

【航空科学与工程研究】

无掺混孔中心分级燃烧室性能数值研究

毕正炎隆, 王成军

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要:以一种无掺混孔的中心分级燃烧室为研究对象,通过改变燃烧室中三级旋流器结构参数,利用数值模拟研究旋流器结构对燃烧室性能的影响。首先使用控制变量法,通过改变各级旋流器叶片的安装角大小及旋向设计了研究方案,再通过 FLUENT 进行数值模拟,最后对数值模拟的结果进行分析并得出结论。结果表明:第一、二级旋流器叶片的结构对燃烧室的回流区大小和出口温度分布影响较小,而第三级旋流器叶片安装角大小对燃烧室的回流区和出口温度分布影响较大;第三级旋流器安装角越大,回流区越大,燃烧就越充分,燃烧室出口温度分布就越均匀。

关键词:掺混孔;中心分级燃烧室;旋流器;数值模拟

中图分类号: V 231.2 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.06.003

0 引言

随着社会发展,人们对飞机性能的要求越来越高,飞机对发动机推重比的要求也日渐提高,而增大涡轮前温度是提高飞机发动机推重比的有效手段之一。在提高发动机燃烧温度的同时,飞机尾喷管排放的 NO_x 对臭氧层的破坏问题也不容忽视。常规航空发动机很难做到具有高温升的同时兼顾低排放,而利用中心分级燃烧技术的中心分级燃烧室就解决了这一难题^[1-2]。旋流器是中心分级燃烧室的重要部件之一,位于燃烧室的前端;来自压气机的空气进入旋流器后,气流会发生旋转运动,这有利于燃油的雾化;气流因为离心力向壁面运动,在燃烧室靠近轴线的区域形成低压区,导致回流区的产生;回流区较低的气流速度,有利于点火,并稳定燃烧。近年来很多学者都开展了旋流器对中心分级燃烧室影响的研究。Thundil 等^[3]为得出旋流器叶片最佳角度,进行了试验研究和数值模拟,结果表明叶片最佳角度为 45° 。Li 等^[4]通过试验研究了三级旋流器的流场,发现旋流器叶片的参数对燃烧室回流区影响较大,并且射流区域的湍流强度浓度降低。陈科华等^[5]通过 PIV 试验与数值模拟相结合对不同旋流数的旋流器以及不同结构的燃烧室进行了对比研究分析,结果表明 Realizable $k-\epsilon$ 模型数值计算结果更为合理,预燃级结构参数对燃烧室性能影响不明显。呼姚等^[6]设计 6 种有相反旋向的两级旋流器通过数值计算和试验验证,得出了回流区大小适宜,燃烧室出口温度分布均匀的旋流器最佳设计方案。李美焯等^[7]对两种不同主燃级旋流数的中心分级燃烧室进行了数值模拟和试验研究,结果表明主燃级旋流数影响了燃烧室的流场分布,同时会影响预燃级的回流区,使其位置后移。苗森等^[8]通过数值模拟研究了三级旋流器叶片角度对 TAPS 燃烧室性能的影响,结果表明各级叶片安装角增加都会使燃烧效率和压力损失增大,并且第三级叶片安装角的增

收稿日期:2023-09-15

第一作者简介:毕正炎隆(1998—),男,辽宁东港人,硕士研究生,主要从事航空发动机燃烧设计研究。

E-mail:741971120@qq.com

加还会使燃烧室回流区增大。陈溯敏等^[9]通过试验研究两级旋流杯叶片安装角、流量比、流通面积和扩张角对燃烧室流场的影响, 结果表明增加叶片安装角有利于油气的掺混; 旋流杯两级流量比增加有利于燃油的雾化, 但不利于稳定燃烧; 流通面积的增加, 会使回流变大, 有利于燃烧的稳定; 扩张角的增加会使得气流径向扩散能力增加。顾大鹏等^[10]通过 PIV 对中心分级燃烧室的冷态流场进行试验, 对比不同流通面积的旋流器出口流场, 结果表明副模旋流器单独工作对回流区影响不大, 说明副模旋流器主要起提供高速气流和促进油气混合的作用; 压降不变的情况下, 增加主模旋流器流通面积, 空气流量增加, 对燃烧室头部流场分布影响显著, 回流区位置和最大速度位置都发生改变。肖周世冀等^[11]利用 9 种不同结构的旋流器对一中心分级燃烧室的冷态流场进行了数值模拟和 PIV 试验, 提出了一种新的湍流交换量化方法并得出了不同结构旋流器的湍流交换结果。马钰等^[12]以一中心分级燃烧室中的三级斜切式旋流器为研究对象, 利用了数值模拟的方法对不同结构的旋流器进行了仿真模拟并对结果进行分析, 结果表明第一级旋流器斜切孔为 25° 、第二级旋流器安装角为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 、第三级旋流器旋流孔为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时, 回流区大小和燃烧室燃烧性能最佳。以上对中心分级燃烧室的研究主要都是利用数值模拟和试验研究的方法, 通过改变旋流器的各项结构参数来研究燃烧室性能。

本文的研究对象是一种无掺混孔中心分级燃烧室。利用数值模拟的方法, 改变旋流器叶片安装角及向来研究燃烧室性能, 为旋流器结构的优化和燃烧室燃烧效率的提高提供参考。

1 研究对象

1.1 物理模型

本文采用 UG 建立无掺混孔中心分级燃烧室三维几何模型。图 1 为火焰筒结构示意图。现在飞机对发动机推重比要求不断提高, 为达到高温升目的, 只在火焰筒上设置冷却孔, 不设置掺混孔。图 2 为燃烧室设计尺寸示意图。燃烧室设计参数: 火焰筒径向高度 H_1 为 120 mm, 二股气流通道径向高度 H_2 为 30 mm, 环形出口高度 H_3 为 74 mm, 环形火焰筒头部面积 A_1 为 0.266 m^2 , 二股气流通道面积 A_2 为 0.112 m^2 , 矩形火焰筒截面积 A_3 为 0.0141 m^2 , 矩形火焰筒宽度 L_w 为 120 mm, 火焰筒个数为 16 个, 主燃区长度 L_{pc} 为 108 mm, 掺混区长度 L_d 为 180 mm, 火焰筒总长度 L 为 288 mm。

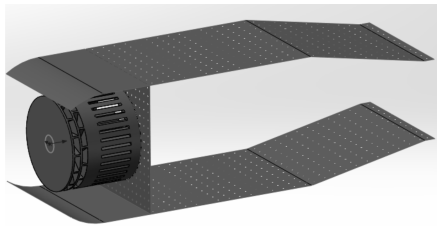


图 1 中心分级燃烧室火焰筒结构图

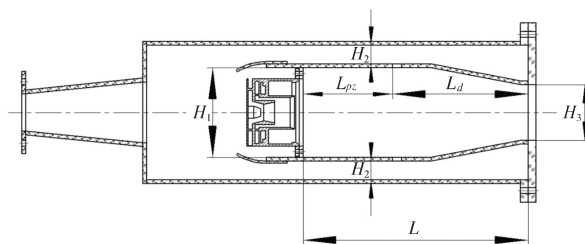


图 2 燃烧室计算尺寸示意图

本文的模型通过引入压气机的冷空气到火焰筒壁上设置的冷却孔来冷却火焰筒。第一、二级旋流器分别占空气总流量的 6% 和 9%。由于火焰筒未设置掺混孔, 所以主燃级即第三级旋流器占空气总流量 85%。根据空气流量分配, 冷却孔的设计采用公式 $A_c = \frac{m_c}{C_c \sqrt{2\rho\Delta P_c}}$ 和 $n_c = \frac{4}{\pi} \frac{A_c}{d_c^2}$ 。式中: A_c 为流通总面积, m_c 为空气质量, C_c 为冷却孔流量系数, ΔP_c 为压力差, n_c 为冷却孔数量, d_c 为冷却孔直径。采用上述公式计算, 需直径为 1.5 mm 的冷却孔 900 个。

本文燃烧室的旋流器由值班级和主燃级两部分组成。值班级由旋流器、文氏管和压力喷嘴三部分组成; 主燃级由第三级旋流器和喷嘴两部分组成。一级旋流器叶片数 12 片, 叶片宽 6 mm, 喉道高 5.6 mm; 二级旋流器叶片数 12 片, 叶片宽 6 mm, 喉道高 5.0 mm; 三级旋流器叶片数 36 片, 叶片宽 30 mm, 喉道高

2.5 mm。

1.2 单计算区域网格划分及网格无关性验证

本文主要研究燃烧室的回流区以及燃烧室出口区域的流场和温度场,使用 Gambit 进行网格划分时,对这两个区域进行加密处理。为减少模型计算时间,其他部分采用较少的网格。由于旋流器结构较为复杂,所以在旋流器区域使用四面体网格并进行加密处理。图 3 为旋流器网格示意图。

通过设置 506 万、515 万、540 万、586 万网格,对网格进行无关性验证。图 4 为四种不同网格数计算出的回流区大小。由图可以看出,回流区的大小相差不大,说明这四种方案的网格数量对回流区大小无影响。在保证计算精确的前提下,选择网格数最少的方案,可以节省计算时间。



图 3 中心分级旋流器网格示意图

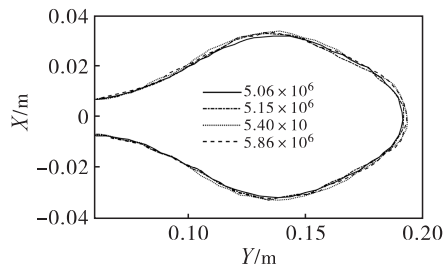


图 4 不同网格数方案回流区大小示意图

1.3 边界条件

因燃烧室内气体雷诺数较高,使用 Realizable $k-\epsilon$ 模型。将流体视为理想气体,速度-压力耦合采用 SIMPLE 方法求解,采用二阶迎风格式,隐式分离的方法求解。进口设置成质量流量入口,温度 850 K,流量 3.75 kg/s,湍流强度 5%,直径 0.109 m;出口设置为压力出口,水力直径 0.09 m;喷嘴直径设置为 0.002 m,温度 300 K;燃烧室模型的侧边设为周期性边界条件,其他的壁面设为绝热壁面。

2 研究方法

通过控制变量法,改变各级旋流器叶片安装角的大小及叶片旋向,分析旋流器结构对燃烧室的影响。具体设计方案如表 1 所示。方案 B、C、D 相对于方案 A 只改变第一级旋流器安装角大小。方案 E、F、G 与方案 A 相比只改变第二级旋流器安装角大小。方案 H、I、J 与方案 A 相比只改变第三级旋流器安装角大小。方案 K、L 与方案 A 相比只改变了第一级旋流器叶片的旋向和第三级旋流器叶片的旋向。

表 1 各级旋流器结构参数方案

方案	第一级旋流器 叶片安装角	第二级旋流器 叶片安装角	第三级旋流器 叶片安装角	方案	第一级旋流器 叶片安装角	第二级旋流器 叶片安装角	第三级旋流器 叶片安装角
A	45°(顺时针)	45°(逆时针)	45°(逆时针)	G	45°(顺时针)	70°(逆时针)	45°(逆时针)
B	30°(顺时针)	45°(逆时针)	45°(逆时针)	H	45°(顺时针)	45°(逆时针)	30°(逆时针)
C	60°(顺时针)	45°(逆时针)	45°(逆时针)	I	45°(顺时针)	45°(逆时针)	60°(逆时针)
D	70°(顺时针)	45°(逆时针)	45°(逆时针)	J	45°(顺时针)	45°(逆时针)	75°(逆时针)
E	45°(顺时针)	30°(逆时针)	45°(逆时针)	K	45°(逆时针)	45°(逆时针)	45°(逆时针)
F	45°(顺时针)	60°(逆时针)	45°(逆时针)	L	45°(顺时针)	45°(逆时针)	45°(顺时针)

3 结果分析

3.1 第一级旋流器叶片安装角对燃烧室性能的影响

图 5 是改变第一级旋流器安装角及旋向方案的回流区曲线图,其中方案 B、C、D 相较于方案 A 只改

变了第一级旋流器的安装角,方案 K 只改变了第一级旋流器叶片旋向。由图 5 可以看出,A、B、C、D、K 五种方案的回流区大小相差不大,但方案 B 的回流区要比其他四种方案径向长度稍长一些,回流区前段宽度较其他四种方案要小一些。这是由于方案的旋流器安装角较小,所以回流区宽度减小,长度拉长。这不利于主燃区稳定,而其他四种方案回流区较宽有利于稳定火焰。总的来说,第一级旋流器的安装角大小主要影响回流区的前段,对回流区整体影响很小,第一级旋流器叶片旋向对回流区无影响。

图 6 为方案 A、B、C、D、K 沿轴向 120 mm 处径向截面 Y 轴速度变化。由图可以看出,五种方案 Y 轴速度变化相差不大。图中 Y 轴速度变化呈现出 W 形,中间轴线位置和靠近壁面处 Y 轴速度最低,并且有两个明显的速度峰值。角涡出现的位置大致相同,但方案 B、D 的角涡位置更靠近中轴线,不利于值班级燃气参与主燃级的燃烧。

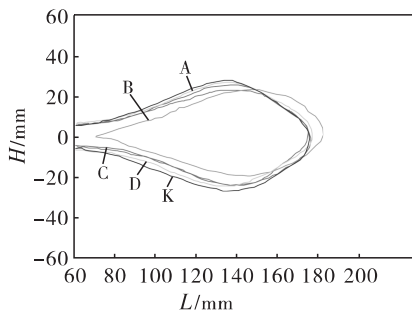


图 5 第一级旋流器设计方案的回流区曲线

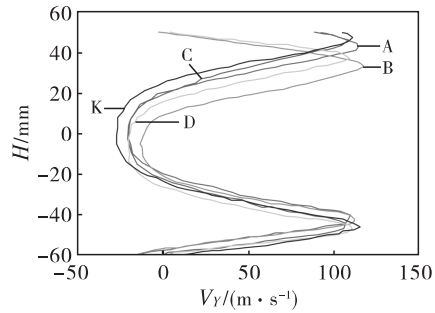


图 6 第一级旋流器设计方案在 Y=200 mm 处 Y 轴速度曲线

图 7 为方案 A、B、C、D、K 回流区沿轴线方向上 Y 轴速度变化。由图可以看出,方案 B 在值班级处的速度和其他方案相比较小,这是由于安装角较小造成的。整体上看,值班级的速度要明显小于主燃级速度。在 Y=180 mm 之前 Y 轴速度都处于较低的状态,值班级燃气低速有利于其扩散燃烧,并且能帮助稳定主燃区的燃烧。主燃区燃气速度在经过回流区后一直增加,即通过 Y=180 mm 后。在燃烧室尾端,由于冷却气体的汇入,气流速度变慢。

图 8 给出了方案 A、B、C、D、K 的燃烧室出口径向温度分布。由图可以看出,方案 A、B、C、D 四种不同安装角的出口径向温度差别不大,而改变旋向的方案 K 在靠近轴线位置的温度明显低于方案 A。整体而言,第一级旋流器叶片安装角尺寸对出口温度影响较小。顺时针旋向的最高温度比逆时针旋向的最高温度高大约 100 K。

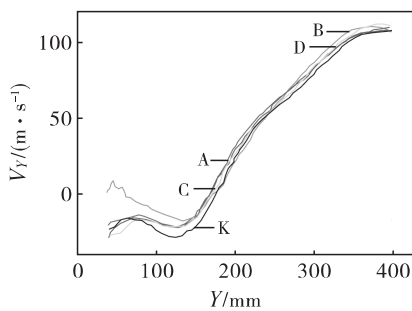


图 7 第一级旋流器设计方案沿轴线方向 Y 轴速度曲线

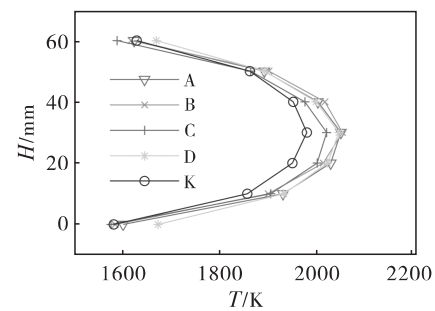


图 8 第一级旋流器设计方案的燃烧室出口径向温度分布曲线

图 9 给出了方案 A、B、C、D、K 的燃烧室出口温度分布。五种方案的温度范围相差不大。其中 A、B、C 三种方案的最高温度比 D、K 方案的最高温度高 100 K。方案 A、C、K 的高温区在出口两侧呈对称分布;方案 B 的高温区处于出口中心处;方案 D 的高温区则呈带状分布。第一级旋流器主要影响燃油雾化

效果,安装角增加,使得燃油雾化程度更佳,从而使得燃烧室出口温度分布更均匀。

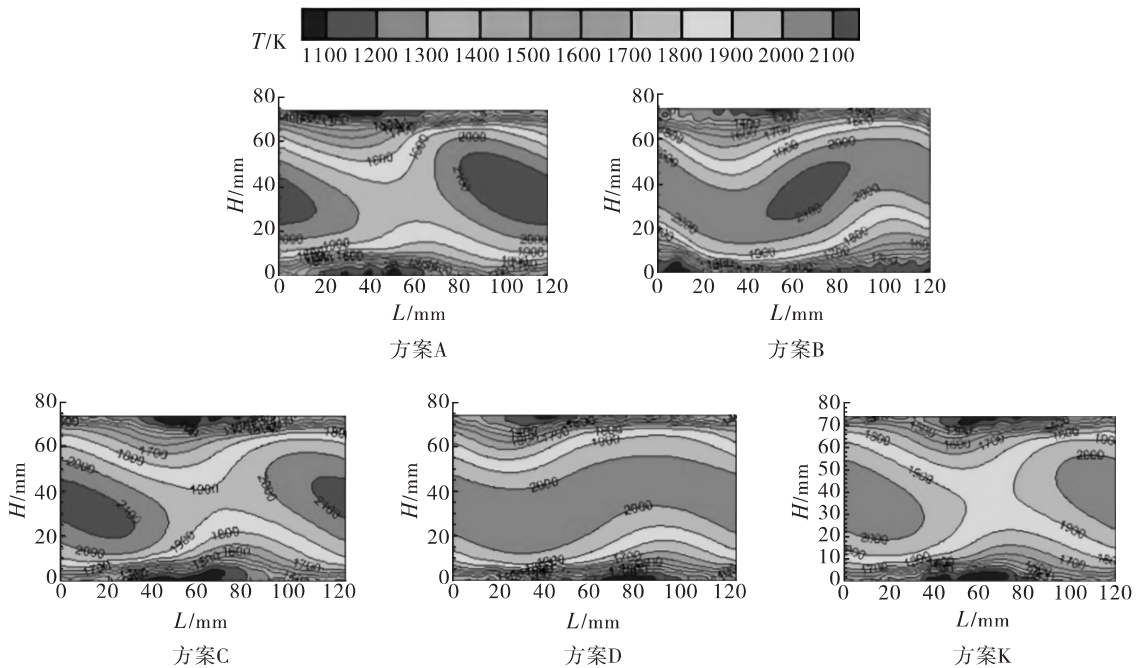


图 9 第一级旋流器设计方案的燃烧室出口温度分布云图

3.2 第二级旋流器叶片安装角对燃烧室性能的影响

图 10 为方案 A、E、F、G 的回流区曲线图。四种方案回流区沿径向宽度相近,但 G 方案回流区轴向长度明显大于其他三个方案。这是由于安装角过大导致回流区变长,不利于燃烧稳定。可见,改变值班级第一级旋流器叶片和第二级旋流器叶片对回流区大小的影响都不是很大。值班级主要起到辅助雾化燃料的功能,主燃级对回流区影响较大。

图 11 为方案 A、E、F、G 沿轴向 120 mm 处径向截面 Y 轴速度变化。由图可以看出, A、E、F、G 四种方案 Y 轴速度变化规律几乎一致。角涡位置没有特别靠近中轴线,有利于值班室燃气排放到主燃级,参与主燃级燃烧。

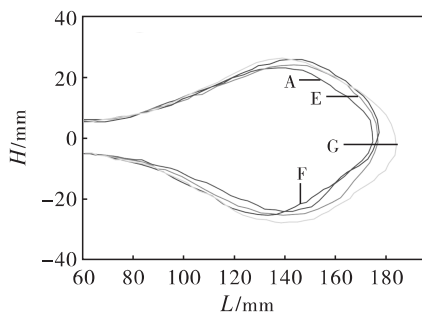


图 10 第二级旋流器设计方案的回流区曲线

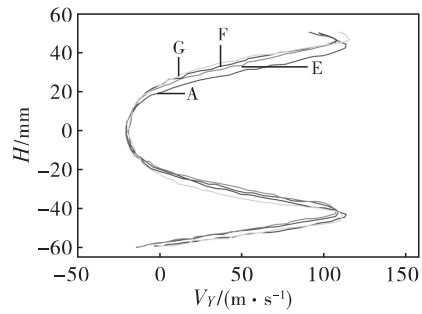


图 11 第二级旋流器设计方案在 Y=200 mm 处 Y 轴速度曲线

图 12 为方案 A、E、F、G 第二级旋流器叶片不同安装角下回流区沿轴线方向上 Y 轴速度变化。四种方案 Y 轴速度变化相近。在值班级区域速度明显低于主燃级。燃气在 Y=180 mm 前 Y 轴速度都处于负值,先增加后减小,当速度减为 0 后通过回流区速度变为正值并逐渐增加,在后端速度增加变缓慢。

图 13 为第二级旋流器叶片不同安装角的燃烧室出口径向温度分布。由图以看出,四种方案的燃烧室径向温度分布规律相同最高温度都出现在轴线处,最低温度出现在靠近壁面处。说明第二级叶片安装角

的大小变化对燃烧室出口径向温度分布的影响很小。

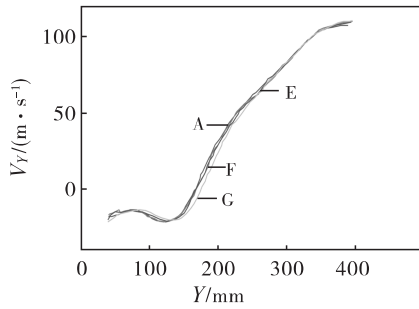


图 12 第二级旋流器设计方案
沿轴线方向 Y 轴速度曲线

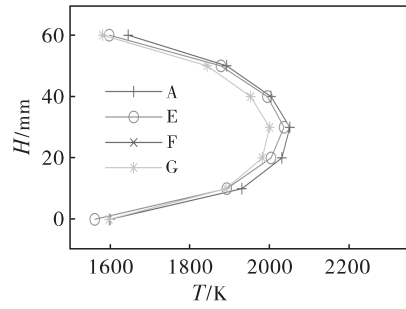


图 13 第二级旋流器设计方案的燃烧室
出口径向温度分布曲线

图 14 给出了第二级旋流器叶片不同安装角的燃烧室出口温度分布。由图可以看出, 方案 A、E、F、G 的燃烧室出口温度范围和分布大致相同, 都是高温区靠两端呈对称分布, 但是方案 F 的高温区域要明显比方案 A、E、G 的高温区域小。

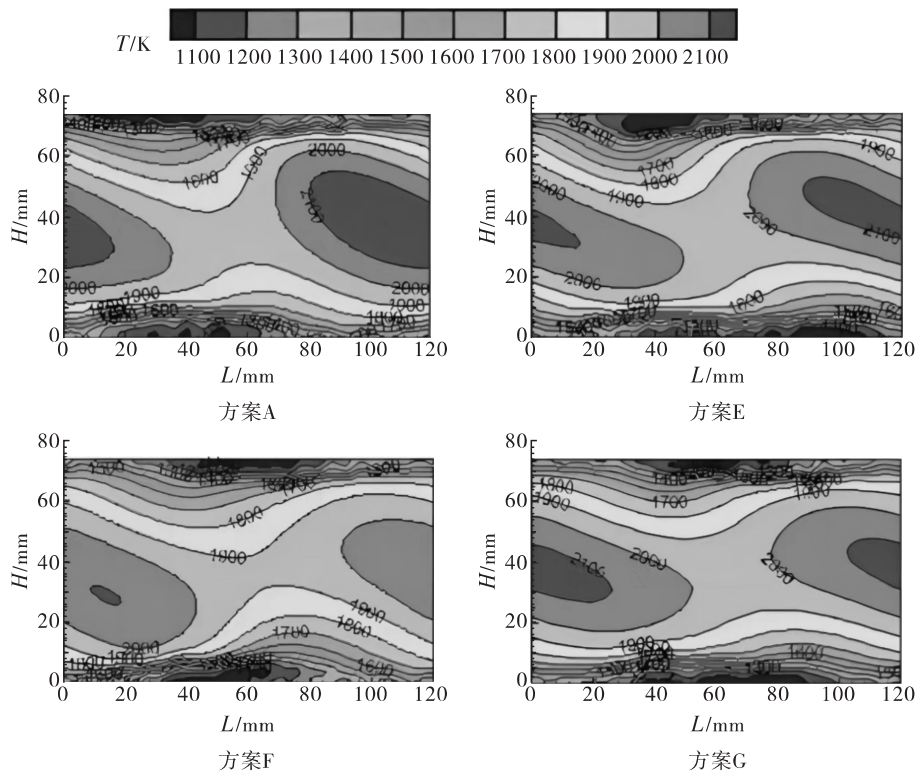


图 14 第二级旋流器设计方案的燃烧室出口温度分布云图

3.3 第三级旋流器叶片安装角对燃烧室性能的影响

图 15 为方案 A、H、I、J、L 的回流区曲线图。方案 I、J 的回流区径向宽度基本一致并且略大于方案 A, 但方案 A 回流区的轴向长度要大于方案 I 和方案 J。方案 I、J 的回流区最大宽度位置相比方案 A 前移, 方案 H 的回流区大小明显小于其他方案的回流区, 并且回流区相比于方案 A 发生后移, 方案 L 和方案 A 回流区大小基本一致。整体而言, 第三级旋流器的叶片安装角大小, 对回流区的大小和回流区位置的影响都很大, 安装角越大, 回流区的径向宽度越大, 对燃烧越有利。

图 16 为方案 A、H、I、J、L 沿轴向 120 mm 处径向截面 Y 轴速度变化。由图可以看出, 除了方案 H, 其他四种方案的 Y 轴速度相差相近。方案 H 的角涡比其他方案更接近中轴线, 这不利于值班级燃气参与主

燃级的燃烧,会导致主燃级燃烧不稳定、不充分。

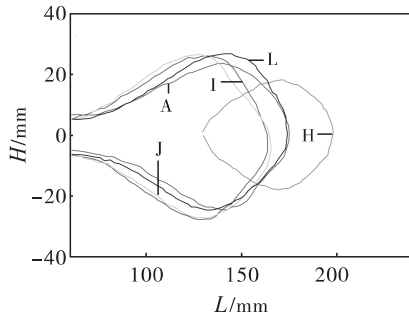


图 15 第三级旋流器设计方案的回流区曲线

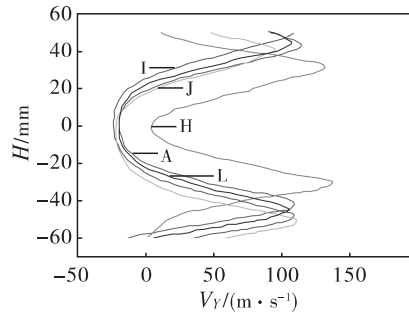


图 16 第三级旋流器设计方案在 Y=200 mm 处 Y 轴速度曲线

图 17 为方案 A、H、I、J、L 的回流区沿轴线方向上 Y 轴速度变化。其中除了方案 H,其他四种方案沿轴线方向的 Y 轴速度几乎一致。方案 H 是由于安装角过小,导致了 Y 轴速度变化较大,主燃区后移。

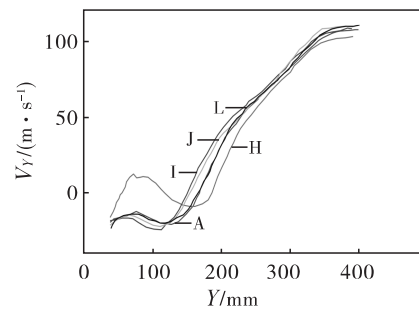


图 17 第三级旋流器设计方案沿轴线方向 Y 轴速度曲线

图 18 给出了第三级旋流器叶片不同安装角及旋向的燃烧室出口温度分布。其中方案 H、I、L 和方案 A 的温度分布大致相同,都有两块高温区并且呈对称分布,而方案 J 的高温区则呈带状分布。方案 A、H、L 的最高温度要比方案 I、J 高大约 100 K。第三级旋流器主要影响回流区大小,安装角的增加使得回流区增大,燃烧更充分,燃烧室出口温度分布更均匀。

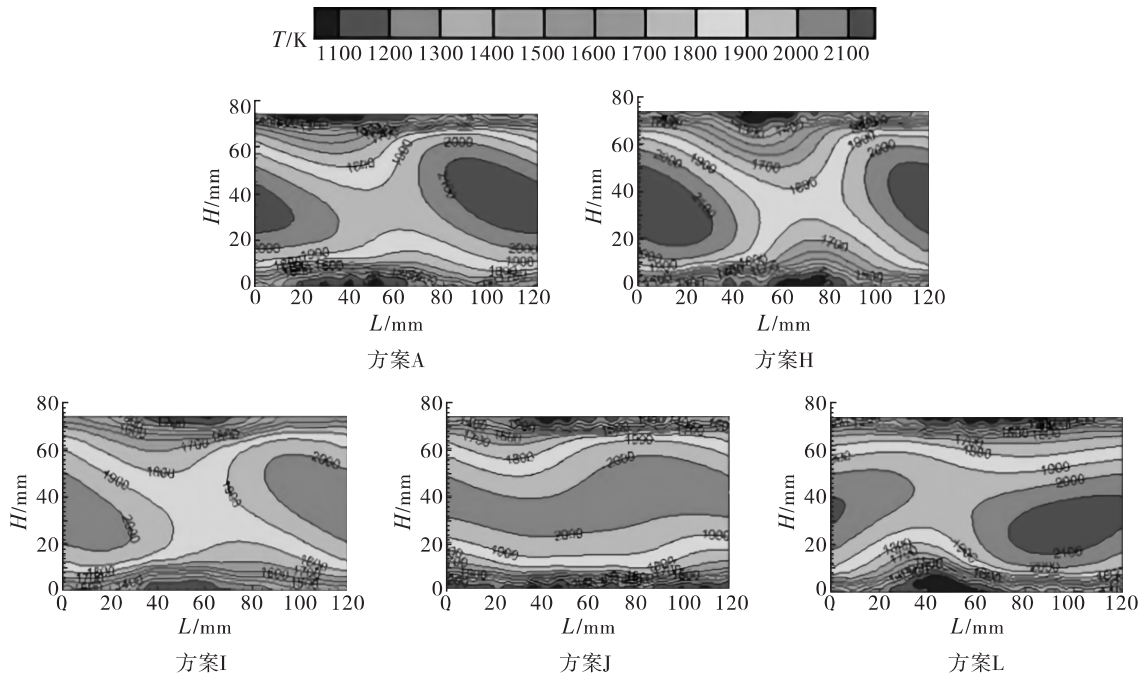


图 18 第三级旋流器设计方案的燃烧室出口温度分布云图

图 19 为第三级旋流器叶片不同安装角的燃烧室出口径向温度分布。由图可以看出,方案 A、H、I、J 的燃烧室径向出口温度分布规律大致相同,最高温都出现在轴线处,最低温度出现在靠近壁面处,但是最高温度大小有明显区别,说明主燃级旋流器叶片安装角的大小起主要影响作用。方案 L 和方案 A 的燃烧

室出口径向温度分布基本一致,这表明第三级旋流器的安装角旋向的改变对燃烧室出口的径向温度分布基本没有作用。

4 结论

本文通过改变各级旋流器叶片不同安装角大小及旋向,来研究燃烧室的性能,最后通过分析数值模拟的结果得出以下结论。

(1)值班级安装角大小要适中,过大或者过小都对回流区径向宽度产生影响,进而影响主燃区的燃烧。值班级旋流器参数的变化对燃烧室的回流区影响很小,回流区的大小主要和主燃级的结构参数有关。第三级旋流器安装角越大,回流区越大,而旋向对回流区大小无影响。值班级燃气速度要明显小于主燃级,有利于燃烧的稳定。

(2)结构参数的变化对燃烧室出口温度范围影响微乎其微。旋流器结构不同的情况下,燃烧室出口最高温度基本相同。第二级旋流器叶片几乎不影响燃烧室出口温度的分布,而第一级旋流器叶片旋向为顺时针时的最高温度要比逆时针时高 100 K 左右。主燃级旋流器叶片安装角增大,燃烧更加充分。

(3)第一、二级旋流器叶片的结构对燃烧室的回流区大小和出口温度分布影响较小,而主燃级旋流器叶片结构对燃烧室的回流区大小和出口温度分布起主要影响作用。为了保证值班级的雾化效果,值班级中的两级旋流器叶片需要设置成相反的旋向。综合考虑第一、二级旋流器安装角可以选择 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$,第三级旋流区安装角选择 60° 。

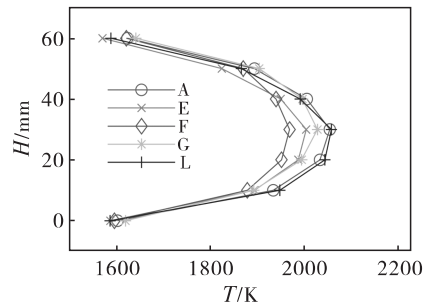


图 19 第三级旋流器叶片设计方案的燃烧室出口径向温度分布曲线

参考文献:

- [1] 彭云晖,林宇震,刘高恩.三旋流器燃烧室出口温度分布的初步试验研究[J].航空动力学报,2007(4):554-558.
- [2] 林宏军,尚守堂,程明,等.高油气比燃烧技术工程应用与发展分析[J].航空发动机,2021,47(4):72-81.
- [3] THUNDIL K R R,GANESAN V. Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers[J]. International journal of thermal sciences,2008,49(9):1204-1225.
- [4] LI G, ANGIER S, LAMBOLEZ O, et al. Experimental study of velocity flow field for a multiple swirl spray combustor [C]//Aiaa Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 2002. DOI: 10. 2514/6. 2002-618.
- [5] 陈科华.中心分级燃烧室流场特性的研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2017.
- [6] 呼姚,赵传亮,白瑞强,等.双级径向旋流器对燃烧性能的影响[J].航空发动机,2021,47(1):19-24.
- [7] 李美焯,程明,林宏军,等.主燃级旋流数对中心分级燃烧室流场的影响[J].航空发动机,2018,44(6):50-53.
- [8] 苗森,陆景贺,杨家龙.旋流器结构参数对 TAPS 燃烧室性能的影响[J].燃气轮机技术,2019,32(4):10-14.
- [9] 陈溯敏,姜磊,王博涵,等.旋流杯结构对火焰筒头部流场影响的试验研究[J].燃气轮机技术,2020,33(4):7-16.
- [10] 顾大鵬,沈忱,杨帅,等.基于 PIV 的中心分级燃烧室冷态流场试验[J].航空发动机,2023,49(1):

76-80.

- [11] 肖周世冀,肖为,曹俊,等.基于中心分级燃烧室的冷态湍流质量交换大涡模拟[J/OL].航空动力学报:1-9[2023-03-22].DOI:10.13224/j.cnki.jasp.20230033.
- [12] 马钰,王成军,里海洋,等.旋流器结构对中心分级燃烧室热态流场的影响[J].滨州学院学报,2023,39(4):15-22.

Numerical Study on Performance of Central Staged Combustor without Dilution Hole

BI Zhengyanlong, WANG Chengjun

(School of Aeroengine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: A central staged combustor without dilution hole is taken as the research object. By changing the structural parameters of the three-staged swirler in the combustor, the influence of the swirler structure on the performance of the combustor is studied by numerical simulation. Firstly, the control variable method is used to design a research scheme by changing the installation angle size and rotation direction of each level of swirler blade. And then numerical simulation is carried out by FLUENT. Finally, the results of numerical simulation are analyzed and conclusions are drawn. The results show that the structure of the first and second staged swirler blades has little influence on the size of the recirculation zone and outlet temperature distribution in the combustion chamber, while the installation angle of the third stage swirler blades has a great influence on the recirculation zone and outlet temperature distribution in the combustion chamber. The larger the installation angle of the third stage swirler, the larger the recirculation zone, the more full the combustion, and the more uniform the temperature distribution at the combustion chamber outlet.

Keywords: dilution hole; central staged combustion chamber; swirler; numerical simulation

(责任编辑:唐立平)