

预燃级旋流数对分级燃烧室流场和温度场燃烧特性的影响

李洪伏¹, 王传奇², 于建桥^{1*}, 宋宇佳¹, 姜 山¹, 王成军³

(1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨 150066; 2. 海装沈阳局驻哈尔滨地区第一军事代表室, 哈尔滨 150066; 3. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 沈阳 110136)

摘要: 为得到不同旋流数下燃烧室流场与温度场的燃烧特性, 通过建立不同结构参数的旋流器和燃烧室模型, 采用数值模拟与调节参数的方法, 研究了预燃级旋流器旋流数对中心分级燃烧室流场与温度场燃烧特性的影响。结果表明: 随着预燃级第一级旋流器旋流数的增大, 旋流器对燃油的雾化效果逐渐增强, 中心回流区也呈增大趋势, 温度场的最高温度呈先增大后减小的趋势; 随着预燃级第二级旋流器旋流数的增大, 旋流器的雾化特性得到明显改善, 中心回流区呈先增大后减小趋势, 温度场分布较好, 反映出预燃级旋流器通过增强气流剪切作用, 提高了燃油雾化质量, 改善了初始混合状态, 其旋流结构有助于火焰稳定发展, 对提高燃烧效率具有积极作用。

关键词: 预燃级旋流器; 旋流数; 中心分级燃烧室; 流场; 温度场; 数值模拟; 中心回流区

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2025)04-0063-12

DOI: 10.3724/j.GTER.20250045

Effect of pre-combustion stage swirl number on flow and temperature field combustion characteristics in staged chamber

LI Hongfu¹, WANG Chuanqi², YU Jianqiao^{1*}, SONG Yujia¹, JIANG Shan¹, WANG Chengjun³

(1. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China; 2. The First Military Representative Office of Haizhuang Shenyang Bureau in Harbin, Harbin 150066, China; 3. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: To obtain the combustion characteristics of the flow field and temperature field of the combustion chamber under different swirl numbers, the swirler and combustion chamber models with different structural parameters were established, and the influence of the swirl number of the pre-combustion stage swirler on the combustion characteristics of the flow field and temperature field of the central staged combustion chamber was studied by numerical simulation and parameter adjustment methods. The results show that with the increase of the swirl number of the first stage swirler of the pre-combustion stage, the atomization effect of the swirler on the fuel is enhanced, the central recirculation area also tends to increase, and the maximum temperature of the temperature field tends to increase first and then decrease; with the increase of the swirl number of the second stage swirler of the pre-combustion stage, the atomization characteristics of the swirler are significantly improved, the central recirculation area tends to increase first and then decrease, and the distribution of the temperature field is also better, reflecting that the pre-combustion stage swirler improves the fuel atomization quality and initial mixing state by enhancing the airflow shear effect. Its swirler structure helps to stabilize the flame development and has a positive effect

收稿日期: 2024-05-25

作者简介: 李洪伏(1981-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师, 研究方向为航空发动机设计制造与研究。

通信作者: 于建桥(1992-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为航空发动机燃烧室设计与研究。E-mail: 811726653@qq.com

引用格式: 李洪伏, 王传奇, 于建桥, 等. 预燃级旋流数对分级燃烧室流场和温度场燃烧特性的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(4): 63-74. LI Hongfu, WANG Chuanqi, YU Jianqiao, et al. Effect of pre-combustion stage swirl number on flow and temperature field combustion characteristics in staged chamber[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(4): 63-74.

on improving combustion efficiency.

Key words: pre-combustion swirler; swirl number; center staged combustion chamber; flow field; temperature field; numerical simulation; central recirculation area

1 引言

近年来,随着中心分级燃烧室燃烧技术的不断发展,旋流器结构设计对燃烧室流场与温度场燃烧特性影响的重要作用得以体现^[1-2]。为此,国内外学者提出了各种结构的旋流器,为探究旋流器结构特征参数变化对燃烧室燃烧性能的影响提供了理论基础和试验方案^[3-5]。

经过长期研究与技术积累,国内外学者持续优化燃烧室设计,不仅形成了多种成熟的头部结构方案,还显著改善了燃烧流场和温度场特性。国内方面,刘岩等^[6]采用3种不同内外旋流强度的预燃级旋流器,研究了旋流数变化对中心分级燃烧室点火特性的影响,并对燃烧室分别开展了常温下的常压与低压的燃烧点火试验,获得了点火特性的相关数据。刘爱骅等^[7]针对中心分级燃烧室值班级的结构特征,研究了旋流角改变对燃烧室燃烧特性的影响。王泽^[8]针对中心分级燃烧室的流场特性开展了数值研究,通过基于雷诺应力平均的数值方法,研究了主燃级旋流器叶片偏转角、预燃级套筒出口扩张角和预燃级喉道长度对燃烧室燃烧流场性能的影响。李乐等^[9]针对中心分级燃烧室的冷态、热态流场及温度场,采用数值模拟的方法,探究了燃烧室流场与温度场的相互作用机理,揭示了旋流器旋向对燃烧室流场与温度场的影响规律。国外方面,DHANUKA^[10]与MONGIA^[11]针对低排放燃烧系统,对双环状预旋低排放(TAPS)燃烧室的冷态、热态流场及火焰特性进行了研究。LI等^[12-13]利用数值模拟与激光多普勒测速试验相结合的研究手段,对带有三环形旋流器的TAPS燃烧室流场进行了研究。LAZIK等^[14-15]提出一种不同于TAPS方案的中心分级燃烧方案,即Lean-Burn,并针对该方案,以主燃级旋流强度、预燃级旋流强度、台阶高度、主燃级和预燃级雾化方式为变量进行了广泛研究。

综上所述,国内外学者提出了多种中心分级燃烧方案,并证实了旋流器结构对燃烧性能的重要影响^[16-17]。针对当前预燃级旋流器研究尚不充分的现状,本文就其结构特征参数变化对燃烧室流场与温度场燃烧特性的影响展开研究。具体为,以三级径向旋流器为研究对象,设计了一种带有掺混孔的

火焰筒,与机匣壳体共同构成中心分级燃烧室结构;针对不同旋流数的预燃级旋流器,采用数值计算的方法对燃烧室流场与温度场的分布进行模拟。通过对比不同旋流数下燃烧室流场与温度场的分布,筛选出合适的预燃级旋流器组合结构,进而确定优化燃烧室燃烧特性的最优方案,为改善燃烧室的旋流与油雾分布提供理论支撑。

2 研究对象及计算域分析

2.1 几何模型构建与预燃级旋流器结构设计

中心分级燃烧室的几何模型结构如图1所示。其空气流量分配为:火焰筒的冷却空气占12%,涡轮的冷却空气占10%,头部的冷却空气占8%,其余70%的空气作为流经中心分级燃烧室旋流器的流量。预燃级旋流器采用双油路离心喷嘴设计,副油路喷嘴为预燃级旋流器提供燃油,主油路喷嘴为主燃级旋流器提供燃油,主副油路燃油流量比为4:1,其具体结构设计参数为:文氏管的喉道直径为20 mm,文氏管的出口扩张角为45°,喷嘴口直径为8 mm。预燃级旋流器旋流角按气流旋向方式划分,其中预燃级第一级与第二级旋向相反,预燃级第二级与主燃级旋向相同。预燃级第一级旋流器采用顺时针旋向进气,旋流角为45°;预燃级第二级旋流器采用逆时针旋向进气,旋流角为-45°。叶片长度为22.0 mm,叶片宽度为1.5 mm,叶片高度为6.0 mm^[18]。预燃级旋流器几何结构如图2所示。

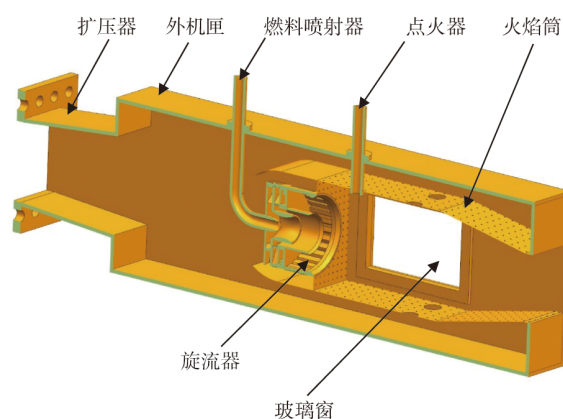


图1 中心分级燃烧室几何结构

Fig.1 Geometric structure of the centrally staged combustor

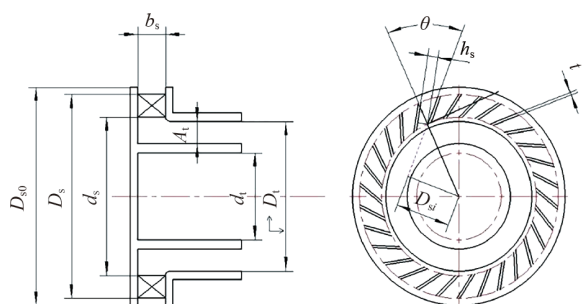


图2 预燃级径向旋流器几何结构

Fig.2 Geometric structure of the pre-combustion stage radial swirler

2.2 预燃级进气流量分配与计算域网格划分

采用三级径向旋流器,根据前文叶片旋流器的参数进行预燃级旋流器设计,各级旋流器的无量纲化进气流量分配设置为:预燃级第一级、第二级旋流器分别占8%、10%,主燃级旋流器占82%。

鉴于三级径向旋流器结构复杂,其计算域网格采用非结构网格划分并进行加密处理;燃烧室采用组合结构化网格划分,其中最佳网格数量为506万,加密网格最小尺寸为 3.65×10^{-8} mm,最大尺寸为 4.79×10^{-4} mm。中心分级燃烧室内部网格划分模型如图3所示,旋流器内/外网格划分模型如图4所示。

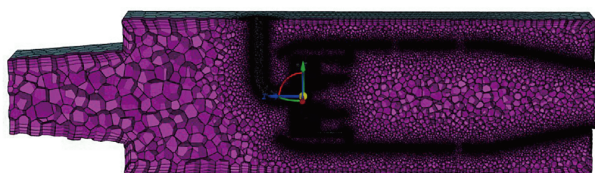


图3 中心分级燃烧室内部网格

Fig.3 Internal grid of center staged combustion chamber

2.3 计算模型选用与边界条件设置

数值计算选用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。其中,固体壁面及近壁区采用标准壁面函数处理,以满足燃烧室近壁面流动的处理要求;速度-压力耦合采用SIMPLE算法,采用二阶迎风离散格式,隐式分离求解;燃烧模型为非预混燃烧模型,离散相模型为压力雾化喷嘴模型,辐射模型为简化的P-1辐射模型;燃烧室所有壁面均采用无滑移绝热壁面^[19-20]。中心分级燃烧室边界条件设置如图5所示,燃烧室进口设置为质量流量入口,出口设置为压力出口。具体参数如下:进口空气质量流量为4.96 kg/s、温度为850 K、压力为2.5 MPa,喷嘴水力直径为108.0 mm,



(a) 外部网格



(b) 内部网格

图4 旋流器计算域网格

Fig.4 Swirler computational domain grid

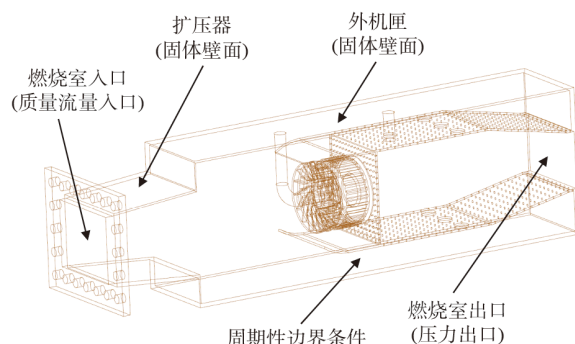


图5 中心分级燃烧室边界条件设置

Fig.5 Boundary conditions for the central staged combustion chamber

湍流强度为5%;出口燃油质量流量为99.2 g/s、压力为0.1 MPa,喷嘴水力直径为44.7 mm,湍流强度为5%。其中,水力直径定义为:

$$D_h = 4A / P_w \quad (1)$$

式中: A 为流动的横截面面积; P_w 为润湿周长,即过流断面上流体与固体壁面接触的湿润边界长度。

3 研究方案

针对各级旋流器旋流数的变化,探究燃烧室流场与温度场的相关特性。研究方案为:在保证主燃级旋流器参数不变的前提下,分别改变预燃级其中

一级旋流器的旋流数,采用相同的旋流模型、计算域网格及边界条件进行计算模拟与对比分析。

具体旋流器结构方案如表1所示。表中,括号中数值为旋流器角度。根据不同的研究内容将方案分为A~G,共计7组,且在主燃级旋流数保持不变、处在恰当的叶片安装角度时,针对预燃级双级旋流器旋流数变化进行研究。即当探究预燃级第一级旋流数对燃烧室流场与温度场影响时,以A、B、C、D方案为

研究对象进行分析;当探究预燃级第二级旋流数对燃烧室流场与温度场的影响时,以B、E、F、G方案为研究对象进行分析。

4 数值模拟与结果分析

4.1 预燃级第一级旋流数对燃烧室流场与温度场的影响

4.1.1 第一级旋流数对燃烧室速度场的影响

图6为预燃级第一级旋流器在不同旋流数下沿流程方向的轴向速度分布云图。可以看出,燃油自旋流器喷嘴喷出后,与流经预燃级和主燃级旋流器的空气在火焰筒中掺混燃烧,并在预燃级第一级、第二级旋流器后形成预燃级旋流,同时又与主燃级旋流器后的旋流相互作用,在火焰筒中心形成回流区。在方案A、B、C、D中,燃油与流经预燃级第一级旋流器的空气在火焰筒中燃烧形成了4种回流区,分别为位于旋流器与火焰筒壁直角处的角回流区、文氏管下方的唇口回流区、掺混口处的掺混回流区及火焰

表1 旋流器结构方案

Table 1 Swirler structure schemes

方案	预燃级旋流器旋流数		主燃级旋流器旋流数
	第一级	第二级	
A	0.53(+30°)	0.85(-45°)	0.85(-45°)
B	0.85(+45°)	0.85(-45°)	0.85(-45°)
C	1.39(+60°)	0.85(-45°)	0.85(-45°)
D	3.08(+75°)	0.85(-45°)	0.85(-45°)
E	0.85(+45°)	0.53(-30°)	0.85(-45°)
F	0.85(+45°)	1.39(-60°)	0.85(-45°)
G	0.85(+45°)	3.08(-75°)	0.85(-45°)

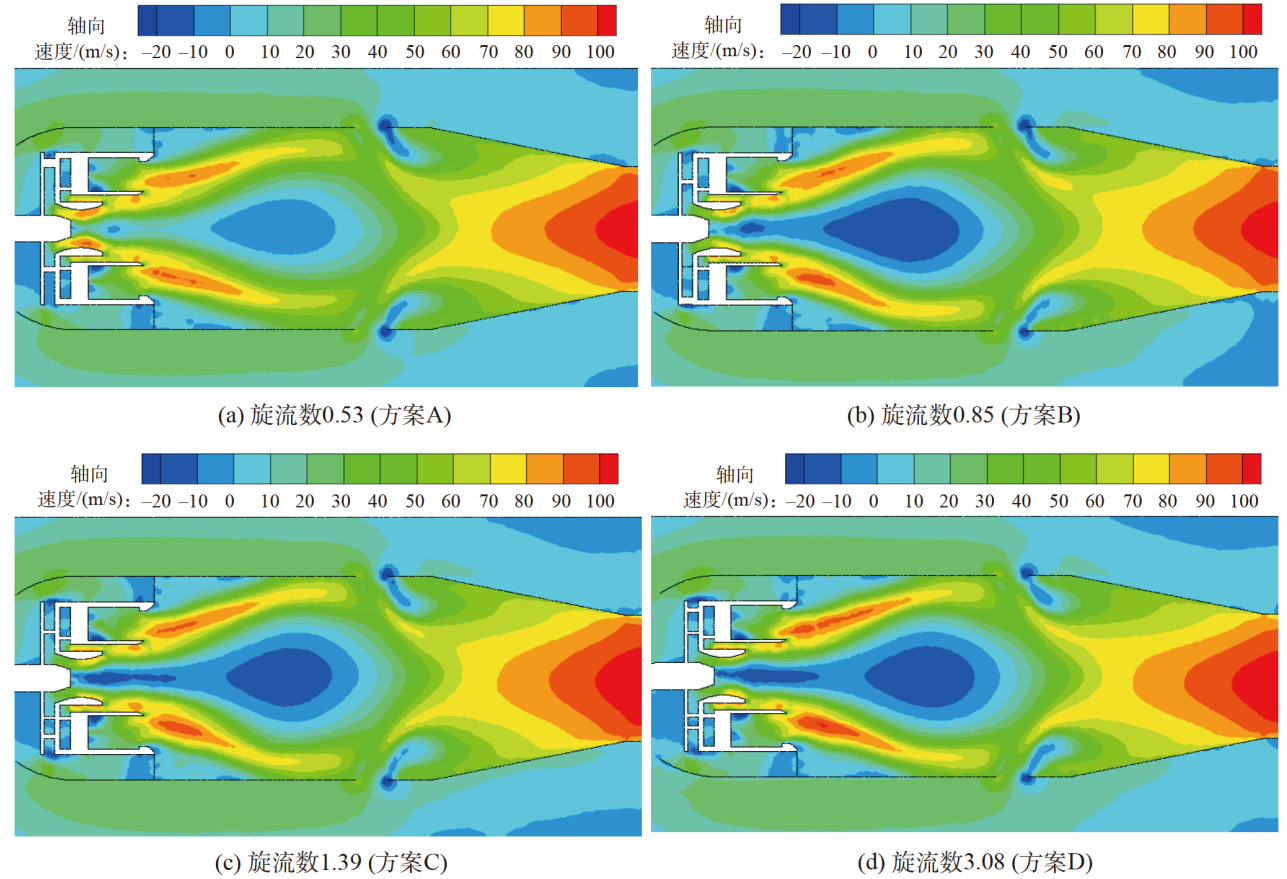


图6 第一级旋流器旋流数对燃烧室沿流程方向速度分布的影响

Fig.6 Effect of the swirl number of the first-stage swirler on the velocity distribution along the flowpath in combustion chamber

筒中心处的中心回流区。中心回流区的存在有利于火焰筒内的燃烧火焰产生回流,中心回流区的大小、形状及产生位置决定着燃烧火焰的稳定性。此中心回流区是预燃级第一级旋流器轴向速度为0的区域,在不同旋流数下其大小没有发生太大变化。4种方案均形成了稳定的中心回流区,且回流区大小均匀、形状饱满,类似于椭圆形状,并沿燃烧室内中心轴线对称分布。

图7为燃烧室中心回流区分布曲线。图中,横坐标表示沿流程轴向长度,纵坐标表示沿流程径向高度。可以看出,预燃级第一级旋流器旋流数的改变对角回流区、唇口回流区、掺混回流区的形状、大小影响不太大,主要原因在于燃烧室中预燃级第一级旋流器主要起燃油雾化作用,但其对中心回流区的影响较大。随着预燃级第一级旋流器旋流数的增加,其回流区的大小呈逐渐增大的趋势,并且中心回流区有后移趋势。方案A的中心回流区轴向长度较短,径向宽度也相对较小,导致回流高温气体覆盖范围受限,不利于高温燃气回流至喷油区域维持稳定燃烧,从而降低了主燃区火焰的稳定性;方案B的中心回流区形状饱满,且位置居中,有利于稳定回流区火焰;方案C、D的回流区整体较大,且其轴向长度过长,使得回流区后移,不利于主燃区稳定燃烧。该现象说明,虽然预燃级第一级旋流器主要起燃油雾化作用,但其旋流数过大仍会对中心回流区造成一定影响。

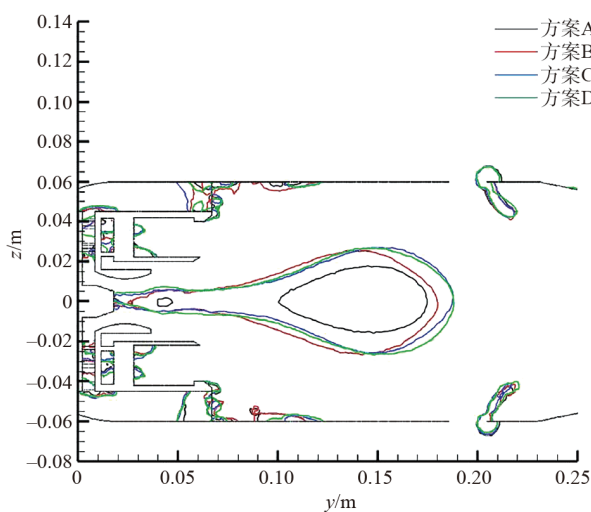


图7 第一级旋流器旋流数对燃烧室中心回流区分布的影响
Fig.7 Effect of the swirl number of the first-stage swirler on the distribution of the central recirculation zone in the combustion chamber

图8为燃烧室中心轴线速度分布曲线,图中横坐标表示沿流程方向的轴向距离。可以看出,受预燃级第一级旋流器旋流数增大的影响,在中心回流区初始形成阶段(即 $y \leq 0.10$ m),喷嘴处气流速度绝对值逐渐增大,并在 $y=0.04$ m附近达到峰值,之后缓慢减小。在 $y=0.08$ m左右,方案B、C、D的负速度趋于平缓,表明中心回流区开始建立。回流区的形成使轴向速度由负转正,随后迅速上升,并逐渐在火焰筒出口段趋于稳定。这是由于出口段的收敛结构减缓了速度波动,使流场分布更趋稳定。总体看,尽管4种方案在局部速度上略有差异,但速度变化趋势大致相同,表明预燃级第一级旋流器主要起促进燃油雾化和增强局部扰动的作用,对轴线速度分布的整体调控作用相对有限。

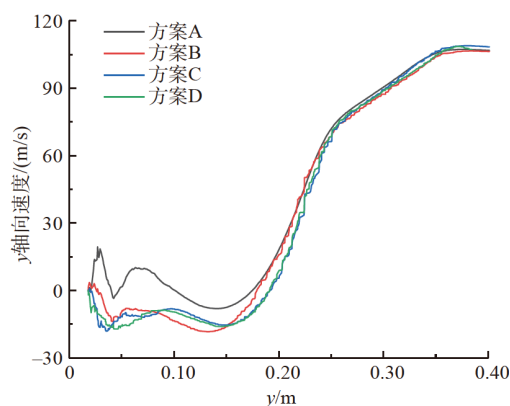


图8 第一级旋流器旋流数对燃烧室中心轴线速度分布的影响

Fig.8 Effect of the swirl number of the first-stage swirler on the velocity distribution of the central axis of the combustion chamber

根据方案A、B、C、D沿流程方向的轴向速度云图、中心回流区曲线图及中心轴线速度分布图的对比分析,可得出方案B为4种方案中的最佳方案,即当预燃级第一级旋流器旋流数为0.85时,燃烧室的速度场性能较好,满足工作需要形成中心回流区,所做设计结构合理。

4.1.2 第一级旋流数对燃烧室温度场的影响

图9为预燃级第一级旋流器在不同旋流数下的燃烧室轴向截面温度分布云图。可以看出,不同旋流数下的火焰筒主燃区均有高温燃烧区域出现,说明火焰筒实现了点火燃烧,但是高温燃烧区域的差别比较明显。随着旋流数从0.53增加到0.85,高温燃烧区域整体变化不大,分布较为均匀,表明燃烧过程

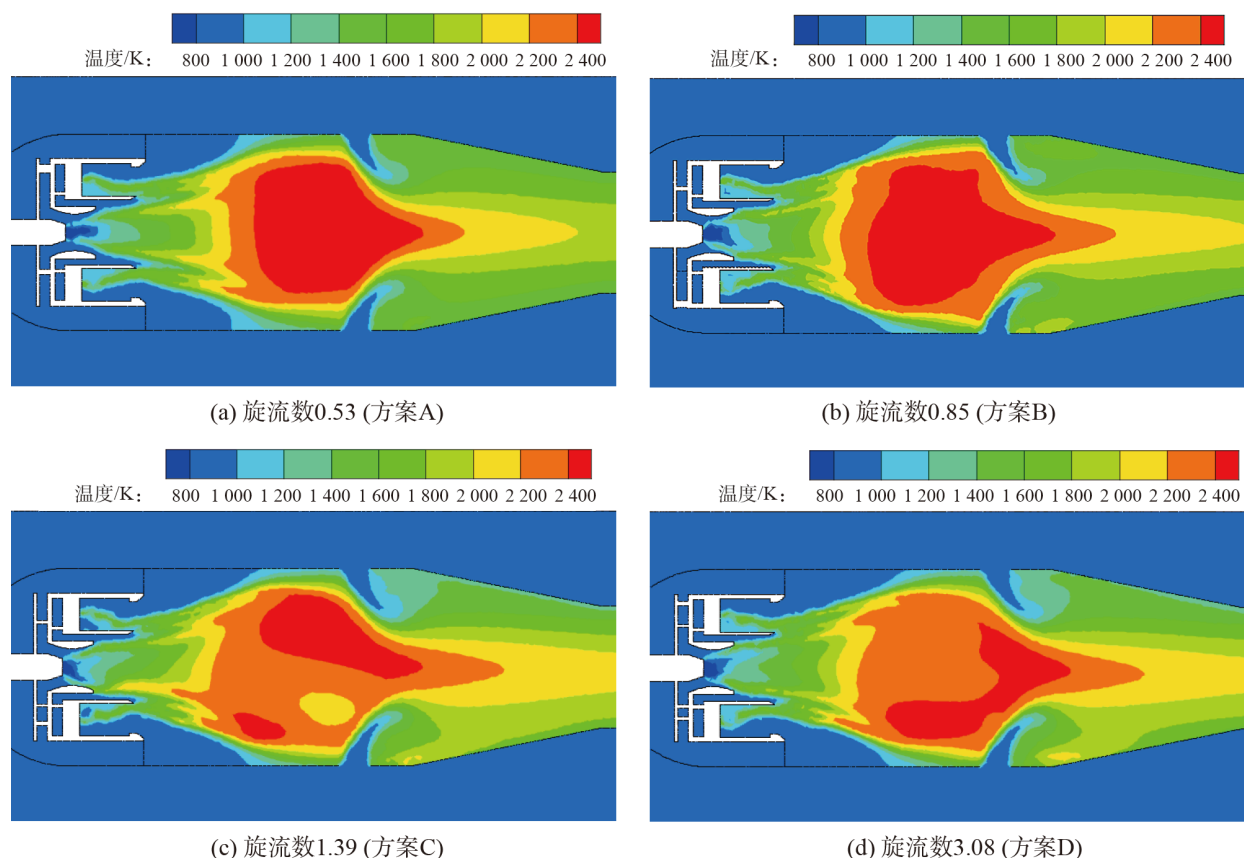


图9 第一级旋流器旋流数对燃烧室沿流程方向温度分布的影响

Fig.9 Effect of the swirl number of the first-stage swirler on the temperature distribution along the flowpath in combustion chamber

较为充分。旋流数为0.53时,高温区略有后移,主要集中在主燃区下游位置,导致火焰后移,不利于燃烧的稳态维持,燃烧效果相对较差。当旋流数增加到0.85时,高温区更集中于主燃区内,有助于形成稳定的中心回流区与火焰结构,从而提升燃烧效率和稳定性。当旋流数增加到1.39时,高温燃烧区域明显缩小并向后移动;当旋流数进一步增加到3.08时,该趋势持续加剧,表明高温区分布不均,燃烧效率下降、燃烧不充分。造成上述现象的主要原因在于火焰筒内回流区特性变化。分析表明,高温区域分布与负速度区域高度重合,燃烧温度受速度场分布影响显著,中心回流区速度分布越合理,燃烧火焰越稳定。高温区域分布与负速度区域高度重合,燃烧温度受速度场分布影响显著,中心回流区速度分布越合理,燃烧火焰越稳定。综合看,随着旋流数的增大,火焰稳定性呈先增强后减弱的趋势,且高旋流数下不利影响更为明显。

图10为燃烧室中心轴线温度分布曲线。通过分析可以得出,燃烧室中心轴线温度呈先升高后降低

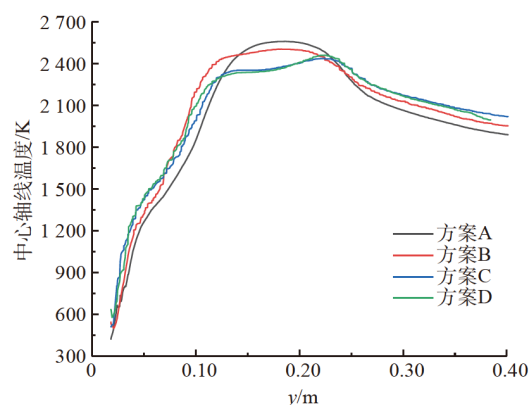


图10 第一级旋流器旋流数对燃烧室中心轴线温度分布的影响

Fig.10 Effect of the swirl number of the first-stage swirler on the temperature distribution of the central axis of the combustion chamber

的趋势。在 $y=0.16\sim 0.20$ m处,方案A、B的中心温度达到最高,其中,方案A最高可达2 600 K,方案B最高可达2 500 K,表明方案A、B燃烧得更加充分;方案C、D的中心温度几乎一致,最高可达2 300 K,说

明随着旋流数的增加,主燃区中心轴线处的最高温度明显降低。同时,方案A的最高温度相较于方案B、C、D的在轴线方向上靠后,表明其主燃区有后移趋势。由此可得,方案B中心温度回流作用较好,且燃烧充分稳定。

根据方案A、B、C、D沿流程方向的温度分布云图和中心轴线温度分布曲线的对比分析,可以得出方案B为4种方案中的最佳方案,即当预燃级第一级旋流器旋流数为0.85时,燃烧室的轴向温度场性能较好,主燃区燃烧火焰稳定,满足设计结构要求。

4.2 预燃级第二级旋流数对燃烧室流场与温度场的影响

4.2.1 第二级旋流数对燃烧室速度场的影响

图11为预燃级第二级旋流器在不同旋流数下沿流程方向上的速度分布云图。根据上节结论,从方案E、B、F、G中可以看出,燃油与流经预燃级第二级旋流器的空气在火焰筒中燃烧依然形成4种回流区,即角回流区、唇口回流区、掺混回流区、中心回流区,

其中,中心回流区决定着燃烧火焰的稳定性。4种方案均形成了稳定的中心回流区,且回流区大小均匀、形状饱满,类似于椭圆形状,并沿燃烧室中心轴线对称分布。

图12为燃烧室中心回流区分布曲线。可以看出,预燃级第二级旋流器旋流数变化对中心回流区的分布特性具有显著影响,随着旋流数的增加,中心回流区呈先减小后增大的趋势,且方案E、F、G的中心回流区有后移趋势,不利于主燃区稳定燃烧;方案B的中心回流形状饱满、位置居中,有利于稳定回流区火焰。该结果表明,预燃级第二级旋流器具有雾化燃油、稳定火焰的作用,且旋流数不宜过大,也不宜过小。

图13为燃烧室中心轴线速度分布曲线。可以看出,与改变预燃级第一级旋流器旋流数方案相比,各方案的速度曲线变化趋势基本一致。在中心回流区初始形成阶段(即 $y \leq 0.10$ m),各曲线在 $y=0.04$ m处出现速度绝对值峰值,随后负速度逐渐减小。在

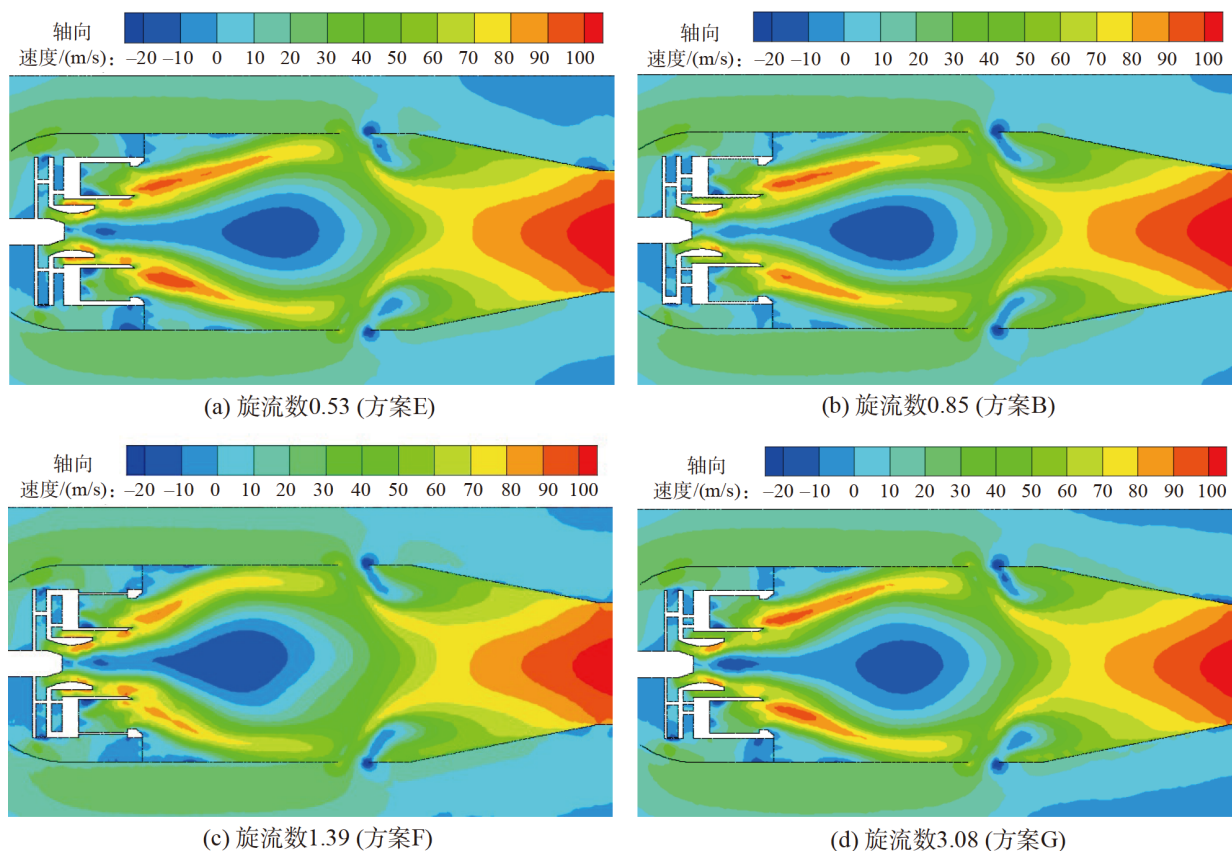


图11 第二级旋流器旋流数对燃烧室沿流程方向速度分布的影响

Fig.11 Effect of the swirl number of the second-stage swirler on the velocity distribution along the flow path in the combustion chamber

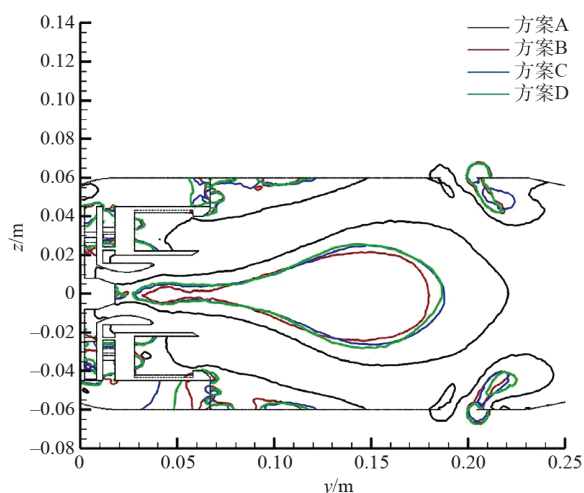


图12 第二级旋流器旋流数对燃烧室中心回流区分布的影响
Fig.12 Effect of the swirl number of the second-stage swirler on the distribution of the central recirculation zone in the combustion chamber

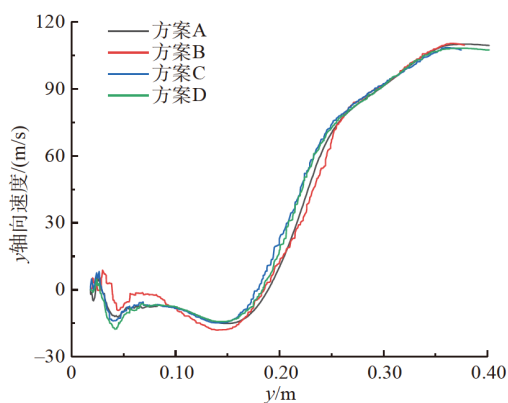


图13 第二级旋流器旋流数对燃烧室中心轴线速度分布的影响
Fig.13 Effect of the swirl number of the second-stage swirler on the velocity distribution of the central axis of the combustion chamber

$y=0.08$ m处,速度由负逐渐转正,标志着中心回流区逐步建立。转正后的速度呈指数式上升,直至火焰筒出口段趋于稳定。该稳定趋势与火焰筒末端的收敛结构有关,该结构对沿流程方向的流场速度起到了减缓和调节作用。该结果表明,预燃级第二级旋流器主要起促进燃油雾化作用,对轴线速度分布虽有一定影响,但不如第一级旋流器显著,说明其对流场结构的干预较弱。

根据方案E、B、F、G沿流程方向的轴向速度云图、中心回流区曲线图及中心轴线速度分布图的对比分析,可以得出方案B为4种方案中的最佳方案,即当预燃级第二级旋流数为0.85时,燃烧室的流场

性能较好,满足工作需要形成中心回流区,所做结构设计合理。

4.2.2 第二级旋流数对燃烧室温度场的影响

图14为预燃级第二级旋流器在不同旋流数下的燃烧室轴向截面温度分布云图。可以看出,火焰在高温燃烧区域的差别比较明显。其中,当旋流数为0.85时,高温燃烧区域分布较均匀,燃烧较为充分;当旋流数为0.53、1.39、3.08时,高温燃烧区域在主燃区均出现一定程度的后移趋势,不利于火焰在主燃区内稳定燃烧,燃烧效果整体一般。主要原因在于火焰筒内中心回流区的速度分布特性对火焰稳定性具有关键影响,即当中心回流区形成良好且回流强度适中时,更有利于火焰在主燃区内稳定驻留。由此可见,随着旋流数的增加,主燃区火焰稳定性呈先增强后减弱的趋势,且旋流数越大,其对流场结构和火焰稳定性的影响越明显。

图15为燃烧室中心轴线温度分布曲线。通过分析可以得出,燃烧室中心轴线温度呈先增大后降低趋势,在 $y=0.15\sim 0.20$ m处,方案E的最高温度可达2 600 K,方案B、F的最高温度可达2 500 K,说明方案E、B、F的燃烧更加充分;方案G的最高温度可达2 400 K,说明随着旋流数的增加,主燃区最高温度逐渐下降。结合上文分析的方案B中心回流区最为理想,可得出方案B的中心回流区结构较优,对高温区形成及火焰稳定有积极作用。

根据方案E、B、F、G沿流程方向的温度分布云图和中心轴线温度分布曲线图的对比分析,可以得出方案B为4种方案中的最佳方案。即当预燃级第二级旋流数为0.85时,燃烧室的温度场性能较好,主燃区燃烧充分且稳定。

4.3 预燃级旋流器对燃烧室出口温度场与燃烧效率的影响

4.3.1 预燃级旋流器对燃烧室出口温度场的影响

图16为燃烧室出口温度分布云图。在选择出预燃级第一级最优旋流数的条件下,通过调节预燃级第二级旋流数,分析燃烧室出口温度场的变化情况,探究其对燃烧特性的影响。通过分析可以得出,不同方案下的出口温度基本在接近的范围内,但中心高温区域的分布存在差异。其中,方案E的中心区域最高温度可达2 000 K以上,原因在于预燃级旋流数较小,使得经预燃级的燃油摄入量减少,导致燃烧室内的回流作用减弱,同时也增加了燃烧反应时火

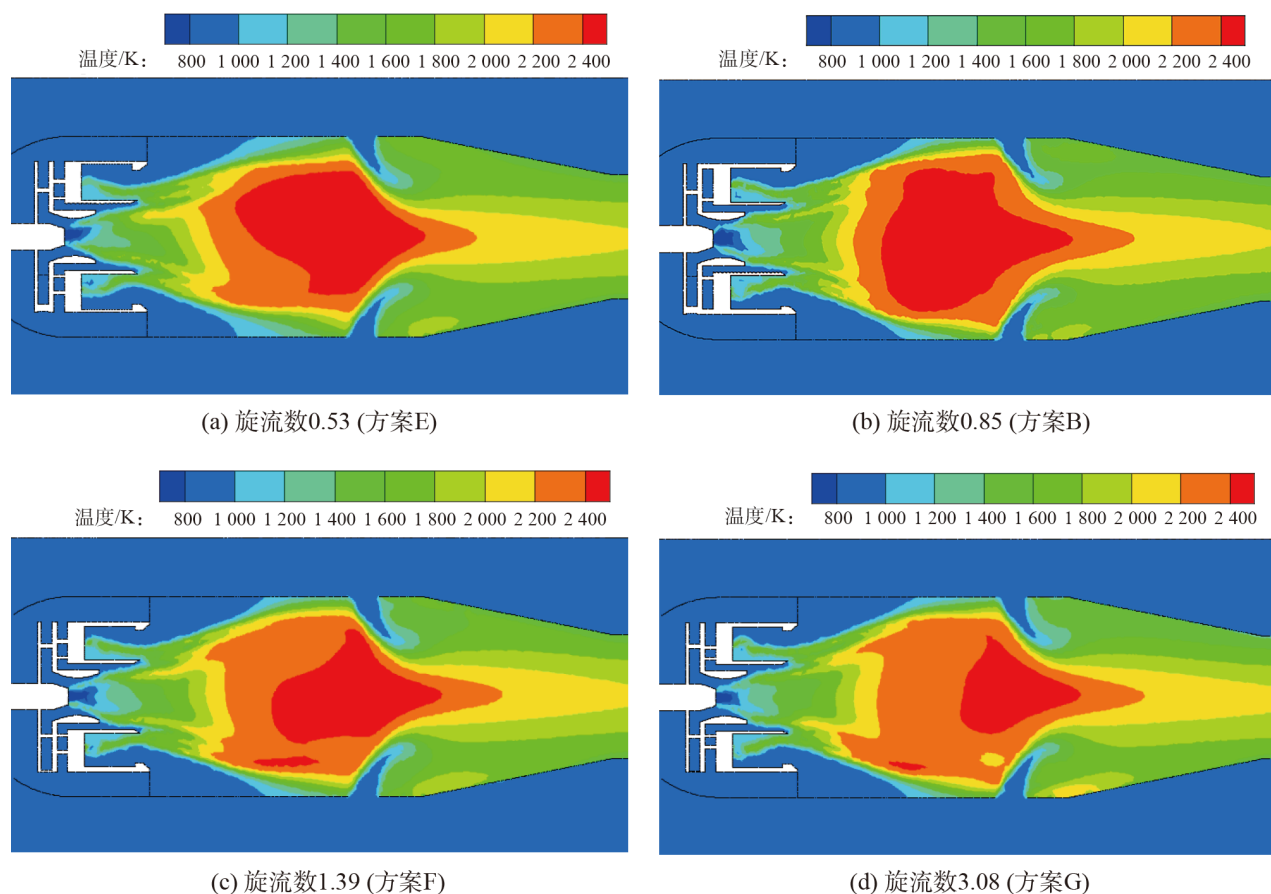


图14 第二级旋流器旋流数对燃烧室沿流程温度分布的影响

Fig.14 Effect of the swirl number of the second-stage swirler on the temperature distribution along the flowpath in combustion chamber

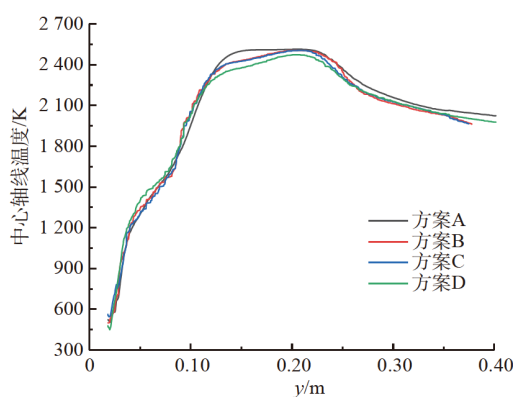


图15 第二级旋流器旋流数对燃烧室中心轴线温度分布的影响

Fig.15 Effect of the swirl number of the second-stage swirler on the temperature distribution of the central axis of the combustion chamber

焰的长度,所以在燃烧室出口处仍有较高温度的火焰燃烧;方案B和方案F的燃烧室出口温度分布较好,中心区域最高温度在1 900~2 000 K之间,且高

温区域的面积居中分布;方案G的出口温度分布不均,使得其后涡轮部件受热不均,不利于涡轮的使用寿命。

4.3.2 预燃级旋流器对燃烧室燃烧效率的影响

图17为燃烧室燃烧效率随油气比的变化曲线。可以看出,随着油气比的增加,各方案的燃烧效率呈缓慢增长趋势,说明此时燃油流量的增加对燃烧室的燃烧效率影响较小;但随着供油增加到一定程度时,燃烧效率开始降低。导致此现象的主要原因为随着油气比的增加,燃油流量摄入增大,使得主燃区的油气混合接近恰当比,导致燃烧室内化学反应速率及火焰传播速率变大,燃烧强度增强,进而提高了燃烧效率;但随着油气比的不断增加,主燃区会呈现富燃燃烧状态,导致燃烧室内的油气分布不均,易造成火焰形成淬熄状况,同时也吸收了燃烧释放的热量,降低了主燃区的燃烧温度,增加了排放量,导致燃烧效率降低。

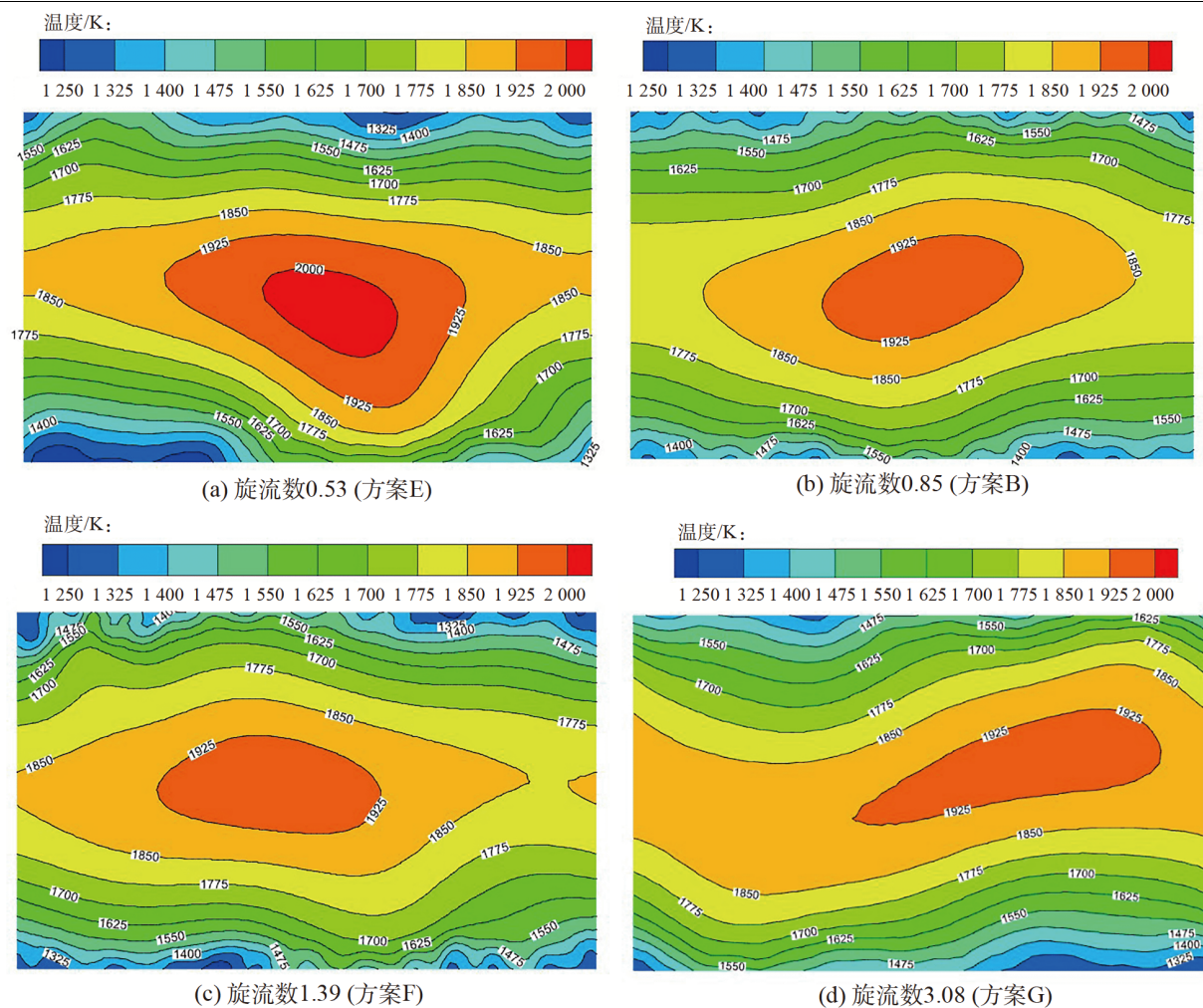


图16 燃烧室出口温度分布云图

Fig.16 Nephogram of combustion chamber outlet temperature distribution

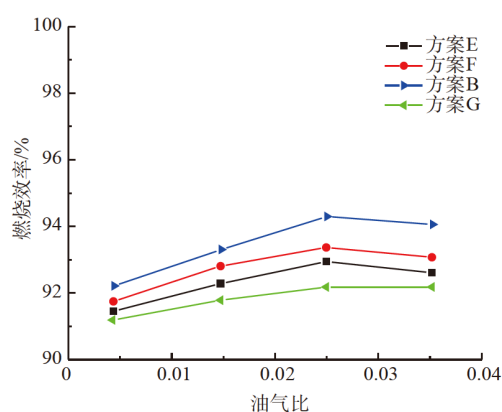


图17 燃烧效率随油气比的变化曲线

Fig.17 Curve of combustion efficiency changing with fuel-gas ratio

通过曲线走势可以分析出,在油气比为0.025时,方案B的燃烧效率最高,方案G的燃烧效率最低。该现象说明了燃烧效率与燃烧室中心回流区分布有

关,即中心回流区的流场特性越好,燃烧越充分,燃烧效率越高。

5 结论

从预燃级第一级与第二级旋流器的结构特征参数变化入手进行研究,开展了旋流数变化对燃烧室流场与温度场燃烧特性影响的研究,揭示了燃烧室内速度场、回流区、温度场的分布变化规律。通过分别改变预燃级第一级、第二级旋流器旋流数,采用数值计算方法探究了预燃级旋流器对燃烧室流场和温度场燃烧特性的影响,得出了不同燃烧流场下的最佳旋流器结构参数。主要结论如下:

(1) 当预燃级第一级、第二级旋流器旋流数均为0.85(即预燃级第一级旋流角为 $+45^\circ$,第二级旋流角为 -45°)时,中心分级燃烧室的流场分布特性较好,中心回流区的分布也较为理想。

(2) 当预燃级第一级、第二级旋流器旋流数均为0.85(即预燃级第一级旋流角为 $+45^\circ$,第二级旋流角为 -45°)时,中心分级燃烧室的温度场分布特性较好,出口温度分布也较为理想,表明回流区的形状大小影响着温度场分布,对燃烧室的燃烧特性具有积极作用。

(3) 当预燃级第一级、第二级旋流器旋流数均为0.85(即预燃级第一级旋流角为 $+45^\circ$,第二级旋流角为 -45°)时,在油气比为0.025时,中心分级燃烧室的燃烧效率最高。

参考文献:

- [1] 高贤智,李 锋,郭大鹏. 超高温升中心分级燃烧室设计及计算分析[J]. 航空发动机,2015,41(1):9-15.
GAO Xianzhi,LI Feng,GUO Dapeng. Design and computational analysis of ultra-high temperature rise central staged combustion chamber[J]. Aeroengine, 2015,41(1):9-15. (in Chinese)
- [2] 于建桥,王成军,里海洋,等. 主燃级旋流器对中心分级燃烧室出口性能的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报,2023,40(1):22-30.
YU Jianqiao,WANG Chengjun,LI Haiyang,et al. Effect of main combustion stage swirler on the outlet performance of the central staged combustion chamber [J]. Journal of Shenyang Aerospace University,2023, 40(1):22-30. (in Chinese)
- [3] MATSUYAMA R,KOBAYASHI M,OGATA H,et al. Development of a lean staged combustor for small aero-engines[R]. ASME GT2012-68272,2012.
- [4] 刘 威,王成军,于 雷,等. 中心分级燃烧室燃烧性能试验研究[J]. 中国测试,2019,45(9):149-155.
LIU Wei,WANG Chengjun,YU Lei,et al. Experimental study on combustion performance of central staged combustion chamber[J]. China Measurement & Test, 2019,45(9):149-155. (in Chinese)
- [5] 于建桥,王成军,里海洋,等. 旋流器结构特征参数对中心分级燃烧室温度场的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究,2023,36(2):14-21.
YU Jianqiao,WANG Chengjun,LI Haiyang,et al. Influence of swirler structural characteristic parameters on the temperature field of the central staged combustion chamber[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2023,36(2):14-21. (in Chinese)
- [6] 刘 岩,惠 鑫,王建臣,等. 预燃级旋流数对中心分级燃烧室点火性能影响[J]. 航空动力学报,2022,37(2):2335-2343.
LIU Yan,HUI Xin,WANG Jianchen,et al. Effect of pre-stage swirl number on ignition performance of central staged combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2022,37(10):2335-2343. (in Chinese)
- [7] 刘爱斌,李昱泽,朱 涛,等. 中心分级燃烧室旋流角变化对燃烧特性的影响[J]. 热能动力工程,2019,34(12):16-23.
LIU Aiguo,LI Yuze,ZHU Tao,et al. Effect of swirl angle variation on combustion characteristics in a central staged combustion chamber[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2019,34(12):16-23. (in Chinese)
- [8] 王 泽. 中心分级燃烧室流场特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2020.
WANG Ze. Research on flow field characteristics of central staged combustion chamber[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2020. (in Chinese)
- [9] 李 乐,索建秦,郑龙席. 旋向对中心分级燃烧室流场及温度场影响研究[J]. 西北工业大学学报,2020,38(6):1198-1209.
LI Le,SUO Jianqin,ZHENG Longxi. Research on the influence of rotation direction on flow field and temperature field in central staged combustion chamber[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2020,38(6):1198-1209. (in Chinese)
- [10] DHANUKA S K. An experimental study of the stable and unstable operation of an LPP gas turbine combustor [D]. Ann Arbor:University of Michigan,2008.
- [11] MONGIA H. TAPS: a fourth generation propulsion combustor technology for low emissions[R]. AIAA 2003-2657,2003.
- [12] LI Gouqiang,ANGIER S,LAMBOLEZ O,et al. Experimental study of velocity flow field for a multiple swirl spray combustor[R]. AIAA:2002-618,2002.
- [13] LI Guoqiang,GUTMARK E J. Flow field measurements of triple swirler spray combustor[R]. AIAA 2002-4010,2002.
- [14] LAZIK W,DOERR T,BAKE S,et al. Development of lean-burn low- NO_x combustion technology at Rolls-Royce Deutschland[R]. ASME GT2008-51155,2008.
- [15] KLINGER H,LAZIK W,WUNDERLICH T. The engine 3E core engine[R]. ASME GT2008-50679,2008.
- [16] 丁国玉,何小民,赵自强,等. 三级轴向旋流器影响燃烧室性能的试验[J]. 航空动力学报,2015,30(3):686-693.
DING Guoyu,HE Xiaomin,ZHAO Ziqiang,et al. Experimental study on the effect of three-stage axial swirler on combustion chamber performance[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(3):686-693. (in Chinese)

- Chinese)
- [17] 鄂亚佳,陈伟,何沛,等. 中心分级燃烧室主燃级设计参数的试验研究[J]. 推进技术,2022,43(8):291-297.
E Yajia, CHEN Wei, HE Pei, et al. Experimental study on design parameters of main combustion stage of central staged combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 291-297. (in Chinese)
- [18] 于建桥. 中心分级燃烧室燃烧流场性能的研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2023.
YU Jianqiao. Research on combustion flow field performance of central staged combustion chamber [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2023.
- (in Chinese)
- [19] ZHENG Zijun, HUANG Zhaoming, WANG Tao, et al. Influence of heat transfer of combustion chamber wall on the performance of gasoline engine based on polishing technology under different compression ratio and air-fuel ratio[J]. International Journal of Automotive Technology, 2022, 23(4): 1055-1063.
- [20] VERMA K A, PANDEY K M, RAY M, et al. Numerical investigation on the effect of variation of upper wall divergence angle of parallel fuel injection scramjet combustor performance[J]. International Journal of Thermofluids, 2022, 15: 100179.