文章编号:1001-2060(2023)05-0162-08

低排放燃烧室燃料空气预混均匀性研究

刘恩惠1,刘世铮2,刘 潇1,郑洪涛1

(1.哈尔滨工程大学动力与能源工程学院,黑龙江哈尔滨150001;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:为了解决燃料与空气均匀预混的问题,以气态燃料-低排放塔式同轴分级燃烧室为研究对象,采用数值模 拟与实验设计数理统计方法相结合,研究了主燃级叶片角、叶片数、燃料速度和单面孔数对燃料和空气预混特性的 影响,筛选出对燃料空气预混均匀性影响的显著项,并拟合得出均匀性的预测公式。结果表明:单面孔数及其平方 项对预混均匀性影响最大;燃料速度与叶片角、燃料速度与单面孔数的交互效应其次;叶片数、叶片角、燃料速度及 其平方项和交互项对均匀性的影响最小。

关键 词:预混均匀性;单通道;实验设计;显著项;单面孔数

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2023.05.020

[引用本文格式] 刘恩惠, 刘世铮, 刘 潇, 等. 低排放燃烧室燃料空气预混均匀性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(5):162-169. LIU En-hui, LIU Shi-zheng, LIU Xiao, et al. Study on premixing uniformity of fuel and air in low emission combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5):162-169.

Study on Premixing Uniformity of Fuel and Air in Low Emission Combustor

LIU En-hui¹, LIU Shi-zheng², LIU Xiao¹, ZHENG Hong-tao¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineer University, Harbin, China, Post Code:150001;2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code:150078)

Abstract: In order to solve the problem of uniform premixing of fuel and air, low emission tower-type coaxial-staged combustor with gaseous fuel was selected as the research object. The effects of blade angle, blade number, the velocity of fuel and the number of one-side fuel hole in main combustion stage on the premixing characteristics of fuel and air were explored by combining numerical simulation and design of experiments. The significant terms that affected fuel-air premixing uniformity were screeened out, then a prediction formula for premixing uniformity was obtained by fitting. The results show that the number of single-side fuel hole and its quadratic term are the significant factors affecting the premixing uniformity; the interaction effects between the velocity of fuel and blade angle, the velocity of fuel and number of one-side fuel hole are considered as the second significant factors; the effects of blade number, blade angle and the velocity of fuel and their quadratic and interaction terms on uniformity are not significant. **Key words**: premixing uniformity, single channel, design of experiments, significant items, number of

one-side fuel hole

收稿日期:2022-07-06; 修订日期:2022-11-29

基金项目:国家科技重大专项(2017 - III - 0006 - 0031)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017 – III – 0006 – 0031)

作者简介:刘恩惠(1994-),女,哈尔滨工程大学博士研究生.

引 言

贫燃预混燃烧技术^[1]是降低燃气轮机 NO_x 排 放的关键技术,燃料与空气的混合均匀性是决定其 污染物排放量的关键因素。研究表明,燃料空气预 混越不均匀, NO_x 生成量越高^[2-3]。因此, 如何实 现燃料与空气快速且均匀的预混是国内外低排放燃 烧室研究热点。国内外学者针对燃料与空气预混均 匀性的研究开展了大量工作。Agbonzikilo 等人^[4]通 过实验方法得出燃料与空气的动量比是决定预混性 能的主要因素。相比于迎风侧喷入燃料,背风侧喷 入燃料时动量比更大,更有利于提高燃料和空气的 均匀性。谢刚等人^[5]发现干式低排放燃烧室内燃 料/空气射流动量比偏小是影响燃料径向和周向分 布不均匀的主要因素,提出减少孔数、增大孔径或者 改变喷孔位置可以提高预混均匀性。邢畅等人[6] 研究了不同值班级燃料比例的预混均匀性,并给出 燃料预混均匀性最佳的燃料布置方式。邵卫卫等 人^[7]发现预混段长度增加可促进燃料 – 空气预混, 但进一步增加长度,预混均匀性收益相对下降。孙 宝成^[8]发现喷嘴个数及布置方式对均匀性的影响 最大,预混长度对均匀性的影响次之。刘昭宇等 人^[9]发现预混段长度主要通过影响喷嘴出口的旋 流强度来影响燃料 - 空气预混均匀性,进而影响燃 烧室燃烧区温度场分布及污染物排放:并给出污染 物生成量最低时,预混段长度和流路直径的最佳比 值。冯冲等人^[10-11]指出燃料的供应方式、供应位 置、预混距离和来流空气的湍流度是影响燃料空气 预混均匀性的关键因素。Choi 等人^[12]指出燃烧室 的回流区和涡破碎过程均有利于促进燃料和空气的 预混均匀性。方刚毅等人[13] 指出增大旋流叶片几 何角有利于提高预混均匀性。Galley^[14]也指出旋流 作用有利于燃料空气掺混。Andreini^[15]通过改变旋 流结构及孔布置方式来实现不同的射流深度,发现 射流深度较大的方案更有利于燃料空气预混。

目前,对燃料空气预混均匀性的研究多基于单 一变量,而各变量的耦合作用对均匀性的影响则少 有研究。因此,本文采用实验设计方法对燃料与空 气的预混均匀性进行探究,重点分析叶片角、叶片 数、燃料速度以及单面孔数等因子的主效应项、平方 项及交互效应项对预混均匀性的影响规律,筛选出 对预混性能影响显著的项,并给出均匀性的预测 公式。

1 模型及方法

1.1 单流道模型介绍

由于旋流器叶片间的流道具有周期性,对单个 流道的研究即可反映出该旋流器全尺寸下的流动特 性及预混特性,且单流道模型的计算量小,可有效提 高计算效率。因此,本文以单流道为模型,其几何结 构如图1所示,单流道的入口内径和外径分别是13 和50 mm,出口内径和外径分别是13和38 mm。单 流道的边界条件如表1所示。空气和燃料(CH₄)均 采用质量流量入口,入口流量根据燃烧室额定工况 下单个预混级的流量确定,出口采用压力出口。



图 1 单流道的物理模型 Fig. 1 Physical model of single channel

表1 燃气轮机性能参数边界条件

Tab. 1 Boundary condition of gas turbine performance parameters

参数	数 值
压力/MPa	1
空气流量/kg·s ⁻¹	0.3977 8
空气温度/K	600
CH4流量/kg·s ⁻¹	0.015 3
CH4温度/K	300

1.2 数值方法验证

由于气体在单通道内的流动及混合过程,不涉 及燃烧和化学反应,因此采用 Realizable *k* – *ε* 湍流 模型及组分运输模型进行数值计算,该计算方法在 之前的研究中已被应用并得到验证^[16-17]。由于单 通道结构及其混合原理类似于横向射流模型,因此 本文使用图 2 所示的横向射流结构进行模型验证。



Fig. 2 Model of the jet-in-cross flow^[18] (mm)

图 3 是不同截面的 X 和 Z 方向的无量纲速度分 布,即 X 和 Z 方向的速度分别除以横流的来流速度。 图 3(a)是射流出口附近的射流速度分布,图 3(b) ~ 3(d)是空气沿 X 方向的速度。图 3(b)和 3(c)中, X/D=0 附近存在峰值;图 3(d)中,峰值位于 X/D= 0.5 附近。峰值是由于横流空气流动到射流出口附 近,射流的障碍作用使空气流动速度减小,并产生具 有反向压力梯度的剪切层引起的。由图 3 可知,模 拟结果能较好的反映出混合区域的速度分布、速度 变化梯度以及剪切层位置。因此,采用该数值方法 能够反映出单流道模型的流动及混合特性。





图3 不同截面位置的速度分布

Fig. 3 Profiles of velocity distribution on different sections

1.3 网格无关性验证

为了减小由网格数引起的计算误差,对单流道 模型进行了网格无关性验证,并对尺寸较小的燃料 孔进行加密。本文对比了 86 万、116 万和 159 万非 结构网格时,Y方向的甲烷质量分数,计算结果如图 4 所示。当网格数达到 116 万时,甲烷质量分数不 再随着网格数的增加而改变,考虑到计算精度和计 算成本,最终选用网格数为 116 万进行数值模拟。



different meshes

2 研究内容及分析

旋流器和燃料孔的结构参数是影响预混性能的 重要因素。旋流器结构参数^[19](叶片数和叶片角 度)影响流场的形态,叶片角度的大小直接决定了 旋流器的旋流强度,进而影响燃料与空气的预混性 能。叶片数将影响单流道周向的流通面积,叶片数 大,周向流通面积相对较小;叶片数小,周向流通面 积相对较大,周向流通面积的大小会影响到燃料流 入空气中的穿透深度。另外,燃料速度的大小也会 影响燃料在空气中穿透深度。

燃料孔位于叶片两侧,燃料总流量一定时,单面 孔数的改变不仅影响到燃料的径向分布,也会影响 燃料速度。因此,本文以叶片角、叶片数、燃料速度 以及单面孔数为研究对象,研究各变量对预混性能 的影响,并将各变量对预混均匀性影响的显著性进 行排序,得出对均匀性影响显著的变量。本文选用 均匀性指数^[20-21](Uniformity Index,UI)来评价各截 面的燃料和空气预混均匀性,UI = 1 表示燃料和空 气完全预混,UI = 0 表示燃料和空气未预混,UI 的定 义为:

$$UI = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{n} [|c_{m} - \bar{c}| A_{m}]}{2 |\bar{c}| \sum_{n=1}^{n} A_{m}}$$
(1)

式中:n—某截面的小平面总数;m—n个小平面的 面序号; c_m —小平面的甲烷质量分数; A_m —各小平面 的面积, m^2 ;|c|—某截面的甲烷质量分数。

2.1 完全析因实验设计

将叶片角、叶片数、燃料速度以及单面孔数这4 个变量定义为因子,变量的取值范围定义为因子水 平,预混均匀性定义为响应变量。本文主要探究主 燃一级旋流器,由于一级流道内径较小,叶片角超过 30°会导致叶片尾缘相互交叉,因此将一级流道内叶 片角固定为 30°,结合经验将一级流道外叶片角变 化范围确定为 35°~55°。燃料孔布置在叶片两侧, 且沿径向均匀分布,单面孔数为 N 个,一个单流道 内有 2N 个燃料孔。各因子及其水平值如表 2 所示。

表 2 各因子及其水平值

Tab. 2 Each factor and level value

名称	因子	低水平	高水平
А	叶片角/(°)	35	55
В	叶片数	8	12
С	燃料速度/m·s ⁻¹	70	180
D	单面孔数	2	6

本文选用 DOE 实验设计方法^[22]对单流道进行 研究,该方法是一种设计实验和分析实验数据的数 理统计方法,可以从大量因子中筛选出对响应变量 影响显著的因子,逐渐缩小因子个数及范围,并能找 到响应变量与因子间的关系式。DOE 方法已经在 燃烧室^[23]和单流道^[24]的研究中被广泛应用。本文 初步选用两水平的完全析因实验设计方法对上述 4 个因子进行实验设计,得到了 19 个设计方案,考虑 到计算误差,设置了 3 个中心点(设计方案 17 – 19, 各因子取值完全相同),各实验方案如表 3 所示。

表 3 完全析因随机实验设计表 Tab. 3 Randomized experimental design of full factorial design

设计	中心点	叶片角/	叶片数	燃料速度/	单面
方案		(°)		$m \cdot s^{-1}$	孔数
17	0	45	10	125	4
13	1	35	8	180	6
7	1	35	12	180	2
2	1	55	8	70	2
16	1	55	12	180	6
8	1	55	12	180	2
5	1	35	8	180	2
18	0	45	10	125	4
11	1	35	12	70	6
9	1	35	8	70	6
3	1	35	12	70	2
19	0	45	10	125	4
4	1	55	12	70	2
14	1	55	8	180	6
15	1	35	12	180	6
1	1	35	8	70	2
12	1	55	12	70	6
10	1	55	8	70	6
6	1	55	8	180	2

通过数值模拟方法计算得出上述 19 个设计方 案的响应变量(均匀性),并得出各因子对均匀性 的影响。如图 5 所示,均匀性随着各变量因子水 平的增加线性增大,并且增加单面孔数对预混均匀 性影响最大。因此将各因子对预混均匀性影响的显 著性排序为:单面孔数 > 燃料速度 > 叶片角 > 叶 片数。



除了考虑各因子对均匀性的影响,还应考虑到 各因子的交互作用对均匀性的影响。图6是各因子 的交互效应图,图6(a)和6(b)分别是叶片角与叶 片数的交互项、叶片角与燃料速度的交互项,其他图 以此类推。两条线平行表明两个因子间无交互作 用,非平行的两条线说明两因子间存在交互作用,两 条线的相交角度越大表明两因子的交互效应越强, 由此可知叶片角与单面孔数的交互项对均匀性影响 最显著。





图 7 为完全析因实验设计的帕累托效应图,一 般将标准化大于临界值(虚线)的项称为显著项。 帕累托效应图有效地将各因子及其交互项进行了排 序。由图 7 可知,单面孔数对均匀性的影响最显著, 燃料速度次之,叶片数是非显著项,由于叶片角与单 面孔数的标准化效应值在临近值附近,为了不忽略 任何一个显著项,也将叶片角与单面孔数的交互项 列为显著项。



通过 Minitab 软件对表 3 的 19 组数据进行检验 时发现,弯曲项值小于 0.05,意味着响应变量(均匀 性)随各因子水平的变化不是绝对的线性变化,为 了得到更准确的结论应该增加平方项,对其进行响 应曲面设计。响应曲面设计一般适用于因子数小于 或等于 3 的实验设计。因此忽略叶片数这一非显著 项对均匀性的影响,将叶片数定为 10,其他各因子 及其水平取值不变。

2.2 响应曲面设计

选用中心复合表面设计(Central Composite Face-centered Design, CCF)对叶片角、燃料速度、单面孔数进行曲面响应实验设计,得到了20个设计方案,其中6个中心点, CCF实验方案如表4所示。

图 8 为响应曲面设计的主效应图,各因子对均 匀性影响的显著性排序为:单面孔数>叶片角>燃 料速度。单面孔数对均匀性的影响最显著,随着单 面孔数从 2 变为 6,均匀性先增大后减小,当单面孔 数为 5 时均匀性最大,这也证明了给定的单面孔数 初始范围的合理性。可见,适当的增加径向单面孔 数有利于提高均匀性,但单面孔数过多,会降低均匀 性。叶片角从 35°增大到 55°时,均匀性先减小后增 加,在 45°附近出现拐点。燃料速度对均匀性的影 响不明显,燃料速度从 70 m/s 变化到 180 m/s,均匀 性变化范围很小。

表4 曲面响应随机实验设计表

Tab. 4 Randomized	l design o	f response	surface	methodology
-------------------	------------	------------	---------	-------------

设计	中心点	叶片角/(°)	燃料速度/	单面孔数
方案			m•s ⁻¹	
12	- 1	45	180	4
4	1	55	180	2
3	1	35	180	2
18	0	45	125	4
10	- 1	55	125	4
9	- 1	35	125	4
20	0	45	125	4
19	0	45	125	4
11	- 1	45	70	4
8	1	55	180	6
1	1	35	70	2
14	- 1	45	125	6
15	0	45	125	4
6	1	55	70	6
13	- 1	45	125	2
17	0	45	125	4
2	1	55	70	2
16	0	45	125	4
7	1	35	180	6
5	1	35	70	6





从图9响应曲面设计的交互效应图可以看出, 图9(b)的叶片角与单面孔数的3条曲线相互平行, 无交叉,说明叶片角和单面孔数之间无交互作用。 叶片角与燃料速度、燃料速度与单面孔数之间存在 交互作用。

各因子、各因子的平方项以及交互项对响应变 量影响的显著性排序如图 10 所示。





Fig. 9 Interaction effect of response surface

methodology



图 10 响应曲面设计的帕条元双应图 Fig. 10 Pareto chart of response surface methodology

单面孔数及其平方项对均匀性的影响最显著, 说明在旋流器其他结构参数确定的情况下,调整燃 料孔数对提高燃料与空气的预混均匀性是最有效 的。由于叶片角与燃料速度的交互项,燃料速度与 单面孔数的交互项的标准化效应值接近于临界值, 将这两个交互项定义为次显著项。

根据上述分析, 拟合出叶片角、燃料速度和单面 孔数与均匀性的关系, 提出均匀性的预测模型, 具体 公式为:

UI = 1.01 - 0.010 95 * A - 0.001 523 * B + 0.056 4 * C + 0.000 091 * A * A + 0.000 001 * B * B - 0.007 15 * C * C + 0.000 021 * A * B0.000 036 * A * C + 0.000 108 * B * C (2) 其中, UI—均匀性指数,%; A、B 和 C—叶片角、燃料 速度及单面孔数,单位分别是(°), m/s 和个。

2.3 流场分析

选取表4中的方案4,8和6,通过流场分析单 面孔数、燃料速度对甲烷质量分数的影响,各方案的 因子水平及均匀性如表5所示。

表 5 各因子水平和均匀性指数

Tab. 5 Each factor level and uniformity index

参数	方案4	方案8	方案6
叶片角度/(°)	55	55	55
燃料速度/m·s ⁻¹	180	180	70
单面孔数	2	6	6
均匀性/%	75.687 2	81.144 1	78.4909

沿着流动方向(X方向)选 X = 5,10,20,30 和 40 mm 截面,通过阵列得出整个截面的甲烷质量分 数云图。图 11 为不同截面的甲烷质量分数云图。 X = 5 mm 截面可以清晰地观察到燃料孔的位置,燃 料孔径向等间距均匀分布,相比于 2 个燃料孔,6 个 燃料孔的布置方式使燃料径向分布的更加均匀。如 图 11(b)中黑色虚线所示,在 X = 10 mm 截面,由于 旋流的作用以及掺混距离的增加,相同径向尺度的 两个燃料孔开始相互靠近并融合。X = 20 mm 截面 时,相同径向尺度的两个燃料孔在周向已完全融合。 方案 6 和 8 的甲烷质量分数相似,但后者的均匀性 优于前者。这种差异主要是燃料速度不同引起的, 方案 8 的燃料速度大,燃料穿透深度更深,燃料与空 气能在流道中更好的混合。



图 12 为方案 6 和方案 8 在 *X* = 5 mm 截面的甲 烷质量分数云图,虚线框内黑色实线是流道边界线, 白色实线是各燃料孔中心的连接线。方案 6 中黑白 实线的间距大于算例 8,表明其燃料射流深度比方 案 8 更深。在 *X* = 40 mm 截面,方案 4,8 和 6 的均 匀性分别为 0.7568 72,0.8114 41 和 0.784 909。以 方案 8 为基准,方案 4 和 6 的均匀性下降了 6.72% 和 3.26%,这也表明单面孔数对均匀性的影响比燃 料速度显著,该结论与曲面响应分析得到的结论 一致。



图 12 X = 5 mm 截面的甲烷质量分数云图 Fig. 12 Contour of mass fraction of CH₄ at X = 5 mm

图 13 为方案 8 的三维燃料流线图。在燃料 出口处由于喷入空气中的燃料受到来流空气的 阻碍,燃料射流弯曲,因此其速度迅速降低^[20-25]。 由于流道的弯曲型面加速了燃料的弯曲过程,导致 燃料喷出后迅速弯曲,然后沿着流道型线向下游运 动,最后在旋流空气的作用下燃料的速度在逐渐 增加。



图 13 燃料三维流线图 Fig. 13 Three-dimensional streamline diagram of fuel

3 结 论

本文采用实验设计的方法对燃料与空气预混均 匀性进行研究,得出叶片角、叶片数、燃料速度以及 单面孔数对均匀性的影响规律,筛选出影响燃料空 气预混均匀性的显著项,并拟合得出均匀性的预 测公式,为旋流器设计工作提供参考。得出结论 如下:

(1)燃料孔的单面孔数及其平方项对燃料空气 预混均匀性的影响是最显著的,均匀性随着单面孔 数的增加先增大后减小。在旋流器设计时,适度增加燃料的单面孔数有利于提高均匀性。

(2)相比于单面孔数,叶片数、叶片角和燃料速度对均匀性的影响不显著。叶片角与单面孔数几乎不存在交互效应,燃料速度与叶片角、燃料速度与单面孔数之间存在较强的交互效应,是次显著项。在旋流器设计中,除了考虑单个因子的作用,仍需充分考虑多因子的交互效应。

(3)从流场结构中可以看出,在空气的阻碍和 流道弯曲型面的共同作用下,燃料喷出后迅速弯曲, 向下游移动一段距离后,在旋流空气作用下其速度 逐渐增加。随着轴向距离的增加,燃料和空气的预 混更加均匀。

参考文献:

- [1] 林 枫,王 威,李名家,等. 燃气轮机振荡燃烧特性试验研究
 [J]. 热能动力工程,2017,32(S1):62-68.
 LIN Feng, WANG Wei, LI Ming-jia, et al. Experimental study on the combustion oscillation characteristics of gas turbine combustor
 [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2017, 32(S1):62-68.
- BIAGIOLI F, GUETHE F. Effect of pressure and fuel-air unmixedness on NO_x emissions from industrial gas turbine burners [J].
 Combustion and Flame, 2007, 151(1/2):274 – 288.
- [3] 谢 刚,祁海鹰,李宇红,等. R0110 重型燃气轮机燃烧室污染 排放性能研究[J].中国电机工程学报,2010,30(20):51-57.
 XIE Gang,QI Hai-ying,LI Yu-hong, et al. Emission performance of the dry low NO_x combustor for R0110 heavy duty gas turbine[J].
 Proceedings of the CSEE,2010,30(20):51-57.
- [4] AGBONZIKILO F E, OWEN I, STEWART J, et al. Experimental and numerical investigation of fuel-air mixing in a radial swirler slot of a dry low emission gas turbine combustor [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 138(6): V04BT04A054.
- [5] 谢 刚,李宇红,祁海鹰. DLN 燃烧室的燃料 空气预混均匀 性研究[J]. 工程热物理学报,2006,27(S2):227-230.
 XIE Gang,LI Yu-hong,QI Hai-ying. Experimental study on non-uniformity of fuel-air premixing in a DLN combustor[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2006,27(S2):227-230.
- [6] 邢 畅,邱朋华,刘 栗,等. 燃料预混特性对燃烧室燃烧特性的影响[J]. 推进技术,2016,37(11):2114-2119.
 XING Chang,QIU Peng-hua,LIU Li, et al. Effects of fuel premixed characteristics on combustion characteristics of combustor [J]. Journal of Propulsion Technology,2016,37(11): 2114-2119.
- [7] 邵卫卫,赵 岩,刘 艳,等.燃气轮机燃烧室掺混燃烧器天然
 气燃料/空气预混均匀性研究[J].中国电机工程学报,2017, 37(3):795-802.

SHAO Wei-wei,ZHAO Yan, LIU Yan, et al. Investigation of fuel/ air mixing uniformity in a natural gas premixed burner for gas turbine combustor applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3):795 - 802.

[8] 孙宝成. 燃气轮机燃料/空气掺混规律的数值研究[M]. 北京: 清华大学,2007.

SUN Bao-cheng. Numerical study of fuel/air unmixedness in a nonreacting gas turbine combustor[M]. Beijing: Tsinghua University, 2007.

[9] 刘昭宇,索建秦,孙付军.预混长度对燃料/空气预混特性和排 放特性影响的数值研究[C]//天津:中国工程热物理学 会,2018.

LIU Zhao-yu, SUO Jian-qin, SUN Fu-jun. Numerical study on the effect of premixed length on fuel/air premixed and emission characteristics[C]//Tianjin: Chinese Society of Engineering Thermophysics,2018.

[10] 冯 冲,祁海鹰,谢 刚,等. 干式低 NO_x 燃气轮机燃烧室的燃料/空气预混均匀性问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(17):9-19.

FENG Chong, QI Hai-ying, XIE Gang, et al. Analysis on the issue of fuel/air premixing uniformity of the dry low NO_x gas turbine combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17):9-19.

[11] 祝俊宗,胡 羽,夏单城,等.改善低 NO_x 燃烧室预混均匀性的结构优化策略[J].中国电机工程学报,2017,37(21):
 6353-6362.

ZHU Jun-zong, HU Yu, XIA Dan-cheng, et al. Structural optimization strategy of improving the premixing uniformity in a low NO_x combustor [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (21): 6353 - 6362.

- [12] CHOI M, SUNG Y, WON M, et al. Effect of fuel distribution on turbulence and combustion characteristics of a micro gas turbine combustor[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2017,48:24-35.
- [13] 方刚毅,邢 菲,赵梦梦. 弱旋流燃烧器燃料/空气预混均匀 性研究[J]. 推进技术,2021,42(6):1293-1302.
 FANG Gang-yi, XING Fei, ZHAO Meng-meng. Fuel/air premixing uniformity of low swirl burner[J]. Journal of Propulsion Technology,2021,42(6):1293-1302.
- [14] GALLEY D, DUCRUIX S, LACAS F, et al. Mixing and stabilization study of a partially premixed swirling flame using laser induced fluorescence[J]. Combustion and Flame, 2011, 158 (1): 155 - 171.
- [15] ANDREINI A, CERUTTI M, FACCHINI B, et al. CFD analysis of NO_x emissions of a natural gas lean premixed burner for heavy duty gas turbine[J]. Energy Procedia, 2015, 81:967 – 976.
- [16] 肖阳.低排放燃烧室燃料掺混特性及燃烧流场模拟研究
 [D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
 XIAO Yang. Study on premixing performance and combustion flow field in low emission combustor[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2019.