

燃料液滴对流燃烧现象研究

魏衍举¹, 邓胜才¹, 张洁¹, 张亚杰¹, 杨亚晶^{2,3}, 刘圣华¹, 杨朝辉⁴

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安;
3. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安; 4. 西安航天动力研究所, 710000, 西安)

摘要: 本文搭建了液滴对流燃烧实验平台,利用飞滴法进行燃料液滴对流燃烧实验,得到液滴燃烧的火焰结构图像和不同火焰阶段火焰与液滴的距离,同时还对蒸气爆发现象进行了探究,阐明了单次蒸气爆发与连续蒸气爆发的产生机理。研究表明:随着液滴速度的增大,液滴燃烧的火焰结构从全包火焰转变成边界层火焰,边界层火焰形成后会产生 2 种类型的转变:边界层火焰不稳定熄灭和边界层火焰转变成倒锥形火焰;在形成边界层火焰前,所有工况下液滴的火焰结构转变点基本相同;蒸气爆发现象是由火焰接触液滴引起的,火焰接触液滴后液滴温度突然升高,短时间内液滴大量蒸发,进而形成蒸气爆发燃烧;连续蒸气爆发的频率与液滴绕流卡门涡街频率相当,连续蒸气爆发的产生主要受液滴绕流卡门涡街效应的影响。

关键词: 燃料液滴;对流燃烧;火焰;蒸气爆发

中图分类号: O551.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202102013 **文章编号:** 0253-987X(2021)02-0112-09



A Study on Convective Combustion of Fuel Droplets

WEI Yanju¹, DENG Shengcai¹, ZHANG Jie¹, ZHANG Yajie¹, YANG Yajing^{2,3},
LIU Shenghua¹, YANG Zhaohui⁴

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710000, China)

Abstract: An experimental platform of droplet convective combustion is built, and the fuel droplet convective combustion experiment is carried out by using the flying drop method. The flame structure image of droplet combustion and the distance between flame and droplet under different flame stages are obtained. At the same time, the phenomenon of steam explosion is explored, and the generation mechanisms of single steam explosion and continuous steam explosion are clarified. The results show that, with the increase of droplet velocity, the flame structure of droplet combustion changes from full envelope flame to boundary layer flame. After the formation of boundary layer flame, there are two types of transition: boundary layer flame becoming unstably extinct and boundary layer flame converting into cone flame; before the formation of boundary layer flame, the transition points of droplet flame structure are basically the same under all working conditions; and the steam explosion phenomenon is caused by the flame contacting the droplet. After the flame contacts the droplet, the droplet temperature rises suddenly, and a large number of droplets evaporate in a short period of time, thus forming steam

explosion combustion. The frequency of continuous steam explosion is equivalent to the frequency of Karman vortex street around the droplet, and the generation of continuous steam explosion is mainly affected by the Karman vortex street effect of droplet flow around the droplet.

Keywords: fuel droplet; convective combustion; flame; steam explosion

对于常见的液体燃料动力设备如内燃机、燃气轮机、航空发动机、液体火箭发动机等,燃料液滴的燃烧在其运行过程中扮演着至关重要的角色,它决定着动力设备的动力性、经济性、污染物排放水平等。液滴燃烧本身是一个复杂的湍流两相流燃烧问题,如今已经成为限制许多动力设备性能提升的关键问题。对液滴燃烧进行深入研究及其机理分析,对提高燃料燃烧效率和生产力具有重要意义。

液滴燃烧的研究开始于 20 世纪 50 年代,其中最为著名的是 Godsave^[1] 和 Spalding^[2] 基于球对称、常物性假设,针对单个液滴在静止环境下的蒸发燃烧过程所提出的 D^2 模型,即液滴直径的平方随着时间延长而线性减小。截至目前,针对液滴燃烧的研究不断深入,模型与数值计算研究逐步考虑了复杂的液滴内部流动和更多的环境因素。随着复杂程度的逐步增加,液滴燃烧模型经历了 Law 的无限热导率模型^[3]、一维球对称模型^[4-5]、二维球对称模型^[6-7],再到如今的轴对称模型^[8]。实验研究主要针对液滴的燃烧特性,运用挂滴法^[9-14]、飞滴法^[15-16]或悬浮法^[17-21]等方式,探究液滴的滞燃时间、液滴寿命、微爆倾向、碳烟生成等特性。在实际的燃烧室中,燃料液滴处在复杂的燃烧环境中,受到诸多环境参数的影响,其中非常重要的一项是液滴与环境气流间存在相对速度。不同的相对速度会导致液滴产生不同的火焰结构,进而影响液滴的气化速率、燃烧速率和放热率^[22-24]。以往的静止模型与燃烧特性研究对进一步探索实际液滴运动燃烧模型存在局限性,因此开展液滴对流燃烧及火焰结构研究便尤为重要。过去针对液滴对流燃烧的研究中,研究者们获得了 3 种典型的火焰结构:包层火焰、尾迹火焰和边界层火焰^[25-28]。而事实上,液滴对流燃烧的火焰结构受到复杂因素的影响^[20-21,29],取决于气流速度、环境温度、液滴形态的历史演变等。目前,针对液滴对流燃烧的研究仍不尽充分,难以对气流中液滴火

焰结构进行全面描述,同时对于多种结构的火焰的转捩点和熄灭特征的报道也较少。

本文针对上述液滴燃烧研究中存在的空白,开展了燃料液滴对流燃烧现象研究。利用燃烧液滴的自由落体运动过程来模拟其在变速气流中的燃烧,系统性地分析液滴在气流中的燃烧现象与火焰结构转变。

1 实验装置

采用飞滴法作为实验方案,利用液滴的自由落体运动过程模拟气流速度对液滴燃烧的影响。实验装置原理图如图 1 所示,液滴发生装置利用电机驱动滑块匀速向左移动来挤压注射器进而在管路上端产生连续滴落的液滴,利用驱动调节装置调节滑块速度从而改变液滴的滴落频率,通过改变管路上端针头的规格来控制液滴直径。管路上端的液滴脱离针头后立即被火焰喷射装置点燃,待液滴的生成频率较稳定后触发高速摄像机,连续记录多个液滴的对流燃烧过程和火焰结构。

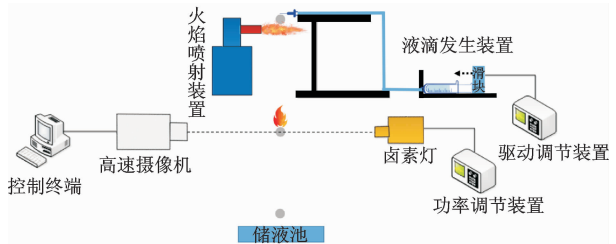


图 1 液滴对流燃烧实验装置原理图

采用 Phantom Miro eX4 高速摄像机拍摄液滴的燃烧过程,拍摄速率为 2 000 帧/s,每帧对应时间 0.5 ms,成像像素为 208×600。

为了使实验结果对发动机燃烧具有参考意义,特别是对发动机缸内喷雾柴油的微观燃烧反应具有重要意义,选择室温下的正庚烷和正十二烷液滴进行实验,具体的液滴参数见表 1。每个工况下的液滴进行

表 1 实验采用的液滴参数

液滴种类	温度/K	密度/(kg·m ⁻³)	表面张力/(mN·m ⁻¹)	液滴直径/mm	液滴质量/mg
正庚烷	293	684	21.6	2.0、2.6	22.9、50.4
正十二烷	293	753	25.44	2.0、2.6	25.2、55.4
柴油	293	835	26.8	(10~14)×10 ⁻³	(4.37~12)×10 ⁻⁷

3次重复实验。

根据杨继雅等对柴油喷雾液滴微观直径和液滴速度的研究^[30],本文采用与缸内喷雾液滴韦伯数接近的燃料液滴进行燃烧实验。柴油喷雾液滴直径多分布在 $10\sim 14\ \mu\text{m}$,液滴速度小于 $2\ \text{m/s}$,根据韦伯数公式有

$$We = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \quad (1)$$

式中: ρ 为燃油密度, kg/m^3 ; v 为液滴速度, m/s ; D 为液滴直径, m ; σ 为表面张力, N/m 。

柴油喷雾的韦伯数为10的占比较大。本实验的液滴在形成边界层火焰时, $v=0.8\ \text{m/s}$,正庚烷的韦伯数为40.5,正十二烷的韦伯数为37.8。实验的液滴韦伯数与缸内柴油的韦伯数在同一数量级,通过本实验对液滴的运动燃烧进行研究,可以了解柴油在缸内喷雾状态下的气流运动和燃烧的火焰形态。

2 实验现象

燃料液滴在自由落体的整个过程中,下落时间长,现象复杂且具有阶段性。为便于研究,将实验现象分成两段。在燃烧的初始阶段,液滴下落速度小,呈现出全包火焰向边界层火焰的转变现象。在边界层火焰形成后的第二阶段,液滴速度持续增大,液滴呈现出2种现象,即边界层火焰趋于不稳定熄灭和边界层火焰向倒锥形火焰转变。

2.1 全包火焰边界层火焰转变

图2所示为初始直径 $D_0=2.6\ \text{mm}$ 的正十二烷液滴在时间 $t=0\sim 120\ \text{ms}$ 内的全包火焰边界层火

焰转变过程,以液滴离开发生装置时刻作为零时刻点。具体过程如下: $t=0\ \text{ms}$ 液滴由发生装置脱落时,火焰结构为全包火焰。液滴随后开始作自由落体运动,速度逐渐增大,并在一段时间内保持全包火焰结构,在 $t=40\ \text{ms}$ 时液滴仍被火焰完全包围。此后火焰结构开始发生变化,随着液滴速度变大,空气相对于液滴向上吹扫,液滴南半球为迎风面,液滴蒸发的蒸气向上流动,导致北半球火焰燃烧更加旺盛,而南半球火焰变小,在 $t=63\ \text{ms}$ 时液滴南极火焰厚度达到 $0\ \text{mm}$,火焰转变成半包火焰。随后火焰继续向液滴北极发展,从半包火焰向边界层火焰转变,在 $t=69\ \text{ms}$ 时形成与液滴北极点平行的尾迹火焰。尾迹火焰逐渐远离液滴北极,在 $t=74\ \text{ms}$ 形成距离液滴北极 $1\ \text{mm}$ 的边界层火焰。之后的 $t=83\sim 120\ \text{ms}$ 时间段边界层火焰进一步远离液滴。

2.2 边界层火焰的结构转变

在边界层火焰形成后,以此时刻为零点描述后续的火焰结构转变阶段,分别是:边界层火焰逐渐趋于不稳定导致熄灭和边界层火焰转变成倒锥形火焰。

2.2.1 边界层火焰不稳定熄灭 在初始直径 2.0 、 $2.6\ \text{mm}$ 的正庚烷液滴和初始直径 $2.0\ \text{mm}$ 的正十二烷液滴的实验中都观察到由边界层火焰向不稳定熄灭的转变,熄灭过程如图3所示。在边界层火焰形成后,火焰已经完全处于液滴上方,液滴迎风面冷却,蒸气蒸发量变少,液滴火焰也随之变小。随着液滴速度进一步增大,火焰传播速度小于液滴速度,火焰无法贴近液滴燃烧,它们之间的相对距离变大,火焰与液滴之间由液滴蒸气形成的碳烟尾迹所联系。空气流绕过液滴时,碳烟随空气摆动,形成卡门涡街,此时的雷诺数为 $150 < Re < 3 \times 10^5$,形成的是湍

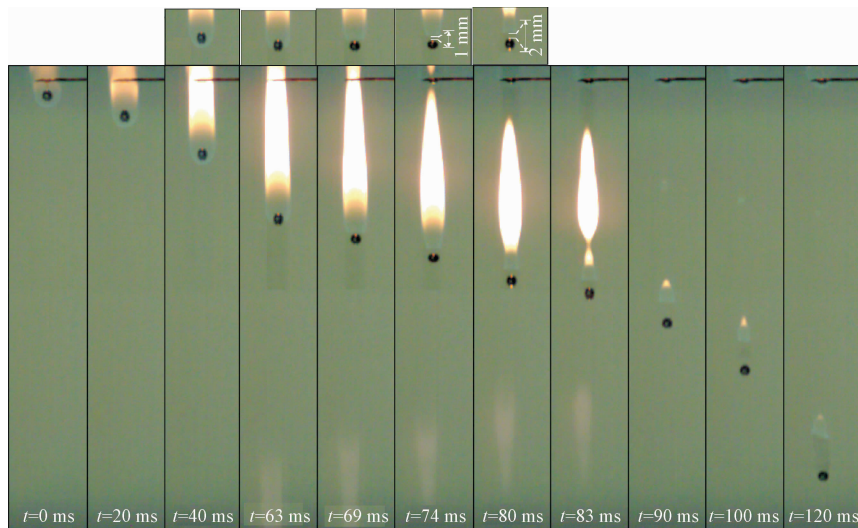


图2 正十二烷液滴全包火焰边界层火焰转变过程

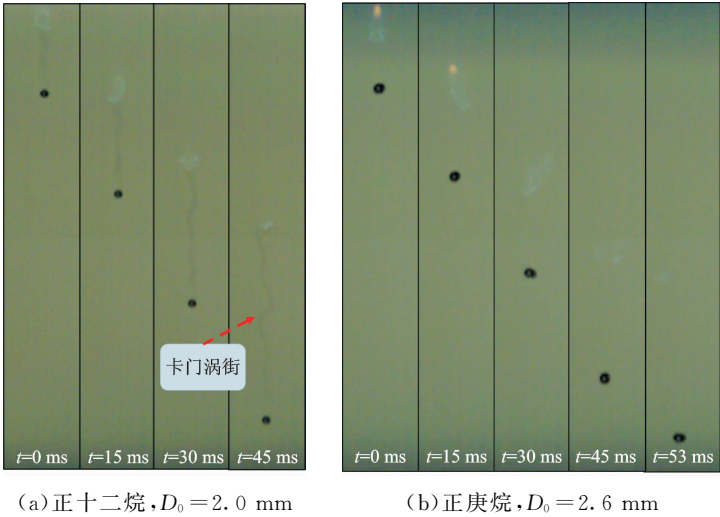


图 3 边界层火焰不稳定熄灭过程

流尾迹。火焰与液滴距离的增大、火焰的水平摆动使得火焰对液滴的辐射传热热量降低,加之空气对液滴迎风面的冷却,液滴表面温度降低,燃料蒸气蒸发量减少,火焰与液滴的距离过远使燃料蒸气供应无法连续,进而火焰熄灭。

2.2.2 边界层火焰转变为倒锥形火焰 对于初始直径 2.6 mm 的正十二烷液滴,其火焰转变过程与上述不稳定熄灭截然不同,整体过程如图 4 所示。图中 $t=0\sim 40 \text{ ms}$ 时间段内液滴与边界层火焰的距离未出现增大,而是在一定范围内波动。在 $t=40 \text{ ms}$ 时刻边界层火焰开始向液滴北极靠近并在 $t=48 \text{ ms}$ 时刻与液滴接触,随后火焰结构在 $t=50\sim 55 \text{ ms}$ 经历了一系列变化,于 $t=55 \text{ ms}$ 时形成了紧贴液滴的倒锥形火焰,并在后续时间内保持稳定。

在上述结构变化过程中,在 $t=50\sim 55 \text{ ms}$ 内,火焰结构经历了一次特殊的蒸气爆发现象,其结构变化过程如图 5。在 $t=48 \text{ ms}$,边界层火焰与液滴接触。在经历了短暂的 2 ms 后,在 $t=50 \text{ ms}$ 时边界层火焰与液滴的中间位置形成了蒸气爆发核心。在之后的 2 ms 内,蒸气爆发所产生的火焰从核心呈圆形逐渐扩大,在 $t=52 \text{ ms}$ 时爆发直径达到最大,



图 4 正十二烷液滴($D_0 = 2.6 \text{ mm}$)边界层火焰向倒锥形火焰的转变过程

此时爆发火焰的圆形直径与其上方的火焰尺寸相当,火焰总面积达到最大。在随后的 3 ms 内火焰的上半部分逐渐熄灭,并在 $t=55 \text{ ms}$ 形成了倒锥形火焰。

3 火焰与液滴距离变化规律

在液滴对流燃烧过程中,火焰与液滴的距离对应火焰的不同阶段,而燃烧火焰的形态是随着液滴

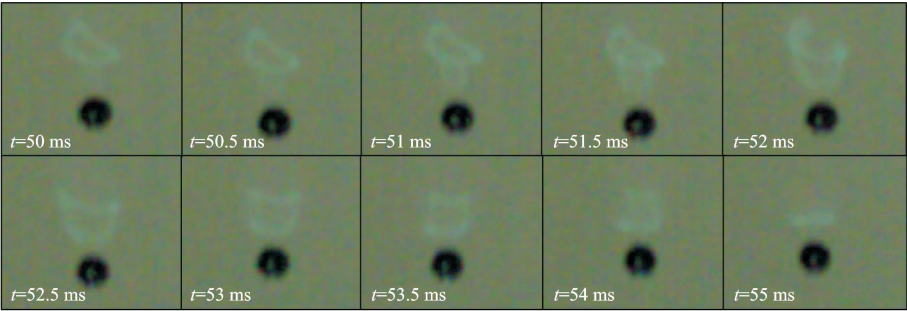


图 5 正十二烷液滴($D_0 = 2.6 \text{ mm}$)燃烧的蒸气爆发现象

速度的改变而改变。以液滴速度 v 为自变量, 火焰与液滴的距离 l 为因变量来定量探究火焰的不同阶段。其中, 火焰与液滴的距离 l 为火焰南极点与液滴北极点的距离。为方便区分火焰包裹液滴和火焰远离液滴, 取火焰南极点低于液滴北极点时 l 的值为负值, 火焰南极点高于液滴北极点时 l 的值为正值。在液滴周围液滴蒸气浓度大, 蒸气燃烧不充分, 温度较低, 火焰呈现蓝色, 在蓝色火焰上部, 蒸气浓度变稀并与空气充分燃烧, 温度较高, 火焰呈现黄色, 如图 6 所示。

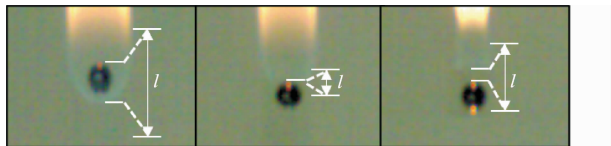


图6 火焰与液滴距离的定义

3.1 全包火焰转变为边界层火焰阶段

对于全包火焰向边界层火焰的转变过程, l 随 v 的变化如图 7 所示。由图 7 可知, 当 $v < 0.6$ m/s 时, l 为负值, $|l| > D_0$, 说明此时火焰为全包火焰结构; l 的斜率变化较小, 出现的小幅波动与液滴本身自由落体的形态振荡有关。在 $v = 0.7$ m/s 时, l 的斜率突然增大, 此时 $|l| = D_0$, 形成半包火焰结构。随着液滴继续下落, 火焰迅速向液滴北极点移动, 在 10 ms 内变成边界层火焰, 此时 $v = 0.8$ m/s, $l = 0$ mm。从半包火焰到边界层火焰的转变过程迅速, 主要是液滴南半球处于迎风面, 受迎风面的冷却作用, 南半球稀薄的火焰迅速消失, 相应的蒸气蒸发量也减少, 致使火焰只呈现在北半球燃烧。边界层火焰形成后, l 随 v 的变化近似于线性增长, 且正庚烷的斜率显著高于正十二烷的斜率。

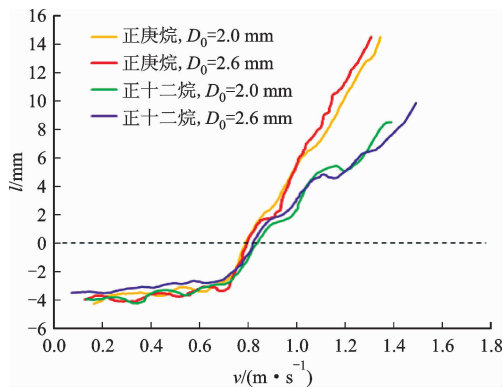


图7 全包火焰转变为边界层火焰阶段火焰与液滴距离随液滴速度的变化

3.2 边界层火焰不稳定熄灭阶段

对于边界层火焰发展向不稳定熄灭的过程, 不同种类和直径的液滴在形成同一边界层火焰高度时, 它们的速度不同。 l 随 v 的变化如图 8 所示, 可以看到, 对于相同种类的液滴, l 随 v 的变化曲线几乎重合, 说明在边界层火焰处于不稳定熄灭阶段; 液滴大小不是影响火焰的因素, 而液滴种类的不同导致液滴的理化性质不同, 如蒸气压、沸点、化学计量空燃比等, 影响了液滴尾迹的燃烧。在 v 相同的情况下, 空气对火焰的冷却作用相同, 空气与蒸气的混合程度相同。从图 8 中可以看到, 正庚烷的 l 值大于正十二烷。这是由于正庚烷的沸点是 98.5°C , 正十二烷的沸点是 215°C , 因此在形成边界层火焰后, 正庚烷液滴的蒸气量大于正十二烷的蒸气量, 导致正庚烷未燃烧的蒸气量多于正十二烷, 即正庚烷的碳烟尾迹较长。此外, 正庚烷的燃点是 215°C , 正十二烷的燃点是 200°C , 正十二烷比正庚烷更易燃烧, 在 v 增大的情况下, 空气冷却作用加大, 温度低于正庚烷燃点时火焰熄灭, 此时 $v < 1.6$ m/s, 正十二烷仍然能够燃烧, 并在 $v > 1.8$ m/s 时火焰熄灭。

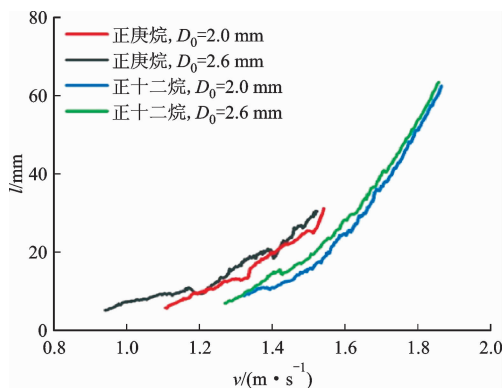


图8 边界层火焰不稳定熄灭阶段火焰与液滴距离随液滴速度的变化

3.3 边界层火焰转变为倒锥形火焰阶段

由于仅在初始直径 2.6 mm 的正十二烷液滴实验中观察到边界层火焰向倒锥形火焰的变化, 为便于分析, 选取 3 组重复实验结果进行比对。图 9 为这 3 组实验中火焰与液滴距离随液滴速度的变化。在形成边界层火焰后, l 在一定范围内波动。1、2、3 组实验分别在液滴速度 v 为 1.3、1.42、1.47 m/s 时边界层火焰开始向液滴发展。随后 3 组实验中 l 以相同的斜率减少, 即火焰的发展速度相同, 直到火焰接触液滴, l 减小至 0 mm; 之后火焰经历一次蒸气爆发后维持稳定的倒锥形, 火焰紧贴液滴, l 维持 0 mm 不再变化。根据上述结果推断: 对于由波动状

态转变为向液滴发展的火焰结构转折点,液滴速度不是其决定性因素,转折点可能受环境空气温度波动的影响。目前无法对其定量,需要进一步探究。

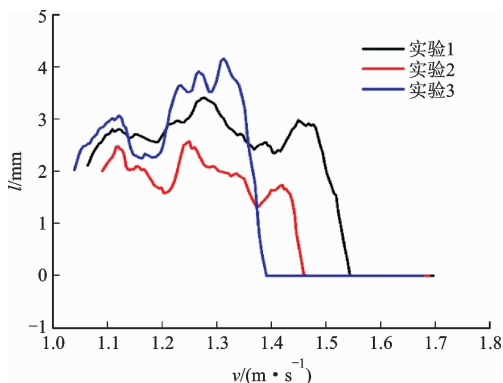


图9 边界层火焰转变为倒锥形火焰阶段正十二烷火焰与液滴距离随液滴速度的变化

4 蒸气爆发现象分析

由于只在初始直径 2.6 mm 的正十二烷液滴在边界层火焰转变为倒锥形火焰的过程中观察到单次蒸气爆发和连续蒸气爆发现象,因此对于蒸气爆发与液滴直径和液滴种类的相关性还需要进行其他液滴实验验证。下面对蒸气爆发现象的产生原因、时间特性,以及连续蒸气爆发现象的频率与产生机理进行探究。

4.1 单次蒸气爆发

图 10 为 $D_0=2.6$ mm 的正十二烷液滴 3 组实验中 l 随绝对时间 t 的变化。每条实验曲线中的 3 个点分别代表该蒸气爆发开始、爆发火焰体积达到最大、爆发火焰完全消散的时刻点。由图 10 可以看出,对于这 3 组实验,在边界层火焰与液滴接触后均很快发生了蒸气爆发,由此可以推断蒸气爆发是由火焰接触液滴引起的,当火焰接触液滴后液滴温度突然升高,短时间内液滴产生大量蒸发,进而形成蒸

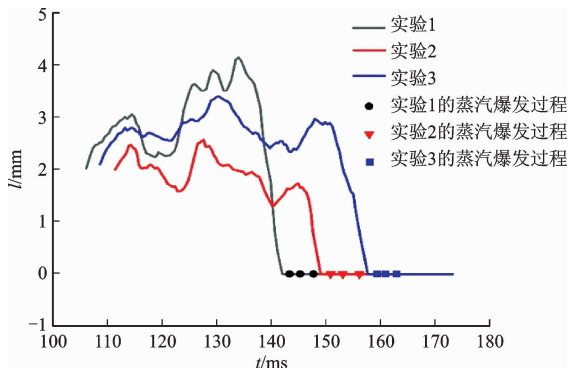


图10 正十二烷火焰与液滴距离随时间的变化(蒸气爆发位置)

气爆发燃烧的现象。

图 11 为上述 3 组实验中蒸气爆发的各阶段时间占比,其中准备阶段是指火焰与液滴接触到产生蒸气爆发核心,爆发阶段为爆发开始到火焰面积达到最大值,熄灭阶段为火焰开始熄灭到形成倒锥形火焰。图中 3 组实验中蒸气爆发准备阶段与爆发阶段的时间接近,蒸气爆发的准备阶段 $\Delta t_1=2$ ms,爆发阶段 $\Delta t_2=2$ ms,而爆发阶段火焰面积达到最大,主要是核心火焰沿着蒸气延伸扩展。由此可知,爆发阶段时间不受环境温度影响,主要由火焰传播速度决定。熄灭阶段 $\Delta t_3=2\sim 3$ ms,这一阶段的时间受环境温度、气流速度影响,不确定性强。

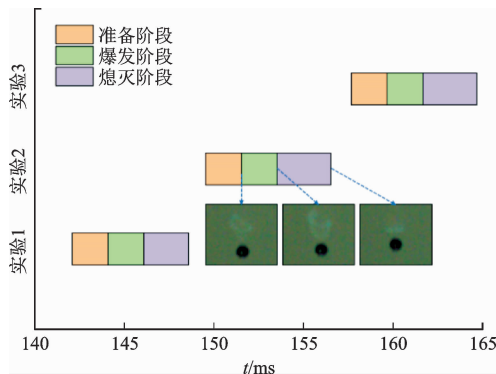


图11 正十二烷的蒸气爆发各阶段时间占比

4.2 连续蒸气爆发

图 12 为正十二烷液滴的连续蒸气爆发现象。如图 12a 所示,多次蒸气爆发现象在火焰接触液滴前的过程与单次蒸气爆发现象相同,在 $t=0\sim 20$ ms 时间段内,液滴与边界层火焰的距离在一定范围内波动,在 $t=20$ ms 火焰开始向液滴北极靠近, $t=26.5$ ms 火焰与液滴接触。随后火焰在 $t=28.5$ ms 开始了第一次蒸气爆发, $t=28.5\sim 30.5$ ms 为爆发阶段,上部分的爆发火焰在 $t=34$ ms 熄灭,形成了倒锥形火焰,过程如图 12b 所示。在下次蒸气爆发开始前,倒锥形火焰北极与液滴的距离逐渐增大,火焰面积同时增大。随后在 $t=36$ ms 火焰开始了第 2 次蒸气爆发,爆发阶段 $t=36\sim 38$ ms,爆发火焰在 $t=39.5$ ms 熄灭,如图 12c 所示。第 3 次蒸气爆发阶段为 $t=44\sim 46$ ms,爆发火焰在 $t=47.5$ ms 熄灭,如图 12d 所示。第 4 次蒸气爆发阶段为 $t=51\sim 53$ ms,爆发火焰在 $t=55$ ms 熄灭,如图 12e 所示。在 4 次蒸气爆发中,爆发阶段的时长相同,均为 2 ms,熄灭阶段时长 1.5~3.5 ms,时间特性与 4.1 节单次蒸气爆发现象一致。

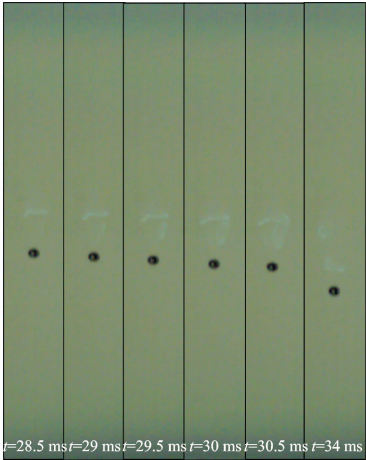
为对比连续蒸气爆发中的多次蒸气爆发,选取

火焰北极点与液滴北极点的距离 l_{top} 以表征连续蒸气爆发过程中的火焰结构,其定义如图 13 所示。

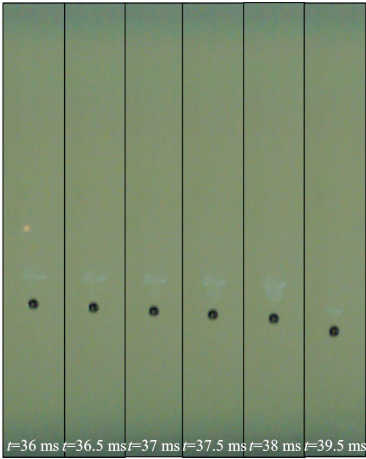
图 14 为实验中两组典型连续蒸气爆发现象中的 l_{top} 随相对时间的变化,其中相对时间以火焰南极接触液滴为时刻点。由图中可以看到,各条曲线中



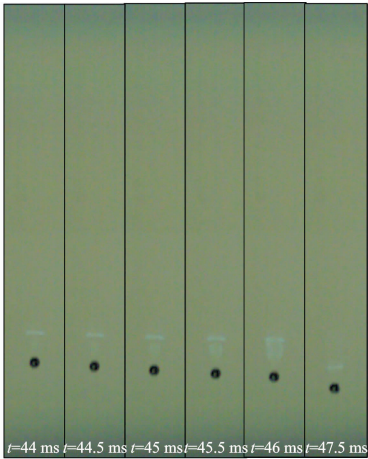
(a) 火焰接触液滴前



(b) 第一次蒸气爆发



(c) 第二次蒸气爆发



(d) 第三次蒸气爆发



(e) 第四次蒸气爆发

图 12 正十二烷的连续蒸气爆发现象 ($D_0 = 2.6\text{ mm}$)

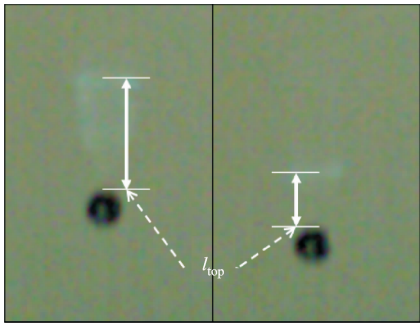
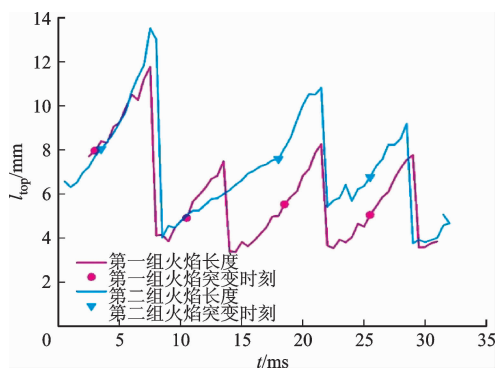


图 13 火焰北极与液滴北极距离 l_{top} 定义

产生蒸气爆发时的 l_{top} 基本相同。对于每一次蒸气爆发, l_{top} 从爆发开始点逐渐增大至爆发结束,而后上方的爆发火焰熄灭时 l_{top} 突然下降,此时的 l_{top} 为倒锥形火焰的高度,随后 l_{top} 逐渐增大直至形成下一次蒸气爆发。对于蒸气爆发的产生时间,除曲线 2 中第一次蒸气爆发后火焰结构产生不稳定影响了蒸气爆发时刻以外,其他蒸气爆发的间隔时间均为

图 14 l_{top} 随相对时间的变化

7.5 ms, 即蒸气爆发的频率 $f_{\text{exp}} = 1/\Delta t = 142.86$ Hz。为探究连续蒸气爆发的产生原因, 参考在不稳定熄灭现象中碳烟轨迹的卡门涡街效应。根据卡门涡街频率公式

$$f_{\text{car}} = Sr(v_g/D) \quad (2)$$

式中: Sr 是斯特劳哈尔数; v_g 为气流速度。 Sr 主要与雷诺数有关, 此处取 0.21。气流速度即液滴速度, 在连续蒸气爆发阶段 $v_g = 1.6 \sim 1.8$ m/s。

液滴蒸发时的液滴直径定律为

$$D^2(t) = D_0^2 - K_v t \quad (3)$$

式中: K_v 为蒸发常数; t 为蒸发时间。正十二烷的 $K_v = 3.3 \times 10^{-7}$, 经计算, 2.6 mm 的正十二烷液滴在沸点对流空气换热中完全蒸发需 7.8 s, 而在本实验中, 由于实验段时间短, 且液滴不是处于稳定的沸点空气对流中, 仅靠火焰自身的蒸发, K_v 的值也将变小, 蒸发较慢, 因此认为整个实验段液滴直径几乎不变, 即 $D = D_0 = 2.6$ mm, 由此可得

$$f_{\text{car}} = 0.21 \left(\frac{1.6 \sim 1.8}{0.0026} \right) = 129 \sim 145 \text{ (Hz)} \quad (4)$$

可以看出, 在蒸气爆发阶段的液滴绕流卡门涡街频率 f_{car} 与蒸气爆发频率 f_{exp} 接近, 据此推断连续蒸气爆发的产生主要受液滴绕流卡门涡街效应的影响。

5 结 论

(1) 在形成边界层火焰前, 所有工况下液滴的火焰结构转变点基本相同。在液滴速度 $v = 0.7$ m/s 处全包火焰开始向北熄灭, 在 $v = 0.8$ m/s 处形成了与液滴北极平行的尾迹火焰, 边界层火焰形成后, 火焰与液滴的距离 l 随 v 的变化近似于线性增长, 正庚烷的斜率显著高于正十二烷的斜率。

(2) 形成边界层火焰后, 正庚烷液滴的蒸气量大于正十二烷的蒸气量, 导致正庚烷未燃烧的蒸气量多于正十二烷, 即正庚烷的碳烟尾迹较长, 在 v 相同

的情况下, 正庚烷的 l 值大于正十二烷。正庚烷的燃点高于正十二烷, 正庚烷在 $v < 1.6$ m/s 时熄灭, 正十二烷在 $v > 1.8$ m/s 时熄灭。

(3) 初始直径 2.6 mm 的正十二烷液滴的边界层火焰能够形成倒锥形火焰, 边界层火焰开始向液滴发展的结构转折点与液滴速度无关。

(4) 蒸气爆发现象是由火焰接触液滴引起的, 火焰接触液滴后液滴温度突然升高, 短时间内液滴大量蒸发, 进而形成蒸气爆发燃烧, 火焰扩展主要受火焰传播速度的影响。蒸气爆发准备阶段时长 $\Delta t_1 = 2$ ms, 爆发阶段时长 $\Delta t_2 = 2$ ms, 熄灭阶段时长 $\Delta t_3 = 2 \sim 3$ ms。

(5) 在连续蒸气爆发现象中, 爆发阶段时长均相同, 为 2 ms。连续蒸气爆发的频率 $f_{\text{exp}} = 142.86$ Hz 与液滴绕流卡门涡街频率 $f_{\text{car}} = 129 \sim 145$ Hz 接近, 推断连续蒸气爆发的产生受液滴绕流卡门涡街效应的影响。

参考文献:

- [1] GODSAVE G A E. Studies of the combustion of drops in a fuel spray; the burning of single drops of fuel [J]. Symposium (International) on Combustion, 1953, 4 (1): 818-830.
- [2] SPALDING D B. The combustion of liquid fuels [J]. Symposium (International) on Combustion, 1953, 4 (1): 847-864.
- [3] LAW C K. Unsteady droplet vaporization with droplet heating [J]. Combustion and Flame, 1976, 26: 17-22.
- [4] ABRAMZON B, SIRIGNANO W A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(9): 1605-1618.
- [5] SHAYGAN N, PRAKASH S. Droplet ignition and combustion including liquid-phase heating [J]. Combustion & Flame, 1995, 102(1/2): 1-10.
- [6] DASH S K, SOM S K. Ignition and combustion of liquid fuel droplet in a convective medium [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1991, 113(3): 165.
- [7] RENKSIZBULUT M, HAYWOOD R J. Transient droplet evaporation with variable properties and internal circulation at intermediate Reynolds numbers [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1988, 14 (2): 189-202.
- [8] HAYWOOD R J, RENKSIZBULUT M, RAITHBY G D. Transient deformation and evaporation of droplets at intermediate Reynolds numbers [J]. Interna-

- tional Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(9): 1401-1409.
- [9] OKAJIMA S. Further investigations of combustion of free droplets in a freely falling chamber including moving droplets [J]. Symposium (International) on Combustion, 1975, 15(1): 401-407.
- [10] LAW C K, LEE C H, SRINIVASAN N. Combustion characteristics of water-in-oil emulsion droplets [J]. Combustion & Flame, 1980, 37: 125-143.
- [11] MIYASAKA K, LAW C K. Combustion of strongly-interacting linear droplet arrays [J]. Symposium on Combustion, 1981, 18(1): 283-292.
- [12] CHAUVEAU C, BIROUK M, GÖKALP I. An analysis of the d^2 -law departure during droplet evaporation in microgravity [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(3): 252-259.
- [13] HASHIMOTO N, NOMURA H, SUZUKI M, et al. Evaporation characteristics of a palm methyl ester droplet at high ambient temperatures [J]. Fuel, 2015, 143: 202-210.
- [14] VERWEY C, BIROUK M. Experimental investigation of the effect of droplet size on the vaporization process in ambient turbulence [J]. Combustion & Flame, 2017, 182: 288-297.
- [15] WORNAT M J, PORTER B G, YANG N Y C. Single droplet combustion of biomass pyrolysis oils [J]. Energy & Fuels, 1994, 8(5): 1131-1142.
- [16] HAN Kai, CHEN Hao, YANG Bo, et al. Experimental investigation on droplet burning characteristics of diesel-benzyl azides blend [J]. Fuel, 2017, 190: 32-40.
- [17] KING L V. On the acoustic radiation pressure on spheres [J]. Proceedings of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1934, 147(861): 212-240.
- [18] HANSON A R, DOMICH E G, ADAMS H S. Acoustical liquid drop holder [J]. Review of Scientific Instruments, 1964, 35(8): 1031-1034.
- [19] BASU S, SAHA A, KUMAR R. Thermally induced secondary atomization of droplet in an acoustic field [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(5): 054101.
- [20] BASU S, SAHA A, KUMAR R. Criteria for thermally induced atomization and catastrophic breakup of acoustically levitated droplet [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2013, 59: 316-327.
- [21] PATHAK B, BASU S. Phenomenology of break-up modes in contact free externally heated nanoparticle laden fuel droplets [J]. Physics of Fluids, 2016, 28(12): 123302.
- [22] 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, 2015, 37(3): 847-853.
- YANG Dali, XIA Zhixun, HU Jianxin, et al. Experimental study on ignition and combustion characteristics of single kerosene gel droplet [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 37(3): 847-853.
- [23] 杨大力. 凝胶单液滴蒸发燃烧特性试验研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015: 42-48.
- [24] 马志豪, 贾义, 李智博, 等. 单滴燃料高压着火与燃烧特性的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 95-101, 155.
- MA Zhihao, JIA Yi, LI Zhibo, et al. Experimental study on high pressure ignition and combustion characteristics of single droplet fuel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 95-101, 155.
- [25] AGOSTON G A, WISE H, ROSSER W A. Dynamic factors affecting the combustion of liquid spheres [J]. Symposium (International) on Combustion, 1957, 6(1): 708-717.
- [26] CHIU H H. Advances and challenges in droplet and spray combustion; I Toward a unified theory of droplet aerothermochemistry [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(4/5/6): 381-416.
- [27] MERCIER X, ORAIN M, GRISCH F. Investigation of droplet combustion in strained counterflow diffusion flames using planar laser-induced fluorescence [J]. Applied Physics: B, 2007, 88(1): 151-160.
- [28] 李科, 赵钰祥, 武文斐. 单油滴蒸发燃烧周围流场及火焰结构的数值模拟研究 [J]. 热科学与技术, 2015, 14(3): 178-183.
- LI Ke, ZHAO Yuxiang, WU Wenfei. Numerical study on surrounding gas flow and flame structures of single combusting droplet [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015, 14(3): 178-183.
- [29] BASU S, SAHA A, KUMAR R. Thermally induced secondary atomization of droplet in an acoustic field [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(5): 054101.
- [30] 杨继雅, 王超, 隆武强. 喷射结束后柴油喷雾微观特性试验研究 [C]//中国工程热物理学会. 北京: 科学出版社, 2015.

(编辑 亢列梅)