0254-6124/2018/38(6)-900–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CUI Yanling, WANG Baorui, YUAN Hongliang, KONG Wenjun. Effects of laser and hot wire modes on ignition and combustion of single multicomponent droplet (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(6): 900-908. DOI:10.11728/cjss2018.06.900

激光与热丝点火对多组分液滴着火及燃烧的影响*

崔彦玲[1,2] 王宝瑞[1] 远洪亮[1,2] 孔文俊[1,2]

1(中国科学院工程热物理研究所 轻型动力重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

摘 要 采用挂滴方法, 实验研究多组分单液滴的着火和燃烧特性, 考察激光和热丝两种点火方式对液滴燃烧速率、火焰形貌及着火延迟时间的影响. 实验结果表明, 随着热丝点火时间增加, 燃烧速率因液滴周围自然对流增强而加快. 常重力下液滴火焰为包覆型火焰, 火焰高度与液滴初始直径之比的最大值约为 18. 当 $t/t_{\rm b} > 0.4$ 时, 尚处于热丝加热阶段的火焰高度比没有热丝加热的高约 $5D_0$, 比激光关闭后的火焰高度高 5∼10 D_0. 与热丝点火相比, 激光点火响应迅速, 对液滴附近气体干扰小, 是地面上比较理想的点火方式. 固定激光脉冲时间, 随着激光强度的增加, 单液滴的着火延迟时间缩短.

关键词 多组分单液滴, 激光点火, 热丝点火, 燃烧特性, 着火延迟时间

中图分类号 TK 16, V 527

Effects of Laser and Hot Wire Modes on Ignition and Combustion of Single Multicomponent Droplet

CUI Yanling[1,2] WANG Baorui[1] YUAN Hongliang[1,2] KONG Wenjun[1,2]

1(*Key Laboratory of Light-duty Gas-turbine, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract The ignition and combustion characteristics of multicomponent fuel as single suspended droplet are conducted. The effects of laser and hot wire ignition on droplet burning rate, flame morphology and ignition delay time are analyzed. The experimental results show that, as the hot wire ignition time increases, the burning rate increases with the increase of natural convection around the droplet. Under ambient environment, the droplet flame is a teardrop shaped flame, and the maximum ratio between the flame height and the initial droplet diameter is about 18. When $t/t_{\rm b} > 0.4$, the flame height of the droplet when heated by the hot wire is $5\,D_0$ higher than that in subsequent non-heating stage, and 5∼10 D_0 higher than that of the droplet ignited by the laser. Compared with the hot wire ignition, the laser ignition responses faster and causes less interference to the flow

* 国家自然科学基金项目 (U1530157) 和国家重点基础研究发展计划项目 (2014CB239603) 共同资助

2018-04-20 收到原稿, 2018-06-20 收到修定稿

E-mail: wjkong@iet.cn

field near the droplet. Therefore, the laser ignition is an ideal method of the droplet combustion experiments on the ground. With a fixed laser pulse time, the ignition delay time of single droplet becomes shorter when the laser intensity increases.

Key words Single multicomponent droplet, Laser ignition, Hot wire ignition, Combustion characteristics, Ignition delay time

0 引言

液滴燃烧与实体燃烧设备的设计和运行密切相关, 如内燃机、燃气轮机、液体火箭和燃油锅炉等. 在这些燃烧设备中, 液体燃料的蒸发和燃烧在动力或推力的产生过程中占有重要地位. 喷雾液滴燃烧与单个液滴燃烧过程不完全相同, 但研究单个液滴燃烧是理解喷雾燃烧的基础. 近年来能源危机加剧, 迫切需要开发替代燃料并提高其燃烧效率 [1]. 代用燃料通常为多组分, 对多组分液滴的燃烧机理还需要进一步研究.

单液滴燃烧的经典理论是 d^2 定律, 即在燃烧过程中液滴直径平方的变化与时间成正比 [2]. 在地面正常重力环境下, 液滴燃烧火焰受自然对流的影响呈现泪滴形, 与理论获得的球形火焰明显不同, 这使液滴燃烧变得更为复杂. 因此, 先削弱自然对流影响, 再研究单液滴燃烧特性是地面研究的主要手段. 在地面情况下, Marchese 等 [3]、Liu 等 [4] 和 Nayagam 等 [5] 通过落塔实验降低自然对流, 模拟液滴在微重力下的燃烧特性. 但落塔实验成本高, 实验实施难度较大. 在常重力情况下, Calcote[6], Papac[7] 和 Strayer[8] 等提出通过外加电场的方式减轻自然对流的影响. 在常重力和微重力环境中, 热丝点火都是常用的一种点火方式. Faeth 等 [9] 采用热丝点火, 在落塔实验室中研究了正癸烷液滴燃烧情况. 为了降低通电热丝对液滴近区自然对流的影响, 在密封舱下落过程中加热热丝, 从热丝通电到引燃液滴所用时间约为 0.2 s, 占落塔实验有效时间的 1/5. Mikami 等 [10] 采用热丝点火, 研究正癸烷液滴阵列在高温环境中的火焰传播模式, 从热丝通电加热到点燃第一个液滴所用时间约为 0.4 s. 美国 NASA 研究中心 [11] 在空间进行了多种燃料液滴燃烧实验, 采用两个热丝对称加热, 从热丝通电到引燃液滴时间大约为 0.43 s, 是小液滴燃烧时间的 1/4.

热丝通电加热到引燃液滴的过程在整个液滴着火燃烧时间中占据不容忽视的部分, 热丝的放热使液滴近区氧化剂温度升高, 进而加强周围空气之间的对流. 因此, 研究该气体对流对液滴燃烧的影响有助于选择实验采用的点火方式和加热时间. 激光点火是目前研究固体推进剂燃烧的常用点火方式, 与热丝点火依靠对流和热传导加热目标物的原理不同, 激光点火通过热辐射将能量汇聚到目标物, 当汇聚能量积累到超过化学反应的阈值时发生着火 [12−14]. 这种点火方式响应迅速, 几乎不改变目标物周围的自然对流强度. 由于点火成本高和液体燃料透过率大于固体燃料等因素, 激光点火目前在点燃液体燃料中应用较少.

这里采用乙醇、柴油及正丁醇组成的多组分液滴, 通过对比激光与热丝两种点火方式下自然对流对液滴燃烧的影响, 明确对液滴点燃干扰最小的点火方式, 采用该点火方式可以减小自然对流对地面液滴着火过程的影响. 研究结果可为微重力空间燃烧实验中点火方式的选择以及天地比对实验结果分析提供依据.

1 实验装置及方法

1.1 燃料选用

实验采用的混合燃料是常用的代用燃料, 由商用柴油、乙醇和正丁醇组成. 其中, 柴油为 0 号标准轻柴油, 无水乙醇和正丁醇均为分析纯, 其性能参数列于表 1. 乙醇、柴油、正丁醇 (作助溶剂 [15,16]) 按体积比 15∶80∶5 配制成混合燃料, 燃料配比的添加顺序为柴油−乙醇−正丁醇, 振荡 5 min 以保证混合均匀, 满足实验的使用要求.

1.2 实验系统

液滴燃烧的实验系统主要由液滴悬挂装置、点火装置和成像装置组成, 如图 1 所示. 碳化硅纤维丝水平布置, 液滴置于交叉点处. 采用热丝和激光两种点火方式, 热丝选用镍铬丝 (Cr20%, Ni80%), 直径 0.5 mm, 长度 5 cm 左右, 并弯曲成一个半圆弧, 从

表 1 燃料的性能参数

Table 1 Fuel performance parameters

参数	$0^{\#}$ 柴油	无水乙醇	正丁醇
密度/(g·mL^{-1})	0.82~0.86	0.789~0.791	0.808~0.811
20°C 运动粘度/(mm^2·s^{-1})	5.18	1.38	3.61
闪点/°C	65~68	12.8	34
沸点/°C	180~370	78.5	117.8
着火温度/°C	270~350	365	340
低热值/(MJ·kg^{-1})	42.85	26.77	35.1
汽化潜热/(kJ·kg^{-1})	301	854	430

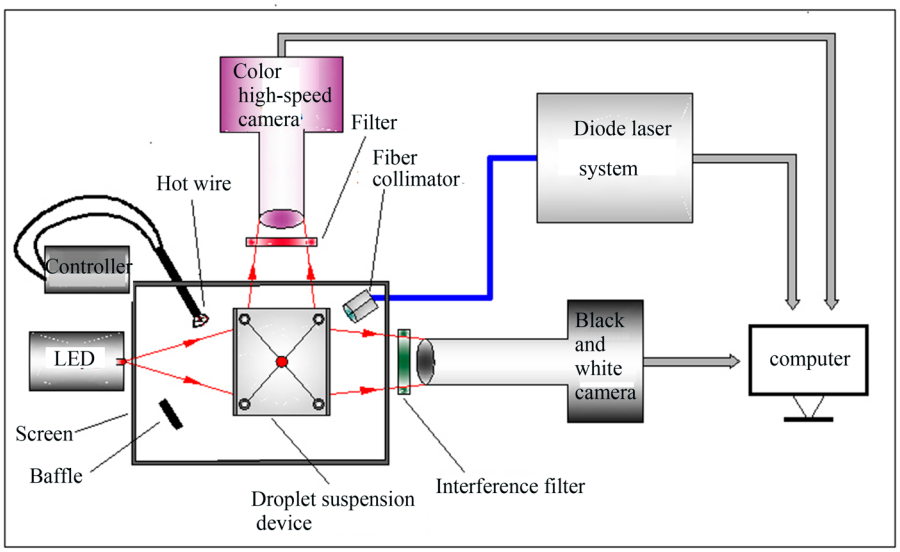

图 1 实验系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

液滴正下方对液滴进行加热. 激光点火采用波长 915 nm、最大输出功率 110 W 的半导体激光器, 配合合适的光纤准直镜, 可输出最小直径为 1 mm 的光斑, 直接将能量汇聚到液滴中心. 成像装置包括一台黑白摄像机和一台彩色高速摄像机. 一个功率为 1 W 的绿光 LED 灯为黑白相机提供光源, 相机前端由近至远依次配置适配器、微距镜头、聚焦镜和干涉滤光片. 干涉滤光片只允许绿光通过, 可滤去火焰强光的影响, 以准确提取液滴轮廓. 彩色摄像机前方布置可见光滤光片, 允许所有可见光通过, 以滤去激光的干扰.

1.3 实验方法

实验在常温常压的空气环境中进行, 液滴由微量注射器产生, 每次滴落的液滴体积约为 1.5 μL, 计算出液滴直径约为 1.4 mm, 将其作为液滴的初始直径. 由于液滴一直存在缓慢蒸发, 图片显示着火前直径约为 1.2 mm, 这里将其作为液滴的初始等效直径.

彩色相机帧数设为 250 frame·s^{-1}, 曝光时间为 1/1000 s; 黑白相机相应参数设为 100 frame·s^{-1} 和 1/100 s. 两台相机分别通过自带的软件控制, 激光点火通过串口软件实现远程操作, 最后使用录制软件记录各软件之间的开启路径, 以准确控制两台相机开启与激光开启的时间间隔, 从而减小实验误差. 使用录制软件记录的激光点火程序如图 2 所示. 热丝点火程序是在图 2 基础上再考虑热丝的传送、停留和撤离过程的.

对于黑白相机采集到的图片, 利用 Matlab 软件提取液滴直径. 由于纤维丝和重力影响, 液滴轮廓呈现不规则的椭圆形. 这里首先定位液滴的圆心, 再从此点沿水平方向向外等距离固定 7 个弦长, 计算出各弦长对应的直径, 最后选取这一系列直径的中位数作为水平方向的最佳直径. 利用同一方法求出竖直方向的最佳直径, 再取两个方向最佳直径的平均值作为液滴的等效直径, 即液滴直径 $D_s = (D_1 + D_2)/2$, 其中 D_1, D_2 分别为两个方向确定的最佳直径.

1.4 实验工况

根据表 1 中的参数, 可以计算出液滴的混合密度约为 $829.3\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, 混合热值为 $40\,173.6\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$. 因此, 对于初始等效直径为 1.2 mm 的单液滴, 实验中观察到燃烧时间约为 1.0 s, 则完全燃烧时的放热量约为 9.6 J.

对于初始直径为 1.4 mm 的小液滴, 当热丝两端电压为 16 V, 通过的电流为 5 A 时, 单一电热丝产生的热量即可实现小液滴的非接触式点火. 根据上述条件, 可计算出热丝加热 200 ms 时放热量为 16 J, 直接施加在液滴上的能量为 (16/50)×1.4=0.45 J. 同理可得不同热丝加热时间下对液滴的外部加热量. 对于激光点火, 实验中到达液滴中心的光斑直径约为 3 mm. 当激光功率为 40 W, 脉冲时间为 180 ms 时, 计算可得激光强度为 $5.66\,\mathrm{W\cdot mm^{-2}}$. 假定液滴对该波长激光的吸收率为 0.4, 则施加在液滴中心的能量约为 $5.66\times(\pi\times0.7^2)\times0.4\times0.18 = 0.62$ (单位 J). 同理, 可计算出其他功率时的激光强度和外部加热量. 不同实验工况下估算的外部加热量列于表 2.

2 实验结果与分析

2.1 点火方式对液滴燃烧速率的影响

每个相同工况下的实验做五次, 选取液滴初始当量直径最接近的一组图片进行处理, 以减小实验误差. 为使外部能量对液滴燃烧干扰最小, 选定激光加热时间最短的工况 (激光加热 180 ms) 与热丝点火下的实验工况比较. 液滴直径 D 和燃烧速率常数 K_c 变化分别如图 3 和 4 所示. 其中, D_0 为液滴初始等效直径, t 为燃烧中的任意时刻, t_r 为热丝加热时间, t_p 为激光加热时间.

由图 3 可以看出, 对于该多组分单液滴, 乙醇和正丁醇的沸点相近, 但与柴油各组分的沸点相差较

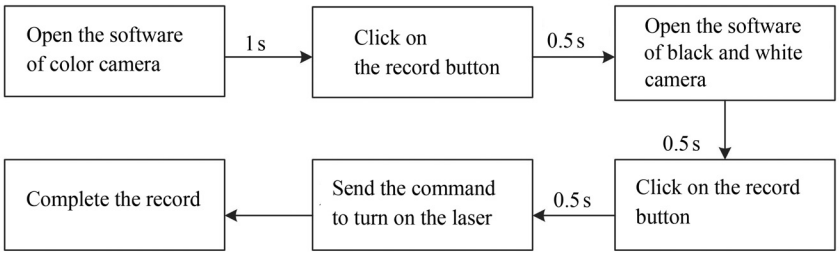

图 2 激光点火程序

Fig. 2 Laser ignition procedure

表 2 不同点火方式下的实验工况

Table 2 Experimental conditions of different ignition modes

热丝点火			激光点火		
功率/W	加热时间/ms	所加能量/J	脉冲时间/ms	功率/W	所加能量/J
80	200	0.45	180	40	0.62
	300	0.67		30	0.58
	500	1.12	220	34	0.65
	700	1.57		37	0.71
				40	0.77

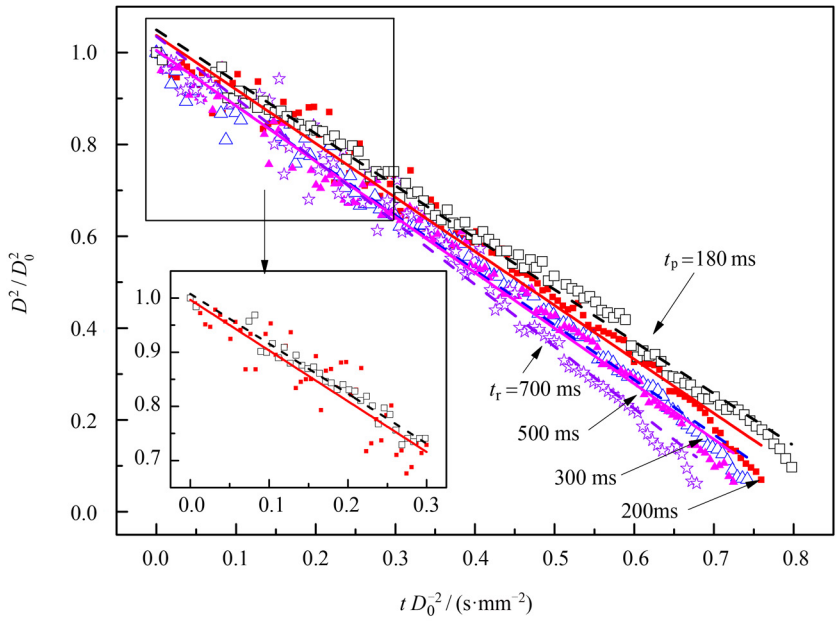

图 3 不同热点火时间下的液滴直径

Fig. 3 Droplet diameter at different hot wire ignition time

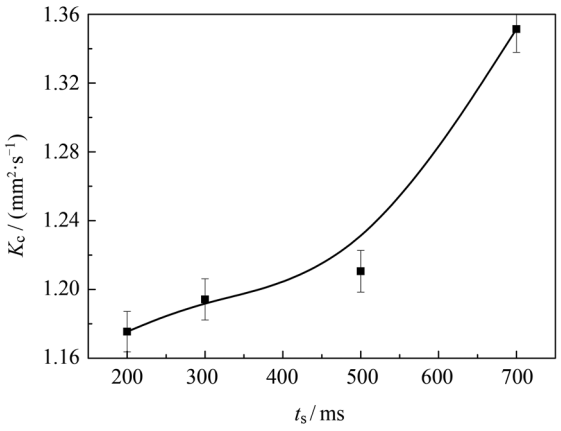

图 4 燃烧速率常数与热点火时间的关系

Fig. 4 Relation between the burning rate constant and the hot wire ignition time

大. 因此, 燃烧过程中直径平方的变化未呈现单组分液滴完全线性减小的特征, 也未呈现多组分液滴明显的阶段区分特征 [17]. 出现上述现象的原因如下. 一是醇类物质在该混合物中所占体积分数较小, 燃烧前期未出现比例占优的阶段, 混合燃料的直径变化逐渐接近于柴油液滴的变化趋势 [18]. 二是该多组分单液滴着火后存在自身火焰、热丝或者激光同时加热液滴的时间段, 液滴表面温度升高很快, 即刻达到柴油组分的沸点, 几乎不出现单独的醇类蒸气燃烧阶段. 下文探究的液滴火焰变化也验证了此猜想, 因此该多组分单液滴未出现明显的阶段区分, 线性拟合误差较大, 但基本满足经典的 d^2 定律.

由图 4 可以看出, 热丝在液滴下方加热时间越长, 燃烧速率常数增大, 燃烧速率加快. 因为热丝加热增加了液滴近区温度, 使液滴周围环境温度稍有升高, 燃烧传热系数增大, 从而使燃烧速率常数增大. 同时, 液滴近区气体温度越高, 其与较远处的冷气体之间的自然对流越强烈, 从而不断将外界环境中的氧化剂吸入到火焰中, 造成燃烧速率加大.

对比两种点火方式下的液滴燃烧直径变化. 首先两种方式下的总体燃烧速率不同, 图 3 中激光加热的燃烧速率最慢, 说明激光加热对液滴周围温度改变较小. 其次, 在燃烧初始阶段, 液滴直径在热丝加热阶段的波动性较大, 详见图 3 中的小图. 热丝加热期间, 周围气体的自然对流显著, 使液滴受到的扰动加大, 其摆动明显, 实验值波动大, 这给确定直径带来误差. 激光点火造成的扰动小, 液滴直径变化线相关程度较强, 实验值与拟合曲线的误差小. 这表明激光点火不易干扰液滴近区的气体温度, 在地面实验中是比较理想的削弱气体对流的点火方式.

2.2 点火方式对液滴火焰形貌的影响

在热丝和激光点火两种方式下, 彩色相机记录的

液滴火焰随无量纲燃烧时间的变化分别如图 5 所示. 其中, 燃尽时间 t_b 定义为液滴上出现火光至火焰完全消失的时间, 无量纲燃烧时间则为任意时刻 t 与 t_b 之比. 由于激光或热丝在加热期间均对火焰颜色有影响, 因此两种点火方式下拍摄到的火焰颜色有些差异, 但基本可以忽略不计.

由图 5 可以看出, 该液滴的燃烧火焰为包覆型火焰, 未呈现微重力情况下的球形对称特征, 液滴下方火焰高度基本不变, 上方火焰高度变化明显. 这里主要观察上方火焰高度随时间的变化, 简称其为火焰高度, 用 H 来表示. 根据火焰变化将液滴燃烧分为两个阶段: 早期不稳定燃烧和稳定燃烧. 早期不稳定燃烧是指此时不仅是单液滴燃烧, 还包括部分浸润在纤维丝上的液体燃烧和液滴蒸气的燃烧. 在无量纲时间为 0.11 之前 (图 5a) 和 0.09 之前 (图 5b), 火焰较为混乱, 浸润在纤维丝上的液体从液滴附近开始燃烧, 直至燃烧完毕才趋于稳定的单液滴火焰. 火焰高度快速上升, 直至火焰上方的液滴蒸气燃尽, 火焰高度瞬时降低. 由于单液滴附近存在其他火焰带来的热量, 液滴近区温度升高, 加快了液滴燃烧, 给实验带来误差. 在稳定燃烧阶段, 单液滴蒸发的同时也燃烧, 随着燃烧时间的进行, 火焰高度不断增大, 直到达到某一峰值后逐渐缩短. 在初始阶段, 火焰锋面距离液滴表面较近, 液滴蒸发速率较大, 这促使了火焰中的燃料蒸气累计, 进而推动火焰面向外扩散, 火焰高度增加. 液滴燃烧的后半阶段, 由于燃料不断被消耗, 火焰高度逐渐缩短, 最后熄灭. 观察图 5 中液滴火焰的颜色变化可以发现, 由于液滴表面先聚集沸点较低的醇类蒸气, 着火瞬间火焰温度较低, 柴油挥发份的燃烧产物尚未聚集形成碳烟. 这两个原因导致火焰为蓝色, 但维持时间极短. 随后火焰表现为明亮的黄色, 这主要是产物中碳烟颗粒的辐射效果造成的. 图 6 是对彩色相机拍摄图片进行处理得到的不同点火方式下多组分液滴的无量纲火焰高度 H/D_0 随无量纲燃烧时间 t/t_b 的变化. 图 6 中圆圈标注的是热丝撤离的时刻.

文献 [19] 采用外加电场的方式研究了正癸烷液滴的火焰高度与外加电场的关系. 当所加电场与浮升力达到平衡时, 液滴上方火焰高度与初始直径的比值约为 4, 这可作为本文所用液滴在无自然对流时火焰高度的参考. 由图 7 可以看出, 由于自然对流的影响, 多组分单液滴的火焰高度与液滴初始当量直径比值达 18, 比无自然对流时的火焰高度约高 3.5 倍, 这说明自然对流影响火焰高度变化. 在不稳定燃烧阶

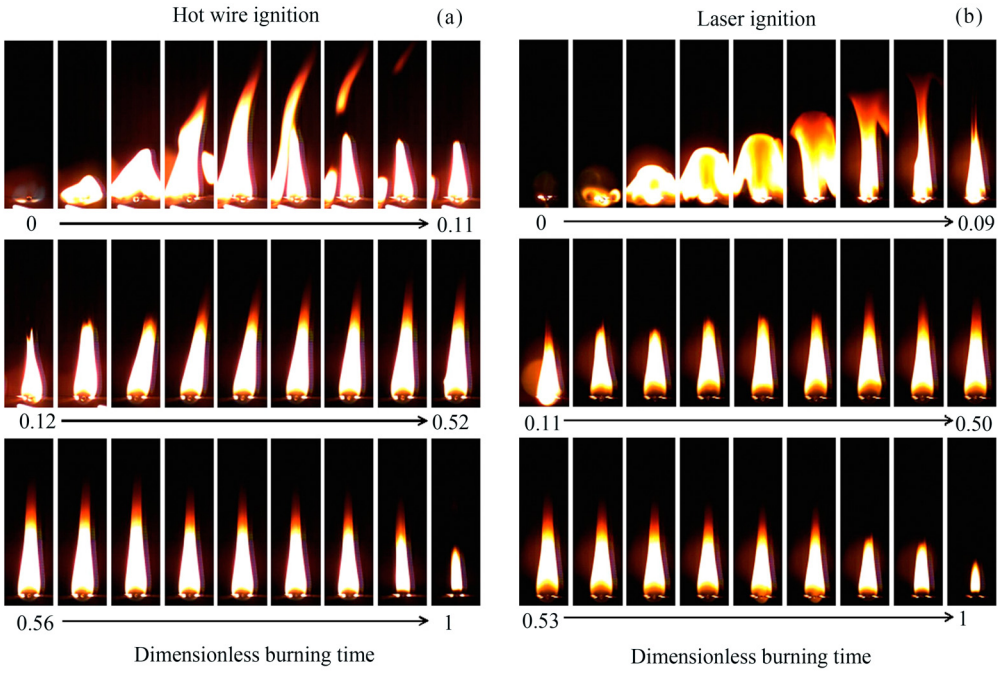

图 5 多组分单液滴的火焰变化. (a) 热丝点火, (b) 激光点火

Fig. 5 Flame changing of single multicomponent droplet by hot wire ignition(a) and laser ignition(b)

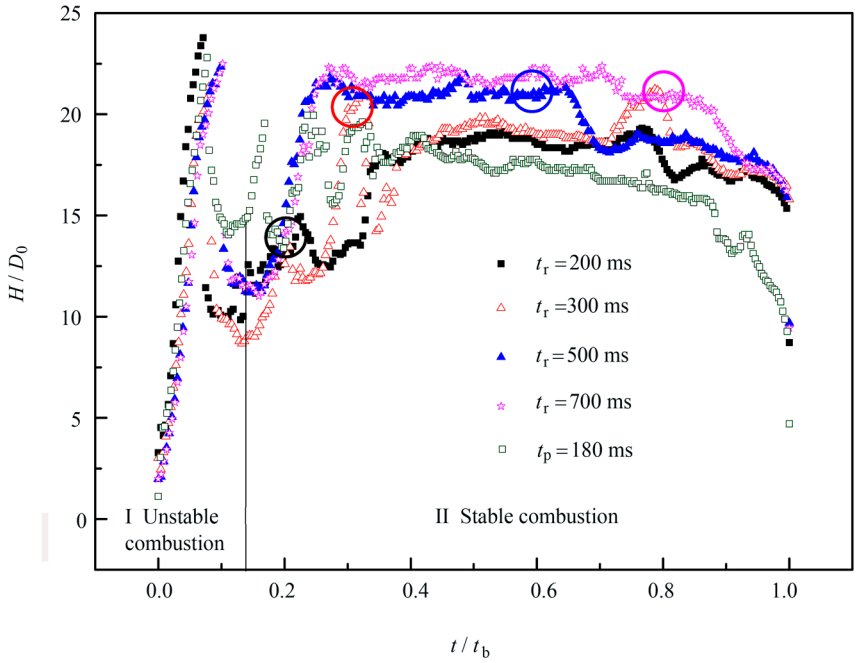

图 6 不同点火方式下的火焰高度对比

Fig. 6 Comparison of flame heights with different ignition modes

段, 热丝点火和激光点火的火焰高度差别不大. 进入稳定燃烧后, 随着时间的推移, 热丝点火下的火焰高度比激光点火的高 5~10 D_0 左右; 而还处于热丝加热阶段 (加热时间为 500, 700 ms) 的火焰高度比热丝撤离后 (加热时间为 200, 300 ms) 高约 5 D_0. 因为随着热丝点火时间的增加, 液滴近区温度与较远处的环境温度差距增大, 格拉晓夫数 Gr 及气体浮升力增大, 液滴的火焰高度增高. 综合图 5 和图 6 可知, 激光点火的火焰高度比热丝点火的低, 尤其在稳定燃烧的后半阶段, 激光点火的火焰高度明显降低, 更接近于微重力情况下的球形火焰. 这说明激光点火方式对液滴近区温度扰动较小, 对液滴着火的影响较小.

2.3 点火方式对液滴着火延迟时间的影响

着火延迟主要是由物理延迟和化学延迟引起的. 在液滴燃烧中物理延迟占主导地位 [20]. 假定液滴着火前的加热、蒸发阶段是完全分开的 [21], 则液滴燃烧的着火延迟时间为

$$t_{\mathrm{i}} = t_{\mathrm{l}} + t_{\mathrm{v}} + t_{\mathrm{g}}. \tag{1}$$

其中, t_{l} 为将液滴从室温加热到沸点所用时间, t_{v} 为着火前的液滴蒸发时间, t_{g} 为将参与反应的液滴蒸气 (着火前) 加热到着火温度的时间.

仿照文献 [21] 对金属颗粒着火延迟时间的推导方法, 液滴每个阶段的着火延迟时间可表示为

$$t_{\mathrm{l}} = \frac{\mathrm{c}_{\mathrm{p,l}}\rho_{\mathrm{l}}D_{\mathrm{h}}}{6h_{\mathrm{l,a}}}\ln\left[1-\frac{4h_{\mathrm{l,a}}}{\alpha_{\mathrm{l}}q}(T_{\mathrm{v}}-T_{\infty})\right]^{-1}, \tag{2}$$

$$t_{\mathrm{v}} = \frac{q_{\mathrm{v}}\rho_{\mathrm{l}}D_{\mathrm{h}}}{6h_{\mathrm{l,a}}}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{l}}q}{4h_{\mathrm{l,a}}}-(T_{\mathrm{v}}-T_{\infty})\right]^{-1}, \tag{3}$$

$$t_{\mathrm{g}} = \frac{\mathrm{c}_{\mathrm{p,g}}\rho_{\mathrm{g}}D_{\mathrm{g}}}{6h_{\mathrm{g,a}}}\ln\left[1-\frac{4h_{\mathrm{g,a}}}{\alpha_{\mathrm{g}}q}(T_{\mathrm{i}}-T_{\mathrm{v}})\right]^{-1}. \tag{4}$$

其中: $\mathrm{C}_{\mathrm{p,l}}$ 为液滴的定压比热容; $\mathrm{C}_{\mathrm{p,g}}$ 为液滴蒸气的定压比热容; q_{v} 为液滴的蒸发潜热; ρ_{l} 为液滴密度; α_{l} 为液滴在该激光波长 (915 nm) 的吸收率; α_{g} 为液滴蒸气在该激光波长的吸收率; q 为激光强度, 单位为 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$; T_{∞} 为环境温度; T_{v} 为液滴的蒸发温度; T_{i} 为着火温度; $h_{\mathrm{l,a}}$ 为液滴与空气之间的对流传热系数; $h_{\mathrm{g,a}}$ 为液滴蒸气与空气之间的对流传热系数.

由式 (2)~(4) 可知, 所加激光强度 q 越大, t_{l}, t_{v} 和 t_{g} 均越小. 因此对于激光点火, 随着激光强度的增加, 着火延迟时间 t_{i} 逐渐减小.

实验中的着火延迟时间定义为激光打亮液滴至出现火光的时间段. 在固定脉冲时间的情况下, 改变激光功率使施加在液滴中心的激光强度不同, 用以研究不同激光强度对该多组分液滴着火延迟时间的影

响. 由表 2 可知, 固定激光脉冲时间为 220 ms, 选取激光功率为 30, 34, 37, 40 W, 计算得激光强度分别为 4.24, 4.81, 5.23, 5.66 $\mathrm{W\cdot mm^{-2}}$. 液滴着火延迟时间 t_i 在不同激光强度 q 下的变化如图 7 所示.

由图 7 可以看出, 在常温常压的空气环境中, 激光强度从 4.24 $\mathrm{W\cdot mm^{-2}}$ 升高到 5.66 $\mathrm{W\cdot mm^{-2}}$ 时, 着火延迟时间从 0.088 s 降低到 0.052 s, 与式 (2)~(4) 推导的结论一致, 即随着激光强度的逐渐增加, 将液滴从室温加热到沸点以及将参与反应的蒸气加热至着火温度的时间变短, 因此着火延迟时间逐渐变短. 但是, 由于试验误差, 这里并未呈现理论推导的线性减小关系.

3 结论

采用激光与热丝两种点火方式, 研究了多组分液滴燃烧过程中的燃烧速率和火焰变化. 结果表明, 通过合理选择参数, 可以削弱地面实验中自然对流对液滴着火的影响. 具体结论如下.

(1) 在热丝点火方式下, 热丝在液滴下方加热时间越长, 燃烧速率越大. 对于燃烧过程的后半阶段, 尚处于热丝加热阶段的火焰高度比没有热丝加热的约高 5 D_0, 比激光关闭后的火焰高度约高 5~10 D_0.

(2) 在激光点火方式下, 火焰高度比热丝点火的要低, 在稳定燃烧的后半阶段更接近于球形. 随着激光强度的逐渐增加, 着火延迟时间逐渐变短.

(3) 对比激光和热丝两种点火方式, 热丝加热 200 ms 与激光加热 180 ms 具有最接近的燃烧速率. 热丝点火对液滴燃烧扰动剧烈, 表现为直径处理误差大, 火焰上方高度在热丝加热阶段升高. 而激光点火响应迅速, 对液滴燃烧的影响小, 是地面上比较理想的液滴点火方式.

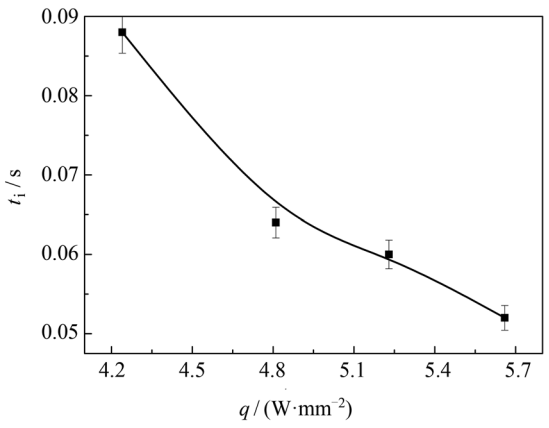

图 7 着火延迟时间与激光强度的关系

Fig. 7 Relationship between the ignition delay time and the laser intensity

(4) 与单组分液滴相比, 多组分液滴的直径变化线性拟合误差较大, 但基本满足经典的 d^2 定律, 其火焰高度与液滴初始直径之比的最大值约为 18.

参考文献

[1] HU Peng. Research on Spray and Combustion Process Based on Single Droplet Evaporation Model and Turbulent Diffusion Combustion Model of Ethanol-Diesel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014 (胡鹏. 基于乙醇柴油单液滴蒸发和湍流扩散模型的喷雾和燃烧过程研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014)

[2] GODSAVE G A E. Studies of the combustion of drops in a fuel spray—The burning of single drops of fuel [J]. *Symp. Int. Comb.*, 1953, **4**(1): 818-830

[3] MARCHESE A J, DRYER F L, COLANTONIO R O, *et al.* Microgravity combustion of methanol and methanol/water droplets: Drop tower experiments and model predictions [J]. *Symp. Int. Combust.*, 1996, **26**(1): 1209-1217

[4] LIU Yucheng, AVEDISIAN C T. A comparison of the spherical flame characteristics of sub-millimeter droplets of binary mixtures of *n*-heptane/iso-octane and *n*-heptane/toluene with a commercial unleaded gasoline [J]. *Combust. Flame*, 2012, **159**(2): 770-783

[5] NAYAGAM V, HAGGARD J B, COLANTONIO R O, *et al.* Microgravity *n*-heptane droplet combustion in oxygen-helium mixtures at atmospheric pressure [J]. *AIAA J.*, 1998, **36**(8): 1369-1378

[6] CALCOTE H F, PEASE R N. Electrical properties of flames: Burner flames in longitudinal electric fields [J]. *Ind. Eng. Chem.*, 1951, **43**(12): 2726-2731

[7] PAPAC M J, DUNN-RANKIN D, STIPE C B, *et al.* N_2 CARS thermometry and O_2 LIF concentration measurements in a flame under electrically induced microbuoyancy [J]. *Combust. Flame*, 2003, **133**(3): 241-254

[8] STRAYER B A, POSNER J D, DUNN-RANKIN D, *et al.* Simulating microgravity in small diffusion flames by using electric fields to counterbalance natural convection [J]. *Proc. Royal Soc.: A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2002, **458** (2021): 1151-1166

[9] FAETH G M, DOMINICIS D P, TULPINSKY J F, *et al.* Supercritical bipropellant droplet combustion [J]. *Symp. Int. Combust.*, 1969, **12**(1): 9-18

[10] MIKAMI M, OYAGI H, KOJIMA N, *et al.* Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays

at high temperatures [J]. *Combust. Flame*, 2006, **146**(3): 391-406

[11] DIETRICH D L, FERKUL P V, BRYG V M, *et al.* Detailed Results from the Flame Extinguishment Experiment (FLEX) March 2009 to December 2011 [R]. Cleveland, OH, US: NASA, 2015

[12] HAO Haixia, PEI Qing, ZHAO Fengqi, *et al.* Summarization of laser ignition characteristics of solid propellants [J]. *Chin. J. Energ. Mater.* 2009, **17**(4): 491-498 (郝海霞, 裴庆, 赵凤起, 等. 固体推进剂激光点火性能研究综述 [J]. 含能材料, 2009, **17**(4): 491-498)

[13] LI Shufen, NIU Helin, ZHANG Gangchui, *et al.* Laser ignition of NEPE propellant [J]. *J. Prop. Technol.*, 2002, **23**(2): 172-175 (李疏芬, 牛和林, 张钢锤, 等. NEPE 推进剂激光点火特性 [J]. 推进技术, 2002, **23**(2): 172-175)

[14] YANG Dali, XIA Zhixun, HU Jianxin, *et al.* Experimental study on ignition and combustion characteristics of single kerosene gel droplet [J]. *Acta Aeron. Astron. Sin.*, 2016, **37**(3): 847-853 (杨大力, 夏智勋, 胡建新, 等. 煤油凝胶单液滴燃烧特性试验 [J]. 航空学报, 2016, **37**(3): 847-853)

[15] LIU Peng, SONG Chonglin, ZHANG Yanfeng, *et al.* Effects on the performance and emission characteristics of heavy-duty diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel [J]. *J. Combust. Sci. Technol.*, 2003, **9**(4): 300-305 (刘朋, 宋崇林, 张延峰, 等. 乙醇–柴油混合燃料对柴油机性能及排放的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2003, **9**(4): 300-305)

[16] LI Shuangding. The Experimental Study on Ethanol-diesel Engine [D]. Nanning: Guangxi University, 2008 (李双定. 乙醇柴油混合燃料发动机的试验研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2008)

[17] LAW C K. Combustion Physics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006: 217-221

[18] BOTERO M L, HUANG Y, ZHU D L, *et al.* Synergistic combustion of droplets of ethanol, diesel and biodiesel mixtures [J]. *Fuel*, 2012, **94**: 342-347

[19] FANG Chaogang, SONG Qiang, ZHONG Lei, *et al.* Combustion behavior of N-decane droplet in direct current electric field in normal gravity field [J]. *J. Combust. Sci. Technol.*, 2012, **18**(6): 486-490 (方朝纲, 宋蔷, 仲蕾, 等. 电场作用下正癸烷液滴在常温常压下的燃烧特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2012, **18**(6): 486-490)

[20] GONG Jingsong, LU Qizhi, HE Yukun, *et al.* Evaporation and ignition characteristics of coal liquefied oil [J]. *J. Combust. Sci. Technol.*, 2014, **20**(1): 10-13 (龚景松, 陆奇志, 何裕昆, 等. 煤液化油的蒸发与着火特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2014, **20**(1): 10-13)

[21] SHAFIROVICH E, BOCANEGRA P E, CHAUVEAU C, *et al.* Ignition of single nickel-coated aluminum particles [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2005, **30**(2): 2055-2062