文章编号:1001 - 2060(2023)05 - 0117 - 09

空气分级比对同轴分级燃烧室性能参数的影响

孙继昊,罗绍文,赵宁波,郑洪涛
(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘　要:为掌握同轴分级燃烧室性能参数随空气分级比(主燃级空气流量的比值)的变化规律,以某同轴分级燃烧室为研究对象,数值分析了空气分级比对燃烧室的燃烧效率、总压损失、出口温度分布、污染物排放和绝热壁面最高温度的影响。结果表明:空气分级比主要会改变角涡位置的燃烧温度和高温烟气的停留时间;随着空气分级比的升高,燃烧室总压损失、出口温度分布系数、NO_x 排放、绝热壁面最高温度逐渐升高,但燃烧效率、CO 污染物排放、径向温度分布系数对空气分级比不敏感;在同轴分级燃烧室设计中,在保证燃烧稳定的前提下可采用较小的空气分级比以实现燃烧室高效、低阻、低污染燃烧。

关　键　词:空气分级比;同轴分级;燃烧室;总压损失;出口温度分布

中图分类号:V231.2　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.015

[**引用本文格式**]孙继昊,罗绍文,赵宁波,等.空气分级比对同轴分级燃烧室性能参数的影响[J].热能动力工程,2023,38(5):117 - 125. SUN Ji-hao, LUO Shao-wen, ZHAO Ning-bo, et al. Influence of air staging ratio on performance parameters of a coaxially-staged combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5):117 - 125.

Influence of Air Staging Ratio on Performance Parameters of a Coaxially-staged Combustor

SUN Ji-hao, LUO Shao-wen, ZHAO Ning-bo, ZHENG Hong-tao
(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: In order to confirm the variation law of coaxially-staged combustor performance parameters with air staging ratio (i.e. the ratio of primary combustion stage air flow), taking a coaxially-staged combustor as research object, numerical simulation was carried out to analyze the influence of air staging ratio on the performance of a model coaxially-staged gas turbine combustor, such as the efficiency of combustion, total pressure loss, combustor outlet temperature distribution factor, pollutant emissions and maxium adiabatic temperature of combustor liner. Results show that air staging ratio can mainly change the combustion temperature of corner recirculation zones and the resistance time of high-temperature flue gas; increasing the air staging ratio will increase the total pressure loss, outlet temperature distribution factor, NO_x emission and maximum adiabatic temperature of combustor liner, while combustion efficiency, CO emission, radial temperature distribution factor are not sensitive to air staging ratio; under the premise of ensuring flame stability, a smaller air staging ratio can be adopted to realize high combustion efficiency, low pressure loss and emissions when designing a coaxially-staged combustor.

Key words: air staging ratio, coaxially-staged, combustor, total pressure loss, outlet temperature distribution

收稿日期:2023 - 02 - 10;　**修订日期**:2023 - 02 - 24
基金项目:国家科技重大专项(2017 - Ⅲ - 0006 - 0031, Y2019 - I - 0022 - 0021)
Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017 - Ⅲ - 0006 - 0031, Y2019 - I - 0022 - 0021)
作者简介:孙继昊(1994 -),男,哈尔滨工程大学博士研究生.
通讯作者:赵宁波(1987 -),男,哈尔滨工程大学副教授.

引 言

日益严格的环保法规的出台使低排放燃烧技术成为燃气轮机发展的一个关键核心技术。在这一背景下,众多科研团队和世界几大燃气轮机制造厂商分别提出了各自的低排放燃烧技术,如阿尔斯通(Alstom)的 EV 燃烧技术[1-2],通用电气(General Electric Company,GE)应用于 GE 7HA 燃气轮机的轴向燃料分级燃烧技术[3],通用电气在 CFM 系列发动机中发展的双环预混旋流燃烧技术(Twin Annular Premixing Swirler, TAPS)[4],西门子(Siemens)在 SGT-800 燃气轮机中应用的多喷嘴分级燃烧技术[5],北京航空航天大学林宇震团队提出的分层旋流低排放技术(Technology of Low Emission of Stirred Swirl,TeLESS)[6],哈尔滨工程大学郑洪涛团队提出的应用于轻型燃气轮机的同轴分级燃烧技术[7]等。

以上各种低排放燃烧技术的核心均是采用贫预混分级燃烧以同时保证燃烧稳定和低污染物排放[8]。其中,同轴分级燃烧技术具有结构紧凑、工况过度平稳、污染物排放低等优点,具有广阔的应用前景[9]。同轴分级燃烧室的头部由采用扩散燃烧的中心级和 1 ~3 个采用预混燃烧的主燃级组成,各级之间同轴嵌套,中心级仅在点火工况和低工况时提供燃料以稳定燃烧,在高工况时燃料全部从主燃级供给以降低污染物排放。作为同轴分级燃烧室头部的一个重要设计参数,主燃级之间的空气分配比例可直接影响燃烧室流场的结构特征,进而影响燃烧室的性能指标,明确空气分级比对燃烧室性能指标的影响对同轴分级燃烧室头部设计具有重要意义。

现有研究结果表明,空气分级比的改变会显著影响同轴分级燃烧室的火焰托举高度、火焰形态、火焰长度及燃烧稳定性[7,10-11]。在针对空气分级比对燃烧室性能参数影响的研究工作中,张志浩等人[7]采用数值模拟耦合实验设计的方法分析了主燃级空气分配对燃烧室性能参数的影响。研究结果指出,增大主燃级外级空气占比有利于提高燃料/空气掺混特性。以某 22.5 kW 模型燃烧室为研究对象,Arndt 等人[10]试验分析了空气分级比对燃烧室火焰形态、速度分布、温度分布及组分分布的影响。研究结果表明,随着旋流器外级空气进气比例的升高,火焰长度逐渐缩短,回流区宽度逐渐增加,但回流区长度对空气分级比不敏感。Mardani 等人[11]以某双旋流模型燃烧室为研究对象,试验分析了旋流器内、外级空气分配对火焰稳定性、排气温度、燃烧效率、火焰形态和 NO_x 排放的影响。研究结果表明,随着内级旋流空气占比的升高,火焰长度逐渐缩短,贫燃熄火当量比逐渐降低,NO_x 排放逐渐升高;当内级空气占比较低时为托举火焰,较高时为附着火焰。Kraus 等人[12]的研究结果同样表明,随着内级旋流空气占比的升高,火焰托举高度逐渐降低。张善军等人[13]针对某双旋流环形燃烧室开展了实验研究。结果表明,随着主燃区空气占比的升高,燃烧室出口温度分布系数(OTDF)呈现先降低后增加再降低的变化规律。杨金虎[14]在针对主燃级结构参数对点火、熄火特性影响的数值研究工作中指出,增加内级空气占比会导致燃烧室的点火、熄火特性恶化,但在低工况时会使得燃烧稳定性提高。Mi 等人[15]在针对中心分级燃烧室点火、熄火特性的试验研究中指出,内级空气比例的升高会改善燃烧室的点火性能;燃烧室的贫燃熄火极限对空气分级比不敏感。

以往的研究工作获得了一系列燃烧室性能参数随空气分级比的变化规律,但空气分级比对燃烧室性能参数的影响十分复杂且作用机制尚不清晰。为进一步深入分析空气分级比对燃烧室性能参数的影响,实现高效、低阻、低污染的分级燃烧组织,以某同轴分级模型燃烧室为研究对象,针对空气分级比对燃烧室的燃烧效率、总压损失、出口温度分布、污染物排放、绝热壁面温度等性能参数的影响开展了数值研究。

1 数值模拟方法

1.1 数值模型选取及验证

湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,并采用绝热条件下的标准无滑移壁面函数假设近壁面流动。燃烧模型选用 FGM(Flamelet Generated Manifold)模型。反应机理选用 GRI-Mech3.0[16]。

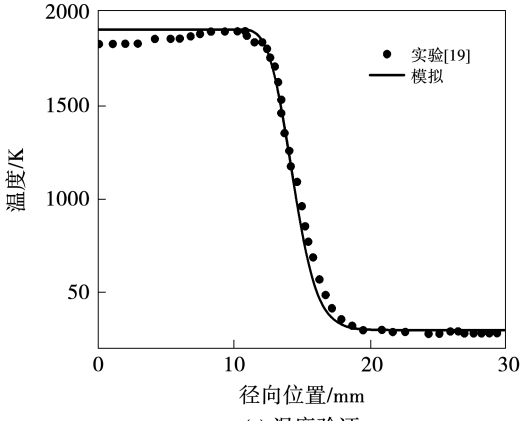
对于污染物 CO 及 NO_x 由于其生成速率较为缓慢,因此附加 CO 及 NO_x 的组分输运方程对其进行求解:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho v Y_i) = \nabla\cdot\left[\left(\frac{k}{c_p}+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\nabla Y_i\right]$$

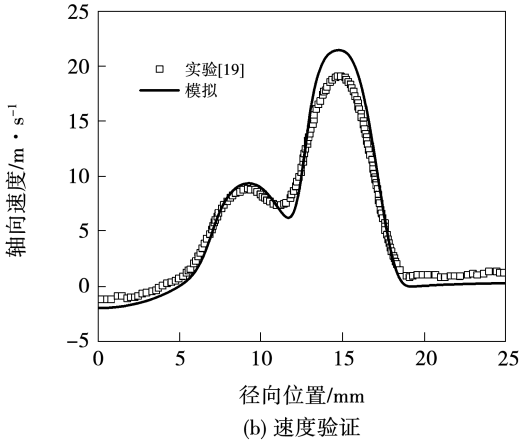
$$\partial + \rho S_{Yi} \tag{1}$$

式中:t—时间,s;ρ—密度,kg/m^3;Y_i—组分 i 的质量分数;v—速度,m/s;k—热导率,W/(m·K);c_p—比定压热容,J/(kg·K);湍流施密特数 $Sc_t = 0.7$;μ_t—湍流粘度,Pa·s;S_{Yi}—组分 i 的净生成速率,mol/(m^3·s)[17]。

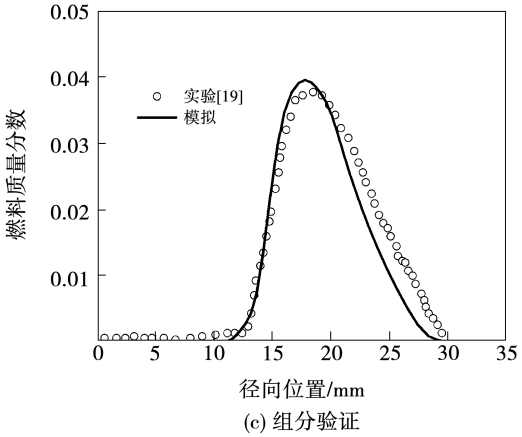
基于上述数值模拟方法和反应动力学机理对剑桥旋流火焰 SW2[18-19] 进行了数值模拟,并给出距燃烧器出口 40 mm 处的温度沿径向的分布情况,如图 1 所示。



(a) 温度验证



(b) 速度验证



(c) 组分验证

图 1　数值模拟方法验证[19]

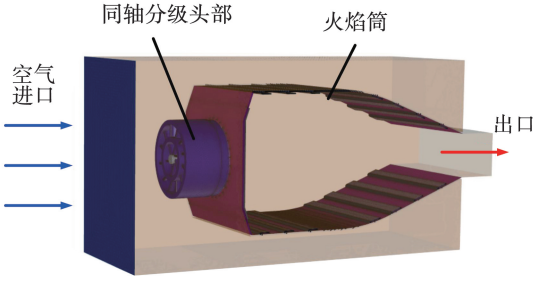
Fig. 1 Numerical simulation method verification[19]

可以看出,上述数值模型及反应动力学机理适用于甲烷/空气旋流燃烧的数值模拟,后续数值模拟将全部采用上述数值模型及反应机理。

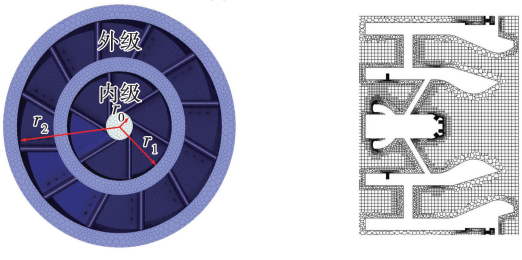
1.2　计算域及边界条件

1.2.1　计算域

本文研究的模型燃烧室的计算域及网格划分如图 2所示。其中,同轴分级头部为双级轴流式旋流器,燃料喷孔位于旋流器外级的旋流叶片及内级的外轮毂上。采用混合网格对计算域进行离散,即在近壁面生成多面体网格,在中心流域生成六面体网格,并对旋流器位置的网格进行局部加密处理。



(a) 计算域



(b) 旋流器网格放大图

图 2　计算域及网格划分

Fig. 2 Computational domain and mesh division

1.2.2　边界条件

模型燃烧室典型工况条件下的空气进气流量为 2.273 kg/s,温度 600 K,进口空气总压 1 MPa,CH_4 流量 65 g/s。定义空气分级比(Air staging ratio,A)为内级旋流器进气量同外级旋流器进气量的比。在研究中保证两级的叶片安装角、中心级半径 r_0、外级轮毂半径 r_2 和轮毂厚度不变,通过改变内级轮毂的半径 r_1 来改变空气分级比。研究过程中保证内级、外级的当量比相同,中心级不供给燃料,表 1 给出不同空气分级比的燃料分配方案。

表 1　不同空气分级比条件下燃料分配方案

Tab. 1 Fuel stage strategy at different air staging ratios

空气分级比	内外级进气面积比	内级燃料流量/g·s^{-1}	外级燃料流量/g·s^{-1}
0.066	0.111	4	61
0.161	0.250	9	56
0.300	0.428	15	50
0.512	0.667	22	43
0.857	1.000	30	35

1.2.3　网格无关性验证

图 3 给出采用不同网格数量时燃烧室中轴线上轴向速度的对比，当网格数量为 350 万时满足网格无关性要求，后续数值模拟工作将全部基于该网格尺度进行。

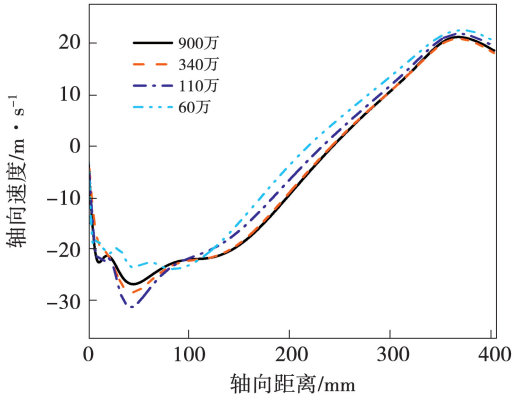


图 3　网格无关性验证结果

Fig. 3 Results of mesh independence verification

2　结果分析与讨论

2.1　燃烧效率及总压损失

图 4 为空气分级比对燃烧效率及总压损失的影响规律，其中燃烧效率 η 及总压损失 p_{loss} 的计算方法如下：

$$\eta = \frac{X_{CO_2} + 0531X_{CO} - 0.318X_{CH_4} - 0.397X_{H_2}}{X_{CO_2} + X_{CO} + X_{UHC}} \tag{2}$$

$$p_{loss} = \frac{p_{in} - p_{out}}{p_{in}} \times 100\% \tag{3}$$

式中：X_i—燃烧室出口位置组分 i 的平均摩尔分数；UHC—未燃尽碳氢化合物；p_{in}—燃烧室进口总压，MPa；p_{out}—出口总压，MPa。

从图 4 可以看出，所有条件下燃烧效率均大于 99.4%，燃烧效率对空气分级比不敏感，但空气分级比为 0.066 时燃烧效率最高。随着空气分级比的增加总压损失迅速增加。

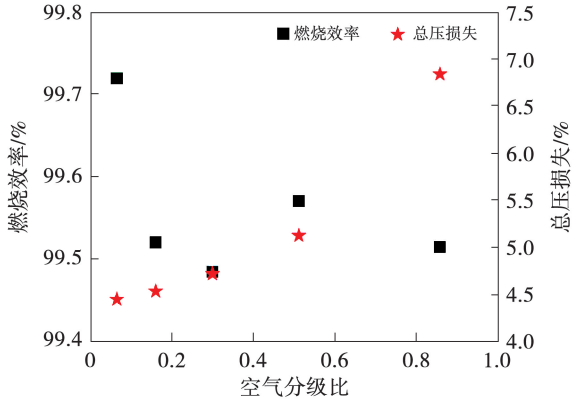


图 4　空气分级比对燃烧效率及总压损失的影响

Fig. 4 Influence of air staging ratio on combustion efficiency and total pressure loss

由于空气分级比是通过改变两级轮毂尺寸实现的，根据旋流数计算公式，$Sn = \frac{2}{3}\tan\beta\frac{1-g^3}{1-g^2}$，在叶片安装角 β 不变的条件下，旋流数 Sn 与与轮毂比（内轮毂半径与外轮毂半径的比）g 成正相关关系，即随着空气分级比的增加，外级旋流数逐渐升高而内级旋流数逐渐降低。

图 5 给出了两级旋流器的流动总压损失随分级面积比的变化规律，其中加权总压损失定义为：内级总压损失 × 内级空气占比 + 外级总压损失 × 外级空气占比。从图 5 可以看出，由于旋流数的改变，随着空气分级比的增加，内级的总压损失逐渐降低而外级的总压损失逐渐升高，二者耦合的加权总压损失逐渐增加，这是导致总压损失随空气分级比升高而增加的主要原因。

另一方面，空气分级比的改变还会改变火焰筒内气流的剪切效应。从图 6 的流线图可以发现，空气分级比 0.3 时，内级的气体全部进入回流区，而外级的气体大部分随剪切层向燃烧室下游流动，只有少部分外级气体进入回流区。随着空气分级比的增加，更多的气体进入回流区，并在回流区内强烈地旋转、剪切，从而增加了总压损失，这是导致燃烧室总压损失增加的又一原因。

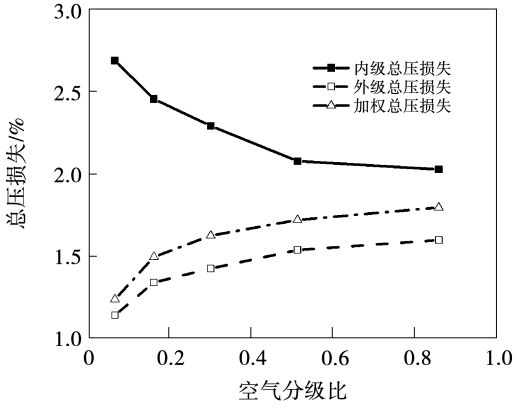


图 5　旋流器总压损失

Fig. 5 Total pressure loss of swirler

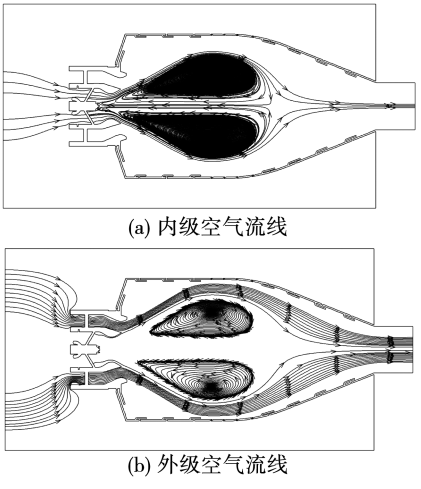


图 6　空气分级比为 0.3 时内外级空气流线图

Fig. 6 Streamline diagram of inner and outer stages' air at 0.3 air staging ratio

2.2　出口温度分布

出口温度分布系数(OTDF)和径向温度分布系数(RTDF)的定义如下:

$$\mathrm{OTDF} = \frac{T_{\max} - T_{\mathrm{ave}}}{\Delta T} \times 100\% \tag{4}$$

$$\mathrm{RTDF} = \frac{T_{\max 1} - T_{\mathrm{ave}1}}{T_{\mathrm{ave}1}} \times 100\% \tag{5}$$

式中:$T_{\max}$—出口最高温度,K;T_{ave}—出口平均温度,K;ΔT—燃烧室实际温升,K;$T_{\max 1}$—出口径向最高温度,K;$T_{\mathrm{ave}1}$—出口径向平均温度,K。

图 7 为 OTDF 和 RTDF 随空气分级比的变化规律。可以看出,随着空气分级比的升高,RTDF 先上升后下降,但变化量较小。随着空气分级比的增加,OTDF 逐渐升高,OTDF 同空气分级比之间近似呈线性关系。

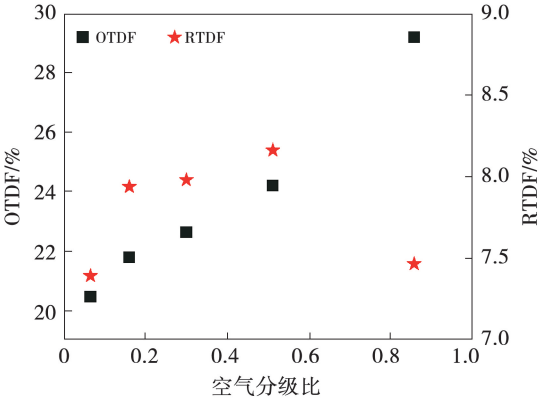


图 7　OTDF 和 RTDF 随空气分级比的变化

Fig. 7 Variation of OTDF and RTDF with air staging ratio

由于燃烧效率对空气分级比不敏感,即空气分级比的改变对出口平均温度影响较小,出口最高温度升高是导致 OTDF 升高的主要原因。图 8 为不同空气分级比对燃烧室出口温度分布的影响。可以看出,不同空气分级比时,燃烧室出口温度分布类似,由于模型燃烧室侧壁面未设置冷却结构,所有条件下燃烧室出口的高温热斑均分布在左、右两侧;燃烧室出口存在两个低温区,位于燃烧室出口的左上角和右下角,且随着空气分级比的增加,该低温区的面积逐渐增大。

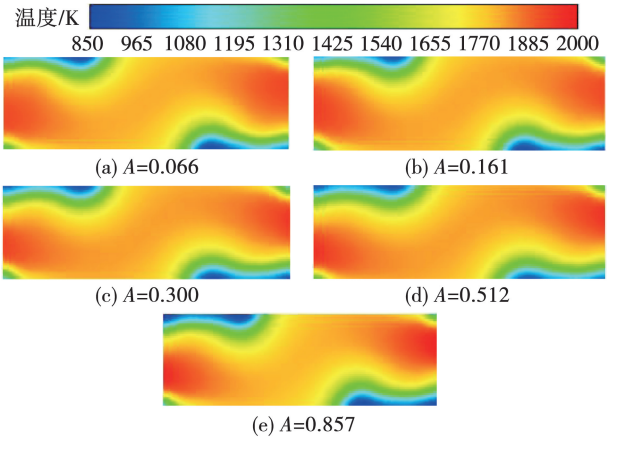


图 8　空气分级比对出口温度分布的影响

Fig. 8 Influence of air staging ratio on outlet temperature distribution

图 9 为空气分级比对温度及流线分布的影响。可以看出,由于文氏管扩张角和两级的燃烧当量比相同,因此燃烧室内的温度分布和流线分布相近,火焰延伸至第 3 排冷却孔附近,主燃区的温度分布对空气分级比不敏感。随着空气分级比的增加,角涡

的温度逐渐升高,这是因为,随着空气分级比的增加第 2 级旋流数逐渐升高,角回流区逐渐增强,从而导致角涡位置温度升高。此外,随着空气分级比的增加,中心级位置的温度逐渐升高,当分级面积比大于 0.3 时,中心级喷嘴位置温度较高,可能会导致中心级烧蚀。结合图 7、图 8 和图 9 可知,空气分级比的升高会增加角涡、侧壁面的温度,从而导致出口 OTDF的升高。

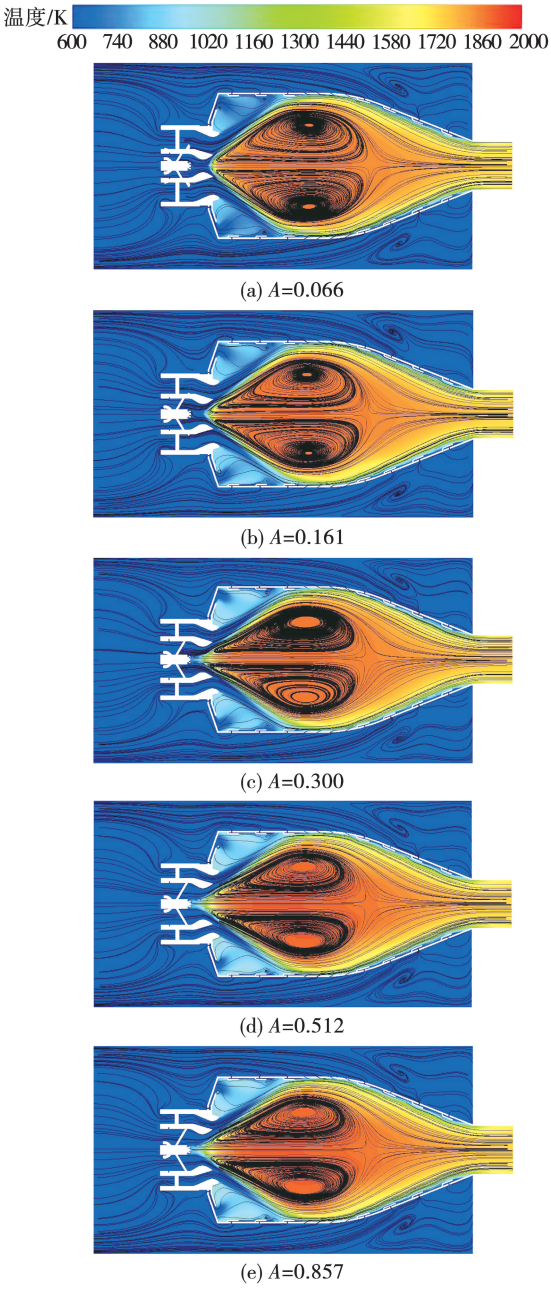


图 9　空气分级比对温度及流线分布的影响

Fig. 9 Influence of air staging ratio on temperature and streamlines distributions

2.3　污染物排放

对于燃用天然气的燃气轮机,CO 和 NO_x 为两种主要的污染物。图 10 为 CO 及 NO_x 排放随空气分级比的变化规律,其中污染物排放按 15% 氧浓度折算。对于 CO 排放,由于该燃烧室在所研究参数范围内燃烧效率较高,CO 基本可完全氧化为 CO_2。因此,CO 排放对空气分级比不敏感,但随着空气分级比的增加,燃烧室出口的 CO 排放先降低后增加;当空气分级比为 0.066 时,燃烧室出口的 CO 排放最高,约为 10.2×10^{-6};当空气分级比为 0.161 时,燃烧室出口的 CO 排放最低,约为 8.8×10^{-6}。

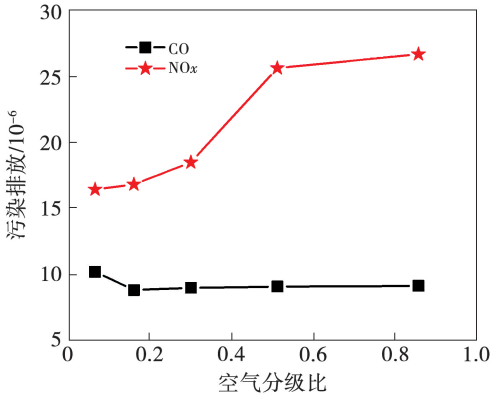


图 10　CO 及 NO_x 排放随空气分级比的变化规律

Fig. 10 Variation law of CO and NO_x emissions with air staging ratio

图 11 为空气分级比对 CO 质量分数分布的影响。从图 11 可以看出,由于主燃区的温度较高,燃烧室内的 CO 主要分布于角涡和火焰锋面位置,其中角涡位置的 CO 主要来源于燃料的预裂解反应,火焰锋面位置的 CO 为燃料燃烧过程中的中间产物。由于火焰温度相近,因此火焰锋面位置的 CO 质量分数基本相同;对于角涡位置,随着空气分级比的升高,角涡位置的 CO 质量分数先升高后降低,并在空气分级比为 0.512 时角涡位置的 CO 质量分数达到最高。结合图 9 可知,随着空气分级比的升高,角涡位置的温度逐渐升高,更多的外级燃料在角涡位置发生预裂解反应。随着空气分级比的增加,外级燃料流量逐渐减小,因此随着空气分级比的增加,角涡位置的 CO 质量分数呈现先升高后降低的变化规律。

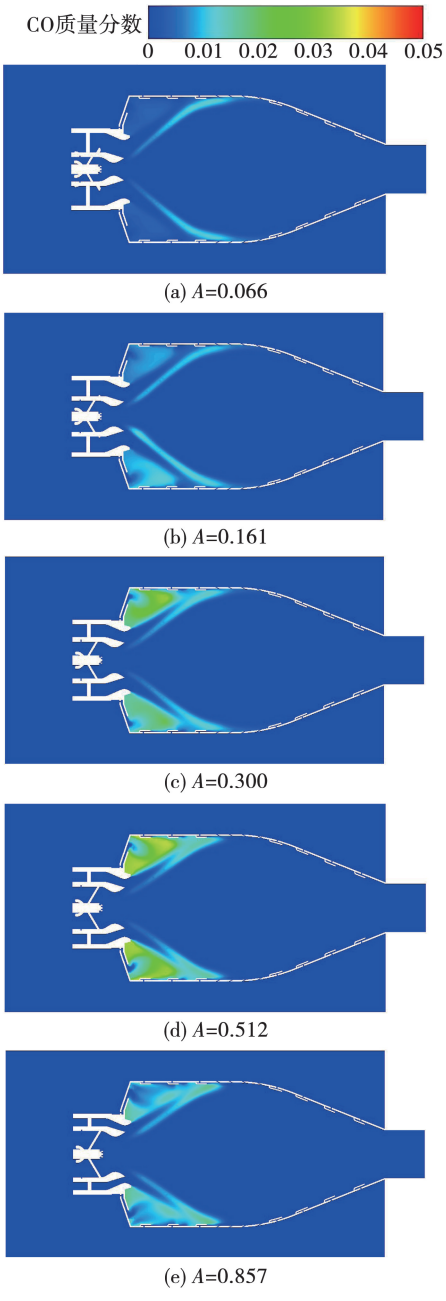


图 11　空气分级比对 CO 分布的影响

Fig. 11 Influence of air staging ratio on CO distribution

燃烧室的 NO_x 排放对空气分级比较为敏感,随着空气分级比的升高 NO_x 排放逐渐增加。图 12 为空气分级比对 NO_x 质量分数分布的影响。可以看出,燃烧室内的 NO_x 主要分布于高温的主燃区,且回流区内具有最高的 NO_x 质量分数,这是因为回流区内温度较高且停留时间较长,促进了热力型 NO_x 在该区域生成。当空气分级比小于等于 0.3 时,回流区内的 NO_x 质量分数变化不明显,但当空气分级比大于 0.3 时回流区内 NO_x 的生成量迅速增加。结合图 6、图 9 和图 12 可知,虽然随着空气分级比的增加燃烧温度基本不变,但更多的气体进入回流区,高温烟气停留时间增长,从而导致了 NO_x 排放的增加。为验证上述说法,图 13 给出回流区 NO_x 生成量随空气分级比的变化规律。

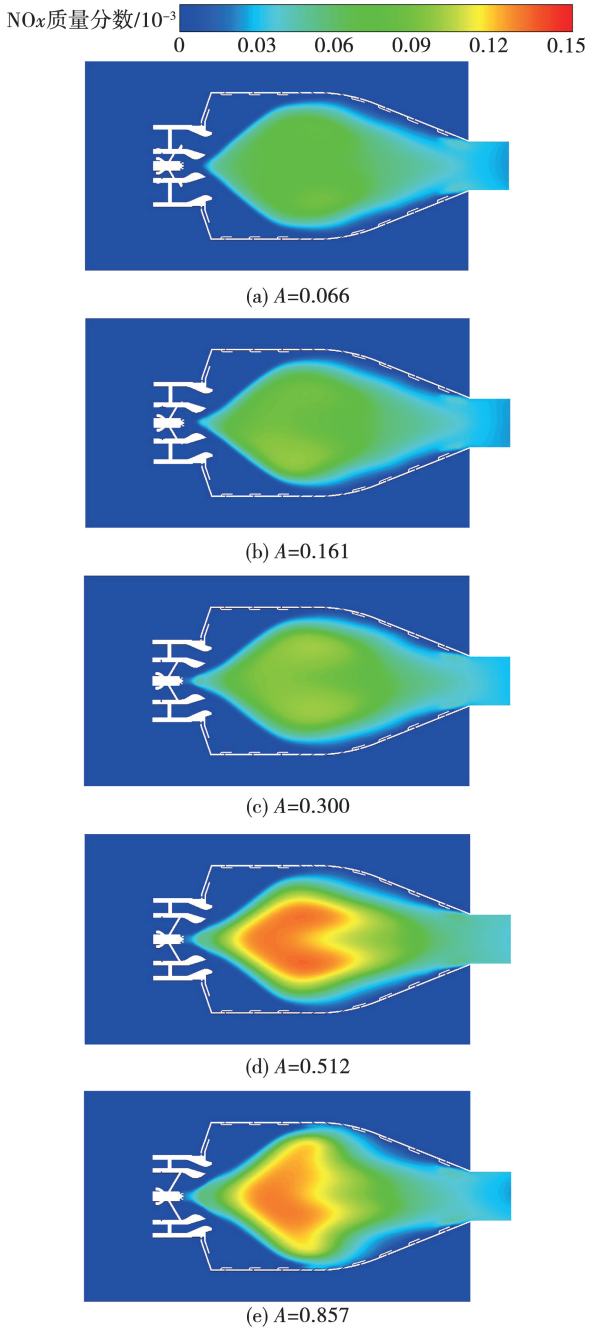


图 12　空气分级比对 NO_x 质量分数分布的影响

Fig. 12 Influence of air staging ratio on NO_x mass fraction distribution

可以看出,随着空气分级比升高回流区 NO_x 生成量增加,且回流区 NO_x 生成量增加速率同总 NO_x

生成量增加速率相近,这同样证明了空气分级比升高导致高温烟气停留时间延长是 NO_x 生成量增加的主要原因。因此,为保证低 NO_x 排放要求,空气分级比不应大于 0.3。

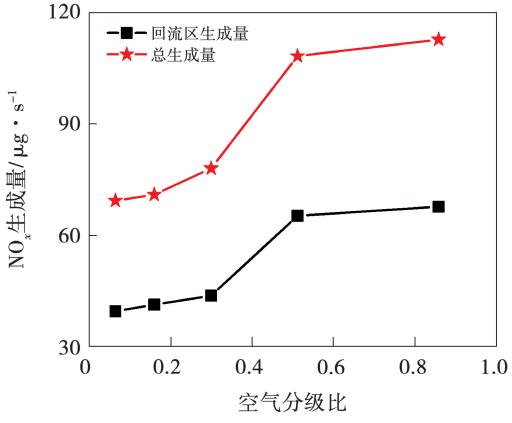


图 13　NO_x 生成量随空气分级比的变化规律

Fig. 13 Variation law of the amount of NO_x generation with air staging ratio

2.4　绝热壁面温度分布

虽然本研究中假定各壁面边界为绝热壁面,但由于研究过程中并未改变火焰筒的壁面冷却结构,因此,仍可定性地给出火焰筒壁面最高温度随空气分级比的变化规律,如图 14 所示。可以看出,随着空气分级比的升高,绝热壁面最高温度呈上升趋势。根据前文所述,空气分级比的增加会增大外级旋流数,外级旋流数的增强会破坏近壁面的冷却气膜,从而使壁面温度发生恶化[20]。

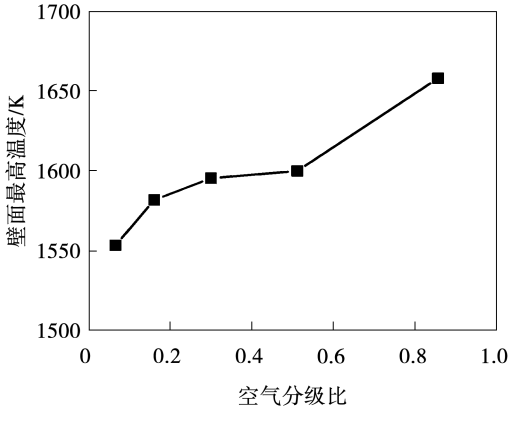


图 14　空气分级比对绝热壁面最高温度的影响

Fig. 14 Influence of air staging ratio on maxium adiabatic temperature of combustor liner

图 15 为不同空气分级比条件下火焰筒的绝热壁面温度分布云图。

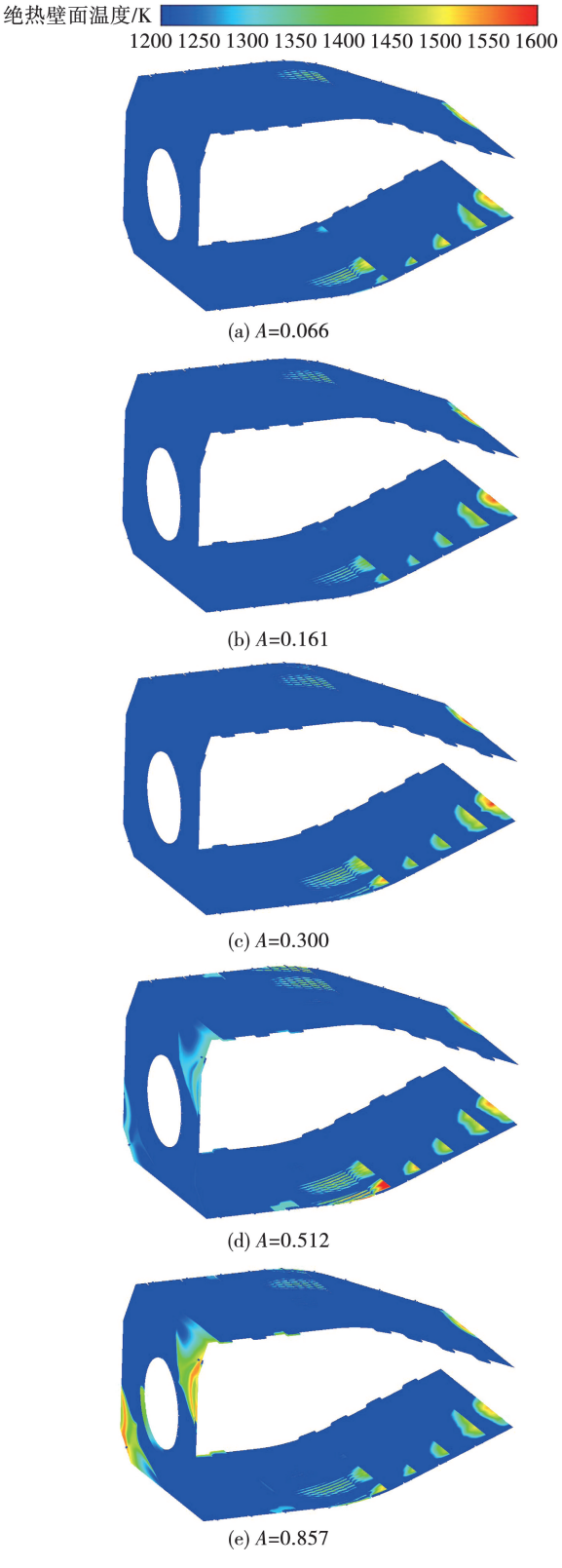


图 15　不同空气分级比时绝热壁面温度分布云图

Fig. 15 Contours of combustor liner's adiabatic temperature at different air staging ratios

从图 15 可以看出,由于旋流的作用,火焰筒绝热壁面高温区位于上方壁面的左侧和下方壁面的右侧,且随着空气分级比的增加火焰筒头部端面位置的温度逐渐升高,火焰筒头部端面的高温区位于右上和左下两个位置。根据前文所述,空气分级比的升高会导致角涡位置的燃料发生预裂解反应,使得角涡位置的温度升高,从而引起头部端面位置的温度升高。

3　结　论

以单头部同轴分级模型燃烧室为研究对象,在保证内、外两级当量比相同的条件下,数值分析了空气分级比 A 对燃烧室性能参数的影响,所得结论如下:

(1) 燃烧室的燃烧效率、温度分布、RTDF 和 CO 污染物排放对空气分级比不敏感,但随着空气分级比的升高,角涡位置的 CO 质量分数先升高后降低,火焰托举高度逐渐减小,当空气分级比大于 0.3 时,可能会导致中心级温度超标。

(2) 随着空气分级比的升高,燃烧室总压损失、OTDF 和 NO_x 排放逐渐升高。其中,NO_x 排放升高的原因主要是随着空气分级比的升高,高温烟气停留时间逐渐增加。

(3) 随着空气分级比的升高,火焰筒绝热壁面的最高温度和火焰筒头部端面的温度逐渐升高。

(4) 对于本研究所采用的单头部同轴分级模型燃烧室,可采用较小的空气分级比来保证燃烧室性能参数。对于本研究所针对的模型燃烧室,空气分级比不应大于 0.3。

参考文献:

[1] ZAJADATZ M, LACHNER R, BERNERO S, et al. Development and design of Alstom's staged fuel gas injection EV burner for NO_x reduction[C]//Montreal: ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, 2007.

[2] DÖBBELING K, HELLAT J, KOCH H. 25 Years of BBC/ABB/Alstom lean premix combustion technologies[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: Transactions of the ASME, 2007, 129(1): 2 – 12.

[3] KARIM H, NATARAJAN J, NARRA V, et al. Staged combustion system for improved emissions operability and flexibility for 7HA class heavy duty gas turbine engine[C]//Charlotte: ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2017.

[4] MONGIA H. TAPS: a fourth generation propulsion combustor technology for low emissions[C]//Dayton: AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition, 2003.

[5] SHUKIN S, ANNERFELDT M, BJORKMAN M. Siemens SGT-800 industrial gas turbine enhanced to 47 MW: design modifications and operation experience[C]//Berlin: ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, 2008.

[6] LI L, LIN Y, FU Z, et al. Emission characteristics of a model combustor for aero gas turbine application[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 72: 235 – 248.

[7] 张志浩,刘　潇,吕光普,等. 低排放塔式同轴分级燃烧室旋流器性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5595 – 5607.
ZHANG Zhi-hao, LIU Xiao, LYU Guang-pu, et al. Research on swirler performance of the low emission tower-type coaxial staged combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5595 – 5607.

[8] 李苏辉,张归华,吴玉新. 面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1423 – 1437.
LI Su-hui. ZHANG Gui-hua. WU Yu-xin. Advanced combustion technologies for future gas turbines[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(12): 1423 – 1437.

[9] 李奥宇,安　辞,赵宁波,等. 同轴分级环形燃烧室低工况燃料分配特性[J]. 热能动力工程, 2020, 35(7): 35 – 42.
LI Ao-yu, AN Ci, ZHAO Ning-bo, et al. Fuel distribution strategies of coaxial stage annular combustor under low load condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 35 – 42.

[10] ARNDT C M, STÖHR M, SEVERIN M J, et al. Influence of air staging on the dynamics of a precessing vortex core in a dual swirl gas turbine model combustor[C]//Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2017: 4683.

[11] MARDANI A, ASADI R B, REZAPOUR R H. Experimental investigation on the effects of swirlers configurations and air inlet partitioning in a partially premixed double high swirl gas turbine model combustor[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2021, 143(1): 012302.

[12] KRAUS C, HARTH S, BOCKHORN H. Experimental investigation of combustion instabilities in lean swirl-stabilized partially-premixed flames in single-and multiple-burner setup[J]. International Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2016, 8(1): 4 – 26.

(下转第 136 页)