文章编号:1001-2060(2025)04-0073-09

氨气分级燃烧 NO_x 生成特性研究

赵宁波,宋 颖,孙继昊,冯忠民

(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:为解决氨气燃烧污染物生成机理不清晰、燃烧室不同区域反应路径模糊等问题,并实现低 NO_x 排放目标, 文中以轴向分级燃烧室为研究对象,对氨气燃烧过程的 NO 生成路径进行总结分类,并探究主燃区当量比、停留时 间、温度、压力等典型参数对 NO 生成特性的影响。结果表明:NO 生成主要集中在主燃区中 HNO 路径,贫燃区 NH_i 路径对 NO 的还原起重要作用;在富燃条件下主燃区分级燃烧控制可有效抑制 NO 生成,当量比最优取值为 1.41; 富燃区及贫燃区停留时间变化对 NO 排放影响不显著;O、H、OH、HNO 等影响 NO 生成的主要自由基质量分数在低 温、高压环境下会逐渐降低,进而有效控制 NO 形成。

关键 词:燃气轮机;氨气;分级燃烧;化学反应器网络

中图分类号:V231.2;TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2025.04.008

[引用本文格式] 赵宁波,宋 颖,孙继昊,等. 氨气分级燃烧 NO_x生成特性研究[J]. 热能动力工程,2025,40(4):73-81. ZHAO Ningbo,SONG Ying,SUN Jihao, et al. Study on NO_x formation characteristics of ammonia fractional combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2025,40(4):73-81.

Study on NO_x Formation Characteristics of Ammonia Fractional Combustion

ZHAO Ningbo, SONG Ying, SUN Jihao, FENG Zhongmin

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: In order to solve the problems such as unclear formation mechanism of pollutants in ammonia combustion, fuzzy reaction paths in different regions of the combustion chamber, etc., and achieve the goal of low NO_{χ} emission, taking the axial graded combustor as the research object, this paper summarized and classified the NO generation paths in the ammonia combustion process, and explored the influence of typical parameters such as equivalent ratio of the main combustion zone, residence time, temperature and pressure on the NO generation characteristics. The results show that NO is mainly generated through HNO pathway in the main combustion zone, and NH_i pathway plays an important role in the reduction of NO in the poor combustion zone. NO generation can be effectively inhibited by controlling the fractional combustion in main combustion zone under the condition of rich combustion, and the optimal equivalent ratio is 1.41. The change of residence time in the rich and lean combustion zones has no significant effect on NO emission. The mass fraction of main free radicals, such as O, H, OH and HNO, which affect the formation of NO, will gradually decrease under low temperature and high pressure conditions, thus effectively controlling the formation of NO.

Key words: gas turbine, ammonia gas, fractional combustion, chemical reactor network

收稿日期:2024-06-27; 修订日期:2024-11-28

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, 叔宁波(1087)》 用 哈尔波工和十些教授

作者简介:赵宁波(1987-),男,哈尔滨工程大学教授.

引 言

2020 年 9 月,我国首次提出"碳达峰"、"碳中 和"目标。作为一种零碳燃料,氨气因其理想的完 全燃烧产物仅为 N₂和 H₂O,在实现低碳排放方面具 有重要战略意义。燃气轮机以单位功率密度大、尺 寸小、重量轻等优势,被广泛应用于航空、船舶动力 等领域,将氨燃料应用于燃气轮机具有广阔的研究 前景^[1-2]。

通过将氨气的燃烧特性与氢气、甲烷等其他常 见气体燃料进行对比可知,氨燃料具有较高的能量 密度和储氢密度,且易液化便于储运,能够很好地解 决氢储运难的问题。然而在实际应用中,氨燃料存 在层流火焰速度小、点火温度高、可燃性范围较窄等 缺陷^[3-6],导致其燃烧稳定性差、燃烧效率低。此 外,其中含有的N原子会导致在不完全燃烧时产生 大量氮氧化物^[7],进一步加剧了环境污染问题。因 此,如何实现氨燃料的清洁高效利用,已成为学者们 关注的重要问题之一。

目前,关于燃氨燃气轮机燃烧的研究已取得诸 多进展。Kurata 等人^[8]进行了世界上首次以纯氨/ 空气为燃料的燃气轮机实验,利用 50 kW 级微型燃 气轮机系统对排放结果进行分析发现,氨比例增加 时 NO 先升高,而后被增多的未燃氨还原; Somarathne 等人^[9]对高压下氨/空气预混旋流系统进行了 数值计算,研究表明,在富氧环境下,压力增大会降 低 OH 自由基浓度,进而对 NO 的生成起到抑制作 用;王杜^[10]研究发现,在当量比为0.8时,纯氨燃烧 层流火焰速度最大,可达1.25 m/s,且富氧燃烧可 提高 H/O 自由基池浓度,进而提高氨燃烧的温度和 热值。但上述研究结果均表明,氨气燃烧会产生大 量氮氧化物。为避免富氧环境中的高 NO_x 排放,研 究人员提出了富 – 贫分级燃烧方法,以在提高燃烧 效率的同时降低 NO_x 排放^[11-12]。Takeharu 等 人^[13]研究了燃气轮机实际工况下 NH。燃料的分级 燃烧,结果表明,当量比为1.6的富燃环境能显著促 进 NO_x 的还原; Okafor 等人^[14]采用空气轴向分级 燃烧进行数值模拟研究发现,主燃区非预混燃烧会 导致局部燃烧当量较低及 OH 浓度较高,相较于预 混燃烧会产生更多 NO_x 排放, 而主燃区富燃则能够

有效降低 NO_x 排放。在 NO_x 生成特性的研究方 面,不同于碳氢燃料 NO_x 生成中热力型路径占据主 导地位,NH,燃烧主要在火焰锋面的反应区生成燃 料型 NO_x,其中 NO 占 90% 以上^[15-16]。Miller 等 人[17]最早建立了包含 22 种物质和 98 步反应的氨 氧化详细动力学模型,指出氨主要与 OH 反应生成 NH;(i=1,2),并通过中间体 HNO 生成 NO,该路径 在氨生成 NO 的反应中占据主导地位: Murai 等 人^[18]研究表明,在NH3燃烧过程中,O/H自由基 (H,O和OH自由基)浓度对NO的生成起决定性作 用;Pugh 等人^[19]在微高压状态下对空气分级燃烧 系统中燃烧 NH₃/H₂燃料混合物进行实验,结果表 明,在燃料最富状态下 NO_x 排放最少,但未燃氨燃 料的含量增加,同时压力升高会使 NH,自由基含量 增多,从而增强燃烧后区 NO 的还原作用,进一步降 低 NO 排放;Li 等人^[20]选用完全搅拌反应器 PSR 和 柱塞流反应器 PFR 建立了分级燃烧模型,探究 NO_x 生成的主要路径及区域,结果表明,在富燃料条件下 HNO 路径生成的 NO_x 可以被其他路径(如与 NH; 相关的反应)的还原作用抵消,实现总体低 NO_x 排 放,证实了空气分级燃烧在 NH₃/CH₄燃烧中具有降 低 NO_x 排放的巨大潜力;钱文凯等人^[21] 通过建立 轴向分级燃烧室的化学反应器网络模型,在燃气轮 机全负荷工况下研究了燃料空气混合均匀度,结果 发现,化学反应器网络法可以通过反应器模拟燃烧 室内部区域的燃烧状况,计算精度高、能快速分析变 参数影响,近些年已逐渐受到研究学者们的重视并 广泛运用。

尽管目前已开展了大量关于氨燃料燃烧 NO_x 生成特性的研究,但在燃烧室不同区域内的 NO 排 放路径尚不清晰, NO_x 排放控制仍是难题。针对 上述问题,本文通过研究 NH₃燃烧的反应动力学特 性,建立了空气分级燃烧模型,总结 NH₃燃烧生成 污染物的主要反应路径,分别探究了燃气轮机运行 工况下主燃区当量比、停留时间、温度、压力等因素 对污染物排放特性的影响规律。基于燃烧过程中 主要自由基的质量分数变化及 NO 生成路径的分 析,明确了实现低排放的关键因素,为有效控制氨 燃料燃烧过程中 NO_x 的排放提供了理论依据和技 术支持。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象

本文采用两个完全搅拌反应器(PSR)分别模拟 燃烧室富燃区及二次空气淬熄后的贫燃区,并基于 此建立了化学反应器网络模型,如图1所示。图中 PSR1为富燃区,PSR2为贫燃区。



图 1 化学反应器网络模型 Fig. 1 Chemical reactor network model

对于理想的零维完全搅拌反应器 PSR,可以模 拟其内部物质在控制容积内达到完全均匀混合,进 而模拟燃烧室内复杂的燃烧过程,其控制方程为:

$$\rho \frac{Y_{k}^{n} - Y_{k}}{\tau_{PSR}} = -W_{k}\dot{\omega}_{k}$$
(1)
$$\rho \frac{\sum_{k=1}^{N_{s}} (Y_{k}^{in}h_{k}^{in} - Y_{k}h_{k})}{\tau_{PSR}} = -\sum_{k=1}^{N_{s}} h_{k}W_{k}\dot{\omega}_{k}$$
(2)

式中: Y_k 、 W_k 、 h_k 、 $\dot{\omega}_k$ —第 k 种物质的质量分数、分子量、 常和净反应速率; ρ —混合物密度; τ_{PSR} —在 PSR 中的停留时间; N_s —物质数量; 上标 in—燃烧室入口。

1.2 研究方法

采用文献[22]中总结的 NH₃燃料燃烧的详细 机理,该机理包括 66 种组分及 486 个基元反应,能 够在空气压力 *p* = 0.1~3.0 MPa、空气温度 *T* = 298~ 2 000 K 的较宽范围内准确计算点火延迟时间和 层流火焰速度等,经验证机理精确有效。表1给出本 文模拟研究的边界条件取值范围。为更准确地探究 影响 NO 生成的具体原因,将温度与压力工况分开讨 论,控制空气总流量为 1.0 kg/s,通过改变富燃区 (PSR1)中的进气量以控制模拟的富燃、贫燃状态。

表1 边界条件取值范围

Tab. 1 Range of boundary condition values

- http://	医去子	空气		NH ₃	
上 然 区 当 景 比	压刀/ Pa	温度/K	流量/	温度/K	流量/
コ里ル			kg \cdot s $^{-1}$		kg \cdot s $^{-1}$
0.37~2.35	0.1~1.0	473 ~723	1.0	300	0.05

2 模拟结果与分析

本文以研究模拟结果为基础,对 NO 生成的主要反应路径进行总结并分类。与其他路径相比, HNO 路径、热力型(Thermal)路径及 NH_i(*i*=1、2)路 径对总 NO 生成量影响显著,而其他路径的 NO 生 成量极少,可忽略不计,因此本文对其不作探究。 NO 生成的主要路径如表 2 所示。

表 2 NO 生成的主要反应路径 Tab. 2 Main reaction pathway of NO generation

主要路径	包含反应		
HNO	$HNO + O_2 = HO_2 + NO$		
	HNO(+M) = NO + H(+M)		
	$HNO + OH = NO + H_2O$		
	HNO + H = NO + H_2		
	$\mathrm{HNO} + \mathrm{NO}_2 = \mathrm{HONO} + \mathrm{NO}$		
Thermal	N + OH = NO + H		
	$N + NO = N_2 + O$		
NH_i	$\mathrm{NH}_2 + \mathrm{NO} = \mathrm{N}_2 + \mathrm{H}_2\mathrm{O}$		
	$\mathrm{NH}_2 + \mathrm{NO} = \mathrm{N}_2 + \mathrm{H}_2\mathrm{O}$		
	$NH_2 + NO = NNH + OH$		
	$NH_2 + NO_2 = H_2NO + NO$		
	$NH + O_2 = NO + OH$		
	$NH + NO = N_2O + H$		
	NH + O = NO + H		
	$NH + NO = N_2 + OH$		

2.1 主燃区当量比对 NO_x 生成特性影响

图 2 给出主燃区当量比对燃烧室内部温度及 NO 排放量的影响。可以看出,当量比为 1 时燃烧 室内部温度最高,NO 排放量最大,说明此时化学反 应充分完全。随着当量比逐渐增大,富燃区与贫燃 区的温度均先升高后降低,但贫燃区温度始终低于 富燃区,燃烧反应始终比富燃区温和,且 NO 排放量 明显低于富燃区,表明 NO 生成主要集中在燃烧室 富燃区域。当主燃区当量比大于 1(燃烧处于富燃 状态)时,燃烧室内部 NO 排放量低于当量比小于 1 (贫燃)时的状态,表明在分级燃烧过程中控制主燃 区处于富燃条件下可以有效抑制 NO 的生成。但当 量比过大或过小都会导致燃烧无法稳定进行,因此 后续将采用当量比为 1.41 进行研究。





and NO emission

为进一步探究主燃区当量比对富燃区 NO 生成 路径的影响,图 3 给出富燃区中主要自由基(O、H、 OH、NH_i、HNO)质量分数随当量比的变化规律,图 4 给出富燃区主要 NO 反应生成路径的生成速率随当 量比的变化规律,其中 Net 指 NO 的净生成速率,为 统一坐标,将其扩大 10 倍表示。从图 3 和图 4 中可 以看出,H、O、OH 等主要自由基的质量分数均呈现 先增大后减小的变化趋势。富燃区中 HNO 路径对 NO 的生成占主导地位;当量比大于 1 时 NH_i自由基 质量分数较大并出现峰值,但当富燃区进气量减少 且当量比逐渐增大时,NH_i自由基质量分数逐渐减 小。此外,热力型 NO 的生成对 NO 总排放量影响 不大。在各路径的耦合作用下,NO 净生成速率呈 先增大后减小趋势,在当量比为 1.41 时达到最 小值。



图 3 富燃区主要自由基质量分数随主燃区当量比的变化 Fig. 3 Variation of mass fraction of main free radicals in rich combustion zone with equivalent ratio of main combustion zone



图 4 富燃区不同路径 NO 生成速率随主燃区当量比的变化 Fig. 4 Variation of NO generation rate of different pathways in rich combustion zone with equivalent ratio of main combustion zone

下面进一步探究主燃区当量比对贫燃区 NO 生 成路径的影响。图5给出贫燃区中主要自由基质量 分数随当量比的变化规律,图6给出贫燃区主要 NO 反应生成路径的生成速率随当量比的变化规律。由 于贫燃区中热力型 NO 反应生成路径反应微弱,在 此忽略不计。从图 5 和图 6 中可以看出,主要自由 基质量分数的变化趋势与富燃区一致,均先增大后 减小。与富燃区相比,贫燃区中 NH,路径对 NO 还 原作用更显著。在控制总进气流量不变的前提下, 主燃区当量比大于1会使更多未燃氨进入贫燃区. 导致 HNO 路径 NO 的生成速率加快。虽然当量比 为1.41 时贫燃区 NO 的净生成速率不是最小值,但 结合图 2 和图 4 可知,整体上贫燃区的 NO 排放远 低于富燃区,在当量比为1.41 时富燃区中 NO 的净 生成速率达到最小,因此从燃烧室整体考虑,1.41 的当量比被视为最优选择。



图 5 贫燃区主要自由基质量分数随主燃区当量比的变化 Fig. 5 Variation of mass fraction of main free radicals in lean combustion zone with equivalent ratio of main combustion zone



图 6 贫燃区不同路径 NO 生成速率随主燃区当量比的变化 Fig. 6 Variation of NO generation rate of different pathways in lean combustion zone with equivalent ratio of main combustion zone

2.2 燃料空气停留时间对 NO_x 生成特性影响

为探究停留时间对燃烧室区域温度及 NO 排放 量的影响,图7给出燃料空气在 PSR1、PSR2 的停留 时间对燃烧室内部温度及 NO 排放量的影响。





Fig. 7 Effects of residence time on combustor internal temperature and NO emission

可以看出,燃料空气在 PSR1 的停留时间越长, 富燃区温度会逐渐升高,而 NO 排放量在短暂增多 后呈逐渐减少趋势,最后趋于稳定。贫燃区温度在 小幅升高后趋于稳定,且富燃区的停留时间对贫燃 区的温度及 NO 排放量影响较小。因此,为有效降 低 NO 排放,更倾向于选择强旋流工况以缩短停留 时间。而贫燃区停留时间的改变对燃烧室整体温度 及 NO 排放均无显著影响。

2.3 进气温度对 NO_x 生成特性影响

图 8 给出进气温度变化对燃烧室内部温度及 NO 排放量的影响。可以看出,随着进气温度的升 高,富燃区与贫燃区温度均逐渐升高,且呈线性增加 趋势。这是因为进气温度的增加使得燃烧室内燃烧 化学反应更加剧烈。同时,NO 的排放量也随进气 温度的升高而逐渐增多,且富燃区 NO 排放量的增 多幅度要明显高于贫燃区,进一步验证了图 2 中 NO 排放主要集中在燃烧室富燃区的结论。



图 8 进气温度变化对燃烧室内部温度及 NO 排放量的影响



为进一步探究进气温度对富燃区 NO 生成路径 的影响,图9给出燃烧反应过程中主要自由基质量 分数随进气温度的变化,图10给出不同路径 NO 生 成速率随进气温度的变化。从图9 和图10 中可以 看出,进气温度的升高使燃烧反应更为剧烈,O、H、 OH 等参与化学反应的主要自由基的质量分数逐渐 增多。尽管 HNO 自由基的质量分数较少,但 HNO 路径对 NO 的生成占主导地位。此外,热力型 NO 的生成对 NO 总排放影响不大,但 NH_i自由基质量 分数的减少导致 NH_i路径对 NO 的还原作用逐渐减 弱。在各路径协同作用下,进气温度的升高使燃烧 室内部化学反应更加剧烈,NO 的净生成速率逐渐 增大。



图 9 富燃区主要自由基质量分数随进气温度变化 Fig. 9 Variation of mass fraction of main free radicals in rich combustion zone with intake temperature





为进一步探究进气温度对贫燃区 NO 生成路径 的影响,图 11 给出燃烧反应过程中主要自由基质量 分数随进气温度的变化,图 12 给出 NO 不同生成路 径反应速率随进气温度的变化。由于贫燃区中热力 型 NO 生成路径反应微弱,在此忽略不计。从图 11 和图 12 中可以看出,贫燃区主要对生成的 NO 进行 还原,但随着进气温度升高,NO 的消耗速率逐渐降 低。同时,O、H、OH等参与化学反应的主要自由基的质量分数逐渐增加,但普遍少于富燃区。此外, NH_i自由基质量分数的降低导致 NH_i路径对 NO 的还原作用逐渐减弱。



图 11 贫燃区主要自由基质量分数随进气温度变化 Fig. 11 Variation of mass fraction of main free radicals in lean combustion zone with intake temperature



图 12 贫燃区不同路径 NO 生成速率随进气温度变化 Fig. 12 Variation of NO generation rate of different pathways in lean combustion zone with intake temperature

2.4 压力对 NO_x 生成特性影响

图 13 给出压力变化对燃烧室内部温度及 NO 排放量的影响。可以看出,随着压力的增加,富燃区 与贫燃区的温度均无明显变化,说明压力的改变对 燃烧室内部温度无显著影响。NO 排放量随压力的 增大而逐渐减小,这是因为压力增大使分子发生化





为进一步探究压力对富燃区 NO 生成路径的影响,图 14 给出燃烧反应过程中主要自由基质量分数 随压力的变化,图 15 给出 NO 不同生成路径反应速 率随压力的变化。





从图 14 和图 15 中可以看出,压力增大使分子 发生化学反应的碰撞概率增大,反应速率加快,导致 O、H、OH、HNO 等影响 NO 生成的主要自由基质量 分数均逐渐降低。尽管 HNO 路径在 NO 的生成中 占主导地位,但由于 HNO 自由基质量分数较低,且 NH,路径对 NO 的还原作用显著增强,使得 NO 排放 量随着压力增大逐渐减少。



图 15 富燃区不同路径的 NO 生成速率随压力变化 Fig. 15 Variation of rate of NO generation rate in different paths in rich combustion zone with pressure

为进一步探究压力对贫燃区 NO 生成路径的影响,图 16 给出燃烧反应过程中主要自由基质量分数 随压力的变化,图 17 给出 NO 不同生成路径反应速 率随压力的变化。由于贫燃区中热力型 NO 生成路 径反应微弱,在此忽略不计。





从图 16 和图 17 中可以看出,参与反应的主要 自由基质量分数变化与富燃区一致,均随压力增大 而逐渐减少。贫燃区主要对富燃区生成的大量 NO 进行还原,并且 NH_i路径 NO 的还原速率在高压环 境下会显著加快,使贫燃区 NO 的还原速率随着压





图 17 贫燃区不同路径的 NO 生成速率随压力变化 Fig. 17 Variation of NO generation rate of different pathways in lean combustion zone with pressure

3 结 论

本文运用化学反应器网络法构建了燃氨燃气轮 机轴向分级燃烧室模型,整理并总结出 NO 生成路 径,研究了主燃区进气量、燃料空气停留时间、温度、 压力等因素对 NO 生成路径及参与反应主要自由基 质量分数的影响,主要结论如下:

(1) 燃烧过程中 NO 主要集中在主燃区经 HNO 路径生成,贫燃区主要由 NH_i路径对 NO 进行 还原。

(2)进气温度升高会导致燃烧反应更剧烈,O、 H、OH等参与化学反应的主要自由基质量分数逐渐 升高,NH_i自由基的减少导致该路径对 NO 的还原 作用逐渐减弱,最终燃烧室内部温度逐渐升高,NO 生成量逐渐增大;压力增大导致燃烧室内化学反应 速率加快,O、H、OH、NH_i、HNO 等影响 NO 生成的 主要自由基质量分数在高压环境下均逐渐减少,同 时贫燃区 NH_i路径对 NO 进行还原,从而逐步降低 NO 排放量;燃料空气停留时间的变化对 NO 排放 影响不显著。

(3)当主燃区当量比大于1时,富燃状态下燃 烧室内部 NO 排放量明显少于贫燃状态,表明在富 燃条件下主燃区进行分级燃烧控制可以有效抑制 NO 的生成,主燃区当量比最优取值为1.41,过大或 过小均会导致无法燃烧。

参考文献:

- [1] 张 屿,赵义军,曾 光,等. 氨燃料强化燃烧技术研究进展
 [J]. 能源环境保护,2023,37(5):129-144.
 ZHANG Yu,ZHAO Yijun,ZENG Guang, et al. A review of the research progress of ammonia combustion enhancement technology
 [J]. Energy Environmental Protection,2023,37(5):129-144.
- [2] 段伦博,李天新. 氨燃烧特性及稳燃技术研究进展[J]. 华中科 技大学学报(自然科学版),2022,50(7):41-54.
 DUAN Lunbo,LI Tianxin. Research progress of ammonia combustion characteristic and stable-combustion technology[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2022,50(7):41-54.
- [3] LI J, LAI S, CHEN D, et al. A review on combustion characteristics of ammonia as a carbon-free fuel [J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9:760356.
- [4] CHAI W S, BAO Y, JIN P, et al. A review on ammonia, ammoniahydrogen and ammonia-methane fuels[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147:111254.
- [5] DIMITRIOU P, JAVAID R. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(11):7098-7118.
- [6] VALERA-MEDINA A, AMER-HATEM F, AZAD A K, et al. Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics
 [J]. Energy & Fuels, 2021, 35(9):6964 7029.
- [7] ROCHA R C, ZHONG S, XU L, et al. Structure and laminar flame speed of an ammonia-methane-air premixed flame under varying pressure and equivalence ratio [J]. Energy&Fuels, 2021, 35 (9): 7179-7192.
- [8] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃-CH₄-air combustion gas-turbine power generations [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2017,36(3):3351-3359.
- [9] SOMARATHNE K D K A, HATAKEYAMA S, HAYAKAWA A, et al. Numerical study of a low emission gas turbine like combustor for turbulent ammonia/air premixed swirl flames with a secondary air injection at high pressure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (44) :27388 - 27399.
- [10] 王 杜.富氧及掺氢氨气预混层流基础燃烧特性研究[D]. 北京:北京工业大学,2021.
 WANG Du. Investigation on fundamental characteristics of oxygen and hydrogen enriched ammonia laminar premixed combustion [D]. Beijing: Beijing University of Technology,2021.
- [11] LI S, ZHANG S, ZHOU H, et al. Analysis of air-staged combustion of NH₃ – CH₄ mixture with low NO_x emission at gas turbine conditions in model combustors[J]. Fuel, 2019, 237:50 – 59.
- [12] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, et al. Measurement and

modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism[J]. Combustion and Flame,2019,204;162 – 175.

- [13] TAKEHARU H. Gas turbine combustion and ammonia removal technology of gasified fuels[J]. Energies 2010,3(3):335 - 449.
- [14] OKAFOR E C, SOMARATHNE K D K A, RATTHANAN R, et al. Control of NO_{χ} and other emissions in micro gas turbine combustors fuelled with mixtures of methane and ammonia[J]. Combustion and Flame, 2020, 211;406 416.
- [15] 陈 磊,方世东,沈 洁,等. 氨燃料发电研究进展[J]. 工程 热物理学报,2022,43(8):2212-2224.
 CHEN Lei, FANG Shidong, SHEN Jie, et al. Research progress in ammonia fuel for power generation [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2022,43(8):2212-2224.
- [16] KEROMNES A, METCALFE W K, HEUFER K A, et al. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(6):995 - 1011.
- [17] MILLER J A, SMOOKE M D, GREEN R M, et al. Kinetic modeling of the oxidation of ammonia in flames [J]. Combustion Science and Technology, 1983, 34(1/6):149-176.

(上接第54页)

- [16] ASTRUA P, PIOLA S, SILINGARDI A, et al. Multi-objective constrained aeromechanical optimization of an axial compressor transonic blade [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark; ASME, 2012.
- [17] 刘汉儒,马 岩,赵星宇,等.基于改进 Gappy POD 方法的压
 气机叶栅气动外形反设计方法[J].航空动力学报,2022, 37(3):607-616.

LIU Hanru, MA Yan, ZHAO Xingyu, et al. Inverse design for aerodynamic shape of compressor cascade based on improved Gappy POD method [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37 (3):

- [18] MURAI R, OMORI R, KANO R, et al. The radiative characteristics of NH₃/N₂/O₂ non-premixed flame on a 10 kW test furnace
 [J]. Energy Procedia, 2017, 120:325 332.
- [19] PUGH D, BOWEN P, VALERA-MEDINA A, et al. Influence of steam addition and elevated ambient conditions on NO_x reduction in a staged premixed swirling NH₃/H₂ flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2019,37(4):5401-5409.
- [20] LI S, ZHANG S, ZHOU H, et al. Analysis of air-staged combustion of NH₃/CH₄ mixture with low NO_x emission at gas turbine conditions in model combustors[J]. Fuel, 2019, 237:50 - 59.
- [21] 钱文凯,朱 民,李苏辉,等. 燃气轮机分级燃烧室 NO_x 排放 动力学模拟研究[J]. 动力工程学报,2019,39(1):33-40.
 QIAN Wenkai, ZHU Min, LI Suhui, et al. A kinetics study on NO_x emission of an axially-staged gas turbine combustor [J].
 Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(1): 33-40.
- [22] SUN J, YANG Q, ZHAO N, et al. Numerically study of CH₄/NH₃ combustion characteristics in an industrial gas turbine combustor based on a reduced mechanism[J]. Fuel, 2022, 327 :124897.

(刘 颖 编辑)

607 - 616.

- [18] 李艾挺,朱阳历,李 文,等. 三维叶轮机叶片黏性反问题设 计改进方法[J]. 航空动力学报,2019,34(6):1380-1388.
 LI Aiting, ZHU Yangli, LI Wen, et al. Improved viscous inverse design method for three-dimensional turbomachinery blades [J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(6):1380-1388.
- [19] BOESE M, FOTTNER L. Effects of riblets on the loss behavior of a highly loaded compressor cascade [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo, Amsterdam, The Netherlands: ASME, 2002.

(姜雪梅 编辑)