

DOI: 10.7652/xjtuxb201809017

燃料在亚/超临界环境下的喷射现象学研究

马志豪¹, 贾义¹, 陈占耀¹, 李亚楠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: 为探究燃料在亚/超临界环境条件下喷射过程的差异,采用定容燃烧弹系统将亚临界状态的正己烷喷射到亚/超临界环境中,利用背光法记录喷射的全过程,研究亚/超临界环境下喷射形态的差异以及相关机理。结果表明:超临界环境下的喷射与亚临界环境下的喷射在形态学特征上存在较大差异,在超临界温度下,当喷射环境的压力由亚临界压力进入超临界压力时,相同喷射时刻的喷射锥角和喷射长度大幅增大,说明亚/超临界环境下喷射的气化机理存在差异,即亚临界环境下的喷射为传统的气化蒸发过程,而超临界环境下的喷射是靠跨越“伪沸腾”线,进行“类液体”向“类气体”转变的过程;超临界环境下相同喷射时刻的喷射锥角和喷射长度随着环境条件的变化波动较大,主要是燃料在临界点及“伪沸腾”线附近时热力学物性参数的剧烈变化导致。亚/超临界环境下的喷射现象学的研究表明,亚/超临界环境下喷射形态学的差异主要是喷射破碎及气化机理的差异导致,为进一步研究超临界环境下的喷射过程数值模拟提供了试验依据。

关键词: 超临界环境;定容燃烧弹;喷射;伪沸腾线

中图分类号: V1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)09-0127-07

Phenomenological Study on the Fuel Injecting into Sub- and Super-Critical Environments

MA Zhihao¹, JIA Yi¹, CHEN Zhanyao¹, LI Ya'nan¹, 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: To investigate the difference of fuel injection processes in sub- and super-critical environments, N-hexane in subcritical condition was sprayed into the sub- and super-critical environments in a constant volume combustion bomb system, and the whole process of injection was recorded by the backlight method. The difference of spray shapes and related mechanism in sub- and super-critical environments were studied. The results show that the jets in super- and sub-critical environments are different in morphological characteristics. At supercritical temperature, when the pressure of the injection reaches the supercritical pressure from subcritical pressure, the spreading angle and injection length increase greatly at the same time. It shows that the gasification theory is different between sub- and super-critical environments, that is, the jet under subcritical environment is a traditional evaporation process, but it is a transition from liquid-like to gas-like across the pseudo-boiling line under supercritical environment. The spreading angle and injection length under supercritical environment fluctuate greatly with the pressure and the temperature due to the drastic change of the physical parameters near the critical

收稿日期: 2018-01-16。 作者简介: 马志豪(1965—),男,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: 2018-04-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180426.1534.002.html>

point and pseudo-boiling line. The study on the spray phenomenology in sub- and super-critical environments shows that the difference of spray morphology between sub- and super-critical environments is mainly caused by the difference in jet fragmentation and gasification mechanism, which provides a test basis for further study on numerical simulation of the spraying process in supercritical environment.

Keywords: supercritical environment; constant volume bomb; jet; pseudo-boiling line

增压是提高内燃机动力性、经济性和降低有害物质排放的重要措施,已经成为内燃机发展的趋势。随着增压技术的普及,缸内压力不断提高,当燃料喷入缸内、尤其在喷射后期时,环境压力和温度已经达到或者超过燃料的临界点。伴随着燃料的喷射、雾化、蒸发、气化以及燃烧过程的进行,部分燃料将进入超临界环境喷射(环境温度和压力均超过燃料临界值的喷射)^[1-2]。液体燃料由亚临界向超临界流体转变的过程中,表面张力和汽化潜热逐渐趋近于零,比定压热容和密度等热力学特性参数随着温度和压力的变化产生剧烈变化。液体燃料喷射入超临界环境后,由于燃料热力学特性参数的变化,喷射及混合过程将不同于传统的方式。

国内外学者关于碳氢燃料在超临界条件下的喷射特性做了一些试验研究。Wensing 等通过观察定容燃烧弹内液体由亚临界状态进入超临界状态时气液界面的变化,发现当液体进入超临界环境后气液界面变得模糊,通过阴影法、米勒散射和激光诱导荧光法观察超临界条件下喷射的形貌特征,得出传统的喷射模型不适用于超临界环境下喷射的结论^[3]。Chehroudi 等利用阴影法细致地观察了超临界环境下的射流,发现在超临界温度、环境压力略低于临界值的条件下,射流过程中已观测不到液滴的存在,并认为是表面张力和汽化潜热的降低所致^[4]。对比可压缩和不可压缩流体的初始喷射锥角,发现在超临界环境下的流体喷射类似于气体喷射。Anitescu 等利用阴影法拍摄超临界燃油喷射到亚临界环境的图像,发现射流阴影变浅的现象^[5]。Dahms 等研究了正十二烷喷射到直喷柴油机缸内环境的喷射现象,并建立模型进行仿真研究,发现在超临界环境下的气液界面比亚临界条件下更加平顺与光滑^[6]。Falgout 等利用弹道成像技术证实了超临界流体混合边界层的存在,并发现在超临界环境下观测不到气液界面、液带、液丝以及液滴,并且超临界环境下的喷射呈现出一种类似网状结构的紊流混合层的状态,接近于气体喷射^[7]。Wu 等利用阴影法拍摄超临界燃油喷射到亚临界环境的图像,观察到了马赫

盘的存在,并得出超临界射流非常接近可压缩气体射流的结论^[8-9]。Falgout 等利用弹道成像法和阴影法详细地观测了柴油、正丁醇、十二烷以及十六烷在亚/超临界条件下喷射油束的形态学变化,在弹道成像的图像中观测到超临界环境下喷射油束的边缘出现了网状结构,而在阴影法的图像中观测到超临界条件下喷射边界出现了类似纹影图像的结构,并把这种现象归因于表面张力和汽化潜热的降低^[10]。Roy 等利用激光诱导荧光成像技术,系统地观测了超临界射流内部浓度分布、浓度梯度分布和射流边界上的凝结现象,并得出射流凝结与否与射流温度和环境温度的乘积相关的结论^[11]。Banuti 等针对超临界环境下喷射潜在核心的密度变化,提出了超临界环境条件下喷射的热力学破碎理论^[12-13]。

本课题组一直致力于研究亚/超临界条件下碳氢燃料液滴的蒸发与燃烧以及燃料喷射的雾化、蒸发和燃烧特性,已经研究了单滴碳氢燃料在亚/超临界环境下蒸发和燃烧的特性,研究结果表明单滴碳氢燃料在超临界条件下能相对更早地完成燃料和环境气体的混合,并且液滴燃烧的时间在超临界条件下随压力的增加不再继续减小,而是趋于稳定值^[14-15]。为探究超临界环境条件下的喷射过程,本文在高压定容燃烧弹内利用高压共轨燃料喷射系统开展燃料在亚/超临界条件下喷射过程的研究。

1 试验系统

1.1 试验设备

亚/超临界环境下喷射过程的研究是在高压定容燃烧弹系统上进行的。高压定容燃烧系统的结构简图如图1所示,主要包括定容燃烧弹、高速摄像机、高压共轨燃料喷射系统和单次喷射仪等。定容燃烧弹内部装有电加热丝和热电偶,用于加热和测量定容燃烧弹内部的环境温度,电加热丝位于定容燃烧弹底部,热电偶位于定容燃烧弹侧壁中部,并且与壁面隔热以保证所测温度为定容燃烧弹内部环境温度;定容燃烧弹的两侧布置有直径为100 mm、厚度为75 mm的JGS2光学石英玻璃窗口,便于采集

定容燃烧弹内部的喷射过程,光学石英玻璃能承受 7 MPa 的压力和 1 375 K 的温度,满足超临界环境条件下试验的需要;定容燃烧弹的侧面安装有进、排气孔,高压气瓶与定容燃烧弹的进气口相连以提供所需环境压力,排气孔用于排出废气;定容燃烧弹端盖上布置有喷油器安装孔;定容燃烧弹内部布置有陶瓷纤维隔热层,能有效减少热量传递,保证内部环境温度的实现。采用 NAC Memrecam GX-8 高速摄像机和 MICRO NIKOR 60 mm 镜头记录燃油的喷射过程,相机拍摄频率设置为 10 000 帧/s,曝光时间为 100 μ m。燃油供给系统采用 Bosch 高压共轨试验台,配备有恒温装置,保证燃油温度一致;高压共轨的压力最高可达到 160 MPa;喷油器采用 Bosch 电控喷油器,喷孔是直径为 0.12 mm、壁厚为 1 mm 的倒锥形结构,经过挤压研磨,研磨后 K 系数为 0.7,研磨后流量系数为 0.51。单次喷射仪为法国 EFS 公司的 8426 和 8427 模块,能调节燃油喷射脉宽和喷油规律,实现喷油器喷油的准确控制。

图像的采集使用背光法:依靠光的散射原理,类似眼睛看物体,记录燃油喷射的液相部分或者密度较大的超临界流体部分^[16]。背光法通过光源和两块平面镜来实现,试验时通过调节平面镜和光源的角度与位置使反射光照亮定容燃烧弹内部的流场,然后通过高速摄像机记录喷射过程。试验时还要避免光源成像在镜头中。

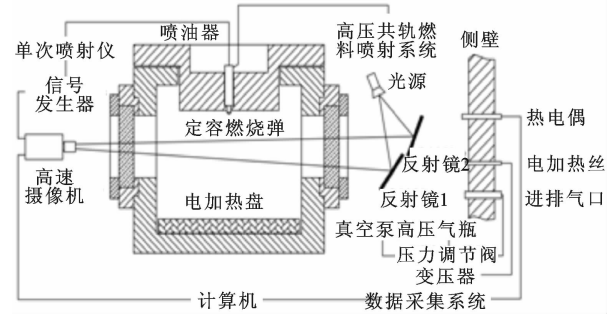


图 1 试验装置示意图

试验过程中使用真空泵将定容燃烧弹内部环境抽成真空,然后通过高压氮气实现对定容燃烧弹内部环境的加压;利用变压器调节电加热丝的输出功率来控制定容燃烧弹的内部温度。加热过程中喷油器也会被加热,导致油嘴内部燃油温度提高,经过多次测定,喷油嘴内部燃油温度可达 365 K 左右;试验中油嘴内部燃油压力为 100 MPa,查询 NIST 数据^[17],此时燃油为液态,密度为 0.687 2 g/cm³。当燃料的温度提高(或者降低)50 K 时,燃油仍为液态,并且相同喷射脉宽下燃油喷射量的变化在

4.1%以内,因此燃油温度的波动对燃油喷射量的影响可以忽略不计。当定容燃烧弹的内部压力和温度至设定值时,同时触发单次喷射仪和高速摄像机,记录下燃油喷射的过程。

1.2 试验方案

本试验采用的燃料为正己烷(C₆H₁₄,临界压力 $P_c=3.034$ MPa,临界温度 $T_c=507.82$ K)。燃料的喷射压力为 100 MPa,喷射脉宽为 5 ms,喷射时燃料温度约为 365 K。喷射环境的压力和温度分别从亚临界变化到超临界,喷射环境的具体参数如表 1 所示。

表 1 喷射的环境参数

环境温度/K	对比温度	环境压力/MPa	对比压力
473	0.93	2.5	0.83
503	0.99	2.8	0.93
513	1.01	3.2	1.07
523	1.03	3.4	1.13
543	1.07	3.6	1.20
573	1.13		

注:对比压力为环境压力与临界压力的比值;对比温度为环境温度与临界温度的比值。

从表 1 可知:试验环境的对比温度从 0.93 变化到 1.13,对比压力从 0.83 变化到 1.2,试验范围处在临界点附近,这主要是受限于试验设备所能承受的压力和温度;在后期的试验过程中发现,虽然燃油喷射的环境在临界点附近,但亚/超临界环境条件下采用背光法拍摄的喷射图像依然有较大的差别。

1.3 试验环境条件下燃料物性的变化

试验中亚临界状态的正己烷被喷射入超临界环境中,燃油会进行亚临界状态向超临界状态的转变。亚临界流体向超临界流体转变的过程会产生热力学特性参数的变化,试验条件下正己烷部分热力学特性参数的变化如图 2 所示,图中数据来源于 NIST 数据^[17]。

由图 2 可知:亚临界压力(小于 3.034 MPa)下燃料的密度在沸点处发生突变,比定压热容出现峰值;临界压力(3.034 MPa)和超临界压力(大于 3.034 MPa)下燃料的密度不再出现断点,比定压热容随着温度的升高出现最大值,并且远远大于亚临界环境压力下沸点对应的比定压热容峰值。比定压热容达到峰值时燃料密度迅速降低,类似亚临界流体沸腾的特征。Kafengauz 等把这种超临界流体出现的类似亚临界流体沸腾的现象称作“伪沸腾”,并

把超临界条件下出现比定压热容峰值的点在 P - T 相图上连接起来,形成一条“伪沸腾”线,把超临界流体区分为“类液体”和“类气体”两部分^[18-19],如图3所示。综上,燃料在临界点和“伪沸腾”线附近密度和比定压热容发生剧变,会对燃油喷射的形态产生较大影响。

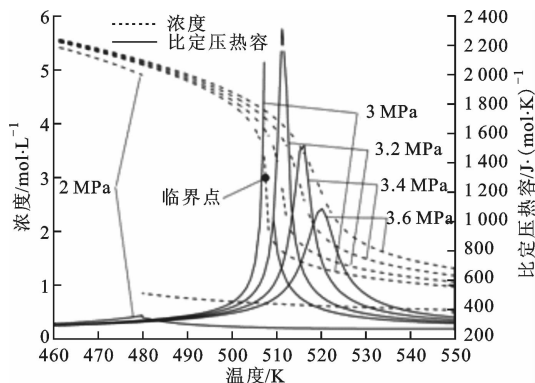


图2 亚/超临界状态的正己烷部分热力学特性参数

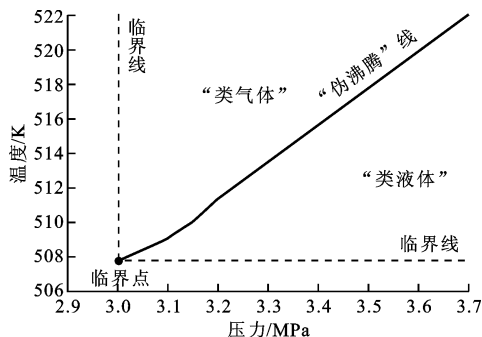


图3 处于超临界环境下的正己烷 P - T 相图

2 试验结果及分析

由于定容燃烧弹内的环境气体由位于其底部的电加热丝加热,因此加热过程中定容燃烧弹内的温度场分布不均匀,从而导致热气流扰动。背光法使用的是发散光,不受紊乱的温度场干扰,背景稳定,易于获得喷射的图像,但背光法对流场密度变化的敏感度较低,只能记录燃油密度较大的位置。虽然超临界状态的“类液体”拥有和液体相近的密度,但试验条件下超临界燃油在由“类液体”向“类气体”转变的同时密度迅速降低,因此背光法只能记录喷射过程中的液相和超临界状态的“类液体”部分。对于结果分析中出现的喷射时刻,均是以喷油开始时刻为起点;结果分析中出现的图像都是背光法减除背景的图像,即选取喷射开始时刻前的一张图片作为背景图片,然后将喷射图片依次与背景图片相减,如图4所示。对于背光法拍摄的图像,本文用喷射锥

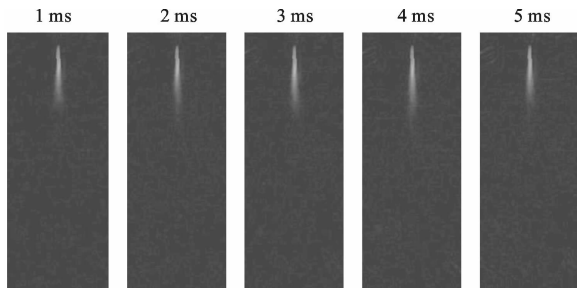
角和喷射长度来描述喷射油束的分散角度和贯穿度。



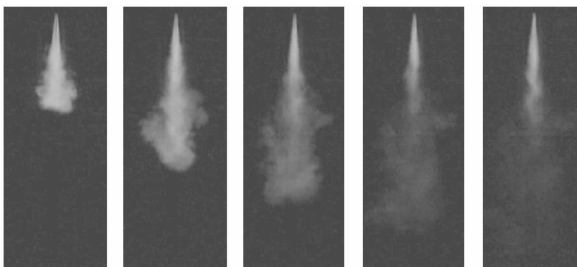
图4 图片处理过程

2.1 亚/超临界条件下的喷射图像

亚/超临界条件下流体热力学特性的差异,必然导致喷射形态的不同。图5所示为亚/超临界环境条件下背光法记录的不同喷射时刻的喷射图像。由图5a可知,高温环境下的亚临界流体喷射呈现出一条短小的喷射油束,拥有较小的喷射锥角和喷射长度,并且持续到喷射结束;由图5b可知,超临界环境条件下的喷射油束呈现出较大的喷射锥角和喷射长度,并且随着喷射的进行,喷射中后期(不受喷射临近结束的影响)的喷射长度和喷射锥角大幅减小。



(a)对比压力为0.83



(b)对比压力为1.07

图5 对比温度为1.07时正己烷在亚/超临界条件下的喷射图像

亚临界压力、超临界温度下的燃油喷射受燃料沸点的影响迅速气化蒸发形成短小的喷射油束,并且在蒸发扩散和持续喷射的共同作用下,喷射油束变化较小。超临界环境条件下,燃油温度不再出现亚临界条件下的沸点,而是出现“伪沸腾”点。“伪沸

腾”点相比于亚临界压力下的沸点具有较高的温度,并且燃料在“伪沸腾”点的比定压热容远大于亚临界压力下沸点的比定压热容。燃油以相同的状态喷射入相同温度、不同压力下的环境中,由于压力相差较小,导热系数相差不大。亚临界压力下,燃油在温度较低的沸点(在对比压力 0.83 下为 494 K,在对比压力 1.2 下“伪沸腾”点温度为 511 K)进行气化,并且沸点处的比定压热容(在对比压力 0.83 下为 $457.5 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)远小于“伪沸腾”点所对应的值 $2487.3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$,燃油在亚临界环境下迅速气化蒸发,而超临界条件下需要吸收更多的热量才能跨越“伪沸腾”线,实现“类液体”向“类气体”的转变,完成气化过程。由于传热速度有限,并且亚临界条件下吸收更少的热量就能实现气化过程,因此亚临界环境下的喷射锥角和喷射长度相比于超临界环境下均较小。

2.2 超临界条件下的喷射图像

当液体燃料喷入超临界环境后,喷射的发展过程如图 6 所示。从图中可以看出:相同温度、相同喷射时刻、不同压力下的喷射锥角和喷射长度差异较大。对比压力为 1.07 和 1.13 下的喷射油束先表现出较大的喷射锥角和喷射长度,随着喷射过程的进行大幅减小,而对比压力为 1.2 下的喷射油束在喷射初期就表现出稳定的喷射锥角和喷射长度。图 7 为图 6 所示的 3 种环境在 P - T 相图上的分布情况。由图可知:3 种环境条件都分布在燃油超临界状态的“类气体”区。试验时燃油喷射入超临界环境中,燃油吸收环境气体的热量,在燃油温度达到“伪沸腾”线温度时进行“类液体”向“类气体”的转变。在相同的环境温度下,随着环境压力的提高,燃料的“伪沸腾”线温度提高,燃料越不容易从环境气体中吸收足够热量达到“伪沸腾”线温度,燃油喷射的喷射锥角和喷射长度也就会越大。参考图 2 可知:图 6 所示的 3 种环境压力下,随着环境压力的提高,燃油在“伪沸腾”线处的比定压热容迅速降低,也就意味着燃油更容易达到环境温度,即燃油更容易气化,喷射锥角和喷射长度就会越小。综合燃料的“伪沸腾”线温度和比定压热容的变化,以及所处气体环境可知:图 6a、6b 的环境温度超过“伪沸腾”线的值相比于图 6c 较大,但燃料在“伪沸腾”线处的比定压热容远大于图 6c 所对应的值,在两者共同的作用下,图 6a、6b 的喷射油束气化过程相比于图 6c 较慢,导致喷射锥角和喷射长度差别较大。

对比图 5a、图 6c 可以发现:亚临界环境和超临

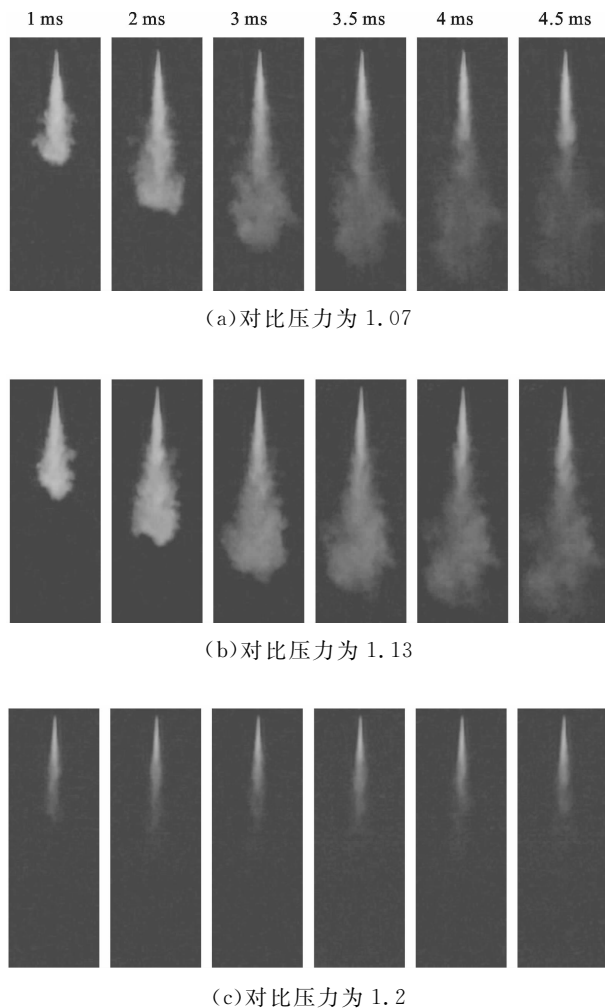


图 6 对比温度为 1.03 时超临界条件下的喷射图像

界环境的喷射在初期就形成了稳定的喷射油束,但超临界条件下的喷射油束表现出较大喷射锥角和喷射长度。亚临界条件下的喷射油束受燃料沸点的影响迅速气化蒸发,形成短小的液态核心;超临界条件下,图 6c 所处环境的对比压力为 1.2,该压力对应的“伪沸腾”线温度为 520 K,而环境温度为 523 K,温差较小,并且在“伪沸腾”线温度处的比定压热容远大于图 5a 所对应的值,燃油无法从环境气体吸收足够热量而快速地由超临界状态的“类液体”向“类气体”转变^[20],导致喷射过程中表现出较大的喷射锥角和喷射长度。

2.3 喷射锥角和喷射长度

通过编写 Matlab 程序获取喷射图像的形态学参数,其中喷射锥角和喷射长度的数据如图 8 和图 9 所示。图 8 中的喷射锥角是在喷射时间为 2 ms、距喷嘴 50 倍喷孔直径的位置测量的,图 9 是喷射开始后 2 ms 所测喷射长度。在喷射时间为 2 ms 时,喷油嘴针阀升程已达最大并基本稳定在最大针阀升

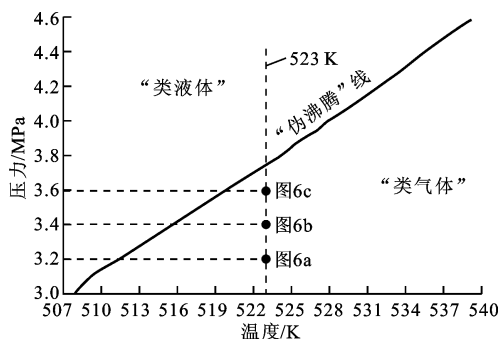


图7 图6的环境条件在相图上的分布

程,此时已经不受喷射初期燃油喷射波动的干扰;在距喷嘴50倍喷孔直径的距离处,喷射位于传统喷射的无损液核区部位,燃油射流没有发生分裂破碎,便于观测亚/超临界环境下燃油喷射的差异。

由图8和图9可知:当环境压力小于临界压力时,随着环境温度的增加,相同压力下的喷射锥角和喷射长度逐渐减小;随着环境压力的增大,相同温度下的喷射锥角逐渐增大,而喷射长度逐渐减小。由于燃料的喷射环境处于亚临界条件,喷射锥角和喷射长度随着环境温度和压力的变化和传统的喷射规律趋于一致。当环境温度小于临界温度时,随着环境压力的增加,喷射锥角呈现逐渐增大的趋势,而喷射长度表现为小幅减小。当环境温度为超临界温度、环境压力由亚临界压力变化至超临界压力时,相同喷射时刻的喷射锥角和喷射长度都大幅增大,这主要是由亚/超临界环境条件下喷射的气化过程差异导致的。进入超临界环境后,喷射锥角和喷射长度随着环境条件的变化呈现出非规律性,即出现了较大的波动性。参考图2和图7可知:在临界点及“伪沸腾”线附近,燃料的密度和比定压热容均发生剧烈的变化,必然伴随着燃料相关的热力学特性参数(如表面张力、汽化潜热、比热容、密度、导热系数等)的变化,进而影响流体喷射结构的变化^[21],导致喷射油束的规律性不强。

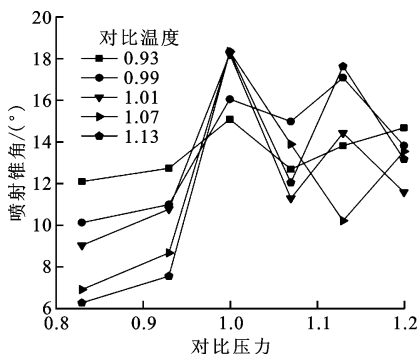


图8 亚/超临界条件下的喷射锥角

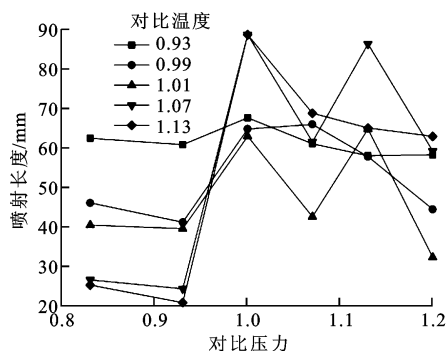


图9 亚/超临界条件下的喷射长度

3 结论

喷射及燃烧是将化石燃料转化为机械能的重要途径,喷射质量的好坏决定着内燃机的动力性、经济性和有害物的排放。探究超临界条件下的喷射过程将为亚/超临界条件下喷射质量的提高提供理论依据。本文通过对超临界条件下喷射过程的研究,得出以下结论:

(1)在超临界条件下喷射的背光法图像中,相同的超临界温度下,当喷射环境的压力由亚临界压力过渡到超临界压力时,相同喷射时刻的喷射锥角和喷射长度相比于亚临界环境下大幅增大,这主要是由燃料在“伪沸腾”线和临界点处的物性参数剧变引起的;

(2)通过对亚/超临界环境下喷射锥角和喷射长度的分析,发现在亚临界条件下喷射锥角和喷射长度随环境条件的变化符合传统的喷射模型,而超临界条件下喷射锥角和喷射长度随环境的变化波动较大,呈现出非规律性,得出燃料的“伪沸腾”线和临界点对喷射结构的影响较大。

参考文献:

- [1] 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(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(1): 1-9.
- [2] CHEHROUDI B, TALLEY D, MAYER W, et al. Understanding injection into high pressure supercritical environments [C]// Proceedings of the Fifth International Symposium on Liquid Space Propulsion. Huntsville, AL, USA: NASA Marshall Space Flight Center, 2003: 1-37.
- [3] WENSING M, VOGEL T, GOTZ G. Transition of

- diesel spray to a supercritical state under engine conditions [J]. *International Journal of Engine Research*, 2016, 17(1): 108-119.
- [4] CHEHROUDI B, TALLEY D, COY E. Visual characteristics and initial growth rates of round cryogenic jets at subcritical and supercritical pressures [J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(2): 850-861.
- [5] ANITESCU G, BRUNO T J, TAVLARIDES L L. Dieseline for supercritical injection and combustion in compression-ignition engines: volatility, phase transitions, spray/jet structure, and thermal stability [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(10): 6247-6258.
- [6] DAHMS R N, MANIN J, PICKETT L M, et al. Understanding high-pressure gas-liquid interface phenomena in diesel engines [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 1667-1675.
- [7] FALGOUT Z, RAHM M, WANG Z K, et al. Evidence for supercritical mixing layers in the ECN spray: A [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 1579-1586.
- [8] WU P K, CHEN T H, NEJAD A S, et al. Injection of supercritical ethylene in nitrogen [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1996, 12(4): 770-777.
- [9] 高伟, 林宇震, 付镇柏, 等. 超临界正十烷喷射到大气环境的喷射特性 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(9): 1984-1988.
- GAO Wei, LIN Yuzhen, FU Zhenbo, et al. Injection characteristics of supercritical n-decane into atmospheric environment [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(9): 1984-1988.
- [10] FALGOUT Z, RAHM M, SEDARSKY D, et al. Gas/fuel jet interfaces under high pressures and temperatures [J]. *Fuel*, 2016, 168: 14-21.
- [11] ROY A, JOLY C, SEGAL C. Disintegrating supercritical jets in a subcritical environment [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 717(2): 193-202.
- [12] BANUTI D T, HANNEMANN K. Supercritical pseudo-boiling and its relevance for transcritical injection [C]//50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2014: 3571.
- [13] BANUTI D T, HANNEMANN K. The absence of a dense potential core in supercritical injection: a thermal break-up mechanism [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(3): 101-353.
- [14] 马志豪, 贾义, 李智博, 等. 单滴燃料高压着火与燃烧特性的试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(5): 95-101.
- MA Zhihao, JIA Yi, LI Zhibo, et al. High pressure ignition and combustion characteristics of single drop fuel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(5): 95-101.
- [15] 马志豪, 李智博, 朱宇东, 等. 亚/超临界环境下碳氢燃料液滴的蒸发与燃烧特性 [J]. *内燃机学报*, 2016(5): 443-448.
- MA Zhihao, LI Zhibo, ZHU Yudong, et al. Evaporation and combustion characteristics of hydrocarbon fuel droplet at sub- and super-critical environments [J]. *Transactions of CSICE*, 2016(5): 443-448.
- [16] 荣美霞. 柴油喷雾与着火特性试验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [17] LIEBMAN J F, AFEEFY H Y, LIEBMAN J F, et al. NIST chemistry webbook [DB/OL]. [2018-01-01]. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- [18] KAFENGAUZ N L, FEDOROV M I. Pseudoboiling and heat transfer in a turbulent flow [J]. *Journal of Engineering Physics*, 1968, 14(5): 489-490.
- [19] KAFENGAUZ N L, FEDOROV M I. Excitation of high-frequency pressure oscillations during heat exchange with diisopropylcyclohexane [J]. *Journal of Engineering Physics*, 1966, 11(1): 63-67.
- [20] POURSADEGH F, LACEY J S, BREAR M J, et al. On the fuel spray transition to dense fluid mixing at reciprocating engine conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(6): 6445-6454.
- [21] ASHGRIZ N. *Handbook of atomization and sprays* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2011: 255-266.

[本刊相关文献链接]

- 袁超, 洪伟, 苏岩, 等. 直喷汽油机起动过程多环芳烃排放的研究. 2017, 51(9): 54-62. [doi:10.7652/xjtuxb201709008]
- 马志豪, 贾义, 李智博, 等. 单滴燃料高压着火与燃烧特性的试验研究. 2017, 51(5): 95-101. [doi:10.7652/xjtuxb201705014]
- 谢萌, 马志杰, 王全红, 等. 聚甲氧基二甲醚及其高比例掺混柴油混合燃料发动机燃烧与排放的试验研究. 2017, 51(3): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201703006]
- 汪映, 黄智勇, 柯希春, 等. 液化石油气对二甲醚-柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响. 2016, 50(5): 19-23. [doi:10.7652/xjtuxb201605003]
- 瞿磊, 王忠, 李瑞娜, 等. 甲醇/生物柴油燃烧颗粒的结构特征研究. 2016, 50(5): 81-86. [doi:10.7652/xjtuxb201605012]

(编辑 荆树蓉)