

喷嘴与安装孔之间的缝隙对微型燃气轮机 燃烧室影响的数值分析

刘闯¹, 王玉璋¹, 高慧峰², 翁史烈¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;
2. 上海航天能源股份有限公司, 上海 201201)

摘要:为了探究喷嘴与燃烧室壁面安装孔间的缝隙对微型燃气轮机燃烧室流动及燃烧特性的影响,运用三维数值计算软件,对30 kW微型燃气轮机燃烧室在不同面积缝隙下的燃烧过程进行了数值计算,得到了燃烧室内的流场及温度场,并对比分析了燃烧室各处的气体流量分配、燃烧室内部温度分布以及污染物排放量。计算结果表明:缝隙面积的变化对燃烧室内气量分配的影响是全局性的,随着缝隙面积的增大,缝隙内的气体流量增加,燃烧室其它各处的流量则相应减小。在贫燃的条件下,这一过程使得燃烧室内部的整体温度逐渐减低,随之CO的排放量小幅增大。此外,一定范围内的缝隙能够在降低燃烧室整体温度的同时维持火焰形态,有效降低NO_x的排放量。

关键词:微型燃气轮机;燃烧室;喷嘴;缝隙

中图分类号:TK474.9

文献标志码:A

文章编号:1009-2889(2018)02-0012-05

微型燃气轮机喷嘴是燃烧室的主要部件,在其安装过程中,受燃烧室结构设计、实际安装条件、壁面受热形变等因素的影响,喷嘴与燃烧室壁面安装孔间会形成一定面积的缝隙。在微型燃气轮机机组运行时,一部分压缩空气会通过这些缝隙直接进入燃烧室反应区域,对燃烧过程产生影响。深入了解不同面积的缝隙对燃烧室流动及燃烧特性的影响,有利于提高燃烧室内的燃烧性能,降低污染物的排放,进而优化微型燃气轮机整体机组。

近年来,CFD方法广泛地运用于微型燃气轮机燃烧室的研究。文献[1]利用CFD方法,分析了微型燃气轮机燃烧室头部结构以及空气在各区段的分配比例对燃烧室内燃烧过程的影响。文献[2-4]通过数值计算,得到了微型燃气轮机燃烧室的流场、温度场分布和NO_x排放量。文献[5-8]根据数值计算结果,改进了微型燃气轮机燃烧室结构设计,优化了燃烧室性能。文献[9-12]对不同燃料的微型燃气轮机进行了数值分析,探讨了燃烧室内部不同

燃料对燃烧特性的影响及其原因。

本文利用数值计算的方法,针对燃烧室喷嘴与壁面安装孔间的缝隙,分析了不同面积缝隙下燃烧室内的燃烧过程,对比了燃烧室各处气量分配、温度分布以及污染物排放量的变化,以探究缝隙对微型燃气轮机燃烧室流动及燃烧特性的影响。

1 研究对象

本文分析的对象为30 kW微型燃气轮机的燃烧室,其示意图如图1所示。燃烧室为双层环状结构,根据功能的不同可分为空气通道、燃烧反应区域以及掺混区域三个部分。反应区域位于燃烧室内层,外部由空气通道包裹,下游即通往掺混区域。掺混区域设置有内外两圈掺混孔,大部分压缩空气经由空气通道最终由此进入燃烧室内层。

燃烧室共配置有六组喷嘴,分为前后两排布置在燃烧室内,前排四组,后排两组,每组喷嘴的结构如图2所示。喷嘴沿轴线方向布置有12个燃气孔,

收稿日期:2018-01-01 改稿日期:2018-01-29

项目基金:国家863计划项目(2014AA052803)。

作者简介:刘闯(1988—),男,江西安义人,博士研究生,研究方向为气动热力学,E-mail:hongzhao2009@sjtu.edu.cn。

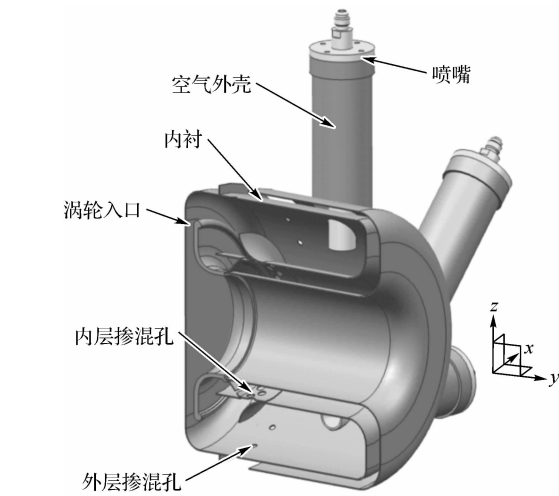


图 1 燃烧室结构示意图

沿切线方向则分布两列共 8 个空气孔，燃气与压缩空气通过各自的孔隙进入喷嘴进行预混。

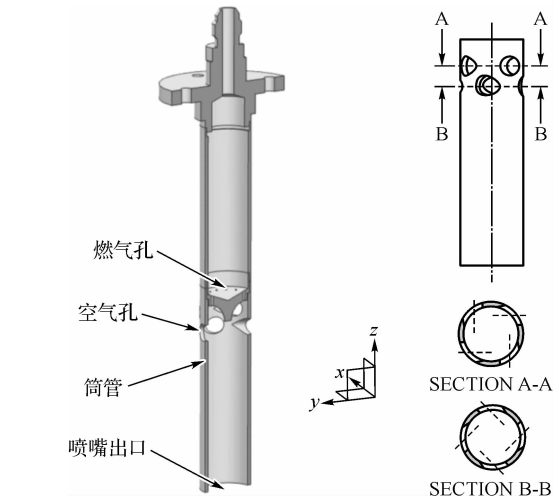


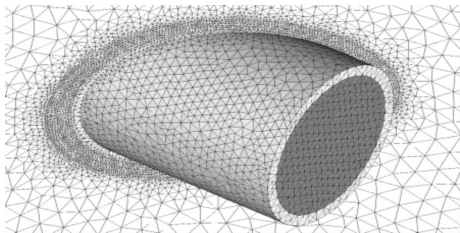
图 2 喷嘴结构示意图

为了探究喷嘴与壁面安装孔间缝隙对燃烧室的影响，分析过程中制作了三套模型，其中安装孔沿轴线的投影直径与喷嘴直径的比例分别为 1、1.06 和 1.16，对应的缝隙面积分别为 0 mm^2 、 79 mm^2 以及 235 mm^2 ，其示意如图 3 所示。

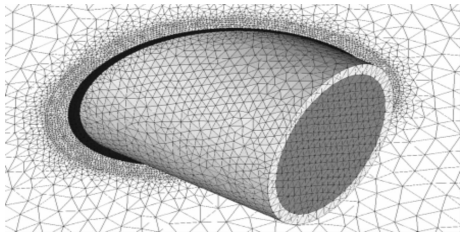
2 计算方法

燃烧室的模型计算运用 ANSYS 软件平台，通过 ICEM CFD 模块对燃烧室三维模型完成网格绘制。计算域采用非结构化网格，并进行网格无关性验证，最终三套模型的网格均生成约 1 173 万网格单元。

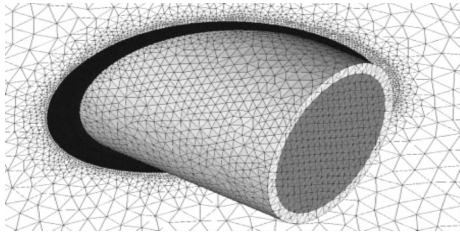
燃烧室模型三维流场的计算在 Fluent 内完成。根据微型燃气轮机实际的运行工况，燃气成分选取甲烷，燃烧反应采用两步反应过程以及 Eddy



(a) 缝隙面积 0 mm^2



(b) 缝隙面积 79 mm^2



(c) 缝隙面积 235 mm^2

图 3 喷嘴与安装孔缝隙示意图

Dissipation Concept 燃烧反应模型，并考虑 NO_x 的生成。计算域空气入口设定流量为 0.558 kg/s ，温度 780 K ；每组喷嘴燃气入口设定流量为 0.00072 kg/s ，温度 300 K 。燃烧室出口设为压力出口，压力值设定为 0.4053 MPa 。计算过程中，以 $k-\epsilon$ 湍流模型计算所得的定常结果为初始条件，采用 Large Eddy Simulation (LES) 湍流模型进行流场数值计算。

3 结果分析

3.1 气量分配

燃烧室通过喷嘴空气孔、掺混孔等孔隙对压气机来流进行合理分配，使燃烧室各处达到最佳的气量配比，而喷嘴与壁面安装孔间的缝隙将影响到气量的分配比率。

图 4 所示为燃烧室内，喷嘴、掺混孔以及缝隙处的气体流量分配比率变化曲线。掺混孔处的气体流量最大，占比超过 60%，其次为喷嘴处，占比在 20% ~ 30% 之间。随着缝隙面积由 0 mm 扩大到 235 mm ，缝隙处的气体流量占比从 0% 增加到 15.7%。相应地，掺混孔处的流量占比由 69.8% 降至 61.5%，喷嘴出口处则由 30.2% 降至 22.8%。对

比曲线的趋势可以发现,缝隙面积的变化不仅影响了临近喷嘴的气体流量,而且改变了掺混孔的流量占比,其对于燃烧室内气量分配的影响是全局性的,同时两者之间大致呈线性关系。

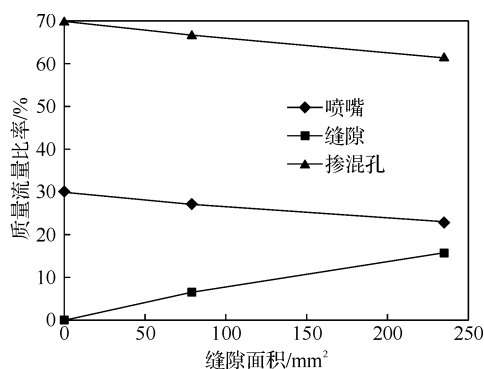


图4 燃烧室各位置气体流量分配比率

3.2 温度分布

喷嘴与燃烧室壁面安装孔间的缝隙大小变化影响到了燃烧室内的气量分配,进而将改变燃烧室内的燃烧特性。而通过温度分布的分析,能够了解到燃烧室内燃烧特性的变化。图5所示为燃烧室轴线平面上的温度分布。由图中可以看出,燃烧室在隔板分隔下被分成了高温区域和掺混区域。高温区域集中在喷嘴出口附近,是燃烧反应充分进行的区域。之后在掺混孔的作用下,掺混气体将高温气体与机组部件分隔开,保护其免受燃烧室内气体高温的影响。

图6所示为燃烧室喷嘴平面上的温度分布。通过喷嘴平面上的温度分布可以观察到喷嘴的火焰形态以及各喷嘴火焰之间的相互作用。高温区域集中在火焰的外焰,而内焰仍保持预混气体的初始温度。火焰在燃烧室环形结构的影响下绕着燃烧室轴线旋转,保证各喷嘴出口处能够维持足够的反应温度。

对比图5、图6中的温度分布可以发现,缝隙面积的变化影响了燃烧室内的燃烧特性。在无缝隙的情况下,燃烧室区域内的最高温度为1 679 K。当缝隙面积增加到79 mm²,燃烧区域的整体温度有明显的减小,最高温度降低到1 565.3 K。根据上节对气量占比分配变化的分析,在这一过程中,缝隙面积的扩大增加了喷嘴出口处的总体流量,降低了火焰温度,同时火焰形态未发生较大变化。当缝隙面积继续增大到235 mm²时,喷嘴处总体流量进一步增大,但区域内的最高温度却升高到1 677.3 K,流量的变化改变了火焰形态,使得燃烧室内整体温度下

降的同时产生了局部高温区,这对于燃烧性能以及污染物排放都是不利的因素。

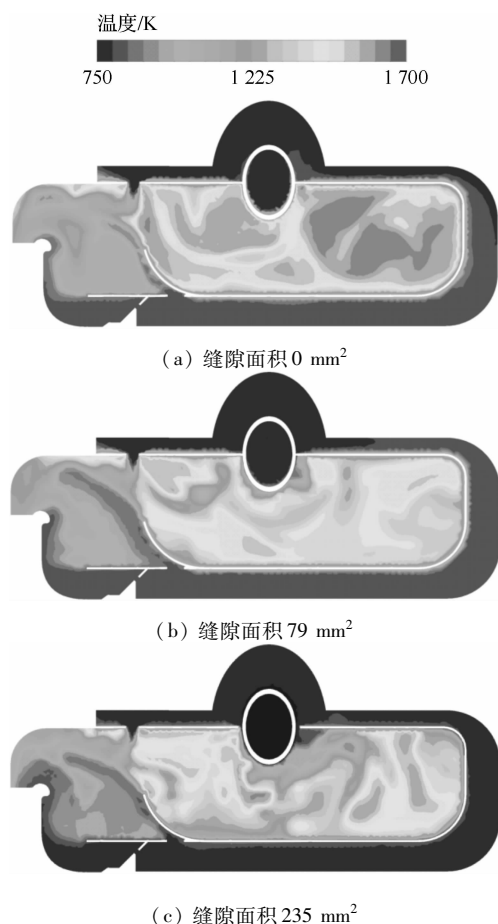


图5 燃烧室轴线平面温度分布

3.3 污染物排放

图7所示为不同缝隙面积下的燃烧室出口污染物排放量。无缝隙时,燃烧室内的整体温度最高,对应的 NO_x 的排放量超过10 000 mL/m³。随着缝隙面积的扩大,燃烧室内的整体温度开始下降, NO_x 的排放量也开始急剧降低,在缝隙面积增至79 mm²时,排放量已降至4.9 mL/m³。而随着燃烧室火焰形态逐渐发生改变,以及局部高温区的增加, NO_x 的排放量开始增加,在缝隙面积为235 mm²时已增至146 mL/m³。对 NO_x 的排放,缝隙的变化存在一个最佳面积,小于和超过都将增加其数值。

不同于 NO_x 的变化规律, CO 的排放量与缝隙面积呈单调变化关系,其数值随缝隙面积增大而增大,由564.2 mL/m³增大到704.5 mL/m³,变化幅度相对于 NO_x 要小得多。

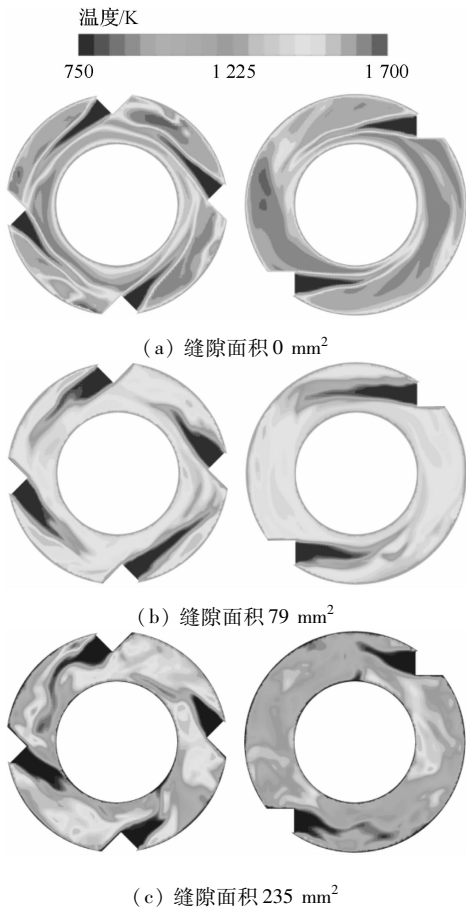


图 6 喷嘴平面温度分布

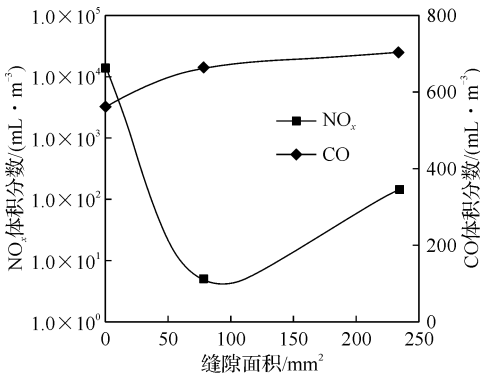


图 7 燃烧室出口污染物排放量

4 结论

综合上述结果分析可以得出,喷嘴与燃烧室壁面安装孔间缝隙的面积变化会改变燃烧室内的气量分配,进而影响燃烧室内的燃烧特性,具体表现为:

(1) 缝隙面积的变化对燃烧室内气量分配的影响是全局性的,随着缝隙面积的增大,喷嘴出口以及掺混孔处的气体流量都相应减小,且大致呈线性关系。

(2) 在贫燃的条件下,一定范围内的缝隙面积扩大,会在不改变燃烧室火焰形态的情况下,降低火焰的整体温度,这有利于降低 NO_x 的排放。而当缝隙面积继续增大时,流量的变化将改变火焰形态,反而不利于提高燃烧室内的燃烧性能以及降低 NO_x 的排放量。

(3) CO 的排放量与缝隙面积呈单调变化关系,其数值随缝隙面积增大而增大,但变化曲线较为平缓,变化幅度较小。

参考文献:

[1] 宗超,朱彤. 某 100kW 微燃机燃烧室结构优化及数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(1): 68-74.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 张文普,丰镇平. 微型燃气轮机燃烧室性能的数值研究[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(2): 26-30.

[5] 陈翔,刘栗,王松涛. 微型燃气轮机燃烧室流场结构及燃烧特性的初步优化[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(25): 76-82.

[6] 王福珍,刘石,贾磊,等. 微型燃气轮机富氧燃烧室优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(2): 300-308.

[7] 张文普,丰镇平. 微型燃气轮机环型燃烧室的设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 150-153.

[8] 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.

[9] CALABRIA R, CHIARIELLO F, MASSOLI P, et al. Numerical study of a micro gas turbine fed by liquid fuels: Potentialities and critical issues[J]. Energy Procedia, 2015, 81: 1131-1142.

[10] SHIH HY, LIU C R. A computational study on the combustion of hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbines [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(27): 15103-15115.

[11] 付忠广,张译中,卢可,等. 合成气微型燃气轮机旋流燃烧特性数值模拟[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 15-20.

[12] 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.

Numerical Analysis on the Effect of Gap between Nozzle and Liner on the Combustor in Micro Gas Turbine

LIU Hongzhao¹, WANG Yuzhang¹, GAO Huifeng², WENG Shilie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Aerospace Energy Co., Ltd., Shanghai 201201, China)

Abstract: In order to explore the effect of gap between nozzle and liner on the flow and combustion characteristics in the combustor of micro gas turbine, the combustion process with various areas of gap was numerical investigated by using three-dimensional numerical calculation software. The flow and combustion fields were obtained and the flow allocation, temperature distribution and emissions were analysed. The results show that the effect of gap is global. With the increase of gap area, the flow allocation of gap rises and the overall temperature in the combustor decreases. In this process, the CO emission increase slightly. With a certain area of gap, the NO_x emission can be reduced effectively.

Key words: micro gas turbine; combustor; nozzle; gap

简 讯

3 项航空派生型燃气轮机国家标准 2017 年开始实施

由全国燃气轮机标准化技术委员会组织制定的 3 项航空派生型燃气轮机国家标准已于 2017 年 5 月发布,并于 2017 年 12 月 1 日开始实施。具体标准介绍如下:

GB/T 33627 – 2017《航空派生型燃气轮机机组箱装体通用技术要求》标准主要起草单位为中国航空综合技术研究所、中国航空规划建设发展有限公司。标准规定了航空派生型燃气轮机机组箱装体的结构、噪声控制、消防灭火、通风系统与空调等通用技术要求。标准适用于发电用航空派生型燃气轮机机组箱装体。机械驱动用航空派生型燃气轮机机组箱装体可参照使用。

GB/T 33631 – 2017《航空派生型燃气轮机成套设备进气系统通用技术要求》标准主要起草单位为中国航空综合技术研究所、中国航空规划建设发展有限公司。标准规定了航空派生型燃气轮机成套设备的进、排气系统中进气过滤装置、消声装置、排气污染控制等通用技术要求。标准适用于发电用航空

派生型燃气轮机动力装置。燃气轮机试车台、压气机试验台、注水泵站、管道增压的航空派生型燃气轮机进、排气系统可参照使用。

GB/T 33632 – 2017《航空派生型燃气轮机成套设备安装通用技术要求》标准主要起草单位为中航世新燃气轮机股份有限公司、中国航空综合技术研究所、株洲南方燃气轮机成套制造安装有限公司。标准规定了航空派生型燃气轮机成套设备的安装要求。标准适用于发电用航空派生型燃气轮机成套设备。机械驱动用航空派生型燃气轮机成套设备也可参照使用。

通过本批标准的实施,可更好地指导航空派生型燃气轮机成套设备的安装和箱装体的生产和安装,规定了进、排气系统的技术要求,填补国内标准体系的空白。

全国燃气轮机标准化技术委员会秘书处

2018 年 5 月 28 日