

挂滴燃烧过程中微气泡的成核

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观测了航空煤油 RP-3 的微尺度挂滴燃烧过程, 分析了油滴内微气泡成核的基本机理和表现形式. 在凸曲率诱发的低压成核机理下, 确证了 3 种具体成核形式: ①挂丝/油滴界面成核. 挂丝温度高于油滴温度, 在交界面上由于温差诱导了蒸发效应形成微气泡成核. ②颗粒/油滴界面成核. 微油滴内的微米量级的丝状或球状杂质颗粒及胶质颗粒形成的凸曲率侧诱导低压, 成为气泡的萌生的成核点. ③油滴表面凹坑成核. 重组分形成筏结构与油滴表面侧的线张力和表面张力同时作用, 引起油滴表面内凹, 凹坑的凸曲率侧气泡成核点. 这些进展为深入研究微尺度燃烧奠定了基础.

关键词: 挂滴; 燃烧; 微气泡; 成核机理; 成核形式

中图分类号: V21; TQ038.3

文献标志码: A

Micro bubble nucleation inside suspended droplet in combustion

LU Qi-zhi, GONG Jing-song, PIAO Ying,
YIN Ya-jun, LI Hui, FAN Hong-yu

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

Abstract: High-speed microscopic camera technology was utilized to observe and re-search the micro-scale suspend droplet combustion process of aviation kerosene RP-3. The basic mechanism of micro bubble nucleation inside droplet and manifestation were analyzed. Under convex curvature induced nucleation mechanism at low pressure, three forms of nucleation which were confirms were including: (1) Nucleation in the interface of the suspended silk/droplet. The temperature of suspended silk was higher than the droplet temperature on interface, and temperature difference induced the evaporation effect to form the micro bubbles nucleation. (2) Nucleation in the interface of the particles/droplet. Several micrometer range filiform or globular impurity particles or colloid particles inside droplet that form convex curvature side to induce meiobar, in which burgeon bubbles nucleation points. (3) Nucleation on pits of droplet surface. Heavy components form the raft structure and the line tension and surface tension of the droplet surface side simultaneous effect cause indent of the droplet surface, which sprout bubbles nucleation points in the convex curvature side of the pit. These developments laid the foundation for further research on micro-scale combustion.

Key words: suspended droplet; combustion; micro bubble;
nucleation mechanism; nucleation form

收稿日期: 2015-09-14

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

作者简介: 陆奇志(1970—), 男, 安徽蒙城人, 博士生, 主要从事燃烧及燃烧设备的研究. E-mail: lqzqlqz@126.com

通讯作者: 朴英(1959—), 女, 吉林长春人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空宇航推进技术与理论方面的研究.

E-mail: piaoying@tsinghua.edu.cn

目前,多数液体燃料燃烧都是将液体雾化成油滴喷入燃烧室内.油滴蒸发燃烧直接影响燃料化学能的释放、燃烧效率和燃烧稳定性.为获得较高的热效率及对燃烧进行有效控制,油滴蒸发燃烧特性的研究一直为众多学者所关注. Wang等^[1]研究了多组分油滴燃烧的几个阶段,指出油滴蒸发主要由扩散控制.刘卫东等^[2]研究了振荡环境下推进剂油滴亚临界蒸发响应特性. Stengle等^[3]研究了单组分和双组分油滴在高压环境下的蒸发特性. 龚景松等^[4]研究了煤液化油挂滴实验的蒸发与着火特性. 李辉等^[5]通过实验分析了燃油压力对雾化颗粒粒径及粒径分布的影响. Hsieh等^[6]分析了多组分油滴在高压环境下的压力对蒸发过程的影响. Turns^[7]对油滴蒸发常数和燃烧常数进行了理论分析. ZHOU Ji等^[8]基于热力学性质和输运系数建立了单油滴的蒸发模型. Khan等^[9]研究了煤油燃料油滴初始直径对油滴蒸发的影响. Law^[10-11]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. 并分析了油滴的碰撞聚并等现象. Kwak等^[12]分析了在过热极限条件下油滴内气泡形成的模型. Jeong等^[13]研究了水燃料乳浊液单油滴自点火和微爆特性.

文献[14]在微油滴燃烧实验中,在微油滴内部观察到了微气泡. 尽管微油滴内存在微气泡^[15],但油滴并没有爆裂,而是稳定地燃烧到最后. 由于微气泡聚合导致内部压力的急剧涨落,由此产生的冲击力引发了油滴振荡. 因微气泡尺度太小(直径约为 $4.5\ \mu\text{m}$),故很难观察到气泡的成核和萌生过程. 因此,文献[14]只借助推测来阐明微气泡成核萌生的机理. 本文通过对实验台的改造,配置了良好的光场,借助高速显微摄像技术,捕捉到了更丰富的现象,为文献[14]的推测提供了较为确凿的证据.

1 实验燃料及装置

本文实验中使用的燃料组分见文献[14]. 实验系统见图1. 挂滴测温示意图见图2. 实验环境条件为 $0.1\ \text{MPa}$, $950\ \text{K}$. 挂滴试样体积为 $0.5\sim 2.5\ \mu\text{L}$. 实验仪器如下:直径为 $0.08\ \text{mm}$ 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-2 $2\ 048\times 2\ 048@2\ 000$ 帧/s 8X Navitar 显微镜头. 拍摄速度为 $2\ 000$ 帧/s. 同轴光功率为 $10\ \text{W}$, 环形光及背光灯光功

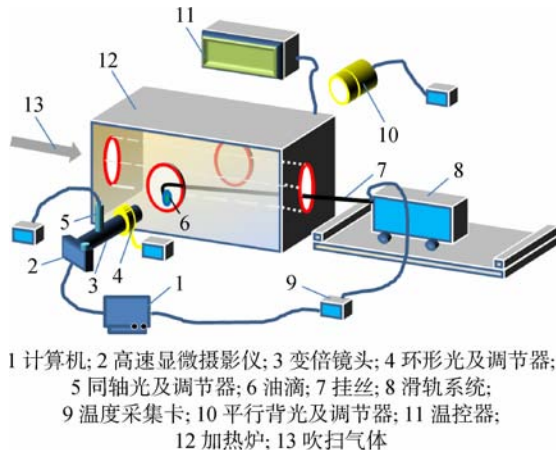


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

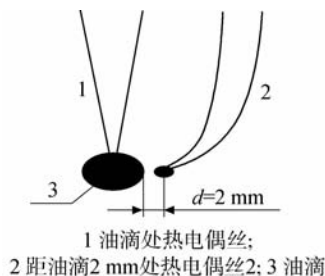


图2 挂滴测温示意图

Fig. 2 Temperature measurement schematic of the suspended droplet

率均为 $100\ \text{W}$ 氙灯. 实验过程中,存储照片的同时存储视频文件. 以 $1\ \text{L/min}$ 的流量向加热炉内注入空气,用于助燃及吹扫燃烧后加热炉内残余气体. 雷诺数 $Re=25$.

2 实验结果及分析

2.1 实验现象描述

本文观察了直径 $D_0=1.35\ \text{mm}$ 的 RP-3 油样挂滴燃烧的过程,如图3所示. 观测结果表明:与文献[14-15]类似,RP-3 油滴内部发生了微气泡的成核、长大和聚合现象.

为了研究微气泡演化过程中的特征温度,本文用热电偶丝测量了直径 $D_0=1.35\ \text{mm}$ 的 RP-3 油样的温度变化曲线. 油滴悬挂在直径为 $0.08\ \text{mm}$ 的热电偶丝1上,热电偶丝1可测出油滴内部的温度曲线. 在距油滴 $2\ \text{mm}$ 处,设置了热电偶丝2,热电偶丝2可测出油滴外部的温度曲线. 测量结果如图4所示.

图4中,黑色曲线 ABCDG 为油滴内部的温度(T_1)变化曲线,红色曲线 AEF G 为油滴外部2

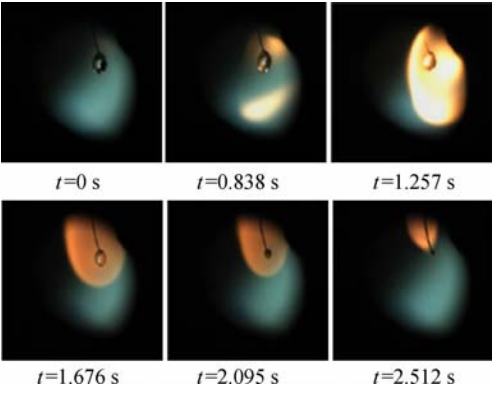


图 3 油滴蒸发燃烧过程($D_0=1.35\text{ mm}$)

Fig. 3 Evaporation and combustion process of droplet ($D_0=1.35\text{ mm}$)

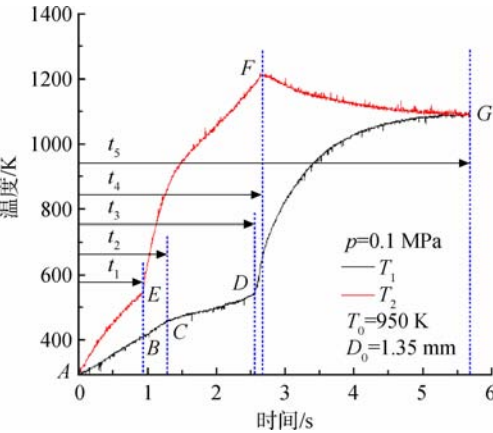


图 4 油滴内部和外部的温度曲线

Fig. 4 Temperature curve of internal and external of droplet

mm 处的温度(T_2)变化曲线. 环境温度 $T_0=950\text{ K}$, E 点对应 2 mm 处明焰出现的时刻.

油滴内部温度变化曲线 $ABCDG$ 上, AB 段对应油滴受热膨胀阶段, t_{AB} 时间段内温度为 $293\sim423\text{ K}$. BC 段对应胶体颗粒开始析出的阶段. 同时, 微气泡在颗粒处成核. t_{BC} 时间段内温度为 $423\sim453\text{ K}$. 从 B 点开始, 油滴受到火焰辐射. BC 段对应油滴表面形貌发生较大变化的阶段. t_{CD} 时间段内温度为 $453\sim573\text{ K}$. 在这个阶段, 油滴表面出现可见凹坑, 且凹坑底部凸曲率侧出现微气泡(气泡直径约为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$). 在 D 点, 油滴蒸发结束. DG 段为油滴蒸发结束后, 热电偶快速升温的阶段, t_{DG} 时间段内温度为 $573\sim1100\text{ K}$.

油滴温度变化的不同阶段对应着气泡演化的不同阶段. 详细分析如下.

2.2 微气泡成核的基本机理

油滴中存在高度弯曲的界面或液面, 本文称

之为高曲率界面或液面^[16]. 在表面张力或界面张力作用下, 高曲率界面或液面的凸曲率侧会形成低压区^[17]. 相对于高压区, 低压区的沸腾蒸发温度要低很多, 由此诱发了微气泡成核^[18]. 文献^[14]称之为凸曲率诱发的低压成核机理.

经过反复研判实验视频, 本文还发现了一种新的成核机理. 这种成核发生在液/固界面上, 亦即挂丝/油滴界面上. 液/固界面上存在较大的温度差, 因此本文称之为界面温差成核机理.

在实验过程中, 油滴内存在两种高度弯曲的界面, 一种是胶体(或杂质)颗粒/油滴界面和挂丝/油滴界面; 另一种是油滴表面凹坑. 与此相对应, 就有 3 种成核形式: 一是挂丝/油滴界面成核; 二是颗粒/油滴界面成核; 三是表面凹坑成核.

下面结合实验观测和两种成核机理, 分别对 3 种成核形式分述如下.

2.3 挂丝/油滴界面成核

挂丝/油滴界面成核形式存在于整个升温 and 燃烧过程. 在油滴受热初期(t_{AB} : 温度为 $293\sim423\text{ K}$), 挂丝/油滴界面成核形式便开始发挥作用. 如图 5 所示, 开始加热时, 挂丝/油滴界面上尚看不到微气泡. 受热($t=0.385\text{ s}$)后, 大量微气泡成核于界面上(气泡直径约为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$, 见图 6), 并迅速聚集成较大气泡(气泡直径约为 $8.5\text{ }\mu\text{m}$, 见图 7).

挂丝/油滴界面上的微气泡, 对应着两种成核机理: 一种是凸曲率诱发的低压成核机理; 另一种是界面温差成核机理. 换言之, 挂丝/油滴界面上的微气泡是两种成核机理共同作用的结果.

关于界面温差成核机理, 更详细的分析如下:

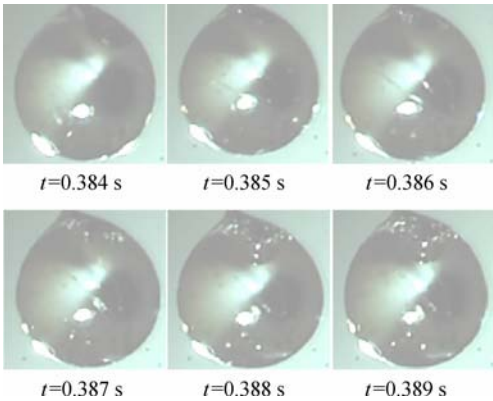


图 5 油滴受热初期微气泡在挂丝/油滴界面成核并聚集

Fig. 5 Early droplet heated, micro bubbles nucleation and gathered in the suspended silk/droplet interface

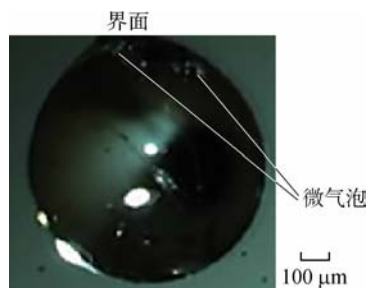
图6 挂丝/油滴界面上聚集的微气泡($t=0.386\text{ s}$)

Fig. 6 Micro bubbles gathered in the suspended silk/droplet interface ($t=0.386\text{ s}$)

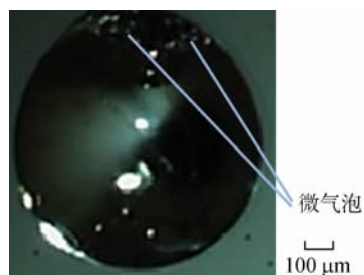
图7 挂丝/油滴界面上聚集的气泡($t=0.389\text{ s}$)

Fig. 7 Large bubbles gathered in the suspended silk/droplet interface ($t=0.389\text{ s}$)

加热初期,挂丝和油滴温度均上升.但与油滴相比,挂丝的导热率要大得多,温升会快得多^[19],在受热时,其温度也比油滴温度高.低温的油滴与高温的挂丝接触瞬间发生气化,因此在图5中看到密集的微气泡.大量的微气泡很快在挂丝上聚合,生成了大气泡(气泡直径大于 $8\text{ }\mu\text{m}$).

通过实验观测,挂丝对气泡有很强的吸附效应.故不论是微气泡还是大气泡,一旦在界面上生成,都很难脱离挂丝/油滴界面吸引力的控制.

经观测发现:①与油滴内部的微气泡相比,挂丝/油滴界面上的微气泡在数量上占主导;②大气泡总是被吸附于挂丝/油滴界面上;③油滴内部的微气泡不断被较的大气泡吞噬.

在油滴受热初期,油滴内部已经有零散微气泡.这些微气泡应是颗粒/油滴界面成核的产物.

2.4 颗粒/油滴界面成核

油滴内的颗粒有两类:一类是杂质颗粒;另一类是胶体颗粒.杂质颗粒/油滴界面成核可在任意温度范围内发生,但胶体颗粒/油滴界面成核只在特定温度范围内出现.见图8.

颗粒的形状多种多样.图8和图9中,小黑点是球形颗粒,而黑丝则是棒状颗粒.球状颗粒的直径大约为 $5.5\text{ }\mu\text{m}$.棒状颗粒的直径大约为 8.5

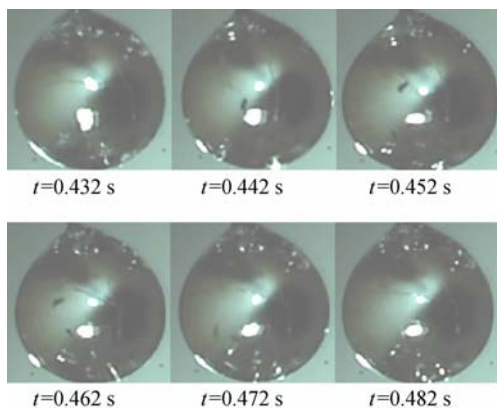


图8 油滴内的颗粒和气泡

Fig. 8 Particles and bubbles inside droplet

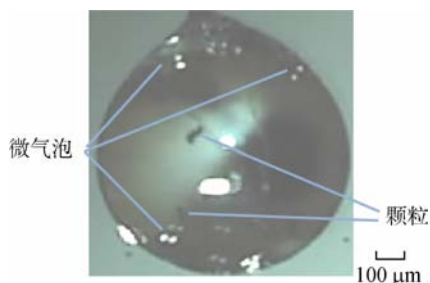
图9 油滴内颗粒和气泡($t=0.452\text{ s}$)

Fig. 9 Particles and bubbles inside droplet ($t=0.452\text{ s}$)

μm ,长度大约为 $80.5\text{ }\mu\text{m}$.故不论是球状颗粒还是棒状颗粒,尺度都在微米量级,表面都具有高曲率.球状颗粒和棒状颗粒都是气泡成核中心^[20].

RP-3中含有烯烃及氧等杂原子化合物.当温度高于 $373\sim 393\text{ K}$ 时,由于燃料受热,其中的烯烃及非烃等不安定成分首先氧化聚合,生成胶质或固体沉淀粒子.之后在一定温度范围内,固相粒子的聚集作用大于分散作用,小粒子聚集成大粒子.生成胶质大粒子(直径为 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$)的温度范围约为 $423\sim 453\text{ K}$.但当温度超过 453 K 后,由于粒子的分散作用,大粒子分散成小粒子^[21].因此油滴温度在 $423\sim 453\text{ K}$ 时,胶体化合物颗粒方能稳定存在并成为气化核心点.

2.5 表面凹坑成核

通过实验观测,在油滴蒸发着火阶段,微气泡便源源不断地从油滴表面萌生^[22],且萌生部位的液面呈凹陷状.由此推测:凹陷状液面凸率侧的低压区,诱发了微气泡成核^[23].然而由于实验技术上的困难,在此之前并未捕捉到油滴表面凹坑存在的确凿证据.现在,借助具有良好光场匹配的实验台,捕捉到了确凿证据,为研究表面凹坑的生成机理奠定了基础.

如图 10 所示, $t=1.055\text{ s}$ 时, 油滴右下方表面上出现了一个很小的凹坑, 直径大约为 0.155 mm . 注意到小凹坑形成的瞬间, 附近有一个棒状杂质颗粒. 由于受到凹坑凸曲率侧低压区的吸引, 棒状颗粒快速向凹坑底部运动. $t=1.056\text{ s}$ 时, 凹坑迅速扩大, 直径瞬间达到 0.255 mm . 而棒状颗粒已经被吸附到凹坑底部. 此时, 在油滴中部右侧, 另一个凹坑正在形成, 直径大约为 $42\text{ }\mu\text{m}$.

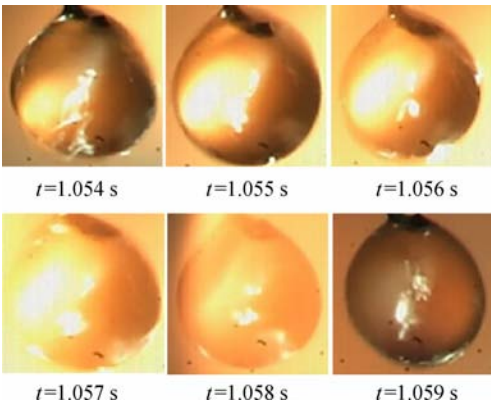


图 10 油滴表面上凹坑的生成过程($t=1.055\text{ s}$)
Fig. 10 Pits generative process on the surface of droplet ($t=1.055\text{ s}$)

为了更清晰地显示出凹坑的精细结构, 将图 10 中 $t=1.056\text{ s}$ 时的照片放大. 从图 11 看出, 只有当凹坑最大截面与高速显微摄影仪镜头的轴线正交时, 拍摄的凹坑照片方可达到最佳效果. 如果凹坑出现在正对着高速显微摄影仪镜头的液面上, 将很难捕捉到凹坑的精细结构. 同样, 如果凹坑出现在正对着平行背光照的液面上, 则不可能捕捉到凹坑的图像.

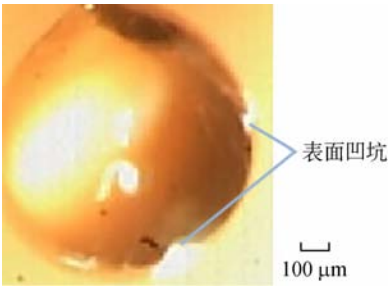


图 11 油滴表面上的凹坑($t=1.056\text{ s}$)
Fig. 11 Pits on the surface of droplet ($t=1.056\text{ s}$)

尽管油滴表面凹坑的物理实在性不容置疑, 但凹坑出现在油滴具有近似球形或鸭梨形外凸的液面上, 要在外凸的液面上形成高曲率的凹陷, 需要很高的能量. 本文推测: 油滴燃烧过程中, 表面

上形成了独特的轻/重组分两相结构^[1,10], 并由此提出筏结构诱导油滴表面凹陷机理见图 12.

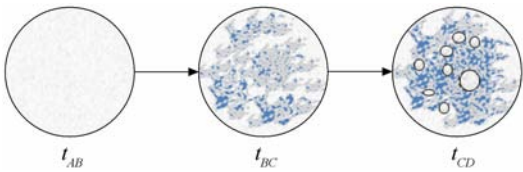


图 12 重组分形成的筏结构示意图
Fig. 12 Schematic of raft structure formed by heavy components

图 12 中凹坑出现(t_{BC})时, 油滴温度大约为 $423\sim 453\text{ K}$. 此时, 油滴内的重组分开始析出. 由于火焰辐射, 油滴内部温度低于表面温度, 故内部密度必然高于表面密度^[24]. 在温度梯度和密度梯度驱动下, 析出的重组分必然漂向油滴表面, 并被表面捕获. 于是油滴表面上就存在两相分子: 一是轻组分相; 二是重组分相. 重组分相并非均匀地分布在弯曲的油滴表面上. 由于在热辐射/蒸发/扩散等复杂的相互作用和表面高度弯曲的空间形式下, 重组分相与轻组分相发生相分离, 重组分在表面抱团聚集, 形成筏结构, 漂浮在油滴表面上.

图 12 中, t_{AB} 段是初始时轻/重组分均匀分布在液滴内部; t_{BC} 段是液滴表面区域轻组分首先挥发, 表面区温度还未达到重组分沸点, 重组分存留在液滴表面; t_{CD} 段是表面区域轻组分挥发殆尽, 组分聚集在液滴表面形成筏结构.

由重组分聚集而成的筏结构并非“密不透油”的“连续膜”, 而是存在着大大小小的“网眼状窟窿”, 见图 12. 而油滴液面上的轻组分就通过“网眼状窟窿”裸露了出来. “网眼状窟窿”部位轻组分蒸发燃烧的速度更快. 此时如下效应的综合作用会影响“网眼状窟窿”部位裸露液面的形状: 一是蒸发燃烧效应, 当内部蒸发液体补充不及时, 就会产生凹陷; 二是快速喷射火焰产生的反冲效应也会导致凹陷; 三是表面张力效应, “筏/轻组分/蒸气”三相界面处的表面张力效应, 会引起轻组分相内凹; 四是筏/油交界线上的线张力效应, 会导致裸露液面产生了向内的凹陷^[25].

当然, 不论是筏结构的生成, 还是“筏结构诱导油滴表面凹陷”机理的提出, 都是建立在推测的基础之上, 其物理实在性还有待于进一步的实验验证.

但上述推测并非纯粹的想法, 而是受到了生物膜结构的启示.

生物膜的常见形式之一是细胞膜。细胞膜上存在多种有机长链分子,例如,磷脂分子、蛋白质分子、糖类等。蛋白质分子嵌入在磷脂分子的“海洋”中。在复杂相互作用和弯曲空间形式的共同调制下,细胞膜上的多相分子发生相分离,蛋白质分子聚集成“功能筏”,而磷脂分子的“海洋”在局部形成“功能凹陷”。

生物膜的常见形式之二是磷脂双分子层膜泡。如果膜泡上存在两相或多相磷脂分子,则往往发生相分离现象。随着相分离的进行,膜泡的形状发生改变:两相交界面附近向内凹,软/硬的相形成凹/凸状的畴区。从 Immenschuh 等^[26]关于膜泡相分离实验的文章中,可以看到实验照片和多样化的表面凹陷。

特别要强调的是,两相交界线上,线张力的驱动效应对上述凹陷的产生起到了关键性作用。

上述现象,在细胞生物学和生物物理学中已经是常识。因此,本文可以说,在软物质弯曲表面上,多相分子因相分离而生成“筏”和“凹陷”的现象具有普遍性。油滴表面可以视为软物质表面。故本文有理由认为:油滴表面形成筏结构和凹坑绝非偶然。

3 结 论

实验考虑了挂丝对油滴热传导的影响。通过对 RP-3 油滴蒸发燃烧过程的微观细致的观察,分析了油滴温升过程中微气泡核化萌生的机理,主要结论如下:

1) 挂丝/油滴界面微气泡成核的两种机理:一种是凸曲率诱发的低压微气泡成核机理;另一种是界面温差成核机理。挂丝/油滴界面上的微气泡是两种成核机理共同作用的结果。

2) 颗粒/油滴界面微气泡成核的两种类型。

油滴内的颗粒有两类:一类是杂质颗粒在任意温度范围内的微气泡成核;另一类是胶体颗粒只在特定温度范围内的微气泡成核。

3) 油滴表面凹坑成核机理:即凸曲率诱发的低压成核机理,在表面张力作用下,油滴中高曲率液面的凸曲率侧形成低压区。低压区的沸腾蒸发温度要低很多,由此诱发了微气泡成核。

4) 筏结构诱导油滴表面凹陷形成机理:一是蒸发燃烧效应,蒸发液体补充不及时产生凹陷;二是快速喷射火焰产生的反冲效应导致凹陷;三是表面张力效应,筏/轻组分/蒸气三相界面处的表面张力,引起轻组分相内凹;四是筏/油交界线上

的线张力效应,导致裸露液面产生向内的凹陷。

油滴的蒸发燃烧过程中,油滴内微气泡的成核形式具有多样性。油滴燃烧时内部都产生微气泡,由于表面张力的约束保证了油滴燃烧的稳定。

参考文献:

- [1] Wang C H, Liu X Q, Law C K. Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplet[J]. Combustion and Flame, 1984, 56(2): 175-197.
- [2] 刘卫东,周进,王振国. 振荡环境下推进剂油滴亚临界蒸发响应特性[J]. 航空动力学报, 2001, 16(1): 52-54. LIU Weidong, ZHOU Jin, WANG Zhenguo. Response of propellant droplet subcritical evaporation to environmental pressure oscillation[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(1): 52-54. (in Chinese)
- [3] Stengele J, Prommersberger K, Willmann M, et al. Experimental and theoretical study of one- and two-component droplet vaporization in a high pressure environment[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(2): 2683-2694.
- [4] 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. GONG Jingsong, LU Qizhi, HE Yukun, et al. Evaporation and ignition characteristics of coal liquefied oil[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(1): 10-13. (in Chinese)
- [5] 李辉,龚景松,朴英,等. 低功率状态下煤液化油的雾化特性[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2014, 54(10): 1310-1315. LI Hui, GONG Jingsong, PIAO Ying, et al. Atomization characteristics of coal liquefied oil at low power levels[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2014, 54(10): 1310-1315. (in Chinese)
- [6] Hsieh K C, Shuen J S, Yang V. Droplet vaporization in high-pressure environments: I near critical conditions[J]. Combustion Science and Technology, 1991, 76(1/2/3): 111-132.
- [7] Turns S R. An introduction to combustion [M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 362-421.
- [8] ZHOU Ji, MO Jiada, Chow A S, et al. A universal model of droplet vaporization applicable to supercritical conditions [R]. AIAA-2000-3850, 2000.
- [9] Khan Q S, Baek S W, Lee S Y. Effect of droplet initial diameter on droplet vaporization regimes for kerosene fuel droplet [R]. AIAA-2007-1181, 2007.
- [10] Law C K. Internal boiling and superheating in vaporizing multicomponent droplets[J]. AIChE Journal, 1978, 24(4): 626-632.
- [11] Law C K. Fuel options for next-generation chemical propulsion[J]. AIAA Journal, 2012, 50(1): 19-36.
- [12] Kwak H Y, Oh S D, Park C H. Bubble dynamics on the e-

volving bubble formed from the droplet at the superheat limit[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(9): 1709-1718.

[13] Jeong I, Lee K H, Kim J. Characteristics 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.

[14] 陆奇志, 龚景松, 朴英, 等. 挂滴燃烧中的微气泡行为和油滴跳动[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)

[15] Miglani A, Basu S, Kmar R, et al. Suppression of instabilities in burning droplets using preferential acoustic perturbations[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(12): 3181-3190.

[16] 殷雅俊, 吴继业. 微纳米空间弯曲诱导的反常驱动力-从泡利的魔鬼谈起[J]. 力学与实践, 2014, 36(2): 137-146.
YIN Yajun, WU Jiye. Abnormal driving forces induced by micro/nano space curvatures-about pauli's devils[J]. Mechanics in Engineering, 2014, 36(2): 137-146. (in Chinese)

[17] Herring C. Surface tension as a motivation for sintering [M]. New York: McGraw-Hill, 1951.

[18] 田勇. 微尺度沸腾核化与汽泡动力特性[D]. 北京: 清华大学, 2005.

TIAN Yong. Dynamical behavior of microscale boiling nucleation and bubble growth[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)

[19] 魏可臻, 张奇. 热电偶热传导测温中的动态响应时间和误差估计[J]. 测试技术学报, 2007, 21(6): 523-526.
WEI Kezhen, ZHANG Qi. Dynamic response time and deviation estimate of thermocouple during heat-exchange temperature measurement[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21(6): 523-526. (in Chinese)

[20] Brennen C E. Cavitation and bubble dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[21] 刘济赢. 中国喷气燃料[M]. 北京: 中国石化出版社, 1991.

[22] Law C K, Law H K. A d^2 -law for multicomponent droplet vaporization and combustion[J]. AIAA Journal, 1982, 20(4): 522-527.

[23] 徐耀祖. 相变原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[24] 林瑞泰. 沸腾换热[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

[25] LÜ Cunjing, YIN Yajun, ZHENG Quanshui. Nonlinear effects of line tension in adhesion of small droplets[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(10): 1251-1262.

[26] Immenschuh S, Baumgart-Vogt E, Tan M, et al. Differential cellular and subcellular localization of heme-binding protein 23/peroxiredoxin I and heme oxygenase;1 in rat liver [J]. The Journal of Histochemistry and Cytochemistry, 2003, 51(12): 1621-1631.

(编辑: 陈 越)