轻型燃气轮机燃烧室 NOx 排放估算

赵巧男,王国峰,张皓男,徐有宁 (沈阳工程学院辽宁省洁净燃烧发电与供热技术重点实验室,沈阳110136)

摘要:为了解决 NOX 排放预估问题,应用数值模拟方法研究轻型燃气轮机燃烧室 NOX 排放规律。将数值分析结果与文献中经 验公式计算数据进行比较与分析,验证数值方法的准确性;基于进口压力、空气质量流量、主燃区温度 3 个参数拟合 NOX 排放预估 公式。结果表明:数值模拟得到的 NOX 排放值与文献中经验公式计算出的符合度较高;结合数值计算结果得到的 NOX 排放预估公 式;该公式能有效反映上述 3 个参数对 NOX 排放的影响;采用验证后的高精度数值模拟方法建立的 NOX 预估模型所得结果具有一 定的科学性及可靠性,并可降低试验成本。

关键词: 轻型燃气轮机燃烧室;NOx 估算;进口压力;空气质量流量;主燃区温度;航空发动机
 中图分类号: TV651.3
 文献标识码:A
 doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.01.010

Estimation of NOx Emission From Light Gas Turbine Combustor

ZHAO Qiao-nan, WANG Guo-feng, ZHANG Hao-nan, XU You-ning

(Key Laboratory of Clean Combustion for Electricity Generation and Heat-supply Technology of Liaoning Province, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to solve the problem of NOx emission estimation, the NOx emission law of light gas turbine combustor was studied by numerical simulation method. The numerical analysis results were compared and analyzed with the empirical formula calculation data in the literature, and the accuracy of the numerical method was verified. The NOx emission estimation formula was fitted based on inlet pressure, air mass flow rate and main combustion zone temperature. The results show that the NOx emission values obtained by numerical simulation are in good agreement with those calculated by empirical formulas in the literature. The NOx emission estimation formula is obtained based on numerical calculation results. The formula can effectively reflect the effect of the above three parameters on NOx emission. The results of the NOx estimation model established by the verified high precision numerical simulation method are scientific and

reliable, and the test cost can be reduced.

Key words: light gas turbine combustor; estimation of NOx; inlet pressure; air mass flow rate; temperature of main combustion zone; aeroengine

符号表			
符号	符号含义	单位	
m _a	进入燃烧室的总空气质量流量	kg/s	
$Q_{\rm NOx}$	NOx的排放	g/kg	
$P_{\rm m}$	燃烧室进口压力	Pa	
q	燃料与空气质量之比		
$T_{ m DZ}$	主燃区温度	K ¦	
T_4	燃烧室出口温度	ĸ	
V _c	燃烧室燃烧区体积	m ³	
$T_{ m st}$	化学当量比为1时的火焰温度	K	

0 引言

近年来,国内对燃烧室污染排放标准要求越来越 严格,相关的法律法规越来越完善。NOx 排放值作为 考察燃气轮机燃烧室的重要标准之一,在燃烧室设计 阶段需要对其进行充分考虑,发展通用性强的 NOx 预估模型是适应中国自主研发燃气轮机燃烧室的重 要方向¹¹⁻³。

收稿日期:2018–11–12 **基金项目:**国家自然科学基金(51406123)、辽宁省教育厅资助项目(XNZD–1808)资助 作者简介:赵巧男(1995),女,在读硕士研究生,主要研究方向为能源与动力工程;E-mail: 505566077@qq.com。

引用格式:赵巧男,王国峰,张皓男,等.轻型燃气轮机燃烧室 NOx 排放估算[J].航空发动机,2020,46(1):49-53.ZHAO Qiaonan, WANG Guofeng, ZHANG Haonan, et al. Estimation of NOx emission from light gas turbine combustor[J]. Aeroengine, 2020, 46(1):49-53.

国内外学者通过试验整理得到了许多 NOx 排放 预估模型。Lefebvre 等¹⁴⁻⁹针对液体燃料提出适合 F100、 F101、J79-17A、J79-17C、TF33、TF39、TF41 等燃烧室 污染物排放预估模型,利用其模型得到的计算结果与 试验数据较为吻合,已被广泛应用;Rizk 等¹⁷⁷提出针 对重型燃气轮机燃烧室的预估模型,其计算结果与 5 台 1.5~34 MW 燃用天然气的工业燃气轮机的 NOx 排放测量值相差无几,具有良好的准确性及应用性; Lewis 等¹⁸⁹提出适用于均质燃料燃烧室的预估模型,在 实现燃料分级、负荷调节、稳定燃烧以及对污染物控 制方面均有较好效果;林清华等¹⁹⁻¹⁰针对不同稀释剂 提出合成气燃烧室的 NOx 排放预估模型,公式计算 结果与试验结果基本无差别。

现有的 NOx 排放预估模型多是通过全温全压燃烧 室试验台试验获得,该试验台的建立对场地选取有严 格要求,并且试验周期较长,试验成本十分高昂。近年 来,随着计算流体力学、计算燃烧学、传热学的发展以 及计算机计算能力大幅提高, 燃烧室数值模拟技术得 到高速发展,逐渐成为燃烧室性能研究的有力工具,数 值模拟结果的实用性及科学性也得到广泛认同[11-12]。通 过对燃烧室进行 CFD 数值模拟计算,可以实现燃烧室 内流场及温度场分布的细节预测,从而为燃烧室优化 设计提供有效手段。特别是在轻型燃气轮机燃烧室数 值模拟研究中,国内很多学者取得了较好的科研成果。 金戈等¹¹³采用3种湍流模型利用数值模拟对 OD128 燃 气轮机燃烧室出口温度场品质进行优化,并对改进的 燃烧室进行 CFD 计算,将计算结果与试验结果进行对 比,发现二者符合程度较高;徐丽等¹⁴⁶应用 CFD 方法对 QD128 燃气轮机燃烧室性能进行数值分析,将其结果 与试验结果进行对比,发现二者十分符合。

本文利用数值模拟代替试验对轻型燃气轮机燃 烧室进行分析,将多参数优化的数值模拟结果与传统 的估算模型进行对比,并通过对进口压力、空气质量 流量、主燃区温度3个主要参数与NOx排放值变化 关系进行研究,根据数值模拟结果拟合出适用于3个 参数的拟合公式。

1 数值分析及结果验证

选取 QD128 燃气轮机燃烧室 15 个喷嘴中的 1 个喷嘴为计算域,建立全尺度周期性数值分析模型, 如图 1 所示。该模型包括扩压器、内外二股腔道和火 焰筒。针对数值计算主要的分析参数有燃烧室进口压 力、进口流量及主燃区温度。在进行网格划分时,仅对 结构复杂的头部旋流器采用4面体网格,其他部位均 采用6面体网格,保证网格紧密的情况下验证网格无 关性,最终确定网格总数为510万,如图2所示。



利用 CFD 计算流体力学软件对燃烧室进行 3 维数值模拟计算分析,得到的燃烧室纵截面总温分布如图 3 所示。



图 3 燃烧室纵截面总温分布

从图中可见,主燃孔射流较深,基本达到火焰筒 高度的 50%,有效切断了头部回流区边界,随着二次 气流及掺混气流的增加,燃烧室内温度逐渐降低,出

口区域温度基本保持稳定。温度模拟结果与金戈、 徐丽等针对 QD128 燃气轮 机的研究结果一致。

燃烧室头部横截面的 速度分布如图 4 所示。从 图中可见,中心区域是旋



图 4 燃烧室头部横截面 速度分布

流引起的低速区域,紧接着是旋流区,外环是气膜孔 的引气,最外环则是二次通道。数值结果很好地描述 了该燃烧室头部的流通状况。

数值模拟计算结果与金戈、徐丽等的研究结果符 合度较高,可为 NOx 排放预估模型的进一步研究提 供参考。

2 模拟结果分析与公式拟合

2.1 NOx 预估经验 / 半经验公式

经过众多学者多年来对燃烧室 NOx 排放经验 / 半经验公式的深入研究,可以对 NOx 排放预估模型 根据不同标准进行具体分类。通过文献采集与数值仿 真计算结果进行比对分析,发现以下 4 个经验公式对 本文研究具有较高参考价值,见表 1。

表 1 主要研究的经验 / 半经验公式

作者	经验公式	单位
Lefebvre ^[15-17]	$Q_{N0x} = \frac{9 \times 10^{-8} P_{in}^{1.25} V_{c} \exp(0.01T_{st})}{m_{s} T_{ps}}$	压力 /kPa,温度 /K
Rokke	$Q_{\rm NOR}$ =18.1 × $P_{\rm in}^{1.42} m_{\rm a}^{0.3} q^{0.72}$ × 10 ⁻⁶	压力 /1.01 × 10 ⁵ Pa
Lewis	$Q_{\rm N0x}\!\!=\!\!3.3192\times10^{-6} {\rm exp}(0.0079775T_{\rm pr})P_{\rm in}^{0.5}\times10^{-6}$	压力 /1.01 × 10 ⁵ Pa,温度 /K
林清华	$Q_{\text{N0x}=e}^{0.002587_{c}+0.007477_{\mu}-(17.31927X_{\text{B},0}+16.95517X_{\text{N},}+17.69844X_{\text{CO}_2})} Q_{\text{N0x}=e}$	温度 /K

本文根据上述 4 个经验公式计算出的 NOx 排放 值,对进口压力、空气质量流量、主燃区温度 3 个主要 参数与预估公式计算排放值的变化趋势进行分析,为 进一步拟合预估公式提供参考。

2.2 基于进口压力的 NOx 预估

通过数值模拟研究及 经验公式推导,如图 5 所 示,当选取进口压力 P_{in}= 1.05~1.63 MPa 时,数值模 拟 NOx 排放值为 0.844 ~ 1.198 g/kg。在压力较低时, NOx 排放值变化趋势较为 缓慢,变化不大;当压力升



的影响

高到 1.20 MPa 时,NOx 排放值变化趋势开始增大;压 力升高到 1.40 MPa 之后,变化率保持不变。在相同进 口压力下,通过 Lefebvre 预估公式计算得到的 NOx 排放值为 0.675~1.103 g/kg。该模型涉及到进口压 力、主燃区温度、火焰温度、空气质量流量及燃烧室燃 烧区体积等参数,其中进口压力的幂次最大为 1.25, Lefebvre¹⁰⁹预估公式对进口压力变化较其他参数更为 敏感,在相同压力范围内变化幅度最大。根据 Lewis 的经验公式计算得到的 NOx 排放值为 0.708~0.917 g/kg,变化趋势与上述 2 个模型的相同,但变化趋势 较小,对于进口压力的幂次为 0.5,在 3 个公式中,对 进口压力参数的敏感程度最低。

通过对比分析数值模拟与经验公式的数据曲线 变化趋势发现,运用数值模拟得到的结果与运用经验 公式计算出的结果总体趋势相同,说明运用数值模拟 替代试验其结果具有较高的参考价值,具有一定的科 学性,值得深入研究。

运用数值模拟结果得到初步拟合的公式 $Q_{\text{NOx}}=10^{-12} \times P_{\text{in}}^2 - 3 \times 10^{-6} \times P_{\text{in}} + 2.5603$ $R^2=0.9985$ (1)

以上 2 次拟合公式的拟合度大于 0.8, 拟合优度 较高, 拟合效果较好。式(1)适用于轻型燃气轮机燃烧 室基于进口压力的 NOx 排放预估, 拟合前选取的空 气质量流量、主燃区温度均符合设定值, 式(1)中进口 压力的范围仍需进一步验证。

2.3 基于空气质量流量 ma 的 NOx 预估

通过数值模拟研究及经验公式推导,如图 6 所 示,当选取 m_a=2.9~3.9 kg/s 时,随着 m_a的增加,数值 模拟 NOx 排放值为 0.67~0.93 g/kg,呈减小趋势。在 数值模拟过程中,当 m_a增加,燃料流量不变时,燃空 比持续减小,导致燃烧室的主燃区温度降低,NOx 的 生成量减少。数值模拟结果与 Lefebvre 经验公式计算 出的 NOx 排放值具有相同趋势,当 m_a范围相同时, 通过 Lefebvre 的经验公式计算得到的 NOx 排放值为 0.55~0.73 g/kg,数值结果要略高于计算结果。说明数 值模拟结果与通过 Lefebvre 经验公式计算得到的结 果具有相同的计算前提条件,利用数值模拟对轻型燃 气轮机燃烧室进行估算分析具有可靠的理论依据。而 Rokke 等的经验公式与所选模型的趋势走向不同,这

是由于在利用该公式进 行估算时,提前固定了1 个最佳燃空比(1:14.7), 在此燃空比下,随着 m。 增加,燃料流量会相应增 加,主燃区温度得到相应 提高,导致热力型 NOx 排 放值增加。由于 Rokke 经 验公式计算与利用数值



模拟的前提条件不符,所以本次研究不考虑该经验公式的计算结果,主要对 Lefebvre 的经验公式与数值模拟的结果进行对比分析。

运用数值模拟结果得到初步拟合的公式

 $Q_{\text{NOx}} = -0.1459 \times m_a^2 + 0.7413 \times m_a + 0.0026 \quad R^2 = 0.9995 \quad (2)$

以上 2 次拟合公式的拟合度大于 0.8, 拟合优度 较好,具有应用价值。式(2)适用于轻型燃气轮机燃烧 室基于空气质量流量的 NOx 排放预估,对于式(2)中 空气质量流量的范围仍需进一步深入研究。

2.4 基于主燃区温度的 NOx 预估

通过数值模拟研究及 经验公式推导,如图7所 示,当选取主燃区温度 $T_{pe}=1995 \sim 2085 \text{ K} 时,数$ 值模拟的 NOx 排放值为 $0.30 \sim 0.66 \text{ g/kg}, \text{NOx 排放}$ 值与根据估算式计算得到 的 NOx 排放值相比较小; 林清华等拟合的公式主要



针对合成气燃烧室,该公式与出口温度及稀释剂的百 分比相关,在相同的主燃区温度下,其计算结果为 1.04~2.04 g/kg,NOx 排放值变化范围较大,说明该预估 模型对该参数具有一定的敏感度;在相同温度变化范 围内,根据 Lefebvre 等的预估公式计算的 Q_{NOx}=1.46~ 3.44 g/kg,其 NOx 排放值的变化程度较上述 2 种模型 的更大,可见该公式对于主燃区温度具有较高的敏感 度,随着主燃区温度的升高,NOx 排放的变化趋势也 呈增大趋势。通过数值模拟的方法预估出的 NOx 排 放值比通过经验公式计算的小,其变化趋势与已有模 型的变化趋势一致,即随着主燃区温度的升高,NOx 排放值呈上升趋势。说明数值模拟方法在一定程度上 可以替代预估公式,计算得到的 NOx 排放值,针对轻 型燃气轮机燃烧室 NOx 排放具有较强的预估作用, 为其设计提供可靠参考。

运用数值模拟结果得到初步拟合公式

 $Q_{\text{NOx}} = 2 \times 10^{-6} \times T_{\text{DZ}}^2 - 0.0031 \times T_{\text{DZ}} - 0.0519 \quad R^2 = 0.9986 \quad (3)$

以上 2 次拟合公式的拟合度大于 0.8,可以实现 较好的拟合效果。式(3)适用于轻型燃气轮机燃烧室 基于主燃区温度的 NOx 排放预估,拟合在其他影响 参数为固定值状态下进行,对于式(3)中主燃区温度 的具体范围仍需进一步研究。

2.5 NOx 排放拟合公式

上述得出的拟合公式适用于单一参数变化的 NOx 排放估算,为进一步丰富公式的适用范围,对适 用于进口压力、空气质量流量、主燃区温度3个主要 参数进行拟合,考虑这些因素拟合公式初步假定的形 式为

 $Q_{NOx} = a_1 P_{in}^2 + b_1 P_{in} + a_2 m_a^2 + b_2 m_a + a_3 T_{pz}^2 + b_3 T_{pz} + C \qquad (4)$ 式中: *a*、*b* 为系数; *C* 为常数项。

系数及常数项的确定根据数值模拟得到,根据 NOx 排放值与3个参数的变化关系拟合出的公式如下

 $Q_{\text{NOx}} = 1.72 \times 10^{-8} P_{\text{in}}^2 - 5.16 \times 10^{-12} P_{\text{in}} + 2.06 \times 10^{-2} m_{a}^2 - 6.00 \times 10^{-12} P_{\text{in}} + 2.00 \times 10^{-12} M_{a}^2 - 6.00 \times 10^{-12} M_{a}^2$

 $0.11m_{a} - 1.37 \times 10^{-8}T_{vz}^{2} + 2.12 \times 10^{-5}T_{vz} + 13.36$ (5)

拟合公式的应用条件之一为轻型燃烧室,式中3 个参数的范围仍需验证后加以使用。

3 结论

数值仿真试验的研究方法具有可操作性强、快速 易得、耗资少等优点,可以弥补试验的不足,具有较高 的应用价值。数值模拟结果与试验结果具有很高的吻 合度,具有一定的科学性及实用性,具有一定的利用 价值,值得进一步研究。

(1)对于轻型燃气轮机燃烧室,随着主燃区温度 及进口压力的升高,NOx 排放量随之增加,其中增加 的主要是热力型 NOx。

(2)随着空气质量流量的增大,燃料燃烧更加充分,NOx 排放值呈减少趋势。

(3)提出适合于轻型燃气轮机燃烧室 NOx 排放的快速估算公式,利用该公式对轻型燃气轮机燃烧室 NOx 排放进行计算得到的估算值与根据经验公式得到的计算值吻合度较高,但有效性及参数的范围有待进一步验证。

参考文献:

[1] 张文普. 燃气轮机燃烧室内 NOx 生成影响因素的数值研究[J]. 燃气 轮机技术, 2004, 17(4):59-63.

ZHANG Wenpu. Numerical study on the factors effecting on NOx formulation in a gas turbine combustor [J]. Gas Turbine Technology, 2004, 17(4):59-63.(in Chinese)

[2] 李名家,林枫,任艳平,等. 燃气轮机燃烧室数值模拟及试验[J]. 舰船科学技术,2010,32(8):117-122.

LI Mingjia, LIN Feng, REN Yanping, et al. Numerical simulation and experimental study of the gas turbine combustor [J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(8):117–122. (in Chinese)

[3] 蒋洪德. 重型燃气轮机的现状和发展趋势 [J]. 热力透平, 2012, 41 (2):83-88.

JIANG Hongde. Development of the heavy-duty gas turbine [J]. Thermal Turbine, 2012, 41(2):83-88. (in Chinese)

- [4] Lefebvre A H. The role of fuel preparation in low-emission combustion
 [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117
 (4):617-654.
- [5] Lefebvre A H, Ballal D R. Gas turbine combustion : alternative fuels and emissions [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(11):77.
- [6] Lefebvre A H. Fuel effects on gas turbine combustion[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1986, 3(2-3):231-244.
- [7] Rizk N K, Mongia H C. Three-dimensional combustor performance validation with high-density fuels[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 6:660–667.
- [8] Lewis J,Toops T.Lean NOx trap chemistry under lean-gasoline exhaust conditions:impact of high NOx concentration and high temperature[J]. Topics in Catalysis, 2013, 56(1-8):89-93.
- [9] 林清华, 张哲巅, 肖云汉. 合成气燃烧室 NOx 排放估算方法分析 [J]. 燃气轮机技术, 2013, 26(1):9-14.
 - LIN Qinghua, ZHANG Zhedian, XIAO Yunhan. Analysis of the methods for estimating NOx emissions from syngas combustor [J]. Gas Turbine Technology, 2013, 26(1):9–14. (in Chinese)
- [10] 林清华. 燃气轮机燃烧室初步设计程序开发及应用[D].北京: 中国 科学院工程热物理所, 2013.

LIN Qinghua. Development and application of preliminary design procedure for gas turbine combustor [D]. Beijing: The Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

- [11] 陈晓丽,祁海鹰,谢刚,等. DLN 燃烧室污染排放估算方法的分析
 [J]. 热能动力工程, 2010, 25(6):23-28,107.
 CHEN Xiaoli, QI Haiying, XIE Gang, et al. Analysis of estimation method for pollutant emission from DLN combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(6):23-28,107.
 (in Chinese)
- [12] 陈晓丽,祁海鹰,谢刚,等. 重型燃机燃烧室污染排放的估算方法 研究[C]//中国工程热物理学会燃烧学分会论文集.合肥:中国工程 热物理学会编,2009:1-7.

CHEN Xiaoli, QI Haiying, XIE Gang, et al. Estimation method of pollutant emission from heavy-duty gas turbine combustor [C]// Chinese National Conference of Engineering Thermophysics. Hefei: Edited by China Society of Engineering Thermophysics, 2009:1-7. (in Chinese)

[13] 金戈,张志学,顾铭企. QD128 航改燃气轮机燃烧室数值模拟[J]. 航空发动机,2008,34(2):30-35.

JIN Ge, ZHANG Zhixue, GU Mingqi. Numerical simulation of QD128 aero – derivative gas turbine combustor[J]. Aeroengine, 2008, 34(2):30–35. (in Chinese)

[14] 徐丽, 孙丽艳. 某型燃气轮机燃烧室性能数值模拟 [J]. 汽轮机技术, 2012, 54(2): 117-119.

XU Li, SUN Liyan. Numerical simulation of combustor performance of gas turbine [J].Turbine Technology, 2012,54 (2): 117–119. (in Chinese)

- [15] Lefebvre A H, Whitelaw J H. Gas turbine combustion[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1984, 5(4): 228.
- [16] Mongia H. Combining lefebvre correlations with combustor CFD[C]// Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference and Exhibit. Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004:1–11.
- [17] Lefebvre A H. Gas Turbine Combustion[M].New York: Taylor & Francis Press, 1998: 338–363.

(编辑:贺红井)