

• 化学工程与技术 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300644



本刊网刊

矩形管内正癸烷的裂解传热特性

雷志良^{1,2}, 鲍泽威^{3*}

(1. 中国民用航空飞行学院 民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室, 四川 德阳 618307; 2. 中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院, 四川 德阳 618307; 3. 四川大学 化工学院, 四川 成都 610065)

摘要: 燃烧室壁面矩形冷却通道内碳氢燃料的裂解传热是发动机再生冷却技术的关键问题。目前, 针对矩形管内超临界压力下正癸烷裂解和传热的耦合作用机制的实验研究较少。本文搭建了超临界压力正癸烷裂解传热实验装置, 在实验过程中通过两段交流电加热的方式将SS304不锈钢管中的正癸烷加热至所需出口温度, 调节恒流泵的设置来改变进口的质量流量, 调节背压阀实现加热管内不同的体系压力。首先, 研究了矩形冷却通道内不同流量、温度和操作压力对正癸烷裂解传热特性的影响; 其次, 利用敏感性分析方法讨论了进口质量流量和体系压力对转化率和产气率的影响程度。结果表明: 相同出口温度下, 随着质量流量的增加, 正癸烷的产气率和转化率逐渐降低。当出口温度在823~923 K之间, 随出口温度的增加, 产气率和转化率先缓慢增加, 后显著上升, 最后增加趋势变缓。相同出口温度下, 随着压力的增加, 正癸烷的产气率和转化率也相应增加。当出口温度为873 K左右, 压力从3 MPa增加到4 MPa时, 产气率和转化率分别从21%增加到27%和从38%增加到45%。由敏感性分析可知, 体系压力对产气率和转化率有正向影响, 而质量流量对产气率和转化率有负向影响。研究成果可为矩形冷却通道的设计提供理论和数据支撑。

关键词: 正癸烷; 裂解反应; 传热; 矩形管; 敏感性分析

中图分类号: V231.1; TQ051

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)04-0342-08

基于吸热型碳氢燃料的再生主动冷却技术是目前解决先进发动机燃烧室热防护问题最为经济可靠的技术之一^[1-2]。在主动冷却过程中, 吸热型碳氢燃料被加热到约1 000 K的高温, 碳氢燃料将裂解成 CH_4 、 C_2H_4 和 C_2H_6 等小分子化合物^[3-6]。碳氢燃料的裂解过程较为复杂, 影响裂解反应的因素较多, 如裂解压力^[7-8]、热流密度^[9]和管径^[10-11]。在进行裂解反应时, 矩形管内的传热会影响反应的进行。因此, 研究矩形管内正癸烷的裂解传热的特性可以更好地了解管道传热的规律, 也可为实际化工生产中正癸烷裂解环节设备的改进提供有用参考。

目前, 大多数文献都集中于均匀加热圆管内超临界压力流体的流动、传热^[12-15]及裂解过程^[16-17]的研究。Zhang等^[12]通过实验研究了碳氢燃料RP-3流经竖直向下冷却通道内的传热特性, 发现对流传热系数

随着热流密度的增加而减少。一般情况下, 随着质量流量的增加, 超临界流体的对流传热系数逐渐增加。然而, 一些文献却得出了不同的结论。Bruch等^[13]认为这种特殊的行为可能是自然对流对热状态的不同影响造成的。Fu等^[14]通过实验研究了超临界压力下碳氢燃料RP-3在内径分别为0.538、1.090和1.820 mm的竖直圆管内的对流换热, 提出了 Nu 数的两个经验关联式, 并分别用于预测1.09 mm圆管内向下和向上的流动传热。Zhao等^[15]研究了超临界压力煤油在高热流密度和高速下的传热特性, 考虑了煤油在流动空间和时间尺度上热物性参数的剧烈变化, 通过引入动力黏度、导热系数和温度概率密度函数修正了传统传热关联式。Zhong等^[16]研究了航空煤油在780~1 050 K和3.0~4.5 MPa的热管中停留0.6~3.0 s的热裂解和吸热性能。Li等^[17]通过电加热管试验研究了碳氢燃料

收稿日期:2023-08-19 修回日期:2024-02-19 网络出版日期:2024-06-04

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PHD2023-064);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QJ2023-049);先进过滤与分离技术联合实验室开放课题(FS2024T002)

作者简介:雷志良(1991—),男,讲师,博士。研究方向:发动机再生冷却热防护技术。E-mail: leizhiliang@cafuc.edu.cn

*通信作者:鲍泽威,副教授, E-mail: zewei.bao@scu.edu.cn

EHF-851在650~750 °C和0.7~6.0 MPa下的亚临界和超临界热解特性,考虑了操作参数(流量、压力和燃料温度)对热沉和详细热解产物的影响。不同的截面形状将导致截面内裂解产物和转化率的分布不同。然而,发动机的冷却通道一般为矩形截面,用圆形冷却通道获得的实验结果来设计矩形冷却通道会带来巨大误差。

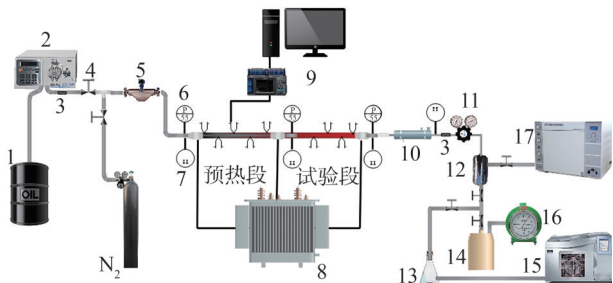
国内外关于碳氢燃料在矩形管内的实验研究大多是单独研究流动、传热^[18-21]、裂解、结焦^[22-25]等方面的特性。罗毓珊等^[19]在高温流密度、高流速、超临界压力条件下对外边长为4.6 mm的方形小通道光滑管及底部带有不同强化表面的5根粗糙管试件进行了煤油的传热、阻力、结焦特性试验,获得了煤油的传热、阻力与结焦特性及主要影响因素。Wang等^[20]通过实验研究了超临界压力下航空煤油在4种不同肋结构的方管和两种不同肋结构的圆管中的流动和传热特性,获得了壁面温度和管内压降的分布。Kim等^[21]通过实验探索了基于传统尺寸通道的理论关联式在预测矩形微通道中的流动和传热特性方面的有效性。Li等^[22]在相同横截面积的矩形、方形和圆形通道中,通过均匀加热实验研究了3.5 MPa下冷却通道形状对HF-1燃料热裂解和积碳行为的影响,发现在矩形和方形冷却通道的边界层中,较高的温度和较低的速度可能会导致较严重的热裂解和快速的二次反应而形成碳沉积。Zhu等^[23]对水力直径为1.8 mm的竖直方管内超临界压力正癸烷的对流换热特性进行了实验研究,提出了竖直方管内向上和向下流动的传热关联式。Pu等^[24]通过实验研究了超临界压力碳氢燃料RP-3在水平矩形冷却通道内的对流传热和流动特性,并基于层流和过渡流区域的实验数据,提出了新的Nu数关联式。Li等^[25]通过电热管实验,研究了超临界条件下不同高宽比水平矩形通道内吸热型碳氢燃料热解和传热之间的耦合关系。

关于矩形截面以及湍流和换热引起的径向温度分布不均匀^[26-28],裂解机理在矩形管内的普适性不强,此外,流动和热解在不同的矩形通道中强烈耦合,会导致局部化学吸热和热物理性质的变化复杂,从而影响对流传热^[29],这有待进一步研究。但目前关于矩形管内超临界压力下正癸烷裂解和传热的耦合作用机制的实验研究较少。本文通过实验探究了质量流量、体系压力和出口温度对正癸烷裂解传热特性的影响,最后利用敏感性分析方法讨论了进口质量流量和体系压力对转化率和产气率的影响程度,研究成果可为矩形冷却通道的设计提供理论和数据支撑。

1 实验部分

1.1 实验装置

用如图1所示的超临界压力正癸烷裂解传热实验装置,通过电加热方式将不锈钢管中的正癸烷加热至所需出口温度。图2所示的不锈钢SS304反应管为加热反应器。实验燃料为正癸烷(纯度≥99%,抚顺泰洋升化工有限公司)。



1.燃料罐; 2.高压恒流泵; 3.过滤器; 4.截止阀; 5.质量流量计; 6.K型热电偶; 7.压力传感器; 8.变压器; 9.数据采集系统; 10.冷凝器; 11.背压阀; 12.气液分离器; 13.液体收集罐; 14.废油桶; 15. PE气相色谱II; 16.湿式气体流量计; 17.气相色谱I。

图1 超临界压力正癸烷裂解传热实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for heat transfer of *n*-decane pyrolysis at supercritical pressure

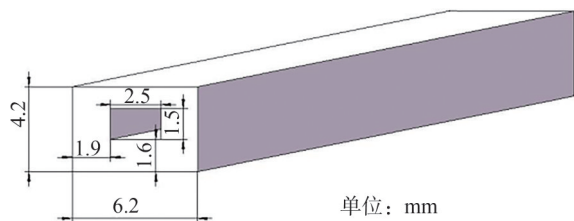


图2 矩形管的几何尺寸

Fig. 2 Geometric dimensions of rectangular tubes

1.2 实验方法

采用两段交流电加热的方式来研究高温进口时不同操作参数对矩形管内正癸烷裂解传热特性的影响。前段用圆管作为预热段,具体尺寸如下:内径为2 mm,外径为3 mm,管长为675 mm。后端用矩形管作为实验段,管长为526 mm,截面的具体形状和尺寸见图2,其中内通道宽为2.5 mm、内通道高为1.5 mm。通过调节恒流泵的设置来改变进口的质量流量,质量流量的范围为0.5~1.5 g/s;通过调节背压阀使加热管内的体系压力为3~5 MPa;待预热段温度稳定在773 K或者873 K,通过改变后端交流变压器的功率使实验管出口油温达到目标温度(823~923 K),同时对管路进出口油温、压力和壁面温度进行同步测量。每次实验中,分别收集和分析燃料的气相和液相裂解产物,详细的进样、采集和分析方法见文献[30-31]。具体实验工况如表1所示。

表 1 矩形管内正癸烷裂解传热实验工况

Tab. 1 Experimental conditions for heat transfer of *n*-decane during pyrolysis in the rectangular tube

工况 编号	出口压力/ MPa	质量流量/ (g·s ⁻¹)	管长/ mm	进口温度/ K	出口温度/ K
1	3	0.5	526	773	823
				773	848
				773	873
2	3	0.5	526	873	898
				873	923
				773	823
3	3	1.0	526	773	848
				773	873
				773	873
4	3	1.0	526	873	898
				873	923
				773	823
5	3	1.5	526	773	848
				773	873
				773	873
6	3	1.5	526	873	898
				873	923
				773	823
7	4	1.0	526	773	848
				773	873
				873	898
8	4	1.0	526	873	923
				873	923
				773	823
9	5	1.0	526	773	848
				773	873
				773	873
10	5	1.0	526	873	898
				873	923
				873	923

1.3 不确定度分析

为了检验实验装置的可靠性和测量仪表的准确性,在不同时间对同一工况下正癸烷在超临界压力下的壁面温度分布进行了重复性实验,并对比了不同时间内壁面温度沿流动方向的分布,分布情况如图 3 所示。矩形管内正癸烷的实验压力为 4 MPa,管长为 526 mm,进口温度为 773 K,质量流量为 1.0 g/s,出口温度为 898 K。

从图 3 可以看出,不同时间内的实验测量结果差别不大,虽然第 1 次测量的壁面温度略微偏低,但所有数据的相对误差均在 0.99% 以内,即相同工况条件下壁面温度的重复性实验误差在允许范围内,说明在上述装置中测量的实验数据是准确可靠的。

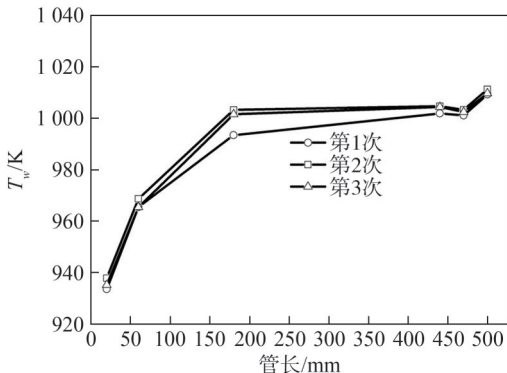


图 3 出口温度为 898 K 时壁面温度随管长的分布

Fig. 3 Distributions of wall temperature with tube length at the outlet temperature of 898 K

转化率和产气率是评价燃料裂解反应程度的重要指标。实验中正癸烷的转化率 X 表示为:

$$X = \frac{\dot{m} - \dot{m}_1 w}{\dot{m}} \times 100\% \quad (1)$$

反应产物选择性 S_i 的计算如下:

$$S_i = \frac{n_i}{n_r X} \quad (2)$$

正癸烷裂解过程中产气率 R_{gas} 的计算如下:

$$R_{\text{gas}} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_1} \quad (3)$$

转化率 X 的相对不确定度误差传递公式为:

$$u_r(X) = \sqrt{\left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}}\right)^2 u_r^2(w) + \left(\frac{w}{\dot{m}}\right)^2 u_r^2(\dot{m}_1) + \left(\frac{\dot{m}_1 w}{\dot{m}^2}\right)^2 u_r^2(\dot{m})} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: w 为原料在裂解残液中所占的质量分数,由PE气相色谱仪II分析得到; n_i 为单位时间内裂解产物*i*的物质的量,mol/s; n_r 为单位时间内正癸烷燃料的物质的量,mol/s; \dot{m}_g 为裂解反应中气体的质量流量,由气相色谱仪I分析组分计算得到,g/s; \dot{m}_1 为裂解反应中残液的质量流量,g/s。

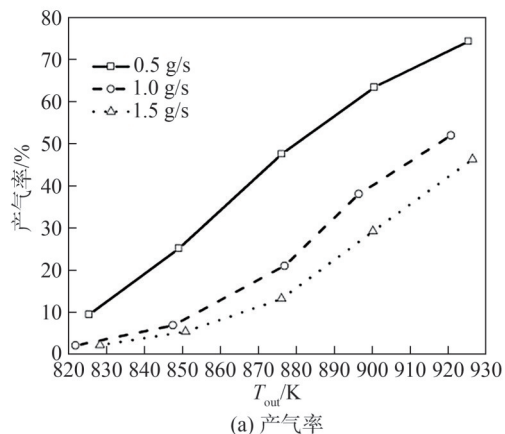
正癸烷转化率的不确定度取决于质量流量和产品组分的测量。采用Micro-Motion CMF101质量流量计对进口燃料的质量流量进行测量,测量结果的不确定度小于±0.1%。数据采集系统的精度为0.1级,采用1.0~5.0 V标准电压信号。用不确定度小于0.1 mg的电子天平测量液体产物的质量流量。用气相色谱仪I(GC-2000 III)中的毛细管分离柱(HP-Al/S)和氢火焰离子化检测器(FID)检测C1~C4的小分子烃类,用5A型分子筛填充柱和热导检测器(TCD)分析氢气含量。用气相色谱仪II(Perkin Elmer GC Clarus 680)对液体产品进行鉴定,测量得到的各组分质量分数的相对不确定度均小于2.5%。根据Moffat的实验误差传递公式^[32]以及式(1)和(4)可得,转化率的最大相对不确定度为±2.67%。

2 结果与讨论

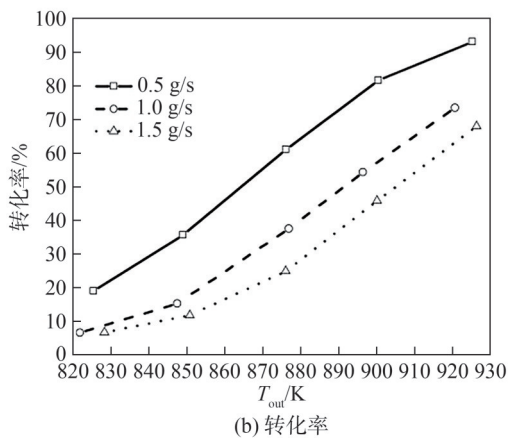
2.1 质量流量对裂解特性的影响

图4为不同质量流量下矩形管内正癸烷的产气率和转化率随出口温度的变化曲线。图4中矩形管内正癸烷的固定体系压力为3 MPa,进口温度为773 K或873 K,出口温度范围为823~923 K,质量流量的变化范围为0.5~1.5 g/s。从图4可以看出,在相同出口温度下,随着质量流量的增加,正癸烷的产气率和转化率逐渐降低。这是因为相同出口温度下,燃料的质量流量越大,单位质量燃料的吸热量越小,燃料的裂解反应速率越低。同时,增加质量流量将缩短燃料在反应

段内的停留时间,不利于热解反应的充分进行。当质量流量为 0.5 g/s、出口温度超过 898 K 时,随着出口温度的增加,燃料产气率和转化率的增加趋势变缓。这是因为此时正癸烷的转化率高于 81%,处于深度反应阶段,反应物浓度比较低。当质量流量为 1.5 g/s、出口温度低于 848 K 时,产气率和转化率随出口温度的变化比较缓慢,这是因为此时燃料刚刚开始反应,处于初始反应阶段,反应程度不剧烈。当温度高于 873 K 以后,产气率和转化率随出口温度的升高显著上升,说明此时燃料处于快速反应阶段。



(a) 产气率



(b) 转化率

图4 不同质量流量下产气率和转化率随出口温度的变化
Fig. 4 Variations of gas yield and conversion as a function of outlet temperature under different mass flow rates

超临界压力下正癸烷热裂解反应的气相产物通过气相色谱仪 I (GC-2000 III) 进行分析,主要产物分为烯烃、烷烃和氢气 3 类。图 5 给出了不同质量流量下矩形管内气相产物中烷烃的选择性随出口温度(T_{out})的变化。从图 5 可以看出,当燃料出口温度在 873~923 K 之间时,随着质量流量的增加,产物中烷烃的选择性减小。这是因为高温下,燃料的转化率较高,流量的增加会降低燃料的转化率,从而降低烷烃的选择性。而当燃料出口温度在 823~848 K 之间时,由于 1.0 g/s 和 1.5 g/s 的转化率比较低,降低质量流量,烷烃的选择性基本不变。

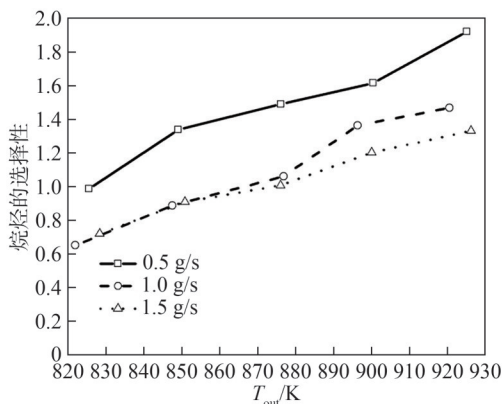


图5 不同质量流量下气相产物中烷烃的选择性随出口温度的变化

Fig. 5 Variations of selectivity of alkane as a function of outlet temperature in gas phase products under different mass flow rates

2.2 体系压力对裂解传热的影响

图 6 给出了不同体系压力下矩形管内燃料出口温度为 848 K 时壁面温度随管长的分布。出口温度随加热功率的变化如图 7 所示。图 6 中,矩形管内正癸烷体系压力的变化范围为 3、4、5 MPa,质量流量为 1.0 g/s。由图 6 可知,压力越大,相应的壁面温度也就越高,导致壁面与环境之间的热损失越大。所以,想要达到相同的出口温度,压力越大,所需要的加热功率就越大(图 7)。当出口温度为 848 K 时,体系压力从 3 MPa 增加到 5 MPa,相应的加热功率增加 11%。

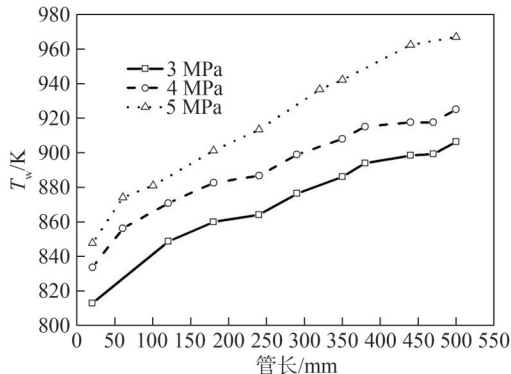


图6 不同压力下出口温度为 848 K 时壁面温度随管长的变化
Fig. 6 Variations of wall temperature with tube length at the outlet temperature of 848 K under different pressures

图 8 为不同压力下矩形管内正癸烷的产气率和转化率随出口温度的变化。从图 8 可以看出,在相同进出口温度下,随着压力的增加,正癸烷的产气率和转化率也相应增加。虽然升高压力从化学反应动力学上来讲并不利于热裂解反应的正向进行,但在相同温度下,体系压力增大,燃料的密度也会增大,导致相同质量流量下燃料的流速降低,停留时间增加。因此,相同条件下,增加压力,正癸烷的产气率和转化率都会增大。比如,当出口温度为 873 K 左右时,压力从 3 MPa

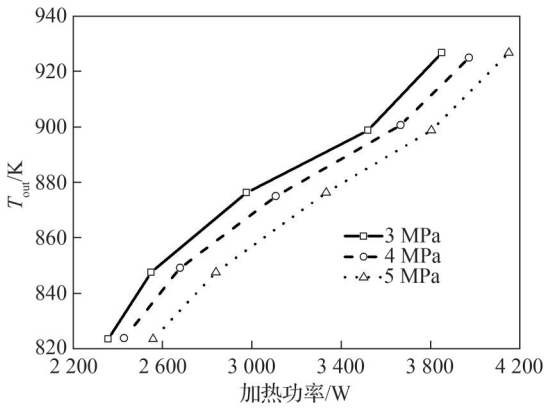
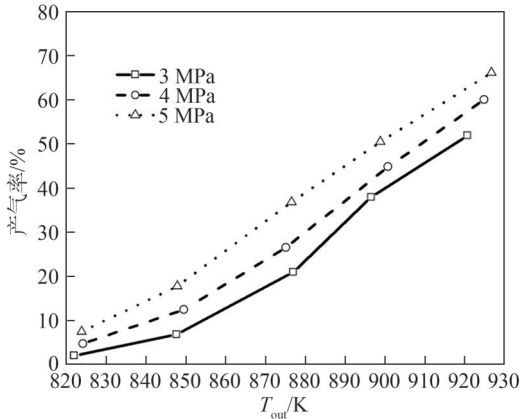
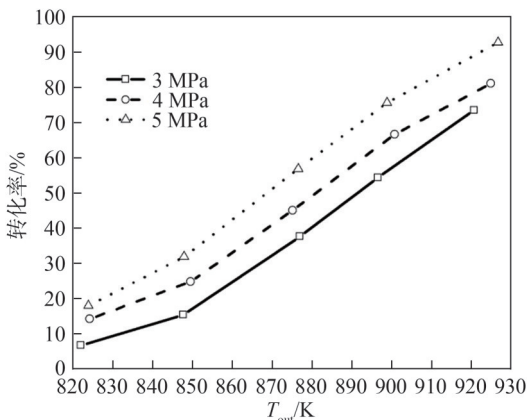


图7 不同压力下加热功率随出口温度的变化

Fig. 7 Variations of heating power as a function of outlet temperature under different pressures



(a) 产气率



(b) 转化率

图8 不同压力下产气率和转化率随出口温度的变化

Fig. 8 Variations of gas yield and conversion as a function of outlet temperature under different pressures

增加到 4 MPa, 产气率和转化率分别从 21% 增加到 27% 和从 38% 增加到 45%。

图9给出了不同压力下矩形管内气相产物中烷烃的选择性随出口温度的变化。根据文献[33]可知, 烷烃主要受烷基自由基的氢提取反应(双分子反应)影响, 与 β -断裂单分子反应相比, 高压更有利于氢提取反应

的正向进行。从图9可以看出, 在相同质量流量和出口温度下, 随着压力的增加, 气相产物中烷烃的选择性增加。

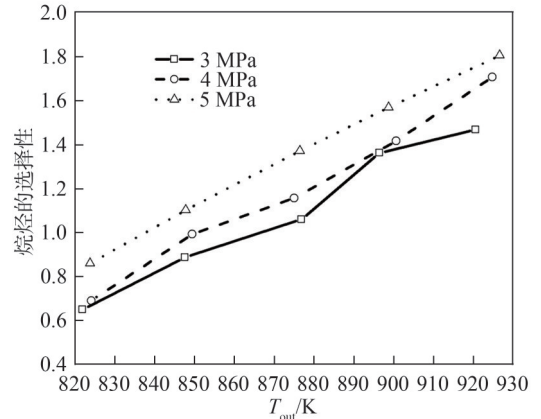


图9 不同压力下气相产物中烷烃选择性随出口温度的变化

Fig. 9 Variations of selectivity of alkane as a function of outlet temperature in gas phase products under different pressures

2.3 敏感性分析

为了分析进口质量流量和体系压力对转化率和产气率的影响程度, 引入敏感性分析方法。由于不确定因素的波动范围不同, 敏感性分析计算结果可能不同。但该数值大小并不是敏感性分析的目的, 真正的重点是确定各不确定性因素的相对值, 以此了解它们的相对影响程度。

敏感性系数定义为目标参数变化率与不确定因素变化率之比。以管长 526 mm, 体系压力 3 MPa, 质量流量 1.0 g/s 为基准条件, 进口质量流量和体系压力的波动范围分别为 0.5~1.5 g/s 和 3~5 MPa。图 10 为不同出口温度下, 矩形管内进口质量流量和体系压力变化对产气率的敏感性系数分布的影响。从图 10 可以看出, 体系压力对产气率有正向影响, 而质量流量对产气率有负向影响, 这与前文的结论相同。图 10 (a) 表明当体系压力为 3 MPa、管长为 526 mm 时, 随着出口温度的升高, 产气率对进口质量流量的敏感性逐渐降低, 这是因为在出口温度为 923 K 时, 正癸烷的产气率比较高, 进口质量流量微小的变化会对产气率产生很小的影响。图 10 (b) 表明, 当质量流量为 1 g/s、管长为 526 mm 时, 随着出口温度的升高, 产气率对体系压力的敏感性也是逐渐降低的。

图 11 给出了不同出口温度时, 矩形管内进口质量流量和体系压力变化对转化率的敏感性系数分布的影响。由图 11 可知, 转化率对进口质量流量和体系压力变化的敏感性规律与产气率相同, 都随出口温度的升高而减小。但总体上, 转化率的敏感性系数值小于产气率, 这是由相同条件下转化率比产气率高所导致的。

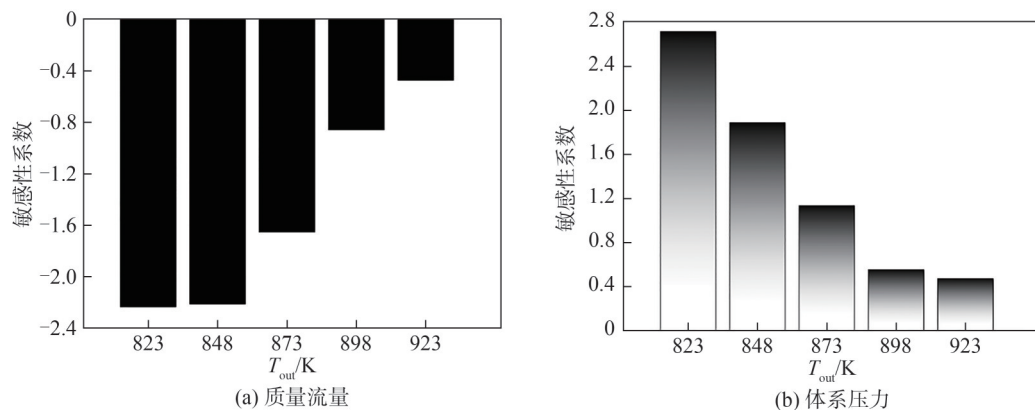


图10 不同出口温度下质量流量和体系压力对产气率的敏感性系数分布

Fig. 10 Distributions of sensitivity coefficient of mass flow rate and system pressure to gas yield under different outlet temperatures

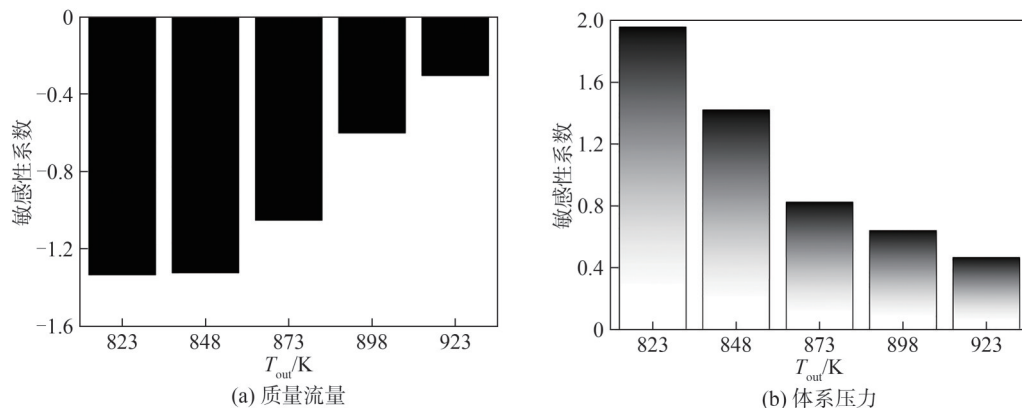


图11 不同出口温度下质量流量和体系压力对转化率的敏感性系数分布

Fig. 11 Distributions of sensitivity coefficient of mass flow rate and system pressure to conversion under different outlet temperatures

3 结论

本文首先通过4 MPa压力下正癸烷裂解传热反应实验台的重复性校核,对实验装置的可靠性和稳定性进行了验证。随后,研究了质量流量、体系压力和出口温度对正癸烷热裂解特性的影响,得到如下结论:

1)在体系压力为3 MPa,出口温度范围为823~923 K,管长为526 mm的矩形管内,增加质量流量,燃料在通道内的停留时间会变短。因此,正癸烷的产气率和转化率逐渐降低。此外,在出口温度为873~923 K时,质量流量的增加会降低烷烃的选择性;在出口温度为823~848 K时,正癸烷的转化率比较低,质量流量从1.0 g/s增加到1.5 g/s时,烷烃的选择性基本不变。

2)在质量流量为1.0 g/s,出口温度范围为823~923 K,管长为526 mm的矩形管内,随着体系压力的增加,燃料的密度增大,停留时间延长。因此,正癸烷的产气率和转化率相应增加。此外,气相产物中烷烃的选择性随压力的增大而增加。通过敏感性分析可知,在实验工况范围内,体系压力对产气率和转化率有正向影响,而质量流量对产气率和转化率有负向影响。

参考文献:

- [1] Zhu Yin Hai, Peng Wei, Xu Ruina, et al. Review on active thermal protection and its heat transfer for airbreathing hypersonic vehicles[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(10):1929-1953.
- [2] Marley C D, Driscoll J F. Heat transfer operability limits for an actively and passively cooled hypersonic vehicle[J]. Journal of Aircraft, 2018, 55(4):1655-1674.
- [3] Jiang Rongpei, Liu Guozhu, Zhang Xiangwen. Thermal cracking of hydrocarbon aviation fuels in regenerative cooling microchannels[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(5):2563-2577.
- [4] Jiang Peixue, Wang Yusen, Zhu Yin Hai. Differential global reaction model with variable stoichiometric coefficients for thermal cracking of *n*-decane at supercritical pressures [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(8):7244-7256.
- [5] Zhu Yin Hai, Liu Bo, Jiang Peixue. Experimental and numerical investigations on *n*-decane thermal cracking at supercritical pressures in a vertical tube[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(1):466-474.
- [6] Zhang Limei, Yin Rou, Wang Jingbo, et al. Numerical investigations on the molecular reaction model for thermal cracking of *n*-decane at supercritical pressures[J]. ACS Omega, 2022, 7(26):22351-22362.

- [7] Wang Yu,Liang Ce,Zhang Qiyi,et al.The study on pyrolysis characteristics of hydrocarbon fuel with fixed heat flux [J].Chemical Research and Application,2017,29(8):1171–1176.[王雨,梁策,张其翼,等.等热流密度条件下碳氢燃料裂解特性研究[J].化学研究与应用,2017,29(8):1171–1176.]
- [8] Zhang L,Zhang R L,Xiao S D,et al.Experimental investigation on heat transfer correlations of *n*-decane under supercritical pressure[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2013,64:393–400.
- [9] Deng Hongwu,Zhu Kun,Xu Guoqiang,et al.Heat transfer characteristics of RP–3 kerosene at supercritical pressure in a vertical circular tube[J].Journal of Enhanced Heat Transfer,2012,19(5):409–421.
- [10] Liu Bo,Zhu Yin Hai,Yan Junjie,et al.Experimental investigation of convection heat transfer of *n*-decane at supercritical pressures in small vertical tubes[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2015,91:734–746.
- [11] Ma Hailong,Gao Hui,Zhao Jiajun,et al.Numerical simulation of flow and heat transfer of *n*-decane in composite tube under supercritical pressure[J].Journal of Physics: Conference Series,2024,2683(1):012020.
- [12] Zhang Chunben,Xu Guoqiang,Gao Lin,et al.Experimental investigation on heat transfer of a specific fuel (RP–3) flows through downward tubes at supercritical pressure[J].The Journal of Supercritical Fluids,2012,72:90–99.
- [13] Bruch A,Bontemps A,Colasson S.Experimental investigation of heat transfer of supercritical carbon dioxide flowing in a cooled vertical tube[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2009,52(11/12):2589–2598.
- [14] Fu Yanchen,Huang Haoran,Wen Jie,et al.Experimental investigation on convective heat transfer of supercritical RP–3 in vertical miniature tubes with various diameters[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,112:814–824.
- [15] Zhao Wenzhe,Song Zichen,Li Hongzhi,et al.Research on heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure in circular tubes[J].Experimental Thermal and Fluid Science,2018,96:507–515.
- [16] Zhong Fengquan,Fan Xuejun,Wang Jing,et al. Thermal cracking and heat sink capacity of aviation kerosene under supercritical conditions[C]//Proceedings of the 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.Denver,Colorado:AIAA,2009:AIAA2009–5267.
- [17] Li Ya,Jin Baitang,Zhang Xiangwen,et al. Pyrolysis and heat sink of an endothermic hydrocarbon fuel EHF–851 [J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2021,155: 105084.
- [18] Jiang Jin,Zhang Ruoling,Le Jialing,et al.The investigation on heat transfer characteristic tests and thermal evaluation of fuel-cooled panels[J].Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2011,25(1):1–6.[蒋劲,张若凌,乐嘉陵,等.燃油冷却面板传热特性试验与计算分析研究[J].实验流体力学,2011,25(1):1–6.]
- [19] Luo Yushan,Wang Haijun,Chen Tingkuan,et al. Investigation to heat transfer and pressure drop characteristics of kerosene under high parameter in square small channel[J].Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(3):265–268.[罗毓珊,王海军,陈听宽,等.方形小通道内高参数下煤油传热与阻力特性[J].西安交通大学学报,2008,42(3): 265–268.]
- [20] Wang Haijun,Luo Yushan,Gu Hongfang,et al.Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of kerosene at supercritical pressure in square and circular tube with artificial roughness[J].Experimental Thermal and Fluid Science,2012,42:16–24.
- [21] Kim B.An experimental study on fully developed laminar flow and heat transfer in rectangular microchannels[J].International Journal of Heat and Fluid Flow,2016,62:224–232.
- [22] Li Fuqiang,Li Zaizheng,Jing Kai,et al. Thermal cracking of endothermic hydrocarbon fuel in regenerative cooling channels with different geometric structures[J].Energy & Fuels,2018,32(6):6524–6534.
- [23] Zhu Jianqin,Zhao Chaofan,Cheng Zeyuan,et al. Experimental investigation on heat transfer of *n*-decane in a vertical square tube under supercritical pressure[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,138:631–639.
- [24] Pu Hang,Li Sufen,Dong Ming,et al.Convective heat transfer and flow resistance characteristics of supercritical pressure hydrocarbon fuel in a horizontal rectangular minichannel[J].Experimental Thermal and Fluid Science,2019, 108:39–53.
- [25] Li Zaizheng,Li Ya,Zhang Xiangwen,et al.Coupling of pyrolysis and heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel in rectangular minichannels[J].Chemical Engineering Science,2022,247:116924.
- [26] Lei Zhiliang,Bao Zewei.Supercritical heat transfer and pyrolysis characteristics of *n*-decane in circular and rectangular channels[J].Energies,2023,16(9):3672.
- [27] Yu Wenli,Zhou Weixing,Long Lin,et al.Effects of different simulation models on pyrolysis performance predictions for regenerative cooling applications[J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2021,156:105136.
- [28] Sun Feng,Li Xin,Boetcher S K S,et al.Inhomogeneous behavior of supercritical hydrocarbon fuel flow in a regenerative cooling channel for a scramjet engine[J].Aerospace Science and Technology,2021,117:106901.

- [29] Jiao Si, Li Sufen, Pu Hang, et al. Investigation of pyrolysis effect on convective heat transfer characteristics of supercritical aviation kerosene[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 171: 55–68.
- [30] Zhang Tianhao, Zhou Hao, Chen Yu, et al. Investigations on the thermal cracking and pyrolysis mechanism of China No. 3 aviation kerosene under supercritical conditions[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2018, 36(17): 1396–1404.
- [31] Yang Chengang, Quan Zongjie, Chen Ting, et al. Pyrolysis and heat transfer characteristics of *n*-decane at different mass flow rate[J]. *Chemical Research and Application*, 2018, 30(9): 1463–1468. [杨陈罡, 全宗杰, 陈廷, 等. 不同质量流量下正癸烷的裂解换热特性[J]. *化学研究与应用*, 2018, 30(9): 1463–1468.]
- [32] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3–17.
- [33] Jin Baitang, Jing Kai, Liu Jie, et al. Pyrolysis and coking of endothermic hydrocarbon fuel in regenerative cooling channel under different pressures[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, 125: 117–126.

Heat Transfer Characteristics of *n*-Decane During Pyrolysis in a Rectangular Tube

LEI Zhiliang^{1,2}, BAO Zewei^{3*}

(1. Civil Aircraft Science And Safety Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618307, China;

2. College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618307, China;

3. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The cracking heat transfer process of hydrocarbon fuel in the cooling channel of the combustion chamber wall is a key issue in engine regenerative cooling technology. Currently, there is limited experimental research on the coupling mechanism of *n*-decane cracking and heat transfer under supercritical pressure in rectangular tubes. This study constructs an experimental apparatus for the heat transfer of *n*-decane pyrolysis at supercritical pressure. During the experiment, the *n*-decane in the SS304 stainless steel tube is heated to the desired outlet temperature through two stages of alternating current heating. The mass flow rate at the inlet varies by adjusting the setting of the constant flow pump. Different system pressures inside the heating tube are achieved by adjusting the back pressure valve. First, the effects of flow rate, temperature, and operating pressure on the heat transfer characteristics of *n*-decane cracking in a rectangular tube are investigated. Second, the sensitivity analysis method is applied to evaluate the degree of influence of flow rate and operating pressure on the conversion rate and gas production rate. The research results indicated that the gas yield and conversion of *n*-decane decrease with an increase in mass flow rate at the same outlet temperature. When the outlet temperature ranges from 823 to 923 K, the gas yield and conversion initially increase slowly, then increase significantly, and finally exhibit a reduced rate of increase. At the same outlet temperature, the gas yield and conversion of *n*-decane increase with rising pressure. When the outlet temperature is approximately 873 K, and the pressure increases from 3 to 4 MPa, the gas yield and conversion rise from 21% to 27% and from 38% to 45%, respectively. The sensitivity analysis showed that the system pressure has a positive impact on gas yield and conversion, whereas the mass flow rate has a negative impact on gas yield and conversion. These research findings provide theoretical and data support for the design of rectangular cooling channels.

Key words: *n*-decane; pyrolysis reaction; heat transfer; rectangular tube; sensitivity analysis

(编辑 陈雪)

引用格式: Lei Zhiliang, Bao Zewei. Heat transfer characteristics of *n*-decane during pyrolysis in a rectangular tube[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 342–349. [雷志良, 鲍泽威. 矩形管内正癸烷的裂解传热特性[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 342–349.]