

催化重整条件下碳氢燃料热裂解与换热

张定瑞, 张枭雄, 侯凌云
(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 针对碳氢燃料在再生冷却通道内的热裂解和催化重整反应过程,考虑燃料在超临界压力下的热物性,建立了超临界压力下的流动、换热和反应模型,开展了流动换热、热裂解和催化重整反应的耦合数值研究。结果表明:计算结果与实验吻合良好,能较为准确地预测壁面和燃油温度、燃料转化率和换热恶化等现象。催化重整反应能显著提高燃料的吸热能力,降低出口温度,同时还能抑制热裂解反应的发生。增大流量会降低燃料在通道内的停留时间,降低燃料的转化率和化学反应吸热量。

关 键 词: 碳氢燃料; 热裂解反应; 催化重整; 停留时间; 换热恶化

中图分类号: V312⁺.1 **文献标志码:** A

Thermal cracking and heat transfer of hydrocarbon fuel with catalytic steam reforming

ZHANG Dingrui, ZHANG Xiaoxiong, HOU Lingyun
(School of Aerospace Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the thermal cracking and steam reforming reactions of hydrocarbon fuel in regenerative cooling channel, a numerical model coupling with flow, heat transfer and chemical reaction was established to investigate the heat absorbing and reaction properties of hydrocarbon fuel, taking thermo-physical properties under supercritical pressure into consideration. Results showed that, the calculated results were in good agreement with experimental data. The numerical model can predict the wall and fuel temperature distribution, fuel conversion and heat transfer deterioration phenomenon. Fuel with catalytic steam reforming had the advantages of heat sink promotion and lower outlet temperature. Thermal cracking reaction can be inhibited by the existence of steam reforming reactions. The analysis of fuel mass flow rate showed that residence time of the fuel decreased with the increasing mass flow rate, resulting in a lower conversion and chemical heat sink of the hydrocarbon fuel.

Key words: hydrocarbon fuel; thermal cracking reaction; catalytic steam reforming; residence time; heat transfer deterioration

随着科技竞争的日益激烈,高超声速飞行器的研制和发展已经成为各主要航空航天大国重点

关注的方向之一,而其所面临的一个瓶颈问题就是发动机的热防护。目前公认的最有效的解决途

径就是利用燃料自身的吸热特性对发动机壁面进行再生主动冷却^[1]。再生主动冷却技术是使用碳氢燃料作为冷却介质,在燃料喷注燃烧室燃烧之前,首先流过冷却套,以对流换热的方式吸收发动机外壁的热量。燃料在吸收机体散热的同时,自身温度升高,会发生热裂解和催化重整反应生成易燃的小分子物质,有助于改善燃料的燃烧特性^[2]。

碳氢燃料在冷却通道内经历的过程十分复杂,涉及超临界压力下燃料的状态转变和流动换热,高温下还会存在热裂解反应。为了保证燃料的高质量雾化,冷却通道内的压力一般控制在3~5 MPa,高压对于燃料的热物性和吸热能力有较大的影响。目前,对于燃料热物性的研究大多采用替代燃料模型。范学军等^[3]选取 3 组分替代模型,较为准确地模拟了航空煤油 RP-3 在超临界压力下的密度和比热容等物性参数。Huang 等^[4]基于替代燃料模型测定了航空燃料 JP-7、JP-8+100、JP-10 的热沉。胡志宏等^[5]结合超临界压力下煤油的电加热圆管换热实验,给出了煤油在超临界压力下的换热关联式。裴鑫岩等^[6]提出了三种航空煤油 RP-3 的替代燃料模型,并计算了煤油在 1~15 MPa 压力范围内的热物性参数。

碳氢燃料的热沉包括物理热沉和化学热沉,物理热沉与燃料的热物性有关,化学热沉则与吸热型化学反应,如:热裂解反应、催化重整反应等有关。贾贞健等^[7]通过流动管反应器研究了热裂解反应对超临界态航空煤油 RP-3 吸热能力的影响,Zhao 等^[8]研究了不同压力下热裂解反应对燃料换热特性和热沉的影响;Ward 等^[9-11]对正癸烷和正十二烷在电加热圆管内的热裂解反应进行了实验和数值研究;侯凌云等^[12]基于平板反应器加热实验研究了碳氢燃料在亚临界和超临界压力下的热沉特性,并发展了热裂解一步总包反应模型。

利用碳氢燃料和水蒸气的催化重整反应,可以在热裂解反应的基础上进一步提高燃料的化学吸热量。Kuranov 等^[13-14]实验研究了碳氢燃料催化重整,并分析了不同反应参数对燃料转化率的影响;侯凌云等^[15-19]研究了碳氢燃料蒸汽催化重整反应的吸热潜力,进行了不同反应条件下的实验和数值研究。

现有的燃料冷却研究大多只考虑了碳氢燃料的热物性、流动换热以及热裂解,但很少涉及碳氢燃料在催化重整条件下的热裂解反应研究。本文将碳氢燃料的物理吸热以及壁面催化重整反应与煤油热裂解空间反应进行了耦合分析,开展了碳

氢燃料在冷却微通道内的流固耦合换热及其反应特性的数值计算。

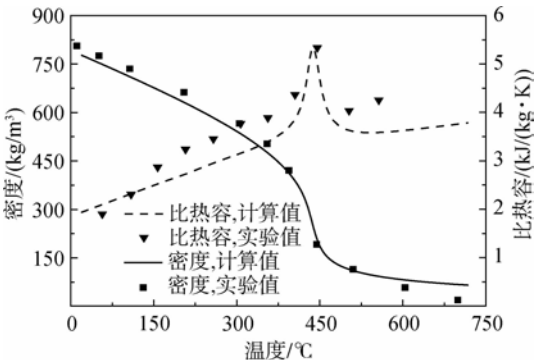
1 航空煤油的热物性参数

本文的计算工质为航空煤油 RP-3 和水的混合物。其中航空煤油 RP-3 的临界温度和临界压力分别为 387℃ 和 2.4 MPa^[20],计算模拟的压力为 3 MPa,已经超过了航空煤油的临界压力。随着温度的升高,处于超临界压力下的航空煤油将会直接从过压液态进入超临界态,而不经气液两相区。

煤油的化学组成十分复杂,包含了链烷烃、环烷烃和芳香烃等多种烃类物质。由于物质组成的复杂性,不能直接通过各组分的摩尔分数计算煤油的热物性参数。一种比较通用的做法是根据煤油的组成建立替代燃料模型^[8,20]。根据实验测定的航空煤油组成和国内外公开发表的一些文献数据^[3,6],建立了一种包含 11 组分的替代燃料模型,并利用物性计算软件 SUPERTRAPP 计算了煤油在 3 MPa 压力下的热物性参数^[21]。在所选用的替代燃料模型中,链烷烃、环烷烃和芳香烃的占比分别为 49.55%、36.37% 和 14.08%。计算得到煤油在 3 MPa 压力下的密度、比热容、动力黏度和热导率随温度的变化如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,在拟临界温度附近,物性参数有较为明显的变化。密度在温度为 430℃ 附近迅速减小,从液相水平降低到气相水平;比热容在拟临界温度附近数值迅速上升,经过拟临界点后又迅速回落。而在拟临界温度附近,热导率存在最小值,动力黏度迅速从液相水平降低气相水平。除燃料的热导率缺少实验值数据外,其他参数的计算值与实验值基本吻合。

燃料中的含水量为 10%。水在 3 MPa 压力下的饱和温度为 233.3℃,因而会经历从液态到气态的相变过程。考虑到燃料的含水量较低,为



(a) RP-3 密度和比热容

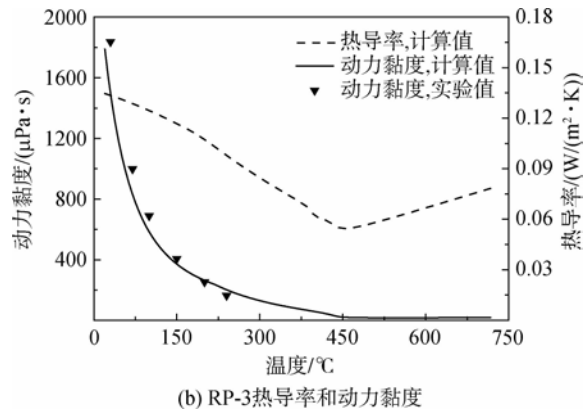


图 1 航空煤油 RP-3 的热物性参数
Fig. 1 Thermo-physical property parameters of aviation kerosene RP-3

简化计算,其中水的相变过程简化为物性在临界温度附近的剧烈变化。当燃料温度低于 233 °C 时,其物性变化与 3MPa 压力下的液态水相同;当燃料温度高于 234 °C 时,其物性变化与 3 MPa 压力下的气态水相同,汽化潜热通过改变在饱和温度附近的比热容弥补。

2 物理和数学模型

本文所模拟的冷却通道是一条矩形截面的长直通道,其结构尺寸如图 2 所示。通道的整体长度尺寸为 1 200 mm,中心流道的截面尺寸为 3 mm×2 mm。在通道的内表面涂覆有一层镍基重整催化剂,涂层厚度为 0.2 mm。在通道的外壁面分布着 12 个热电偶(对应图中测点编号为 $t_1 \sim t_{12}$)用于测量壁面温度,油温由位于燃油进、出口处的 2 个热电偶(对应图中 t_{in} 和 t_{out})测量。

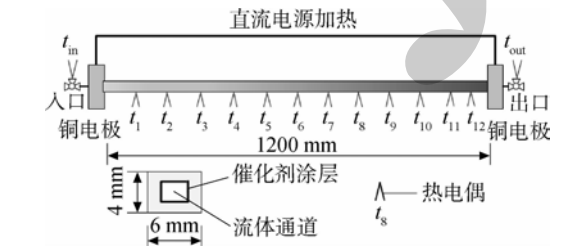


图 2 冷却通道的结构尺寸示意图
Fig. 2 Schematic diagram of cooling channel structure dimensions

通道的几何尺寸规则,采用六面体结构化网格,并对流体边界层进行了网格加密,通道截面网格划分如图 3 所示。最终用于数值计算的网格数量为 184 800。

碳氢燃料流过冷却通道,以对流换热的方式吸

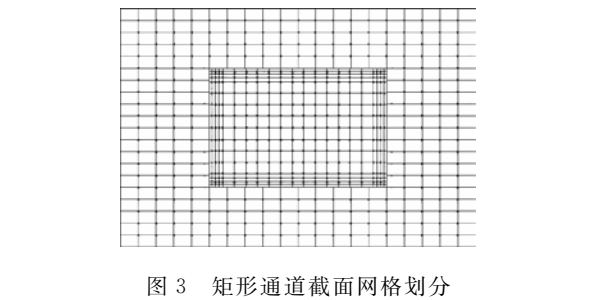


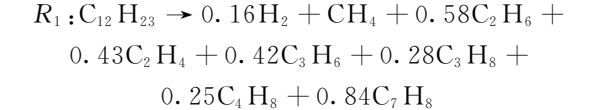
图 3 矩形通道截面网格划分
Fig. 3 Mesh of rectangular channel cross section

收壁面的热量。随着温度的升高,燃料不仅会经历从亚临界到超临界的状态转变,还将发生热裂解和催化重整反应。其流动过程的通用控制方程为

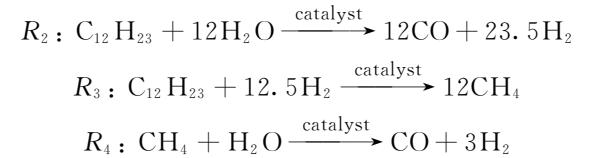
$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V\varphi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi) + S \quad (1)$$

其中 φ 为通用变量,其取值为 1、流体速度 V 、组分质量分数 ω 和焓值 h 时方程分别转化成质量、动量、组分和能量方程。 Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项;式中第 1 项为瞬态项,第 2 项为对流项,第 3 项为扩散项,第 4 项为源项。

由于碳氢燃料自身组成以及化学反应的复杂性,其详尽的裂解和催化重整反应机理将包含数百种物质和上千种基元反应,因而无法直接用于计算。对于碳氢燃料的热裂解反应,采用侯凌云等^[12]的热裂解一步总包反应模型。基于替代模型中的燃料组成,航空煤油的平均分子式为 $C_{12}H_{23}$ 。其密度等物性参数根据 11 组分替代燃料模型计算得到结果进行设置,最终用于计算的热裂解一步总包反应为



碳氢燃料的热裂解反应是一种空间反应,而催化重整反应是一种壁面反应。燃料分子和水分子在催化壁面上进行反应,生成氢气、甲烷等易燃的小分子物质。由于催化重整反应相较于热裂解反应具有更强的吸热效应,因而具有更广阔的应用前景。本文用于计算的 3 步总包催化重整反应机理^[19,22]为



其中 catalyst 代表镍基催化剂。以上反应的反应速率根据下式进行计算:

$$r = -\frac{dc_R}{dt} = k \prod c_{R_i} \quad (2)$$

其中 c_R 代表反应物的摩尔浓度, k 是化学反应的速率常数, 壁面反应和空间反应分别假定为拟一级反应和二级反应。用于计算化学反应速率常数的指前因子 A 和活化能 E_a 等参数见文献[12,19,22]。

考虑到冷却通道内的煤油会经历从层流到湍流的状态转变, 计算中选用 RNG (re-normalization group) $k-\epsilon$ 湍流模型^[23], 壁面函数选用增强壁面处理, 化学反应模型选用有限速率/耗散模型。同时, 将计算的固体域和流体域交界面设置为流固耦合界面, 在固体域上只需求解热传导方程。根据实验的基本工况, 设置燃料的质量流量为 2.58 g/s, 工作压力为 3 MPa, 通道表面的实际加热功率为 9.504 kW。计算中, 根据实验测定的壁面温度信息分段给定通道的加热热流密度。

3 计算结果和分析

3.1 计算与实验的验证

数值计算得到的通道壁面和燃油温度与实验值的对比如图4所示。可以看出, 壁面温度的计

算值与实验值吻合良好, 最大相对误差为 5%。实验时控制出口温度在 700 ℃ 左右 (稳态时温度波动范围为 ± 2 ℃), 计算得到的出口油温为 712.2 ℃, 相对误差约为 1.59%。计算得到的燃料转化率为 56.6%, 略高于实验值 50.1%, 这是由于计算模型中使用煤油裂解一步总包反应, 未考虑煤油一次裂解之后的产物发生二次裂解所能吸收的热量。因此, 数值模型能够较为准确地预测壁面和燃料的温度分布以及转化率等信息。

图 5 所示是冷却通道上下壁外表面和中间截面的温度分布云图, 中间截面包括了左右壁面以及通道中的流体。其中, z 表示距离通道入口的距离。注意到在距离通道入口约 0.37 m 处的通道壁面温度高于前后两侧的温度, 呈现局部的壁温峰值, 管内的换热出现恶化。从该处流道的局部放大图中可以看出, 燃料的温度基本保持不变。此时的温度大约为 230 ℃ 左右, 对应于 3 MPa 压力下水的相变点温度。由于水相变时会吸收大量的热量, 燃料的温度增长趋缓, 燃料中掺混的水发生膜态沸腾, 使得通道内壁附着一层气膜。由于气态水的热导率远小于液态水和碳氢燃料, 流体的热边界层厚度增加, 导致局部的传热系数明显降低, 壁面向主流区的换热受阻, 壁面温度升高, 出现了换热恶化现象。

实验过程中也观察到了这种由于在燃料中掺混部分水而引起的换热恶化现象, 如图 6 所示。对应于纯航空煤油的热裂解工况, 实验和计算都没有在前部出现局部的壁温极值, 如图 6(a) 所示。保持其他参数不变, 当在煤油中掺混 10% 的水以后, 通道前半段开始出现局部的暗红区域。金属在加热达到一定的温度后, 其表面会出现颜色改变, 而且颜色与表面温度有关, 这种现象可以

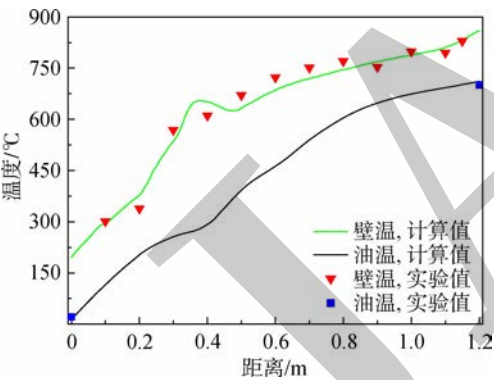


图 4 壁面和燃油温度的计算值与实验值比较
Fig. 4 Comparison of calculation result and experiment result of wall and fuel temperature

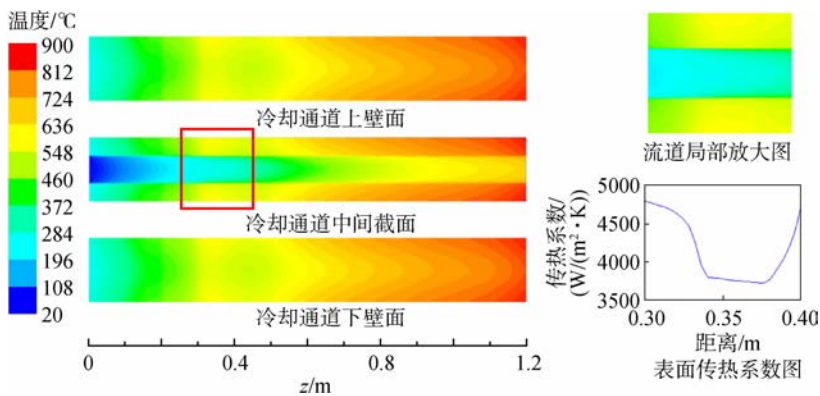


图 5 冷却通道截面温度云图
Fig. 5 Temperature contours of cooling channel cross section

作为衡量温度的一个定性标准。图 6(b)显示了煤油中所掺混的水相变引起的换热恶化现象,其出现的位置也与数值模拟的结果相吻合。

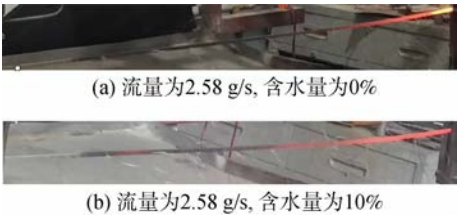


图 6 不同工况下的换热恶化现象

Fig. 6 Heat transfer deterioration in different cases

3.2 有无化学反应的影响

为了探究煤油的流动换热、热裂解反应和催化重整反应对燃料吸热特性的影响,本文进行了 4 种工况下的数值模拟。这 4 种工况的燃料流量均为 2.58 g/s,加热功率均为 9.504 kW。详细工况参数设置和计算得到的燃料出口温度如表 1 所示。

可以看出,仅仅考虑物理吸热(工况 1),燃料的出口温度高达 984.3℃,此时的壁面温度已经超过了通道金属材料的熔点。在模型中加入热裂解反应之后(工况 3),出口温度降低到 794.8℃,降温幅度达到 19.2%。对比纯航空煤油的裂解(工况 2),在燃料中掺混的 10%的水可使出口温度进一步降低 2.3%。综合考虑热裂解反应、催化重整反应(工况 4),燃料的出口温度仅为 712.2℃,燃料的吸热能力显著增强,出口温度大幅度降低。

表 1 有无反应工况下的燃料出口温度

Table 1 Fuel outlet temperature with/without reaction cases

参数及说明	工况			
	1	2	3	4
含水量/%	10	0	10	10
化学反应情况	无反应	热裂解	热裂解	热裂解 催化重整
出口温度/℃	984.3	813.2	794.8	712.2

图 7 所示是不同工况下冷却通道壁面温度,纯煤油裂解工况对应的壁面温度沿程逐渐升高,没有出现局部的壁温峰值。而 3 种含水的工况在

通道的前半段温度变化趋势相似,并且都出现了换热恶化现象,由于重整反应的发生,壁温峰值依次降低,换热恶化明显减弱。在通道的后半段,工况 4 的整体壁温相较于其他工况有明显的降低,表明催化重整反应具有很强的吸热效应。

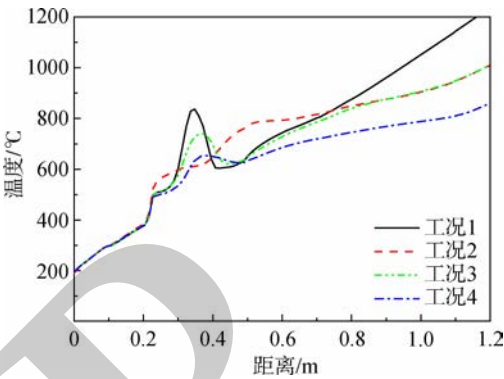


图 7 不同工况下的壁面温度对比

Fig. 7 Wall temperature comparison at different cases

本组计算的后 3 种工况涉及了化学反应,为考察化学反应的影响,得到各组工况下化学反应速率的沿程变化情况,如图 8 所示。可以看出,热裂解反应仅发生在通道的后半段,催化重整反应在通道的前半段就会发生。催化重整反应是壁面反应,由于开始发生反应的起始温度低,其起始位置出现较早,在距离通道入口约 0.3 m 处。速率曲线沿程出现两个峰值,第一个峰值对应换热恶化位置,此处的壁面局部温度较高。由于催化重整反应的发生,燃料的整体温度进一步降低。相比于纯航空煤油的热裂解反应,工况 3 由于掺混了 10%的水,燃料的整体温度相对较低,热裂解反应的起始位置和速率峰值位置都向后移动。工况 4 中的热裂解反应区进一步后移,可见催化重

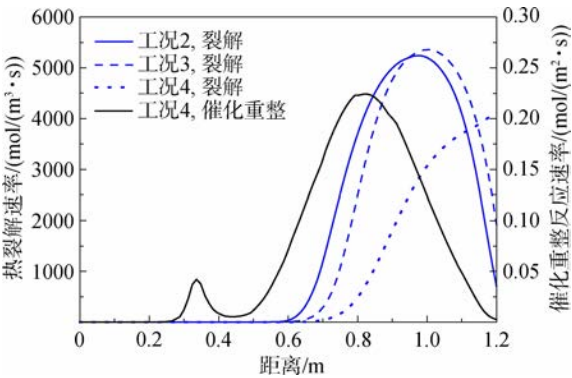


图 8 不同工况下的热裂解和催化重整反应速率

Fig. 8 Thermal cracking and steam reforming reaction rate at different cases

整反应对热裂解反应具有抑制作用。

图 9 所示是 3 种有反应工况的 H_2 摩尔分数分布云图。仅考虑裂解反应,冷却通道内的 H_2 摩尔分数较低。由于燃料中含有 10% 的水,工况 3 的 H_2 摩尔分数略低于纯航空煤油裂解工况。而存在催化重整的工况 H_2 摩尔分数相较于前两种工况有大幅度的提高,由于碳氢燃料在壁面处发生重整反应,靠近壁面处的 H_2 摩尔分数明显高于流道中心处。

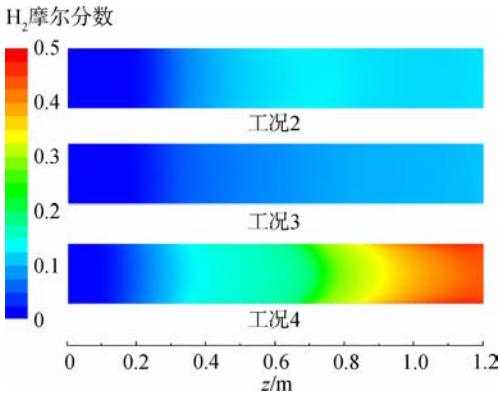


图 9 不同工况下的 H_2 摩尔分数分布云图
Fig. 9 Contours of H_2 mole fraction distribution at different cases

3.3 燃料流量的影响

为了探究流量对燃料热沉的影响,选取了 6 种不同流量 (2.58, 3.05, 3.60, 4.01, 4.53, 5.50 g/s) 的实验工况进行了数值模拟。各工况燃料的入口温度均为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 对应的燃料的出口温度均为 $700\text{ }^\circ\text{C}$, 燃料中水与煤油的比例为 1 : 9。

根据实验工况设定计算的热流边界条件,数值计算得到的不同工况下的燃料出口温度与实验值之间的误差均在 2% 以内。为表征燃料的吸热能力,实际使用中以单位质量燃料升温到特定温度时所吸收的热量,即热沉作为衡量指标。图 10 所示是不同流量下燃料的热沉的变化。燃料的热沉包括物理热沉和化学热沉,由于计算所得到的各工况燃料出口温度都接近 $700\text{ }^\circ\text{C}$, 燃料的物理热沉基本相同,因此燃料总热沉的变化就反映了其化学热沉的变化。可以看出,随着流量的增加,燃料的化学热沉和总热沉都随之降低。

燃料的化学热沉与其在冷却通道内部的化学反应过程有关,煤油和水转化率可以表征通道内化学反应的强弱。图 11 所示为不同流量下煤油($\text{C}_{12}\text{H}_{23}$)和水(H_2O)的转化率信息。燃料中水

仅在通道壁面处与煤油发生催化重整反应,其转化率从 94.7% 降低到 70.9%; 煤油不仅在壁面处发生催化重整反应,还在流场空间内发生热裂解反应,其转化率从 58.8% 降低到 28.7%。从转化率的变化可以看出,增加燃料的流量会减少化学反应的发生,因而燃料的化学吸热量降低,总热沉也随之降低。

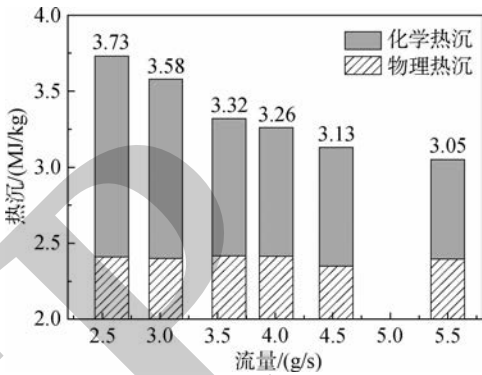


图 10 不同流量下燃料热沉的变化
Fig. 10 Heat sink of the fuel under different mass flow rates

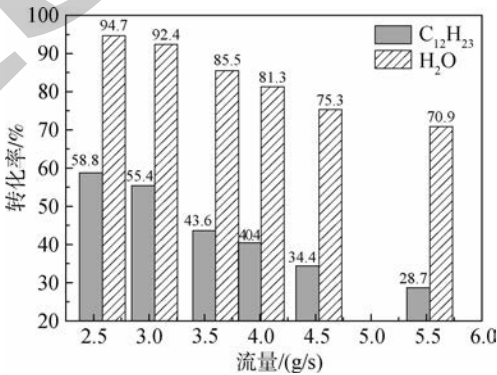


图 11 不同流量下 $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ 和 H_2O 的转化率
Fig. 11 Conversion of $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ and H_2O under different mass flow rates

燃料流量的不同,将会直接影响燃料在通道内的速度分布和停留时间,进而影响燃料的转化率和化学热沉。图 12 所示为燃料在通道内的停留时间随流量的变化,可以看出,当燃料的流量从 2.58 g/s 增加到 5.50 g/s 时,停留时间从 218.0 ms 降低到 133.3 ms,煤油和水转化率也分别降低了 51.19% 和 25.13%。由于燃料在通道内部停留时间的缩短,发生化学反应的燃料相应减少,表现为燃料的化学热沉随着流量的增加而降低。

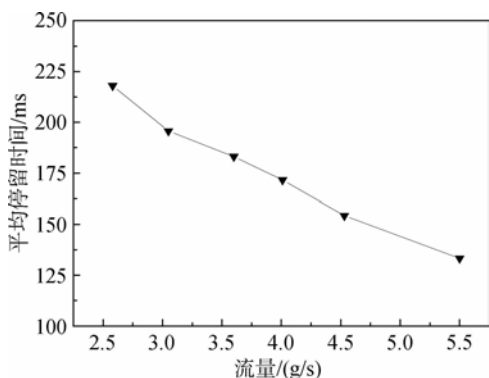


图12 不同流量下燃料的停留时间变化

Fig. 12 Variation of residence time of fuel in different mass flow rates

4 结 论

本文针对航空煤油 RP-3 与水的混合物在再生冷却通道内的吸热过程进行了数值模拟,考虑了燃料的热物性、流动换热、热裂解和催化重整反应的耦合,建立了超临界压力下燃料流动换热与反应的三维数值计算模型,并将计算结果与实验数据进行了比对。计算结果与实验吻合较好,数值模型可以较为准确地预测通道壁面温度分布,燃料出口温度和转化率以及换热恶化现象。

计算结果表明,催化重整反应能提高燃料的吸热能力,降低壁面温度和燃料的出口温度。相比于物理吸热或仅有热裂解的工况,考虑催化重整反应的燃料出口温度分别降低了 27.6% 和 10.2%。对化学反应的分析表明,考虑催化的工况会对热裂解反应产生抑制作用,具体体现在两个方面:一是由于所掺混的水的物理比热容和汽化潜热较高,有助于提高燃料的物理热沉,二是由于催化重整反应具有比热裂解反应更低的起始温度和更高的吸热效应。这两者共同作用使得燃料的整体温度下降,热裂解反应区向后移动。

对燃料流量的影响分析表明,流量的改变会导致通道内的速度场发生改变,进而影响燃料的停留时间。流量增大,燃料的停留时间相应缩短,煤油和水的转化率会随之降低,燃料的化学吸热量降低。

参考文献:

[1] 孙弘原. 超燃冲压发动机燃烧室煤油再生冷却研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
SUN Hongyuan. Investigation of kerosene's regenerated cooling of supersonic combustion chamber[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2009. (in Chi-

nese)

[2] WU Xianyu, YANG Jun, ZHANG Hua, et al. System design and analysis of hydrocarbon scramjet with regeneration cooling and expansion cycle[J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(4): 350-355.
[3] 范学军, 俞刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 187-192.
FAN Xuejun, YU Gang. Analysis of thermo-physical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 187-192. (in Chinese)
[4] HUANG H, SOBEL D R, SPADACCINI L J. Endothermic heat-sink of hydrocarbon fuels for scramjet cooling[R]. Indianapolis, Indiana: the 38th AIAA ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2002.
[5] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 超临界压力下煤油传热特性试验研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 990916. 1-990916. 8.
HU Zhihong, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9): 990916. 1-990916. 8. (in Chinese)
[6] 裴鑫岩, 侯凌云, 莫崇康, 等. 航空煤油替代燃料模型热物性[J]. 航空动力学报, 2015, 30(9): 2122-2128.
PEI Xinyan, HOU Lingyun, MO Congkang, et al. Thermo-physical properties for surrogate models of aviation kerosene[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(9): 2122-2128. (in Chinese)
[7] 贾贞健, 周伟星, 黄洪雁, 等. 碳氢燃料热裂解与引发裂解换热对比实验[J]. 化工学报, 2014, 65(1): 138-143.
JIA Zhenjian, ZHOU Weixing, HUANG Hongyan, et al. Heat transfer of thermal cracking and initiated cracking of aviation kerosene[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2014, 65(1): 138-143. (in Chinese)
[8] ZHAO Guozhu, SONG Wenyan. Effect of pressure on thermal cracking of china RP-3 aviation kerosene under supercritical conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 58(1): 625-632.
[9] WARD T A, ERVIN J S, STRIEBICH R C, et al. Flow and chemical kinetic simulations of endothermic fuels [R]. Honolulu, Hawaii, USA: the 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 2003.
[10] WARD T A, ERVIN J S, STRIEBICH R C, et al. Simulations of flowing mildly-cracked normal alkanes incorporating proportional product distributions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(3): 394-402.
[11] WARD T A, ERVIN J S, ZABARNICK S. Pressure effects on flowing mildly-cracked n-decane[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(2): 344-355.
[12] HOU Lingyun, DONG Ning, SUN Dapeng. Heat transfer and thermal cracking behavior of hydrocarbon fuel[J]. Fuel, 2013, 103(1): 1132-1137.
[13] KURANOV A, KORABELNIKOV A. Catalytic structures for thermochemical protection and fuel conversion[R].

Bremen, Germany; the 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2009.

[14] KURANOV A, KORABELNIKOV A. Hydrocarbon fuel conversion in the thermal protection reactor[R]. Bremen, Germany; the 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2009.

[15] HOU Lingyun, GONG Jingsong, LU Xiaofeng. Conversion of emulsified kerosene in a gas generator with catalytic reforming[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182(10):1478-1490.

[16] HOU Lingyun, DONG Ning, REN Zhuyin, et al. Cooling and coke deposition of hydrocarbon fuel with catalytic steam reforming[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 128(1):128-133.

[17] HOU Lingyun, JIA Zhen, GONG Jingsong, et al. Heat sink and conversion of catalytic steam reforming for hydrocarbon fuel[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(3):453-457.

[18] 侯凌云, 龚景松, 卢小丰, 等. 煤油催化重整可燃燃气发生器的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(2):97-102.

HOU Lingyun, GONG Jingsong, LU Xiaofeng, et al. Experimental researches on flammable gas generator of kerosene with catalytic reforming reaction[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(2):97-102. (in Chinese)

[19] 侯凌云, 卢小丰. 小型化催化重整煤油燃气发生器的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(8):1359-1363.

HOU Lingyun, LU Xiaofeng. Numerical simulation of flaming gas generator with catalytic reforming process[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(8):1359-1363. (in Chinese)

[20] LI Xunfeng, HUAI Xiulan, CAI Jun, et al. Convective heat transfer characteristics of China RP-3 aviation kerosene at supercritical pressure[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14):2360-2366.

[21] ELY J F, HUBER M L. NIST standard reference database 4: NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures[M]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1999.

[22] ÖZGÜN Y, HASTAOGLU M A. Comprehensive study of steam reforming of methane in membrane reactors[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2016, 138(5):052204.1-052204.8.

[23] KIM J J, BAIK J J. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG $k-\epsilon$ turbulence model[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(19):3039-3048.

(编辑:王碧琚)