

船用气道喷射式甲醇发动机喷射参数 对整机性能的影响

许晓颖^{1,2}, 游凯^{1,2}, 颜鲁^{1,2}, 迟昊^{1,2}, 沈富超^{1,2}, 方桦^{1,2}, 陈宁^{1,2}

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 内燃机与动力系统国家重点实验室, 山东 潍坊 261061

摘要:为研究由某船用天然气发动机改装的船用甲醇发动机的整机性能,采用 Converge 软件进行三维流体仿真,分析喷孔参数、甲醇轨压对甲醇雾化的影响,采用 GT-Power 软件进行一维仿真,分析配气相位对发动机进、排气性能的影响,并选取最佳仿真选型设计,结合台架试验进行最佳喷射结束角选型及整机性能验证。结果表明:喷孔数为 16,喷孔直径为 0.27 mm,轨压为 600 kPa,进气门开启、进气门关闭、排气门开启、排气门关闭时曲轴转角(上止点后)分别为 344°、570°、104°、409°,为最佳喷射系统仿真选型设计;最佳选型设计下进气门最大升程为 12.0 mm,排气门最大升程为 13.5 mm;喷射结束时曲轴转角为 330°时,该发动机不同用途下标定工况对应的最小甲醇消耗率台架试验结果分别为 433.2、426.5 g/(kW·h),满足此机型产品开发中最小甲醇消耗率小于 440 g/(kW·h)的目标要求。

关键词:甲醇发动机;喷射结束;甲醇消耗率;轨压;配气相位

中图分类号:TK464

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0045-08

引用格式:许晓颖,游凯,颜鲁,等.船用气道喷射式甲醇发动机喷射参数对整机性能的影响[J].内燃机与动力装置,2025,42(2):45-52.

XU Xiaoying, YOU Kai, YAN Lu, et al. The influence of injection parameters on the overall performance of the marine inlet jet methanol engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2): 45-52.

0 引言

随着碳达峰碳中和战略的提出以及国际海事组织对船舶排放标准要求更加严格,要求船舶应减少 SO_x 、 NO_x 、颗粒物及温室气体的排放。甲醇是一种可再生清洁燃料,具有辛烷值高、层流燃烧速度快、自燃温度高的特点,同时甲醇原料来源广泛、价格低廉、便于运输,被认为是有效的发动机替代燃料之一,对解决我国化石能源短缺问题具有重要的战略意义^[1-4]。

汽油的低热值为 42.90 MJ/kg,汽化潜热为 180~350 kJ/kg。甲醇的低热值为 20.09 MJ/kg,汽化潜热为 1 100 kJ/kg^[5]。相比汽油,甲醇低热值、高汽化潜热的理化特性易导致甲醇燃料附着在发动机气道及气缸壁面,同时甲醇及空气形成的混合气均质性较差,在实际应用中可能导致发动机低温起动困难,循环变动大,早燃及爆震风险高,尤其将天然气内燃机改制成甲醇内燃机时,甲醇喷射系统的设计与选型影响整机性能^[6-7]。朱建军等^[8]针对纯甲醇发动机低温起动困难的问题,在进气歧管前、节气门后加装自行研发的甲醇发动机冷起动系统,采用正温度系数(positive temperature coefficient, PTC)陶瓷热敏电阻加热起动时喷入气缸的甲醇,使甲醇蒸汽浓度达到着火界限,顺利实现低温条件(环境温度为 0℃)冷起动,较好地解决了纯甲醇发动机冷起动困难问题。陈月春等^[9]为解决甲醇发动机低温环境下难以形成足够

收稿日期:2025-02-13

基金项目:山东省重点研发计划(2022CXGC020311)

第一作者简介:许晓颖(1983—),女,山东潍坊人,高级工程师,主要研究方向为柴油发动机及替代燃料发动机开发技术, E-mail: xuxiaoy@weichai.com。

浓度的可燃混合气导致的起动困难问题,采用空气辅助喷射器减小甲醇喷雾粒径,提高可燃混合气浓度;加热进入气缸的混合气,使低温下混合气浓度尽快达到着火界限。邹轲等^[10]分析以柴油掺烧甲醇为燃料的发动机排放,发现颗粒物排放减少,但 HC 和 CO 排放增加,并产生了甲醇和甲醛等非常规排放物,且未找到合适的催化剂可以同时处理尾气中的甲醛和 NO_x 。甄旭东等^[11]通过建立火花点火式甲醇发动机的一、三维物理模型,分析负荷、点火提前角、废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)率、压缩比对甲醇发动机非常规排放的影响。马宝东等^[12]分析了甲醇能量比、EGR 率、喷油器等对缸内 THC 及尾气排放性能的影响。张刘^[13]采用自主研发的可变气门升程机构,试验研究特定工况(当量比燃烧和空气稀释燃烧)下,纯甲醇燃料发动机采用不同进、排气门升程策略对发动机燃烧和排放性能的影响,并通过 GT-Power 软件建立了可变气门升程机构一维仿真模型,仿真分析了不同配气相位对发动机性能的影响。

甲醇发动机开发是较复杂的系统工程,影响其性能的因素较多,本文中采用 Converge 软件进行三维流体仿真及分析,完成气道喷射式甲醇发动机喷射器喷孔设计、甲醇轨压选型等;为确保提高充气效率的同时降低缸内回流诱发的回火风险,采用 GT-Power 软件进行一维仿真,分析不同配气相位对缸内气体回流及充气效率的影响,实现配气相位优化;为明确最佳甲醇喷射时刻,通过整机试验分析喷射相位对整机性能的影响,并结合发动机台架性能试验完成对样机甲醇消耗率的分析。

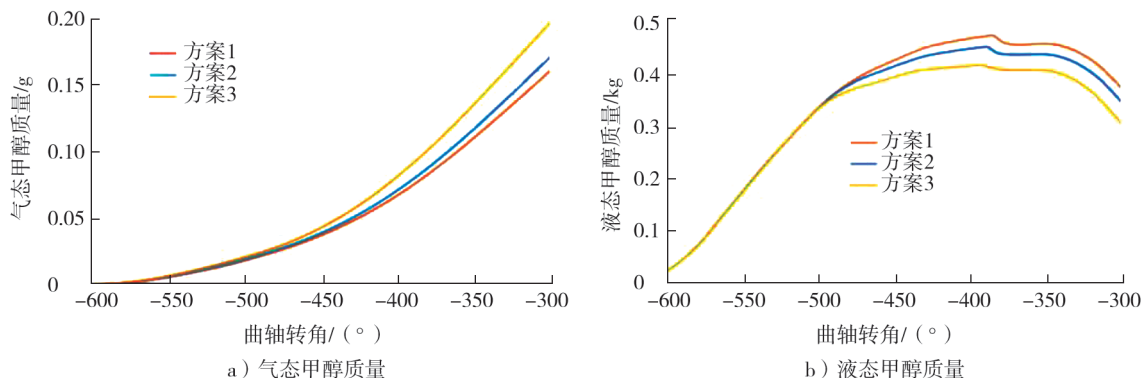
1 仿真分析

为评估甲醇喷射系统对发动机性能的影响,分析甲醇燃料从喷射到进入缸内整个过程中雾化及壁面附着状态,为提高开发效率,基于计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的三维模拟软件 Converge 进行数值模拟计算,分析甲醇喷头喷孔参数、甲醇轨压对甲醇混合气的影响。仿真计算过程中,湍流模型采用 RNG 模型,液滴碰撞模型采用 NTC 模型,蒸发模型采用 Frossling 模型,喷雾撞壁模型采用 Wall film 模型,喷雾破碎模型采用 KH-RT 模型,燃烧模型采用 SAGE 模型。

1.1 喷孔参数

甲醇在气道及气缸内有气态、液态和附壁态 3 种物理状态,为分析不同喷孔对甲醇混合气的影响,在喷孔总开孔面积固定的前提下,调整喷孔数及直径,分别设置喷孔数为 12、16、24,对应的喷孔直径为 0.31、0.27、0.22 mm,分别记为喷孔方案 1、2、3。以第一缸上止点曲轴转角为 0° ,仿真计算时将甲醇喷嘴模型简化为闭阀喷射,喷射压力为 600 kPa,喷射质量流量为 15.5 g/s,曲轴转角为 $-600^\circ \sim -300^\circ$,不同喷孔方案下不同物理状态的甲醇质量随曲轴转角的变化如图 1 所示。不同喷孔方案的喷雾贯穿距随曲轴转角的变化如图 2 所示。

由图 1 可知:气态甲醇质量及附壁甲醇质量随曲轴转角的增大逐渐增大,液态甲醇质量随曲轴转角的增大先增大后减小;随着喷孔数增加,喷孔直径减小,气态甲醇质量及附壁甲醇质量增大,液态甲醇质量减小。分析原因为:随着喷孔数增加及喷孔直径减小,可能导致喷雾锥角增大,附壁甲醇质量增大。



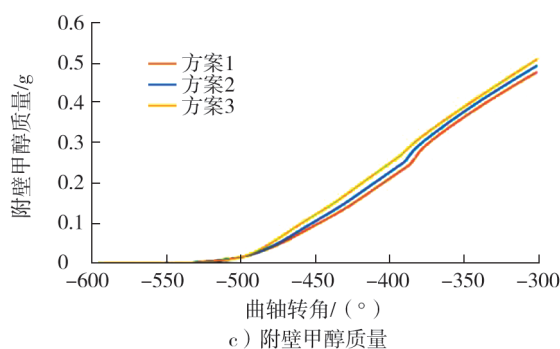


图1 不同喷孔方案下不同物理状态的甲醇质量随曲轴转角的变化

由图2可知:不同喷孔方案下,喷雾贯穿距离基本一致,没有明显区别。在相同的喷射压力和喷射流量下,甲醇喷嘴喷孔对喷射贯穿距离的影响较小。

由于附壁甲醇难以蒸发,为尽量减少附壁甲醇质量,方案1、2相对较优;与方案1相比,方案2气态甲醇质量较多,易于充分燃烧,因此选择喷孔方案2为优选方案:喷孔数为16,喷孔直径为0.27 mm。

1.2 甲醇轨压

采用喷孔方案2,设置轨压分别为0.5、1.0、3.0、5.0 MPa,从喷雾粒径、喷雾贯穿距离两方面仿真分析不同轨压对甲醇燃料雾化的影响,结果如图3所示。

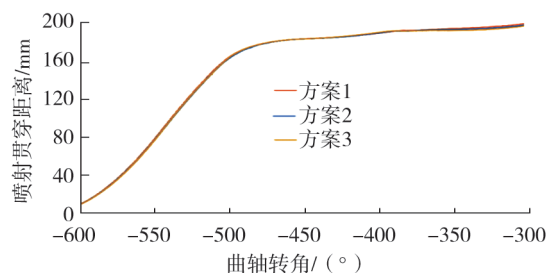
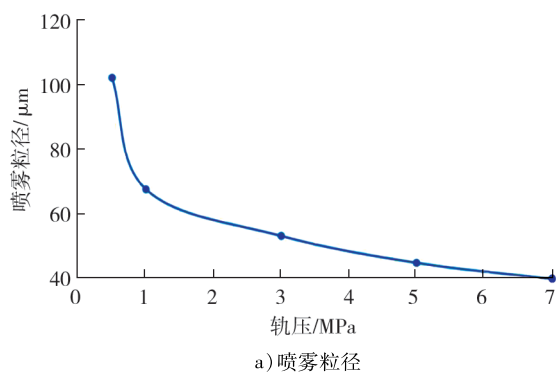
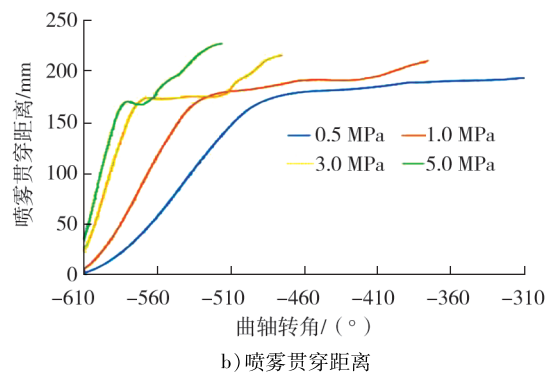


图2 不同喷孔方案的喷雾贯穿距离随曲轴转角的变化



a) 喷雾粒径



b) 喷雾贯穿距离

图3 不同轨压对甲醇燃料雾化的影响

由图3a)可知:喷雾粒径随着轨压增大而减小;轨压由0.5 MPa增大到1.0 MPa时,喷雾粒径明显减小,甲醇雾化效果明显提高;轨压大于3 MPa时,喷雾粒径减小趋势趋于平缓,甲醇雾化效果未产生明显变化。由图3b)可知:随着轨压增大,喷雾贯穿距离增大。考虑甲醇喷嘴和甲醇泵的成本及布置限制,本文中设置轨压为0.6 MPa。

1.3 配气相位

精确控制配气相位对发动机的动力性能、燃油经济性和排放有显著影响,最佳配气相位可以使发动机在各工况下都能获得较好的燃烧效率,减少能量损失,提高动力输出。为避免缸内高温气体回流到气道诱发回火及异常燃烧,采用GT-Power软件,模拟计算不同配气相位对气体回流及充气效率的影响。

以正常气流方向为正,回流方向为负,从进气回流及充气效率两方面分析进气门开启(intake valve opening, IVO)、进气门关闭(intake valve closed, IVC)对进气过程的影响,从排气回流和甲醇消耗率两方面分析排气门开启(exhaust valve opening, EVO)、排气门关闭(exhaust valve closed, EVC)对排气过程的影响。

设置IVO时的曲轴转角分别为304°、309°、314°、319°、324°、329°、334°、339°、344°、349°、354°,不同

IVO 对进气过程的影响如图 4 所示。

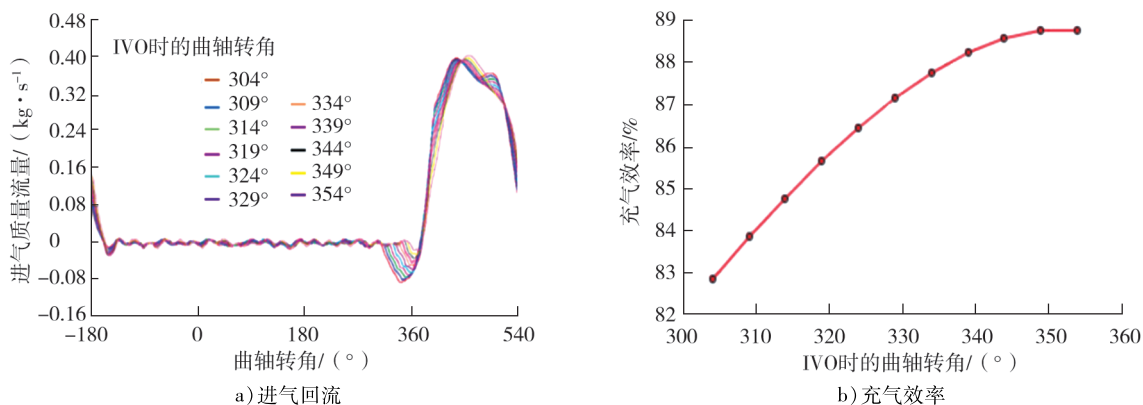


图 4 不同 IVO 对进气过程的影响

由图 4a)可知:进气门开启延后,进气回流对应的质量流量减少;进气门开启早期(曲轴转角约为 360° 时)产生了明显的进气回流。由图 4b)可知:随着进气门开启延后,充气效率先增大后稍微减小,当进气门开启的曲轴转角约为 349° 时,充气效率最高。综合考虑气体回流、充气效率及排气门重叠角,最佳进气门开启时的曲轴转角为 344° 。

设置 IVC 时的曲轴转角分别为 540° 、 550° 、 560° 、 570° 、 580° 、 590° ,不同 IVC 对进气过程的影响如图 5 所示。

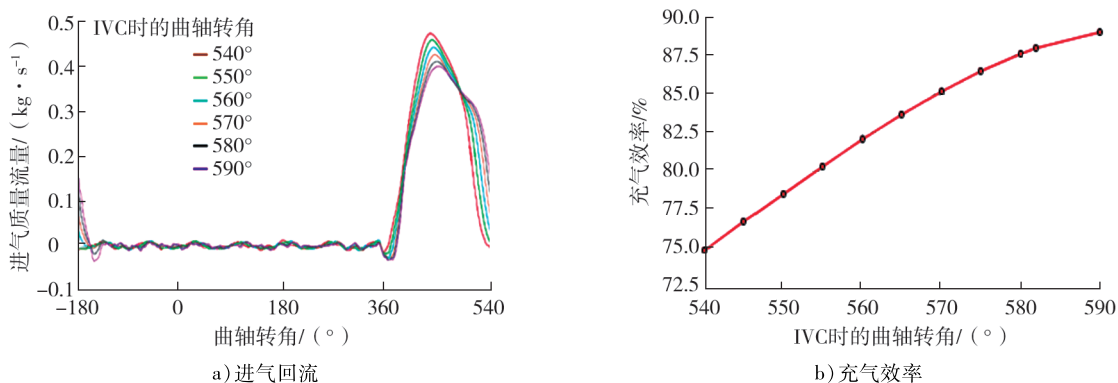


图 5 不同 IVC 对进气过程的影响

由图 5 可知:进气门关闭延后,缸内回流现象明显,气道高温气体增加,充气效率增大;当进气门关闭时的曲轴转角约为 540° 时,进气回流对应的质量流量最小,但是充气效率最低。综合考虑气体回流、充气效率及气门重叠角,选择进气门关闭时的曲轴转角为 570° 。

设置 EVO 时的曲轴转角分别为 89° 、 99° 、 109° 、 119° 、 129° 、 139° ,不同 EVO 对排气过程的影响如图 6 所示。

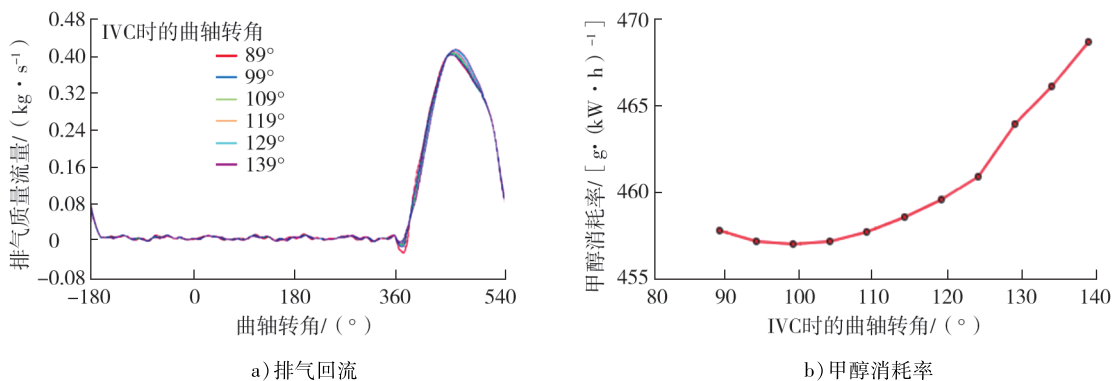


图 6 不同 EVO 对排气过程的影响

由图6可知:排气门开启延后,排气回流对应的质量流量先减小后增大;不同排气门开启时刻对排气回流的影响较小;排气门开启延后,甲醇消耗率先减小后增大。综合考虑排气回流和甲醇消耗率,最佳排气门开启时的曲轴转角为 109° 。

设置 EVC 时的曲轴转角分别为 435° 、 425° 、 415° 、 405° 、 395° 和 385° ,不同 EVC 对排气过程的影响如图7所示。

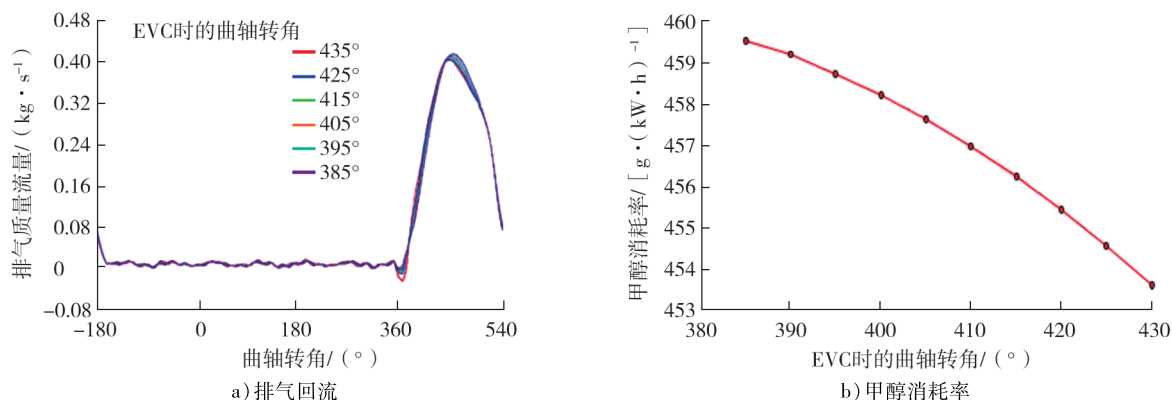


图7 不同 EVC 对排气过程的影响

由图7可知:随着排气门关闭延后,气道回流有增大趋势;EVC 时的曲轴转角为 435° 时,排气回流对应的质量流量最大;排气门关闭延后,气门重叠角增大,甲醇燃料消耗率降低,综合考虑排气回流和甲醇消耗率,最佳排气门关闭时的曲轴转角为 405° 。

采用 GT-Power 计算接触应力和强度等,确认 IVO、IVC、EVO、EVC 时的曲轴转角分别为 344° 、 570° 、 109° 、 405° ,配气相位优化前 IVO、IVC、EVO、EVC 时的曲轴转角分别为 314° 、 585° 、 109° 、 405° ,优化前、后的气体质量流量及气门升程如图8所示。

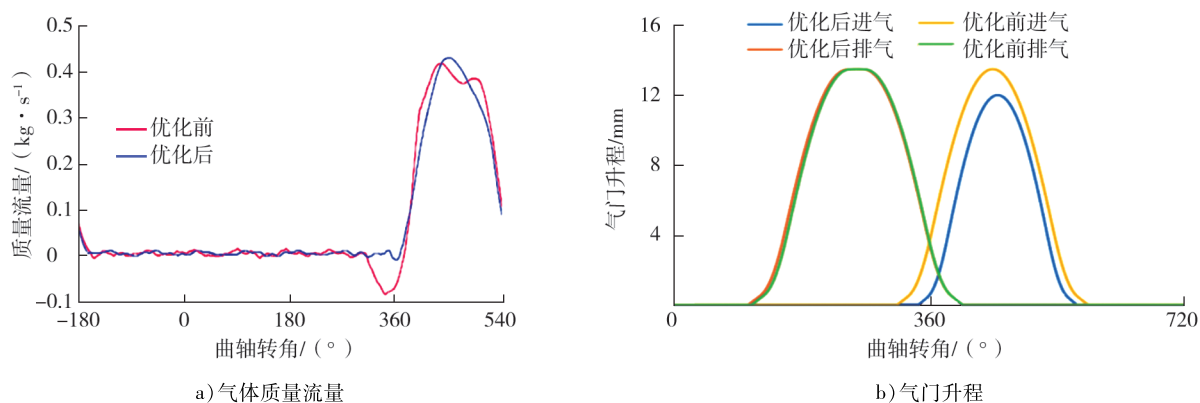


图8 优化前、后的气体质量流量及气门升程曲线

由图8可知:相比优化前,配气相位优化后明显改善缸内高温气体回流到气道的现象,优化后进气门最大升程为 12.0 mm,排气门最大升程为 13.5 mm,优化后进气门升程减小,排气门升程变化不大。分析原因为:优化后的凸轮轴进气开启和进气关闭时的曲轴转角区间减小,优化前的高气门升程可能会影响配气机构的可靠性,在确保进气量足够的前提下降低进气门升程,可减少进气阻力,优化燃烧效率,降低机械损失。

2 试验验证及分析

2.1 试验装置

由于气道喷射式发动机硬件改动便捷且改动成本较低^[14-16],本文中选用某船用气道喷射式天然气

发动机改装成甲醇发动机,改装后的发动机基本参数如表 1 所示。

表 1 发动机基本参数

气缸数	类型	缸径/mm	行程/mm	排量/L	压缩比	燃料
6	直列	175	222	32	11	M100 甲醇

为优化甲醇发动机喷射系统,采用 AVL PUMA 电力测功机测量转速和转矩,测功机额定功率为 660 kW;采用 AVL7351 油耗仪监测甲醇消耗率;采用 AVL 进气流量计检测进气质量流量,检测量程为 0~1 200 kg/h;采用 Kistler Kibox 燃烧分析仪分析燃烧产物组分;采用 Kistler 6054 缸压传感器监测缸压;采用 Horiba MEXA-7000 气体分析仪分析发动机排放成分。

2.2 试验结果及分析

根据仿真结果确定最佳配置:甲醇泵喷射压力为 600 kPa,甲醇喷射系统选用喷孔方案 2,配气相位的进气门开启、进气门关闭、排气门开启、排气门关闭时的曲轴转角分别为 344°、570°、109°、405°。通过整机台架性能测试验证选型方案,试验测试条件如表 2 所示。

表 2 试验测试条件

额定转速/ ($r \cdot min^{-1}$)	最大转矩/ ($N \cdot m$)	额定功率/ kW	过量空气 系数	点火角/ ($^{\circ}$)	喷射相对 压力/kPa	喷射脉宽/ ($^{\circ}$)	喷射开始 时刻/($^{\circ}$)
1 500	4 202	600	1.5	19.5	600	265	65

Shen 等^[6]研究表明最佳喷射结束时刻应在进气门开启时附近。由于燃料喷嘴与气门的相对位置差异,在进气门开启时的曲轴转角 344°附近以曲轴转角 10°为一个测试点。额定工况下,设置不同的甲醇喷射结束时刻曲轴转角区间为 300°~400°,曲轴转角每 10°随机选取一组测量数据,甲醇喷射结束时的曲轴转角对甲醇消耗率、进气歧管温度、涡轮增压前排气温度的影响如图 9 所示。

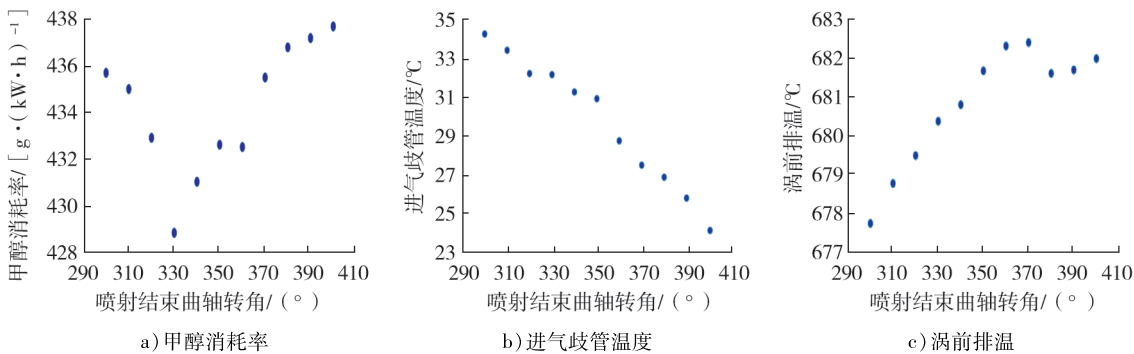


图 9 甲醇喷射结束时刻曲轴转角对甲醇消耗率、进气歧管温度、涡轮前温的影响

由图 9a)可知:喷射结束时刻曲轴转角为 330°时,甲醇消耗率最低。由图 9b)可知:喷射结束时刻曲轴转角约为 350°时,进气歧管温度明显降低,此时喷射结束,并接近进气门开启曲轴转角。由于额定工况下,开阀喷射方式使进气温度大幅降低,进气歧管外壁可能出现凝结水,容易造成外观腐蚀,进而引发电器短路等,因此喷射结束时刻曲轴转角不应超过 350°。由图 9c)可知:随着喷射结束时刻曲轴转角延后,涡轮前温先升高后降低,又再次升高。综合喷射结束时曲轴转角对整机甲醇消耗率、进气温度以及涡轮前温的影响,额定工况下,选择甲醇喷射结束时曲轴转角为 330°。

由于同一发动机不同用途下标定的参数不同,采用稀薄燃烧技术、低压进气道喷射,选取用途 1(以额定转速为 1 500 r/min、输出功率为 600 kW 为标定工况)及用途 2(以常用转速为 1 200 r/min、输出功率为 480 kW 为标定工况),调整点火提前角和过量空气系数,标定为用途 1 和用途 2 发动机。在满足排放

要求的前提下,在外特性工况和负载工况下进行整机台架试验验证甲醇消耗率,确定最佳经济性参数,试验过程中进气温度、中冷后温度、发动机出水温度等边界条件保持恒定。外特性工况和负载工况下,用途1、用途2发动机的甲醇消耗率台架试验结果如图10所示。

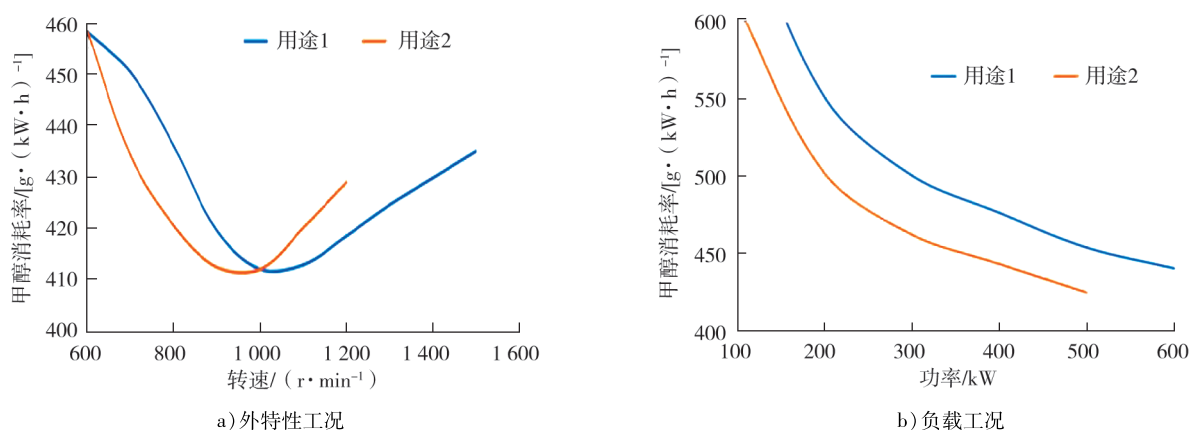


图10 外特性工况和负载工况下用途1和用途2发动机的甲醇消耗率台架试验结果

由图10可知:用途1发动机标定工况最小甲醇消耗率为433.2 g/(kW·h),用途2发动机标定工况最小甲醇消耗率为426.5 g/(kW·h),均满足此机型产品开发中最小甲醇消耗率小于440 g/(kW·h)的目标要求。

3 结论

1)通过三维CFD仿真分析喷嘴喷孔数、轨压对甲醇喷射、雾化、壁面附着及混合气形成的影响,综合考虑,选择喷孔数为16,轨压为600 kPa为最佳方案。

2)通过GT-Power分析配气相位对缸内气体回流以及充气效率的影响,最佳配气相位为进气门打开、进气门关闭、排气门打开、排气门关闭时刻曲轴转角分别为344°、570°、109°、405°,该配气相位对应的进气门最大升程为12.0 mm,排气门最大升程为13.5 mm。

3)通过整机台架试验验证不同工况下试验样机的甲醇消耗率,以额定转速1500 r/min、输出功率600 kW作为标定工况的发动机最小甲醇消耗率为433.2 g/(kW·h),以常用转速1200 r/min、输出功率480 kW作为标定工况的发动机最小甲醇消耗率为426.5 g/(kW·h),试验样机满足项目开发目标要求。

参考文献:

- [1] 袁宝良,洪建海. 甲醇燃料在点燃式发动机上的应用研究[J]. 现代车用动力,2016(1):1-6.
- [2] 王文坤,王铁,曹贻森,等. 甲醇/生物柴油/F-T柴油混合燃料燃烧特性与排放特性研究[J]. 可再生能源,2016,34(1):131-135.
- [3] GONG C M, LIU J J, PENG L G, et al. Numerical study of effect of injection and ignition timings on combustion and unregulated emissions of DISI methanol engine during cold start[J]. Renewable Energy, 2017, 112:457-465.
- [4] ZHEN X D, WANG Y, XU S Q, et al. Study of knock in a high compression ratio spark-ignition methanol engine by multi-dimensional simulation[J]. Energy, 2013, 50:150-159.
- [5] 王全刚. 柴油/甲醇二元燃料燃烧边界条件研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [6] SHEN F C, MORIYOSHI Y, KUBOYAMA T, et al. Performance investigation of a PFI gasoline engine by applying various kinds of fuel injectors [C]//Proceedings of SAE/JSME Small Engine Technology Conference & Exposition. Hiroshima, Japan:Society of Automotive Engineers of Japan, 2020.
- [7] WEI H Y, YAO C D, PAN W, et al. Experimental investigations of the effects of pilot injection on combustion and gaseous emission characteristics of diesel/methanol dual fuel engine[J]. Fuel, 2017, 188:427-441.

- [8] 朱建军,寇子明,王淑平,等. 纯甲醇发动机冷起动系统的研发[J]. 汽车工程,2011,33(4):298-302.
- [9] 陈月春,李志杰,曾笑笑,等. 改善 M100 甲醇发动机低温起动性能的试验研究[J]. 车用发动机,2024(1):16-20.
- [10] 邹轲,吕林. 柴油掺烧甲醇发动机排放控制技术研究[J]. 内燃机,2018,34(6):50-53.
- [11] 甄旭东,雷星星,田智,等. 高压缩比甲醇发动机非常规排放影响分析[J]. 车用发动机,2023(3):52-58.
- [12] 马宝东,姚安仁,姚春德,等. 基于国 VI 排放的柴油甲醇双燃料燃烧能量平衡研究[J]. 工程热物理学报,2022,43(11):3117-3121.
- [13] 张刘. 可变气门升程对甲醇发动机燃烧和排放性能的影响研究[D]. 长春:吉林大学,2023.
- [14] 赖开昌,冯浩,郑尊清,等. 稀燃对甲醇直喷点燃式发动机性能的影响[J]. 内燃机工程,2023,44(4):16-22.
- [15] 陈旨明,刘军恒,孙平,等. 柴油/甲醇双燃料发动机耦合后处理系统的排放性能研究[J]. 西安交通大学学报,2022,56(12):12-22.
- [16] 卢鉴明. 船用柴油/甲醇双燃料发动机燃料协同控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2023.

The influence of injection parameters on the overall performance of the marine inlet jet methanol engine

XU Xiaoying^{1,2}, YOU Kai^{1,2}, YAN Lu^{1,2}, CHI Hao^{1,2},
SHEN Fuchao^{1,2}, FANG Hua^{1,2}, CHEN Ning^{1,2}

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China

Abstract: In order to study the overall performance of a marine methanol engine modified from a natural gas engine, Converge software is used for 3D fluid simulation to analyze the effects of nozzle parameters and methanol rail pressure on methanol atomization. GT-Power is used for one-dimensional simulation analysis to investigate the influence of valve timing on engine intake and exhaust performance, and the optimal simulation parameter combinations is selected. Combined with bench tests, the optimal injection end timing selection and overall performance verification are carried out. The results show that the best parameters combinations are 16 injection holes, 0.27 mm diameter of the injection holes, 600 kPa rail pressure, 344° intake valve open, 570° intake valve closed, 104° exhaust valve open, and 409° exhaust valve closed, 12.0 mm maximum lift of the intake valve, 13.5 mm maximum lift of the exhaust valve. When the crankshaft angle is 330° at the end of injection, the minimum methanol consumption rate corresponding to the calibration conditions of the engine under two different uses is 433.2 g/(kW·h) and 426.5 g/(kW·h), which meets the target requirement of a minimum methanol consumption rate of less than 440 g/(kW·h) in the product development.

Keywords: methanol engine; injection end; methanol consumption rate; rail pressure; valve timing

(责任编辑:胡晓燕)