日益严格。国内,2016 年环境保护部与国家质量监督检验检疫总局联合发布的《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段)》也已于 2018 年 7 月 1 日起开始实施;再加上国内石油资源供需日趋紧张,因此寻找清洁、可再生的船机燃料已受到越来越多的重视^[1-2]。甲醇因为原料来源广泛,如煤炭、天然气和生物质均可制得,为工业化应用提供可能;另外甲醇是一种高含氧燃料,其燃烧速度快,着火界限宽,燃烧后无污染物排放,因此是一种具有广阔发展前景的替代燃料。

虽然 LNG 一直是船机替代燃料的主要关注点^[3-4],但现阶段越来越多的研究和案例表明:甲醇以其清洁、环保、可获取性强等诸多优势,已充分显示出其成为未来船用燃料的潜力。与 LNG 相比,甲醇最大的优势在于不须要低温储存和绝热,因而燃料舱的设计和建造非常简单,成本大大降低。甲醇燃料舱可以是整体式,也可以是独立式,整体式货舱在甲醇运输船上已有大量应用经验^[4-6]。

柴油/甲醇双燃料燃烧(DMDF 模式)是由天津大学提出的一种在柴油机上应用甲醇的燃烧理论。其实施方式是:在发动机进气管上布置甲醇喷嘴,通过甲醇电控单元 ECU 控制甲醇喷射,形成甲醇空气预混气,进入气缸并由直喷柴油引燃。由于甲醇特殊的燃料属性,该燃烧方式能够有效降低柴油机的碳烟排放,同时改善传统柴油机 NO_x 和碳烟的 trade-off 关系^[7-9]。

经过多年的探索和发展,在国内该技术已成功应用在重载柴油车上,由于其独特的经济性和排放性能而得到了社会的广泛认可^[10-11]。但是此燃烧模式在船舶发动机上还没有进行过任何的试验,因此,笔者在一台 450 kW 的渔船发动机上进行了甲醇替换柴油的台架试验,探究 DMDF 模式在船用柴油机上应用的潜力。

1 试验设备与步骤

1.1 试验设备

试验在一台直列六缸四冲程直喷废气涡轮增压船用发动机上进行,仅在原机的基础上增加了组合燃烧喷醇系统。原机的主要参数如表 1 所示。该机主要用做内河湖泊和沿海渔船的主机。柴油机的进

气总管上增加了六个甲醇喷嘴,并将其分成两组由两个甲醇泵分别为其供油,用自行开发的电控单元控制甲醇的喷射量和喷射时间。增加的甲醇供给和喷射系统与原机的燃油供给系统完全独立,原机的燃油供给系统、喷射系统和控制系统不做任何改动。为测量甲醇油耗,在甲醇供给系统上增加了一台智能油耗仪。此次试验所用测功机为水力测功机。具体试验台架系统如图 1 所示。在本文的研究工作中,发动机在纯柴油模式和双燃料模式下测试条件完全相同。

表 1 试验用发动机参数

类型	直列 6 缸、水冷
进气形式	涡轮增压、中冷
缸径/mm	170
行程/mm	220
压缩比	14.5
持续转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 500
持续功率/kW	450
最低稳定工作转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	670
最高燃烧压力/MPa	14

试验中,在集控室对发动机扭矩、转速、冷却水温度、机油温度和压力等参数进行实时监测和控制,以确保试验工况的稳定。发动机的 1#缸安装有示功阀,用来测量发动机的最高燃烧压力;在每一缸的缸盖上安装一温度表用来检测缸内温度;在甲醇喷嘴的前后各安装一温度表,用来对比喷醇前后进气温度的变化。

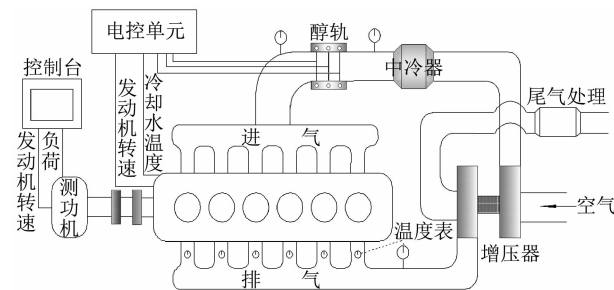


图 1 试验台架系统

由于甲醇的汽化潜热较大,约是柴油的 4.3 倍,甲醇喷入进气管后会降低进气温度;中小负荷下增压后的空气温度较低,不利于甲醇的汽化,且由于适当提高中冷后进气温度对 DMDF 发动机的热效率有改善^[12-13],因此希望在中小负荷下对进气进行适当加热。本试验用发动机缸套冷却水通过进气中冷器对进气进行加热。试验所用甲醇为无水

甲醇，其特性与柴油的特性对比如表 2 所示。

表 2 试验用柴油和甲醇特性

参数	柴油	甲醇
分子式	—	CH ₃ OH
摩尔质量/(g·mol ⁻¹)	—	32
密度/(kg·m ⁻³)	830	790
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	42.5	19.9
汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	270	1 167
黏度(20℃)/(MPa·s)	2.80	0.59
氧的质量分数	0	50%
硫的质量分数/10 ⁻⁶	<350	—
理论空燃比	14.3	6.7
闪点/℃	75	12
着火温度/℃	316	470

1.2 试验介绍

替代率是指在发动机采用 DMDF 燃烧模式下甲醇所替代掉的柴油量与同等工况时在纯柴油模式下柴油消耗量的比值。

试验过程中，在同一负荷率下保持发动机转速、扭矩不变，通过电脑远程手动控制甲醇喷射 MAP，使甲醇喷入量从零逐渐增加，相应的柴油喷入量逐步降低，待工况稳定时，记录分析甲醇替代率为 0（纯柴油模式）、10%、20%……时的发动机运行参数。试验过程中实时监控发动机运行，当发动机出现失火或者最高燃烧压力超标时，停止继续增加甲醇喷射，此时对应的替代率为该工况下的最大替代率。

另外，考虑到不同喷油时刻对 DMDF 燃烧有一定的影响^[14]，在原机喷油时刻为 23° BTDC 的基础上，选取在 50% 负荷率下，分别探索喷油时刻为 18.5° BTDC 和 27.5° BTDC 对 DMDF 发动机运行过程的影响。

由于船舶柴油机功率是与螺旋桨吸收功率相匹配的，而螺旋桨所吸收的功率与速度的立方成正比。因此本试验所选取的工况点如表 3 所示。

表 3 试验发动机工况点

负荷率	功率/kW	转速/(r·min ⁻¹)	扭矩/(N·m)
25%	112.5	945	1 132
50%	225	1 191	1 805
75%	337.5	1 363	2 363
90%	405	1 448	2 672
100%	450	1 500	2 865

2 试验结果与分析

2.1 不同替代率对发动机性能的影响

试验过程中选取原机 25%、50%、75%、90% 和 100% 额定负荷率（分别对应 112.5、225、337.5、405、450 kW）进行最大甲醇替代率试验，并记录与分析每一工况点下的最高燃烧压力、进气温度、排气温度等参数。本节主要从最高燃烧压力和排气温度两个方面来分析各工况下发动机性能随替代率的变化，并将实测的数据绘制成曲线，如图 2~图 6 所示，此时发动机的喷油提前角为 23° BT-DC。

在 25% 负荷率时，控制发动机功率为 112.5 kW，转速维持在 945 (r·min⁻¹)，该工况下的最大甲醇替代率为 57.8%。从图 2a) 中可以看出：在小甲醇替代率下发动机最高燃烧压力随替代率的增加有所增大，但在大替代率下发动机最高燃烧压力有下降的趋势，相比纯柴油模式最多可降低 0.6 MPa，此时如果替代率继续增加，则发动机可能发生失火，台架中表现为发动机的转速开始下降。图 2b) 显示发动机六缸排气温度随替代率的变化。从图中可以看出：随着甲醇喷入量的增加发动机排气温度逐渐降低，但是从 50% 替代率开始，2#缸和 6#缸的排气温度出现明显的差异，在 57.8% 替代率时两者之间的最高温差达 115℃。但是从图中也可以看出：如果 2#缸没有出现异常升温，各缸之间的排气温差最高不超过 50℃。其原因是甲醇进入各缸的量不均匀，导致各缸的燃烧状况不尽相同^[15]。由此可知：在 25% 负荷率下，发动机可以稳定运行在甲醇替代率为 56% 的燃料环境下，替代率再增加，则会出现失火和各缸排气温差过大的不正常现象。至于 2#缸在高替代率下出现的异常升温情况，还须进一步研究。

在 50% 负荷率时，控制发动机功率为 225 kW，转速维持在 1 191 (r·min⁻¹)，此工况下最大甲醇替代率达到了 59.6%。通过图 3a) 可以看出：发动机的最高燃烧压力随着甲醇替代率的增加基本呈增加趋势，只有在 59.6% 替代率时最高燃烧压力相比 50% 替代率时下降了 0.6 MPa，但仍比纯柴油模式高 0.4 MPa。从图 3b) 显示的各缸排气温度曲线可以看出：随着甲醇喷入量的增加，排气温度逐渐降低，与原机相比，六缸平均温降最大为 64.2℃。相比于纯柴油模式，59.6% 甲醇替代率下各缸的排气温度出现一定的差异，推测应该是甲醇进入各缸的量不均匀所致^[15]，但情况明显要好于 25% 负荷工况点，说明此工况下各缸燃烧相对均匀。因此，从图 3 可以得出在 50% 负荷率时，此发动机可以稳定运行在 60% 甲醇替代率的环

境下。

在75%负荷率时,发动机功率为337.5 kW,转速维持在1363 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),该工况下的最大甲醇替代率为49.1%。从图4a)可以看出:随着替代率的增大,发动机最高燃烧压力稳定上升,且在49.1%替代率时为12.3 MPa,远低于极限最高燃烧压力14 MPa。从图4b)可以看出:发动机排气温度随着替代率的提高能够稳定下降,与原机相比,最大温降可以达到80 $^{\circ}\text{C}$,六缸平均温降最大为56.73 $^{\circ}\text{C}$,且各缸排气温度无明显差异。在49.1%替代率时,再增加甲醇MAP值,油耗仪显示的甲醇油耗稳定在73.7 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)不变。表明:此时喷嘴喷射速率达到了最大值,限制了更大甲醇替代率的试验探究。

在90%负荷率时,控制发动机功率为405 kW,转速维持在1448 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),此工况下的最大甲醇替代率为39%。从图5a)可以看出:随着替代率的升高,发动机最高燃烧压力不断增加,最高达到13.4 MPa,距离14 MPa还有一定的距离。图5b)反映出:随着替代率的升高,发动机六缸排气温度均呈现明显下降的趋势;在39%替代率时,与原机相比,六缸的平均温降在43 $^{\circ}\text{C}$,且此时各缸排气温度无明显差异。与75%负荷率时情况相同,在39%替代率时,再增加甲醇MAP值,油耗仪显示的甲醇油耗稳定在73.7 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)不变。说明甲醇喷嘴的喷射速率已达到最大值,从而限制了更大甲醇替代率的试验探究。

在100%负荷率时,发动机功率为450 kW,转速维持在1500 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),此工况下最大甲醇替代率为36.7%。从图6a)、6b)可以看出:随着替代率的升高,发动机最高燃烧压力逐渐升高,排气温度逐渐降低,平均最大温降为49.5 $^{\circ}\text{C}$ 。在36.7%替代率下,发动机最高燃烧压力已经达到了13.8 MPa,接近极限最高燃烧压力14 MPa。表明:此时已经达到了最大甲醇替代率。

DMDf燃烧过程包括:柴油的预混和扩散燃烧、甲醇的火焰传播、甲醇的末端混合气自燃和甲醇先于柴油着火的自燃等多种燃烧现象^[16]。图7显示不同负荷下发动机最高燃烧压力随替代率的变化;图8显示试验发动机在各个负荷下的甲醇最大替代率。根据分析及图7可知:本次试验中限制船舶机替代率提升的原因有三方面:发动机失火、甲醇喷射速率有限和最高燃烧压力过高。小负荷工况时,压缩终点温度低,甲醇稀混合气火焰传播速度慢,大替代率时柴油引燃量不足,发动机容易发生

失火和部分燃烧现象,因而限制了更多甲醇的喷入;中大负荷时,由于甲醇喷嘴的流量限制,不能再将更多的甲醇喷入进气管,从而限制了更大替代率的试验;满负荷工况时燃料燃烧速度快,容易发生甲醇自燃,压力升高率过大,最大替代率受到最高燃烧压力的限制^[17-19]。

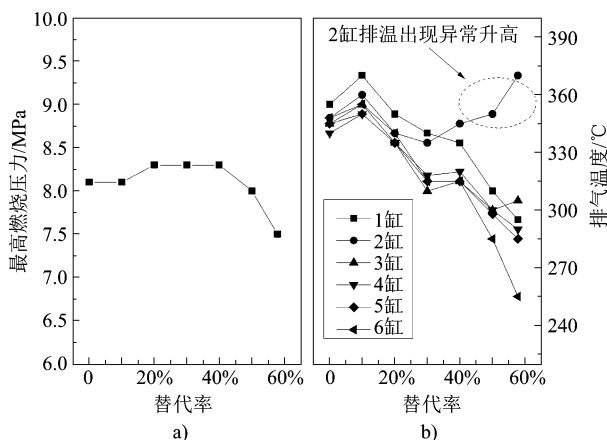


图2 25%负荷率下最高燃烧压力和排温随替代率的变化

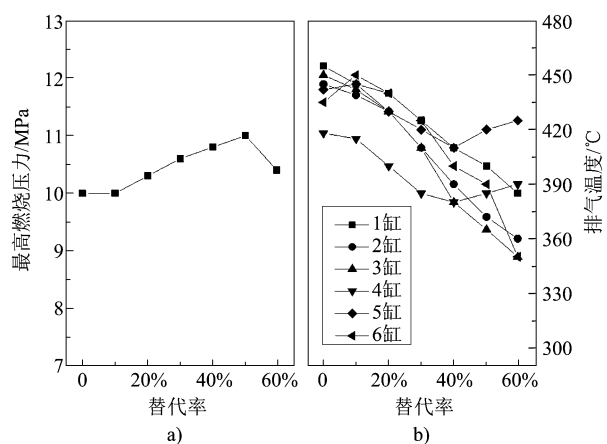


图3 50%负荷率下最高燃烧压力和排温随替代率的变化

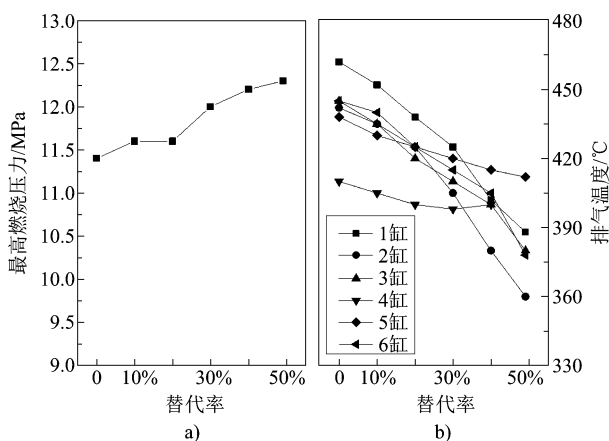


图4 75%负荷率下最高燃烧压力和排温随替代率的变化

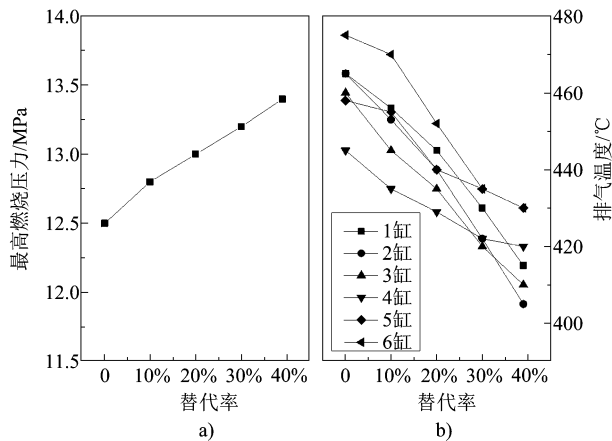


图5 90%负荷率下最高燃烧压力和排温随替代率的变化

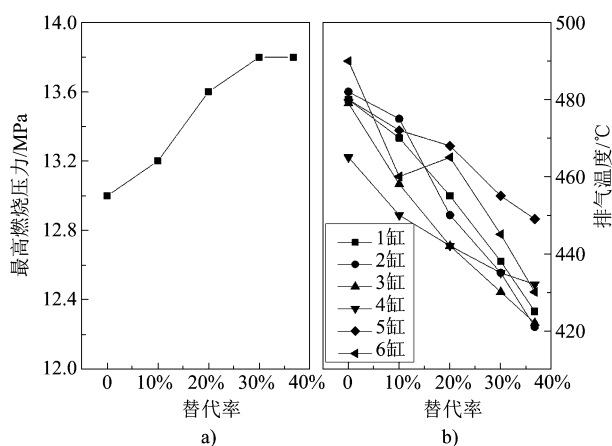


图6 100%负荷率下最高燃烧压力和排温随替代率的变化

根据以上分析,除了受试验条件限制的负荷区域外,将DMDF发动机的非稳定运行区分为失火限制区和最高燃烧压力限制区,如图8所示,分别对应的发动机负荷率范围大致为0~50%负荷率和90%~100%负荷率。

2.2 不同替代率下的进气温度

图9显示不同负荷率下发动机进气温度随替代率的变化。由图可知:纯柴油模式时,发动机在各个负荷下的进气温度在40~60℃之间,负荷越高,进气温度越高。喷入甲醇后会发现进气温度明显下降,且替代率越高进气温度降低越多;在中小负荷、大替代率下进气温度能降低到10℃左右,在大负荷时也能降低到20℃以下。说明甲醇喷入后吸热非常明显。但是在小替代率下,进气温度的下降趋势变缓。说明甲醇在进气管的蒸发量变小,更多的甲醇在压缩冲程继续蒸发,导致缸内温度过低^[20],这解释了在小负荷情况下较大的甲醇替代率容易造成发动机失火的现象。进气温度的降低促进了排气温度的降低^[20],如上节图所示。

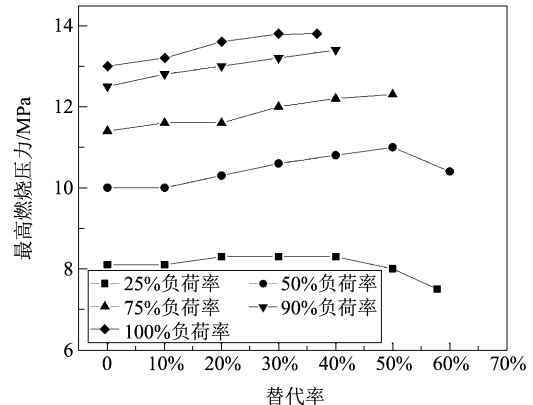


图7 不同负荷下发动机最高燃烧压力随替代率的变化

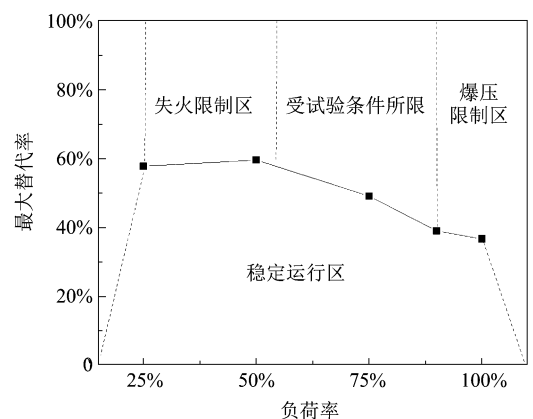


图8 甲醇最大替代率随发动机负荷率的变化

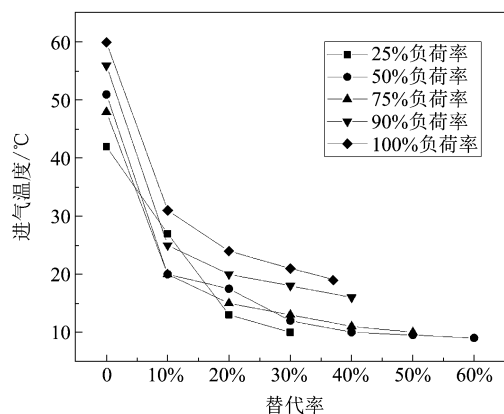


图9 不同负荷率下进气温度随替代率的变化

2.3 喷油时刻对DMDF燃烧的影响

本试验选取发动机50%负荷率,探究喷油时刻对DMDF船舶发动机燃烧的影响。图10对比了喷油时刻为18.5° BTDC、23° BTDC和27.5° BTDC时发动机最高燃烧压力随替代率的变化。图11a)、11b)分别显示了喷油时刻为18.5° BTDC和27.5° BTDC时发动机六缸排气温度随替代率的变化。从图中可以看出:喷油时刻为18.5° BTDC时,最大

甲醇替代率为 59.4%，此时发动机的各缸排气温度已很不均匀，最大温差（3#缸和 5#缸）达到了 85℃；另外，替代率为 59.4% 时发动机最高燃烧压力相比于替代率为 50% 时没有提高，若继续增大甲醇替代率，推测发动机会发生失火现象发生。喷油时刻为 27.5° BTDC 时的最大甲醇替代率只达到 50%，因为此时最高燃烧压力已达到了 13.8 MPa，接近 14 MPa 的最高燃烧压力极限，限制了更大替代率的探究。从图 10 还可以看出：随着甲醇喷入量的增加，喷油时刻越提前发动机的最高燃烧压力提高的速度越快，各缸排温均匀性也越好。

喷油时刻太靠后，甲醇的加入造成压缩冲程缸内温度过低，燃烧始点过度推迟，燃烧速度变慢，燃烧不稳定，发动机易发生失火，从而限制了替代率的提高；喷油时刻太靠前，较长的滞燃期造成了预混燃烧阶段延长，燃烧速度过快，发动机的最高燃烧压力限制了替代率的提高^[14, 21]。理论上，在原机喷油时刻的附近，发动机存在一个最大的甲醇替代率。下一步须做更详细的试验探究。

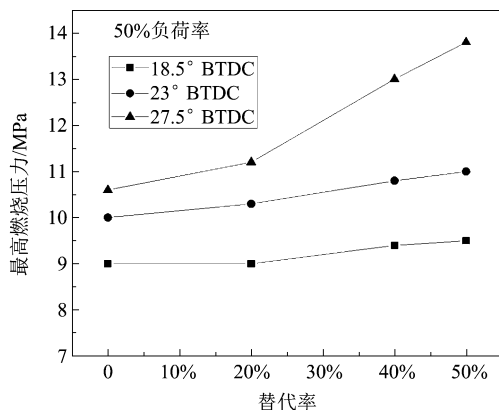


图 10 不同喷油时刻发动机最高燃烧压力随替代率的变化

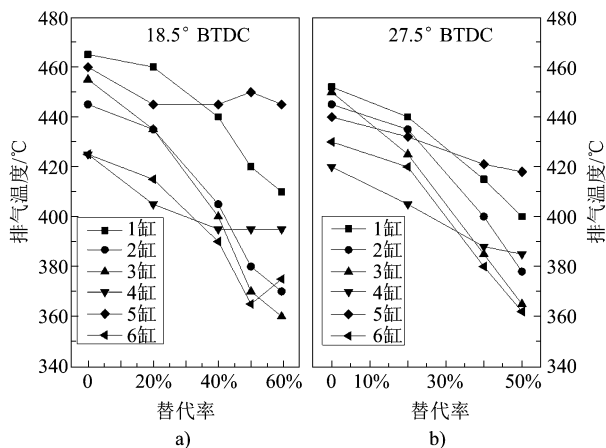


图 11 喷油时刻为 18.5° BTDC 和 27.5° BTDC 时发动机排气温度随替代率的变化

3 结论

采用柴油/甲醇二元燃料燃烧方式对船用发动机部分性能及影响因素开展了初步研究，在排除某些受试验条件限制的工况后，得到结论如下。

(1) 在船机台架上进行最大甲醇替代率试验时，在原机喷油定时不变的情况下，25% 负荷率时最大替代率为 57.8%，50% 负荷率时最大替代率为 59.6%，100% 负荷率时最大替代率为 36.7%；受喷醇流量的限制，在 75% 和 90% 负荷率时，甲醇替代率分别只做到了 49.1% 和 39%。

(2) 限制甲醇替代率提高的原因有发动机失火、最高燃烧压力限制和试验条件限制。除了受试验条件限制的区域（50% ~ 90% 负荷率）外，可将 DMDF 在船用柴油机上的非稳定运行区间分为失火限制区和最高燃烧压力限制区，分别对应的负荷率范围大致为 0 ~ 50% 负荷率和 90% ~ 100% 负荷率。

(3) 发动机进气温度随着甲醇喷入量的提高而不断降低，中小负荷、大替代率时，喷醇后进气温度只有不到 10℃。发动机排气温度随着甲醇替代率增大而逐渐降低，与纯柴油模式相比，最大甲醇替代率时，六缸平均温降均在 40℃ 以上。

(4) 在原喷油时刻的基础上推迟喷油时刻，发动机易失火的因素限制了甲醇替代率的提高；而喷油时刻提前，则发动机最高燃烧压力升高过快，从而限制了甲醇替代率的提高。

参考文献

- [1] GILBERT P, WALSH C, TRAUT M, et al. Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production* [J]. 2018, 172: 855-866.
- [2] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法 (中国第一、二阶段): GB15097-2016 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [3] DENIZ C, ZINCIR B. Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production* [J]. 2016, 113: 438-449.
- [4] BRYNOLF S, FRIDELL E, ANDERSSON K. Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 74: 86-95.
- [5] 甘少炜, 雷伟, 周国强. 甲醇: 未来船用燃料 [J]. 中国船检, 2016 (8): 90-94.

(下转第 35 页)

- (6): 20-24.
- [6] 段炼, 袁寿其, 胡林峰, 等. 高压共轨喷油器控制阀空化研究 [J]. 农业机械学报, 2015 (5): 321-327.
- [7] WANG C, LI G X, SUN Z Y. Effects of structure parameters on flow and cavitation characteristics within control valve of fuel injector for modern diesel engine [J]. Energy Conversion and Management, 2016 (124): 104-115.
- [8] 何志霞, 柏金, 王谦, 等. 柴油机喷嘴内空穴流动可视化试验与数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2011, 42 (11): 5-9.
- [9] 王忠远, 孙剑, 董庆兵, 等. 柴油机喷孔内部空化效应的可视化实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18 (3): 280-287.
- [10] 杜广生. 工程流体力学 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [11] DUAN L, YUAN S Q, HULF, et al. Injection performance and cavitation analysis of an advanced 250 MPa common rail diesel injector [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016 (93): 388-397.

(上接第 6 页)

- [6] 袁士春. 甲醇燃料船试验方案分析 [J]. 世界海运, 2017 (4): 28-32.
- [7] 姚春德, 段峰, 李云强, 等. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的燃烧特性与排放 [J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11 (3): 214-217.
- [8] 姚春德, 程传辉, 张镇顺. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的微粒排放特性 [J]. 内燃机学报, 2008, 26 (4): 302-306.
- [9] 姚春德, 张志辉, 张镇顺. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的微粒排放及催化转化特性 [J]. 内燃机学报, 2010, 28 (6): 494-499.
- [10] 刘军恒, 姚安仁, 姚春德, 等. 柴油/甲醇双燃料车辆道路运行特性 [J]. 中国公路学报, 2015 (6): 120-126.
- [11] 姚春德, 耿鹏, 魏立江, 等. 柴油/甲醇组合燃烧 (DMCC) 减少重载柴油机烟度排放的试验研究 [J]. 环境科学学报, 2013 (11): 3146-3152.
- [12] 韩国鹏, 姚安仁, 姚春德, 等. 柴油/甲醇双燃料发动机能量平衡分析 [J]. 内燃机学报, 2016, 34 (2): 183-191.
- [13] WANG Q G, YAO C D, DOU Z C, et al. Effect of intake pre-heating and injection timing on combustion and emission characteristics of a methanol fumigated diesel engine at part load [J]. Fuel, 2015. 159: 796-802.
- [14] WEI L J, YAO C D, HAN G P, et al. Effects of methanol to diesel ratio and diesel injection timing on combustion, performance and emissions of a methanol port premixed diesel engine [J]. Energy, 2016. 95: 223-232.
- [15] 陈志方, 姚春德, 王全刚, 等. 柴油/甲醇双燃料发动机各缸燃烧均匀性研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23 (1): 41-46.
- [16] 魏立江. 重型柴油机实现甲醇高比例替代和高效清洁燃烧试验研究 [D]. 天津大学, 2014.
- [17] 王全刚. 柴油/甲醇二元燃料燃烧边界条件研究 [D]. 天津大学, 2016.
- [18] 续晗, 姚安仁, 姚春德. 高压缩比甲醇发动机中爆轰现象研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23 (2): 153-160.
- [19] 许汉君. 甲醇对高十六烷值燃料着火与燃烧特性影响的机理研究 [D]. 天津大学, 2010.
- [20] 姚春德, 潘望, 魏立江, 等. 进气温度对 DMDF 发动机燃烧特性和烟度排放的影响 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2015 (4): 328-333.
- [21] 陈超, 姚春德, 窦占成, 等. 喷射时刻对柴油甲醇组合燃烧发动机颗粒物排放的影响 [J]. 环境科学学报, 2017, 37 (5): 1894-1901.