

预喷持续期对预燃室式天然气发动机性能的影响

李晓东, 邵鲁建, 史艳军, 游凯

潍柴动力股份有限公司 大缸径发动机研究院, 山东 潍坊 261061

摘要:为改善天然气发动机的性能,对某预燃室式天然气发动机进行试验,分析增加预喷持续期对预燃室进气量、预燃室气管温度、预燃室和主燃室的着火时刻、预燃室和主燃室缸压、主燃室平均有效压力波动率、燃气消耗率和气体排放的影响。结果表明:预喷持续期增加,预燃室进气量线性增加,预燃室气管温度降低;预喷持续期曲轴转角小于 100° 时,预喷持续期增加,预燃室及主燃室的着火时刻提前,预燃室及主燃室缸压增大,平均有效压力波动及燃气消耗率降低, NO_x 排放增加, CH_4 、 HC 、 CO 排放降低;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,预喷持续期增加,预燃室及主燃室的着火时刻缓慢推迟,预燃室缸压缓慢增加,主燃室缸压减小且趋于平稳,平均有效压力波动及燃气消耗率缓慢增加, NO_x 排放降低, CH_4 、 HC 、 CO 排放增加。

关键词:预燃室式;预喷持续期;天然气发动机

中图分类号:TK432

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)05-0027-05

引用格式:李晓东,邵鲁建,史艳军,等.预喷持续期对预燃室式天然气发动机性能的影响[J].内燃机与动力装置,2022,39(5):27-31.

LI Xiaodong, TAI Lujian, SHI Yanjun, et al. Effects of pilot injection duration on the performance of pilot combustion chamber natural gas engine [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(4):27-31.

0 引言

天然气的主要成分是甲烷(CH_4),相比传统化石燃料,燃烧后基本没有颗粒排放,且 HC 、 CO 、 CO_2 等生成量少。一般大功率天然气发动机缸内平均有效压力大于 1.8 MPa ,受爆震区和失火区的限制,其工作区域较小。空燃比为1时天然气火焰传播速度约 40 cm/s ,火焰传播速度随着空燃比的增加快速降低。一般大缸径气体机的缸径在 170 mm 以上,火焰传播速度慢,传播过程容易中断,出现不完全燃烧、循环波动大、失火率高等问题,降低了天然气发动机功率,增大了 HC 排放^[1-2]。

预燃室点火方式通过在预燃室内使用火花塞点火或喷射高活性燃料引燃,燃烧后产生高温高压射流火焰进入主燃室,在主燃室内形成大范围多点点火,提高稀薄燃烧下火焰传播速度,改善燃烧性能,提高点火能量^[3-4]。预燃室内的燃气量影响点火能量,从而影响发动机性能。目前关于预燃室燃气量对发动机性能影响的研究较少,本文中选取某大功率预燃室式天然气发动机,调整预喷持续期,研究不同预喷持续期对发动机预燃室进气量、预燃室气管温度、2个燃烧室(预燃室、主燃室)的着火时刻,2个燃烧室的缸压、平均有效压力波动、燃气消耗率、气体排放的影响。

1 试验样机及设备

试验样机为大缸径4冲程、12缸、V型、增压中冷、预燃室式天然气发动机,额定功率为 1800 kW ,额定转

收稿日期:2022-04-26

基金项目:山东省重大科技创新项目(智能环保大功率船舶双燃料发动机研制)

第一作者简介:李晓东(1984—),男,山东荣成人,工程师,主要研究方向为气体机性能开发,E-mail:wclixd@163.com。

速为 1500 r/min,结构如图 1 所示。由图 1 可知,从气源出来的 1 MPa 的燃气分为 2 路:一路经调压阀 1 调整为 10 kPa 的低压燃气,根据电子控制单元 (electronic control unit, ECU) 内设定空燃比与定量空气混合成稀混合气后经增压器、中冷器、节气门、进气总管和进气歧管后进入主燃烧室;另一路燃气经调压阀 2 调整为 500 ~ 700 kPa 的高压燃气,高压燃气临时存放在气轨内确保供气压力稳定,进气冲程时,ECU 控制电磁阀打开,高压燃气进入预燃室,电磁阀开启持续时间(即预喷持续期)以曲轴转角计算,不同的预喷持续期,进入预燃室内的燃气量不同^[5-7]。

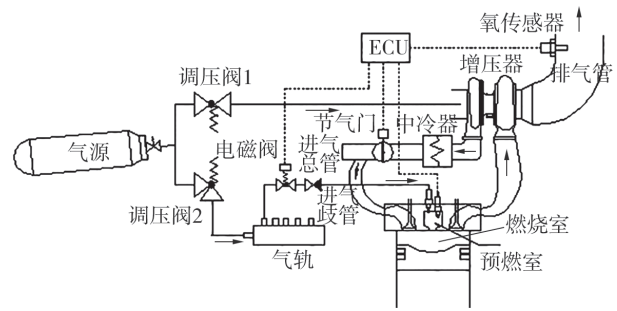


图 1 试验样机主要结构

正常状态下,纯天然气进入预燃室,按照空燃比设定的稀混合气进入主燃室,但预燃室气体容积仅为主燃室气体容积的 1.5% 左右,压缩冲程时主燃烧室内部分稀混合气进入预燃室,预燃室内的燃气由纯天然气稀释为空燃比为 1 左右的混合气,火花塞点火后引燃预燃室内的混合气,预燃室内混合气燃烧产生的火焰穿透预燃室周围的喷孔引燃主燃烧室气体^[8-9]。ECU 调整预喷持续期,在其他参数不变的前提下,通过控制预燃室内的混合气浓度,影响发动机性能。试验设备主要有水力测功机、CMF050 流量计、气体分析仪、燃烧分析仪以及 6052C 缸压传感器。CMF050 流量计装在气源出口 2 个调压阀之前,气体分析仪安装在排气总管上,缸压传感器安装在缸盖下部燃烧室上平面。

2 试验方案及结果分析

试验过程中保持发动机转速、转矩、点火提前角、主燃室空燃比、水温、中冷后温度等参数不变,ECU 通过控制电磁阀调整预喷持续期,以曲轴转角 50° 作为预喷持续期始点,以曲轴转角 10° 为步长进行测试,研究预喷持续期对预燃室进气量、预燃室气管温度、2 个燃烧室的着火时刻、2 个燃烧室的缸压、平均有效压力波动、燃气消耗率、气体排放的影响。

2.1 预燃室进气量

预燃室周围有火焰喷孔,因此主燃室和预燃室是相通的,随着曲轴转角增大,预燃室缸压和主燃室缸压随曲轴转角的变化曲线如图 2a) 所示,预喷初始缸压、预喷终止缸压及预燃室进气量随预喷持续期的变化曲线如图 2b)、c) 所示。由图 2a) 可知:点火初期预燃室缸压突增,明显高于主燃室,其他时刻预燃室和主燃室的缸压基本相同。由图 2b) 可知:预喷初始缸压维持不变,预喷终止缸压先减小后增加,其原因主要是:随着预喷持续期增加,活塞下行,预喷终止缸压逐渐降低,预喷持续期曲轴转角为 146° 时活塞到达下止点,预喷终止缸压达到最低,随后活塞上行,预喷终止缸压逐渐升高。由图 2c) 可知:随着预喷持续期增加,预燃室进气量近似线性增长,但不同持续期斜率略有差异,预喷持续期曲轴转角为 $50^\circ \sim 80^\circ$ 时斜率约为 0.021,预喷持续期曲轴转角为 $90^\circ \sim 160^\circ$ 时斜率约为 0.035,预喷持续期曲轴转角为 $170^\circ \sim 200^\circ$ 时斜率约为 0.028,后 2 段预喷终止缸压略高,对预燃室的进气量略有影响。

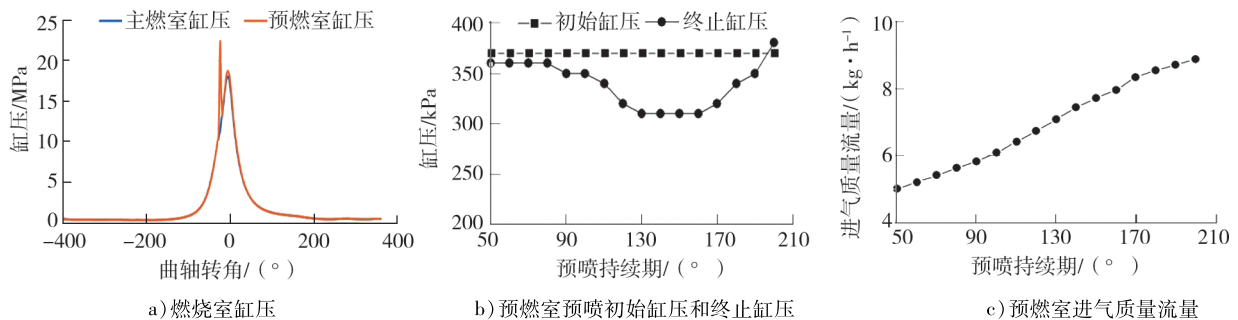


图 2 燃烧室相关参数变化曲线

2.2 预燃室气管温度

预燃室气管内部装有单向阀,开启压力约为 20 kPa,打开单向阀气轨内的高压燃气,进入预燃室,ECU 控制单向阀关闭,预燃室停止供气。由于与预燃室直接接触,预燃室内燃烧产生的高温传导到预燃室气管,温度达 150 ℃ 以上。预喷持续期增加,流经预燃室气管的天然气增多,可降低气管温度,提高预燃室气管单向阀可靠性。预燃室气管温度随预喷持续期的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知,预燃室气管温度随预喷持续期的增加逐渐降低。

2.3 着火时刻

预燃室、主燃室着火时刻随预喷持续期的变化曲线如图 4 所示。

由图 4a)可知,随着预喷持续期的增加,预燃室着火时刻先提前后推迟;预喷持续期曲轴转角小于 100° 时,随着预喷持续期的增加,预燃室内燃气量增加,主燃室的空燃比和燃气量不变,压缩冲程进入预燃室内的混合气量不变,预燃室内纯天然气体积分数加大,空燃比接近 1,预燃室着火性能提高,火焰传播速度加快,着火时刻提前;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,预燃室内燃气量继续增加,空燃比小于 1,预燃室着火性能降低,混合气过浓,着火时刻逐渐推迟,但推迟幅度较小。

由图 4b)可知,主燃室的发火时刻、燃烧完成 50% 着火时刻和燃烧完成 90% 着火时刻与预燃室变化规律相同;预喷持续期曲轴转角小于 100° 时,所有着火时刻相应提前且幅度逐渐增大,整个燃烧持续期缩短;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,随着预喷持续期增加,主燃室的着火时刻、燃烧完成 50% 着火时刻和燃烧完成 90% 着火时刻均相应推迟,燃烧放缓,燃烧持续期增加。

2.4 缸压

2 个燃烧室缸压随预喷持续期的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知:在预喷持续期曲轴转角为 50°~100° 时,预燃室缸压增长 5.4%,平均增长速度为 22 kPa/(°),在预喷持续期曲轴转角为 100°~200° 时,预燃室缸压增长 1.3%,平均增长速度为 7 kPa/(°);预喷持续期曲轴转角为 50°~100° 时,主燃室缸压增长 5.3%,平均增长速度为 17 kPa/(°),预喷持续期曲轴转角为 100°~200° 时,主燃室缸压降低 1.8%,平均降低速度为 6 kPa/(°)。主要原因是:预喷持续期曲轴转角小于 100° 时,预燃室气量持续增加,着火时刻提前,缸压快速增加;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,预燃室内燃气量增加,但着火时刻略有推迟,预燃室内缸压增加缓慢;主燃室内的燃气量和空燃比不变,缸压主要受着火时刻影响,先增大后减小。

预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,随着预喷持续期增加,主燃室的着火时刻、燃烧完成 50% 着火时刻和燃烧完成 90% 着火时刻均相应推迟,燃烧放缓,燃烧持续期增加。

2.5 平均有效压力波动率

平均有效压力是指单位气缸工作容积发出的有效功,平均有效压力波动率可用于评价发动机工作稳定性,一般气体机平均有效压力波动率应小于 3%,波动率大说明每个循环内气缸工作容积发出的有效功变动大,发动机工作不稳定^[10-12],平均有效压力波动率随预喷持续期的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知:预喷持续期曲轴转角为 50° 时平均有效压力波动率最大;预喷持续期曲轴转角为 50°~100° 时,随着预

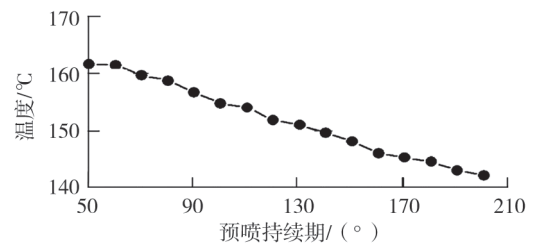


图3 预燃室气管温度随预喷持续期变化曲线

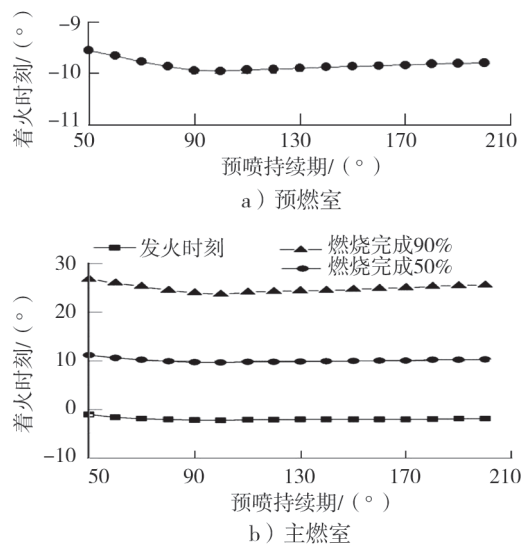


图4 2个燃烧室着火时刻随预喷持续期变化曲线

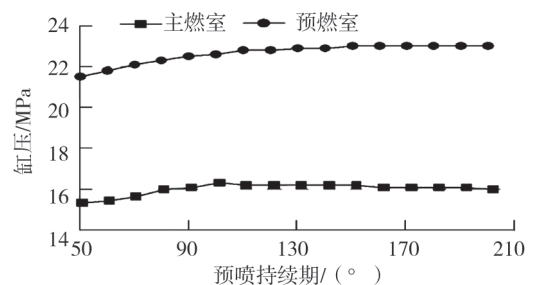


图5 2个燃烧室缸压随预喷持续期变化曲线

喷持续期的增加,平均有效压力波动率明显降低;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,随着预喷持续期的增加,平均有效压力波动率波动不大。主要原因是:随着预喷持续期的增加,预燃室内燃气量增大,参与燃烧的燃气增多,点火能量增强,主燃烧室内稀混合气的燃烧更加稳定,波动率下降;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,预燃室内的燃气量用于保证主燃烧室内的混合气正常燃烧,波动率不再明显变化。

2.6 燃气消耗率

燃气消耗率(以下简称为“气耗率”)随预喷持续期的变化曲线如图7所示。由图7可知:气耗率随预喷持续期的增加先降低后增加,预喷持续期曲轴转角为 $50^\circ\sim 100^\circ$ 时,气耗率降低1.7%,平均降低速度为 $0.063\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;预喷持续期曲轴转角为 $100^\circ\sim 200^\circ$ 时,气耗率升高0.4%,平均升高速度为 $0.015\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。主要原因是:气耗率受主燃室着火时刻影响,预喷持续期曲轴转角小于 100° 时,随预喷持续期增加主燃室着火时刻提前,燃烧速度加快,燃烧持续期缩短,气耗率降低;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时随着预喷持续期的增加,主燃室着火时刻推迟,燃烧速度放缓,燃烧持续期增加,气耗率增加。

2.7 气体排放

NO_x 、 CH_4 、 HC 、 CO 排放体积分数随预喷持续期的变化曲线如图8所示。由图8a)可知, NO_x 体积分数随持续期的增加先增加后降低。主要原因是: NO_x 受氧含量、燃烧温度的影响,试验过程中主燃室空燃比维持恒定,氧含量基本不变;预喷持续期曲轴转角小于 100° 时,随着预喷持续期的增加,主燃室着火时刻提前,最大缸压增加,燃烧室内温度增加, NO_x 排放增加;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,随着预喷持续期的增加,主燃室着火时刻推迟,最大缸压降低,燃烧室内温度降低, NO_x 排放减少。由图8b)、c)可知, CH_4 、 HC 和 CO 体积分数都随预喷持续期增加先降低后增大,主要原因是:预喷持续期 100° 之前,随着持续期的增加,主燃室着火时刻提前,燃烧更加充分, CH_4 、 HC 和 CO 的体积分数都降低;预喷持续期 100° 之后,随着预喷持续期的增加,主燃室着火时刻推迟, CH_4 、 HC 和 CO 的体积分数都增加。

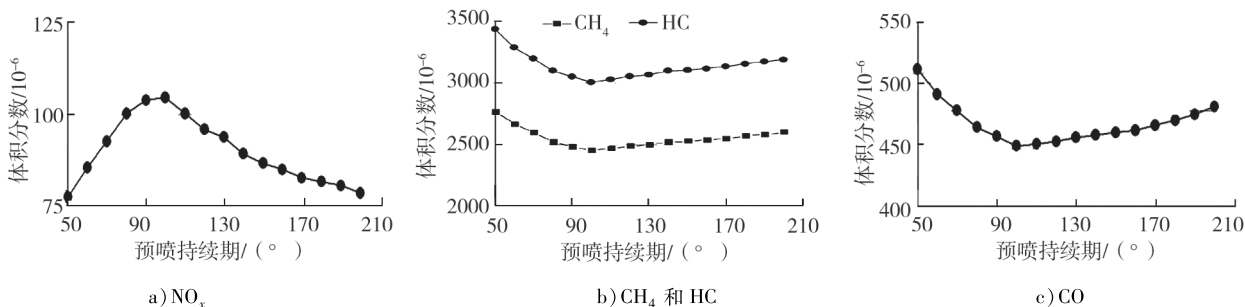


图8 气体体积分数随预喷持续期变化曲线

3 结论

1) 随预喷持续期增加,预燃室进气量呈近似线性增长,预喷持续期曲轴转角小于 100° 时,预燃室内的纯天然气体积分数逐渐增加,空燃比接近1,点火性能和点火能量都增强,着火时刻提前,带动主燃室着火时刻提前;预喷持续期曲轴转角大于 100° 时,预燃室内燃气继续增长,燃气过浓,空燃比小于1,点火性差,预燃室内着火时刻滞后,主燃室着火时刻相应推迟。

2) 随预喷持续期增加,预燃室缸压增加,主燃室缸压、 NO_x 排放体积分数先增大后减小,气耗率及

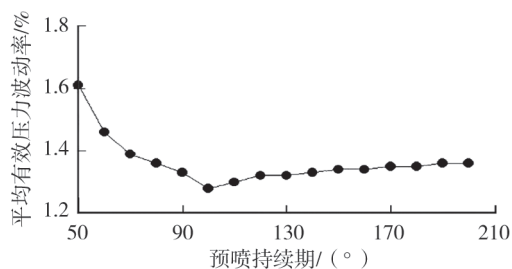


图6 平均有效压力波动率随预喷持续期变化曲线

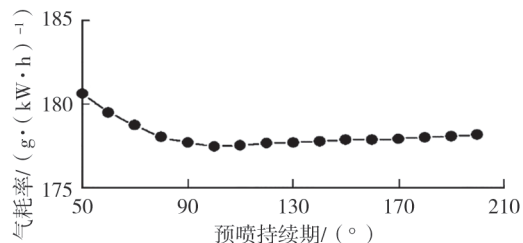


图7 气耗率随预喷持续期增加的变化曲线

CH₄、HC、CO 排放体积分数先减小后增大;预喷持续期曲轴转角小于 100°时,主燃室缸压、气耗率、气体体积分数均变化较大;预喷持续期曲轴转角大于 100°时,各参数变化较小。

3)对预喷持续期的选择,应结合经济性、排放性等各方面因素综合考虑。以本样机为例,如无排放要求,可选用曲轴转角为 100°时的预喷持续期确保发动机经济性达到最优;如有排放要求,由于预喷持续期曲轴转角大于 100°时 NO_x 体积分数低,CH₄、HC、CO 体积分数增长率较小,应综合考虑,选取最佳预喷持续期。

参考文献:

- [1]李翔.船用预燃室式天然气发动机射流火焰和燃烧特性的研究[D].上海:上海交通大学,2020.
- [2]李树生.高性能大功率天然气发动机燃烧系统开发研究[D].济南:山东大学,2013.
- [3]张国栋.大缸径气体机预燃室式燃烧系统开发[D].济南:山东大学,2018.
- [4]何海斌,阮晓东,吴杰,等.预燃室火花塞式天然气发动机燃烧性能试验[J].科学技术与工程,2021,21(30):12939-12945.
- [5]王梅.预燃室式天然气发动机流动和燃烧的数值模拟[D].镇江:江苏大学,2018.
- [6]冷先银,葛琪琪,何志霞,等.预燃室式天然气掺氢发动机燃烧及排放模拟[J].内燃机学报,2021,39(1):26-33.
- [7]孙帅帅.预燃室射流引燃模式可视化研究[D].北京:清华大学,2018.
- [8]江袅袅.高压直喷天然气船机爆震燃烧过程的数值模拟[D].天津:天津大学,2018.
- [9]王玉宝.基于扫气加浓的预燃室式气体机性能提升方法研究[D].济南:山东大学,2018.
- [10]苏展望.大功率气体发动机性能提升研究[D].济南:山东大学,2016.
- [11]靖海国.船用天然气发动机稀燃稳定性及控制技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [12]杨兆鑫.大功率气体机性能仿真及优化研究[D].上海:上海交通大学,2014.

Effects of pilot injection duration on the performance of pilot combustion chamber natural gas engine

LI Xiaodong, TAI Lujian, SHI Yanjun, YOU Kai

R&D Center, Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to improve the performance of natural gas engine, a natural gas engine with a pilot combustion chamber is tested. The effects of increasing the duration of pilot injection on the intake air volume of the pilot combustion chamber, the gas pipe temperature of the pilot combustion chamber, the ignition time and the cylinder pressure of the pilot combustion chamber and the main combustion chamber, the fluctuation rate of the average effective pressure of the main combustion chamber, the fuel consumption rate and the gas emission are analyzed. The results show that with the increase of pilot injection duration, the intake air volume of the pilot chamber increases linearly, and the gas pipe temperature of the pilot chamber decreases; during the duration of pilot injection, when the crankshaft angle is less than 100°, the duration of pilot injection increases, the ignition time of the pilot combustion chamber and the main combustion chamber advances, the cylinder pressure of the pilot combustion chamber and the main combustion chamber increases, the average effective pressure fluctuation and the gas consumption rate decrease, NO_x emissions increase, and CH₄, HC, CO emissions decrease; during the duration of pilot injection, when the crankshaft angle is greater than 100°, the duration of pilot injection increases, the ignition time of the pilot combustion chamber and the main combustion chamber decreases slowly, the cylinder pressure of the pilot combustion chamber increases slowly, the cylinder pressure of the main combustion chamber decreases slightly and tends to be stable, the average effective pressure fluctuation and the gas consumption rate increase slowly, NO_x emissions decrease, and CH₄, HC, CO emissions increase.

Keywords: pilot combustion chamber type; pilot injection duration; natural gas engine

(责任编辑:郎伟锋)