

燃烧油滴内部蒸发的气泡周期性暴涨/碎裂

陆奇志, 龚景松, 朴英, 殷雅俊, 李辉, 范红雨
(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 利用高速显微摄像技术捕捉到航空煤油 RP-3 挂滴的燃烧现象——微气泡周期性暴涨/破碎现象。环境温度为 973 K 时,在直径为 1.25 mm 的燃烧油滴内,捕捉到了微气泡的急剧暴涨和瞬间碎裂现象。即:①在 0.04 s 内,微气泡直径增长 41.6%;②在 0.01 s 内,暴涨的气泡在油滴内破碎,激发油滴急剧振荡;③油滴恢复相对稳定的蒸发燃烧,内部残留的微气泡,启动第 2 轮暴涨/破碎;④经过 3 轮暴涨/破碎,油滴燃烧殆尽。因而得出:被高温加热的石英丝挂钩在油滴内部诱发的快速蒸发效应,是微气泡周期性暴涨/碎裂的驱动力,而表面张力则是油滴恢复并保持稳定燃烧的约束机制。

关 键 词: 挂滴; 燃烧; 内部蒸发; 微气泡; 暴涨和碎裂

中图分类号: V21; TQ038.3

文献标志码: A

Periodic expansion/fracture of bubbles in burning oil droplets by internal evaporation

LU Qizhi, GONG Jingsong, PIAO Ying,
YIN Yajun, LI Hui, FAN Hongyu

(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The following phenomena were captured in combustion process by high-speed microscopic camera technology: the periodic expansion/fracture of micro bubbles in aviation kerosene RP-3 suspended droplet. The phenomena that the micro bubbles sharply expanded and suddenly fractured were found inside the burning 1.25 mm diameter droplet at environment temperature of 973 K. Namely: (1) in 0.04 s, the diameter of the micro bubbles increased by 41.6%; (2) in 0.01 s, the expansion bubble was fractured inside the droplet, which stimulated the droplet's sharply oscillations; (3) the droplet resumed relatively stable evaporation and combustion, and the internal residuals of the micro bubbles were observed to start the second round of expansion/fracture; (4) the droplet burned away after three rounds of expansion/fracture. The following mechanism was speculated: the quartz fiber heated by high temperature induced the rapid evaporation effect inside the droplet, which was the driving force of the micro bubble periodic expansion/fracture. Moreover, surface tension was the restraint mechanism to restore and maintain the droplet stable combustion.

收稿日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51036004, 11672150, 11272175); 高等学校博士生导师基金(20130002110044)

作者简介: 陆奇志(1970—),男,博士生,主要从事燃烧及燃烧设备方面的研究。E-mail: lqzqlqz@126.com

通讯作者: 朴英(1959—),女,教授、博士生导师,博士,主要研究方向为航空宇航推进技术与理论。

E-mail: piaoying@tsinghua.edu.cn

引用格式: 陆奇志,龚景松,朴英,等.燃烧油滴内部蒸发的气泡周期性暴涨/碎裂[J].航空动力学报,2017,32(8):1869-1875. LU Qizhi, GONG Jingsong, PIAO Ying, et al. Periodic expansion/fracture of bubbles in burning oil droplets by internal evaporation[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1869-1875.

Key words: suspended droplet; combustion; internal evaporation; micro bubbles; expansion and fracture

液体中气泡成核是工程领域和自然界中的基本物理现象,由于气液相变蕴含着复杂多变的过程,因此池沸腾和管内沸腾一直是众多学者研究的重点。王金照分析了池沸腾中纳米颗粒的尺寸对液体内部气泡成核的影响^[1]。毕景良从微观角度探究了核态池沸腾换热的特性及机理^[2]。王珍分析指出二元溶液的表面张力存在明显温度和浓度相关性^[3]。吴迪指出当管径小于等于 2.0 mm 时,气液相变尺度效应作用明显^[4]。Wiesche 等研究了随着过热的增加,临界核扩展的空间增加,而非稳区来自气核所需要的能量减少和消失^[5]。邬小波等模拟研究了过热液相中的气相成核过程^[6]。

除池沸腾和管内沸腾外,微小尺度单液滴内气泡成核运动现象和机制逐渐被学者们所关注。Kwak 等分析了在过热极限条件下油滴内气泡形成的模型^[7]。Law 等分析了多组分油滴在蒸发时内部沸腾和过热的现象,指出内部气泡的产生有助于缩短油滴在燃烧器内驻留的时间,减少不完全燃烧碳烟颗粒的出现^[8-9]。Wang 等研究了多组分液滴的微暴^[10]。Khan 等研究了煤油燃料油滴初始直径对油滴蒸发的影响^[11]。XU Jian 等分析了碳水胶状悬浮液滴在强辐射条件下燃烧炸裂的机理^[12]。Turns 指出液滴受热蒸发直径先增大后减小,某些燃料液滴会出现炸裂现象^[13]。Basu 等研究了活性金属纳米颗粒在燃烧的液滴中导致其沸腾和微爆的过程^[14]。Migliani 等分析了声波对燃烧液滴的稳定性影响^[15]。Jeong 等研究了水燃料乳液液滴单油滴自点火和微爆的特性^[16]。Tijerino 等研究了辐射加热的悬浮液滴中纳米颗粒在不同声波振幅下的影响^[17]。

前期实验在燃烧的油滴内发现了微气泡^[18-19],捕捉到了微气泡的成核-长大-聚合-溢出的完整过程,澄清了微气泡的若干种成核机理,诠释了含气泡油滴稳定燃烧的表面张力约束机制。这些进展为研究单液滴的燃烧效率和稳定性提供了启示。

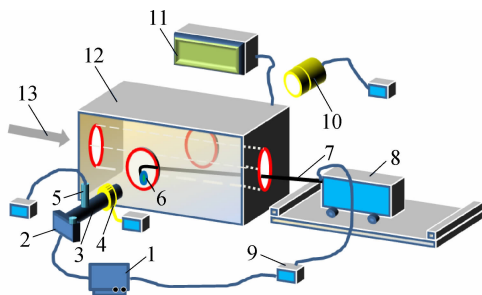
前期实验观察到微气泡演化都具有如下共性:一是渐进性。微气泡的演化过程大体上是平缓的和渐进的,液滴直径没有较大涨落,更没有反复无常的现象。二是同步性。微气泡的成核-长大-聚合-溢出过程^[18-19]与油滴的燃烧过程基本同步。随着气泡的溢出,油滴很快燃烧殆尽。然

而最近捕捉到的新实验现象打破了上述共性:在实验中发现,在一定条件下,微气泡先急剧暴涨,再瞬间破碎,后部分溢出,打破了渐进性。而在油滴燃尽之前,先后发生 3 轮暴涨-破碎/溢出,彻底颠覆了“同步性”。

鉴于油滴的周期性暴涨/碎裂现象在已有的文献中和过去的实验中从来没有出现过,本文将致力于新颖现象的精细描述,以便于建立清晰的物理图象,同时力求澄清现象背后的机理。

1 实验燃料及装置

实验中使用的燃料组分见文献^[18]。实验系统见图 1,实验环境压力为 0.1 MPa,实验环境温度为 973 K。挂滴试样体积为 0.5~2.5 μL 。实验仪器:直径为 0.08 mm 的热电偶丝、微量取样器、温度测控仪、高速显微摄影仪、Photron Mini-UX100 SA-2048 $\times$ 2048@2000 帧/s,8X Navitar 显微镜头。拍摄速度为 2000 帧/s,同轴光功率为 20 W,环形光功率为 100 W 的氙灯及背光为 10 W LED(发光二极管)灯。实验过程中,在存储照片的同时存储视频文件。以 1 L/min 的体积流量向加热炉内注入空气,雷诺数 $Re=25$,用于助燃及吹扫燃烧后加热炉内的残余气体。



1 计算机; 2 高速显微摄影仪; 3 变倍镜头; 4 环形光及调节器; 5 同轴光及调节器; 6 油滴; 7 挂丝; 8 滑轨系统; 9 温度采集系统; 10 背光及调节器; 11 温控器; 12 加热炉; 13 吹扫气体

图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

2 实验现象描述

2.1 油滴着火

实验中航空煤油 RP-3 油滴直径为 1.25 mm。环境温度为 973 K。图 2 是油滴点火前后过程。 $t=0.150\text{ s}$ 是油滴点火的瞬间。 $t=0.155\text{ s}$ 生成

球状火焰。在这个瞬间,视场中没有观察到微气泡。正如前期实验的分析,这个时间段,微气泡仍然处于的成核阶段。微气泡成核的主要位置应该位于石英丝挂钩与油滴的交界面上,而交界面温差成核是交界面上微气泡成核的基本机制。

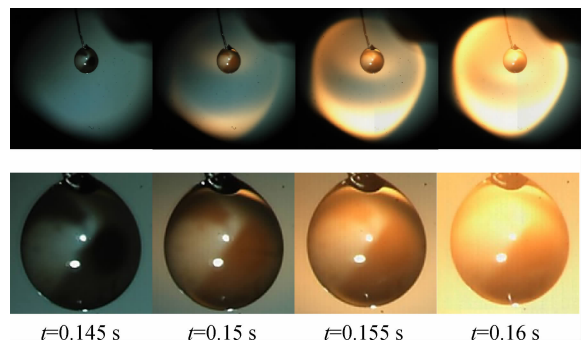


图 2 油滴点火瞬间
Fig. 2 Ignition moment of droplet

2.2 油滴内气泡的第 1 轮暴涨/碎裂

图 3 是第 1 个气泡出现的过程。 $t=0.490\text{ s}$ 时微气泡在交界面上成核、长大并聚合。 $t=0.495\text{ s}$ 时,微气泡突然从交界面上弹出,从挂丝上脱离向下运动,其位置在不断降低。注意到油滴受到向上的浮力和黏滞阻力,因此微气泡必须有向下的初始动能,才能克服浮力和黏滞阻力,向下运动。

$t=0.495\text{ s}$ 时微气泡的挂钩直径为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 。注意到石英丝挂钩直径也是 $80\text{ }\mu\text{m}$ 。这个现象并非巧合。石英丝挂钩直径即为此处微气泡直径的临界值,微气泡直径超过临界值的气泡就很难稳定地吸附在石英丝挂钩上。

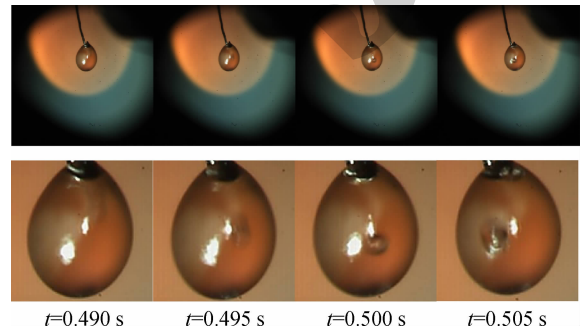


图 3 第 1 个微气泡出现瞬间
Fig. 3 Occurrence of the first micro bubble

图 4 展示了第 1 个气泡的运动径迹。 $t=0.510\text{ s}$ 微气泡达到了最低点,然后,在浮力作用下开始上浮。 $t=0.520\text{ s}$ 时,微气泡便上升到石

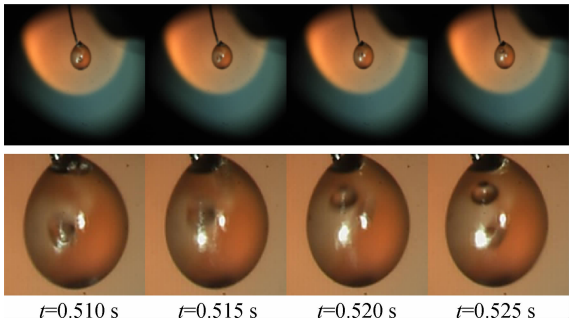


图 4 第 1 个微气泡的上升运动
Fig. 4 Upward movement of the first micro bubble

英丝挂钩附近。微气泡上升的平均速度大约为 7.5 m/s 。

图 5 中的照片展示了第 2 个气泡出现前后以及两个微气泡融合的过程。从 $t=0.525\text{ s}$ 起,能够观察到第 2 个气泡绕过第 1 个气泡,从第 1 个气泡右侧向下弹出。 $t=0.530\text{ s}$ 时第 2 个气泡达到最低点后开始上浮,并且第 2 个气泡从左下方逼近第 1 个气泡。两个气泡互相吸引,第 2 个气泡上升,第 1 个气泡下降。 $t=0.540\text{ s}$ 时第 2 个气泡从后下方与第 1 个气泡黏附在一起,开启了两个气泡相互融合的进程。

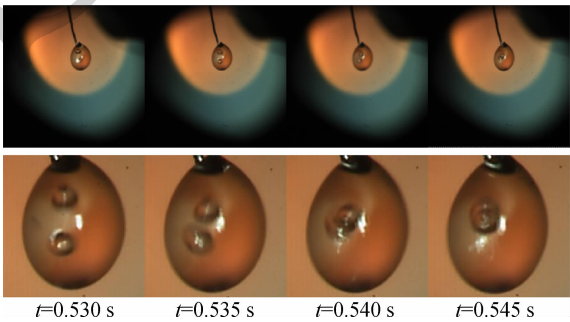


图 5 两个微气泡融合成较大气泡
Fig. 5 Two micro bubbles merge into a larger bubble

图 6 是较大气泡暴涨(第 1 轮)的系列照片。 $t=0.550\text{ s}$ 时两个气泡融合完毕,体积增大,成为一个较大气泡,气泡直径 $d=324\text{ }\mu\text{m}$ 。随后,较大气泡开启暴涨进程。 $t=0.585\text{ s}$ 时气泡直径 $d=427\text{ }\mu\text{m}$ 。从 $t=0.550\text{ s}$ 到 $t=0.585\text{ s}$,气泡直径增长了 31.8% 。 $t=0.625\text{ s}$ 时,气泡直径激增至 $624\text{ }\mu\text{m}$ 。从 $t=0.585\text{ s}$ 到 $t=0.625\text{ s}$,在 0.04 s 内气泡直径增长了 46.1% 。 $t=0.665\text{ s}$,气泡直径增大 $846\text{ }\mu\text{m}$ 。从 $t=0.625\text{ s}$ 到 $t=0.665\text{ s}$,气泡直径增长 35.6% 。从 $t=0.705\text{ s}$ 开始气泡直径逼近油滴直径的水平。由 $t=0.705\text{ s}$ 到 $t=0.780\text{ s}$ 观察到气泡直径仍然在不断增长,到 $t=0.780\text{ s}$ 为止,

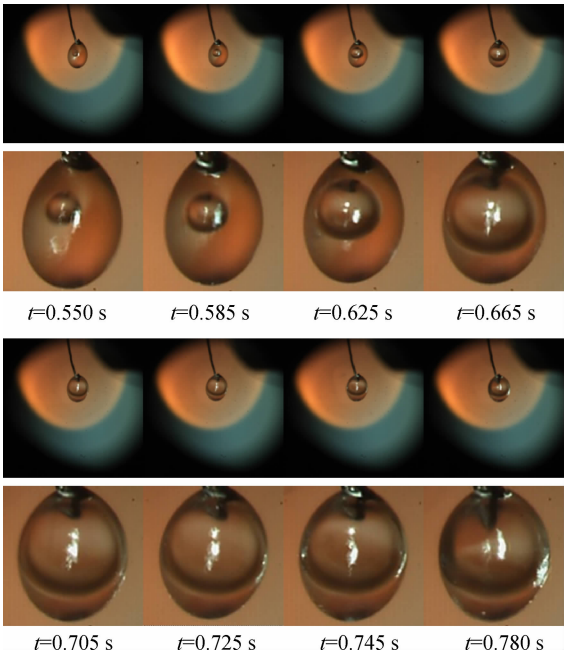


图 6 第 1 轮气泡暴涨

Fig. 6 First round expansion of bubble

气泡直径与油滴的水平直径几乎相等。此时的油滴,已经成为包裹着大气泡的一层薄薄的椭球状油膜。油膜的厚度是不均匀的,底部最厚,厚度约为 $50\mu\text{m}$,顶部最薄,厚度约为 $8\mu\text{m}$ 。

对于气泡暴涨的驱动力,本文推测有如下两个机制:

一个机制是热传导驱动的油滴/气泡界面上的内蒸发效应。一方面,火焰一直包裹着石英丝挂钩,且迅速加热着石英丝,热量沿着石英丝快速传导至挂钩。于是石英丝挂钩就成为油滴内部的高温热源,源源不断地向油滴内部传导热量;另一方面,气泡受浮力作用上升, $t=0.625\text{ s}$ 时其上表面接近挂钩底部时,油/气界面被加热,升温蒸发,引起气泡体积增长。两方面的信息综合起来,观察到了气泡暴涨的正反馈驱动机制:气泡体积越大 $\rightarrow$ 气泡上表面距挂钩下表面越近 $\rightarrow$ 油/气界面蒸发越剧烈 $\rightarrow$ 气泡体积增长越快。

另一个机制是石英丝挂钩底部的热辐射驱动的油/气界面蒸发效应。当气泡体积足够大时,气泡上表面与挂钩底部接触,在浮力推动下,挂钩底部刺入气泡内部。从 $t=0.705\text{ s}$ 到 $t=0.780\text{ s}$,在气泡内部形成热辐射效应。热辐射加剧了油/气界面的蒸发,驱动了气泡体积的进一步增大。这也是一个正反馈机制:气泡体积越大 $\rightarrow$ 挂钩刺入气泡越深 $\rightarrow$ 辐射越强 $\rightarrow$ 蒸发越快 $\rightarrow$ 体积膨胀越迅速。

图 7 是第 1 轮气泡暴涨后碎裂和溢出的过程。 $t=0.785\text{ s}$ 是气泡破碎前的瞬间,火焰稳定。 $t=0.790\text{ s}$ 是气泡破碎的瞬间,气泡轮廓尚在,能够观察到细碎的反射光斑。观察到此时没有气体逸出,理由如下: $t=0.790\text{ s}$ 与 $t=0.785\text{ s}$ 相比,油滴表观体积没有减小,火焰形状保持稳定。 $t=0.795\text{ s}$ 是气泡溢出的瞬间。观察到气体从油滴左侧溢出,从而在火焰面左侧生成奇点状凸起。同时油滴表观体积减小。气体逸出的时间很短,从 $t=0.795\text{ s}$ 开始溢出到 $t=0.805\text{ s}$ 溢出结束,延续时间约为 0.01 s 。碎裂的气泡溢出了一大部分,并激发油滴急剧振荡。从 $t=0.795\text{ s}$ 到 $t=0.810\text{ s}$,小部分微小气泡仍然残留在油滴内部。

对于这种过程分析如下:① $t=0.785\text{ s}$ 时石英丝挂钩底部的热辐射和炙烤效应是气泡破碎的直接驱动机制;② $t=0.795\text{ s}$ 时气泡碎裂产生的冲击力在油滴左侧冲开了小孔,大部分气体由小孔溢出;③表面张力提供了稳定机制,很快封闭了小孔, $t=0.810\text{ s}$ 时终止了气体的溢出。至此气泡的第 1 轮暴涨/碎裂过程结束。整个过程历时约 0.6 s 。

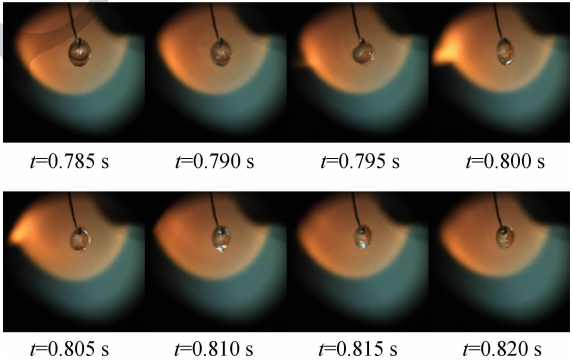


图 7 第 1 轮气泡碎裂和溢出

Fig. 7 First round break and overflow of bubble

2.3 油滴内气泡的第 2 轮暴涨/碎裂

图 8 是微气泡第 2 轮暴涨/破碎的照片。观察到,在 $t=0.840\text{ s}$ 时油滴中有 2 个微小气泡;在 $t=0.850\text{ s}$ 时有 3 个微小气泡。 $t=0.860\text{ s}$ 时有 5 个微小气泡,其中,左上方的 2 个微小气泡处于即将融合的状态;右上方的 2 个微小气泡处于相互吸引、靠近的状态,且有被挂钩吸附捕获的趋势。 $t=0.870\text{ s}$ 时,左上方的 2 个微小气泡融合成了较大气泡;右上方的 2 个微小气泡也融合成了更大的气泡,且被挂钩吸附。 $t=0.880\text{ s}$ 时和 $t=0.890\text{ s}$ 时,左上方和右上方的两个较大气泡已经吸附在一起,

并在 $t=0.890\text{ s}$ 迅速融合成更大气泡,随后,开启暴涨进程。从 $t=0.890\text{ s}$ 至 $t=0.940\text{ s}$,在 0.05 s 内,气泡直径由 $623\text{ }\mu\text{m}$ 暴涨至 $782\text{ }\mu\text{m}$ 。 $t=0.940\text{ s}$ 时挂钩底部已经刺入气泡内部, $t=0.945\text{ s}$ 时,热辐射效应导致大气泡瞬间碎裂。碎裂的瞬间,观察到若干残余的微小气泡。至此气泡的第 2 轮暴涨/碎裂过程结束。整个过程历时约 0.1 s 。注意到与第 1 轮相比,第 2 轮暴涨/碎裂持续的时间大大缩短。主要原因是油滴体积变小,油滴内部温度升高,加快了暴涨/碎裂过程。

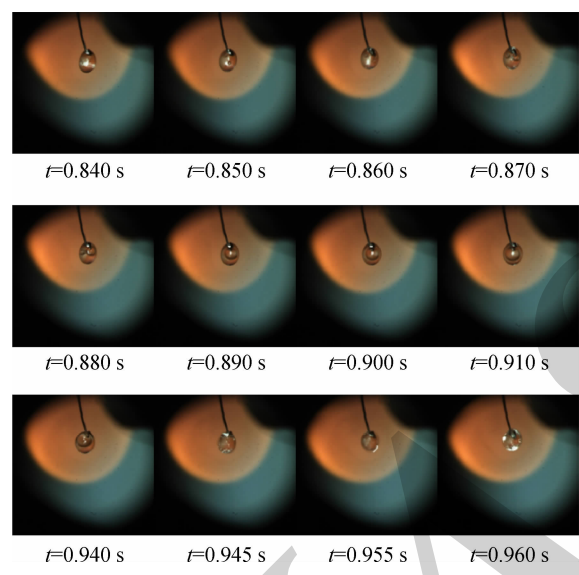


图 8 第 2 轮气泡暴涨/碎裂

Fig. 8 Second round expansion and fracture of bubble

2.4 油滴内气泡的第 3 轮暴涨/碎裂

第 2 轮碎裂残余的微小气泡在 $t=0.995\text{ s}$ 时很快又聚集,在 $t=1.065\text{ s}$ 时融合,在 $t=1.070\text{ s}$ 时生成较大气泡。较大气泡被挂钩底部吸附加热, $t=1.075\text{ s}$ 时启动第 3 轮暴涨。在 $t=1.130\text{ s}$ 时很快碎裂。注意到由于油滴直径已经蒸发减小到约 $864\text{ }\mu\text{m}$,故气泡生长的空间非常有限。从 $t=1.070\text{ s}$ 到 $t=1.080\text{ s}$,在 0.01 s 之内,暴涨过程就结束了。原因分析如下:由于油滴体积的急剧减小,毛细效应愈加突出。在毛细力作用下,微小油滴沿石英丝挂钩向上爬升。油滴越上升,挂钩浸入在油滴中的长度就越大,油滴内部加热升温速度越快,内部气泡暴涨/碎裂越迅速。 $t=1.080\text{ s}$ 到 $t=1.155\text{ s}$ 的照片为上述分析提供了支持。

2.5 第 2 轮和第 3 轮气泡碎裂瞬间的反常现象

前期的实验中,油滴内气泡碎裂的同时,都伴随着气体的快速溢出。而气体的溢出,总会导致

火焰形状的急剧改变。典型的例子如图 7 中 $t=0.795, 0.800, 0.805\text{ s}$ 所示,由于气体逸出速度较高,火焰边缘出现尖锐凸起。因此常规情况下,气泡破碎与火焰形状巨变存在对应关系。

然而第 2 轮和第 3 轮气泡碎裂的瞬间,出现反常现象:气泡虽然碎裂,但火焰形状丝毫没变。例如,第 2 轮气泡碎裂时(图 8), $t=0.945\text{ s}$ 时的火焰形状是稳定的; $t=1.130\text{ s}$ 时第 3 轮气泡破碎(图 9),火焰形状也没有发生变化。这意味着气泡碎裂后气体并没有快速冲出,也没有脱离油滴表面。这是非常特殊的现象。后续的文章将对大气泡碎裂后气体的去向继续进行细致严谨的实验观察,力求对反常现象给出科学的解释。

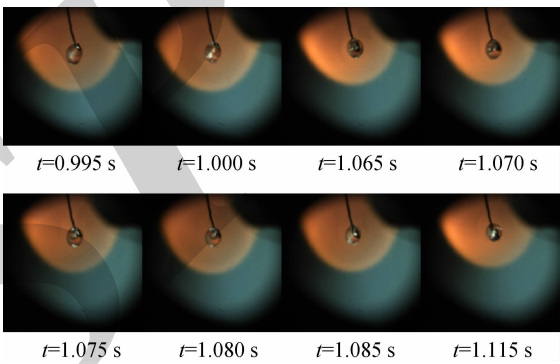


图 9 第 3 轮气泡暴涨/碎裂

Fig. 9 Third round of expansion and fracture of bubble

3 反常燃烧曲线

经典的 D^2-t 曲线是一条近乎单调递减的上凸曲线。其理想化物理模型是实心球状的油滴蒸发燃烧。随着燃烧过程的进行,球状油滴的半径必然会单调递减,球面的体积也必然会单调递减。

然而,随着微气泡的发现,实心球状油滴的物理模型被打破。前期的实验结果已经表明:燃烧过程中出现微气泡油滴的 D^2-t 曲线随着微气泡的合并,气泡的直径发生波动,油滴的体积也会发生波动。因此 D^2-t 曲线不再是单调光滑的曲线,而是伴随着锯齿状的细微波动。

本实验则进一步表明: D^2-t 曲线不仅是锯齿状波动曲线,而且存在着大幅度的瞬时涨落。如图 10 所示,Ⅱ区已经有气泡出现,看到曲线锯齿状波动。Ⅲ区对应曲线的急剧上升,这是气泡的第 1 轮暴涨阶段。气泡的暴涨导致油滴表观直径和表观体积的暴涨。Ⅳ区对应曲线的急剧下跌,这是气泡第 1 轮碎裂的瞬间。气泡的碎裂导致油滴表观直径和表观体积的瞬间跌落。Ⅴ区和Ⅵ区对

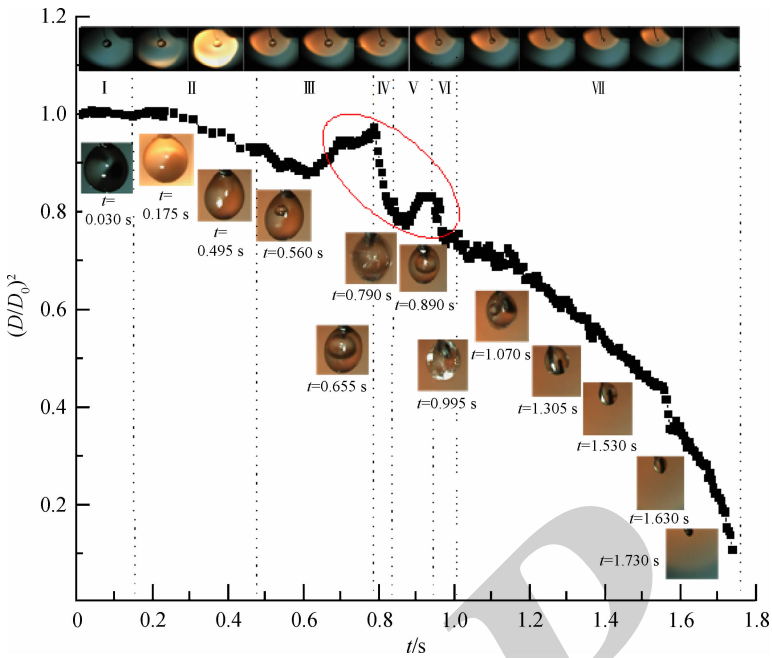


图 10 油滴的 $(D/D_0)^2-t$ 曲线

Fig. 10 $(D/D_0)^2-t$ curve for droplet

应气泡的第 2 轮暴涨/碎裂。Ⅶ区中的 $t=1.63\text{ s}$ ，曲线的跌落对应气泡的第 3 轮碎裂。

图 10 中的 $(D/D_0)^2-t$ 曲线对经典的单油滴燃烧理论提出了挑战，图中 D_0 为油滴的原始直径， D 为油滴随时间变化的直径。本实验在后续的研究中，会应对这一挑战继续研究分析。

4 气泡直径的反常变化

气泡直径与油滴直径之比随时间的变化曲线即 $D_1/D-t$ 曲线，如图 11 所示，其中 D_1 为气泡随

时间变化的直径。注意到第 1 轮暴涨在 $t=0.670\text{ s}$ 达到峰值，此时气泡直径占到油滴平均直径的 83%。这样大的比例并没有即刻使油滴碎裂。此后该比值稳定地保持到 $t=0.785\text{ s}$ ，气泡碎裂。第 2 轮暴涨在 $t=0.980\text{ s}$ 达到峰值，此时气泡直径占到油滴平均直径的 81%。随后气泡碎裂。

图 11 中有两个台阶状跌落，分别对应第 1 轮和第 2 轮气泡碎裂。观察到气泡碎裂后，油滴内残余气泡所占体积比不到 3%，可忽略不计。

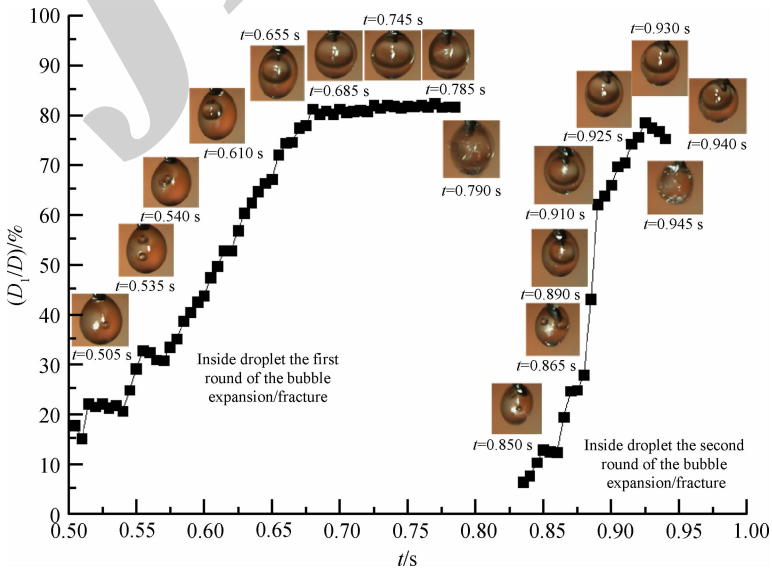


图 11 气泡的 $D_1/D-t$ 曲线

Fig. 11 $D_1/D-t$ curve for bubble

5 结 论

这是本文首次从燃烧的油滴中捕捉到气泡周期性的暴涨/碎裂现象。这表明早期发现的气泡体积单调递增的模式并不是气泡演化的唯一模式。相反燃烧油滴内气泡的演化模式具有多样性。通过实验推测,油滴内石英丝挂钩的高温加热是气泡暴涨的推动力,而挂钩的高温辐射是气泡碎裂的推动力。当然,气泡周期性暴涨/碎裂现象的普遍性有待于进一步确认,而气泡碎裂后气体的去向尚有待于进一步追踪分析。本文将在后续的研究中继续报道实验的研究结果。

参考文献:

[1] 王金照. 汽泡成核的分子动力学研究及纳米颗粒对成核的影响固体表面浸润和毛细粘附的力学研究[D]. 北京:清华大学,2005.
WANG Jinzhao. Molecular dynamics simulation of bubble nucleation and the effect of nanoparticle on nucleation [D]. Beijing:Tsinghua University,2005. (in Chinese)

[2] 毕景良. 微尺度核态池沸腾传热传质特性及机理研究[D]. 北京:清华大学,2014.
BI Jingliang. Micro-scale nucleate pool boiling heat and mass transfer characteristics and mechanisms[D]. Beijing: Tsinghua University,2014. (in Chinese)

[3] 王珍. 微细丝上二元溶液过冷沸腾模态及汽泡动力学[D]. 北京:清华大学,2010.
WANG Zhen. Boiling mode and bubble dynamics of sub-cooled binary mixtures on micro wires[D]. Beijing: Tsinghua University,2010. (in Chinese)

[4] 吴迪. 微细结构内气液相变机理及传递现象[D]. 北京:清华大学,2010.
WU Di. Liquid-vapor phase change mechanisms and transport phenomena in microscale structures[D]. Beijing: Tsinghua University,2010. (in Chinese)

[5] WIESCHE S A D, REMBE C, HOFER E P. Boiling of superheated liquids near the spinodal: I general theory[J]. Heat and Mass Transfer,1999,35(1):25-31.

[6] 郭小波,刘朝,宋粉红. 液相中气相成核率的分子动力学模拟[J]. 工程热物理学报,2010,31(11):1806-1808.
WU Xiaobo, LIU Chao, SONG Fenhong. Molecular dynamics simulation of bubble nucleation in superheated liquid[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31 (11):1806-1808. (in Chinese)

[7] KWAK H Y, OH S D, PARK C H. Bubble dynamics on the evolving bubble formed from the droplet at the super-

heat limit[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1995,38(9):1709-1718.

[8] LAW C K, WILLIAMS F A. Kinetics and convection in the combustion of alkane droplets[J]. Combustion and Flame,1972,19(3):393-406.

[9] LAW C K. Internal boiling and superheating in vaporizing multicomponent droplets[J]. American Institute of Chemical Engineers,1978,24(4):626-632.

[10] WANG C H, LIU X Q, LAW C K. Combustion and micro-explosion of freely falling multicomponent droplet[J]. Combustion and Flame,1984,56(2):175-197.

[11] KHAN Q, BAEK S W, LEE S Y. Effect of droplet initial diameter on droplet vaporization regimes for kerosene fuel droplet[R]. AIAA-2007-1181,2007.

[12] XU Jian, QIAO Li, GAO Jian. Droplet breakup of micro- and nano-dispersed carbon-in-water colloidal suspensions under intense radiation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2014,78(7):267-276.

[13] TURNS S R. An introduction to combustion[M]. New York: McGraw-Hill Publisher,2000.

[14] BASU S, TIJERINO E, KUMAR R. Insight into morphology changes of nanoparticle laden droplets in acoustic field[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102 (14): 141602. 1-141602. 5.

[15] MIGLANI A, BASU S, KUMAR R. Suppression of instabilities in burning droplets using preferential acoustic perturbations[J]. Combustion and Flame, 2014, 161 (12): 3181-3190.

[16] JEONG I, LEE K H, KIM J. Character-istics of auto-ignition and micro-explosion behavior of a single droplet of water-in-fuel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2008,22(1):148-156.

[17] TIJERINO E, BASU S, KUMAR R. Nanoparticle agglomeration in an evaporating levitated droplet for different acoustic amplitudes[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(3):034307. 1-034307. 7.

[18] 陆奇志, 龚景松, 朴英, 等. 挂滴燃烧中的微汽泡行为和油滴跳动[J]. 航空动力学报, 2015, 30(6):1344-1349.
LU Qizhi, GONG Jingsong, PIAO Ying, et al. Micro bubble behaves inside pendant droplet and droplet oscillations in combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30 (6):1344-1349. (in Chinese)

[19] 陆奇志, 龚景松, 朴英, 等. 挂滴燃烧过程中的微汽泡的成核[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3):616-622.
LU Qizhi, GONG Jingsong, PIAO Ying, et al. Micro bubble nucleation inside suspended droplet in combustio[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31 (3): 616-622. (in Chinese)

(编辑:陈 越)