

DOI: 10.7652/xjtuxb201705014

单滴燃料高压着火与燃烧特性的试验研究

马志豪¹, 贾义¹, 李智博¹, 朱宇东¹, 陈占耀¹, 胡二江²

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 471003, 河南洛阳;

2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用挂滴法对正常重力条件下正十七烷液滴的高压着火与燃烧现象进行了试验研究, 采用嵌入液滴内部的热电偶和高速相机分别记录了液滴温度变化和液滴发展情形。试验结果表明: 随着环境压力的提高, 液滴着火区域减小且靠近液滴表面, 燃烧火焰中碳烟的生成增多, 火焰宽度减小; 在亚临界压力下液滴温度曲线在着火时突变, 之后会维持一段较为平坦的过程, 而在超临界压力下液滴温度曲线斜率较大, 液滴界面温度超过了燃料临界温度; 环境压力小于0.6倍临界压力时, 液滴着火温度随着压力的提高迅速升高且在临界压力附近温升停止, 而环境压力大于1.2倍临界压力时, 液滴着火温度随着压力的提高继续升高; 亚临界压力下液滴燃烧时间随着环境压力的提高迅速缩短, 此时相平衡控制着液滴燃烧速率, 而超临界压力下液滴燃烧时间不再继续缩短且趋于稳定, 此时液滴已不存在相变过程, 扩散系数开始影响燃烧速率。该结果可为高压环境中发动机着火及燃料燃烧特性研究提供参考。

关键词: 燃料液滴; 燃烧; 超临界; 液滴温度

中图分类号: V1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)05-0095-07

High Pressure Ignition and Combustion Characteristics of Single Drop Fuel

MA Zhihao¹, JIA Yi¹, LI Zhibo¹, ZHU Yudong¹, CHEN Zhanyao¹, HU Erjiang²

(1. College of Vehicle & Transportation Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With hanging drop method under normal gravity condition, the droplet of heptadecane in high pressure ignition and combustion phenomena is detailedly researched. Embedded thermocouple inside the droplet and high-speed cameras record the droplet temperature variation and droplet development images. The experiment shows that with environment pressure increasing, the fire region of droplet reduces and tends to liquid drop surface, the carbon smoke generated in burning flame increases and flame width reduces; in subcritical pressure environment, the temperature curve of droplet after the corresponding mutation of burning maintains a flat process; in supercritical pressure environment, the temperature of droplet rises at a high rate, and the interface temperature gets over the fuel critical one. When ambient pressure is less than 0.6 time of critical pressure, the ignition temperature of droplet increases rapidly with ambient pressure and stops near critical pressure, but when environmental pressure is higher than 1.2 times of the critical pressure, the ignition temperature of droplet continues to increase with the increasing pressure. The droplet combustion time under subcritical pressure decreases rapidly

收稿日期: 2016-09-15。 作者简介: 马志豪(1965—),男,博士,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91441118)。

网络出版时间: 2017-02-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170223.1106.004.html>

with the increasing ambient pressure, and the droplet combustion rate is controlled by the phase equilibrium; under supercritical environment pressure, droplet combustion time no longer continues to decrease but tends to stable, droplet phase transition does not exist in this period, and the diffusion coefficient begins to affect combustion rate.

Keywords: fuel droplet; combustion; supercritical condition; droplet temperature

直喷式内燃机、液体火箭发动机、新一代燃气轮机、脉冲爆震发动机和液体燃料冲压发动机等高压燃烧设备的燃烧室环境均达到了喷射燃料的热力学临界条件^[1-3],其中直喷自然吸气柴油机的压缩压力在 4 MPa 以上,燃烧峰值压力在 8 MPa 左右,对于增压柴油机而言,随着增压压力的显著提高,以及两级、甚至三级增压的应用,燃烧峰值压力高达近 20 MPa。大多数液体烃类燃料的临界压力均在 1.5~3.0 MPa 范围,可见对于直喷式柴油机来说,缸内压力超过燃料临界压力点已不是一种小概率现象^[4]。单滴的研究是掌握喷雾燃烧机理和计算模型的基础,而高压以及超临界环境中燃料液滴燃烧特性更是燃烧学领域长期以来备受关注的研究内容。高压下环境气体分子间相互作用不可忽略,常压模型的理想气体假设已不成立;高压下液体燃料对环境气体的溶解性不能忽略,液滴在溶解环境气体物质时产生的多组分混合物会显著影响液滴的直径、温度和寿命^[5],简化处理的常压模型也未考虑溶解问题。以亚临界初始温度喷射的液体燃料经雾化后进入燃烧室,雾化形成的燃料液滴在高于临界压力和临界温度下经历了蒸发、与空气混合、着火和燃烧过程,并在持续期内从亚临界温度迅速升温,此时很可能发生由亚临界状态向超临界状态迁移,而超临界状态下流体物性会发生急剧变化,使得该状态流体具有许多独特的性质,显然采用低压蒸发与燃烧的传统计算模型不再适用^[6]。目前,几乎所有的计算流体动力学(CFD)软件中喷雾燃烧模型均以常压下燃料液滴的蒸发与燃烧特性为基础,这样的模型在应用于高压超临界环境时就会使计算结果不精确,甚至与实际情况的差异较大^[7]。

近年来,国内主要开展了常压、低压下液滴蒸发与燃烧的试验研究^[8-16],以及高压环境中燃料液滴蒸发与燃烧的数值研究^[17-24],张蒙正等采用重活塞驱动器技术对煤油和偏二甲肼(UDMH)单滴超临界蒸发和燃烧进行了初步试验研究^[25-26]。Faeth 等研究发现,液滴燃烧时间随环境压力的提高而减少,初始燃烧时间随环境压力的提高而延长^[27]。Kadota 等研究发现,在小于临界压力附近液滴燃烧时间

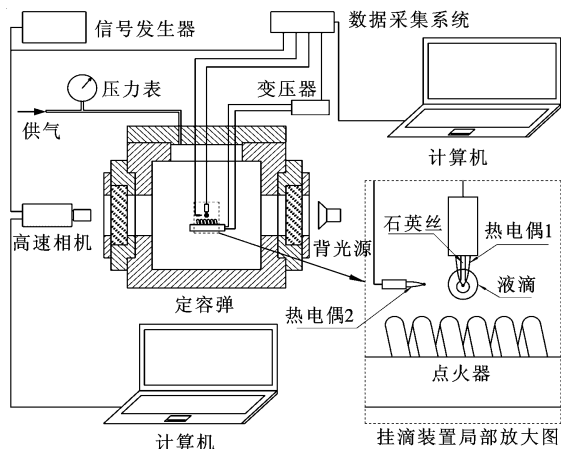
随环境压力的提高而迅速缩短,大于临界压力时燃烧时间进一步缩短,但降幅明显减缓^[28]。Sato 等发现,在超临界压力区正常重力和微重力下液滴燃烧时间均随环境压力的提高而延长^[29],这与 Kadota 等结果存在差异。尽管已有大量文献对液滴燃烧方面做了相关的试验和数值研究,但人们对高压环境中液滴燃烧现象的认识仍然不足,甚至不同文献得出了不一致的结论。

柴油主要是由原子数为 15~18 的长链烷烃组成的复杂混合燃料,直喷式内燃机燃烧室环境在喷油时刻已达到柴油中绝大部分单质成分的临界条件。所以,本文选取正十七烷进一步开展高压中单滴着火与燃烧的试验研究。

1 试验装置

高压中单滴着火与燃烧的试验装置示意如图 1 所示,主要包括定容弹、挂滴装置、背光源、高速相机和数据采集系统等。定容弹两侧装有直径为 130 mm、厚为 80 mm 的石英观察窗,挂滴用石英细棒直径为 0.33 mm,为了便于挂滴,将石英细棒端部热加工成直径为 0.73 mm 的圆球。燃料液滴通过 10 μL 微量注射器(最小刻度为 0.2 μL)挂在石英细棒端部,液滴初始直径 d_0 。采用等容积法计算获得,即通过微量注射器可以读出挂滴时燃料体积,从而计算出假如液滴为球形时对应的直径,此直径被视为液滴初始直径。采用 NAC Memrecam GX-8 高速相机和尼康 MICRO NIKKOR 60 mm 镜头拍摄液滴燃烧过程,试验所用背光光源为钨卤灯。

试验用单质燃料为正十七烷($\text{C}_{17}\text{H}_{36}$,临界压力 $P_{\text{cr}}=1.34$ MPa,临界温度 $T_{\text{cr}}=463$ $^{\circ}\text{C}$)。液滴在定容弹内挂好后通过压缩空气瓶充入不同压力的背压环境(0.1~2.1 MPa),背压 P_{a} 与燃料临界压力 P_{cr} 之比定义为对比压力 P_r ,环境初始温度为室温。由于正十七烷的沸点较高,不易挥发,在充入压缩空气的过程中没有观察到液滴直径的变化,所以保证了不同背压下液滴大小的一致性。液滴下方的镍铬加热线圈作为点火器,变压器为其提供电压以快速引燃液滴,这也保证了着火时液滴大小的一致性。为



测量液滴温度,在液滴内部紧靠石英细棒端部位置嵌入了一支直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的 K 型热电偶,即图 1 中热电偶 1。数据采集系统采集热电偶电压信号,通过 K 型热电偶对应的温度与热电动势多项式公式计算出液滴温度 T_1 。温度计算多项式公式是基于冷端温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时得出的,即式中的电压信号为 $E(T_1, 0)$,而在实际测量中冷端温度为室内温度,即实际测量电压信号为 $E(T_1, T_0)$,而 T_0 即为室内温度,那么直接使用多项式公式势必会给试验结果带来误差。所以,本文在采用多项式计算温度前进行了冷端补偿计算,即通过公式 $E(T_1, 0) = E(T_1, T_0) + E(T_0, 0)$ 计算出 $E(T_1, 0)$,继而计算出所测温度值,公式中室内温度 T_0 。由水银温度计测得, $E(T_0, 0)$ 是冷端温度为 T_0 时的校正值,可以从 K 型热电偶分度表查得。信号发生器输出的 TTL(晶体管晶体管逻辑电路)电平信号用于同时触发高速相机和数据采集系统。

2 试验结果及分析

加热线圈通电后迅速对液滴周围环境进行加热,液滴温度升高后其表面从液相变为气相并与周围环境空气混合,在达到着火条件后液滴开始着火,此时液滴温度信号发生突变。为研究燃烧液滴瞬态着火过程在不同环境压力下的变化,本文采用高速相机拍摄了正十七烷单滴在 0.1、0.9、1.7 MPa 环境压力下的无背光瞬态着火过程。由于瞬态着火过程持续时间很短,所以高速相机拍摄频率设定为 2 000 帧/s, d_0 为 1.24 mm。为观察瞬态着火过程微弱蓝焰,高速相机曝光时间设定为 500 μ s,此曝光时间为 2 000 帧/s 允许的最大值,拍摄结果如图 2 所示。由图可以看出:环境压力为 0.1 MPa 时液滴

着火过程出现了较为清晰的蓝焰并迅速传播;在经历大约 4 ms 的蓝焰过程之后开始出现了亮度更强的白炽热焰,蓝焰被热焰覆盖且难以区分。可见,压力增大会使环境气体导热系数增大,反应物升温加速,活化分子浓度增大,单位体积内的分子数增多,这显著地增加了分子有效碰撞频率,从而加速了化学反应速率,致使高压热焰提前出现,高压下热焰较低压更加明亮,蓝焰被掩盖后更难以发现。

高压下热焰更加明亮的原因可能有两个方面:一是高压下化学反应速率提高,导致放热率升高,火焰中能够发出更强光的自由基 C_2 和 CH 的生成速率增大,即火焰中间基的化学发光增强;二是高压下火焰中发生高温裂解的燃料增多,碳烟浓度增大,高温裂解燃料的辐射发光强度增大。高压下瞬态着火过程几乎在液滴表面区域发生,热焰形成团状并迅速长大,随着环境压力的提高液滴着火区域变小且更加靠近液滴表面,特别是环境压力为 1.7 MPa 时瞬态着火过程明亮火焰区域团聚在液滴周围,其形状接近球形。环境压力提高时,气体密度增大,扩散阻力增大,燃油蒸汽由液滴表面向外扩散的速率减小,化学反应速率提高,化学反应特征时间缩短,着火位置更加靠近液滴表面。

本文通过高速相机拍摄了液滴燃烧过程的有背光图像,以观察火焰的透光性和结构,从而研究不同环境压力下液滴燃烧过程中碳烟生成量的变化及火焰尺寸的变化。有背光图像拍摄时相机曝光时间设定为 $2.1\ \mu\text{s}$,拍摄频率为 $1\ 000\ \text{帧/s}$ 。在 $2.1\ \mu\text{s}$ 的曝光下基本消除了火焰本身辐射光对成像的影响,由此可以获得不同压力下液滴燃烧过程中火焰透光性的变化,拍摄结果如图 3 所示,相邻图像之间的时间间隔为液滴燃烧时间 t_{com} (从液滴着火至燃烧结束所持续的时间)的 0.1 倍。由图可以发现,随着环境压力的提高,火焰中碳烟的生成量增多。受正常重力作用下燃烧液滴周围热气流驱动的自然对流的影响,液滴火焰均为包焰结构。自然对流影响了无自然对流条件下球形对称燃烧的浓度场、温度场,斯蒂芬流不再保持球形对称,同时自然对流改变了火焰结构,燃烧区域的输运特性受到严重影响。火焰中碳烟量由其生成速率和氧化速率的综合效果决定,生成过程经历了结晶、成核和长大。环境压力提高时,化学反应速率增大,碳烟前驱物组分中多环芳香烃的生成速率增大,成核速率增大,从而引起碳烟生成量增多。此外,高压下的化学反应速率和燃烧放热速率使得火焰具有更高的温度,而高温又加速

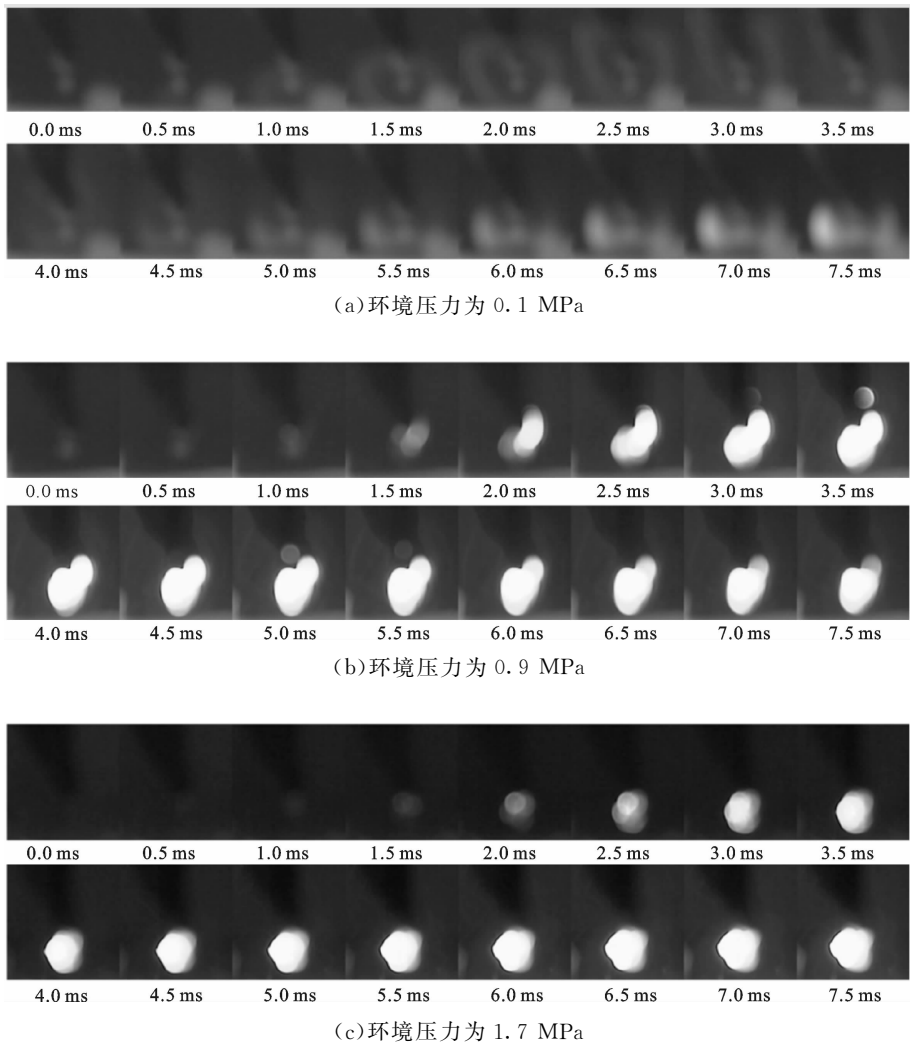


图 2 不同环境压力下液滴瞬态着火过程的无背光图像

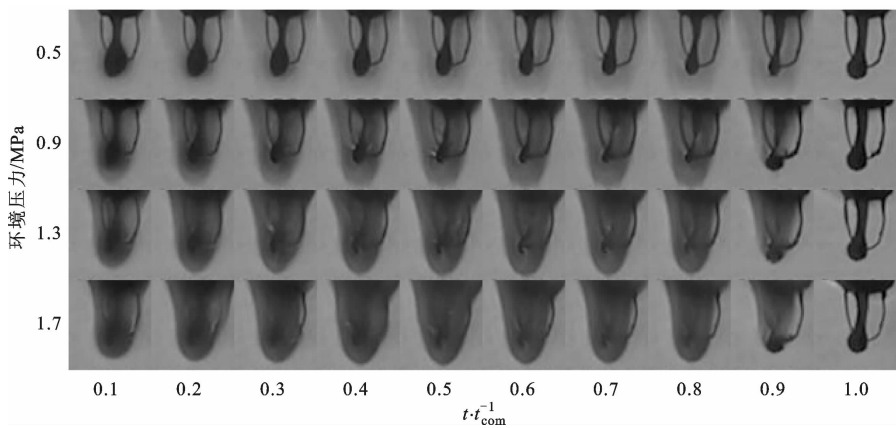


图 3 不同环境压力下液滴燃烧过程的有背光图像

了燃料热解、多环芳香烃的生成,进而碳烟成核和长大过程得到促进;然而,温度升高也会引起碳烟氧化速率提高。所以,综合影响结果表现为,碳烟生成量随着环境压力的升高而增多。

液滴燃烧过程中火焰尺寸对液滴蒸发过程有着

重要影响,火焰尺寸的变化将改变火焰锋面与液滴表面的距离,从而改变火焰对液滴的传热,亦距离液滴表面更近的火焰会加快液滴的蒸发速率。为研究燃烧过程中火焰尺寸的变化,本文对液滴火焰结构进行了测量,并引入了火焰宽度这一参数,即过液滴

中心的水平直线与火焰边界交点之间的距离。不同环境压力下正十七烷液滴燃烧过程中最大火焰宽度的变化如图 4 所示。

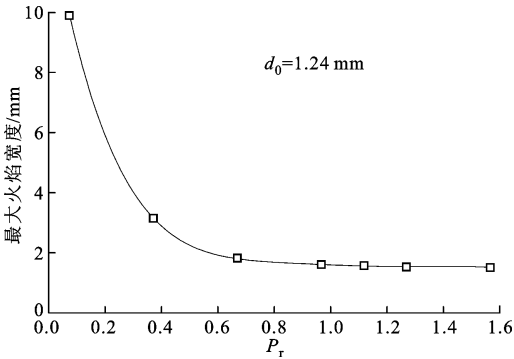


图 4 不同对比压力下正十七烷液滴在燃烧过程中最大火焰宽度的变化

由图 4 可以看出,在亚临界和超临界压力范围内最大火焰宽度呈现出随对比压力的增加而减小的趋势,但在 P_r 小于 0.6 时最大火焰宽度迅速减小,而在 P_r 大于 0.6 时缓慢减小。环境压力提高时,扩散阻力及自然对流强度的增大均会引起火焰宽度减小,但随着火焰更加接近液滴表面,相应位置处斯蒂芬流(斯蒂芬流为燃油蒸气运动的宏观流动)强度增大,受其影响火焰向远离液滴表面的方向输运,最终火焰的宽度减小,速率下降。

不同对比压力下正十七烷液滴从开始着火至燃烧结束时的温度变化如图 5 所示,液滴着火时刻为横坐标 0 点。在亚临界压力下,液滴温度曲线在着火时发生突变,之后会维持一段较为平坦的过程,该过程即为平衡蒸发阶段,对应液滴温度称为湿球温度,或者伪湿球温度^[5],此时液滴从环境气体中吸收热量并全部用于液滴的蒸发,符合准定常状态假设。当压力超过燃料临界压力时温度曲线不再处于平衡蒸发阶段,从着火开始至燃烧结束液滴温度曲线一直以较高的斜率上升,不符合准定常状态假设。在

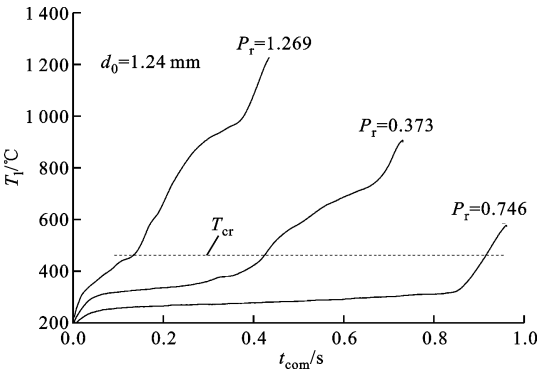


图 5 不同对比压力下正十七烷液滴的温度变化

超临界压力下液滴温度不再受相变过程制约,燃烧过程中液滴表面已进入超临界状态,蒸发焓变为 0,环境传给液滴的热量将全部用于液滴升温,液滴温度持续上升,无湿球温度。

随着液滴不断燃烧,液滴直径相应减小,内部热电偶热结点开始露出液滴表面,液滴温度曲线出现突变,此时对应的温度定义为液滴界面温度 T_s 。不同对比压力下正十七烷液滴的界面温度变化如图 6 所示。可以看出,随着环境压力的提高,液滴界面温度呈现出增大的趋势,当环境压力超过燃料临界压力时液滴界面温度会超过其临界温度,再次证明了在超临界压力下液滴燃烧时的界面状态会由亚临界向超临界迁移。

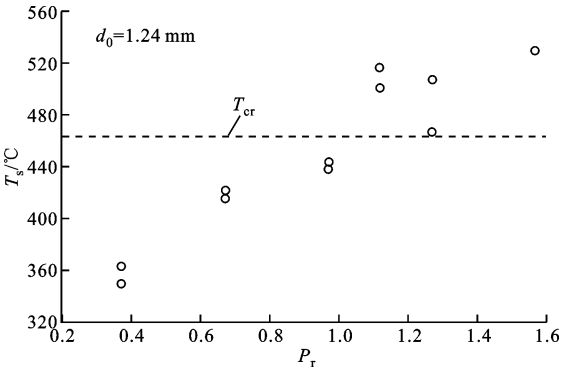


图 6 不同对比压力下正十七烷液滴的界面温度变化

液滴着火时对应的液滴温度定义为液滴着火温度 T_f ,正十七烷液滴着火温度随对比压力的变化如图 7 所示。可以看出, P_r 小于 0.6 时液滴着火温度随环境压力的提高迅速升高, P_r 在 1 附近时液滴着火温度停止, P_r 大于 1.2 时液滴着火温度在试验压力范围内继续提升。Segawa 等研究了微重力条件下十八醇液滴着火温度随压力的变化,发现在超临界压力区域液滴着火温度几乎不变^[30],而本文在正常重力条件下且 P_r 大于 1.2 时着火温度继续升高的试验现象,可能是因为高压下自然对流影响了燃

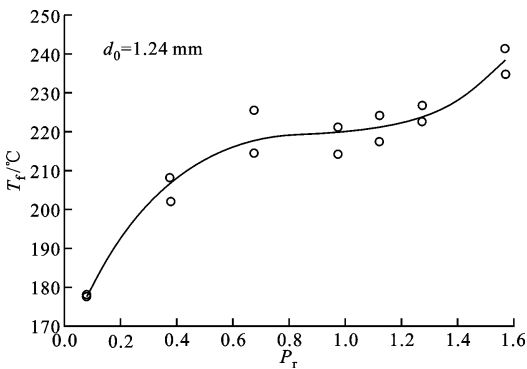


图 7 不同对比压力下正十七烷液滴的着火温度变化

油蒸气的输运特性及混合气的分布,以及环境气体影响了液滴的传热特性。

正十七烷液滴燃烧时间随对比压力的变化如图8所示。可以看出,在亚临界压力下液滴燃烧时间随着环境压力的提高迅速减小,而环境压力达到临界压力时燃烧时间已无明显变化,趋于一稳定值。在亚临界压力下,液滴表面状态不可能进入超临界状态,相平衡控制着液滴的蒸发速率,由于化学反应的时间尺度远小于相变物理过程,所以蒸发速率又决定着燃烧速率。随着压力的增大,尽管扩散系数减小,但增加的环境传热系数以及减小的燃料蒸发焓使得蒸发速率增大,最终致使燃烧时间缩短;在超临界压力下,液滴着火后被火焰包围着的液滴表面达到超临界状态,此时液滴表面张力和蒸发焓为0,不再存在相变过程,因此燃料和氧气扩散速率开始影响液滴燃烧速率。扩散系数随着环境压力的提高而减小,但压力的提高使得液滴温升速率增大,燃料温度升高又会促使液滴燃烧的速率增大,所以综合影响使得燃烧时间出现了在高于临界压力时趋于稳定的现象。可见,临界压力时燃烧时间的转变可以作为判断液滴是否进入超临界燃烧的重要依据。

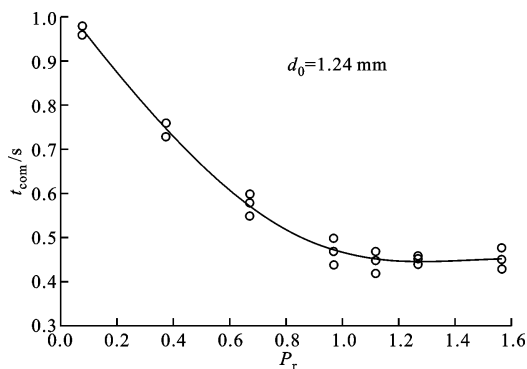


图8 不同对比压力下正十七烷液滴燃烧时间的变化

3 结 论

(1)常压下液滴着火过程出现了较为清晰的蓝焰且迅速传播,而在高压下蓝焰难以发现,且被热焰覆盖。随着环境压力的提高,液滴着火区域减小且更加靠近液滴表面,燃烧火焰中碳烟增多。 P_r 小于0.6时最大火焰宽度随环境压力的提高而迅速减小, P_r 大于0.6时最大火焰宽度减小的速率明显减缓。

(2)亚临界压力下,液滴温度曲线在着火时发生突变,之后维持一段较为平坦的过程,即平衡蒸发阶段,而在超临界压力下,从着火开始至燃烧结束时液滴温度一直以较高的斜率上升,不再符合准定常状

态假设。

(3)超临界压力下燃烧液滴界面温度会超过燃料临界温度; P_r 小于0.6时液滴着火温度随环境压力的提高而迅速升高, P_r 在1附近时温升停止, P_r 大于1.2时液滴着火温度在试验压力范围内继续提升。

(4)亚临界压力下,液滴蒸发速率决定着燃烧速率,此时液滴燃烧时间随着环境压力的提高而缩短,而在超临界环境压力下,被火焰包围着的液滴表面达到超临界状态,已不存在相变过程,燃料蒸气和氧气的扩散速率开始影响液滴燃烧速率,最终致使液滴燃烧时间随着环境压力的升高而趋于一稳定值。

参考文献:

- [1] BELLAN J. Supercritical (and subcritical) fluid behavior and modeling: drops, streams, shear and mixing layers, jets and sprays [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(4/5/6): 329-366.
- [2] MENG H, YANG V. Clustering effects on liquid oxygen (LOX) droplet vaporization in hydrogen environments at subcritical and supercritical pressures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(16): 11815-11823.
- [3] KUO K K. Principles of combustion [M]. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2005: 590.
- [4] 解茂昭. 内燃机跨临界超临界燃料喷雾混合过程的机理与模型 [J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(1): 1-9.
XIE Maozhao. Mechanism and modeling of transcritical/supercritical fuel spray and mixture formation in internal combustion engines [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(1): 1-9.
- [5] GIVLER S D, ABRAHAM J. Supercritical droplet vaporization and combustion studies [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1996, 22(1): 1-28.
- [6] YANG V. Modeling of supercritical vaporization, mixing, and combustion processes in liquid-fueled propulsion systems [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(1): 925-942.
- [7] JIA H, GOGOS G. Investigation of liquid droplet evaporation in subcritical and supercritical gaseous environments [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1992, 6(4): 738-745.
- [8] MA X, ZHANG F, HAN K, et al. Evaporation characteristics of acetone-butanol-ethanol and diesel blends droplets at high ambient temperatures [J]. Fuel, 2015, 160: 43-49.
- [9] WANG C H, PAN K L, UENG G J, et al. Burning behaviors of collision-merged water/diesel, methanol/

- diesel, and water+methanol/diesel droplets [J]. Fuel, 2013, 106: 204-211.
- [10] NIE W, HE B, ZHUANG F. Effects of NTO oxidizer convection velocity and pressure on the combustion characteristics of UDMH nonmetalized organic gel droplet: Experimental studies [C] // 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2013: 3714.
- [11] LIU Z, HU X, HE Z, et al. Experimental study on the combustion and microexplosion of freely falling gelled unsymmetrical dimethylhydrazine (UDMH) fuel droplets [J]. Energies, 2012, 5(12): 3126-3136.
- [12] HAN K, ZHAO C, FU G, et al. Evaporation characteristics of dual component droplet of benzyl azides-hexadecane mixtures at elevated temperatures [J]. Fuel, 2015, 157: 270-278.
- [13] HE B, NIE W, FENG S, et al. Effects of NTO oxidizer temperature and pressure on hypergolic ignition delay and life time of UDMH organic gel droplet [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2013, 38(5): 665-684.
- [14] 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.
- [15] 尹婷, 聂万胜, 何浩波. 偏二甲肼液滴燃烧特性及影响因素实验研究 [J]. 火箭推进, 2014, 40(5): 29-36.
YIN Ting, NIE Wansheng, HE Haobo. Experimental study on combustion characteristics of UDMH droplet and influence factors on combustion [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(5): 29-36.
- [16] 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, 2016, 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, 2016, 37(3): 847-853.
- [17] HE P, LI Y, ZHAO L. Evaporation of liquid fuel droplet at supercritical conditions [J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 54(2): 369-374.
- [18] FENG S, NIE W. Vaporization and combustion of lox droplets at supercritical conditions [C] // 42nd AIAA Thermophysics Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2011: 3639.
- [19] 璐刘, 舒盼盼, 刘彦丰, 等. 环境压力对双组分运动液滴蒸发特征影响的理论研究 [J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1488-1491.
- LIU Lu, SHU Panpan, LIU Yanfeng, et al. Theoretical study of effects of ambient pressure on evaporation characteristics of bicomponent moving droplet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(11): 1488-1491.
- [20] 李云清, 王宏楠, 陈威. 亚临界和超临界压力下燃料液滴的蒸发特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(4): 287-294.
LI Yunqing, WANG Hongnan, CHEN Wei. Fuel droplet evaporation in sub-critical and super-critical pressure environments [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(4): 287-294.
- [21] 王宏楠, 熊永华. 超临界环境条件对碳氢燃料液滴蒸发特性的影响 [J]. 内燃机学报, 2014, 32(2): 172-177.
WANG Hongnan, XIONG Yonghua. Effect of super-critical ambient conditions on hydrocarbon fuel droplet evaporation characteristics [J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(2): 172-177.
- [22] 魏明锐, 郑丽, 刘近平, 等. 二甲醚/液化石油气液滴超临界蒸发特性的数值模拟 [J]. 内燃机学报, 2014, 32(6): 527-533.
WEI Mingrui, ZHENG Li, LIU Jinping, et al. Numerical simulation on supercritical evaporation characteristic of DME/LPG fuel droplet [J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(6): 527-533.
- [23] 赵卫东, 魏明锐, 孔亮, 等. 超临界工况下二甲醚蒸发的数值模拟 [J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(5): 468-473.
ZHAO Weidong, WEI Mingrui, KONG Liang, et al. Number simulation on DME droplet evaporation in supercritical condition [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(5): 468-473.
- [24] 王宏楠, 熊永华, 鹿盈盈. 亚/超临界压力下碳氢燃料液滴的燃烧特性 [J]. 内燃机学报, 2014, 32(4): 328-333.
WANG Hongnan, XIONG Yonghua, LU Yingying. Combustion characteristics of hydrocarbon fuel droplet in sub-and super-critical pressure environments [J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(4): 328-333.
- [25] 张蒙正, 徐胜利. 超临界环境下煤油和 UDMH 单滴燃烧现象 [J]. 火箭推进, 2013, 39(5): 1-6.
ZHANG Mengzheng, XU Shengli. Combustion phenomena of kerosene and UDMH droplets in supercritical environment [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(5): 1-6.

(下转第 155 页)