

低排放燃烧室旋流器结构对 NO_x 排放的影响

武萍, 曹天泽, 张晨曦, 李名家

(中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为使燃气轮机满足污染物排放要求, 必须对燃烧室结构进行优化设计。国际上先进的低排放燃烧室均采用干式贫燃预混燃烧技术, 该技术的关键措施是控制燃烧区燃料预混均匀度, 预混的越均匀, 局部高温区越少, 生成的 NO_x 越少。而对于预混燃烧室, 旋流器的结构对燃料预混均匀性有重要影响。因此针对某型燃气轮机燃烧室燃气燃烧器的旋流器结构进行研究, 分析旋流器旋向、旋流数、燃料与空气的喷射动量比对 NO_x 排放的影响, 从而寻求最优的旋流器结构。研究表明: 最优的旋流器结构为两级旋流器同向组合、第二级旋流数为 0.7、燃料与空气动量比为 0.058。燃烧室出口 NO_x 排放量为 16.6 mg/m^3 , 总压损失系数为 5.96%, 出口温度最大不均匀度为 9.6%。

关键词: 燃气轮机; 旋流器; NO_x ; 数值模拟

中图分类号: TK472 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.02.002

引言

目前, 低排放燃烧室应用较多的是 DLN(干式低 NO_x 燃烧技术)。DLN 技术主要采用贫燃预混燃烧的方式, 使燃烧在偏离理论空气量条件下进行, 从而控制燃烧区温度, 降低 NO_x 排放^[1]。英国 Rolls-Royce 公司利用预混燃烧技术和燃料分级燃烧技术, 开发出用于 RB211 燃机的低排放燃烧室, $\text{NO}_x < 51 \text{ mg/m}^3$ ^[2]; 美国 GE 公司通过综合利用富燃/贫燃扩散和预混燃烧、分级燃烧等技术, 开发出用于重型燃机的 DLN-1、DLN-2、DLN-2.6、DLN-2.5H 等低排放燃烧室^[3-4]。德国西门子公司利用贫燃预混燃烧技术, 开发出用于 V94.3 燃气轮机的混合型双燃料低排放燃烧室。日本三菱公司生产的 M701F 燃气轮机采用了干式低 NO_x 预混燃烧器, $\text{NO}_x < 31 \text{ mg/m}^3$; 为保证系统运行的安全性, 该

燃烧器采用了旁路阀, 提高了燃烧的稳定性^[5-6]。国内北航林宇震等人开展了分级燃烧技术和贫燃预混燃烧技术等研究, 使 NO_x 排放量较原型燃烧室降低 60%^[7]。清华大学冯冲等人全面深入地分析了燃料预混均匀度对 NO_x 排放的影响^[8-9]。黎明公司研制的某重型燃机采用了干式低污染燃烧器, 该型燃烧室采用燃料径向分级技术以降低 NO_x 排放^[9-10]。

先进的干式低排放技术主要集中在国外几家大公司中, 国内对低排放技术的研究主要体现在燃烧室燃烧过程数值分析、污染物排放特性等原理性及概念性研究方面。国内迫切需要研制一款低排放燃烧室, 以打破国际垄断, 推进中国的燃气轮机技术。本研究分析了燃烧器旋流器结构对燃烧室 NO_x 排放的影响, 为低排放燃烧室设计奠定基础。

1 几何模型及数学模型

1.1 几何模型

该燃烧室为环管型燃烧室, 以天然气为燃料, 共 16 个火焰筒。采用 Fluent 软件计算燃烧场, 评价燃烧室压力损失、出口温度最大不均匀度 (OTDF) 和 NO_x 排放。为减少计算量, 采用 1/16 燃烧室模型进行计算, 采用非结构化网格, 并进行网格局部加密, 考虑金属壁面导热, 对火焰筒壁也划分网格, 最终网格总数约为 950 万 (其中, 火焰筒壁网格为 274 万, 火焰筒筒体网格为 505 万, 环腔网格为 171 万, 经计算得到计算域壁面 Y^+ 值为 47), 单个周期燃烧室网格模型如图 1 所示。每个火焰筒装有一个双气路双旋流燃气燃烧器, 天然气通过旋流叶片上的小孔喷入旋流器流道内, 与旋流空气进行混合, 然后

收稿日期: 2014-02-28; 修订日期: 2014-05-08

基金项目: 国家国际科技合作专项项目 (2012DFR60010)

作者简介: 武萍 (1981-), 男, 山西大同人, 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所工程师。

进入燃烧区进行燃烧。

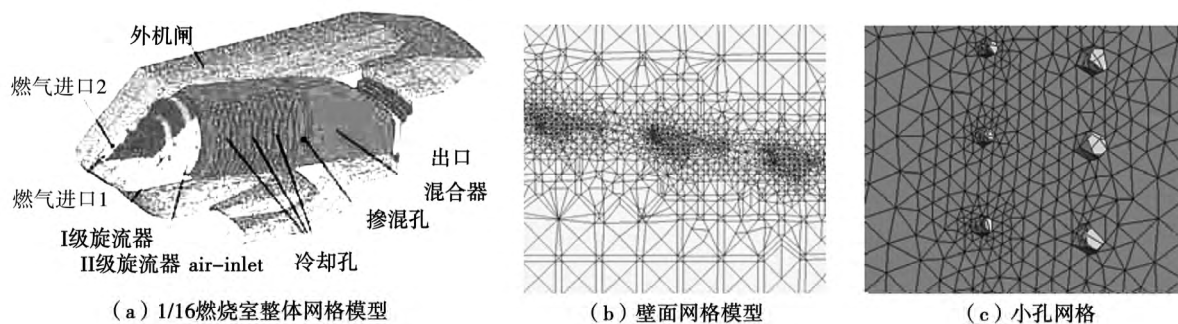


图 1 低排放燃烧室计算域网格

Fig. 1 Grid of the computational domain of a combustor with low emissions

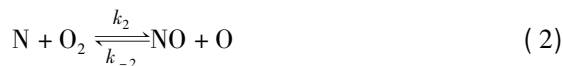
边界条件: 燃气进口 1 为第 I 路天然气入口 - 质量流量入口; 燃气进口 2 为第 II 路天然气入口 - 质量流量入口; 空气入口为空气 - 质量流量入口; 出口为压力出口, 外机匣为绝热无滑移壁面, 火焰筒内外壁为热固耦合壁面。

1.2 数学模型

燃烧室内气体流动遵循基本的流体力学控制方程, 即连续方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及组分守恒方程。计算中, 忽略重力、彻体力、浮力。为了封闭方程组中由于湍流粘性应力所带来的未知变量, 采用 Realizable *k* - ϵ 湍流模型模拟湍流流动。采用 Finite Rate/Eddy Dissipation 燃烧模型模拟湍流与化学反应间的相互作用, 化学反应采用甲烷两步化学反应机理, 反应常数如表 1 所示。

在燃气轮机燃烧室 NO_x 生成过程中, 主要为热

力型 NO_x, 即指空气中的 N₂ 在高温条件下氧化生成的, 其主要成分是 NO。其生成机理采用 Zeldovich 定律进行控制:



则 NO 生成速率可表示为:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1 [N_2][O] - k_{-1} [NO][N] + k_2 [N][O_2] - k_{-2} [NO][O] + k_3 [N][OH] - k_{-3} [NO][H] \quad (4)$$

表 1 甲烷化学反应常数

Tab. 1 Chemical reaction coefficient of methane

化学反应步	指前因子 A _r	活化能 E _r / J • kmol ⁻¹	温度指数 β _r	速率指数
CH ₄ + 1.5O ₂ → CO + 2H ₂ O	5.012e+11	2e+08	0	CH ₄ 0.7 O ₂ 0.8
CO + 0.5O ₂ → CO ₂	2.239e+12	1.7e+08	0	CO 1 O ₂ 0.25

采用准稳态假设计算 [N] 原子浓度:

$$[N] = \frac{k_1 [N_2][O] + k_{-2} [NO][O] + k_{-3} [NO][H]}{k_{-1} [NO] + k_2 [O_2] + k_3 [OH]} \quad (5)$$

采用部分平衡法计算 [O] 和 [OH] 的组分浓度:

$$[O] = 36.64 T^{0.5} [O_2]^{0.5} e^{-27123/T} \quad (6)$$

$$[OH] = 2.129 \times 10^2 T^{-0.57} e^{-4595/T} [O]^{0.5} [H_2O]^{0.5} \quad (7)$$

则最终 NO 的生成速率可表示为:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 6 \times 10^{16} T^{-0.5} [N_2][O_2]^{0.5} \exp\left(\frac{-69090}{T}\right) \quad (8)$$

式中: [] 一组分摩尔浓度, kmol/m³; k₁、k₂、k₃ 一式 (1) - 式 (5) 的正向反应率, 其值分别为 1.8 × 10⁵

$e^{-38370/T}$ 、 $18e^{-4680/T}$ 和 $7.1 \times 10^4 e^{-450/T} \text{ m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{s})$; k_{-1} 、 k_{-2} 、 k_{-3} —逆向反应速率,其值分别为 $3.8 \times 10^4 \cdot e^{-425/T}$ 、 $3.8e^{-20820/T}$ 和 $1.7 \times 10^5 e^{-24560/T} \text{ m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{s})$; T —绝对温度, K; t —时间, s; R —通用气体常数, $\text{J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

热力型 NO_x 不会在火焰面上生成,只在火焰下游生成。从反应机理可见,除温度对热力型 NO_x 的生成具有决定性影响外, NO_x 的生成量还与 N_2 和 O_2 浓度以及停留时间有关。

2 计算结果及分析

旋流器结构对燃料与空气的混合程度有较大影响,而预混程度又对污染物排放有重要影响。在旋流器优化设计过程中,保证空气流量分配不变、第 I、II 级旋流器叶片喉部结构和面积不变、旋流器环道出口结构和面积不变,第 I 级旋流器结构不变(第 I 气路燃料比例较小,主要是稳定火焰,其结构变化对流场影响较小,所以主要考察第 II 级结构对流场的影响)。首先考察两级旋流器的旋向组合对流场的影响,在确定旋向的前提下,考察第 II 级旋流器的旋流数大小及燃料孔径的变化对燃烧场性能的影响,经过层层优化设计及性能计算,最终得到性能最优的旋流器结构。表 2 给出了优化设计方案的旋流器主要特征参数。

表 2 第 II 级旋流器结构优化方案(第 I 级为左旋)

Tab. 2 Structural optimization scheme of a stage II swirler (the swirler in stage I is of a levorotation type)

流程	方案	旋向	旋流数	动量比 r
旋向组合	Case - 01	同向	0.7	0.058
	Case - 02	反向	0.7	0.058
↓				
旋流数	Case - 03	同向	0.5	0.058
	Case - 04	同向	0.9	0.058
↓				
动量比	Case - 01	同向	0.7	0.058
	Case - 05	同向	0.7	0.043
	Case - 06	同向	0.7	0.032
↓				
孔径分布	Case - 01	同向	0.7	相同孔径
	Case - 07	同向	0.7	不同孔径

2.1 旋向组合对燃烧室性能的影响

第 I 级旋流器旋向为左旋,第 II 级旋流器旋向可以有左旋和右旋两种方式,方案 Case - 01 为左旋,即与第 I 级同向,方案 Case - 02 为右旋,即与第 I 级反向。

图 2 - 图 5 分别给出了 I、II 级旋流器不同旋向时的流场特性参数对比情况。由图可知,与反向组合相比,当第 II 级旋流器与第 I 级旋流器为同向组合时,燃烧室总压损失较小(5.96%)、出口 NO 排放低($16.6 \text{ mg}/\text{m}^3$)、最大不均匀度为 $\text{OTDF} = 9.6\%$,出口温度分布较均匀。

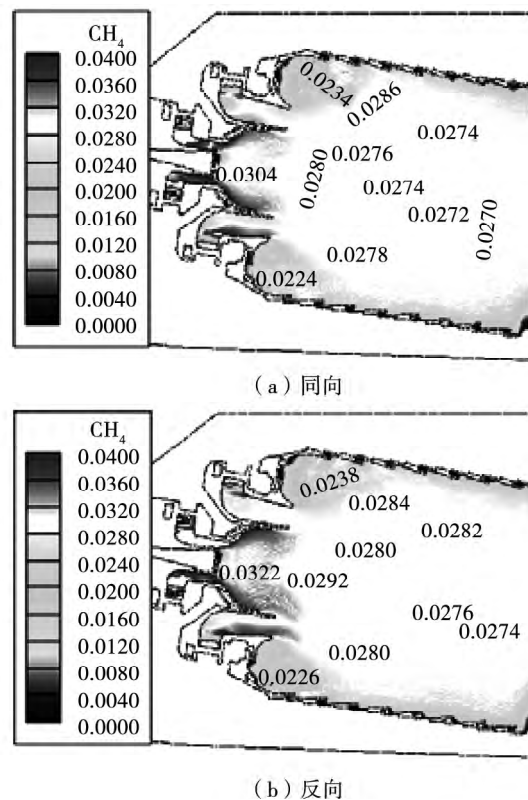


图 2 不同旋向时冷态流场下 CH_4 质量分数分布云图

Fig. 2 Atlas showing the distribution of CH_4 mass fraction in various rotation directions when the flow field is in the cold state

这是因为当两级旋流器的旋向相反时,第 I 级旋流器会削弱第 II 级旋流器的转动动量,两个方向气流相互掺混使能量损失增大;燃料与空气的掺混效果变差,预混均匀性下降,导致高温区变大, NO_x 生成量增加,出口温度均匀性下降。可见燃料与空

气的预混均匀性对燃烧室性能参数有重大影响。为提高燃烧室性能,应采用 I、II 级同向组合方式(Case -01) 作为后期优化设计的基础。

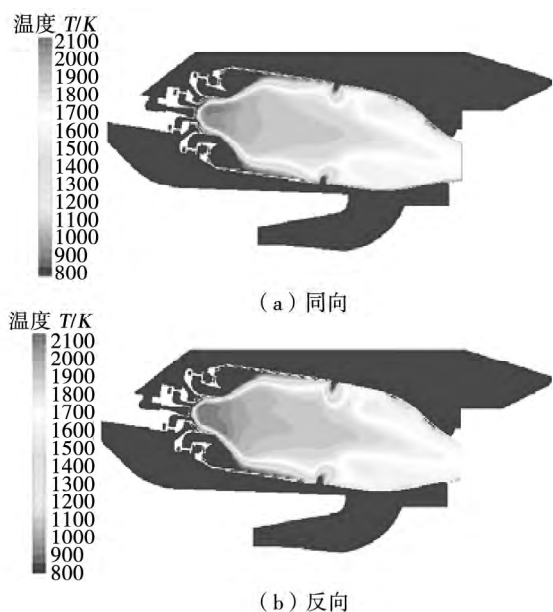


图 3 不同旋向时中截面温度分布云图

Fig. 3 Atlas showing the temperature distribution in the mid-section in various rotation directions

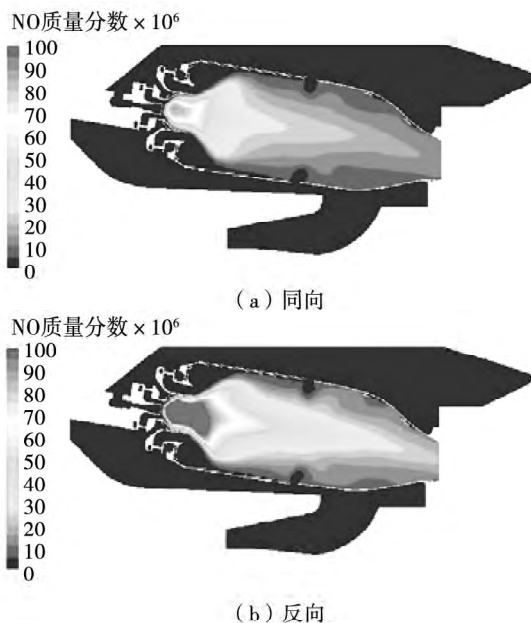


图 4 不同旋向时中截面 NO 质量分数分布云图

Fig. 4 Atlas showing the distribution of NO mass fraction in the mid-section in various rotation directions

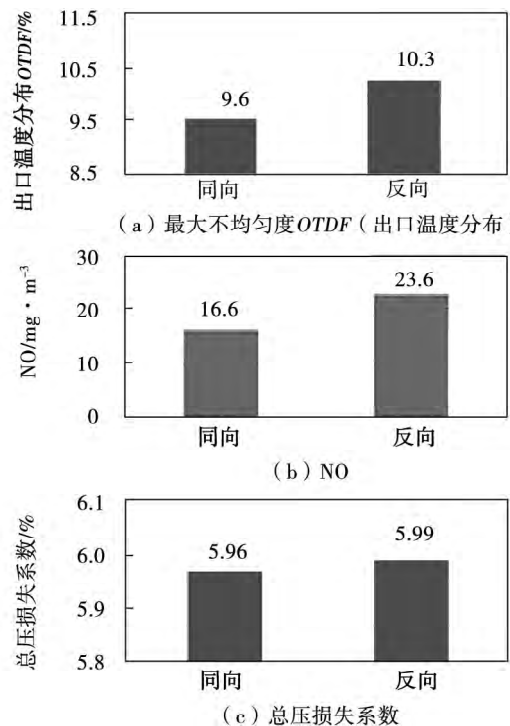


图 5 不同旋向时燃烧室特性参数对比

Fig. 5 Contrast of the characteristic parameters of the combustor in various rotation directions

2.2 旋流数对燃烧室性能的影响

通过旋流方向的计算分析可知,两级旋流器采用同向组合(Case -01) 时,燃烧室综合性能参数相对优越。在两级旋流器为同向组合的情况下,继续考察第 II 级旋流器的旋流数对流场性能的影响,旋流数分别为 $S_n = 0.5$ (Case -03)、 0.7 (Case -01)、 0.9 (Case -04) 燃烧室流场特性参数如图 6 和图 7 所示。

从图 6 和图 7 中可以看出,当第 II 级旋流器的旋流数变化时,燃烧室流场特性发生较大变化。随着旋流数的增加,燃烧室总压损失系数增大,因为旋流数增大时,燃料与空气掺混的更加剧烈,所以两股气流的掺混损失增加,但是由于旋流数增大时,燃料与空气掺混的更加均匀,所以高温区变小,NO_x 生成量下降。但是过大的旋流数导致总压损失过大。由计算结果可知,当旋流数为 0.9 时,燃烧室总压损失达到 6.12%,如此高的总压损失将导致燃机机组性能急剧下降,所以对本燃烧室而言,第 II 级的旋流数不宜超过 0.7 (总压损失为 5.96% < 设计要求 6.0%)。当旋流数过小时 ($S_n = 0.5$),旋流强度较弱,NO_x 生成量较高。所以综合考虑以上各因素,

旋流数为 $Sn=0.7$ 时为较优方案。

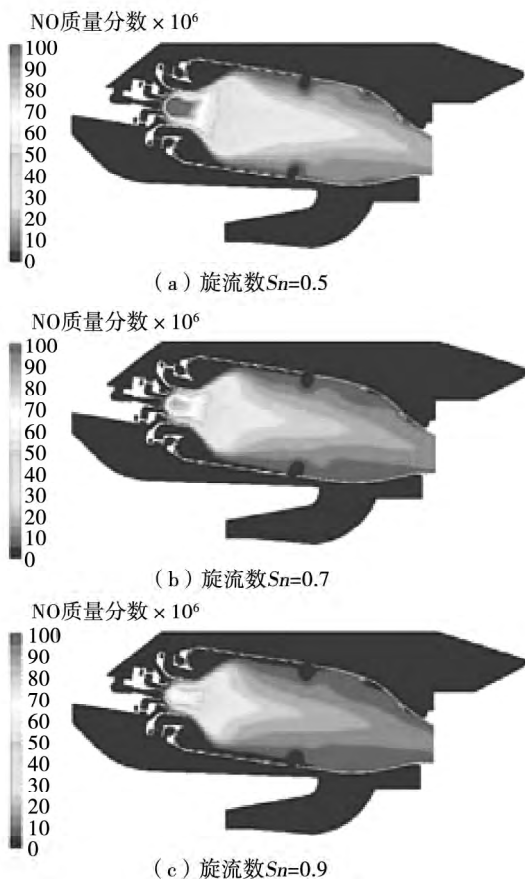


图 6 不同旋流数 Sn 时中截面 NO 质量分数分布云图

Fig.6 Atlas showing the distribution of NO mass fraction in the mid-section at various snixling unmbers Sn values

2.3 燃料空气动量比对燃烧室性能的影响

试验研究表明,燃料喷射与空气流动的动量比 r 对预混燃烧室污染物排放有较大影响,第 I 级旋流器的燃料空气动量比约为 $r=0.04$ 。保持第 I 级动量比不变,在 Case-01 基础上,考察燃烧场特性参数随燃料与空气的动量比的变化情况,动量比分别为 $r=0.032、0.043、0.058$ 。

图 8 和图 9 给出了燃烧场特性参数随动量比的变化。由图可知,随着动量比的增加,燃烧室出口温度均匀性变好, NO_x 生成量下降,但是燃烧室总压损失增加。这是因为当燃料与空气动量比增加时,本质上相当于燃料喷射速度的提高,较高的燃料喷射速度,将使燃料与空气的掺混更加剧烈,所以导致压损增加。同时,当燃料喷射速度提高时,燃料射流深度增加,燃料与空气掺混地更加均匀,燃烧区最高

温度下降,所以 NO_x 排放量下降,燃烧室出口温度分布均匀性进一步提高。可见,动量比的增减对燃烧室特性来说既有有利的影响,也有不利的影响,所以在进行燃料喷嘴设计时,应综合考虑燃烧室的总体性能指标。

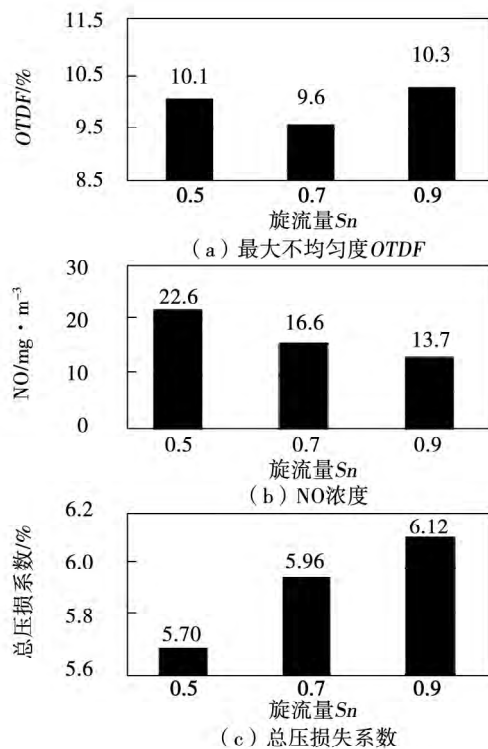


图 7 不同 Sn 时燃烧室特性参数对比

Fig.7 Contrast of the characteristic parameters of the combustor at various Sn values

对于本燃烧室,当动量比为 0.058 时为燃烧室综合性能较优的方案,此时污染物排放特性及总压损失均满足设计要求,且出口温度均匀性良好。过小的动量比可能使污染物排放量超过设计要求;过大的动量比会引起燃烧室总压损失过大。而且为了提供动量比,有效的方法就是减小燃料喷射孔孔径,但是过小的孔径,可能导致燃料供应堵塞,所以从结构可靠性及总体经济性角度综合考虑,燃料喷射孔孔径不能过小。

由于加工精度及加工工艺的限制,在实际生产时,可能出现同一个叶片上的数个燃料喷射孔孔径不一致,将导致燃料与空气混合的空间均匀度下降,为此需要分析孔径分布的一致性对燃烧室 NO_x 排放的影响。旋流叶片上的燃料孔径可以为相同或不同两种情况,图 10 和图 11 给出了相同孔径与不同

孔径时燃烧室性能对比图。

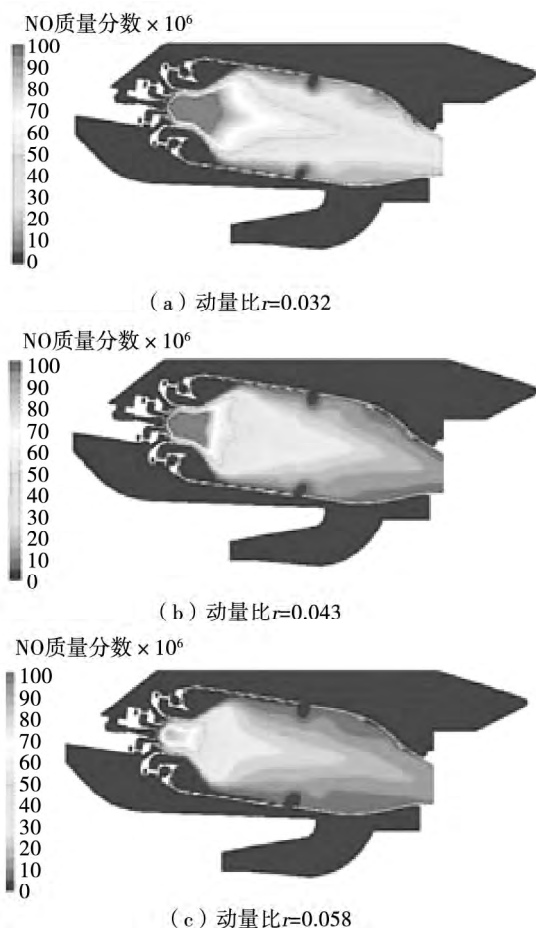


图 8 不同动量比时中截面 NO 质量分数分布云图

Fig. 8 Atlas showing the distribution of NO mass fraction in the mid - section at various momentum ratios

由图 10 和图 11 可知,当燃料喷射孔孔径不同时,燃料与空气的掺混会出现局部高浓度区,从而使主燃区出现局部高温区,最终导致 NO_x 生成量增多,火焰偏长,出口温度均匀性下降。NO_x 的生成量在不同孔径时要比相同孔径时高 74%,所以综合考虑燃烧室的低排放性能,燃料射流孔孔径相同时的结构为最优结构,此时的燃烧场综合特性最优。在实际的生产加工时,要尽量提高燃料喷射孔的加工精度,以保证燃烧室的低排放特性。

该型燃烧室在 0.8 工况模化燃烧试验参数下的 NO_x 计算值为 64 mg/m³ (@ 15% O₂ 干基),通过燃烧试验验证(试验台情况如图 12 所示),在相应试验条件下实测 NO_x 排放量为 72.6 mg/m³ (@ 15% O₂ 干基) 相对误差约 12%。可见软件计算的精度

具有一定的可信性,虽然定量精度稍低,但是对于 NO_x 预测的趋势是可信的。

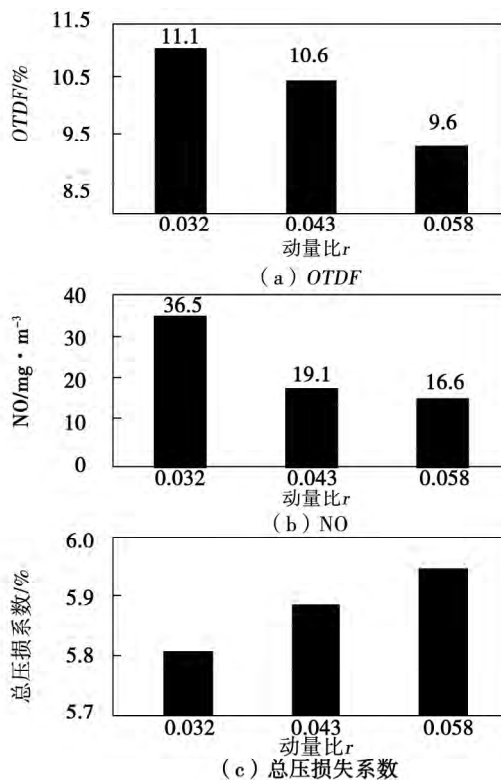


图 9 不同动量比时燃烧室特性参数对比

Fig. 9 Contrast of the characteristic parameters of the combustor at various momentum ratios

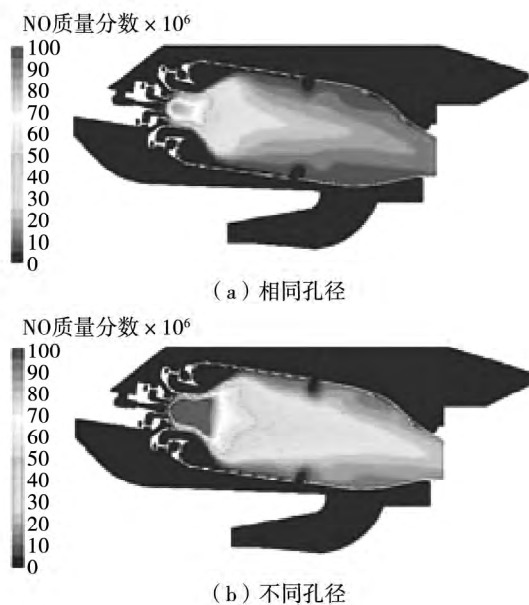


图 10 孔径分布不同时 NO 质量分数分布云图

Fig. 10 Atlas showing the distribution of NO mass fraction in various hole diameter distributions

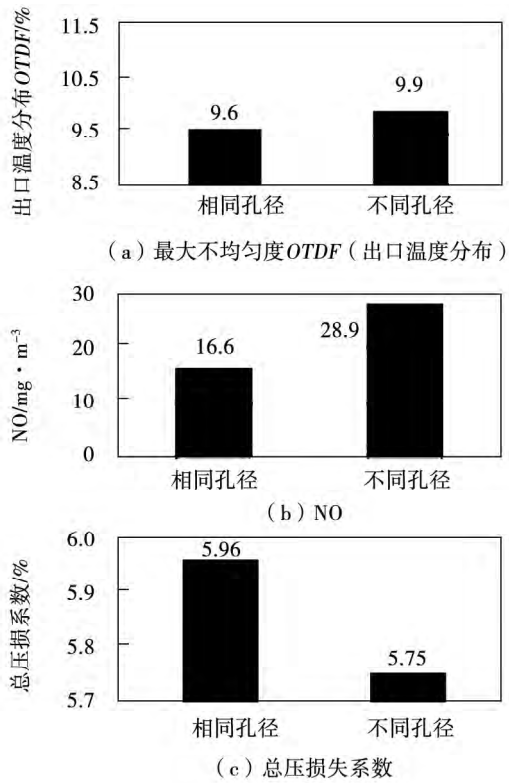


图 11 孔径分布不同时燃烧室特性参数对比
Fig. 11 Contrast of the characteristic parameters of the combustor in various hole diameter distributions

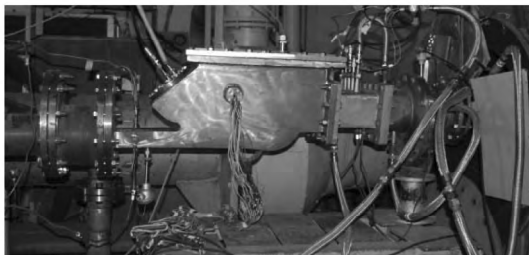


图 12 污染物测量试验台
Fig. 12 Pollutant measurement test stand

3 结 论

低排放燃烧室采用的主要技术是贫燃预混燃烧技术,该技术的关键是控制燃烧区燃料预混的均匀度,从而控制燃烧区最高温度,降低 NO_x 排放量。本研究主要针对某燃气轮机燃烧室气态燃料喷嘴的旋流器结构进行研究,分析旋流器旋向、旋流数、燃料与空气动量比对 NO_x 排放的影响,得出结论:

(1) 最优的旋流器结构为两级旋流器同向组

合、第二级旋流数为 0.7、燃料与空气掺混的动量比为 0.058。

(2) 燃烧室出口 NO_x 排放量为 16.6 mg/m³,总压损失系数为 5.96%,出口温度最大不均匀度为 9.6%。

(3) 在生产加工时,要尽量提高燃料喷射孔的加工精度,以保证燃烧室的低排放特性。

参考文献:

- [1] A H Lefebvre. Gas turbine combustion (second edition) [M]. Philadelphia, Taylor & Francis Press, 1998.
- [2] J D Willis, A J Moran. Industrial RB211 DLE Gas Turbine Combustion Update [R]. 2000 - GT - 109, New York: American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- [3] L B Davis, S H Black. Dry Low NO_x Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines [R]. GER-3568G, Schenectady, New York: GE Power Systems, 2000.
- [4] M Marvin, Schorr, Joel Chalfin. Gas Turbine NO_x Emissions Approaching Zero [R]. GER 4172, Schenectady, New York, GE Power Systems, 1999.
- [5] H Arimura, S Shiozaki, E Ito, et al. M501G Operating Experience and Improvements Update [C]. Power-Gen International 2001, Las Vegas, NV, USA: GE Power Systems, December 11 - 13, 2001.
- [6] Satoshi Tanimura, Masakazu Nose, et al. Advanced Dry Low NO_x Combustor for Mitsubishi G Class Gas Turbines [C]. ASME turbo expo 2008: Power for land, sea, and air. Vol. 3 Part B, Combustion Fuels and Emissions. New York: American Society of Mechanical Engineer, 2008, GT-2008-50819, 1-9.
- [7] 林宇震, 彭云晖, 刘高恩. 分级/预混合预蒸发贫油燃烧低污染方案 NO_x 排放初步研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 492-497.
LIN Yu-zhen, PENG Yun-hui, LIU Gao-en. Preliminary study of NO_x emissions of a staged/premixed prevaporized insufficient oil combustion low pollution scheme [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, Vol. 18, No. 4: 492-497.
- [8] 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 of the uniformity problems relating to the premixing of fuel/air in a dry low NO_x gas turbine combustor [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2011, Vol. 31, No. 17: 9-19.
- [9] 冯冲, 祁海鹰, 谢刚, 等. R0110 燃烧室预混均匀性与排放的研究 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(8): 1431-1434.
FENG Chong, QI Hai-ying, XIE Gang, et al. Study of the uniformity of the premixing in a R0110 combustor and its emissions [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, Vol. 31, No. 8: 1431-1434.
- [10] 谢刚. R0110 重型燃气轮机 DLN 燃烧室的性能试验与分析 [D]. 北京: 清华大学, 2010.
XIE Gang. Performance test and analysis of a DLN combustor in a R0110 heavy-duty gas turbine [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

(丛敏 编辑)

关于重型燃气轮机预测诊断与健康管理的综述 = **Overview Concerning the Study of the Prediction ,Diagnosis and Health Management (PHM) of Heavy-duty Gas Turbines** [刊 汉]JIANG Dong-xiang ,LIU Chao , YANG Wen-guang (Gas Turbine Research Institute ,Department of Thermal Energy Engineering ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30(2) . - 173 - 179

An overview of the advances in the study of the prediction ,diagnosis and health management of heavy-duty gas turbines was given with the composition and main functions of a prediction ,diagnosis and health management system being analyzed and the framework and status quo of the application of remote monitoring and diagnosis system being described. On this basis ,the development tendency of the prediction ,diagnosis and health management of heavy-duty gas turbines was investigated. It has been found that to adopt a PHM system can better safeguard ,predict and manage heavy-duty gas turbines and effectively enhance their reliability operation and maintenance intelligence level. **Key Words:** gas turbine ,prediction and diagnosis ,health management ,artificial intelligence ,remote monitoring and diagnosis system

低排放燃烧室旋流器结构对 NO_x 排放的影响 = **Influence of the Structure of the Swirler in a Low Emission Combustor on NO_x Emissions** [刊 汉]WU Ping ,CAO Tian-ze ,ZHANG Chen-xi ,LI Ming-jia (CSIC Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 ,30(2) . - 180 - 186

To make a gas turbine to meet the requirements for pollutant emissions ,one must perform an optimized design of the structure of its combustor. At present ,all the world-advanced low emission combustors adopt the dry type fuel deficiency premixed combustion technology ,the key measure of which is to control the premixed uniformity of fuel in the combustion zone ,the more uniform the fuel premixed ,the less the high temperature zones in locals and the less the NO_x produced. For a dry type premixed combustor ,the structure of its swirler exercises important influence on the uniformity of fuel premixed. Therefore ,the authors mainly studied the structure of the swirler in the combustor of a gas turbine ,analyzed the influence of the swirling direction ,swirling number ,fuel and air momentum ratio of the swirler on the NO_x emissions and then looked for the optimized structure of the swirler. It has been found that the optimized swirler should be one with two stages combined along the same direction ,the swirling number in the second stage should be 0.7 ,the fuel and air momentum ratio 0.058 ,the amount of NO_x emissions at the outlet of the combustor 16.6 mg/m^3 ,the total pressure loss coefficient 5.96% and the maximum non-uniformity of the tempera-

ture at the outlet 9.6%. **Key Words:** gas turbine ,swirler ,NO_x ,numerical simulation

三联供系统中综合性能评价方法的应用研究 = **Study of the Applications of the Method for Evaluating the Comprehensive Performance of a Trigeneration System** [刊, 汉] / SUN Peng , YOU Shi-jun , ZHANG Huan (College of Environment Science and Engineering , Tianjin University , Tianjin , China , Post Code: 300072) , LI Xu (China Northwest Architecture Design Research Institute Co. Ltd. , Xi'an , China , Post Code: 710018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(2) . - 187 - 192

In the light of the problem that the influence of dynamic loads are currently ignored during the design of a gas cooling , heating and power trigeneration system and excessively large capacities given in the models of the equipment items chosen in the configuration of the system may result , with the reference capacity and operation strategies for the internal gas combustion engine serving as the design variables and the comprehensive performance indexes , including the total annual operation expenses , amount of primary energy sources consumed and the quantity of carbon dioxide emissions serving as the target functions for optimization , established was a method for designing and optimizing a system. By using the method thus established , an analysis and design of a trigeneration system for a building of a hotel in Tianjin city were conducted. The optimization results are given as follows: the reference capacity of the inner combustion engine should be chosen as 975 kW and when the system is operating according to the strategy of “determining heat generation on the basis of power demand” , as compared with any single supply system , the trigeneration system can save expenses by 3.6% , an amount of energy by 28.9% and reduce the carbon dioxide emissions by 44.7%. **Key Words:** cooling , heating and power trigeneration system , comprehensive performance index , system configuration , operation strategy

泡状流中含气率和气泡尺寸分布的超声非接触测量方法 = **A Method for Ultrasonic Non-contact Measuring the Gas Content and Dimension Distribution of Bubbles in a Bubble Flow** [刊, 汉] / HU Bian (Hunan Wuling Electric Power Engineering Co. Ltd. , Changsha , China , Post Code: 410004) , SU Ming-xu , CAI Xiao-shu (Particle and Two-phase Flow Measurement Research Institute , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(2) . - 193 - 199

Set up was a set of supersonic non-contact measurement device for performing an on-line measurement of the gas content and bubble dimensions of a gas-liquid two-phase bubble flow in a circulation system. For a vertical rectangu-