

超临界碳氢燃料流动换热的一维模型

李海旺, 王 渊, 朱剑琴, 胡希卓, 陶 智
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 考虑水平圆管内燃料流动换热过程和裂解反应及结焦过程之间的相互影响, 提出一个一维稳态模型来研究碳氢燃料的流动换热过程与裂解反应的耦合特性。选用正癸烷作为替代燃料, 裂解反应采用正癸烷裂解的一步总体化学反应模型, 结焦过程采用一维结焦工程模型进行数值模拟, 结果表明裂解反应能够强化换热。选择不同的管壁面热流密度、进口压力和质量流量等典型工况进行模拟, 表明流动换热过程影响燃料裂解反应速率和在管内的驻留时间, 从而影响裂解度。计算结果与实验数据的对比表明了程序的可靠性, 加上一维程序计算效率高的优点, 可将应用于快速工程计算, 并为三维数值模拟提供支持。

关 键 词: 超临界; 正癸烷; 驻留时间; 裂解度; 一维稳态

中图分类号: V233.5⁺9 **文献标志码:** A

One-dimensional model of flow and heat transfer
of supercritical hydrocarbon fuel

LI Haiwang, WANG Yuan, ZHU Jianqin, HU Xizhuo, TAO Zhi
(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine
Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering the mutual influence between fuel flow and heat transfer process and pyrolysis reaction and coking process in horizontal circular tube, a one-dimensional steady-state model was proposed to study the coupling characteristics of hydrocarbon fuel flow and heat transfer process and pyrolysis reaction. *n*-decane was chosen as the alternative fuel, pyrolysis reaction used one-step chemical reaction model and coking process used a one-dimensional coking engineering model for numerical simulation. The overall results showed that the pyrolysis reaction can strengthen heat transfer, and different wall heat flux, inlet pressure and mass flow rate were chosen to simulate the typical working conditions. The overall results showed that flow and heat transfer process influenced fuel's pyrolysis reaction rate and dwell time in the tube, thus affecting pyrolysis ratio. The comparisons of the calculated results with the experimental data show the reliability of the program, which can be applied to swift engineering calculation combined with the advantage of high calculation effi-

收稿日期:2016-03-31

基金项目:基础科研计划(B2120132006); 国家自然科学基金(51406005)

作者简介:李海旺(1982—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事高温旋转部件的流动与换热、高效冷却技术、微尺度动力系统、航空发动机耦合布局、太阳能光热发电技术等方面的研究。

引用格式:李海旺,王渊,朱剑琴,等.超临界碳氢燃料流动换热的一维模型[J].航空动力学报,2017,32(10):2330-2337. LI Hai-wang, WANG Yuan, ZHU Jianqin, et al. One-dimensional model of flow and heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2330-2337.

ciency, and will provide a support for three-dimensional numerical simulation.

Key words: supercritical; *n*-decane; dwell time; pyrolysis ratio; one-dimensional steady state

为解决超燃冲压发动机热防护问题,采用吸热型碳氢燃料进行主动再生冷却已成为目前的主要研究方向之一^[1-3]。再生冷却发动机工作时冷却燃料通常处于超临界压力下与发动机壁面进行对流传热,随着吸热的进行,燃料温度超过临界温度达到超临界态,当温度升高到一定程度后燃料发生裂解反应释放化学热沉^[4],吸热能力显著增强,有利于提高主动冷却效果。但目前关于碳氢燃料裂解反应的模型较少,国内焦毅等^[5-6]构建了常压下正癸烷热裂解的详细机理,并采用自制的常压裂解装置对动力学模拟结果进行了验证。Zhong 等^[7-8]对超临界条件下 RP-3 进行热裂解研究,并构建了一步总体反应模型。国外 Ward 等^[9]使用成比例的产物分布(proportional product distribution,PPD)化学模型构建了低裂解度下正癸烷和十二烷简化反应模型,并进行了数值模拟计算。PPD 机理认为在低裂解度时,燃料的反应仅为一次,产物之间按照比例分布,并依次构建总体化学反应模型。

当前对再生冷却热防护中碳氢燃料的裂解反应的研究多以实验为主,限于实验所要求的高热流密度、高温、高压、小管径等实验条件,相对于流动换热和化学反应的复杂性,实验过程中可测量信息相对较少,需相关的计算以辅助于超临界压力下碳氢燃料裂解反应过程的研究。当前这方面的计算研究已经开展,如文献[10]提出了一个二维稳态模型进行正烷烃裂解反应过程的研究,由于该模型是包含化学反应的多维计算,计算效率相对不高。文献[11]则提出了一个一维模型,但是该模型没有考虑裂解过程中物性的变化对流动过程的影响。文献[12]采用了一个包含 1185 个化学反应的详细机理模型来研究正十二烷的裂解过程,由于详细机理模型通常需要知道所有的反应路径及对应的反应速率常数,这些参数对高分子碳氢燃料来说通常是很难获得的,因此该方法的可推广性相对较差。文献[13-14]提出了一个一维非稳态的计算模型,但模型中采用的裂解机理受限于进一步研究,选取的对流换热的经验关系式并未普遍认可,同时没有考虑高温引起的结焦过程。

本文旨在提出一个效率较高的一维计算模型,用来研究碳氢燃料在超临界状态下的流动换热特性,从而辅助于实验来认识超临界状态下碳氢燃料的裂解反应对流动换热的影响,为三维条件下的流动换热模拟提供支持。

1 数值计算模型

1.1 物理模型和边界条件

本文的采用的管道模型为周向等热流密度加热、等直长、圆形截面的细长管道,管道内径 $d=2\text{ mm}$,管道长度 $L=1\text{ m}$,正癸烷进口温度 $T_{\text{in}}=600\text{ K}$,给定进口压力(p_{in})和进口质量流量($\dot{m}$),壁面为等热流密度边界条件。物理模型如图 1 所示,图中 q_w 为壁面热流密度。

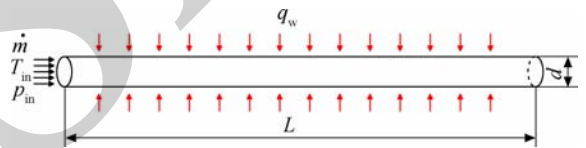


图 1 管道物理模型示意图
Fig. 1 Schematic of tube physical model

1.2 流动换热过程建模

建模基于以下假设:

- 1) 认为管道中参数沿一维轴向分布,忽略参数沿通道径向的变化;
- 2) 忽略径向的燃料物性变化;
- 3) 忽略燃料动能和流动摩擦产生的热能;
- 4) 认为通道是完全水平的,忽略燃料的重力势能的差异;
- 5) 忽略流体的轴向导热作用。

流动和换热的基本控制方程如下:

组分守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u w_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_i \frac{\partial w_i}{\partial x} \right) + \zeta_i \tag{1}$$

式中 ρ 为燃料密度 (kg/m^3); u 为轴向速度 (m/s); x 为横向距离 (m); w_i 、 D_i 和 ζ_i 分别为组分 i 的质量分数、扩散系数和生成率。

动量方程

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{f}{d} (\rho u^2) \tag{2}$$

式中 p 为燃料压力(Pa); f 为摩擦因数。

阻力特性

$$\begin{aligned} f &= 0.316Re^{-0.25} & Re \leqslant 2 \times 10^4 \\ f &= 0.184Re^{-0.2} & Re \geqslant 2 \times 10^4 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 Re 为雷诺数。

能量方程

$$\frac{\partial(\rho u c_p T_f)}{\partial x} = \frac{4}{d}(q_w + q_s) \quad (4)$$

式中 T_f 为燃料温度(K); c_p 为比定压热容(J/(kg·K)); q_w 为管道内壁热流密度(W/m²); q_s 为裂解吸热的等效管壁热流密度(W/m²)。

对流换热特性

$$h = \frac{\lambda}{d}Nu \quad (5)$$

式中 h 为表面传热系数(W/(m²·K)); λ 为燃料导热系数(W/(m·K)); Nu 为努塞尔数。据文献[15], 本文讨论的工况在管内都是湍流流动, 取传热关联式如下:

$$Nu = 0.020Re^{0.82}Pr^{0.40}(\mu/\mu_w)^{0.16} \quad (6)$$

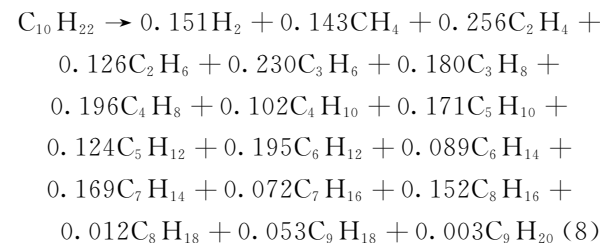
式中 μ 为按管道横截面平均温度计算的黏度(Pa·s); μ_w 为按壁面温度计算的黏度; 雷诺数 Re 和普朗特数 Pr , 表示如下:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (7)$$

1.3 裂解反应过程建模

碳氢燃料的裂解反应类型主要包括热裂解、催化裂解和引发裂解。催化裂解和引发裂解的反应过程及产物分布与所采用的催化剂和引发剂的类型关系密切, 本文仅研究不采用任何催化剂和引发剂的碳氢燃料的高温热裂解反应。碳氢燃料的成分比较复杂, 包括正构烷烃、异构烷烃、芳香烃等多种组分。严格说来, 碳氢燃料的热裂解反应不是完全的一阶化学反应, 但是已有的相关研究表明, 长直链烷烃的裂解过程可近似作为一阶的化学反应过程进行处理。

本文选用正癸烷作为替代燃料来研究, 正癸烷裂解的一步总体化学反应模型为



此裂解反应的反应速率 k 由 Arrhenius 公式计算:

$$k = \alpha \exp(-E/RT_f) \quad (9)$$

式中 $\alpha = 1.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 为频率因子; $E = 263.7 \text{ kJ/mol}$, 为反应活化能; $R = 8.314 \text{ J/(mol·K)}$, 为普适气体常数。

据质量作用定理

$$\frac{dc_{C_{10}}}{dx} = ukc_{C_{10}} \quad (10)$$

式中 $c_{C_{10}}$ 为正癸烷的浓度(mol/m³)。

正癸烷的裂解度定义为裂解的正癸烷的质量流量占进口总质量流量的百分比:

$$Y = \left(1 - \frac{\dot{m}_{C_{10}}}{\dot{m}}\right) \times 100\% \quad (11)$$

式中 $\dot{m}_{C_{10}}$ 为裂解后正癸烷的质量流量(kg/s)。

1.4 结焦过程建模

结焦是极其复杂的过程, 包括了化学反应、传质、吸附等多个过程, 仅仅有机物的热裂解过程就包含了上千种化学反应。为了方便研究, 一般都把结焦简化为由一种或几种结焦前躯体一步生成结焦的反应。本文针对一维研究, 把乙烯作为结焦前躯体, 根据天津大学的结焦实验研究结果, 提出如下的一维结焦动力学模型:

$$\frac{d\rho_c}{dt} = \kappa_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_w}\right) c_{C_2H_4} \cdot \exp(-at) \quad (12)$$

其中 ρ_c 为结焦量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$); t 为反应时间(min); κ_0 为指前因子($\frac{\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})}{\text{mol/L}}$); E_a 为活化能(J/mol); T_w 为壁温(K); $c_{C_2H_4}$ 为乙烯的浓度; a 为衰减因子。

1.5 物性计算

物性模型的具体算法见参考文献[16]。

应用物性模型, 可在给定压力、温度和组分的条件下, 计算其密度、黏度、导热系数和定压比热容, 数学形式如下:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(p, T_f, Y) & \mu &= \mu(p, T_f, Y) \\ \lambda &= \lambda(p, T_f, Y) & c_p &= c_p(p, T_f, Y) \end{aligned} \quad (13)$$

1.6 计算方法验证

为了验证数值计算方法, 对超临界正癸烷的流动换热特性进行了计算, 与文献[17]中的实验数据进行了对比。

计算条件为管道内径 $d = 0.95 \text{ mm}$, 管道长度 $L = 0.7775 \text{ m}$, 正癸烷进口温度为 423 K , 进口质量流量为 0.83 g/s , 进口压力为 3 MPa , 壁面为等热流密度边界条件, 壁面热流密度为 0.214

MW/m²。

将本文计算的正癸烷在等热流密度下的流体温度以及努塞尔数沿管道分布与文献[16]中的实验数据进行比较,如图 2 和图 3 所示。通过图 2 对流体温度分布的比较可以看出,由于入口效应,流体温度的实验值与计算值差距较大,在 0.07 m 处差距最大,约 90 K。在 0.3 m 以后差距在 20 K 以内,总体而言温度趋势一致,数值计算具有较好的精度。通过图 3 对努塞尔数分布的比较看出,在 0.6 m 处计算值和实验值差距最大,约为 30,这与裂解起始温度选取较高有关,其他位置的计算结果和实验值的差距在允许范围内,能较好地反应出超临界流动的流动换热特性。

为了进一步验证数值计算方法,本文设计与文献[16]中裂解结焦实验部分相同的工况,进行了计算,具体如下。

计算条件为管道内径 $d=1\text{ mm}$,管道长度

$L=0.90\text{ m}$,正癸烷进口温度为 473 K,进口质量流量为 6 g/s,进口压力为 5 MPa,壁面为等热流密度边界条件,壁面热流密度为 414.2 KW/m²,结焦过程总时间为 20 min。

流体温度、壁温沿管道分布如图 4 和图 5。可以看出,由于入口效应,流体温度和壁温的实验值与计算值差距较大,但在 0.15 m 以后差距在 40 K 以内,在允许范围内。总体而言温度趋势一致,数值计算具有较好的精度,能较好地反应出超临界流动的流动换热特性。

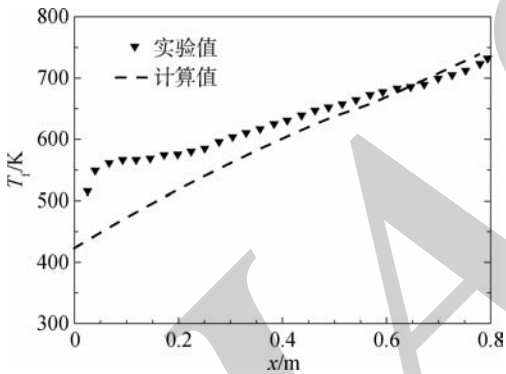


图 2 流体温度沿管道分布($d=0.95\text{ mm}$, $L=0.7775\text{ m}$)
Fig. 2 Distribution of fluid temperature along the tube ($d=0.95\text{ mm}$, $L=0.7775\text{ m}$)

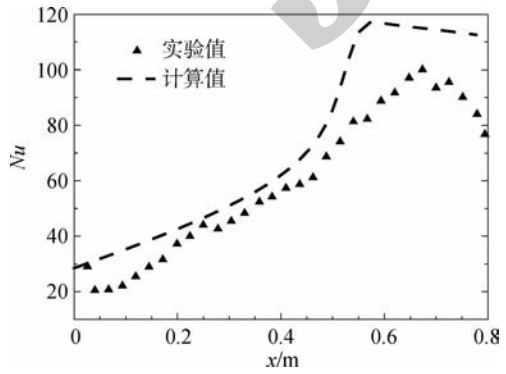


图 3 努塞尔数沿管道的分布($d=0.95\text{ mm}$, $L=0.7775\text{ m}$)
Fig. 3 Distribution of Nusselt number along the tube ($d=0.95\text{ mm}$, $L=0.7775\text{ m}$)

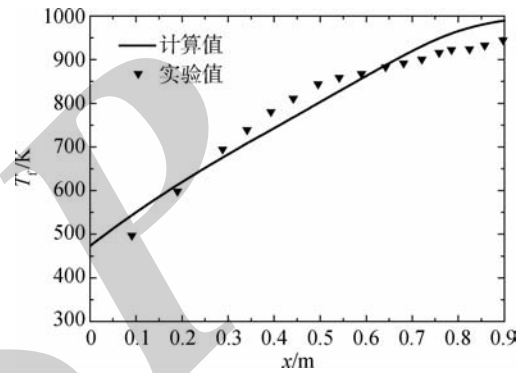


图 4 流体温度沿管道分布($d=1\text{ mm}$, $L=0.90\text{ m}$)
Fig. 4 Distribution of fluid temperature along the tube ($d=1\text{ mm}$, $L=0.90\text{ m}$)

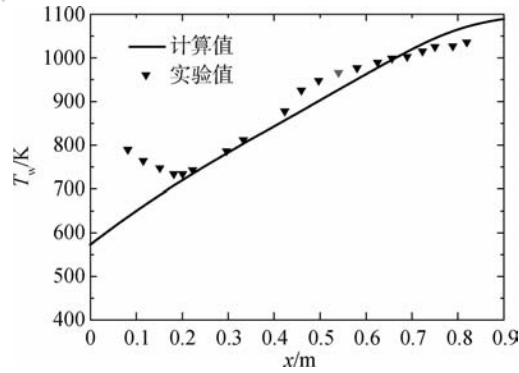


图 5 壁温沿管道分布($d=1\text{ mm}$, $L=0.90\text{ m}$)
Fig. 5 Distribution of wall temperature along the tube ($d=1\text{ mm}$, $L=0.90\text{ m}$)

2 结果分析

2.1 裂解对流动换热的影响分析

本文对进口质量流量为 1 g/s,壁面热流密度为 0.25 MW/m²,3 MPa 压力条件下的正癸烷流动换热和裂解过程进行了计算。图 6 为不考虑裂解反应和考虑裂解反应时管道内流体的温度分布及正癸烷裂解度沿管道的分布。图 7 为正癸烷裂

解反应速率沿管道分布。图 8 为不考虑裂解反应和考虑裂解反应时管道内的流体雷诺数 Re 和努塞尔数 Nu 的分布。

由图 6 可知,管内流体温度一直在升高,但考

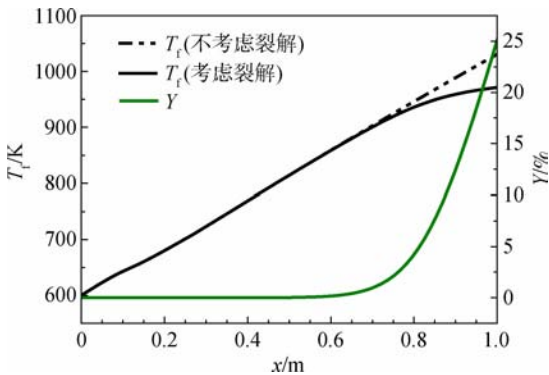


图 6 流体温度和正癸烷裂解度沿管道分布
Fig. 6 Distribution of fluid temperature and n -decane pyrolysis ratio along the tube

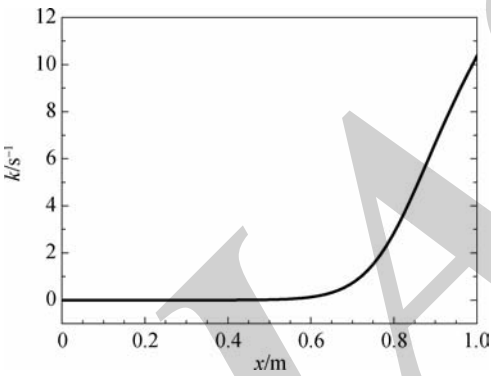


图 7 正癸烷裂解反应速率沿管道分布
Fig. 7 Distribution of n -decane pyrolysis reaction rate along the tube

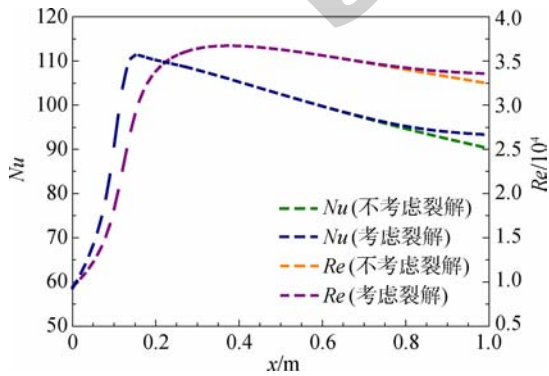


图 8 雷诺数和努塞尔数沿管道的分布
Fig. 8 Distribution of Reynolds number and Nusselt number along the tube

虑裂解反应时,温度的沿程上升速率在降低,至管道出口处比不考虑裂解反应时的温度降低了约 70 K,出现这一温度变化的差异是因为正癸烷进行裂解反应时吸收了大量的热。

由图 7 可知,正癸烷在约 0.5 m 处对应流体温度约 800 K 时反应速率开始逐渐升高,但由图 6 可知,正癸烷在管道约 0.7 m 处对应流体温度约 900 K 时才出现明显的裂解使得温度下降。这是因为裂解反应速率对温度十分敏感,当流体温度较低时,化学反应进行十分缓慢,裂解反应吸收的热量不足以对流体温度的变化产生影响。由图 6 中裂解反应速率沿管道分布曲线可以看出,从 0.7 m 处开始,反应速率随温度的进一步上升迅速增大,大量的正癸烷发生裂解,减慢了流体温度的上升。

由图 8 可知,雷诺数 Re 和努塞尔数 Nu 在管道内先快速升高后缓慢下降,这是因为温度影响流体的黏度,管内流体温度沿程上升,流体黏度先快速变小,后缓慢增大,使得雷诺数 Re 和努塞尔数 Nu 先快速升高后缓慢下降。另一方面,考虑裂解反应时的雷诺数 Re 和努塞尔数 Nu 与不考虑裂解反应相比,在约 0.7 m 处开始减小,这是因为裂解反应吸热引起温升变缓,使流体的黏度增大愈加缓慢,导致雷诺数 Re 和努塞尔数 Nu 的下降幅度越来越小。通过图 6~图 8 的结果及上述分析可知,正癸烷的裂解反应使得温度的沿程上升速率降低,并且能够强化换热。

2.2 不同进口压力对流动换热和裂解过程的影响分析

本文对进口质量流量为 1 g/s,壁面热流密度为 0.25 MW/m²,3~6 MPa 压力条件下的正癸烷流动换热和裂解过程进行了计算,考虑本节探究裂解度的主要影响因素,所以采用了较大的裂解度范围便于观察分析。图 9 为管道出口正癸烷的裂解度随压力的变化。图 10 为正癸烷裂解反应速率沿管道分布。图 11 为流体流动速度沿管道分布。

由图 9 可知,管道出口正癸烷的裂解度随进口压力的增大而增大。由图 10 可知,进口压力越大,正癸烷裂解反应速率越低。由图 11 可知,进口压力越大,管道同一空间位置流体的流速越低。这是因为压力影响流体的密度,压力越大,流体密度越大,在质量流量不变的前提下,流体流速越低,导致流体在通道内的驻留时间越长,可用于裂解反应的时间则越多,但是同一空间位置处裂解

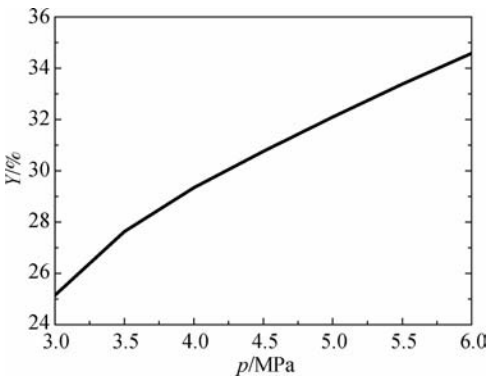


图 9 管道出口正癸烷的裂解度随压力的变化
Fig. 9 Outlet *n*-decane pyrolysis ratio under various pressure

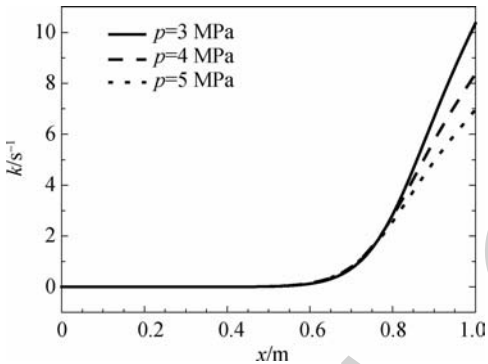


图 10 不同压力下正癸烷裂解反应速率沿管道分布
Fig. 10 Distribution of *n*-decane pyrolysis reaction rate along the tube under various pressure

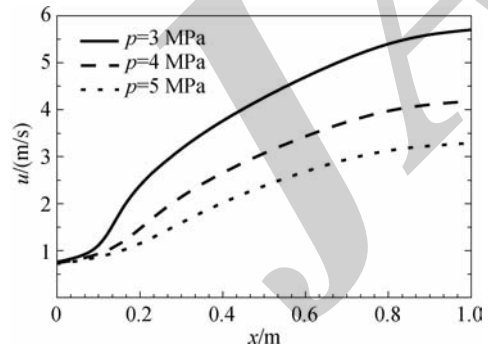


图 11 不同压力下流体流动速度沿管道分布
Fig. 11 Distribution of flow velocity of fluid along the tube under various pressure

反应速率随压力增大而减小,正癸烷的裂解度既受驻留时间的影响,同时也受裂解反应速率的影响。通过图 9~图 11 的结果及上述分析可知,驻留时间占主导地位,所以正癸烷的裂解度随进口压力的增大而增大。

2.3 不同的进口质量流量对流动换热和裂解过程的影响分析

本文对进口质量流量为 1 g/s,壁面热流密度

为 0.25 MW/m²,3 MPa 压力条件下的正癸烷流动换热和裂解过程进行了计算。图 12 为管道出口正癸烷的裂解度随进口质量流量的变化。图 13 为正癸烷裂解反应速率沿管道分布。图 14 为流体流动速度沿管道分布。

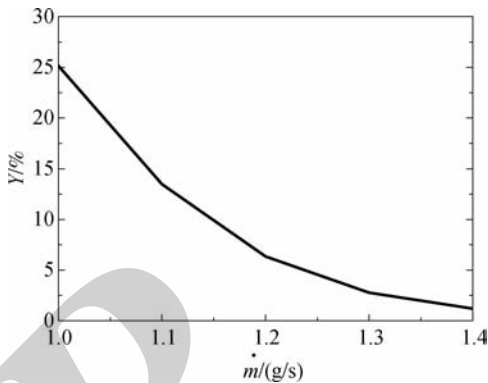


图 12 管道出口正癸烷的裂解度随进口质量流量的变化
Fig. 12 Outlet *n*-decane pyrolysis ratio under various inlet mass flow rate

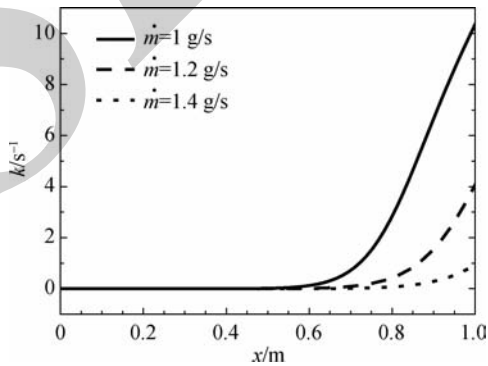


图 13 不同进口质量流量下正癸烷裂解反应速率沿管道分布

Fig. 13 Distribution of *n*-decane pyrolysis reaction rate along the tube under various inlet mass flow rate

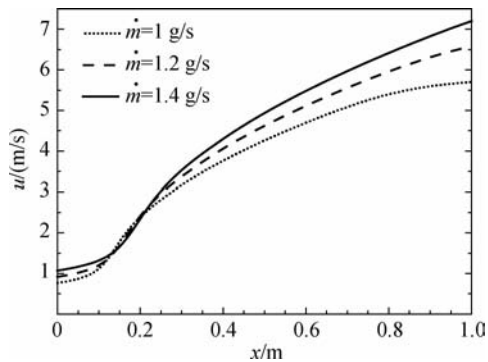


图 14 不同进口质量流量下流体流动速度沿管道分布
Fig. 14 Distribution of flow velocity of fluid along the tube under various inlet mass flow rate

由图 12 可知,管道出口正癸烷的裂解度随进口质量流量的增大而降低,且小质量流量下,裂解度的下降速度更快。由图 13 可知,进口质量流量越大,正癸烷裂解反应速率越低。由图 14 可知,进口质量流量越大,通道中同一空间位置处流体的流速越大。这是因为温度影响流体的密度,流体温度沿管长升高,所以流体密度降低,流速变大,进口质量流量越大,同一位置流体的流速越大,导致驻留时间越短,可用于裂解反应的时间则越少,但是在壁面热流密度不变的前提下,进口质量流量越大,流体温升越小,同一空间位置处的裂解反应速率越小,正癸烷的裂解度既受驻留时间的影响,同时也受裂解反应速率的影响。通过图 12~图 14 的结果及上述分析可知,裂解反应速率占主导地位,所以正癸烷的裂解度随进口质量流量的增大而降低。

2.4 不同的壁面热流密度对流动换热和裂解过程的影响分析

本文对进口质量流量为 1 g/s,壁面热流密度 0.2~0.24 MW/m²,3 MPa 压力条件下的正癸烷流动换热和裂解过程进行了计算。图 15 为管道出口正癸烷的裂解度随壁面热流密度的变化。图 16 为流体反应速率沿管道分布。图 17 为流体流动速度沿管道分布。

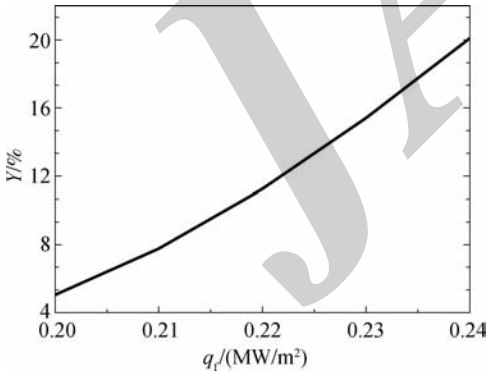


图 15 管道出口正癸烷的裂解度随壁面热流密度的变化
Fig. 15 Outlet *n*-decane pyrolysis ratio under various wall heat flux

由图 15 可知,管道出口正癸烷的裂解度随壁面热流密度的增大而升高。由图 16 可知,壁面热流密度越大,正癸烷裂解反应速率越高,并且反应速率出现明显升高的位置越靠前,即裂解反应的区域长度越长。由图 17 可知,壁面热流密度越大,通道中同一空间位置处流体的流速越小。这是因为温度影响流体的密度,壁面热流密度越大,

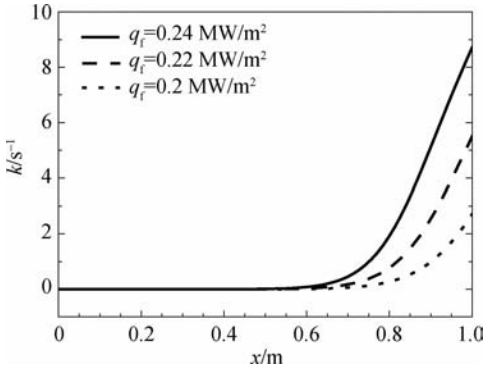


图 16 不同壁面热流密度下正癸烷裂解反应速率沿管道分布

Fig. 16 Distribution of *n*-decane pyrolysis reaction rate along the tube under various wall heat flux

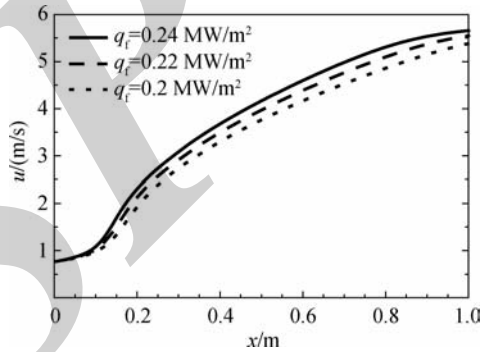


图 17 不同壁面热流密度下流体流动速度沿管道分布
Fig. 17 Distribution of flow velocity of fluid along the tube under various wall heat flux

通道中同一空间位置处流体的温度越高,所以流体密度越低,在相同的质量流量下,流速越高,导致驻留时间越短。另一方面,壁面热流密度越大,在裂解段的裂解反应速率越大,正癸烷的裂解度既受驻留时间的影响,同时也受裂解反应速率的影响。通过图 15~图 17 的结果及上述分析可知,裂解反应速率占主导地位,所以正癸烷的裂解度随壁面热流密度的增大而升高。

3 结 论

本文采用一个一维稳态模型来研究超临界碳氢燃料的流动换热过程,采用正癸烷的物性数据,分析了流动换热过程和裂解反应之间的相互影响,主要的结论如下所示:

1) 正癸烷在约 800 K 时开始发生裂解反应,在 900 K 时裂解反应速率开始有明显的提高并且以指数型增大,这是因为裂解反应速率对温度十分敏感,在 800~900 K 之间正癸烷的裂解反应速率非常小,几乎可以忽略。

2) 正癸烷的裂解增加了正癸烷的吸热能力,可以有效抑制燃料温度的快速增长,并且能够强化换热。

3) 正癸烷的裂解过程本质是受燃料的裂解反应速率和在管内的驻留时间的影响,裂解反应速率越大,驻留时间越长,正癸烷的裂解度越大。其中进口压力越大,则驻留时间越长,裂解度越大;壁面热流密度越高,质量流量越低,裂解反应速率越大,则裂解度越大。

参考文献:

[1] EDWARDS T. Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 1903—2003 [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1089-1107.

[2] HUA Y X, WANG Y Z, HUA M. A numerical study of supercritical forced convective heat transfer of *n*-heptane inside a horizontal miniature tube[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2010, 52(1): 36-46.

[3] KANDA T, MASUYA G, WAKAMATSU Y, et al. Parametric study of airframe-integrated scramjet cooling requirement[J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(3): 431-436.

[4] HUANG H, SOBEL D R, SPADACCINI L J. Endothermic heat-sink of hydrocarbon fuels for scramjet cooling[R]. AIAA-2002-3871, 2002.

[5] 焦毅, 李军, 王静波, 等. 正癸烷热裂解实验和动力学模拟[J]. 物理化学学报, 2011, 27(5): 1061-1067.

JIAO Yi, LI Jun, WANG Jingbo, et al. Experiment and kinetics simulation on the pyrolysis of *n*-decane [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27(5): 1061-1067. (in Chinese)

[6] 李军, 邵菊香, 刘存喜, 等. 碳氢燃料热裂解机理及化学动力学模拟[J]. 化学学报, 2010, 68(3): 239-245.

LI Jun, SHAO Juxiang, LIU Cunxi, et al. Pyrolysis mechanism of hydrocarbon fuels and kinetic modeling[J]. Acta Chimica Sinica, 2010, 68(3): 239-245. (in Chinese)

[7] ZHONG F Q, FAN X J, YU G, et al. Thermal cracking of aviation kerosene for scramjet applications[J]. Science in China, 2009, 52(9): 2644-2652.

[8] ZHONG F Q, FAN X J, YU G, et al. Thermal cracking and heat sink capacity of aviation kerosene under super-

critical conditions[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2011, 25(6): 1226-1232.

[9] WARD T A, ERVIN J S, ZABARNICKS, et al. Pressure effects on flowing mildly-cracked *n*-decane[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(2): 344-355.

[10] WARD T, ZABARNICK S, ERVIN J, 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] TRAN L. Heat transfer calculation of an endothermic fuel at supercritical conditions[R]. AIAA 98-3762, 1998.

[12] GASCOIN N, GILLARD P, DUFOUR E, et al. Validation of transient cooling modeling for hypersonic application [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2007, 21(1): 86-94.

[13] 鲍文, 李献领, 秦江, 等. 碳氢燃料流动换热与裂解反应的建模及仿真[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(10): 1765-1771.

BAO Wen, LI Xianling, QIN Jiang, et al. Modelling and simulation of flow with heat transfer and cracking reaction for hydrocarbon[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(10): 1765-1771. (in Chinese)

[14] 鲍文, 李献领, 周伟星, 等. 细长圆管内超临界碳氢燃料换热特性研究[C]//中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集. 上海: 中国工程热物理学会, 2010: 103379. 1-103379. 9.

[15] 张磊, 乐嘉陵, 张若凌, 等. 超临界压力下湍流区碳氢燃料传热研究[J]. 推进技术, 2013, 34(2): 225-229.

ZHANG Lei, LE Jialing, ZHANG Ruoling, et al. Heat transfer of hydrocarbon fuel in turbulent flow region under supercritical pressure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(2): 225-229. (in Chinese)

[16] 程泽源, 朱剑琴, 金钊. 吸热型碳氢燃料 RP-3 替代模型研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(2): 391-398.

CHENG Zeyuan, ZHU Jianqin, JIN Zhao. Study on surrogate model of endothermic hydrocarbon fuel RP-3 [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(2): 391-398. (in Chinese)

[17] 刘波. 超临界压力流体在圆管内对流换热及热裂解研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.

LIU Bo. Researches on in-tube convection heat transfer and thermal cracking of supercritical pressure fluids[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)