

航空发动机燃烧室辐射传热特性研究

史鹏宇, 李铭, 于倩倩, 王之声, 任利时, 范玮

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:航空发动机燃烧室气态燃烧产物热辐射具有明显的非灰体特性。基于 OpenFOAM 平台,采用能准确描述气体非灰体特性的灰气体均值加权(WSGG)气体辐射模型,针对某型航空发动机燃烧室开展了湍流-燃烧-辐射多场耦合辐射换热数值研究。结果表明,辐射换热特性受到当量比、燃烧压力、壁面发射率等多个因素的影响,其中当量比占主要地位,当量比从 0.11 提升至 0.4,燃烧室壁面平均入射辐射增加 189%,出口处平均入射辐射增加 233%。当量比、燃烧压力、壁面发射率增大会提高燃烧室内平均辐射强度及燃烧室出口处辐射分布的不均匀性。径向辐射分布系数(radial radiation distribution factor,RRDF)随着当量比、燃烧压力、壁面发射率的增加而增大。

关 键 词:航空发动机;灰气体均值加权;辐射;OpenFOAM

中图分类号:V231.2

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)04-0697-10

随着军用飞机对高机动性及超声速巡航能力需求的不断增加,高温升燃烧室成为航空发动机发展的迫切需要。燃烧室温升的提高使得燃气与燃烧室内各部件的辐射换热量也变得不可忽略^[1]。相关研究^[2-3]表明,在针对热端部件的数值计算中,考虑辐射热源的计算结果与不考虑辐射热源的计算结果二者存在 30% 的偏差。然而,在考虑辐射换热的研究中,有学者发现^[4],如果将由多种成分组成的燃气辐射特性按灰体处理,计算结果与实际仍有明显偏差。可见,只有考虑辐射传热过程并对燃烧产物的非灰体辐射特性准确描述,才能对燃烧过程有更细致的了解。此外,在航空发动机燃烧室中,湍流-辐射耦合(turbulence-radiation interaction, TRI)问题^[5]不可避免,只有将湍流燃烧过程与辐射换热过程结合,才能准确研究辐射换热过程。因此,在研究航空发动机燃烧室燃烧及热部件防护时,应将辐射换热考虑在内,而在燃烧室辐射换热的研究中,对燃气非灰体特性的准确描述成为当下研究的重点^[6]。

目前描述气体非灰体特性最常见的模型为 WSGG 模型^[7-8]。WSGG 模型可以适用任何辐射传

递方程解法^[9-10],该模型将真实具有非灰体辐射性质气体视为由多种辐射特性不同的具有灰体性质的“灰气体”组成,在实际计算过程中,单独计算每种灰气体的辐射传热过程,最后将不同灰气体的计算结果加权求和获得实际气体的辐射热流。尽管上述方法对整个辐射传热过程进行大幅简化,但最近的研究^[11-15]发现 WSGG 模型仍然能够实现对复杂流动环境中气体混合物辐射传热过程的准确计算。WSGG 模型采用吸收系数表示辐射特性,计算简便、适用范围广,因此被广泛使用^[16]。

王成军等^[17]利用同样方法对不同室压下的燃烧室火焰辐射换热进行计算,发现随燃烧室压力增加,主燃区火焰筒壁的辐射热流量以及烟粒浓度明显增加。韩志双^[2]使用 WSGG 辐射模型,研究了非灰辐射性质以及由温度脉动引起的湍流辐射交互作用对温度分布以及碳黑生成的影响,认为应当充分考虑辐射和湍流-辐射交互作用对于温度分布以及碳黑的生成分布所带来的影响。Centeno 等^[6]以 WSGG 模型为基础研究了碳烟对燃烧室内湍流非预混甲烷-空气火焰辐射换热的影响,发现在碳烟浓度最高的区域,介质中局部辐射源的体积增加了 30%,壁面辐射热流增加了 25%。Liang 等^[18]采用 WSGG 模型和 Mie 理论,以航空发动机燃烧室火焰为背景,研究了颗粒粒径对高温均质气体-颗粒混

收稿日期:2023-06-30

基金项目:国家科技重大专项(2017-III-0005-0030)资助

作者简介:史鹏宇(1996—),博士研究生

通信作者:范玮(1966—),教授 e-mail:weifan419@nwpu.edu.cn

合物辐射传热的影响。结果发现,增大颗粒粒径和忽略颗粒散射都会导致辐射换热衰减;当总粒子数浓度不变时,增大粒径则得到相反的结论。

目前针对航空发动机热端部件的热辐射研究已有一定规模,然而已有研究大多对实际运行环境进行简化,不能实际复现航空发动机内复杂的流动-燃烧-辐射过程。因此,需要构建越来越细致的模型来计算辐射换热过程,其中,如何详细描述燃气的非灰体特性成为目前研究的重点。

据此,本文基于 WSGG 模型利用 OpenFOAM 开源软件发展适用于航空发动机燃烧室湍流-燃烧-辐射耦合换热问题的数值求解技术,为航空发动机内燃烧-流动-辐射传热多物理场全耦合研究提供可靠高效的辐射换热计算方法。在此基础上,分析航空发动机燃烧室辐射换热特性,获得燃烧室运行参数对燃烧室辐射热特性参数的影响规律,为燃烧室内燃烧组织手段及燃烧室热防护设计提供参考。

1 物理模型与计算方法

1.1 物理模型

本文计算所用的物理模型为某型航空发动机的全流场模型,从前往后依次为进气道、压气机转子级、压气机定子级、燃烧室、涡轮定子级、涡轮转子级和尾喷管,压气机转子级和涡轮转子级为运动部件并且拥有相同的转速,航空发动机的结构示意图如图 1a) 所示。燃烧室内环向分布有 12 个喷油嘴,此燃烧室设置有主燃孔、补燃孔和掺混孔等,为了体现燃烧室内部空气流动与燃烧组织情况,将燃烧室模型沿 $Z=0$ 截取剖面并分析截面上的空气分配与流

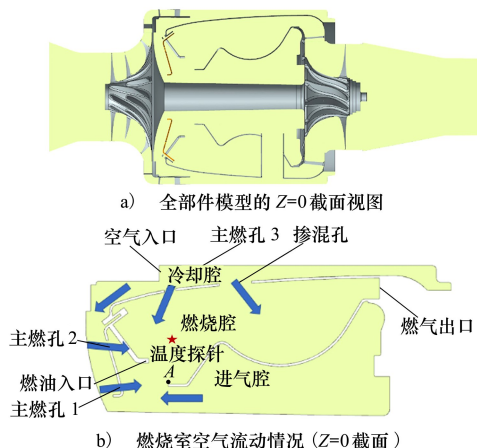


图 1 计算模型结构示意图

动方向,如图 1b) 所示。

1.2 计算方法

本文利用 OpenFOAM 开源软件对湍流流动-燃烧-辐射多场耦合辐射换热进行研究,流动部分采用适用于强湍流及旋转流动的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型进行计算,燃烧部分采用适用于航空发动机燃烧模拟的 PIMPLE 算法 (PISO-SIMPLE algorithm) 模型,该模型的反应速率仅由一个常数 C 控制,与反应机理无关, C 值越大,反应越缓慢。通过与 FLUENT 软件中使用概率密度模型 (probability density function, PDF) 的工况进行对比,确定适当的 C 值。

采用离散坐标法 (discrete ordinate model, DO 法) 计算辐射^[19],该方法将在空间上连续的辐射传递方程转化为离散的空间坐标下的辐射输运方程,因此只需保证足够的网格密度,该方法就可在几何结构和边界条件复杂的情况下保持很高的精度。

WSGG 模型 (weighted sum of gray gases model) 是一种常用的气体辐射传输模型,适用于工程应用中的高温气体辐射传输计算,其基本原理如图 2 所示。该模型将气体介质视为由辐射吸收系数在不同波长上是恒定的数种灰体组成,对不同波长上所有灰体的辐射吸收系数加权平均,以此获得整个气体介质的辐射吸收系数。在 WSGG 模型中,每个灰体的吸收系数与温度、燃烧压力、组分和波长有关,可以通过实验或理论计算得到。

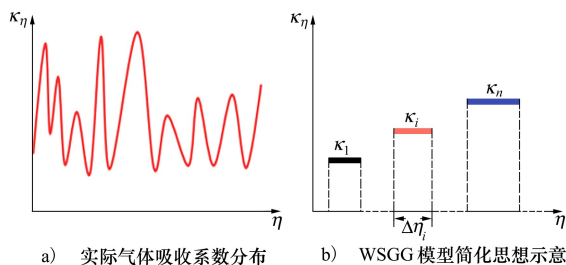


图 2 WSGG 模型的基本原理^[20]

WSGG 的基本假设中,若辐射流沿某一方向经过的行程长度为 s ,则距离 s 上的总发射率可以表示为^[11]

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^I a_{\varepsilon,i}(T)(1 - e^{-k_i p s}) \quad (1)$$

式中: $a_{\varepsilon,i}$ 是第 i 种虚拟灰色气体的发射率加权因子; $1 - e^{-k_i p s}$ 是第 i 种虚拟灰色气体的发射率; k_i 是第 i 种灰色气体的吸收系数; p 是所有吸收气体的分压之和; s 是路径长度。 $a_{\varepsilon,i}$ 和 k_i 由气体成分和温度

决定。

当 $i = 0$ 时,加权因子为

$$a_{\varepsilon,0} = 1 - \sum_{i=0}^I a_{\varepsilon,i}(T) \tag{2}$$

式中, $a_{\varepsilon,0}$ 为 WSGG 模型所设定的透明气体的加权因子。加权因子 $a_{\varepsilon,i}(T)$ 是关于温度的函数,WSGG 模型使用多项式进行拟合

$$a_{\varepsilon,i}(T) = \sum_{j=1}^I b_{\varepsilon,i,j} T^{j-1} \tag{3}$$

式中: $b_{\varepsilon,i,j}$ 是 WSGG 模型中加权因子的气体温度多项式系数。系数 $b_{\varepsilon,i,j}$ 和 k_i 通过将方程(1) 和实验获得的总发射率表拟合估算获得。

介质的总吸收系数由发射率求得,如(4) 式所示

$$a = - \frac{\ln(1 - \varepsilon)}{s} \tag{4}$$

路径长度 s 可以按照(5)式计算

$$s = 3.6V/A \tag{5}$$

式中: V 是计算域体积; A 是计算域表面积。

1.3 边界条件

燃料采用 $C_{12}H_{23}$ 代替航空煤油的 21 步简化机理^[21],基本边界条件为燃烧室内的压力 0.44 MPa,入口处的空气温度 500 K,燃油温度 300 K;空气与燃油均采用质量流量入口;燃烧室出口采用压力出口,压力为 101 325 Pa。研究中保持空气流量为 750 g/s,燃油流量范围 5.61 ~ 20.4 g/s,燃烧压力 0.24~0.52 MPa,壁面发射率 0.8~1。当量比(全局当量比)、燃烧压力的工况选取分别对应燃烧室的启动工况、过渡工况、标准工况和极限工况。

1.4 网格无关性验证

对图 1 所示的物理模型进行网格划分,网格类型为多面体非结构网格。如表 1 所示,通过计算不同网格数下燃烧室中心处(见图 1b)温度探针位置)的温度值来进行网格无关性验证,确定计算网格数量为 380 万。

表 1 燃烧室网格无关性验证

网格数量/万	中心处温度/K
86	789.6
220	831.6
380	836.5
420	837.1

1.5 算法验证

本文根据燃烧室多场耦合数值模拟特点,即水蒸气与二氧化碳的摩尔比为 1、温度在 600~2 400 K 范围内、吸收性气体分压与光学路径长的乘积介于 0.000 1 MPa · m 至 1 MPa · m 之间的特点,选取了 Dorigon 等^[12] 提出的基于 HITEMP2010 数据库的 WSGG 气体辐射模型,并将计算结果与 Smith 的实验数据^[10]、Fluent 的计算结果(默认使用 Smith1982 年的 WSGG 模型^[22]) 以及 OpenFOAM 自带的 greyMean 气体辐射模型相对比。

以气体混合物的总发射率作为评价标准,比较 greyMean 气体辐射模型以及 2 种 WSGG 气体辐射模型的优劣,结果如图 3 所示。由图 3 可知, greyMean 模型仅能在变化趋势上符合实验,其计算所得结果与实验结果相差明显。2 种 WSGG 模型的趋势相同,但 Fluent 使用的 WSGG 模型的预测值偏低,拟合效果不如本文使用的 WSGG 气体辐射模型,本文使用的 WSGG 模型预测值变化趋势与实验更为符合,误差更小,可以满足计算要求。综上所述,本文在 OpenFOAM 中构建了 WSGG 气体辐射模型,该 WSGG 气体辐射模型拓展了 OpenFOAM 在非灰体辐射计算领域的能力。

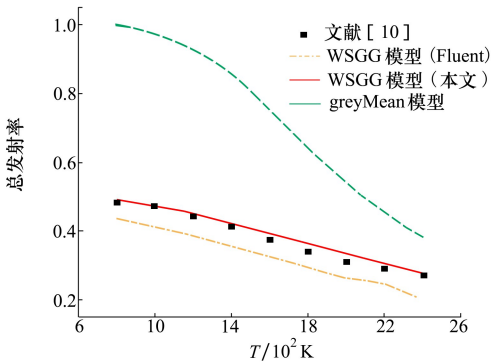


图 3 不同 WSGG 模型对实验数据的拟合效果

2 结果与分析

2.1 当量比对燃烧室辐射换热特性的影响

燃烧室当量比(φ)会影响燃烧室燃气温度及容积释热率等参数,导致燃烧室中辐射换热、燃烧室壁温的变化,进而影响燃烧室高效安全运行及寿命。因此需要研究当量比变化导致的燃烧室壁面、出口处和内部辐射场的变化。

在燃烧压力为 0.44 MPa,壁面发射率为 0.8 的

条件下,保持空气流量不变,逐渐增加燃油流量获得如图 4 所示的不同当量比下 $Z=0$ 截面的入射辐射分布。由图 4 可知,随着当量比提高,燃烧室内的入射辐射强度不断增大。从图 4a)~4d) 的变化可以看出,入射辐射强度较高的区域逐渐向燃烧室下游扩张。这主要是由于随着主燃区当量比的提高,燃

油在主燃区富集,导致了燃烧效率下降,使得该区域温度相比于低当量比时下降,该区域富集的燃油随气流移动至燃烧室中后部,与从掺混孔进入的空气充分反应放热,使燃烧室中后部出现高温区进而影响辐射场。由于辐射强度与燃烧室温度成正比,最终表现为高辐射强度区域向燃烧室中后部移动。

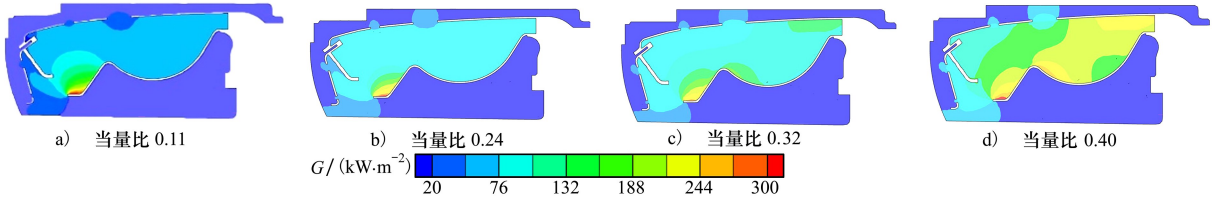


图 4 不同当量比下的中心截面入射辐射分布

不同当量比下的壁面平均入射辐射 $G_{ave,wall}$ 如图 5 所示。由于燃烧室温度的提升以及高温区的增加,燃烧室壁面平均入射辐射随着当量比的提高而增大,当量比从 0.11 提升至 0.40 时,壁面平均入射辐射提高了 189%。

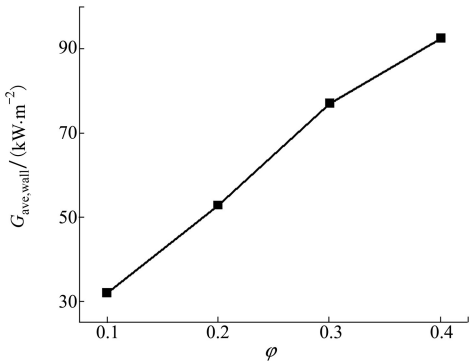


图 5 不同当量比下的壁面平均入射辐射

为更详细研究当量比对燃烧室壁面入射辐射的影响,将图 1b) 中 A 点绕涡轮轴中心 (x 轴) 旋转构成一个圆形,计算该圆上每一处入射辐射的相对大小 (relative size of incident radiation, RSIR), 定义其为壁面入射辐射沿周向的相对大小。紧贴燃烧室下壁面沿轴向取点,计算不同位置处入射辐射的相对大小,定义其为壁面入射辐射沿轴向的相对大小。分别研究当量比改变对上述参数的影响,结果如图 6~7 所示。由图 6 可知整个环形燃烧室辐射分布并不均匀,且不同当量比下辐射相对强度的分布也有明显差异。当量比为 0.11 时,壁面周向高入射辐射区域为 90° 附近、 220° 附近和 330° 附近,低入射辐射区域为 50° 附近和 170° 附近。随着当量比提升, 50°

附近的低入射辐射区域逐渐消失, 170° 附近的低入射辐射区域入射辐射强度增大;随着当量比提升,高入射辐射区域的位置没有变化。上述结果表明,壁面入射辐射在周向上分布非常不均匀,这主要是由于燃烧室几何结构以及进气方式导致燃烧室周向温度场产生畸变,不同位置处温度差距较大。结合图 4 及图 6 可以发现,随着当量比提升,壁面入射辐射的周向不均匀性有所上升。

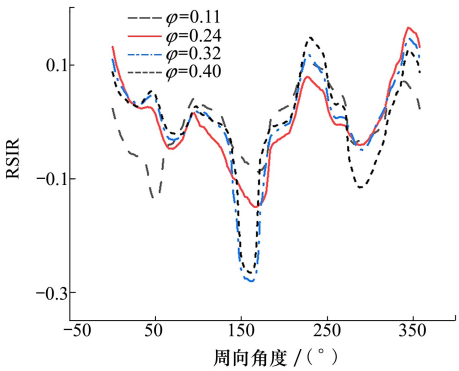


图 6 不同当量比下壁面入射辐射沿周向的相对大小

图 7 展示了不同当量比下沿轴向的壁面入射辐射分布。由图可知,当量比为 0.11 时,沿轴向入射辐射总体上升,在 $X=0.16\text{ m}$ 处突然下降,这是由于该处排布有掺混孔,低温的来流空气冷却并稀释了主流燃气。随着当量比增大,燃烧室前部辐射的相对强度下降,燃烧室中后部辐射的相对强度上升。这说明随着当量比增大,高辐射强度区域不断向燃烧室中后部移动。壁面入射辐射的分布在轴向上分布非常不均匀,随着当量比提升,壁面入射辐射强度不断上升,而轴向不均匀性逐渐增加。这是由于当

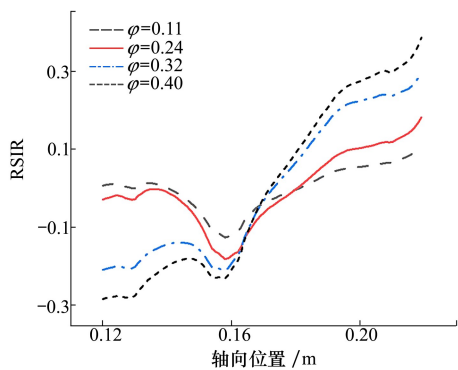


图 7 不同当量比下壁面入射辐射沿轴向的相对大小

量比的变化对轴向温度分布影响较大,当量比越大,轴向温度分布越不均匀,从而使得入射辐射在轴向的分布更加不均匀。

航空发动机燃烧室出口的辐射分布与涡轮叶片的正常运行紧密相关,因此研究了不同当量比下的出口处平均入射辐射 ($G_{ave,out}$)。结果如图 8 所示,燃烧室出口处平均入射辐射随着当量比的提高而增大。当量比从 0.11 提升至 0.40 时,燃烧室出口处平均入射辐射提高了 233%,这与图 4 显示的燃烧室高辐射区后移相匹配。

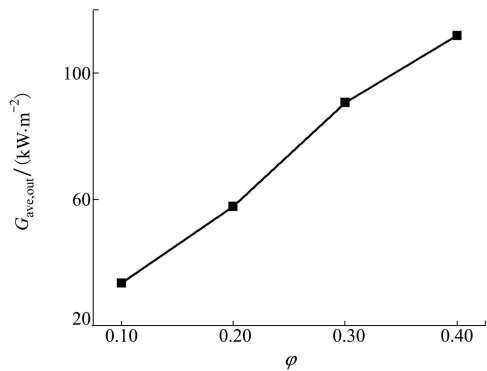


图 8 不同当量比下出口处的平均入射辐射

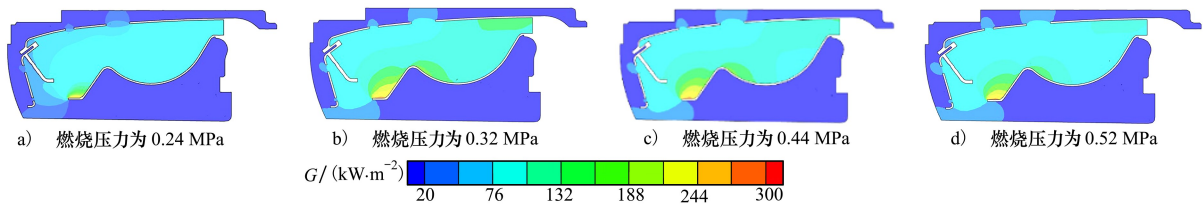


图 10 不同燃烧压力下辐射场

为表征燃烧室出口面上辐射热流分布的不均匀性,本文仿照温度分布系数的概念,定义了径向辐射分布系数 RRDF (radial radiation distribution factor)。其计算公式如(6)式所示。

$$R_{RDF} = \frac{G_{r,ave} - G_{ave,out}}{G_{ave,out}} \quad (6)$$

式中: $G_{r,ave}$ 表示某半径 r 下的平均入射辐射; $G_{ave,out}$ 表示燃烧室出口截面上的平均入射辐射。

不同当量比下燃烧室出口处的 RRDF 分布如图 9 所示。结果表明,不同当量比下 RRDF 沿径向先减小后增加,即在出口处越靠近燃烧室上下壁面,入射辐射的不均匀性越高。随着当量比提高,RRDF 增大,燃烧室出口处入射辐射的不均匀性增大。

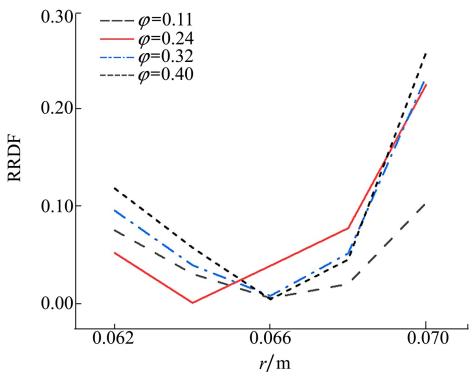


图 9 不同当量比下出口不同半径处的 RRDF

2.2 燃烧压力对燃烧室辐射换热特性的影响

燃烧室运行压力变化直接影响燃烧室中燃烧效率、燃气温度等参数,进而影响燃烧室的寿命和正常运行。燃烧过程会改变燃烧室压力,因此本文通过改变燃烧室初始压力 p_c 来研究燃烧室压力对辐射换热过程的影响。

在当量比为 0.32,壁面发射率 0.8 条件下,不同燃烧压力下 $Z = 0$ 截面的人射辐射分布如图 10 所示。

由图 10 可知,随着燃烧压力提高,燃烧室内的

入射辐射强度不断增大,燃烧室内部的辐射强度较

高的区域逐渐向燃烧室前部集中。与当量比不同,燃烧压力对于辐射的影响不直接通过影响温度场这一途径,而是由于随着燃烧压力上升,来流空气密度上升,在来流质量流量不变的条件下,来流空气的动量有所下降,从而对燃烧室的空气流动产生影响,(随着燃烧压力由 0.24 MPa 上升至 0.52 MPa,掺混孔进入燃烧室的气流速度由 90 m/s 下降为 70 m/s)进而影响燃烧室内的温度分布,最终影响辐射分布。同时,从辐射计算角度考虑,燃烧压力的升高提高了整个燃烧室的吸收性气体分压,从而使得整个计算域内在组分浓度变化不大的情况下辐射强度有所提升。

不同燃烧压力下的壁面平均入射辐射如图 11 所示。计算结果表明,壁面平均入射辐射随着燃烧压力提高而增大。当燃烧压力由 0.24 MPa 提升至 0.52 MPa 时,壁面平均入射辐射提高了 145%。

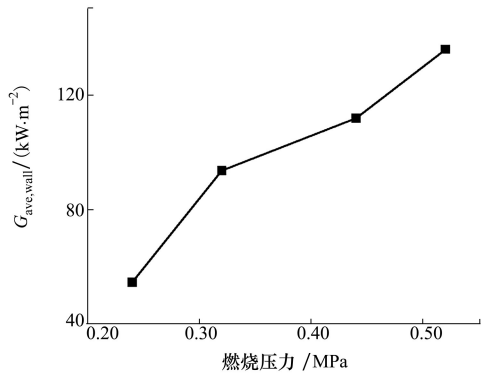


图 11 不同燃烧压力下的壁面平均入射辐射

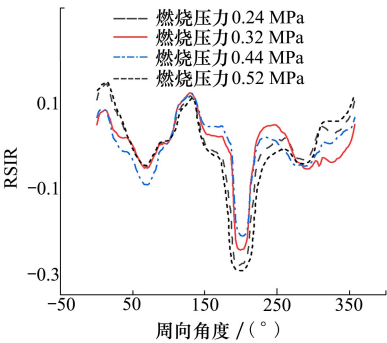


图 12 不同燃烧压力下壁面入射辐射沿周向的相对大小

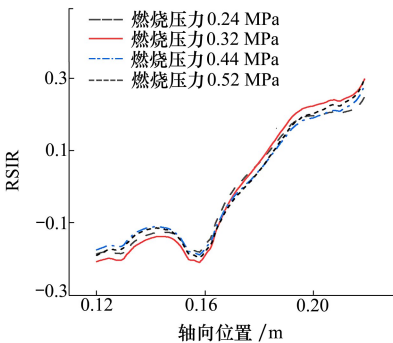


图 13 不同燃烧压力下壁面入射辐射沿轴向的相对大小

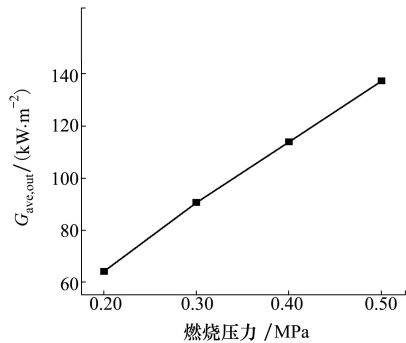


图 14 不同燃烧压力下出口处的平均入射辐射

不同燃烧压力下燃烧室出口处的 RRDF 分布如图 15 所示。结果表明,不同燃烧压力下 RRDF 沿径向的变化为先减小后增加,受掺混气影响,在出口处越靠近燃烧室上下壁面,入射辐射的不均匀性越高。

为更详细研究燃烧压力对燃烧室壁面入射辐射的影响,计算了不同燃烧压力下沿周向及轴向的壁面入射辐射分布,结果如图 12~13 所示。由图 12 可知,燃烧压力为 0.32 MPa 时,壁面周向高入射辐射区域为 10°和 130°附近,低入射辐射区域为 70°和 200°附近。随着当量比提升,200°和 70°附近的低入射辐射区域不均匀度逐渐下降;随着燃烧压力的提升,130°附近的高入射辐射区域位置与不均匀度没有变化,而 10°附近的高入射辐射区域不均匀度逐渐下降。与当量比对壁面入射辐射的影响类似,壁面入射辐射分布在周向上分布非常不均匀。

图 13 展示了不同燃烧压力下壁面沿轴向的入射辐射分布,由图 13 可知,燃烧压力的变化对于燃烧室壁面入射辐射的轴向分布影响较小,燃烧室入射辐射沿轴向分布的变化规律为随着 X 方向小幅增大并在 $X=0.16$ m 附近由于掺混孔的掺混作用导致辐射强度突降。与增加当量比不同,随着压力提升,壁面入射辐射的轴向不均匀性有所下降,这主要是由于燃烧室空气流速下降,流场分布更均匀,进而改善辐射分布。

为探究燃烧压力对燃烧室出口处入射辐射的影响,计算了不同燃烧压力下的燃烧室出口处平均入射辐射,结果如图 14 所示。计算结果表明,燃烧室出口处平均入射辐射随着燃烧压力的提高而增大。当燃烧压力由 0.32 MPa 提升至 0.52 MPa 时,燃烧室出口处平均入射辐射提高了 51%。

随着燃烧压力的提高,RRDF 增大,燃烧室出口处入射辐射的不均匀性增大,这一点与当量比的影响类似,受燃烧室结构的影响,燃烧压力的增加对于燃烧室各处辐射热流的强化程度也是不均匀的。

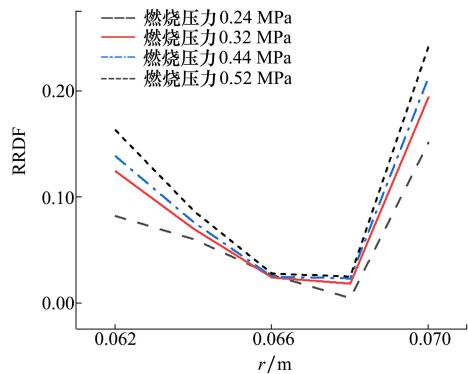


图 15 不同燃烧压力下出口不同半径处的 RRDF

2.3 壁面发射率对燃烧室辐射换热特性的影响

在发动机燃烧室的运行使用中,燃烧室壁面在

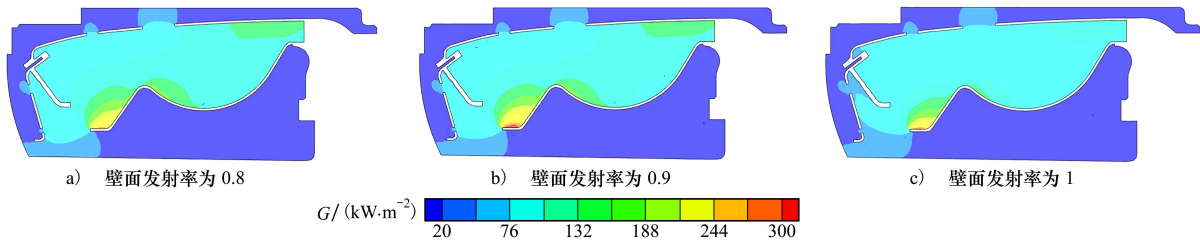


图 16 不同壁面发射率下辐射场

不同壁面发射率下的壁面平均入射辐射如图 17 所示。计算结果表明,壁面平均入射辐射随着壁面发射率的提高而减小。壁面发射率提升 25%,壁面平均入射辐射下降了 2%。

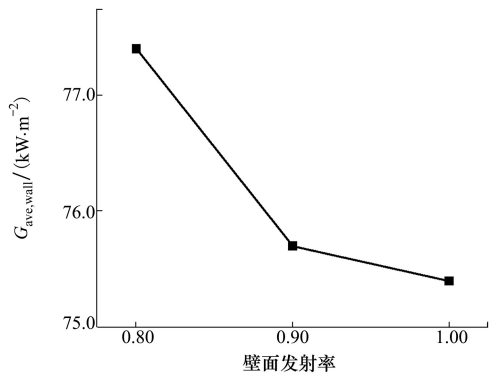


图 17 不同壁面发射率下的壁面平均入射辐射

为更详细研究发射率对燃烧室壁面入射辐射的

高温环境中氧化、碳黑污染及壁温变化,使壁面辐射特性发生改变,影响燃烧室的正常运行及燃烧室寿命。为研究壁面辐射特性对辐射的影响,将壁面发射率分别设为 0.8,0.9 和 1,代表表面未氧化/积碳、部分氧化/积碳和完全氧化/积碳的燃烧室壁面。

在当量比为 0.32,燃烧压力为 0.44 MPa 的条件下,不同壁面发射率下 $Z=0$ 截面的入射辐射分布如图 16 所示。由图 16 可知,随着壁面发射率提高,燃烧室内的入射辐射强度略微下降,其原因是随着壁面发射率的不断增加,壁面反射率减小,壁面吸收的来自高温燃气的辐射热流量增加,从而使得燃烧室内辐射强度略微下降。

影响,计算了不同壁面发射率下壁面沿周向及轴向的入射辐射分布,结果如图 18~19 所示。由图 18 可知,壁面入射辐射沿周向的分布几乎不受壁面发射率的影响。从图 19 可以看出,随着壁面发射率增大,壁面沿轴向的入射辐射分布趋势变化很小,其不均匀性略有增加。

图 20 展示了不同壁面发射率下的燃烧室出口处平均入射辐射。结果表明,燃烧室出口处平均入射辐射随着壁面发射率的提高略有下降。当壁面发射率由 0.8 提升至 1 时,燃烧室出口处平均入射辐射下降了 0.8%。

不同壁面发射率下燃烧室出口处的 RRDF 分布如图 21 所示。结果表明,不同壁面发射率下 RRDF 沿径向的变化为先减小后增加,即在出口处越靠近燃烧室上下壁面,入射辐射的不均匀性越高。随着壁面发射率的提高,RRDF 增大,燃烧室出口处入射辐射的不均匀性增大。

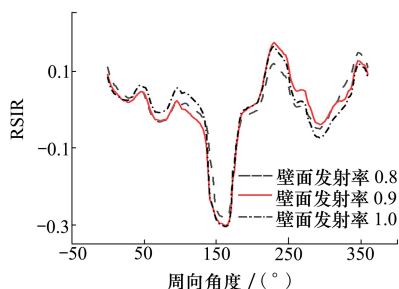


图 18 不同壁面发射率下入射辐射沿周向的相对强度

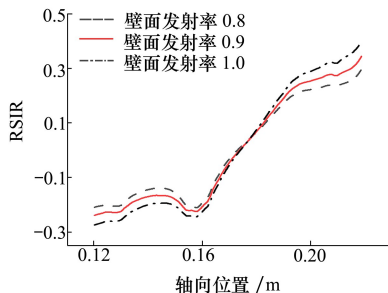


图 19 不同壁面发射率下入射辐射沿轴向的相对强度

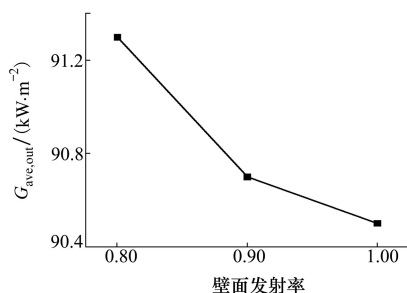


图 20 不同壁面发射率下出口处的平均入射辐射

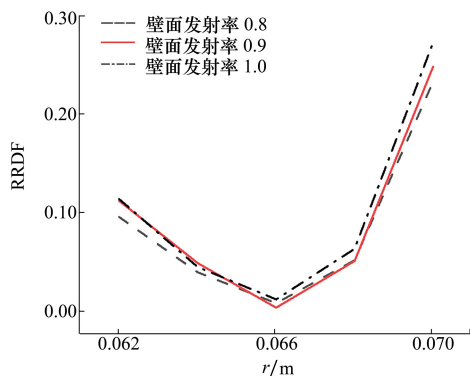


图 21 不同壁面发射率下出口不同半径处的 RRDF

3 结 论

本文基于 OpenFOAM 开源软件发展了适用于航空发动机热部件湍流-燃烧-辐射耦合换热问题的数值求解技术,为发动机内燃烧、流动、传热多物理场全耦合研究提供了可靠高效的辐射换热计算方法。在此基础上,开展了航空发动机燃烧室辐射换

热特性分析,获得了热辐射效应对发动机热特性参数的影响规律,研究主要结论有:

1) 在 OpenFOAM 中构建 WSGG 气体辐射模型,并验证了该模型处理航空发动机高温燃气非灰辐射参数的适用性和可靠性。

2) 当量比自 0.11 提升至 0.40 的过程中,燃烧室辐射热流量因燃气辐射特性改变而急剧增加,燃烧室出口处平均入射辐射提高 233%,同时主要辐射热流区域后移至燃烧室中后部。当量比的增加会同时增大周向和轴向辐射强度分布的不均匀性。

3) 燃烧压力增加增强燃烧室的辐射传热,燃烧压力增加 117%,燃烧室出口处平均入射辐射仅提高 145%,影响程度低于当量比。增加燃烧压力有助于减小周向壁面辐射的不均匀性,相同当量比条件下,燃烧室的 RRDF 平均提升 20.5%。

4) 壁面发射率变化对壁面辐射影响极小,发射率变化增加 25%,燃烧室出口处平均入射辐射最大仅下降 0.8%。因此,进行辐射换热计算时基本可忽略燃烧室壁面辐射特性变化的影响。

参考文献:

- [1] 尹洪. 先进燃气轮机燃烧室与透平交互作用的流动传热机理研究[D]. 北京:清华大学, 2014
YIN Hong. Research on the flow and heat transfer of combustor-turbine interaction in advanced gas turbine[D]. Beijing:Tsinghua University, 2014 (in Chinese)
- [2] 韩志双, 王振峰. 高压燃气涡轮叶栅热辐射特性研究[J]. 机械工程师, 2010(4): 74-76
HAN Zhishuang, WANG Zhenfeng. The study of heat radiation characteristics for a high pressure gas turbine[J]. Mechanical Engineer, 2010(4): 74-76 (in Chinese)
- [3] LEFEBVRE A H. Flame radiation in gas turbine combustion chambers[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1984, 27(9): 1493-1510
- [4] WANG L, MODEST M F, HAWORTH D C, et al. Modelling non-gray gas-phase and soot radiation in luminous turbulent non-premixed jet flames[J]. Combustion Theory & Modelling, 2005, 9(3): 479-498
- [5] 张丽芬, 刘振侠, 廉筱纯. 气冷涡轮叶片三维换热问题计算[J]. 航空动力学报, 2007(8): 1268-1272

- ZHANG Lifan, LIU Zhenxia, LIAN Xiaochun. Numerical study of 3D heat transfer for turbine blade with air cooling[J]. Journal of Aerospace Power, 2007(8): 1268-1272 (in Chinese)
- [6] CENTENO F R, BRITTES R, FRANCA F H R, et al. Application of the WSGG model for the calculation of gas-soot radiation in a turbulent non-premixed methane-air flame inside a cylindrical combustion chamber[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93: 742-753
- [7] HOWELL J R, MENGUC M P, DAUN K, et al. Thermal radiation heat transfer[M]. Boca Raton: CRC Press, 2020
- [8] MODEST M F. The treatment of nongray properties in radiative heat transfer: from past to present[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(6): 061801
- [9] HOTTEL H C, SAROFIM A F. The effect of gas flow patterns on radiative transfer in cylindrical furnaces[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1965, 8(8): 1153-1169
- [10] HO S Y. Comments on the AFCRL atmospheric absorption line parameters compilation in the 2 900~3 000 cm⁻¹ atmospheric window[J]. Infrared Physics, 1979, 19(6): 699-700
- [11] GAMACHE R R, VISPOEL B, REY M, et al. Total internal partition sums for the HITRAN2020 database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2021(271): 271
- [12] DORIGON L J, DUCIAK G, BRITTES R, et al. WSGG correlations based on HITEMP2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H₂O/CO₂ mixtures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 863-873
- [13] CASSOL F, BRITTES R, FRANCA F H R, et al. Application of the weighted-sum-of-gray-gases model for media composed of arbitrary concentrations of H₂O, CO₂ and soot[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 79: 796-806
- [14] DEMARCO R, CONSALVI J L, FUENTES A, et al. Assessment of radiative property models in non-gray sooting media[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(9): 1672-1684
- [15] WANG B, XUAN Y. An improved WSGG model for exhaust gases of aero engines within broader ranges of temperature and pressure variations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 1299-1310
- [16] SAROFIM A F, HOTTEL H C. Radiative transfer in combustion chambers: influence of alternative fuels[C]//International Heat Transfer Conference, 1978
- [17] 王成军, 张群杰, 李超. 燃气轮机燃烧室压力对火焰辐射换热影响的模拟计算与分析[J]. 热力发电, 2012, 41(5): 43-46
- WANG Chengjun, ZHANG Qunjie, LI Chao. Simulation calculation and analysis concerning influence of pressure in combustor of gas turbine upon flame radiation heat transfer[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(5): 43-46 (in Chinese)
- [18] LIANG Dong, HE Zhenzong, XU Liang, et al. Effect of particle size distribution on radiative heat transfer in high-temperature homogeneous gas-particle mixtures[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 36(5): 733-746
- [19] FIVELAND W A. Discrete-ordinates solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures[J]. Journal of Heat Transfer, 1984, 106: 699
- [20] 楚化强, 冯艳, 曹文健, 等. 灰气体加权和辐射模型综合评估及分析[J]. 物理学报, 2017, 66(9): 212-221
- CHU Huaqiang, FENG Yan, CAO Wenjian, et al. Comprehensive evaluation and analysis of the weighted-sum-of-gray-gases radiation model[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 212-221 (in Chinese)
- [21] RA Y, REITZ R D. A reduced chemical kinetic model for IC engine combustion simulations with primary reference fuels[J]. Combustion and Flame, 2008, 155(4): 713-738
- [22] MITH T F, SHEN Z F, FRIEDMAN J N. Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1982, 104: 602-608

Study on radiation heat transfer characteristics of
aeroengine combustion chamber

SHI Pengyu, LI Ming, YU Qianqian, WANG Zhisheng, REN Lishi, FAN Wei

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The thermal radiation of gaseous combustion products in an aero-engine combustion chamber has obvious non-ash-body characteristics. In this paper, based on the OpenFOAM platform, a numerical study on multi-field coupled turbulence-combustion-radiation radiative heat transfer was carried out for a certain type of aero-engine combustion chamber using the mean weighted sum of grey gas (WSGG) gas radiation model, which can accurately describe the non-ash characteristics of the gas. The results show that the radiation heat transfer characteristics are influenced by several factors such as equivalent ratio, combustion pressure and wall emissivity, among which the equivalent ratio is dominant. Increasing the equivalence ratio from 0.11 to 0.4 resulted in a 189% increase in average incident radiation at the combustion chamber wall and a 233% increase in average incident radiation at the exit. Increasing the equivalent ratio, combustion pressure or wall emissivity will increase the average radiation intensity in the combustion chamber and the inhomogeneity of radiation distribution at the exit of the combustion chamber. The radial radiation distribution factor (RRDF) also increases with the increase of equivalent ratio, combustion pressure and wall emissivity.

Keywords: aero-engine; weighted sum of grey gas; radiation; OpenFOAM

引用格式:史鹏宇, 李铭, 于倩倩, 等. 航空发动机燃烧室辐射传热特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(4): 697-706
SHI Pengyu, LI Ming, YU Qianqian, et al. Study on radiation heat transfer characteristics of aeroengine combustion chamber[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(4): 697-706 (in Chinese)