

掺混长直链烷烃对航空煤油雾化性能影响

任海涛, 甘志文
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 将藻基生物航空煤油加工过程的中间产物 C13~C18 分别与航空煤油按 10% 比例进行掺混, 对掺混燃油的喷雾雾化性能进行了对比研究。结果表明: 随掺混直链烷烃碳数增加, 对燃油喷雾雾化影响逐渐增大。其中按 10% 比例掺混直链烷烃 C18: 雾化锥角最大减幅为 5.07%; 液滴平均速度最大变化 17.6%; 索泰尔平均直径最大变化 15%; Ohnesorge 数和韦伯数随着喷射压力增加而明显变化, 会对液滴二次破碎产生影响。总体来说, 加入长直链烷烃会对航空煤油的雾化性能产生一定的影响。

关 键 词: 生物航煤; 低排放; 长直链烷烃; 雾化性能; 液滴破碎

中图分类号: **文献标志码:** A

Atomization performance effects of aviation kerosene mixed with long straight-chain alkanes

REN Haitao, GAN Zhiwen
(School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The intermediate products C13—C18 of algae-based aviation kerosene were blended with aviation kerosene at a ratio of 10%, and the spray atomization performance of blended fuel oil was compared. In this experiment, as the carbon number of blended linear paraffins grew, the effect of atomization on fuel spray gradually increased. Among them, the linear alkanes C18 was blended at a ratio of 10%; the maximum reduction of the atomizing cone angle was 5.07%; the average droplet speed was changed by a maximum of 17.6%; Sauter's average diameter was changed by a maximum of 15%; Ohnesorge number and Weber number significant changed with increasing injection pressure, affecting the secondary breakage of droplets. In general, the addition of long linear alkanes will have a certain influence on the atomization performance of aviation kerosene.

Key words: bio jet fuel; low emission; long straight-chain alkanes; atomization performance; breakup of droplets

随着近几年航空运输业的迅猛发展,我国已经成为世界航空燃油消耗第二大国^[1],中国航空燃油的消耗量保持着平均每年 9% 的速度在迅速增长^[2],预计到 2020 年后,中国的航空燃油的消耗量将接近 5 600 万吨/年^[3],航空燃料的供给安全问题日益突出。同时,化石基航空燃料消耗量

收稿日期:2018-01-19
基金项目:青年科学基金(51406004)
作者简介:任海涛(1982—),男,工程师,博士,主要从事航空燃料方向研究。

引用格式:任海涛,甘志文. 掺混长直链烷烃对航空煤油雾化性能影响[J]. 航空动力学报,2019,34(2):357-367. REN Haitao, GAN Zhiwen. Atomization performance effects of aviation kerosene mixed with long straight-chain alkanes[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2): 357-367.

快速增长也导致了航空领域碳排放量的快速增加,由此带来的环境压力也日益严峻^[4]。大力发展航空替代燃料,尤其是生物基燃料得到了越来越高地重视^[5]。

微藻作为第三代航空替代燃料的原料,具有产油率高^[6]、生长周期短、不必占用耕地,全生命周期内可有效降低碳排放等诸多优点^[7],因此微藻基航煤被认为是未来最有前景的航空替代燃料^[8]。

生物质水热液化-脱羟、脱羧-加氢裂解工艺转换成生物燃油是目前被广泛认为比较有前景的发展趋势^[9],微藻基生物燃料经过水热液化工艺所制备的生物燃油主要成分是 C13~C22 的烃类物质,期中碳链长度在 C13~C18 的直链烷烃类物质所占比例非常高^[10],而传统航空煤油主要成份是碳链长度为 C8~C16 的混合烃类物质。如要将藻基燃油进一步转化为航空煤油,需加氢裂解,该环节耗能较大^[11]。如果将直链烷烃 C13~C18 组分含量比较高的微藻燃油与传统航空煤按一定比例掺混后可直接应用于航空领域,对节能具有重要意义。航煤中加入碳数较高的烃类物质会对航空煤油的冰点产生影响^[12],从飞行安全的角度考虑,不适合高海拔飞行,但是,如果能直接应用于对冰点要求比较低的低空通航领域,将有效解决微藻制备航空煤油的耗能问题。

航空燃油的喷雾特性直接影响其燃烧效果及发动机的性能。因此研究将 C13~C18 组分体积分数比较高的微藻基航空替代燃料与 RP-3 航空

煤油直接掺混在航空发动机中的应用的可行性,首先要对掺混对航空煤油的喷雾特征产生怎样影响进行研究。

1 实验系统及工况

1.1 实验系统

实验系统主要包括三部分:燃油供给及喷雾系统、动态粒子分析仪(PDA)数据采集系统,如图 1(a)所示;粒子图像测速法(PIV)数据采集系统,如图 1(b)所示。

燃油供给及喷雾系统主要包括氮气压力供给装置,储油罐和旋流雾化喷嘴。燃油储存在不锈钢储油罐中,通过注入高压氮气将燃油压入输油管路,经过过滤器滤掉燃油中的杂质,最后从旋流雾化喷嘴喷出。喷嘴选择 Danfoss 离心旋流雾化喷嘴,喷口直径为 100 μm ,额定喷油量为 2.08 L/h,最大雾化锥角为 80°。实验过程中,用精度为 0.2 mL/s 的浮指流量计对流量进行测量。实验温度为 20 °C。在整个实验过程中,为了避免周围气流干扰,喷雾及测量区域用塑料罩与外界空气隔离。

PDA 数据采集系统采用 Dantec 公司的粒子动态分析仪 BSO P60,使用 Arion 激光器作为光源。利用光源对液滴直径、液滴速度进行了测量。直径测量误差为 1%,直径测量误差为 5%(设备说明书提供)。PDA 数据采集测量点的设置如图 1(c)所示,喷雾场液锥是对称结构的,故只对液锥

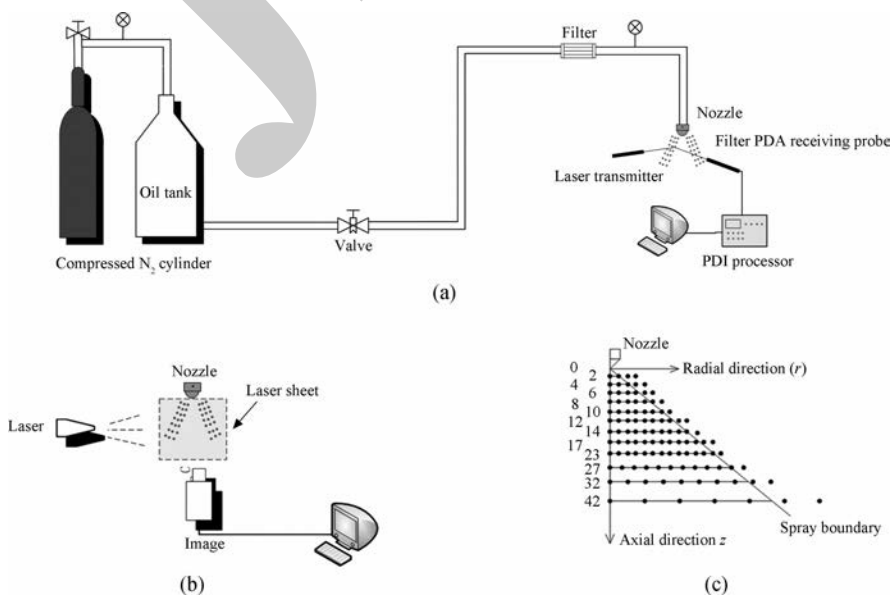


图 1 实验系统示意图
Fig. 1 Schematic of the test system

一侧进行测量^[13],测量点的轴向(z 轴)坐标分别设定为距离喷嘴轴向距 $z=2,4,6,8,10,12,14,17,23,27,32,42$ mm 的区域,测量点的径向坐标设定分为 4 种情况,以喷嘴中间正下方轴线为径向 0 点,当 $z<27$ mm,从径向 0 点向雾锥面方向间隔 1 mm 单位设置测量点;当 $z=27,32,42$ mm 分别间隔 2、3、4 mm 单位设置测量点。每个测量点持续 15 s 的测量时间,保证采集够 5000 个液滴的数据后再更换下一个测量点。PDA 测量液滴速度和直径的误差分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 5\%$ 。

PIV 实验数据收集系统采用 Lavision 公司的 Imager Pro X 4M CCD 采集器,在本文中对不同实验工况下,每种燃料,分别收集 2000 组 PIV 样本点,每个样本点连续拍照两次,间隔时间为 50 μ s,通过计算软件,得到每个样本所对应的瞬时雾化场中液滴速的度矢量分布图。

1.2 实验工况

本实验选取长支链烷烃 C13、C14、C15、C16、C17、C18 分别按 0%~10% (长直链烷烃在混合燃油中所占体积比) 比例与 RP-3 进行掺混,充分搅拌后再静置 12 h 进行实验。将各种掺混燃油分别在压力 $p=0.3,0.5,0.7,0.9,1.1$ MPa 等 5 种实验工况下进行喷雾实验,采集数据。

2 基础理化性能变化分析

燃油的喷雾特性与其理化性能(如密度、黏度、表面张力等)密切相关。所以研究掺混长直链烷烃对喷雾影响,要结合理化性能的变化进行分析。本文中使用的 RP-3 煤油由中国石油化工集团公司提供,对其组分分析如图 2 所示,可以看出其成分大多以 C8~C18 的分子组成,其中 C12、

C13 分子居多。在 20 $^{\circ}$ C 的环境下测量其理化性能结果如下:密度为 791.5 kg/m³,黏度为 1.628 mm²/s,表面张力为 24.0 mN/m。

对各组掺混燃油的密度、黏度、表面张力变化分析如下。

2.1 密度变化

燃油的密度采用密度测量仪(型号:SYA-1884A)按照国家标准 GB/T1884-2000 进行测量,测量误差为 ± 0.5 kg/m³ (设备说明书中提供)。测量结果如图 3(a)所示,密度变化与长支链烷烃的掺混比例是线性相关的,随着掺混比例的增加,混合燃油的密度线性降低。掺混 C13~C18 等 6 种混合燃油的拟合优度分别为:0.9899、0.994 2、0.987 0、0.985 5、0.993 2、0.976 9。按 10% 比例掺混的 6 种混合燃油密度分别为:787.2、788.2、789.2、789.5、789.8、790.4 kg/m³,相比 RP-3 煤油分别降低了 0.54%,0.42%,0.29%、0.25%、0.21%、0.14%。由此可见,10% 比例以内掺混长直链烷烃,对密度的影响很微小。

2.2 黏度变化

燃油的黏度测量采用黏度计(型号:SYD-265H),按照国家标准 GB/T265 进行测量,其测量误差范围: $\pm 0.3\%$ (设备说明书中提供)。结果分析如图 3(b)所示,各组混合燃油的黏度变化随着掺混长直链烷烃的体积分数的增加而呈现线性增长的趋势,在掺混体积分数达到 10% 时,黏度的变化最大,对 C13~C18 的变化趋势进行线性拟合,拟合优度分别为 0.985 6、0.994 5、0.992 0、0.996 9、0.993 4、0.988 1。增加率分别为:1.47%、3.71%、5.57%、6.55%、9.26%、10.30%。显然,掺混长直链烷烃对黏度的影响比较大。同时,也可以看到,在相同掺混比例下,掺混 C18 对运动黏性的影响最大,掺混 C13 对运动黏性的影响最小,其影响与掺混直链烷烃的碳数正相关。

2.3 表面张力变化

表面张力采用表面张力仪,(型号:SFT-A15),按照标准 ASTM D1331 进行测量,其测量误差范围: ± 0.1 mN/m (设备说明书中提供)。结果分析如图 3(c)所示,RP-3 煤油的表面张力大约为 26.06 mN/m,掺混长直链烷烃后,表面张力在 25.87~26.16 mN/m 之间变化。其变化区间几乎在仪器测量误差范围内,表面张力的变化不显著,也未发现与掺混比例之间存在明显的线性变化关系。

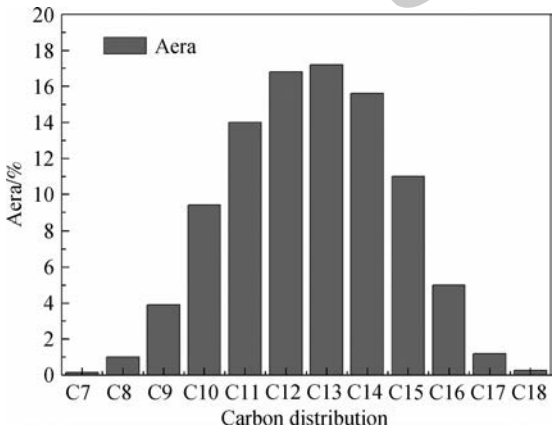


图 2 RP-3 煤油中碳数分布

Fig. 2 Carbon number distribution of RP-3 kerosene

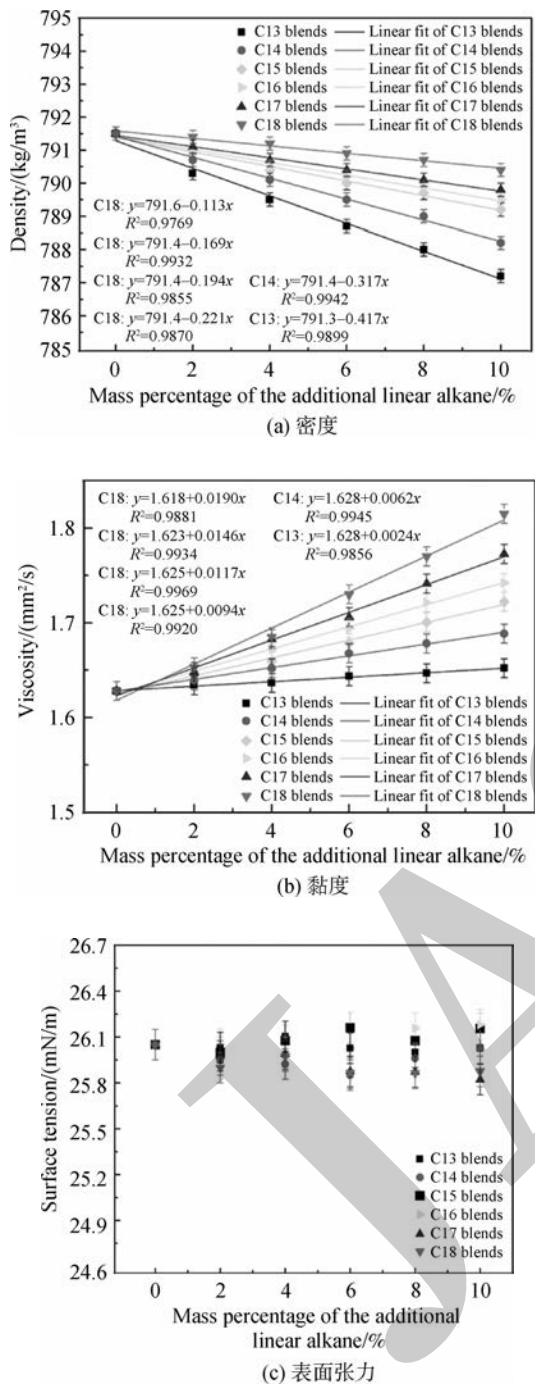


图 3 密度、黏度、表面张力变化分析

Fig. 3 Analysis of density,viscosity and surface tension

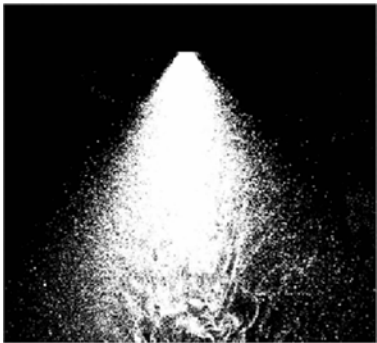
3 喷雾特性变化分析

本文分析的喷雾特性主要包括雾化锥角,雾锥结构、液滴速度,液滴直径、液滴二次雾化影响因素等几个方面。在本文实验结果中,掺混 10% 比例 C18 对喷雾特性带来的影响最大。故本文重点选择 RP-3 与 10% 比例 C18 的掺混燃油分别在低压 $p=0.3\text{ MPa}$ 工况和高压 $p=1.1\text{ MPa}$ 工况得到的实验数据进行对比分析。

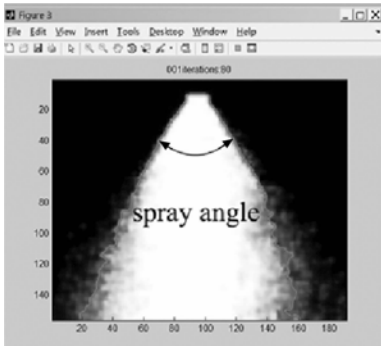
3.1 雾化锥角分析

雾化锥角是衡量喷雾效果的一个重要性能指标,本文中雾化锥角的分析采用主动轮廓模型 (ACM) 方法,其基本思想是用连续曲线来表达目标轮廓,并定义一个自变量包括曲线的能量泛函,将分割问题转变为求解泛函极小值问题,当泛函达到最小值时,曲线演化到目标边界^[14]。应用 MATLAB 软件对喷雾的照片进行分析计算。图 4(a) 为高速摄像机拍摄的 RP-3 航空煤油在 $p=1.1\text{ MPa}$ 的实验压力下形成的雾锥照片。图 4(b) 显示的是对雾锥照片进行 80 次迭代后确定雾化锥角的最终值。

图 4(c) 显示的是应用 ACM 方法测得 RP-3 煤油与按 10% 比例掺混的 6 种燃油在 $p=0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1\text{ MPa}$ 等 5 种压力工况下的雾化锥角。可以很明显的看到各组燃油随着喷雾压力的增加,雾化锥角明显变大。在 $p=0.3, 0.5\text{ MPa}$ 低压工况下,雾化不完全,雾化锥角主要由喷嘴的结构决定,混合燃油组分变化对其影响不大;在 $p=0.7, 0.9, 1.1\text{ MPa}$ 工况下,随着喷雾压力的增加,雾化锥角越来越大。同时黏度对雾化锥角的影响也越来越明显了,与 RP-3 煤油的相比,在 $p=1.1\text{ MPa}$ 的工况下,6 种掺混燃油与 RP-3 煤油相比,雾化锥角分别减小了 2.98%、3.39%、3.82%、4.17%、4.76%、5.07%。



(a) 原始照片



(b) 次迭代

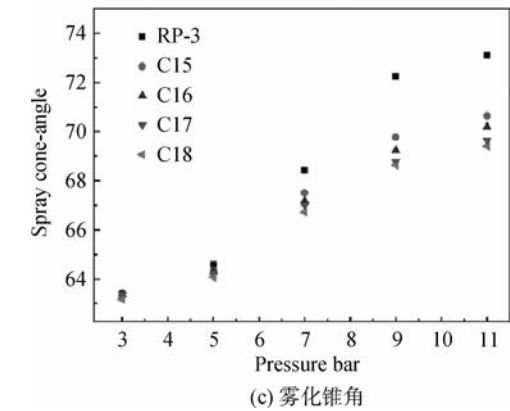
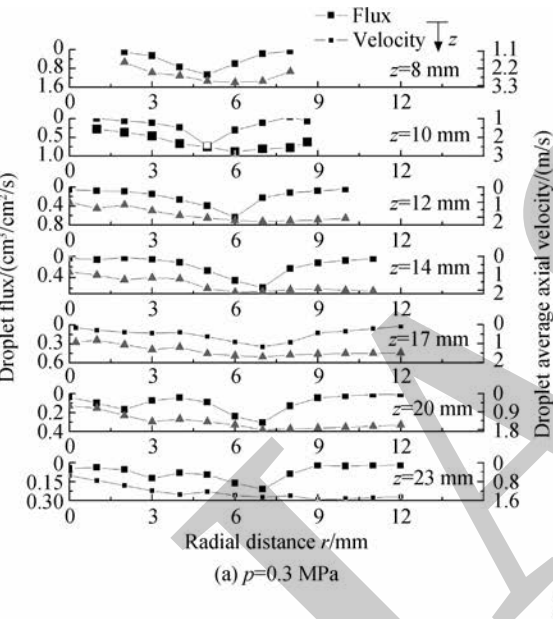


图 4 雾化锥角变化

Fig. 4 Spray cone angle with respect to injection pressure



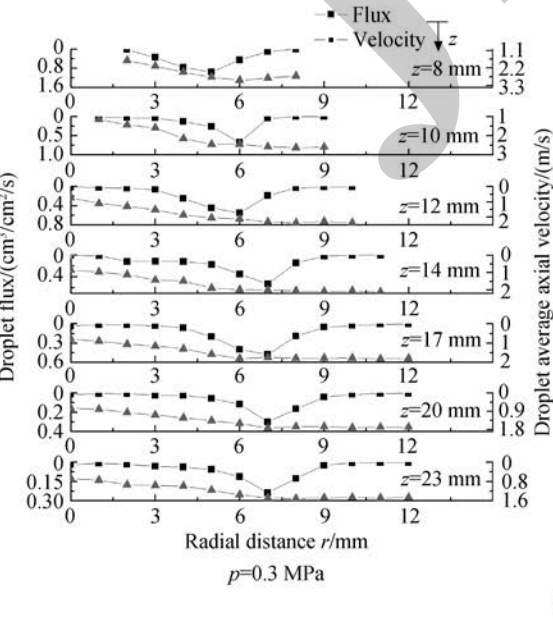
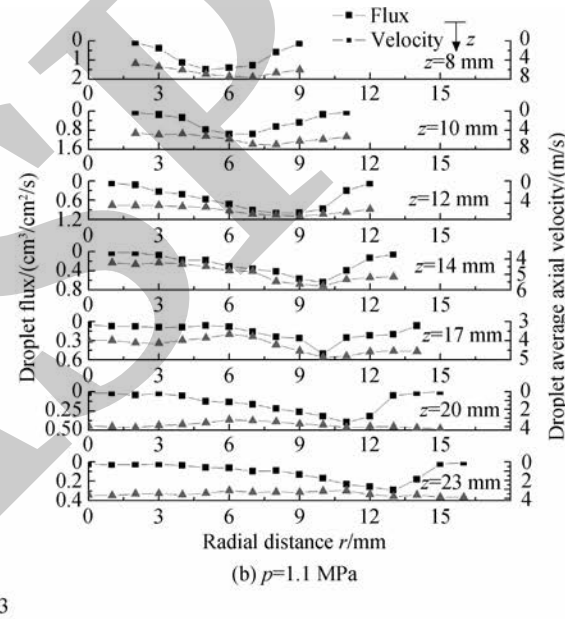
(a) RP-3

3.2 雾锥结构分析

雾锥的速度和流量结构特征分析如图 5 所示。掺混燃油与纯 RP-3 煤油相比,呈现了如下相同的速度和流量空间分布特性:

1) 随着轴向 z 的增大,燃油流量的波峰逐渐趋于平缓;液膜逐渐破碎,液滴也逐渐扩散,液滴广泛分布在液锥面内外的区域。

2) 当径向坐标 r 大于液膜面位置时(即在液锥面外),液滴流量逐渐减少,趋近于至 0,而液滴速度却依然保持很高的值,这是因为液膜破碎时,少量的直径较大的液滴脱离了液锥面,扩散到外面,并且依然保持很高的动量。



(b) 10%掺混C18

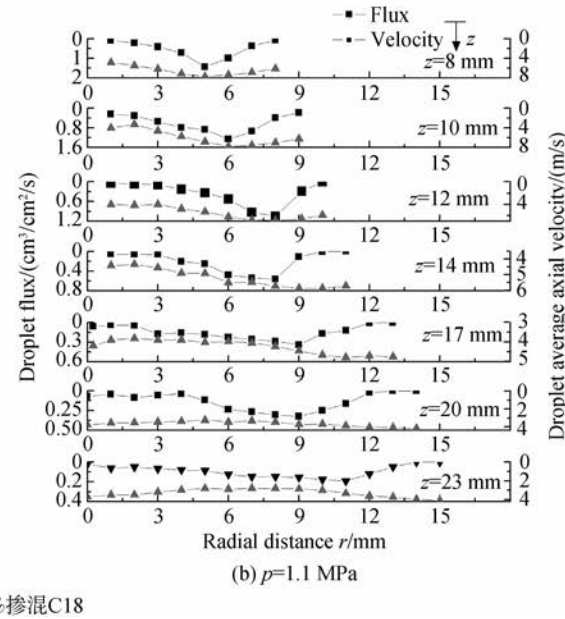


图 5 雾锥结构分析

Fig. 5 Analysis of spray flow structure

3) 在 $p=0.3\text{ MPa}$ 工况下,在距离喷嘴 $z=23\text{ mm}$ 雾锥的中心区域,液滴速度比较小,而在 $p=1.1\text{ MPa}$ 时,在相同区域观察到具有较高速度的液滴,这是由于空气的卷吸造成的。随着喷雾压力的不断增大,更多的小液滴被空气卷到这个位置^[15]。

同时,也可以明显的看到,掺混燃油与 RP-3 煤油在雾锥结构上存在如下明显不同:

1) $p=1.1\text{ MPa}$ 时,混合燃油液锥面外的液滴的速度明显高于液滴面的速度,而对于 RP-3,液锥面外和液锥面上的液滴速度基本相同。这是因为,液锥面外的液滴源自液膜破碎,由于混合燃油的黏度大导致的这部分脱离液锥面的液滴直径更大,甚至大于液锥面的液滴直径,这部分液滴在空气中保持更大的惯性^[16]。

2) 在 $p=0.3\text{ MPa}$ 工况下,掺混燃油与纯 RP-3 相比,雾锥结构大致相同,而在 $p=1.1\text{ MPa}$ 工况下,流量峰值有明显向中心侧的位移,雾化锥角也因此逐渐减小。

3.3 液滴轴向速度变化分析

液滴轴向平均速度变化如图 6 所示,可以看到由于空气的阻力影响,液滴的平均速度会随着轴向 z 的增大而逐渐减小。在 $p=0.3\text{ MPa}$ 的低压工况下,轴向 $7\sim14\text{ mm}$ 区域速度下降相对较快,在 $z=23\text{ mm}$ 区域附近变化趋势趋缓,液滴在初始速度相对较低时,动能损失较快。掺混燃油的液滴速度在 $p=0.3\text{ MPa}$ 工况下小于 RP-3 的滴液速度,在轴向 $z=7\text{ mm}$ 区域,掺混 C18 混合燃油的平均液滴速度减小了 17.6% 。原因是在低工况压力下,掺混燃油的黏度较大,当燃料离开喷嘴时,黏度增大造成液滴要克服的阻力更大。随着距离喷嘴位置的增加,几种燃油的液滴速度差逐渐缩小,在轴向 $z=23\text{ mm}$ 处,几种燃料液滴速度有一个交叉点,这是因为 RP-3 航空煤油液滴直

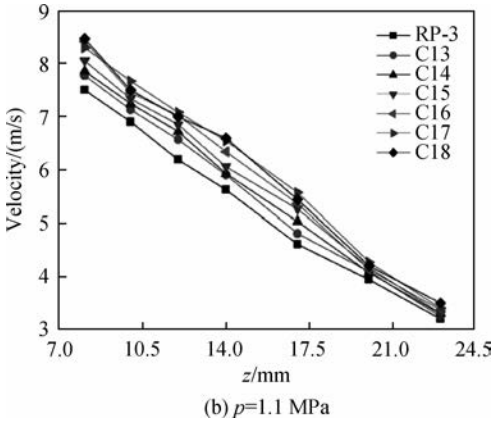


图 6 轴向平均速度
Fig. 6 Oplet average velocity of axes

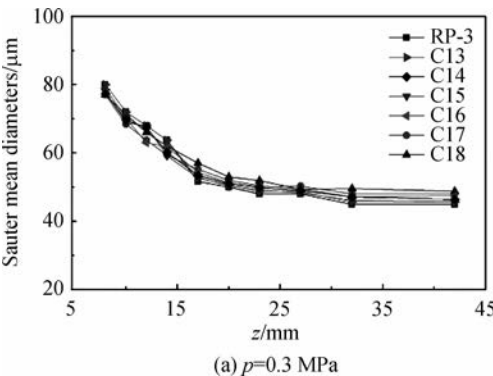
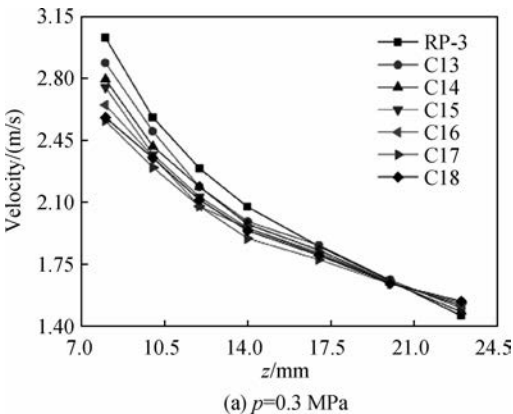
径小,相对于混合燃油在空气环境中衰减更快。

3.4 索太尔平均直径(SMD)变化分析

3.4.1 轴向平均 SMD 变化分析

在 $p=0.3\text{ MPa}$ 工况下,如图 7(a)所示,随着轴向距离的增加,RP-3 煤油和 6 种掺混燃油的 SMD 平均值都呈现了逐渐减小的共同特征。掺混燃油的轴向 SMD 平均值要高于 RP-3,掺混直链烷烃的碳数越高,轴向 SMD 平均值越大。掺混 C18 燃油的液滴对 SMD 的影响最明显,在轴向距离喷嘴 $14\sim32\text{ mm}$ 区域,会导致 SMD 增加 $6\%\sim12\%$ 。这是由于掺混的烷烃碳数越高,黏性就越大,因此破碎起来更加困难,导致液滴的直径更大。

在 $p=1.1\text{ MPa}$ 工况下,如图 7(b)所示 RP-3 煤油及其他 6 种掺混燃油均出现了随着轴向距离的增加,液滴破碎,轴向 SMD 平均值先逐渐减少,而后又增加的情况。对比 PIV 测量的瞬时数据,如图 8 所示,可以清楚的看到在雾锥面外已经形成清晰的旋涡。在高压工况下,在轴向距离喷嘴 $20\sim30\text{ mm}$ 的区域,几种燃油均出现在液锥面附近形成卷吸旋涡的现象。



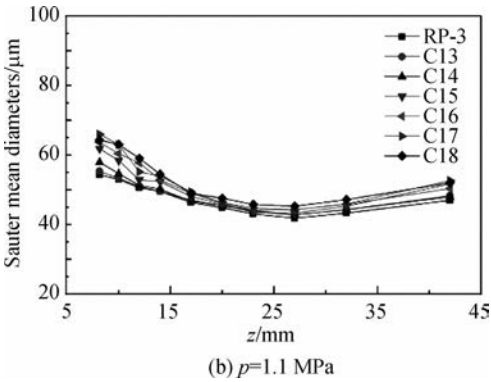


图 7 轴向 SMD 平均值
Fig. 7 Average SMD of axes

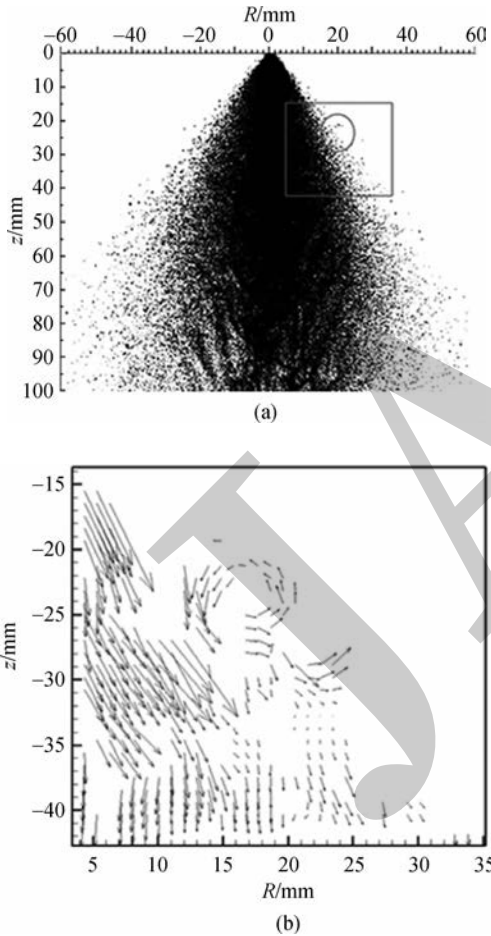


图 8 PIV 测到的液滴流畅漩涡

Fig. 8 Flow field from PIV for the semi-trapped vortex

3. 4. 2 SMD 径向分布分析

选取 RP-3 航空煤油与 10% 比例 C18 掺混燃油在 $p=0.3, 1.1$ MPa 两种工况下的 SMD 径向分布数据分析,如图 9 所示。总体来说,两种燃油的 SMD 值分布情况基本接近,随着喷雾压力增大正向增加;在雾锥的中心区域 SMD 值比较小,接近雾锥面,SMD 值逐渐增大。

在液锥面外,液滴的 SMD 值较大,这部分是因为惯性较大,脱离液锥面后仍继续按照原来的轨迹运动的大直径液滴。而中心区域的液滴 SMD 值较小,这部分是直径和惯性较小的液滴,很容易被空气流卷入到雾锥的中心区^[17]。由于黏度的影响,C18 掺混燃油的 SMD 偏大。

可以看到在轴向 $z=7$ mm 附近区域,掺混 C18 燃油的液滴 SMD 变化差异最大,增加了 26.1%。随着距离喷嘴位置的增大,变化差异逐渐缩小,在轴向距离喷嘴 14~32 mm 区域,掺混 C18 燃油的液滴 SMD 增加值在 8%~15% 范围之间变化。

RP-3 煤油在 20℃ 时的饱和蒸汽压力为 0.0047 MPa^[18],饱和蒸汽压力值较小,故在本文分析中饱和蒸汽压力的影响忽略不计。

3. 5 燃油液滴二次雾化影响因素分析

在 RP-3 燃油中掺混长直链烷烃,从理化性能变化来看,主要对燃油黏度影响比较大,引起液滴破碎模式发生变化,进而对液滴 SMD 的变化产生影响。韦伯数 (We) 和 Ohnesorge 数 (Oh) 是分析液滴变形破碎的两个重要因素。

3. 5. 1 韦伯数 (We) 分析

韦伯数可清晰的表示喷雾过程中作用在液滴表面的气动力和表面张力的比值关系^[19],对液滴二次破碎模式研究具有很重要的意义,通过如下公式对各组燃料喷雾过程中液滴的平均韦伯数进行计算

$$We = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_g u_i d_i}{\delta} / n \quad (1)$$

式中 ρ_g 为液滴密度; u_i 为气体和液体的相对速度,本实验中认为气体速度为 0,该项为液滴的速度; d_i 为液滴的直径; δ 为表面张力系数; n 为每一个点统计液滴的个数。

选取距离喷嘴较近的区域 ($z=8$ mm) 和雾锥形成的中间区域 ($z=23$ mm),分别在 $p=0.3, 1.1$ MPa 两种工况下,对 RP-3 及掺混燃油液滴的平均韦伯数进行对比分析。如图 10 所示,两种压力工况下,各种燃油雾锥中心区域液滴的韦伯数值均接近于零,沿着水平方向由中心向液锥面移动,韦伯数也随之增加,在液锥面外,随着液滴的速度衰减,韦伯数也随之下降。这是由于雾锥中心区域液滴速度较小,而液锥面附近液滴的速度较大。对比 $p=0.3, 1.1$ MPa 两种工况压力,均可明显看到,在液锥面附近,掺混直链烷烃均会引起液滴

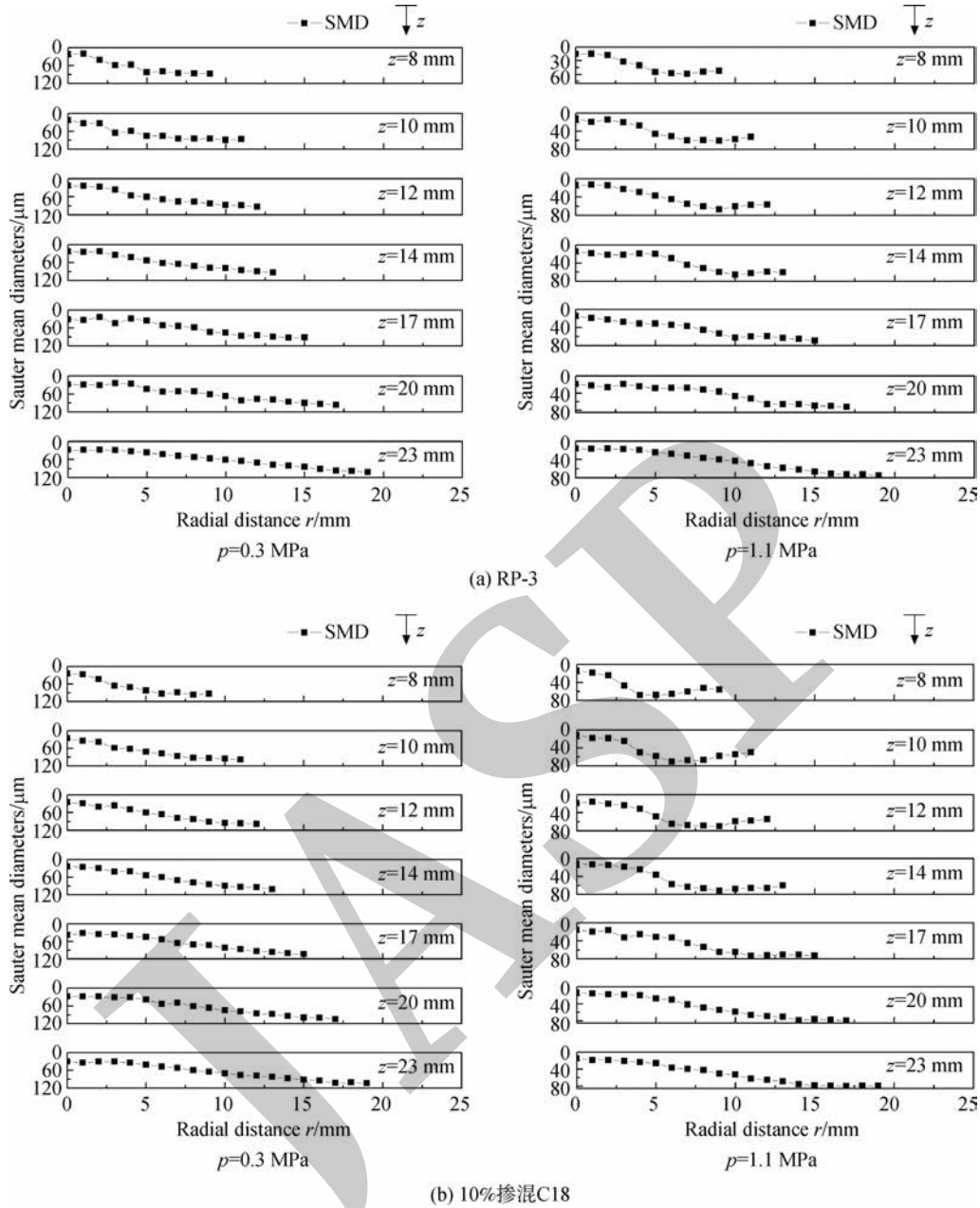
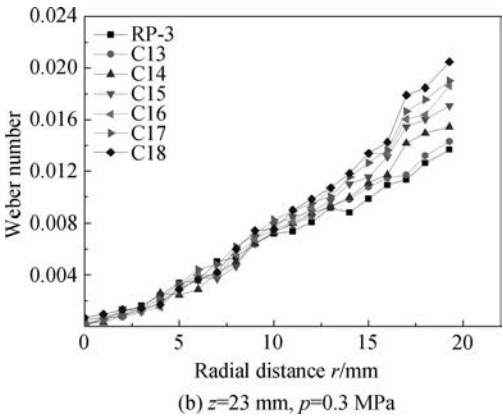
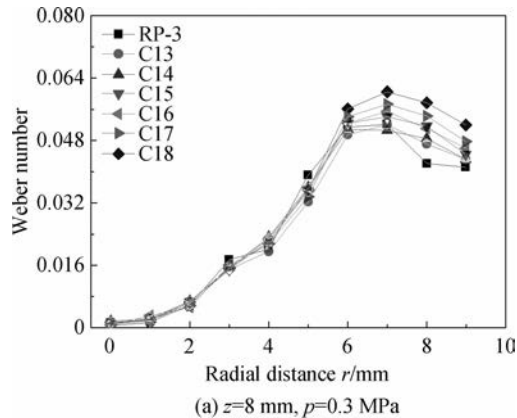


图 9 SMD 径向分布

Fig.9 SMD profiles of radial



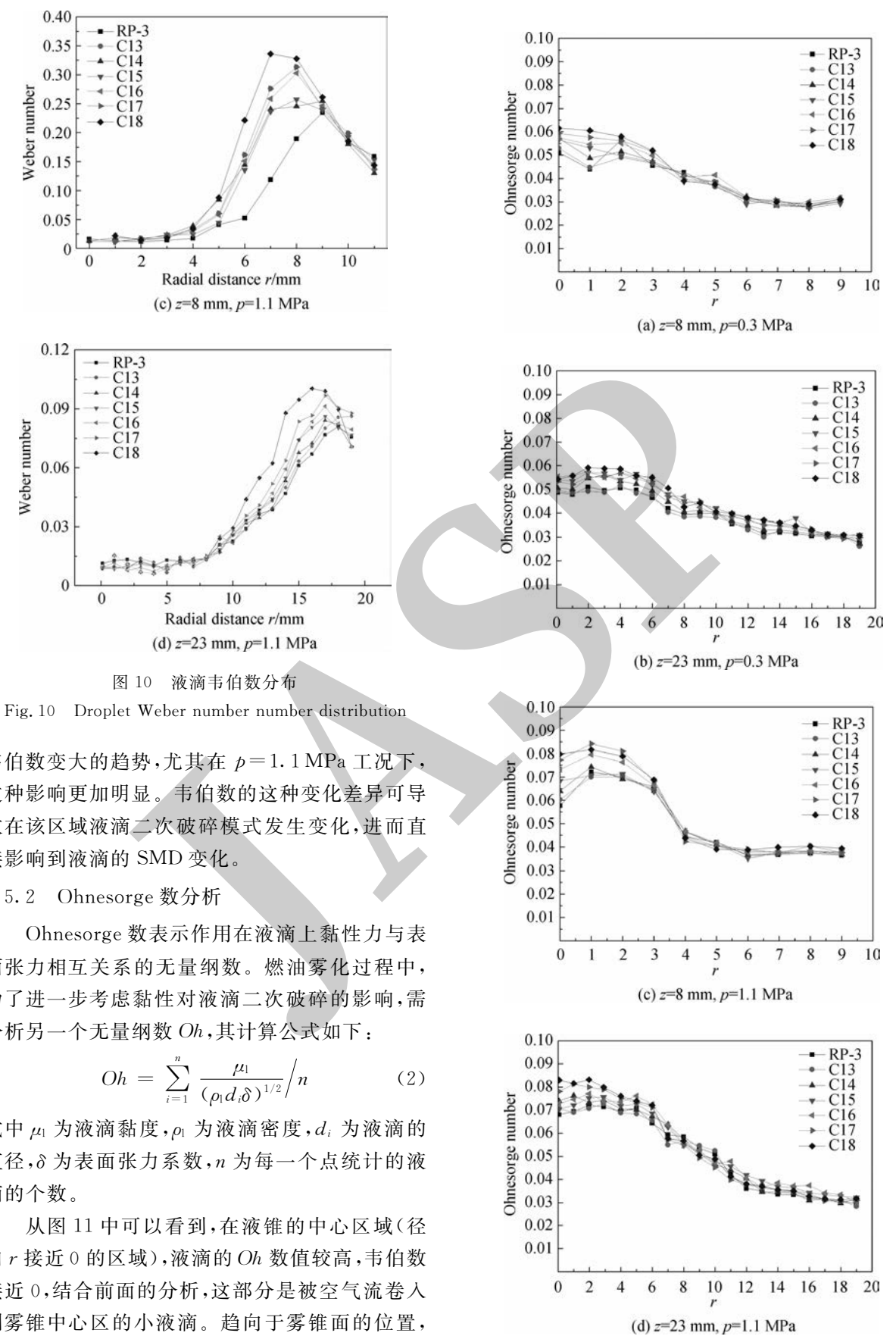


图 10 液滴韦伯数分布

Fig. 10 Droplet Weber number number distribution

韦伯数变大的趋势,尤其在 $p=1.1\text{ MPa}$ 工况下,这种影响更加明显。韦伯数的这种变化差异可导致在该区域液滴二次破碎模式发生变化,进而直接影响到液滴的 SMD 变化。

3. 5. 2 Ohnesorge 数分析

Ohnesorge 数表示作用在液滴上黏性力与表面张力相互关系的无量纲数。燃油雾化过程中,为了进一步考虑黏性对液滴二次破碎的影响,需分析另一个无量纲数 Oh ,其计算公式如下:

$$Oh = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{(\rho_i d_i \delta)^{1/2}} / n \tag{2}$$

式中 μ_i 为液滴黏度, ρ_i 为液滴密度, d_i 为液滴的直径, δ 为表面张力系数, n 为每一个点统计的液滴的个数。

从图 11 中可以看到,在液锥的中心区域(径向 r 接近 0 的区域),液滴的 Oh 数值较高,韦伯数接近 0,结合前面的分析,这部分是被空气流卷入到雾锥中心区的小液滴。趋向于雾锥面的位置, Oh 数值越来越小,韦伯数越来越大,此时液滴黏性对 Oh 的影响比较大,而接近雾锥面附近,由于液滴直径比较大,导致黏性对 Oh 数值的影响变

图 11 液滴 Ohnesorge 数分布

Fig. 11 Droplet Ohnesorge number distribution

小了。在雾锥面附近,掺混燃油与 RP-3 的 Oh 数值差异并不明显。

4 结 论

本文重点分析了在 $p=0.3\sim 1.1\text{ MPa}$ 等 5 种压力工况下(航空发动机比较典型的工作压力),在 RP-3 航空煤油中按 10% 比例分别掺混 C13、C14、C15、C16、C17、C18 等 6 种长直链烷烃,对航空煤油喷雾特性产生的影响,结论如下:

1) 雾化锥角变化与喷雾压力及掺混的直链烷烃的碳数有直接关系。在 $p=0.3\text{ MPa}$ 工况下,掺混长直链烷烃对雾化锥角的影响很小。随着喷雾压力的增加,6 种燃油的雾化锥角均不同程度的变大。可明显的观察到,在相同压力工况下,掺混长直链烷烃会导致雾化锥角减少,在 $p=1.1\text{ MPa}$ 工况下,掺混 10% 比例 C18,会导致雾化锥角变化最明显,减少 5.07%。

2) 掺混长直链烷烃会在喷雾的初始阶段对液滴速度产生明显影响(轴向 $z=7\sim 21\text{ mm}$ 区域),在接近轴向 23 mm 处,掺混燃油与 RP-3 煤油的液滴速度逐渐接近。

3) 掺混长直链烷烃会导致液滴 SMD 增大, $p=0.3, 1.1\text{ MPa}$ 工况下,在距离喷嘴 14~32 mm 区域,掺混燃油液滴的 SMD 增幅分别在 6%~12% 和 8%~15% 两个区间变化。

4) 掺混长直链烷烃,在液锥雾锥面处,由于黏性变化会对 Oh 数值产生影响,进而影响韦伯数的变化,尤其是高压工况下,在雾锥面附近会造成破碎模式的变化,进而导致影响 SMD 变化。

本文研究了掺混 10% 比例长直链烷烃 C13~C18 对航空煤油喷雾性能影响,从实验结果来看,掺混长直链烷烃后,将对燃油喷雾雾化性能产生一定的影响。本文的结论将在藻基生物替代燃料实际应用研究中,针对发动机结构及喷嘴的改型设计方面提供一定的参考意义。

参考文献:

[1] 柳亚琴,赵国浩.节能减排约束下中国能源消费结构演变分析[J].经济问题,2015(1):15-18,27-33.
LIU Yaqin, ZHAO Guohao. The evolution analysis of China's energy consumption structure in the constraints of energy-saving and carbon emissions reduction[J]. On Economic Problems, 2015(1):15-18,27-33. (in Chinese)

[2] 任海涛,郭放,杨晓奕.中国微藻航空煤油制备潜能及 CO_2 减排[J].北京航空航天大学学报,2016,42(5):912-919.
REN Haitao, GUO Fang, YANG Xiaoyi. Potential produc-

tion of microalgae aviation fuel and CO_2 emissions reduction in China[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(5):912-919. (in Chinese)

[3] 张彤,张文琴,王渊,等.中国石油供应安全状态分析与风险预警[J].中国石油大学学报(社会科学版),2014,30(2):1-7.
ZHANG Tong, ZHANG Wenqin, WANG Yuan, et al. Analysis and warning on chinese oil supply security[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Social Sciences), 2014, 30(2):1-7. (in Chinese)

[4] 唐旭,张宝生,邓红梅,等.基于系统动力学的中国石油产量预测分析[J].系统工程理论与实践,2010,30(2):207-212.
TANG Xu, ZHANG Baosheng, DENG Hongmei, et al. Forecast and analysis of oil production in China based on system dynamics [J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2010, 30(2):207-212. (in Chinese)

[5] 胡洪营,李鑫,于茵,等.藻类生物质能源—基本原理、关键技术与发展路线图[M].北京:科学出版社,2011.

[6] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae[J]. Biotechnology Advances, 2007, 25(3):294-306.

[7] YOO G, PARK M S, YANG J W. Lipid content in microalgae determines the quality of biocrude and energy return on investment of hydrothermal liquefaction[J]. Applied Energy, 2015, 156:354-361.

[8] ULLAH K, AHMAD M S, SHARMA V K, et al. Assessing the potential of algal biomass opportunities for bioenergy industry[J]. Fuel, 2015, 143(4):414-423.

[9] YANG Xiaoyi, GUO Fang, XUE Song. Carbon distribution of algae-based alternative aviation fuel obtained by different pathways[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54:1129-1147.

[10] ZHAO C, BRUCK T, LERCHER J. Catalytic deoxygenation of microalgae oil to green hydrocarbons[J]. Green Chemistry, 2013, 15(7):1720-1739.

[11] 陈俊英,马晓建,冯向应,等.国内外生物航油研究现状[J].可再生能源,2012,30(2):120-124.
CHEN Junying, MA Xiaojian, FENG Xiangying, et al. Status study of aviation biofuel at home and abroad[J]. Renewable Energy, 2012, 30(2):120-124. (in Chinese)

[12] 闫博,杨有亮.加氢裂化装置航煤冰点不合格原因分析与对策[J].广州化工,2010,38(3):183-184.
YAN Bo, YANG Youliang. Analysis and countermeasures of unqualified freezing point of the jet fuel in hydrocracking unit[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2010, 38(3):183-184. (in Chinese)

[13] 周婷雅,李江弘,谭若樵,等.正十七烷与正十八烷对航空煤油理化性能及液滴平均直径的影响[J].航空动力学报,2016,31(5):1133-1141.
ZHOU Tingya, LI Jianghong, TAN Ruqiao, et al. Impact of heptadecane and octadecane on physical properties and SMD of kerosene[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(5):1133-1141. (in Chinese)

[14] 曾青华,范慧杰,王岳,等. 基于主动轮廓方法提取雾化锥角[J]. 航空动力学报,2014,29(5):912-919.
ZENG Qinghua,FAN Huijie,WANG Yue,et al. Spray angle tracking based on active contour method[J]. Journal of Aerospace Power,2016,29(5):912-919. (in Chinese)

[15] ZHANG Haibin,BAI Bofeng,LIU Li,et al. Droplet dispersion characteristics of the hollow cone sprays in cross-flow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2013,45(2):25-33.

[16] GAN Zhiwen,REN Haitao,YANG Xiaoyi. Effect of linear alkane C17,C18 on Spray characteristics of kerosene in hollow cone pressure swirl spray [J]. Atomization and Sprays,2017,27(6):207-212.

[17] 石日昕. 飞机燃油系统高空性及其计算[J]. 河北工业科技,2013,30(4):244-248.
SHI Rixin. Altitude performance of aircraft fuel system and the calculation[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2013,30(4):244-248. (in Chinese)

[18] REN N, MARSHALL A W. Characterizing the initial spray from large weber number impinging jets[J]. International Journal of Multiphase Flow,2014,58(1):205-213.

[19] MARCHIONE T,ALLOUIS C,AMORESANO A,et al. Experimental investigation of a pressure swirl atomizer spray[J]. Journal of Propulsion and Power,2007,23(5):1096-1101.

(编辑:叶 青)