

分类号 TK16

学 号 1503811331

# 西安建筑科技大学

# 学 位 论 文

超临界条件下乳化煤油

比定压热容测量实验研究

作者 贺宇锋

指导教师姓名 郭亚军 副教授

申请学位级别 硕士 专业名称 建筑与土木工程

论文提交日期 2018.05 论文答辩日期 2018.06

学位授予单位 西安建筑科技大学

答辩委员会主席 刘艳华

评 阅 人 刘艳华

南晓红

# 声 明

本人郑重声明我所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中已经标明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或其他人在其它单位已申请学位或为其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的所有贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：贺宇锋

日期：2018.6.11

## 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安建筑科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或者其它复制手段保存学位论文。

(保密的论文在论文解密后应遵守此规定)

论文作者签名：贺宇锋

指导教师签名：郭理

日期：2018.6.11

本人授权中国学术期刊(光盘版)杂志社、中国科学技术信息研究所等单位将本学位论文收录到有关“学位论文数据库”之中，并通过网络向社会公众提供信息服务。

因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，同意在一年/两年/三年以后，在网络上全文发布。(此声明处不勾选的，默认为即时公开)

论文作者签名：贺宇锋

指导教师签名：郭理

日期：2018.6.11

注：请将此页附在论文首页。

## 超临界条件下乳化煤油比定压热容测量实验研究

专    业：建筑与土木工程

硕    士：贺宇锋

指导教师：郭亚军 副教授

### 摘要

高超声速飞行器及其发动机的热管理问题目前已成为飞行器及发动机研发过程中的一个关键性课题。飞行器的气动热载荷随飞行马赫数的提高急剧增大，发动机局部温度可达 4950K，远远超过现有可用材料的承受极限，因此飞行器的冷却问题显得愈发重要。

在目前提出的冷却方案中，再生主动冷却热防护是有效方法之一。实现再生主动冷却的基础需要揭示燃料的流动及换热的内在规律，定压比热作为重要的热物性参数是不可或缺的，其数据是计算其他物性参数的必要条件，同时对于提高煤油吸热性能和冷却设计具有一定的参考意义。为了准确测量高温高压下乳化煤油的比定压热容，本文基于能量守恒的量热计理论，搭建了一套流动型比定压热容在线测量系统。系统温度测量范围为 301K~980K，测量压力可达 10MPa，相对标准不确定度为 2.42%~4.2%。选取纯物质去离子水、正己烷、二氧化碳和质量比 1:1 的正辛烷-正庚烷混合流体进行比定压热容测量，实验结果与文献值进行比较，验证了试验系统的可靠性与准确度。

在此基础上，对含水质量分数为 10%、20%、30%、50% 的四种乳化煤油比定压热容进行测量，温度为 301K~880K，压力为 3MPa、4MPa、5MPa。实验结果与航空煤油 RP-3、碳氢燃料 EHF-01、纯水的比定压热容进行对比，并绘制出了各自在不同工况下的比热容变化曲线，同时分析了不同含水量乳化煤油定压比热随温度和压力的变化特性及含水量、压力、温度等对乳化煤油比定压热容的影响。该系统的搭建为进一步研究乳化碳氢燃料比定压热容创造了条件。

**关键词：**乳化煤油；超临界压力；比定压热容；在线测量

# Experimental Research on Isobaric Specific Heat Measurement of Emulsified Kerosene at Supercritical Pressure

Specialty: Architecture and Civil Engineering

Name: He Yufeng

Instructor: Guo Yajun Associate Professor

## ABSTRACT

The thermal management of hypersonic vehicles and their engines has become a key issue in the research and development of aircraft and engines. Cooling of the vehicle becomes more and more important because the aerodynamic heat load with the flight of Mach number increase sharply increased so that the engine of local temperature up to 4950K, which is far more than the limits of the available materials.

Regenerative active cooling is one of the effective methods in the present cooling scheme. Isobaric specific heat as the important thermophysical parameters is essential to implementation of internal rules based regeneration cooling needs to reveal fuel flow and heat, which is necessary data to calculate other physical parameters and has a certain reference value for improving the performance and design of kerosene endothermic cooling. A calorimeter based on energy conservation theory was constructed for on-line measurement of the isobaric specific heat capacity of emulsified kerosene at temperatures covering from 301 to 900K and pressures up to 10MPa. The standard uncertainty is identified as 2.42% to 4.2%. The deionized water, octane and the binary mixtures of n-octane and n-heptane with a mass ratio of 1:1 were measured for the calibration of the measurement system.

The isobaric specific heat capacity of emulsified kerosene with water content fraction of 10%、20%、30% and 50% were measured at the temperatures from 301 to 880K and the pressure of 3MPa、4MPa and 5MPa. The experimental results with RP-3 kerosene hydrocarbon fuel, EHF-01, pure water isobaric specific heat were compared, and draw their under different working conditions of the heat capacity curve, and analyzed the change characteristics of different water content of emulsified kerosene

specific heat with temperature and pressure and water content, pressure and temperature on emulsified kerosene the ratio of heat capacity at constant pressure. The construction of the system creates conditions for further study of the emulsified hydrocarbon fuel than the constant pressure heat capacity.

**Key words:** supercritical pressure; emulsified fuel; specific heat capacity; on-line measurement

## 主要符号表

$T$	流体温度, K
$P$	压力, MPa
$C_{p,exp}$	测量比热, kJ/(kg · K)
$C_{p,lit}$	理论比热, kJ/(kg · K)
$C_p$	实际比热, kJ/(kg · K)
$C_{p,(cal)}$	计算比热, kJ/(kg · K)
$m$	质量, g
$Q$	加热量, kJ
$P$	加热功率, kW
$P_0$	损失功率, kW
$q_m$	质量流量, g/min
$u_c$	合成不确定度
$U_c$	扩展不确定度
$U$	电压, V
$I$	电流, A
$PD$	偏差率
$AAD$	平均绝对误差
$MAD$	最大绝对误差

## 目录

1 绪论 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 国内外煤油燃料在高超声速飞行技术方面研究现状 .....	3
1.2.2 国内外比定压热容研究现状 .....	6
1.3 本文研究内容及实验步骤 .....	8
2 比定压热容测量原理与方法 .....	10
2.1 比热容实验测量方法 .....	10
2.1.1 绝热量热计法 .....	10
2.1.2 差热分析法 .....	11
2.1.3 差示扫描量热法 .....	12
2.1.4 热弛豫法 .....	13
2.1.5 脉冲加热法 .....	14
2.1.6 流动量热法 .....	14
2.2 流动型比定压热容测量原理 .....	15
2.3 本章小结 .....	16
3 流动型比定压热容实验系统的研制 .....	17
3.1 实验系统介绍 .....	17
3.2 量热器结构设计 .....	18
3.3 实验装置介绍 .....	19
3.3.1 恒流泵 .....	19
3.3.2 质量流量计 .....	20
3.3.3 加热装置 .....	21
3.3.4 水冷机 .....	21
3.3.5 压力、压差及温度的测量 .....	22
3.3.6 数据信号采集系统 .....	23
3.5 实验内容和方法 .....	24
3.5.1 系统装置的优化 .....	24
3.5.2 实验内容及步骤 .....	25

3.5.3 实验过程优化措施.....	26
3.5 系统不确定度分析 .....	26
3.5.1 实验误差的分析.....	26
3.5.2 减小误差的措施.....	27
3.5.3 实验结果的不确定度.....	27
3.6 本章小结 .....	30
4 实验数据处理及精度分析.....	31
4.1 实验原理 .....	31
4.2 试验系统可靠性标定 .....	32
4.2.1 去离子水比定压热容测量.....	33
4.2.2 正己烷比定压热容测量.....	34
4.2.3 二氧化碳比定压热容测量.....	34
4.2.4 二元混合流体比定压热容测量.....	35
4.3 乳化煤油比定压热容测量结果及分析 .....	36
4.3.1 含水量对比热容的影响.....	37
4.3.2 压力和温度对比热容的影响.....	38
4.4 乳化煤油与 RP-3 的比定压热容对比分析 .....	39
4.5 乳化煤油与碳氢燃料、纯水之间比定压热容分析 .....	40
4.6 本章小结 .....	41
5 结论与展望.....	43
5.1 本文工作总结 .....	43
5.2 工作展望 .....	44
致谢.....	45
参考文献.....	46
附录.....	52
研究生在读期间研究成果.....	58

# 1 绪论

## 1.1 研究背景与意义

近空间高超声速航空飞行器在实际工程中具有特殊意义的战略价值，目前已经成为了世界各国近期研究的课题<sup>[1,2]</sup>。高超声速技术在当今航空航天领域的发展具有重要的意义，不仅是一个国家综合实力的体现，也是一个国家在科学技术领域上领先地位的标志。高超声速航空飞行器的发展在国家军事与民航等方面上的作用是潜移默化的，不仅可以通过未来战争的作战模式的转变来影响国家军事作战方面的力量；也能够通过为航天运输提供全新的途径来带动社会进步及国民经济<sup>[3,4]</sup>。

在航空器高超声速运行过程中，马赫数将会影响航空器发动机的气动热载荷，且以二次方的关系增加，当马赫数很大时，未冷却的燃烧室局部壁温高达 3000K 左右，远远超过现有可用材料的耐温极限值<sup>[5-8]</sup>。当前航空飞行器及其发动机的冷却问题制约着近空间高超声速技术的发展，也是航空飞行器热管理问题发展过程中急需解决的核心难题<sup>[9]</sup>。

对于高超声速航空飞行器表面冷却降温的问题，几种解决热防护的方法<sup>[10,14]</sup>已经成为关注的热点，主要有传统气膜冷却、涂隔热层被动冷却和主动冷却；在冷却方案中，主动冷却因为成本低，而且具有冷却能力强、可抵抗高热流密度的长时间加热、可实现温度和热流的开环或闭环控制、设计灵活、可重复使用等优点成为目前采用最多的方法。在主动冷却技术中面临工质的选取问题，冷却工质一方面要比热容大，热沉大，能吸收大量热量，冷却效果好；另一方面不能增加飞行器的负载，影响它的提速。而飞行器如果采用自身携带的燃料作为制冷剂，就可以克服额外携带冷却工质多带来的问题。在这种情形下，人们提出了“再生冷却技术”。“再生冷却技术”是指飞行器自身携带的燃料在进入燃烧室前先通过布满微小槽道的燃烧室固壁，一方面作为冷却剂的燃料可以带走燃烧室内产生的热量，从而降低飞行器表面的局部温度；另一方面对燃料自身进行预热，提高量燃料的温度，促进燃料在燃烧室内的充分燃烧<sup>[15,16]</sup>。

吸热型碳氢燃料由于其高热值和高冷却能力成为近年来学者研究的热点<sup>[17,18]</sup>，吸热型碳氢燃料密度高、热容大，能带走大量的热量，冷却效果好，作为冷却剂可以很好满足飞行器的冷却要求。作为推进剂和冷却剂的吸热型碳氢燃料因其成

分和热力学状态变化复杂能够发生多种物理及化学反应吸收大量的热量，进而可以降低飞行器壁面的局部温度<sup>[19,20]</sup>。随着飞行速度的提升，燃烧室通常处在超高声速燃烧状态，同时燃料远远高于其临界压力。目前吸热型碳氢燃料作为制冷剂存在的问题是高温高压条件下会发生结焦反应从而产生碳，碳在内部附着方式与析碳量会对整个内部燃烧过程的换热带来巨大影响，引起换热过程的衰减并使得局部壁面温度急剧增高；而且析出的碳还会堵塞燃料和喷射器系统的一些细小管路，给飞行过程的安全性带来很大危害。然而吸热型碳氢燃料加入一定质量分数水能够明显的缓解燃料燃烧过程中的结焦析碳，尤其是在温度较高的条件下，会发生化学反应，效果尤其突出，因此超临界压力下乳化煤油燃料的相关研究工作已经成为新的研究方向<sup>[21]</sup>。

掺加一定质量分数水的乳化煤油作为制冷剂在一定程度上提高了航空燃料的冷却性能，但是目前针对乳化煤油燃料在超临界条件下的物性测量研究开展的不多。作为推进剂和冷却剂的乳化碳氢燃料其成分和热力学状态复杂，在飞行器及其发动机的冷却通道内处于高温高压的超临界状态，冷却换热过程具有高热流密度、大过热度、裂解或脱氢化学反应等特点，使其流动和换热过程具有很大的特殊性和复杂性。揭露并认识传热过程中与之关联因素的影响规律和相关潜在的作用原理，是实现高超声速飞行器发动机可携带乳化煤油类燃料可再生主动冷却的基础<sup>[7]</sup>。要从本质上认清乳化煤油燃料流动换热规律，则必须要获得乳化煤油燃料不同压力（特别是超临界压力）不同温度下的热物性参数。因此，乳化煤油燃料宽广的物性数据是开展研究工作的前提和保障。比热容作为重要的热物性参数在工程与应用科学中得到广泛的应用，其数值是计算其他物理量的必要条件，如密度、摩尔折射率等。由于理论计算和模拟精度发展水平的限制，加之飞行器及其发动机冷却过程的复杂多变，实验方法是获得苛刻条件下碳氢燃料热物理性质的主要选择。此外，乳化煤油燃料是新型燃料，对于其比热容测量的研究探讨，相关公开的文献记载很少，这就要求运用新方法、新设备、研制一套新的实验测量系统。为了精确地测量乳化煤油燃料在超临界压力下比热容值，本文采用绝热量热计法<sup>[22]</sup>，设计并搭建了一套适用于乳化煤油燃料高温高压的比热容在线测量实验系统，该系统具有较高的测量精度和可靠性，可实现严苛条件下多组分乳化煤油燃料比热容的在线测量。

鉴于以上分析，本论文是以高超声速飞行技术工程应用为目的，为研究超临

界压力下乳化煤油流动和换热提供基础性热物性数据。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国内外煤油燃料在高超声速飞行技术方面研究现状

1939年,世界上首架喷气式飞机试飞成功,之后将煤油作为喷气燃料的应用标志着“喷气时代”的开始。高超飞行器的热管理技术在20世纪后期得到全世界的广泛关注,Coulter<sup>[23]</sup>等人对高超声速飞行器的热管理技术的系统组成及相互关系进行了详细概述,着重对整个热管理流程进行了阐述。

1993年,美国空军以碳氢燃料在高速飞行器热防护应用技术为目的,对碳氢燃料在超临界条件下的特殊性质进行了研究,认为超临界燃料可满足高超飞行器冷却的需求,分别对超临界碳氢燃料的吸热能力、热稳定性及传热等方面进行了论述<sup>[24]</sup>。

2001年,Mourice等人<sup>[25]</sup>对美国空军不同阶段下所用喷气燃料的种类和燃料热沉、腐蚀及热稳定性等特性进行了回顾,包括燃料Jet-A、JP-4、JP-5、和JP-7等,同时将未来军事应用中所需燃料的化学物理特性及工作需求进行量概述。

为了在近空间超声速研究技术上保持核心竞争力,美国在1995年开始了以液态燃料做为推进剂的高超声速研发技术课题。2001年,Powell等人<sup>[18]</sup>将该项目的相关技术难题及发展现状进行了介绍,指出燃料的吸热冷却性能是飞行器热管理技术的关键。

2002年,Chen与Dang<sup>[26]</sup>测量了超临界压力下的JP-7航空煤油的换热特性与结焦性质,发现燃料的裂解可以改善换热的能力,同时超临界条件下燃料的吸热能力优于亚临界环境。

2004年,Sobel等人<sup>[27]</sup>模拟航空发动机的实际工作环境,研究了燃料在实际测试台上的超临界燃烧及排放过程,选取吸热型燃料JP-7和JP-8+100的热沉、反应生成物和转化过程进行了分析。针对高声速飞行器热管理冷却技术中的控制和测量研究,欧洲导弹集团与法国新奥尔良大学的多个实验室共同合作开展了COMPARER项目,目标通过实验和计算手段评价高声速飞行器燃料高温特性的技术参量。

2005年,Perkins RAM, Joseph W<sup>[28]</sup>采用绝热量热法对摩尔分数分别为69.75%、30.25%的R32-R125混合物及R125在温度为300-400K范围内、3-20MPa压力下

的定容比热进行了测量, 分析实验数据和描绘了单相与压缩两种气体的样本定压等容线, 然而 R125 的纯度相对较高, 温度的测量及体积波动的修正是实验测量误差的主要因素, 比热容的相对不确定度在液相时大约为 2%, 在气相时大约为 4%。

2007 年, Gascoin 等人<sup>[29]</sup>建立了超然冲压发动机主动热防护吸热型碳氢燃料一维瞬态计算模型, 包含了传热传质、流动机制和化学分解方程, 用于预测燃料在超临界稳态及瞬态条件下的流动、传热、化学反应及流动性质等参数的变化; 后来又用数值模拟了特定合成燃料在飞行条件下的高温分解过程, 指出了燃料比热、临界参数和化学特性等对于发动机冷却效率的影响。

2009 年, Outcalt 等人<sup>[30]</sup>实验测量了两种火箭推进燃料 RP-1、RP-2 的密度、声速和粘度热物性参数。他们利用振动管传感器测量了 0.083MPa-40MPa、270K-470K 范围内的燃料的密度以及大气压下 278.15K-353.15K 温度范围内的声速数据; 利用向心力型双毛细管粘度计测量大气压下 293.15K-373.15K 范围内的实验数据。

2010 年, 美国标准技术委员会 NISTIR 公布量燃料 JP-8 的热力学、输运性能及化学性能研究报告<sup>[31]</sup>, 热物性测量方面利用蒸馏的方法测量量 JP-8 等多种燃料的化学成分。

2011 年, DeWitt 等<sup>[32]</sup>对不同种类的碳氢燃料在超临界压力下关于热裂解反应和结焦析碳性能的影响进行了分析讨论, 指出合成的链烷烃类煤油具有较高的反应活性和裂解沉积速率, 在吸热反应过程中燃料中的硫成分会加剧碳颗粒的沉积。

2011 年, Abdulagatov, I.M. and N.D. Azizov<sup>[33]</sup>根据单调逐步递增的加热理论设计了一套比热容测量研究系统, 此系统的核心装置是由量热器(测温结构)、高温高压灭菌器和恒温器三部分构成, 量热计与恒温器保持同轴, 给恒温器一个固定加热功率使其温度单调增加, 始终控制差分热电偶的真空间隙的温差维持在 0 左右; 基于牛顿守恒第一定律, 压力相同情况下, 根据测量计算出加热速率及差分热电偶示数为 0 时的加热平均功率即可推导 RP-1 燃料的比热容, 文章中用绝热真空式量热器对火箭助推剂 RP-1 燃料在温度为 293-671K 区间内, 60MPa 的压力下比热容进行了研究分析, 最后将测量的比热值与根据代替混合模型模拟出来的计算值进行了比较, 测量数据与计算数据的平均绝对偏差为 0.81%。

1999 年, 陈听宽教授等人<sup>[34]</sup>完成了液态火箭发动机煤油在直径为 1.7mm 微

圆管内的传热实验, 获得换热性能曲线、临界热流密度和导热系数准则方程, 同时对煤油结焦性能进一步研究分析。

2005年, 侯凌云等人<sup>[35]</sup>对乳化煤油在超临界压力工况下传热特性随热负荷变化的规律以及析碳的影响进行了数值模拟研究, 结果表明乳化煤油降低壁温的效果更好, 同时具有减少析碳的作用。

2006年, 俞刚等人<sup>[36]</sup>用广义对应状态法则对国产航空煤油 RP-3 的热物理性质进行了分析计算并对该煤油的高声速燃烧特性进行了实验研究, 结论表明 RP-3 尚不能满足高超声速飞行器发动机的需要。

2008年, 周伟星等人<sup>[37]</sup>建立了煤油燃料换热实验台, 通过空载漏热验证试验, 来研究分析超临界条件下管内乳化煤油燃料结焦换热的性能, 实验最后得到结论为管内结焦与内壁温存在关系及结焦随时间变化的规律。

2010年, 徐国强等人<sup>[38]</sup>综述性阐述了超临界条件下航空燃料的结焦换热性能及机理, 在此基础上实验分析了测试压力对于 RP-3 燃料结焦析碳性能的作用。

2012年, 冉振华等人<sup>[39]</sup>对超临界条件下典型航空燃料 RP-3 在并联 U 型管中的流量及流速分布规律进行了分析, 讨论了工质温度、系统压力和不对称性加热热流密度等因素分别对流量分配性能的影响规律。

2012年, Deng, H.W, Zhu, K 等<sup>[40]</sup>设计了一个绝热真空量热装置, 航空煤油通过活塞泵升压流经质量流量计进行调控, 使实验段处在恒温环境中来减少实验段的热传导、空气对流和辐射热带来的热损失, 导热损失还可以通过覆盖在量热计表面的气凝胶材料来减少, 通过减少实验段进出口温差来减少对流损失, 在管子上覆盖辐射屏来减少辐射损失; 同时还对 RP-3 航空煤油在亚、超临界两个区域的比定压热容进行了测量, 温度和压力的范围分别为 292.1-823.9K, 2.40-5.98MPa, 最后结合焓值计算验证了实验所测比定压热容数据的准确性。

2013年, 龚先杰<sup>[41]</sup>针对高超声速飞行器的热管理问题提出吸热型乳化煤油燃料作为可燃制冷剂, 主要围绕其燃料模型化合物的吸热性能进行了研究, 自主设计了一套动态实验装置, 考察燃料的热稳定性及吸热性能。

2016年, 潘辉等人<sup>[42]</sup>对航空燃料 RP-3 在高温钛合金管内流动是热裂解结焦析碳过程及传热性能进行了测量分析, 通过分析碳附着量阐述了结焦对管内燃料对流换热性能的影响。

从目前已收集的文献可以发现, 全世界各国对高超声速航空飞行器的吸热型

燃料都展开了探索, 然而对于高超声速飞行器飞行热防护途径的寻找和对航空燃料应用于热防护方案的评估已经进入前期阶段。逐步开始对乳化碳氢燃料的具体研究内容展开深入的研究, 学者们正通过试实验和理论等方法寻找合适燃料, 获得更多的基础物性数据, 以工程应用为目的进行超临界压力下乳化煤油传热、流动规律及热物性方面的研究。

### 1.2.2 国内外比定压热容研究现状

1973 年, Bier 和 Ernst 等人建立了一个准确度高的闭式再循环高压流动型气体比定压热容实验平台<sup>[43]</sup>, 此后经过不断改进将测试范围提高到 298.15-673.15K, 压力可达 100MPa, 测量精度在 0.1-0.4%。

1989 年, Steele 等人<sup>[44]</sup>利用微分扫描量热计和高温高压容器测量了甲苯、四氢化萘和碳氢燃料 JP-10 的液态比定压热容和临界参数。

1991 年, Nakagawa 等人建立了高压液体比热容试验台, 测量温度 276-500K, 压力可达 15MPa, 测量了 HFC-134a、HCFC-123 等在内的多种液体的比定压热容<sup>[45,46]</sup>。

1992 年, Sandarusi JA 等人<sup>[47]</sup>建立了一套能同时测量流体比热容和焓值的流动型量热装置, 该装置的设计温度为 300-700K, 设计压力 0-30MPa, 测量精度 0.1%。采用该设计, 他们研究分析了许多纯物质与二元混合物的比定压热容。

1995 年, Kubota 等人基于流动型量热方法实验测量了温度 303-343K、最高压力 0.5MPa 的二氟甲烷气体的比定压热容<sup>[48]</sup>。

1997 年, Sharygin 等人利用流动型量热计测量了温度 302-623K, 压力 28MPa 的盐酸水溶液的比定压热容<sup>[49]</sup>。

2010 年, Bhuiyan 等人利用流动型微热量热计测量了温度 298.15K 甘氨酸与不同浓度三种类胺类混合液的比定压热容<sup>[50]</sup>。

2013 年, Miyazawa 等人利用流动型量热计测量量恒压 500kPa, 温度 265-348K 范围内液相乙醇的比定压热容, 包含可重复性在内的不确定度比例为 0.55-0.89%<sup>[51]</sup>。

1987 年, 时家增等人搭建了一套流动型气体比定压热容测量实验系统, 测试压力 1.1MPa, 测量精度为 1%<sup>[52]</sup>。

1995 年, 方文军等人建立一套流动型在线测量系统, 适用于中低压气体比定压热容测量, 测量精度 1%左右<sup>[53]</sup>。

1992年,赵冠春等人<sup>[54]</sup>设计搭建的高压气体比热容试验台测试温度280-370K,压力可达15MPa,测量的气态CO<sub>2</sub>、HCFC-22、HFC-152a的比定压热容的精度为0.5%。

1999年,赵小明等人<sup>[55,56]</sup>通过对前人装置的改进完善,解决了液体工质压力不稳以及混合成分不一致等问题,测量精度提高到0.6%。

2006年,范学军等人<sup>[35,36]</sup>选用对应状态法数值模拟了航空煤油RP-3的热物性,在温度333K-553K,压力0.25MPa-0.55MPa范围内分析比热、密度随温度的变化曲线。

2007-2010年,张立胜等人<sup>[57]</sup>陆续对量热器结构和监测控制做出改进,在此基础上完成了液相二甲醚和气相二氧化碳不同实验条件下的比定压热容的测量。

2010年,刘凤军等人<sup>[58]</sup>搭建了测量温度在303.15-348.1K,压力在0.2-0.4MPa的二氧化碳比定压热容的试验台,实验装置的测量精度为3.66%。

2013年,袁立公等人<sup>[59]</sup>建立了适用于测定流动型流体比定压热容的实验系统,测量了航空燃料RP-3在温度292.1-823.9K,压力2.04-5.98MPa范围内的比定压热容,测量装置的最大不确定度为2.11%。

2015年,黄淑君等人<sup>[60]</sup>采用流动量热法,对碳氢燃料在温度333K-903K,压力2.0MPa-5.0MPa范围内的比定压热容进行测量,系统最大相对不确定度为4.2%。

综上所述,对高超声速飞行器的燃料的研究国内外都已经开展,且竞争相当激烈,开展与新一代天空飞行器相关的高超声速飞行器技术研究不仅是严峻的国际形势所迫,也是体现各国总体实力与技术水平的衡量标杆。寻找一种新型高超声速飞行器推进剂是目前急需解决的难题,燃料热物性参数是流动和传热过程理论计算的基础数据,根据实验结果和现象才能推出计算模型,从而为设计合理高效的热防护结构提供依据和方法。由于燃料在高超声速飞行器冷却通道内发生复杂的化学变化,理论模拟计算和推导分析存在很大的难度,实验研究成为主要的研究手段,而飞行器燃料组分复杂,要弄清楚其传热机理,就必须先掌握其热物性参数。

目前国内热物性的研究主要是针对单组份、多组分碳氢燃料的替代物和国产航空煤油,而对于比热容的研究处于方法探究阶段,研究手段分为实验和数值模拟两大类。然而流体的热物性测量多采用离线式的静态测量方法,很难模拟出燃料实际在冷却通道内复杂多变的状态变化。

然而基于战略保密的需要，国外对于超临界压力条件下乳化煤油热物性的在线测量研究和理论研究几乎没有相关的报道。因此，开展超临界压力下乳化煤油燃料热物性在线测量研究具有重要的学术和应用价值。

### 1.3 本文研究内容及实验步骤

目前高超声速飞行器及其热防护方面的研究国内外竞争激烈，相关方面详细公开的资料很少，尤其是在乳化煤油热物性方面的研究，几乎找不到相关资料。由于乳化煤油燃料在高超声速飞行器冷却通道内状态变化很复杂，传统的模拟计算与理论推导存在很大的困难，故实验手段成为主要的研究手段；而乳化煤油组分复杂、状态参数不断的变化要求热物性参数必须在线测量。本论文从高超声速飞行器主动冷却热防护系统的应用基础研究出发，开展了关于乳化煤油燃料比定压热容物性参数的在线测量研究。设计搭建了一套流动型比定压热容在线测量系统，根据测量数据结果绘制定压比热容随温度变化的曲线，并进行了分析与讨论。本论文的主要研究内容：

重点阐述流体定压比热容测量技术的研究方法与特点；主要介绍流动在线测量比热的实验原理，自主设计了一套在线测量系统，详细介绍了系统核心装置量热器，同时分析了系统其它各个部件；通过对标定物去离子水、正己烷、二氧化碳和正辛烷-正庚烷二元混合物比定压热容的测量，并与文献值进行比较，验证了实验系统测量结果的准确性和可靠性；最后测量不同含水量的乳化煤油在不同状态参数下的比热容，分析各因素对比热容的影响，同时与典型航空煤油 RP-3、碳氢燃料 EHF-01 和纯水的比热容进行了分析讨论。

该研究属于高超声速飞行器主动冷却热防护技术中的关键基础性科学研究，研究结论将会对高速飞行器的热防护结构中共流动、传热过程的理论计算提供基础数据。

本实验课题研究的主要步骤如下：

(1) 查找相关文献，确定实验方案。调研流体比热容测量方法及实验原理，确定实验方案，研制了一套基于能量守恒的量热计理论，设计一套流动型比定压热容在线测量系统，自主研发设计系统核心部件——量热器。

(2) 搭建比热试验台，设计实验系统流程。在广泛调研与阅读大量文献的基础上，购置实验所需设备，按设计的试验系统进行搭建并对各个组元进行优化处

理。在试验系统组建完成后，对系统的绝缘、密封进行多次检查，直至满足试验要求。

(3) 在实验测量乳化煤油之前，选取纯物质去离子水、正己烷、二氧化碳和质量比 1:1 的正辛烷-正庚烷二元混合流体对实验系统的测量精度进行标定，通过与文献值对比分析来对实验装置进行优化处理，最终使标定物的测量值与文献值较好的吻合，最大绝对误差和平均绝对误差都控制在合理范围。

(4) 按含水质量分数不同来配制乳化煤油，配制含水 10%、20%、30%、50% 的四种乳化煤油。

(5) 实验采用小电压大电流对预热段和比热测试段进行加热，量热器置于高温恒温槽中，PID 温度控制仪监测量热器内温度跟管壁温度的温差并自动进行调节。调节直流电源使实验预热段、比热测试段流体的温度达到设定值，测量实验系统的质量流量，量热器内比热测试段流体进口及出口温差和给比热容测量段加热的电压及电流，实验中所有数据都将通过数据采集系统保存，以便后期对实验数据的处理与分析。

(6) 实验测量结束后，对实验数据进行分析处理，分析了含水量、压力及温度对乳化煤油比定压热容的影响，并与典型航空煤油 RP-3、碳氢燃料 EHF-01 及纯水的比定压热容进行比较，分析比热容与温度和压力变化的规律。

## 2 比定压热容测量原理与方法

### 2.1 比热容实验测量方法

描述物质热力学性质的一个重要参数就是物质的比热容，同时物质的比热容也影响着物质结构，对科学研究、工程应用以及热能动力分析方面均有关键性的作用。

流体比热容的研究一直被学者们关注，研究方法根据计算方式的不同可分为理论分析和实验研究两大类。其中理论分析方法包括统计热力学法和状态方程法：统计热力学法是利用统计学原理，将热力学的宏观性质微观量化处理推算出流体的比热容；状态方程法是利用现有的状态方程采用不同的推算方法计算流体的比热容。然而理论计算分析法是一种理想的计算方法，它对实际流体进行不同程度的简化和经验化的处理，同时它的应用范围有限且获得的数据与实际值偏差较大。

考虑实验数据的精确度与可靠性，目前常常采用实验测量获取物质的比热容，实验测量是检验理论方法的唯一标准。常常采用的实验研究方法根据测量方式不同分为直接测量法和间接测量法：利用比热容的定义式，分别测量温度、热量和流量等相关量直接计算出比热容的方法为直接法；而先测出声速、焦汤系数、熵值等热物性参数，再套用相关公式计算出比热容的方法为间接法。由于间接法测量过程中引入了中间变量，累计误差变大，测量精度较直接法降低。因此在要求较高的比热容测量研究中，直接法测量比热容被广泛采用。

比热容直接测量方法按照热交换方式或热流状态可以细分为不同的类型<sup>[61]</sup>，目前常用的直接测量方法主要有：绝热量热计法、差热分析法、差示扫描量热法、热弛豫法、脉冲加热法和流动量热法等。

#### 2.1.1 绝热量热计法

根据加热方式的不同绝热量热计法可分为定热量加热量热计<sup>[62]</sup>和连续加热（准稳态）量热计<sup>[63]</sup>，测量方法的核心内容是确保绝热性能良好。

定热量加热法其测量原理可以概述为：用定常热量  $Q$  加热装有待测试样的容器并测量其热量，将测量结果转换成待测试样的焓增值，并把测试温度范围区间内所有的焓增值拟合为温度的函数。该函数关系式的一阶倒数即为所测试样的比

热容:

$$c_p = \left( \frac{\partial \Delta H}{\partial T} - C_0 \right) \quad (2-1)$$

式中:  $c_p$  待测试样比热容;  $\Delta H$  表示待测试样的焓增值;  $T$  表示待测试样温度;  $C_0$  表示容器热容。

连续加热法(准稳态法)采用恒定不变的功率持续加热待测试样,系统稳定后试样温度在空间保持相对不变的分布,也就是说每个点的温度与时间的变化率都相同。此时我们用加热功率和温升速率来表示待测试样的比热容,如下所示:

$$c_p = \frac{1}{m} \left( \frac{q}{\partial T / \partial t} - C_0 \right) \quad (2-2)$$

式中:  $c_p$  表示待测试样比热容;  $q$  表示定常功率;  $\partial T / \partial t$  表示温升速率;  $C_0$  表示容器热容;  $m$  表示待测试样质量。

通过对比分析绝热量热计的不同测量方法,可以发现:定热量加热法的难点在于实验热平衡稳定时间较长,工作效率不高,焓增值对应温度为加热前后温度的平均值;连续加热法(准稳态法)的难点在于要保证试样各点之间的温度保持一致,对实验温控系统的精准度要求比较高。

### 2.1.2 差热分析法

差热分析法的原理是利用测量物温度  $T_s$  和参比物温度  $T_r$  之间的温差与测量温度间关系,若测量物与参比物加载相同热量时,因为他们吸热能力不同,故各自升温曲线会表现出差异,通过测定两者之间温度差来确定被测物的比热容<sup>[64]</sup>。

实验测量升温前,假设测量物温度  $T_s$ 、参比物温度  $T_r$  和测量容器温度  $T_w$  相同,实验升温过程中试样没有发生反应或相变等热效应,升温后试样的换热表达式为:

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = h_T (T_w - T_s) \quad (2-3)$$

参比物的换热表达式:

$$C_r \frac{dT_r}{dt} = h_T (T_w - T_r) \quad (2-4)$$

式中:  $h_T$  表示传热系数;  $C_r$  表示参比物总的热容;  $C_s$  表示测量试样总的热容。

实验达到准稳态后,两物质的加热速率与容器法加热速率相同,合并上面两公式:

$$(C_s - C_r) \frac{dT_w}{dt} = -h_T(T_s - T_r) \quad (2-5)$$

整理可得

$$\Delta T = \frac{C_s - C_r}{h_T} \frac{dT_w}{dt} = \frac{\Delta C_p}{h_T} \frac{dT_w}{dt} \quad (2-6)$$

式中： $\Delta T$ 表示待测试样与对比物的温度之差； $\Delta C_p$ 表示参比物与待测试样的热容差； $\frac{dT_w}{dt}$ 表示容器加热速率。

在同一压力下加热固体或非挥发性液体试样时，测量的总热容可用下式表示：

$$C_S = m_s \cdot c_p + C_0 \quad (2-7)$$

式中： $c_p$ 表示试样比热容， $C_0$ 表示容器热容。

把容器作为参考物，最终可以用下式计算容器的定压比热容：

$$c_p = \frac{\Delta T \cdot h_T}{m_s \cdot dT_w/dt} \quad (2-8)$$

差热分析法可实现小样品试样比定压热容的快速测量，但测量过程收仪器、试样和测试条件等外在因素的影响，测试结果的稳定性、重复率比较差，因此对于要求较高的测试并不是很合适。

### 2.1.3 差示扫描量热法

为了弥补差热分析法定量性不足的缺陷，在它的基础上人们提出了差示扫描量热法。根据设计原理及构造的不同，差示扫描量热法可以分为热流型、功率补偿型和快速型三类<sup>[64]</sup>。差示扫描量热法主要是根据待测样品与参比样品间的温度差不同来检测信号，来决定加热容器与试样间的热交换强度，即加热速率和待测试品及参照试品间的温度差成正比。

热流型差示扫描量热法的原理是通过康铜电加热板将相同的热量加载到待测试品与参照样品，记录测温元件测量加载平台下待测试品和参照试品间的热流差，从而获取待测试品的比热容。

功率补偿型差示扫描量热法的原理是将待测试品与参照试品分开放置在独立的加热器内，取用两套温控系统控制；一套是加热温度的控制，另一套是补偿待测试样和参照试样之间的温度差。待测试样和参照试样之间的温差为零是功率补偿性区别热流型的本质特征。

Cray<sup>[65]</sup>利用差示扫描量热法曲线推导出功率补偿型差示扫描量热法的焓值

变化与测量量之间的关系式:

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{dQ}{dt} + (C_s - C_r) \frac{dT_y}{dt} - R_x C_s \frac{d^2Q}{dt^2} \quad (2-9)$$

式中:  $dH/dt$ 表示待测样品焓变率;  $dQ/dt$ 表示待测样品与参照样品的热流差值变化率;  $d^2Q/dt^2$ 表示功率补偿差示扫描量热法曲线斜率;  $R_x C_s$ 表示时间常数;  $T_y$ 表示热分析容器温度。

当 $C_s$ 、 $C_r$ 、 $R_x$ 和热交换率 $dT/dt$ 视作常量时,  $dH/dt$ 可表示成 $dQ/dt$ 的函数; 假设测试试样没有发生其他反应热过程, 即 $dH/dt=0$ ,  $d^2Q/dt^2=0$ , 则:

$$\frac{dQ}{dt} = (m_s c_s - m_r c_r) \frac{dT_y}{dt} \quad (2-10)$$

根据上式, 在已知待测样品质量 $m_s$ 、参照样品质 $m_r$ 和比热容 $c_r$ 的基础上, 由热交换速率与热流差速率曲线可以计算获得待测样品的比定压热容。

快速型差示扫描量热法是在功率补偿型差示扫描量热法分析技术的基础上发展的新类型, 利用扫描速率与灵敏度的直接关系, 具备快速的响应时间的极高的分辨率。这种技术特别适应待测物快速加热检测的过程, 可以避免其他不必要的反应。

差示扫描量热法与差热分析法测量原理都以焓值变化为基础, 所以对测试过程的要求很高, 且两种方法都属于相对测量方法。不同之处是差示扫描量热法可用于定量测定, 测试精度较高, 在工程上广泛的应用。

#### 2.1.4 热弛豫法

Bachmann 等人<sup>[66]</sup>在 1972 年首先提出热弛豫法, 主要用在体积较小样品比热容的测量。原理是将一温度传感器和加热器分别贴附到试样容器底部, 通过热传导作用把热量  $Q$  加载到容器和测试样品, 此时用如下公式表示:

$$C_p \frac{dT}{dt} = Q - k(T - T_0) \quad (2-11)$$

式中:  $C_p$ 表示试样与容器总的热容;  $k$ 表示损失热量的传热系数;  $T$ 表示试样温度。

如保持定常加热, 此时 $dT/dt=0$ , 则有:

$$Q = k(T - T_0) \quad (2-12)$$

根据不同的温度分别求出  $k$  值, 之后将加热电源关闭, 记录试样温度与时间的内在关系, 其中:

$$T - T_0 = \Delta T \exp\left(-kt/C_p\right) = \Delta T \exp(-t/\tau) \quad (2-13)$$

式中： $\tau$ 表示降温过程中试样的时间常数；通过它可以计算出系统的 $C_p$ 值。

热弛豫法的特点是具有较高的灵敏度，不仅可以测量低温物固体，同样也适用高温流体热容的测量<sup>[67-68]</sup>；但该方法难以测量存在过程热反应的试样，对待测试样和容器内温度的均匀性要求比较高。

### 2.1.5 脉冲加热法

脉冲加热法<sup>[69]</sup>的测量原理是待测试样被脉冲电流加热，在脉冲加热时间 $\tau$ 内，测量脉冲的加热电流 $I$ 、加热电压 $U$ 和试样温度 $T$ ，其中试样温度变化用电阻率 $\rho$ 的变化来表示：

$$C_p = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT} = \frac{\Delta(UI) \cdot d\tau}{m \cdot dT} = \frac{\Delta(UI)}{m} \cdot \frac{d\rho/dT}{d\rho/d\tau} \quad (2-14)$$

式中： $d\rho/dT$ 表示电阻率随温度的变化率； $d\rho/d\tau$ 表示电阻率随时间的变化率。

脉冲加热法的特点是测量周期短，热辐射损失小，测量高温比热具有较高的精度<sup>[70]</sup>；但测量对象必须为良导体，对测量样品的导电性要求较高。

### 2.1.6 流动量热法

相对于静态测量来讲流动量热法是一种流体比热测量方法，Callender 和 Barnes 采用的流动型量热计<sup>[69]</sup>是将一根定常热输入的加热丝置于流通管道中，测量管道进口与出口温度法变化。流动型量热计结构如下图所示，真空室对管道进行隔热保护，同时循环恒温流体为真空室提供了恒温保障。

当质量 $m$ 的待测流体流经测量管道，恒定热量 $Q$ 的加热丝对其加热；待热稳定后，测量出流体进出口温差 $\Delta T$ ，可以得到比定压热容的表达式：

$$C_p = \frac{1}{m} \frac{Q - Q_L}{\Delta T} \quad (2-15)$$

式中： $m$ 表示待测流体质量流量； $\Delta T$ 表示流体进出口温差； $Q$ 表示总的加热量，即加热功率； $Q_L$ 表示损失的热量。

为了消除热损失 $Q_L$ 影响，假定过程中 $Q_L$ 是实验流体温度的关系式。维持进出口流体温度不变，先后改变待测流体质量流量和加热功率，可以得到两个不同状态的热平衡方程：

$$Q_1 = m_1 c_p \Delta T + Q_L \quad (2-16)$$

$$Q_2 = m_2 c_p \Delta T + Q_L \quad (2-17)$$

式中下标 1,2 表示质量流量与加热功率改变前后的测量值。

上两式相减, 推算得出最终比定压热容的计算关联式为:

$$c_p = \frac{Q_1 - Q_2}{(m_1 - m_2) \cdot \Delta T} \quad (2-18)$$

流量热法的特点是简单可靠, 适合测量流动性良好的气体和液体的比热, 同时能克服高压高温的条件限制, 可实现流体过程热反应的在线测量。而非流动型比热容测量方法虽然测量精度较高, 但绝热条件要求苛刻且仅适合固体及低压下液体物性的测量。

通过上述比热容测量方法的对比, 考虑实际工程高温高压测试条件及在线测量的要求, 本文基于能量守恒的量热计理论, 采用绝热量热计法设计并搭建了一套流动型比定压热容在线测量系统, 该系统将实现超临界压力下乳化煤油比定压热容在线测量, 为进一步研究乳化碳氢燃料换热特性提供准确的基础热物性数据。

## 2.2 流动型比定压热容测量原理

测量比热容的原理与热力学中常说的比热容定义是一样的, 而定压比热容广泛的被应用在实际工程中, 同时因为压力在实验容易被控制, 固常用物质的比定压热容作为实验测量的比热容值。由于乳化煤油的吸热型化学反应与流动过程密切相关, 其定压比热容必须采用流动法测量, 本实验采用定流量的比热测量方法, 该方法基于能量守恒定律:

$$Q_{total} = UI = Q_{absorb} + Q_{loss} = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT + Q_{loss} \quad (2-19)$$

式中:  $Q_{total}$  表示加热的总热量;  $Q_{absorb}$  表示流体吸收的热量;  $Q_{loss}$  表示损失的热量;  $U$ 、 $I$  表示加热电压、电流;  $T_1$ 、 $T_2$  表示加热段流体进出口温度;  $m$  表示流体质量。

测量过程中, 将测试温度采用离散化处理, 推出以下方程:

$$m c_{p,T} \Delta T = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (2-20)$$

式中:  $c_{p,T}$  表示流体的平均比定压热容;  $\Delta T$  表示流体进出口温差。由于流体进出口温度差不大, 采用流体进口与出口温度的平均值所对应的比定压热容代替定性温度  $T$  处流体的实际比热容值。

## 2.3 本章小结

本章主要介绍了各种比热容测量方法以及它们测量的原理和适用条件, 包括绝热量热计法、差热分析法、差示扫描量热法、热弛豫法、脉冲加热法和流动量热法等。通过对比和分析选择了流动型量热器在线测量方法, 同时给出了流动型比定压热容实验测量原理, 并分析了该方法的计算过程。

### 3 流动型比定压热容实验系统的研制

#### 3.1 实验系统介绍

为了准确测量高温高压下乳化煤油的比定压热容，在流动型比定压热容实验测量原理的基础上，基于能量守恒的量热计理论，自主搭建了一套流动型比定压热容在线测量系统。该系统操作简单，测量准确度较高，具有很好的工程应用前景。该系统将实现超临界压力下乳化煤油比定压热容在线测量，为进一步研究乳化碳氢燃料传热特性提供准确的基础热物性数据。图 3.1 为实验系统实物图。



图 3.1 流动型比热容实验系统实物图

本实验是在物性测量实验平台上完成的，实验台和系统流程由自己搭建与设计，试验系统流程图如 3.2 所示：

本实验模拟高声速飞行器发动机高温高压的工作环境，测量不同压力和温度下乳化煤油的比热容。实验主要由流体供给系统、预热段加热系统、试验段低电压大电流加热系统、冷凝器冷却系统、数据记录采集系统五部分组成，是一个开放式在线测量系统。乳化煤油由储液罐进入恒流泵（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 MASS6000，精度 0.1%）实时监测；实验过程中通过调节背压阀（熊川 SS9313，精度为 $\pm 1\%$ ）使系统维持在恒定压状态，通过真空泵使量热器所处的真空腔保持真空度在 0.1MPa，从量热器比热测试段流出的高温高压流体经冷凝器最终流回储液罐。预热段和量热器的腔外都包裹保温棉，减少散热，测量过程中各数据通过 IMP3595 采集系统记录。

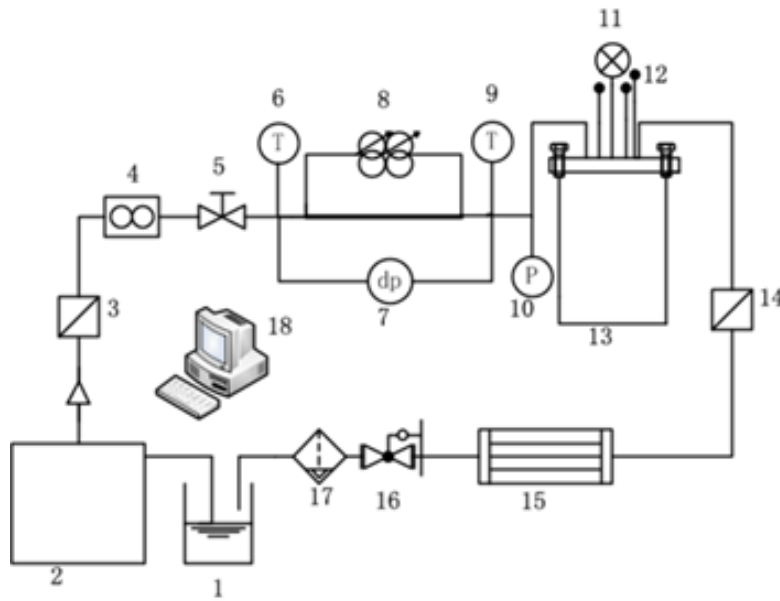


图 3.2 流动型比热容实验系统流程图

1-储液罐，2-恒流泵，3-过滤器，4-质量流量计，5-调节阀，6-铠装热电偶，7-压力变送器，8-电源，9-铠装热电偶，10-压力传感器，11-真空表，12-铠装热电偶，13-量热器，14-过滤器，15-冷凝器，16-背压阀，17-分离器，18-数据采集系统

### 3.2 量热器结构设计

流动型比热容装置常常测量的是物质在一定压力下的比热容，而实验测量系统中测量装置的核心部件是量热器，量热器设计的好坏直接决定实验测量结果的准确性。图 3.3 为量热器结构简图：

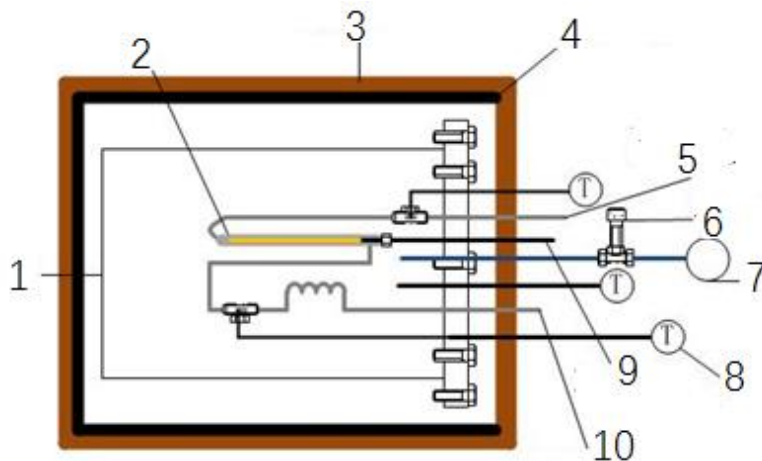


图 3.3 量热器结构简图

1-真空腔，2-微型加热器，3-保温棉，4-陶瓷加热圈，5-试验段流体进口，6-接真空泵，7-真空表，8-铠装热电偶，9-引线套管，10-实验段流体出口

图中量热器内管道为不锈钢管, 流体进出口温度由  $\Phi 1.5\text{mm}$  的 K 型铠装热电偶测量, 流体的定性温度采用进口与出口流体测量温度的数值平均值, 为避免实验事故, 在预热段管外壁上等距离点焊 6 个热电偶用来时时监测管壁温度, 同时调节腔内温度, 使管壁温度与腔内温度保持动态平衡。为了获取可靠的测量数据, 应尽量减少试验测试段流体的散热损失, 故本实验系统将量热器放入一个真空腔内, 出口段管路做成螺旋状尽量延长出口管程, 由于加热后流体往往高于真空腔内温度, 适量加长管段可以减少沿管段的温度梯度。真空腔外面是由陶瓷加热圈和铁桶构成的高温恒温槽, PID 温度控制仪使腔内温度与比热测试段管壁温度保持一致, 最大程度减少流体加热后通过管壁对周围的热辐射换热, 量热器维持 10KPa 真空来减少导热、对流引起的散热损失; 在管路与腔体之间加锡纸板隔热来减少换热。

微型加热器插入管内直接给流体加热, 可以避免因高温氧化结焦产生热损失, 提高实验测量精度。流体吸收加热器的热量温度升高, 控制量热器比热测试段进出口温差在 1-2K 之间, 其中测量温度的 K 型铠装热电偶分别通过三通与金属卡套与测量管路连接。从阻隔热传递基本方式的角度对量热器进行设计: (1) 流体加热采用直流电源、加热器直接插入管内进行加热, 可以有效的减少因为结焦而产生的热损失; (2) 量热器管壁的温度与真空腔的温度保持一致, 可以有效的减少加热管壁的辐射热损失; (3) 真空腔的密封设计, 同时实验过程用真空泵对腔进行抽真空, 是腔内维持在接近真空的状态; (4) 出口段做成螺旋状, 尽可能的加长管程, 这样有效的减少流体在管道内的沿程温度梯度, 降低了流体在出口管道所产生的热量传导损失。以上设计可以有效减少实验过程中的热量损失, 使加热热量几乎完全被流体吸收, 提高实验数据的精度。

### 3.3 实验装置介绍

#### 3.3.1 恒流泵

测量过程中需要保持流量稳定不变, 故恒流泵选用大连依利特分析仪器有限公司设计开发的新型半制备高效液相色谱高压恒流泵 P270, 在低速下该恒流泵的电机运行比较稳定, 大大提高实验测量结果的准确性和可靠性, 使流体在高压低速的测量系统环境中保证了流动相构成的持续稳定性。这种泵的内部结构采用双柱塞并联式, 优点表现为输液脉动低; 安装采用浮动式导向柱塞杆的方式。为保

证能在长时间高压下恒流泵持续运行且稳定的输送流体，内部装有量柱塞杆和密



图 3.4 高压恒流泵 P270 实物图

封圈等核心器件。恒流泵极限工作压力不得超过 20MPa，流量设定范围为 1.00mL/min~99.99 mL/min, 设定步长 0.01 mL/min，流量测量准确度 $\leq\pm 1.5\%$ 、相对标准偏差 $\leq\pm 1.0\%$ ，本次试验测量最高压力不超过 5MPa，故性能指标满足本次实验研究需要，恒流泵实物图如 3.4 所示。

### 3.3.2 质量流量计

测试流体经恒流泵加压后质量流量基本维持一个定值，故测量系统质量流量计选取西门子公司的高准质量流量计 SIMENS MASS 6000, 该型号质量流量计适用于各种液体或气体较小质量流量测量，可以测量范围为 $-20^{\circ}\text{C}$ - $50^{\circ}\text{C}$ 物质的温度，流量测量范围为 0-510 kg/h，工作时最高压力可达 35MPa，它的系统原理基于科里奥利力原理，该质量流量计能够一同测量流体的流速与温度等，测量精度等级高达 0.1%。使用简单、安装方便，采用即插即用的机械接口。为获得更加稳定、均匀的流量供给，在接入质量流量计之前的管道安装一缓冲容积约为 1.2L 的阻尼器。通过相对不确定误差评定法可知，质量流量的相对不确定误差由流量测量误差、恒流泵流量相对偏差和信号采集系统测量误差合成，最终不确定度 $\leq 1\%$ 。质量流量计实物图如 3.5 所示。

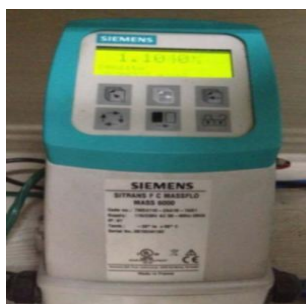


图 3.5 质量流量计实物图

### 3.3.3 加热装置

该实验加热系统主要由预热段、试验段和量热器三部分组成，分别采用独立的调、变压器进行加热控制。预热管路管径  $\Phi 3 \times 0.5\text{mm}$ 、管长 870mm，经计算所需最大加热功率为 5KW，选用额定功率为 10KW 的可控硅调压器驱动 0-50V，0-200A 变压器的直流电对其加热；试验段最大加热功率为 250W，采用可调电源控制设备可控硅调压器，进口端电压 380V，出口端电压 370V，能充分对测试流体进行加热；其中量热器是由人工智能温控仪（PID）调节温度而引起电压变化进行加热的，其控温精度高，为了确保量热器进行恒温控制，选用日本导电温控仪 FP23。变压器、可控硅调压器及温控仪实物图如 3.6 和 3.7 所示。



图 3.6 变压、可控硅调压器



图 3.7 温度控制仪

### 3.3.4 水冷机

量热器流出的是高温流体，为了保证实验的安全性与回收测试流体，本实验选用上海康赛制冷设备有限公司的工业风冷冷水机组对测试完毕后的高温流体进

行冷却。其工作原理是：冷冻水在蒸发器中吸收热量，通过水泵加压进入冷水盘管并与从实验测试段流出的流体盘管进行换热，从而冷却实验流体；吸收热量的冷冻水再次流回蒸发器与制冷剂发生热量交换，而制冷剂通过压缩机的压缩后将热量由冷凝器散发到周围环境中，释放热量后的制冷剂再一次流回蒸发器，按这样一流程进行反复循环。该冷水机的制冷量为 20KW，额定电流为 10A，采用 380V 交流电，经计算能满足实验的冷却要求。工业风冷冷水机系统工作系统图及实物操作面板图如 3.8 和 3.9 所示。

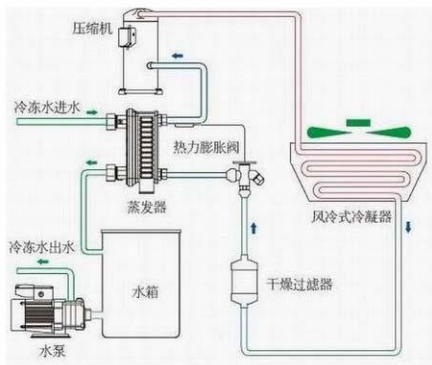


图 3.8 冷水机系统原理图



图 3.9 冷水机实物控制面板

### 3.3.5 压力、压差及温度的测量

数据测量过程是在线恒压测量，在定压下对流体进行温度梯度的连续测量，采用背压阀调节整个实验过程所需的恒定压力，选用 SS9313 北京熊川被压调节阀，最高压力为 10Mpa，该背压阀具有调节精准，使用方便等特点，实物图如 3.10 所示。



图 3.10 背压阀

该实验比热容的计算虽然没有直接使用压力与压差的测量值，但为确保实验安全，需要注意系统管路中压力表与压差表示数的变化，一旦发现示数发生巨变要及时解决检查管路问题。实验测试的流体是乳化煤油，具有易燃、易爆的危险

性，故在实验过程中要密切注意压差与压力的变化，以免出现管路堵塞导致爆管等突发状况，尤其是在高温情况下，乳化煤油可能会结焦析碳，堵塞试验管道内部，造成差压出现极大变动，在这种情形下，要注意数据采集系统中压差示数的变化，并采取解决的措施。压力选用 ROSEMOUNT3051CG 压力变送器进行测量；压差选用 ROSEMOUNT3051CD 差压变送器进行测量。通过引压管将预热段和试验段的进出口与固定在试验台上的压差、压力变送器，其实物图如 3.11 所示。

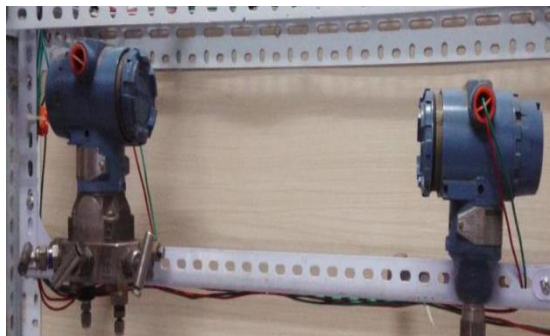


图 3.11 压力变送器和压差变送器

温度是计算比热的一个关键数据，实验过程所需要测量的温度数据均采用 K 型铠装热电偶进行测量，型号是美国 Omega 公司的 TJ36 系列，温度测量区间 0-800℃，测温误差控制在±0.4%以内。其测温原理是：将热电偶探头插入流体中间部位且用卡套拧紧，以流体中间的温度作为流体实时温度，并通过采集板记录采集传输温度信号给采集系统。

### 3.3.6 数据信号采集系统

本实验选用 IMP3595 采集板输送数据信号，将采集到的压力、压差、温度、电流、电压及加热功率等信号经过自编程序处理后传输到电脑并显示出来。为了准确和在线读取采集数据，采用两块相同型号的采集板，系统会自动保存采集板传输的所有数据，同时为以后处理数据方便，我们将每组数据求平均值并生产 Excel 文件。



图 3.12 数据采集电脑



图 3.13 数据采集板

测量过程中, 为确保实验采集数据的准确性和减少测量误差, 当加热到设置温度时, 要保证测量的各个参数都处于稳态及波动不大时才可进行数据的采集, 一般保证系统平稳需要 3-5 分钟左右, 假如出现数值上下波动较大, 则采集稳定时间需要延长, 试验中可以对相同工况点进行多次测量求数值平均值的方式来减少误差, 数据采集板实物图如 3.12 和 3.13 所示。

### 3.4 实验内容和方法

#### 3.4.1 系统装置的优化

为了确保实验测量数据在精度与可靠性, 需要在试验台的搭建和系统测量之前对测量设备装置结构及参数进行优化处理设计。包括预热段尺寸的选取、实验段长度的确定、量热器的隔热和密封与实验段流体进口及出口温度的控制等。

实验测量结果在很大程度上与预热段尺寸的选取有明显的关系, 倘若选取预热段尺寸过短会造成加热时热流密度过大, 从而引起温度梯度过大导致受热不均匀, 引发过冷沸腾现象。加热管道在加热过程中纵向横截面受热不均匀, 管内流体温度沿径向呈现梯度递减分布, 管道中心处流体温度较管壁温度低些, 管内中心处主流温度在接近饱和之前, 接近管内壁流体温度此时可能达到饱和温度且产生汽化现象并有气泡出现。过冷沸腾时出现汽化导致在管内壁面结垢且堆积, 管壁热阻随垢体附着厚度增加而迅速变大, 出现局部超高温, 导致实验管道受热变形。适当延长加热段的管长, 将会降低热流密度, 过冷沸腾现象将大大降低发生概率。通过多次反复测验, 预热段管段长度确定为 980mm。

实验比热测量管长为 120mm, 将加热器直接插入管道内并用卡套固定, 实验测量段进出口都延长, 使其轴向温度梯度非常低, 可以当做一维稳态导热理想模型来计算处理。由傅里叶定律可知, 尽量减小测试段流体进口与出口温差来降低热量散发损失。

整套装置的关键部件是量热器, 量热器的绝热和密封是测量物质比容数据是否准确的核心。为了减少热量散发, 把测量比热的实验件整体做成一个密封的腔, 其中温度测量元件、微型加热器的引线都通过套管从腔体内利用卡套孔引出, 并对腔进行抽真空处理。出口段管路做成螺旋状尽量延长管程, 一般情况下流体加热后温度较腔体内高, 延长出口管将会减少沿流体流动方向的温度梯度。真空腔外面是由陶瓷加热圈和铁桶构成的高温恒温槽, PID 温度控制仪使腔内温度与比

热测试段管壁温度保持一致，最大程度减少流体加热后通过管壁对周围的热辐射换热，量热器维持 10KPa 真空来减少导热、对流引起的散热损失；在管路与腔体之间加铝锡纸板减少辐射传热。

### 3.4.2 实验内容及步骤

本实验主要研究内容为：基于能量守恒的量热计理论，设计了一套比定压热容在线测量实验系统台，实验测量了含水质量分数为 10%、20%、30%、50% 四种乳化煤油的比定压热容，根据测量实验数值分别制作比定压热容与温度、含水量变化的曲线，同时与航空煤油 RP-3 进行对比，分析乳化煤油定压比热的影响因素及变化的规律，最后分析比较不同含水量的乳化煤油的比热容。

在实验开始之前首先对测量管路、阀门及恒流泵头进行清洗，选取无水乙醇冲洗试验管道系统，大概 10min 后将氮气充入试验管路系统去除管道中残留的无水乙醇。

实验的具体操作步骤如下：

(1) 实验前的准备工作。确定设备仪器的完好性，实验系统流程是否连接正确，检测实验系统连的密封性及绝缘性，避免出现泄漏及触电事故的发生。

(2) 依次开启实验台的设备。测试流体调配好后，开启大流量冲洗功能直至管道无气泡产生，设置设定流量，开始调节背压阀，使系统压力达到设定值。

(3) 调节加热功率，对预热段流体进行预热，缓慢升高功率，直至达到实验测量所要求的测量段流体进口设置的温度；调节温度控制仪对恒温槽的温度进行控制，保证真空腔内的温度与实验段外壁温度保持一致；调节实验段加热微型加热器的功率，保证实验测量段的进出口流体温差在 2K 的范围内，待系统稳定后，采集数据。

(4) 缓慢升高测量流体设置温度，每 25 度为一间隔，出现比热值突变或变动比较大的时候处每隔 15 度采集一次数据，重复步骤 (3) 测量每组数据。待到测量工况的参数都基本不变后（稳定的标准是以达到某一最大值不再有继续增加的趋势为准），开始采集数据（质量流量、进出口流体温差、实验测试段加热功率及压力等），给个工况对应的数据采集 120 个记录点后自动保存，对每一个工况的实验数据作好记录并导入 Excel 表格中处理。

(5) 实验过程中，在实验没有产气结焦之前，流体可以循环利用，高温发生裂解反应后产气后，测试流体实验完后直接排入废油桶。整个实验测试完成后，

首先关闭温控仪和调压器，慢慢调节预热段和测试段的加热功率，以免突然降低功率使电压过大烧坏设备，其次是防止管道内二次结焦堵塞管道系统，直至调节为 0，管壁调压器，调节恒流泵至最大流量冷却管道，调节背压阀至压力最小，待流体温度降至 50 摄氏度以下时，关闭电源总开关、恒流泵、冷水机及电脑。

### 3.4.3 实验过程优化措施

本实验测量超临界压力下乳化煤油的比定压热容，测量介质属于易燃易爆的危险品，该实验发生事故的风险较大，故必须采取相关优化措施来保证实验过程的安全。

试验台应该保证绝缘，所有设备和实验装置都设置在试验台上，所有加热的电源都安装在一个总变电箱内，便于控制，应对实验过程中出现的突发状况，能够及时处理，确保安全。实验室还应配备相应的灭火设备，以防实验中发生火灾时能紧急使用处理。乳化煤油在高温段会产生气体，不仅味道难闻，而且还对人的健康有很大的危害，故实验室要时刻保持空气流通，并开启排风装置；同时要做好整个系统的密封性。

整个试验过程都是使用大电流低电压的方式进行加热，实验电压维持 36V 以下，确保人体安全。为防止意外触电事故发生，在每一次实验开始之前都要测量试验台各部分是否连通，保证整个实验台的绝缘。

## 3.5 系统不确定度分析

### 3.5.1 实验误差的分析

在实验过程中，误差是无法避免的，引起误差的来源也是多方面的，本实验的误差主要由以下几个部分组成：

1. 实验装置的误差。实验中的各个仪器、测量设备本身会产生误差，其装置的精度等级不一样，所带来的误差大小也会不同；实验过程中，人们往往会忽略实验装置所带来的误差，然而在处理数据结果时，会发现最后的测量结果偏差较大，故需要引入实验装置的误差分析来改善实验测量结果。

2. 测量方法的误差。本实验采用绝热量热计法测量流体的定压比热容，而测量系统的核心装置量热器需要在绝热和密封的环境下，在给预热段、实验测量段、量热器腔内及恒温槽加热过程中会有一部分热量损失而导致误差，该部分误差直

接影响实验测量数据的准确度，所以应该重点考虑并采取一定措施减小误差。

3.测量人员的误差。由于测量人员记录数据的习惯、对设备的熟悉程度、生理和心理等一些主观因素的影响，会使测量结果不同，对实验最后的数据带来误差；在记录和采集实验数据的过程中，实验数据会发生波动，不能保证试验系统达到完全稳定的状态，这种误差几乎是无法避免的。

### 3.5.2 减小误差的措施

为了确保实验测量结果的准确度和提高实验系统的可靠性，需要减小实验过程上述的几种误差。针对实验装置的误差，首先需用合适量程的仪器、仪表，确保测量数据达到仪器满量程的  $1/3 \sim 2/3$ ，在每次实验开始之前，都要校核装置的精度，尤其是压差变送器，需要调零；对于测量方法所产生的误差，首先对预热段和恒温槽包裹上保温棉进行保温隔热，对于量热器，为了减少散热损失，采用微型加热器，并将其置于测试管道内部，使热量直接被流体吸收；出口段管路做成螺旋状尽可能加长来降低管段沿程温度梯度，从而降低试验段流体的散热损失；采用真空泵对量热器腔内抽空气的办法来使量热器维持 10KPa 真空，从而减少导热、对流引起的散热损失；在管路与腔体之间加铝析纸减少辐射损失；最后对于测量人员的误差，应做到尽可能最小，不能带个人习惯来采集数据，对于每个工况数据采集时，都要等到工况基本稳定（2 分钟内实验数据无明显波动）后，连续采集 120 组数据，然后取其所有平均值来进行计算，实验在高温阶段，流体裂解产气会出现“尖啸”声，同时会引起管段震动，最终导致数据上下波动特别剧烈，使测量的数据存在较明显的误差偏离，这种属于粗大误差，在处理数据的过程中应该剔除。

### 3.5.3 实验结果的不确定度

不确定度的解释为由于实验误差是无法避免的，对待测量值的未能确定的概率，也称作实验结果的可信程度。不确定度是检验测量结果可信的指标，是验证实验系统可靠性的因子，不确定度越小，实验测量结果与被测物质真实值越接近。在实验开始之前，一般并不知道被测物质所测量物理量与真实值存在的差距，因此误差的大小也不能确定。故要确定某个物理参数的数值就需要一个测量值的范围，这个范围一般称为“不确定度范围”。

在本实验的数据分析中，当一个数据对实验真实值的估计在可信度 95% 的区

间内，我们认为这个数据是符合要求的，其关系式可以表示为：

$$\chi_i = \chi'_1 \pm \delta\chi'_1 \quad (3-1)$$

$\chi'_1$  表示实验测量值，

假设其中的间接测量值物理量由几个直接参量组成，即：

$$R = f(\chi_1, \chi_2 \cdots \chi_n) \quad (3-2)$$

一个完整的测量结果包括两个因素，一个是测量值的数据，另一个是测量不确定度的评定，流动型比定压热容在线测量系统的不确定度主要由比热测试段电加热器的电压与电流、进出口温差及流体质量流量的不确定度引起，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，由此可以得出扩展不确定度为：

$$U = ku_c = k \sqrt{\sum u_i^2} = \frac{k}{c_p} \sqrt{\left(\frac{\partial c_p}{\partial \Delta T}\right)^2 u_{\Delta T}^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial q_m}\right)^2 u_{q_m}^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial P}\right)^2 u_p^2} \quad (3-3)$$

式中， $u_c$ 表示扩展标准不确定度， $u_i$ 表示每个因素的不确定度， $k$ 为置信因子（取 $k=2$ ）， $u_{\Delta T}$ 表示测试流体进出口温差的不确定度， $u_{q_m}$ 表示测试流体质量流量不确定度， $u_p$ 测试流体加热功率不确定度。

由比热计算公式可知，质量流量  $m$ 、流体温差  $\Delta T$ 、测试系统压力  $p$  以及加热电压与电流的精确测量均直接影响比定压热容的测量结果，各参数的相对不确定度如表 3.1 所示。

3.1 测试参数不确定度分析

测量参数	测量范围	精度/%
质量流量/ $g \cdot s^{-1}$	0.6-1.2	$\pm 0.1$
流体温度/K	301-880	$\pm 0.38$
压力/MPa	3-5	$\pm 0.075$
加热电流/A	15-30	$\pm 0.2$
加热电压/V	1-15	$\pm 0.2$

### (1) 温度不确定度

本实验选用美国 Omega 公司生产的 TJ36 系列铠装热电偶测量试验段流体的温度，热响应时间小于 0.4s，实验前用 JOFRA 系列热电偶校正器 650SE 对铠装热电偶进行标定，在 301K-880K 测温范围内，铠装热电偶的测量精度为 $\pm 0.38\%$ ，则有：

$$\frac{\delta_T}{T} = \frac{0.38\% \times 880}{301} = 1.1\% \quad (3-4)$$

所以，试验中温度的相对不确定度为 1.1%。

(2) 质量流量不确定度

实验选用西门子公司的高准质量流量计 SIMENS MASS 6000，该型号质量流量计适用于测量各种液体和气体的小质量流量，量程比高于 500:1，流量测量精度为  $\pm 0.1\%$ ，那么实验中质量流量的不确定度为恒流泵流量相对偏差、流量测量误差和信号采集系统测量误差合成不确定度为 1.01%。

(3) 压力不确定度

实验系统中的压力传感器为美国 Rosemount 公司的 3051TG 系列压力变送器，量程为 0-15MPa, 10:1 量程比范围内测量精度为  $\pm 0.075\%$ ，实验中最小压力为 3.0MPa，则有：

$$\frac{\delta_T}{T} = \frac{15}{3} \times 0.00075 \times 100\% = 0.375\% \quad (3-5)$$

所以，实验压力的相对不确定度为 0.375%。

(4) 电流及电压不确定度

在量热器内，加热器本身的阻值作为加热元件，采用直流电源的加热方式，其中加热电流由 LEM 霍尔传感器 LT58-S7 测量，电流表量程为 0~50A，电流传感器测量精度为  $\pm 0.2\%$ ，最小电流为 15A，电流互感器的精度为  $\pm 0.2\%$ ，则有：

$$\frac{\delta_I}{I} = \frac{50}{15} \times \sqrt{(0.002)^2 + (0.002)^2} = 0.9\% \quad (3-6)$$

所以，实验中电流的相对不确定度为 0.9%。

加热电压由 TAIK 电压变送器 S4T-DT-V4A4A 测量，电压表量程为 0~20V，最小电压为 1V，电压变送器的精度为  $\pm 0.2\%$ ，则有：

$$\frac{\delta_V}{V} = \frac{0.2\% \times 20}{1} = 4\% \quad (3-7)$$

所以，实验中电压的相对不确定度为 4%。

流动型比定压热容在线测量系统的不确定度主要由比热测试段电加热器的电压与电流、进出口温差及流体质量流量的不确定度引起，由此可以得出扩展不确定度为：

$$U = k u_c = k \sqrt{\sum u_i^2} \quad (3-8)$$

$$= \frac{k}{c_p} \sqrt{\left(\frac{\partial c_p}{\partial \Delta T}\right)^2 u_{\Delta T}^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial q_m}\right)^2 u_{q_m}^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial P}\right)^2 u_P^2}$$

式中， $u_c$ 表示扩展标准不确定度， $u_i$ 表示每个因素的不确定度， $k$ 为置信因子（取

$k=2$ ),  $u_{\Delta T}$  表示测试流体进出口温差的不确定度,  $u_{q_m}$  表示测试流体质量流量不确定度,  $u_p$  测试流体加热功率不确定度。

根据电流和电压的不确定度, 可以推算出加热功率的测量不确定度为 4.1%。综上所有计算可以得出, 实验过程中所有主要参数的不确定度均在误差要求的不确定度范围内, 实验结果满可以达到要求。实验中质量流量计的相对不确定度为 1.01%, 比热测试段电加热丝加热功率相对不确为 4%, 试验测量温度范围内温差的相对不确定度为  $\pm 0.19\% \sim \pm 0.61\%$ 。经上式 3-8 计算可获得测量流体比定压热容的合成相对标准不确定度为 1.21%~2.1%, 取置信因子  $k=2$ , 则测量比定压热容的扩展相对不确定度为 2.42%-4.2%。

### 3.6 本章小结

本章重点阐述了高温高压比热容在线测量试验系统、实验台各部件和仪器设备、测量步骤及实验过程的优化措施等。主要介绍了实验系统中的核心装置—量热器, 简要介绍了其它一些测量仪器和相对量程, 同时还介绍了数据采集系统和处理方法, 并强调了试验中需要测量记录的因数: 预热段进口流体温度、实验段进口与出口的温差、流体质量流量、压力及加热功率等。具体说明了实验内容与过程和实验系统搭建的优化措施。

## 4 实验数据处理及精度分析

物质的热物理性质包括迁移性质和热力学性质两大类，而比热容是描述物质热力学性质的一个重要参数，比热容的获得对于科学研究、工程计算以及热力特性分析等有重要意义。

碳氢燃料具有密度大、冷却性能强的优点，目前是高超声速飞行器的可选燃料，然而研究发现碳氢燃料作为制冷剂最大问题是高温结焦析碳，析碳沉积会影响传热燃烧，更严重的问题是析碳容易堵塞燃料和喷射系统的细小管路系统。煤油掺入一定质量分数的水和乳化剂，均匀搅拌变成乳化煤油，其比热增大，可以提升冷却飞行器表面的冷却能力；尤其在高温，析出的碳和水发生水煤气反应，大大减轻碳氢燃料的结焦，乳化煤油很好解决了碳氢燃料作为冷却剂高温结焦的问题。作为高超声速航空飞行器的燃料与制冷剂，乳化煤油克服了碳氢燃料的缺陷，且进一步优化了燃料的物性，具有很好应用前景。

### 4.1 实验原理

由于乳化煤油的吸热型化学反应与流动过程相关，其比热容必须采用在线测量，为了准确测量高温高压下乳化煤油的比定压热容，基于能量守恒的量热计理论，自主研发搭建了一套流动型比定压热容在线测量系统。

实验测量过程中，质量  $m$  的流体通过吸收加热量  $Q$  后，流体温度从  $T_1$  升到  $T_2$ ，但是加热的热量不可能完全被流体吸收，存在一部分热损失（如流体通过管壁向周围散热）。固在实验过程中，当温差  $\Delta T$ 、压力  $p$  在恒定的状态下比定压热容计算式可以表示为：

$$\begin{aligned} C_p(T, p) &= \frac{P - P_0}{q_m \Delta T} = \frac{P - P_0}{q_m (T_2 - T_1)} = \frac{P}{q_m \Delta T} - \frac{P_0}{q_m \Delta T} \\ &= C_p(cal) - \frac{P_0}{q_m \Delta T} \end{aligned} \quad (4-1)$$

式中， $P$  表示微型加热器给流体的加热功率， $P_0$  表示流体加热过程中损失的功率， $q_m$  表示通过量热器试验段的质量流量， $T_1$ 、 $T_2$  表示加热后流体进出口温度， $\Delta T$  表示流体进出口温差， $C_p$ 、 $C_p(cal)$  表示流体实际比定压热容和实验计算比定压热容。

根据公式 4-1 来计算不同质量流量下流体的比热容，随着质量流量增加，散热损失减小，当相邻两次不同流量下计算比热容误差在 0.1% 以内时，此时计算比

定压热容就是该流体的真实比定压热容。如表 1 所示：

表 4.1 测量流体比热容

$T/K$	$q_m/(\text{g}/\text{min})$	$P/\text{MPa}$	$C_p/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
330.2	0.48	3.0	4.1942
330.1	1.38	3.0	4.1889
330.2	2.28	3.0	4.1815
330.1	3.18	3.0	4.1776

为了减少散热损失，采用微型加热器，并将其置于测试管道内部，使热量直接被流体吸收；出口段管路做成螺旋状尽可能加长来降低管段沿程温度梯度，从而降低试验段流体的散热损失；量热器维持 10KPa 真空来减少导热、对流引起的散热损失；在管路和腔体中间包铝锡纸减少辐射损失。量热器置于高温恒温槽中，PID 温度控制仪使量热器内温度与管壁温度保持一致，减少对周围的散热。实验过程中需要测量和记录的参数包括：流体的质量流量  $q_m$ ；微型加热器的加热功率  $P$ ；测试段进出口温差  $\Delta T$ 。最终通过上式可以得到实验流体的比定压热容值。

## 4.2 试验系统可靠性标定

乳化煤油在流动加热过程中会发生复杂的相态变化，为了验证实验测量系统的准确度和测量数据的可靠性，在开始测量乳化煤油的比定压热容之前，实验选取不同性质的测试工质对所搭建的试验系统进行标定，本实验选用的标定物分别为去离子水、正己烷、二氧化碳以及正辛烷与正庚烷的二元混合物。分析测量的比定压热容数值，同时将试验结果与美国国家标准及技术研究所（NIST）的数据互相对比，其偏差程度分别用相对偏差（PD），相对偏差绝对平均值（AAD）和最大相对偏差（MAD）表示：

$$PD = \left( \frac{c_{exp}}{c_{lit}} - 1 \right) \times 100\% \quad (4-2)$$

$$AAD = \frac{\sum_{i=1}^n abs(PD_i)}{n} \quad (4-3)$$

$$MAD = \max(abs(PD_i)) \quad (4-4)$$

式中： $c_{exp}$ 表示实验测量比热容值； $c_{lit}$ 表示参考比热容值。所用测试工质的

基本参数指标见表 4.2。

表 4.2 测试工质参数

名称	来源	纯度/%	临界压力/Mpa	临界温度/K
去离子水	自制	≥99.9	4.11	591.8
二氧化碳	西安亚泰气体有限公司	≥99.8	7.39	304.2
正己烷	国药试剂	≥99.5	3.03	507.4
正辛烷	国药试剂	≥99.0	2.51	569.2
正庚烷	国药试剂	≥99.0	1.62	474.9

#### 4.2.1 去离子水比定压热容测量

量热计在压力  $P=3.0\text{MPa}$ ,  $T=330\sim 510\text{K}$  范围内测量去离子水的比定压热容, 将试验测量值与参考值 (取自 NIST REFPROP 9.0) 进行对比, 如图 4.1 所示, 去离子水的比定压热容测量值相对与参考值的误差离散分布如图 4.2 所示, 具体测量数据详见附录-表 1。

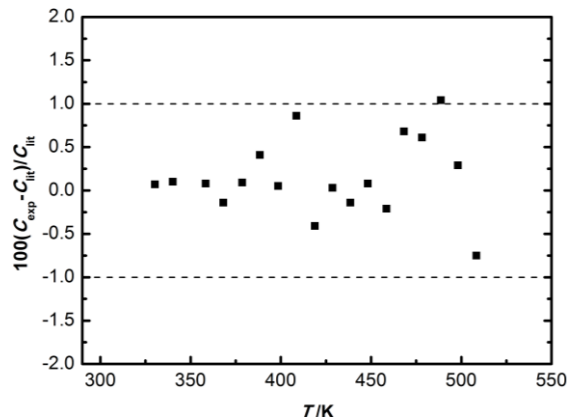
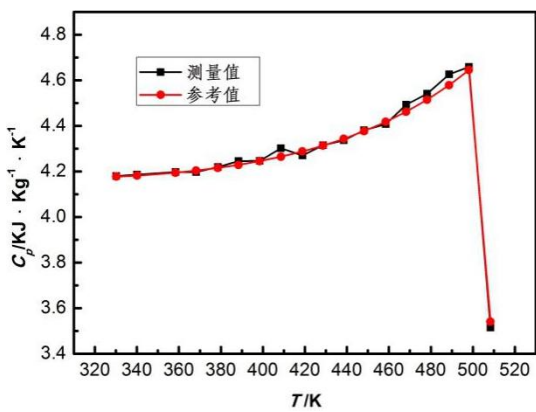


图 4.1 去离子水比定压热容随温度变化曲线

图 4.2 测量值相对于参考值的误差分布

从图 4.1 中可以看出, 去离子水比定压热容测量结果与参考值高度吻合, 在压力  $P=3.0\text{MPa}$  时, 去离子水比定压热容测量值与参考值的最大相对偏差为 1.04%, 相对偏差绝对平均值为 0.33%; 图 4.2 给出了去离子水的比定压热容测量值相对于参考值的误差分布, 除个别测试点外均位于  $\pm 1.0\%$  偏差区域以内, 测量结果充分证明了该套流动型在线比热测量系统对于不可压缩液体具有较高的测量精度和系统可靠性较高。

#### 4.2.2 正己烷比定压热容测量

实验通过测量正己烷在温度 342.0-591.2K，压力 3.07Mpa 下的比定压热容来进一步检测实验装置的可靠性。实验测量值随温度变化如图 4.3 所示，正己烷的比定压热容测量值相对与参考值的误差离散分布如图 4.4 所示，具体测量数据详见附录-表 2。

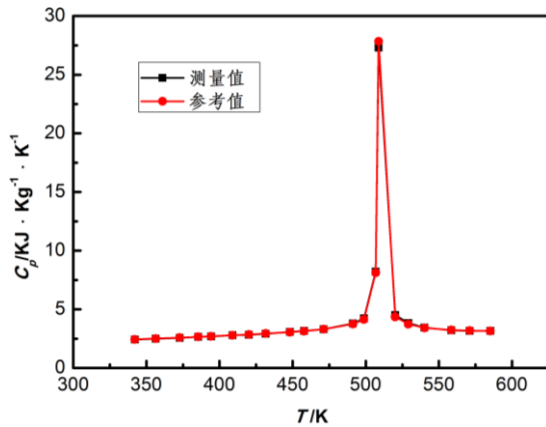


图 4.3 正己烷比定压热容随温度变化曲线

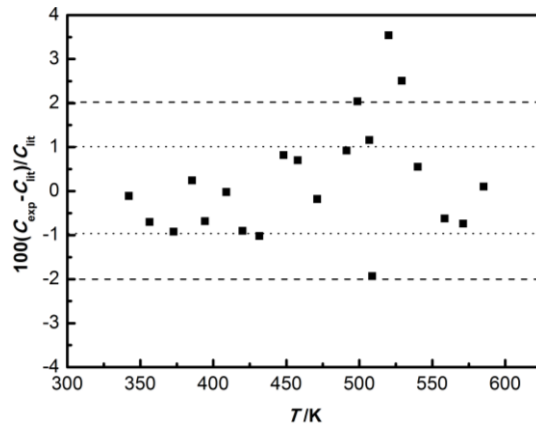


图 4.4 测量值相对于参考值的误差分布

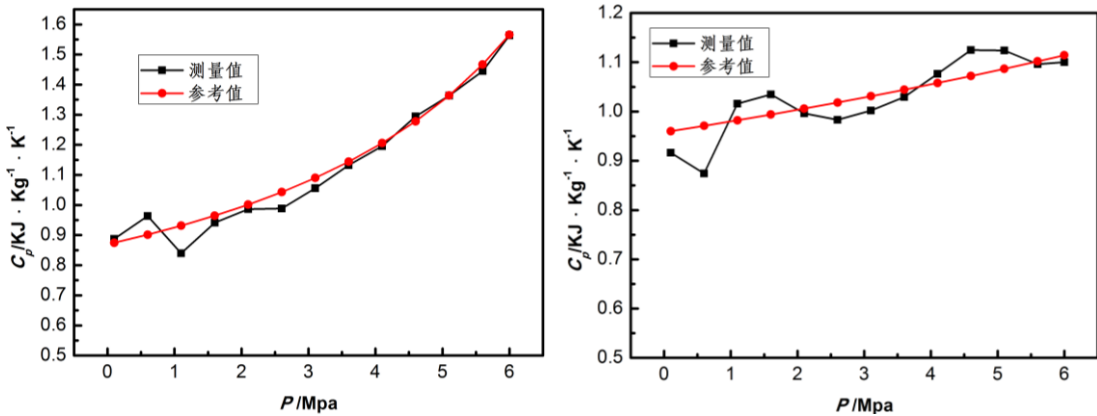
该实验中测试压力稍高于正己烷的临界压力，随温度的升高测试流体一次经历液态和超临界状态。如图 4.3 所示，正己烷的比定压热容随温度的增高出现先增大后减少的峰值变化规律，在 508.8K 附近出现峰值；正己烷比定压热容测量结果的最大偏差为 3.54%，相对偏差绝对平均值为 0.98%，实验测量值相对于参考值的误差分布如图 4.4，测量结果中 92%的数据位于 $\pm 2.0\%$ 的误差区间，78%的数据位于 $\pm 1.0\%$ 的偏差区域内，超临界温度点附近大比热区间内的数据测量误差较大，说明了该比热测量系统在测量物质大比热区间时误差较大，但是整体数据误差都在 $\pm 4.0\%$ 区间以内，由此证明了该套比定压热容测量系统对于超临界压力流体比热容测量的可靠性。

#### 4.2.3 二氧化碳比定压热容测量

为了验证系统对于气体比热容测试的适用性，选用二氧化碳作为测试工质，气体在测量过程中温度控制不易调节，而压力的调节比较容易实现，故二氧化碳比热容的标定采用定温变压的操作方法，测量温度为  $T=323.2\text{K}$  和  $T=423.2\text{K}$ ， $P=0.1\text{Mpa}-6.0\text{Mpa}$ ，此过程二氧化碳处于可压缩气体状态。二氧化碳比热容随压力变化曲线如图 4.5 所示，比热容测量值相对于参考值的误差分布如图 4.6 所示，

具体测量数据详见附录-表 3。

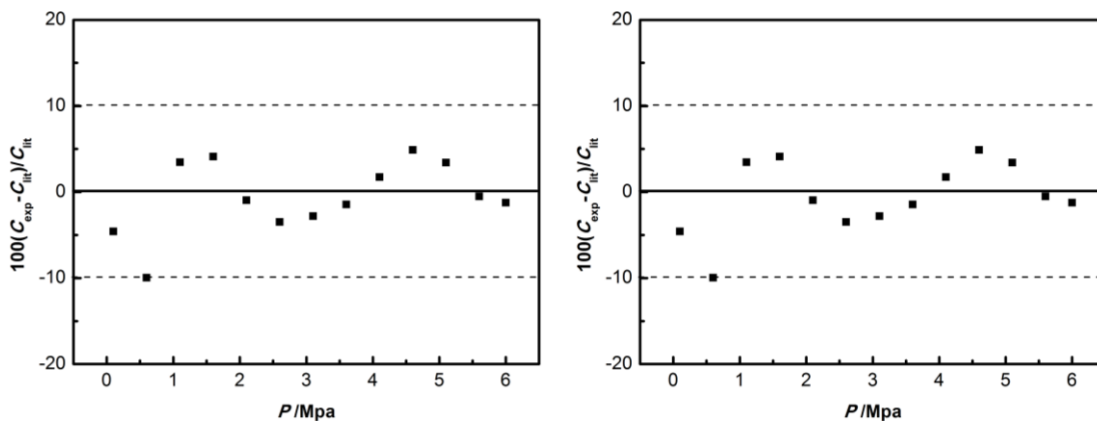
从图 4.5 可以看出，二氧化碳比热容测量结果与参考值存在一定的偏差，当温度  $T=323.2\text{K}$  时，比热容测量值最大相对偏差为 9.85%，相对偏差绝对平均值为 2.71%；当温度  $T=423.2\text{K}$  时，比热容测量值最大相对偏差为 9.96%，相对偏差绝对平均值为 3.27%。从图 4.6 中可以发现，所有比热容测量结果的偏差均在  $\pm 10\%$  的范围内，其中 85% 的数据偏差在 5% 的范围之内；而出现偏差较大的均在压力较小时段，此时二氧化碳比热容较小，误差影响较大。由此可见，相比于液体比热容测量的高精度，对于可压缩气体比热容测量精度不是很高，但对于工程而言仍具有一定的适用性。



(a)  $T=323.2\text{K}$  下比热容随压力变化曲线

(b)  $T=423.2\text{K}$  下比热容随压力变化曲线

图 4.5 二氧化碳比热容随压力变化曲线



(a)  $T=323.2\text{K}$  下误差分布

(b)  $T=423.2\text{K}$  下误差分布

图 4.6 二氧化碳比热容测量值相对于参考值的误差分布

#### 4.2.4 二元混合流体比定压热容测量

为了进一步验证该比热容测量系统对于混合碳氢化合物在超临界压力条件下

比热容测量的可靠性, 选用正辛烷与正庚烷的二元混合物作为测试介质, 其中正辛烷与正庚烷的质量百分比 1:1。测量条件选用超临界压力  $P=5.0\text{MPa}$ ,  $T=320\sim 580\text{K}$  范围内, 混合溶液比定压热容随温度变化曲线如 4.7 所示, 测量值相对于参考值误差分布如图 4.8 所示, 具体测量数据详见附录-表 4。

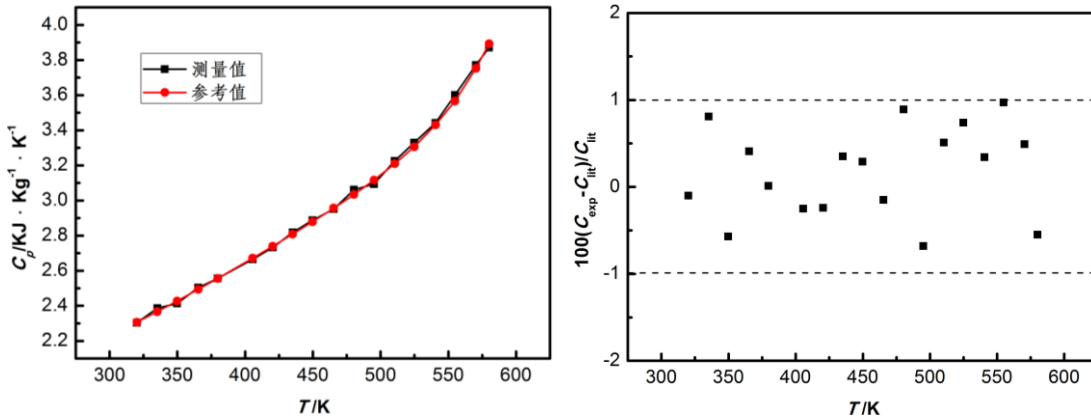


图 4.7 二元混合物比定压热容随温度变化曲线

图 4.8 测量值相对于参考值的误差分布

从图 4.7 可以看出正辛烷-正庚烷二元混合物比定压热容测量值与参考值重合度较高。实验测量值与参考值最大偏差为 0.97%, 相对偏差绝对平均值为 0.46%。从图 4.8 中可以发现, 测量数据的偏差均在  $\pm 1.0\%$  以内。从此推知, 本文基于能量守恒的量热计理论搭建的流动型比定压热容在线测量系统对于混合物质比定压热容的测量是完全可行且具有较高的测量精度。

### 4.3 乳化煤油比定压热容测量结果及分析

物质的比热容是一种基本属性, 一般不随重量、形状的改变而改化; 如果温度不同, 物质的比热容会不一样, 主要的原因是分子间的作用力不一致, 故不同的压力或相态, 物质的比热容亦不一样。由此可以可知, 与乳化煤油的比热容有关的因素有: 含水量、温度、压力等。

在选用去离子水、正己烷、二氧化碳及质量比 1:1 的正辛烷-正庚烷二元混合溶液对比热测量实验系统可靠性进行验证的基础上, 本实验选取含水质量分数 10%、20%、30%、50% 四种乳化煤油在压力 3.0MPa、4Mpa、5Mpa, 温度 301~880K 下的比定压热容进行测量, 并分析乳化煤油比热容测量数据, 具体测量数据详见附录-表 5。

### 4.3.1 含水量对比热容的影响

乳化煤油作为冷却剂，同时还是燃料，含水量的增加能提高燃料热沉，提升冷却性能，但过多的水会增加燃料重量，对热沉进一步提高不明显。实验测量乳化煤油含水范围为 10%~50%，本文选取含水质量分数 10%、20%、30%、50% 四种乳化煤油在压力 3.0~5.0MPa，温度 301~880K 下的比定压热容进行测量，同一压力下四种含水量不同的乳化煤油的比热容随温度变化曲线如图 4.9 所示。

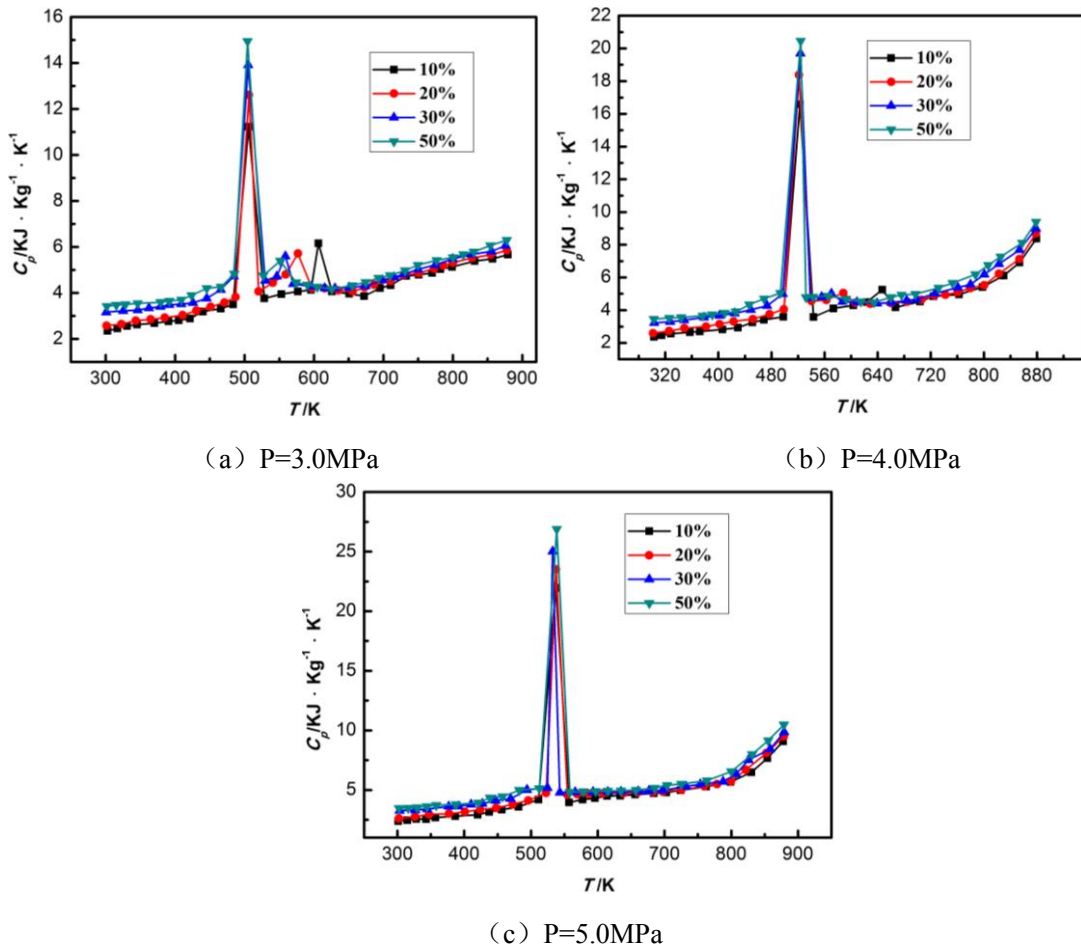


图 4.9 不同含水量的乳化煤油在同一压力下比热随温度变化曲线

从图 4.9 中可以看出，同一压力下不同含水量的乳化煤油比定压热容随温度变化趋势大致相同；在超临界压力下，乳化煤油的定压比热容与温度的关系为非线性趋势变大。由图 (a) 可以发现，当测试温度小于 450K 时，乳化煤油处于液体状态，比定压热容随温度的升高呈现近似于线性增长的趋势；温度达到 507K 左右时，比定压热容出现一个峰值，此时水在 3MPa 下达到汽化临界点，由液态变为气态，吸收大量汽化潜热，水的蒸发潜热比煤油燃料要大一个数量级，其物理热沉较大，故含水量越高比定压热容变化越剧烈，其所对应的比热容峰值越大；

当温度达到 550~610K 之间时, 出现第二个峰值, 此时乳化煤油在压力 3MPa 下达到拟临界点, 随着含水量增加, 乳化煤油临界点提前, 峰值对应的测量温度不断前移, 且所对应峰值呈减小趋势。从图 (b) 可以看出, 在 4MPa 下不同含水量的乳化煤油比定压热容随温度变化的趋势与 3MPa 下的相似, 50%含水量的乳化煤油第二个峰值几乎消失, 其它含水量的乳化煤油第二个峰值显著减小。从图 (c) 可知, 在压力 5MPa 下, 各个含水量的乳化煤油所对应的第二个峰值均消失。由以上所有温度-比热图可以得出, 乳化煤油随含水量的增加, 比热容相对应增大。

#### 4.3.2 压力和温度对比热容的影响

图 4.10 为 10%、20%、30%、50%含水量的乳化煤油在不同压力下比热容随温度变化的曲线。

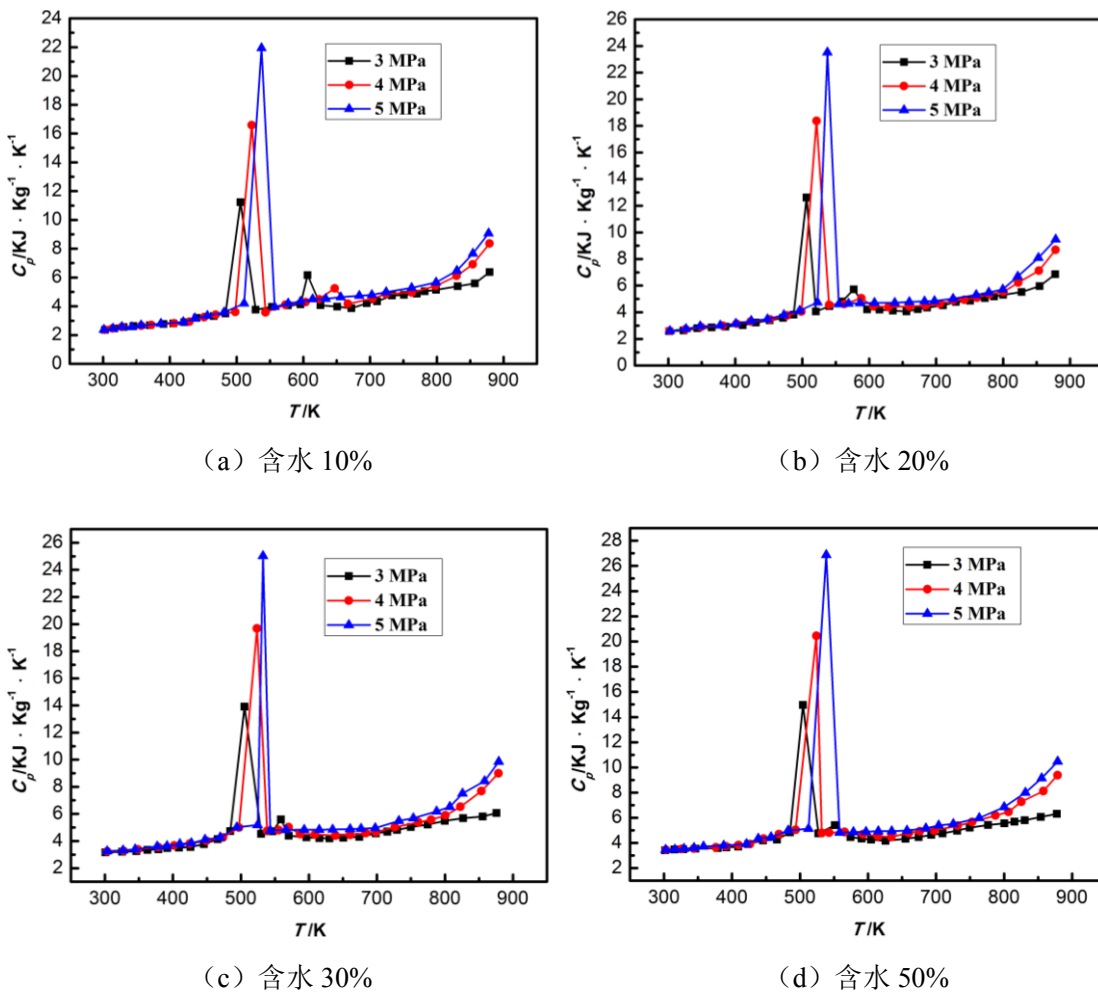


图 4.10 同一含水量的乳化煤油在不同压力下比热随温度变化曲线

从以上四个图中可以看出, 在压力 3MPa、4MPa、5MPa 下, 含水量 10%、20%的乳化煤油的比热容与温度变化的趋势相近, 含水量 30%、50%的乳化煤油

的比热容随温度变化的规律相同。在温度较低区间，乳化煤油的比热容在定压下因温度的上升逐渐变大，压力对比热容的作用不明显，此阶段乳化煤油处于液体，影响流体比热的主要因数是温度；当流体温度上升到接近所对应压力下水的临界温度或拟临界温度时，比热容出现一个峰值，所对应压力越大，比热容峰值越大；随流体温度进一步升高，乳化煤油流动过程中伴随剧烈变化，可能再一次出现峰值点。大比热区后，流体的可压缩性逐渐增加，乳化煤油的比热容随着压力的增加而增大，当大于 850K 后，乳化煤油开始发生吸热型化学反应，比定压热容值增大较快，此时的压力增加有助于化学反应的进行，所以压力越大，测得的比热容值越大。从航空煤油在超、亚临界压力条件下换热性能分析中可以发现，乳化煤油的换热性能大致可以概括为四个阶段，常规换热阶段、首次换热加强阶段、换热恶化阶段、第二次换热加强阶段，温度较低阶段的变化属于常规换热阶段；比热容较大阶段的变化属于首次换热强化阶段，此阶段流体已达到拟沸腾区域。

从图 (a) 中可以看出，随压力的增大，乳化煤油的第一个临界点所对应的峰值不断增大，且出现峰值点所对应的温度不断后移，随温度继续升高，3MPa、4MPa 下乳化煤油会出现第二个峰值点，而 5MPa 下乳化煤油的比热容随温度的升高而增大，没有峰值出现；对比分析图 (a)、(b)、(c)、(d) 可以得出，在温度 500K 以内，乳化煤油比热容不随压力的增加有明显变化，表明压力对此阶段比热容基本无影响；对于含水量 10% 的乳化煤油， $P=3.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 606K， $P=4.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 647K， $P=5.0\text{MPa}$  时，比热变化趋于平滑，拟临界温度很难从比热曲线中进行判断；对于含水量 20% 的乳化煤油， $P=3.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 576K， $P=4.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 588K， $P=5.0\text{MPa}$  时，比热变化趋于平滑，拟临界温度很难从比热曲线中进行判断；对于含水量 30% 的乳化煤油， $P=3.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 558K， $P=4.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 570K， $P=5.0\text{MPa}$  时，比热变化趋于平滑，拟临界温度很难从比热曲线中进行判断；对于含水量 50% 的乳化煤油， $P=3.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 551K， $P=4.0\text{MPa}$ ，临界温度约为 565K， $P=5.0\text{MPa}$  时，比热变化趋于平滑，拟临界温度很难从比热曲线中进行判断。

#### 4.4 乳化煤油与 RP-3 的比定压热容对比分析

在压力 3MPa，温度 301~880K，乳化煤油与典型航空煤油 RP-3 进行对比，结果如图 4.11 所示。

乳化煤油比定压热容随温度升高出现两个峰值点，与航空煤油 RP-3 相比，比定压热容增大；乳化煤油临界点较航空煤油 RP-3<sup>[71]</sup>大大提前，且对应峰值相对减小，因为水在高温后的比热容值较小。含水量的不同对煤油的拟临界温度和比热容峰值会产生一定的影响。尤其高温，温度达到约 760K，乳化煤油开始发生氧化和裂解反应，其化学热沉增大，比定压热容随温度升高逐渐增大；同时水的加入能够大大减轻煤油的氧化结焦，换热性能增强，掺入水的乳化煤油作为冷却剂可以提升燃料冷却壁温的能力。

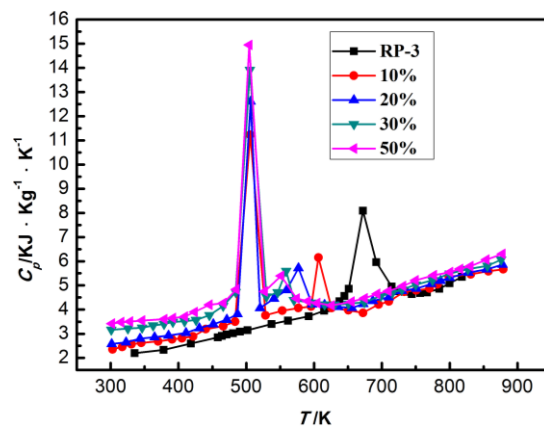


图 4.11 不同含水量的乳化煤油和 RP-3 在 3MPa 下比热随温度变化曲线

航空煤油 RP-3 一直作为高超声速冲压发动机的燃料，随飞行马赫数的提高，冷却问题是目前需要解决的难题，分析上图可以发现，在高温区，乳化煤油的比热容明显高于航空煤油 RP-3，最重要的是，航空煤油 RP-3 在高温时会结焦析碳，而乳化煤油因为含有一定分量的水，在高温时，结焦析出的碳可以跟水发生水煤气反应，减少碳在内部堵塞。在相同工况下和热负荷下，乳化煤油作为燃料和制冷剂能更好的降低发动机壁面的温度，同时能一定程度的减少析碳。

#### 4.5 乳化煤油与碳氢燃料、纯水之间比定压热容分析

含水量 20%、30%的乳化煤油与 EHF-01 碳氢燃料<sup>[72]</sup>及水（取自 NIST REFPROP 9.0）的比热容在压力 3.0MPa 下随温度变化曲线如图 4.12 所示。

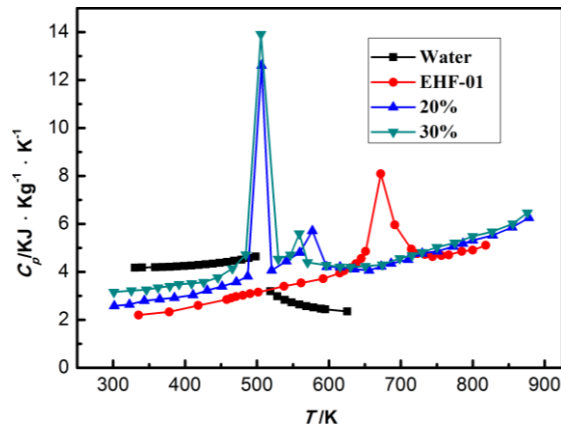


图 4.12 不同含水量的乳化煤油和 EHF-01 及水在 3MPa 下比热随温度变化曲线

煤油所含成分比较复杂，主要包括环烷烃、烯烃、苯类化合物、醇和酮。掺入水后的乳化煤油的比热容不是水和煤油比热容按质量分数简单的线性叠加，因为乳化煤油会随温度的升高发生复杂的化学反应，同时含水量的不同也会产生一定的影响，改变其对应的临界温度和所对应的峰值。水的掺入会影响乳化煤油发生化学反应的温度，故目前还无法拟合一个通用的公式来计算乳化煤油的比热容。

通过图 4.12 可以发现，在低于纯水比热峰值的温度区域内，乳化煤油处于液体，定压比热容随含水量的增加而相对增大，但同一工况下纯水的比热容较大。但在高于碳氢燃料 EHF-01 的比热峰值的温度区域，随温度增加到 750K 附近，乳化煤油发生裂解反应，产生的氢气会促进乳化煤油的燃烧，掺入的水会抑制燃料结焦加速裂解反应，化学热沉增大，吸热能力提高。

#### 4.6 本章小结

本章主要详细说明了该实验的原理，采用测量不同性质的物质的比定压热容对测量系统的准确度与可靠性进行了验证，测量的物质包括去离子水、正己烷、二氧化碳以及质量百分比 1:1 的正辛烷-正庚烷的二元混合物，将测量结果与文献参考数据进行比较，标定流体比热容测量值与参考值的相对偏差均在  $\pm 4\%$  以内，充分验证了本实验系统的可靠性与测量精度。在此基础上，利用该流动型绝热量热计测量了含水质量分数为 10%、20%、30%、50% 的四种乳化煤油的比定压热容，温度测量范围为 301K~880K，压力为 3.0-5.0MPa，分析了含水量、温度及压力对乳化煤油比定压热容的影响，从每种含水量的乳化煤油比热容随温度变化曲线图上，获得了相应压力下的临界温度或你临界温度值；同时将四种含水量不同的乳化煤油分别与典型航空煤油 RP-3、碳氢燃料 EHF-01 及纯水的比定压热容进

行了对比分析。最后分析了该实验系统的不确定度，详细介绍了实验误差的来源及减小误差的措施，通过实验参数结果的不确定性分析，计算了各个参数的不确定度并合成了该流动型绝热量热计测量比定压热容的相对扩展不确定度。

## 5 结论与展望

### 5.1 本文工作总结

本文以高超声速飞行器主动冷却热防护技术为研究背景,进行了乳化煤油超临界压力比热容测量研究分析。以四种不同含水量的乳化煤油为测试介质,完成了新型燃料乳化煤油比定压热容的在线测量,获得乳化煤油比热容数据,这些数据对于提高煤油吸热性能和冷却设计具有一定的参考意义,研究具备了一定的应用价值。本文开展和完成的工作有:

1.在调研流体比热容测量方法和原理的基础上,基于能量守恒的量热计理论,搭建了一套流动型比定压热容在线测量系统,介绍了流动型比定压热容的测量原理,详细分析了该系统的各个组元,特别是核心部件量热计,在设计过程中,采用加热器插入管内直接给流体加热来减小热损失。

2.本文设计的流动型绝热量热计可实现温度 301-980K 和压力 0.1-10MPa 范围内流体比定压热容的在线测量,选取了标准物离子水、正己烷、二氧化碳以及质量百分比 1:1 的正辛烷-正庚烷的二元混合物进行比热容测量,并将测量结果与文献参考数据进行比较,标定流体比热容测量值与参考值的相对偏差均在 $\pm 4\%$ 以内验证了实验系统的准确度和可信度。利用该系统完成了含水量 10%、20%、30%、50%四种乳化煤油在温度 301-880K 和压力 3.0-5.0MPa 条件下的比定压热容测量,分析了比热容随温度变化曲线的规律以及与典型航空煤油 RP-3、碳氢燃料 EHF-01 及纯水的比热容进行了对比。通过不确定度分析,该套测量系统测量比定压热容的相对扩展不确定度为 2.42%-4.2%。

研究过程中主要结论有:

(1) 乳化煤油的比定压热容随温度的增加会出现两个峰值点;同一压力下乳化煤油随含水量的增加,水临界点对应的峰值不断提高;乳化煤油临界点对应的峰值呈减小的趋势,且对应临界温度往前推移。

(2) 不同含水量的乳化煤油的定压比热容随温度变化的趋势大致相似。在温度较低区间,乳化煤油的比热容在定压下随温度的上升而变大,压力对比热容的作用不明显;大比热区后,流体的可压缩性逐渐增加,乳化煤油的比热容随着压力的增加而增大,并开始发生吸热型化学反应,比定压热容值增大较快,此时的压力增加有助于化学反应的进行,所以压力越大,测得的比热容值越大。

(3) 乳化煤油比定压热容的第一个峰值随压力的增大而提高, 第二个峰值随压力的增大而下降, 甚至峰值消失, 变化趋于平滑。

(4) 与典型航空煤油 RP-3、碳氢燃料 EHF-01 的定压比热容进行对比分析, 结果表明乳化煤油比定压热容较大; 在相同工况和热负荷下, 乳化煤油吸热能力增强, 更能起到降低壁温、减少析碳的堆积, 作为冷却剂可以提升燃料的冷却性能。该实验测量的乳化煤油比热容数据对于提高煤油吸热性能和冷却设计具有一定的参考意义。

## 5.2 工作展望

选用吸热型燃料作为高声速飞行器的制冷剂来冷却发动机的壁温是一个具有挑战和重要应用的课题, 也是目前高超声速冲压发动机发展过程中急需解决的关键技术。吸热型乳化煤油比定压热容等物性的研究对飞行器热防护结构的优化和冷却设计至关重要。目前对于吸热型乳化煤油定压比热容等热物性测量的研究比较少, 公开的相关报道也很少, 需要在后续工作中对其更深入细致的研究, 对此有如下的建议:

(1) 将进一步研究掺混不同物质的乳化煤油的传热机理, 以期得到大比热、大热沉、高冷却性能的乳化煤油燃料。

(2) 乳化煤油作为冷却剂, 同时还是燃料, 含水量的增加能提高燃料热沉, 提升冷却性能, 但过多的水会增加燃料重量, 对热沉进一步提高不明显, 且还要确保满足作为燃料的要求, 可以进一步研究具体多少含水量的乳化煤油做合适。

(3) 量热器是该测量比定压热容系统的关键核心, 采用先进技术手段, 最大程度地实现绝缘跟密封要求, 减少测量过程中热量损失, 进一步提高测量精度。

## 致谢

时光匆匆,三年的研究生生活旅程马上到达终点,回首这段美好的学生时光,感触颇多。2015年是我人生中的一个新的起点,怀揣着那份对科学研究的懵懂向往,踏入西安建筑科技大学大门,那一刻起,建大学子踏实务实、积极上进是学风深深的感染着我。在毕业论文即将写完时刻,对在学习上和生活上给予帮助的全部人们表示最诚恳的谢意及最衷心的祝福。

首先感谢我的导师郭亚军老师,感谢郭老师三年来生活上亲切的关怀和学术研究上悉心的指导,本论文从课题调研、实验设计到论文写作,无不凝聚着郭老师的心血与汗水;郭老师平易近人、朴实无华、和蔼可亲的人格魅力及严谨的学术态度、广博的学识,无论从学习上还是生活上,都将深深影响我,使我受益终身。在此,向郭老师致以崇高的敬意,祝福郭老师身体健康,工作顺利。

其次我要感谢西安交通大学博士研究生冯松师兄,在实验期间,冯师兄给予了巨大的帮助,教会了我怎样做科学研究,从最初实验原理与方法探讨到实验台的搭建及实验系统优化与改进的过程中都提出了许多宝贵的建议。对于实验数据的记录与处理以及最后论文的撰写和修改,都对我进行了悉心的指导,在实验过程中遇到的各种困难,冯师兄都毫不吝啬的为我一一解答,冯师兄友善的性格及扎实的专业基础都让我受益匪浅。衷心的感谢冯松师兄在学习上给我的帮助。

再次我要感谢西安交通大学的毕勤成老师,在西安交通大学多相流国家重点实验室进行毕业课题实验期间,为我提供了昂贵的实验器材和宝贵的实验场地,实验过程中也帮助我解决了许多专业的难题,毕老师严谨的治学态度,诲人不倦的高尚师德,令人敬佩。在此,表示崇高的敬意和诚挚的感谢。

同时,我要感谢高东、李琦、王永杰三位室友,谢谢你们生活上对我的帮助;感谢荆少萌、董新宇、曹冬冬,王帅等师兄在学习上的指导,我的同门胡琼宇、焦瑞,师妹耿辰给我的关心和鼓励。

最后,我要感谢我的家人朋友在我的求学路上给予的极大支持,才是我得以完成学业,谢谢你们!

贺宇锋

2018年5月15日

## 参考文献

- [1] 王佩广, 刘永绩, 王浚. 高超声速飞行器综合热管理系统方案探讨[J]. 中国工程科学, 2007, 9(2):44-48.
- [2] 沈海军, 程凯, 杨莉. 近空间飞行器[M].北京:航空工业出版社,2012.
- [3] 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(06):658-673.
- [4] 黄伟, 罗世彬, 王振国. 临近空间高超声速飞行器关键技术及展望[J].宇航学报,2010,31(05):1259-1265.
- [5] 贺芳, 禹天福, 李亚裕. 吸热型碳氢燃料的研究进展[J].导弹与航天运载技术,2005,(01):26-29.
- [6] 郭永胜, 方文军, 林瑞森. 吸热型碳氢燃料热裂解的结焦抑制[J].浙江大学学报(工学版),2005,39(04):538-541.
- [7] 刘世俭, 刘兴洲. 超燃冲压发动机可贮存碳氢燃料再生主动冷却换热过程分析[J].飞航导弹,2009,(03):48-52.
- [8] 郭永胜, 张玲玲, 魏会, 等. 改善吸热型碳氢燃料热管理能力的研究进展[J].石油学报(石油加工),2011,27(05):822-828.
- [9] 符全军, 燕珂, 杜宗罡, 等. 吸热型碳氢燃料研究进展[J]. 火箭推进, 2005, 31(5):32-36.
- [10] 汪新智, 王天宇, 胡彦伟, 等. 高超声速飞行器主动冷却系统流固耦合模拟研究[C]// 中国力学大会 2011 暨钱学森诞辰 100 周年纪念大会. 2011.
- [11] 王金涛. 高热流条件下碳氢燃料主动冷却流动换热数值研究[D]. 南京航空航天大学, 2013.
- [12] Pizzarelli M, Nasuti F, Onofri M. Coupled Wall Heat Conduction and Coolant Flow Analysis for Liquid Rocket Engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 29 (1): 34-41.
- [13] 乐嘉陵, 刘陵. 高超声速飞行器的碳氢燃料双模态超燃冲压方案研究[J]. 实验流体力学, 1997(2):1-13.
- [14] 马军军. 碳氢燃料发动机主动冷却系统优化设计研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.

- [15] Marc B, Gregory A, Nicolas G, et al. Measurements for fuel reforming for scramjet thermal management and combustion optimization: 2009 status of the COMPARER project. 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [16] Pizzarelli M, Nasuti F, Onofri M. Coupled Wall Heat Conduction and Coolant Flow Analysis for Liquid Rocket Engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 29(01): 34-41.
- [17] 许滢, 刘卫华, 刘文怡, 等. 吸热型碳氢燃料研究现状与发展[J]. 中国民航飞行学院学报, 2017, 28(2):12-18.
- [18] Powell OA, Edwards J T, Norris R B, et al. Development of hydrocarbon-fueled scramjet engines: the hypersonic technology (HyTech) program[J]. Journal of Propulsion & Power, 2001, 17(6):1170-1176.
- [19] 赵祖亮. 吸热型碳氢燃料结焦与超临界压力下传热性质研究[D]. 浙江大学理学院 浙江大学, 2006.
- [20] 王夕. 超临界压力吸热型碳氢燃料热裂解及传热特性研究[D]. 清华大学, 2013.
- [21] Faulkner R, Weber J. Hydrocarbon scramjet propulsion system development, demonstration and application[C]// International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 1999.
- [22] 赵小明, 赵冠春. 绝热量热法测量比热容的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 1995(5):12-17.
- [23] Coulter LJ, Bass RW, Ernst RC. Thermal-energy management for air breathing hyper-velocity vehicles. 27th Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989.
- [24] Edwards T. USAF supercritical hydrocarbon fuels interests[C]// Aerospace Sciences Meeting. 1993.
- [25] Maurice L Q, Lander H, Edwards T, et al. Advanced aviation fuels: a look ahead via a historical perspective[J]. Fuel, 2001, 80(5):747-756.
- [26] Chen A, Dang L. Characterization of supercritical JP-7's heat transfer and coking

- properties[C]// Aiaa Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 2002:9324-9327.
- [27] Huang H, Spadaccini L J, Sobel D R. Fuel-Cooled Thermal Management for Advanced Aero Engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2004, 126(2):284-293.
- [28] And R A P, Magee J W. Specific Heat Capacity at Constant Volume for R125 and R410A at Temperatures from (300 to 400) K and Pressures to 20 MPa[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2005, 50(5):1727-1731.
- [29] Gascoin N, Gillard P, Dufour E, et al. Validation of Transient Cooling Modeling for Hypersonic Application[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2007, 21(1):86-94.
- [30] Outcalt SL, Laesecke A, Brumback KJ. Thermophysical Properties Measurements of Rocket Propellants RP1 and RP2[J]. Journal of Propulsion & Power, 2009, 25(5):1032-1040.
- [31] Bruno T J. Thermodynamic, Transport and Chemical Properties of "Reference" JP-8[J]. 2006.
- [32] Dewitt M J, Edwards T, Shafer L, et al. Effect of Aviation Fuel Type on Pyrolytic Reactivity and Deposition Propensity under Supercritical Conditions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(18):10434-10451.
- [33] Abdulagatov I M, Azizov N D. Heat capacity of rocket propellant (RP-1 fuel) at high temperatures and high pressures[J]. Fuel, 2011, 90(2):563-567.
- [34] 胡志宏, 陈昕宽. 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):62-65.
- [35] 侯凌云, 王慧, 钟北京, 等. 超临界压力下乳化煤油传热性能数值研究[J]. 推进技术, 2006, 27(6):488-491.
- [36] 范学军, 俞刚. 超临界煤油超声速燃烧特性实验[J]. 推进技术, 2006, 27(1):79-82.
- [37] 周伟星, 鲍文, 段艳娟, 等. 超临界条件下管内乳化煤油燃料结焦换热研究[C]// 中国工程热物理学会 2008 年传热传质学学术会议. 2008.
- [38] 朱锷, 邓宏武, 王英杰, 等. 超临界压力下航空煤油结焦换热综述及实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11):2472-2478.

- [39] 冉振华, 徐国强, 邓宏武, 等. 超临界压力下航空煤油在并联管中流量分配特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1):63-68.
- [40] Deng H W, Zhu K, Xu G Q, et al. Isobaric Specific Heat Capacity Measurement for Kerosene RP-3 in the Near-Critical and Supercritical Regions[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 57(2):263-268.
- [41] 龚先杰. 乳化碳氢燃料模型化合物热稳定性能研究[D]. 浙江大学, 2013.
- [42] 潘辉, 冯松, 刘朝晖, 等. 航空煤油 RP-3 热裂解结焦流动换热特性实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7):7-12.
- [43] Bier K, Büsser J, Ernst G. Experimental heat capacities  $C_p$  of non-ideal binary gaseous mixtures from  $C_3H_8$ ,  $i-C_4H_{10}$ ,  $CHF_2Cl$ , and  $C_2F_5Cl$ [J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 1973, 5(1):83-96.
- [44] Steele W V, Chirico R D, Knipmeyer S E, et al. High-temperature heat-capacity measurements and critical property determinations using a Differential Scanning Calorimeter: Results of measurements on toluene, tetralin, and JP-10[J]. 1989.
- [45] Nakagawa S, Hori T, Sato H, et al. Isobaric heat capacity for liquid 1-chloro-1,1-difluoroethane and 1,1-difluoroethane[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 1993, 38(1):70-74.
- [46] Nakagawa S, Sato H, Watanabe K. Isobaric heat capacity data for liquid HCFC123.( $CHCl_2CF_3$ ), 2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane)[J]. Journal of Chemical and Engineering Data; (United States), 1991, 36:2(2).
- [47] Sandarusi J A, Mulia K, Yesavage V F. An automated flow calorimeter for the determination of liquid and vapor isobaric heat capacities: Test results for water and n - pentane[J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(2):1810-1821.
- [48] Kubota H, Sotani T, Kunimoto Y. Isobaric specific heat capacity of difluoromethane at pressure up to 0.5MPa[J]. Fluid Phase Equilibria, 1995, 104:413-419.
- [49] Sharygin A V, Wood R H. Volumes and heat capacities of aqueous solutions of hydrochloric acid at temperatures from 298.15 K to 623 K and pressures to 28 MPa[J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 1997, 29(2):125-148.
- [50] Bhuiyan M M H, Hakin A W, Liu J L. Densities, Specific Heat Capacities,

- Apparent and Partial Molar Volumes and Heat Capacities of Glycine in Aqueous Solutions of Formamide, Acetamide, and N, N -Dimethylacetamide at  $T = 298.15$  K and Ambient Pressure[J]. *Journal of Solution Chemistry*, 2010, 39(6):877-896.
- [51] Miyazawa T, Kondo S, Suzuki T, et al. Specific Heat Capacity at Constant Pressure of Ethanol by Flow Calorimetry[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012, 57(6):1700-1707.
- [52] 时家增, 何志迈. 流动卡计测量加压气体比热实验台研制[C]// 全国热物性学术讨论会. 1987.
- [53] 方文军, 林瑞森, 李彬, 等. 复杂烃类混合物的蒸汽热容[J]. *高校化学工程学报*, 1995(3):215-220.
- [54] 赵冠春, 宋小明, 赵小明, 等. 1—1—二氟乙烷气体比热的实验测量和理论计算[J]. *高校化学工程学报*, 1992(4):290-296.
- [55] 赵小明, 刘志刚, 陈钟颀. 流动型高压液体及其混合物定压比热容测量装置的建立[J]. *上海交通大学学报*, 1999, 33(8):1008-1012.
- [56] 赵小明, 刘志刚, 陈钟颀. 流动型量热法测量液体比热容实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 1999, 33(3):52-55.
- [57] 张立胜. 流动型比热容实验台的建立和替代燃料互溶性实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
- [58] 刘凤军, 郑振铎, 李军超. 流动型比热容实验台的建立[J]. *科园月刊*, 2010(11):55-56.
- [59] 袁立公, 邓宏武, 徐国强, 等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 壁面结焦特性对换热的影响[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(4):832-837.
- [60] 黄淑君, 郭亚军, 杨竹强, 等. 吸热型碳氢燃料的定压比热测量研究[J]. *热能动力工程*, 2015, 30(6):833-836.
- [61] 陈则韶. 量热技术和热物性测定[M]. 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [62] 张金涛, 原遵东, 邱萍, 等. 高精密度自动绝热量热计[J]. *计量学报*, 2005, 26(4):320-325.
- [63] Yue DT, Tan Z C, Di Y Y, et al. Specific Heat Capacity and Thermal Conductivity of Foam Glass (Type 150P) at Temperatures from 80 to 400 K 1[J]. *International*

- Journal of Thermophysics, 2006, 27(1):270-281.
- [64] Haines P J, Wilburn F W. Differential thermal analysis and differential scanning calorimetry[J]. 1995:63-122.
- [65] Johnson J F, Gill P S. Analytical Calorimetry[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Letters, 1967, 5(7):603-603.
- [66] Rogge R B. Study of heat capacity measurement methods for small samples[J]. Brock University, 1990.
- [67] Gao X K, Wen X, Zhou H, et al. Novel Measurement of Isobaric Specific Heat Capacity for Kerosene RP-3 at High Temperature and High Pressure[J]. Thermochemica Acta, 2016, 638:113-119.
- [68] Tanaka K, Uematsu M. Calorimeter for measuring the isobaric specific heat capacity of fluids and fluid mixtures by the thermal relaxation method[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(3):785.
- [69] 埃克特, E.R.), 戈尔茨坦,等. 传热学测试方法[M]. 国防工业出版社, 1987.
- [70] Giaretto V, Torchio M F. Two-Wire Solution for Measurement of the Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Liquids: Experimental Design[J]. International Journal of Thermophysics, 2004, 25(3):679-699.
- [71] Hou L, Jia Z, Gong J, et al. Heat Sink and Conversion of Catalytic Steam Reforming for Hydrocarbon Fuel[J]. Journal of Propulsion & Power, 2013, 28(3):453-595.
- [72] Yang Z, Liu Z, Bi Q, et al. Design of a Flow Calorimeter for Hydrocarbon Fuel at Temperatures from (330 to 900) K and Pressures up to 6.0 MPa[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2015, 60(5):1434-1439.

## 附录

附录-表 1 去离子水比定压热容测量结果及相对误差表\*

$T/K$	$C_{p,exp}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$C_{p,lit}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\frac{\Delta C_p}{C_p} \%$	$T/K$	$C_{p,exp}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$C_{p,lit}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\frac{\Delta C_p}{C_p} \%$
330.2	4.180	4.177	0.07	428.6	4.315	4.313	0.03
340.1	4.186	4.182	0.10	438.5	4.337	4.343	-0.14
358.4	4.197	4.194	0.08	448.2	4.381	4.377	0.08
368.2	4.197	4.203	-0.14	458.5	4.408	4.418	-0.21
378.6	4.219	4.215	0.09	468.2	4.493	4.462	0.68
388.4	4.246	4.229	0.41	478.2	4.542	4.514	0.61
398.5	4.247	4.245	0.05	488.7	4.627	4.578	1.04
408.6	4.302	4.265	0.86	498.1	4.659	4.645	0.29
418.8	4.270	4.288	-0.41	508.4	3.515	3.541	-0.75

\*标准不确定度  $u(T)=0.38\text{K}$ ,  $u(p)=0.75\text{MPa}$ ; 扩展不确定度  $U_c(\rho)=0.11 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

附录-表 2 正己烷比定压热容测量结果及相对误差表\*

$T/K$	$C_{p,exp}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$C_{p,lit}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\frac{\Delta C_p}{C_p} \%$	$T/K$	$C_{p,exp}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$C_{p,lit}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\frac{\Delta C_p}{C_p} \%$
342.1	2.436	2.439	-0.11	491.2	3.793	3.758	0.92
356.4	2.492	2.508	-0.70	498.7	4.224	4.139	2.04
372.8	2.568	2.592	-0.92	506.8	8.217	8.123	1.16
385.4	2.663	2.657	0.24	508.8	27.305	27.843	-1.93
394.3	2.687	2.706	-0.68	520.1	4.511	4.357	3.54
408.9	2.788	2.789	-0.02	529.1	3.831	3.738	2.51
420.1	2.831	2.857	-0.90	540.1	3.441	3.422	0.55
431.6	2.917	2.937	-1.02	558.5	3.217	3.237	-0.62
448.1	3.084	3.059	0.82	571.1	3.163	3.186	-0.74
457.8	3.167	3.145	0.70	585.2	3.159	3.156	0.10
471.2	3.305	3.311	-0.18	591.2	3.154	3.157	-0.10

\*标准不确定度  $u(T)=0.38\text{K}$ ,  $u(p)=0.75\text{MPa}$ ; 扩展不确定度  $U_c(\rho)=0.12 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

附录-表3 二氧化碳比定压热容测量结果及相对误差表<sup>\*</sup>

$p/MPa$	$C_{p,exp}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$C_{p,lit}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$\frac{\Delta c_p}{c_p} \%$	$p/MPa$	$C_{p,exp}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$C_{p,lit}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$\frac{\Delta c_p}{c_p} \%$
T=323.2K				T=423.2K			
0.1	0.888	0.875	1.51	0.1	0.916	0.960	-4.58
0.6	0.963	0.902	6.84	0.6	0.874	0.971	-9.96
1.1	0.840	0.932	-9.85	1.1	1.016	0.982	3.45
1.6	0.941	0.965	-2.45	1.6	1.035	0.994	4.12
2.1	0.986	1.002	-1.52	2.1	0.996	1.006	-0.95
2.6	0.989	1.043	-5.21	2.6	0.983	1.018	-3.47
3.1	1.056	1.090	-3.12	3.1	1.002	1.031	-2.81
3.6	1.132	1.144	-1.02	3.6	1.029	1.044	-1.45
4.1	1.196	1.206	-0.84	4.1	1.076	1.058	1.73
4.6	1.294	1.278	1.26	4.6	1.125	1.072	4.89
5.1	1.363	1.364	-0.03	5.1	1.124	1.087	3.42
5.6	1.445	1.467	-1.47	5.6	1.096	1.102	-0.52
6.0	1.564	1.566	-0.14	6.0	1.100	1.114	-1.24

<sup>\*</sup>标准不确定度  $u(T)=0.38K$ ,  $u(p)=0.75MPa$ ; 扩展不确定度  $U_c(p)=0.68 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

附录-表4 质量分数 1:1 正辛烷-正庚烷比定压热容测量结果及相对误差表<sup>\*</sup>

$T/K$	$C_{p,exp}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$C_{p,lit}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$\frac{\Delta c_p}{c_p} \%$	$T/K$	$C_{p,exp}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$C_{p,lit}$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$\frac{\Delta c_p}{c_p} \%$
320.1	2.304	2.307	-0.1	465.4	2.952	2.957	-0.15
335.2	2.386	2.367	0.81	480.3	3.061	3.034	0.89
349.8	2.413	2.427	-0.57	495.1	3.094	3.116	-0.68
365.4	2.504	2.494	0.41	510.4	3.225	3.209	0.51
379.8	2.556	2.556	0.01	524.8	3.33	3.306	0.74
405.6	2.665	2.672	-0.25	540.6	3.442	3.431	0.34
420.5	2.733	2.74	-0.24	554.9	3.601	3.567	0.97
435.1	2.818	2.809	0.35	570.4	3.771	3.753	0.49
449.7	2.887	2.879	0.29	580.1	3.871	3.893	-0.55

<sup>\*</sup>标准不确定度  $u(T)=0.38K$ ,  $u(p)=0.75MPa$ ; 扩展不确定度  $U_c(p)=0.06 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

附录-表 5 含水量不同的乳化煤油比定压热容实验测量值表\*

$T/K$	$C_p/kJ \cdot kg^{-1}K^{-1}$	$T/K$	$C_p/kJ \cdot kg^{-1}K^{-1}$	$T/K$	$C_p/kJ \cdot kg^{-1}K^{-1}$
$P=3.0MPa$			含水 10%		
302.7	2.357	483.6	3.503	695.1	4.213
316.9	2.457	505.8	11.233	710.4	4.333
330.7	2.566	528.5	3.763	732.9	4.739
345.2	2.625	553.1	3.952	750.7	4.791
370.1	2.689	576.9	4.063	770.3	4.868
390.5	2.768	595.6	4.128	782.1	5.037
405.2	2.815	606.3	6.157	798.9	5.360
421.6	2.892	625.8	4.064	831.3	5.460
440.2	3.192	650.7	3.969	857.1	5.587
465.9	3.316	672.1	3.863	879.1	5.669
$P=4.0MPa$			含水 10%		
302.8	2.364	468.7	3.411	666.8	4.173
314.4	2.463	498.1	3.602	703.9	4.528
328.3	2.567	522.7	16.590	724.1	4.850
357.2	2.653	543.4	3.579	762.6	4.950
372.1	2.701	573.2	4.101	797.9	5.408
406.3	2.821	603.3	4.291	829.7	6.108
429.5	2.930	623.6	4.491	853.9	6.912
451.4	3.248	646.9	5.245	879.1	8.368
$P=5.0MPa$			含水 10%		
301.1	2.378	481.3	3.578	683.7	4.728
314.7	2.465	511.3	4.195	702.7	4.786
328.1	2.572	537.5	21.945	724.1	4.980
342.9	2.555	556.8	3.953	762.3	5.280
356.9	2.685	577.2	4.196	798.9	5.658
386.4	2.804	595.7	4.320	830.1	6.473
420.1	2.916	613.8	4.495	854.1	7.963
437.4	3.165	633.6	4.525	877.6	9.272
456.1	3.343	656.1	4.628	879.2	9.314
$P=3.0MPa$			含水 20%		
301.5	2.581	506.5	12.612	686.5	4.355
322.7	2.644	520.4	4.065	710.2	4.511
343.3	2.800	540.8	4.448	729.7	4.776
364.8	2.859	559.3	4.805	750.9	4.865
385.3	2.925	576.9	5.714	772.8	5.060
411.1	3.038	596.9	4.210	786.4	5.188

430.8	3.232	615.4	4.199	800.1	5.314
451.4	3.396	635.3	4.113	827.8	5.525
471.3	3.584	655.7	4.067	854.6	5.661
487.2	3.819	672.6	4.232	878.0	5.857
P=4.0MPa			含水 20%		
301.5	2.597	521.4	18.383	725.8	4.897
325.7	2.728	540.2	4.554	742.1	4.940
348.8	2.902	562.7	4.618	760.8	5.093
381.5	3.001	588.2	5.049	779.7	5.346
401.8	3.152	605.7	4.446	800.6	5.532
422.9	3.308	628.9	4.388	822.8	6.232
452.0	3.460	659.9	4.435	853.7	7.129
477.3	3.759	684.7	4.504	878.4	8.687
498.9	4.057	705.7	4.624		
P=5.0MPa			含水 20%		
302.3	2.601	522.7	4.751	697.6	4.854
326.4	2.759	537.6	23.524	725.3	5.017
347.4	2.954	554.4	4.612	759.8	5.312
377.4	3.015	569.1	4.651	778.7	5.486
400.8	3.161	586.0	4.688	799.6	5.715
423.8	3.359	607.8	4.709	821.8	6.697
448.0	3.487	638.1	4.721	852.7	8.198
472.6	3.798	659.8	4.781	878.6	9.584
496.1	4.125	682.6	4.814		
P=3.0MPa			含水 30%		
300.9	3.162	484.5	4.725	674.2	4.302
325.3	3.216	505.4	13.913	698.5	4.562
346.3	3.251	529.7	4.534	715.4	4.688
362.5	3.346	546.4	4.716	729.5	4.821
378.8	3.400	558.8	5.599	750.1	5.025
391.7	3.485	570.1	4.395	774.8	5.217
409.1	3.515	596.2	4.282	799.9	5.487
425.9	3.568	615.4	4.208	826.8	5.676
445.6	3.766	630.2	4.199	855.6	5.812
465.9	4.143	650.6	4.241	875.9	6.065
P=4.0MPa			含水 30%		
303.3	3.226	523.7	19.688	698.6	4.659
327.4	3.284	538.6	4.747	726.3	5.016
348.4	3.391	555.4	4.802	760.8	5.385
378.4	3.558	570.1	5.018	779.7	5.571

401.8	3.668	587.0	4.513	800.6	6.188
424.8	3.807	608.8	4.487	822.8	7.026
449.0	4.023	639.1	4.408	853.7	7.685
473.6	4.261	660.8	4.457	878.6	8.986
497.1	4.990	683.6	4.584		
P=5.0MPa			含水 30%		
303.2	3.254	494.0	5.011	676.6	4.913
326.5	3.314	524.6	5.182	697.4	4.957
344.5	3.398	532.5	25.018	732.3	5.286
376.8	3.612	543.2	4.781	753.5	5.482
391.3	3.642	566.0	4.816	787.8	5.691
410.2	3.785	592.9	4.825	807.1	6.324
427.0	3.857	615.1	4.835	825.8	7.816
447.2	4.102	634.9	4.852	858.2	8.328
469.5	4.265	660.5	4.879	879.1	9.849
P=3.0MPa			含水 50%		
301.7	3.420	485.2	4.835	692.8	4.649
315.4	3.478	504.4	14.949	709.5	4.762
328.5	3.502	527.1	4.752	731.2	4.971
346.3	3.545	551.3	5.397	749.7	5.208
379.1	3.599	574.1	4.459	776.6	5.421
391.7	3.646	590.5	4.349	800.3	5.548
409.1	3.705	604.6	4.265	815.2	5.678
423.8	3.899	625.6	4.169	830.4	5.795
445.7	4.200	655.2	4.325	854.1	6.066
466.1	4.268	674.4	4.468	877.7	6.302
P=4.0MPa			含水 50%		
302.7	3.462	493.5	5.041	676.1	4.826
326.0	3.523	524.1	20.455	696.9	4.985
344.0	3.559	532.0	4.783	731.8	5.163
376.3	3.598	542.7	4.823	753.0	5.658
390.8	3.655	565.5	4.984	787.3	5.810
409.7	3.726	592.4	4.688	806.6	6.355
426.5	3.910	614.6	4.530	825.3	7.165
446.7	4.341	634.4	4.476	857.7	7.814
469.0	4.899	660.0	4.788	878.6	9.186
P=5.0MPa			含水 50%		
302.3	3.464	482.5	4.981	684.9	5.158
315.9	3.485	512.5	5.124	703.9	5.384
329.3	3.538	538.7	26.875	725.3	5.498

344.1	3.611	558.0	4.821	763.5	5.785
358.1	3.628	578.4	4.859	800.1	6.546
387.6	3.661	596.9	4.884	831.3	7.986
421.3	3.924	615.0	4.924	855.3	8.647
438.6	4.353	634.8	4.935	878.8	10.176
457.3	4.458	657.3	4.986		

\*标准不确定度  $u(T)=0.38\text{K}$ ,  $u(p)=0.75\text{MPa}$ ; 扩展不确定度  $U_c(\rho)=0.68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

## 研究生在读期间研究成果

- [1] 贺宇锋,郭亚军,冯松,毕勤成.高温下吸热型碳氢燃料定压比热容在线测量[J].热能动力工程.
- [2] 贺宇锋,郭亚军,冯松,毕勤成.超临界压力下乳化煤油比定压热容测量[J].推进技术.
- [3] 董新宇,毕勤成,贺宇锋,王腾,桂淼.钛合金螺旋扁管换热器流阻与传热性能试验[J].西安交通大学学报.
- [4] 胡琼宇,郭亚军,贺宇锋,毕勤成.乳化碳氢燃料与碳氢燃料传热特性实验对比研究在.[J].热能动力工程.