

二硝酰胺铵液滴微爆特性的试验研究

赵锦胜 宁智 吕明*

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 绿色无毒航天推进剂二硝酰胺铵(ADN)在燃烧室内会发生微爆效应, 从而使得发动机具有较好的燃烧效率和较低的排放污染物。本文以 ADN 液滴为研究对象, 搭建了挂滴式试验系统, 给出了 ADN 液滴在微爆过程中的形态变化及微爆特性表征参数; 在此基础上, 开展了环境温度和液滴初始直径对液滴微爆特性的影响规律研究。研究表明, ADN 液滴微爆延迟时间不会随环境温度的增加而缩短; 液滴微爆强度和液滴微爆持续时间均会随着环境温度的不断升高而逐渐减小; 液滴微爆持续时间所占液滴生存时间的百分比与环境温度并不存在负相关关系; 液滴当量蒸发速率会随着环境温度的升高而不断增加, 但增加速率会越来越小; 液滴着火时刻会随环境温度的升高而提前。ADN 液滴微爆发生的次数与液滴初始直径的相关性不强; 微爆过程中液滴的最大直径与液滴初始直径存在正相关关系; 液滴微爆延迟时间会随着液滴初始直径的增大而增加; 液滴微爆强度、液滴微爆持续时间和液滴当量蒸发速率与液滴初始直径均不存在正相关关系; 液滴着火时刻会随着液滴初始直径的增大而不断延迟, 但延迟趋势越来越小。通过本文研究, 有利于加深对 ADN 液滴微爆影响因素及其影响规律的理解, 从而为实现控制 ADN 液滴微爆过程提供重要依据。

关键词: 二硝酰胺铵; 液滴形态; 微爆特性; 试验研究

中图分类号: O351

Experimental Study on Micro-explosion Characteristics of Ammonium Dinitramide Droplets

Zhao Jinsheng, Ning Zhi, Lü Ming*

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: The green non-toxic space propellant ammonium dinitramide (ADN) will undergo a micro-explosion effect in the combustion chamber, resulting in better combustion efficiency and lower emissions for the engine. This article takes ADN droplets as the research object, establishes a hanging drop experimental system, and provides the morphological changes and micro-explosion characteristic characterization parameters of ADN droplets during the micro-explosion process; On this basis, a study was conducted on the influence of environmental temperature and initial droplet diameter on droplet micro-explosion characteristics. The research results indicate that the delay time of ADN droplet micro-explosion does not decrease with the increase of environmental temperature; The intensity and duration of droplet micro-explosion will gradually decrease with the increasing of environmental temperature; There is no negative correlation between the percentage of droplet micro-explosion duration in droplet survival time and environmental temperature; The equivalent evaporation rate of droplets will continuously increase with the increasing of environmental temperature, but the increasing rate will become smaller and smaller; The ignition time of droplets will advance with the increasing of ambient temperature. The correlation between ADN droplet micro-explosion numbers and the initial diameter of the droplet is not strong; There is a positive correlation between the maximum diameter of the droplet and the initial diameter of the droplet during the micro-explosion process; The delay time of droplet micro-explosion will increase with the increasing of the initial diameter of the droplet; There is no positive correlation between the intensity, duration, and equivalent evaporation rate of droplet micro-explosion and the droplet initial diameter; The ignition time of droplets will continue to delay as the initial diameter of the droplet increases, but the delay trend will become smaller and smaller. This research is beneficial to deepen people's understanding of the influencing factors and laws of ADN droplet micro-explosion, thereby providing important basis for controlling the ADN droplet micro-explosion process.

Key words: ADN; droplet morphology; micro-explosion characteristics; experimental study

含氧燃料作为一种可再生资源, 因其分子中含 有氧元素, 可与化石燃料混合使用, 有利于燃烧更

*通讯作者: lvming@bjtu.edu.cn

国家自然科学基金(批准号: 52276026)资助.

加充分,减少污染物的产生,主要用于工程机械、农用机械、汽车及航空航天等不同用途的内燃机中。已有研究表明^[1,2],含氧燃料在内燃机高温蒸发过程中,其液滴会发生微爆效应,从而使内燃机具有较好的燃烧效率和较低的排放污染物。二硝酰胺铵(ADN),化学式为 $\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2$,含氧燃料的一种,目前已被作为绿色无毒航天推进剂进行了应用,由于其在燃烧室内会发生微爆效应,因此具有较好的燃烧效率。因此针对二硝酰胺铵液滴的微爆特性开展研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

微爆概念最早由Ivanov等学者^[3]在1962年的报告中提及,用来表述乳化油液滴在高温中进行蒸发和燃烧时,会产生较为剧烈的破碎现象。微爆现象是用来描述两种以上不同沸点组分的混合液在受热蒸发或燃烧过程中出现的剧烈破碎现象。高温加热时,液滴内部轻质组分先达到沸点,成核汽化产生气泡,当达到某一临界点时,突破液滴表面张力,发生微爆,使液滴破碎成为小液滴。因此,微爆的存在可以促进喷雾射流的二次破碎,从而改善燃料的雾化效果提高蒸发速率。

之后,国内外相关学者^[4-16]针对微爆特性开展了大量的理论及试验研究。如Botero等人^[4]基于乙醇、柴油、生物柴油三种燃料,开展微爆特性试验探究,得到了不同质量分数对混合燃料液滴微爆的影响规律。Wang等人^[5]以正庚烷和十六烷的混合燃料为试验对象,开展双组分流滴的燃烧和微爆试验研究。Avulapati等人^[6]基于悬挂试验系统,对柴油、生物柴油、乙醇三种液体组成的混合燃料开展液滴微爆试验探究,将混合燃料的微爆特性主要分为平滑蒸发、吹脱和爆炸三种情况。Hou等人^[7]基于挂滴式试验系统,探究柴油和生物柴油混合后的燃料液滴的蒸发、微爆及燃烧特性。Watanabe等人^[9]基于质量守恒和能量守恒方程开发一个可以用于预测单液滴微爆中产生的水蒸气质量的数学模型。张依姗^[13]基于建立的生物柴油/乙醇含气液滴仿真模型,开展了不同温度下液滴微爆特性的影响规律研究。玄铁民等人^[14]探究了在不同混合体积分数、环境温度条件下,甲醇/加氢催化生物柴油混合液滴的微爆特性。孟柯生^[15]研究了航空燃油、乙醇与生物柴油三种燃料混合后的微爆特性,从而寻找可以替代航空燃油的生物柴油。

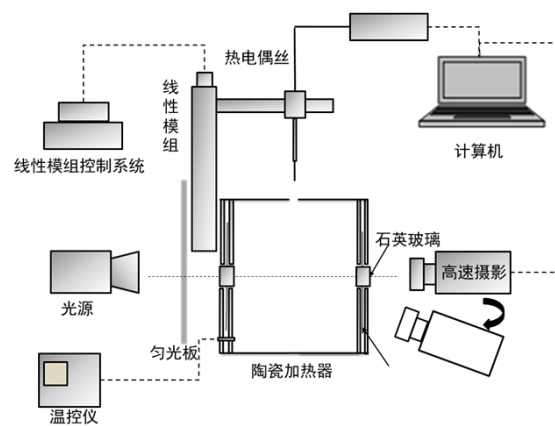
通过国内外研究现状可以发现,目前对混合燃料单液滴微爆特性的试验研究,主要是通过改变液滴不同组分的掺混比例或者环境温度等参数来研究对液滴微爆特性的影响规律。基于此,本文以ADN液滴为研究对象,搭建挂滴式试验系统,首先进行

ADN液滴在微爆过程中的形态变化及微爆特性表征参数分析;在此基础上,开展环境温度和液滴初始直径对液滴微爆特性的影响规律研究。通过本文研究,拟加深对ADN液滴微爆影响因素及其影响规律的理解,从而为实现控制AND液滴微爆过程提供重要依据。

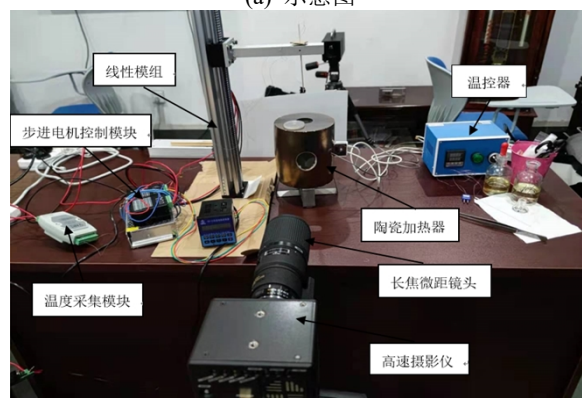
1 挂滴式试验系统

1.1 试验系统组成

本文采用挂滴式试验系统,试验系统主要包括液滴生成部分、液滴传送部分、液滴加热部分、图像和温度采集部分等四大部分,如图1所示。液滴生成部分包括:微量注射器、胶头滴管和玻璃试管等;确保所产生的液滴满足试验需求,且可以悬挂到热电偶触点位置。液滴传送部分包括:K型热电偶丝、陶瓷管、步进电机、滚珠丝杠和步进电机控制器等;可满足目标液滴快速、准确、稳定地运动到指定位置。液滴加热部分包括:陶瓷加热器、石英玻璃和温控仪等;满足试验中所需的温度需求,减少热量损失,且具有良好的可视化需求。图像和温度采集部分包括:高速摄影仪、光源、匀光板、计算机、K型热电偶丝、长焦微距镜头、温度采集模块等;主要是采集并存储在试验中液滴形态变化的图像数据和温度变化。



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 挂滴式试验系统

Fig.1 Experimental platform of the droplet test

1.2 试验数据处理

为得到试验中反映液滴形态变化的直径,需要对得到的图像数据进行处理。本文中主要通过灰度化、二值化、形态学图像^[17]处理方法来进行数据处理,处理之后的图像可以较好地保持原状,且可去除多余的热电偶丝,试验数据处理流程如图2所示。

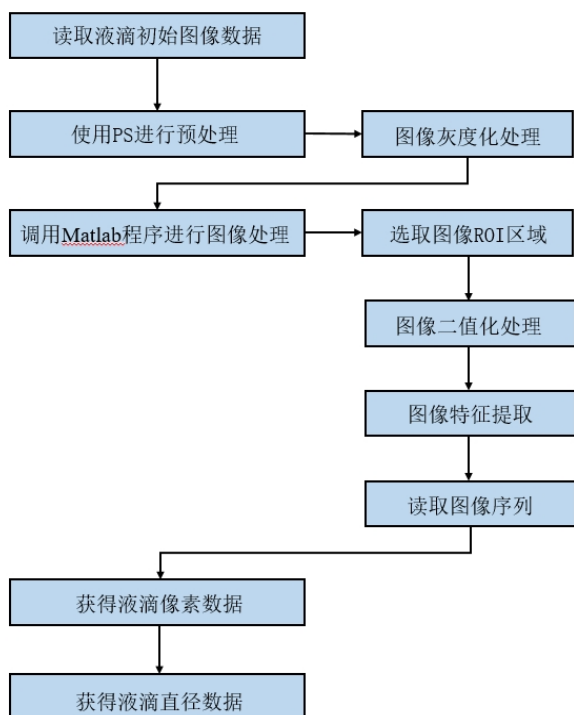


图2 试验数据处理流程

Fig.2 Process flow of experimental data

1.3 试验液体

本文采用的是二硝酸铵溶液(ADN)作为试验液体。表1给出的是该液体的物性参数。

表1 二硝酸铵溶液的物性参数

Table 1 Physical properties of ADN

试验液体	密度 g/ml	粘度 mPa·s	沸点 K	表面张力 mN/m
二硝酸铵	1.29	4.60	400	44.7

2 AND 液滴微爆形态及表征参数

本节基于挂滴式试验系统,分析二硝酸铵液滴在微爆过程中的形态变化,同时给出表征液滴微爆特性的参数。

2.1 液滴微爆形态

为研究二硝酸铵液滴微爆形态变化,在环境

温度为415 K、液滴初始直径 D_0 为1.24 mm、环境压力为标准大气压的条件下,得到二硝酸铵在微爆时液滴形态的变化过程,如图3所示。

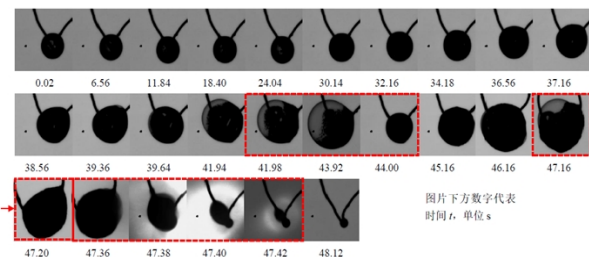


图3 二硝酸铵液滴在微爆过程中液滴形态变化

Fig.3 Changes in droplet morphology of ammonium dinitramide droplets during micro-explosion

从图3中可以看出,在时间 $t=0.02\sim 24.04$ s这一时间段内,二硝酸铵液滴体积大小基本没有变化。在时间 $t=24.04$ s以后液滴体积逐渐膨胀,到 $t=39.36$ s时从液滴边缘部分可看到有小气泡产生,随着小气泡体积不断变大,液滴体积在时间为 $t=43.92$ s时达到最大值,随后发生爆炸,气泡破碎,液滴体积突然变小,但比初始体积要大,这应该是高温导致液滴内部气核体积增大所致。在时间 $t=44\sim 47.2$ s的时间段,液滴体积逐渐变大,且在 $t=47.16$ s时,从液滴边缘部分可再次看到有气泡产生,随后液滴发生爆炸,气泡消失,液滴体积相对减小,但比第一次减小时的体积要大。在 $t=47.36$ s时,液滴体积又变大,没有微爆过程发生,液滴直接燃烧(液滴周围变白为燃烧后的高温所致),整个微爆过程结束。

2.2 液滴微爆表征参数

根据图像处理之后的液滴直径的试验数据,以及国内外文献^[18-23]对液滴微爆特性的研究。本文给出了用于分析液滴微爆特性的表征参数:液滴微爆强度、液滴微爆延迟时间、液滴微爆持续时间、液滴生存时间及微爆阶段的当量蒸发速率,下面给出这些表征参数的定义。

液滴微爆强度^[18],是指液滴在微爆阶段中每次微爆强度之和,因为在液滴微爆过程中,会发生次数较多的微爆,所以用每次微爆强度之和来表示液滴微爆强度更加合理。单次微爆强度用液滴微爆前的液滴直径平方与微爆后液滴直径平方之比来表示,液滴微爆强度的表达式如式(1)所示。

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{d_{i1}^2}{d_{i2}^2} \quad (1)$$

式中, d_{i1} 为液滴微爆前液滴直径, d_{i2} 为液滴微爆后液滴直径。

图4给出的是液滴微爆延迟时间、液滴微爆持续时间及液滴生存时间的示意图；纵坐标为液滴归一化直径平方 D^2/D_0^2 ，是指液滴当前直径平方与液滴初始直径平方的比值；横坐标为标准化时间 τ ，是指时间与液滴初始直径平方的比值 $\tau = t/D_0^2$ 。

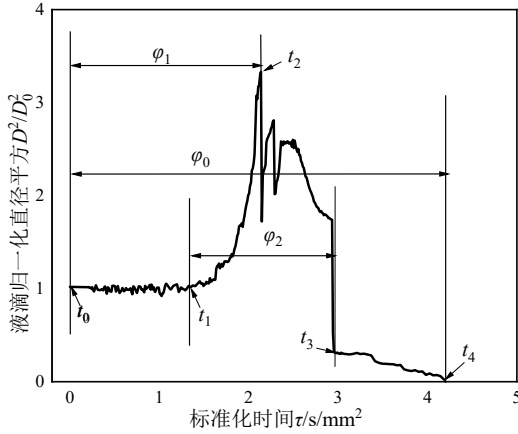


图4 微爆表征参数示意图

Fig.4 Schematic of micro-explosion characterization parameters

液滴微爆延迟时间 ϕ_1 ，是指液滴从进入加热室位置时刻 t_0 到液滴首次发生微爆的时刻 t_2 的时间段与液滴初始直径平方的比值，可以反映液滴在微爆发生时吸收能量的多少。

液滴微爆持续时间 ϕ_2 ，是指液滴在发生微爆前开始膨胀的时刻 t_1 到液滴最后一次微爆结束后的时刻 t_3 与液滴初始直径平方的比值，此时间段液滴直径平方随着时间变化会有较为剧烈的波动过程。

液滴生存时间 ϕ_0 ，是指液滴从进入加热室位置时刻 t_0 到液滴完全消失或只剩残留物（即液滴体积不再随时间变化）的时刻 t_4 与液滴初始直径平方的比值。

微爆持续时间所占液滴生存时间的百分比，是指液滴微爆持续时间 ϕ_2 与液滴生存时间 ϕ_0 的比值，可以反映液滴微爆阶段在液滴寿命中的占比。

在液滴微爆阶段，液滴直径处于不断变化的波动过程，所以其微爆过程中的蒸发速率不容易计算。为便于后续分析微爆阶段，在本文中将微爆阶段的当量蒸发速率定义为：液滴微爆发生前开始膨胀时刻 t_1 的液滴直径平方及液滴最后一次微爆结束后的时刻 t_3 的液滴直径平方的差值与两时刻之间时间差的比值，当量蒸发速率的表达式如式(2)所示。

$$k = \frac{d_1^2 - d_3^2}{t_3 - t_1} \quad (2)$$

式中， d_1 为 t_1 时刻的液滴直径大小， d_3 为 t_3 时刻的液滴直径大小。

3 AND 液滴微爆特性研究

基于上一节对 AND 液滴微爆形态及表征参数的分析，本节将探究环境温度、液滴初始直径这两个因素对液滴微爆特性的影响。

3.1 环境温度对AND微爆特性的影响

理论上环境温度改变会对二硝酰胺液滴的微爆强度、微爆时间等微爆特性产生重要影响。图5给出的是液滴初始直径为 1.24 mm、环境压力为标准大气压的条件下，环境温度分别为 405 K、415 K、425 K 时，ADN 液滴在微爆过程中的形态变化。

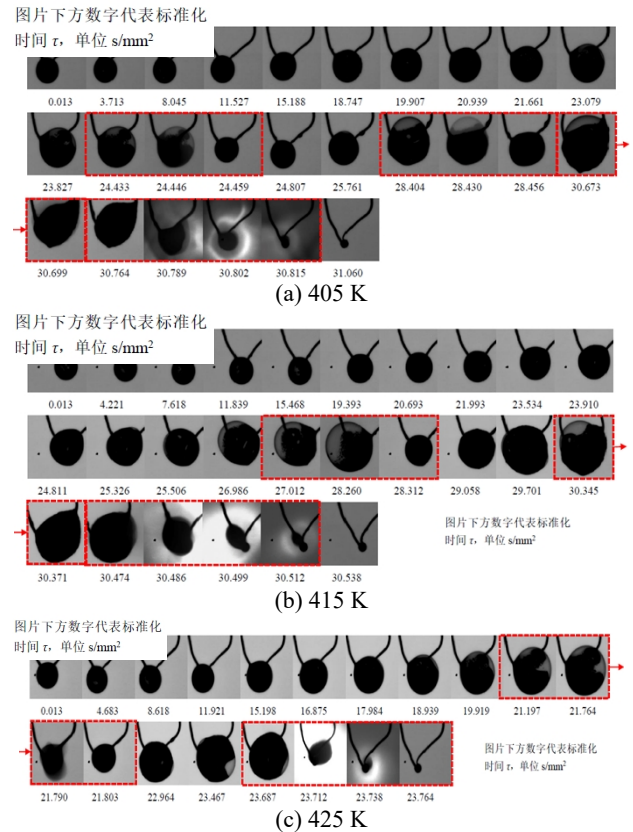


图5 不同环境温度下 ADN 液滴微爆过程中的形态图
Fig.5 Image of droplet morphology during micro-explosion of ADN droplets at different ambient temperatures

由图5可以看出，在图5(a)中 ADN 液滴共发生三次微爆（用虚线框标出），第一次微爆前后液滴体积变化最大，最后一次微爆液滴体积变化最小，且最后一次微爆发生后液滴很快就发生着火现象。在图5(b)中 AND 液滴发生两次微爆，之后液滴发生着火现象。在图5(c)中 ADN 液滴仅发生一次微爆，间隔一段时间之后液滴发生着火现象。

通过对比图5的三幅图可以看出，在环境温度高于沸点的前提下，AND 液滴均会发生着火现象；且环境温度越高，微爆发生的次数越少。

图6给出的是，将液滴形态变化经图像处理，液滴归一化直径平方（左侧纵坐标，图中对应黑色

线条)及液滴温度(右侧纵坐标,图中对应红色线条)随标准化时间的变化。

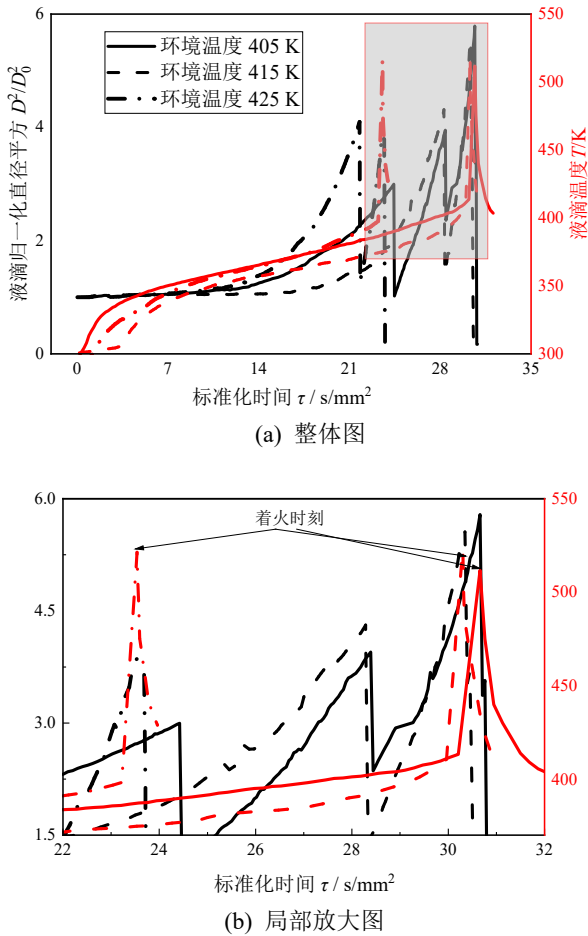


图6 不同环境温度下液滴归一化直径平方和液滴温度随时间变化

Fig.6 Droplet normalized diameter squared and droplet temperature versus time at different ambient temperatures

由图6(a)可以看出,当环境温度为425 K时,ADN液滴在微爆过程中生存时间最短;当环境温度为405 K时,液滴生存时间最长;环境温度为415 K时的液滴生存时间居中,但与环境温度为405 K时液滴生存时间相差较小。因此,ADN液滴在微爆过程中的生存时间随着环境温度的升高而减少。

由图6(b)可以看出,在液滴微爆阶段,液滴归一化直径平方的波动值随环境温度的升高逐渐降低。当环境温度为425 K时,液滴归一化直径平方波动最小;当环境温度为405 K时,液滴归一化直径平方波动最大,但与环境温度为415 K相比,波动值相差较小。

综合图6可以看出,三种不同环境温度下,液滴温度达到环境温度所用的时间与液滴生存时间相差较小,这是因为液滴着火后会在很短的时间内燃烧完成。在液滴燃烧的那一刻,液滴温度会达到一个远高于环境温度的最大值,随后又快速下降至环

境温度附近。三种不同环境温度下,着火时刻液滴温度达到的最大值相差较小,但最大值产生的时刻不同。

图7给出的是三种环境温度下,液滴微爆延迟时间及液滴微爆强度的对比。

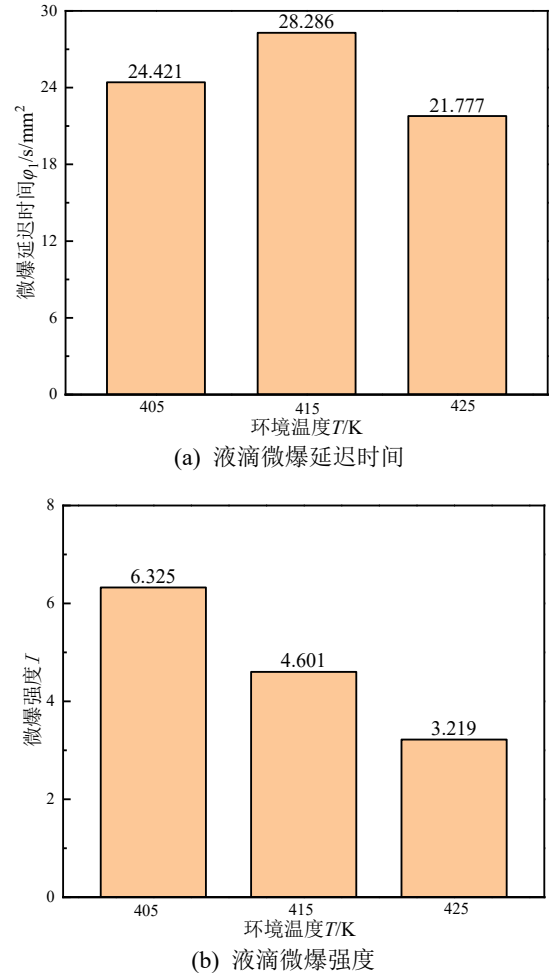


图7 环境温度对液滴微爆延迟时间及微爆强度的影响
Fig.7 Influence of ambient temperature on droplet micro-explosion delay time and micro-explosion intensity

由图7(a)可以看出,当环境温度为415 K时,液滴微爆延迟时间最长;当环境温度为425 K时,微爆延迟时间最短,与温度为405 K相比,微爆延迟时间相差较小。因此,对于二硝酰胺铵液滴,液滴微爆延迟时间不会随环境温度的增加而缩短,这可能是由于液滴微爆的发生条件与环境温度并不存在负相关关系。

由图7(b)可以看出,当环境温度为405 K时,液滴微爆强度最大,与环境温度为415 K、425 K相比,微爆强度分别增加37.49%、96.53%;当环境温度为425 K时,液滴微爆强度最小,与环境温度为415 K相比,微爆强度减少30.04%。由此可知,对于二硝酰胺铵液滴,随着环境温度不断升高,液滴微爆强度逐渐减小,但减小幅度也逐渐变小。

图 8 给出的是三种环境温度下,液滴微爆持续时间及其所占液滴生存时间百分比、当量蒸发速率及液滴着火时刻的对比。

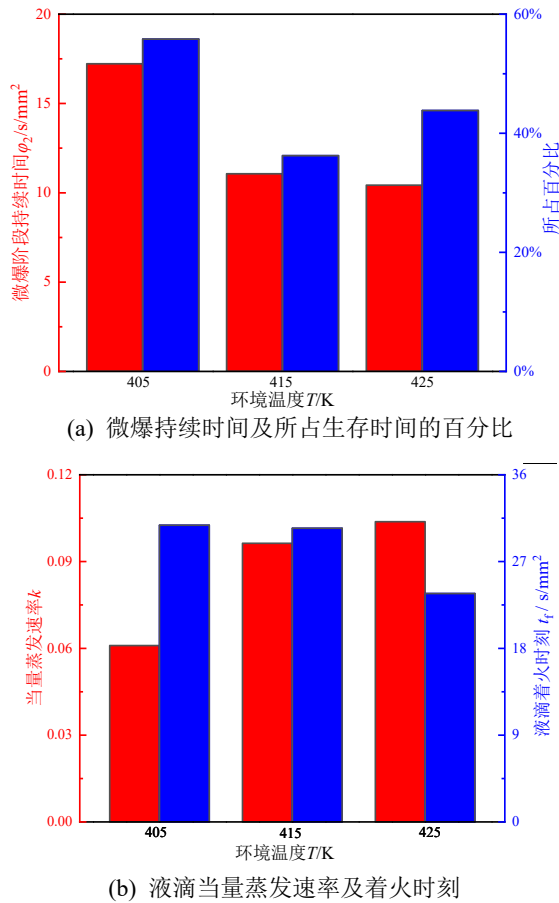


图 8 环境温度对液滴微爆持续时间、当量蒸发速率和着火时刻的影响

Fig.8 Influence of ambient temperature on micro-explosion duration, equivalent evaporation rate and ignition time

由图 8(a)可以看出,当环境温度为 405 K 时,液滴微爆持续时间最长,与环境温度为 415 K、425 K 相比,液滴微爆持续时间分别增加 55.64%、65.25%;当环境温度为 425 K 时,液滴微爆持续时间最短,与温度为 415 K 相比,微爆持续时间减少 5.81%。因此,对于二硝酸铵液滴,随着环境温度越高,液滴微爆持续时间逐渐减小。

另外,由图 8(a)还可以看出,当环境温度为 415 K 时,液滴微爆持续时间所占液滴生存时间百分比最低;当环境温度为 405 K 时,所占百分比最高,与温度为 415 K、425 K 相比,所占百分比分别增加 54.05%、27.36%。因此,对于二硝酸铵液滴,随着环境温度不断升高,液滴微爆持续时间所占百分比先减小后增加,即液滴微爆持续时间所占百分比与环境温度并不存在负相关关系,这和液滴微爆持续时间与环境温度的关系不一致。

由图 8(b)可以看出,当环境温度为 425 K 时,

液滴当量蒸发速率最高,与温度为 405 K、415 K 相比,分别增加 70.27%、7.75%;当环境温度为 405 K 时,当量蒸发速率最低;环境温度 415 K 与 405 K 时相比,当量蒸发速率增加 58.02%。因此,对于二硝酸铵液滴而言,随着环境温度升高,液滴当量蒸发速率会不断增加,但增加速率会越来越小。

另外,由图 8(b)还可以看出,当环境温度为 425 K 时,液滴着火时刻最早,与环境温度为 405 K、415 K 相比,液滴着火时刻分别提前 23.01%、22.21%;当环境温度为 405 K 时,着火时刻最晚,环境温度 415 K 与 405 K 时相比,着火时刻仅提前 1.02%。因此,对于二硝酸铵液滴而言,液滴着火时刻会随环境温度的升高而提前。

3.2 液滴初始直径对 AND 微爆特性的影响

除了环境温度,液滴初始直径也是影响液滴微爆特性的一个重要因素。本小节将探究液滴初始直径对二硝酸铵微爆特性的影响。

图 9 给出的是在环境温度为 415 K、环境压力为标准大气压的条件下,液滴初始直径分别为 0.98 mm、1.24 mm、1.42 mm 时,ADN 液滴在微爆过程中的形态变化。

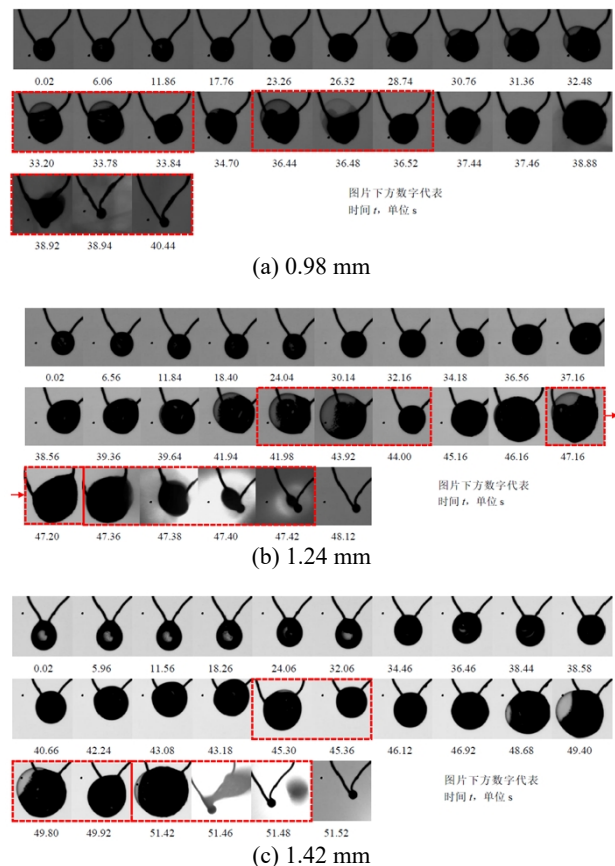


图 9 不同液滴初始直径下 ADN 液滴微爆过程中的形态图
Fig.9 Image of droplet morphology during micro-explosion of ADN droplets at different initial droplet diameters

由图 9 可以看出,在图 9(a)中 ADN 液滴共发生两次微爆,两次微爆后的液滴体积变化相差不大,且最后一次微爆发生后又经过一段时间,液滴膨胀后才发生着火现象。在图 9 (b)中 AND 液滴也发生两次微爆,两次微爆后的液滴体积变化相差较大,之后液滴发生着火现象。在图 9(c)中 ADN 液滴同样发生两次微爆,两次微爆后的液滴体积变化也相差较大,之后液滴发生着火现象。

通过对比图 9 的三幅图可以看出,在环境温度高于沸点的前提下,三种液滴初始直径下 ADN 液滴均会发生着火现象;液滴微爆发生的次数与液滴初始直径的相关性不强:

图 10 给出的是,将液滴形态变化经图像处理,液滴直径平方(左侧纵坐标,图中对应黑色线条)及液滴温度(右侧纵坐标,图中对应红色线条)随实际时间的变化。

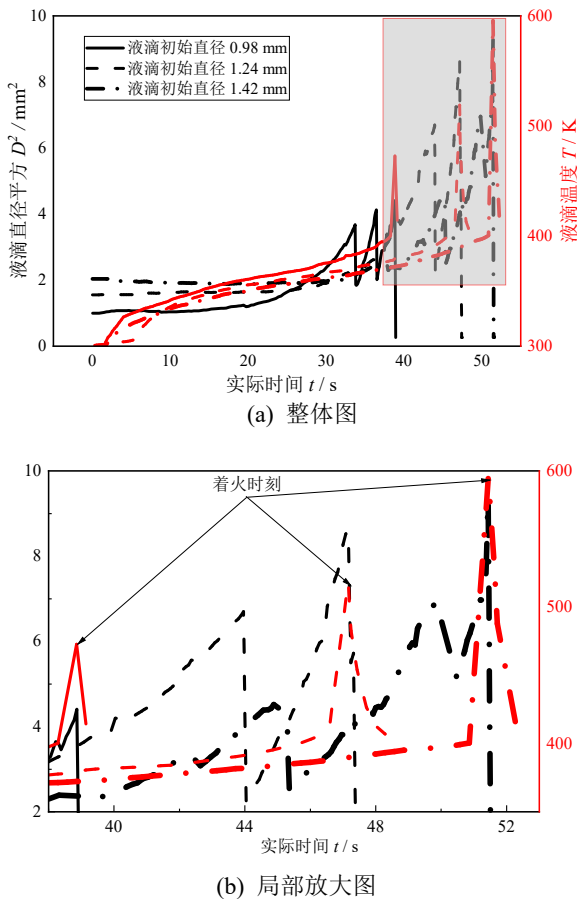


图 10 不同液滴初始直径下液滴直径平方和液滴温度随时间变化

Fig.10 Droplet normalized diameter squared and droplet temperature versus time at different initial droplet diameters

由图 10(a) 可以看出,当液滴初始直径为 1.42 mm 时,ADN 液滴在微爆过程中生存时间最长;当液滴初始直径为 0.98 mm 时,液滴生存时间最短;液滴初始直径为 1.24 mm 的液滴生存时间居中。因

此,ADN 液滴在微爆过程中的生存时间随着液滴初始直径的增大而加长。

由图 10(b) 可以看出,在液滴微爆阶段,当液滴初始直径为 1.42 mm 时,液滴直径平方的最大值最大;直径为 0.98 mm 时,液滴直径平方的最大值最小。这说明微爆过程中液滴最大直径与液滴初始直径存在正相关关系。

综合图 10 可以看出,三种不同液滴初始直径下,液滴温度达到环境温度的所用时间相差较大。初始直径为 1.42 mm 时,液滴温度达到环境温度所用时间最长,液滴燃烧时液滴温度最高;初始直径为 0.98 mm 时,所用时间最短,液滴燃烧时液滴温度也最低;说明液滴初始直径越大,液滴燃烧时液滴温度越高。这是因为液滴初始直径越大,本身携带能量越大,燃烧时释放的热量也就相对越多。

图 11 给出的是三种液滴初始直径下,液滴微爆延迟时间及液滴微爆强度的对比。

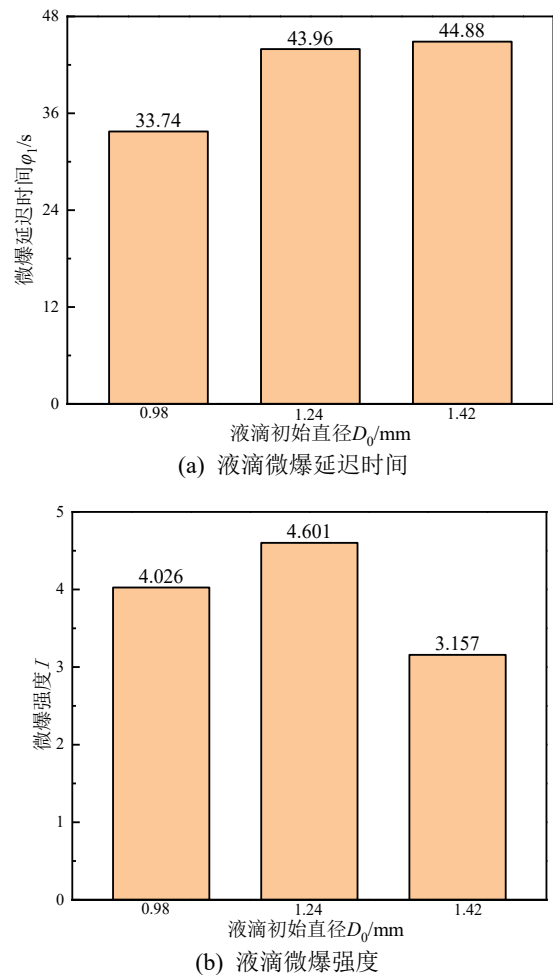


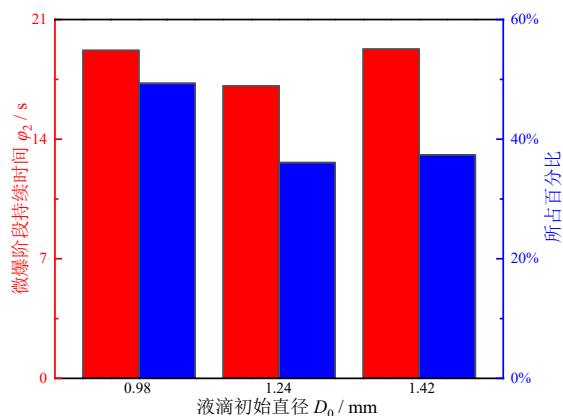
图 11 液滴初始直径对液滴微爆延迟时间及微爆强度的影响
Fig.11 Influence of droplet initial diameter on droplet micro-explosion delay time and micro-explosion intensity

由图 11(a)可以看出,液滴初始直径为 1.42 mm,液滴微爆延迟时间最长,与直径为 0.98 mm、1.24

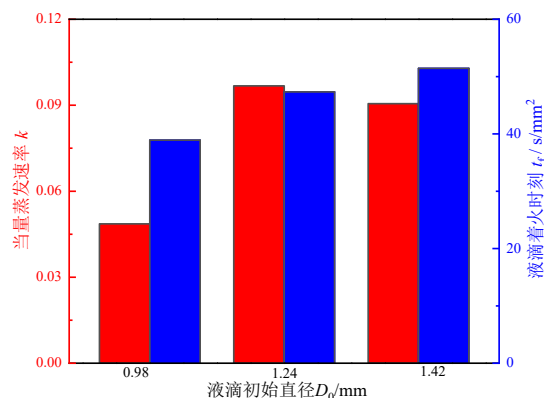
mm 相比, 分别增加 33.02%、2.11%; 液滴初始直径为 0.98 mm 时, 液滴微爆延迟时间最短; 液滴初始直径为 1.24 mm 时, 与直径为 0.98 mm 相比, 微爆延迟时间增加 30.29%。因此, 随着液滴初始直径的变大, 液滴微爆延迟时间会增加, 但增长幅度会逐渐变小。

由图 11(b) 可以看出, 液滴初始直径为 1.24 mm 时, 液滴微爆强度最大, 与直径为 0.98 mm、1.24 mm 相比, 微爆强度分别增加 14.26%、45.73%; 当初始直径为 1.42 mm 时, 液滴微爆强度最小。由此可知, 对于二硝酰胺铵液滴, 液滴微爆强度不会随液滴初始直径的增大而一直增加, 而是当液滴初始直径增加到某一值时, 微爆强度开始逐渐减小。

图 12 给出的是三种液滴初始直径下, 液滴微爆持续时间及其所占液滴生存时间百分比、当量蒸发速率及液滴着火时刻的对比。



(a) 微爆持续时间及所占生存时间的百分比



(b) 液滴当量蒸发速率及着火时刻

图 12 液滴初始直径对液滴微爆持续时间、当量蒸发速率和着火时刻的影响

Fig.12 Influence of droplet initial diameter on micro-explosion duration, equivalent evaporation rate and ignition time

由图 12(a)可以看出, 当液滴初始直径为 1.42 mm 时, 液滴微爆持续时间最长, 当液滴初始直径为 1.24 mm 时, 液滴微爆持续时间最短, 液滴初始

直径为 0.98 mm 时的液滴微爆持续时间居中; 直径为 1.42 mm 时与直径分别为 0.98 mm、1.24 mm 时相比, 微爆持续时间分别增加 0.41%、12.62%。因此, 对于二硝酰胺铵液滴, 随着液滴初始直径的不断增大, 液滴微爆持续时间并非一直增大, 而是呈现先减小后增大的趋势, 即液滴微爆持续时间与液滴初始直径并不存在正相关关系。

另外, 由图 12(a)还可以看出, 随着液滴初始直径的不断增大, 液滴微爆持续时间占液滴生存时间的百分比呈现先减小后增大的趋势, 这和液滴微爆持续时间与液滴初始直径的关系是一致的。

由图 12(b)可以看出, 当液滴初始直径 1.24 mm 时, 液滴当量蒸发速率最高, 与直径分别为 0.98 mm 和 1.42 mm 时相比, 分别增加 99.02%、6.87%; 当液滴初始直径为 0.98 mm 时, 当量蒸发速率最低。因此, 对于二硝酰胺铵液滴而言, 液滴当量蒸发速率会随着液滴初始直径的增大而呈现先增大后减小的趋势, 即液滴当量蒸发速率与液滴初始直径亦不存在正相关关系。

另外, 由图 12(b)还可以看出, 液滴初始直径为 1.42 mm 时, 液滴着火时刻最晚, 与直径分别为 0.98 mm 和 1.24 mm 时相比, 液滴着火时刻分别延迟 32.17%、8.71%; 直径为 0.98 mm, 着火时刻最早。由此可知, 对于二硝酰胺铵液滴, 液滴着火时刻会随着液滴初始直径的增大而不断延迟, 但延迟趋势越来越小。这是因为液滴初始直径越大, 液滴着火时所需能量越多, 在相同条件下, 吸收能量所用时间也就较长, 着火时刻延迟。

4 结论

本文以二硝酰胺铵(ADN)液滴为研究对象, 搭建了挂滴式试验系统, 首先分析了 ADN 液滴在微爆过程中的形态变化, 同时给出了表征液滴微爆特性的参数; 在此基础上, 开展了环境温度和液滴初始直径对液滴微爆特性的影响规律研究。

(1) ADN 液滴在微爆过程中的生存时间随环境温度的升高而减少; 在液滴微爆阶段, 液滴归一化直径平方的波动值随环境温度的升高逐渐降低; 三种不同环境温度下, 液滴温度达到环境温度所用的时间与液滴生存时间相差较小; 着火时刻液滴温度会达到一个远高于环境温度的最大值, 不同环境温度下该最大值相差较小, 但最大值产生的时刻不同。

(2) ADN 液滴微爆延迟时间不会随环境温度的增加而缩短; 液滴微爆强度和液滴微爆持续时间

均会随着环境温度的不断升高而逐渐减小；液滴微爆持续时间所占液滴生存时间的百分比与环境温度并不存在负相关关系，这和液滴微爆持续时间与环境温度的关系不一致；液滴当量蒸发速率会随着环境温度的升高而不断增加，但增加速率会越来越小；液滴着火时刻会随环境温度的升高而提前。

(3) 在环境温度高于沸点的前提下，三种液滴初始直径下 AND 液滴均会发生着火现象；液滴微爆发生的次数与液滴初始直径的相关性不强；ADN 液滴在微爆过程中的生存时间随着液滴初始直径的增大而加长；微爆过程中液滴的最大直径与液滴初始直径存在正相关关系；液滴初始直径越大，液滴燃烧时液滴温度越高。

(4) ADN 液滴微爆延迟时间会随着液滴初始直径的增大而增加；液滴微爆强度、液滴微爆持续时间和液滴当量蒸发速率与液滴初始直径均不存在正相关关系；随着液滴初始直径的不断增大，液滴微爆持续时间占液滴生存时间的百分比呈现先减小后增大的趋势，这和液滴微爆持续时间与液滴初始直径的关系是一致的；液滴着火时刻会随着液滴初始直径的增大而不断延迟，但延迟趋势越来越小。

参考文献:

- [1] Sayin C, Ilhan M, Canakci M, et al. Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel-methanol blends[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(5): 1261-1269.
- [2] 孙雯禹. 几种新型含氧燃料的燃烧反应动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [3] Ivanov V M, Nefedov P I. Experimental investigation of the combustion process of natural and emulsified liquid fuels[J]. *NASA Report*, 65N14944, 1962.
- [4] 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.
- [5] Wang C H, Hung W G, Fu S Y, et al. On the burning and microexplosion of collision-generated two-component droplets: miscible fuels[J]. *Combustion and Flame*. 2003, 134(3): 289-300.
- [6] Avulapati M M, Ganippa L C, Xia J, et al. Puffing and micro-explosion of diesel-biodiesel-ethanol blends[J]. *Fuel*, 2015, 166: 59-66.
- [7] Hou S S, Rizal F M, Lin T H, et al. Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends. *Fuel*, 2013, 113: 31-42.
- [8] Mura E, Massoli P, Josset C, et al. Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 43: 63-70.
- [9] Watanabe H, Suzuki Y, Harada T, et al. Development of a mathematical model for predicting water vapor mass generated in micro-explosion[J]. *Energy*, 2011, 36(7): 4089-4096.
- [10] Tarlet D, Allouis C, Bellettre J. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 107: 179-183.
- [11] 迟浩. 掺水乳化柴油单液滴蒸发特性可视化试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [12] 张小卿. 含水乙醇乳化燃料喷雾燃烧特性及消烟机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [13] 张依姗. 生物柴油/乙醇含气液滴微爆特性的仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [14] 玄铁民, 孙中成, 李文豪等. 甲醇/正辛醇/加氢催化生物柴油单液滴蒸发与微爆特性研究[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(01): 22-30.
- [15] 孟柯生. 生物柴油及其混合燃料的微爆特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [16] 彭志军, 白龙, 白富强等. ABE/柴油单液滴燃烧微爆现象的试验[J]. *内燃机学报*, 2019, 37(03): 273-279.
- [17] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. *Digital Image Processing Using MATLAB (2nd edition)* [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2013.
- [18] Cen C, Wu H, Lee C F, et al. Experimental investigation on the sputtering and micro-explosion of emulsion fuel droplets during impact on a heated surface[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 132: 130-137.
- [19] Omar M, Dominique T, Patrizio M, et al. Parametric study of the micro-explosion occurrence of W/O emulsions[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 133: 90-97.
- [20] Rao D C K, Syam S, Karmakar S, et al. Experimental investigations on nucleation, bubble growth, and micro-explosion characteristics during the combustion of ethanol/Jet A-1 fuel droplets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 89: 284-294.
- [21] Shen S, Sun K, Che Z, et al. Mechanism of micro-explosion of water-in-oil emulsified fuel droplet and its effect on soot generation[J]. *Energy*, 2020, 191: 116488.
- [22] Antonov D, Kuznetsov G V, Strizhak P A, et al. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 210: 479-489.
- [23] Antonov D, Piskunov M, Strizhak P, et al. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating[J]. *Fuel*, 2020, 259: 116241.