

旋流角度对燃料掺混特性影响研究

谢岩¹, 梁红侠¹, 索建秦¹, 冉军辉²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072; 2. 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: 为了研究工业燃气轮机燃烧室旋流器旋流角度对燃料/空气混合均匀度以及 NO_x 排放的影响, 针对某型燃烧室的中心分级双级轴向旋流器, 应用 Fluent 软件, 选择 Realizable $k-\varepsilon$ 和 Species Transport 模型, 在燃气轮机的设计工况下对不同旋流角度回流区形态、甲烷的体积分数分布、温度场和污染物的排放进行了数值模拟。研究表明: 随着内旋流角度从 30° 增加到 50° , 燃烧室内流场形成的回流区尺寸有减小的趋势, 燃料的分布趋于均匀, 主燃区最高温度从 2 304 K 降低到 2 180 K, NO_x 排放呈先增大后减少的趋势, 旋流角度为 50° 时 NO_x 排放质量浓度为 501.045 mg/m^3 。

关键词: 工业燃气轮机; 双旋流燃烧室; 旋流角度; 燃料掺混特性; NO_x 排放

中图分类号: V231.2 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.10.007

[引用本文格式] 谢岩, 梁红侠, 索建秦, 等. 旋流角度对燃料掺混特性影响研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 48-54. XIE Yan, LIANG Hong-xia, SUO Jian-qin, et al. Study on the effect of Swirl angle on fuel mixing characteristics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 48-54.

Study on the Effect of Swirl Angle on Fuel Mixing Characteristics

XIE Yan¹, LIANG Hong-xia¹, SUO Jian-qin¹, RAN Jun-hui²

(1. College of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072; 2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to study the effect of swirl angle on fuel / air mixing uniformity and NO_x emission in industrial gas turbine combustor, the Realizable $k-\varepsilon$, Species Transport models were selected by Fluent software for a centralstage two-stage axial swirler of a combustor. Under the design conditions of the gas turbine, the shape of the recirculation zone, volume fraction of methane, temperature field and pollution emission at different swirl angles were numerically simulated. The results show that with the increase of the internal swirl angle from 30° to 50° , the size of the recirculation zone formed by the flowfield in the combustor tends to decrease, and the fuel distribution tends to be uniform. The maximum temperature in the main combustion zone decreased from 2 304 K to 2 180 K. The NO_x emission increasing at first and then decreasing, and the NO_x emission concentration was 501.045 mg/m^3 at 50° swirl angle.

Key words: industrial gas turbine; dual-swirl combustor; swirl angle; fuel mixing characteristics; NO_x emissions

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-04-29

基金项目: 国家科技重大专项(2017-I-0011-0012); 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室-海洋工程燃气轮机实验室

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-I-0011-0012); Supported by National Engineering Laboratory of Ship and Ocean Engineering Power System-Ocean Engineering Gas Turbine Laboratory

作者简介: 谢岩(1996-), 男, 山西运城人, 西北工业大学硕士研究生。

通讯作者: 梁红侠(1979-), 女, 陕西宝鸡人, 西北工业大学副教授。

引 言

空气中的 NO_x 不仅会危害人体健康,而且会形成光化学烟雾,破坏臭氧层,形成酸雨,对环境造成极大危害。我国在 2012 年实施的火电厂大气污染物排放标准中规定^[1],燃气轮机机组氮氧化物排放浓度限值为 50 mg/m^3 。为降低污染物排放,国际上工业燃气轮机大多采用贫燃预混燃烧技术,例如,Rolls-Royce 轴向分级贫燃预混燃烧室^[2];GE 的 DLN (Dry Low NO_x) 系列燃烧室^[3];Siemens 公司的中心分级燃烧室^[4-5]。在这些先进的燃气轮机燃烧室中,均使用了旋流器结构,一是为了在燃烧室中形成回流区,起稳定火焰的作用,二是为了促进燃料和空气的混合,形成可燃均匀混合气体以降低污染排放。

国内外很多学者对贫燃预混燃烧室中的旋流器进行了深入研究。武萍等人^[6]通过数值模拟研究了某环管燃烧室双级旋流器旋向组合和旋流强度对 NO_x 排放的影响,结果表明同向组合燃烧室 NO_x 排放低于反向组合,二级旋流器旋流强度为 0.7 时排放性能最优。黄行良等人^[7]通过数值模拟研究了旋流器叶片轴向长度、叶片角度及叶片数目对燃料混合和燃烧的影响,结果表明对燃料混合起主要作用的是旋流强度,增大旋流强度可以提高燃料和空气的混合均匀性。ZHOU 等人^[8]通过试验研究了旋流数对 NO_x 形成的影响,结果表明随着旋流数增加,热力型 NO_x 先增加后减小,燃料型 NO_x 先减小后增大。党新宪等人^[9]通过试验研究了双级旋流器流通面积和叶片安装角对污染物排放和燃烧效率的影响。Mehta 等人^[10]针对同轴双旋流燃烧室,采用试验研究了旋流器旋向组合对燃烧室流场的影响。Grinstein 等人^[11]采用数值模拟和试验方法,研究了单旋流和多旋流燃烧室旋流数和旋流器半径对流场的影响。

旋流器对燃烧室流场和燃烧性能的影响极其复杂,因此,针对以甲烷为燃料的双旋流燃烧室,采用数值模拟研究内旋流器叶片角度对燃烧室流场、燃料/空气掺混特性以及燃烧性能的影响规律。

1 模型介绍

1.1 几何模型

双旋流燃烧室头部结构如图 1 所示,燃烧室头

部由双级旋流器、燃料喷射小孔、中心体和文丘里通道组成。内、外旋流器叶片的几何角度均为 40° ,旋向相同,为顺时针方向,内旋流器由 10 个直叶片组成,外旋流器有 12 个直叶片。在双级旋流器进口处的内外壁叶片通道之间均布有预混燃料喷射小孔,中心体开设有轴向扩散燃料和径向扩散燃料喷射小孔用以稳定火焰。预混燃料经喷射小孔沿径向喷射进入旋流器通道中,在旋流器叶片通道与文丘里通道中与旋流空气充分混合,形成预混燃气进入火焰筒,实现预混燃烧。

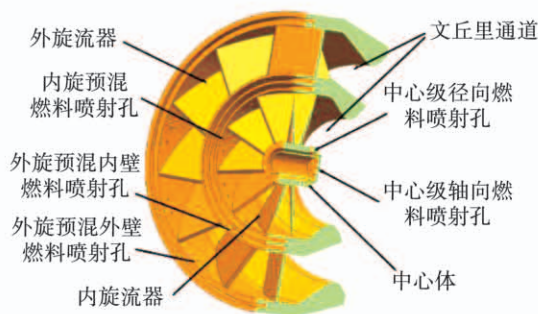


图 1 双旋流低排放燃烧室头部结构

Fig. 1 Dome structure of dual swirl low emission combustor

图 2 为燃烧室流体域结构图,火焰筒采用方腔结构。火焰筒长度为 388 mm,最大横截面 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。头部扩张角为 77.5° ,后半段是收敛段,收敛角为 17° 。坐标轴原点建立在头部出口燃烧室进口轴线位置,轴向位置为 x 轴,火焰筒后半段沿 y 轴方向收敛。

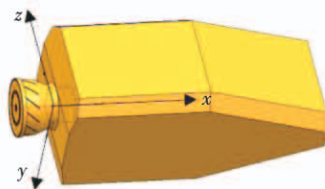


图 2 燃烧室计算域

Fig. 2 Calculation domain of the combustor

1.2 计算方法

对燃烧室流动特性以及燃烧特性的数值模拟基于压力求解器的压力-速度耦合算法,方程的空间离散化均采用二阶或二阶迎风格式。同时,监测残差与 $x = 50 \text{ mm}$ 截面(回流区所在截面)的质量加权平均轴向速度,当计算残差小于 10^{-4} 时,轴向速度

的波动量小于 1%, 并迭代计算 200 次判断收敛。

采用空气质量流量进口、燃料质量流量进口边界条件、压力出口及无滑移、绝热壁面边界条件。在设计工况下, 燃烧室空气进口压力为 1 MPa, 温度为 600.887 K, 进气流量为 1.591 kg/s。

燃烧室头部结构复杂, 燃料喷孔较多, 采用了一体化的非结构四面体网格, 喷射小孔等细小部位进行局部加密。网格无关验证后选择网格数量约为 567 万进行计算。

1.3 模型验证

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型模拟燃烧室内的湍流流动, 采用组分输运模型 (Species Transport) 模拟燃烧室内燃料和空气的掺混过程, 采用有限速率/涡耗散燃烧模型 (Finite-Rate/Eddy-Dissipation), 以甲烷/空气两步反应机理模拟化学反应过程。燃烧中主要产生热力型 NO_x 。

采用文献[12]中的轴向双级旋流器加文丘里管试验件的 PIV 试验结果对本模型数值计算进行验证。试验件结构如图 3 所示。

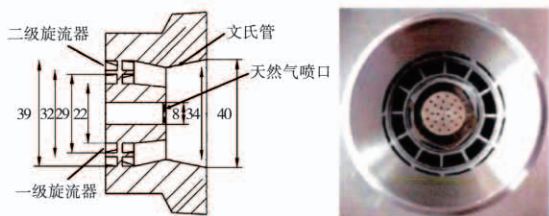


图 3 验证模型试验件及相关尺寸 (mm)

Fig. 3 Validate model test article and related dimensions (mm)

验证结果如图 4 所示。试验结果与数值模拟得到的轴向速度峰值基本一致, 轴向速度在各个截面均呈双峰分布。说明所采用的数值模拟计算模型能比较准确地模拟燃烧室内的流场结构与细节, 因而选用的计算模型是可靠的。

2 计算结果分析

2.1 内旋流角度对回流区的影响

图 5 为内旋流角度对燃烧室回流区的影响结果, 图中燃烧室内曲线表示轴向速度为零等值线, 曲线包围区域是燃烧室的后回流区。从图中可以看出, 旋流角度从 30° 变化到 50° , 产生的中心回流区后驻

点^[13]位置前移, 回流区轴向长度变短。当内旋流器叶片角度逐渐增大, 气流在旋流器出口位置会产生更大的切向速度, 导致中心轴线上逆压梯度增大, 负速度沿轴线方向会更早地衰减到零, 导致回流区轴向长度变短。同时, 随着内旋流角度的增大, 回流区最大宽度有少许减小, 内旋空气切向速度增大, 与外旋空气的掺混作用及动量交换就更加强烈, 速度耗散导致下游回流区的径向宽度减小。

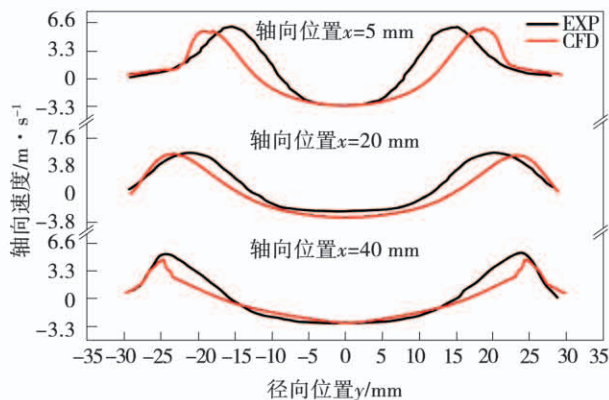


图 4 不同位置轴向速度试验与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison diagram of axial velocity and numerical simulation at different positions

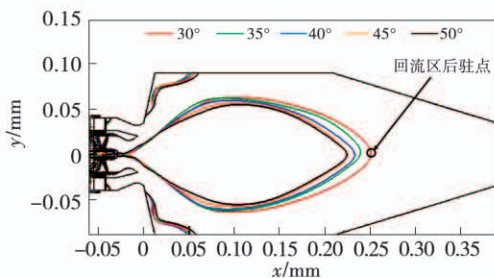


图 5 不同旋流角度回流区对比

Fig. 5 Comparison of recirculation area at different swirl angles

2.2 旋流角度对燃料分布特性的影响

燃料/空气混合均匀度是燃烧室重要的性能指标, 在表征甲烷混合均匀度时, 均使用甲烷体积分数在各个截面面积加权平均的均匀度指数, 计算式为:

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(f_i - \bar{f}_a) A_i]}{2 |\bar{f}_a| \sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

$\bar{f}_a$ 是特征截面燃料体积分数的平均值;

$$\bar{f}_a = \sum_{i=1}^n f_i A_i / \sum_{i=1}^n A_i \tag{2}$$

改变内旋流器叶片角度会影响燃烧室流场,进而也会影响燃料/空气的掺混特性。在设计工况下进行燃料的分配,中心级燃料的质量流量为 0.007 090 kg/s,内旋预混燃料质量流量为 0.021 27 kg/s,外旋预混燃料是为 0.042 52 kg/s。

图 6 为不同内旋流角度时燃料混合均匀度沿轴向位置的变化。从图中可以看出,燃料混合均匀度沿轴向位置的变化呈单调递增的趋势。轴向位置 x 为 $-20 \sim 5$ mm 时甲烷的混合均匀度快速上升;到 $x = 5$ mm 时燃料的混合均匀度均达到了 0.97 以上;再往下游发展,燃料的混合均匀度增加缓慢,到 $x = 45$ mm 位置,5 种方案对应的燃料混合均匀度均达到了 0.995 以上。不同方案对应的甲烷混合均匀度有一定差异,轴向位置 x 为 $-20 \sim 40$ mm 时,30° 内旋流角对应的燃料混合均匀度最低,35° 和 40° 旋流角时差别不大,燃料混合均匀度要好于 30°,45° 和 50° 旋流角时混合均匀度曲线也基本重合,其燃料混合均匀度最好。到 $x = 40$ mm 位置,不同旋流角度对应的燃料混合均匀度曲线已完全重合,燃料与空气的掺混基本完成,不再发生变化。

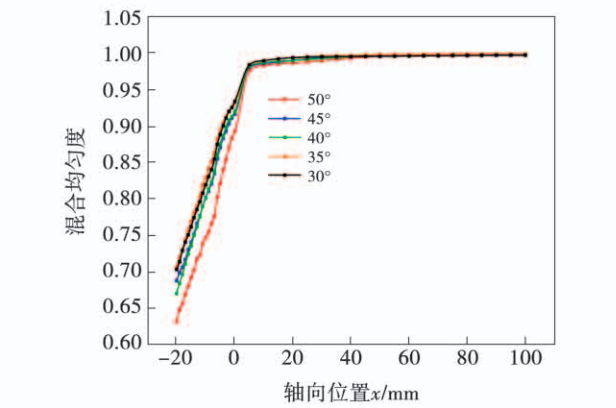


图 6 旋流强度对燃料混合均匀度的影响

Fig.6 The influence of swirl intensity on fuel mixing uniformity

为观察燃料在火焰筒内的分布情况,取 $x = 0$, 10 和 20 mm 3 个截面,对甲烷摩尔分数分布进行对比,如图 7 所示。以内旋流角 30° 头部出口截面 ($x = 0$ mm) 为例,如图 8 所示,燃料的分布大致分

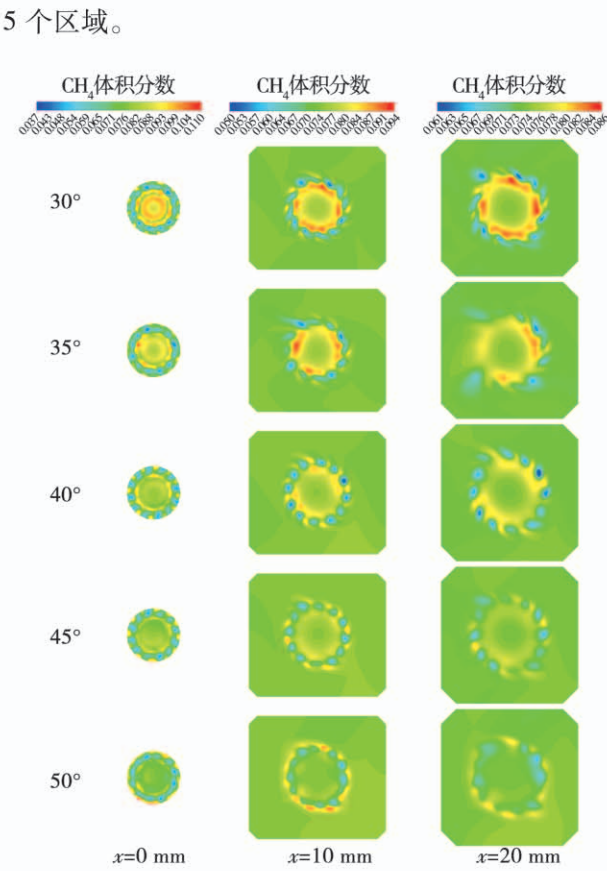


图 7 不同旋流角度下甲烷体积分分数分布

Fig.7 Methane volume fraction distribution at different swirl angles

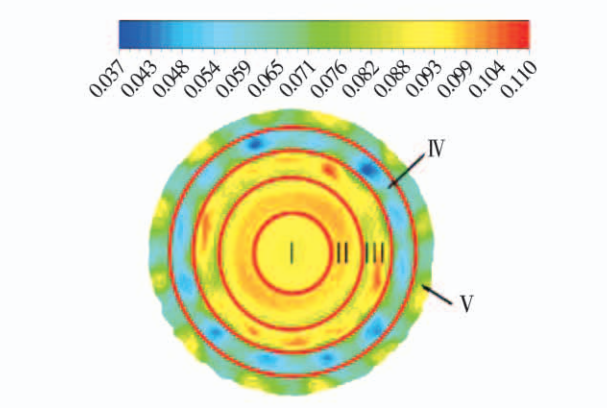


图 8 火焰筒头部出口截面甲烷体积分分数分布

Fig.8 Distribution of methane volume fraction at flame tube dome exit section

区域 I :最中间轴线附近燃料的体积分分数较低,这是中心回流区的位置,燃料主要来自于下游燃料的回流。区域 II :向外一圈是燃料的环形高浓度区,这一部分是中心级扩散燃料。区域 III :燃料环形高

浓度区,与内旋空气进行充分混合的内旋预混燃料。区域Ⅳ和区域Ⅴ是外旋预混燃料在截面的分布。

与图 7 进行横向比较,从轴向位置 x 为 $0 \sim 20$ mm 时,燃料空气向下游发展,各个环形区域的半径逐渐变大,截面上燃料分布逐渐均匀;区域Ⅱ的扩散燃料在旋流空气的作用下径向向外扩张,逐渐与区域Ⅲ连在一起;区域Ⅳ和区域Ⅴ向下游发展过程中,燃料在旋流空气的作用下向壁面方向扩散,这有利于燃料空气的混合。

与图 7 进行纵向比较,当旋流角度从 30° 变化到 50° ,区域Ⅱ与区域Ⅲ燃料高浓度区域的颜色逐渐变浅,区域Ⅳ和区域Ⅴ会有更多燃料通过质量交换与扩散作用散布到壁面附近,火焰筒内燃料的分布更均匀。增大内旋流器旋流角度促进了火焰筒内燃料与空气的混合均匀性。

2.3 旋流角度对热态流场与燃烧特性的影响

2.3.1 旋流角度对热态流场的影响

获得旋流角度对燃料分布特性的影响规律后,需要进一步研究其燃烧特性,从图 6 得出结论,旋流角度为 35° 与 40° , 45° 与 50° 时的燃料掺混特性差异并不明显,所以选择 30° , 40° 与 50° 3 种方案进行热态数值计算,得到热态不同旋流角度下回流区对比结果,如图 9 所示。从图中可以看出,热态回流区随旋流角度的变化规律与冷态时是一致的,随着旋流角度变大,回流区呈减小的趋势。

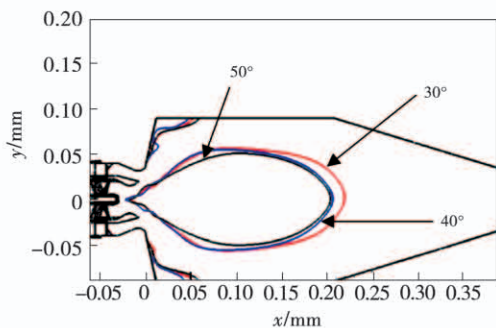


图 9 不同旋流角度热态回流区对比

Fig.9 Comparison of hot recirculation zone at different swirl angles

不同内旋流器叶片角度冷、热态流场之间的关系是一致的,这里选取基准方案(内旋流角 40°)的

冷、热态流场进行研究,定性分析冷态和热态流场的差异。图 10 选择 3 个轴向截面 $x = 100, 180$ 和 240 mm 进行冷热态轴向速度的比较。可以看出,3 个截面的冷、热态流场轴向速度有明显的差异。热态流场的轴向速度明显大于冷态流场,尤其是靠近壁面的速度峰值,热态流场约为冷态流场的 $2 \sim 5$ 倍。在 $x = 100$ 和 180 mm 截面上存在回流区,与冷态流场相比,热态流场的回流速度更大,但回流区宽度略小,热态轴向速度的分布更不均匀,沿径向方向的速度梯度更大。

在热态流场情况下,燃料燃烧释放大量热量,气体受热膨胀,气流的流动速度会增加。这与文献 [14] 得到的规律相同。

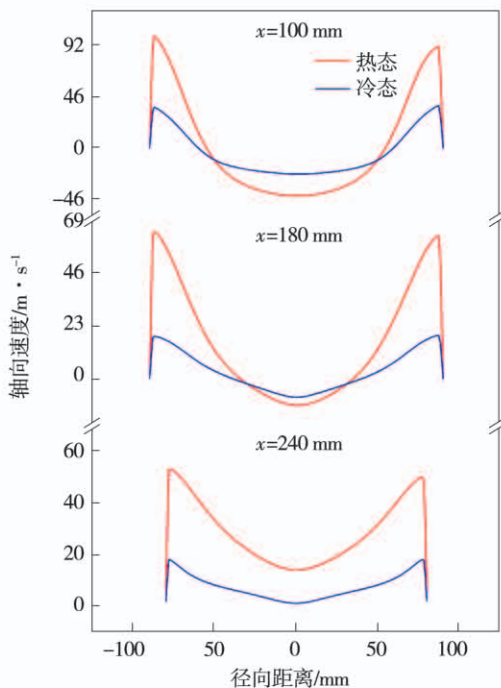


图 10 冷、热态流场轴向速度沿径向分布对比

Fig.10 Comparison of radial distribution of axial velocity in cold and hot states flowfield

2.3.2 旋流角度对温度场的影响

燃料在火焰筒内的分布会影响到热态温度场,继而影响 NO_x 的排放。图 11 为不同旋流角度燃烧室中心轴线的温度分布。从图中可以看出,随着旋流角度的增加,火焰筒中心位置燃料与空气的掺混更均匀,最高温度逐渐降低。

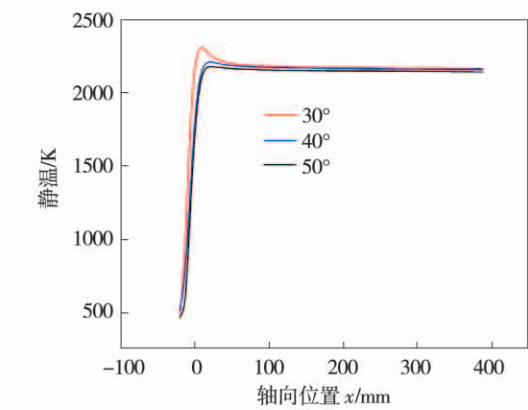


图 11 不同旋流角度中心轴线上温度分布
Fig. 11 Temperature distribution on the central axis
of different swirl angles

2.3.3 旋流角度对污染物排放的影响

双旋流燃烧室模型在工作过程中主要产生热力型 NO_x 。图 12 是不同旋流角方案的 NO_x 质量分数分布云图。从图中可以看出,燃烧室 NO_x 主要产生在中心高温区和角回流区。随着旋流角度的增大,燃烧室中心高温区产生的 NO_x 逐渐减少,但角回流区会产生大量的 NO_x 。

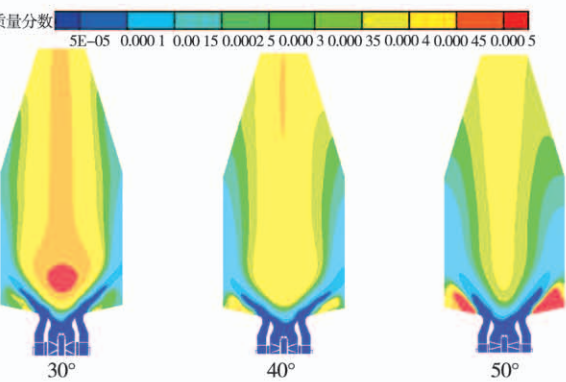


图 12 不同旋流角度下 NO_x 质量分数分布
Fig. 12 NO_x mass fraction distribution at different
swirl angles

按照国家标准规定^[1], NO_x 和 CO 排放需要折算成 15% 氧体积分数计算,作为衡量排放的指标。表 1 为燃烧室出口 NO_x 和 CO 质量浓度并换算成 15% 氧含量下的排放质量浓度。从表中可以看出,随着旋流角度的增大, NO_x 排放呈先增大后减少的趋势, 50° 旋流角的 NO_x 排放最低,为 501. 045 mg/

m^3 。CO 排放质量浓度均比较低,表示燃烧效率高。

表 1 不同旋流角度时污染物排放质量浓度
Tab. 1 Pollutant emissions mass concentration
at different swirl angles

旋流角度/(°)	NO_x 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	CO 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
30	552. 551	0. 145
40	558. 457	0. 118
50	501. 045	0. 235

3 结 论

针对双旋流燃烧室头部结构,改变内旋流器叶片角度,研究叶片角的变化对燃烧室冷态流场、燃料分布特性以及燃烧特性的影响规律,得到结论:

(1) 内旋流器旋流角度从 30° 增大到 50°, 燃料混合均匀度沿轴向位置的变化呈递增的趋势,当轴向位置达到 40 mm,再往下游发展,燃料混合均匀度已不再发生变化。

(2) 对比冷、热态流场不同旋流角度下回流区,随着旋流角度变大,热态回流区呈减小的趋势。与冷态流场相比,热态流场轴向速度的分布更不均匀,沿径向方向的速度梯度更大。

(3) 对 30°、40° 和 50° 3 种旋流角度进行设计工况的热态计算,随着旋流角度的增大,燃烧室中心高温区减小,温度降低, NO_x 排放呈先增大后减少的趋势, 50° 旋流角 NO_x 排放最低,为 501. 045 mg/m^3 。

参考文献:

[1] 中国环境科学研究院, 国电环境保护研究院. 火电厂大气污染物排放标准[S]. 中华人民共和国国家标准, 2011.
Chinese Academy of Environmental Sciences, National Power Environmental Protection Research Institute. Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants[S]. National Standards of the People's Republic of China, 2011.

[2] WILLIS J D, TOON I J, SCHWEIGER T, et al. Industrial RB211 dry low emission combustion[C]//ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cincinnati, 1993.

[3] DAVIS L B. Dry low NO_x combustion systems for GE heavy-duty gas Turbines[C]//ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Birmingham, 1996.

- [4] RATCLIFF P, GARBETT P, FISCHER W. The new siemens gas turbine SGT5 – 8000H for more customer benefit[J]. VGB power tech, 2007, 87.
- [5] NAG P, LITTLE D, PLANT A, et al. Low load operational flexibility for siemens F-and G-Class gas turbines[C]//Asme Turbo Expo; Power for Land, Sea, & Air, Glasgow, 2010.
- [6] 武 萍, 曹天泽, 张晨曦, 等. 低排放燃烧室旋流器结构对 NO_x 排放的影响[J]. 热能动力工程, 2015, 30(2): 180 – 186.
WU Ping, CAO Tian-ze, ZHANG Chen-xi, et al. Influence of low-emission combustion chamber cyclone structure on NO_x emissions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(2): 180 – 186.
- [7] 黄行良, 朱志劫, 叶 文. 燃气轮机燃烧室预混结构性能的数值研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(9): 697 – 703.
HUANG Xing-liang, ZHU Zhi-jie, YE Wen. Numerical study on the performance of premixed structure of gas turbine combustor[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2016, 36(9): 697 – 703.
- [8] ZHOU L X, CHEN X L, ZHANG J. Studies on the effect of swirl on no formation in methane/air turbulent combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2235 – 2242.
- [9] 党新宪, 赵坚行, 吉洪湖. 试验研究双旋流器头部燃烧室几何参数对燃烧性能影响[J]. 航空动力学报, 2007(10): 1639 – 1645.
DANG Xin-xian, ZHAO Jian-xing, JI Hong-hu. Experimental study on the influence of geometric parameters of dual swirler head combustor on combustion performance[J]. Journal of Aeronautical Dynamics, 2007(10): 1639 – 1645.
- [10] MEHTA J M, SHIN H W, WISLER D C. Mean velocity and turbulent flow-field characteristics inside an advanced combustor swirl cup[C]//AIAA Paper, AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1989.
- [11] GRINSTEIN F, YOUNG T, LI G, et al. Computational and experimental analysis of the flow dynamics in a multi-swirler combustor [C]//AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, 1976.
- [12] 姜 磊. 低 NO_x 双旋流燃气燃烧器流动及燃烧特性的实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2017.
JIANG Lei. Experimental study on the flow and combustion characteristics of a low- NO_x dual swirl gas burner[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [13] 于 涵. 基于 LDI 中心分级低污染燃烧室流动和污染排放特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
YU Han. Research on the characteristics of flow and pollution emission based on LDI center graded low-pollution combustion chamber[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.
- [14] FU Y, CAI J, JENG S M, et al. Reacting spray structure of a counter-rotating swirl cup [C]. Asme Turbo Expo; Power for Land, Sea, & Air, Reno-Tahoe, Nevada, 2005.

(丛 敏 编辑)