

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.03.006

联焰板长度对驻涡燃烧室凹腔流动特性影响的数值模拟

赵玉玲¹ 李季² 何小民¹ 李明玉¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016; 2. 中国人民解放军驻 120 厂军事代表室, 哈尔滨, 150000)

摘要:开展了联焰板长度对驻涡燃烧室凹腔冷态流场特性影响的数值研究, 结果表明: 联焰板的流向长度存在两个临界值: $L_{c1}=1$ mm 和 $L_{c2}=9$ mm, 当联焰板的流向长度小于等于临界长度 L_{c1} 时, 主流会卷入凹腔中, 凹腔中无法形成双涡结构; 当联焰板的流向长度大于临界长度 L_{c1} 小于等于 L_{c2} 时, 凹腔中可以形成双涡结构, 但仍有部分主流会卷入凹腔中; 当联焰板流向长度大于 L_{c2} 时, 凹腔中可以形成双涡结构, 主流几乎不会卷入凹腔中。

关键词: 驻涡燃烧室; 联焰板; 临界长度; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2016)03-0334-06

Numerical Studies on Effect of Strut Axial Length on Cavity Flow Field in Trapped Vortex Combustor

Zhao Yuling¹, Li Ji², He Xiaomin¹, Li Mingyu¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing, 210016, China;

2. Military Presentative Office of People's Liberation Army 120 Factory Garrison, Haerbin, 150000, China)

Abstract: Numerical studies are carried out to investigate the effect of the strut axial length on the cold flow field of a trapped vortex combustor (TVC). The results indicate that the flow field in the cavity of a TVC depends to a great extent which exceeds the general expectation upon the axial length of the strut. Two characteristic length $L_{c1}=1$ mm and $L_{c2}=9$ mm are achieved from detailed numerical simulations of the cold flow field. When the strut axial length is less than L_{c1} , a great amount of mainstream is entrained into cavity and there exists only a single vortices in the cavity, whereas when the strut axial length is more than L_{c1} and less than L_{c2} , the entrainment of the mainstream into the cavity seems to be eliminated and a dual-vortex dominant structure which consists of two vortices is observed in the cavity. And last, when the strut axial length exceeds L_{c2} , the flow in the cavity becomes independent of the axial length of the strut. As a result, changing axial length of the strut is regarded as a passive approach to control entrainment of mainstream into the cavity as well as interaction between the mainstream and cavity.

Key words: trapped vortex combustor (TVC); strut; characteristic length; numerical studies

收稿日期: 2016-02-26; 修订日期: 2016-04-17

通信作者: 何小民, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hxm@nua.edu.cn.

引用格式: 赵玉玲, 李季, 何小民, 等. 联焰板长度对驻涡燃烧室凹腔流动特性影响的数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(3): 334-339. Zhao Yuling, Li Ji, He Xiaomin, et al. Numerical studies on effect of strut axial length on cavity flow field in trapped vortex combustor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(3): 334-339.

驻涡燃烧室(Trapped vortex combustor, TVC)是一种结构紧凑、稳定工作范围宽、燃烧污染物排放少的新型燃烧室。TVC采取分级分区的燃烧组织方式,主要分为驻涡区和主燃区。驻涡区为值班区,起稳定火焰作用和小功率状态下的燃烧组织,在起飞等大功率状态下,驻涡区与主燃区共同工作。

由于驻涡区起到稳定火焰的作用和小功率状态下的燃烧组织,所以驻涡区的流动特性对于TVC的性能起着决定性的作用。对于凹腔内的流动,国内外的研究人员进行了一些研究。Katta、Roquemore^[1-3]采用数值模拟的方法研究了凹腔中喷射气流对凹腔内流动特性的影响。

Roquemore/Burrus^[4-7]对凹腔内的单涡与双涡结构进行了研究,发现凹腔中的双涡结构对火焰稳定性和燃烧效率有显著提高。Ronou^[8-11]等人采用粒子图像测速及大涡模拟的方法对主流与凹腔前壁进气的流量比及凹腔后壁射流对凹腔内流动特性的影响进行了研究,研究结果表明:主流与凹腔前壁的流量比及凹腔后壁的射流对凹腔内的流动特性产生重要影响,不同的凹腔流动状态对应不同的火焰稳定性能。印度科学院(Indian Institute of Science)Agrwal等人^[12-15]在主流与凹腔交界处设计了一“L”型导流板,将主流的一部分气体引入凹腔中,试验结果表明:该导流板增强了凹腔内涡系的稳定性,显著地提高了TVC的火焰稳定性能。北京航空航天大学的樊未军^[16-17]采用数值模拟和粒子图像测速技术对TVC凹腔内的流场形态及其影响进行了研究,结果表明凹腔后壁的射流对凹腔内的双涡结构的形成起到重要作用。南京航空航天大学何小民、姚峰等^[18-19]对凹腔前壁及凹腔后壁的射流对凹腔内流动特性及燃烧性能的影响进行了数值模拟及实验研究,并在此基础上提出了TVC的设计思路。金义^[20]揭示了联焰板的引入,使凹腔内的流动呈现出较强的不均匀性,这种不均匀性增强了流动的三维特性,但是没有针对联焰板的几何参数对驻涡燃烧室流场的影响展开进一步研究。Agrwal等人^[15]初步研究了联焰板的引入对提高主流的掺混效果显著,并进一步比较了两种不同支板宽度(总阻塞面积相同)对流动与燃烧性能的影响,结果发现4个联焰板结构无论从燃烧效率还是排放性能都优于6个联焰板结构,不足之处在于没有对产生差异的原因做深入分析且只研究了两种结构,无法全面地揭示联焰板对流动与燃烧特性的影响。Burguburu等人^[10]揭示了主

流圆形支柱(Rod)下游低压/低速尾流区可以引导凹腔内高温燃气流向主流,但所研究的支柱结构单一,且没有进一步讨论支柱影响凹腔与主流相互作用的规律。

总而言之,国内外的研究人员针对凹腔内的流动特性已经进行了大量研究,但大多只局限于凹腔结构参数及凹腔前后壁射流对凹腔流动特性的影响,而之前的很多研究发现联焰板的几何结构也对凹腔内的流动特性有着很大的影响,但是对于这个方面的研究不够深入,所以,为了进一步研究联焰板的结构参数对凹腔内流动特性的影响,本文开展了联焰板流向长度对凹腔内流动特性影响的数值模拟。

1 物理模型与网格划分

图1为本文所研究驻涡燃烧室头部的结构示意图,其主要由中心钝体,导流板和联焰板组成。其中联焰板为一长方体结构,主要有3个结构参数:联焰板流向长度 L 、联焰板宽度 W 和联焰板高度 H ,本文主要通过改变联焰板流向长度 L 来研究其对凹腔流动特性的影响。针对所述的驻涡燃烧室进行数值模拟,计算物理模型如图2所示,计算域的流向长度为405 mm,展向长度为120 mm。网格划分如图3所示,由ICEM生成的非结构化网格,对凹腔前、后壁进气缝及掺混孔等区域进行了适当的加密。网格数量分别约200万、350万和600万个,进口马赫数为0.3的情况下进行了网格

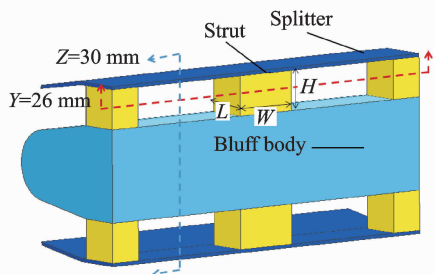


图1 TVC头部结构示意图

Fig. 1 Dome structure of TVC

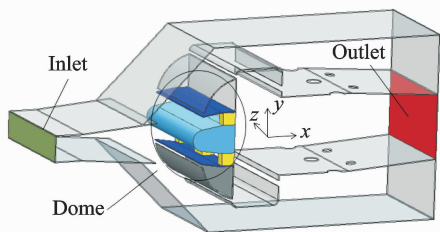


图2 TVC计算物理模型

Fig. 2 Physical model for computation

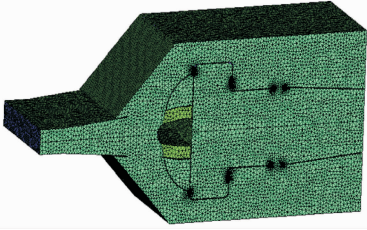


图3 TVC计算模型网格

Fig. 3 Mesh generated for computation

独立性实验,图4为凹腔中心所在截面的网格独立性计算结果,其中横坐标为流向速度 V_x 。从图中可以看出,当网格数量为350万和600万个的计算结果基本重合,说明当网格数量达到350万个时计算结果基本独立于网格数量,因此、本文计算模型中的网格数量约为350万个。

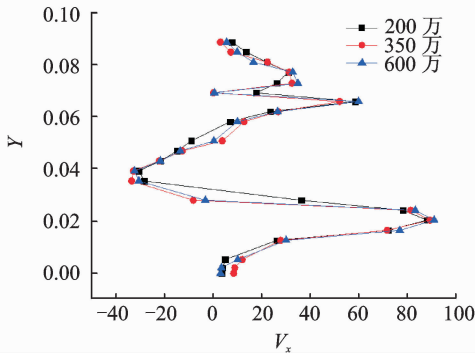


图4 网格独立性计算结果

Fig. 4 Grid independency results

2 数值方法及边界条件

采用Fluent对计算区域进行了数值模拟,分析比较了联焰板流向长度对凹腔流动特性的影响。在驻涡燃烧室的冷态流场研究中,文献[21]中对各种湍流模型的适应性进行了详细研究,结果表明标准 $k-\epsilon$ 模型的模拟结果与PIV实验结果最为接近,所以本文的湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。壁面采用标准壁面函数处理,求解过程采用二阶迎风离散格式、SIMPLE算法和基于压力基隐式求解器求解。

由于进口气流马赫数较低,本文采用不可压理想气体进行数值计算。进口条件为速度进口,进口速度大小为 $v=105\text{ m/s}$ ($Ma=0.3$);进口温度为 300 K ;操作压力为 $0.101\ 325\text{ MPa}$ 且出口条件为压力出口(表压为 0 MPa),其余面均按壁面处理。

3 数值模拟结果及分析

本文在保持联焰板宽度不变的前提下,主要研究联焰板的流向长度对凹腔流动特性的影响。图

5为不同联焰板流向长度下X-Y截面(图1中 $Z=30\text{ mm}$ 所在截面)凹腔内的速度矢量图。从图中可以看出,联焰板的流向长度 L 存在两个临界长度 $L_{c1}=1\text{ mm}$ 和 $L_{c2}=9\text{ mm}$,在本文计算模型及工况下,当联焰板的流向长度小于等于临界长度 L_{c1} 时,凹腔内无法形成双涡结构,只有凹腔后壁与凹腔底部的交接处有一小涡;当联焰板的流向长度 $L_{c1}<L<L_{c2}$ 时,凹腔内可以形成较稳定的双涡结构,但仍有部分主流被卷入凹腔中;当凹腔的流向长度 $L>L_{c2}$ 时,凹腔内形成了稳定的双涡结构。

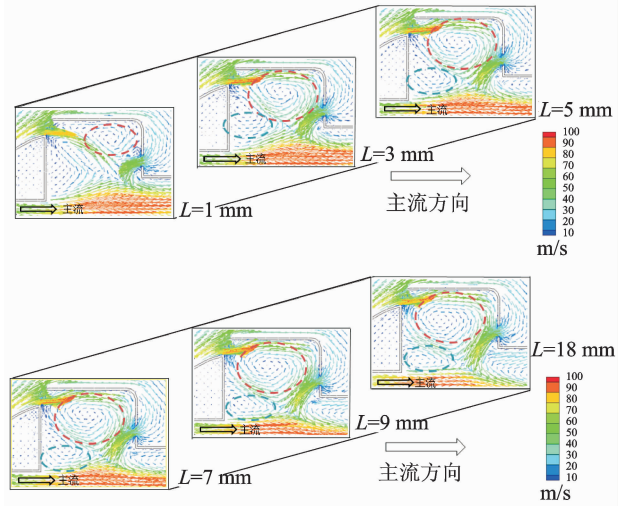


图5 不同联焰板流向长度下X-Y截面的速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector graph of X-Y section on different strut axial length

图6为不同联焰板流向长度下X-Z截面(图1中 $Y=26\text{ mm}$ 所在截面)主流的速度云图和流线图,图中白色矩形框为凹腔所在位置,从图中可以看出,当联焰板流向长度 $L=3\text{ mm}$ 和 $L=5\text{ mm}$ 时,主流的流线沿 Z 方向向内弯曲;当联焰板的流向长度 $L=9\text{ mm}$ 和 $L=18\text{ mm}$ 时,主流的流线沿 Z 方向弯曲很小或基本不弯曲。

结合图5,6,联焰板的流向长度对凹腔内流动特性的影响可能是因为当联焰板的流向长度较小时($1\sim 7\text{ mm}$),主流沿 X 方向在联焰板前滞止,使得凹腔所在位置的流线沿 Z 方向严重弯曲,流通截面变小,在流量保持不变的情况下,主流的动量增加,而由图可见 X 方向流速并没有显著增加,主流流线在 $Y-Z$ 平面沿 Y 方向向凹腔内弯曲,主流便卷入凹腔中。当联焰板的流向长度足够长时(9 或 18 mm),其对主流起到了很好的整流作用,虽然主流同样在联焰板前滞止,但凹腔所在位置的流线由于此时联焰板的整流作用,流线弯曲很小或基本不弯曲,所以主流不会卷入凹腔中。

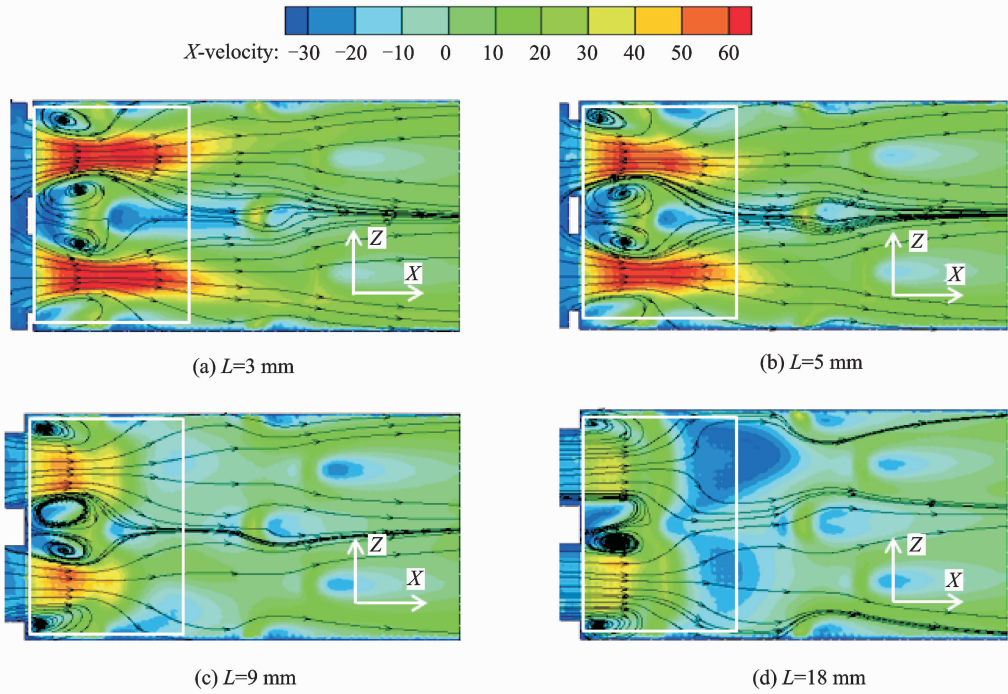


图 6 不同联焰板流向长度下 X-Z 截面主流的速度云图和流线图

Fig. 6 Streamlines overlaid on contours of velocity magnitude

图 7,8 分别是不同联焰板长度下凹腔内不同流向位置($X/S=0.3$ 、 $X/S=0.7$, S 为凹腔的流向长度)Y-Z 截面的流线和涡量云图,不同的色标表示流向涡涡量大小,图中黑色矩形框为凹腔所在

位置。从图中可以看出,随着联焰板轴向长度的增加,涡量 $|\omega_x|$ 的大小总体上随着联焰板长度的增加而减小,这主要是由于联焰板长度的增加,起到了整流的作用,使主流的射流在凹腔所在位置的速度

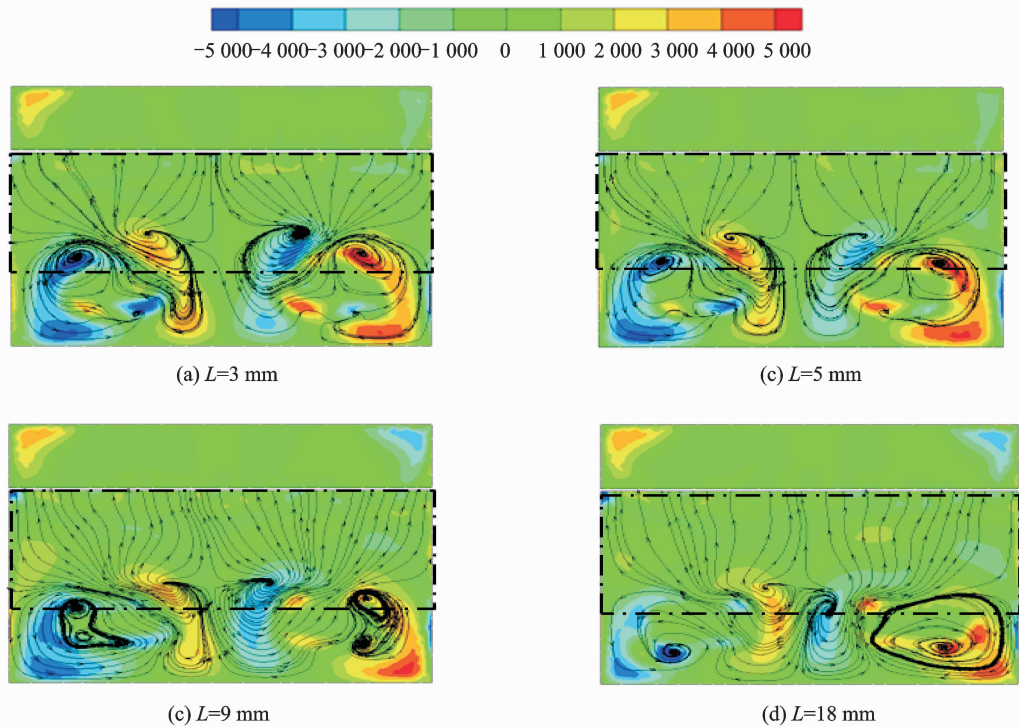


图 7 $X/S=0.3$ 时不同联焰板长度下的流线与涡量云图

Fig. 7 Streamlines overlaid on contours of X-vorticity magnitude ($X/S=0.3$)

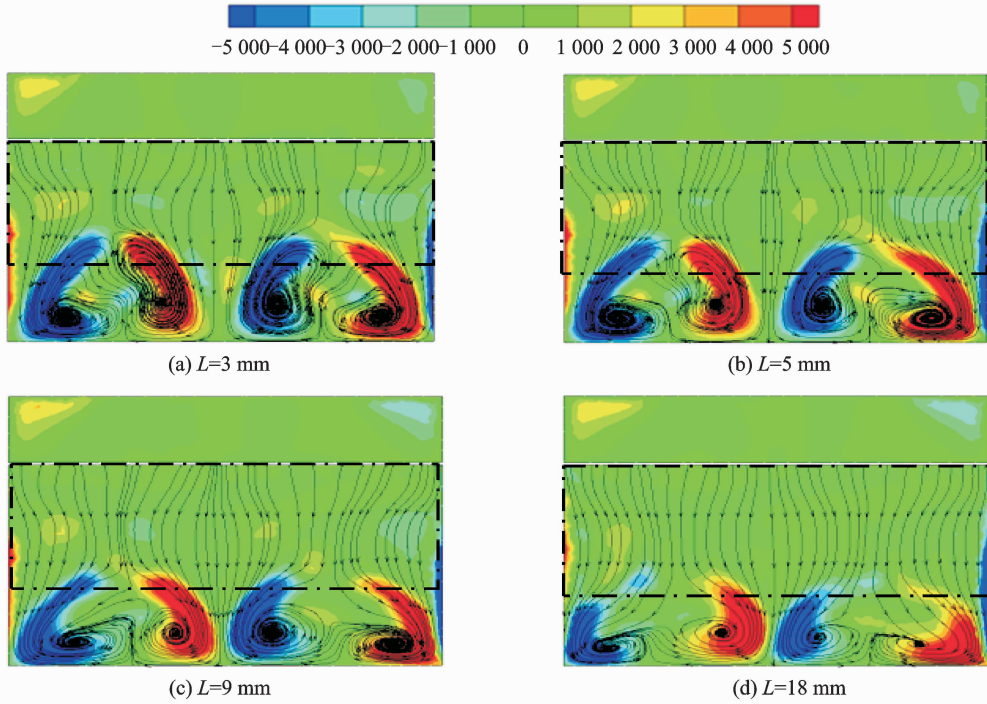


图8 $X/S=0.7$ 时不同联焰板长度下的流线图与涡量云图

Fig. 8 Streamlines overlaid on contours of X-vorticity magnitude($X/S=0.7$)

减小,速度梯度也随之减小,主流射流所诱导出的反向漩涡对的强度也逐渐减弱。从图中还可以看出,流向涡涡系的范围随着联焰板长度的增加而逐渐缩小。在联焰板长度 $L=3$ mm 和 $L=5$ mm 时,涡系发展到了凹腔所在位置,并引起凹腔内流线在 $Y-Z$ 截面上发生弯曲,使凹腔内的流动呈现出较强的三维特性。产生这种现象的原因在于联焰板的长度较短,对主流的整流作用不强,使主流大量卷入凹腔中,形成于主流近场的反向漩涡对在凹腔中继续发展,并与凹腔内的气体相互作用,使凹腔内的流线在 $Y-Z$ 截面发生弯曲。从图中还可以看出,在联焰板长度 $L=9$ mm 和 $L=18$ mm 时,发展到凹腔内的涡系范围减少,这是由于联焰板的长度增加对主流的整流作用增强,使卷入凹腔中的主流减少,形成与主流近场的反向漩涡对在主流远场中随着射流一起向下游发展,并消失在主流中,只有很少一部分在凹腔中发展,并与凹腔中的气体相互作用。

图9所示为驻涡区内流向涡涡量平均值 ($|\omega_x|_{avg}$) 随联焰板长度的变化规律,从图中可以看出,驻涡区内流向涡涡量平均值随联焰板长度的增加而逐渐减小。值得注意的是,当联焰板长度 $L=1$ mm,驻涡区流向涡涡量平均值为 1 764.6,明显大于联焰板长度 $L=3$ mm, $L=5$ mm, $L=7$ mm 和 $L=9$ mm 时驻涡区流向涡涡量的平均值。当联焰板长度 $L=18$ mm 时,驻涡区流向涡涡量平均值为 1 020.9,明显小于联焰板长度 $L=$

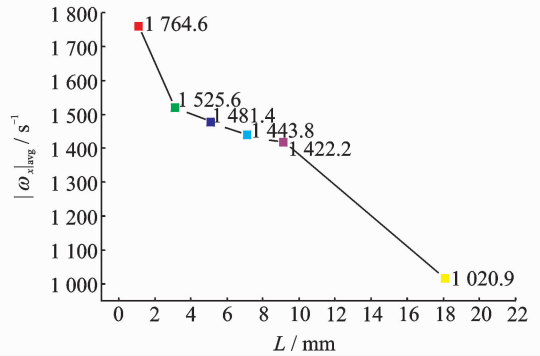


图9 驻涡区内流向涡涡量平均值 ($|\omega_x|_{avg}$) 随联焰板长度变化规律

Fig. 9 X-vorticity magnitude on different strut axial length

3 mm, $L=5$ mm, $L=7$ mm 和 $L=9$ mm 时驻涡区流向涡涡量的平均值。从驻涡区流向涡涡量随联焰板变化的斜率也可以看,联焰板长度同样存在两个临界值,当联焰板长度 L 大于 1 和 9 mm 时图中曲线斜率突然增大,说明驻涡区流向涡涡量的变化率也突然增大。这一现象与前文所述驻涡区内涡系结构随联焰板长度变化的规律基本吻合。

4 结 论

采用了数值模拟方法,研究了联焰板的流向长度对凹腔内流动特性的影响。基于本文所述模型及参数,可以获得以下结论:

(1)联焰板的流向长度存在两个临界长度: $L_{c1}=1\text{ mm}$ 和 $L_{c2}=9\text{ mm}$,当联焰板的流向长度小于等于临界长度 L_{c1} 时,凹腔所在位置的流线向中间弯曲,主流极易卷入凹腔中,凹腔中无法形成稳定的双涡结构,将影响凹腔内火焰的稳定性。

(2)当联焰板的流向长度大于临界长度 L_{c1} 小于等于 L_{c2} 时,凹腔中可以形成稳定的双涡结构,但此时仍有部分主流会卷入凹腔中。

(3)当联焰板流向长度大于临界长度 L_{c2} 时,凹腔中可以形成稳定的双涡结构,主流不会卷入凹腔中。

(4)凹腔内流向涡涡量平均值随着联焰板长度的增加而减小,且当 $L=1\text{ mm}$ 和 $L=9\text{ mm}$ 时,流向涡涡量平均值的变化率发生急剧变化。

参考文献:

- [1] Katta V R, Roquemore W M. Study on trapped vortex combustor- effect of injection on dynamics of non-reacting and reacting flows in a cavity[R]. AIAA-97-3256,1997.
- [2] Katta V R, Roquemore W M. Study on trapped-vortex combustor-effect of injection on flow dynamics [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(3): 273-281.
- [3] Katta V R, Roquemore W M. Numerical study on trapped-vortex combustor concepts for stable combustion[J]. Transactions of the ASME, 1998, 120: 60-68.
- [4] Mancilla P C, Chakka Pl. Performance of a trapped vortex spray combustor[R]. 2001-GT-0058,2001.
- [5] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines[R]. AIAA-2001-0483,2001.
- [6] Burrus D L, Johnson A W, Roquemore W M, et al. Performance assessment of a prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application [R]. 2001-GT-0087,2001.
- [7] Hendricks R C, Shouse D T, Roquemore W M, et al. Experimental and computational study of trapped vortex combustor sector rig with tri-pass diffuser [R]. NASA/TM-2004-212507,2004.
- [8] Xavier P, Vandel A, Godard G, et al. Analysis of the flame structure in a trapped vortex combustor using low and high-speed OH-PLIF[R]. GT2014-25207, 2014.
- [9] Merlin C, Domingo P, Vervisch L. Large eddy simulation of turbulent flames in a trapped vortex combustor (TVC)—A flamelet presumed-pdf closure preserving laminar flame speed[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2012, 340: 917-932.
- [10] Burguburu J, Cabot G, Renou B, et al. Flame stabilization by hot products gases recirculation in a trapped vortex combustor[R]. GT2012-68451, 2012.
- [11] Xavier P, Renou B. Towards low-NO_x operation in a complex burner optimization of an annular trapped vortex combustor[R]. GT2013-94704, 2013.
- [12] Singhal A, Ravikrishna R V. Single cavity trapped vortex combustor dynamics—Part-1: Experiments, international[J]. Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2011(3): 23-44.
- [13] Singhal A, Ravikrishna R V. Single cavity trapped vortex combustor dynamics—Part-2: Simulations, international[J]. Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2011(3): 45-62.
- [14] Agarwal K K, Ravikrishna R V. Experimental and numerical studies in a compact trapped vortex combustor: Stability assessment and augmentation[J]. Combustion Science and Technology, 2011(183): 1308-1327.
- [15] Agarwal K K, Krishna S, Ravikrishna R V. Mixing enhancement in a compact trapped vortex combustor [J]. Combustion Science and Technology, 2013(183): 363-378.
- [16] 樊未军, 易琪, 严明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 66-70.
Fan Weijun, Yi Qi, Yan Ming, et al. A study of double vortex structure in the trapped vortex combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 66-70.
- [17] 樊未军, 孔昭健, 邢菲, 等. 凹腔驻涡模型燃烧室内涡的演化发展[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 888-892.
Fan Weijun, Kong Zhaojian, Xing Fei, et al. Vortex evolution and development in the model of trapped vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6): 888-892.
- [18] 何小民, 王家骅. 驻涡火焰稳定器冷态流场特性的初步研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 567-571.
He Xiaomin, Wang Jiahua. An investigation on the fluid characteristics of trapped-vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 567-571.
- [19] 何小民, 姚锋. 流动和油气参数对驻涡燃烧室燃烧性能的影响[J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 810-813.
He Xiaomin, Yao Feng. Effect of flow parameters and equivalence ratio on the trapped vortex combustor performance [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 810-813.
- [20] Jin Yi, Li Yefang, He Xiaomin, et al. Experimental investigations on flow field and combustion characteristics of a model trapped vortex combustor[J]. Applied Energy, 2014(134): 257-269.
- [21] Jin Yi, He Xiaomin, Zhang Jingyu, et al. Numerical investigation on flow structures of a laboratory-scale trapped vortex combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2014(66): 318-327.