

“双碳”目标背景下船舶动力技术的自主创新与发展论坛论文专栏

二冲程低压双燃料发动机配气正时 对燃气-空气混合效果的影响

王 磊, 苏祥文, 徐赵刚

(上海中船三井造船柴油机有限公司, 上海 201306)

摘 要: 为了探究燃气喷射参数对船用低压双燃料主机燃气-空气混合效果的影响, 改变主机燃气配气正时, 通过数值计算的方法对比不同燃气喷射时刻下的缸内混合气发展趋势, 同时结合台架试验数据进行分析。分析结果表明: 燃气喷射正时推迟, 活塞头附近燃气含量增大, 气缸盖和排气阀附近燃气含量降低, 燃气上部会形成一层“气垫”, 阻止燃气与高温零部件接触而发生早燃; 同时, 随着喷射正时推迟, 甲烷在压缩冲程的物理扩散逃逸问题得到缓解, 但活塞头附近燃气集聚, 导致活塞头热负荷增加。

关键词: 低压双燃料主机; 配气正时; 甲烷; 逃逸

中图分类号: TK432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)06-0010-05

Influence of Gas Injection Timing on Gas-Air Mixing Effect of Two-Stroke Low-Pressure Dual Fuel Engine

Wang Lei, Su Xiangwen, Xu Zhaogang

(CSSC-MES Diesel Co., Ltd., Shanghai 201306)

Abstract: In order to explore the influence of gas injection parameters on the gas-air mixing effect of marine low-pressure dual fuel engine, by changing the gas injection timing of the main engine, the development trend of in-cylinder mixture at different gas injection times was compared by numerical calculation, and analyzed in combination with the bench test data. The results show that when the gas injection timing is delayed, the gas content near the piston head increases, the gas content near the cylinder head and exhaust valve decreases, and a layer of "air cushion" will be formed on the upper part of the gas to prevent early combustion due to the contact between the gas and high-temperature parts. At the same time, with the delay of gas injection timing, the physical diffusion and escape of methane in the compression stroke is alleviated, but the gas accumulation near the piston head will increase the heat load of the piston head.

Key words: low pressure dual fuel main engine; gas injection timing; methane; slip

0 引言

在 IMO 2020 全球限硫令以及 2025 年 IMO EEDI phase 3 提出船舶碳排放强度须在原有基础上减少 30% 的背景下, 常规燃油主机已不能满足法规要求。使用天然气 (LNG) 燃料的船用发动机不仅可以显

著降低氮氧化物、硫氧化物的排放, 且在运营成本方面也更具市场竞争力^[1]; 同时, 其碳排放比传统的 MDO 燃料减少 25% 左右。目前市面已有成熟的 LNG 双燃料主机机型。其中, Win GD X-DF 主机以供气压力低、满足 IMO Tier III 排放法规要求、动态燃烧控制等优势在双燃料主机领域备受好评^[2]。

但 X-DF 主机的燃烧过程也存在一些待解决的问题如甲烷逃逸、失火以及不正常燃烧。其中, 不正常燃烧主要有 3 种形式: 气缸油自燃引发着火爆燃, 普通爆燃和热表面点火^[3]。所有这些问题均与气缸内燃气的预混状态息息相关。

本文以二冲程 DF 低速机为对象, 运用数值模拟方法分析燃气进入气缸与空气混合的过程, 通过改变燃气配气正时解析其对缸内燃气-空气混合的影响, 并结合车间台架试验结果进一步论证燃气配气正时与双燃料主机缸内燃气-空气混合效果的相关性。

1 缸内燃气混合过程

二冲程低压双燃料发动机的燃气是在活塞上行扫气过程结束后喷入气缸的, 并在压缩过程中在缸内扩散预混, 在活塞运行到上止点附近时由引燃油点火引燃。

实际经验表明: 燃气在混合过程中会出现由高温废气或部件 (如排气阀盘) 引发的早燃现象, 为此须对燃气喷射与混合过程进行预控。从宏观角度看, 在二冲程发动机扫气行程中, 扫气口关闭时缸内会形成残余废气与空气的分层, 最上面是燃烧后的废气, 下面是新鲜空气, 局部可能存在混合气, 如图 1 所示。图 1 中: D 为空气层厚度; L 为燃气喷射时活塞顶距进气阀 (gas admission valve, GAV) 的高度。随配气正时推迟, L 会越来越小。当 $L < D$ 时, 燃气直接与新鲜空气接触, 高速喷射的燃气将空气层分为上下两层。通过调节燃气配气时刻可以调节上下两层空气层的厚度: 燃气配气时刻提前, 上层空气层厚度减小, 下层空气层厚度增加, 在压缩行程末期会在活塞底部形成一层“气垫”, 如图 2 (a) 所示; 燃气配气时刻滞后, 上层空气层厚度增加, 下层空气层厚度减小, 在压缩冲程末期会在燃烧室顶部形成一层“气垫”, 如图 2 (b) 所示。上述“气垫”对于奥托循环双燃料主机的燃烧状态起着不可忽视的作用。

2 数值模拟

2.1 计算模型

以某船用大缸径双燃料低速机为对象、基于流体动力学计算软件搭建该机单缸计算模型, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[4] 计算缸内复杂的湍流运动, 采用标准壁面函数计算壁面传热、采用压力-密度修正的 SIMPLE 算法求解可压缩流动动量及连续性方程。本文仅研究燃气-空气混合过程, 不涉及液体燃料蒸发、喷雾、破碎及燃烧。

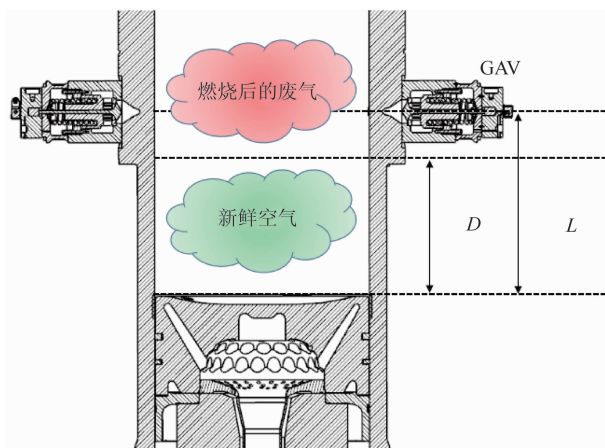


图 1 二冲程主机缸内扫气行程中期气体分布概况

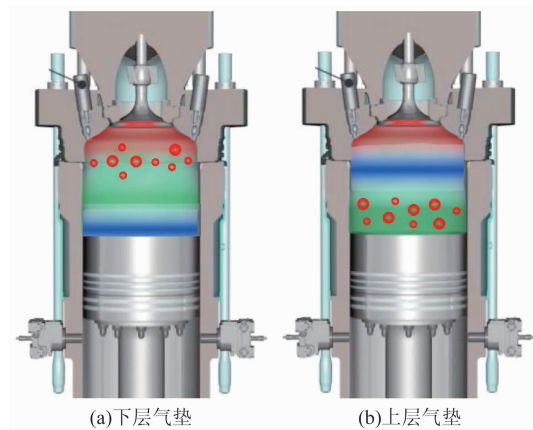


图 2 二冲程主机缸内压缩冲程末期气体分布概况

2.2 网格划分及边界条件

忽略小尺寸结构对缸内流动的影响, 采用 FAME-Hexa 工具生成单缸计算域网格, 见图 3。最大网格尺寸为 10 mm, 排气阀座及 GAV 处网格做相应细化处理。最终, 排气阀打开时刻网格总数为 1 348 327 个。

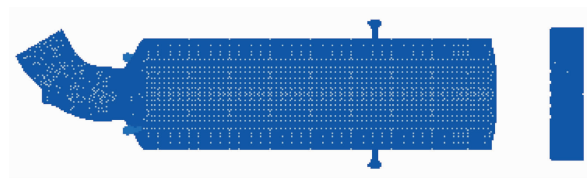


图 3 单缸计算域网格

以主机燃气模式 90% 负荷车间试车数据为输入源得到相应的计算域边界条件, 如表 1 所示。

2.3 可行性验证

为了验证网格处理效果及软件内部计算模型的准确性, 将数值模拟得到的缸内平均压缩压力与主机在燃气模式、90% 负荷下缸压传感器监测到的缸内压缩压力曲线进行对比, 结果如图 4 所示。从图 4 可见: 两者很好地贴合, 从而可确认边界条件及计算模型选用的准确性。

表1 计算域边界条件

边界条件	数值
扫气压力/kPa	424
扫气温度/K	302.75
排气压力/kPa	410
排气温度/K	618.15
燃气压力/kPa	1 410
燃气温度/K	308.75
排气阀关闭正时/(°)	106
排气阀开启正时/(°)	272

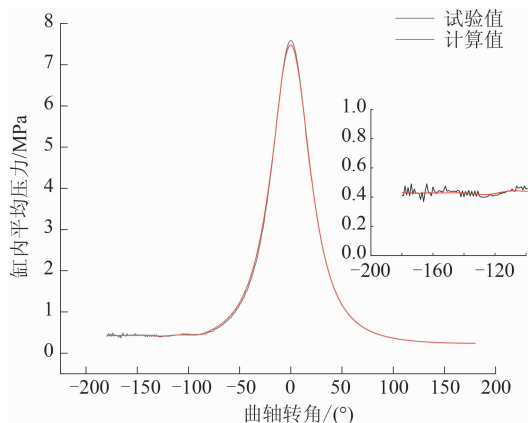


图4 90%负荷缸内压缩压力台架试验值与仿真计算值对比

2.4 计算结果分析

数值模拟得到不同活塞位置、不同燃气喷射时刻的缸内甲烷含量分布,如图5所示。从图5可以看出:燃气从GAV喷出时,由于动量较大,堆积在气缸套内壁并在缸内涡流的作用下向上做螺旋运动。

随着燃气喷射时刻推迟,甲烷的运动相位滞后,甲烷扩散至排气阀的时刻推迟;在同一曲轴转角下,燃气喷射正时越晚,排气阀附近的甲烷含量越低,活塞头附近的甲烷含量越高(见图5第二、三列)。这个现象与前述的“气垫”效应相印证。

从燃气喷射正时为 230° (第一行)的一组云图中可以发现:压缩冲程末期活塞头上方甲烷含量较低,“气垫”位于活塞头上方(燃烧室下部);随着燃气正时延迟至 250° (第三行),活塞头四周甲烷集聚,“气垫”位置上移至排气阀下方(燃烧室上部)。

另一方面,过早的燃气喷射正时会导致甲烷物理扩散逃逸(排气阀关闭前甲烷从排气阀处随混合气逃逸至排气集管)的风险增加。

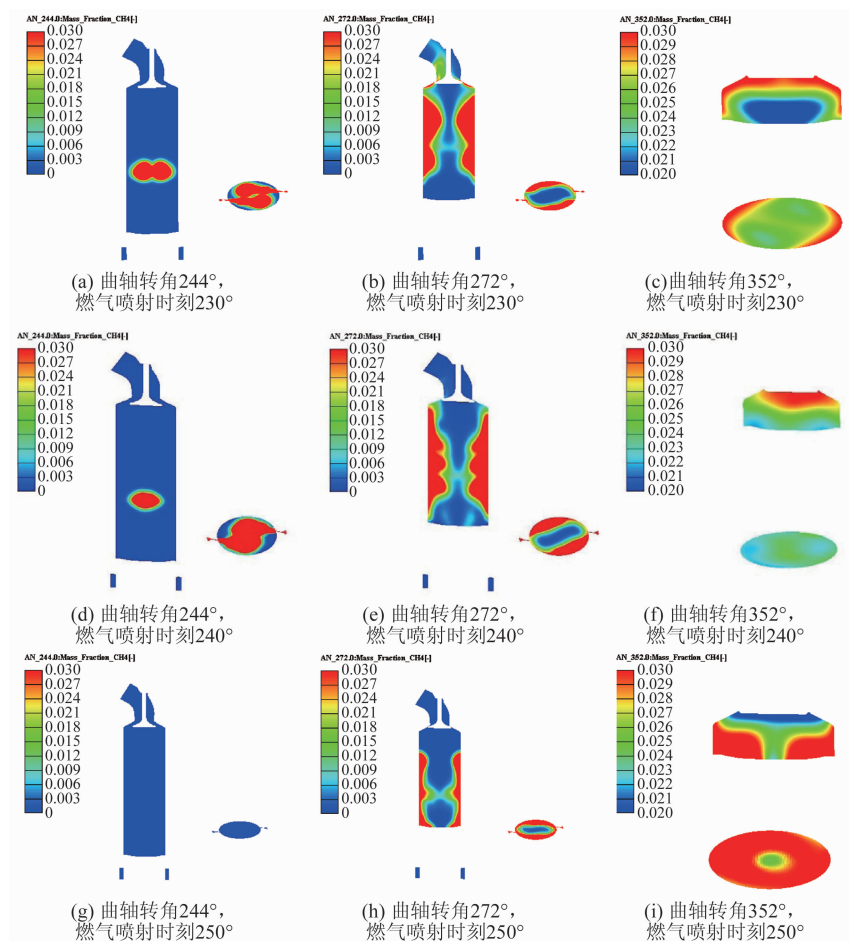


图5 不同燃气喷射正时下缸内的甲烷分布云图

3 台架试验

为了验证“气垫”效应以及其对主机燃烧状态的重要性，在某大型双燃料主机上做相关台架试验。由于缸内气流可视化在工厂较难实现，故从缸内燃烧状态及最终的废气排放两方面进行侧面印证。

3.1 试验仪器

试验使用的部分仪器如表 2 所示。

表 2 仪器及型号

仪器、仪表名称	型号
水力测功器	AVL-25M2N 350 F4
燃烧分析仪	AVL-INDICOM
质量流量计	80F40-10C2/0/DN40
干湿度计	GM1360
大气压力表	DYM3

试验用引燃油为 0#柴油，其物理/化学属性见表 3。

表 3 引燃油物理/化学属性

物理/化学属性	数值
密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	820.2
运动黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	2.75
净热值/ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	43.155
硫质量分数	3×10^{-5}
十六烷指数	55

试验用天然气密度为 0.7426 kg/m^3 ，低热值为 38.292 MJ/m^3 ，甲烷体积分数为 90.91%。

3.2 试验结果分析

试验通过改变单一因子：燃气喷射正时，观察主机在 75% 负荷和 90% 负荷下活塞头附近温度变化（对应燃气喷射正时变化引起的活塞头四周甲烷浓度变化）及废气排放中甲烷的含量变化（对应燃气喷射正时变化导致的甲烷物理扩散现象）。

试验得到的活塞头附近温度以及废气中甲烷含量随燃气配气正时的变化规律见图 6，横坐标 0 对应实际主机配气正时初始默认值，“+”和“-”分别代表正时滞后和提前。

从图 6 (a) 可以看出：在 75% 负荷和 90% 负荷下，活塞顶附近温度均随燃气喷射正时的推迟而升高，活塞头热负荷加剧。主要原因是随着喷射正时的推迟，活塞头上部的“气垫”效应减弱并逐渐消失，燃气集聚。相比之下，90% 负荷时活塞头附近温度要比 75% 负荷时低，且温度随燃气正时的推迟变化并不明显。造成此种现象的原因是随着

负荷的升高，燃烧变得剧烈，从而进入动态燃烧控制（dynamic combustion control, DCC）模式。控制系统在降低燃气供给的同时，补充燃油喷射以维持功率输出。燃气的减少减弱了缸内燃气的集聚效应，进而降低了活塞头附近温度。

从图 6 (b) 可以看出：在 75% 和 90% 负荷下，甲烷逃逸量随燃气喷射正时的推迟而减少。这主要是因为随着燃气喷射正时的推迟，甲烷在压缩冲程的物理逃逸逐渐减少并最终趋于消失（排气阀关闭时，甲烷未扩散至排气阀附近）。90% 负荷时甲烷逃逸的量要比 75% 时大，但变化趋势一致。总之，在 DCC 工作模式下，稀薄燃烧存在明显的甲烷逃逸现象。

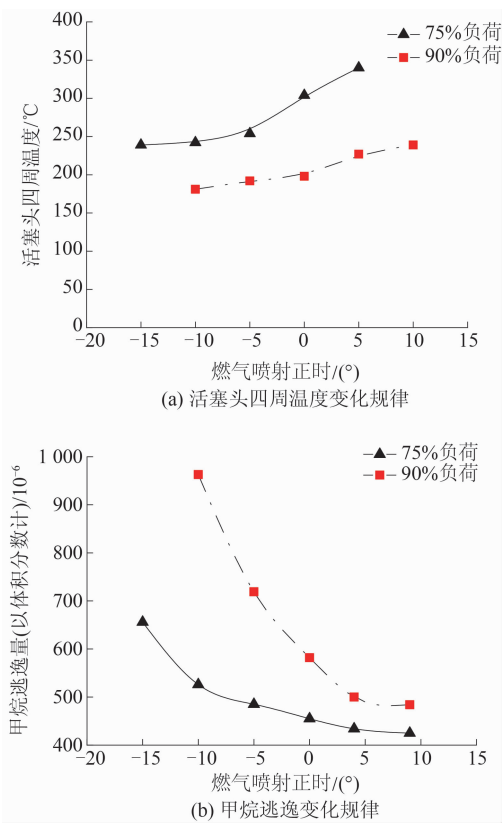


图 6 不同燃气喷射正时下活塞头四周温度及甲烷逃逸规律

4 结论

燃气配气正时对二冲程低压双燃料发动机的缸内燃气-空气混合效果及甲烷逃逸有不可忽视的影响。

(1) 合理的燃气配气正时有助于缸内“气垫”效应的形成。燃气配气正时提前，燃烧室内会形成下层“气垫”效应，该效应可以降低活塞头附近的甲烷集聚，减轻活塞头及其附属零部件的热负荷。燃气配气正时滞后，燃烧室内会形成上层

“气垫”效应,该效应可以有效缓解燃气与缸内高温废气以及高温零部件的接触,有助于降低不正常燃烧发生的概率。

(2) 燃气喷射正时提前会增加甲烷在压缩行程的物理扩散逃逸量,而燃气喷射正时推迟这种现象可得到有效控制。

(3) 由于甲烷逃逸对于 X-DF 主机来说不可避免,所以在缸内不发生早燃的情况下,可设置尽可能早的燃气喷射正时,以提高活塞头附近零部件的可靠性。目前在 X-DF 2.1 版本中,甲烷逃逸已通过引入智能废气再循环系统(iCER)得到有效控制。

(上接第 4 页)

参考文献

- [1] IMO Marine Environment Protection Committee. Resolution MEPC. 304 (72) -Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships [R/OL]. (2018-04-13) [2021-03-12]. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf).
- [2] DNV. AMMONIA as a marine fuel white paper [R/OL]. (2020-11-20) [2021-03-12]. <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>.

(上接第 9 页)

5 应用案例及展望

某单位以一台 6230SG 天然气机为原动机,与德国西门子技术制造的 1FC6 发电机配套,组成 600 kW 应急发电机组,2014 年 1 月交付使用。市电失电时,机组自动启动,在 30 s 内对外供电;市电恢复正常后,自动切换和停机,由市电对负载供电。

该机组直接采用城市管网的天然气为燃料,使用十分方便。机组采用隔振器弹性支承,所有外接

参考文献

- [1] 马义平,曾向明,魏海军,等.国内外船用 LNG 动力发动机发展现状[J].中国航海,2016,39(3):20-25.
- [2] 谷林春.两种主流双燃料柴油机特性对比[J].中国船检,2020(2):72-75.
- [3] 冯立岩,刘超,吴瑶.低速二冲程双燃料船用主机气缸润滑油自燃引发不正常燃烧问题的研究[J].柴油机,2017,39(1):1-5.
- [4] HAN Z Y, REITZ R. Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG $k-\varepsilon$ models [J]. Combustion Science and Technology, 1995, 106(4/6):267-295.
- [3] MAN Energy Solutions. MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia, (2020-11-01) [2021-03-12]. <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels/ammonia>.
- [4] ABS. Sustainability white paper: ammonia as marine fuel [R/OL]. (2020-10-29) [2020-03-12]. <https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/sustainability-white-paper-ammonia-as-marine-fuel>.
- [5] IMO. Revised MARPOL Annex VI [R/OL]. (2017-01-01) [2021-03-12]. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx>.

管路均采用挠性接头连接,机组安放在办公大楼下,发动机运行时,机械振动不对外传播。

在当前节能减排的大环境下,天然气发动机将拥有良好的市场前景。

参考文献

- [1] 中国船级社.钢质海船入级规范[R/OL].(2018-06-29)[2021-08-22].<https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=201900001000008486>.