

# 多组分重油单液滴着火与燃烧特性

陈健, 张扬, 张海

(清华大学 能源与动力工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 该文研究了3种多组分重油单液滴在高温环境下的着火、微爆和燃尽特性。通过管式炉实验,记录了单液滴重油在着火和燃烧过程中的特征时间和特征直径的变化规律。实验发现重油的着火延迟时间和燃尽时间与组分、温度、初始直径密切相关。由于重油液滴的组分复杂且沸点不同,因此在燃烧过程中发生的膨胀对其燃烧特性有重要影响。热重质谱(thermogravimetric-mass spectrometry, TG-MS)分析的结果可以较好地解释膨胀的频率和幅度。实验结果表明:3种样品的膨胀次数与TG-MS结果中热解峰的数量一致,膨胀幅度与热解峰的高度呈正相关;多组分重油燃烧过程发生了明显的微爆现象。该文定义了液滴燃烧过程中的微爆强度,并发现其与重质组分占比、液滴初始直径和温度呈正相关关系。

**关键词:** 燃料与燃烧;重油;液滴燃烧;微爆

**中图分类号:** TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0054(2023)04-603-00

**DOI:** 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.25.037

重油是石油精炼过程的末端重质产物之一,能量密度较高、价格低廉,经常被用作大型机械设备的动力燃料<sup>[1]</sup>。然而,重油作为燃料,燃烧特性较差,主要体现为着火性能差、燃尽时间长。随着对重油的需求不断增多和石油精炼技术的不断发展,不同供应商提供的重油成分也日益不同,导致不同重油的燃烧性质存在较大差异,给重油的使用造成了一定的困难。因此,研究重油的燃烧特性,特别是与重油安全使用息息相关的着火和燃尽特性,对掌握重油的科学燃用方法,开发和优化重油燃烧器,具有重要的指导意义。

在实际的燃油锅炉中,重油经过雾化后被喷入炉膛中进行燃烧。燃油锅炉中实际发生的燃烧过程可大致分为5个阶段<sup>[2]</sup>:燃料雾化成燃油液滴;燃油液滴被喷入高温氧化性环境的炉膛内;液滴在高温环境中蒸发;液滴不断升温,达到着火点并着火;液滴持续燃烧至燃尽<sup>[3]</sup>。实际上,重油在炉膛内的燃烧过程是由大量液滴的燃烧组成。因此,单组分液滴作为燃烧的最基本单位,通过研究单个液滴的着火与燃尽特性,可以更好地揭示重油燃烧的基础性质。

对单组分液滴的研究已有成熟的结论。对于最简单且在静止环境中孤立的单组分液滴,Spalding<sup>[4]</sup>给出了在蒸发和燃烧过程中液滴半径的变化规律,即经典的 $D$ 平方定律。Law<sup>[5]</sup>在此基础上进一步推导了无限导热率模型,假设液滴内部温度在空间上分布均匀,在时间上发生变化。在实际工业过程中,雾化燃烧的液滴半径较小,基本满足以上假设,因此燃烧性质近似满足 $D$ 平方定律和无限导热率模型。

多组分液滴的着火与燃尽特性与单组分液滴存在显著不同。Zhu等<sup>[6]</sup>研究了椰壳和松木锯末制成的生物炭水煤浆燃料液滴的着火与燃烧特性,发现含水量持续增加时,点火延迟时间会先增加后减小,点火延迟时间受水分蒸发时间和水分蒸发后固体残留物加热时间的双重影响。当水含量较高,水的质量分数超过50%时,液滴表现出更高的燃烧速率,总体遵循 $D$ 平方定律。同时,该研究团队<sup>[7]</sup>实验研究了生物炭-甘油-水煤浆燃料液滴的着火和燃烧行为,结果显示,当燃料中甘油与水的比值增加时,液滴的点火延迟时间显著缩短,甘油的蒸发导致液滴膨胀和内部循环,增强了热传递速率。同

收稿日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52176116)

作者简介: 陈健(1997—),男,硕士研究生。

通信作者: 张扬,副教授, E-mail: yang-zhang@tsinghua.edu.cn

时, 蒸发的甘油与液滴附近的氧气反应并释放热量, 提高了液滴的加热速率。随着甘油含量的增加, 液滴逐渐从平滑蒸发转变为发生一定程度的膨胀, 当甘油含量达 57.16% 时, 在液滴燃烧中会发生“微爆”现象。Faik 等<sup>[3]</sup>研究发现, 与纯燃料液滴相比, 混合燃料液滴燃烧速率略有下降, 且在混合物液滴内发现了成核现象。Hansen 等<sup>[8]</sup>研究发现, 对于生物质组分、柴油、棕榈油和水的不同组分的混合液滴, 混合液滴的燃尽时间只与质量有关, 而与点燃的各项数据无关。此外, 不同混合液滴的组分性质不同, 因此在燃烧过程中可能出现膨胀与微爆等特殊现象。综上所述, 随着液滴含水量的降低和成分复杂度的增加, 液滴的着火延迟时间和燃烧速率也会发生变化。

多组分重油的化学组构成较复杂, 无法通过单一组分液体燃料的研究结论推断多组分重油的燃烧性质。通过文献可知, 现有研究缺乏针对多组分重油燃烧性质系统的深入探索, 尚未明确重油的着火、燃尽等特性与其组分之间的关联性。

本文拟对重油开展单液滴试验和热重质谱 (thermogravimetric-mass spectrometry, TG-MS) 检测, 以探究多种组分不同的重油在蒸发与燃烧过程中的着火延迟时间、燃尽时间和直径的变化规律, 旨在明确重油液滴的燃烧特性和组成成分之间的关联, 从而为重油的燃烧利用提供理论指导。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

为探究不同组分重油的着火与燃尽规律, 本文选用编号分别为 #1、#2、#3 的 3 种典型重油进行研究。3 种重油的组成中重质组分占比(质量分数)各不相同。由于重油的重质组分较多, 因此使用了在煤质分析领域较常见的四组分分析法对重油进行分析, 结果如表 1 所示。

表 1 样品的四组分分析结果 %

样品	沥青质 质量分数	胶质质 量分数	芳香份 质量分数	饱和份 质量分数	总收率
#1	2.9	8.2	24.8	52.6	88.5
#2	2.3	9.9	19.6	68.2	100.0
#3	8.1	12.0	31.9	30.0	82.0

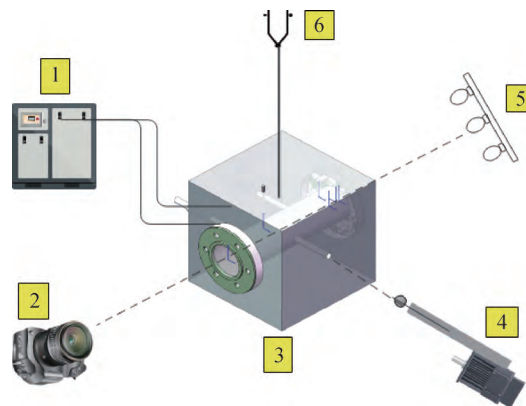
注: 样品有挥发, 收率不足 100%, 为轻组分挥发, 可计入饱和份和芳香份。

由表 1 可知, 3 种重油中的重质组分占比大小关系为: 样品 #3(20.1%) > 样品 #2(12.2%) > 样

品 #1(11.1%)。其中, 芳香份和饱和份可视为可挥发的轻质组分, 沥青质和胶质则视为重质组分。

### 1.2 单液滴实验

采用挂滴法在管式炉中进行单液滴着火和燃烧实验, 实验台系统如图 1 所示。



1—温控箱; 2—相机; 3—管式炉;  
4—直线电机; 5—背光光源; 6—热电偶

图 1 实验台系统

实验中使用了高速相机、管式炉和陶瓷送样针等设备。高速相机安装在升降台上, 可以调节与管式炉中心的距离和高度; 管式炉中心为石英玻璃管, 两端为可拆卸的观察窗, 右侧留有进样通道。陶瓷送样针固定在直线电机上, 陶瓷送样针中心为双孔通道, 穿入热电偶丝, 在前端悬挂等待测量的重油液滴。直线电机可以在水平方向上以一定的速度前后移动, 将陶瓷送样针沿进样通道送入管式炉的中心位置。炉内维持高温环境, 温度由温控箱控制, 实验温度  $T_s$  为 600、675 和 750 °C。管式炉中心线前后 2 侧分别布置背光光源与相机, 重油液滴在管式炉中心的燃烧过程由高速相机完整记录。

首先在可见光条件下进行实验, 关闭背光光源, 并对管式炉后侧观察窗进行遮光。通过拍摄液滴图像, 可以直观地观察液滴燃烧过程。每 2 幅图像的间隔时间为 0.01 s, 可用来确定液滴被送入管式炉、液滴着火和液滴明火熄灭等特殊现象发生的时刻。

在有背光光源条件下继续进行实验, 通过调整相机的光圈, 在强烈的背光条件下, 可以清晰地观察到液滴在燃烧过程中直径的变化情况。采用 MATLAB 程序对所得图像进行二值化处理, 通过阈值调整, 将原图的 256 个亮度级别分别转化为纯黑或纯白色。纯黑色部分即为液滴和热电偶, 提取黑色部分所占像素点的个数, 人为设定感兴趣区域 (region of interest, ROI) 去除热电偶丝的影响。与

标尺所占像素点个数进行对比,可以得到液滴实际所占面积,特征半径则定义为液滴面积与液滴图像所占面积大小相同的等效圆对应半径,如图2所示。

实验中液滴中心温度可由热电偶丝进行测量。热电偶丝为Omega Engineering公司生产的K型热电偶裸丝,直径为0.125 mm。热电偶裸丝与温度采集卡相连,温度采集卡为NI公司生产的USB-6210型。实验中采样频率为100 Hz。

### 1.3 TG-MS 检测

在由热重分析仪(TG)和在线质谱仪(MS)构成的测试系统中,对待测的重油液滴进行TG-MS联用测试。在氮气环境下,对液滴样品进行加热,从室温20℃逐渐加热到600℃,每上升1℃停留1 min。随着温度的上升,液滴中的挥发份和热解产生的气体会在不同的温度条件下析出,这些气体被传输到质

谱仪中进行识别和分析,从而达到对物质成分在线分析的目的。

### 1.4 实验误差分析

实验中使用的高速相机频率为100 fps,单张图片像素为400×416(宽×高),经测算每毫米约有19个像素点。因此,直径测量误差约为0.05 mm。

温度采集卡的量程为±5 V,根据误差传布原理,计算得到温度测量的误差不超过0.3%。

## 2 分析与讨论

### 2.1 液滴着火现象

在可见光下对3种油样进行单液滴实验,同时使用红外相机与可见光高速相机对燃烧过程进行记录。在环境温度 $T_s=800\text{℃}$ 时,观察到样品#3的典型燃烧过程,如图3所示。



图2 液滴图像处理过程

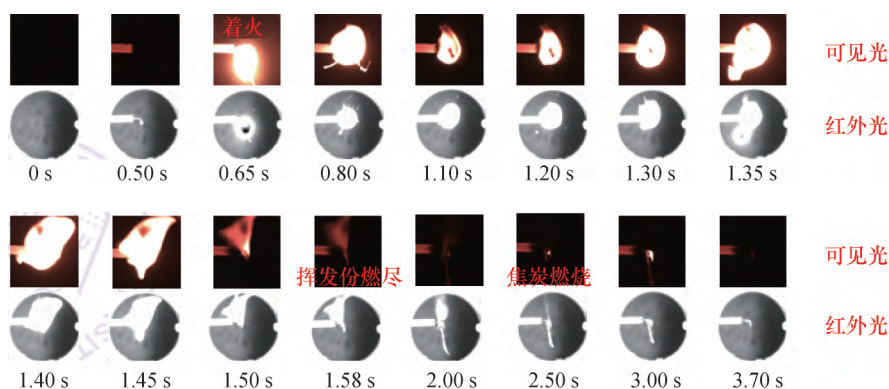


图3 典型燃烧过程

在可见光下可以观察到明显的黄色火焰,火焰区域的大小剧烈波动,部分液滴在挥发份燃尽后出现了焦炭燃烧过程。

综合已知的蒸发与燃烧理论,对重油液滴的实际燃烧过程进行总结,具体的蒸发-燃烧过程为:1)将液滴送入高温环境并加热,此时液滴吸收的热量主要用于对自身进行加热,液滴表面温度上升;2)当界面组分分压达到某组分的饱和蒸汽压时,液滴析出挥发份,挥发份在液滴表面进行燃烧;3)液滴持续燃烧并燃尽。

通过定义时间参数来描述燃烧过程。将液滴进

入高温环境的时刻定义为0 s;将从液滴进入加热炉的时刻到液滴着火的时刻定义为着火延迟时间;将从液滴进入加热炉的时刻到液滴明火熄灭的时刻定义为挥发份燃尽时间。

在600℃下,分别对3种液滴进行实验研究,记录着火延迟时间与挥发份燃尽时间,并发现在相同温度下( $T_s=600\text{℃}$ ),同种燃料的着火延迟时间和挥发份燃尽时间与液滴初始直径呈正相关关系,与理论知识相符。着火延迟时间、挥发份燃尽时间与液滴初始直径的关系,如图4所示。 $D_0$ 为初始直径, $t_1$ 为着火延迟时间, $t_2$ 为挥发份燃尽时间。

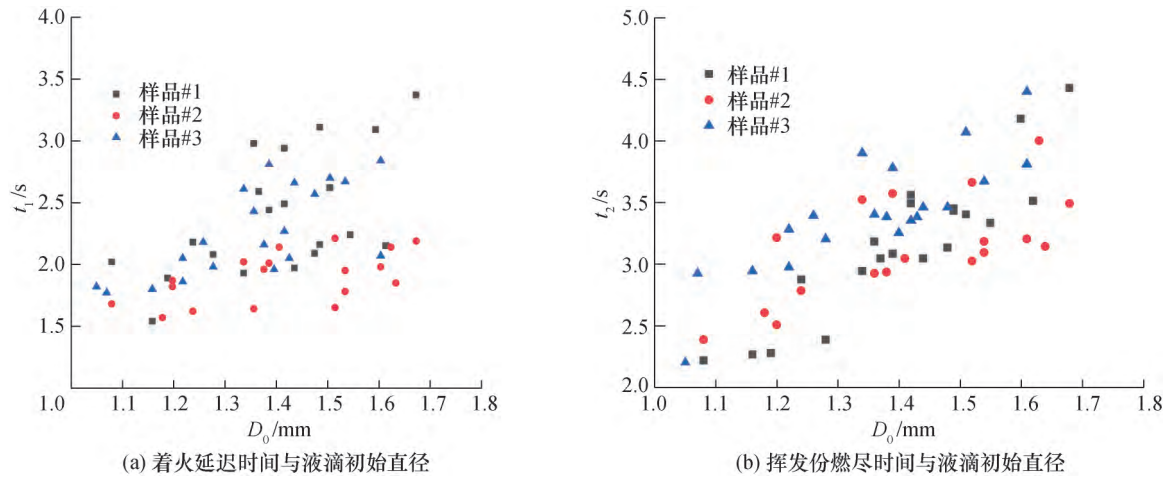
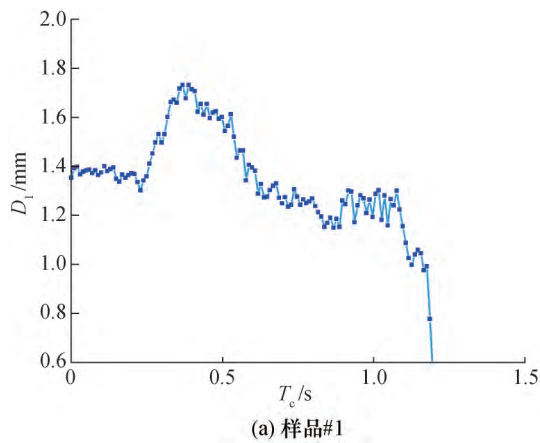
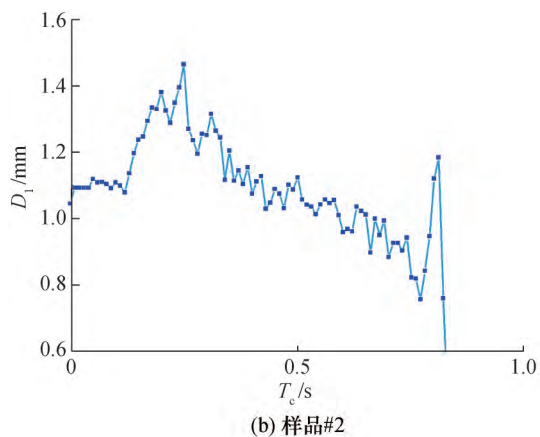


图4 着火延迟时间、挥发份燃尽时间与液滴初始直径的关系

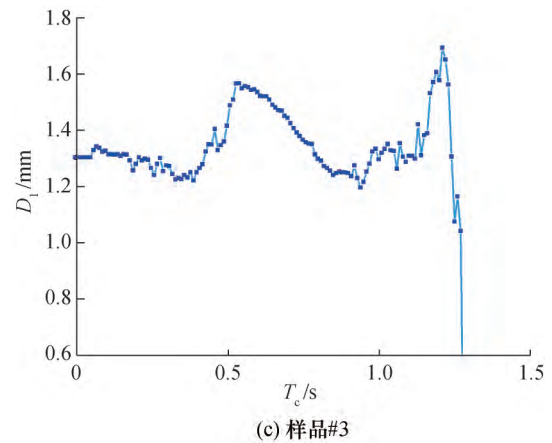
为了进一步研究燃烧过程中液滴直径的变化情况,实验中增加了背光光源进行实验。3种样品在燃烧过程中液滴阴影面积的等效圆直径随时间变化的典型图像,如图5所示。图5中,样品#1、#2和#3的 $T_s$ 均为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ , $D_1$ 为等效圆直径, $T_c$ 为燃烧时间。



(a) 样品#1



(b) 样品#2



(c) 样品#3

图5 燃烧过程中液滴直径的变化情况

样品#1液滴在燃烧过程的前中期,出现了一次小幅膨胀,之后液滴直径变化幅度不大,最终几乎燃尽。样品#2液滴在燃烧过程中总体发生2次膨胀,第一次膨胀幅度较大,第二次膨胀幅度较小,最终几乎完全燃尽。样品#3在燃烧过程中产生较多黑烟,总体发生2次膨胀,2次膨胀的幅度相似,而且在第二次膨胀之后液滴直径迅速减小,燃烧结束后,在热电偶丝上留下了明显的残炭。

本文通过对3种液滴进行TG-MS检测结果分析,得出组分热解随温度的变化关系,检测结果如图6所示。图中,样品#1、#2、#3的 $T_s$ 范围均为 $16\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ ;横坐标为TG-MS检测结果的温度 $T_f$ ;纵坐标为分解出的气体单位质量样品吸收的红外辐射的强度 $A_1$ ,强度越高,代表同一时刻析出的气体量越多,对应液滴膨胀的体积也越大。



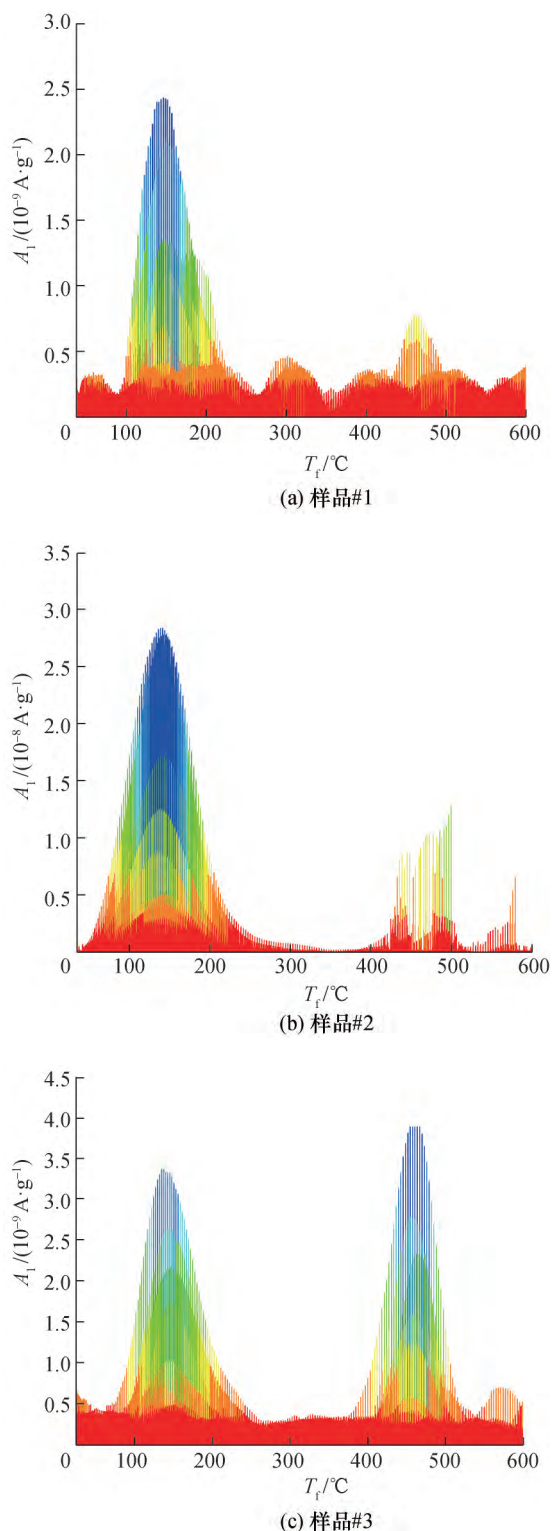


图 6 TG-MS 检测结果

根据液滴在燃烧过程中直径的变化情况, 对 3 种液滴的 TG-MS 检测结果进行分析。对于样品 #1, 组分的热解主要集中在  $100 \sim 200$  °C, 整体呈单峰形态, 因此样品 #1 只在燃烧过程的前中期发生一次反常膨胀现象。对于样品 #2, 检测结果整

体呈双峰形态, 第一次产生的气体强度更大, 因此样品 #2 在燃烧过程中发生 2 次反常膨胀现象, 第一次的膨胀幅度更大。对于样品 #3, 检测结果也呈双峰形态, 两峰的强度近似相等, 因此样品 #3 在燃烧过程中也发生了 2 次膨胀, 2 次膨胀的幅度相近。

综上所述, 通过对重油液滴进行 TG-MS 分析, 可以较好地解释液滴在燃烧过程中出现反常膨胀现象的次数和幅度。混合组分液滴在燃烧过程中出现的反常膨胀和微爆现象对液滴的燃烧特性影响显著。因此, 本文认为将 TG-MS 检测方法与工业分析等传统检测方法结合, 可以更全面、科学地评价重油的燃烧性能。

## 2.2 不同温度和组分下液滴的燃烧

在  $600$ 、 $675$ 、 $750$  °C 下分别对 3 种液滴进行着火和燃烧实验, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 在相同温度下, 3 种样品的着火延迟时间与燃尽时间均随直径的增加而增加。此外, 在不同温度下相同组分燃料液滴的燃烧过程中, 3 种样品油液滴的着火延迟时间与燃尽时间均随温度升高而缩短。

对同一温度下 3 种样品油液滴的实验结果(见图 4)进行分析, 可知样品 #2 的着火延迟时间和燃尽时间均小于样品 #1 和 #3, 而样品 #1 和 #3 之间的横向对比, 缺乏明显规律性。此实验结果与 3 种样品油中重质组分的占比大小关系存在显著差异, 样品 #3 的重质组分占比最高, 为  $20.1\%$ , 样品 #2 次之, 为  $12.2\%$ , 样品 #1 最低, 为  $11.1\%$ 。因此, 在重油的工业应用中, 单纯以重油的重质组分占比大小判断不同重油的着火延迟时间和挥发份燃尽时间是不客观的。

为了进一步研究, 将 3 种液滴在燃烧过程中液滴中心温度的变化情况进行对比, 结果如图 8 所示。图 8 中, 3 种液滴的初始直径均为  $1.2$  mm,  $T_m$  为液滴中心温度,  $T_s$  为  $600$  °C。

由图 8 可知, 在燃烧过程的初始阶段, 样品 #2 的液滴中心温度更高, 且在燃烧过程中其平均温度也更高, 进一步证实了样品 #2 的着火延迟时间与挥发份燃尽时间均小于样品 #1。液滴中心温度与蒸发过程和传热过程密切相关, 因此对于重油而言, 液体直径的多次膨胀证明燃烧过程中存在液滴的微爆现象, 微爆现象对液滴传热传质和蒸发过程影响剧烈, 需要对微爆现象进行专门的研究。

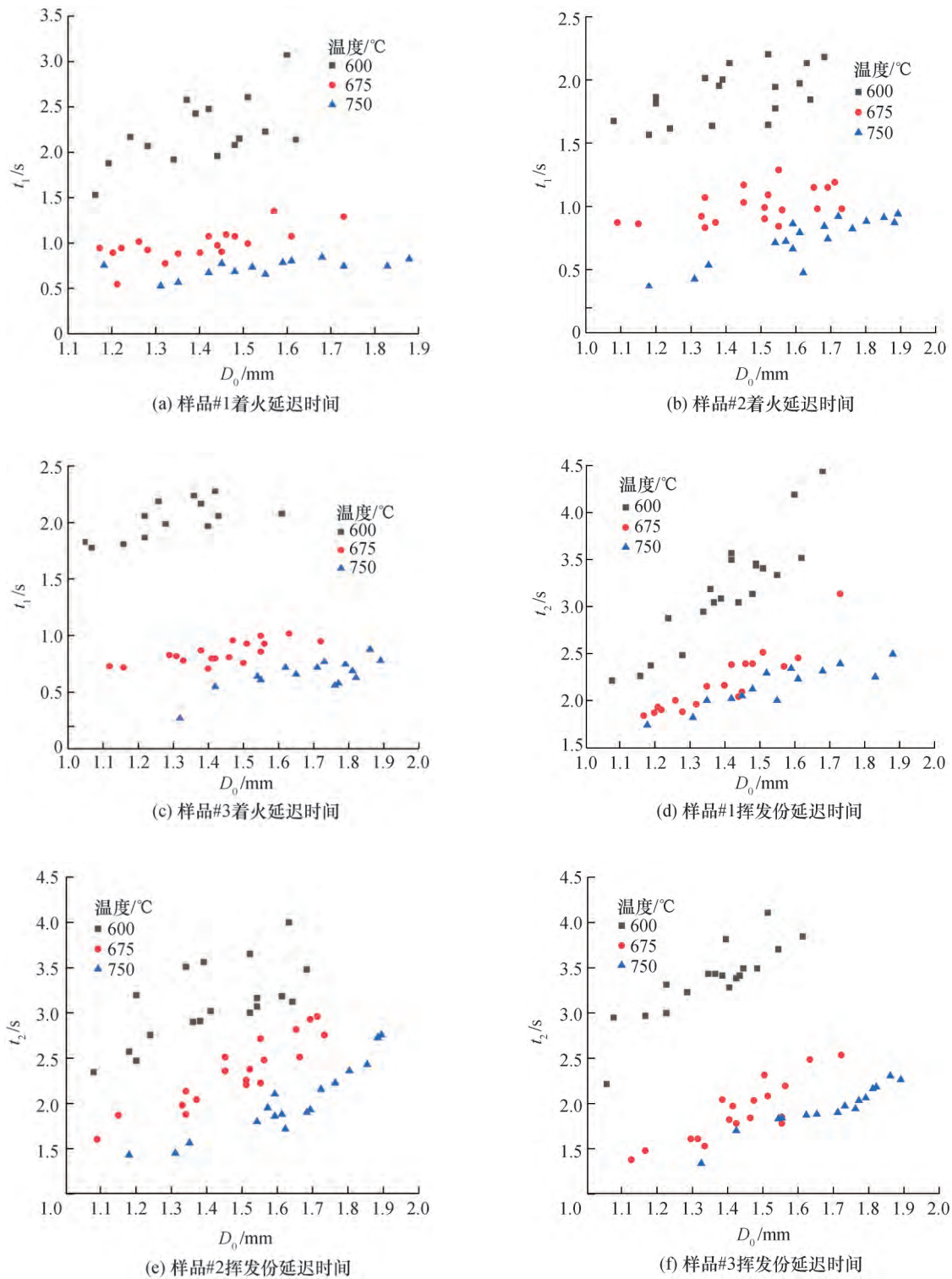


图7 3种液滴在不同温度下的着火延迟时间与挥发份燃尽时间

## 2.3 微爆现象

### 2.3.1 微爆现象发生机理和表征

在双组分或多组分燃料液滴的燃烧中,微爆现象的发生十分常见,会对整体的燃烧过程产生显著影响,通常表现为增强燃烧。Zeng等<sup>[9]</sup>研究了微爆

过程发生的机理,以不同挥发性双组份液体燃料为例,在高温环境中单液滴内部区域的轻质组分的温度已到达沸点,而单液滴外表面的重质组分的温度没有到达沸点,由于液滴表面质量扩散速率有限,随吸热过程的继续,液滴内部区域温度超过轻质组分沸点,开始产生气泡并破碎。相关学者<sup>[10-12]</sup>的研

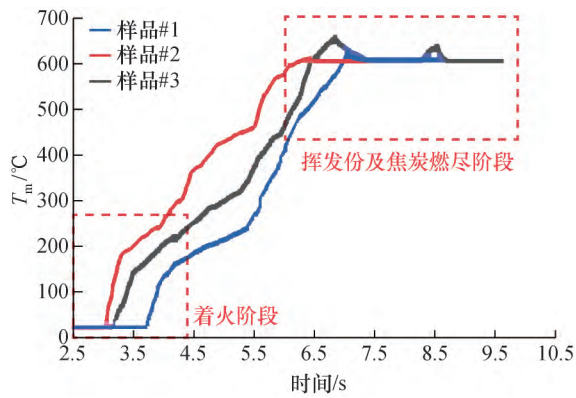


图 8 3 种样品中心温度的变化

究表明, 柴油混合燃料等多组分液滴, 可能会发生不同形式的微爆现象, 并且无论哪种微爆均会对燃烧产生促进作用。Antonov 等<sup>[13]</sup>为探究混合燃料发生微爆的速率, 采取了控制温度和向菜籽油中添加煤颗粒的方法进行研究, 发现随着环境气体温度和菜籽油中煤颗粒质量分数的增加, 发生膨胀或微爆的时间会缩短。

为达到量化判断微爆过程对液滴燃烧的影响, 需要对微爆过程进行科学表征。Han 等<sup>[14]</sup>提出了表征微爆强度的计算公式, 用单次微爆前后的体积变化除以微爆持续时间来表征微爆的剧烈程度。结合本文的实验过程, 微爆强度  $I$  表示如下:

$$I = - \sum_{i=0}^n \frac{S_{is} - S_{ie}}{t_{is} - t_{ie}} \quad (1)$$

其中:  $i$  表示微爆的序数,  $S_{is}$  和  $S_{ie}$  分别表示第  $i$  次微爆开始和结束时的液滴体积,  $t_{is}$  和  $t_{ie}$  分别表示第  $i$  次微爆开始和结束的时间。

### 2.3.2 微爆对重油液滴燃烧过程的影响

在相同温度(600 °C)下对 3 种组分不同的重油液滴进行燃烧试验, 结果如图 9 所示。

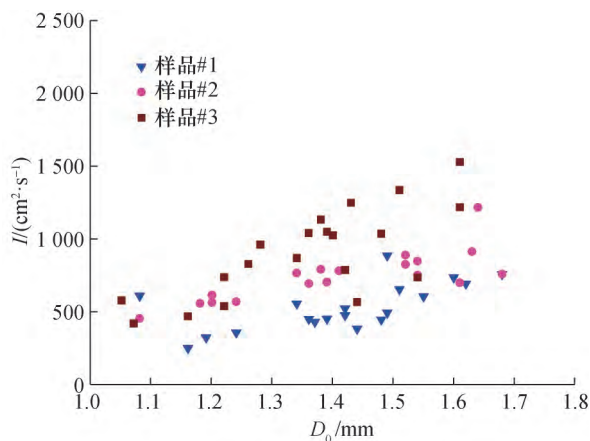


图 9 3 种样品燃烧过程的微爆强度

整体上,  $I_{\text{样品}\#3} > I_{\text{样品}\#2} > I_{\text{样品}\#1}$ , 与 3 种样品重质组分占比的大小关系相同, 这与理论知识相符。当重质组分占比与轻质组分占比相近时, 液滴的微爆现象最剧烈。此外, 对于同种液滴, 微爆强度随着初始直径的增加而增加。

对 3 种样品在 600、675 和 750 °C 的温度下进行燃烧试验, 实验结果如图 10 所示。

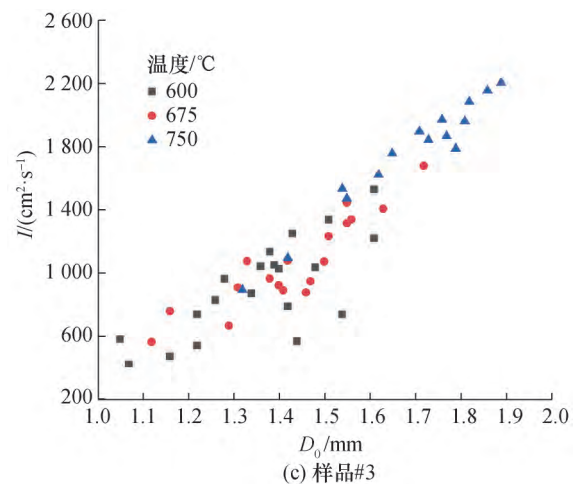
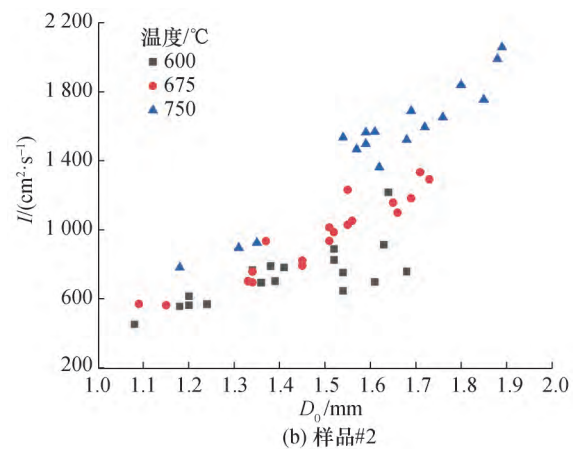
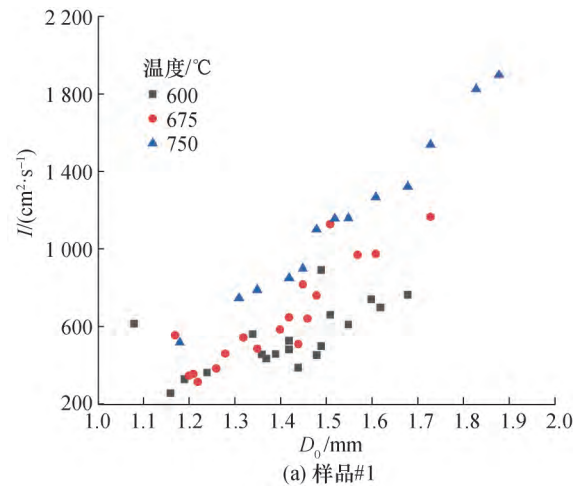


图 10 不同温度下 3 种样品燃烧过程的微爆强度

由图 10 可知,随初始直径的变化,3 种样品的微爆强度表现为:在 750 °C 温度下的微爆强度最大,675 °C 次之,600 °C 最低。对于单个样品,随着温度的升高,液滴的微爆强度也会不断增加。

对于重油而言,由于其组分构成极为复杂,建立类似过去研究<sup>[9-12]</sup>中组分与微爆之间的关系是困难的,需要另行考虑模型的建立方法。这将是本研究团队未来的研究重点之一。

### 3 结 论

本文通过对 3 种多组分重油单液滴着火和燃烧实验,以及重油成分进行 TG-MS 分析,得到如下结论。

1) 重油液滴的实际燃烧过程分为 3 个阶段:被加热、挥发份燃烧和挥发份燃尽。部分品种的重油还可能出现焦炭燃烧的过程。在整体的燃烧过程中,液滴的直径变化关系并不遵循经典的  $D$  平方定律,且会出现膨胀现象。

2) 液滴的膨胀现象与其组成成分密切相关。运用 TG-MS 检测的结果可以较好地解释液滴在燃烧过程中膨胀的次数和幅度。作为传统燃油检测方法的补充,TG-MS 检测方法可以用于辅助预测重油的燃烧性能。

3) 3 种样品的着火延迟和燃尽时间均随温度的升高而缩短,微爆强度均随温度的上升而增加。在 600 °C 的工况下,样品 # 3 的着火延迟和燃尽时间约等于样品 # 1,样品 # 2 最短,与其重质组分占比大小不同。即单纯用重质组分占比大小去推断液滴燃烧性能是不合理的。

4) 对于 600 °C 下的微爆强度,样品 # 3 最强,样品 # 2 次之,样品 # 1 最低,与样品重质组分占比大小一致。同时,微爆强度随初始直径的增加而增加,随温度的升高而增加。

### 参考文献 (References)

[1] 王忠俊,陈军.中高速船用柴油机燃用重油的应用[J].船海工程,2010,39(2):74-77.  
WANG Z J, CHEN J. Application of high-speed marine diesel engine burned heavy fuel oil [J]. Ship & Ocean Engineering, 2010, 39(2): 74-77. (in Chinese)

[2] FOOLADGAR E, BRACKMANN C, MANNAZHI M, et al. CFD modeling of pyrolysis oil combustion using finite rate chemistry [J]. Fuel, 2021, 299: 120856.

[3] FAIK A, ZHANG Y, HANRIOT S. The investigation of droplet combustion characteristics of biodiesel-diesel blends using high speed camera [C]// Proceedings of 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Costa de Sol, Spain, 2016: 1362-1367.

[4] SPALDING D B. The combustion of liquid fuels [J]. Symposium (International) on Combustion, 1953, 4(1): 847-864.

[5] LAW C K. Unsteady droplet combustion with droplet heating [J]. Combustion and Flame, 1976, 26: 17-22.

[6] ZHU M M, ZHANG Z Z, ZHANG Y, et al. An experimental investigation into the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar water slurry fuels in air [J]. Applied Energy, 2017, 185: 2160-2167.

[7] ZHU M M, ZHANG Z Z, ZHANG Y, et al. An experimental study of the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar-glycerol-water slurry fuels [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2475-2482. DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.070.

[8] HANSEN B B, JENSEN P A. Combustion characterization of individual bio-oil droplets [C]// Proceedings of the Nordic Flame Days 2015. Copenhagen, Denmark, 2015.

[9] ZENG Y B, LEE C F F. Modeling droplet breakup processes under micro-explosion conditions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2185-2193.

[10] 齐正达,韩恺,倪兆静.柴油混合燃料液滴微爆现象及规律研究[J].内燃机学报,2022,40(3):225-232.  
QI Z D, HAN K, NI Z J. Research on the micro-explosion phenomenon and characteristics of diesel mixed fuel droplet [J]. Transactions of CSICE, 2022, 40(3): 225-232. (in Chinese)

[11] 迟浩.掺水乳化柴油单液滴蒸发特性可视化实验研究[D].武汉:华中科技大学,2018.  
CHI H. Visual experimental study on single droplet evaporation characteristics of emulsified diesel blending with water [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[12] VIGNESWARAN R, BALASUBRAMANIAN D, SASTHA B D S. Performance, emission and combustion characteristics of unmodified diesel engine with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nano particle along with water-in-diesel emulsion fuel [J]. Fuel, 2021, 285(237): 119115.



- [13] ANTONOV D V, KUZNETSOV G V, SAZHIN S S, et al. Puffing/micro-explosion in droplets of rapeseed oil with coal micro-particles and water [J]. *Fuel*, 2022, 316: 123009.
- [14] HAN K, LIU Y, WANG C X, et al. Experimental study on the evaporation characteristics of biodiesel-ABE blended droplets [J]. *Energy*, 2021, 236: 121453.

## Single droplet ignition and combustion characteristics of multi — component heavy oil

CHEN Jian, ZHANG Yang, ZHANG Hai

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,  
Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** [Objective] Heavy oil is one of the heavy end products of the petroleum refining process and has high energy density, low price, and poor ignition and combustion performance. There is an increasing demand for heavy oil and substantial variation in the composition of heavy oil provided by different suppliers. Understanding the combustion characteristics of heavy oil, especially those related to ignition and burnout, is critical to safely use and effectively tune and control the combustion of heavy oil. The development of heavy oil burners can yield significant insights into this endeavor. The combustion of heavy oil in the furnace is essentially the combustion of a large number of liquid droplets. The study of the ignition and burnout characteristics of a single liquid droplet can lead to a better understanding of the combustion of heavy oil. [Methods] The composition of multi-component heavy oil is analyzed, and the single drop experiment is carried out. Considering the need to measure the temperature at the droplet center and take pictures of the static droplet during the experiment, the hanging drop method is chosen for studying single droplets of three multi-component heavy oils at different temperatures. Also, experiments are performed in tubular furnaces with different initial diameters to understand the correlation between the ignition and combustion characteristics of a heavy oil droplet and its composition, ambient temperature, and initial diameter. The droplet ignition delay is defined as the duration between the entrance of the droplet into the tubular furnace and its ignition. All experiments are conducted under visible light to enable observation of the variation in the ignition delay of liquid droplets and the time taken for the burn-out of their volatile components. Then the experiment is repeated under a strong backlight to better observe the change in the droplet radius during combustion. The obtained images are binarized by the MATLAB program, and the 256 brightness levels of the original image are converted into pure black or pure white, respectively, through threshold adjustment. The pure black part denotes liquid droplets and thermocouples. The pixel count of the black regions is determined, the region of interest (ROI) is set manually to exclude the thermocouple wire, and the actual area of the droplet is calculated. The characteristic radius is defined as that corresponding to the equivalent circle area equal to that of the droplet image. [Results] The ignition delay and the burnout time of a heavy oil droplet were found to decrease with increasing temperature and increase with increasing initial diameter. However, given that these variations were not directly related to the proportion of the heavy components of the droplet, it was unreasonable to try to correlate the proportion of the heavy component with the combustion performance of the droplet. Due to the complex mix of components with different boiling points, the expansion behavior of the heavy oil droplets as a function of time during combustion strongly influences their combustion characteristics. The thermogravimetric-mass spectrometry (TG-MS) characterization could explain the frequency and amplitude of expansion. The expansion times of the three samples were consistent with the number of pyrolysis peaks in TG-MS results, and the expansion amplitude was positively correlated with the height of the pyrolysis peaks. [Conclusions] The multi-component heavy oil droplets are found to undergo micro-explosions during combustion due to the complexity of their composition and large differences in the volatilities of the individual components. The intensity of micro-explosion during droplet combustion is defined. It is found to be positively correlated with the proportion of heavy components, the initial diameter of the droplets, and the ambient temperature.

**Key words:** fuel and combustion; heavy oil; droplet combustion; microburst

(责任编辑 汤梅)