

文章编号:1000-8055(2011)09-1921-07

乙醇燃烧加热空气污染物对煤油超燃的影响

侯凌云¹, 杨 缙¹, 马雪松², 刘 巍²

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084;

2. 中国航天科工飞航技术研究院 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘 要: 在燃烧室入口来流马赫数为 2.5 的条件下, 研究乙醇燃烧加热空气污染物对煤油超声速燃烧的影响. 在加热器中, 采用预混稳态燃烧火焰模型和 61 组分 388 步详细反应机理模拟乙醇燃烧加热过程, 获得与实验温度条件相同的详细污染出口组分组成. 其主要污染空气作为煤油超声速燃烧室的入口组分, 采用 17 组分 30 步反应机理模拟煤油超声速燃烧过程, 研究了污染物组分对煤油超燃室性能的影响. 通过化学动力学和热力学分析, 对比了地面电加热、乙醇燃烧加热和 25 km 高空三种工况. 结果表明: 由于自由基作用以及平均分子质量的减小和平均比定压热容的增加, 乙醇燃烧加热污染空气造成超燃室的燃烧效率和内推力均上升.

关 键 词: 煤油超声速燃烧; 乙醇空气加热; 空气污染物; 详细反应; 热力学

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Influences of vitiation air from ethanol-fueled heating on kerosene-fueled supersonic combustion

HOU Ling-yun¹, YANG Jin¹, MA Xue-song², LIU Wei²

(1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Power Machinery Research Institute,

Aerodynamic Missile Technology Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074, China)

Abstract: The influences of vitiation air generated by ethanol-fueled combustion heating on the performances of kerosene-fueled supersonic combustion were studied numerically when the inflow Mach number at the inlet of combustor is 2.5. Premixed burner-stabilized flame model and ethanol-air reaction mechanism with 61 species and 388 steps were used to simulate the combustion in the heater, helping to obtain the components of high-enthalpy air fluid. The reduced reaction mechanism with 17 species and 30 steps were used to simulate the kerosene-fueled supersonic combustion. The contributions of seven main vitiated species such as H_2O , CO_2 , O , OH , H , CO , H_2 to the performance of the supersonic combustion were analyzed. Comparing with the cases of electric-heating on the ground and high altitude at the height of 25 km, vitiation air causes the increase of combustion efficiency and internal thrust because of the free-radical's function, decrease of averaged molecular mass and increase of averaged specific heat at constant pressure.

Key words: kerosene-fueled supersonic combustion; ethanol-air heating; vitiation air; detailed reaction; thermodynamics

收稿日期:2010-10-28; 修订日期:2010-12-27

基金项目:国家自然科学基金(50306011)

作者简介:侯凌云(1972—),女,湖南岳阳人,副教授、博士生导师,博士,主要从事超声速燃烧和先进推进研究.

地面实验是研制超声速燃烧冲压发动机的的重要手段.若要真实再现飞行时的高速高焓气流特性,就必须对来流气体进行预先加热以使总焓达到高飞行马赫数时气流总焓.目前主要采用电弧加热和燃烧加热两种方式对空气进行加热,以模拟高空高速来流.采用电弧加热,需要配备专用电站提供巨大电流,设备投资和实验费用十分惊人.燃烧式加热法以其成本低、风险小、加热温度范围广和运行周期长而在地面风洞实验中受到青睐.燃烧式加热设备最常用的是氢和碳氢燃料,可以模拟飞行马赫数为2~8的条件(即444 K < T < 2500 K).然而,燃烧式加热器最明显的问题,即加热后气体和真实高焓气体间在热物性和化学组分上存在差异.这些差异会影响到超燃室的着火、稳定燃烧及推力的大小,从而造成地面实验的结果不能等同于实际飞行实验的结果.于是,如何使用污染空气来模拟和复现超声速燃烧飞行状态下的实际性能,研究加热污染空气对超声速燃烧的影响就成为燃烧实验技术需要解决的重要课题^[1].

Mitani 等人^[2]实验研究了马赫数为6的条件下,分别使用电加热空气和燃烧加热空气的氢燃料超燃冲压发动机的性能;Goyne 等人^[3]实验研究了燃烧加热后含 H₂O、CO₂ 组分对超声速燃烧性能的影响;Lai 等人^[4]展开数值理论研究,评估了加热污染空气中 NO_x、H₂O 和 CO₂ 对氢超声速燃烧的作用.近几年较多研究者采用 CFD(计算流体动力学)技术定性预测分析了加热污染空气对氢超声速燃烧性能的影响^[5-6].国内也在此方面展开了污染物主要组分对氢超声速燃烧的研究^[7-9].

以上国内外对单个组分(如 H₂O、CO₂、CO、NO 等)在超燃室作用的研究已经比较深入,大多是针对氢气/空气加热对氢超声速燃烧的影响.本文针对乙醇加热空气后产生的污染空气,首先在加热器中分析了污染空气主要成分,然后研究其中主要污染物对煤油超声速燃烧性能的影响.

1 数学和物理模型

由于在实验中难以测量到加热器燃烧后所有的污染成分,因此采用准一维定常预混稳态燃烧火焰模型来计算加热器中燃烧后燃气组分(空气污染组分)的组成.其主要控制方程如下:

连续性方程

$$\dot{m} = \rho u A \quad (1)$$

能量方程

$$\dot{m} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k M_k = 0 \quad (2)$$

组分方程

$$\dot{m} \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) - A \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (3)$$

状态方程

$$\rho = \frac{P \bar{W}}{RT} \quad (4)$$

其中 $\dot{\omega}_k$ 为第 k 种组分化学反应生成速率,即涉及第 k 种组分的所有反应叠加的结果, Y_k 为第 k 种组分质量分数; V_k 为第 k 种组分扩散速度; W_k 为第 k 种组分摩尔质量; $\bar{W}$ 为混合物平均分子质量; A 为包围火焰的管道横截面积.

在超声速燃烧室中,采用包含多种组分带化学反应的守恒型雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程作为质量连续、动量、能量和组分控制方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (F - F_v)}{\partial x} + \frac{\partial (G - G_v)}{\partial y} = H \quad (5)$$

式中 U 为守恒变量, F 和 G 为对流项, F_v 和 G_v 为扩散项, H 为源项. 对流项的离散采用二阶迎风格式, 扩散项采用中心差分. 以 SST (shear-stress transport) $k-\omega$ 湍流模型、涡耗散概念 (EDC) 燃烧模型封闭雷诺平均方程, 采用四热流辐射模型模拟辐射过程. 由于煤油在喷入超燃室时为液态, 因此需要求解其液相控制方程, 选用颗粒轨道模型模拟气液两相流动.

2 加热器出口条件模拟

地面实验中,为了模拟高空来流空气,采用预补氧乙醇燃烧加热器. 补氧燃烧加热器的功能就是要在保证出口氧气摩尔分数仍为21%的条件下,提升空气总温至对应高空来流总温要求,然后经拉瓦尔喷管加速至对应高空来流速度. 采用 Chemkin 4.0 软件中的预混稳态燃烧火焰模型和 Lawrence 实验室的 61 组分 388 反应乙醇燃烧机理^[10]来模拟乙醇燃烧加热器的燃烧过程,在确保出口燃气总温达到1644 K 和出口氧气摩尔分数为21%的条件下,分析出口主要组分及其摩尔分数.

加热器入口乙醇、氧气和氮气的质量分数分别为 8.49%, 34.63% 和 56.88%, 燃烧室截面直径为 40 mm. 从计算结果图 1 和图 2 可看出, 燃烧完成后, 出口燃气中氧气摩尔分数仍为 21%, 燃气总温为 1644 K. 这实现了补氧燃烧加热器保证出口燃气中氧气的摩尔分数和总温的要求.

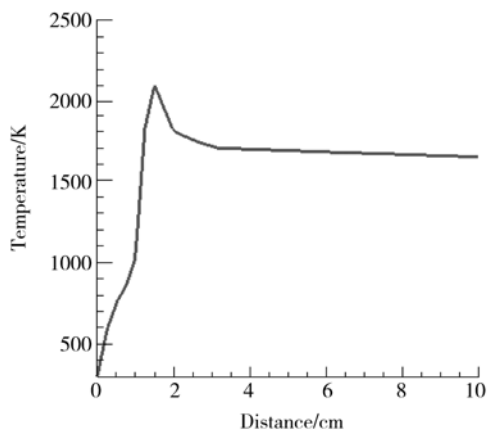


图 1 燃气温度分布

Fig. 1 Gas temperature distribution

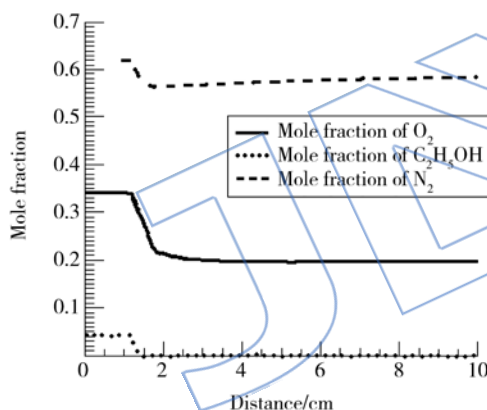


图 2 氧气、乙醇、氮气摩尔分数变化

Fig. 2 Mole fractions of oxygen, ethanol and nitrogen

从燃烧过程中各主要组分摩尔分数的变化来看, 乙醇燃烧消耗的主要路径是: $C_2H_5OH \rightleftharpoons C_2H_4 \rightleftharpoons CH_2O \rightleftharpoons CO \rightleftharpoons CO_2$. 这与乙醇燃烧化学反应机理的构造思路是一致的. 醇类燃烧过程中先分解为短链烯烃, 然后按照短链烯烃的规律进行燃烧. 乙醇燃烧过程中短时间大量出现的组分为 C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , CH_3 , CH_2O , HO_2 . 这些组分非常活跃, 在乙醇燃烧过程中起着非常关键的作用, 但是在燃气出口中含量已经非常少. 燃烧结束后, 出口燃气中除了 N_2 , O_2 外, 含量较多的 7 种组分分别是 H_2O , CO_2 , O , OH , CO , H , H_2 . 其中 H_2O 和 CO_2 含量占的比重非常大, 其摩尔分数分

别在 7% 和 10% 左右; O , OH , CO 的摩尔分数在同一个数量级 10^{-3} ; H , H_2 的摩尔分数在同一个数量级 10^{-4} . 从上述计算结果中可得到加热器出口, 即超燃室入口组分的摩尔分数. 有些组分含量太少 (如 C_2H_4 等), 摩尔分数数量级在 10^{-20} 以下, 这些组分不会对超声速燃烧造成明显影响, 将这些微量组分摩尔分数的总和 (约 0.2%) 都加在 N_2 上. 表 1 给出了加热器出口 (煤油超燃室空气入口) 主要组分及摩尔分数. 表中数据将作为煤油超燃室空气入口组分条件, 用来研究其对煤油超声速燃烧性能的影响, 并确定主要影响因素. 煤油简化机理涉及到的组分包括了乙醇燃烧加热出口中含量较多的 9 种组分.

表 1 乙醇燃烧加热器出口 (超燃室空气入口)
主要组分及摩尔分数

Table 1 Main composition and mole fraction
at the outlet of ethanol-combustion heater
(i. e. the inlet of supersonic combustor)

Secondary species	Mole fraction	Main species	Mole fraction
CH_4	9.19×10^{-19}	H_2	0.0001618
CH_3	7.22×10^{-18}	H	0.0002003
CH_2O	8.68×10^{-12}	CO	0.0050302
HCN	8.93×10^{-11}	OH	0.0061212
N	1.06×10^{-10}	O	0.0072593
HCO	7.47×10^{-9}	CO_2	0.0712053
NO_2	5.16×10^{-8}	H_2O	0.1120000
NO	8.39×10^{-7}	O_2	0.210009
HO_2	3.21×10^{-6}	N_2	0.588009

3 加热污染空气对煤油超燃的影响

3.1 超燃室模型和工况

超燃模型发动机的燃烧室选用具有燃料喷射支板和两对凹槽的突扩型双模态超燃冲压发动机燃烧室^[11]模型二维结构如图 3 所示. 此模型的支板燃料注入系统能够使燃料在高速气流中均匀分布, 并在很短的时间内完成混合, 凹槽火焰稳定器能对点火和稳定燃烧起积极作用. 燃料从燃烧室壁面距凹槽 15 mm 处径向垂直喷入以及支板尾缘顺向喷入主流. 由于结构的对称性, 取其一半进行计算. 煤油选用 $C_{12}H_{23}$ 作为代用燃料, 其燃烧化学反应动力学模型采用 17 组分 30 步反应模型^[12].

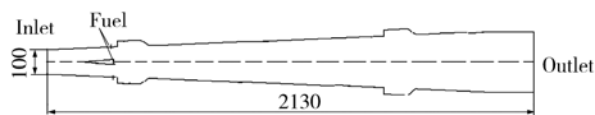


图3 超燃室结构示意图(单位:mm)

Fig.3 Schematic structure of supersonic combustor
(unit:mm)

在飞行马赫数为6,对应来流马赫数为2.5的条件下,边界条件设置如下:空气入口采用压力入口,总压为732152.8 Pa,静压为42852.9 Pa,总温为1644.15 K。煤油喷注采用简单圆孔喷注模型,煤油从燃烧室壁面距凹槽15 mm处以及支板尾缘顺向喷入主流,喷注比为6:1,煤油当量比为0.723。出口设置为压力出口,25 km高空出口背压取1500 Pa,总温为245 K(查表插值得到);地面出口背压取大气环境压力为101325 Pa,总温为300 K。壁面为无滑移绝热壁面。

根据入口空气组分组成不同设置了地面电加热、乙醇燃烧加热和25 km高空三种工况,具体工况参数及组分组成见表2~表4。

表3 地面乙醇燃烧加热空气来流工况(工况2)

Table 3 Case of ethanol combustion heated air (case 2)

Outlet condition	Species of air	Mole fraction	Species of air	Mole fraction
Back pressure: 101325 Pa Total temperature: 300 K	CH ₄	9.19×10^{-19}	H ₂	0.00016177
	CH ₃	7.22×10^{-18}	H	0.00020033
	CH ₂ O	8.68×10^{-12}	CO	0.00503023
	HCN	8.93×10^{-11}	OH	0.00612119
	N	1.06×10^{-10}	O	0.00725926
	HCO	7.47×10^{-9}	CO ₂	0.07120529
	NO ₂	5.16×10^{-8}	H ₂ O	0.11200000
	NO	8.39×10^{-7}	O ₂	0.21000585
	HO ₂	3.21×10^{-6}	N ₂	0.58600000

表4 25 km高空大气来流工况(工况3)

Table 4 Case of real air for the height of 25 km (case 3)

Outlet condition	Species of air	Mole fraction
Back pressure: 1500 Pa	H ₂ O	0.001
	O ₂	0.21
Total temperature: 245 K	N ₂	0.789
	...	0

工况1(表2)模拟地面直连式实验中无污染源电加热来流空气,地面大气背压环境下,超燃室的燃烧情况;工况2(表3)模拟地面直连式实验中乙醇燃烧加热污染来流空气,地面大气背压环境下,超燃室的燃烧情况;工况3(表4)模拟25 km高空来流空气,高空背压环境下,超燃室的燃烧情况。工况1与工况3的区别主要在于出口背压、总温和来流空气中水含量不同;工况1与工况2的区别主要是组分组成不同。所有工况都保证来流空气中氧气含量基本一致,即氧气的摩尔分数为21%。

表2 地面电加热空气来流工况(工况1)

Table 2 Case of electric heated air on the ground (case 1)

Outlet condition	Species of air	Mole fraction
Back pressure: 101325 Pa	H ₂ O	0.011
	O ₂	0.21
Total temperature: 300 K	N ₂	0.779
	...	0

3.2 计算和实验对比

为了验证本文数值模拟方法和煤油简化反应机理的合理性,将数值计算与实验壁面静压分布进行了对比分析。实验工况设置:模拟飞行马赫数为5,对应来流马赫数为2.38,总压为1.68 MPa,总温为1200 K,煤油当量比为0.551^[11]。数值模拟工况设置:总压为1.68 MPa,静压为0.12 MPa,总温为1200 K,煤油当量比为0.551。分别采用煤油一步总包反应和17组分30步反应模型对该超

燃过程进行了数值模拟,计算和实验壁面静压结果对比如图4所示.可以看出,采用一步总包反应和17组分30步反应模拟的煤油超燃过程壁压分布与实验壁压分布总体变化趋势是一致的.而采用17组分30步反应模拟煤油超燃过程所得壁压分布比采用一步总包反应更接近实验壁压分布.这体现了数值模拟与实验结果在一定程度上是吻合的,进一步验证了本文所采用数值模拟方法以及所采用的化学反应动力学模型的合理性.

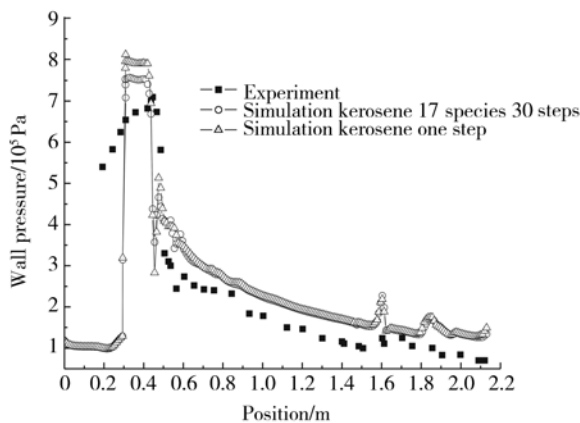


图4 燃烧室数值计算与实验壁面静压分布对比

Fig. 4 Comparison of wall pressure for supersonic combustor between simulation and experiment

3.3 影响分析

图5和图6对乙醇燃烧加热空气中较多的7种组分 H_2O , CO_2 , O , OH , CO , H , H_2 各自对煤油超声速燃烧的燃烧效率和内推力的贡献进行了比较,这里采用增量柱状图分析.这7种组分摩尔分数同表3中一致,分别与 H_2O , O_2 和 N_2 构成来流污染空气(剩余含量合在 N_2 中).其基准工况为地面电加热空气工况,取最终燃烧效率差值和超燃室内推力差值进行增量分析.可以看出:乙醇燃烧加热污染空气中的 H_2O 是对超燃室燃烧效率起消极作用的主要因素,使超燃室燃烧效率和内推力均下降,从化学反应动力学看,是通过抑制 OH 系统的快速反应来降低煤油裂解效率; CO_2 组分也起消极作用,但比 H_2O 的消极作用弱一些,主要通过大分子质量特性使燃气平均分子质量增大,降低超燃室做功能力; O , OH , CO , H , H_2 是对燃烧效率起积极作用的主要因素,活跃的自由基快速反应释放的热量对维持煤油裂解很关键,对煤油从裂解到完全燃烧都起着积极的作用.其中自由基 O 的贡献最大.自由基 O , OH 主要通过化学反应动力学过程来加快燃烧过程,促进煤

油消耗而提高燃烧效率,从而提升超燃室性能.自由基 H 由于本身的快速反应释放的热量对维持煤油裂解很关键,因此对煤油超燃室性能起积极作用.来流空气中污染组分 CO 和 H_2 均对煤油超燃室性能起积极作用.它们自身作为额外添加燃料,其作用原理与自由基 H 的作用类似.

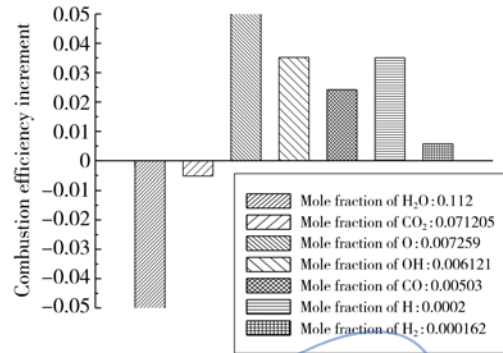


图5 各主要组分相对电加热燃烧效率增量

Fig. 5 Combustion efficiency increment of main species comparing with electric heating case

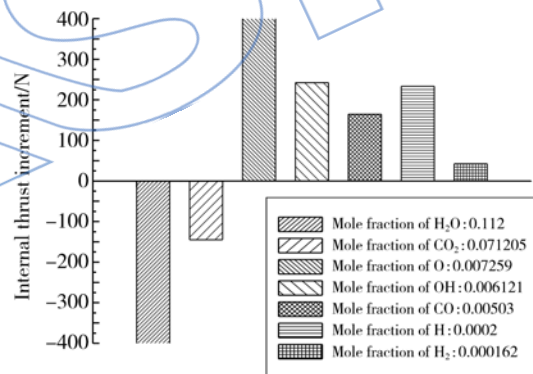


图6 各主要组分相对电加热内推力增量

Fig. 6 Internal thrust increment of main species comparing with electric heating case

图7和图8对比了表2~表4中三种工况下的来流污染空气对煤油超声速燃烧效率和内推力的影响,地面电加热工况与25km高空工况相比,燃烧效率和内推力均有下降.燃烧效率略有下降的原因是前者来流空气中 H_2O 的摩尔分数比后者高, H_2O 通过化学反应动力学过程对煤油超燃过程发挥消极作用,从而使燃烧效率下降.内推力下降的原因有两方面:一是燃烧效率下降引起做功能力下降;二是背压增加导致内推力下降.乙醇燃烧加热工况与25km高空工况以及地面电加热工况相比,超燃室燃烧效率和内推力均上升.乙醇

燃烧加热污染空气中的 H_2O 和 CO_2 是对煤油超燃室燃烧效率及内推力起消极作用的主要因素, O , OH , CO , H , H_2 是对燃烧效率及内推力起积极作用的主要因素. 这说明乙醇燃烧加热来流空气中的自由基和中间产物对煤油超燃室的燃烧效率和内推力的积极作用大于 H_2O 和 CO_2 的消极作用.

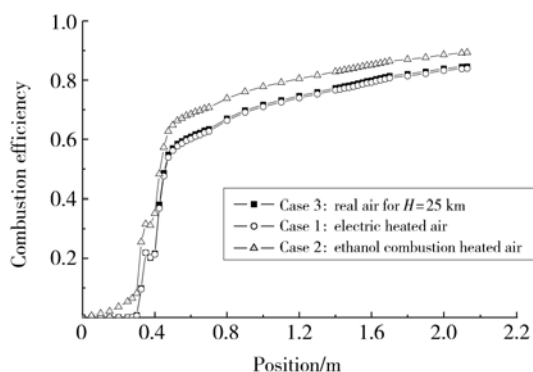


图 7 超燃室燃烧效率

Fig. 7 Combustion efficiency of supersonic combustor

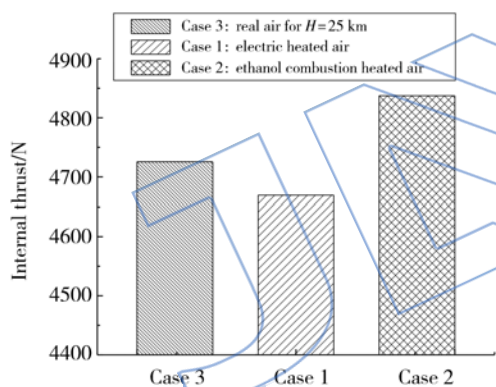


图 8 超燃室内推力

Fig. 8 Internal thrust of supersonic combustor

图 9 和图 10 对比了三种工况的燃气平均比定压热容和平均分子质量. 25 km 高空工况、地面电加热工况和乙醇燃烧加热工况的燃气平均比定压热容依次增大, 平均分子质量依次减小. 这从热力学角度说明乙醇燃烧加热污染空气中污染组分的存在整体上增大了燃气的平均比定压热容, 减小了燃气的平均分子质量, 这对提升燃气做功能力起积极作用, 有利于提高超燃室的性能.

从化学反应动力学角度和热力学角度分析, 结果都表明, 乙醇燃烧加热污染空气对煤油超声速燃烧性能起到了积极作用, 使燃烧效率上升, 超燃室内推力增大.

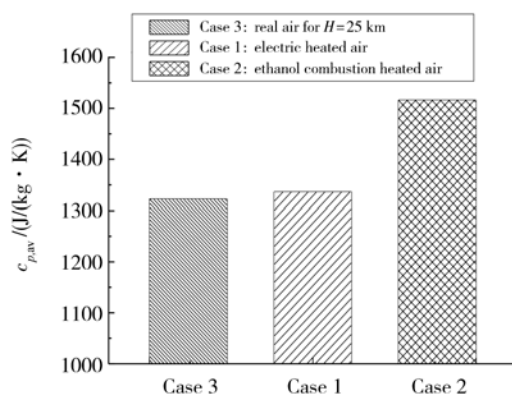


图 9 三种工况的燃气平均比定压热容

Fig. 9 Averaged specific heat at constant pressure of gas for three cases

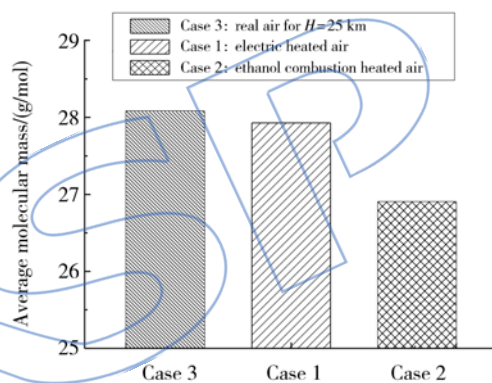


图 10 三种工况的燃气平均分子质量

Fig. 10 Averaged molecular mass for three cases

4 结 论

采用乙醇详细化学反应机理模拟了乙醇加热器中的一维燃烧过程, 由乙醇燃烧加热器出口条件(主要组分及摩尔分数), 确定了超燃室的污染空气入口主要组分为: H_2O , CO_2 , O , OH , H , CO , H_2 , 并得到相应摩尔分数. 采用 17 组分 30 步煤油简化反应机理模拟模型发动机煤油超声速燃烧过程, 在与实验数据对比基础上, 研究来流马赫数为 2.5 的条件下, 乙醇燃烧加热空气主要污染物及各组分(包括最终产物、自由基和中间产物)对煤油超声速燃烧性能的影响, 与地面电加热工况和 25 km 高空工况进行了对比. 主要结论如下:

1) 来流空气中污染组分 H_2O 使煤油超燃室中的燃烧效率和内推力均下降; 来流空气中污染组分 CO_2 含量增多对燃烧效率没有明显影响, 但使内推力下降; 来流空气中自由基 O , OH , H 含量增多均使超燃室燃烧效率和内推力上升.

2) 乙醇燃烧加热污染空气相对地面电加热工况和 25 km 高空工况,超燃室燃烧效率提高、内推力上升。乙醇燃烧加热污染空气中的污染组分 H_2O 和 CO_2 等对煤油超燃室性能的消极作用小于污染组分 O , OH , H , CO , H_2 等对煤油超燃室的积极作用,从而提升了超燃室性能。乙醇燃烧加热空气使燃气平均分子质量减小,比定压热容增加,从而促进超燃室做功能力是超燃室性能提升的另一重要原因。

参考文献:

- [1] 贺武生. 超燃冲压发动机研究综述[J]. 火箭推进, 2005, 31(1): 29-32.
HE Wusheng. Review of scramjet engine development [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(1): 32-33. (in Chinese)
- [2] Mitani T, Hiraiwa T, Sato S, et al. Comparison of scramjet engine performance in Mach 6 vitiated and storage-heated air[J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(5): 635-642.
- [3] Goyne C P, McDaniel J C, Krauss R H, et al. Test gas vitiation effects in a dual-mode scramjet combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(3): 559-565.
- [4] Lai H, Thomas S. Numerical study of contaminant effects on combustion of hydrogen, ethane, and methane in air [R]. AIAA Paper 95-6097, 1995.
- [5] Mattick S J, Frankel S H. Numerical modeling of supersonic combustion validation and vitiation studies using FLUENT [R]. AIAA Paper 2005-4287, 2005.
- [6] Davidenko D M, Gökalp I. Systematic numerical study of the supersonic combustion in an experimental combustion chamber[R]. AIAA Paper 2006-7913, 2006.
- [7] 刘陵, 唐明, 张榛, 等. 污染空气对超音速燃烧地面试验结果的影响[J]. 推进技术, 1992, 13(5): 12-17.
LIU Ling, TANG Ming, ZHANG Zhen, et al. Effects of vitiated air on the results of ground tests of scramjet combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 1992, 13(5): 12-17. (in Chinese)
- [8] 李卫强, 宋文艳. 水组分对高超声速冲压发动机性能的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(5): 10-12.
LI Weiqiang, SONG Wenyan. The effect of mass vapor in gas on performance of scramjet[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2006, 7(5): 10-12. (in Chinese)
- [9] Liu W X, He W, Li H B, et al. Influence of contaminations on combustion kinetics in hydrogen-fueled engine[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(8): 1317-1321.
- [10] Marinov N M. A detailed chemical kinetic model for high temperature ethanol oxidation[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 1999, 31(3): 187-198.
- [11] 刘欧子, 蔡元虎, 胡欲立, 等. 煤油超声速燃烧的数值分析[J]. 推进技术, 2004, 25(5): 463-468.
LIU Ouzi, CAI Yuanhu, HU Yuli, et al. Numerical analysis of kerosene supersonic combustion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(5): 463-468. (in Chinese)
- [12] 黄生洪, 徐胜利, 刘小勇. 煤油超燃冲压发动机两相流场数值模拟[J]. 推进技术, 2005, 26(2): 101-105.
HUANG Shenghong, XU Shengli, LIU Xiaoyong. Combustion flow of kerosene-fueled scramjet with 3D cavity [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(2): 101-105. (in Chinese)