

超临界碳氢燃料的射流特性研究

彭云晖¹, 高伟², 张弛^{2,3}, 林宇震^{2,3}

(1. 南京模拟技术研究所, 南京 210016; 2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘要: 针对未来先进航空发动机的超临界燃油喷射混合问题, 采用纹影法对超临界正十烷(*n*-decane)/正戊烷(*n*-pentane)混合物在静止环境中的射流激波结构进行试验, 同时采用理论分析的方法研究了射流的相变途径和流量特性。纹影照片显示, 在试验工况下射流在喷嘴附近呈现出马赫波等激波结构, 燃料的压力是激波结构的主要影响因素。理论分析表明: 在混合物的临界点附近, 燃料压力较高时更有可能导致相变。由于物性的不同, 大分子与小分子碳氢燃料的相变途径存在一定的差异, 小分子燃料在喷射过程中更容易发生冷凝。采用 1 维等熵计算方法可以较精确地计算高温高压碳氢燃料的流量。

关键词: 超临界; 碳氢燃料; 射流特性; 流量特性; 航空发动机

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.02.012

Investigation on Jet Characteristics of Supercritical Hydrocarbon Fuel

PENG Yun-hui¹, GAO Wei², ZHANG Chi^{2,3}, LIN Yu-zhen^{2,3}

(1. Nanjing Research Institute of Simulation Technology, Nanjing 210016, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: The shock structures of supercritical *n*-decane/*n*-pentane mixtures into atmospheric environment was experimentally investigated by Schlieren method, and the phase transition path and mass flow rate characteristics of fuel jets were theoretically studied. Flow visualization showed that internal shock structures are observed near the nozzle exit for the test conditions and the fuel pressure has the primary influence on shock structures. Theoretical analysis revealed that fuel condensation phenomenon occurs more possibly at higher fuel pressures near the critical point and the condensation of small hydrocarbon fuel is more likely to occur than large hydrocarbon fuel because of the different thermodynamic properties. The mass flow rate of hydrocarbon fuel at high temperature and high pressure conditions can be calculated accurately using one-dimensional isentropic calculation method.

Key words: supercritical; hydrocarbon fuel; jet characteristics; mass flow rate characteristics; aeroengine

0 引言

未来先进的航空动力装置采用航空煤油作为首选的冷却介质^[1-3], 燃油在冷却高温部件时温度升高并超过其临界温度, 而供油压力也超过了其临界值, 导致了超临界燃油喷射问题。基础研究表明^[4-7], 燃料的超临界相独立于气相和液相, 其具有不同于气体和液体的热物理性质, 且在临界点附近其热力学性质对压力和温度的变化很敏感。由于超临界燃油独特的热力学性质, 导致其喷射混合过程显著区别于液态和气态

燃料。目前, 针对超临界碳氢燃料喷射特性已进行了广泛研究。

Wu 等^[8-9]对超临界乙烯喷射到静止氮气环境中的射流结构和流量特性进行了试验研究; Lin 等^[10]对超临界乙烯/甲烷混合物喷射到静止氮气环境中的射流结构、喷嘴内部的流动过程及均相成核现象进行了试验和仿真研究; Star 等^[11]对超临界乙烯喷射到亚临界氮气环境中的相变及流量特性进行了仿真研究, 上述研究均表明超临界燃料喷射到环境中会呈现出部分气体射流的特性, 当喷射温度接近临界点时, 射

收稿日期: 2018-05-28

作者简介: 彭云晖(1978), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事航空发动机燃烧研究工作; E-mail: peng_yun_hui@163.com。

引用格式: 彭云晖, 高伟, 张弛, 等. 超临界碳氢燃料的射流特性研究[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 59-64. PENG Yunhui, GAO Wei, ZHANG Chi, et al. Investigation on jet characteristics of supercritical hydrocarbon fuel[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 59-64.

流在喷口附近产生冷凝,理想气体的流量公式不适用于超临界燃料。Chen^[12]对处于临界点附近的 SF₆ 喷射到静止 CO₂ 及 N₂ 环境的射流形态及相变特性进行了试验研究,结果表明喷射温度和环境压力对射流的形态和相变有较大的影响;Lamanna 等^[13]对正己烷的相变特性进行了研究,发现临界点附近热力学性质的突变是射流产生相变的主要影响因素;Roy 等^[14]研究超临界氟己酮喷射到氮气环境中的混合和雾化过程时发现环境温度较低时,射流边缘会发生局部冷凝而产生微小液滴;靳乐^[15]及 Doughtip 等^[16]研究环境压力对超临界燃料射流结构的影响特性时发现当环境压力较低时,射流呈现出激波结构,而当环境压力较高时,射流与亚声速气体射流类似。上述研究对超临界碳氢燃料的射流特性有了广泛的认识,但成果相对分散,未形成统一和完善的理论体系。比如 Wu^[9]和林^[10]在分析超临界燃料射流结构与理想气体的差异时得出了矛盾的结论。前期的研究发现,大分子超临界燃料的喷射相变特性与小分子不同^[10-17],而相变特性又对射流结构和混合特性有很大的影响^[16-18],但都没有给出合理的解释。因此,有必要对其喷射特性进行深入的研究。

本文采用质量分数为各占 50%的正十烷及正戊烷混合物来模拟航空煤油进行静止环境下的超临界喷射特性研究,着重研究喷口附近的射流结构、相变过程及流量特性。正十烷是航空煤油中相对含量较多的成分,而正戊烷则代表煤油中分子量相对较小的组分,两组分混合物热力学性质容易计算,采用这 2 种碳氢燃料混合物作为研究对象可在很大程度上反映出煤油的特性且便于理论分析。

1 试验系统

1.1 超临界碳氢燃料喷射试验系统

超临界正十烷 / 正戊烷混合物喷射到静止大气环境中的试验系统如图 1 所示。该系统由燃油贮箱、增压系统、输送与调节系统、加热系统、纹影光测系统、吹扫系统和废油废气收集处理系统组成。泵压式增压系统有利于保持供油压力的恒定;2 级燃油电加热系统通过调节功率来控制正十烷 / 正戊烷混合物的喷射温度;纹影光测系统用于测量正十烷 / 正戊烷混合物的射流特性;单次试验结束后,开启吹扫系统对系统管路进行吹除以防止残余燃料在管路中结焦。

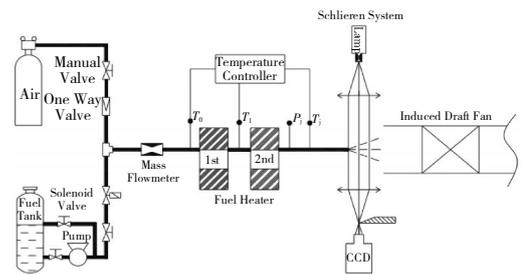


图 1 试验系统

试验采用的圆形直射式喷嘴结构如图 2 所示。喷嘴入口直径为 4 mm,内收缩角度为 16°,出口直径为 0.5 mm,喷嘴出口长径比为 8。在喷嘴上游采用精度为 ± 5 kPa 的压力传感器测量正十烷 / 正戊烷混合物的喷射压力,采用精度为 ± 2.5 K 的 K 型热电偶测量正十烷 / 正戊烷混合物的喷射温度。在喷嘴外壁包裹 1 层 2 mm 厚的绝热层,并在绝热层外侧布置 3 支 K 型热电偶以估算散热损失。估算结果表明,绝热层外壁的散热量低于正十烷 / 正戊烷混合物加热量的 0.5%,可认为燃料在喷嘴内部的流动为绝热过程。

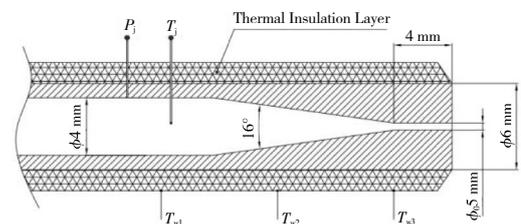


图 2 燃料喷嘴

试验采用质量流量计测量液态正十烷 / 正庚烷混合物的流量,测量范围为 1 ~ 10 g/s,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。纹影系统为凹面镜反射式结构,光源为 24 V/300 W 卤灯,光源调节狭缝为 1.0 mm,凹面反射镜的直径为 200 mm,焦距为 2000 mm。图像采集使用 Nikon D300 相机,曝光时间设置为 1/25 s,光学放大倍数为 4 倍,可测量的流场区域为 93.7 mm²,每平方毫米中有 180 个像素点,可满足研究需求。

在正式试验前,对光学测试系统进行标校,参照 Crist 对理想气体射流结构的研究,测量了高压氮气喷射到静止大气环境中的激波结构。标校结果如图 3 所示。本文得到的无量纲马赫盘位置(具体定义见第 2.1 节)与 Crist^[19]的研究结果一致,表明光测系统的可靠性。

1.2 试验工况

超临界正十烷 / 正戊烷混合物喷射特性的试验工

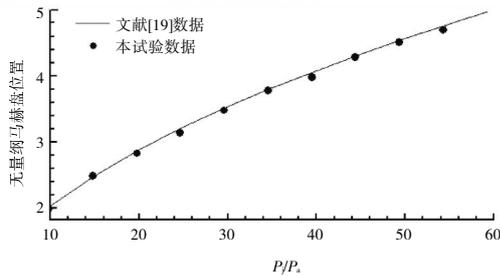


图 3 纹影系统测量精度校正结果

况见表 1。工况参数以对比参数的形式给出,即喷射参数与临界参数的比值;混合物的临界参数由 SUPER-TRAPP^[20]软件计算得到,分别为 $P_c=325$ MPa、 $T_c=533$ K。在试验中,混合物的喷射压力为 3.0~4.5 MPa,对比压力为 0.92~1.38;喷射温度为 533~661 K,对比温度为 1.0~1.24;混合物的流量为 1.3~3.0 g/s。环境的压力和温度为常温常压 $P_a=0.1$ MPa、 $T_a=298$ K。

| 工况参数 | 范围 |
|-------------------|-----------|
| $\dot{m}_t/(g/s)$ | 1.3~3.0 |
| P_j/P_c | 0.92~1.38 |
| T_j/T_c | 1.0~1.24 |
| P_j/P_a | 30~45 |
| T_j/T_a | 1.68~2.21 |

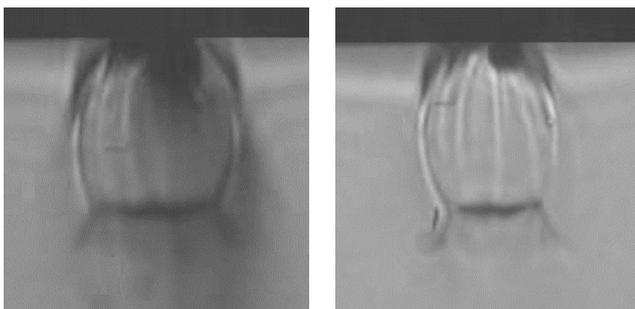
注:下标 c 为临界参数,下标 j 为喷射参数,下标 a 为环境参数。

在试验中,对每个工况点连续进行 10 次测量,取测量结果的平均值作为数据分析的依据。

2 试验结果及分析

2.1 喷口附近的射流结构

超临界正十烷 / 正戊烷混合物在喷射压力 $P_j/P_c=1.23$, 喷射温度 $T_j/T_c=1.01$ 、1.23 工况下的射流结构如图 4 所示。从图中可见,超临界正十烷 / 正戊烷混合物在喷嘴下游表现出明显的欠膨胀射流特性,射流中存在马赫波等激波结构,表明超临界大分子碳氢燃料喷射后也具有类似于理想气体的射流结构。同时,激波结构的出现表明超临界正十烷 / 正戊烷混合物的流动在喷口发生了壅塞,混合物流速为当地声速^[4-6]。



(a) $P_j/P_c=1.23, T_j/T_c=1.01$ (b) $P_j/P_c=1.23, T_j/T_c=1.23$

图 4 正十烷 / 正戊烷混合物的射流结构

同时还观察到,射流激波结构在喷射温度较低 ($T_j/T_c=1.01$) 的情况下已经出现,但射流中存在明显的阴影区,表明射流在喷嘴出口发生局部相变而导致冷凝现象。而在喷射温度较高时 ($T_j/T_c=1.23$),射流没有发生冷凝现象,更接近于理想气体的膨胀过程。

为了得到超临界正十烷 / 正戊烷混合物喷射后射流结构参数随喷射参数变化的定量关系,在纹影图片中定义马赫盘的轴向位置 x_M 和马赫盘的直径 D_M , 如图 5 所示。图中 d_j 为喷口内径。

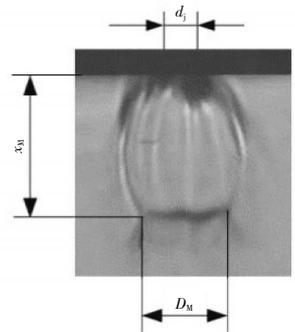


图 5 射流参数

喷射压比 P_j/P_a (喷射压力与环境压力的比值)

对正十烷 / 正戊烷混合物射流马赫盘位置 x_M/d_j 的影响规律如图 6 所示。同时还给出了欠膨胀理想气体射流激波位置的数据^[9]。从图中可见,马赫盘的位置 x_M/d_j 与喷射压比呈单调递增的关系,数据拟合表明二者之间符合 $P_j/P_a=2.4(x_M/d_j)^2$ 的函数关系式。图中也显示出超临界碳氢燃料与理想气体的射流结构具有良好的一致性。由于研究中正十烷 / 正戊烷混合物的温度均高于其临界温度,当喷射压力小于临界压力时,混合物处于气相状态,其喷射过程更接近理想气体,而此时喷射压力仍远大于环境压力,所以导致这种情况下射流仍有激波结构。Wu^[8]和 Lin^[10]研究超临界小分子碳氢燃料的射流结构时,也证实了这一点。上述研究均表明激波结构特征位置与流体的种类无关。同时,试验中发现碳氢燃料的喷射温度对马赫盘的位置没有影响,即使在发生局部冷凝的情况下也是如此。

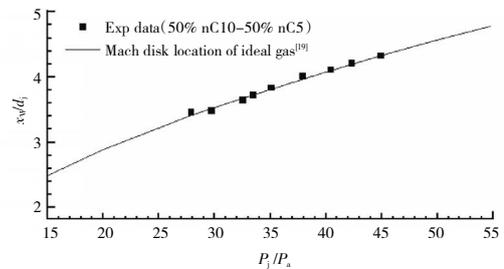


图 6 喷射压比对马赫盘位置的影响

喷射温度 T_j 对正十烷 / 正戊烷混合物射流马赫盘尺寸 D_M/d_j 的影响规律如图 7 所示。从图中可见,随着喷射温度的升高,马赫盘的尺寸随之减小,特别是

当喷射温度接近临界温度时,马赫盘尺寸随喷射温度的升高快速减小;当喷射温度接近临界温度时,正十烷 / 正戊烷混合物在喷嘴内部发生相变冷凝,由冷凝引起的热量释放导致混合物在喷嘴内部静压升高,当正十烷 / 正戊烷混合物离开喷嘴口时,射流边界向外扩张以平衡静压的升高,导致马赫盘的尺寸增大;喷射压力越高,喷射温度对马赫盘尺寸的影响越大;马赫盘的尺寸随喷射压力的升高而增大。

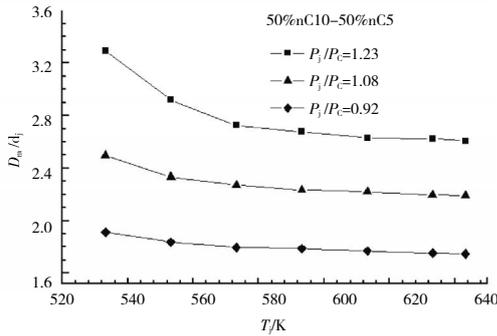
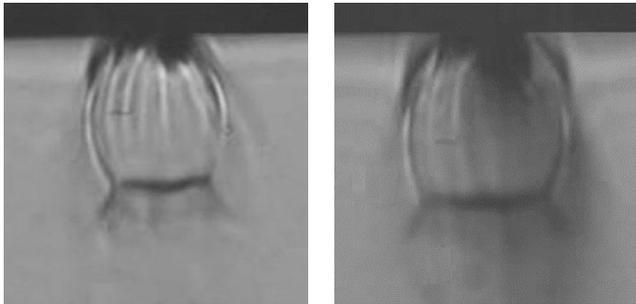


图 7 喷射温度对马赫盘尺寸的影响

2.2 燃料在喷嘴内部及出口附近的相变过程

正十烷 / 正戊烷混合物在相同喷射温度、不同喷射压力下的纹影照片如图 8 所示。从图中可见,当喷射压力为 $P_j/P_c=1.08$ 时,喷嘴处射流结构清晰,无相变发生;而当喷射压力升高到 $P_j/P_c=1.23$ 时,混合物在喷嘴处发生相变,有局部冷凝现象。正十烷及正戊烷的压力 - 温度相图如图 9 所示,从图中可见,在如图 8 所示的 2 种喷射状态下,正十烷 / 正戊烷混合物的喷射参数均处于正戊烷的超临界区及正十烷的液相区中。单独从图 9 来看,在这 2 种工况下,正十烷 / 正戊烷混合物在喷嘴处均处于两相状态,均会在喷嘴口处发生冷凝,但实际的相变过程却不是这样的。



(a) $P_j/P_c=1.08, T_j/T_c=1.01$ (b) $P_j/P_c=1.23, T_j/T_c=1.01$

图 8 正十烷 / 正戊烷混合物不同喷射压力下的射流结构

为了研究如图 8 所示的 2 种喷射工况下超临界正十烷 / 正戊烷混合物的相变过程,采用 SUPER-

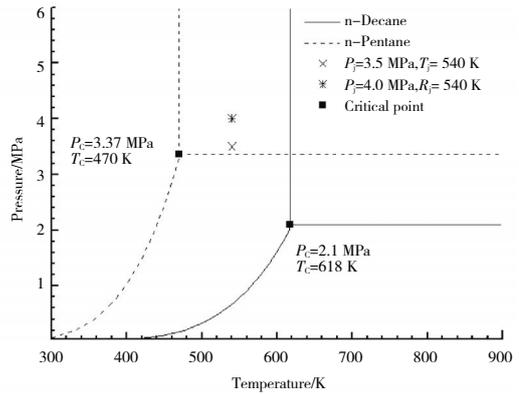


图 9 正十烷及正戊烷的温度 - 压力相图

TRAPP 软件计算得到了正十烷 / 正戊烷混合物的熵 - 压力相图,如图 10 所示。由于喷嘴内部非常光滑,可不考虑摩擦的影响,同时喷嘴向外散热也可以忽略,因此将超临界正十烷 / 正戊烷混合物在马赫波之前的流动视为等熵膨胀过程。在图 10 中标出了上述 2 种喷射工况下各自喷射参数的位置,同时给出各自的相变路径线。从图中可见,在较低的喷射压力 ($P_j/P_c=1.08$) 下,超临界正十烷 / 正戊烷混合物在流动过程中由超临界态转变为气态,而且计算结果表明,这种转变是在喷嘴内部发生的,混合物在喷嘴及下游位置均为气相状态,没有发生冷凝现象。在相同喷射温度下提高喷射压力 ($P_j/P_c=1.23$),超临界正十烷 / 正戊烷混合物在喷嘴内部由超临界态转变为气液共存状态,之后在继续膨胀的过程中又进入气态。这种相变过程表明正十烷 / 正戊烷混合物在流动过程中发生均相核化而冷凝,但在喷嘴下游的流动过程中,混合物的压力降低速度大于其温度下降速度^[21],冷凝的液相重新进入气相状态。由于采用了比较简单的气液两相平衡模型,在喷嘴内部有相变发生时,无法精确

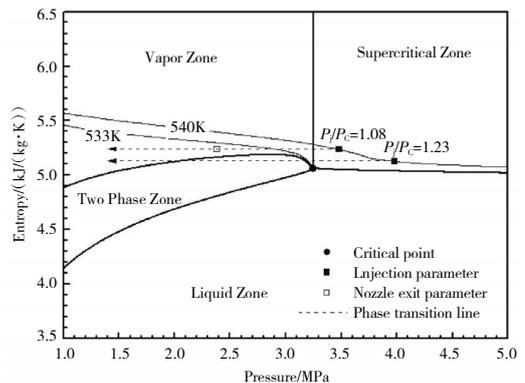


图 10 正十烷 / 正戊烷混合物的熵 - 压力相图

计算喷口处的流动参数,只能根据等熵假设大概估计流动过程的参数。

图 10 中给出的分析结果与图 8 中给出的试验结果具有很好的一致性,表明等熵假设和分析方法的可行性和准确性。

为了解超小分子碳氢燃料与大分子碳氢燃料在临界点附近相变特性的差异,采用 SUPERTRAPP 软件计算得到乙烯的熵-压力相图,如图 11 所示。从图中可见 2 种工况下 ($P_j/P_c=1.08, T_j/T_c=1.01; P_j/P_c=1.23, T_j/T_c=1.01$) 超临界乙烯喷射过程的相变途径。在 2 种喷射工况下,乙烯均从超临界区直接进入两相区,之后一直处于气液两相共存状态,表明乙烯在喷射过程中有冷凝现象发生。对比图 10、11 可见,2 种燃料的熵-压力相图中两相区的形状有所不同,对于小分子碳氢燃料而言,其两相区大致呈对称的钟型结构,在环境压力较低的情况下,即使喷射温度较高,射流在发展过程中也会进入两相区;而大分子碳氢燃料则不同,其两相区的边界存在熵值最大点,当喷射工况的熵值超过该点时,射流就不会进入两相区。

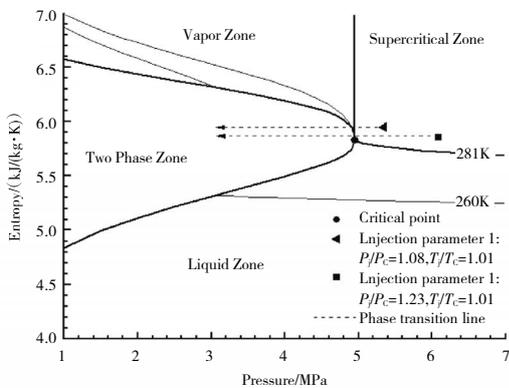
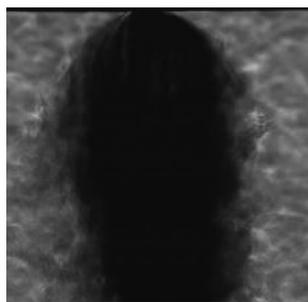


图 11 乙烯的熵-压力相图

值得注意的是,射流的相变特性会在一定程度上影响射流结构。Star^[22]拍摄到的超临界乙烯喷射的射流结构如图 12 所示,从图中可见,当在喷射参数为 $P_j/P_c=1.23, T_j/T_c=1.01$ 时,超临界乙烯在喷射过程中于喷嘴出口发生明显的冷凝现象,完全看不出激波结构,与图 11 中给出的分析结果是一致的。这与超临界正十烷/正戊烷混合物喷



$P_j/P_c=1.23, T_j/T_c=1.01$

图 12 超临界乙烯射流结构^[22]

射后的相变特性和射流结构存在明显区别。超临界正十烷/正戊烷混合物在喷射温度 $T_j/T_c=1.01$ 的工况下,仍然具有清晰可见的激波结构。

2.3 燃料的流量特性

超临界燃油喷射在工程实际中应用时,需要根据已知的燃油流量及燃油状态参数来确定喷嘴的开孔面积,或者根据已知的燃油状态及喷嘴的开孔面积来确定燃油的流量。由于超临界燃油具有可压缩性,且其压缩因子和比热比随温度压力变化显著,理想气体状态方程不适用于超临界燃油,所以适用于不可压缩流体和理想可压缩气体的流量计算公式均不能适用于超临界态燃油。

本文采用 1 维计算方法计算得到在不同状态下超临界正十烷/正戊烷混合物的流量,并与测量值进行比较。计算中将燃料在喷嘴内流动视为 1 维等熵流动的过程,并且在喷口处达到当地声速,采用 SUPERTRAPP 软件计算燃料物性。

正十烷/正戊烷混合物测量的质量流量与计算的质量流量之间的对比关系如图 13 所示,在试验研究的范围内,当喷射压力在临界压力以上时($P_j/P_c=1.28, 1.11, 1.01$),计算值与试验值符合得很好,最大误差不超过 4%;而在喷射压力低于临界压力时($P_j/P_c=0.92$),计算值与试验值的变化趋势相同,但计算值比试验值大,最大误差达到 7%。在本试验中,当喷射压力较低且喷射温度高时,燃料的质量流量约为 1.3 g/s,在试验中采用的流量计最小量程为 1.0 g/s,当实际流量较小时,测量值可能会出现一定的误差。同时,低压下测量值均比计算值小,反映出采用 SUPERTRAPP 计算低压下混合物物性时的误差较大。另外,流量系数也会随着燃料喷射参数的变化而变化。上述原因均会导致计算值与试验值之间产生误差。

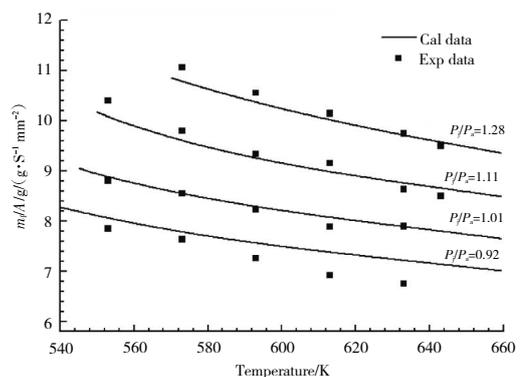


图 13 正十烷/正戊烷混合物的流量特性

3 结论

本文用试验与理论分析相结合的方法对超临界正十烷/正戊烷混合物喷射到静止环境中的射流特性进行研究,重点关注了喷口下游的激波结构、喷嘴内部及下游的相变过程及混合物的流量特性。得到如下结论:

(1)超临界正十烷/正戊烷混合物喷射到静止环境中后在喷嘴下游表现出明显的欠膨胀射流特性,射流中存在马赫波等激波结构。

(2)激波的位置仅受喷射压比的影响,二者之间满足 $P_j/P_a=2.4(x_M/d_j)^2$ 的单调函数关系;激波的尺寸随喷射温度的升高而减小,随喷射压比的增大而增大。

(3)在临界点附近,超临界正十烷/正戊烷混合物可能会在喷口处发生相变而发生冷凝。在相同喷射温度下,较高的喷射压力更有可能导致喷口处发生冷凝。

(4)小分子碳氢燃料和大分子碳氢燃料由于物性的不同导致相变特性存在一定差异。小分子碳氢燃料在喷射过程中更容易发生相变和冷凝。

(5)采用1维等熵假设可以计算超临界碳氢燃料的流量,在临界压力以上可以达到较高的精度。

参考文献:

- [1] Edwards T. USAF supercritical hydrocarbon fuels interests [R]. AIAA-1993-0807.
- [2] Huang H, Spadaccini L J, Sobel D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 284-293.
- [3] Dang G X, Zhong F Q, Zhang Y J, et al. Numerical study of heat transfer deterioration of turbulent supercritical kerosene flow in heated circular tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 85: 1003-1011.
- [4] 韩布兴. 超临界流体科学与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 30-35.
HAN Buxing. Supercritical fluid science and technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 30-35. (in Chinese)
- [5] Yang V. Modeling of supercritical vaporization, mixing and combustion processes in liquid-fueled propulsion system [J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2000, 28(1): 925-942.
- [6] 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 (4-6): 329-366.
- [7] Edwards T, Maurice L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels [J]. Journal of Propulsion and Power,

- 2001, 17(2): 461-466.
- [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] Wu P K, Shahnam M, Kirkendall K, et al. Expansion and mixing processes of underexpanded supercritical fuel jets injected into superheated conditions [R]. AIAA-1997-2852.
- [10] Lin K C, Stouffer S C, Jackson T A. Structures and phase transition processes of supercritical methane/ethylene mixtures injected into a subcritical environment [J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178(1-3): 129-160.
- [11] Star A M, Edwards J R, Lin K C, et al. Numerical simulation of injection of supercritical ethylene into nitrogen [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(4): 809-819.
- [12] Chen L D. Heat transfer, fouling, and combustion of supercritical fuels [R]. AFOSR-TR-94-0321.
- [13] Lamanna G, Stotz L, Weigand B, et al. Supercritical fluid injection: an experimental study [R]. Proceedings of the 7th European Symposium on Aerothermodynamics, Belgium; ESA, 2011: ESA-SP-692.
- [14] Roy A, Joly C, Segal C. Disintegrating supercritical jets in a subcritical environment [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 717: 193-202.
- [15] 靳乐, 范玮, 范珍滢, 等. 超临界喷射受环境和喷射参数影响的数值研究 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1323-1329.
JIN Le, FAN Wei, FAN Zhencen, et al. Numerical investigation on effects of ambient and injection parameters on supercritical injection [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29 (6): 1323-1329. (in Chinese)
- [16] Dounghip T, Ervin J S, Williams T F, et al. Studies of injection of jet fuel at supercritical conditions [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2002, 41(23): 5856-5866.
- [17] 高伟, 林宇震, 付镇柏, 等. 超临界正十烷喷射到大气环境中的喷射特性 [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. (in Chinese)
- [18] Xue X, Gao W, Xu Q H, et al. Injection of subcritical and supercritical aviation kerosene into a high temperature and high pressure crossflow [R]. ASME 2011-GT-45773.
- [19] Crist S, Sherman P M, Glass D R. Study of the highly underexpanded sonic jet [J]. AIAA Journal, 1966, 4(1): 68-71.
- [20] Ely J F, Huber M L. NIST standard reference database 4 - NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures [M]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards, 1990: 1-43.
- [21] 潘锦珊, 单鹏, 刘火星, 等. 气体动力学基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 168-170.
PAN Jinshan, SHAN Peng, LIU Huoxing, et al. Fundamentals of gas dynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 168-170. (in Chinese)
- [22] Star A M, Edwards J R, Lin K C, et al. Numerical simulation of injection of supercritical ethylene into nitrogen [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(4): 809-819.

(编辑: 刘静)