旋流杯文氏管长度对积碳的影响研究*

张 弛,田兴鹏,林宇震,王晓峰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院/航空发动机气动热力国家级重点实验室,北京100191)

摘 要:研究了三个不同长度旋流杯文氏管的积碳特性。方案A,B,C文氏管喉道位置至喷嘴出 口距离依次为6mm,8mm,10mm。通过热态燃烧试验定量比较了三个方案文氏管的积碳量,并利用数 值模拟分析了文氏管长度对旋流杯内部及下游的热态流场,温度场以及积碳特性的影响。试验结果显示 随着文氏管长度的增加,其内壁上的积碳量随之减小,方案C相较于方案A减小幅度达到99%。数值模 拟结果则发现:文氏管长度对旋流杯下游流场及温度场影响较小,但是增加文氏管长度会使中心回流区 上止点由上游喷嘴处向下游文氏管出口移动,文氏管喉道附近的负速度区域和高温区域减小,方案C相 较于方案A负速度及温度峰值减小幅度分别达到99%和35%。因此,适当增加文氏管长度有利于减少燃 油在文氏管上的积碳,对旋流杯的结构设计具有指导作用。

关键词: 航空发动机; 燃烧室; 旋流杯; 文氏管; 积碳 中图分类号: V231.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2015) 12-1833-06 DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2015. 12. 011

Effects of Venturi Length of Swirl Cup on Carbon Deposition

ZHANG Chi, TIAN Xing-peng, LIN Yu-zhen, WANG Xiao-feng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics/School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A research had been done to study the effects of venturi length of swirl cup on the carbon deposition of venturi by combustion experiments in quantification and numerical simulation analysis. Three variations of venturi lengths were made. The distances between venturi throat and nozzle exit of case A, B, C are 6mm, 8mm, 10mm respectively. Comparative analyses were conducted for above parameter in terms of the flow field, temperature field and carbon deposition characteristics in the swirl cup and the downstream. The experimental results show that the carbon amount on the inwall decrease with the increase of venturi length and the amount of reduction of case C can reach 99% by comparison to case A. Meanwhile, the numerical results indicate that the length of venturi has no discernable impact on the flow field and temperature field in the downstream of the swirl cup. However, the front stagnation points of the primary recirculation zone can be moved from the nozzle to the exit of the venture in path with the length increase. In addition, the peak value and distribution area of negative velocity and temperature near the venturi throat will have a dramatic reduction with the greatest amplitude between case A and C come to 99% and 35% respectively. Thus, increasing the length of venturi to a certain degree can lead to the carbon on the venturi sharply decrease, which has guiding significance for the structural design of the swirl cup.

Key words: Aero-engine; Combustor; Swirl cup; Venturi; Carbon deposition

^{*} 收稿日期: 2014-07-30; 修订日期: 2014-09-12。

作者简介:张 弛 (1979—),男,博士,副教授,研究领域为航空发动机燃烧及传热传质,超声速燃烧,替代燃料,燃 烧化学动力学,热电转换。E-mail:zhangchi@buaa.edu.cn

1 引 言

旋流杯是航空发动机主燃烧室中稳定火焰的重 要组成部分。旋流杯的设计对燃烧室的燃烧性能有 着极大的影响。相关设计准则的提出将有助于提高 燃烧性能,减少污染排放,缩短燃烧室的设计周 期^[1]。GE公司发展了用于雾化和油气混合和的双级 旋流杯结构^[2]获得了良好的燃油雾化质量和燃烧室 稳定性^[3],因此得到了广泛应用,如CFM56。

旋流杯中文氏管的存在能够缩小液滴范围,使 燃油集中在回流区中,明显改善液滴尺寸分布的均 匀性及总体雾化质量,促进燃油雾化,有效地抑制旋 流杯及喷嘴积碳的产生^[4]。

结焦积碳是航空燃油在氧和金属的催化作用 下,经过氧化、热解、裂化、脱氢、焦化和聚合等系列 反应所生成的[5.6]。积碳是一个化学反应过程,会受 到温度、压力、油气比和时间等参数的影响。Chin J S和Lefebvre^[7]研究发现燃油管道中产生积碳的速率 和燃油温度、管道壁温和雷诺数相关,燃油温度和 管道壁温越高,流动速度越快,单位时间内积碳量 也越大。文献[8]的研究结果则表明燃烧室火焰筒 的积碳量受到进口温度、压力和油气比的影响。文 献[9~13]则着重研究了温度对积碳的影响,研究 发现壁面温度和燃油温度对积碳量均有很大影响, 并在一定的壁温范围内,积碳量和壁温有很好的 线性关系。而停留时间也对影响到积碳,当停留时 间小于5~6h时,积碳速率随时间直线上升,当时 间大于6h后,积碳速率基本不变^[9]。此外,氧浓度 也会对积碳量产生很大影响,当燃油处在氮气缺氧 的环境中时,积碳量非常少以至于几乎可以忽略不 计[12]。

国内外对于积碳问题的研究,基本都集中在燃烧室火焰筒和燃油管道内壁上的积碳,对于旋流杯 文氏管积碳的过程缺少其内在机理的物理描述和分 析。GE公司对E3双环腔燃烧室曾做过有关文氏管 和喷嘴积碳的重要试验^[14],指出了影响旋流杯文氏 管积碳的重要设计准则:一级旋流器出口到文氏管 喉道的距离、文氏管喉道直径以及一级旋流器与文 氏管喉道的面积比。

本文选择了文氏管长度这一参数,分析旋流杯 内部及其下游的流场特性和温度分布,研究旋流杯 文氏管内的积碳问题。通过热态燃烧试验测试了文 氏管积碳特性,探索旋流杯文氏管长度对文氏管积 碳的影响规律。

2 研究对象

本文旋流杯设计为斜切径向双级旋流结构,一 二级旋流器旋向相反,一级旋流器采用斜切孔,二级 旋流器采用径向叶片的结构形式,且叶片形式为直 叶片。二级旋流数为0.8,一二级气量分配比为3:7, 采用扩张套筒结构,扩张角度为80°。试验燃油喷嘴 采用离心喷嘴,喷嘴流量为9.1kg/(h·MPa⁰⁵),喷雾锥 角为80°,采用国产航空煤油 RP-3 为试验燃油。

旋流杯文氏管包括方案A,方案B和方案C三个 方案,其文氏管喉道位置至喷嘴出口距离L依次增 大,分别是6mm,8mm,10mm。L越大,离心喷嘴喷出 的燃油打在文氏管上的位置越靠近文氏管出口,而 燃油打在文氏管内壁上的位置不同会对文氏管的积 碳情况产生影响。此外,所选三个方案喷嘴伸入旋 流杯深度一致,文氏管喉道直径及其与出口的距离 不变,文氏管旋流数也保持不变。三个方案旋流杯 截面图如图1所示,图中喷嘴出口出两条粗直线表示 喷嘴喷雾范围。



Fig. 1 Schematics of swirl cup and venturi (mm)

3 试验方法及系统

3.1 试验件

本文采用单头部矩形回流模型燃烧室作为试验 件,试验装置由测试段、过渡段以及试验段组成。试 验段包括矩形机匣、火焰筒、小流量离心喷嘴以及点 火电嘴等,其火焰筒实物如图2所示。旋流杯各部件 采用不锈钢材料,原因是不锈钢材料具有相对更大 的积碳速率^[15],便于试验后称重测量。



Fig. 2 Liner of the single module test combuster

3.2 试验系统

如图 3,整个试验系统由供气系统、排气系统、燃油系统、冷却系统和采集系统等部分组成。采用低 压气源进行供气,手动调节阀调节空气流量,空气质 量流量通过对测试段进行温度、静压、总-静压差测 试计算得到。油路系统采用挤压式供油,科氏质量 流量计测量燃油流量,手动调节阀控制燃油流量。 排气系统中为了实现加压工况要求,在试验段出口 和排气段之间加装有临界孔板。试验时对测试段的 总压、总-静压差、温度、火焰筒进出口总压、火焰筒 进出口差压和燃烧室出口温度进行了测量。

3.3 试验条件

由于积碳会在高温状态下发生分解^[12],因此选择在常温加压条件下对旋流杯方案进行文氏管积碳燃烧试验,试验系统如图3所示。在常温加压条件下进行实验是因为在该条件下燃油在火焰筒中能够进行较长时间的蒸发,且在头部进行的是典型的富油燃烧,化学反应不是很充分,高温区域会集中出现在主燃孔和掺混孔之间甚至是掺混孔之后,因此文氏管内部温度不会过高导致积碳分解,而且加压条件也有利于积碳的产生^[8]。同时因为旋流杯产生的旋流强度较大,在逆压梯度的作用下中心回流区向上游延伸,在文氏管内部也会出现相对高温燃气,导致积碳产生。而在燃烧室正常巡航工况下,进口压力约为0.2~1MPa,进口温度约为700K,均高于试验所选工况,所以根据文献[8,12]研究结果,在巡航状态下文氏管壁面积碳量更大。

试验时,模型燃烧室进口空气为常温,进口空气 压力为0.35MPa,火焰筒空气压降为2%,保持油气比 为0.024不变,试验持续时间为1h。由此,对三个方 案的旋流杯文氏管分别进行热态燃烧试验,以获得 文氏管积碳特性。

3.4 试验测量方法

热态试验中,积碳主要产生在文氏管内壁,且质 量甚微。综上考虑,本文对文氏管积碳的结果采用 定性与定量测量相结合的方法:使用数码相机先对 三个方案的文氏管积碳情况进行拍摄对比,通过观 察得到定性结果;然后采用电子分析天平(0~200g, 最小分辨率为0.1mg)对试验前后的文氏管重量进行 精确称量,得到定量的积碳数据。

3.5 试验结果及分析

定性拍照得到三个方案的文氏管积碳情况对比 如图4所示。

从图4中可以定性看出,随着文氏管长度的逐渐 增大,文氏管内壁上的积碳量是呈逐渐减少的趋势, 当文氏管长度增加到一定程度时,可以观察到方案 C 的文氏管内已经几乎没有明显的黑色积碳。此外, 也可以观察到积碳主要集中出现在文氏管喉道位置 附近,而喉道下游的积碳则不是很明显。

图 5 所示为三个方案的文氏管内壁上积碳质量 的三次定量称量结果的平均值,从图中可知,随着文 氏管长度的增加,其内壁上的积碳量随之减小,减小 幅度达到 99%,与定性拍照得到的结果相符。可见 增加文氏管长度对于文氏管积碳的抑制效果是十分 明显的。

4 数值分析

4.1 计算模型

采用 Fluent 商业软件对单头部回流燃烧室进行 三维数值仿真,为减少计算工作量和其他因素的干 扰,本文对单头部回流燃烧室进行了简化,将上下壁 面冷却斜孔用渗透壁代替,气流方向与设计一致,忽



Fig. 3 Schematic of the carbon deposition test system

略壁面冷却斜孔气流速度的影响,去掉大弯管复杂 冲击加发散冷却设计的双层壁,改为单层壁,并去掉 冷却孔改为渗透壁,给定气流方向与壁面相互垂直, 同时忽略了点火电嘴安装座的影响。计算过程中保 证各方案各部分的空气流量、流速和方向一致,并在 冷态条件下进行流量分配试验测定各部分的流量百 分数,以此给定各部分空气的质量流量。







Fig. 5 Quantitative results of the carbon deposition

数值仿真计算之前,先采用UG建模,生成流体 域如图6,再利用ICEM软件对流体域进行网格划分, 由于回流燃烧室结构非常复杂,整个计算域采用非 结构化网格划分,为了提高计算精度,改善网格质 量,在旋流杯一二级旋流器等流动比较复杂的地方 对其进行网格加密,并对网格质量进行倾斜度检查, 生成三维网格单元总数约为700万,网格节点数为 243万,网格最终生成结果如图7所示。



Fig. 6 Fluid domain of the module test liner

计算过程中采用非耦合隐式求解器,湍流模型选用 Realizable *k*-ε模型,近壁面采用标准壁面函数,离散相模型追踪油雾运动轨迹,使用 WAVE模型模拟燃

油的二次雾化,空心锥模型模拟离心喷雾,燃烧模型 采用非预混化学平衡燃烧模型,压力方程采用二阶精 度离散,动量、湍流动能以及湍流动能耗散率等控制 方程采用QUICK格式离散,利用解压力耦合方程半隐 式(SIMPLEC)算法对离散方程进行迭代求解。按照 Fluent软件的判断收敛准则,本文所得的计算结果进 出口流量相对误差小于1%,全部残差小于1.0×10⁻³。

与试验条件保持一致,采用质量流量进口和压力出口,基准方案下进口空气质量流量为0.078kg/s,进口压力为0.35MPa,进口总温为300K,进口湍流强度设为4%,燃油流量为0.0017kg/s。



Fig. 7 3-D gird of the computational domain

4.2 计算结果与分析

对所选A,B,C三个方案进行了热态两相喷雾燃烧场的对比研究,如图8,9所示为两相喷雾燃烧状态



Fig. 8 Schematic of recirculation zone of different cases



下不同方案中心截面回流区和文氏管内部的轴向速 度分布图,图9中红色垂直直线所示为轴向零速度 线,定义旋流杯出口中心处为坐标轴原点,沿流动方 向为X正向,从图中可以看出,不同文氏管长度下的 回流区结构式相似的,且主燃孔的相互对冲结构能 够很好地将回流区截止住,起到控制火焰长度的作 用,随着文氏管长度的增加,旋流杯在头部形成的回 流区长度以及最大宽度变化不大,说明长度的变化 对下游流场影响较小,但旋流杯内部的回流区尺寸

$$ssr = \sqrt{2((\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial w}{\partial z})^2) + (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2 + (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})^2}$$

公式为

式中*ssr*表示剪切率,*u*,*v*,*w*分别为*x*,*y*,*z*方向速度,单位为 m/s。

计算中湍流模型采用 realizable *k*-*ε* 模型,在近壁面采用标准壁面函数,计算结果中第一层网格质 心到文氏管内壁面的无量纲距离 Y*值均介于 30~60 之间,而且在近壁面剪切率随径向距离几乎呈线性 分布的区域内共铺设了十层网格。可以认为在近壁 面区域内网格数量是足够的,得到的剪切率结果是 可信的。



Fig. 10 Shear strain rate distribution at throat section of venturi

由于积碳量与温度只在一定温度范围内呈正相 关,温度过高反而会使碳分解,导致积碳量下降。所 以,单纯依靠热态流场得出的中心回流区带动的高 温燃气在旋流杯内的上止点位置是不足以确定文氏 管长度对文氏管积碳的影响机制的,还需要借助温 度场进一步判断。

如图 11 所示,本文选取 T=1000K 这一温度示意 高温区域对三个方案的两相喷雾燃烧温度场进行分 析,由图可知热态下不同文氏管长度方案的中心截 面温度场也具有相似性,且高温区域的分布范围也 基本相同,这说明长度的增加对于文氏管出口下游 的温度分布影响不大,这可能是因为不同方案只是 增加了文氏管的长度,但文氏管的喉道直径没有变 化,导致其对出口下游的高温区域分布影响没有对 上游影响那么大。从图中可以看出,在文氏管内部, 随着长度的增加,高温区域的分布位置由文氏管喉 道附近逐渐向外移动直至出口处。如图12所示为文 氏管内部的中心截面温度分布曲线,在喉道位置,随 着文氏管长度的增加,其内部气流温度由最高的 520K逐渐下降至接近进口温度的300K,而在出口位 置,温度也能从最高1400K左右大幅下降至800K附 近,而且越靠近喷嘴位置,温度峰值区域减小得越加 明显,这说明文氏管长度的增加主要减小了文氏管 出口上游的高温区域分布,而旋流杯文氏管的积碳

和回流速度峰值明显缩小,甚至被喉道给完全截止,

表明增加文氏管长度能够使气流在文氏管内能充分 发展,很好的控制了中心回流区在旋流杯上游的位

切率分布图,可见文氏管长度的增加能够导致壁面

附近的剪切率增大,这意味着油雾喷射到壁面时,更

容易被气流剪切成膜,不易形成积碳。剪切率计算

如图10所示为不同方案文氏管喉道截面处的剪

置,限制了高温燃气向上游的传递。



Fig. 11 Schematic of high-temperature areas of different cases



Fig. 12 Temperature distribution at throat and exit section of venturi

是与其内部温度场密切相关的,文献[12]的研究表 明,在300~550K,由于氧和碳氢燃料之间发生自氧 化反应,积碳速率随着温度的上升基本呈线性增长, 而当温度增加至550K以上时,随着温度的增加,积 碳则会发生分解,所以文氏管喉道下游积碳不如上 游明显。综上所述,积碳集中出现位置为文氏管喉 道附近,且增加文氏管的长度能够有效抑制燃油在 文氏管内部的化学反应,从而减少甚至消除了文氏 管积碳的发生。

5 结 论

本文利用试验数值结合研究了旋流杯文氏管长 度对文氏管积碳特性的影响,主要结论如下:

(1)文氏管积碳主要集中出现在文氏管喉道位 置附近,而喉道下游的积碳则不明显。

(2)文氏管长度对文氏管下游的流场及温度场 影响较小,下游回流区及高温区域尺寸不大,但对文 氏管内部的流场和温度场会造成较大影响。

(3)随着文氏管长度的增加,中心回流区上止点向下游移动,文氏管喉道附近的负速度峰值及区域明显减小,方案C相较于方案A峰值减小幅度可达99%。

(4)增加文氏管长度,能够增强气流在文氏管壁 面附近的剪切作用,使燃油更容易剪切成膜,增强雾 化效果,在一定程度上有利于抑制积碳。

(5)随着文氏管长度的增加,文氏管喉道附近的 温度峰值及高温区域不断减小,方案C相较于方案A 温度峰值降低约35%,文氏管积碳量明显减小,减小 幅度达99%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Mongia H C, Al-Roub M, Danis A, et al. Swirl Cup Modeling Part I[R]. AIAA 2001-3576.
- [3] 彭云晖,林宇震,许全宏.双旋流空气雾化喷嘴喷雾、流动和燃烧性能综述[J]. 航空学报,2008,29
 (1):1-14.
- [4] Ateshkadi A, McDonell V G, Samuelsen G S. Effect of Hardware Geometry on Gas and Drop Behavior in a Radi-

al Mixer Spray [R]. The Combustion Institute, 1998. 1985 - 1992.

- [5] 徐学明,殷 贤,杨书忠,等.催化裂化油浆系统结 焦的分析及优化措施[J].河南化工,2006,23(5): 28-29.
- [6] Ren Yan, Mahinpey Nader, Freitag Norman. Kinetic Model for the Combustion of Coke Derived at Different Coking Temperatures [J]. Energy & Fuels, 2007. 21 (1): 82-87.
- [7] Chin J S, Lefebvre A H. Influence of Flow Conditions on Deposits From Heated Hydrocarbon Fuels [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(3): 433-438.
- [8] Starkman E S, Cattaneo A G, McAllister S H. Carbon Formation in Gas Turbine Combustion Chambers [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1951, 43 (12): 2822 - 2826.
- [9] Chin J S, Lefebvre A H, Sun F T-Y. Temperature Effects on Fuel Thermal Stability[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(2): 353-358.
- [10] Giovanetti A J, Szetela E J. Long-Term Deposit Formation in Aviation Turbine Fuel at Elevated Temperature
 [J]. Journal of Propulsion and Power, 1986, 2(5): 450-456.
- [11] Brandauer M, Schulz A, Wittig S. Mechanisms of Coke Formation in Gas Turbine Combustion Chambers [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(2): 265-270
- [12] Heneghan S P, Zabarnick S, Ballal D R. JP-8+ 100: the Development of High Thermal Stability Jet Fuel[R]. AIAA 96-0403.
- [13] He Huang, Xia Tang, Martin Haas. In-Situ Continuous Coke Deposit Removal by Catalytic Steam Gasification for Fuel-Cooled Thermal Management[R]. ASME 2012 GT-68012.
- [14] 航空工业部主编.高效节能发动机文集第四分册[C].北京:航空工业出版社,1991.
- [15] Kendall D, Mills J. The Influence of JFTOT Operating Parameters on the Assessment of Fuel Thermal Stability
 [R]. SAE Technical Paper 851871, 1985.

(编辑:梅 瑛)