

先进空天动力 油料发展

(2018)

曹文杰 陈立波 主编

航空工业出版社

先进空天动力油料发展

(2018)

曹文杰 陈立波 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

近年来,空天动力装备技术和空天油料技术相互促进,发展迅速。本书围绕先进空天油料与空天动力融合发展,以“聚焦动力油料融合、促进军民协同创新”为主题,收录了“2018年先进航空动力油料发展论坛”优秀论文60余篇,共分为燃料动力篇、润滑动力篇和发展探索篇,涵盖了先进空天动力油料发展现状、发展趋势、前沿技术动态,以及探索创新思考等内容。在新产品、新工艺研究,评价方法探索,油料技术体系前瞻性思考等方面有较大篇幅论述。

本书可作为空天动力装备、油料相关设计、制造、维护、使用部门和科研教学机构的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

先进空天动力油料发展. 2018 / 曹文杰, 陈立波主编. -- 北京: 航空工业出版社, 2018.9
ISBN 978-7-5165-1728-4

I. ①先… II. ①曹…②陈… III. ①航空油料—发展—研究—中国 IV. ①V31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 207724 号

先进空天动力油料发展 (2018)
Xianjin Kongtian Dongli Youliao Fazhan (2018)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2018年9月第1版

2018年9月第1次印刷

开本: 889×1194 1/16

印张: 24.5

字数: 758千字

印数: 1—1300

定价: 160.00元

序

20 世纪中叶以来，随着国产航空装备的发展，航空油料的研制、生产，以及试验评价的历程也随之开启，航空动力技术与油料技术相互促进，对航空装备的发展起到了重要作用。仅仅是为了考察国产喷气燃料与发动机的适配性，1956 年到 1979 年的 23 年间，军地双方共组织了 38 次发动机试车试验和 35 次飞行试验。大量的装备与油料适配性试验和技术研究，有力推动了我国航空油料的研制进程，大大促进了我国航空油料标准、产品、试验评价体系的建立和石油工业的技术进步，同时对于国产航空装备技术发展做出了卓越贡献。

进入 21 世纪以来，航空航天装备进入了新的快速发展期，对油料的需求发生了很大变化，装备和油料走深度融合和军民协同发展十分必要。本书收录的“2018 年先进航空动力油料发展论坛”60 余篇专业学术论文，分别来自军内外科研究所、高等院校、航空航天装备主机厂所，以及航空油料研制、生产、使用单位，总结了近年来科研、生产等方面的技术成果，对先进动力与油料融合发展形成了共识，对推进我国航空航天装备与油料研究领域交流融合大有裨益。

举办“2018 年先进航空动力油料发展论坛”并将其论文汇编成书，书名取为《先进空天动力油料发展（2018）》，突出了“空天一体”的理念，得机会先读此书，乐为之序。

中国工程院院士



2018 年 9 月

前 言

本书收录了参加“2018年先进航空动力油料发展论坛”的60余篇优秀论文，论文涵盖范围突破了航空领域，编委会把书名取为“先进空天动力油料发展（2018）”，是想表达该论坛着眼于先进性的发展定位和空天一体动力-油料融合发展的理念。

“空天一体”发展，是习近平主席对空军作出的战略决策。要实现“空天一体”发展就必须实现空天装备用油一体保障，进而要求空天装备用油标准、油料品种、检测评价方法、油料保障装备器材在很大程度上实现通用。从技术层面考虑，其核心就是油料与空天装备的适配性问题。这个问题从航空航天装备出现之初就是油料和装备专家孜孜不倦研究的课题。半个多世纪以来，油料和装备研究人员艰苦探索、积极协作，取得了大量高水平科研成果，确保了航空航天装备性能的发挥，成绩斐然。

近年来，由于科学技术发展提速，油料和装备专业各自独立发展的模式已导致新技术对接滞后，其适配性研究难度加大，难以起到相互促进的效果，不再适应新形势发展要求。为改变这一不利局面，动力油料联合攻关、融合发展势在必行。

本书收录的论文涉及多个学科领域，包括应用化学、分析化学、燃烧化学、反应动力学、工程热物理、流体力学、军事后勤学等，提出了许多新理论、新方法，呈现了许多新技术、新产品，其中尚有不少问题还难以准确认识，特别是在发展探索部分，是作者奉献给读者的学科领域发展动态及思考，希望读者理解并继续研究和探索。

本书的编写和审稿人员，无论是理论修养或实践经验都比较有限，书中错误或不妥之处难以避免，我们衷心希望读者给予批评指正。

主编 曹文杰 陈立波

2018年9月

目 录

燃料动力篇

航空煤油高温高压下密度的在线测量	柳朋浩 周凌霄 陈志聪 朱权 王健礼 李象远	(3)
污染组分对正庚烷点火特性影响的理论和试验研究	涂杨 张昌华 王静波 李象远	(10)
航空油料及其裂解产物自点火特性研究	王易君 张昌华 李萍 李象远	(18)
基于在线取样方法的正癸烷热裂解总包反应机理构建	周凌霄 柳朋浩 张天昊 朱权	(24)
新型高密度吸热型燃料裂解反应动力学	李在政 金百堂 张香文 刘国柱	(32)
煤基煤油高温高压裂解结焦特性研究	蒋榕培 游岳 姚传奇 马军强 孙海云	(43)
碳氢燃料低温流动性能模拟研究	姚传奇 游岳 蒋榕培 孙海云 方涛	(47)
藻基燃料在氮气稀释层流扩散火焰中的炭烟生成研究	成波 甘志文	(50)
硼笼化合物对液固高能燃料点火及燃烧性能的影响	孙道安 李春迎 杜咏梅 薛云娜 吕剑	(56)
生物质转化制备高密度烃类燃料研究进展分析	项锴 童坤 蒋榕培 孙海云 方涛	(63)
3号喷气燃料冰点问题研究	赵丽萍 陶志平 陈志成 吴明清	(73)
RP-3+100 添加剂降低发动机燃油系统沉积物性能探讨	张怀安 薛洪涛 王树雷 刘婕 李辉	(82)
糠醛催化转化制喷气燃料组分的工艺研究	闫瑞 陶志平 赵红	(87)
木质纤维素基高密度、高热安定性航空燃料的催化合成	李宁 丛昱 王爱琴	(95)
分子筛催化 endo-THDCPD 异构合成 exo-THDCPD	董行 王文科 赵杰 陶志平	(100)
生物质航煤提质加氢脱氧反应催化剂的研究进展	李晓彤	(106)
植物油基可再生生物航空油料的技术发展与应用	刘思阳 李伟 阎晓琪 叶锋	(112)
蓖麻作为生物航煤原料的供应潜力及经济性分析	崔晓莹 何皓 叶锋 李建忠	(117)
Pt/USY 催化剂催化转化煤焦油馏分油制备环烷基航天燃料	李广慈 陈松 李学兵	(122)
煤基直接液化喷气燃料的研制	王树雷 曹文杰 李辉 张继明 张传江 都长飞 陈茂山 贾振斌 崔健 韩来喜 刘多强 刘婕 邢军 张怀安 林洋	(126)
一种3号喷气燃油水分快速检测方法	李咏 张东晋川 陈摇 杨晓飞	(134)
运用俄罗斯综合鉴定法考察 RP-3+100 添加剂的性能	张怀安 都长飞 李辉 邵万昌	(139)
煤基喷气燃料与石油基喷气燃料动态热氧化安定性对比研究	李辉 张怀安 曹文杰 王树雷 都长飞	(144)

润滑动力篇

RIPP 555 重负荷航空发动机及传动系统润滑油的研制	梁宇翔 贺景坚 阎欢 尹开吉 唐红金	(153)
高性能航空发动机润滑油研究	尹开吉 唐红金 梁宇翔 张建荣 贺景坚	(162)
高温型航空润滑油综合鉴定评价研究	陈磊 陈聪慧 李冬梅 陈静	(174)
FDS655-HTS 高温润滑油的适用性考察	李冬梅 杨坚 史艳梅 陈磊 邢彬	(183)

航空润滑油结焦性能评价方法简介	刘洪亮 谷俊 陈磊 陈静	(189)
密度法检测航空发动机滑油系统串入燃油的含量	施雯 刘欣 唐娅	(192)
航空润滑油燃料稀释故障分析方法研究	李荣荣 曹桂松 裴康妮	(196)
7260 先进航空通用润滑脂的技术发展与应用	刘显秋 李茂森 刘欣阳 何懿峰	(202)
石墨烯润滑脂防护及抗磨性能研究	鲍天骄	(212)
氧化石墨烯改性航空润滑油研究	汪定江 陈名华 杜晓伟 丁丽丽	(217)
4050 航空润滑油颗粒污染度检测方法研究	裴康妮 曹桂松 李荣荣	(221)
磨粒分析技术在发动机维修中的运用	李咏 张晓峰 张东晋川 陈哲	(228)
航空发动机润滑系统油液测试技术及发展趋势	毛福荣	(232)
低黏度酯型合成航空润滑油规范的演变	梅莉 马楷	(239)
高温型航空润滑油的性能比较	马楷 梅莉	(244)
航空装备修理中油料使用存在问题浅析	刘诗碧	(252)
卡尔·费休法测试润滑油微量水分影响因素研究	孙佳斯 郎宏 刘宇佳 郝延龙	(255)
航空润滑油高温沉积性能评价方法	王美川 李进 王树雷 赵军	(261)
航空涡轮发动机润滑油橡胶相容性试验对比	李进 王树雷 刘多强 邵万昌 董芮寒	(266)
几种国外航空润滑油高温沉积性能的对比研究	王美川 李进 王树雷 赵军 孟浩龙 易方	(270)
我国煤基 PAO 基础油发展	刘婕 顾鹏翔 王树雷 张怀安 李辉	(275)
5 厘斯航空涡轮发动机润滑油发展	李召良 王树雷 李进 张亮	(280)

发展探索篇

燃烧室设计对航空燃料工程研究的需求分析	尚守堂 林宏军 程明	(289)
基于航空及临近空间飞行器综合热管理的燃料使用方式初步研究	廖桔 熊斌 沈军	(294)
先进航空动力对润滑油的技术需求分析	李炎军 陈亮 李贵林	(300)
航空润滑油发展历程及发展趋势简介	刘海峰	(304)
军用航空油料与飞机发动机适应性问题研究	张占纲 宋兰琪 陈立波 王韬	(309)
油液监控技术在航空油料使用中的应用	宋兰琪 张占纲 陈立波 王洪伟	(315)
军用航空润滑油标准体系及鉴定考核程序的探讨	刘多强 曹文杰 陈立波 王树雷 李进 岳彬	(320)
我军航空润滑脂体系展望	赵军 都长飞 王树雷 王德岩 张亮 王美川 李进	(326)
构建军用航空发动机润滑油标准体系的思考	顾鹏翔 杨文毅 王树雷 曹文杰	(331)
航空油料快速分析简述	刘婕 李胜强 曹文杰 王强 郑焯	(335)
航空润滑油轴承高温沉积试验发展现状	张亮 王树雷 赵军 李进 李召良	(341)
美国与俄罗斯喷气燃料综合鉴定程序论述	都长飞 王树雷 王强 郑焯	(345)
两种开口闪点试验方法的对比研究	王美川 李进 都长飞 赵军 孟浩龙 易方	(350)
浅谈航空润滑油与发动机联合科研新模式	李进 王树雷 赵军 李召良 王美川	(355)
军民融合油料保障模式浅探	高明 王菊芬 刘波 武建军	(362)
美军油料保障军民融合模式的分析与思考	杨艺 罗耿 戚持恒 李玉	(365)
军民融合条件下的航空油料科研浅析	许俊杰 杨晓军 高明 王兵文	(370)
附录 “2018 先进航空动力油料发展论坛” 特邀专家报告 (简介)		(375)

燃料动力篇

航空煤油高温高压下密度的在线测量

柳朋浩¹ 周凌霄¹ 陈志聪¹ 朱权¹ 王健礼² 李象远¹

(¹四川大学化学与工程学院 ²四川大学化学学院)

摘要: 基于流动连续性方程和伯努利方程, 通过孔板流量计与试验管串联的方法, 建立了一套吸热型碳氢燃料高温密度在线测定装置。采用氮气和正癸烷作为基准物质对孔板流量计的流出系数进行了标定, 并对高温密度在线测量的准确性和重复性进行了分析。根据误差分析原理, 结合密度测量原理公式, 得到密度测量的相对不确定度为 $\pm 2.84\%$ 。选用航空燃料 RP-3 作为研究对象, 研究了其在亚临界/超临界条件和不同流量下的密度和流速变化情况, 详细分析和对比了温度、压力和质量流量等条件对燃料密度的影响。

关键词: 密度; 高温高压; 碳氢燃料; 在线测量

1 引言

超燃冲压发动机技术是现代高新科技的集合体, 在国家安全、空间探测以及科技创新等领域都起到了至关重要的推动作用^[1,2]。飞行器在高速运行时, 航空发动机燃料剧烈燃烧产生大量热量, 同时飞行器外表面与高速气流强烈摩擦产生巨大的热能, 比如当飞行器的速度达到高马赫数时, 发动机温度高达 2000K 以上^[3,4]。在这种高温环境下飞行, 飞行器表面温度迅速升高而导致热防护问题^[5], 采用主动冷却技术, 可以改善发动机燃烧室冷却系统, 吸热型碳氢燃料可以同时满足发动机冷却和动力的双重要求, 是一种具有很好应用前景的主动冷却剂和推动剂^[6], 达到高速飞行器的冷却与燃烧要求^[7,8]。其中航空煤油 RP-3 是其重要燃料之一, 也是在航空领域军民两用最广泛的燃料, 常被作为燃料来进行热物性研究。

在高超声速飞行器的推进系统中, 为了同时满足高推动力及冷却高温部件的双重要求, 燃料必须高速输送, 这使燃料在系统中的压力急剧升高, 超过了自身的临界压力, 同时燃料吸收燃烧室壁面的热量, 温度不断上升并发生复杂的化学反应。在通道内的流动传热过程中, 受到温度、压力、裂解反应的影响, 燃料经历了从亚临界到超临界状态, 燃料密度发生剧烈变化, 精确测量燃料在通道内的密度变化, 并获得燃料流速、停留时间等重要参数, 为设备的结构和功能设计提供了基础支撑, 密度是很多其他物理性质测量的前提, 也是流体管路中流动、传热方程构建中不可缺少的物性参数。航空航天动力推进装置属于体积受限系统, 能量密度高和使用安全的碳氢化合物通常作为首选燃料, 发展合适的密度测量方法对燃料的对比和筛选尤为关键^[9]。因此, 有必要通过试验测量来建立吸热型喷气燃料的相关物性参数的数据系统, 密度是所有物性中最基础, 也是最重要的, 为燃料的筛选、燃料通道内流动状态的监测、流动传热耦合模型的研究提供数据支持。

密度瓶法是目前应用最为广泛的一种液态物质密度测量方法^[10], 其原理是使用电子天平称量密度瓶内指定体积的液体, 通过质量和体积计算液体的密度。密度瓶法虽然操作简便且计算结果精度较高, 但其仅适用于常温下液态密度的测量。U 形管振荡法^[11]是通过电磁振荡使 U 形管发生振动, 并采集 U 形管的振动周期计算得到液体的密度, 然而, U 形管振荡法只适用于静态液体的密度测量, 不能用于流动碳氢燃料的密度测量。此外, 放射性射线测量法^[12]和超声波密度测量法^[13], 这两种方法虽然可以实现不接触式密度测量且可完成流动状态下液体密度的连续测量, 但其适用的温度区间较窄, 在应用于碳氢燃料高温密度测量时仍存在问题。因此, 建立一种碳氢燃料高温裂解气密度测量方法十分必要。

本文通过选用结构简单、易于安装及测量准确的孔板流量计^[14,15]结合差压测量的方式作为在线

测量密度的工具, 在孔板节流孔前后建立伯努利方程, 并根据流体连续性方程和冷态质量流量守恒的原理推导得到孔板在线测量密度的公式, 分析了试验方法的可靠性和准确性, 通过对航空煤油 RP-3 进行高温密度测量, 分析了温度、压力及燃料流量大小对密度的影响。

2 测量原理

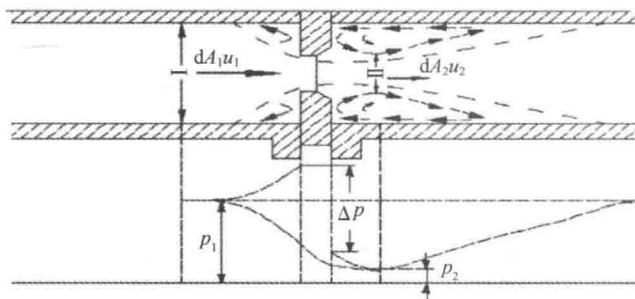


图1 孔板工作原理示意图

差压计基于在流通管道上设置流动阻力件, 流体通过阻力件时将产生压力差, 此压力差与流体流量之间有确定的数值关系。设 D 和 d 为截面 I 和 II 上流束直径, u_1 和 u_2 为截面 I 和 II 上轴向流速, ρ 为流体密度, 则:

$$u_1 \rho \frac{\pi D^2}{4} = u_2 \rho \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

当理想流体在管内定常流动时, 对于管道中任意两个截面 I 和 II 有如下关系式:

$$gh_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (2)$$

式 (2) 为不可压缩流的伯努利方程。其中, g 为重力加速度; h_1 和 h_2 为截面 I 和 II 相对基准线的高度; p_1 和 p_2 为截面 I 和 II 上流体的静压力。由式 (1) 和式 (2) 可导出质量流量为:

$$q_m = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (3)$$

由于取压位置不同可能带来差别, 需引入流出系数 C 对式 (3) 进行修正, C 是通过计量标定的设备参数, 即:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (4)$$

$\beta = \left(\frac{d}{D}\right)$ 是一个设备参数。

对于可压缩流体, 考虑到节流过程中流体密度的变化而引入流束膨胀系数 ε 对式 (4) 进行修正, 即:

$$q_m = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (5)$$

密度表示为:

$$\rho = \frac{8(1 - \beta^4) q_m^2}{\pi^2 d^4 (C\varepsilon)^2 \Delta p} \quad (6)$$

若令 $C\varepsilon = C'$, 对应的燃料流体密度可以被表示为:

$$\rho = \frac{8(1 - \beta^4) q_m^2}{\pi^2 d^4 (C')^2 \Delta p} \quad (7)$$

式中, 压力差和质量流量可分别由差压变送器和质量流量计测定。在设备参数固定时, C' 只与流体

的流动形态相关, C' 可通过对已知密度的可压缩和不可压缩流体标定获得。

3 试验部分

3.1 试验装置

试验装置主要由供油系统、加热系统、冷却系统和分析系统等 4 部分组成, 如图 2 所示, I. 供油系统: 碳氢燃料由高压恒流泵以恒定的质量流量输送到加热系统; II. 加热系统: 通过可编程逻辑控制器 (PLC) 自动控制电流对燃料通道进行加热, 冷态的碳氢燃料与燃料通道发生对流传热, 碳氢燃料被加热到设定温度, 燃料流体在流经孔板前后两端时会产生差压, 通过数据记录仪实时采集压力信号; III. 冷却系统: 高温燃料经过冷凝器冷却后进入气液分离器, 然后将分离的气相产物和液相产物收集; IV. 分析系统: 采用湿式气体流量计对气体体积进行分析。

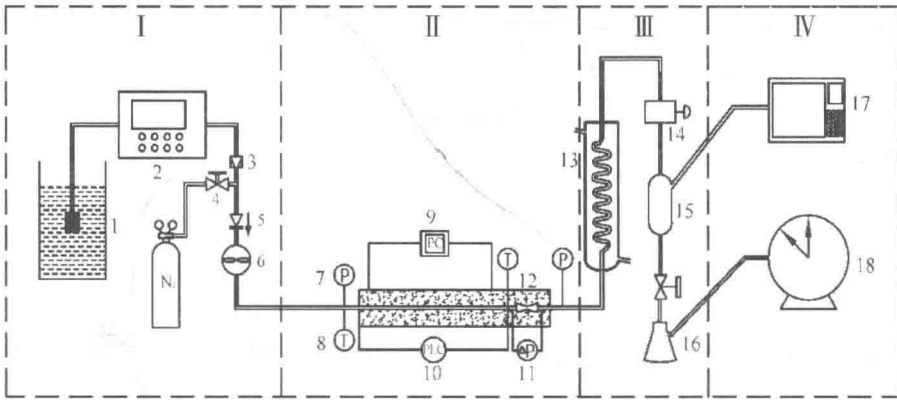


图 2 高温高压密度在线测量装置

I. 供油系统, II. 加热系统, III. 冷却系统, IV. 分析系统

1—油箱; 2—高压恒流泵; 3—过滤器; 4—针形阀; 5—单向阀; 6—质量流量计; 7—压力传感器; 8—热偶;

9—数据采集系统; 10—可编程逻辑控制器 (PLC); 11—压差表; 12—孔板; 13—冷凝器;

14—背压阀; 15—气液分离罐; 16—残液接收器; 17—气相色谱; 18—气体流量计

3.2 试验方法

为了测量碳氢燃料在不同工况下的密度, 本试验采用上述高温高压密度在线测量装置进行试验探究, 试验仪器和材料: P500 型高压恒流泵, Rosemount 差压变送器, Emerson 质量流量计, HIOKI LR8400 型数据记录仪, 正十烷 (纯度 $\geq 99\%$), 氮气 (纯度: 99.999%), 3 号喷气燃料 (符合 GB 6537)。

通过已知密度介质在常温下获得孔板校正系数, 并用此系数进行密度和流量计算。采用标准物质正癸烷和氮气, 标定具有压缩和非压缩性质流体的流出系数, 由于液体的黏度较大, 在现有的试验条件下, 通过正十烷对流出系数标定时雷诺数 Re 最大只能达到 2000 左右, 而要实现更高 Re 条件下的流出系数标定只能通过黏度较小的 N_2 进行。

我们用高温氮气气体和冷态煤油对 C' 值进行标定。实际上, 在超临界条件下, 由于压差值 Δp 远小于体系压力值, 节流前后密度变化可忽略。孔板参数表示为:

$$C' = \frac{4q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{\sqrt{2\pi d^2} \sqrt{\rho \Delta p}} \quad (8)$$

3.3 测量不确定度

根据误差分析原理, 结合密度测量原理公式, 得到密度测量的相对不确定度计算公式:

$$\xi_p = \pm (4\xi_{q_m}^2 + 4\xi_{C'}^2 + \xi_{\Delta p}^2)^{1/2} \quad (9)$$

各直接测量手段绝对不确定度见表 1。在式 (9) 中, 质量流量在整个量程内的相对测量不确定度为 $\pm 0.5\%$; 压差传感器在其测量范围内相对不确定度是 $\pm 0.075\%$; 通过流出系数标定的重复实现, 得到流出系数的相对不确定度为 $\pm 0.5\%$; 根据式 (9) 得到孔板测量高温高压下密度的相对不确定度为 $\pm 1.42\%$, 扩展不确定度为 2.84% (取扩展不确定度 $k=2$)。

表 1 各直接测量手段绝对不确定度

直接测量	测量不确定度
质量流量 q_m	$\pm 0.005 \text{ g/s}$
工作压力 p	$\pm 3.00 \text{ kPa}$
压力差 Δp	$\pm 5 \text{ Pa}$
加热电压 U	$\pm 0.02 \text{ V}$
加热电流 I	$\pm 0.02 \text{ A}$
燃料温度 T	$\pm 0.22 \text{ K}$

4 试验结果及分析

4.1 流出系数标定

从图 3 中可知, 流出系数 C' 除了在 Re 处于 $300 \sim 400$ 之间时出现一些异常值外, 在 $Re \leq 1750$ 时, 流出系数随雷诺数的增大而增大。而当 $Re > 1750$ 时, 随着 Re 的升高, 流出系数 C' 基本保持不变, 可以近似认为保持常数。在这里, 我们定义当流出系数 C' 不再随雷诺数 Re 增加而改变时所处的最小 Re 称为临界雷诺数 Re_{cr} 。本试验中所使用孔板流量计的 Re_{cr} 为 1750 , 在流体雷诺数大于孔板流量计的 Re_{cr} 时, 流出系数 C' 和温度基本无关。从图 3 和图 4 中可以看出, 对于不可压缩与可压缩流体, 采用本试验中的孔板流量计标定具有几乎相同的流出系数, 通过对流出系数基本保持稳定的数据进行平均后确定计算流体密度时使用的 C' 值为 0.74 。

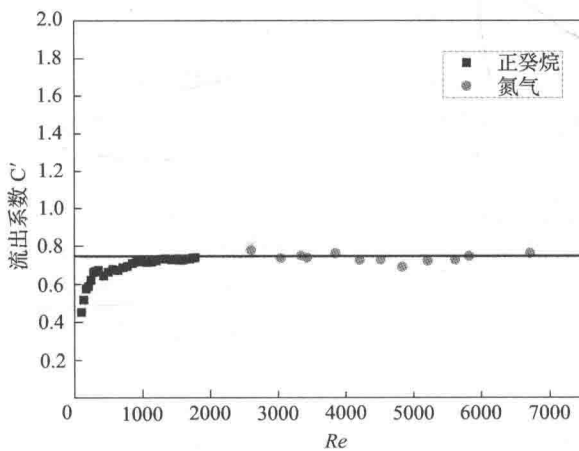


图 3 流出系数

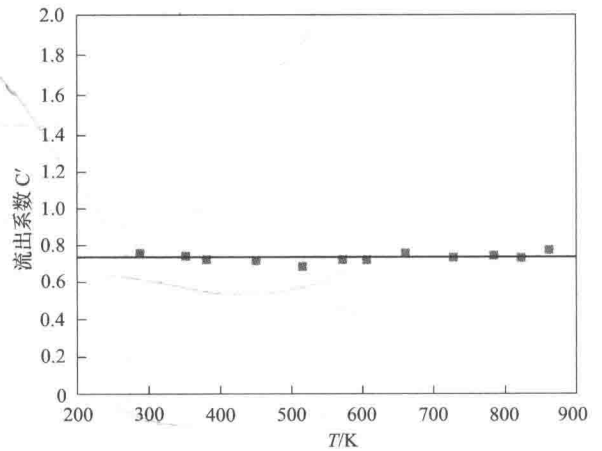


图 4 流出系数随温度变化图

考虑到高温条件下孔板装置由于热膨胀原因, 按线膨胀系数计算, 孔板孔径变形带来的误差不超过 0.1% 。裂解结焦在节流孔表面积炭, 引起节流孔径变化, 使孔径值发生变化, 造成误差, 解决的办法是试验完成后通入冷油, 检验孔板校正系数是否变化。如发生变化, 应立即停止测量, 对节流孔处积炭进行清洗。

4.2 测量重复性

试验中通过压力 5MPa 相同条件下三次测量苯的密度随温度的变化作为孔板流量计测量密度重复性验证的方法,如图 5 所示。

从图 5 中可知,当温度 $\leq 553\text{K}$ 和 $\geq 573\text{K}$ 时,三次重复试验的测量偏差 $\leq \pm 0.7\%$,表明孔板测量密度具有高的精确性。在温度处于 $553 \sim 573\text{K}$ 区域内,三次测量偏差较大,最大偏差达到 8%。因为苯的临界温度和临界压力分别为 563K 和 4.92MPa ^[16],在 5MPa 和此温度区间内,流体苯具有超临界流体的特性,即温度、压力的轻微变化就会导致密度的很大变化,导致密度的精确性不好。

4.3 喷气燃料高温密度测定

RP-3 燃料在常温下的密度通过称重法计算得到为 789.7kg/m^3 ,在从 100°C 升温至 750°C 过程中,燃料密度随温度变化关系如 6 图所示。

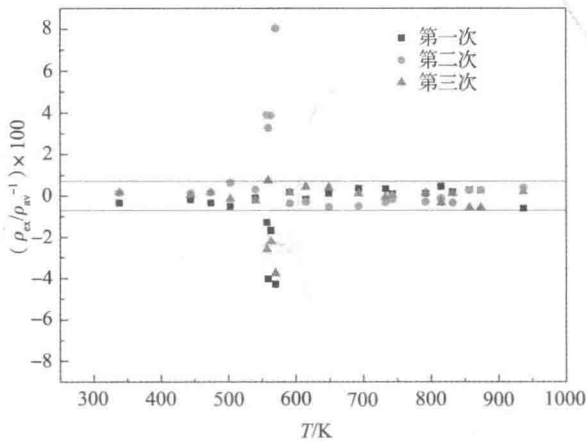


图 5 压力 5MPa 条件下密度偏差随温度的变化

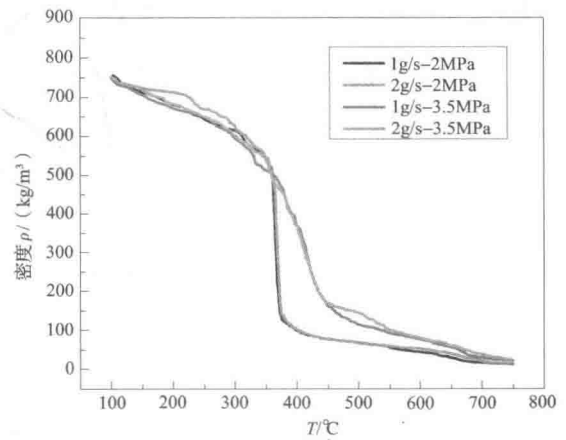


图 6 RP-3 在不同条件下密度

在压力 2MPa 条件下, 1g/s 流量的 RP-3 燃料在 750°C 的密度为 12.20kg/m^3 ,而 2g/s 流量在 750°C 的密度为 14.4kg/m^3 ,密度变化主要分为三个阶段,在 360°C 到 380°C 之间密度变化最为剧烈,从 520kg/m^3 降到约 120kg/m^3 ,降低至约 $1/4$,说明发生了明显的相变过程。对于 2g/s 流量,从 380°C 到 750°C ,密度降低至 $1/8$,一方面是由于升温引起,另外一方面由于裂解反应降低了平均分子量,从而导致密度下降。

在压力 3.5MPa 条件下, 1g/s 流量的 RP-3 燃料在 750°C 的密度为 22.3kg/m^3 ,而 2g/s 流量在 750°C 的密度为 24.7kg/m^3 ,密度变化主要分为三个阶段,在 360°C 到 500°C 之间密度变化最为剧烈,从 500kg/m^3 降到约 120kg/m^3 ,降低至约 $1/4$,说明相变过程相对平缓。对于 2g/s 流量,从 500°C 到 750°C ,密度降低至 $1/6$,一方面是由于升温引起,另外一方面由于裂解反应降低了平均分子量,从而导致密度下降。

2MPa 和 3.5MPa 压力相比,由于 3.5MPa 压力超过燃料的超临界压力,因此在相变过程中,密度变化相对平缓,同时,由于压力大,因此,在相同温度下的密度也大于 2MPa 的密度。

从图中可以看出,在相同温度和压力条件下,保证管长管径等其他条件不变,燃料流量的增加基本上会导致流速增加。同时会导致停留时间的减少,裂解深度降低,从而造成密度增加,流速下降,两者共同作用的结果导致高温燃料的流速随冷态停留时间的减少而增加。在相变过程中,冷态停留时间越少流速增加越快。

当质量流量一定时,燃料在反应管内的流速与密度成反比,所以密度降低导致流速增加。同样地,燃料的流速在相变区急剧增加。当温度高于 600°C 后,流速由于燃料发生裂解反应而进一步加

大, 由于燃料在发生裂解反应后密度很小, 导致当温度高于 600°C 后燃料流速随温度升高的增加量比相变过程更大。在相同温度条件下, 系统压力的增加会导致高温燃料流速降低。系统压力降低, 燃料先开始进行相变过程, 导致流速增加。

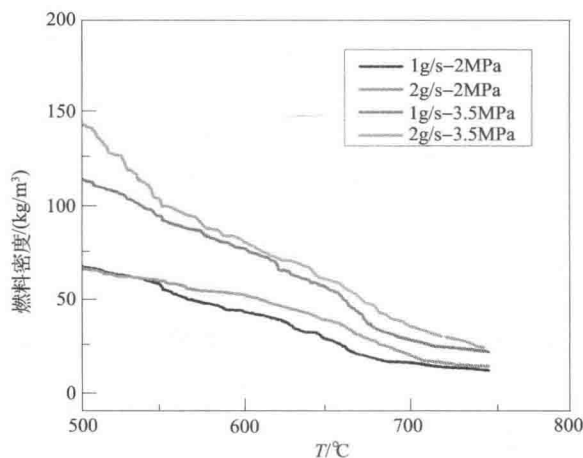


图7 RP-3 燃料密度局部放大图

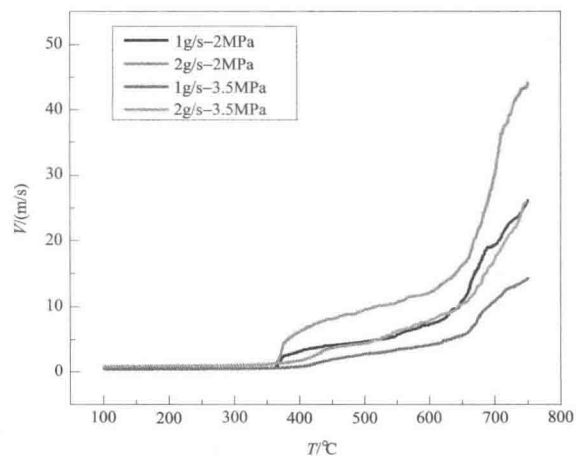


图8 不同条件下 RP-3 流速

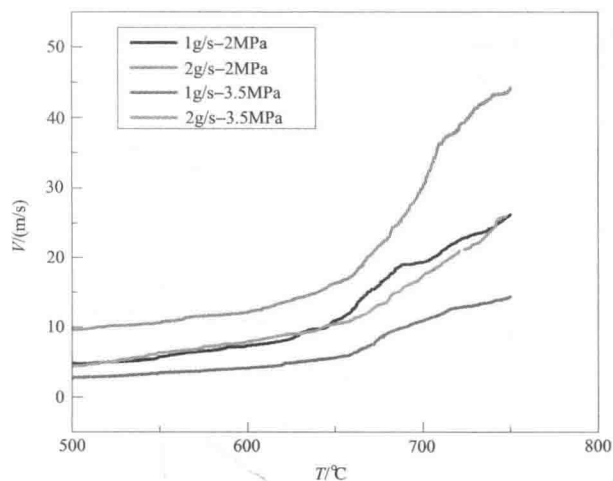


图9 不同条件下 RP-3 流速局部放大图

5 结论

基于密度测量原理, 通过正十烷和氮气对孔板流量计的流出系数和孔板适用的 Re_{cr} 进行标定, 结果表明试验中采用的孔板流量计 Re_{cr} 为 1750, 对于不可压缩流体和可压缩流体, 孔板流量的流出系数都为 0.74; 根据误差分析, 孔板测密度的理论误差为 $\pm 2.84\%$ (扩散不确定度 $k=2$)。

试验中测量不同压力、质量流量的航空煤油高温高压密度和流速。当质量流量一定时, 燃料在反应管内的流速与密度成反比。在液相区, 燃料密度主要受温度的影响, 压力对密度的影响较小。随着温度升高, 密度进入陡降区域, 此时压力对密度影响较大。在冷态流量不变的情况下, 燃料密度随温度升高而降低, 流速随温度升高而增大, 在相变区, 液-气变化导致系统稳定性变差, 压差波动较大, 反映在密度不稳定。在相变完成后, 系统趋于稳定, 密度曲线变得平滑。在气相燃料开始明显裂解时, 在反应管固定时, 密度受压力、温度、质量流量共同作用, 温度的升高, 从体积膨胀和裂解率提升两个方面协同降低密度。相同温度、压力条件下, 质量流量的增加, 引起燃料停留时间减小, 裂解率降低, 密度随流量的增大而增大。

参 考 文 献

- [1] Tongli L. Development and prospect of hypersonic technology in USA [J]. Aerospace Control, 2004, 22 (4): 36-41.
- [2] Chung H S, Chen C S H, Kremer R A, et al. Recent developments in high-energy density liquid hydrocarbon fuels [J]. Energy & Fuels, 1999, 13 (3): 641-649.
- [3] 曹玉璋. 航空发动机传热学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [4] National Research Council Committee. Review and Evaluation of the Air Force Hypersonic Technology Program [M]. National Academy Press, 1998.
- [5] Petley D H, Jones S C. Thermal management for a Mach 5 cruise aircraft using endothermic fuel [J]. Journal of Aircraft, 1992, 29 (3): 384-389.
- [6] 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 (1): 26-29.
- [7] Feng Y, Qin J, Zhang S, et al. Modeling and analysis of heat and mass transfers of supercritical hydrocarbon fuel with pyrolysis in mini-channel [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 91 (5): 520-531.
- [8] Jackson T A, Eklund D R, Fink A J. High speed propulsion: Performance advantage of advanced materials [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39 (19): 5905-5913.
- [9] 靳乐, 范玮, 周舟, 等. RP-3 航空煤油的亚/超临界密度实测和计算方法研究 [J]. 推进技术, 2015, 36 (7): 1103-1109.
- [10] 朱广华, 鞠峴先. 仪器分析发展史在大学教学中的应用探讨 [J]. 大学化学, 2003, 18 (4): 30-32.
- [11] Sousa A T, Fialho P S, de Castro CAN, et al. Density of 1, 1-dichloro-1-fluoroethane (HCFC 141b) as a function of Temperature and Pressure [J]. International Journal of Thermophysics, 1996, 17 (3): 551-560.
- [12] 余新平, 王宏远. γ 射线式密度传感器及其在石油勘探中的应用 [J]. 仪表技术与传感器, 1999 (7): 26-28.
- [13] 姚明林, 陈先中, 张争. 超声波液体密度传感器 [J]. 传感器技术, 2005, 24 (5): 57-60.
- [14] Ahmadi A, Beck S B M. Development of the Orifice Plate with a Cone Swirler Flow Conditioner [J]. Sensor Review, 2005, 25 (1): 63-68.
- [15] Huang S, Ma T, Wang D, et al. Study on Discharge Coefficient of Perforated Orifices as a New Kind of Flowmeter [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 46: 74-83.
- [16] Liu T, Fu J Y, Wang K, et al. Gas-liquid Critical Properties of Ethylene + Benzene [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2001, 46 (4): 809-812.

联系方式:

联系人: 朱权

联系电话: 028-85402951 手机: 15928091298

电子邮箱: qzhu@scu.edu.cn

通信地址: 四川省成都市一环路南一段 24 号四川大学化学工程学院

邮编: 610065

污染组分对正庚烷点火特性影响的理论和试验研究

涂杨 张昌华 王静波 李象远

(四川大学化学工程学院)

摘要: 超燃冲压发动机在进行空中飞行试验之前需要先进行充分的地面试验,然后将地面试验数据向真实飞行环境外推。确定地面试验所用高焓气体中 H_2O 、 CO_2 等污染组分对燃烧过程影响是将地面试验数据向真实飞行环境外推的关键。为了研究污染组分对碳氢燃料点火特性的影响,本文通过激波管试验研究了 20% CO_2 对正庚烷点火特性的影响,结果表明在试验条件下(压力为 2atm^① 和 10atm, 当量比为 0.5 和 1), CO_2 抑制正庚烷的点火。为了在更宽的温度和压力范围内阐明污染组分对正庚烷点火的影响,本文通过动力学模拟方法研究了不同浓度和不同当量比条件下, CO_2 和 H_2O 作为污染组分对正庚烷点火特性的影响,模拟结果表明 CO_2 抑制正庚烷的点火, H_2O 在不同条件下表现出不同的影响特性,并进一步分析了 H_2O 和 CO_2 产生污染效应的原因。

关键词: 污染组分; 点火延迟; 正庚烷; 激波管; 动力学模拟

1 引言

超燃冲压发动机在进行空中飞行试验之前需要先进行充分的地面试验,然后将地面试验数据向真实飞行环境外推。在进行地面试验时,为了获得高焓气体,可采用直接电加热法、热交换法、压缩加热法、激波加热法、燃烧加热法等方法^[1]。目前主要通过使用氢、乙醇、甲烷、异丁烷、丙烷等燃烧获得地面试验所需的高焓气体。与高空飞行的实际环境气体相比,烧氢将产生 H_2O 污染组分,烧碳氢燃料将产生 H_2O 、 CO_2 污染组分。 H_2O 和 CO_2 与 N_2 相比,一方面具有不同的热容和不同的输运性质,另一方面它们可作为基元反应碰撞第三体影响反应速率,此外 H_2O 和 CO_2 还可以直接参与燃烧基元反应,如: $\text{H}_2\text{O} + \text{O} \rightleftharpoons 2 \text{OH}$ 、 $\text{CO}_2 + \text{H} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{OH}$, 因此 H_2O 和 CO_2 污染组分的存在将影响燃料的燃烧特性,给地面试验数据向真实飞行环境外推带来不确定性。

碳氢燃料的点火延迟时间是燃料燃烧特性的重要参数之一,长期以来吸引了许多国内外研究者的兴趣^[2,3],因此研究污染组分对碳氢燃料点火延迟时间的影响规律具有重要意义。Rogers 等人^[4,5,6]研究了污染组分 H_2O 对氢气的点火特性的影响,Le Cong 和 Dagaut 等人^[7,8,9]研究了污染组分 CO_2 对甲烷点火特性的影响,梁金虎等人^[10,11]通过激波管试验研究了污染组分 CO_2 和 H_2O 对乙烯点火特性的影响。

正庚烷是常用的汽油燃料替代组分,也是碳氢燃料辛烷值的标准参考燃料,其十六烷值为 56,与传统的柴油燃料的十六烷值十分接近。因此,正庚烷在碳氢燃料中占有重要地位,常作为碳氢燃料点火延迟模拟及反应机理研究中的模型燃料。本文通过激波管试验研究了压力为 2atm 和 10atm, 当量比为 0.5 和 1 条件下,摩尔分数为 20% 的 CO_2 作为污染组分对正庚烷点火特性的影响,同时使用 Chemkin - pro 程序,运用动力学模拟方法,对试验结果进行了验证;以及在更宽的温度和压力范围内,从理论上研究了不同浓度和不同当量比条件下, CO_2 和 H_2O 作为污染组分对正庚烷点火特性的影响。

^① 1atm (标准大气压) = 101.325kPa。