

# 凝胶燃料单滴燃烧的建模、实验及应用

张蒙正

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 讨论了凝胶燃料单个液滴燃烧的建模、实验研究和应用问题。单滴燃烧建模的关键在于依据凝胶燃料的胶凝结构和组份物性, 确定燃烧过程的关键步骤, 提炼主要影响因素。单滴燃烧实验研究的水平主要依赖于微小液滴的生成技术, 高分辨率和高速成像技术, 燃气成份的准确快速测量技术等光学测试技术的发展。单滴燃烧研究的主要应用在于揭示燃料的燃烧机理, 分析燃料的燃烧特性, 提高燃烧装置的设计水平。

**关键词:** 凝胶燃料; 单液滴; 燃烧; 模型; 应用

**中图分类号:** V513

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 03-0001-09

## Modeling, experiment and application of single droplet combustion for gel fuel

Zhang Mengzheng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Modeling, experiment and application of single fuel droplet were discussed. The key problem of single droplet combustion model of gel fuel was to discover the combustion control process and main influencing factor according to the fuel chemistry configuration. The development of experiment technology depends on droplet-creating technique, the photography with high resolution and high speed and optical detector technology for combustion production. The research of modeling and experiment of single droplet could reveal the fundamental mechanisms, combustion characteristics and enhance design level of combustion chambers.

**Key words:** gel fuel; single liquid droplet; combustion; model; application

收稿日期: 2010-02-21; 修回日期: 2010-03-12。

作者简介: 张蒙正 (1964—), 男, 研究员, 研究领域为喷雾燃烧。

## 0 引言

液体燃料的燃烧是非常复杂的物理化学过程,通常认为包含燃料的雾化、蒸发、混合和化学反应等子过程,涉及到燃料液滴与环境气体之间的扩散、传热、传质和流动等现象。研究这些子过程有助于了解和揭示燃料的燃烧机理及相关的科学问题,也是提高液体动力系统燃烧室设计水平的基础。燃烧室中,燃料的燃烧是无数个离散的微小燃料单元(包括液膜、液丝和液滴)组成的液雾群的燃烧过程。而且,由于推进剂供应系统的持续工作,上述的诸子过程是在同一给定区域交错或者同时进行的,诸子过程之间的相互耦合作用非常强烈,也很复杂。为了简化并了解最基本的物理与化学现象,通常是从最简单的单个液滴(以下简称单滴)的燃烧过程入手,一般是将液滴假设为球形的,且将蒸发与燃烧一并考虑。使用的研究方法包括理论、仿真和实验。20世纪50年代初期,国内外陆续开展了单个液滴的理论建模和实验研究工作,已针对不同的液体燃料类型(如单组元/双组元、烃类/可贮存、自燃/非自燃等)和燃烧环境(主要考虑惰性/氧化剂环境、压力、温度、亚临界/超临界、相对静止/运动、有/无环境气体的对流等),陆续建立了许多蒸发和燃烧数值仿真模型<sup>[1]</sup>,研究成果在揭示燃烧机理方面发挥了一定作用。近年来,国外研究人员陆续开展了凝胶燃料单滴燃烧过程研究工作。本文主要讨论凝胶燃料单滴燃烧建模、实验研究的相关问题及其应用。

## 1 单滴燃烧的建模

### 1.1 简要回顾

上世纪50年代,Godsave、Spalding、Goldmith、Penner、Wise和Faeth等学者陆续在球形、准定常、恒压、物性参数恒定、忽略热辐射和液相反应等前提条件下,对单组分液滴在静止的惰性或者氧化环境中的蒸发和燃烧进行了研究。其后几十年里,国内外许多学者和研究人员

对单滴蒸发/燃烧模型进行了持续发展和完善<sup>[1-9]</sup>。研究的单滴蒸发模型主要有球对称模型和轴对称模型,而球对称模型包含Godsave和Spalding的“直径平方”定律模型和Law的无限热导率模型;轴对称模型有Prakash和Sirignano的轴对称模型以及Tong和Sirignano的轴对称模型。不同模型研究的因素各有侧重,但几乎所有模型都是在准稳态假设的条件下建立的。蒸发和燃烧涉及的影响因素非常多且复杂,几乎没有模型能综合考虑所有影响因素。因而,也就很难形成一个普适的单滴燃烧模型。

对于单滴蒸发/燃烧模型,通常是在球坐标系下建立数学模型进行分析求解。气相和液相数学模型主要考虑非理想气体效应和物性参数随温度、组分浓度等状态参数的变化,液滴与周围环境的传热传质,液滴内部的流动和温度的不均匀性,化学动力学参数的影响,自然对流换热的影响等因素。通过连续方程、动量方程、能量方程、组分方程、状态方程,同时辅以液滴和环境的初始温度、物性参数、平衡蒸发条件及化学动力学参数等初始和边界条件联立求解,获得液滴温度随时间的变化、气相温度场和浓度场、液滴蒸发速率、液滴半径随时间的变化等。如果研究氧化剂单滴和燃料单滴的蒸发/燃烧问题,则需要建立双球坐标系下的双滴蒸发/燃烧物理和数学模型。此时,气相和液相的数学模型需要考虑燃料单滴和氧化剂单滴之间的相互影响,也是在上述条件下,得到液滴蒸发/燃烧时气相参数和液相参数随时间的变化规律,滴径随时间的变化规律等。

近年来,随着凝胶推进剂研究和应用工作的进展,相关的工作活跃起来。凝胶推进剂是在原液体燃料的基础上,添加了胶凝剂、助剂和含能物质(AI、C)等形成的混合物,这导致凝胶燃料的蒸发/燃烧特性发生变化,主要在于:(1)凝胶过程改变了原基体燃料的分子结构,也影响燃烧过程中的蒸发潜热;(2)加热条件下,无机胶凝剂和有机胶凝剂形成的凝胶燃料的液滴内部流动是不同的,而无机胶凝剂又是不燃烧的不燃物质;(3)添加物与基体燃料有不同的物

理化学性质。这些影响使得凝胶燃料的蒸发和燃烧过程比原基体燃料复杂得多, 凝胶燃料的单滴燃烧建模也更为困难。

文献 [7] 对他人的研究工作进行了综述: (1) 基于无机胶凝剂、非金属化的 JP-5 凝胶燃料的燃烧遵循扩散控制燃烧的  $d^2$  定律, 胶凝剂对燃烧时间的影响可用蒸发潜热考虑; 随着胶凝剂的增加, 凝胶燃料的蒸发潜热增加, 点火延迟时间和需要的点火热量也增加; 凝胶燃料的燃烧速率低于纯液体燃料, 燃烧时间随着氧化剂质量分数的增加而减小。(2) 基于有机胶凝剂的含能凝胶燃料可看作具有特有燃烧机理的多组分燃料的混合物, 且与浆滴的燃烧过程类似。燃烧的初始阶段, 易挥发的组分先汽化, 液滴组分的空间分布依赖于最初的混合和液体燃料的扩散速率。随着液滴表面易挥发的燃料组分浓度的逐渐减小, 液滴温度逐渐由较难挥发的组分的沸点所决定, 而部分较易挥发的组分被限制在液滴内, 最后导致液滴的微爆。开始阶段, 碳浆滴的燃烧与纯液体燃料相似, 并且碳浆滴从变形开始到破碎的过程中, 其直径几乎保持不变; 增加燃料中碳粒子含量, 初始燃烧速率降低, 并且液滴变形也提前。基于铝粒子的凝胶浆滴燃烧时, 浆滴的刚性外壳能随着内部压力的升高而破裂, 并产生微爆。(3) 基于有机胶凝剂的凝胶液滴的燃烧过程中, 随着液滴内部分燃料的蒸发, 液滴表面会逐渐形成一弹性胶凝剂层, 它阻止了液滴内部燃料的继续蒸发。这导致燃料在液滴内部蒸发形成气泡, 引起液滴膨胀爆裂和燃料喷射, 并最后破碎剩余的液滴。这是个周期性的燃烧过程, 直到完全消耗掉燃料和胶凝剂。

进而, 文献 [7] 进行了基本的凝胶燃料和 4 种混合燃料的实验研究。基本的凝胶燃料由 70% 的 JP-8 和 30% 的胶凝剂组成。JP-8 以煤油为基本成份, 由多种不同成份的物质 (18% 的芬芳物, 35% 的环烷, 45% 的石蜡, 2% 的烯烃) 组成, 各物质的沸点介于 160–270℃ 之间。胶凝剂 (Thixatrol 289) 由溶解剂 (含量为 50%、沸点温度为 144℃ 的甲基二异戊基酮 (Methyl Isoamyl Ketone, MIAK)) 和未知的有机胶凝物质 (G、含

量为 50%) 组成。G 的沸点温度和蒸发潜热明显高于 JP-8。4 种混合燃料分别是甲苯/机油混合物 (质量比为 1:1)、甲苯/十六烷混合物 (质量比为 1:1)、甲苯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 混合物 (质量比为 1:2) 和乙醇/十六烷/水的混合物。文献提出的所研究的基于有机胶凝剂的凝胶燃料燃烧可以分为以下 4 个阶段:

(1) 初始阶段。起初, 凝胶液滴是内部组分均匀的高粘度液体, 其燃烧类似于液体燃料单滴燃烧, 有明显的包络火焰。液滴的瞬态温度取决于各组分的沸点温度, 随液滴温度的不断升高, MIAK 的沸点最低, 最先蒸发; JP-8 和胶凝剂的沸点温度较高, 蒸发温度也较高。液滴体积逐渐减少, 可观察到内部的湍流和各组分的混合。然而, 与液态燃料相比, 由于凝胶燃料的粘性较高, 其内部的湍流强度也较小, 混合也较慢; 随着 MIAK 的蒸发和持续减少, 液滴中心的混合燃料还处于均质状态, 但外表面开始相分裂, 产生滴状胶凝物质。

(2) 相分离阶段。此阶段, 几个过程同时发生。随着 MIAK 的持续蒸发, 环绕凝胶液滴表面的胶凝物慢慢形成一连续的高粘度薄膜层 (如图 1(a) 所示), 并阻止内部的气泡穿过; 液滴内部, MIAK 继续蒸发, 形成小气泡并不断聚集 (如图 1(b) 所示)。无机胶凝剂燃料单滴燃烧过程中, 液滴表面易形成一层坚硬的外壳, 导致液滴内部压力升高, 直至破裂而爆破液滴。有机胶凝剂单滴燃烧过程中, 外表面的膜层是一均匀的液体层, 随着内部气泡的膨胀, 液滴也在膨胀, 内部压力基本保持为常数, 膨胀将使粘性胶凝剂膜层厚度持续减小, 直到膜层破裂并产生蒸汽喷射, 导致液滴体积突然减小。同时, 破裂的膜层又收缩回液滴表面。图 2 显示了一个燃烧液滴的燃烧 (a)、气泡产生 (b) 和喷射 (c) 过程。实验表明, 第一次起泡的体积约占液滴初始体积的 20%–50%。

(3) 胶凝剂膜形成及破裂阶段。MIAK 几乎完全蒸发后, 液滴内部也形成了两种可区分的相态: JP-8 和胶凝剂。内部的胶凝剂粘附在液滴外层的胶凝剂膜层上, 使之变厚。膜层对燃料的蒸

发和穿透产生极强的阻碍,使内部的 JP-8 蒸发起泡。由于气泡的膨胀,胶凝剂膜层的厚度逐渐减小直到被蒸汽撕破。通过在凝胶中添加微小的可视粒子,再观测湍流状态下粒子的运动速度,可证实液滴内部不同粘性的两相具有内部运动较快,靠近膜层运动较慢的特点。当 JP-8 蒸发时,由于 JP-8 本身是多组分燃料,并且每种组分的沸点也不同,导致液滴温度增加速率较快。

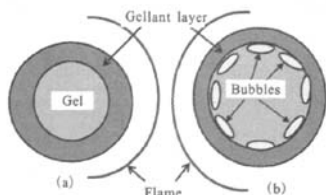


图 1 凝胶液滴燃烧时内部气泡的形成

Fig.1 Formation of bubbles inside the burning droplet

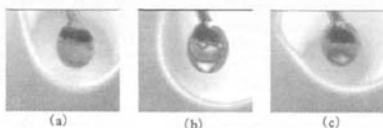


图 2 凝胶液滴燃烧 (a)燃烧 (b)气泡产生 (c)喷射

Fig.2 Gelled droplet burning

(a)beginning; (b)with bubble; (c)jetting

(4) 胶凝物质燃烧阶段。这是液滴燃烧的最复杂的阶段。此时,大部分 JP-8 已经蒸发完,而胶凝物质才开始蒸发或分解。这时的胶凝物质膜层非常厚,还可以显著拉伸以阻止残余的 JP-8 蒸汽穿过。气泡的形成和增长都非常迅速,在最后破裂之前,体积会超过初始体积的两倍。初始阶段,气泡可以使胶凝物质层伸长 10%~25%直到破裂;而在后期,气泡可以使胶凝物质膜层被拉伸到初始尺寸的 100%~400%;最后,胶凝物质 (G) 开始燃烧。

可见,就凝胶燃料的蒸发和燃烧而言,不同的凝胶燃料有不同的组分和胶凝机理。由此导致凝胶液滴有不同的蒸发过程,这些不同的阶段特征控制着蒸发和燃烧速率。无机胶凝剂不参与燃烧,使推进剂性能减小。有机胶凝剂可参与燃

烧,性能损失也会减小。当对其充分加热后,凝胶燃料的状态将发生改变,更像一种液态混合物或者多组分燃料。此时,可按照多组分燃料燃烧机理理解其燃烧过程。不同的是,部分燃料蒸发后,在液滴表面会形成胶凝剂弹性膜,它阻止液滴内部燃料的进一步蒸发,导致燃料在液滴内部蒸发,从而产生气泡,导致液滴充胀,使得燃料喷射,直至液滴最后完全破碎。这有可能导致燃烧室中出现粗糙燃烧问题。此时,液滴内部分子扩散是燃烧过程的主要控制机理。建立凝胶液滴燃烧模型,首先需根据凝胶燃料的本征结构,分析不同凝胶燃料的理化性质,依据不同阶段液滴体积、温度、质量、组分的变化建立其蒸发模型。然后,根据不同组分燃烧动力学特性建立燃烧模型,得到燃烧速率、燃气成份、温度等。目前,凝胶燃料单滴燃烧建模方面提出的模型有:

#### (1) 连续热力学理论模型

此模型将有机凝胶燃料液滴的蒸发燃烧过程看作是多组分的连续混合物液滴的蒸发和燃烧,采用连续热力学理论模型,用概率密度函数描述液滴中组分分布,从而建立起简化的准稳态液滴蒸发模型<sup>[8]</sup>,该模型仅适用于混合物的组分种类足够多,以至于组分浓度近似地随分布变量连续变化的情况。文献 [9] 采用离散混合物的光谱理论分析了多组分、球对称、互相可溶的、液滴准稳态蒸发和燃烧过程。文献 [10] 采用连续热力学模型分别研究了多组分混合物液滴蒸发过程中内部混合特性,研究了 4 种多组分液滴的蒸发和高温分解特性。

#### (2) 基于时间的(非定常)燃烧模型

文献 [11] 将有机凝胶推进剂蒸发燃烧过程分为胶凝剂膜形成和气泡形成/液滴破碎两个阶段(如图 3 所示),假设凝胶液滴为球对称的液态燃料和胶凝剂组成的双组元液态混合物,液滴内部温度均匀且等于最易挥发物质的沸点,液滴已达到该沸点温度并已开始燃烧,胶凝剂和燃料的粘性均不变。在此基础上,建立了基于时间的理论模型。模型研究表明,液体燃料从液滴表面蒸发的速率与液滴大小有关,并影响胶凝剂膜的厚度;气泡形成时胶凝剂膜的张力在很短的时间内

即达到很高的值,且在超过胶凝剂膜材料的屈服点时,则导致液滴破裂;胶凝剂膜形成阶段消耗时间几乎是气泡形成/液滴破碎阶段的3倍。

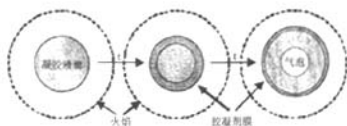


图3 凝胶液滴燃烧过程示意图

Fig.3 Schematic of single gelled droplet combustion

### (3) 振荡蒸发理论模型

模型将胶凝剂膜对凝胶液滴中液体蒸发的影响(即液体蒸发气泡穿透胶凝剂膜的扩散燃烧过程)用振荡蒸发理论模型描述<sup>[4]</sup>,通过理论分析和数值仿真,研究了有机凝胶燃料液滴振荡蒸发对火焰特征的影响,振荡频率对凝胶液滴燃烧火焰结构、温度等的影响。

## 1.2 建模面临的问题

单滴燃烧模型的建立主要依赖于对单滴燃烧过程的认知,即,对从液态的燃料液滴到生成气态燃烧产物之间的物理和化学过程的正确理解,如,控制燃烧的主要过程和关键因素,不同燃料的化学反应步骤,燃烧产物的成份等等。其次,在于对单滴燃烧与环境间相互作用的准确把握,如,液滴的火焰峰界面、与环境的质量和能量交换、环境压力和温度对燃烧过程影响等等,这也是单滴燃烧能在多大程度上反映或者表征群雾燃烧的关键。还有,燃料物理性质的掌握程度,如煤油、混肼等燃料究竟应选取何种成份(替代物),其沸点、表面张力、换热系数和比热容等物性参数随温度变化的准确关系,燃烧产物的物性和生存条件等等。最后,是计算求解技术的发展水平。

目前,得到广泛认可的亚临界条件下单滴燃烧过程是液滴首先需要蒸发、蒸发之后再行气相混合,其后是化学反应;超临界条件下可以忽略燃料的雾化过程。由此,物理模型包括了蒸发、混合和化学反应等过程。但是,氧化剂和燃料是否在仅能在气相条件下才能发生化学反应?

在完成蒸发之前,液相是否可能或者已经产生化学反应?如何验证这个问题?

凝胶推进剂是在液体推进剂中均匀溶入固体颗粒(金属或非金属),再通过胶凝剂和助剂作用而生成的静态“有形”,在一定的剪切应力作用下能恢复液态,并与原推进剂有相近物理性质的混合物。凝胶过程是新物质的融入过程,它改变了原基体燃料的结构。就常规可贮存推进剂而言,肼类燃料和硝基氧化剂本身就是混合物,融入胶凝剂等物质后,原基体燃料、胶凝剂、助剂、含能物质在新的燃料体系中如何分布?上述物质的物理化学性质是否会发生变化?燃烧室的压力和温度是否会改变凝胶燃料的物性?又如何改变?有机胶凝剂的凝胶液滴的燃烧过程中周期性的弹性胶凝剂层形成、液滴膨胀爆裂和燃料喷射是否是燃烧室粗糙燃烧的机理?

理想而言,完整的单滴燃烧模型应当考虑燃料的组分、物性、液滴的形状和尺寸、与环境气体的相对运动速度、环境气体的压力、温度、成份及物性等诸多因素,这是非常复杂而艰巨的工作,也是研究者持之以恒的目标。凝胶燃料单滴燃烧模型的建立更为困难。问题的关键在于首先必须了解要研究的凝胶燃料的凝胶体系,了解燃料的微观形貌,确定燃料中各组份的分布情况;其次,是如何简化非常复杂的问题,确定控制燃烧过程的关键步骤;再者,是要提炼出关键的影响因素,就主要过程和主要参数建立分析模型,从而揭示燃烧机理,得出影响燃烧装置设计的主要结论。无疑,现阶段,无论分析和建模均需借助实验提供直观的印象。

## 2 单滴燃烧实验

单滴燃烧实验是指在一定的环境(温度、压力、环境气体成份)下,进行单个液滴燃烧过程的物理和化学现象识别,液滴与环境质量和能量交换过程诊断,燃烧产物特性(成份、温度等)测量等相关问题研究的科学实验工作。通常,是将单个的燃料液滴以某种方式置入气态的氧化剂环境中,通过点火(非自燃条件,)或者不点火

(自燃条件)使其发生化学反应。单滴燃烧实验涉及到单个液滴的产生技术,氧化剂(或者富氧化剂)的环境压力、温度和气体成份的生成技术,液滴运动速度和轨迹跟踪和捕获技术,液滴和环境温度、压力测量技术,燃烧产物的诊断技术等诸多实验相关技术。

## 2.1 实验方法

目前,已经提出和使用过的、用于单滴燃烧的实验方法主要有悬挂法、多孔球法、悬浮法和飞滴法,这些主要方法的概况如下。

### (1) 液滴悬挂法

悬挂法是指将燃料液滴悬挂在石英丝或热电偶上,然后将液滴置于氧化剂环境中燃烧。使用石英丝主要是其能耐较高的温度;使用热电偶的目的在于可用它来跟踪并测量液滴本身温度的变化。此方法相对容易,悬挂的液滴处于相对静止的状态,也便于用一些测试手段对液滴尺寸、温度、环境温度、压力等参数进行较精确的测量。不足在于:1)因悬挂液滴的石英丝或者热电偶本身的体积,液滴的尺寸很难取小(如小于1mm),实际尺寸要远大于实际雾化所产生的液滴。Law 等人 and Miyasak 认为在悬挂用石英丝直径小于0.1 mm 时可以忽略液滴变形和热量传递改变的影响<sup>[3]</sup>。2)悬挂的液滴形状与实际形状不同,且常常是非球形的。液滴蒸发过程中,液滴对悬挂用石英丝或者热电偶的表面张力会使液滴发生变形,这在蒸发的最后阶段尤其明显。3)液滴内部的实际传热过程与内核为液体的单滴有所区别,石英丝或者热电偶本身的热传导也会改变液滴与周围环境之间的热量交换,这导致实际测量到的液滴温度可能与实际情况相差较大。4)最重要的是静止的液滴与环境气体的换热与实际情况不同。Okajima<sup>14</sup>和 Kumagai 的研究表明<sup>[15]</sup>用石英丝悬挂对燃烧液滴的综合影响稍稍降低了燃烧效率。

### (2) 多孔球法

此方法是不断向多孔球供给燃料,使其表面保持湿润来模拟燃料液滴。这主要用于挥发性小的液体燃料,研究其稳态蒸发过程。

### (3) 气悬和磁悬浮法

气悬法是利用气流的浮力与液滴的重力相平衡,使得液滴悬浮于高温环境中的一种方法。而磁悬法是在液滴中添加某种磁性微粒(如 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),使之悬浮在磁场中的方法。其优点是液滴没有直接接触的热电偶、石英丝等附件,不会有导热损失和变形。但不足在于:1)很难控制液滴的位置;2)添加的磁性物质会对液滴传热和燃烧产生影响;3)根据场协同理论,在流场与磁场之间可能还存在相互作用,也会改变传热过程,从而影响到燃烧过程。

### (4) 加热板方法<sup>[16]</sup>

加热板方法是将液滴跌落(或注射)在预先加热的、有一定弯曲度、且斜置的薄金属板上。将加热板设计成一定弯曲的目的在于控制液滴的横向流动,斜置是为了方便光学仪器测量。金属板用酒精灯加热到800~1000K。此方法的显著特点在于简单和易操作。主要不足在于内部温度不均,仅有液滴部分面积发生燃烧(见图4)。

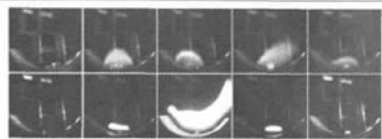


图4 燃烧的图像

Fig.4 Combustion of nitromethane gelled with guar gum

### (5) 飞滴(抛滴、落滴)实验法

与前述方法相比,该方法最接近实际,具备了液滴与环境气流的对流换热条件;可使液滴迎风面和背风面产生不同的效果;对较小直径的液滴不会有悬挂材料的影响;可对挥发性大的燃料进行实验;更适合于自燃推进剂等等。主要问题在于这种实验方法对实验技巧、研究设备和测量仪器的要求较高。液滴以一定速度运动,液滴本身和周围流场的测量都有较大的困难;液滴蒸发过程中,随着燃料液滴运动,直径不断减小,对流强度也将不断变化。需要设计可以精确控制液滴生成的供液装置,需要更大的实验研究空间,速度更高的温度、压力和液滴图像捕获仪器。近年来,飞滴实验已有很大发展,已经可以同时记录较小液滴的短暂蒸发过程。图5是文献<sup>[13]</sup>

获得的运动的凝胶燃料单滴的燃烧过程图像。



图5 燃烧的凝胶液滴运动过程

Fig.5 Picture series of moving and burning gelled propellant droplets

## 2.2 实验装置和测量仪器

这里, 以相对复杂的飞滴法实验为例。通常, 需要以下研究装置和测量仪器。

### (1) 实验舱

首先, 要以燃烧室的实际工作环境为基准, 根据模拟准则和当前可用的器材 (如观察窗石英玻璃等), 确定环境温度、压力以及氧化剂 (富氧化剂) 的浓度等环境参数。例如, 对于可贮存推进剂、挤压式的双组元液体火箭发动机来说, 实验舱的压力环境可取 1.0~5.0MPa, 环境气体温度在 290~1000K。产生富氧化剂、压力和温度环境气体的方法有预热富氧化剂气体填充的方法, 使用加热器对富氧化剂加热的方法, 应用高混合比燃烧产生压力和温度环境的方法。相比较而言, 后者简单且与实际更为接近, 主要问题在于产生富氧化剂环境过程中对燃烧过程的准确控制。

通常, 为了液滴尺寸、运动轨迹和燃烧产物成份的光学测量需求, 实验舱需要开设 2~3 个观测窗口。观察窗的尺寸需要依据环境温度、压力、液滴尺寸、运动速度、预估的燃尽时间、石英材料、光学测量仪器的拍摄速度等综合考虑。窗口上安装的石英玻璃既要承受一定的温度和压力, 又需满足摄影系统的光学和观测的需要。实验舱主体上需要安装测温热电偶、测压传感器、供气入口、抽气出口、冷却水进出口和安全阀等。为减少热量损失, 需在实验段内包裹一层保温隔热材料, 使实验段的温度很快达到实验要求并保持相对长的时间。除此之外, 装置的预抽真空、冷却、废气和污染物处理、安全防护等也是需要考虑的问题。典型的实验系统如图 6 所示。

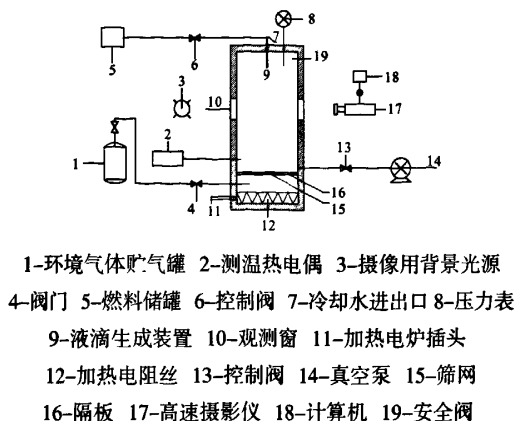


图6 实验系统示意图

Fig.6 Schematic of single droplet burning experimental system

### (2) 单滴产生装置

单滴产生技术是单滴实验技术水平的关键。综合考虑实验舱观察窗尺寸、光学仪器的测量速度和精度、燃料的燃尽时间等问题, 单滴的直径应在 0.5~2mm, 运动速度 20~30m/s。可用的方法包括微型液体泵, 快速开关的毛细管喷射和微孔注射方法。

### (3) 液滴捕获

需要测量的运动参数主要是液滴尺寸及其运动轨迹, 常用的是高速摄影技术, 要求其拍摄速度和分辨率尽可能的快和高, 一般应大于 5000 帧/秒和 1024×1024, 最好采用彩色摄影技术, 能在整个实验过程中快速清晰地记录液滴直径在蒸发/燃烧过程的变化。

PIV 也是采用的方法之一, 标准的 PIV 测试系统主要包括光源系统、图像采集系统和图像处理系统<sup>[4]</sup>, 在反映和跟踪燃烧场的流场信息方面有一定优势, 问题在于需要示踪粒子。燃烧初期运动的液滴本身就可作为示踪粒子, 实验可以测量自由下落的液滴与其周围静止气体之间的相对速度。在燃烧后期, 需要添加示踪粒子, 示踪粒子不仅要满足无毒、无腐蚀、不参与燃烧、稳定等要求, 还要满足流动跟随性和散光性等要求。

### (4) 燃气成份测量

燃气成份测量主要是使用基于分子或者原子

辐射的光学诊断技术。目前,应用较多的是 PLIF 技术。碳氢燃料反应中生成的一些中间产物,如 OH 基、CH 基、甲醛本身就是良好的荧光粒子。OH 基通常存在于反应区及高温燃烧产物区中,CH 基主要存在于反应区中,而甲醛是反应放热的主要指示剂,它们的 PLIF 图像可以反映火焰结构。由于 OH 基几乎出现在所有类型的燃烧环境中,并且可作为一种主要的中间产物并具有相当高的平衡浓度,加之其光谱带位于近紫外波段,能用普通的激光进行激发,且荧光信号较强,易于观测,所以 OH 基 PLIF 技术是显示与测量各种燃烧流场的火焰结构的主要方法。除此之外,其它燃烧中间产物(如 NO、CO 等)及最终产物(如 CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 等)的 PLIF 探测技术也在不断发展和应用中<sup>[10]</sup>。

### 2.3 实验面临的问题

单滴燃烧实验是艰苦和细致的研究工作,问题的关键在于如何利用当前的实验条件,发现关键的物理和化学现象,找出主要影响因素,理解燃烧问题,揭示燃烧机理,提供燃烧室设计需要的主要参数。

单滴燃烧实验水平主要依赖于光学等测试技术的发展,如微小液滴的生成技术,高分辨率、高速成像技术,燃气成份的准确快速测量技术等。目前,如何生成一定尺寸和运动速度的单个球形液滴是实验技术的关键之一,这是影响实验研究水平和结果的重要因素。液滴跟踪和捕获的单项技术发展的非常迅速,但能否将色彩、高分辨和高速记录集于一身是实验技术的另一个关键。基于激光和荧光的燃烧产物测量技术可以准确诊断出燃烧产物中某种成份,但主要问题在于这些仪器都是基于产物分子或者原子的散射波长为基础的,因而,单台仪器每次仅能测量一个成份,能否在一台仪器中集多种成份为一体,实现燃烧过程的多组分、场分布、实时和快速诊断,将是对测量技术提出的最大挑战。

## 3 单滴燃烧研究的应用

单滴燃烧是液体动力装置中燃烧问题的简化

和抽象,也是实际群雾燃烧问题研究的基础。建立单滴蒸发/燃烧模型的主要作用是理论分析和计算奠定物理和化学基础,再通过仿真计算,获得给定条件下单滴的蒸发速率、燃烧速率(或燃尽时间)、内部温度及其分布、燃烧产物及其浓度分布等参数,进而了解相关参数对燃烧特性的影响,具体包括:1)发现燃料蒸发和燃烧过程中的物理和化学现象,进而揭示燃烧机理,研究燃烧规律;2)研究单滴蒸发速率、燃尽时间与燃料化学结构、物性、液滴尺寸、环境温度和压力的关系,从而获得有限容积和相关条件下液滴可能的滞留时间,寻求加速燃烧的相关措施,为燃烧室设计提供依据。对于凝胶燃料,其意义还在于:1)凝胶燃料与基体燃料燃烧过程的主要特征,控制燃烧过程的关键因素;2)胶凝剂与基体燃料的相互作用与影响;3)胶凝剂成份、含量对燃料蒸发和燃烧过程的影响;4)胶凝剂成份、含量对燃尽时间的影响;5)改善燃烧性能的措施。

单滴燃烧实验的主要目的在于研究燃烧过程的主要物理和化学现象,进而揭示燃烧机理,为燃烧装置的设计提供参考。具体包括:1)通过实验诊断燃料的蒸发和燃烧过程,发现燃烧的主要现象和特征,理解燃烧过程相关的物理和化学问题,揭示燃烧机理,为建模提供支持;2)通过实验研究,确定单滴燃尽时间与液滴尺寸、环境温度和压力的关系,进而验证或者修正燃烧模型,为燃烧室设计提供直观依据。对于凝胶推进剂,意义在于:1)判断胶凝剂和基体燃料燃烧过程特征现象,寻找燃烧过程的控制因素;2)研究胶凝剂成份、含量对燃料蒸发和燃烧过程和燃尽时间的影响。

单滴燃烧研究的宗旨是发现燃烧现象,揭示燃烧机理,掌握燃烧特性,为燃烧室的特性分析(如点火启动特性,亚临界/超临界燃烧问题,周期性的胶凝剂层形成、液滴膨胀爆裂和燃料喷射是否会导致粗糙燃烧)、燃烧室特征长度和停留时间的选择、燃烧过程控制和燃烧效率的提升等提供参考,其科学意义和实用价值不言而喻。建模是仿真的基础,模型和仿真有助于发现规律性的问题,实验是发现现象、判别燃烧主要过程的



主要方法, 可为建模提供直观依据, 也是验证模型正确性的唯一手段, 三者相辅相成, 互为补充。单滴燃烧理论和实验研究工作的发展依赖于对科学问题的追求和动力装置研发的需要, 也依赖与大专院校、科研院所等单位的共同努力, 最终还是服务于高水平动力装置的研发。

#### 参考文献:

- [1] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用 [M]. 国防科技大学出版社, 1995.
- [2] Benveniste Natan, Shai Rahimi. The Status Of Gel Propellants In Year 2000, Combustion Of Energetic Materials[M]. Begel House, Boca Raton, 2001.
- [3] 胡小平. 单元推进剂液滴在惰性高温环境中的分解燃烧 [D]. 国防科技大学研究生院, 1985.
- [4] 聂万胜, 庄逢辰. 一甲基肼的高压蒸发研究[J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(5): 82-86.
- [5] 李云清, 浅耀义, 罗滇生. 单滴碳氢燃料的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(4).
- [6] 丁继贤. 单液滴蒸发的压力效应与热环境影响研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2007.
- [7] Yair Solomon, Benveniste Natan, Yahin Coben. Combustion of Gel Fuels based on Organic Gellants [R]. AIAA2006-4565.
- [8] Hallett W. A Simple Model for the Vaporization of Droplets with Large Numbers of Components[J]. Combust. Flame, 2000, 121: 334-344.
- [9] Manuel A, Daniel E. Multicomponent Fuel Droplet Vaporization and Combustion using Spectral Theory for a Continuous Mixture[J]. Combust. Flame, 2003, 135: 271-284.
- [10] Abdel-Qader Z, Hallett W. The Role of Liquid Mixing in Evaporation of Complex Multicomponent Mixtures: Modelling using Continuous Thermodynamics[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60: 1629-1640.
- [11] Hallett W, Clark N. A Model for the Evaporation of Biomass Pyrolysis Oil Droplets [J]. Fuel, 2006, 85: 532-544.
- [12] Kunin A, Natan B, Greenberg J. Preliminary Modeling of the Combustion of Gel Fuel Droplets [C]. Tel Aviv & Haifa: 48th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences, 2008, 20080227-28.
- [13] Volker Weiser, Sascha Glaser. Investigations on the Droplet Combustion of Gelled Mono - and Bipropellants [R]. AIAA2005-4474.
- [14] 张蒙正, 张泽平, 李鳌. 现代光学技术在喷雾燃烧研究中的应用及进展[J]. 光子学报, 1999, (3): 155-161.
- [15] Zhang Mengzheng, Wang Liang, Yang Guohua. Principle and Design of a Measuring System of Mixture Ratio and Combustion Species Concentration [J]. Acta Photonica Sinica, Vol.36 SUP, June 2007, 149-153.
- [16] 丰松江, 何博, 聂万胜. 液体火箭凝胶推进剂燃烧特性研究进展[J]. 火箭推进, 2009, 35(4): 1-8.
- [17] 苏凌宇, 刘卫东. 压力振荡环境下液滴非平衡蒸发过程的理论分析及试验研究[J]. 火箭推进, 2009, 35(5): 1-8.

(编辑: 王建喜)