

# 吸热型碳氢燃料的定压比热测量研究

黄淑君<sup>1</sup> 郭亚军<sup>1</sup> 杨竹强<sup>2</sup> 刘朝晖<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院 陕西 西安 710055;

2. 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)

**摘要:** 针对亚临界及超临界压力下吸热型碳氢燃料的定压比热进行了在线测量研究。基于能量守恒原理,设计了一套定压比热测量装置,并对测试装置的几何尺寸和结构进行了优化。在用去离子水和环己烷对测试装置进行标定的基础上,对吸热型碳氢燃料压力在 2.0~5.0 MPa、温度在 333~903 K 范围内的定压比热进行了测量,获得了不同压力下比热随温度变化的曲线。试验结果表明:定压比热在低温区随温度平稳增加,在拟临界、临界温度时达到第一个峰值;在高温区吸热型化学反应发生后比热值随温度的增加不断增大。而定压比热在临界、拟临界温度区的峰值随压力的增加逐渐减小,但在高温化学反应区比热随压力的增加而增大。

**关键词:** 定压比热; 碳氢燃料; 超临界压力

中图分类号: TK311 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.001

## 引言

高超声速飞行器是当今航空航天领域发展研究的热点,在高超声速飞行过程中,高速气流给飞行器结构带来显著的气动热载荷,此时燃烧室温度超过 3 000 K,这超出材料自身的承受能力,为使燃烧室温度低于材料耐受温度,需对飞行器表面进行冷却、换热强化。为此,采用吸热型碳氢燃料作为飞行器的推进剂和冷却剂应用于热防护技术的再生主动冷却循环中,并对其流动及换热特性进行基础性研究时燃料的比热是必不可少的,因为发热量、传热特性等相关参数都要通过比热来计算。

比热的测量方法有许多,主要有冰卡计测定仪法、绝热量热法<sup>[1]</sup>、脉冲法和 DSC(差示扫描量热法)<sup>[2-3]</sup>。对象主要为纯净物及两组分混合物,研究参数多集中在低温低压范围。此外,研究学者还

采用静态实验法对多种碳氢燃料进行测量<sup>[4-7]</sup>。

吸热型碳氢燃料因化学组分复杂,工作条件苛刻,化学反应与流动过程相关等原因,其物性测试工作需在高温高压的条件下实现在线测量。本研究采用定压稳定流动法实现对碳氢燃料不同压力、不同温度条件下定压比热的在线测量。在测量数据之前,对测试装置进行了优化处理,并用已知物对测试系统进行了标定,保证了测量数据的可靠性和准确性。

## 1 实验装置及原理

### 1.1 实验系统

本实验是在碳氢燃料的物性实验平台(如图 1 所示)上完成的。实验系统由 5 个子系统组成,分别是动力系统、低电压大电流加热系统、测试段加热系统、数据采集系统和冷却系统。碳氢燃料由原油桶流经恒流泵(依利特 P500+ 精度为 0.3%)达到一定流速和压力,流入质量流量计(SIEMENS MASS 6000 精度 0.1%)实时监控,后经电加热管加热到设定温度,最终流入比热测试段。待测试完毕后,流体经冷凝器冷却流入回收桶内。测试过程中,压力变送器测量测试段压力,并由背压阀实现测试段压力调节;预热段、测试段加热采用低电压大电流的交流电加热方式,并采用独立的变压、调压器进行加热控制,最大加热功率分别为 10 KW 和 4 KW。预热段和测试段管壁外包装保温棉,防止热损失。试验中的各温度、压力、压差、流量、电压、电流等数据通过 IMP3595 数据采集系统获得。

收稿日期: 2014-10-31; 修订日期: 2014-11-24

基金项目: 青年科学基金(21306147)

作者简介: 黄淑君(1988-),女,湖北襄阳人,西安建筑科技大学硕士研究生。

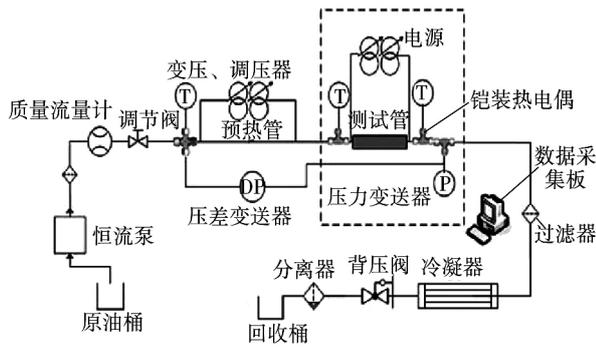


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the experimental system

比热测试装置结构如图 2 所示,图中测试管为  $\Phi 3 \times 0.5$  mm 的不锈钢管,流体进出口温度由  $\Phi 1.5$  mm 的 K 型铠装热电偶测量,将进出口流体温度的平均值作为所测流体的定性温度,并在测试管的外壁上点焊 5 个热电偶用来监测壁温。保温罐用于测试管的保温绝热,由铁皮、加热丝、陶瓷环构成一真空腔,并在保温罐外覆盖一层保温棉对其进一步保温。温度控制器用于保持保温罐的温度,当罐内温度低于设定温度时,调节变压器对保温罐进行加热,当罐内温度接近设定温度,停止加热。

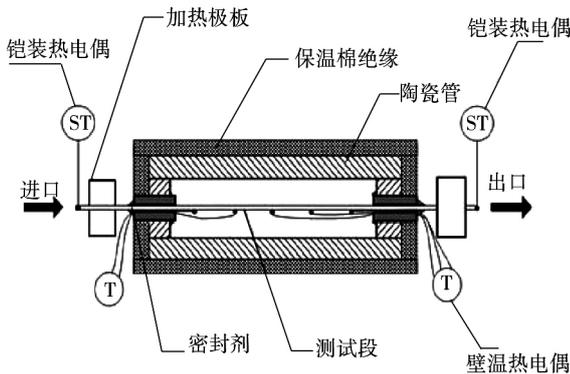


图 2 测试段示意图及保温罐结构

Fig. 2 The schematic diagram of the test section and tank insulation structure

为减少热量的损失,测试装置及实验依导热、对流和辐射 3 种方式进行设计:(1) 增加加热长度,减小温度梯度,减少导热;(2) 保温罐空腔密封,减少了壁面与空气的对流换热;(3) 对保温罐进行加热

时,管壁的温度与空腔内空气的温度保持一致,最大程度减少管壁对周围的热辐射换热。

### 1.2 实验系统的优化

在整个实验系统中,测试装置的几何尺寸和结构的选取必须优化设计。包括预热段长度、测试段加热长度、进出口温差的控制等。

在选取预热段长度时,若预热段长度过短,加热时会造成热流密度、温度梯度较大,出现过冷沸腾现象。过冷沸腾可能会使管内壁汽化处管壁超温,出现热变形。增大预热段的长度,可以减小热流密度,避免出现过冷沸腾现象。经实验验证,选取预热段长度为 105 mm。

测试段长度为 380 mm,测试段加热长度设计为 750 mm,使得  $l/d = 250$ ,其轴向温度梯度非常低,并且测试区管截面导热的面积和管壁面积相比,可忽略不计。故可以视为一维稳态导热来处理。这样,使进出口温度梯度较小,对减少热损失有一定效果。

试验中采用二次加热的方式保证进出口温差保持在 4-5 K:

$$Q_{\text{吸收}2} - Q_{\text{吸收}1} = Q_{\text{全部}2} - Q_{\text{全部}1} - Q_{\text{损耗}2} + Q_{\text{损耗}1} \quad (1)$$

### 1.3 实验原理

质量为  $m$  的工质吸收了热量  $Q$  后,温度由  $T_1$  升高到  $T_2$ ,根据比热的定义式,可以表示为:

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} = \frac{P}{G(T_2 - T_1)} = \frac{UI}{G(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

式中:  $U$ 、 $I$ —加热电压 V、电流 A;  $G$ —质量流量 kg/s;  $\Delta T$ —工质的进出口温差  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_1$ 、 $T_2$ —工质的进口和出口的温度。当工质的进出口温差较小时,比热值可以近似看作  $T_1 + 1/2(T_2 - T_1)$  处的比热值。加热器的加热功率并非全部由工质吸收,还有一部分热量通过导热、对流和辐射的方式损失了。

$$Q_{\text{吸收}} = Q_{\text{全部}} - Q_{\text{损耗}} \quad (3)$$

采用二次加热等方法,得:

$$C_p = \frac{UI - UI'}{[(T_2' - T_1') - (T_2 - T_1)] \times G} \quad (4)$$

式中:带上标“'”的物理量为测试段第一次加热值,未带上标“'”的物理量为测试段第二次加热值。

### 1.4 不确定度的计算

本实验的误差按物理量分为:温度误差,质量流

量误差, 压力误差, 电压、电流误差。参照各个物理量的误差和精度标准对其进行不确定度的计算。

### (1) 温度不确定度

本实验采用镍铬 - 镍硅 K 型铠装热电偶来测量实验段流体温度, 其误差为测量值的 0.4%, 测温范围是 0 - 1 073 K。其中, 实验中的最高温度为 903 K, 最低温度为 333 K, 则

$$\frac{\delta_T}{T} = \frac{0.4\% \times 903}{333} = 1.1\%$$

因此, 实验中温度的相对不确定度 1.1%。

### (2) 质量流量不确定度

本实验采用西门子的 MASS6000 测量仪器测量, 其精度为  $\pm 0.1\%$ 。则实验中质量流量的相对不确定度为 0.1%

### (3) 压力不确定度

本实验的压力变送器的量程为 0 - 13.8 MPa, 精度为 0.08%, IMP 板的精度为 0.02%, 实验中最小压力达到 2 MPa, 则

$$\frac{\delta_P}{P} = \frac{13.8}{2} \sqrt{(0.00075)^2 + (0.0002)^2} =$$

0.54%

因此, 实验中压力的相对不确定度 0.54%。

### (4) 电流不确定度

电流表量程为 0 - 50 A, 电流传感器精度为 0.2%, 最小电流为 15 A, 电流互感器的精度为 0.2%, 则

$$\frac{\delta_I}{I} = \frac{50}{15} \sqrt{(0.002)^2 + (0.002)^2} = 0.9\%$$

因此, 实验中电流的相对不确定度 0.9%。

### (5) 电压不确定度

电压表量程为 0 - 20 V, 电压变送器精度为 0.2%, 最小电压为 1 V, 则

$$\frac{\delta_U}{U} = \frac{0.2\% \times 20}{1} = 4\%$$

实验中电压的相对不确定度为 4%。

由此可得, 实验各个参数的不确定度全部在实验要求的范围之内, 完全满足实验要求。

定压比热的相对不确定度为:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{C_p}}{C_p} &= \sqrt{(1.1\%)^2 + (0.1\%)^2 + (0.9\%)^2 + (4\%)^2} \\ &= 4.2\% \end{aligned}$$

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 纯净物标定结果

为了验证测试系统的准确性和可靠性, 本实验选取去离子水和环己烷两种物质对试验系统进行了标定, 试验结果与 NIST(美国国家标准及技术研究所)的数值进行了对比。

去离子水的最大绝对误差为 3.31%, 平均绝对误差为 1.66%; 环己烷的最大绝对误差为 5.84%, 平均绝对误差为 1.78%。

从结果可以看出, 实验结果与理论值吻合度较好, 证明本比热测试试验台有较好的可靠性和精确度。

### 2.2 测量结果与分析

本研究给出了吸热型碳氢燃料 A 和 B 在亚临界压力(2.0 MPa)和超临界压力(3.5、5.0 MPa)下, 温度 333 - 903 K 的比热测试数据及温度 - 比热曲线图, 如图 3、4 所示。

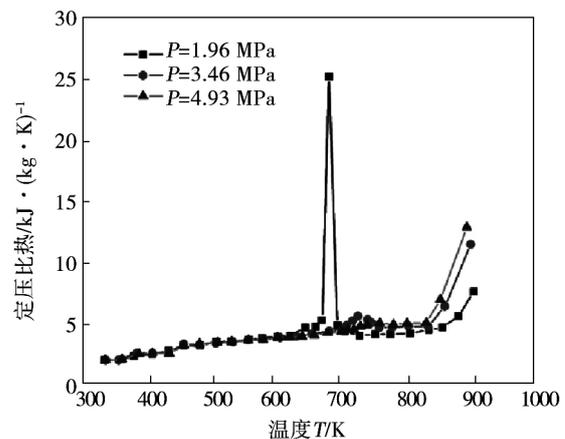


图 3 碳氢燃料 A 不同压力下比热随温度变化曲线

Fig. 3 The curve of isobaric specific heat capacity A of hydrocarbon fuel changing with temperatures at various pressures

从图 3、图 4 中可以看出, 两种碳氢燃料有相似的变化趋势。在亚临界和超临界压力下, 碳氢燃料的定压比热随温度呈非单调趋势增加, 有两次明显增大趋势。在 333 - 593 K 低温区域, 碳氢燃料的比热在恒定压力下, 随温度的升高而增加, 压力基本不

会影响碳氢燃料的比热,这表明在此区域比热主要受流体温度影响;当温度继续升高到  $T/T_{p,c} = 0.96 - 0.98$ ,工质的物性发生剧烈且复杂的变化,比热随温度升高而飞速增加,温度达到最大值  $T_{p,c}$  后急剧下降;随着温度的继续升高,比热按照与低温区类似的趋势平稳增加。当流体温度上升到 853 K,碳氢燃料的吸热型化学反应开始变得剧烈,产气率也明显增加,此时比热也显著增加。这种趋势与超临界压力煤油传热特性的研究一致<sup>[8]</sup>。

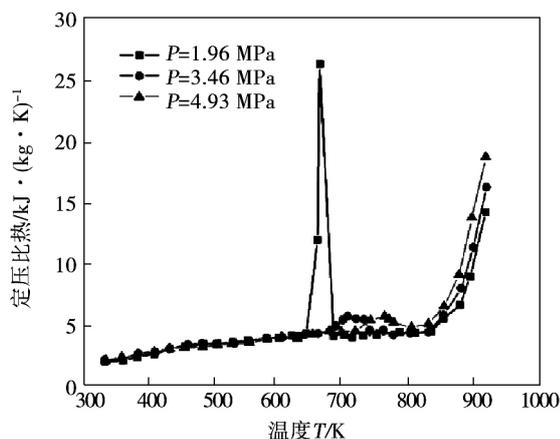


图 4 碳氢燃料 B 不同压力下比热随温度变化曲线

Fig. 4 The curve of isobaric specific heat capacity B of hydrocarbon fuel changing with temperatures at various pressures

在低温区域,比热并不随压力的增加有任何增减,说明压力对比热基本没有影响;当温度继续升高,碳氢燃料比热达到峰值。在 2.0 MPa 的亚临界压力下,碳氢燃料 A 和 B 比热峰值对应的拟临界温度分别为 679.7 和 661.9 K;在 3.5 MPa 的超临界压力下,比热峰值对应的拟临界温度分别为 724.6 和 705.4 K;而在 5.0 MPa 超临界压力下,拟临界温度在图中并不易观察出,从上述数据可以看出,拟临界温度随着压力的增加而上升,且上升趋势逐渐减弱;亚临界压力下大比热区比热增加的十分显著,而在超临界压力下(3.5、5.0 MPa)比热峰值并不是很明显,并且在 5 MPa 压力下比热峰值几近消失,定压比热在拟临界、临界温度区的峰值随压力的增加而减小;在高温区,当碳氢燃料的吸热型化学反应变得剧烈时,定压比热随着压力的增加而增大。

### 3 结 论

本研究以吸热型碳氢燃料为对象,设计了一套定压比热测量装置,用去离子水和环己烷验证了测量系统的精确性,对压力 2.0 - 5.0 MPa,温度 333 - 903 K 范围内的两种碳氢燃料的定压比热进行了在线测量,并得到以下结论:

(1) 不同的碳氢燃料的定压比热有相似的变化趋势。在低温区随温度增大平稳增加,在拟临界、临界温度达到第一个峰值,在高温区吸热型化学反应后随温度增加而增加。

(2) 定压比热在拟临界、临界温度区的峰值随压力的增加而减小,亚临界压力下的峰值十分明显,而在超临界压力下并不明显。

### 参考文献:

- [1] Losada-Perez P, et al. Specific heat capacity of nitrobenzene-tetradecane near the liquid-liquid critical point [J]. International Journal of Thermophysics. 2010, 31(4-5): 710-716.
- [2] Kousksou TJ, A. Zeraoui, Y. Use of multiple heating rates DSC to determine the specific heat capacity [J]. High Temperatures - High Pressures. 2010, 39(2): 165-179.
- [3] 胡玉华, 杜伟, 汪梅影, 等. 差示扫描量热仪(DSC)测定液体比热[J]. 润滑油与燃料. 2013(01): 33-36. HU Yu-hua, DU Wei, WANG Mei-ying, et al. DSC (differential scanning calorimeter) determination of liquid specific heat [J]. Lubricating oil and fuel Material. 2013(01): 33-36.
- [4] Huber ML, et al. Preliminary surrogate mixture models for the thermophysical properties of rocket propellants rp-1 and rp-2 [J]. Energy and Fuels. 2009, 23(6): 3083-8.
- [5] Deng HW, Zhu K. Isobaric specific heat capacity measurement for kerosene RP-3 in the near-critical and supercritical regions [J]. Journal of Chemical & Engineering Data. 2012, 57(2): 263-268.
- [6] Huang HS, Louis J. Sobel, David R. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2004, 126(2): 284-293.
- [7] Bruno TJ, et al. Thermochemical and thermophysical properties of JP-10. [J]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2006.
- [8] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 高热流条件下超临界压力煤油流过小直径管的传热特性[J]. 化工学报. 2002(02): 134-138. HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan, LUO Yu-shan, et al. High heat flux under the condition of supercritical pressure kerosene through the heat transfer characteristics of small diameter tube [J]. Journal of chemical industry. 2002(02): 134-138.

(陈 滨 编辑)

吸热型碳氢燃料的定压比热测量研究 = **Study of the Measurement of the Specific Heat Capacity of a Heat Absorption Type Hydrocarbon Fuel at a Constant Pressure** [刊 汉] HUANG Shu-jun , GUO Ya-jun ( College of Environment and Municipal Engineering , Xi'an University of Architectural Science and Technology , Xi'an , China , Post Code: 710055) , YANG Zhu-qiang , LIU Zhao-hui , BI Qin-cheng ( National Key Laboratory on Multi-phase Flow in Power Engineering , Xi'an Jiaotong University , Beijing , China , Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -833 -836

At subcritical and supercritical pressures ,an on-line measurement was performed of the specific heat capacity at a constant pressure of a heat absorption type hydrocarbon fuel. Based on the energy conservation theory ,a set of device for measuring the specific heat capacity at a constant pressure was designed and the geometrical dimensions and structures of the device under discussion were optimized. On the basis of the device in question being calibrated by using deionized water and cyclohexane ,when the pressure ranges from 2.0 to 5.0 MPa and the temperature from 333 K to 903 K ,the specific heat capacities of the heat absorption type hydrocarbon fuel were measured and the curves showing changes of the specific heat capacity with temperature were obtained. The test results show that in the low temperature zone ,the specific heat capacity at a constant pressure will smoothly and stably increase with an increase of the temperature and reach the peak values at the pseudocritical and critical temperature respectively. After a heat absorption type chemical reaction has taken place in the high temperature zone ,the specific heat value will ceaselessly increase with an increase of the temperature while the peak value of the specific heat capacity at a constant pressure in the critical and pseudocritical zone will gradually decrease with an increase in the pressure. However ,the peak value in the critical and pseudocritical temperature zone will decrease with an increase of the pressure and the specific heat capacity in the high temperature chemical reaction zone will increase with an increase of the pressure.

**Key words:** specific heat at a constant pressure ,hydrocarbon fuel ,supercritical pressure

模拟超临界水环境下煤气化所用换热器的研究 = **Numerical Simulation Study of a Heat Exchanger for Use in the Supercritical Water Coal Gasification Process** [刊 汉] WANG Hong-na , SU Xiang-chao ( China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co. Ltd. , Tianjin , China , Post Code: 300074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -837 -841

A three-dimensional model for shell-and-tube heat exchangers for use in the coal gasification process in the environ-