

可控涡结构的三维湍流燃烧特性的数值分析

曾卓雄¹ 郭帅帅¹ 陈超杰² 魏佳加²

(1. 上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090; 2. 南昌航空大学 飞行器工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要:可控涡扩压器因具有较高的压力恢复及较低的压力损失而得到重视,为了获得其较好的燃烧性能,采用有限速率模型及引气口流量出口条件对可控涡结构的燃烧特性进行了数值模拟,并和无引气的常规突扩结构的燃烧流场进行了比较。结果表明:可控涡结构的引入能够减小燃烧室回流区长度,有利于突扩燃烧室组织燃烧,扩大燃烧通道中的燃烧区域,并使出口截面温度沿径向分布更加均匀以及燃烧效率得到较大提高,其性能比无引气的常规突扩结构更好。

关键词:可控涡扩压器;数值模拟;燃烧特性

中图分类号:TK16 文献标识码:A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.06.007

引言

由于从主流路流出的引气可提供高压恢复和低压损失,可控涡扩压器有望在未来的发动机燃烧室中推广使用^[1];国内外对扩压器和引气射流方面已有众多研究^[2~8];黄知龙等实验研究表明具有附面层抽气功能的扩压器能够缩短其有效扩压长度^[6],并有效提高静压恢复;Nicholas等研究表明增大抽吸强度能够增大剪切层的变形^[7],并使回流强度增大;Chakrabarti等数值分析了雷诺数、突扩比和引气量对低雷诺数下可控涡扩压器扩压效率和滞止压力的影响^[8];曾卓雄等比较了可控涡扩压器燃烧器不同开口方式(轴向开口,径向开口以及它们的组合开口)及尺寸对冷态流场的影响^[9],发现引气开口尺寸 $\Delta x = 0.002\text{ m}$, $\Delta y = 0\text{ m}$ 时的综合扩压性能最好;另外,曾卓雄等研究了可控涡扩压器轴向引气口位置及进口条件变化对冷态流场的影响^[10],结果表明从提高扩压效率的角度考虑,在选取开口位置时应取突扩喉部。

国内外对可控涡扩压燃烧器的研究报道很少,而且对于其热态流场缺乏研究。因此,本研究通过比较常规突扩结构及可控涡结构对热态流场的影响,改变不同的进口条件对可控涡扩压器内的燃烧流场进行研究,分析其流场变化。

1 模型及边界条件

可控涡扩压器中心截面的几何结构如图1所示:进口小圆柱的结构尺寸为 $\Phi 0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$;主燃烧室大圆柱的结构尺寸为 $\Phi 0.2\text{ m} \times 1.1\text{ m}$;喉部引气开口尺寸 $\Delta x = 0.002\text{ m}$, $\Delta y = 0\text{ m}$ 。当 $\Delta x = \Delta y = 0\text{ m}$ 时为常规突扩结构(无引气结构), xyz 坐标原点在进口截面中心。 x 方向为流动方向; y 方向在竖直平面内垂直于 x 方向;其单位皆为 m 。

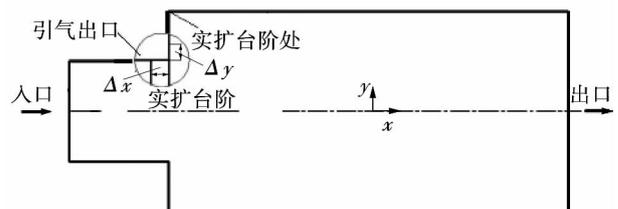


图1 可控涡扩压器中心截面几何图

Fig. 1 Central section diagram of vortex controlled diffuser

采用粘性定常不可压缩的 Navier - Stokes 方程,湍流模型为可实现的 $k - \varepsilon$ 两方程模型。进口为速度入口条件;引气口采用流量出口条件^[13];出口为完全发展的边界条件;壁面边界采取无滑移条件;壁面温度恒定;反应模型为通用有限速率模型。进行了网格无关性验证,计算结果与网格数无关。

收稿日期: 2015-09-09; 修订日期: 2015-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51066006, 51266013); 航空科学基金资助项目(2013ZB56004)

作者简介: 曾卓雄(1972-),男,江西新干人,上海电力学院教授。

2 数值结果与分析

为验证本文数值模拟的合理性,对比了无引气的圆管突扩流动的计算结果与 Durrett 的实验结果^[11],由图 2 可见,速度 U 分布及湍动能 K 的分布和实验结果吻合较好。

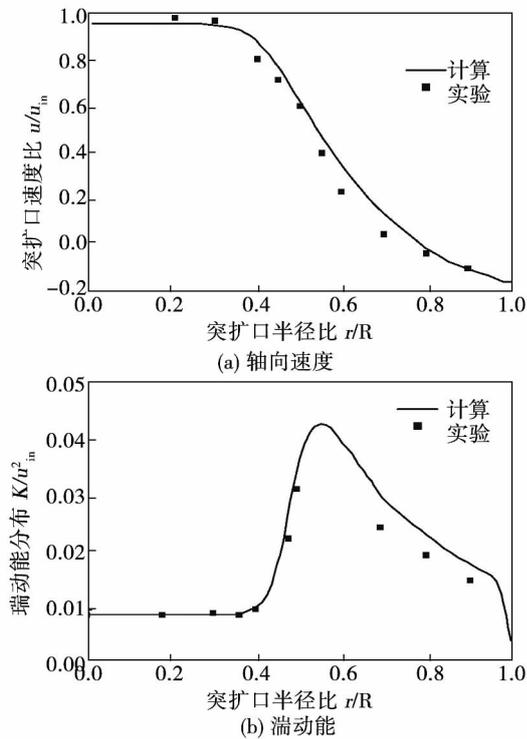


图 2 计算和实验的对比

Fig.2 Comparison of calculation and experiment results

入口速度 20 m/s,入口温度 300 K,图 3 ~ 图 6 中的(i) (ii) 分别表示常规突扩结构及可控涡结构的结果。

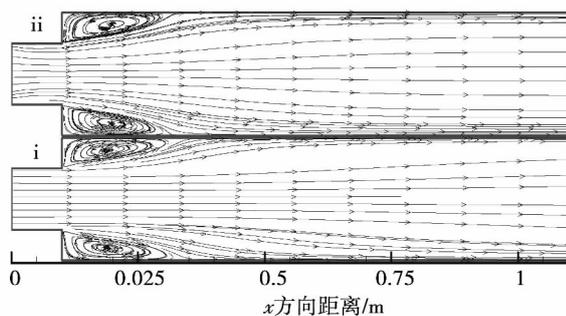


图 3 热态流场

Fig.3 Flow field in combustion state

2.1 可控涡结构对燃烧通道速度场的影响

入口速度 20 m/s,入口温度 300 K,甲烷和空气充分预混燃烧,由图 3(i) (常规突扩结构)可知,回流区长度和漩涡中心距突扩台阶壁面的距离分别约为 0.34 和 0.19 m,而在冷态情况下如图 4(i)所示,回流区长度和漩涡中心距突扩台阶壁面的距离分别约为 0.49 和 0.25 m,两者相比有明显的差异,可见燃烧对于燃烧通道内的流场分布有很大影响。

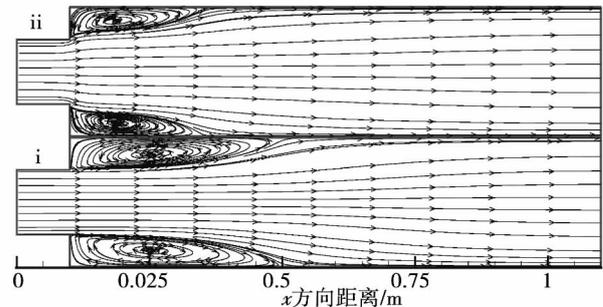


图 4 冷态流场

Fig.4 Flow field in cold state

2.2 可控涡结构对燃烧通道温度场的影响

由图 5(i)可知,混合气体进入扩散段后,在突扩台阶后部某处回流区与主流的结合边界上温度明显升高,这表明甲烷与空气发生了燃烧反应。这是由于流通通道的扩大,使得主流边界附近混合气体的流速有了明显的降低,且主流与回流相互之间的能量交换比较激烈,给稳定点火提供了条件。之后燃烧区域迅速向壁面扩张,直至充满突扩台阶后部的管道。而在靠近中心轴线区域,由于可燃预混气体温度较低,流速较高,对火焰产生了吹熄作用,故无法实现稳定燃烧,温度也较低。但随着气流向下游流动,流体间不断掺混及高温燃烧区域的辐射作用使轴线附近的气流温度不断上升,扩压器横截面沿径向的温度梯度逐渐减小。另外,在突扩台阶后部的回流区域,虽然温度较高,气流流速较低,但未发生燃烧反应,这是由于燃烧反应发生于回流与主流之交界面处,大部分燃烧生成物被卷吸到回流区,而预混气体与回流之间因为有燃烧区的隔离无法或只有少量的进入回流区。

由图 5(ii)可知,可控涡结构的引入使燃烧通道内温度分布发生了较大的变化。入口段,温度沿径向的分布产生了梯度,着火点由扩散段前移至入口

处两侧壁面附近,这是由于引气吸除了附面层,并干扰了近壁处主流沿轴向的流动。另外,引气使引气口附近区域形成了负压区,引气下游的主流因为负压梯度的存在,流通道稍有增大,主流边界的流速减缓,提供了有利于燃烧的较为稳定的流场环境,着火点前移。入口段近壁区域混合气的燃烧使该区域气体分子动能增大,气体迅速膨胀,使得有效流通通道在入口段出现了紧缩。

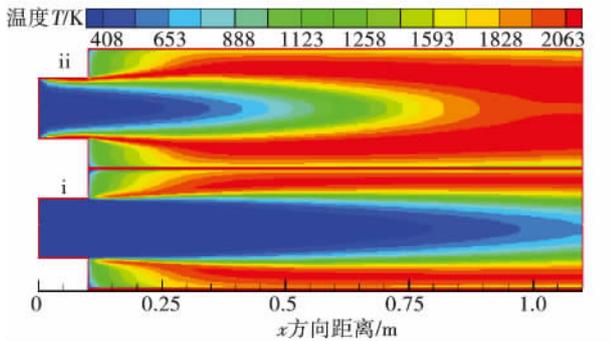


图 5 不同可控涡结构下 $Z = 0$ m 截面温度分布
Fig. 5 Temperature distribution in $Z = 0$ m section at different VCD structure

在扩压段,具有可控涡结构的燃烧通道的高温区明显比常规突扩结构的大,在 $x = 0.9$ m 之后,轴线两侧的高温区域连通在一起充满整个通道。这是由于着火点前移至入口段,对主流进行了预加热,增大了主流内部混合气体分子之间的热交换,宏观上反映为气体粘性的增加,有利于气流流速的降低;另一方面,引气有利于通道内主流气体的减速增压。

2.3 可控涡结构对组分浓度分布的影响

图 6a ~ 图 6d 分别为燃烧通道内甲烷、氧气、二氧化碳及水的质量分数分布图。由图可以看出,甲烷及氧气等反应物主要分布在燃烧通道的低温区,而二氧化碳及水等生成物则主要分布在高温区;反应物和生成物在燃烧通道内的分布大体相似,这是因为在入口段预混气体混合的比较充分,各组分浓度分布与温度分布也基本对应。另外从图 6c 和图 6d 生成物的浓度分布来看,在常规突扩结构的燃烧通道中心轴线附近,二氧化碳和水的浓度较小,这表明在该区域未发生燃烧反应,而沿轴向方向浓度稍有增加,这是由于中心轴线附近气流与燃烧区域气流相互掺混使部分生成物被带到该区域。在具有可

控涡结构的燃烧通道的中心轴线附近,生成物浓度沿轴线变化较大,则是由于虽然发生了燃烧反应,但燃烧还不充分。可控涡结构的引入使得通道中的高温区域(即燃烧区)增大了许多,能够改善燃烧所需环境,有利于提高燃烧效率。

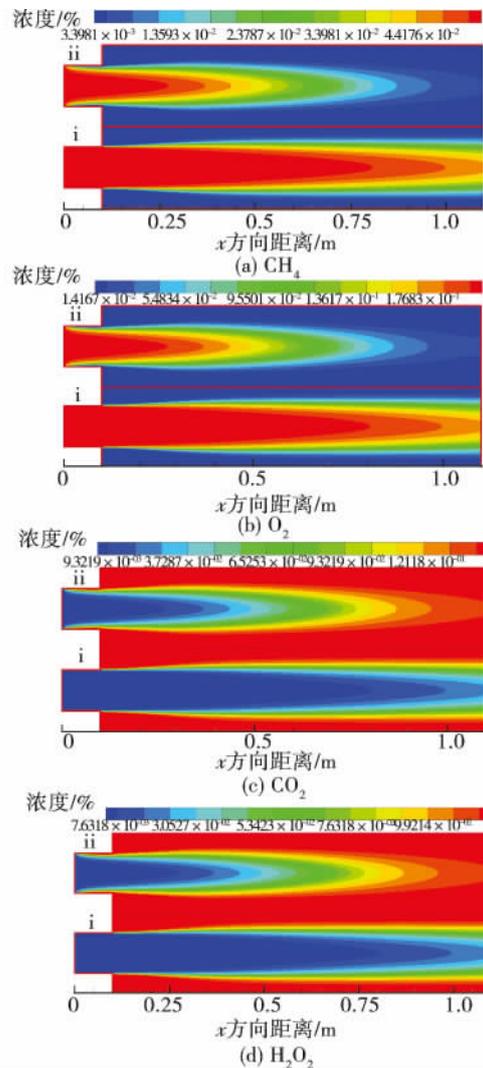


图 6 不同可控涡结构下质量浓度分布
Fig. 6 Mass fraction distribution at different VCD structure

2.4 可控涡结构对燃烧通道出口径向温度的影响

由图 7 可知,对于常规突扩结构而言,近壁面由于温度较低,热辐射作用较强,温度梯度较大,温度值较低,而中心轴线区域由于未发生燃烧反应,温度值也较低。

另外,由图还可看出,可控涡结构的引入增大了混合气体燃烧区域,使燃烧通道出口截面径向温度最高值增大,最高值位置向中心轴线方向移动,且出

口的温度分布也更加均匀; 另一方面, 燃烧区域的增大有利于燃烧效率的提高。

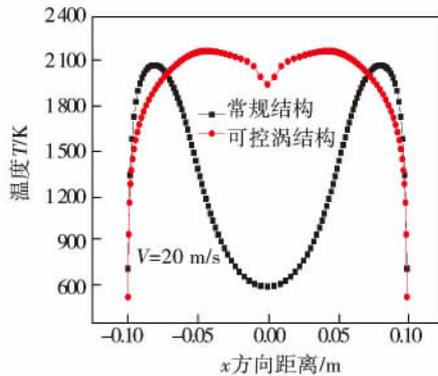


图 7 不同可控涡结构下出口径向温度分布
Fig. 7 Outlet radial temperature distribution at different VCD structure

2.5 进口条件对可控涡式燃烧通道的影响

2.5.1 不同入口速度对燃烧室性能的影响

图 8(i) (ii) (iii) 分别为入口速度 10、15 和 20 m/s 情况下燃烧室 $Z=0$ m 截面温度分布。由图可知, 随着入口速度的增加, 中心轴线附近火焰前锋位置向燃烧室下游移动, 火焰长度增大, 这是由于随着预混可燃气体速度增大, 混合气的流速降到与火焰传播速度相等时所需扩散段的长度增加, 火焰为保持稳定, 向混合气速度较低的下游移动。在回流区, 随着混合气流速的增大, 由于回流区长度稍有减小, 壁面对高温回流的耗散作用减小, 且回流强度的增大, 对高温燃烧产物卷吸作用增强, 一方面使高温区域前移; 另一方面使靠近突扩台阶壁面的温度梯度增大。在扩散段的近壁处, 随着入口混合气流速的增大, 高温区域向壁面拓展。近壁处温度梯度增大, 其原因在于流速的增高减小了近壁处气体分子间的粘度, 附面层变薄, 更有利于温度的扩散。

图 9 为不同速度下燃烧室出口截面的径向温度分布。由图可知, 随着入口速度的增大, 出口径向最高温度值点向壁面两侧移动, 近壁处的温度梯度增大, 同时, 高温区域增大, 最高温度值点两侧温度分布趋于均匀, 但出口温度分布随入口速度整体变化不明显。

2.5.2 过剩空气系数(实际供给空气量与理论完全燃烧所需最少空气量的比值)对燃烧室性能的影响

图 10 为不同剩余空气系数 α 燃烧室温度分布

图((i)、(ii)、(iii))中剩余空气系数分别为 0.8、1 和 1.2)。由图可知, $\alpha = 0.8$ 富油燃烧(图 10(i))时, 燃烧通道内高温区域比完全燃烧 $\alpha = 1$ (图 10(ii))时的小, 比贫油燃烧 $\alpha = 1.2$ (图 10(iii))时的大。因为富油燃烧实际氧气供给小于理论完全燃烧所需量, 只有部分燃料发生完全反应, 部分则发生了不完全反应, 根据链锁反应机理, 不完全反应时也要释放热量, 但比完全反应要少。而贫油燃烧时, 混合气中燃料较少, 氧气充足, 燃料能够发生完全反应, 但不参加反应的剩余空气对热量的吸收耗损使燃烧室内整体温度较其他情况下的低。

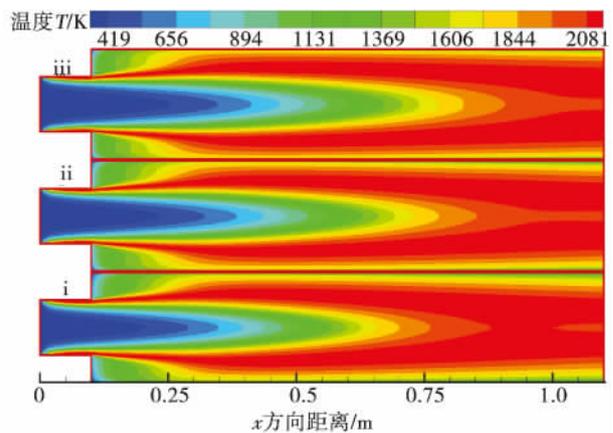


图 8 不同进口速度下 $Z=0$ m 截面温度分布
Fig. 8 Temperature distribution at different inlet velocity in $Z=0$ m section

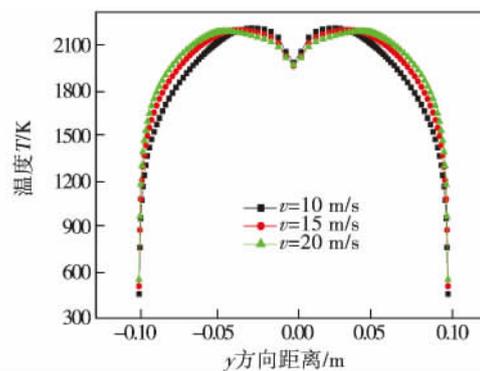


图 9 不同进口速度下出口径向温度分布
Fig. 9 Outlet radial temperature distribution at different inlet velocity

图 11 为不同剩余空气系数下中心轴线水的质量分数分布, $\alpha = 0.8$ 时中心轴线任一位置水质量分数浓度较 $\alpha = 1$ 的稍低, 但相差不大; 另外, $\alpha = 1.2$ 时, 由于燃料减少, 生成的水较少, 中心轴线相

同位置的水质量分数浓度较其他情况的小。

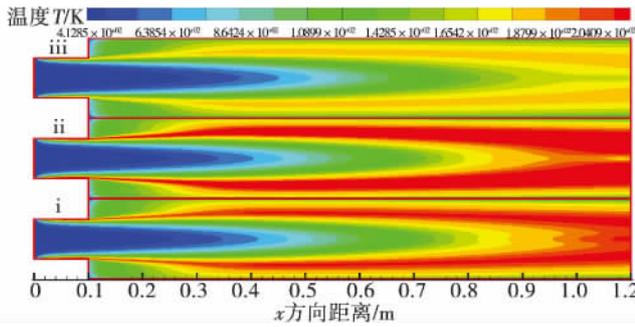


图 10 不同空气系数下 Z = 0 m 截面温度分布
Fig. 10 Temperature distribution in Z = 0 m section at different air ratio

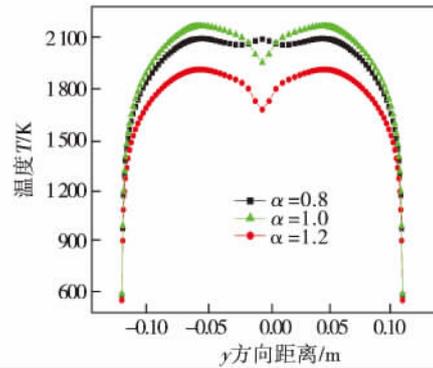


图 12 不同空气系数下出口径向温度分布
Fig. 12 Outlet radial temperature distribution at different air ratio

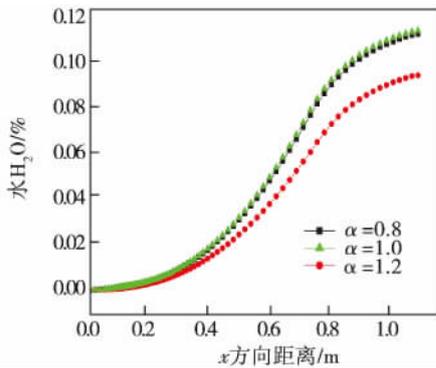


图 11 不同空气系数下中心线 H₂O 质量浓度分布
Fig. 11 H₂O mass fraction distribution in centerline at different air ratio

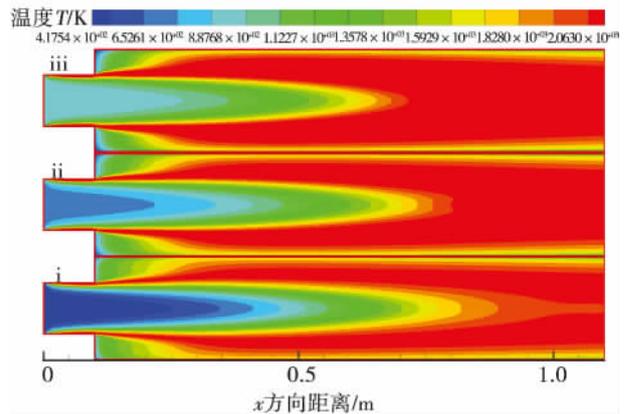


图 13 不同入口温度下 Z = 0 m 截面温度分布
Fig. 13 Temperature distribution in Z = 0 m section at different inlet temperature

图 12 为燃烧通道出口径向温度分布。由图可知, $\alpha = 0.8$ 和 $\alpha = 1$ 时的出口温度明显比 $\alpha = 1.2$ 时的高。另外, $\alpha = 0.8$ 时, 曲线在 $y = 0$ m 附近向上凸出, 温度产生一峰值, 这是因为当 $\alpha = 0.8$ 时, 发生富油燃烧, 中心轴线附近燃料不完全反应产生较多的中间产物, 在出口处由于温度较高, 且有新鲜空气回流到燃烧通道内, 中间产物继续与氧反应, 使温度进一步升高。

2.5.3 不同入口温度对燃烧室性能的影响

图 13 为不同入口温度下, 燃烧室 Z = 0 m 截面温度分布(图(i)、(ii)、(iii))中入口温度分别为 300、600 和 800 K)。由图可知, 随着温度的增高, 燃烧室高温区域面积增大(一方面燃烧通道内燃烧反应更加彻底, 另一方面火焰长度减小), 中心轴线处着火点前移。这是由于随着入口温度的升高, 混合气体中活化分子的数目增多, 改善了燃烧条件, 使较高流速下的混合气能发生燃烧反应。

图 14 为中心轴线水的质量分数分布, 随着温度的增高, 曲线斜率越大, 说明燃烧反应程度增大。图 15 为出口截面径向温度分布, 随着温度增加, 出口最高温度值增加, 但在近壁区域相差不大。

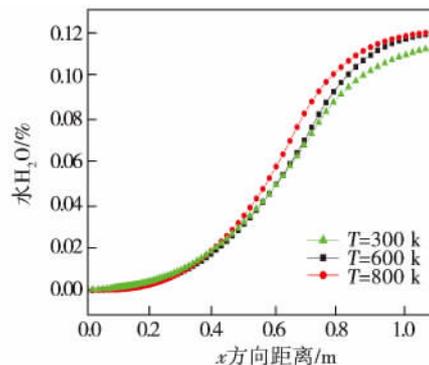


图 14 不同入口温度下中心线 H₂O 质量浓度分布
Fig. 14 H₂O mass fraction distribution in centerline at different inlet temperature

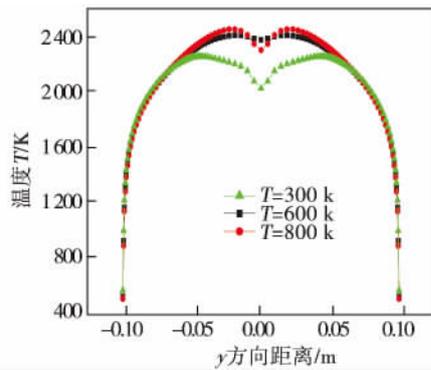


图15 不同入口温度下出口径向分布

Fig. 15 Outlet radial temperature distribution at different inlet temperature

3 结论

本文对具有可控涡式的燃烧室的燃烧性能做了分析,结论如下:

(1) 可控涡结构的引入能够减小燃烧室回流区长度;

(2) 可控涡结构燃烧通道的点火位置前移至入口段,燃烧区域增大,在 $x = 0.9$ m 后燃烧区域充满整个通道截面,燃烧效率得到较大提高;

(3) 由于燃烧反应,可控涡结构燃烧通道中心轴线附近的出口温度得到了较大的提高,出口温度沿径向分布也更加均匀,同时温度最高值增大,最高值所处的径向位置向中心轴线处靠近;

(4) 入口速度对可控涡式燃烧室燃烧性能总体影响不大;过剩空气系数对燃烧室内部和出口径向的温度有较大影响,贫油燃烧时整体温度较低,富油时其次,完全反应时最高。入口温度对燃烧室性能也有较大影响,随着温度的增高,燃烧程度增大,燃烧室内整体温度和出口径向温度升高。

参考文献:

- [1] 徐旭常,周力行. 燃烧技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
XU Xu-chang, ZHOU Li-xing. Combustion technical manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [2] Mandal D K, Manna N K, Bandyopadhyay S, et al. A numerical study on the performance of a sudden expansion with multisteps as a diffuser[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2011, 3(4): 779-802.
- [3] Chakrabarti S, Rao S, Mandal D K. Numerical simulation of the

performance of a sudden expansion with fence viewed as a diffuser in low Reynolds number regime[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(11): 1-4.

- [4] 徐永国,付金波,李秀香,等. 突扩流道内单相流动的数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2010, 52(3): 205-207.
XU Yong-guo, FU Jin-bo, LI Xiu-xiang, et al. Numerical simulation on the flow in a sudden pipe expansion[J]. Turbine Technology, 2010, 52(3): 205-207.
- [5] 程勇,汪军. 侧壁射流对突扩通道流动特性的影响[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(3): 202-206.
CHENG Yong, WANG Jun. Effect of side-wall jet on the flow in a sudden-expansion channel[J]. Journal of University of Shanghai Science and Technology, 2004, 26(3): 202-206.
- [6] 黄知龙,廖达雄,张国彪. 附面层抽气扩压器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 725-727.
HUAHUANG Zhi-long, LIAO Da-xiong, ZHANG Guo-biao. Test research on performance of the boundary scoop pumping diffuser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 725-727.
- [7] Nicholas C O, Frank T S. Vortices and flow reversal due to suction slots[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society (A), 2005, 363(1830): 1199-1208.
- [8] Chakrabarti S, Ray S, Sarkar A. Numerical simulation of the performance of a vortex controlled diffuser in low Reynolds number regime[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2002, 12(3): 224-240.
- [9] 曾卓雄,陈超杰,徐义华. 结构参数优化对可控涡扩压器性能的影响分析[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 742-748.
ZENG Zhuo-xiong, CHEN Chao-jie, XU Yi-hua. Influence of structure parameters optimization on the vortex controlled diffuser flow field[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(6): 742-748.
- [10] 曾卓雄,陈超杰,徐义华. 轴向引气口位置及进口条件对可控涡扩压器流场的影响分析[J]. 应用力学学报, 2014, 31(3): 478-482.
ZENG Zhuo-xiong, CHEN Chao-jie, XU Yi-hua. Influence of axial bleed slot and inlet conditions on the vortex controlled diffuser flow field[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(3): 478-482.
- [11] Durrett R P, Stevenson W H, Thompson H D. Radial axial turbulent flow measurements with an LDV in an axisymmetric sudden expansion flow[J]. Journal of Fluids Engineering, 1988, 110(12): 367-372.

(陈滨 编辑)

through Semicircular Microchannel [刊 汉] SUN Bin , CHEN Chen , YANG Di (Northeast Dianli University , Jilin , China , Post Code: 132000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016 , 31(6) . - 27 ~ 34

In order to study the heat transfer and flow characteristics of fluid flowing through the semi-circular microchannel , the convective heat transfer characteristics of deionized water , Cu-water nanofluids and Al-water nanofluids were studied experimentally in the progress of thermal subsidence in 21 semicircular parallel microchannels with 612 μ m equivalent diameter. Microchannel heat transfer coefficient of thermal subsidence and pressure drop were measured and calculated. The fact that semicircular microchannel heat exchanger also has good heat transfer performance compared to the conventional shape of rectangular cross-section was confirmed by the results. Moreover , compared to deionized water , adding Al and Cu nanoparticles increases the pressure drop. Nanofluids effects in the process of thermal subsidence in microchannels deteriorate due to the accumulation of nanoparticles , precipitate , and the viscosity and other reasons when the concentration of nanofluids is 0.5% . Based on the experimental data , the correlations of laminar convective heat transfer and drag coefficient of low concentration of nanofluids in semicircular microchannel were formulated. The results are of great significance for the integrated chip cooling system design. **Key words:** nanofluids , microchannel , heat transfer coefficient , resistance characteristics

入口压力对某环形燃烧室内燃烧及 NO_x 生成的影响 = Impact of Inlet Pressure on Combustion and NO_x Formation in an Annular Combustion Chamber [刊 汉] FU Zhong-guang , SHI Li , LIU Bing-han , SHEN Ya-zhou (Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University) , Ministry of Education , Changping District , Beijing , China , Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016 , 31(6) . - 35 ~ 41

The impact of combustor inlet pressure on combustion and thermal NO_x formation characteristic in an annular combustion chamber was simulated numerically by commercial CFD code Fluent. The predicted results show that the increase of inlet pressure increases the density of gas flow , and thus decreases the velocity of gas flow and magnitude of back flow regions which reduce flame temperature and high temperature zone near those regions. The mole concentration of oxygen atom increases with inlet pressure which accelerates the generation of thermal NO_x in premixed flame. The region of the highest thermal NO_x formation rate is near the boss of the combustion chamber. Fall of flame temperature in those regions reduces the growth rate of thermal NO_x formation to some extent. The formation rate of thermal NO_x near the crust are relatively higher than that of hub side under different inlet pressures. **Key words:** gas turbine , annular combustion chamber , inlet pressure , back flow region

可控涡结构的三维湍流燃烧特性的数值分析 = Numerical Simulation of Turbulent Combustion Characteristics in the Vortex Controlled Diffuser [刊 汉] ZENG Zhuo-xiong , GUO Shuai-shuai (College of Power and Me-

chanical Engineering ,Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) ,CHEN Chao-jie ,WEI Jia-jia (School of Aircraft Engineering ,Nanchang Hangkong University ,Nanchang ,China ,Post Code: 330063) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -42 ~47

The vortex controlled diffuser (VCD) has been expected to be widely used in the engine combustion chamber in the future ,due to its high pressure recovery and low pressure loss. To obtain satisfactory vortex controlled diffuser performance ,numerical simulations of flow in different structures were performed with finite rate model and suction slot bleed condition. Comparison was made between VCD and normal expansion structure without suction slot. It is revealed that this structure with suction slot can reduce the length of the recirculation zone in combustion chamber ,expand the combustion area ,make the distribution of the outlet temperature along the radial direction more uniform , and improve the combustion efficiency greatly. **Key words:** vortex controlled diffuser ,numerical simulation ,combustion performance

基于局部搜索增强策略的微分进化算法应用于换热网络优化 = **A Differential Evolution Algorithm with Enhanced Local Search for Heat Exchanger Network Synthesis** [刊 ,汉] DUAN Huan-huan ,CUI Guo-min ,PENG Fu-yu ,CHEN-Shang (Research Institute of New Energy Science and Technology ,University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -48 ~53

An improvement strategy for differential evolution algorithm considering capabilities of local and global searches for heat exchanger network synthesis was proposed to avoid the problems of weak search ability and premature convergence. The mechanism of premature convergence for differential evolution algorithm was analyzed ,and a local enhancement factor based on dynamic updating was introduced into the numerical model to improve local search precision. Furthermore ,global search capability was also enhanced by the break mechanism. For the non-linear and non-convex characteristics of the heat exchanger networks ,this improved model now has the capabilities of local and global searches with great accuracy. Simulation cases indicate that the precision ,efficiency and diversity of the differential evolution algorithm have been improved ,and better solutions can be obtained compared to literature. **Key words:** differential evolution algorithm ,local search ,dynamic updating ,heat exchanger network

含 SO₂ 气流对 20 碳钢冲蚀磨损性能影响的试验研究 = **Experimental Study on the Effect of Air-flow Containing SO₂ on Fly-ash Erosion of 20 Carbon Steel** [刊 ,汉] ZHAO Xian-ping ,ZHU Chong-wu ,YE Gui-lin ,PAN Wei-guo (College of Energy and Mechanical Engineering ,Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China , Post Code: 200090) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -54 ~58