

台阶高度对船用低排放塔式分级燃烧性能影响研究

胡金洋¹, 赵铁铮², 王 俊², 陆景贺¹, 刘 潇¹

(1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 哈尔滨 150078)

摘要: 对塔式分级燃烧室旋流器结构进行优化, 研究了旋流器主燃级和值班级之间的台阶高度对燃烧室的流场、燃烧性能及出口温度分布的影响。结果表明: 随着台阶高度的增加, 台阶回流区尺寸增大并挤压中心回流区头部, 燃油分布均匀性降低, 高温区面积急剧上升, NO 生成量和生成区域均扩大, 高温烟气逐渐向出口两侧壁面移动, 出口温度分布质量逐渐改善; 压力损失系数逐渐降低, 当台阶高度由 4 mm 增加至 16 mm 时, 燃烧室压力损失系数和出口温度分布系数 OTDF 分别降低了 0.2% 和 5.6%, NO 排放量增加了 62.1%。

关键词: 台阶高度; 船舶燃气轮机; 低排放燃烧室; 旋流器

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)02-0205-07

Investigation on Influence of Step Height on the Combustion Performance in Marine Low Emission Tower-Type Staged Combustion

Hu Jinyang¹, Zhao Tiezheng², Wang Jun², Lu Jinghe¹, Liu Xiao¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. No.703 Research Institute of CSIC, Harbin 150078, China)

Abstract: The flow field characteristics and combustion performance of low emission tower combustion chamber at different step heights were studied by numerical simulation. The results show that with the increase of step height, the size of the step return area increases and the head of the central return area is squeezed. The uniformity of fuel distribution decreases, the high temperature area increases sharply, and both the amount and the generation area of NO increase. The high temperature flue gas gradually moves to both sides of the exit wall, and the temperature distribution quality of the exit gradually improves. When the step height increases from 4 mm to 16 mm, the combustion chamber pressure loss coefficient and out temperature distribution factor (OTDF) decrease by 0.2% and 5.6%, respectively, while NO emission increases by 62.1%.

Keywords: step height; marine gas turbine; low emission combustion chamber; swirler

近年来,各个领域环境保护的要求都在不断严格,绿色发展早已深入人心,燃气轮机污染排放的要求也不断提高。国际海事组织 IMO 对船用动力装置

污染物排放也提出了越来越严格的限制标准^[1]。因此,掌握新型低污染船舶燃气轮机燃烧室方法十分重要^[2]。

收稿日期: 2024-02-18.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (J2019-III-0012-0055).

作者简介: 胡金洋 (2000—), 男, 硕士研究生, hujinyang@hrbeu.edu.cn.

通信作者: 刘 潇, 男, 博士, 副教授, liuxiao_hcu@163.com.

船舶低污染燃烧室研发大多效仿航空燃气轮机中成熟的燃烧技术^[3]。贫油预混预蒸发(LPP)是目前低排放燃烧技术中研究最广泛的一种,可达到接近天然气燃料燃烧室的低排放水平,并且被证明具有超低污染物排放水平的潜力。20世纪90年代,GE公司将LPP方法引入了分级分区燃烧中研究得到的双环预混旋流(TAPS)燃烧室是目前广泛应用的低污染燃烧室,其高工况下 NO_x 排放水平达到了CAEP/6标准的50%^[4]。Mongia^[5]详细说明了每一代TAPS燃烧室的设计思路。

国内低排放燃烧室大多采用预混和分级燃烧的燃烧组织方法。邓远灏等^[6]将直接喷射和LPP技术结合在一起,提出了一种混合燃烧技术的中心分级燃烧室,研究了叶片的旋流角度对燃烧室燃烧性能和 NO_x 等污染物排放的影响^[7]。Zhang等^[8]研究了燃烧室燃油分级比例对 NO_x 排放特性的影响。林宇震等^[9-11]发现增加套筒的扩张角度、减小值班级和主燃级之间的台阶高度、增大预燃级的气量分配都会增大燃烧室贫油熄火的油气比。

目前对贫油燃烧中心分级燃烧室的研究多集中在采用数值模拟方法对燃烧室内部流场、温度场分析,以及对燃烧效率、污染物排放、出口温度分布函数等燃烧性能分析。本文对塔式分级燃烧室的主燃级和值班级之间的台阶高度进行优化,研究了旋流器台阶高度对燃烧室的流场、燃烧性能及出口温度分布的影响。在塔式旋流器中,定义台阶高度为主燃级出口内半径与值班级出口半径之差,在保持主燃级出口尺寸不变时,改变值班级出口半径和扩张段角度确定台阶高度分别为4 mm、8 mm、12 mm和16 mm。本文对4种台阶高度的方案进行了试验研究,研究了台阶高度对燃烧室油气掺混水平、回流区尺寸、各截面温度分布和燃烧室性能参数的影响。

1 燃烧室模型和网格划分

1.1 燃烧室模型

本文采用的塔式分级燃烧室装配图如图1所示,主要由机匣、旋流器和火焰筒组成,旋流器上与供油臂连接,火焰筒头部有帽罩孔和冷却结构,旋流器有台阶冷却孔,高压空气从处于外机匣底部的入口进入机匣,通过3条路径进入火焰筒:第1部分空气为燃烧空气,从旋流器头部进入,经过旋流器到达火焰筒内部,对燃油的雾化和蒸发起到辅助作用,燃油与高压空气完全掺混,在旋流器出口后方产生稳定燃烧的回流区;第2部分空气为头部冷却空气,从旋流器的

台阶冷却孔等进入火焰筒内部,消除火焰筒内部的局部高温区,保护旋流器不被烧毁;第3部分空气为冷却空气,通过火焰筒上的气膜冷却结构进入火焰筒,保护火焰筒结构不被烧毁。在火焰筒尾部开有小孔,改善燃烧室出口的温度分布。

在塔式旋流器中,定义台阶高度为主燃级出口内壁面与值班级出口外壁面之间的距离。头部进气占燃烧室全部进气的77%,主要通过台阶冷却孔进入火焰筒。值班级布置一个离心喷嘴,主燃级采用环形布置12个空气雾化喷嘴,将空气引入柴油射流附近,大幅提升雾化效果,并且使油气混合物跟着气流进入火焰筒中,能够有效地避免自燃和回火,见图2。

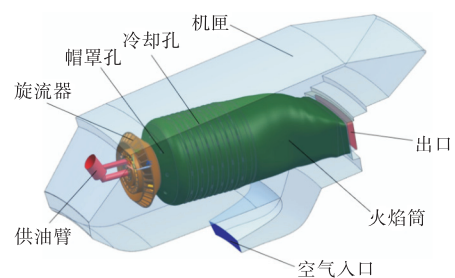


图1 塔式分级燃烧室装配图

Fig.1 Tower graded combustion chamber assembly drawing

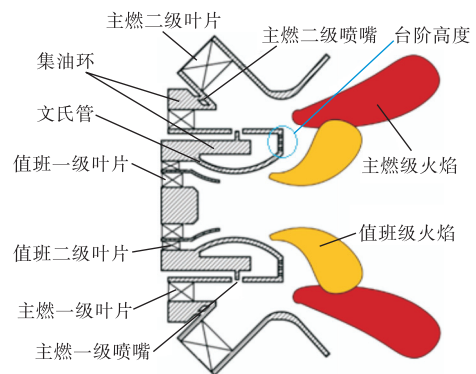


图2 塔式分级燃烧室头部结构简图

Fig.2 Schematic diagram of the head structure of the tower graded combustion chamber

1.2 网格划分

本文利用FLUENT Meshing软件对计算域进行网格划分。本文采用多面体网格对计算域进行网格划分。网格的数量密度会影响数值计算的准确性,对燃油喷嘴、台阶冷却孔等结构进行加密,同时对旋流器出口后方位置进行二次加密,以保证计算的准确性。

在确定划分网格方法的基础上进行网格无关性验证,本文划分3种不同数量的网格,分别考察了网格数量为271万、343万、425万3种网格数量下的燃烧室中轴线速度和温度分布,采用相同计算方法与边界条件,进行数值模拟计算。如图3所示,当网格数量为425万时,计算结果与343万网格相差在1%

以内,所以最终燃烧室网格数量为 343 万。

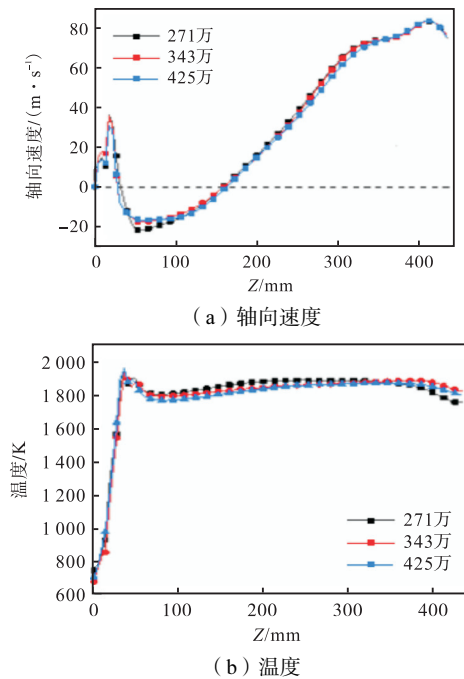


图3 不同数量网格计算结果对比

Fig.3 Comparison of different number of grid calculation results

本文采用 ANSYS FLUENT 软件对塔式分级燃烧室进行数值计算. 湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 燃烧模型选择部分预混 FGM (flamelet generated manifold) 模型, 对流项采用 Second Order Upwind, 壁面边界选用标准壁面函数处理; 基于压力基求解器采用 SIMPLE 算法求解湍流喷雾燃烧流场, 选用正十二烷代替柴油, 机理包含 106 组分和 420 步反应; 值班级选用 hollow-cone 喷嘴, 主燃级采用 solid-cone 喷嘴, 选用 DPM (discrete phase model) 燃油喷雾模型, 液滴尺寸分布为 R-R 分布, 开启离散随机游走模型. 计算收敛条件为各项残差均低于 10^{-4} . 在污染物排放的计算结果上, 仅开启热力型机理.

计算工况参数如下: 燃烧室进口流量 4 kg/s、压力 2 MPa、温度 770 K, 燃油流量 0.1 kg/s, 值班级燃油比例为 10%.

2 数学物理模型和边界条件

2.1 基本控制方程

燃烧室流场控制方程可如下表示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\beta_w \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \beta_r \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\beta_w \phi) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \\ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + S_\phi \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ϕ 、 β 、 Γ_ϕ 、 S_ϕ 等参数可以表示出连续方程、动量方程、能量方程等. 其中 S_ϕ 为源项, Γ_ϕ 为湍流交换系数, ϕ 表示任意独立变量.

2.2 湍流流动模型

Realizable $k-\varepsilon$ 模型的表达式如下所示.

湍流动能 k 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (2)$$

湍流耗散率 ε 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 燃烧模型

FGM 模型通过详细化学反应机理建立湍流 FGM 表, 通过求解温度、组分的输运方程完成计算.

混合分数的表达式为

$$Z = \frac{Z_i - Z_{i,OX}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,OX}} \quad (4)$$

$$C = \frac{\sum_k \alpha_k (Y_k - Y_{k,u})}{\sum_k \alpha_k (Y_{k,eq} - Y_{k,u})} = \frac{Y_C}{Y_{C,eq}} \quad (5)$$

式中: Z_i 代表组分 i 的质量分数; α_k 为常数, 0 和 1 分别代表新鲜反应物和燃烧产物; 下标 eq 表示化学平衡状态; u 表示未燃烧的反应物; k 代表组分顺序; fuel 代表燃料; OX 代表氧化剂.

2.4 NO_x 生成模型

NO_x 由 NO 、 NO_2 和 N_2O 组成. 在本文的计算中, 燃烧室为贫油燃烧, 不适用于快速型机理, 因此本文在 NO_x 计算上, 仅开启热力型机理.

3 结果和分析

在塔式旋流器中, 定义台阶高度为主燃级出口内半径与值班级出口半径之差, 本文在保持主燃级出口尺寸不变时, 改变值班级出口半径和扩张段角度确定台阶高度分别为 4 mm、8 mm、12 mm 和 16 mm, 进行燃烧室流场特性及燃烧性能的分析.

3.1 冷态场分析

图 4 给出了不同台阶高度时, 旋流器出口平面和燃烧室中截面的当量比分布. 可以看出, 台阶高度增加时, 值班级燃油径向分布空间急剧缩小, 其出口高当量比区域面积显著增加, 导致在旋流器下游 20 mm 之前平面的燃油分布均匀性迅速降低, 如图 5 所

示. 另外, 由于值班级燃油轴向运动距离相对增大, 在火焰筒底部的主燃级高当量比区域逐渐扩大, 如红圈区域所示. 根据图 5 可知, 在旋流器下游 30 mm 平

面后, 台阶高度对油气掺混的影响几乎消失, 因此不同台阶高度下各截面的燃油分布均匀性基本一致.

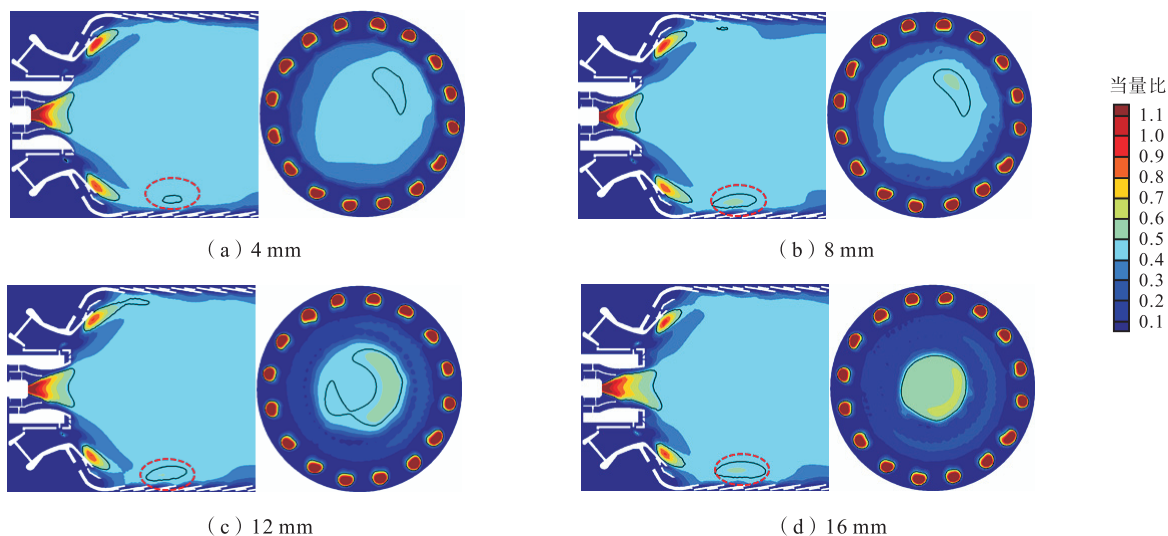


图 4 不同台阶高度时燃烧室当量比分布

Fig.4 Equivalent ratio distribution of combustion chamber at different step heights

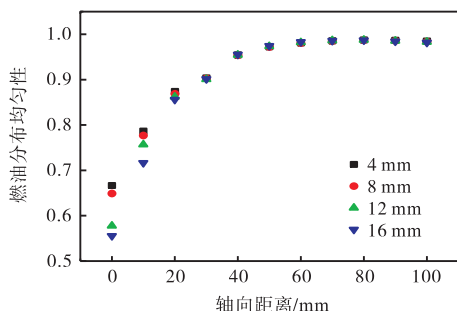


图 5 不同台阶高度时燃烧室燃油分布均匀性

Fig.5 Fuel distribution uniformity of combustion chamber at different step heights

图 6 为不同台阶高度时燃烧室中截面混合分数和流线分布, 红色实线代表当量比为 1. 台阶高度增加时, 值班级喷嘴下游的燃油浓度显著增加, 挤压中心回流区头部流线向下游运动. 在台阶高度为 4 mm 和 8 mm 时, 台阶回流区消失; 随后其逐渐增大, 并在台阶高度为 16 mm 时挤压中心回流区头部, 进一步限制了值班级燃油在下游的径向分布空间. 另外, 由于值班级出口空气径向扩张能力减弱, 使得主燃级出口下游的高浓度燃油径向分布位置缩小, 进一步削弱了旋流器出口下游近距离截面的油气掺混水平.

图 7 为不同台阶高度时燃烧室中截面速度分布. 由图 7(a)可知, 台阶高度为 4 mm 时, 值班级空气径向扩散能力最强, 部分值班级空气直接汇入主燃级空气中, 因此主燃级出口下游的低速间断区几乎消失; 当台阶高度增加时, 台阶回流区尺寸增大, 两级空气之间的相互作用减弱, 主燃级出口下游的气体速

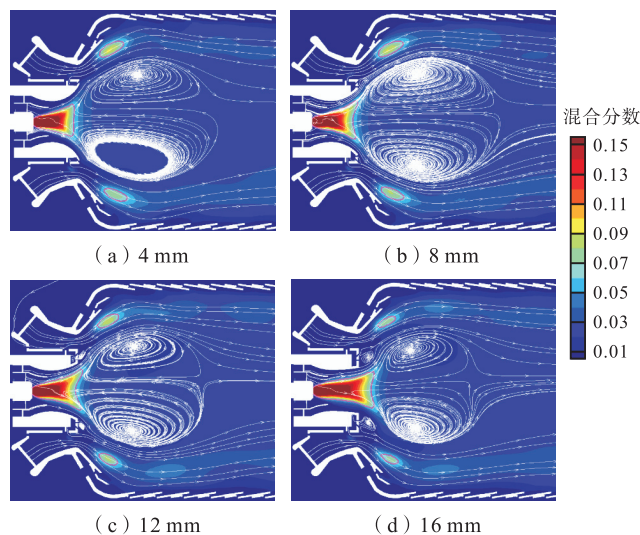


图 6 不同台阶高度时燃烧室混合分数和流线分布

Fig.6 Combustion chamber mixing fraction and streamline distribution at different step heights

度逐渐降低, 低速间断区逐渐扩大. 在图 7(e)中, 台阶高度增加导致中心回流区尺寸迅速缩小, 其头部在台阶回流区挤压下逐渐向内凹陷, 下游驻止点逐渐向上游移动.

图 8 为不同台阶高度时旋流器下游 10 mm 直线的速度分布. 由图可见, 台阶高度增大时, 一方面由于中心回流区头部向内凹陷, 导致值班级下游回流速度幅值和回流区径向长度均缩小; 另一方面, 值班级出口高速射流区域轴向长度增加, 导致其轴向速度和径向速度峰值均增加, 如径向位置[-15 mm, 15 mm]区域内. 当台阶高度超过 8 mm 时, 在径向位置

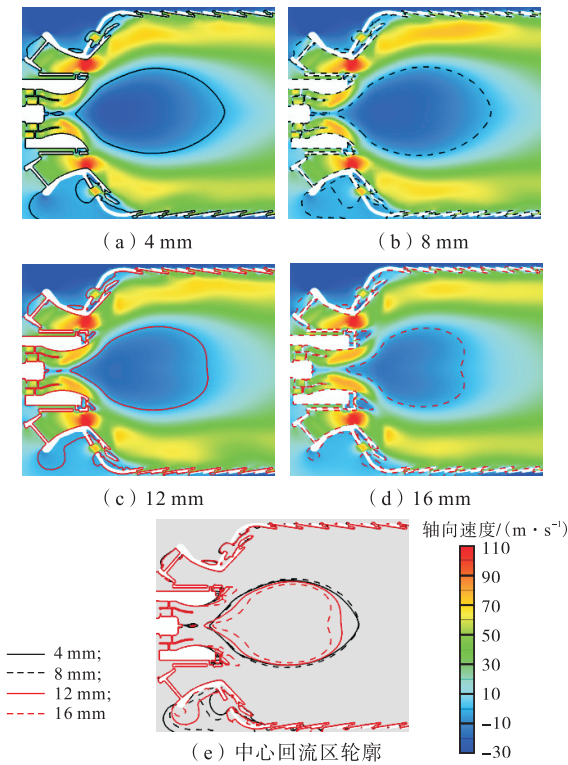


图7 不同台阶高度时燃烧室中截面速度分布

Fig.7 Cross-sectional velocity distribution in the combustion chamber at different step heights

± 30 mm 处, 由于台阶回流区尺寸增加, 轴向速度和径向速度均缩小。

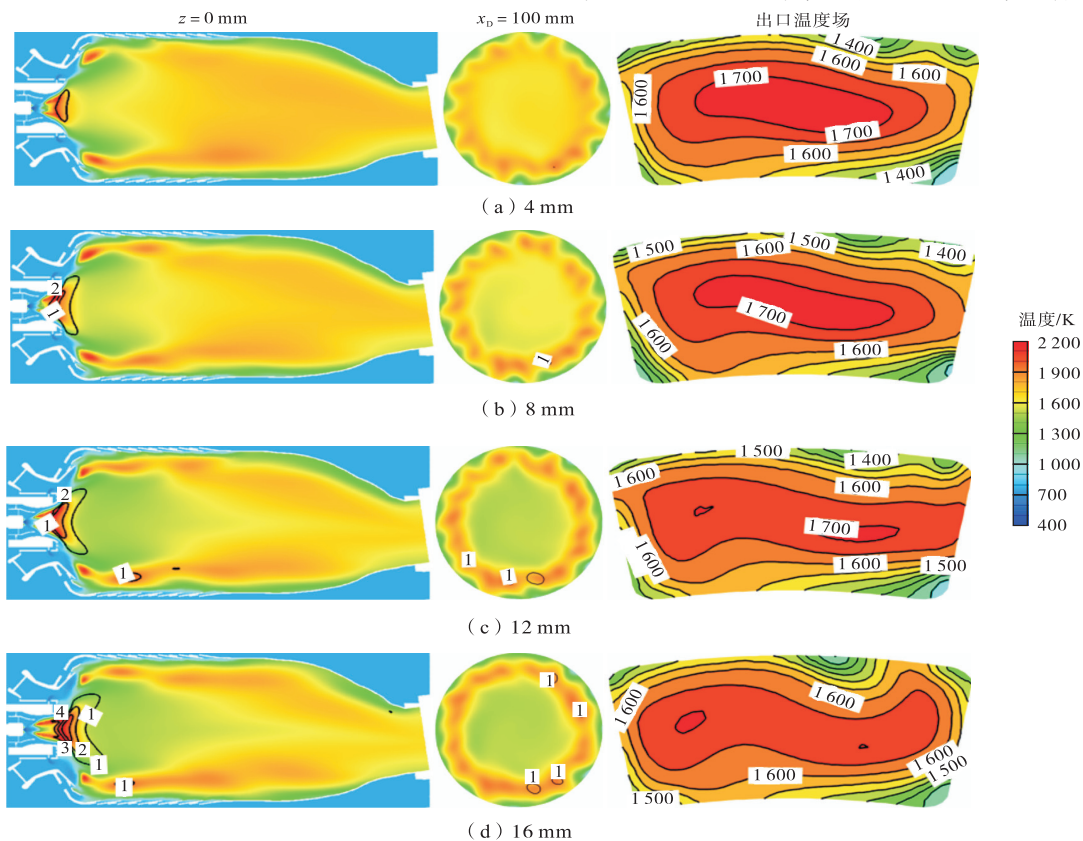


图9 不同台阶高度时燃烧室温度分布

Fig.9 Temperature distribution of the combustion chamber at different step heights

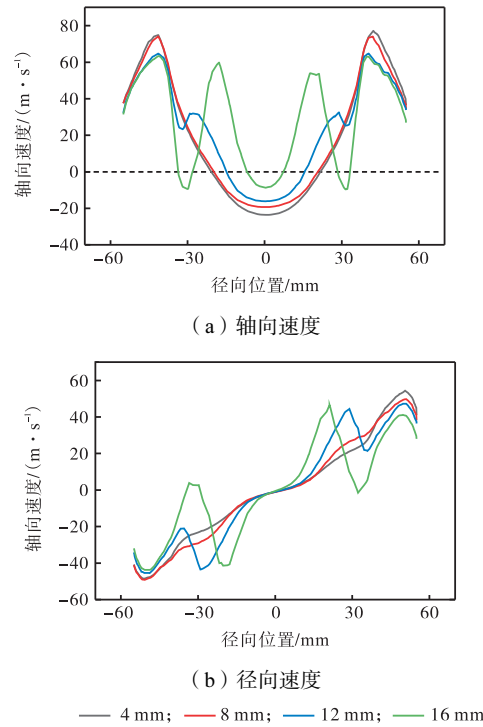


图8 不同台阶高度旋流器出口后 10 mm 速度分布

Fig.8 10 mm speed distribution after the exit of cyclone with different step heights

3.2 热态场分析

图9 为不同台阶高度时燃烧室内各截面温度分布和 NO 生成区域, 图中 1、2、3、4 分别代表 NO 质

量分数为 0.000 05, 0.000 1, 0.000 15, 0.000 2. 台阶高度增加时, 由于值班级出口燃油分布均匀性大幅下降, 因此其火焰温度和高温区面积急剧上升, NO 生成量和生成区域均扩大. 由于台阶回流区尺寸扩大, 两级火焰的相互作用减弱, 因此在值班级火焰下游, 火焰筒中心区域的烟气温度迅速降低, 如 $x_D = 100$ mm (旋流器出口下游 100 mm) 截面所示. 在燃烧室出口, 出口中心 1 700 K 温度带迅速缩小, 燃烧后的高温气体向出口两侧壁面移动, 改善了出口温度分布质量.

图 10 为不同台阶高度时燃烧室性能参数. 由图 10(a) 可见, 台阶高度增加时, 中心回流区尺寸缩小, 气流压力能转化为动能的比例降低, 因此压力损失系数逐渐降低. 由图 10(b) 可见, 由于值班级火焰高温区面积逐渐扩大, 因此出口 NO 排放量迅速增加. 由于值班级燃油分配比例较低, 因此出口 CO 和 UHC

排放量变化幅度较小, 燃烧效率几乎无变化. 结合图 10(a) 和(c) 可知, 出口 1 700 K 温度带面积缩小导致出口径向温度分布系数(RTDF) 峰值和出口温度分布系数(OTDF) 逐渐降低, 出口温度分布质量得以改善. 当台阶高度由 4 mm 增加至 16 mm 时, 燃烧室压力损失系数和 OTDF 分别降低了 0.2% 和 5.6%, NO 排放量增加了 62.1%.

4 结 论

本文以低排放塔式分级燃烧轮机燃烧室为研究对象, 对旋流器台阶高度进行优化调整, 分析其对速度场、燃烧性能及出口温度分布的影响. 数值模拟结果表明:

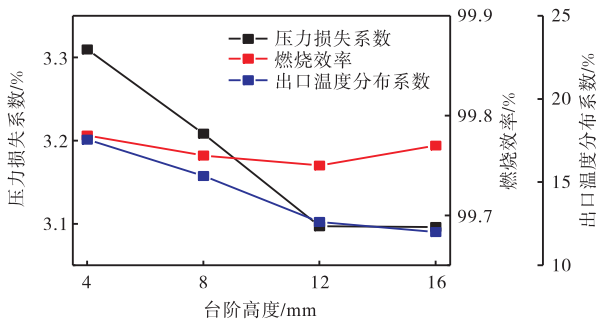
(1) 随着台阶高度的增加, 燃油分布均匀性迅速降低, 火焰筒底部高当量比区域扩大, 台阶回流区尺寸增大并挤压中心回流区头部流线向下游运动, 两级空气间相互作用减弱, 值班级下游回流速度幅值和回流区径向长度均缩小.

(2) 随着台阶高度的增加, 值班级出口燃油分布均匀性大幅下降, 火焰温度和高温区面积急剧上升, NO 生成量和生成区域均扩大, 燃烧室出口中心 1 700 K 温度带迅速缩小导致 RTDF 峰值和出口温度分布函数逐渐降低, 高温烟气逐渐向出口两侧壁面移动.

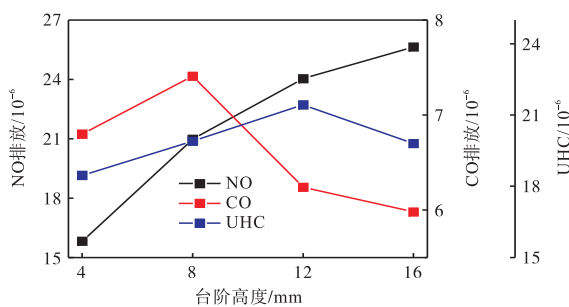
(3) 随着台阶高度的增加, 出口温度分布质量逐渐改善, 压力损失系数逐渐降低, 燃烧效率几乎无变化. 当台阶高度由 4 mm 增加至 16 mm 时, 燃烧室压力损失系数和出口温度分布函数分别降低了 0.2% 和 5.6%, NO 排放量增加了 62.1%.

参考文献

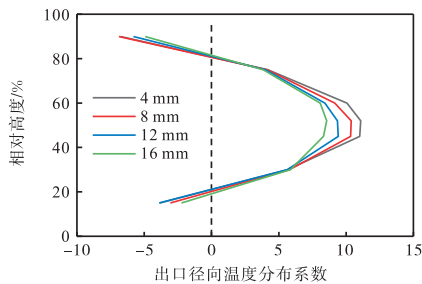
[1] 闻雪友, 任兰学, 祁 龙, 等. 舰船燃气轮机发展现状、方向及关键技术[J]. 推进技术, 2020, 41(11): 2401-2407.
Wen Xueyou, Ren Lanxue, Qi Long, et al. Development and key technologies in marine gas turbine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(11): 2401-2407 (in Chinese).
[2] 陆景贺, 刘 潇, 刘恩惠, 等. 船用低排放塔式分级燃烧室主燃级喷嘴结构优化研究[J]. 推进技术, 2022, 43(9): 250-258.
Lu Jinghe, Liu Xiao, Liu Enhui, et al. Optimization research on main stage atomizer structure of marine low emission tower-type coaxial-staged combustor[J].



(a) 压力损失系数、燃烧效率和出口温度分布系数



(b) 污染物排放



(c) 出口径向温度分布系数

图 10 不同台阶高度时燃烧室性能参数

Fig.10 Combustion chamber performance parameters at different step heights

- Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(9): 250-258 (in Chinese).
- [3] 李孝堂, 梁春华. 世界航改舰船用燃气轮机的发展趋势[J]. 航空科学技术, 2011(6): 4-7.
Li Xiaotang, Ryang Chun-hwa. Development trend of world aero-derivative marine gas turbines[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2011(6): 4-7 (in Chinese).
- [4] 林宏军, 常峰, 程明. GE公司低排放燃烧室发展概述[J]. 航空动力, 2019(1): 31-36.
Lin Hongjun, Chang Feng, Cheng Ming. The development of GE's low emission combustion chamber [J]. *Aerospace Power*, 2019(1): 31-36 (in Chinese).
- [5] Mongia H. TAPS: A fourth generation propulsion combustor technology for low emissions[C]// *AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years*. Dayton, Ohio, 2003: AIAA 2003-2657.
- [6] 邓远灏, 颜应文, 朱嘉伟, 等. LPP 低污染燃烧室两相喷雾燃烧数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(3): 353-361.
Deng Yuanhao, Yan Yingwen, Zhu Jiawei, et al. Numerical study of two-phase spray combustion for lean premixed prevaporized low-emission combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(3): 353-361 (in Chinese).
- [7] 邓远灏, 马存祥, 郭凯, 等. 贫油预混预蒸发燃烧室排放试验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(4): 691-697.
Deng Yuanhao, Ma Cunxiang, Guo Kai, et al. Experimental investigation on emission of lean premixed pre-evaporation combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(4): 691-697 (in Chinese).
- [8] Zhang M, Fu Z, Lin Y, 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.
- [9] 康尧, 林宇震, 付镇柏, 等. 台阶高度对 LESS 燃烧室的影响研究[J]. 推进技术, 2014, 35(7): 941-949.
Kang Yao, Lin Yuzhen, Fu Zhenbo, et al. Effect of step height on low emission stirred swirl combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(7): 941-949 (in Chinese).
- [10] 付镇柏, 林宇震, 傅奇慧, 等. 不同台阶高度对中心分级燃烧室点火熄火性能的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1062-1070.
Fu Zhenbo, Lin Yuzhen, Fu Qihui, et al. The effect of different step heights on the ignition and extinguishing performance of a central staged combustion chamber[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(5): 1062-1070 (in Chinese).
- [11] 付镇柏, 林宇震, 张弛, 等. 中心分级燃烧室预燃级燃烧性能实验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 46-52.
Fu Zhenbo, Lin Yuzhen, Zhang Chi, et al. Experimental study on the combustion performance of a pre combustion stage in a central staged combustion chamber[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(1): 46-52 (in Chinese).