



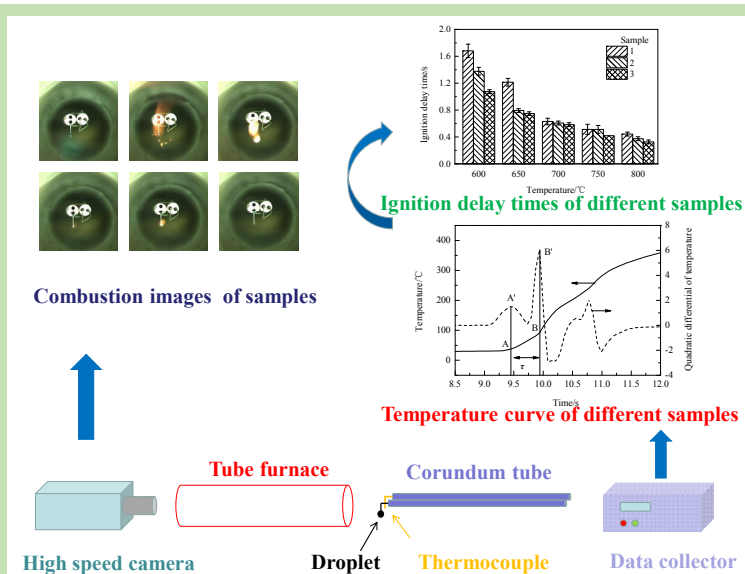
DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219241

# Ignition and combustion characteristics of Al-oleic acid/n-heptane-based nano-slurry fuel droplets

Baoxin DAI, Yanwu JI, Siyi ZHANG, Baozhong ZHU\*, Yunlan SUN\*

School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China

**Abstract:** The ignition and combustion characteristics of n-heptane, oleic acid/n-heptane mixed fuel, and Al-oleic acid/n-heptane-based nano-slurry fuel droplet which contains 20wt% nano-sized Al powder at different temperatures (600~800 °C) were studied by a droplet suspension method. A high-speed camera was used to observe the ignition and combustion process of these droplets when the droplets were placed into the tubular resistance furnace. The temperature changes of gas phase around the droplets were recorded by a thermocouple, and the ignition delay times of the droplets were calculated according to the obtained temperature



curves. The results showed that the additions of nano-sized Al powder and oleic acid into the n-heptane reduced the ignition delay time of n-heptane droplets. With the ambient temperature increase, the ignition delay times of n-heptane, oleic acid/n-heptane mixed fuel, and Al-oleic acid/n-heptane-based nano-slurry fuel droplets all decreased significantly, but the trend gradually became flat. The relationship between the ignition delay time of Al-oleic acid/n-heptane-based nano-slurry fuel droplet and the ambient temperature were described by the Arrhenius equation. Compared the combustion of Al-oleic acid/n-heptane-based nano-slurry fuel droplet with n-heptane and oleic acid/n-heptane mixed fuel droplets, the combustion process of Al-oleic acid/n-heptane-based slurry fuel droplet had significant difference. The combustion of Al-oleic acid/n-heptane-based nano-slurry fuel droplet had three stages: stable combustion stage of n-heptane, micro-explosion stage of n-heptane and micro-explosion stage of surfactant. Especially, the combustion process of Al-oleic acid/n-heptane slurry fuel droplet had long combustion time, and the flame was extinguished and re-ignited. In addition, the combustion process accompanied the severe flame deformation and sputtering of Al particles. In micro-explosion stage of surfactant, most of nano-sized Al powder form the agglomerates, then the formed Al agglomerates occurred redox reactions and burned completely.

**Key words:** nano-sized aluminum powder; n-heptane; nano-slurry fuel; ignition characteristic; combustion characteristic

收稿: 2019-06-25, 修回: 2019-08-23, 网络发表: 2019-09-18, Received: 2019-06-25, Revised: 2019-08-23, Published online: 2019-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51376007; 51876187)

作者简介: 代宝鑫(1994-), 男, 重庆市江津区人, 硕士研究生, 研究领域为高能燃料燃烧, E-mail: 3308808087@qq.com; 通讯联系人, 朱宝忠, E-mail: bzzhu@cczu.edu.cn; 孙运兰, E-mail: yunlansun@163.com.

**引用格式:** 代宝鑫, 季言午, 张思懿, 等. 铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料液滴着火燃烧特性. 过程工程学报, 2020, 20(4): 476-483.

Dai B X, Ji Y W, Zhang S Y, et al. Ignition and combustion characteristics of Al-oleic acid/n-heptane-based nano-slurry fuel droplets (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(4): 476-483, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219241.

# 铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料液滴着火燃烧特性

代宝鑫, 季言午, 张思懿, 朱宝忠\*, 孙运兰\*

常州大学石油工程学院, 江苏 常州 213164

**摘要:** 采用液滴悬挂法研究了正庚烷液滴、油酸/正庚烷混合燃料液滴、含 20wt% 纳米铝粉的铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料液滴在不同温度下(600~800 °C)的着火燃烧特性。用高速摄像机观测液滴进入管式电阻炉后的着火燃烧过程, 使用热电偶记录液滴周围的气相温度变化, 同时通过对应的温度曲线计算液滴的着火延迟时间。结果表明, 纳米铝粉和油酸的添加均能降低正庚烷液滴的着火延迟时间。随温度升高, 正庚烷、油酸/正庚烷混合燃料、铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料液滴的着火延迟时间显著降低, 但变化趋势逐渐趋于平缓。铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料液滴的着火延迟时间与环境温度满足阿累尼乌斯方程。与纯正庚烷、油酸/正庚烷混合液滴的燃烧过程相比, 铝-油酸/正庚烷基浆体燃料液滴的燃烧过程有显著差异, 其燃烧经历 3 个阶段: 正庚烷稳定燃烧阶段、正庚烷微爆炸阶段和表面活性剂微爆炸阶段。铝-油酸/正庚烷基浆体燃料液滴燃烧时间延长, 火焰熄灭后又复燃, 且燃烧过程中发生剧烈的火焰形变和铝颗粒喷射现象, 大部分铝以团聚体形式在第三阶段完成氧化还原反应。

**关键词:** 纳米铝粉; 正庚烷; 纳米浆体燃料; 着火特性; 燃烧特性

**中图分类号:** TQ460.6+4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2020)04-0476-08

## 1 前言

液态碳氢燃料储运方便、安全性高, 广泛应用于航天航空领域, 但传统碳氢燃料热值较低, 着火延迟时间长, 制约着航天器的性能。高性能飞行器的发展对液态碳氢燃料的热值提出了较高要求, 虽然化学合成具有新分子结构的燃料可显著提高碳氢燃料的密度和体积热值, 但燃料的粘度和冰点也会急剧增加<sup>[1-4]</sup>。因此, 迫切需要探寻一种新方法提高液态碳氢燃料的体积热值。

金属(如铝)的氧化过程释放大热量, 可作为能量载体添加到液态燃料中。与普通金属粉相比, 纳米金属粉不易堵塞管道且易实现完全燃烧, 引起研究者的广泛关注<sup>[5-11]</sup>。Gan 等<sup>[12]</sup>确立了铝/正癸烷纳米流体燃料液滴的 5 个燃烧阶段: 点火、典型燃烧、微爆炸、表面活性剂燃烧和铝液滴燃烧。Kim 等<sup>[13]</sup>发现压力大于 1 MPa 时, 添加 0.1wt% 纳米铝颗粒的煤油液滴, 其着火延迟时间大于纯煤油液滴的着火延迟时间, 但添加 1wt% 纳米铝颗粒的煤油液滴, 着火延迟时间小于纯煤油液滴的着火延迟时间。Saad 等<sup>[14]</sup>在乙醇中添加了 5wt% 直径为 80 nm 的铝粉, 发现液滴的燃烧速率提高约 140%。Javed 等<sup>[15]</sup>在煤油中添加少量纳米铝粉, 发现液滴的着火延迟时间显著下降, 燃烧速率显著提高, 但未观察到单独的铝液滴火焰和燃烧后的残留物。Mehta 等<sup>[16]</sup>分别研究了添加 0.5wt% 的铝、铁、硼纳米颗粒的柴油在单缸压缩发动机中的性能和排放情况。结果表明, 纳米流体燃料表

现出较低的着火延迟时间和较长的燃烧时间, 虽然纳米流体燃料降低了峰值气缸压力和燃料消耗量, 但排气温度升高, 导致 NO<sub>x</sub> 排放量增加。上述研究可知, 添加纳米金属颗粒可促进碳氢燃料着火, 但其燃烧过程更复杂, 且这些研究主要集中在纳米流体燃料着火燃烧特性方面, 对纳米浆体燃料着火燃烧特性尚未涉及, 因此有许多未知因素需进一步探索。

正庚烷的自然着火特性与柴油相当, 常被用作柴油的替代燃料<sup>[17]</sup>, 但目前对铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的研究较少。Irfan 等<sup>[18]</sup>研究了不同温度下正庚烷基纳米流体燃料液滴的自然和燃烧特性, 但浓度仅限于 5wt%。韩伟康等<sup>[19]</sup>研究了纳米铝粉及表面活性剂在低温时对正庚烷着火特性的影响, 但其纳米铝粉的浓度最高为 7.5wt%。目前, 对更高浓度下的铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的着火和燃烧特性不清楚, 因此需进一步研究。本工作以含 20wt% 纳米铝粉的正庚烷基浆体燃料为研究对象, 探究其液滴在不同温度下的着火特性和燃烧过程, 旨在为纳米浆体燃料的尽早应用奠定基础。

## 2 实验

### 2.1 材料与试剂

纳米铝粉(nAl, 平均粒径为 50 nm, 上海茂果纳米科技公司), 油酸和正庚烷(分析纯, 上海沪试有限公司)。

### 2.2 实验设备与分析仪器

本实验所用着火燃烧装置如图 1 所示。该装置主要

由 4 部分构成：图像采集系统、送料系统、温度采集系统、燃烧室和控温系统。图像采集系统由 i-speed TR 型高速摄像机(英国奥林巴斯公司)和计算机组成，用于记录液滴整个燃烧过程，高速摄像机的帧率设置为 500 fps。送料系统由带滑轨的小车、刚玉管、热电偶丝组成。温度采集系统由 K 型热电偶、34972 数据采集仪(美国安捷伦公司)和计算机组成，用于实时记录液滴周围温度，数据采集仪的采样频率为 70 ms/次。燃烧室由 YFK40X440/12QK-GC 管式电阻炉(上海意丰电炉有限公司)构成，其自带温度控制器可设定并维持燃烧室内的温度。液滴及热电偶具体布置如图 2 所示。

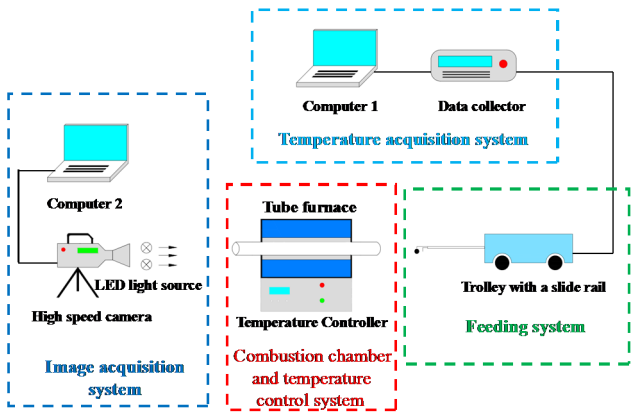


图 1 燃烧装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the combustion equipment

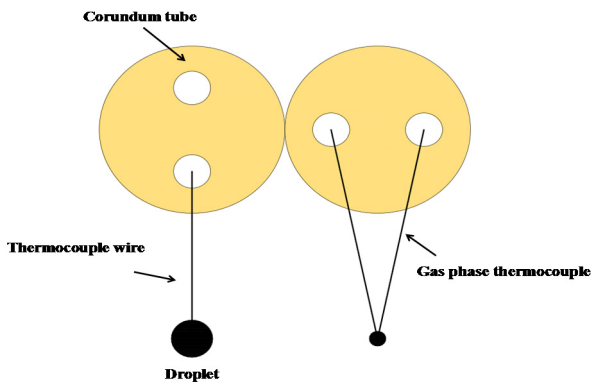


图 2 液滴及热电偶布置示意图  
Fig.2 Schematic diagram of droplet and thermocouple arrangement

2.3 实验方法

2.3.1 纳米浆体燃料的制备

实验所用纳米浆体燃料由两步法制备。正庚烷为基液，油酸为表面活性剂，纳米铝粉与油酸质量比为 1:1。用注射器添加一定量油酸于广口瓶中，再加入一定质量的正庚烷基液混合，然后将一定量的铝粉加入混合物中

并密封广口瓶。在 SK3310HP 超声波清洗仪器(上海科导超声仪器有限公司)中以 53 kHz 频率震荡 40 min，得到深黑色浓浆。所配样品如图 3 所示，具体组成见表 1。

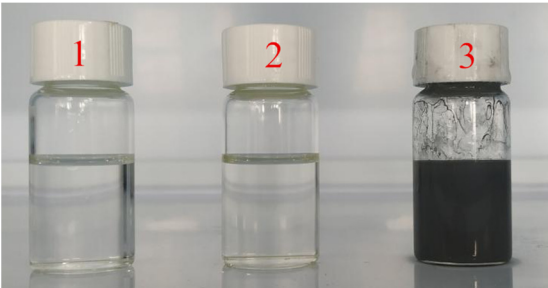


图 3 样品实物图  
Fig.3 Photos of the samples

表 1 样品组成 Table 1 Composition of samples			
Sample	Al powder/g	Oleic acid/g	n-heptane/g
1	0	0	5
2	0	1	4
3	1	1	3

2.3.2 着火燃烧特性测试

实验时，提前启动数据采集仪和高速摄像机，用微量注射器取 4  $\mu\text{L}$  燃料悬挂于热电偶丝头部，快速滑动小车将液滴送入管式炉中。数据采集仪和高速摄像机分别记录液滴周围温度变化及其燃烧过程。

2.3.3 着火延迟时间定义

以 800  $^{\circ}\text{C}$  时纯正庚烷的燃烧温度曲线为例定义燃料的着火延迟时间。图 4 为正庚烷气相温度曲线及其二次微分曲线。定义二次微分曲线中出现第一个极大值时对应温度曲线上的点为 A 点，出现第二个极大值时对应温度曲线上的点为 B 点。二次微分函数出现极大值时，

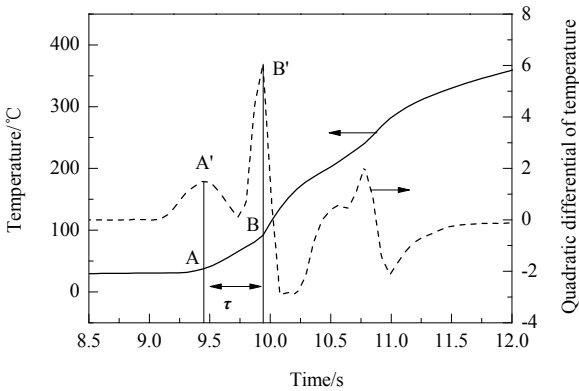


图 4 800  $^{\circ}\text{C}$  下正庚烷燃烧的气相温度曲线及其二次微分曲线  
Fig.4 Gas phase temperature and quadratic differential curves of n-heptane combustion at 800  $^{\circ}\text{C}$

一次微分函数(升温速率, 即温度曲线的斜率)将出现极大变化, 即 A、B 两点分别发生第一次和第二次温度突变。A 点温度突变是由于热电偶和液滴同时被送入炉膛而吸收炉内热量。B 点温度突变是液滴周围的可燃气体被点燃, 释放热量而引起。定义 A 点为起始点, B 点为着火点, 二者间的时间差即燃料着火延迟时间  $\tau$ (s)。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 着火延迟时间

为明确各样品能否成功着火, 研究了各样品在 550 和 600 °C 下的着火概率。结果表明, 在 550 °C 时, 3 种样品能否成功着火具有随机性, 对各样品进行 10 次着火燃烧测试发现, 1, 2, 3 号样品在该着火温度下的着火概率分别为 80%, 60% 和 20%, 表明加入油酸和铝颗粒不利于样品在低温下点火, 可能是液滴进入炉膛后, 油酸和铝颗粒先吸收部分热量, 导致正庚烷基液吸热减少, 液滴周围无法产生足够浓度的气体, 从而影响其着火概率。但 600 °C 时各样品均能成功着火, 原因是高温环境中, 液滴能吸收足够的热量。纳米颗粒快速升温后相当于热源, 而油酸吸收足够热量分解后提高了液滴周围可燃物的浓度, 可能对点火起促进作用。鉴于上述结果, 对样品进一步测试时, 温度选择了 600~800 °C。

扩散燃烧中着火延迟主要有两种, 燃料蒸气与周围空气扩散混合造成的物理延迟, 燃料蒸气与空气发生缓慢氧化反应至剧烈燃烧反应的化学延迟<sup>[20]</sup>。不同温度下各样品的着火延迟时间见图 5。600 °C 时 1, 2 和 3 号样品的着火延迟时间分别为 1.68, 1.38 和 1.07 s。2 和 3 号样品的着火延迟时间比纯正庚烷的着火延迟时间分别下降了 17.9% 和 36.3%。本研究中正庚烷的着火延迟时间小于韩伟康等<sup>[19]</sup>在 500 °C 炉温中所测的结果, 原因是随温度升高, 正庚烷液滴蒸发速度加快, 液滴的物理延迟时间降低; 同时因为燃料蒸气在高温下着火所需活化能降低, 使其更易与高温空气发生反应, 从而使高温下正庚烷液滴的化学延迟时间降低。在正庚烷中添加油酸后, 虽然油酸导热性差且难挥发, 但添加高浓度的油酸后反而有利于正庚烷液滴着火, 可能是淡黄色的混合液滴比无色透明的纯正庚烷液滴的热辐射吸收率高, 尤其在此温度下油酸分解产生易于燃烧的物质。但在韩伟康等<sup>[19]</sup>的研究中, 油酸添加量较低, 初始加热温度为 500 °C, 低于本工作研究温度, 此温度下油酸分解产生易燃物质较少, 反而因混合溶液的导热性变差而不利于着火。添加高浓度铝粉后, 燃料的着火延迟时间进一步降低, 原因是纳米颗粒强化了燃料液滴与炉膛间的辐射传热<sup>[21,22]</sup>, 使纳米铝颗粒在短时间内达到很高温度, 较

强的导热能力和布朗运动促进了热量向液滴传递, 从而加快了正庚烷液滴蒸发。同时, 液滴内部扰动增强, 一定程度上抑制了液滴表面形成油酸浓度较高的区域。

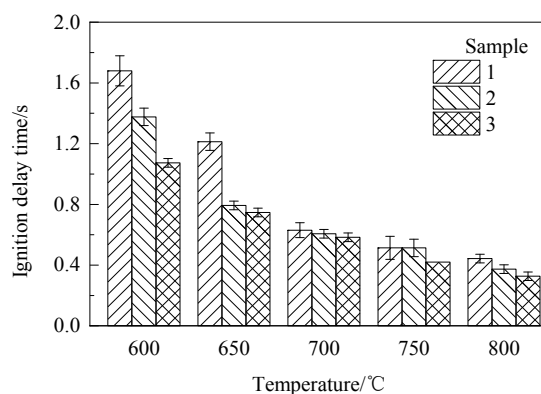


图5 不同温度下各样品的着火延迟时间  
Fig.5 Ignition delay times of samples at different temperatures

由图 5 还可发现, 所有样品的着火延迟均随温度升高而降低。800 °C 时 1, 2, 3 号样品的着火延迟时间比 600 °C 时分别下降了 73.8%, 73.2%, 69.2%。原因是炉膛温度升高, 液滴与炉膛间的热传递增强, 显著促进了正庚烷蒸发。随炉膛温度进一步升高, 液滴蒸发速率加快, 温度不再是制约着火的关键因素, 此时蒸气和空气的混合情况占主导, 各样品的变化趋势逐渐趋于平缓。

低浓度铝粉条件下, 纳米流体燃料的着火延迟时间与炉膛温度关系符合阿累尼乌斯方程<sup>[18]</sup>。如果铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的着火延迟时间与炉膛温度的关系也符合阿累尼乌斯方程, 可推导出一个关系式用于估算本实验条件下, 纳米浆体燃料液滴在 600~800 °C 范围内任意温度对应的着火延迟时间。

图 6 为铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的着火延迟时间和温度(开氏温度, K)的关系。纵坐标为着火延迟时间的自然对数, 横坐标为炉膛温度倒数的 1000 倍。由图可看出, 其关系近似一次函数。为探究具体函数表达式, 用 Origin 软件对散点进行线性拟合, 结果表明, 铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的着火延迟时间和温度间的关系符合阿累尼乌斯方程, 满足下式:

$$\ln \tau = \frac{1000b}{T} + a$$

式中,  $b$  为拟合函数的斜率,  $a$  为线性拟合函数的截距,  $T$  为炉膛温度(K)。

对等式两边同时取自然常数  $e$  为底的指数, 并代入拟合数据, 得:

$$\tau = \exp\left(\frac{5537.27}{T} - 6.27059\right)$$

将温度从开氏温度换成摄氏温度后,得:

$$\tau = \exp\left(\frac{5537.27}{t + 273} - 6.27059\right)$$

式中,  $t$  为炉膛温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

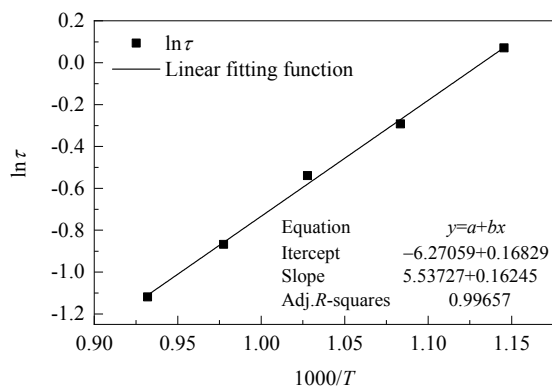


图6 样品3的着火延迟时间和温度的关系

Fig.6 Relationship of ignition delay time and temperature of sample 3

为更直观地比较油酸和纳米铝粉的加入对正庚烷着火性能的影响,根据阿累尼乌斯方程计算各样品的表观着火活化能  $E_a$ 。  $E_a$  和拟合函数斜率  $b$  满足下式:

$$E_a = 1000bR$$

式中,  $R=8.314 \text{ J}(\text{mol}\cdot\text{K})$ , 理想气体常数。根据上式计算得铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的表观着火活化能为  $46.04 \text{ kJ/mol}$ 。按相同方法对纯正庚烷、油酸/正庚烷混合燃料进行拟合并计算其表观着火活化能,结果分别为  $55.41$  和  $47.81 \text{ kJ/mol}$ 。表明在  $600\sim 800^{\circ}\text{C}$  时,添加高浓度油酸降低了正庚烷的表观着火活化能,在此基础上添

加高浓度纳米铝粉进一步降低了其表观着火活化能。

### 3.2 燃烧过程

为进一步明确铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的燃烧特性,采用高速摄像机记录了3种样品在  $700^{\circ}\text{C}$  时的燃烧过程。定义液滴周围第一次观察到火焰的时刻为燃烧的起始点,分析并比较了3种样品的燃烧特性。

#### 3.2.1 纯正庚烷的燃烧过程

$700^{\circ}\text{C}$  时纯正庚烷的燃烧过程如图7所示。 $0 \text{ s}$  时液滴下部空间先观察到淡蓝色火焰,随后蓝色火焰引发剧烈燃烧反应,在  $0.056 \text{ s}$  时液滴底部形成明亮火焰。原因是正庚烷的分子质量比空气大,沸点较低,液滴在燃烧前蒸发出的正庚烷蒸气的温度远小于燃烧室内空气的温度,使其密度比空气大。重力作用下,正庚烷可燃气更多地聚集在液滴底部,首先被引燃。随后火焰向上扩散逐渐包围液滴, $0.302 \text{ s}$  时形成稳定的包焰,液滴以包焰的形式燃烧,火焰面积逐渐变大,火焰颜色逐渐变浅。一方面,可能是高温导致气体分子的无规则运动加剧而使火焰面积变大;另一方面,由于管式炉空间较小,燃烧产生的  $\text{CO}_2$  气体不能及时排出炉外,与液滴周围的空气混合,氧气浓度降低,火焰亮度变弱。 $0.902$  和  $1.392 \text{ s}$  时观察到稳定包焰下方出现小火焰,可能是可燃蒸气燃烧不充分,烟气中存在的部分未燃碳氢化合物随火焰到达石英管的上壁面,然后沿石英管的管壁流动到下壁面,该过程中未燃碳氢化合物和石英管内的空气混合。由于石英管的管壁温度比管内高,且下壁面同时受到火焰底部的加热,未燃碳氢化合物在下壁面达到燃烧所需活化能而燃烧。 $1.392 \text{ s}$  后火焰面积逐渐缩小,亮度逐渐减弱,至  $2.068 \text{ s}$  时火焰完全熄灭,燃烧结束。

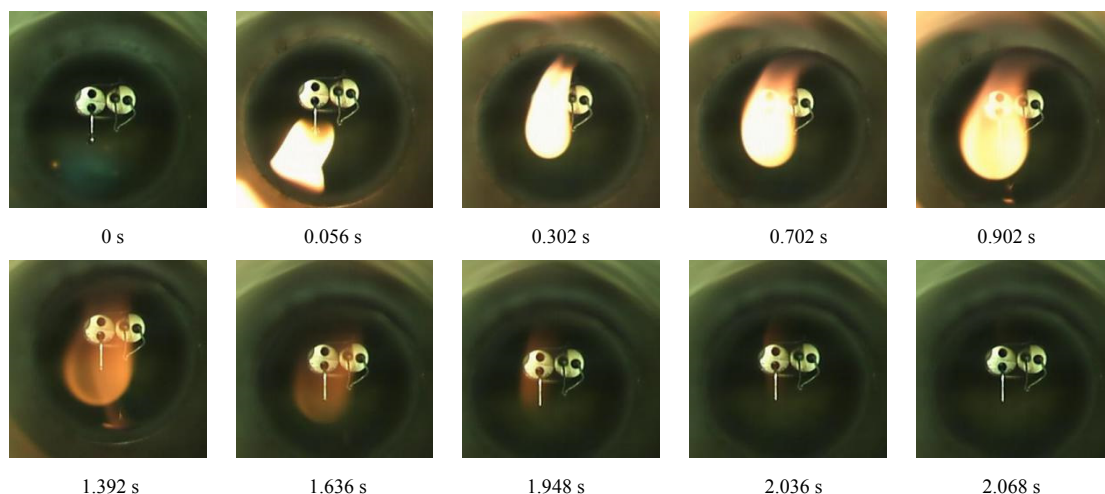


图7  $700^{\circ}\text{C}$  时1号样品液滴燃烧过程

Fig.7 Droplet combustion process of sample 1 at  $700^{\circ}\text{C}$



### 3.2.2 油酸/正庚烷混合液滴的燃烧过程

700℃时油酸/正庚烷混合液滴的燃烧过程如图8所示。混合液滴的燃烧过程与纯正庚烷液滴类似,但其总燃烧时间比纯正庚烷液滴的燃烧时间短,且燃烧结束后观察到炭烟生成。2号样品中正庚烷含量是1号样品的0.8倍。如果按照1号样品的平均消耗速率计算,2号样品中正庚烷全部燃烧约为1.654s,而2号样品实际燃烧时间为1.760s,两者非常接近,表明油酸并没有全部燃烧,只有部分油酸分解成短碳链的有机物和正庚烷一起

燃烧。可能是油酸沸点高、密度大且导热差,液滴周围必须达到足够高的温度才能使油酸大量蒸发。而添加高浓度油酸显著降低了正庚烷的比例,导致正庚烷燃烧完全时,液滴周围温度仍未达到油酸的沸点。在此之后,只有高温炉膛对残留油酸加热,但油酸导热较差,残留油酸升温速率低,无法产生大量蒸汽实现燃烧,油酸只能通过不断受热分解消耗,因此燃烧结束后仍观察到炭烟生成。此外,由于管式炉空间限制,液滴燃烧产生的烟气回流至热电偶丝附近,抑制了残留油酸的燃烧。

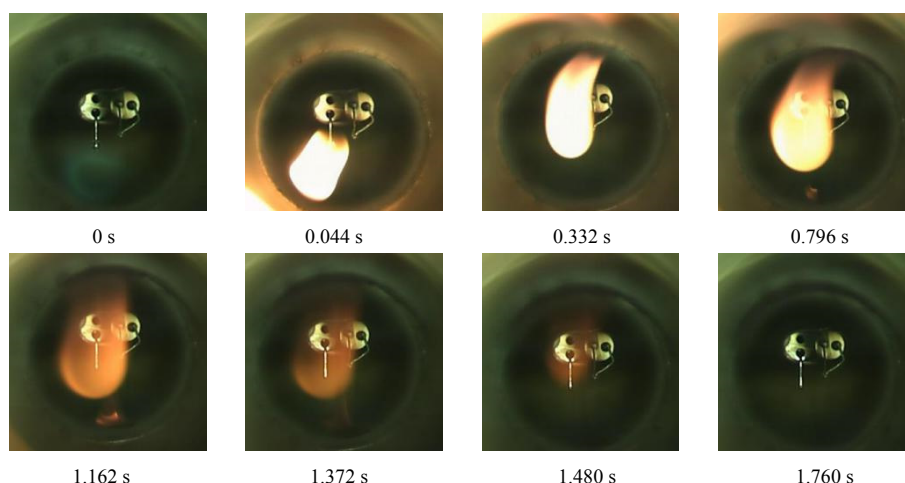


图8 700℃时2号样品液滴燃烧过程  
Fig.8 Droplet combustion process of sample 2 at 700℃

### 3.2.3 铝-油酸/正庚烷基浆体燃料燃烧过程

700℃时铝-油酸/正庚烷基浆体燃料液滴的燃烧过程如图9所示。与纯正庚烷液滴、油酸/正庚烷混合液滴的燃烧过程相比,铝-油酸/正庚烷基浆体燃料液滴的燃烧过程有显著差异。液滴燃烧时间延长,达3.784s;其次,观察到火焰熄灭后又复燃现象,表明油酸发生燃烧;最后,燃烧过程中观察到剧烈的火焰形变和铝颗粒溅射现象。根据不同时间段内火焰和液滴表现出的特点,将燃烧过程分为3个阶段:正庚烷稳定燃烧阶段(0~1.150s)、正庚烷微爆炸阶段(1.150~1.634s)、表面活性剂微爆炸阶段(1.634~3.784s)。

1.150s前液滴的燃烧特点与纯正庚烷液滴相似,液滴以稳定包焰的形式燃烧,为正庚烷稳定燃烧阶段,该阶段共持续1.150s,占总燃烧时间的30.4%。1.150s时观察到火焰形状发生轻微变化,有小火花从液滴中飞溅出来,可能是随燃烧进行,液滴表面正庚烷的浓度逐渐降低而形成油酸浓度较高的膜层,阻碍液滴内部与外部的传热传质。与此同时,液滴内部的纳米铝颗粒吸收炉

膛的热辐射而急剧升温,在液滴内部形成气化核心并促进其周围正庚烷蒸发而产生过热蒸汽。此外,由于纳米铝颗粒可能有效催化了正庚烷裂解为各种有机易燃小分子而促进其燃烧,且高温下纳米铝极易被氧化并出现团聚现象。由于纳米铝的热值远高于正庚烷,燃烧过程中会释放大量的热而使体系温度急剧升高,产生更多的过热蒸汽。过热蒸汽使液滴内部压力逐渐升高,当液滴内部的压力达到一定程度,液滴破碎,发生微爆炸,使小部分铝颗粒从主液滴中溅射出来。随液滴内部铝颗粒温度不断升高,液滴内部压力累积更快,导致微爆炸的强度和频率升高,所以在1.192s时观察到更强的铝颗粒溅射现象。随着正庚烷不断消耗,火焰逐渐变弱,1.634s时完全熄灭。该阶段仍是正庚烷在燃烧,定义为正庚烷微爆炸阶段,该阶段共持续0.484s,占总燃烧时间的12.8%。然而,1.970s时液滴复燃,周围出现小火焰,原因是铝颗粒与炉膛间强烈的辐射换热使其温度非常高,铝颗粒对残留液滴的加热作用十分明显,导致残留液滴内部的油酸先于表面达到过热状态,压力累积再次

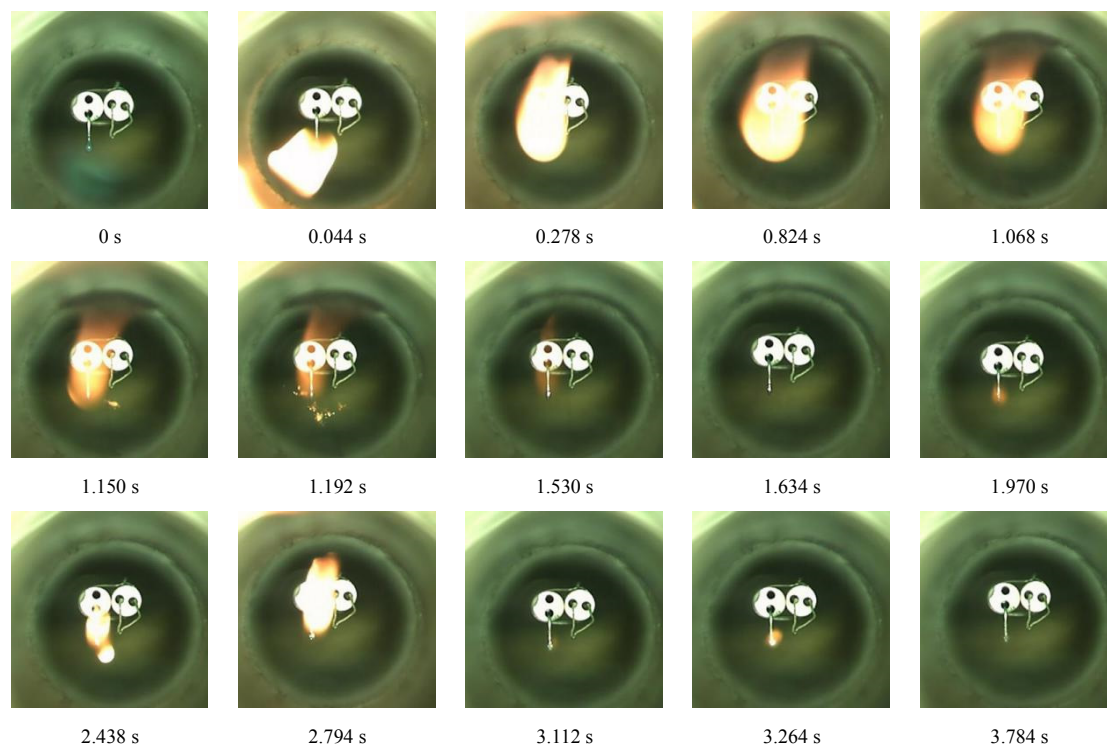


图9 700 °C时3号样品液滴燃烧过程

Fig.9 Droplet combustion process of sample 3 at 700 °C

造成微爆炸,油酸蒸气大量释放而引起燃烧,该阶段火焰形状变化剧烈,火焰亮度明显提高。但在微爆过程中未观察到铝颗粒溅射,原因是随着液滴不断缩小,残留的铝颗粒逐渐形成了大的团聚体。2.794 s后随着油酸不断消耗,火焰逐渐减弱,3.112 s时铝团聚体周围的火焰几乎消失。随后铝团聚体发出了亮白色光芒,原因是燃烧导致的高温破坏了铝表面的氧化层,火焰褪去后,氧气与铝团聚体表面接触后发生氧化还原反应。由于铝团聚体内部还包裹着部分未燃烧的油酸,当铝团聚体发生氧化还原时,高温导致其内部的油酸迅速蒸发,从铝团聚体表面的空隙逃逸,铝团聚体周围再次观察到较明亮的小火焰。3.784 s时火焰完全熄灭,铝团聚体不再发光,表明其表面的氧化还原反应已结束,燃烧过程结束,该阶段主要由表面活性剂燃烧导致,定义为表面活性剂微爆炸阶段,共持续 2.150 s,占总燃烧时间的 56.8%。

## 4 结 论

通过液滴悬挂法研究了铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的着火燃烧特性,得到如下结论:

(1) 高浓度油酸(20wt%)和高浓度纳米铝粉(20wt%)的添加均有利于正庚烷液滴的着火。600 °C时油酸/正庚烷混合燃料和铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的着火延迟时间分别为 1.38 和 1.07 s,比相同条件下纯正庚烷液

滴的着火延迟时间分别下降了 17.9%和 36.3%。

(2) 随温度升高,各样品的着火延迟时间显著降低,但变化趋势逐渐趋于平缓,且不同样品间的着火特性参数逐渐接近。

(3) 铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的着火延迟时间与温度的关系符合阿累尼乌斯方程,其着火延迟时间和温度的关系式可近似表达为  $\tau = \exp[5537.27/(t+273) - 6.27059]$ 。

(4) 添加高浓度油酸和纳米铝粉降低了正庚烷的表现着火活化能。正庚烷、油酸/正庚烷混合燃料和铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料的表现着火活化能分别为 55.41, 47.81 和 46.04 kJ/mol。

(5) 700 °C时铝-油酸/正庚烷基纳米浆体燃料燃烧经历 3 个阶段:正庚烷稳定燃烧阶段、正庚烷微爆炸阶段和表面活性剂微爆炸阶段,大部分铝以团聚体的形式在第三阶段的末期完成氧化还原反应。

## 参考文献

- [1] 邹吉军,郭成,张香文,等. 航天推进用高密度液体碳氢燃料:合成与应用 [J]. 推进技术, 2014, 35(10): 1419-1425.  
Zou J J, Guo C, Zhang X W, et al. High-density liquid hydrocarbon fuels for aerospace propulsion: synthesis and application [J]. Journal of Promotion Technology, 2014, 35(10): 1419-1425.
- [2] 邹吉军,张香文,王莅,等. 高密度液体碳氢燃料合成及应用进展 [J]. 含能材料, 2007, (4): 411-415.

- Zou J J, Zhang X W, Wang L, et al. Progress on the synthesis and application of high-density liquid hydrocarbon fuels [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, (4): 411–415.
- [3] 鄂秀天凤. 基于亲油性纳米颗粒的高密度悬浮燃料研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015: 1–15.
- E X T F. High-density suspension fuels containing oil-dispersable nanoparticles [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 1–15.
- [4] 鄂秀天凤, 彭浩, 邹吉军, 等. 含有纳米铝颗粒的高密度悬浮燃料研究 [J]. *推进技术*, 2016, 37(5): 974–978.
- E X T F, Peng H, Zou J J, et al. Study on Al NPs-containing suspension as high-density liquid fuel [J]. *Journal of Promotion Technology*, 2016, 37(5): 974–978.
- [5] Wen D S. Nanofuel as a potential secondary energy carrier [J]. *Energy & Environmental Science*, 2010, 3: 591–600.
- [6] Basu S, Miglani A. Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: a short review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 96: 482–503.
- [7] Ojha P K, Srinibas K. Boron for liquid fuel Engines—a review on synthesis, dispersion stability in liquid fuel, and combustion aspects [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 100: 18–45.
- [8] Tyagi H, Phelan P E, Prasher R, et al. Increased hot-plate ignition probability for nanoparticle-laden diesel fuel [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(5): 1410–1416.
- [9] 邵昂, 朱韶华, 鄂秀天凤, 等. 含铝金属化浆体推进剂火箭发动机燃烧性能试验研究 [J]. *推进技术*, 2018, 39(7): 1650–1659.
- Shao A, Zhu S H, E X T F, et al. Experimental study on combustion characteristic of rocket engine based on slurry propellant containing aluminum particles [J]. *Journal of Promotion Technology*, 2018, 39(7): 1650–1659.
- [10] Chen B H, Liu J Z, Li H P, et al. Laser ignition and combustion characteristics of Al/JP-10 nanofluid droplet [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 135(2): 925–934.
- [11] Gan Y, Lim Y S, Li Q. Combustion of nanofluid fuels with the addition of boron and iron particles at dilute and dense concentrations [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1732–1740.
- [12] Gan Y, Li Q. Combustion characteristics of fuel droplets with addition of nano and micron-sized aluminum particles [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(2): 354–368.
- [13] Kim D M, Baek S W, Yoon J. Ignition characteristics of kerosene droplets with the addition of aluminum nanoparticles at elevated temperature and pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 173: 106–113.
- [14] Saad T, Li Q. Effect of addition of energetic nanoparticles on droplet-burning rate of liquid fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(1): 408–415.
- [15] Javed I, Baek S W, Waheed K. Autoignition and combustion characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of aluminum nanoparticles at elevated temperatures [J]. *Combustion & Flame*, 2015, 162(3): 774–787.
- [16] Mehta R N, Chakraborty M, Parikh P A. Nanofuels: combustion, engine performance and emissions [J]. *Fuel*, 2014, 120: 91–97.
- [17] 吕兴才, 侯玉春, 俎琳琳, 等. 乙醇-正庚烷燃料均质压缩过程着火与燃烧特性的研究 [J]. *内燃机学报*, 2006, 24(4): 336–343.
- Lü X C, Hou Y C, Zu L L, et al. Experimental study on the auto-ignition and combustion characteristics of homogenous charge compression ignition combustion with ethanol/n-heptane blends by port injection [J]. *Transactions of CSICE*, 2006, 24(4): 336–343.
- [18] Irfan J, Seung W B, Khalid W. Autoignition and combustion characteristics of heptane droplets with the addition of aluminum nanoparticles at elevated temperatures [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(1): 191–206.
- [19] 韩伟康, 孙运兰, 朱宝忠. 铝/正庚烷基纳米流体燃料的着火特性 [J]. *过程工程学报*, 2018, 18(4): 769–773.
- Han W K, Sun Y L, Zhu B Z. Ignition characteristics of heptane-based nanofluid fuel droplets [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(4): 769–773.
- [20] Kim H, Baek S W, Chang D. Auto-Ignition characteristics of single n-heptane droplet in a rapid compression machine [J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 186(7): 912–927.
- [21] Gan Y, Li Q. Radiation-enhanced evaporation of ethanol fuel containing suspended metal nanoparticles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(21/22): 5777–5782.
- [22] Gan Y, Qiao L. Optical properties and radiation-enhanced evaporation of nanofluid fuels containing carbon-based nanostructures [J]. *Energy Fuel*, 2012, (26): 4224–4230.