

当量比对微型燃气轮机 H_2 / Air 燃烧特性的影响

刘红, 曾卓雄, 郭开放

(上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了探究氢气微型燃气轮机的燃烧特性, 用数值模拟方法分析了6种不同当量比工况下的燃烧室内流场特性、压力损失、燃烧效率、 NO_x 排放和速度分布等参数。结果表明: 当量比对回流区的范围影响不大, 压力损失和出口速度随当量比增加逐渐增大, 出口温度分布系数(OTDF)、排气温度和 NO_x 排放随当量比的增加先增大后减小; 径向速度的分布关于燃烧室中心轴线对称; 当量比小于1时, 燃烧效率在99.9%以上; 当量比大于1时, 燃烧效率随当量比增加而降低; 当量比为1时, 排气温度达到2 500 K, NO_x 排放达到最大值, 偏离化学当量比燃烧有利于抑制 NO_x 的生成。

关键词: 微型燃气轮机; 当量比; 燃烧特性; 氢气; 数值模拟

中图分类号: TK47 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.05.010

[引用本文格式] 刘红, 曾卓雄, 郭开放. 当量比对微型燃气轮机 H_2 / Air 燃烧特性的影响[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 72-78. LIU Hong, ZENG Zhuo-xiong, GUO Kai-fang. Effect of equivalence ratio on H_2 / air combustion characteristics of micro gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 72-78.

Effect of Equivalence Ratio on H_2 / Air Combustion Characteristics of Micro Gas Turbine

LIU Hong, ZENG Zhuo-xiong, GUO Kai-fang

(School of Energy and Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090)

Abstract: In order to explore the combustion characteristics of hydrogen micro gas turbine, the parameters of flow field characteristics, pressure loss, combustion efficiency, NO_x emission and velocity distribution of combustion chamber at six different equivalence ratios were analyzed by numerical simulation method. The results show that the equivalence ratio has little effect on the range of recirculation zone, with the increase of equivalence ratio, the pressure loss and outlet velocity gradually increase, the outlet temperature distribution factor(OTDF), exhaust temperature and NO_x emission first increase and then decrease. The radial velocity distribution is symmetrical about the central axis of the combustion chamber. When the equivalence ratio is less than 1, the combustion efficiency is above 99.9%; when the equivalence ratio is greater than 1, the combustion efficiency decreases with the increase of equivalence ratio; when the equivalence ratio is 1, the exhaust temperature reaches 2 500 K, NO_x emission reaches the maximum, deviation from the stoichiometric combustion is beneficial to the inhibition of NO_x formation.

Key words: micro gas turbine, equivalence ratio, combustion characteristics, hydrogen, numerical simulation

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-06-08

基金项目: 上海市科委地方高校能力建设资助项目(19020500900)

Fund-supported Project: Capacity Building Project of Local Colleges and Universities Supported by Shanghai Science and Technology Commission (19020500900)

作者简介: 刘红(1998-), 男, 重庆江津人, 上海电力大学硕士研究生。

通讯作者: 曾卓雄(1972-), 男, 江西新干人, 上海电力大学教授。

引言

微型燃气轮机体积小、污染排放低、安全稳定,是一种先进创新型的动力装置,在电力能源等行业发挥举足轻重的作用。因此,研究微型燃气轮机的燃烧特性具有重要意义^[1-2]。

王中华^[3]以微型燃气轮机环形燃烧室为对象,研究了不同当量比下 $H_2 + CH_4$ /Air 预混火焰的结构特征,发现适当调节当量比能够稳定火焰,增大当量比对增大燃烧强度和燃烧面积有着促进作用。付忠广等人^[4]以 H_2 和 CO 的混合物为可燃气,发现增大主燃区旋流数能使燃料与空气混合充分,扩大回流区的范围。曹常青等人^[5]研究了以富氢合成气为燃料的微型燃气轮机燃烧室,结果表明,该燃烧室压损小、效率高。Li 等人^[6]研究了燃气轮机燃烧室分阶段共燃 $NH_3 + H_2$ 的 NO_x 排放特性,研究发现,与添加 CH_4 相比,燃料中添加 H_2 具有零 CO 排放和反应速率更快的优势,有利于减少 NO_x 的生成。Funke 等人^[7]对以 H_2 为燃料的微型燃气轮机干式低氮燃烧室(DLN)进行了优化设计,优化后燃烧室表现出良好的运行性能、燃烧效率和污染物排放水平。Meziane 等人^[8]研究了天然气与氢气燃料混合比例对微型燃气轮机富油燃烧-猝熄-贫油(RQL)燃烧室燃烧性能的影响,当燃料以恒定质量流量进入时,燃烧室出口温度升高,当燃料以恒定速度进入时,出口温度分布均匀,污染物排放量下降。Roberta^[9]利用计算流体力学(CFD)进行数值模拟,燃料为甲烷和氢气的混合物,结果表明:增加氢气量会使燃烧效率提高,污染物排放降低。Du 等人^[10]实验研究了不同混合燃料对燃烧室效率和排放的影响,结果表明,65% CH_4 、20% H_2 与 15% CO_2 的混合物燃烧会使 CO 和 NO_x 排放大幅降低,在沼气中加入 H_2 可减少污染物排放,说明 H_2 是一种良好的清洁能源。

氢能作为一种清洁、高效与可持续的二次能源,将成为第三次能源变革和实现碳中和的重要媒介。西门子、三菱和 GE 等公司都出台了氢能燃气轮机近期发展规划,氢气的属性、物性、反应速度及反应机理与其他燃料有较大差异,因此以 H_2 为燃料,对当量比分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 和 1.6 的 6 种

工况下的微型燃气轮机燃烧室燃烧特性开展了数值模拟。

1 计算模型及网格划分

1.1 几何模型

某燃气轮机燃烧室采用双级旋流燃烧,模型如图 1 所示。内旋流入口内径为 10 mm,外径为 38 mm;外旋流入口内径为 38 mm,外径为 100 mm;燃烧室总长 505.93 mm;出口高度 108.93 mm。

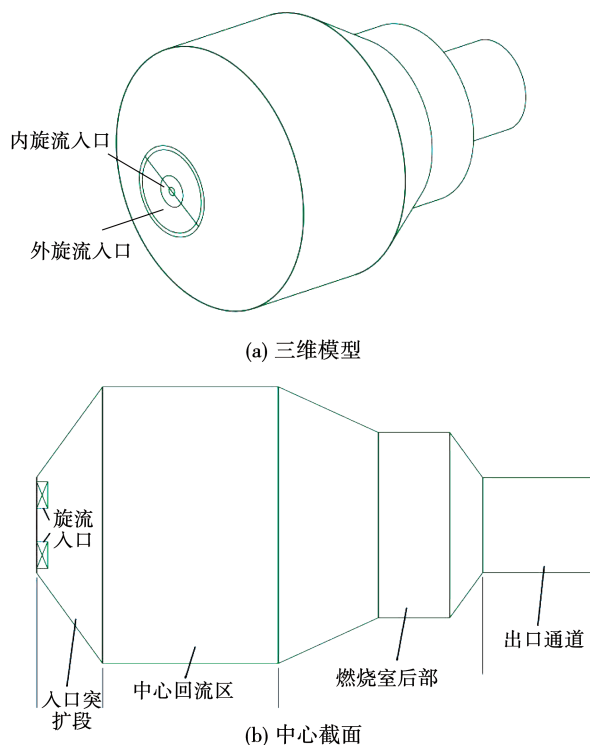


图 1 燃烧室结构图

Fig. 1 Structure diagram of combustion chamber

1.2 计算模型和边界条件

湍流模型采用 Realizable $k - \varepsilon$ 模型,燃料为 H_2 ,采用氢气-空气一步反应,燃烧模型采用通用有限速率模型,湍流与化学反应相互作用模型为涡耗散模型。压力与速度耦合采用 coupled 算法,离散均采用二阶格式。近壁面采用标准壁面函数,侧壁面采用绝热边界条件。燃烧室出口为压力出口,为 101 325 Pa。

1.3 网格无关性及燃烧模型验证

采用六面体结构化网格,为了保证计算结果的准确性,对燃气轮机燃烧室入口处、突扩处以及中心回流区这些流场特性较复杂的区域进行了局部

加密。

为验证网格无关性,共设计了 106 万、131 万和 182 万 3 套网格分别进行计算,比较了 3 种方案在轴向距离 L 为 100 mm 处的径向速度分布,如图 2 所示。由图 2 可知,三者的模拟结果非常接近。为了节省计算资源和时间,采用 106 万网格进行计算。

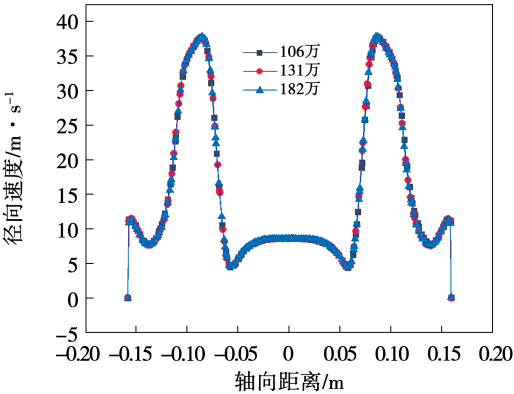


图 2 网格无关性验证
Fig. 2 Grid independence verification

将数值模拟结果与参考文献[11]中的实验结果进行对比,在实验研究中,采用粒子图像测速(PIV)和激光多普勒测速(LDV)技术对带环形旋流器的气缸燃烧室中央回流区的流动速度进行了测量。实验研究的边界条件为入口轴向速度 30 m/s,旋流数(气流旋转的切向动量矩与轴向动量之比)为 1.4,入口温度为 670 K,预混气体当量比为 0.47。图 3 为算例验证。从图 3 可以看出,计算结果与实验值吻合较好,表明所采用的计算方法可行。横坐标和纵坐标分别表示无量纲轴向距离和轴向速度。

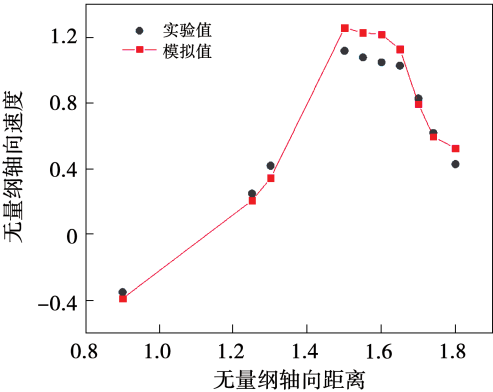


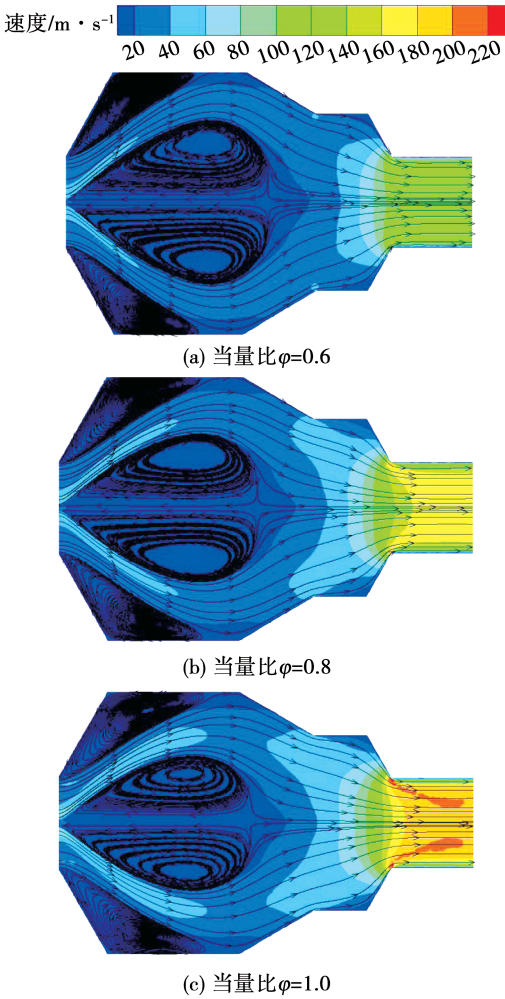
图 3 算例验证
Fig. 3 Example verification

2 结果与分析

双级旋流入口均采用质量流量入口且流量保持不变,内旋流入口流量为 0.02 kg/s,外旋流入口流量为 0.08 kg/s,入口温度为 300 K,内外旋流器叶片角均为 45°,内旋流数为 0.7,外旋流数为 0.73。

2.1 流场特性分析

图 4 为不同当量比下燃烧室的流场分布。由图 4 可知,燃烧室在突扩形成了角回流区。由于旋流作用,在中部也会产生回流区,回流区沿中心轴线对称,回流区的速度比较低,可稳定火焰,增加预混气体的停留时间,有利于燃料完全燃烧,提高燃烧效率。不同的当量比对回流区的范围影响不大。随着当量比的增加,燃烧室的入口速度和出口速度有所增加,这是因为随着当量比增大,入口处的氢气变多,而氢气具有很强的扩散性,燃烧速度很快,气体的流动性增强。



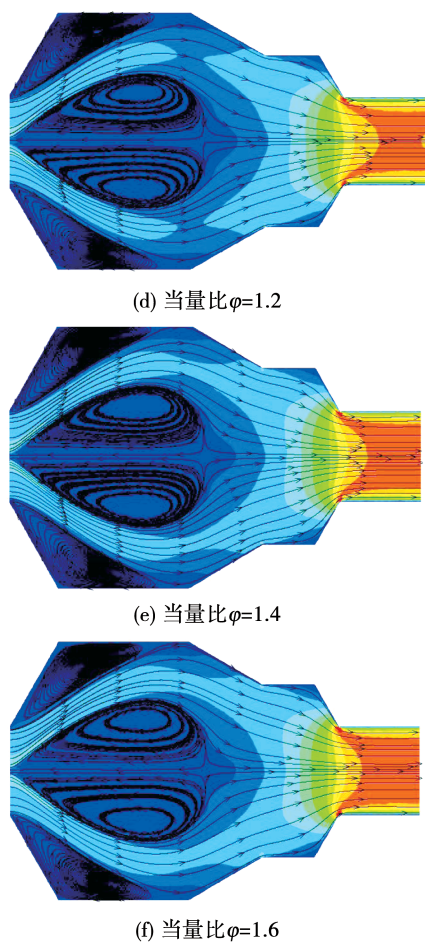


图 4 不同当量比下燃烧室流场分布

Fig.4 Flow field distribution of combustor at different equivalence ratios

2.2 当量比对燃烧特性的影响

图 5 为压损随当量比的变化曲线。气体在燃烧室流动的过程中,受到气体粘性和温度升高的影响,会产生压力损失 ε , 定义为:

$$\varepsilon = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \tag{1}$$

式中: p_{in} —进口压力,Pa; p_{out} —出口压力,Pa。

从图 5 可以看出,压损随当量比的增加而增加。当量比小于 1 时,压损变化较为明显,当量比大于 1 后,增加趋势变缓。这是因为随着当量比增加, H₂ 增多, H₂ 在燃烧室内发生放热反应, 释放的热量多, 温度升高, 气体的粘性增大。从产生的机理来看^[12], 这使得流阻损失和热阻损失都增多, 所以压力损失逐渐增大。当量比大于 1 后, 温度和气体粘性降低, 但是入口速度有所增加, 导致流动阻力继续变大, 压损增加幅度变缓。

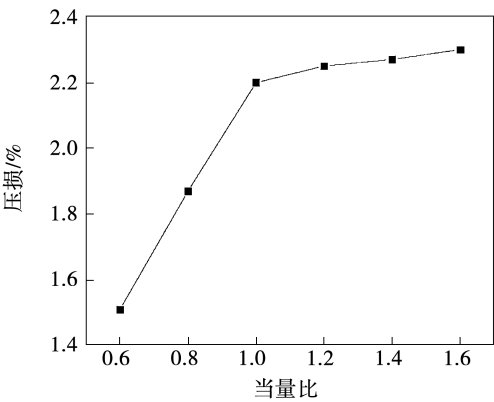


图 5 当量比对压损的影响

Fig.5 Influence of equivalence ratio on pressure loss

图 6 为出口温度分布系数 (OTDF) 随当量比的变化趋势, OTDF 定义为^[13]:

$$OTDF = \frac{T_{max} - T_{out}}{T_{out} - T_{in}} \tag{2}$$

式中: T_{max} —出口温度最大值, K; T_{out} —出口温度平均值, K; T_{in} —进口温度, K。

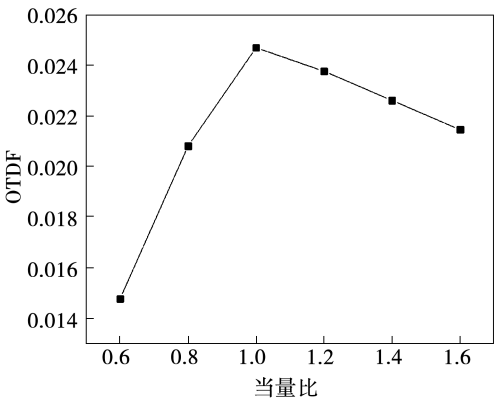


图 6 当量比对 OTDF 的影响

Fig.6 Influence of equivalence ratio on OTDF

从图 6 可以看出, OTDF 随当量比的增加先增大后减小。因为随着当量比增加, 燃空比增大, 预混气体在燃烧室内不容易混合均匀, 会形成局部富氢, 导致出现局部高温, OTDF 增大。继续增加燃料量, 减小空气量, 空气相对燃料量变少, 富氢燃烧的趋势更加明显, 温度分布更加均匀, OTDF 开始降低。较低的出口温度分布系数可提高燃气轮机的使用寿命, 模拟工况下的 OTDF 都在 0.025 以内, 表明出口温度分布较均匀。

图 7 为燃烧效率随当量比的变化趋势。燃烧效率表示为:

$$\eta = \frac{\omega_{\text{H}_2,\text{in}} - \omega_{\text{H}_2,\text{out}}}{\omega_{\text{H}_2,\text{in}}} \tag{3}$$

式中： $\omega_{\text{H}_2,\text{in}}$ —入口处 H_2 质量分数； $\omega_{\text{H}_2,\text{out}}$ —出口处 H_2 质量分数。

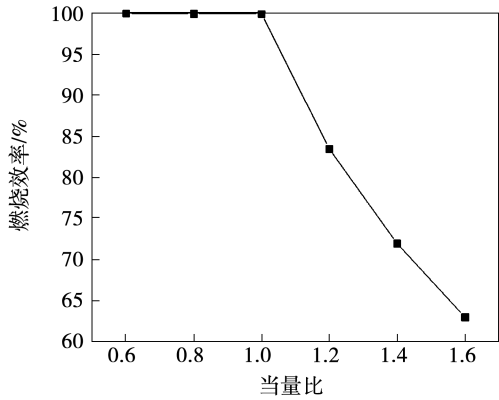


图 7 当量比对燃烧效率的影响

Fig.7 Influence of equivalence ratio on combustion efficiency

由图 7 可知，当量比小于 1 时，属于贫氢燃烧，燃料可以完全燃烧，燃烧效率基本不变，均在 99.9% 以上。当量比大于 1 时，属于富氢燃烧，燃料燃烧不充分，燃烧效率逐渐降低。

图 8 为燃烧室出口排气温度随当量比的变化。由图 8 可知，随着当量比的增加，排气温度先增加后减小。当量比小于 1 时，入口处于贫氢燃烧状态，燃料可以完全燃烧，此时燃料少，空气较多，对壁面起到冷却作用，排气温度在 1 900 K 左右。随着当量比增加，燃烧由贫氢向富氢过渡， H_2 的燃烧温度较高，排气温度有明显的变化，上升到 2 500 K。当量比大于 1 时，入口处于富氢燃烧状态，预混空气不能满足燃料完全燃烧需求，燃烧效率降低，排气温度降低。

图 9 为燃气轮机出口 NO 排放随当量比的变化。燃烧室内温度高，可达 2 000 K 以上，产生的污染物主要是热力型 NO_x 。由 NO_x 的产生机理可知^[14]，温度和氧化性氛围是影响热力型 NO_x 生成的主要因素，而温度又占主导地位，当温度大于 1 500 K 时，每增加 100 K，反应速率呈指数增长。当量比小于 1 时，燃烧区温度随当量比增加而增大，所以 NO 排放增加。当量比等于 1 时，燃烧温度最高，NO 排放达到最大值，出口处摩尔分数为 5.2×10^{-4} 。当量比大于 1 时，燃烧温度降低， H_2 量多，处

于还原性氛围，NO 排放减小。当量比为 0.6 和 1.6 时，NO 排放较少，说明偏离化学当量比燃烧有利于抑制 NO_x 的生成^[15]。

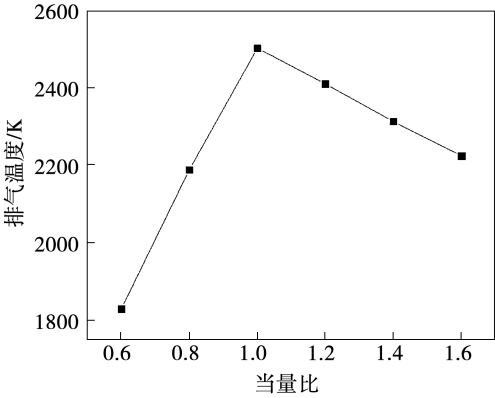


图 8 当量比对排气温度的影响

Fig.8 Influence of equivalence ratio on exhaust temperature

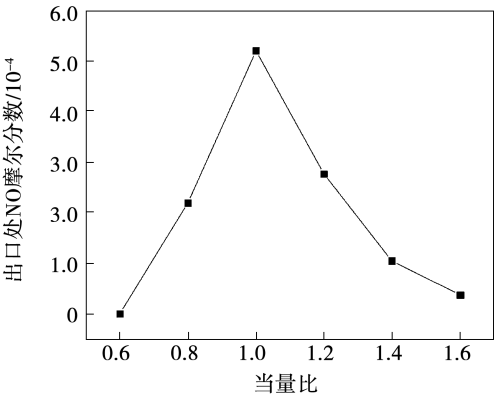


图 9 当量比对出口处 NO 排放的影响

Fig.9 Influence of equivalence ratio on outlet NO emission

2.3 当量比对速度分布的影响

图 10 为不同当量比下不同位置处燃烧室的径向速度分布。图 10(a)，(b) 和 (c) 分别表示不同当量比下轴向距离 L 为 100, 150 和 200 mm 处的径向速度分布。可以看出速度的分布关于燃烧器中心轴线对称，两个峰值处的速度随当量比的增加而增大，两个速度最大值之间的距离随着轴向距离的增加而增加，且峰值之间的速度较低。图 10(c) 靠近中心处有两个波峰，此处位于回流区后部，逆向压力梯度大，射流在流动中受到阻力，扰动增强，速度有明显的波动，加强了燃料与空气的混合。通过对比可以看出，同一位置处的径向速度随着 L 增大略有降低。图 10(d) 为出口处的径向速度分布，当量比大于 1 时，出口速度达到 200 m/s 以上。

图 11 为中心轴线处不同当量比下的轴向速度分布。当 $L=0 \sim 250$ mm 时,随着当量比的增大,速度分布的变化趋势相同,速度较低且为负值,这说明当量比对回流区的速度分布和范围影响不大,回流区有利于稳定燃烧。当 $L>250$ mm 时,由于燃烧器渐缩结构的作用和燃烧热量的释放,导致轴向速度逐渐上升。当量比小于 1 时,随着当量比增加,出口处速度增加,除了因为 H_2 量增多、扩散速度快之外, H_2 能够完全燃烧,燃烧温度和释放的热量都增加,也会导致速度增加得快。当量比大于 1 时,随着当量比增加,速度增加的斜率几乎相同,出口速度略有增加。

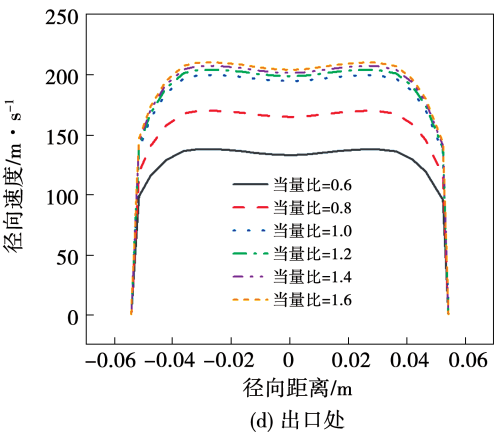
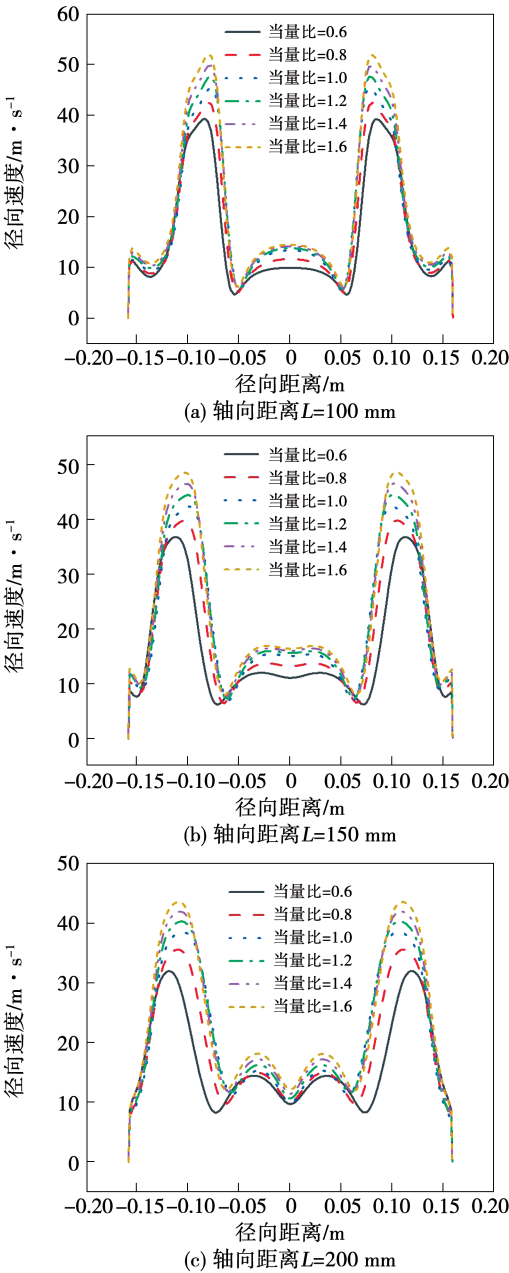


图 10 不同当量比下不同位置处的径向速度分布
Fig. 10 Radial velocity distribution at different positions at different equivalence ratios

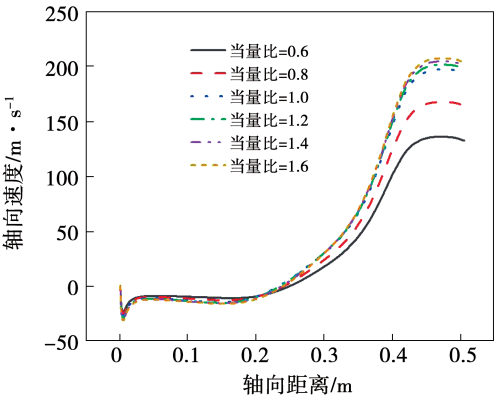


图 11 中心轴线处不同当量比下的轴向速度分布
Fig. 11 Axial velocity distribution at central axis at different equivalence ratios

3 结 论

对某微型燃气轮机燃烧室开展了数值模拟,研究了当量比的变化对燃烧室流场和燃烧性能的影响,结论如下:

- (1) 不同的当量比对回流区的大小和速度分布影响不大,回流区沿中心轴线对称分布,随着当量比的增加,燃烧室的入口速度和出口速度有所增加。
- (2) 随着当量比的增加,压力损失逐渐增大,当量比小于 1 时,燃烧效率在 99.9% 以上,当量比大于 1 时,效率随当量比增加而降低。
- (3) OTDF、排气温度和 NO_x 排放都随当量比的增加先增大后减小,模拟工况下的 OTDF 都在 0.025 以内,出口温度分布较均匀。当量比为 1 时,排气温

度达到 2 500 K,NO_x排放达到最大值,偏离化学当量比燃烧有利于抑制 NO_x的生成。

(4) 径向速度的分布关于燃烧器中心轴线对称,两个峰值处的速度随当量比的增加而增大,两个速度最大值之间的距离随着轴向距离的增加而增大。当 $L=0\sim250\text{ mm}$ 时,随着当量比的增大,中心轴线处轴向速度分布基本相同。当 $L>250\text{ mm}$ 时,轴向速度逐渐上升。

参考文献:

[1] 谢哲. 现阶段我国微型燃气轮机发展与应用推广[J]. 科技与创新,2018(8):160-161.
XIE Zhe. Development and application of micro gas turbine in China[J]. Technology and innovation,2018(8):160-161.

[2] 邱德川. 关于微型燃气轮机应用前景的研究[J]. 科技致富向导,2014(11):227.
QIU De-chuan. Research on application prospect of micro gas turbine[J]. Guide of Sci-tech Magazine,2014(11):227.

[3] 王中华. 基于 OH-PLIF 技术的微型燃气轮机环形燃烧室混合气燃烧特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
WANG Zhong-hua. Study on mixture combustion characteristics of micro gas turbine annular combustor based on OH-PLIF Technology[D]. Chongqing:Chongqing University,2019.

[4] 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.
FU Zhong-guang,ZHANG Yi-zhong,LU Ke,et al. Numerical simulation of swirling combustion characteristics of syngas micro turbine[J]. Thermal Power Generation,2015,44(3):15-20.

[5] 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.
CAO Chang-qing,FU Zhong-guang,LU Ke. Optimization design and numerical simulation of syngas micro turbine combustor[J]. China Electric Power,2014,47(2):100-105.

[6] LI Zhao-xing,LI Su-hui. Kinetics modeling of NO_x emissions characteristics of a NH₃/H₂ fueled gas turbine combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2020,46(5):4526-4537.

[7] FUNKE H W,BECKMANN N,ABANTERIBA S. An overview on dry low NO_x micromix combustor development for hydrogen-rich gas turbine applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2019,44(13):6978-6990.

[8] MEZIANE S,BENTEBBICHE A. Numerical study of blended fuel natural gas-hydrogen combustion in rich/quench/lean combustor of a micro gas turbine[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2019,44(29):15610-15621.

[9] ROBERTA D R. Innovative combustion analysis of a micro-gas turbine burner supplied with hydrogen-natural gas mixtures[J]. Energy Procedia,2017,126:858-866.

[10] TOIT M D,ENGELBRECHT N,OELOFSE S P,et al. Performance evaluation and emissions reduction of a micro gas turbine via the co-combustion of H₂/CH₄/CO₂ fuel blends[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments,2020,39:100718.

[11] ORBAY R C,NOGENMYR K J,KLINGMANN J,et al. Swirling turbulent flows in a combustion chamber with and without heat release[J]. Fuel,2013,104:133-146.

[12] 刘杰才. 双级旋流器结构对燃烧室燃烧性能影响规律研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
LIU Jie-cai. Study on the influence of two-stage cyclone structure on combustion performance of combustor[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2016.

[13] 林宇震,许全宏,刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
LIN Yu-zhen,XU Quan-hong,LIU Gao-en. Gas turbine combustion chamber[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2008.

[14] 徐通模. 燃烧学[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
XU Tong-mo. Combustion[M]. Beijing:China Machine Press,2011.

[15] 李红键. 氢气燃烧低 NO_x 排放特性及数值模拟[D]. 浙江:浙江大学,2006.
LI Hong-jian. Low NO_x emission characteristics and numerical simulation of hydrogen combustion[D]. Zhejiang:Zhejiang University,2006.

(刘颖 编辑)