

文章编号: 1008-8857(2019)01-0040-08

DOI: 10.13259/j.cnki.eri.2019.01.007

微型燃气轮机燃烧室性能影响因素的探讨

赵立志, 汪 军

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对微型燃气轮机燃烧室性能的各种影响因素(进气条件、燃料热值、燃烧室结构等)对燃烧稳定性和燃烧效率的影响,介绍了国内外相关实验和数值模拟研究现状,分析了燃烧室主要污染物的生成机理和影响因素,以及降低氮氧化物排放浓度的技术措施。

关键词: 微型燃气轮机; 燃烧室; 燃烧效率; 燃烧稳定性; 氮氧化物; 排放浓度

中图分类号: TP392

文献标志码: A

Discussion of the influential factors on the performance of combustion chamber in a micro gas turbine

ZHAO Lizhi, WANG Jun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the influential factors concerning the performance of combustion chamber in a micro gas turbine such as inlet air, fuel heating value, structure of the combustion chamber and so on, and their effects on combustion stability and combustion efficiency, the corresponding status of experimental study and numerical simulation was introduced. The formation mechanism of the main pollutants from combustion chamber and the related influential factors were analyzed. The technical measures for reducing the NO_x emission concentration were summarized.

Keywords: micro gas turbine; combustion chamber; combustion efficiency; combustion stability; NO_x ; emission concentration

微型燃气轮机(micro-turbine 或 micro gas turbine, MGT)是一种以燃料(燃气或燃油)和空气为介质的旋转式热力发动机,其功率一般在 25~300 kW 之间,并具有多台集成扩容、多燃料、低燃料消耗率、低噪音、低排放、低振动、低维修率、可遥控和诊断等一系列先进技术特

征,被广泛应用于分布式发电、备用电站、热电联产以及民用和军用交通运输等领域。燃烧室是燃气轮机的核心部件之一,位于压气机与涡轮之间,主要由扩压器、火焰筒、燃料喷嘴、旋流器、点火装置以及燃烧室壳体等部件组成^[1]。在燃烧室内进行的燃烧反应是一个复杂的过程,包

收稿日期: 2018-06-14

第一作者: 赵立志(1993—),男,硕士研究生。研究方向:微型燃气轮机燃烧室。E-mail: 601707811@qq.com

括燃料与空气的流动、传热、传质和化学反应等。由压气机出来的空气首先经过燃烧室头部的扩压器, 使空气入口压力达到进入燃烧室的工作压力, 经过旋流器后与由喷嘴进入的燃料混合燃烧, 形成高温高压燃气, 再进入透平中膨胀做功^[2]。整个燃烧过程将燃料的化学能转化为机械能。确保在此过程中燃烧稳定, 提高燃烧效率, 降低 NO_x 排放浓度已成为目前对微型燃气轮机燃烧室研究的重点。

1 国内外微型燃气轮机发展现状

国外燃气轮机的发展史可追溯到 20 世纪 30 年代。1939 年第一台发电用燃气轮机和航空燃气轮机先后研制成功。微型燃气轮机的发展始于 20 世纪 60 年代^[3], 比重型燃气轮机晚了 20 多年。在 1995 年美国动力年会上, Allied

Signal、Capstone 和 Elliott 等公司各自推出了 25~75 kW 的微型燃气轮机样机, 其性能参数如表 1 所示。2003 年在美国召开了机械工程师协会 (ASME) 年会, 从各厂商发布的微型燃气轮机信息中可看出^[4], 当时微型燃气轮机已有了较大发展。

随着科技的进步与发展, 微型燃气轮机在结构方面也有了较大的改变。为了减小整个机组的质量和尺寸, 采用高速永磁发电机中的空气轴承代替滚动轴承; 为了提高机组的热效率, 采用高效紧凑型回热器; 为了提高燃烧效率, 采用陶瓷、硅等耐高温材料提高燃烧室入口温度^[5]。美国 Capstone 公司^[6-7]已成功研制了型号为 C30、C65 和 C200 的微型燃气轮机; Honeywell 公司研发了 75 kW 的 Parallon75 型微型燃气轮机; 英国 Bowman 公司研发了 35、60 和 80 kW 的微型燃气轮机; 瑞典 Turbec 公司研制了 100 kW 的 T100 型微型燃气轮机。这些产品均已投放市场, 并得到广泛应用。

表 1 国外第一代微型燃气轮机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of first-generation micro gas turbines

厂家	电功率/kW	效率/%	压比	进气温度/℃	出口温度/℃	排烟温度/℃	NO_x 排放质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Allied Signal	75	28.5	3.7	930	650	240	<50
Bowman	45	22.5	4.3		650	305	
Capstone	30		3.2	840		270	
GE/Elliott	45	30				316	<18
Ingersoll-Rand	70	33	3.3	870		200	

相对而言, 国内微型燃气轮机的研究和应用起步较晚, 最初是购买国外样机开展试验研究。“十五”期间开展 863 计划专项“100 kW 微型燃气轮机研制”^[8], 并成功研制了型号为 WDR100 的微型燃气轮机。该燃气轮机设计发电功率为 100 kW, 发电效率不低于 29%; 热电联供热效率达到 80% 以上。上海交通大学成功研制了 20 kW 微型燃气轮机, 并与澳大利亚联邦研究院和上海航天能源股份有限公司合作, 成功研制了 30、50 kW 低热值微型燃气轮机, 与上海理工大学合作建成了微型燃气轮机能源岛供能系统实验台。2015 年由中航工业哈尔滨东安发动机(集团)有限公司下属哈尔滨东安科技开

发公司成功研制了我国首台具有自主知识产权的 WD18 微型燃气轮机发电机组, 填补了国内微型燃气轮机发展史上的空白。该机功率为 18 kW, 具有体积小、重量轻、发电速度快、发电品质高、突加载能力强等特点。但是, 我国目前市场上所供应的大部分微型燃气轮机仍以国外进口为主, 主要是美国 Capstone 公司的产品, 国内应用近 200 台。国内相关企业和科研机构对微型燃气轮机做了大量研究工作, 具备了一定的经验和基础, 但可实现商业应用的还较少, 仍需进一步研究核心技术以降低生产和研发成本, 提高能源利用效率, 才能真正将微型燃气轮机产品推向国内外市场, 实现商业化应用。

2 燃烧室的技术特性指标

在燃烧室研究与开发中,通常使用各种技术特性指标衡量燃烧室工作性能的优劣,如:燃烧效率、总压保持系数、出口温度分布不均匀系数、燃烧稳定性、污染物排放浓度和使用寿命等。

2.1 燃烧效率

燃料在燃烧室中燃烧时,总能量损失 $\sum Q$ 主要由化学未完全燃烧损失 Q_c 、物理未完全燃烧损失 Q_m 和散热损失 Q_h 三部分组成。总能量损失的表现形式为燃料的发热量 H_u 未能用来加热燃气。所以,燃烧效率 η 表示为

$$\eta = \frac{H_u - \sum Q}{H_u} = 1 - \frac{\sum Q}{H_u} \quad (1)$$

目前,一般燃气轮机燃烧室的燃烧效率均能达到90%~99%,它与燃料热值、燃烧室进口空气参数和燃烧室设备结构形式等因素密切相关。

2.2 总压保持系数

总压保持系数 σ 是衡量燃烧室气动性能好坏的指标,有

$$\sigma = \frac{p_3}{p_2} \quad (2)$$

式中: p_2 、 p_3 分别为燃烧室入口、出口总压。

造成总压下降的原因有两个:因摩擦、掺混等不可逆流动造成的损失;热阻的影响,影响程度会随工质加热程度的增加而增加,且这一影响不可避免。就目前而言,一般燃烧室的总压保持系数在91%~98%左右。

2.3 出口温度分布不均匀系数

燃烧室出口与透平入口靠得很近,如果燃烧室出口气流温度分布不均匀就会使透平叶片受热不均,严重时会有烧坏的危险。通常采用不均匀系数 A_t 衡量燃烧室出口气流温度分布不均匀程度,一般要求 $A_t \leq 10\%$ 。

$$A_t = \frac{T_{3\max} - T_{3\text{ave}}}{T_{3\text{ave}}} \quad (3)$$

式中: $T_{3\max}$ 为燃烧室出口最高温度; $T_{3\text{ave}}$ 为燃烧室出口平均温度。

一般情况下,在单个燃烧室机组中,燃烧室出口最高温度不能比出口平均温度高60~80℃;在多燃烧室同时运行的机组中,还应确保每个燃

烧室出口的温度偏差不超过15~20℃。

2.4 燃烧稳定性

燃烧稳定性是燃烧室的一个重要性能指标,它要求在各种可能遇到的工况下燃烧室均能维持燃烧,既不会熄火也不会发生强烈的火焰脉动。燃烧室存在两种熄火现象:富油熄火,即过量空气系数低于富油熄火极限时发生的熄火现象;贫油熄火,即过量空气系数高于贫油熄火极限时发生的熄火现象。位于这两个界限之内的即为稳定燃烧区。一般来说,贫油熄火极限与富油熄火极限之间的差值越大,燃烧稳定性越好。

通常在燃气轮机中不会发生富油熄火现象,只会出现贫油熄火,因此也可以用贫油熄火极限衡量燃烧稳定性。一般要求燃烧室的贫油熄火极限至少大于25才能适应燃气轮机的工作需求。

2.5 污染物排放量

燃烧室排气中的污染物主要由 NO_x 、CO、UHC(未燃碳氢化合物)和冒烟组成。随着环境保护标准的提高,有效控制燃烧室污染物排放浓度已成为衡量燃烧室性能的重要指标之一。美国环保局规定:燃用天然气的燃气轮机,其 NO_x 排放体积分数不能高于 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,CO排放体积分数不能高于 $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。相较于燃用天然气的燃气轮机,燃用液体燃料的燃气轮机允许排放浓度的要求要低得多。

2011年,北京市颁布了固定式燃气轮机大气污染物排放标准(DB11/847-2011)^[9],规定了 NO_x 最高允许排放质量浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, SO_2 最高允许排放质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,烟尘最高允许排放质量浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。为了更好地适应未来的发展,应尽快立法,制定全国统一的燃气轮机污染物排放标准。

2.6 使用寿命

不同类型燃气轮机的使用寿命差距较大。固定式燃气轮机由于其燃烧强度较低,使用寿命较长,一般为20 000~30 000 h;地面运输式机组使用寿命大约为1 000~1 500 h;而航空发动机燃烧强度大,使用寿命仅为300~800 h。

燃气轮机失效的主要原因是燃烧室中高温元件损坏。火焰筒壁面温度高低对燃烧室的寿命有着决定性的影响。一般,规定火焰筒壁面温度要

低于材料长期工作所能承受的温度水平。对于工作寿命要求较长的燃烧室,最好能把温度控制在 $650\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,但在某些工作寿命较短的燃烧室中,壁面最高温度可能会超过 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$,甚至局部最高温度会达到 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,火焰管的温度分布均匀程度对使用寿命也有较大的影响。在温度分布不均匀处,火焰管容易变形或开裂,导致其使用寿命降低。

3 燃烧室性能影响因素分析

随着微型燃气轮机技术的发展和功率的提高,为了保证在高温、高压工作环境下达到低排放、长寿命、高可靠性的指标要求,燃气轮机的相关研发工作主要集中在提高燃烧初温、提高热效率和降低 NO_x 排放浓度。提高燃烧初温的关键在于提高动静叶片的耐高温性能;而对于提高热效率和降低 NO_x 排放浓度,可从进气条件、燃料类型、燃烧室结构等方面进行研究。

3.1 进气温度的影响

进气温度对燃烧室性能影响较大^[10]。在一定温度范围内,随着燃烧室进气温度上升,燃烧效率显著提高,燃烧室出口气流温度分布不均匀系数减小;同时燃烧室出口 CO 、 UHC 排放浓度显著降低。但由于热阻增大,总压保持系数有所降低。此外,当进气温度超过一定值后,若继续提高进气温度,燃烧效率的提高则变得缓慢。

出现上述现象的原因在于,随着进气温度上升,燃烧室内的化学反应速率加快,使得燃烧过程在更短的时间内完成,且由于燃料流量减少,燃烧室过量空气系数增大,使氧气浓度上升,促进了燃料的完全燃烧;另一方面,随着进气温度上升,燃烧反应速率变快,火焰长度变短,高温燃气与空气掺混更加均匀。因此,燃烧室出口温度分布更加均匀,温度分布不均匀系数更小。但当进气温度超过一定值后,其对燃烧室燃烧效率的影响越来越弱。

3.2 燃料热值的影响

微型燃气轮机的燃料一般为天然气或柴油。鉴于全球石油储备减少和能源价格上涨^[11],为保障可持续发展,需要开发新能源以替代常规能

源。因此,有必要开展对替代能源的研究和应用,以及燃用替代燃料对燃烧室性能的影响研究。国内外很多学者通过实验和数值模拟的方法对燃用不同热值燃料的燃烧室性能进行了研究,并对燃烧室结构进行了优化设计。

燃料热值高低对燃烧稳定性和燃烧效率影响较大。氢气作为一种优质燃料,在燃烧室燃烧时具有热值高、反应时间短、蒸发快、扩散快、火焰传播速度快等特点^[12]。Robbio^[13]以美国Capstone公司的C30为模型建模,将燃料改为氢气与天然气的混合物,研究发现:随着氢气占总燃料比重的不断上升,燃料热值升高,燃烧效率提高,且 NO_x 排放浓度降低。曹常青等^[14]设计了一种以富氢合成气为燃料的 100 kW 级微型燃气轮机燃烧室,并对燃烧室内部冷热流场、燃烧效率、燃烧稳定性等进行数值模拟。结果表明:该燃烧室燃烧效率高达 99% ,燃烧基本稳定,满足燃烧室的设计要求。Laranci等^[15]以Elliott公司T80微型燃气轮机燃烧室为模型建模,对分别燃用两种不同燃料(天然气和植物油)的燃烧室性能进行了研究,结果表明:由于植物油热值较低,从功率和燃烧效率的数据对比分析来看,天然气的相应参数比植物油的参数高出 40% 左右。

针对生物质气、低热值合成气等燃料燃烧效率低的问题,许多学者对燃烧室内部结构进行适当改进^[16-20]。张巍等^[16]将生物质气应用于原本燃用天然气的C30微型燃烧室,采用数值模拟方法进行研究,结果表明:由于生物质气热值较低,降低了主燃区温度,显著降低了 NO_x 排放浓度,但局部高温区变大;流场前部流速加大,高温燃气直接冲击内筒壁,且出口温度不均匀系数变大;这些问题仍需在后续研究中进行改进。Sadig等^[16]针对两种不同成分的生物质气进行研究,在双燃料模式下采用轴向和径向两种注入方式,并采用分级燃烧方式,有效提高了燃烧效率。

研究表明,可采取以下措施改善燃料热值对燃烧室内燃烧稳定性和燃烧效率的影响:

(1)适当改变掺混孔布局,减少掺混孔数量,以提高燃烧室出口温度。

(2)适当延长燃烧室轴线长度,使高温燃气与空气在燃烧室内混合更加均匀,增强燃烧稳定性,减小出口温度分布不均匀系数。

(3)尽量将燃烧工况维持在满工况状态,并改进燃烧室外壁的冷却效果。

3.3 燃烧室结构对燃烧室性能的影响

3.3.1 喷嘴

在燃用液体燃料的微型燃气轮机燃烧室中,燃料喷射、雾化以及与空气的预混均匀程度对燃烧稳定性和燃烧效率有着决定性作用^[21]。一般而言,液体燃料的雾化效果好,雾滴颗粒越细且均匀,燃烧效率越高^[22]。传统燃气轮机燃烧室的喷嘴有离心式喷嘴、空气雾化喷嘴、甩油盘喷嘴和蒸发管喷嘴^[23]。由于微型燃气轮机燃烧室结构紧凑,在燃用液体燃料时必须确保在有限空间中迅速实现液体燃料的喷射、雾化和预混燃烧,所以,为了确保燃烧稳定性,提高燃烧效率,需要对原喷嘴结构进行优化设计。

针对微型燃气轮机燃烧室的开发,许多学者研发了新型喷嘴或对传统喷嘴进行了适当改进和优化。为了满足某微型燃气轮机进行400 h的长试要求,冯占祥^[24]设计了一种燃油喷嘴,填补了我国在空气雾化喷嘴技术上的空白;崔运静等^[25]在Danfoss喷嘴基础上通过外加涡旋方式进行优化,通过实验验证了在加入外部涡旋的情况下可增大喷嘴的出口雾化角,降低内部雾滴碰撞再聚合的机率,保证燃烧室内燃烧稳定性;由于传统喷嘴具有固定的旋流数,所以在低功率工况下会对燃烧性能产生影响。针对该问题,徐永国等^[26]设计了一种可在相同雷诺数下得到不同旋流数的涡旋式喷嘴,并采用数值模拟方法验证了其在低功率工况下的燃烧效率,为喷嘴设计提供了经验。光辉等^[27]设计了一种应用于微型燃气轮机燃烧室的离心式多孔蒸发管喷嘴,并通过实验发现:当进入蒸发管的温度高于480 K时,蒸发率达到100%。Rajpara等^[28]在现有燃烧室模型的基础上进行建模,采用反向燃油喷射方式加强燃料与空气的掺混,研究表明:喷嘴长度对掺混效果、停留时间和污染物排放浓度有较大影响,并存在一个最佳喷嘴长度使燃烧效率和总压恢复系数达到最佳。

3.3.2 旋流器

当气流流经旋流器时,气体的流动状态由轴向运动转变为旋转运动,在离心力作用下形成低压区,从而形成一个回流区稳定燃烧^[29]。旋流器还可增大气流和燃油的相对速度,优化油滴雾化和与空气的预混,同时为燃烧室头部提供适量空气,保证燃烧室头部具有合适的余气系数,所以旋流器的选取在燃烧室设计中至关重要。

旋流强度决定了气流的旋流流动。流场中回流区的形成、发散角度以及气体在燃烧室中的停留时间均取决于旋流强度。传统的单级旋流器已不再适用于高推质比发动机,双级旋流器以及三级旋流器正逐步取代单级旋流器。我国部分学者对双级旋流器和三级旋流器的旋向进行了研究^[30-34],发现:在双级旋流器中,旋向相反时气流掺混造成较大的能量损失,空气与燃料的掺混效果变差,且由于预混效果变差导致高温区增大,NO_x排放浓度增大,出口温度分布不均匀系数增大,燃烧性能不如旋向相同时;但在三级旋流器中,当中间级旋流器和外级旋流器与内级旋流器旋向不同时,空气与燃料预混均匀性较好,燃烧性能更佳。在对旋流器的研究中还发现,通过改变旋流器安装角度可改变旋流数大小,选择适当的旋流数能维持流场和燃烧稳定性^[35-37]:当旋流数过低时不会形成回流区,燃烧稳定性较差;但当旋流数过高时喷嘴处气体过于稀薄,回流区气体容易向上游直冲导致回火,使燃烧过程存在安全隐患。

3.3.3 其他结构

燃气轮机燃烧室复杂的内部结构对其性能有较大影响。因此,国内外许多学者均致力于优化其内部结构来改善性能。Farokhipour等^[38]在燃烧室内设置了一些喷水喷头,结果发现燃烧性能有了较大改善,并在此基础上对不同的喷头位置、方向和水的质量流率下的燃烧性能进行了模拟,结果表明:当喷头位于主燃区末端、喷射角度 $\alpha = 120^\circ$ 、水的质量流率为 $1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,燃烧性能达到最佳。Xing等^[39]将一个可调节的燃料供应系统应用于某一30 kW级微型燃气轮机中,通过改变可调节燃料特征数U进行模拟研究,结果表明,随着U增大,总压保持系数不

变,出口温度分布不均匀系数减小,且燃烧效率逐渐增大,最大可达99.995%。De Paepe等^[40]在Turber T100微型燃气轮机基础上,利用先进的湿式燃气轮机循环概念,在燃烧室中进行废热回收优化;由于废热回收增加,在恒定转速时有更高的电力输出或在输出相同电能时燃料消耗更少,使发电效率更高。Peng等^[41]以氢气为燃料,采用非预混燃烧方式,研究壁厚和多孔介质对圆柱形微型燃气轮机燃烧室性能的影响,结果表明:设置多孔介质或增加壁厚可增强热传递,提高燃烧稳定性,有利于改善外壁温度和提高能源利用率。Ansari等^[42]研究了一台带有挡板和圆柱组合的新型平面微型燃气轮机,结果表明:挡板厚度决定了火焰位置;圆柱直径较小或挡板与圆柱间距过小时会影响燃烧稳定性;挡板长度和壁面导热率能有效改善燃烧效率和嫡产。

4 NO_x排放浓度的影响因素及控制措施

燃气轮机燃烧室在燃烧过程中产生的污染物主要有CO、CO₂、SO_x、UHC以及NO_x等^[43]。其中CO和UHC来源于燃料的未完全燃烧,CO₂来源于燃料与O₂之间的氧化反应,SO_x来源于燃料中S元素与O₂之间的反应,NO_x来源于空气中N₂与O₂之间的反应。在NO_x排放浓度的问题上,美国、日本等发达国家要求将其排放质量浓度限制在2.5 mg·m⁻³以下;相对而言,我国对燃气轮机的排放限制较宽,要求NO_x最大排放质量浓度为30 mg·m⁻³。

4.1 NO_x的形成机理

燃烧过程中产生的NO_x可分为热力型NO_x、快速型NO_x和燃料型NO_x^[44],其中NO约占95%。热力型NO_x是指在高温条件下O₂与N₂发生反应生成NO,是燃烧过程中NO形成的主要来源。热力型NO_x的生成与燃烧区温度、氧气浓度以及反应物在燃烧区的停留时间等密切相关^[45]。当燃烧区温度超过1800℃时,其排放浓度将急剧增大^[46]。快速型NO_x是碳氢化合物燃料分解成CH、C₂H、CH₂等基团后与N₂经过一系列复杂的化学反应后生成的NO;燃料型

NO_x是指当燃料中含有的N元素与碳氢基团发生化学反应,生成NO的过程。其生成原理与快速型NO_x的生成原理基本相同。由于微型燃气轮机的燃料一般为天然气或柴油,不含氮元素,且燃烧过程中热力型NO_x所占比例较大,所以此处仅分析影响热力型NO_x排放浓度的因素。

4.2 NO_x排放浓度的影响因素

影响燃烧室出口NO_x排放浓度的因素有很多。部分学者针对燃烧室入口进气温度和压力进行了实验和数值模拟研究,结果表明:燃烧室的进气温度和压力对NO_x生成的影响较大^[47-50]。随着进气温度的上升,燃料密度发生变化,使燃料在燃烧区的停留时间增加,燃烧更加充分,但燃烧区温度上升,使NO_x排放浓度增大;同时根据理想气体状态方程,由于燃烧室体积不变,压力变化将引起温度变化,而温度变化对热力型NO_x生成影响巨大,所以随着压力升高,燃烧更加充分,使主燃区温度上升,NO_x排放浓度也随之上升。

同时,过量空气系数对燃烧室出口NO_x排放浓度也有较大影响。工程实践中,在主燃区内布置一个内部循环的连续空气分级器^[51],将燃烧所需的空气分成两级送入燃烧室,第一级空气和全部燃料过浓燃烧,其余空气作为第二级空气在火焰下游送入,使燃料完全燃烧。随着过量空气系数增加,空气流量的增加降低了燃烧区内温度,使NO_x排放浓度逐渐下降。

与传统的扩散燃烧相比,采用预混燃烧可降低主燃区温度,从而降低燃烧室出口NO_x排放浓度。但预混燃烧的燃烧范围较窄,在低功率工况下燃烧不稳定,甚至会导致熄火,可以考虑加入值班区火焰。值班区火焰采用扩散燃烧的方式,可起到稳定燃烧的作用。值班区与主燃区的燃料配比问题成为这一技术的关键所在^[52],要既能保证燃烧稳定性又能降低燃烧室出口NO_x排放浓度。研究表明:当值班区燃料配比较低时,燃烧室头部不会形成高温区,整个燃烧室温度场分布均匀,NO_x排放浓度也较低,但燃烧效率也相对较低;随着值班区燃料配比增大,燃烧室头部的高温区逐渐扩大,温度上升,同时NO_x排放浓度也随之急剧上升。所以需要选定

一个合适的燃料配比,以尽量避免这些问题的出现。

4.3 降低 NO_x 排放浓度的措施

综上所述,降低燃烧室出口 NO_x 排放浓度的措施有:①在不影响燃烧效率的情况下,尽可能降低进气温度和压力;②选取适宜的值班区与主燃区燃料配比;③设置空气分级器,适当增大过量空气系数;④在燃烧区与稀释区之间合理布置掺混孔^[53]。

5 结束语

通过分析微型燃气轮机燃烧室各种影响因素,讨论了进气条件、燃料热值、燃烧室结构等对燃烧稳定性和燃烧效率的影响;根据燃烧室出口 NO_x 的形成原因,分析了造成热力型 NO_x 排放浓度较高的影响因素并提出了优化建议,为后续微型燃气轮机的设计和使用提供借鉴。

参考文献:

- [1] 汪军,马其良,张振东. 工程燃烧学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 焦树建. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [3] 翁一武,苏明,翁史烈. 先进微型燃气轮机的特点与应用前景[J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 111 - 116.
- [4] 袁春,何国库. 微型燃气轮机发电技术进展[J]. 移动电源与车辆, 2002(4): 39 - 40.
- [5] 桑振远. 100 kW 微型燃气轮机总体方案分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [6] 李耀强. 微型燃机燃烧室天然气燃烧过程数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 刘寅晟. 微型燃机双级离心压气机气动性能分析与研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [8] 耿加民,朱汉粉,仝云峰. 100 kW 级微型燃气轮机控制系统设计[C]. 中国航空学会轻型燃气轮机专业第四次学术交流会议. 厦门: 中国航空学会, 2005.
- [9] DB11/847-2011. 固定式燃气轮机大气污染物排放标准[S]. 北京: 北京市环境保护局, 2011.
- [10] 汪凤山,孔文俊,王宝瑞,等. 进气温度对微燃机燃烧室燃烧特性的影响分析[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 331 - 334.
- [11] 陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究, 2009, 44(4): 41 - 55.
- [12] CAO H L, XU J L. Thermal performance of a micro-combustor for micro-gas turbine system[J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(5): 1569 - 1578.
- [13] ROBBIO R D. Innovative combustion analysis of a micro-gas turbine burner supplied with hydrogen-natural gas mixtures[J]. Energy Procedia, 2017, 126: 858 - 866.
- [14] 曹常青,付忠广,卢可. 合成气微型燃气轮机燃烧室优化设计及数值模拟[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 100 - 105.
- [15] LARANCI P, ZAMPILLI M, D' AMICO M, et al. Geometry optimization of a commercial annular RQL combustor of a micro gas turbine for use with natural gas and vegetal oils[J]. Energy Procedia, 2017, 126: 875 - 882.
- [16] 张巍,翁一武,刘爱斌. 生物质气微型燃气轮机燃烧室的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2009, 24(1): 100 - 104.
- [17] SADIG H, SULAIMAN S A, SAID M A. Effect of producer gas staged combustion on the performance and emissions of a single shaft micro-gas turbine running in a dual fuel mode[J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 90(1): 132 - 144.
- [18] 张晓宇,李意民,周忠宁,等. 微型燃气轮机低浓度瓦斯混掺燃烧实验研究及数值模拟[J]. 煤炭技术, 2016, 35(3): 134 - 137.
- [19] 尹洪,任静,蒋洪德. 燃气轮机燃用中低热值燃料性能优化方案研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(8): 1303 - 1306.
- [20] 崔玉峰,徐纲,聂超群,等. 数值模拟在合成气燃气轮机燃烧室设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 109 - 116.
- [21] 金如山,索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [22] LEFEBVRE AH. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1984, 107(1): 24 - 37.
- [23] 黄勇,林宇震,樊未军,等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [24] 冯占祥. 某微型燃气轮机燃油喷嘴设计[J]. 科技与企业, 2012(10): 307 - 307.
- [25] 崔运静,林其钊,仇性启. 微型燃气轮机喷嘴射流和雾化特性研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(4): 11 - 17.
- [26] 徐永国,李秀香,李宇峰. 燃气轮机涡旋式喷嘴内流体

- 动力特性数值模拟研究[J]. *汽轮机技术*, 2010, 52(2): 120 - 122.
- [27] 光辉, 许全宏, 朱菁, 等. 一种离心喷嘴多孔蒸发管的蒸发率实验[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(2): 337 - 342.
- [28] RAJPARA P, DEKHATAWALA A, SHAH R, et al. Influence of fuel injection method on performance of upward swirl can-type combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 319 - 330.
- [29] BRADLEY D, CAVALIERE A, et al. *Lean Combustion: Technology and Control*[M]. Boston: Boston Academic Press, 2008.
- [30] 张欣, 刘勇, 党新宪, 等. 单头部双级旋流器燃烧室流场 PIV 测量[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(7): 1253 - 1256.
- [31] 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.
- [32] 代威, 林宇震, 张弛. 第 2 级径向旋流器旋流数对燃烧室点火和贫油熄火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(5): 1092 - 1098.
- [33] 彭云晖, 林宇震, 刘高恩. 三旋流器燃烧室出口温度分布的初步试验研究[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(4): 554 - 558.
- [34] 丁国玉, 安伯堃, 何小民, 等. 三级轴向旋流器燃烧室的贫油熄火性能试验[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(2): 356 - 361.
- [35] 刘洋, 陈鹏飞, 史俊瑞, 等. 燃气轮机旋流器安装角对燃烧室出口温度品质的影响[J]. *热能动力工程*, 2017, 32(S1): 41 - 45, 128 - 129.
- [36] 尹航, 戴韧, 张建辉, 等. 旋流器安装角对低旋流燃烧流场的影响[J]. *动力工程学报*, 2011, 31(9): 664 - 671.
- [37] TANAKA S, SHIMURA M, FUKUSHIMA N, et al. DNS of turbulent swirling premixed flame in a micro gas turbine combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3293 - 3300.
- [38] FAROKHIPOUR A, HAMIDPOUR E, EAMANI E. A numerical study of NO_x reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers[J]. *Fuel*, 2018, 212: 173 - 186.
- [39] XING C, LIU L, QIU P H, et al. Combustion performance of an adjustable fuel feeding combustor under off-design conditions for a micro-gas turbine[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 12 - 24.
- [40] DE PAEPE W, MONTEROCARRERO M, BRAM S, et al. Waste heat recovery optimization in micro gas turbine applications using advanced humidified gas turbine cycle concepts[J]. *Applied Energy*, 2017, 207: 218 - 229.
- [41] PENG Q G, JIAQIANG E, CHEN J W, et al. Investigation on the effects of wall thickness and porous media on the thermal performance of a non-premixed hydrogen fueled cylindrical micro combustor[J]. *Energy Conversion & Management*, 2018, 155: 276 - 286.
- [42] ANSARI M, AMANI E. Micro-combustor performance enhancement using a novel combined baffle-bluff configuration[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 175: 243 - 256.
- [43] 党昂. 微型燃气轮机环形燃烧室的数值模拟与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [44] GARDINER W C J R. *Gas-Phase Combustion Chemistry*[M]. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [45] 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 & Engineering Chemistry*, 2016, 48: 24 - 35.
- [46] LEFEBVRE H. *Gas Turbine Combustion*[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [47] 刘外丽, 汪军, 李张硕. 进气温度对微型燃机燃烧室污染物排放性能的影响[J]. *能源研究与信息*, 2009, 25(4): 204 - 207.
- [48] 刘聪. 不同进气环境下微型燃气轮机燃烧及污染物排放特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [49] 王福珍, 刘石, 任晓辰, 等. 微燃机富氧燃烧室 NO_x 排放的数值研究[J]. *华东电力*, 2014, 42(2): 406 - 411.
- [50] 汪凤山, 孔文俊, 王宝瑞, 等. 微型燃气轮机燃油燃烧室燃烧特性的模化试验研究[J]. *热能动力工程*, 2010, 25(1): 8 - 11.
- [51] AL-HALBOUNI A, GIESE A, TALI E, et al. Combustor concept for industrial gas turbines with single digit NO_x and CO emission values[J]. *Energy Procedia*, 2017, 120: 134 - 139.
- [52] 汪凤山, 孔文俊, 艾育华, 等. 微型燃气轮机低污染燃烧室 NO_x 排放影响因素的数值分析[C]//中国工程热物理学会燃烧学 2009 年学术会议论文集. 合肥: 中国工程热物理学会, 2009.
- [53] ENAGI I I, AL-ATTAB K A, ZAINAL Z A. Combustion chamber design and performance for micro gas turbine application[J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 166: 258 - 268.