

舰船柴油多喷嘴燃烧室排放优化实验研究*

周士超¹, 林宇震^{1,2}, 许全宏^{1,2}, 王柏森^{1,2}, 程旭³

(1. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 102206;

2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 102206;

3. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 根据舰船燃气轮机燃烧室的典型工况参数设计了一种蒸发管式多喷嘴燃油分级低排放燃烧室, 并对部分喷嘴工作的小工况(35%最大功率工况)开展了供油主燃级喷嘴数量、值班级燃油比例、油气比、掺混孔排布对排放及燃烧效率的优化实验研究。试验结果表明: 当油气比不变时, 采用三个主燃级喷嘴供油, 燃烧效率最高, CO排放浓度最低。但是随着油气比继续增大, 不同分级方式的CO排放浓度均稳定在 $170 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$ 附近, 说明通过调节燃油分级和增大油气比的方式优化CO排放浓度和燃烧效率的潜力有限。此外, 采用三个主燃级喷嘴供油且油气比不变的条件下, 值班级燃油比例低于0.08时, 掺混孔方案进一步有效降低燃烧室的CO排放浓度, 提高燃烧效率, 并减少 NO_x 排放浓度。采用3M分级方式结合9L150掺混孔方案, 通过增大油气比可以使燃烧室在小工况下的CO排放浓度降低至 $79 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$, 燃烧效率达到99.918%, NO_x 排放浓度达到 $190 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$ 。

关键词: 燃气轮机; 多喷嘴燃烧室; 燃油分级; 污染物排放; 蒸发管; 燃烧效率

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2025) 07-2407024-10

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2407024

1 引言

目前, 舰船燃气轮机已经成为各国海军在役舰船的主要动力装置, 其应用也成为海军现代化的重要标志^[1]。污染物排放是舰船燃气轮机燃烧室的重要性能指标之一, 燃烧室尾气中的氮氧化物(Nitrogen Oxide, NO_x)、CO等污染物会造成航线沿途城市的大气污染, 不同国家的港口城市对 NO_x 等污染物排放有着各自严格的限制要求^[2]。因此, 有必要对现有舰船燃气轮机燃烧室的污染物排放性能进行优化设计及实验研究。

目前国际上应用最广泛的低排放燃烧技术为贫油预混预蒸发燃烧技术(Lean Premixed Pre-vaporized, LPP), 通过贫油预混燃烧使燃烧区的温度降低到低 NO_x 排放区间^[3]。LPP燃烧器的设计需要考虑燃料在高温高压下的自燃和回火问题, 而且其稳定工

作范围较窄, 点熄火性能较差^[4], 一般需要搭配火焰稳定性较好的值班级燃烧器辅助燃烧, 值班级与主燃级LPP燃烧器分级方式有中心分级^[5-8]、径向分级^[9-10]、轴向分级^[11-12]等。

对于燃油分级燃烧室, 油气比和燃油比例分配是影响燃烧室燃烧性能的重要参数。头部当量比会随着燃烧室工况的升高而不断增加, 魏为等^[13]与李林等^[14]通过对中心分级燃烧室的排放实验研究发现, 油气比增大会导致燃烧室的燃烧效率和 NO_x 排放浓度升高, CO和未燃碳氢化合物(Unburned Hydrocarbons, UHC)排放浓度降低。而在燃烧室结构及进口参数不变的条件下, 通过调节主燃级喷嘴数量与值班级燃油比例, 可以有效控制燃烧室内的局部当量比, 进而影响燃烧室的污染物排放、燃烧效率及出口温度分布等性能。程明等^[15]采用数值模拟方法研究了双环预混旋流燃烧室中的燃油分配对燃烧室污

* 收稿日期: 2024-07-11; 修订日期: 2024-10-15。

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-III-0012-0055)。

作者简介: 周士超, 博士生, 研究领域为燃气轮机低排放燃烧室设计。

通讯作者: 许全宏, 博士, 副研究员, 研究领域为航空发动机低排放燃烧技术、燃烧室火焰筒热防护技术。

E-mail: xuquanhong@buaa.edu.cn

引用格式: 周士超, 林宇震, 许全宏, 等. 舰船柴油多喷嘴燃烧室排放优化实验研究[J]. 推进技术, 2025, 46(7):2407024. (ZHOU S C, LIN Y Z, XU Q H, et al. Experimental study on emission optimization of marine diesel multi-nozzle combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(7):2407024.)

染物排放、出口温度分布的影响,发现在大功率工况条件下,值班级燃油比例降低会使燃烧室的温度场更加均匀,热点高温区域减小,导致 NO_x 和CO的排放显著降低。王志超等^[5]采用试验方法也得出了类似的结论,并通过化学自发光图像分析发现,值班级火焰在 NO_x 排放生成中占主导地位。然而,值班级燃油比例在小工况条件下对 NO_x 排放浓度的影响却与大工况不同,王晶等^[7]对单头部中心分级燃烧室的数值模拟研究中却发现,小工况下 NO_x 排放随着值班级燃油比例增大而增大。上述研究表明通过调节值班级与主燃级的燃油分级比例,可以得到燃烧室污染物低排放控制策略。

在燃烧室头部结构不变的条件,文献[9,16-17]发现,通过改变掺混孔的结构或位置可以有效改善燃烧室 NO_x 排放、出口温度分布及燃烧效率,同时对燃烧室的其他性能影响较小。因此,调节掺混孔位置及结构也可以作为一种排放优化策略。

为了对某环管型舰船燃气轮机燃烧室污染物排放过高的问题进行优化,本文将环管燃烧室的一个单管提取出来作为研究对象,根据该燃烧室运行的典型工况参数设计了一种燃料为轻柴油的多喷嘴低排放单筒燃烧室,该燃烧室在满功率大工况下采用全部喷嘴供油,喷嘴局部当量比为0.46, NO_x 排放浓度低于 $50 \times 10^{-6} @ 15\% \text{O}_2$,但是在35%功率的小工况下,燃烧室油气比降低,继续采用全部喷嘴供油时喷嘴局部当量比过低,存在燃烧效率过低与CO排放浓度过高的问题。为了优化燃烧室的小工况的排放和燃烧效率等性能,开展了开展供油主燃级喷嘴数量、值班级燃油比例、油气比、掺混孔排布对排放及燃烧效率影响的试验研究,形成了满足 NO_x 和CO排放标准的低排放燃烧组织方案。

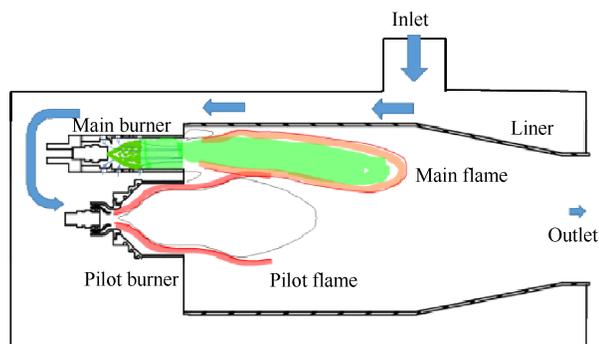
2 研究方法

2.1 多喷嘴燃烧室结构

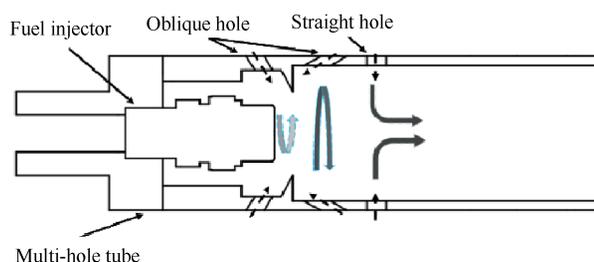
本文的研究对象为一种多喷嘴低排放单筒燃烧室。多喷嘴燃烧室具有负荷调节比高、稳定工作范围宽、工况调节灵活等特点,适用于工况切换频繁的舰船燃气轮机燃烧室。燃烧室的示意图如图1(a)所示,头部中心为带有渐扩限制域的值班级单元,值班级外围周向均匀布置了9个相同的多孔蒸发管主燃级单元如图1(b)所示。主燃级采用多孔蒸发管结构见图1(c),其优势在于其能高效制备出掺混均匀、蒸发完全的油气混合物,且结构简单、组合灵活、径向尺寸小,对于径向尺寸受限的舰船燃气轮机多喷嘴

燃烧室是很好的选择。

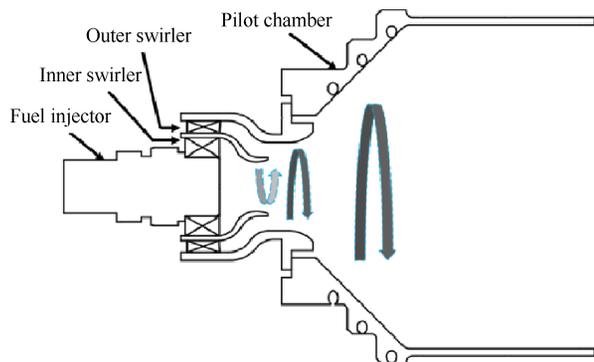
为了更贴近原型燃烧室的流动状态,本研究中模型燃烧室的空气先从侧面进入机匣,经过折转后再从头部进入到火焰筒中,燃烧室基准方案设计头部气量分配为78%,冷却气量占22%,火焰筒采用多斜孔冷却方式,冷却孔直径为1 mm,倾角为 30° 。燃烧室共分三级供油,在点火启动阶段,仅值班级供油,小工况时值班级和部分主燃级单元供油,在大工况时值班级和九个主燃级单元供油,每个供油的主燃级单元燃油流量保持相同。



(a) Sketch of multi-nozzle combustor



(b) Sketch of main stage unit



(c) Sketch of pilot stage unit

Fig. 1 Sketch of combustor

主燃级的气动结构如图1(b)所示,为具有三排不同直径与倾角的射流孔蒸发管,蒸发管内径 D_e 为29 mm,三排射流孔直径与蒸发管内径之比 D_h/D_e 分别为0.16,0.22,0.22,倾角分别为 40° , -40° , 0° 。燃油

在蒸发管内与空气进行充分混合与蒸发,在蒸发管出口形成高速的柴油空气混合物。主燃级火焰为贫预混柴油空气高速射流火焰。高速射流火焰的火焰稳定性较差,在进口温度较低,且主燃级当量比较低时独立稳火,需要设计值班级稳焰。

值班级火焰为典型的旋流液雾扩散火焰,其气动结构如图1(c)所示,为双级轴向反旋的旋流杯结构,其中外旋流数为1.1,内旋流数为0.8,内外旋流器的气量分配为4:6。在值班级旋流杯外设置了一个切向渐进补气式的限制域,旋流杯与切向补气限制域的气量分配为4:6,这种设计使值班火焰上游的火焰根部燃油浓度更高,提高值班火焰稳定性,能够降低燃烧室的慢车贫油熄火边界。限制域的扩张部分有三排直径为2 mm的切向孔,切向孔的旋向与外旋流器相同,其作用是补充值班级气量,使值班级火焰在限制域内燃烧更为充分,同时使值班火焰不受到主燃级流动的影响。

主燃级和值班级都采用离心喷嘴供油,喷嘴流量数 q 为 $18.8 \text{ kg}/(\text{hMPa}^{0.5})$,喷雾锥角为 60° ,喷嘴SMD与喷嘴供油压差间的关系如图2所示,当喷嘴供油压差大于 0.7 MPa 时, $\text{SMD} < 50 \mu\text{m}$ 。

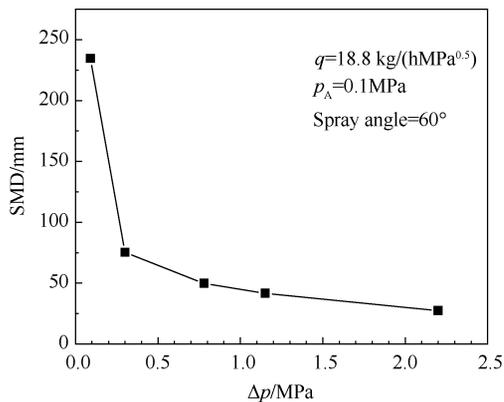


Fig. 2 Relationship between SMD of centrifugal nozzle and fuel supply pressure difference

2.2 试验系统

本次试验是在北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室的高温高压燃烧实验台上进行,采用燃气分析法测量燃烧室出口的产物及计算燃烧效率。试验系统如图3所示,试验系统包含供气系统、燃油系统、测试系统和燃气分析系统等四个部分。

试验气源由高压压气机压缩后进入储压缓冲罐,缓冲罐中的空气经过空气加热器进入到试验件。来流空气从试验件上方进入机匣环腔,经过折转后

再由头部及火焰筒冷却孔进入火焰筒内。试验台采用标准孔板流量计测量空气流量,测量精度为 $\pm 0.5\%$ ^[5]。燃烧室进口温度采用K型热电偶测量,测量精度为 $\pm 1\%$ 。压力测量采用薄膜压力传感器进行测试,测试精度为 $\pm 0.2\%$ 。舰船燃气轮机上使用的燃料一般为柴油,本文选择的燃料为-10号柴油,燃油供给采用挤压式供油,通过微流量调节阀来调节燃油流量,燃油流量通过科里奥利流量计进行测量,测量精度 $\pm 0.05\%$ 。

燃气分析系统包括采样耙、保温管路、燃气分析仪。采样耙采用等环面积开孔,共有9个1 mm直径的采样孔。采集的样气经保温管道进入燃气分析仪,保温管道的温度保持在 $165 \pm 5^\circ\text{C}$ 。燃气分析系统符合ICAO附件16的测量标准,共包含 NO_x , CO , CO_2 , O_2 和UHC五个模块,其中 NO_x 和UHC模块的测量精度为 $\pm 1\%$; CO , CO_2 和 O_2 模块的测量精度为 $\pm 2\%$ ^[14]。采用燃气分析法计算燃烧效率 η ,计算公式如式(1)所示,式中 φ_i 为气体组分的体积分数。本文将燃气分析仪测量的污染物排放浓度 C_i 通过式(2)折算到15%氧气含量下的污染物排放浓度。

$$\eta = 1 - \frac{\varphi_{\text{CO}_2} + 0.513\varphi_{\text{CO}} - 0.319\varphi_{\text{CH}_4}}{\varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CH}_4}} \quad (1)$$

$$(C_i)_{15\% \text{O}_2} = \frac{5.9C_i}{20.9 - 100\varphi_{\text{O}_2}} \quad (2)$$

2.3 试验方案

多喷嘴燃烧室在35%最大功率的小工况下采用值班级和部分主燃级喷嘴结合的供油策略,共分为两路供油,值班级一路,主燃级一路,主燃级一路的燃油流量平均分配给每个供油主燃级单元。在燃烧室总油气比和值班级燃油流量不变的条件下,供油主燃级单元数量变化将影响主燃级火焰的局部当量比,供油主燃级喷嘴数量越多,主燃级局部当量比越小。考虑到碳氢燃料的贫油可燃当量比0.5左右,当量比低于0.5或高于1.5,均会产生大量的未完全燃烧产物,影响燃烧效率,所以在小工况下本文选取主燃级喷嘴供油数量为3~5个。

根据主燃级单元的供油数量及组合方式不同,设计了三种主燃级分级方式如图4所示,分别为3M, 2M2M, 2M3M三种分级方式,3M分级方式为三个主燃级单元分散供油;2M2M分级方式为四个主燃级单元分为两组分散供油,每组有两个主燃级单元并列;2M3M分级方式为五个主燃级单元分两组分散供油,两组分别为两个主燃级单元并列和三个主燃级单元并列。

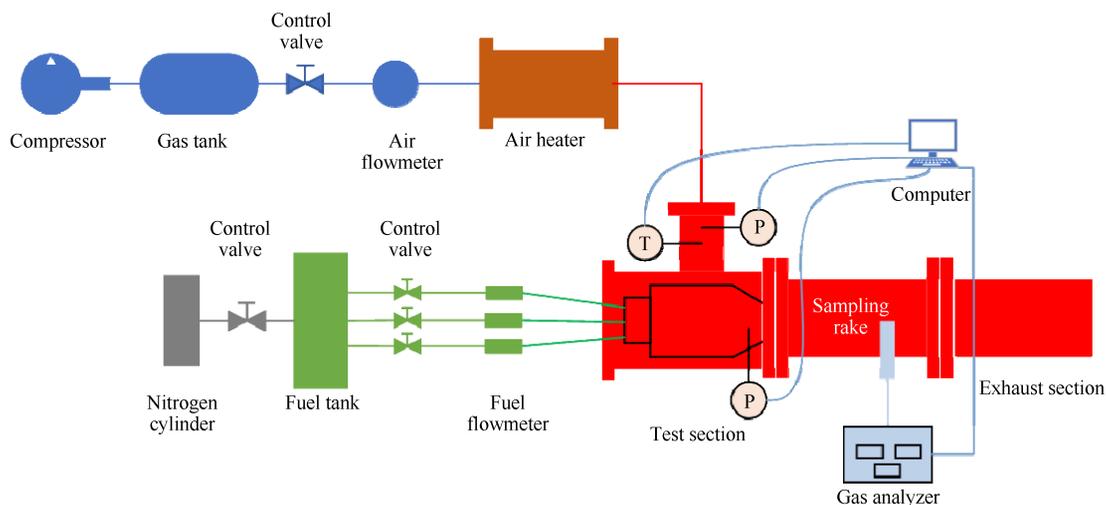


Fig. 3 Sketch of the experimental system

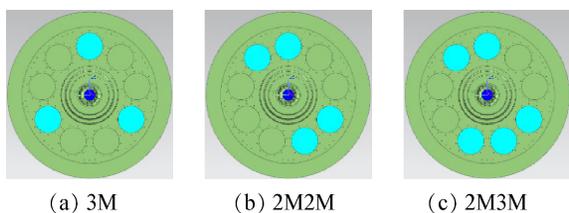


Fig. 4 Sketch of three fuel staging methods

对 3M 分级方式,采用掺混孔的方式进一步提高燃烧室的排放和燃烧效率,掺混孔开孔示意图如图 5 所示。本文布置掺混孔的主要目的是为主燃级火焰下游的燃气补氧并降低燃气温度,使下游的未完全燃烧产物进一步氧化,提高燃烧室在小工况下的排放性能和燃烧效率。在火焰筒上布置掺混孔主要考虑掺混孔的孔径、数量及其位置,孔径影响掺混孔的穿透深度,式(3)^[3]为横向射流最大穿透深度 Y_{max} 的半经验计算公式,其中 d_j 为掺混孔直径, J 为掺混孔射流与主流的动量比, θ 为掺混孔角度。本文掺混孔的孔径为 6 mm,倾角为 90° ,通过式(3)计算出掺混孔最大穿透深度刚好在主燃级射流的径向区域内。

$$Y_{max} = 1.15d_j J^{0.5} \sin\theta \quad (3)$$

掺混孔的数量影响了掺混空气的质量及热量交换效果,而掺混孔的轴向位置将会影响掺混气与燃气相互作用的时间及作用效果。本文以掺混孔距头部端壁的轴向距离、掺混孔数量为变量,设计了三组掺混孔方案如表 1 所示, N 为掺混孔数量, d_j 为掺混孔直径, L 为掺混孔中心距头部端壁的轴向距离,三个方案的掺混孔的直径 d_j 均为 6 mm,方案代号中,以 6L150 为例,表示在距头部端壁轴向距离 L 为 150 mm 处有 6 个直径 d_j 为 6 mm 的掺混孔,每个供油的主燃级单元对应 2 个孔,每组第一个孔的周向位置与主燃

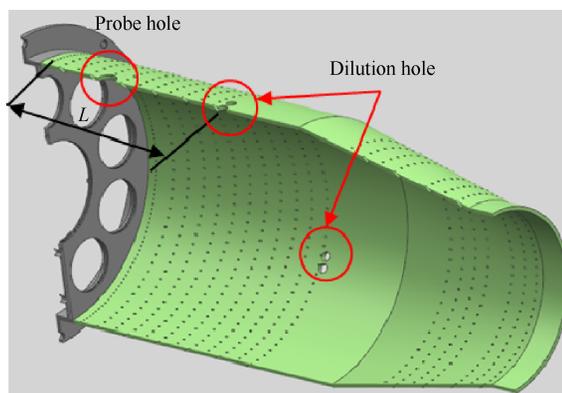


Fig. 5 Sketch of dilution holes of 3M fuel staging method

级单元中心相同,孔的阵列方向与值班级外旋流器旋向相同,间隔角为 5° 。通过三种掺混孔方案的对比,研究掺混孔数量及轴向位置对排放及燃烧效率的影响。为了减小掺混孔对头部气量分配的影响,在开掺混孔的同时堵住了火焰筒后段相同几何面积的冷却孔。

Table 1 Schemes of dilution holes

Scheme	N	d_j /mm	L /mm
6L150	6	6	150
6L100	6	6	100
9L150	9	6	150

2.4 试验工况

试验工况如表 2 所示,燃烧室进口压力 p_3 为 0.5 MPa,进口温度 T_3 为 659 K,进口空气流量 m_a 为 1.13 kg/s。对于 Case 1~3,将燃烧室总油气比 ϕ 保持在 0.017 2,研究三种分级方式下,值班级燃油比例 α 对排放及燃烧效率的影响, α 的范围从 0.06~0.3。值班级燃油比例 α 的定义为值班级燃油流量占总燃油流量之比。

对于 Case 4~6, 将值班级燃油比例 α 保持为 0.1, 研究三种分级方式下油气比 far 变化对排放及燃烧效率的影响。

Table 2 Test conditions

Case	Scheme	far	α
1	3M	0.017 2	0.08/0.1/0.15/0.2/0.3
2	2M2M	0.017 2	0.06/0.08/0.1/0.15/0.2/0.3
3	2M3M	0.017 2	0.06/0.08/0.1/0.15
4	3M	0.017 2~0.022 2	0.1
5	2M2M	0.017 2~0.023 2	0.1
6	2M3M	0.017 2/0.024 2	0.1
7	3M-6L150	0.017 2	0.06/0.08/0.1/0.15/0.2/0.3
8	3M-6L100	0.017 2	0.06/0.08/0.1/0.15/0.2/0.3
9	3M-9L150	0.017 2	0.06/0.08/0.1/0.15/0.2/0.3
10	3M-6L150	0.017 2~0.022 2	0.06
11	3M-6L100	0.017 2~0.022 2	0.06
12	3M-9L150	0.017 2~0.022 2	0.06

对于 Case 7~Case 9, 采用 3M 分级方式且油气比 far 为 0.017 2, 研究不同掺混孔方案下, 值班级燃油比例 α 对排放及燃烧效率的影响。对于 Case 10~12, 采用 3M 分级方式且将值班级燃油比例 α 保持在 0.06, 研

究不同掺混孔方案下油气比 far 变化对排放及燃烧效率的影响。

3 结果与讨论

3.1 燃油分级对排放的影响

针对图 4 中的三种燃油分级方式, 值班级燃油比例对排放的影响如图 6 所示, 图中误差棒来源于燃气分析仪示数稳定后采集数据经过计算得到的标准差。图 6(a) 为不同燃油分级方式下燃烧效率随值班级燃油比例 α 变化的曲线。可以看出, 不同燃油分级方式下, 燃烧效率大体上均随 α 升高而降低, 在 α 相同时, 3M 分级方式的燃烧效率最高, 2M2M 次之, 2M3M 燃烧效率最低。

图 6(b) 为不同燃油分级方式下 NO_x 排放浓度随 α 变化的曲线, 2M3M 分级方式的 NO_x 排放浓度几乎不随 α 改变, 2M2M 分级方式的 NO_x 随 α 升高而降低, 而对于 3M 分级方式, NO_x 排放浓度随 α 的升高呈先上升后下降的趋势。在相同的 α 下, 3M 分级方式的 NO_x 排放浓度最高, 2M2M 次之, 2M3M 最小。

图 6(c) 和图 6(d) 为不同燃油分级方式下 CO 和 UHC 排放浓度随 α 变化的曲线, 对于 2M3M 和 2M2M

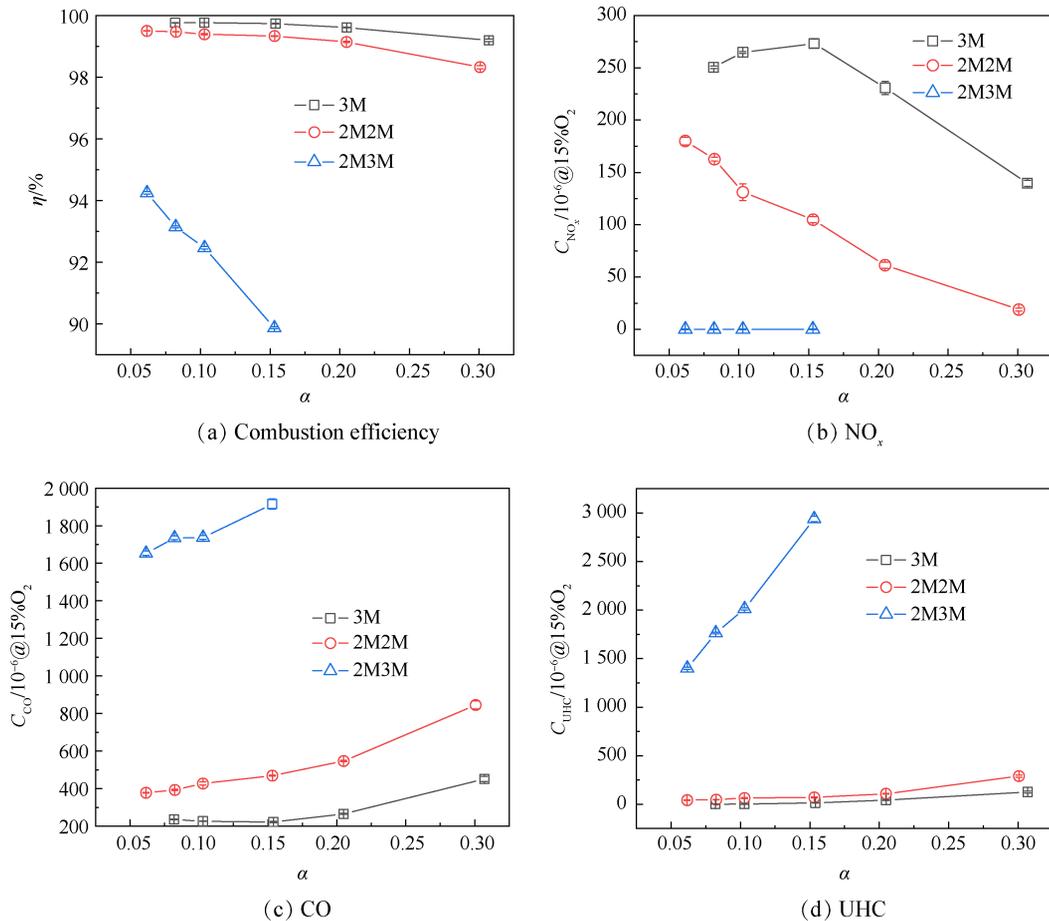


Fig. 6 Influence of pilot fuel staging ratio on combustion efficiency and emissions under different fuel staging methods

分级方式,CO和UHC排放浓度随 α 升高呈上升趋势,而对于3M分级方式,CO排放浓度随 α 升高呈先降低后升高的趋势。在相同的 α 下,2M3M分级方式的CO和UHC排放浓度要远高于2M2M和3M分级方式。

图7为总油气比 far 是0.017 2时,在三种燃油分级方式下,不同值班级燃油比例 α 对应的值班级当量比 Φ_p 和主燃级当量比 Φ_m 。不同燃油分级方式下的供油主燃级单元数量不同,造成主燃级当量比 Φ_m 数值的差异。3M分级方式的 Φ_m 最高,在0.8~1.1,2M2M次之,在0.6~0.84,2M3M分级方式的 Φ_m 最低,在0.6~0.67。主燃级当量比 Φ_m 的不同解释了不同分级方式下排放及燃烧效率呈现的差异。2M3M分级方式由于 Φ_m 过低,导致主燃级火焰温度过低,产生了大量的CO和UHC等不完全燃烧产物,造成该方案的燃烧效率及 NO_x 排放浓度偏低。对于2M2M分级方式,随着 α 升高, Φ_m 在低于恰当比一侧单调降低,火焰温度也随之单调降低,所以其燃烧效率和 NO_x 排放浓度也随 α 单调降低,CO和UHC排放浓度随 α 单调升高。对于3M分级方式,其燃烧效率、CO和 NO_x 排放浓度在 α 为0.15附近时存在一个极大值点,此处主燃级当量比 Φ_m 在恰当比附近,火焰温度达到最高,因此燃烧效率与 NO_x 排放浓度均达到了极大值,CO排放浓度达到极小值。

综合来看,小工况下采用3M分级方式供油,主燃级当量比 Φ_m 最高,CO和UHC排放浓度最小,燃烧效率最高,但产生的 NO_x 排放浓度同样最高;采用2M2M分级方式供油,燃烧效率比3M分级方式稍低, NO_x 排放浓度相对于3M分级方式有大幅度降低;采用2M3M分散模式供油时,虽然几乎没有 NO_x 排放产生,但是产生了大量的CO和UHC排放,燃烧效率也极低。

将值班级燃油比例 α 保持在0.1不变,改变燃烧

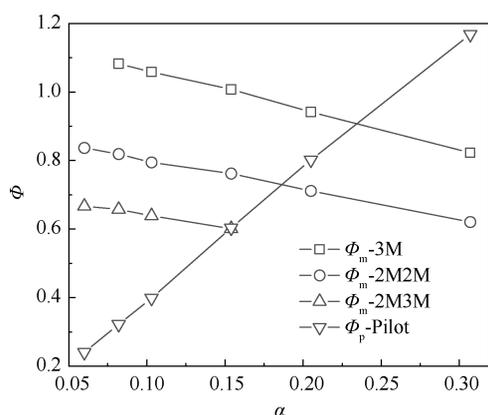


Fig. 7 Correlations between the pilot fuel staging ratio, the pilot equivalence ratio and the main stage equivalence ratio under different fuel staging methods ($far=0.0172$)

室的总油气比 far , far 变化对燃烧室排放的影响如图8所示。图8(a)为不同分级方式下燃烧效率随 far 的变化曲线,3M和2M2M分级方式的燃烧效率均随 far 升高呈先上升后下降的趋势,而2M3M分级方式的燃烧效率在 far 从0.017 2升高到0.024 2的范围内,仍然保持上升的趋势。

不同分级方式下 NO_x 排放浓度随 far 的变化趋势如图8(b)所示,3M分级方式的 NO_x 随 far 升高呈降低趋势,2M2M分级方式的 NO_x 排放浓度随 far 升高呈先上升后下降的趋势,而2M3M分级方式的 NO_x 排放浓度随 far 升高呈上升趋势。

不同分级方式下CO排放浓度随 far 的变化趋势如图8(c)所示,可以看出,3M和2M2M分级方式的CO排放浓度都随着 far 升高呈先降低后升高的趋势,且CO排放浓度最小值基本都稳定在 $170 \times 10^{-6} @ 15O_2$ 附近,而2M3M分级方式的CO排放浓度随着 far 升高不断降低。UHC排放浓度随着 far 的变化趋势如图8(d)所示,三种分级方式的UHC排放浓度均随 far 增大而呈先降低到最后基本保持不变,但2M3M分级方式的初始UHC排放浓度高达 $2000 \times 10^{-6} @ 15\%O_2$,对 far 的变化更为敏感。

值班级燃油比例 α 为0.1时,不同分级方式下的主燃级当量比 Φ_m 和值班级当量比 Φ_p 随油气比 far 变化如图9所示。燃烧室的 far 升高时,值班级当量比 Φ_p 和主燃级当量比 Φ_m 均呈升高趋势。3M分级方式的 Φ_m 在大于恰当比一侧上升,火焰温度会随 Φ_m 升高而降低,所以3M分级方式的 NO_x 排放浓度随 far 升高而降低,2M2M分级方式的主燃级当量比 Φ_m 从0.8升高到1.07,超过了恰当比,主燃级火焰温度先升高后降低,所以2M2M分级方式的 NO_x 排放浓度随 far 升高先增大后减小。2M3M分级方式的主燃级当量比 Φ_m 在小于恰当比一侧上升,火焰温度随主燃级当量比升高而升高,因此2M3M分级方式的 NO_x 排放浓度随 far 上升而增大。

3.2 掺混孔对排放的影响

针对3M分级方式 NO_x 排放过高,且需要进一步降低CO排放提高燃烧效率的需求,采用在火焰筒上开掺混孔的方式来进一步优化燃烧室在小工况下的排放性能。掺混孔可以对主燃级火焰下游的燃气进行补氧,使未完全燃烧的CO和UHC等不完全燃烧产物进一步氧化,同时降低火焰温度,进一步抑制 NO_x 的生成。

掺混孔对燃烧效率及排放的影响如图10所示,图10(a)为不同掺混孔方案下的燃烧效率随值班级燃油比例 α 变化曲线,当 α 从0.06升高至0.3时,掺混

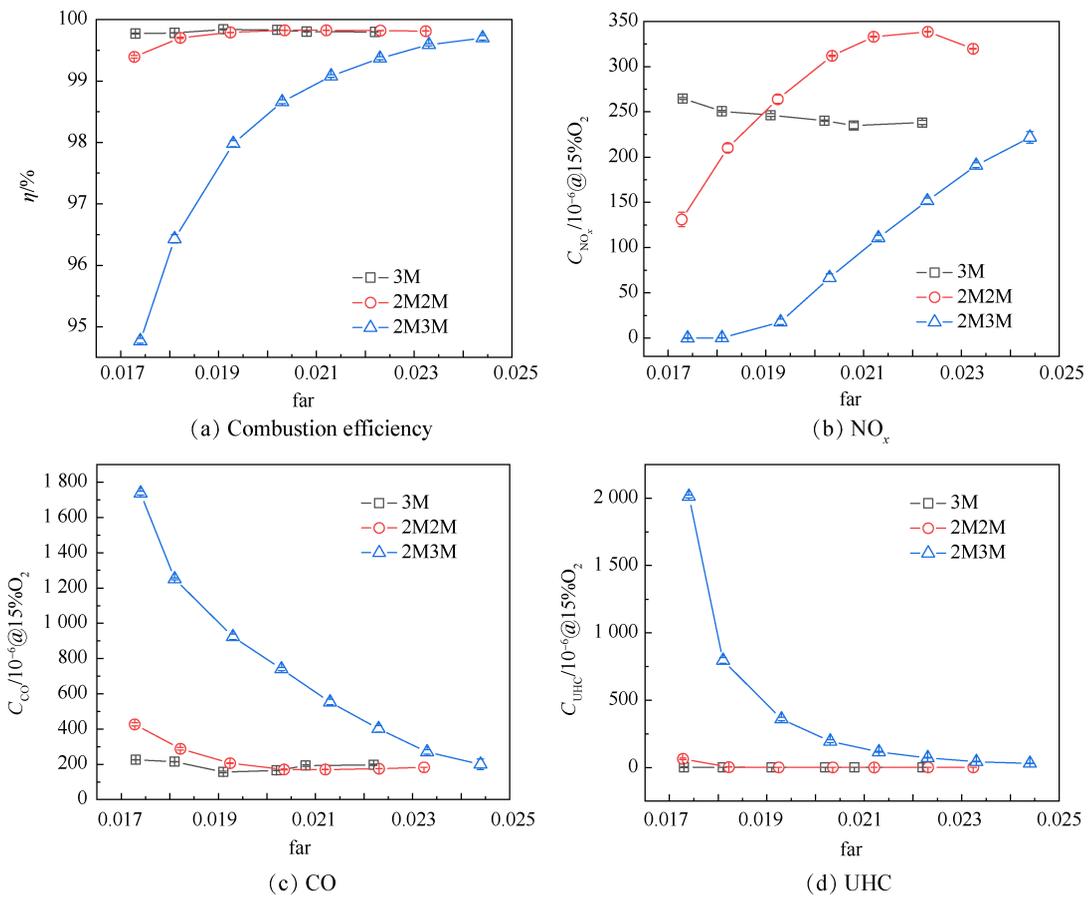


Fig. 8 Influence of fuel air ratio on combustion efficiency and emissions under different fuel staging methods ($\alpha=0.1$)

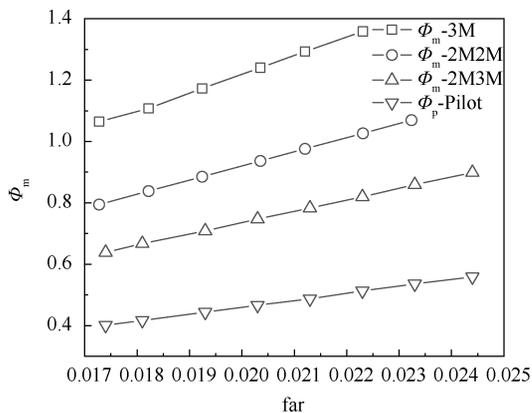


Fig. 9 Correlations between fuel air ratio, the pilot equivalence ratio and the main stage equivalence ratio under different fuel staging methods ($\alpha=0.1$)

孔方案的燃烧效率呈单调下降趋势,而未加掺混孔方案的燃烧效率呈先短暂上升后下降趋势。 α 为0.06时,掺混孔方案的燃烧效率均高于未加掺混孔方案的极大值99.77%,说明掺混孔在主燃级当量比偏富的时候可以起到补充氧气促进未燃产物进一步氧化的效果,来提高燃烧效率。在图10(c)不同掺混孔方案对CO排放的曲线中也同样有这种趋势。

图10(b)为不同掺混孔方案下 NO_x 排放浓度随值

班级燃油比例 α 变化曲线,可以看出,所有掺混孔方案的 NO_x 排放浓度均比未开掺混孔方案的 NO_x 排放浓度要更低。在 α 下,6L100方案要比6L150方案的 NO_x 排放浓度更低,这是因为掺混孔距头部端壁更近时,低温的掺混空气更早与主燃级火焰掺混,使高温区的停留时间变短,对于降低 NO_x 排放更有利。与6L150方案相比,9L150方案的掺混孔数量更多,掺混空气更多,因此9L150方案的 NO_x 排放浓度要更低。

图10(c)和图10(d)为不同掺混孔方案下CO和UHC排放浓度随值班级燃油比例 α 变化的曲线,CO和UHC排放浓度的变化趋势基本与燃烧效率相反。随着 α 从0.06升高至0.3,掺混孔方案的CO排放浓度呈升高趋势,而未加掺混孔方案的CO排放浓度是呈先降低再升高趋势的。掺混孔方案在 α 低于0.08时,均低于未加掺混孔方案的极小值 $220 \times 10^{-6}@15\%O_2$,更具有降低CO排放浓度和提高燃烧效率的潜力。结合图7来看,掺混孔方案在主燃级当量比接近1时,可以降低燃烧室的CO和 NO_x 排放浓度并提高燃烧效率。

掺混孔方案下油气比far对排放浓度及燃烧效率的影响如图11所示。图11(a)为不同掺混孔方案下油气比对燃烧效率的变化曲线,随着far增大,燃烧效

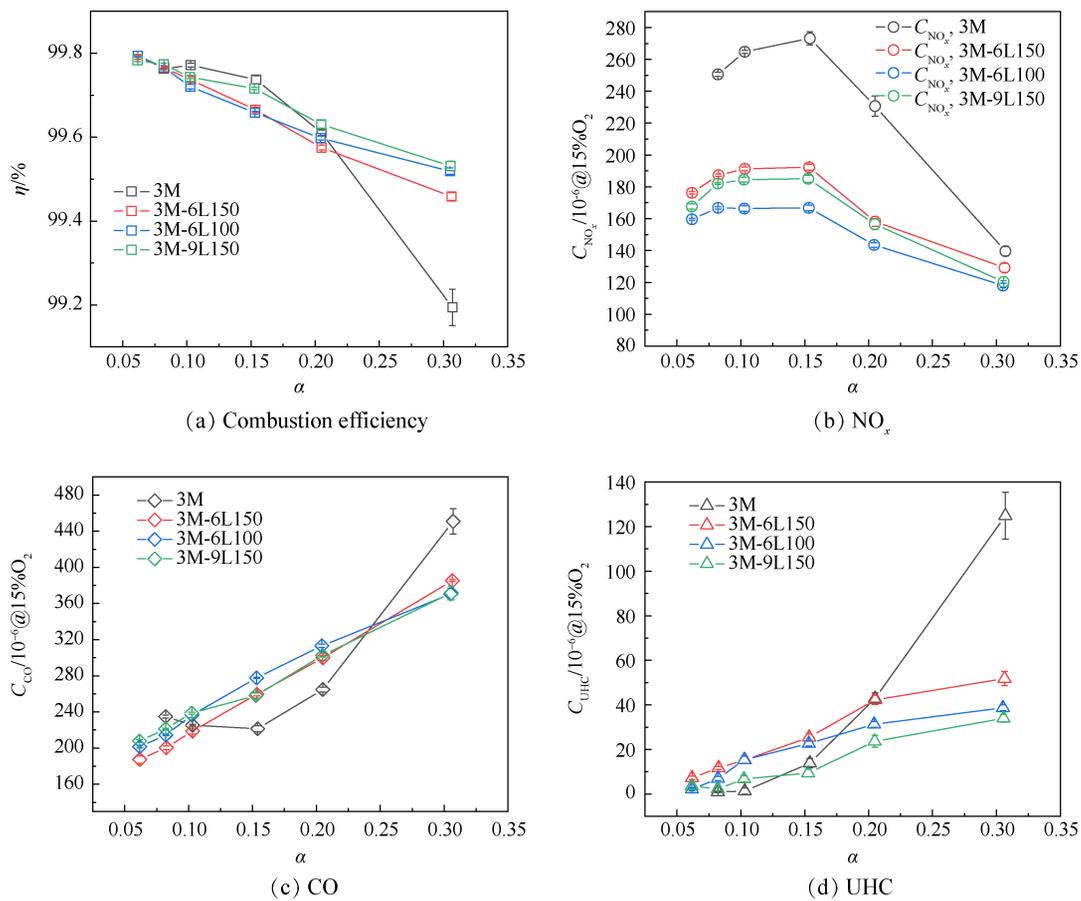


Fig. 10 Influence of pilot fuel staging ratio on combustion efficiency and emissions under different dilution hole designs

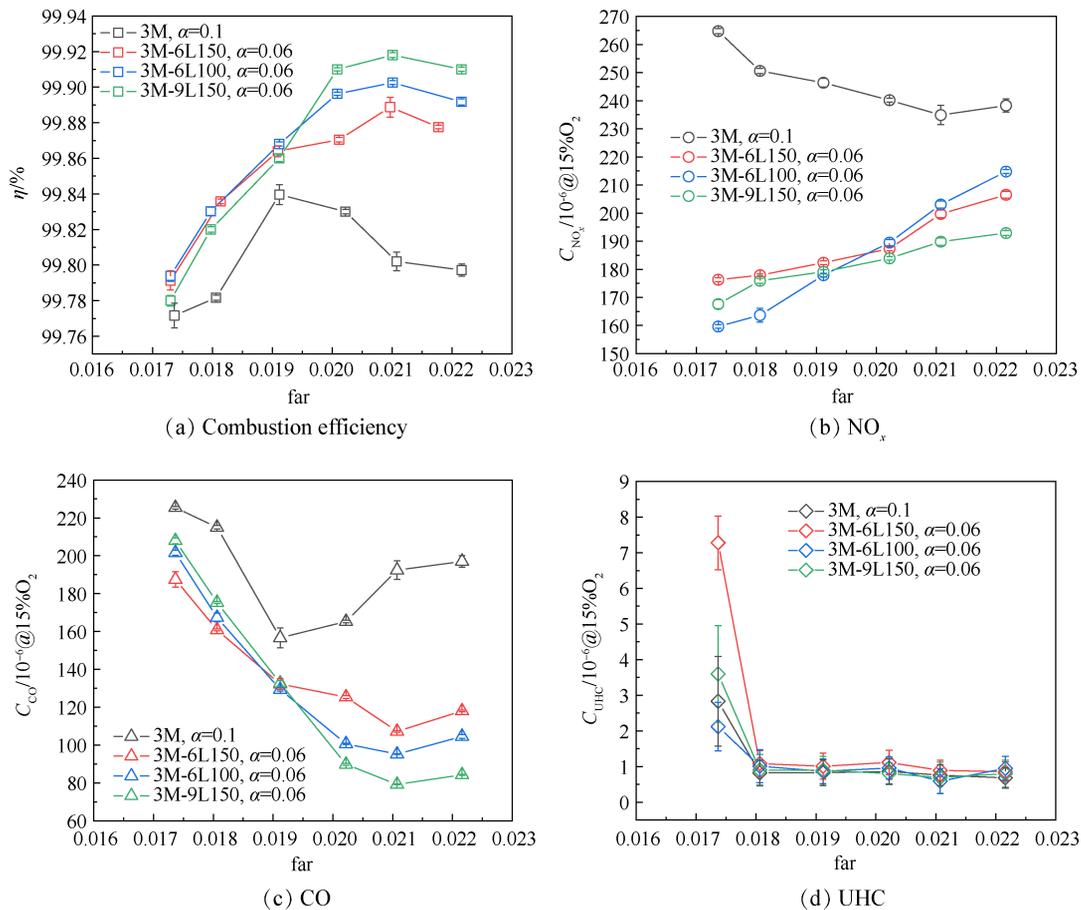


Fig. 11 Influence of fuel air ratio on combustion efficiency and emissions under different dilution hole designs

率均呈先上升后下降的趋势,且掺混孔方案的燃烧效率均比未加掺混孔方案的燃烧效率要高,图11(c)中CO排放浓度随 far 的变化趋势与燃烧效率相反。

图11(b)为不同掺混孔方案下 far 对 NO_x 排放浓度的影响,在相同 far 下,所有掺混孔方案的 NO_x 排放浓度均低于未加掺混孔方案。此外,未加掺混孔方案的 NO_x 排放浓度随 far 增大呈下降趋势,而掺混孔方案的 NO_x 排放浓度随 far 增大均呈上升趋势,当 far 增大到超过0.019时,9L150方案的 NO_x 排放浓度最低。

图11(d)为不同掺混孔方案下UHC排放浓度随 far 的变化曲线,在 far 为0.0172附近时,还存在着少量的UHC排放,随着 far 的升高,所有方案的UHC排放浓度均降低至 $1 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$ 。

在所有方案里,随着油气比 far 升高,9L150方案在降低CO和 NO_x 排放浓度,提高燃烧效率方面的潜力最大,在油气比为0.021时,燃烧效率达到了99.918%,CO排放浓度最小值达到 $79 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$,UHC排放浓度达到 $0.7 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$,此时 NO_x 排放浓度为 $190 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$ 。

4 结论

本文通过研究,得到如下结论:

(1)在小工况下当油气比不变时,主燃级采用3M供油方式,燃烧效率最高,CO排放浓度最低,但该方案的 NO_x 排放浓度也最高。

(2)随着油气比增大,不同分级方式的CO排放浓度均呈先减小后基本不变的趋势,且CO排放浓度最终稳定在 $170 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$,说明通过调节值班级燃油比例和增大油气比的方式优化CO排放和燃烧效率的潜力有限。

(3)当油气比为0.0172时,值班级燃油比例在0.06~0.08,采用掺混孔方案的3M供油方式可以有效降低燃烧室的CO排放,提高燃烧效率。

(4)将值班级燃油比例保持0.06,随着油气比增大至0.021,9L150掺混孔方案可以将CO最小降低至 $79 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$,燃烧效率达到99.918%,UHC排放浓度达到 $0.7 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$,此时 NO_x 排放浓度为 $190 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$ 。

因此通过增大油气比与掺混孔方案结合,可以对燃烧室的CO排放和燃烧效率进一步优化。

致谢:感谢国家科技重大专项的资助。

参考文献

[1] 闻雪友,任兰学,祁龙,等. 舰船燃气轮机发展现

状、方向及关键技术[J]. 推进技术, 2020, 41(11): 2401-2407.

WEN X Y, REN L X, QI L, et al. Development and key technologies in marine gas turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(11): 2401-2407. (in Chinese)

[2] CONTINI D, MERICO E. Recent advances in studying air quality and health effects of shipping emissions[J]. Atmosphere, 2021, 12(1).

[3] LEFEBVRE A H, BALLAL D R. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions[M]. US: Taylor & Francis Group, 2010.

[4] 黄勇,林宇震,樊未军,等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009:393-418.

[5] WANG Z C, LIN Y Z, WANG J C, et al. Experimental study on NO emission correlation of fuel staged combustion in a LPP combustor at high pressure based on NO-chemiluminescence[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(2): 550-560.

[6] ZHANG M, FU Z B, LIN Y Z, et al. CFD study of NO_x emissions in a model commercial aircraft engine combustor[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(6): 854-863.

[7] 王晶,张漫,张弛,等. 单头部模型燃烧室燃烧组织及 NO_x 排放[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 94-103.

WANG J, ZHANG M, ZHANG C, et al. Combustion organization and NO_x emission in a single sector model combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 94-103. (in Chinese)

[8] ZHANG M, WU H, WANG H. Numerical prediction of NO_x emission and exit temperature pattern in a model staged lean premixed prevaporized combustor [R]. ASME 2013-GT-95325.

[9] 田园,耿俊杰,孙逸凡,等. 天然气径向分级燃烧室低 NO_x 排放的优化研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(4): 660-669.

TIAN Y, GENG J J, SUN Y F, et al. Optimization investigation of low NO_x emissions of natural gas radially staged combustor [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(4): 660-669. (in Chinese)

[10] LIN Y Z, PENG Y H, LIU G E. Investigation on NO_x of a low emission combustor design with multihole premixer-prevaporizer[R]. ASME 2004-GT-53203.

[11] BANK R V D, SCHILLING T. Development of an ultra-low NO_x LP(P) burner[R]. ASME 2004 GT-53341.

[12] KARIM H, NATARAJAN J, NARRA V, et al. Staged combustion system for improved emissions operability and flexibility for 7HA class heavy duty gas turbine en-

- gine[R]. ASME 2017-GT-63998.
- [13] WEI W, XU Q H, XUE X, et al. Study on the emissions performance of a CMC combustor with weakly coupled stratified swirl flames at engine-relevant conditions [R]. ASME 2022-GT-81619.
- [14] LI L, LIN Y Z, FU Z B, et al. Emission characteristics of a model combustor for aero gas turbine application[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 72: 235-248.
- [15] 程明, 尚守堂, 刘殿春, 等. 燃油分级比例对TAPS燃烧室性能的影响[J]. *航空发动机*, 2012, 38(4): 6-10.
CHENG M, SHANG S T, LIU D C, et al. Influence of fuel-staging ratio on taps combustor performance [J]. *Aeroengine*, 2012, 38(4): 6-10. (in Chinese)
- [16] 刘凯, 王峻宁, 曾文, 等. 掺混孔结构对燃烧室性能影响研究[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(7): 64-69.
LIU K, WANG J N, ZENG W, et al. Research on effect of dilution holes structures on combustor performance[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(7): 64-69. (in Chinese)
- [17] DING G Y, HE X M, ZHAO Z Q, et al. Effect of dilution holes on the performance of a triple swirler combustor [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(6): 1421-1429.

(编辑:朱立影)

Experimental study on emission optimization of marine diesel multi-nozzle combustor

ZHOU Shichao¹, LIN Yuzhen^{1,2}, XU Quanhong^{1,2}, WANG Bosen^{1,2}, CHENG Xu³

(1. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, Beihang University, Beijing 102206, China; 3. No.703 Research Institute of CSSC, Harbin 150078, China)

Abstract: A fuel staging multi-nozzle low emission combustor with evaporation tube main stage injectors based on typical operating parameters of a certain type of marine gas turbine combustor was designed. Experimental investigation on the effects of the number of fuel supply main stage injectors, pilot fuel staging ratio, fuel air ratio, and dilution hole arrangement on emissions and combustion efficiency was conducted for small operating condition (35% max power condition). The experimental results show that when the fuel air ratio remains constant, using three main stage injectors for fuel supply results in the highest combustion efficiency and the lowest CO emission. But as the fuel air ratio continues to increase, CO emission from different fuel staging methods stabilizes at near $170 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$, it indicates that the potential for optimizing CO emission and combustion efficiency is limited by adjusting the fuel staging methods and increasing the fuel air ratio. In addition, under the condition of using 3M fuel supply method and keeping the fuel air ratio constant, when the pilot fuel staging ratio is below 0.08, the dilution hole scheme can further effectively improve combustion efficiency, reduce CO and NO_x emission. Finally, by using the 3M fuel supply method combined with the 9L150 dilution hole scheme, the CO emission in the combustor under small operating condition can be reduced to $79 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$ under the condition of increasing the fuel air ratio, combustion efficiency reaches 99.918%, NO_x emission reaches $190 \times 10^{-6} @ 15\% O_2$.

Key words: Gas turbine; Mutli-nozzle combustor; Fuel staging; Pollutant emission; Evaporation tube; Combustion efficiency

Received: 2024-07-11; Revised: 2024-10-15.

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2407024

Foundation item: National Science and Technology Major Project of China (J2019-III-0012-0055).

Corresponding author: XU Quanhong, E-mail: xuquanhong@buaa.edu.cn