

# 吸热型碳氢燃料再生冷却性能评估方法

刘朝晖<sup>1</sup>, 宋晨阳<sup>1</sup>, 陈 强<sup>1</sup>, 封 凡<sup>1</sup>, 赵书军<sup>2</sup>, 胡申林<sup>2</sup>, 毕勤成<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 中国航天科工集团三十一研究所 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 北京 100074)

**摘 要:**吸热型碳氢燃料作为吸气式高超声速飞行器的再生冷却剂, 冷却剂出口温度可达到 750 ℃ 以上。碳氢燃料的冷却能力和抗结焦特性指标, 是再生冷却剂的关键参数。在工程应用参数范围内, 建立了吸热型碳氢燃料再生冷却性能综合评估体系, 实现燃料热沉、结焦和流动传热性能的综合评估。燃料热沉采用热平衡法测量。作为参考: 燃料温度 600 ℃, 热沉约 2.0 MJ/kg; 燃料温度 750 ℃, 热沉约 3.5 MJ/kg。结焦采用层流流动阻力法进行定量测量, 应用泊肃叶定律计算碳氢燃料结焦前后通道的当量内径, 从而得到通道内结焦层的平均厚度。流动换热性能的评估方法是比较相同出口流体温度条件下不同燃料壁面温度沿轴向的分布趋势。以上吸热型碳氢燃料评估方法的建立, 为研制吸热型碳氢燃料提供了有效的初步筛选途径。

**关键词:**吸热型碳氢燃料; 再生冷却; 热沉; 结焦; 流动换热

**中图分类号:**V231.1   **文献标识码:**A   **文章编号:**1672-9374(2020)02-0015-06

## Evaluation methods on regenerative cooling performance for endothermic hydrocarbon fuel

LIU Zhaohui<sup>1</sup>, SONG Chenyang<sup>1</sup>, CHEN Qiang<sup>1</sup>, FENG Fan<sup>1</sup>,

ZHAO Shujun<sup>2</sup>, HU Shenlin<sup>2</sup>, BI Qincheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Science and Technology on Scramjet Laboratory, The 31st Research Institute of CASIC, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The endothermic hydrocarbon fuel as the coolant in the airbreathing hypersonic vehicles, its working temperature could be up to 750 ℃. The effective cooling capacity and coking characteristics of hydrocarbon fuel at high temperature conditions are crucial for the regenerative cooling technology. An experimental evaluation system for the regenerative cooling performance of endothermic hydrocarbon fuel was constructed to realize the measurement and evaluation of heat sink, coking characteristics and heat transfer characteristics. The heat sink was measured by the thermal balance method. Basically, the heat sink could be 2.0 MJ/kg for fuel at temperature of 600 ℃ and 3.5 MJ/kg at 750 ℃. Coking propensity was measured by hydraulic resistance method at laminar conditions. The equivalent inner diameter of the test

收稿日期:2019-12-05;修回日期:2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51776167)

作者简介:刘朝晖(1985—),男,博士,副教授,研究领域为飞行器再生冷却技术和(吸热型)碳氢燃料相关应用

tube before and after coking test could be obtained by the poiseuille's law. Then the average coking thickness could be obtained from the inner diameter before and after coking test. Heat transfer characteristics were evaluated by comparing the wall temperature behavior at the same outlet fluid temperature for different fuels. The above experimental evaluation methods provide an effective evaluation mean for the selection and development of endothermic hydrocarbon fuel.

**Keywords:** endothermic hydrocarbon fuel; regenerative cooling; heat sink; coking; heat transfer

## 0 引言

近年来,超燃冲压发动机技术<sup>[1-4]</sup>在国内外得到大力发展。吸气式高超声速飞行器的热防护及热管理问题,是制约其发展的瓶颈问题<sup>[5-7]</sup>。“吸热型碳氢燃料”的概念是 1971 年提出<sup>[8]</sup>,用来描述通过高温裂解吸收热量,对发动机表面或者燃烧室壁面进行再生冷却的碳氢燃料。再生冷却过程中,吸热型碳氢燃料流经发动机壁面小槽道,温度升高或发生吸热裂解反应,带走发动机的多余热量,实现发动机的热防护<sup>[9]</sup>。对于 6 Ma 以上的超声速燃烧冲压发动机,近壁层的燃气温度可高达 2 727 °C 以上<sup>[10-11]</sup>。再生冷却过程,燃料作为冷却剂被加热,可能经历(拟)液态、(拟)气态以及高温裂解,最高温度可达约 750 °C<sup>[12]</sup>。在不发生高温裂解的条件下,作为冷却剂的碳氢燃料 JP-900 最高工作温度约 482 °C<sup>[13]</sup>,远低于高超声速飞行器再生冷却通道的出口燃料温度。

热沉和抗结焦性能是吸热型碳氢燃料的 2 个关键指标。8 Ma 的高超声速飞行器,要求燃料热沉达到 3.5 MJ/kg。此时燃料温度达到约 750 °C。碳氢燃料高温裂解产生大量化学热沉,但同时伴随着结焦的发生<sup>[14-17]</sup>。结焦在微小冷却通道内产生,严重影响飞行器的安全:一方面,结焦减小流道流通面积,增加流阻,甚至堵塞流道使系统失效;另一方面,结焦相当于一层热阻,弱化甚至恶化燃料与冷却通道之间的流动换热。因为结焦的存在以及碳氢燃料在并联通道中的流量分配不均等问题<sup>[18]</sup>,使得碳氢燃料的热沉利用受到限制。为充分利用碳氢燃料的热沉<sup>[19]</sup>,优化再生冷却通道结构设计,近年来吸热型碳氢燃料的流动换热特性<sup>[20-22]</sup>、结焦特性<sup>[14-17]</sup>和高温高压热物性<sup>[23-25]</sup>得到广泛研究,但几

乎不涉及针对燃料的热沉、结焦和换热性能进行的吸热型碳氢燃料再生冷却性能综合评估和筛选方法研究。

在碳氢燃料研制过程中,燃料的抗结焦性能是否满足要求,燃料在再生冷却结构内是否产生了大量结焦,结焦何时产生以及结焦量的多少,是评估结焦特性的主要参数。如何评估燃料的抗结焦性能、燃料的冷却能力以及流动换热特性是吸热型碳氢燃料再生冷却性能评估要解决的问题。本文在总结碳氢燃料流动换热与结焦特性的基础上,建立了吸热型碳氢燃料热沉、结焦和传热性能的综合评价体系,为研制吸热型碳氢燃料提供筛选方法和途径。

## 1 实验系统

吸热型碳氢燃料的再生冷却性能评价实验系统如图 1 所示。详细的实验系统介绍请参考文献[14-15]。试验段采用高温合金管,内径 1.0 mm 或 2.0 mm,壁厚 0.5 mm。通道长度可根据测试热流密度大小以及电加热阻抗匹配而定。试验段均采用低电压大电流交流电加热,热流沿通道轴向和周向均匀分布。试验段内表面热流密度范围:0.5 ~ 5.0 MW/m<sup>2</sup>。

燃料供给采用小流量计量泵。燃料进入试验段之前,流经科里奥利力质量流量计进行流量测量,流量大小直接通过计量泵控制。在试验段进出口,采用铠装热电偶测量燃料的流体温度。在试验段壁面点焊热电偶测量通道沿程壁面温度。通道的出口压力及通道压差采用压力压差表测量。出口燃料经冷却后,进入背压阀调节压力,之后排出试验系统。所有测试数据经 IMP 数据采集系统进入工控机。

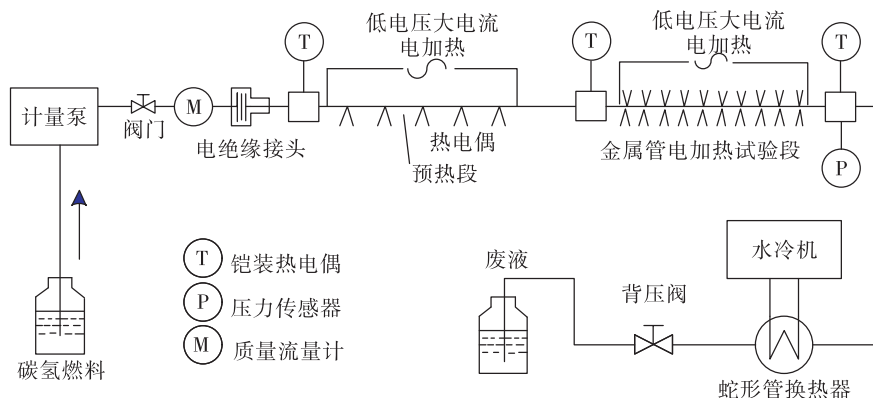


图1 吸热型碳氢燃料再生冷却性能评估实验系统

Fig. 1 The experimental system for regenerative cooling performance evaluation of endothermic fuels

## 2 评估方法

### 2.1 热沉测量原理

热沉采用热平衡法测量。根据热力学第一定律能量守恒原理,达到热平衡时,燃料吸收的热量等于加热量减去散热损失。燃料的热沉计算式为

$$Q_m = \frac{Q_{UI} - Q_{loss}}{m} \quad (1)$$

式中: $Q_m$ 为燃料某温度下的质量热沉, kJ/kg;  $Q_{UI}$ 为焦耳加热功率, W;  $Q_{loss}$ 为散热损失, W;  $m$ 为质量流量, g/s。加热功率和质量流量为测量值,散热损失在热沉测量前标定得到。散热损失的标定精度对燃料热沉测量的不确定度影响很大。散热损失的标定,同样采取热平衡法。散热损失分为管道热损失和电加热极板热损失两部分。通过干烧法测量加装保温层的管道散热损失,将散热损失拟合成管道壁面温度与环境温度之差的多项式函数。干烧法,即在不通燃料的情况下,对试验段进行加热,达到热平衡时,加热功率等于散热损失。通过热补偿法测量电加热极板热损失,在试验段后增加保温绝热段(具有一定散热损失),给绝热段加一定功率,使绝热段进口流体温度和出口流体温度相等。绝热段的极板热损失等于加热功率减去管道热损失,管道热损失采用干烧法得到的散热损失函数关系式计算得到。将极板热损失拟合成流体温度的函数。

不同冷却结构中以及不同试验工况下(尤其是不同质量流量,不同加热功率),散热损失占总加热功率的比重不同,约5%~20%。在不同冷却结构

热沉测试实验中,需针对特定冷却结构和试验工况进行具体的散热损失标定,以提高测量精度。

### 2.2 结焦评价的流动阻力法

碳氢燃料在小通道内的结焦考核主要采用流动阻力法<sup>[14]</sup>。流动阻力法是根据结焦前后测试通道的流动阻力变化,定量求取结焦测量通道内结焦层当量厚度的一种方法。流动阻力法的基本假设:结焦试验后,结焦层沿测试通道轴向和径向均匀分布。该假设带来一定误差,但是通过不同燃料的比较,能基本反映出结焦的严重程度<sup>[15]</sup>。

结焦实验前后,测试常温常压下不同质量流速,即不同雷诺数 $Re$ 数下的流动阻力。在相对粗糙度 $\Delta/D < 0.05$ 范围内,管内层流压降与粗糙度无关。应用定常不可压缩流体在水平直管内的充分发展流动阻力公式,可以得到管道的达西摩擦阻力特性曲线,即莫迪图(摩擦系数与 $Re$ 的关系图),计算式为:

$$\Delta p = \frac{128Lm\mu}{\rho\pi D^4} = \frac{1}{D^4} \frac{128Lm\mu}{\rho\pi} = \frac{1}{D^4} H \quad (2)$$

压差 $\Delta p$ 与管道内径 $D$ 的四次方成反比。该公式适用于相对粗糙度小于0.05的管子,即1 mm管子的绝对粗糙度小于50  $\mu\text{m}$ , 2 mm管子的绝对粗糙度小于100  $\mu\text{m}$ 。实验结果表明:结焦层的厚度大部分情况下在此范围内。考虑到绝对粗糙度小于结焦层厚度,因此该式能用于对结焦层厚度进行定量测量。且文献[10]比较了流阻法与显微镜可视化方法的测量结果,两者基本一致。文献[11]提供了考虑结焦不均匀的结焦层厚度修正方法。

结焦前后,层流条件下,结焦导致管径变化,流

通面积发生变化,使得流动阻力发生变化。如果试验后管径减小为原来的 1/2,压降为试验前的 16 倍。通过测量试验前后压差的变化,可以得到结焦试验前后试验通道内径的变化,从而得到结焦层的当量厚度。

### 2.3 单通道内的流动换热

在试验段壁面沿着试验段长度方向布置热电偶,测量外壁温。在流体温度相同的条件下,外壁温越高,传热性能越差。且根据实际工程应用条件,流体温度 750 °C 时,管道外壁温应控制在 1 000 °C 以内,如果管道外壁温大量超过 1 000 °C,其换热性能将不能满足要求。在进行单管换热试验时,要求燃料在整个实验过程中能稳定运行,若存在幅度较大的试验参数(流体温度,壁面温度,系统压力,试验段压差等)波动,燃料的性能将不利于在实际工程中的应用,燃料的有效热沉将受到影响。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 燃料的热沉曲线

2 种碳氢化合物(环己烷、正己烷)和 2 种吸热型碳氢燃料(EHF1、EHF2)在内径 2 mm 通道内的热沉测试结果如图 2 所示。测试压力为 5 MPa,质量流量为 1.0 g/s。4 种燃料出口温度在 600 °C 时的热沉值约 2.0 MJ/kg,出口温度为 750 °C 时的热沉值约 3.5 MJ/kg。燃料在 600 ~ 750 °C 温度区间发生剧烈化学反应,化学热沉急剧增加,总热沉也迅速上升。

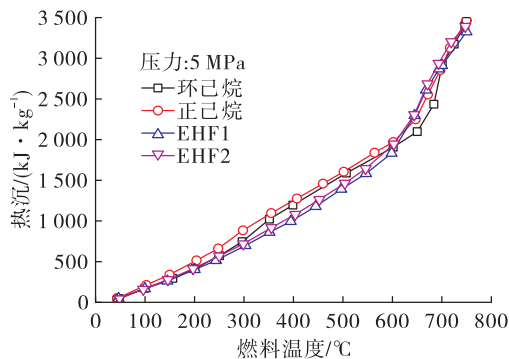


图 2 4 种燃料的单位质量热沉随温度变化趋势

Fig. 2 The heat sink results with the increasing fuel temperature for four different fuels

### 3.2 结焦的流阻效应分析方法

在常温常压下,对结焦实验前后的冷却通道在

不同流量下进行流阻测试,并绘制流阻曲线,如图 3 所示。其中横坐标  $H$  的计算方法如公式(2)所示,因为结焦试验前后流阻测试过程中,除了流体流量发生变化外,温度变化将导致流体的密度尤其是黏度发生较大变化,因此将质量流量、密度和黏度 3 个变量纳入 1 个参数  $H$  中,使得压差是  $H$  的比例函数,且多次测量拟合压差  $\Delta p$  (kPa) 与参数  $H$  (kPa · mm<sup>4</sup>) 直线的斜率  $\text{slop}[\Delta p - H]$  可直接用来计算结焦前后的管道内径

$$D = \frac{1}{\sqrt[4]{\text{slop}(\Delta p - H)}} \quad (3)$$

结焦前管道内径为 1.830 mm,结焦后管道内径为 1.663 mm,可推算结焦层厚度 83.5 μm。

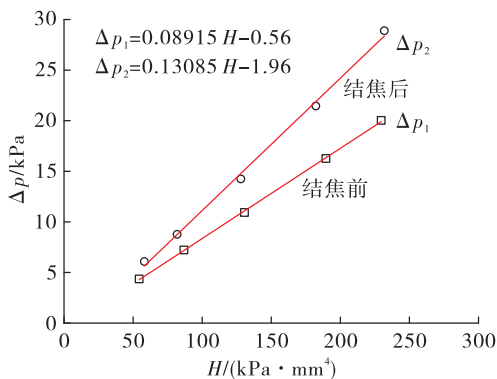


图 3 结焦前后冷却通道的流阻曲线

Fig. 3 The hydraulic resistance diagram of the test section before and after coking test

### 3.3 碳氢燃料流动换热结果的对比

图 4 为 8 种不同碳氢燃料(代号 A-H)的壁温分布趋势,试验段内径 1 mm,加热长度 410 mm,出口压力 3 MPa,燃料冷态流速约 2 m/s。燃料 G 在 550 °C 发生爆管,故无出口流体温度 750 °C 的壁温数据。从图中可以看出,不同燃料的换热性能存在显著差异。出口流体温度 300 °C,不同燃料对应的壁面温度在入口附近的差异最大,达到约 300 °C。在入口附近,流体温度较低,沿着轴向壁温很快上升到整个试验段的壁温最大值,在此位置,最小换热温差约 200 °C,而最大换热温差达到约 500 °C。出口流体温度 750 °C,不同燃料在进口第一个热电偶处的差别达到 250 °C。在出口附近,个别燃料的壁面

温度超过 1 000 ℃,换热温差达到 300 ℃,而换热好的燃料的壁面不到 900 ℃,换热温差不到 150 ℃,换热能力相差一倍。

料出口温度 750 ℃,壁温不超过 1 000 ℃。

#### 参考文献:

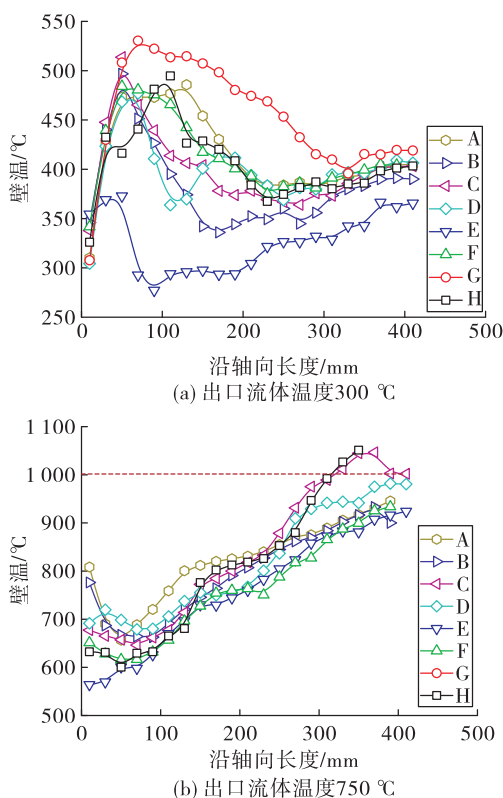


图4 8种不同碳氢燃料在测试段出口流体温度为 300 ℃和 750 ℃时的壁温分布趋势

Fig. 4 The wall temperature profiles for several hydrocarbons at outlet fluid temperatures of 300 ℃ and 750 ℃

## 4 结论

建立了吸热型碳氢燃料的再生冷却性能评价体系,对其热沉、结焦、和流动传热综合性能进行评估,并得到如下结论:

1)吸热型碳氢燃料热沉评估采用热平衡法。作为参考:流体温度 600 ℃,燃料热沉约 2.0 MJ/kg;流体温度 750 ℃,燃料热沉约 3.5 MJ/kg。

2)结焦对碳氢燃料在小通道内的流阻产生明显影响,层流条件下的流阻法可方便快捷地应用于碳氢燃料结焦严重程度的评估。

3)相同出口流体温度下的试验段壁温能很好地反映出不同燃料的换热性能差异。作为参考:燃

[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 W S. Review of scramjet engine development[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(1):29-32.

[2] 吴家彤. 6.5 马赫超燃冲压发动机的近期飞行试验结果[J]. 火箭推进, 2004, 30(2):48-53.

WU J T. Recent flight results of the Mach 6.5 scramjet engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2004, 30(2):48-53.

[3] 马杰, 梁俊龙. 液体冲压发动机技术发展趋势和方向[J]. 火箭推进, 2011, 37(4):12-17.

MA J, LIANG J L. Development trends and directions of liquid ramjet/scramjet technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(4):12-17.

[4] 杜泉, 王建设, 付秀文. 火箭冲压组合发动机部件缩尺关系理论分析初探[J]. 火箭推进, 2017, 43(6):70-75.

DU Q, WANG J S, FU X W. Theoretical analysis of scaling laws for components of rocket-based combined cycle engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(6):70-75.

[5] 沈海军, 程凯, 杨莉. 近空间飞行器[M]. 北京:航空工业出版社, 2012.

[6] 崔尔杰. 近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题[J]. 力学进展, 2009, 39(6):658-673.

[7] 闫杰, 于云峰, 凡永华. 吸气式高超声速飞行器控制技术[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2015.

[8] LANDER H, NIXON A C. Endothermic fuels for hypersonic vehicles[J]. Journal of Aircraft, 1971, 8(4):200-207.

[9] 符全军, 燕珂, 杜宗昱, 等. 吸热型碳氢燃料研究进展[J]. 火箭推进, 2005, 31(5):32-36.

FU Q J, YAN K, DU Z G, et al. Research progress of endothermic hydrocarbon fuels[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(5):32-36.

[10] 金烜, 沈赤兵, 吴先宇, 等. 超燃冲压发动机再生冷却技术研究进展[J]. 火箭推进, 2016, 42(5):66-73.

JIN X, SHEN C B, WU X Y, et al. Progress of regenerative cooling technology for scramjet[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(5):66-73.

[11] EDWARDS T. Liquid fuels and propellants for aerospace

- propulsion 1903-2003[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19 (6):1089-1107.
- [12] EDWARDS T, ANDERSON S. Results of high temperature JP-7 cracking assessment [C]//31st Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1993.
- [13] EDWARDS T. USAF supercritical hydrocarbon fuels interests [C]//31st Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1993.
- [14] LIU Z H, BI Q C, GUO Y, et al. Hydraulic and thermal effects of coke deposition during pyrolysis of hydrocarbon fuel in a mini-channel [J]. Energy & Fuels, 2012, 26 (6):3672-3679.
- [15] LIU Z H, BI Q C, FENG J T. Evaluation of heat sink capability and deposition propensity of supercritical endothermic fuels in a minichannel [J]. Fuel, 2015, 158:388-398.
- [16] LIZ Z, WANG H Y, JING K, et al. Kinetics and modeling of supercritical pyrolysis of endothermic hydrocarbon fuels in regenerative cooling channels [J]. Chemical Engineering Science, 2019, 207:202-214.
- [17] JIN B T, JING K, LIU J, 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.
- [18] LIU Z H, BI Q C, GUO Y, et al. Thermal induced static flow instability of hydrocarbon fuel in the regeneratively cooled structures of hypersonic vehicles [C]//18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Tours, France. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [19] JING T, HE G Q, QIN F, et al. An innovative self-adaptive method for improving heat sink utilization efficiency of hydrocarbon fuel in regenerative thermal protection system of combined cycle engine [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 178:369-382.
- [20] LIU Z H, BI Q C, GUO Y, et al. Convective heat transfer and pressure drop characteristics of near-critical-pressure hydrocarbon fuel in a minichannel [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2):1047-1054.
- [21] YAN J G, LIU S C, GUO P C, et al. Experimental investigation on convection heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel in a long mini tube [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 115:110100.
- [22] GONG K Y, CAO Y, FENG Y, et al. Influence of secondary reactions on heat transfer process during pyrolysis of hydrocarbon fuel under supercritical conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159:113912.
- [23] LIU Z H, TRUSLER J P M, BI Q C. Viscosities of liquid cyclohexane and decane at temperatures between (303 and 598) K and pressures up to 4 MPa measured in a dual-capillary viscometer [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2015, 60(8):2363-2370.
- [24] FENG S, BI Q C, PAN H, et al. Isobaric specific heat capacities of emulsified kerosene at high temperature and pressure [J]. Thermochimica Acta, 2018, 665:127-133.
- [25] YANG Z Q, BI Q C, GUO Y, et al. Design of a gamma densitometer for hydrocarbon fuel at high temperature and supercritical pressure [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2014, 59(11):3335-3343.