驻涡燃烧室驻涡区涡系特点数值模拟

彭春梅 何小民 金 义 (南京航空航天大学能源与动力学院,南京210016)

彭春梅(1988),女,在读硕士研究生, 研究方向为燃烧与传热传质。 收稿日期:2012-07-24

摘要 :为深入了解驻涡燃烧室凹腔内流场的涡系分布特性,采用 FLUENT 对不同驻 涡区前进口堵塞比和不同燃烧室入口速度的驻涡区流场进行计算,分析典型截面压力场 和流线图,研究驻涡区涡系特点。结果表明:不同纵截面旋涡特点不同,主流被联焰板堵 塞的凹腔纵截面只有主涡,为稳定点火和火焰稳定提供条件 :不同横截面的旋涡差别较 大 离驻涡区前壁越远的截面涡心距越大 贴近前壁和后壁的截面均无旋涡 燃烧室入 口速度对轴向中间截面的旋涡结构无影响,而前进口堵塞比对旋涡结构影响较大。 关键词 驻涡燃烧室 燃烧 驻涡区 涡系特点 数值模拟

Numerical Simulation on Characteristics of Vortex in Trapped Vortex Combustor

PENG Chun - mei, HE Xiao - min, JIN Yi

渊 ollege of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China冤

Abstract: To investigate the distribution characteristics of the vortex in trapped vortex combustor cavity, FLUENT was used to perform numerical simulation on flow field of cavity with different blocking ratios of cavity front-inlet and different combustion inlet velocity. Pressure and steamline line of typical section was analyzed to research the characteristics of vortex in cavity. The result shows that the characteristics of vortex on different section are different, there only exist primary vortex on longitudinal section which mainstream was blockaded by shutter to help for the stability of ignition and flame stability. The differences of the vortex on different cross-sections are obvious. The distance between the vortex centers becomes larger as the distance to the front-wall increases. There is no vortex on crosssection which is close to front-wall and after-wall. The structure of the vortex on axial center section is not sensitive to combustor inlet velocity, but sensitive to blocking ratio of front-inlet.

Key words: Trapped Vortex Combustor (TVC); combustion; cavity; characteristics of vortex; numerical simulation

引言 0

随着现代航空工业的快速发展 对涡轮发动机的 性能要求越来越高。燃烧室是燃气涡轮发动机的核心 部件,为了满足高性能低污染要求,美国空军研究所 (AFRL)和通用发动机(GEAE)公司于 20 世纪 90 年 代提出了驻涡燃烧室 (Trapped Vortex Combustor, TVC)概念,目前已经发展到第4代¹¹⁻⁴。与过去40年 来普遍采用的旋流器燃烧室相比 驻涡燃烧室采用 1 种不同的燃烧组织方式。燃烧室主要分为2部分,包 括驻涡区和主燃区。利用凹腔形成旋流 驻涡区主要 起到火焰稳定和小功率燃烧的作用 ,主流主要起到大 状态时的燃烧作用。驻涡区内的燃料和空气以一定方 式单独供入凹腔内 在较宽范围的主流进气状况下建 立稳定的回流区。国内外对驻涡燃烧室开展了大量研 究 结果表明:驻涡燃烧室具有结构简单、贫富油极限 宽、高空再点火性能优越、可在更宽广的油气范围内 保持高燃烧效率等优点¹⁴。驻涡区的特性对燃烧室性 能有重要影响 特别是驻涡区涡系特点。驻涡区内主 要存在2个涡 分别为主涡和副涡 对驻涡区的流场结 构及变化规律也开展了一些研究。文献[5]分析了主流 对凹腔涡流动的影响 ,文献[6]对驻涡腔前驻体有无喷 射 2 种情况下的旋涡分布进行了研究, 文献[7]研究了 凹腔结构对驻涡区旋涡的影响,但这些都是笼统地研 究驻涡区旋涡 没有详细分析驻涡区各纵横截面的旋 涡特性。



驻涡区涡系结构主要受驻涡区结构和进口气动 参数等的影响 本文主要通过变化驻涡区的前进口堵 塞比和燃烧室进口速度的方法改变驻涡区的进口结 构形式和入口速度 采用数值计算的方法对驻涡区流 场 特别是涡系结构的变化规律进行研究 ,并对驻涡 区不同纵横截面的流场进行详细讨论 ,分析驻涡区涡 系特点 ,总结相应的变化规律。

1 计算方法

1.1 物理模型

本文研究的对象是在前期对驻涡燃烧室探索研 究的基础上设计的燃烧室^[48-9]。考虑到整个燃烧室的 周期性,物理模型选用1个头部,不简化模型。驻涡燃

烧室单头部物理模型如图 1 所示,研究对象如图 2 所示。单头部驻涡燃烧室 长 353 mm,宽 60 mm,高 172 mm,驻涡区前进口宽 60 mm,高4 mm。



几何模型



1.2 计算方法和边界条件

数值计算采用 FLUENT 专用的前处理软件 GAMBIT 对所建立的3 维几何结构进行网格划分 整 体采用结构化网格 对局部区域网格进行加密。生成 的六面体网格总数约为 141 万。计算过程中采用基于 压力耦合的离散稳态隐式求解器 ,各参数的离散均采 用精度较高的2 阶迎风差分格式,采用标准 资着模 型模拟紊流黏性 ,湍流度设为 5%。流体设为常物性 不可压气体(air)。以各项计算结果的残差均小于 10⁻⁶ 来判断解是否收敛。

燃烧室进出流边界条件:入口为速度入口,其中入口速度分别设为 50、85 和 120 m/s,温度设为 300 K 静压设为大气压;出口为压力出口,燃烧室两侧截 面设置为周期性边界条件。 驻涡区前进口堵塞比直接影响到驻涡区流量和 流场特性,从而影响驻涡区涡系特点。研究过程中通 过改变驻涡区前进口堵塞比,得到所需的流量和流 场。研究时,堵塞前进口的中部,变化堵塞面积,堵塞 比分别为 20%、40%和 60%,在不同燃烧室入口速度 下,研究驻涡区的流动特性。涉及到 3 种驻涡区前进 口堵塞比和 3 种燃烧室入口速度,共 9 种组合,分析 其纵横截面的流线图及压力云图,研究不同驻涡区前 进口堵塞比和不同燃烧室入口速度对涡系的影响。

2 计算结果及分析

模拟了3种驻涡区前进口堵塞比分别为20%、40%和60%3种燃烧室入口速度分别为50、85和120 m/s。取不同截面流线和静压分布云图进行分析,研究其涡系特点。

Z/D=0.10,为过驻涡区前进口、联焰板堵塞截面; Z/D=0.25,为过主流和驻涡区前进口截面;Z/D=0.50, 为过主流、驻涡区前进口堵塞截面,是燃烧室的对称 面。各截面选取如图 2 所示。

试验拍摄 PIV 如图 3 所示。从图 3 中可见,主流 被联焰板堵塞的截面,驻涡区只存在主涡,为单涡结 构,主涡位于凹腔中部左右;主流截面驻涡区主要存 在 2 个旋涡。主涡几乎占据了整个驻涡区,整体形状 呈椭圆形,流线光滑,形态饱满。



图 3 试验 PIV

2.1 驻涡区纵截面的旋涡特性

在堵塞比为 20%、燃烧室入口速度为 50 m/s 时, 对驻涡区不同纵截面(Z/D=0.10、0.25 和 0.50,如图 4 所示)流场进行分析,研究其旋涡特点。图 4 中流线显 示驻涡区内主要存在 2 个涡,分别为主涡和副涡,主 涡位于凹腔中部,主流被联焰板堵塞的截面为单涡结 构 主涡在流动方向上几乎占据整个驻涡腔 形态较饱 满 整体形状呈椭圆形,流线较为光滑,与试验结果相 符 验证了数值模拟结果的正确性。气流从驻涡腔前壁 进入驻涡区后,在压力驱动下向该区运动,与驻涡腔后 壁进口气流相互作用,共同形成主涡。副涡处于驻涡腔 与主流交界处,其流体整体逆时针方向运动,旋涡形态 沿轴向拉伸,强度较小。由于主涡被副涡隔离于驻涡腔 中,则主流的高速运动对其影响较小,处于相对稳定的 流动环境。主涡结构稳定,气流速度不高,为稳定点火 和火焰稳定创造了条件。副涡保护凹腔中的主涡免受 主流的干扰,并起到热量传递的作用。



 (a) Z/D=0.10
 (b) Z/D=0.25
 (c) Z/D=0.50
 图 4 堵塞比为 20% 燃烧室入口速度为 50m/s 时 纵截面流线和压力

3 个特征截面均存在主涡。截面 Z/D=0.25 和 Z/D=0.50 时旋涡特点相似,在驻涡区与主流交界处存 在明显的副涡,这是由于主涡下部沿旋涡回流的部分 气体与主流进来的高速气流作用,被折回,从而形成 副涡,并被主流托住。截面 Z/D=0.10,该截面主流被联 焰板堵塞,主涡下部靠近主流处,气体有沿旋涡回流 的趋势,但由于主流被联焰板堵塞,该处为低压区,因 此部分气体向联焰板及钝体后面的低压区运动,在钝 体后产生回流。

2.2 驻涡区横截面的旋涡特性

在驻涡区前进口堵塞比为 20%、燃烧室入口速 度为 50 m/s 时,对驻涡区设置 5 个轴向评判截面:

XL=0.3、0.4、0.5、 0.6 和 0.7,详细 研究各截面旋涡 情况 (如图 5 所 示)。



(a)X/L=0.3

(b)X/L=0.4



图 5 堵塞比 20%、燃烧室入口速度 50m/s 时 横截面流线和压力 从图 5 中可见, 凹腔上游靠近前壁的截面无旋涡 形成, 凹腔轴向中心位置附近存在明显的旋涡, 但旋涡 强度较弱 形态不饱满, 在凹腔轴向中心位置处旋涡最 大 形态最饱满, 距离凹腔前壁越远的横截面上旋涡涡 心距越大, 靠近凹腔后壁的横截面上无旋涡存在。而 且, 气流从驻涡区前进口进入, 在压力驱动下一边向 堵塞所对应的区域偏转, 一边向下运动, 到主流处由 于压力较高, 被主流托住, 气流不能直接流进主燃区 与主流掺混, 于是向燃烧室两侧截面偏转, 一部分往 回绕形成旋涡, 一部分从联焰板引入主燃区。

凹腔上游靠近前壁的截面 X/L=0.3 旋涡在此位 置正好往凹腔底部回绕 流线朝向凹腔底部。X/L=0.4 处有较明显的旋涡存在 但旋涡形态不饱满 涡心距 较小,涡心大约分别在 Z 向 1/3 和 2/3 处,从驻涡腔 前进口进入的空气由于惯性、压力驱动向凹腔后壁运 动,与后壁进口进入的空气作用形成旋涡,旋涡位于 轴向中心位置附近 由于该截面位于凹腔轴向中心位 置上游 旋涡发展不够充分 形态不饱满。X/L=0.5 截 面为轴向中间截面 该截面上旋涡最大 形态饱满 流 线光滑 涡心距变大。该截面的流线图显示 旋涡涡心 大约位于 Z 向 1/4 和 3/4 处 对应纵截面 Z/D=0.25 附 近,如纵截面流线图所示,在凹腔轴向中心位置处存 在明显的旋涡,且主涡涡心位于凹腔轴向中心位置, 即 0.5 L 处。轴向距离继续增大 到 X/L=0.6 截面,旋 涡较小,形态不饱满,涡心距较大,涡心大约在乙向 1/8 和 7/8 位置处,对应纵截面 Z/D=0.1 附近,该纵截 面主涡涡心位于凹腔轴向中心偏右大约 0.6 L 处 因 此纵横截面旋涡特点符合较好。X/L=0.7 截面,无旋涡 存在,在压力驱动下,气流直接从凹腔底部流向主流, 反映在纵截面上即为凹腔下游靠近后壁面的流体均 沿靠近后壁的路径直接流向燃烧室中心与主流混合。

2.3 堵塞比对流动特性的影响

驻涡区前进口堵塞比分别为 20%、40%和 60%, 燃烧室入口速度分别为 50、85 和 120 m/s,X/L=0.5 截面的流线和压力分布分别如图 6~8 所示 驻涡区 前进口流量变化曲线如图 9 所示,驻涡区前进口流 速变化曲线如图 10 所示。在不同驻涡区前进口堵塞 比和不同燃烧室入口速度下的涡心距和涡通量分别 见表 1、2。

从图 6~8 中可见,在相同堵塞比、不同燃烧室入口速度时, 驻涡区轴向中间截面的旋涡结构几乎没有







	表1	涡心距	mm
堵塞比 /% -		入口速度 /(m/s)	
	50	85	120
20	31.5	32.3	32.0
40	33.0	33.1	32.5
60	35.4	36.3	35.2
	表2	涡通量	mm
	表2	涡通量 入口速度 /(m/s)	mm
	表2 50	涡通量 入口速度 /(m/s) 85	mm 120
堵塞比 /% · ·	表2 50 1200	涡通量 入口速度 /(m/s) 85 2300	mm 120 5400
堵塞比 /% · 20 40	表 2 50 1200 900	涡通量 入口速度 /(m/s) 85 2300 1500	mm 120 5400 4100

区别 ,在相同燃烧室入口速度、不同堵塞比时, 脏涡区 轴向中间截面的旋涡相差较大。从表 1、2 中可见, 在 同一堵塞比时, 燃烧室入口速度越大, 旋涡强度越大, 涡心距几乎不变。其原因是燃烧室入口速度越大, 涡区前进口的流体速度越大, 流量越大, 致使旋涡强 度越强。在相同燃烧室入口速度下, 堵塞比不同, 从驻 涡区前进口进入的流体速度几乎相同, 堵塞比越大, 驻涡区前进口流量越小, 旋涡强度越弱, 旋涡形态变 得不规则、不饱满。随着堵塞比增大, 涡心距也增大。 图 8 中由于驻涡区前进口堵塞比太大(60%) 旋涡实 际发展空间相对狭小, 旋涡形态不饱满, 流线不光滑。

3 结论

通过改变驻涡区前进口堵塞比和燃烧室入口速 度,对燃烧室进行数值模拟,取驻涡区典型截面流线 和静压分布图,分析驻涡区流场特点,研究驻涡区涡 系特性,得到以下结论:

(1)驻涡区的旋涡是3维的,不同截面旋涡特点 不同,主流被联焰板堵塞的凹腔纵截面只存在主涡, 为燃烧室稳定点火和火焰稳定提供条件。

(2)驻涡区不同横截面的旋涡差别较大,在凹腔 轴向中心位置处形态最饱满,离驻涡区前壁越远截面 的旋涡涡心距越大,贴近凹腔前壁和后壁的截面均无 旋涡存在。燃烧室入口速度对驻涡区轴向中间截面的 旋涡结构没有影响,驻涡区前进口堵塞比对旋涡影响 较大。前进口堵塞比一定时,燃烧室入口速度越大, 涡区前进口流速越大,流量越大,旋涡强度越大,涡心 距几乎不变。燃烧室入口速度一定时,驻涡区前进口 速度几乎相同,堵塞比越大,流量越小,旋涡强度越

小 旋涡形态不饱满 涡心距增大。

参考文献:

- Hsu K Y, Goss L P, Roquemore W M. Characteristics of a trappedvortexcombustor[J].Journalof Propulsion and Power, 1998,14 (1):57-65.
- [2] 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]ASME 2001-GT-87.
- [3] 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 vortexstructure in thevortexcombustor [J].Proceedings of the CSEE,2006,26(9):66-70.(inChinese)
- [4] 何小民,姚峰. 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 onthetrapped vortex combustor performance [J]. Journal of Aerospace Power, 2006 21 (5) 810-813. (in Chinese)
- [5] 李瑞明,刘玉英,杨茂林,等. 驻涡燃烧室主流对凹腔涡流动的影响[J]. 航空动力学报,2009,24(7):1482-1487.
 LI Ruiming, LIU Yuying, YANG Maolin, et al. Impact of mainstream on the vortex flow of cavity in trapped vortex

combustor [J]. Journal of Aerospace Power 2009,24 (7): 1482-1487. (in Chinese)

 [6] 刘世青,钟兢军. 驻涡燃烧室内涡系分布研究[J]. 大连海事 大学学报, 2009, 35(4):103-107.
 LIU Shiqing, ZHONGJingjun. Distribution of the vortex in the

trapped vortex combustor [J]. Journal of Dalian Maritime University 2009 35(4):103-107. (in Chinese)

- [7] Sturgess G J, Hsu K Y.Entrainmentofmainstreamflowin a trapped vortexcombustor[R].AIAA-1997-261.
- [8] 何小民,许金生,苏俊卿. 驻涡燃烧室燃烧性能试验[J]. 航空动力学报 2009 24(2) 318-323.
 HEXiaomin,XUJinsheng,SUJunqing.Experimental research of the performanceof thetrappedvortexcombustor[J].Journal ofAerospacePower 2009, 24(2):318-323. (inChinese)
 [9] 金义,何小民,蒋波. 富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧(RQL)
- [1] 亚文,阿尔氏,将波, 留加燃烧, 医库尔恩, 货加燃烧((QC)) 工作模式下驻涡燃烧室排放性能试验 [J]. 航空动力学报, 2011 26(5):1031-1036.

JIN Yi, HE Xiaomin, JIANG Bo. Experimental study on emission performance of rich-burn quick-quench lean- burn (RQL) trapped- vortex combustor [J]. Journal of Aerospace Power 2011 26(5):1031-1036.(in Chinese)

[10] 杨事民,唐豪,黄玥.带凹腔的超声速燃烧室燃烧流场数值 模拟[J]. 航空发动机,2008,34(3),35-38. YANG Shimin, TANG Hao, HUANG Yue. Numerical simulation of combustion flow field of supersonic combustor with cavity[J].Aeroengine,2008,34(3):35-38.

(上接第50页)

AppliedThermalEngineering,2001,21 111-118.

- [5] 李政,王德慧,薛业丽,等.微型燃气轮机的建模研究(上): 动态特性分析[J].动力工程,2005,25(1).13-17.
 LIZheng, WANG Dehui,XUEYeIi, et al. Research on ways of modelingof micro gas turbines (PartI) analysisofdynamic characteristic [J]. Power Engineering,2005,25(1):13-17. (in Chinese)
- [6] 李政,王德慧,薛业丽,等.微型燃气轮机的建模研究(下): 简化与分析[J].动力工程 2005 25(2):160-164.
 LI Zheng, WANG Dehui, Xue Yeli, et al. Research on ways ofmodelingofmicro gasturbines(Part) analysis ofdynamic characteristic[J]. Power Engineering,2005 25(2):160-164. (inChinese)
- [7] 刘尚明,王纯.燃气-蒸气联合循环的神经网络变工况模 拟[J].燃气轮机技术,2006,19(4) 20-24.
 LIU Shangming, WANG Chun. Simulation on load variation of gas-steam combined cycle unit based on neural network[J].
 GasTurbineTechnology 2006,19(4) 20-24. (inChinese)
- [8] 刘云生,孙丰瑞,张仁兴,等.燃气轮机的实时仿真及数据 预处理[J].海军工程大学学报,2002,14(2):76-79.

LIU Yunsheng, SUN Fengrui, ZHANG Renxing, et al. Real-timesimulationanddata pretreatmentof gas turbine[J].

Journal of Naval University of Engineering 2002,14 (2): 76-79. (in Chinese)

[9] 李杨. 船用发电燃气轮机的仿真研究[D]. 哈尔滨 哈尔滨工程大学 2006.

LI Yang. The simulation study on marine gas turbine of electricity generation [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2006. (in Chinese)

[10] 王志涛. 燃燃联合动力发电模块特性仿真研究 [D]. 哈尔 滨 哈尔滨工程大学 ,2008.

WANG Zhitao. Simulation study on characteristic of Combined Gas Turbine and Gas Turbine (COGAG) generating electricitymodule[D].Harbin:HarbinEngineering University,2006. (in Chinese)

[11] 韩晓光,曲文浩,董瑜,等.基于 simulink 的燃气轮机动态 仿真模型[J]. 航空发动机 2010 ,36(3) 20-22.
HAN Xiaoguang, QU Wenhao, DONG Yu, et al. Dynamic simulation model of gas turbine based on simulink [J]. Aeroengine 2010 ,36(3) 20-22. (in Chinese)