

【航空科学与工程研究】

旋流器结构对中心分级燃烧室 热态流场的影响

马 钰, 王成军, 里海洋, 于建桥

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要:以装有三级斜切式径向旋流器的中心分级燃烧室为研究对象,利用数值模拟和控制变量的方法分别进行了值班级第一级旋流器斜切孔角度、值班级第二级旋流器叶片安装角和主燃级旋流器旋流孔角度对中心分级燃烧室热态流场影响的仿真和对比分析。结果表明:当值班级第一级旋流器斜切孔和值班级第二级旋流器叶片安装角角度分别为 25° 和 $30^\circ\sim 45^\circ$,主燃级旋流器旋流孔角度为 $45^\circ\sim 60^\circ$ 时,中心回流区的形状最好,中心分级燃烧室热态流场的品质最佳。

关键词:旋流器结构;中心分级燃烧室;热态流场;数值模拟

中图分类号: V 231.2 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.04.002

燃烧室作为航空发动机核心机的重要组成部分,对航空发动机的推力和效率等性能会产生很大影响。为满足推力更高、环保更好的要求,航空发动机朝着高温升、低污染排放的方向发展^[1],近年来研发的中心分级燃烧室的分级燃烧技术能同时满足高温升、低污染排放的要求^[2]。中心分级燃烧室的头部装有由值班级(又叫预燃级)和主燃级组成的旋流器^[3],通过同心圆的方式连接在一起,它们分别产生旋流,并通过中心分级燃烧室内流场及温度场的作用,实现高温升及高容热燃烧的目标^[4]。

关于旋流器对中心分级燃烧室性能的影响,国内外学者进行了大量研究。呼姚等^[5]采用数值模拟研究了双级径向旋流器的结构参数对燃烧室燃烧性能的影响,结果表明,只增加主旋流器或副旋流器旋流数时,OTDF 均先减小后增大;苗森等^[6]采用数值模拟的方法研究了三级旋流器叶片安装角对双环预混旋流(TAPS)燃烧室性能的影响,结果显示当第一、二级旋流器叶片安装角增大时,燃烧效率和压力损失上升,当第三级旋流器叶片安装角增大时,燃烧效率也逐渐上升;程明等^[7]采用数值模拟与性能试验相结合的方法,研究了旋流杯中副旋流器的旋流数和相对进气量对燃烧室出口温度场分布和 NO_x 排放量的影响,结果表明,随着旋流数增加, NO_x 排放量也增加,出口温度场的分布逐渐变好,当旋流数大于 1.0 后,出口温度场的分布开始逐渐变差,随着相对进气量地不断增加,出口温度场的分布越来越差,而 NO_x 排放量则逐渐降低;陈溯敏等^[8]通过采用 2D-3C 粒子图像测速仪进行试验的研究手段,研究了旋流杯的结构参数和气动参数对燃烧室头部冷态流场的影响,结果表明,随着旋流杯的叶片安装角增加,燃烧室头部总压损失和回流量也增加,回流作用逐渐增加,但叶片安装角增大到一定角度后,回流区将向后移动,不利于火焰的稳定,旋流杯流量比的增加能够提高燃油和空气的掺混质量,但流量比不宜过大;Lazik 等^[9]通过改变值班级旋流器和主燃级旋流器叶片安装角角度、数量等参数,研究了中心分级贫油燃烧室(Lean-burn)中旋

收稿日期:2023-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51476106)

第一作者简介:马 钰(1997—),男,贵州织金人,硕士研究生,主要从事航空发动机燃烧室技术研究。

E-mail:1692148553@qq.com

流器的旋流强度对燃烧室燃烧性能所造成的影响,将试验结果进行对比发现:旋流器的旋流强度对点火启动性能和贫油熄火特性具有很大影响,旋流强度越大,燃烧室点火越稳定,但贫油熄火油气比也会随之变大;Raj 等^[10]将燃烧室 PIV 试验与 CFD 仿真结果进行对比,发现当旋流强度较弱,数值模拟选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型时,仿真结果与 PIV 试验得出的结果较为接近,而当旋流强度较强时,数值模拟选择雷诺应力模型较为合适。

本文以三级斜切式径向旋流器为研究对象,通过数值模拟计算,研究各级旋流器结构改变对燃烧室热态流场的影响,以期为提高燃烧室燃烧效率的研究做出贡献。

1 物理模型及计算

1.1 物理模型

本文利用三维建模软件 UG 对中心分级燃烧室建立几何模型,为了计算方便,对中心分级燃烧室结构进行了适当简化,即未设计掺混孔和冷却孔,如图 1 所示。具体设计参数:燃烧室头部直径 0.108 m,头部长度 0.1 m,燃烧室筒体直径 0.086 m,筒体长度为 0.2 m,燃烧室尾部收敛段长度 0.04 m,燃烧室出口直径为 0.0447 m。

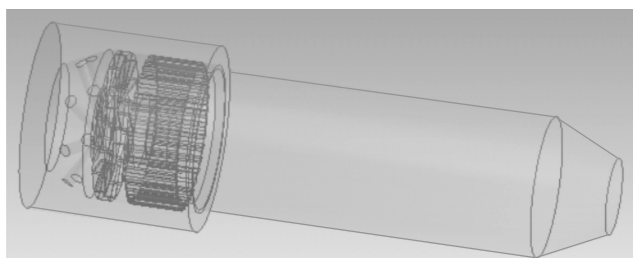
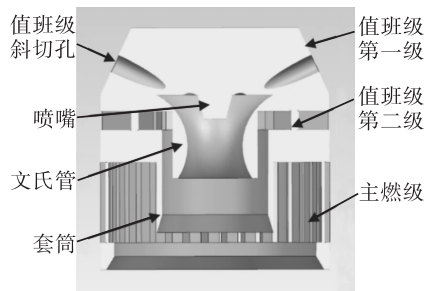


图 1 中心分级燃烧室内部结构图

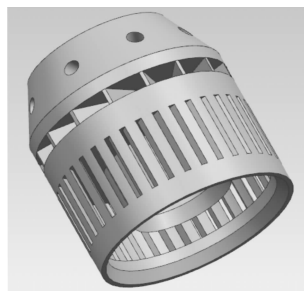
1.2 计算域网格划分

本文所设计的旋流器类型为三级斜切式径向旋流器,如图 2 所示。各级旋流器的空气流量分配为值班级第一级旋流器与值班级第二级旋流器分别占 8% 与 12%,主燃级旋流器占 80%。值班级第一级与值班级第二级的设计旋流数分别为 0.4、0.6、0.8。根据流量的分配情况及设计旋流数的大小对各级旋流器的结构及尺寸进行设计。

由于在中心分级燃烧室模型中,旋流器属于几何外形较为复杂的结构,为保证计算的准确、简化计算的过程及降低网格的生成速度,对燃烧室头部的旋流器部分采用非结构化四面体网格进行划分,并对网格进行了加密。旋流器部分网格划分如图 3 所示。



(a) 旋流器内部



(b) 旋流器外部

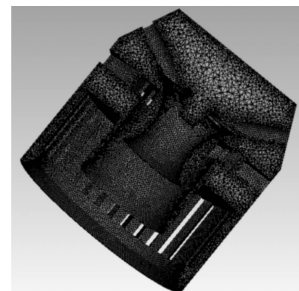


图 3 旋流器内部网格

图 2 旋流器

1.3 计算方法与边界条件

将网格导入 Fluent 进行计算,将流体视作理想流体,由于燃烧室中燃气雷诺数较高,选用 Realizable $k-\epsilon$

湍流模型进行计算,燃烧室进口边界条件为质量流量进口,流量为 3 kg/s,进口温度为 850 K。燃烧室出口采用压力出口边界条件,压力为 1 个标准大气压,温度为 850 K。热态仿真计算时的湍流强度均为 5%,进口水力直径为 0.108 m,出口水力直径为 0.0447 m。水力直径的定义式为 $D_h = 4A/P_w$ ^[11],式中: D_h 为水力直径(m); A 为流通截面积(mm^2); P_w 为润湿周长(m),即过流断面上流体与固体壁面接触的交界线周长。中心分级燃烧室的所有壁面均设置为无滑移绝热壁面,近壁区选择标准壁面函数进行处理,以满足中心分级燃烧室内近壁面流动的处理要求^[12-13]。

2 研究方案

采用分别改变三级斜切式径向旋流器其中一级旋流器的结构参数,而保证其余两级旋流器结构参数、湍流模型的选择、边界条件的制定以及非结构化网格的划分方式不变的方法,制定了如表 1 所示的旋流器结构参数方案。

表 1 旋流器结构参数方案

方案	第一级旋流器	第二级旋流器	主燃级旋流器	方案	第一级旋流器	第二级旋流器	主燃级旋流器
	斜切孔角度/(°)	叶片安装角/(°)	旋流孔角度/(°)		斜切孔角度/(°)	叶片安装角/(°)	旋流孔角度/(°)
A	25	45	60	F	25	30	60
B	35	45	60	G	25	60	60
C	45	45	60	H	25	45	30
D	55	45	60	I	25	45	45
E	25	15	60	J	25	45	75

当研究值班级第一级旋流器结构对热态流场的影响时,将方案 A、B、C、D 分为一组进行分析;当研究值班级第二级旋流器结构对热态流场的影响时,将方案 A、E、F、G 分为一组进行分析;当研究主燃级旋流器的旋流孔角度对热态流场的影响时,将方案 A、H、I、J 分为一组进行分析。各级旋流器结构变化见图 4。

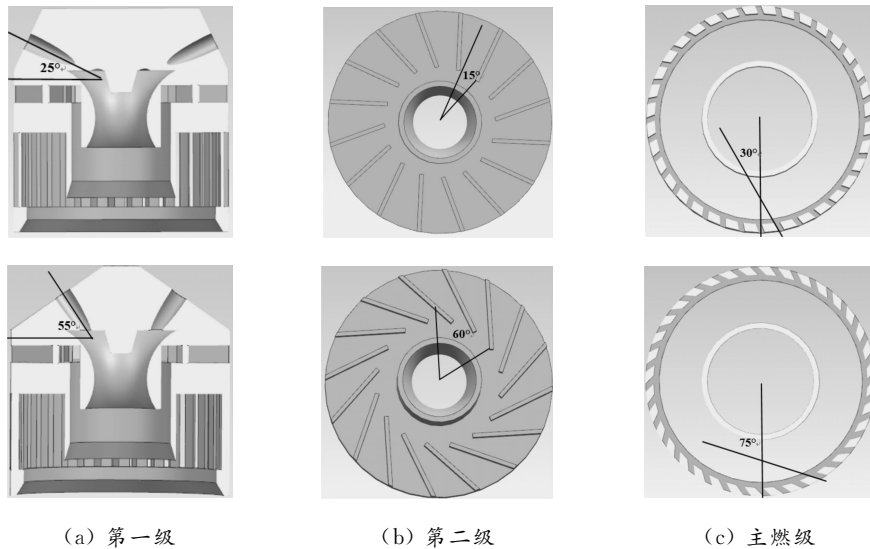


图 4 旋流器结构参数变化示意图

3 结果分析

3.1 值班级第一级旋流器对燃烧室流场的影响

图 5 为 A、B、C、D 四种方案的中心回流区曲线图,从图中可得,四种方案的中心回流区形状均较为规

律,均呈葫芦形。方案 A、B、C、D 的中心回流区长度分别为 0.126 m、0.117 m、0.118 m、0.124 m,宽度分别为 0.026 m、0.021 m、0.020 m、0.017 m。从中心回流区的面积来看,方案 A 的中心回流区面积最大,方案 D 的中心回流区面积最小。这是由于值班级第一级斜切孔角度的增加,导致值班级第一级旋流器的进气角度改变,使得旋流器的旋流数减少,导致中心回流区的面积逐渐减少。并且,当值班级第一级旋流器斜切孔角度增加到 55°时,中心回流区的形状发生了较大的变化,葫芦形的中心回流区喉部变得比较狭窄,回流区的形状开始向着细长的趋势变化,这说明斜切孔角度过大对中心回流区的形成及发展造成了一定程度的阻碍。中心回流区的这一变化趋势使得燃烧室的回流区效果变差,也意味着旋流器对燃烧火焰的稳定效果变差。故方案 D 的斜切孔角度对中心分级燃烧室的正常工作来说是不合理的,而方案 A 的中心回流区无论是在面积大小还是在形状圆滑度上,都比其他三种方案表现得更加优秀。

图 6 为四种方案沿燃烧室中心轴线的速度曲线图,由图可知,在喷嘴口附近的流场速度为负值,并且负速度的绝对值逐渐增大,直到 $X=0.025\text{ m}$ 的位置,负速度的绝对值达到最大。此后,负速度的绝对值开始逐渐减小,到了 $X=0.060\text{ m}$ 的位置,负速度的变化开始趋于平稳,这是由于旋流器的旋流作用,使燃烧室开始形成中心回流区,中心回流区的出现使流场的速度变化逐渐稳定,速度也从原来的负速度逐渐变为正速度。在这之后,流场速度先是在中心回流区的作用下,以缓慢的变化率稳定增加,而后由于跨过了中心回流区的范围,流场速度开始快速增加。最后由于中心分级燃烧室出口的收敛段作用,流场速度的增长率开始减小。四种方案的 X 轴向速度变化虽有一定的差异,但总体趋势较为接近,证明了值班级第一级旋流器主要的作用是促进燃油的雾化,对于燃烧室中心轴线的速度虽然有一定的影响,但影响较小。

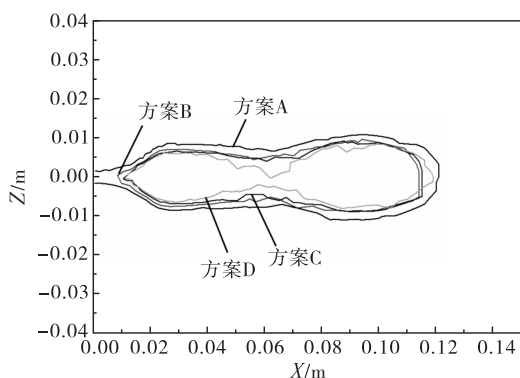


图 5 中心回流区曲线图(1)

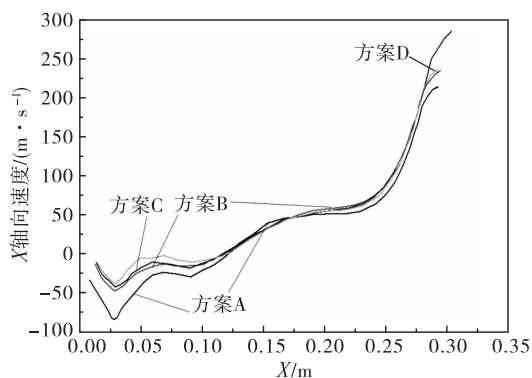


图 6 沿燃烧室中心轴线速度曲线图(1)

图 7 为 $X=0.1\text{ m}$ 、 $Y=0\text{ m}$ 时方案 A、B、C、D 的中心分级燃烧室纵截面速度云图,对比各图发现,四种方案的纵截面速度云图均呈环状分布,在中心区域的位置均存在负速度区域,并且向外形成回流区,当跨过回流区之后,流场速度开始为正值,并且由内向外逐渐增加。

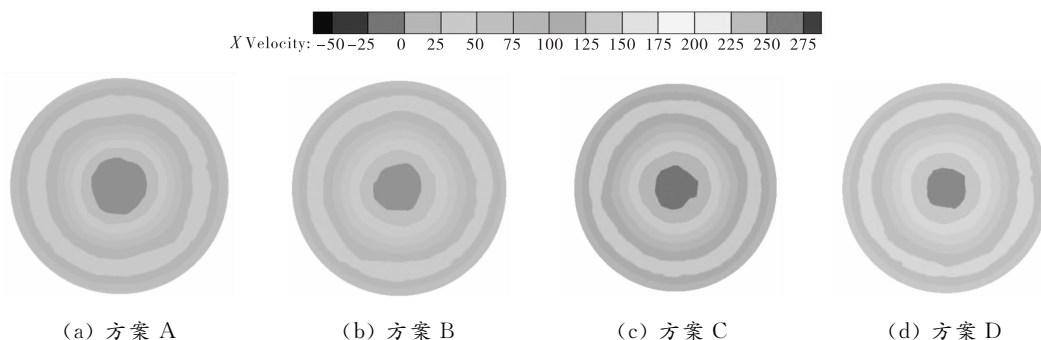


图 7 纵截面速度云图(1)

方案 A 的负速度区域较其他三种方案面积更大,说明值班级第一级斜切孔角度的变化对燃烧室的流

场分布造成了一定的影响,也说明值班级第一级旋流器的斜切孔角度不能过大,虽然值班级第一级的主要作用是燃油雾化,但在三级旋流器中,值班级会与后面的主燃级共同作用,使燃烧室的燃烧反应稳定,所以值班级第一级旋流器的结构参数变化将会影响值班级与主燃级旋流器的共同作用,进而影响燃烧室的燃烧性能。

通过对方案 A、B、C、D 的中心回流区曲线图、中心轴线速度分布图、纵截面速度云图的对比与分析,得出了方案 A 为四种方案中的最佳方案,即当值班级第一级旋流器斜切孔角度为 25° 时,燃烧室的流场分布和回流效果最为理想。

3.2 值班级第二级旋流器对燃烧室流场的影响

图 8 为 E、F、A、G 四种方案的中心回流区曲线图,四种方案的中心回流区形状呈葫芦形,形状比较规律。方案 E、F、A、G 的中心回流区长度分别为 0.118 m、0.122 m、0.126 m、0.126 m,宽度分别为 0.018 m、0.022 m、0.026 m、0.030 m。从中心回流区的面积来看,方案 G 的中心回流区面积最大,方案 E 的中心回流区面积最小。这是由于值班级第二级叶片安装角角度的增加,导致旋流器的进气量和旋流数改变,使得中心回流区的面积逐渐增加,旋流器对燃烧室的回流作用也随之增加。但回流作用的效果太大会造成燃烧室的高温区集中,使燃烧室承受的热负荷增加。值班级第二级叶片安装角角度逐渐增加,当叶片安装角角度增加到 45° 时,中心回流区长度的增加率开始降低,说明由于回流作用过大,中心回流区的形状开始从细长向着粗短变化。所以值班级第二级旋流器的角度在方案 F 与方案 A 之间更为理想。

图 9 为四种方案沿燃烧室中心轴线的速度曲线图,该速度曲线与值班级第一级方案的速度变化规律基本相同,气体在喷嘴口附近的速度为负值,并且负速度的绝对值逐渐增大,直到 $X=0.025$ m 的位置,负速度的绝对值达到最大。此后,负速度的绝对值开始逐渐减小,到了 $X=0.06$ m 的位置,负速度的变化开始逐渐平稳,由于旋流器的旋流作用,形成中心回流区,使燃烧室流场的速度变化逐渐稳定,流场速度也从原来的负速度逐渐变为正速度。在这之后,速度先是以缓慢的变化率稳定增加,而后轴向速度增加率变大。最后在中心分级燃烧室出口收敛段的作用下,流场速度的增长率减小。四种方案的 X 轴向速度变化虽有一定的差异,但总体趋势较为接近,证明了值班级第二级旋流器主要的作用也是促进燃油雾化,对于燃烧室中心轴线速度的变化虽然有一定的影响,但影响效果依旧不大。

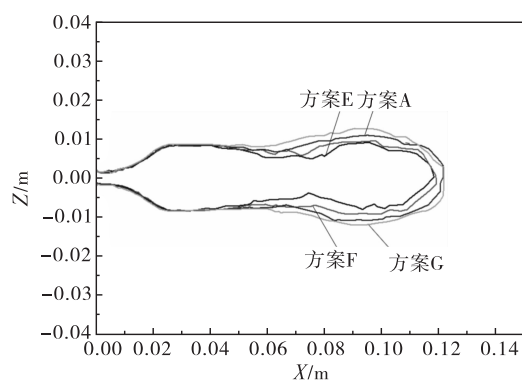


图 8 中心回流区曲线图(2)

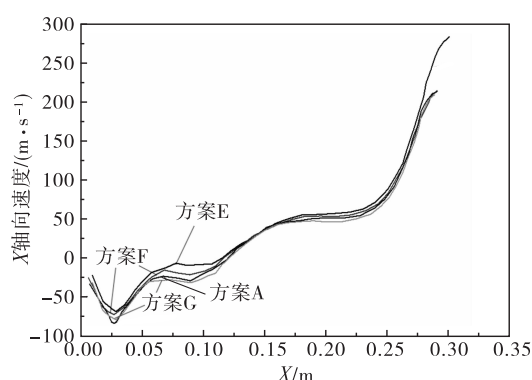


图 9 沿燃烧室中心轴线速度曲线图(2)

图 10 为 $X=0.1$ m、 $Y=0$ m 时方案 E、F、A、G 的中心分级燃烧室纵截面速度云图,对比四种方案的云图,发现四种方案的纵截面速度云图均呈环状分布,在中心区域的位置均存在负速度区域,并且向外形成回流区,当跨过回流区之后,流场速度开始为正值,并且由内向外逐渐增加。方案 G 的负速度区域较其他三种方案面积更大,说明值班级第二级叶片安装角角度的变化,对燃烧室的流场分布造成了一定的影响。方案 G 的中心位置存在负速度绝对值较大的区域,这是由于旋流器的回流作用随着值班级第二级叶片安装角角度的增加而变强所致。

通过对方案 E、F、A、G 的中心回流区曲线图、中心轴线速度分布图、纵截面速度云图的对比与分析,

得出值班级第二级旋流器的叶片安装角角度范围为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 时,燃烧室的流场分布和回流效果最为理想。

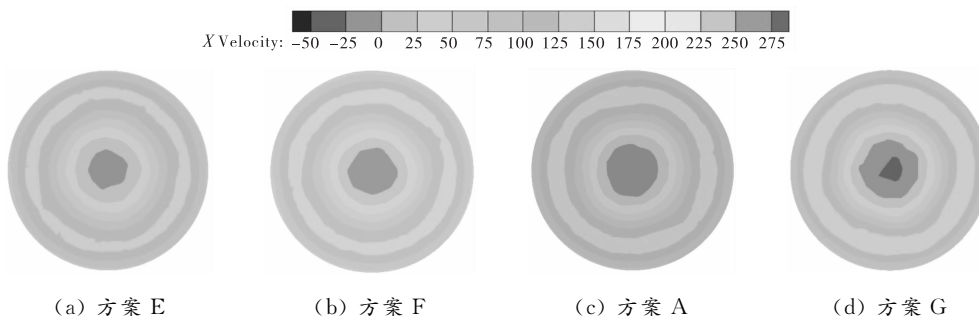


图 10 纵截面速度云图(2)

3.3 主燃级旋流器对燃烧室流场的影响

图 11 为 H、I、A、J 四种方案的中心回流区曲线图,四种方案均形成了形状规律的中心回流区,方案 I、A、J 的中心回流区形状呈葫芦形,方案 H 的中心回流区形状呈雨滴形。方案 H、I、A、J 的中心回流区长度分别为 0.048 m、0.130 m、0.126 m、0.120 m,宽度分别为 0.018 m、0.022 m、0.026 m、0.034 m。从中心回流区的面积来看,方案 J 的中心回流区面积最大,方案 H 的中心回流区面积最小。这是由于主燃级旋流器旋流孔角度的增加,导致旋流器的进气量和旋流数改变,使得中心回流区的面积逐渐增加,旋流器对燃烧室的回流作用也随之增加。方案 H 的旋流孔角度过小,使得旋流器对燃烧室未起到有效的回流作用,进而无法保证燃烧火焰的稳定。在其余三种方案中,方案 J 的中心回流区宽度最大,而长度最小,这会增加燃烧室承受的热负荷。随着主燃级旋流器旋流孔角度的增加,当旋流孔角度增加到 45° 时,中心回流区长度开始降低,说明由于回流作用过大,中心回流区的形状开始从细长向着粗短变化。所以主燃级旋流器旋流孔的最佳角度应在方案 I 与方案 A 之间,即 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。

图 12 为四种方案沿燃烧室中心轴线的速度曲线图,观察曲线图可以得出方案 I、A、J 的曲线变化规律与值班级第一级和值班级第二级方案相同,负速度的绝对值先是逐渐增大,直到 $X=0.025$ m 的位置,负速度的绝对值达到峰值。此后,负速度的绝对值开始逐渐减小,到了 $X=0.060$ m 的位置,负速度的变化逐渐平稳,开始形成中心回流区,使燃烧室流场的速度变化稳定下来,速度也从原来的负速度逐渐变为正速度。接着速度先是以缓慢的变化率增加,而后轴向速度增加率变大。最后由于燃烧室出口收敛段的作用,流场速度的增长率减小。方案 H 在 $X=0.060$ m 的位置上为正速度,说明回流区的形成在 $X=0.060$ m 之前。证明了主燃级旋流器主要的作用是控制燃烧室头部的流场结构及油气比,对燃烧室中心轴线速度的变化影响较大。

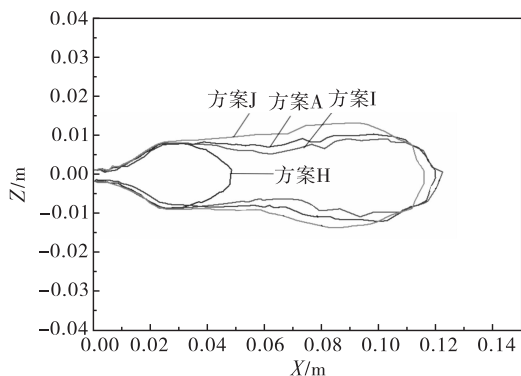


图 11 中心回流区曲线图(3)

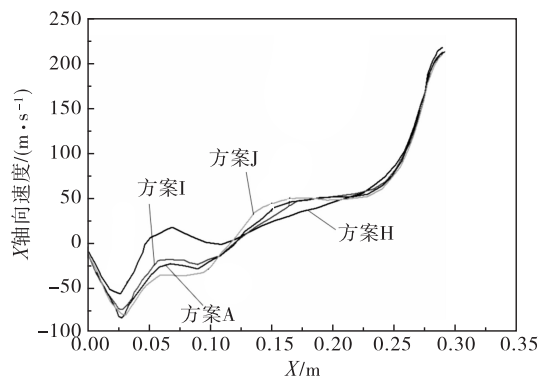


图 12 沿燃烧室中心轴线速度曲线图(3)

图 13 为 $X=0.1$ m、 $Y=0$ m 时方案 H、I、A、J 的中心分级燃烧室纵截面速度云图,对比四种方案的云图可以发现,四种方案的纵截面速度云图均呈环形分布,方案 I、A、J 在中心位置存在明显的负速度区域,

并且向外形成回流区,当跨过回流区之后,速度开始为正值,并且由内向外逐渐增加。方案 H 的中心位置负速度区域面积小,方案 J 的负速度区域面积较大,说明主燃级旋流器旋流角的变化,对燃烧室的流场分布造成了一定的影响。

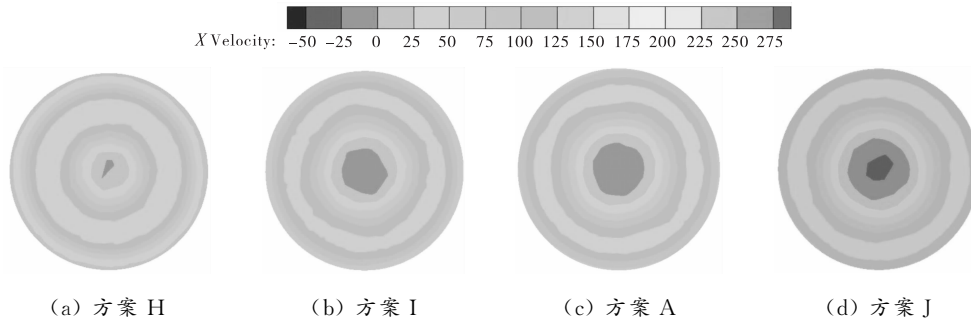


图 13 纵截面速度云图(3)

通过对方案 H、I、A、J 的中心回流区曲线图、中心轴线速度分布图、纵截面速度云图的对比与分析,可以得出最佳方案在方案 I 与方案 A 之间,即当主燃级旋流器旋流孔角度为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,燃烧室的流场分布和回流效果最为理想。

4 结论

通过采用数值模拟(CFD)的方法分别对第一级旋流器斜切孔角度为 25° 、 35° 、 45° 、 55° ,第二级旋流器叶片安装角角度为 15° 、 30° 、 45° 、 60° ,主燃级旋流器旋流孔角度为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 时的燃烧室热态流场进行数值模拟计算研究,得出以下结论:

- (1) 当值班级第一级旋流器斜切孔角度为 25° 时,燃烧室的流场分布和回流效果最为理想;
- (2) 当值班级第二级旋流器叶片安装角角度为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,燃烧室的流场分布和回流效果最为理想;
- (3) 当主燃级旋流器旋流孔角度为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,燃烧室的流场分布和回流效果最为理想。

参考文献:

- [1] 彭云晖,林宇震,刘高恩.三旋流燃烧室出口温度分布的初步试验研究[J].航空动力学报,2007,22(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] 肖茹洁.双环预混旋流燃烧室燃烧室特性研究[D].大连:大连海事大学,2020.
- [4] 林宏军,常峰,程明.中心分级燃烧室技术和工程应用研究[J].航空动力,2018(3):41-44.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 程明,林宏军,李锋.旋流杯设计参数对燃烧性能的影响[J].航空动力学报,2014,29(10):2355-2361.
- [8] 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.
- [9] LAZIK W, DOERR T, BAKE S, et al. Development of lean-burn low- NO_x combustion technology at Rolls-Royce deutschland[C]. ASME Expo: power for land, sea, and air, 2008. [https://doi.org/10/1115/G72008-51115](https://doi.org/10.1115/G72008-51115).
- [10] RAJ R T K, GANESAN V. Study on the effect of various parameters on flow development behind

- vane swirlers[J]. Inter journal of thermal sciences, 2008, 47(9): 1204-1225.
- [11] 向奕同. 强风沙尘环境下车顶复合绝缘子形变特性与外绝缘放电特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [12] 朱大顺, 纪国法, 程卫琴. 多级离心泵级间导叶影响的 CFD 模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 322-326.
- [13] WANG F, HUANG Y, DENG T. Study of the cold flow field of a multi-injection combustor[C]. ASME Turbo Expo: Power of land, sea and Air, 2009. <https://doi.org/10.1115/G72009-59197>.

The Influence of Swirler Structure on the Hot Flow Field of Central Staged Combustor

MA Yu, WANG Chengjun, LI Haiyang, YU Jianqiao

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

Abstract: Taking the central staged combustion chamber equipped with a three-stage oblique tangential radial hydrocyclone as the research object, the effects of the angle of the oblique tangential hole of the first stage hydrocyclone, the installation angle of the second stage hydrocyclone blade and the angle of the swirl hole of the main combustion stage hydrocyclone on the hot flow field of the central staged combustion chamber are simulated and compared by using the method of numerical simulation and control variables. The results show that the shape of the central recirculation zone is the best, and the quality of the hot flow field in the central staged combustion chamber is the best when the installation angle of the first stage swirl hole and the second stage swirl blade is 25° and $30^\circ \sim 45^\circ$ respectively, and the swirl hole angle of the main combustion stage swirl is $45^\circ \sim 60^\circ$.

Keywords: swirler structure; central staged combustion chamber; hot flow field; numerical simulation

(责任编辑: 唐立平)

本 刊 声 明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司(万方数据电子出版社)、重庆维普资讯有限公司、超星期刊域出版平台等在其各自的系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行及在信息网络传播本刊全文。作者著作权使用费和稿酬(即包括印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)一并支付。如作者对本声明持有异议,请在投稿时说明。