

正癸烷作为航空煤油雾化过程 代理燃料的研究

霍伟业, 林宇震, 张 弛, 庄纯青

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 对航空煤油和单组份碳氢燃料正癸烷的雾化性能进行实验测试, 研究在部件燃烧特性验证阶段, 正癸烷作为航空煤油雾化过程代理燃料的可行性. 结果表明: 在室温条件下, 经过旋流器的气流压力降分别为 0, 500, 2000 Pa, 供油压力从 0.1~1.0 MPa 间隔 0.1 MPa 均匀变化, 使用马尔文激光粒度仪测量旋流器下游点火器位置处两种燃料的雾化索太尔平均直径. 对于两种燃料, 供油压力大于 0.5 MPa 后, SMD 变化缓慢, 此时两种燃料的雾化过程基本完成, 雾化索太尔平均直径均介于 30~45 μm 之间. 相同气流压力降下, 正癸烷的雾化 SMD 比航空煤油稍大, 这与其更高的黏度和表面张力有关; 供油压力大于 0.5 MPa 后, 两种燃料的雾化 SMD 非常接近. 在对实验数据进行拟合分析的基础上, 获得了航空煤油和正癸烷在旋流中的雾化 SMD 经验关系式, 发现拟合系数的相对差异约为 7%, 可将正癸烷经过适当的修正之后做为航空煤油雾化的代理燃料.

关 键 词: 航空煤油; 正癸烷; 旋流; 雾化; 物理代理燃料

中图分类号: V231; TK231.2

文献标志码: A

Research on *n*-decane as surrogate fuel of aviation kerosene in atomization process

HUO Wei-ye, LIN Yu-zhen, ZHANG Chi, ZHUANG Chun-qing

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Atomization characteristics of aviation kerosene RP-3 and single component hydrocarbon fuel *n*-decane were tested to study the feasibility of *n*-decane as an atomization surrogate fuel of aviation kerosene in component testing stage. Results showed that, at room temperature, atomization Sauter mean diameter (SMD) located at igniter orifice of the two fuels was measured using Malvern laser particle size measurement system when the air pressure drop through the swirler was 0, 500, 2000 Pa, and the fuel pressure varied from 0.1 MPa to 1.0 MPa by 0.1 MPa uniformly. SMD of the two fuels decreased slowly when fuel pressure increased to more than 0.5 MPa, showing that atomization process of the two fuels basically completed, and the atomization SMD was between 30—45 μm . When the air pressure drop was the same, the atomization SMD of *n*-decane was slightly larger than that of aviation kerosene due to the slightly larger viscosity and surface tension. When the fuel pressure was more than 0.5 MPa, physical properties of the fuels and aerodynamic force around the atomization could be ignored, and the atomization SMD of the two fuels was very close.

收稿日期: 2014-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(51306010); 北京市国家自然科学基金(3152020)

作者简介: 霍伟业(1986—), 男, 河北保定人, 博士生, 主要从事航空替代燃料的研究.

Further, the experimental data were analyzed and fitted to obtain the empirical relationship of atomization SMD of the two fuels in swirl flow. The relative difference of the fit coefficients was about 7%, so, *n*-decane could be used as the physical surrogate fuel of aviation kerosene atomization after appropriate correction.

Key words: aviation kerosene; *n*-decane; swirl flow; atomization; physical surrogate fuel

目前对航空煤油的基础理化特性及基础燃烧特性都进行了广泛的研究,针对航空煤油发展代理燃料(surrogate fuel)以及基于代理燃料发展详细的和简化的化学反应机理研究工作也已经开展了很多,并从层流火焰传播速度、点火延迟时间、污染物排放等各方面进行了验证,对航空煤油的燃烧过程有了充分全面深刻的理解。

近十年来,模拟基础燃烧特性的代理燃料发展了很多,Dagaut 等^[1-2]采用摩尔分数 74% 的正癸烷(*n*-decane)、15% 的正丙基苯(*n*-propylbenzene)和 11% 的正丙基环己烷(*n*-propylcyclohexane)作为 Jet-A1 的代理燃料,该代理燃料的化学动力学机理正确模拟了航空煤油的点火延迟时间(当量比为 0.5,压力 $p = 0.1 \sim 2.0$ MPa)、在完全搅拌反应器中氧化以及火焰结构(当量比为 1.7,压力为常压)。Honnet 等^[3]采用质量分数为 80% 的正癸烷和 20% 的 1,2,4-三甲基苯(1,2,4-trimethylbenzene)组成的混合物(Aachen 代理燃料)作为煤油型燃料的代理燃料,使用该代理燃料的化学动力学机理得到的数值计算结果,与从激波管、快速压缩机、完全搅拌反应器、稳定预混火焰燃烧器得到的实验数据吻合得很好。研究表明,Aachen 代理燃料的化学动力学机理可以应用于预测煤油的非预混燃烧。

单组分碳氢燃料作为代理燃料,由于其简单的特性,依然被广泛的研究着,Kurman 等^[4]使用正十二烷(*n*-dodecane)模拟航空煤油的预燃特性,在压力为 0.8 MPa、当量比范围为 0.23~0.88 范围内,使用气相色谱法(gas chromatography)测量增压流动反应器(pressurized flow reactor)中两种燃料的中间产物成分及浓度,并与正十二烷半详细化学动力学机理的模拟结果对比,发现在中等当量比情况下,该半详细机理能很好地预测航空煤油 CO 和 CO₂ 的生成。

正癸烷作为构建代理燃料的重要成分^[2-3,5-8],也可以独自作为航空煤油的代理燃料,因为在完全搅拌反应器中,正癸烷和煤油具有非常相似的

氧化速率^[1]。Dagaut 等^[2]发现对于绝大部分燃烧中间产物(除了苯和甲苯),正癸烷和航空煤油 Jet-A1 在搅拌反应器(jet stirred reactor,JSR)中的实验结果都吻合的很好,对于预测这些中间产物,正癸烷的作为代理燃料基本可用。Lindstedt 等^[9]研究了正癸烷和航空煤油的层流预混火焰结构,发现了和 Dagaut 相同的实验现象,即除了苯外,其他燃烧中间产物测量结果基本相符。王慧汝等^[10]使用单一正癸烷作为预测航空煤油 RP-3 点火延迟时间的代理燃料,发现在温度高于 1176 K 时预测值与实验值符合较好,在 1052~1176 K 之间则相差较大。

液体燃料在实际燃烧室中燃烧,需经历雾化、蒸发、混合、燃烧反应的过程,因此,要准确模拟液态燃料在实际燃烧室中的燃烧特性,不仅需要代理燃料在基础燃烧特性上可以准确模拟真实燃料,还需要代理燃料能在雾化、蒸发等物理过程中能准确模拟真实燃料。所以,液态燃料在燃烧室中的雾化特性对于其燃烧室燃烧特性有直接影响^[11]。这是属于物理代理(physical surrogate)的范畴^[12]。

本文研究了正癸烷和航空煤油 RP-3 在带旋流器矩形燃烧室中的雾化特性,并对两种不同燃料的雾化特性进行了对比分析,得到两种燃料雾化索太尔平均直径的经验关系式,分析了正癸烷作为航空煤油雾化过程代理燃料的可行性。

1 实验设置

1.1 实验装置设计

本研究所采用的实验装置如图 1 所示:按照喷嘴的设计喷雾张角,确定测量孔的位置,使喷雾锥角与玻璃壁面刚好相交于测量孔的中心,该位置也正是实际燃烧室中点火器的放置处。进气管路分为 4 股,使集气箱中的气流流场在到达限流器或旋流器之前尽量均匀。旋流器为内外双旋流器结构,内旋流器为斜切孔形式,旋流数为 0.91,以流动方向为基准其旋向为右旋;外旋流器为径

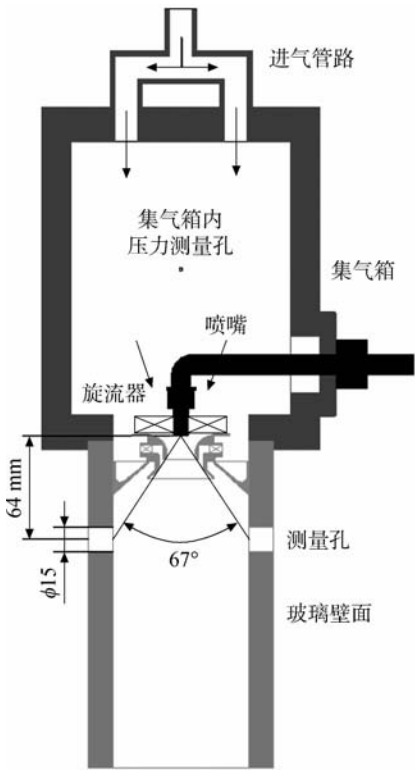


图 1 雾化实验结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of atomization experiment

向叶片形式,旋流数为 0.93,以流动方向为基准其旋向为左旋,经过实验标定其总有效面积为 $(200 \pm 0.9) \text{ mm}^2$. 喷嘴为空心喷雾锥型离心喷嘴,实验前使用航空煤油标定喷嘴流量数为 $F_{n,PR-3} = (20.95 \pm 0.03) \text{ kg}/(\text{h} \cdot \sqrt{\text{MPa}})$,使用正癸烷标定喷嘴流量数为 $F_{n,n-decane} = (19.75 \pm 0.12) \text{ kg}/(\text{h} \cdot \sqrt{\text{MPa}})$.

本研究采用由天津大学现代光学仪器研究所研制的 LSA-III 型马尔文激光粒度测试仪,实验系统如图 2 所示.当激光通过颗粒时发生衍射,其衍射光的角度与颗粒的体积相关,颗粒体积越大,衍

射光的角度越小,不同体积的颗粒所衍射的光会落在不同的位置,因此,通过衍射光的位置可反映出颗粒体积大小.同时,通过适当的光路配置,同样体积的颗粒所衍射的光会落在同样的位置,所以叠加后的衍射光强度反映出颗粒所占的相对多少,通过分布在不同角度上的检测器测定衍射光的位置信息及强度信息,然后根据米氏理论(等效圆球理论)就可计算出颗粒的直径分布.

在室温条件(283.15 K)下,经过旋流器的气流压力降分别为 0,500,2 000 Pa 时,研究供油压力从 0.1~1 MPa 间隔 0.1 MPa 均匀变化,测量孔处两种燃料的雾化参数.其中气流压力降为 0 Pa 时,不安装旋流器和玻璃壁面,仅考察喷嘴在静止环境中的雾化规律.

1.2 数据处理

液滴雾化颗粒度常用索太尔平均直径 d_{32} 表示,即在液体的总质量相等的前提下,按照液雾总表面积不变的原则求得的平均直径.液雾的 d_{32} 越小,其总的表面积越大,总的蒸发速率越快. d_{32} 直接影响燃烧室的燃烧性能,例如点火、熄火、燃烧效率及出口温度分布等,所以 d_{32} 是评价替代燃料(alternative fuel)和代理燃料燃烧室燃烧性能的一个重要参数.

$$d_{32} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \tag{1}$$

实验之前先用标准颗粒群进行标定,确定系统测量误差.取 4 次标准颗粒群测量结果的平均值作为标定 d_{32} ,与标准颗粒群的标称 d_{32} 之比作为修正系数 α .每个实验状态进行 4 次测量以减小误差,实验结果的平均值与修正系数 α 之比作为该实验状态下的最后结果.这样可尽量减小系统误差及统计误差.

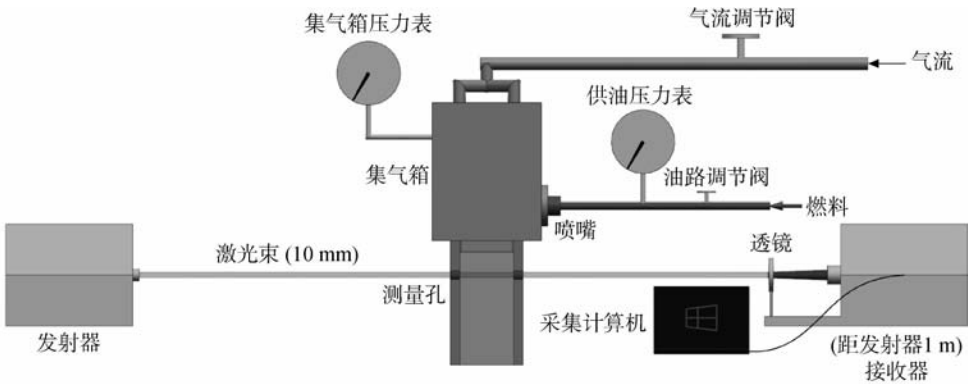


图 2 马尔文激光粒度测量系统

Fig. 2 Malvern laser particle size measurement system

2 结果和讨论

2.1 冷态流场

影响液态燃料在燃烧室中雾化的因素除了燃料本身的基础理化性质外,还有燃烧室中空气旋流的流场特征,所以首先得到液雾区域的空气流场,对了解雾化特性有重要作用。

本文使用数值计算的方法模拟出模型燃烧室中的空气流场.数值计算使用由 ICEM CFD 生成的非结构网格,网格质量在 0.4 以上.根据文献 [13-17]得出的结论,湍流模型采用雷诺应力模型 (Reynolds stress model, RSM) 比较合适.采用分离隐式求解的方式 (pressure-based) 求解绝对坐标系中的稳态问题,忽略重力的作用.针对于旋流器下游流场的强旋流特性,湍流方程采用线性压力应变 (linear pressure-strain model) 的雷诺应力模型,对于近壁条件采用标准墙函数 (standard

wall functions),由于空气黏度较小,可忽略黏度加热的作用.由于进口马赫数 $Ma = 0.06 \ll 0.3$,可认为流体为不可压缩流体,所以空气的密度设定为不可压缩理想气体,计算其密度时使用理想气态方程,但其中压力使用操作条件 (operating conditions) 中的常数压力值.由于温度变化微小,空气的其他物性,如比定压热容、黏度、导热系数等,设定为常数即可。

进口设置为质量流量进口边界条件,在经过旋流器气流压力降为 500 Pa 时,设置空气质量流量为 0.007 0 kg/s;在经过旋流器气流压力降为 2000 Pa 时,设置空气质量流量为 0.014 3 kg/s.温度均设置为室温 283.15 K.壁面边界的边界条件均设置为静止无滑移边界条件,壁面处的扩散率设置为 0。

数值模拟得到的两种压力降下流场如图 3 所示.可以看出,两种不同压力降下,流场特征基本

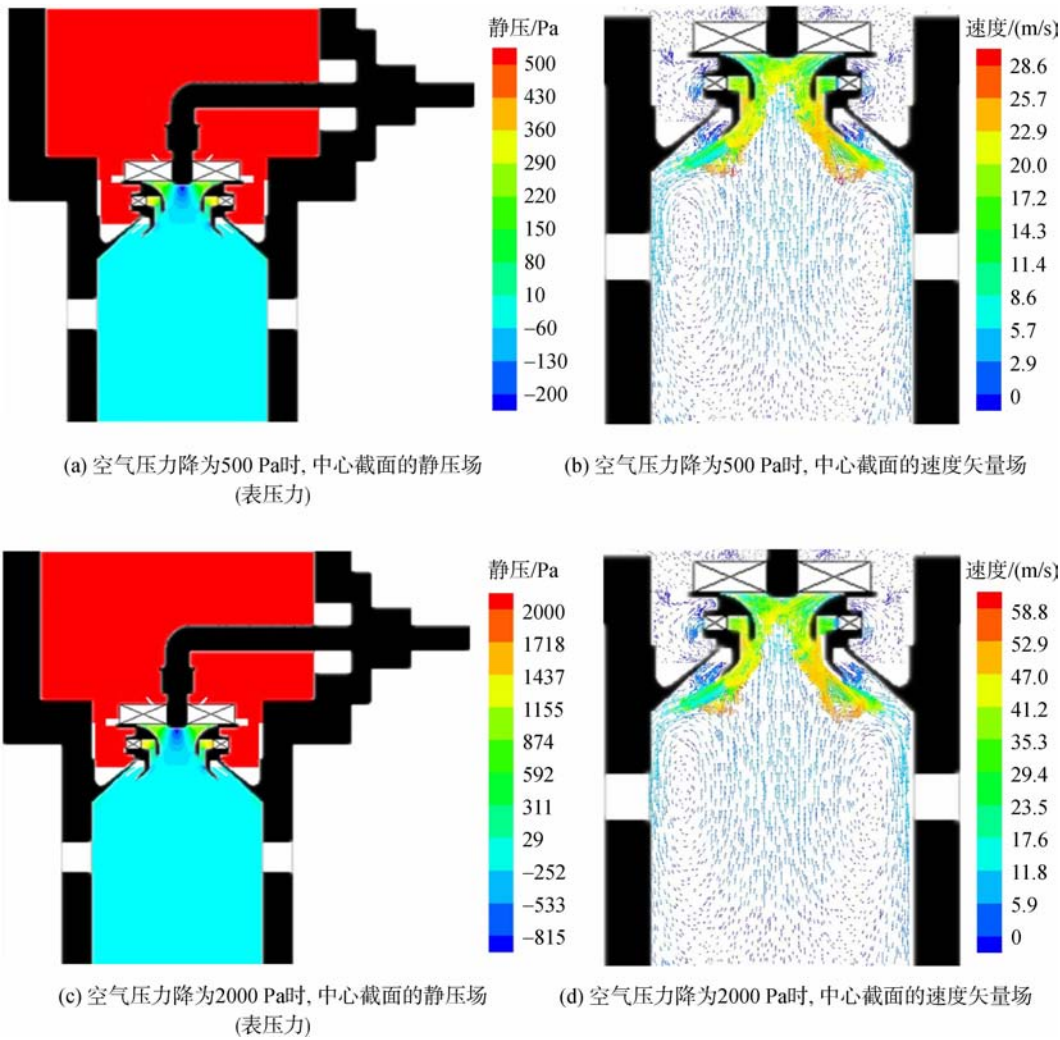


图 3 空气流场数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of air flowfield

相同,喉道处都形成了强烈的剪切射流,矩形玻璃流道内都形成了左右对称的回流区,只是压力降为2000 Pa 时各点速度大小均比压力降为 500 Pa 时高.

2.2 雾化实验结果

两种燃料在实验条件下(室温为 283.15 K)基础理化性质的对比如表 1 所示^[18],其中,航空煤油 RP-3 的摩尔质量及碳氢质量分数由天津大学石油化工科学研究院负责测定.

由基础理化特性数据可以看出,正癸烷与航空煤油碳原子数极为接近,相对分子质量也很接近,保证了选用正癸烷作为航空煤油单一代理组分的提前条件.其表面张力比航空煤油大在 2.7%左右,动力黏度比航空煤油大在 7.4%左右.

以供油压力 Δp_1 为横坐标,雾化 d_{32} 为纵坐标、气流压力降为参变量,将航空煤油和正癸烷的雾化实验数据结果整理成如图 4 所示.由实验结果可知,在任一气流压力降下,随着供油压力的增大,两种燃料的雾化 d_{32} 都逐渐减小,但是 d_{32} 减

小的速度越来越小;在相同供油压力下,随着气流压力降(Δp_a)的增大,两种燃料的雾化 d_{32} 逐渐减小;供油压力在 0.5 MPa 以上时,两种燃料的 d_{32} 基本都在 30~45 μm 之间,减小缓慢,表明此时雾化过程基本已经完成,增大压力对于改善雾化效果影响不大;在各个气流压力降下,正癸烷的雾化 d_{32} 均比航空煤油大,与正癸烷黏度、表面张力稍大有关;供油压力在 0.5 MPa 以上时,两种燃料在各个气流压力降下的 d_{32} 都非常接近,表明此时燃料物性和周围气流的气动力对雾化效果几乎没有影响.

Lefebvre 等^[19] 总结的雾化 d_{32} 的一般关系式为

$$d_{32} = C_1 \sigma_1^a \mu_1^b \dot{m}_1^c \Delta p_1^{-d}$$

(2)

式中 σ_1 为表面张力, μ_1 为动力黏度.

而本研究中,燃油质量流量 $\dot{m}_1$ 是根据供油压力 Δp_1 计算得出

$$\dot{m}_1 = F_n \sqrt{\Delta p_1} / 3600$$

(3)

式中 F_n 为喷嘴质量流量.

表 1 航空煤油 RP-3 和正癸烷物理和化学性质的比较
Table 1 Comparison of physical and chemical properties of RP-3 and n-decane

燃料种类	摩尔质量/(g/mol)	碳质量分数	碳原子数	氢质量分数	氢原子数
RP-3	145.59	85.37	10.35	14.42	20.83
n-decane	142.29	84.41	10	15.59	22

燃料种类	$\sigma_1/10^{-3}(\text{N/m})$	$\mu_1/10^{-3}(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	$\rho_1/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$F_n/(\text{kg}/(\text{h}\cdot\sqrt{\text{MPa}}))$
RP-3	24.10	0.9934	794.7	20.95
n-decane	24.75	1.0665	737.7	19.75

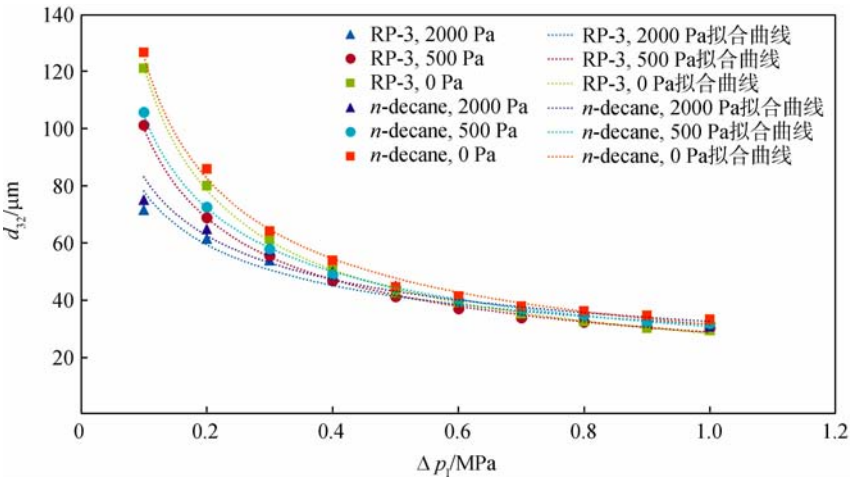


图 4 航空煤油 RP-3 和正癸烷雾化 d_{32} 的实验结果
Fig. 4 Atomization d_{32} experimental results of RP-3 and n-decane

将式(3)代入式(2),可简化为

$$d_{32} = C_2 \sigma_1^a \mu_1^b \Delta p_1^{-e} \tag{4}$$

其中 $C_2 = C_1 F_n^c / (10^{3c} \cdot 3\,600^c)$, 气流压力降指数 $e = -0.5c + d$. 根据式(4)可知, 对于特定的燃料在特定的温度下, 其表面张力及动力黏度为常数, 故雾化 d_{32} 与供油压力 Δp_1 之间的关系可表示为 $d_{32} = C_3 \Delta p_1^{-e}$, 其中 $C_3 = C_2 \sigma_1^a \mu_1^b$, 代表燃料物性的影响, Δp_1^{-e} 代表气动力的影响. 将实验数据拟合为 d_{32} 与 Δp_1 的指数关系式, 如图 4 所示. 拟合的指数关系式系数、系数偏差及实验数据与拟合曲线的相关系数如表 2 所示.

由拟合的数据可以看出, 对于同一种燃料, 不同气流压力降下 C_3 基本不变, 与其含义相吻合, 可将其平均值作为拟合结果; 对于同一种燃料, 随着气流压力降增大 e 逐渐减小, 可见公式中 Δp_1^{-e} 的简单指数形式并不能确切反映旋流流场中气动力对雾化 d_{32} 的影响规律, 需要进一步对其修正.

根据经典雾化理论^[20]可知, 液体燃料雾化的影响因素包括燃料的表面张力、燃料的黏度、周围空气的密度和相对运动速度. 对于单纯离心喷嘴, 当液滴喷射进的周围介质为静止大气时, 根据伯努利方程可知, 供油压力 Δp_1 直接反映了液滴喷射进周围介质中的绝对速度, 也就是液滴与周围介质的相对速度, 在这种情况下, Δp_1^{-e} 中存在单一变量 Δp_1 就可以很好的拟合实验数据. 但是由于本研究中周围介质流场为复杂的旋流流场, 见图 3 所示, 供油压力 Δp_1 代表的液滴喷射速度并不能等于液滴与当地周围介质的相对速度, 所以还需要引进气流压力降对雾化 d_{32} 的影响, 以修正复杂旋流流场的影响. 由于本研究中环境压力温度基本不变, 所以在喷雾区域的空气密度基本不变, 可忽略空气密度对雾化的影响.

根据上述分析, 在气流压力降相同时, 周围介质的流场相同, 则雾化区域中各点的气动力相同, 旋流流场对雾化的影响效果也相同, 那么拟合指数 e 也应该相同而与燃料物性无关. 由拟合的数据可以看出, 对于不同的燃料, 相同气流压力降下 e 基本相同, 与上述分析相吻合, 可将其平均值作为拟合结果.

由于气流压力降为 0 Pa 时, 液滴喷射进入静止大气, 此时只有供油压力 Δp_1 的影响而没有旋流的影响, 所以气流压力降为 0 Pa 时的 e 表征的就是单独供油压力 Δp_1 对雾化效果的影响, 取其平均值作为拟合结果, 气流压力降平均指数 $e_m = 0.6199$. 依然采用指数类型表达式来考虑气流压力降 Δp_a 对雾化 d_{32} 的影响, 则式(4)演变为

$$d_{32} = C_2 \sigma_1^a \mu_1^b \Delta p_1^{-e} \Delta p_a^{-f} \tag{5}$$

再次对雾化 d_{32} 数据拟合之后可得供油压力指数 $f = 0.0311$ ($\Delta p_a = 0$ 时不能拟合, 可设置为一个较小的数字, 比如 1, 再进行拟合), 由于本研究中只涉及两种燃料, 而系数 $C_3 = C_2 \sigma_1^a \mu_1^b = C_1 F_n^c / (10^{3c} 3\,600^c) \sigma_1^a \mu_1^b$ 中存在 4 个未知系数, 方程组并不可解, 所以在本文的研究范围内, 雾化 d_{32} 最终的表达式为

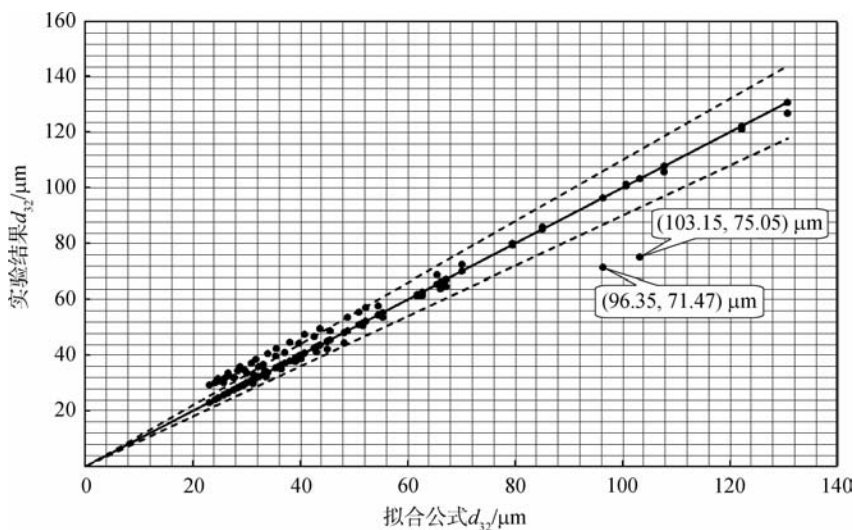
$$d_{32, \text{RP-3}} = 29.2842 \Delta p_1^{-0.6199} \Delta p_a^{-0.0311} \tag{6}$$

$$d_{32, n\text{-decane}} = 31.3490 \Delta p_1^{-0.6199} \Delta p_a^{-0.0311} \tag{7}$$

拟合数据和实验数据的总体偏差见图 5, 可见, 在拟合结果与实验结果的误差在 10% 范围以内, 具有较高的精度. (偏差较严重的两点分别对应两种燃料在气流压力降为 2 000 Pa、供油压力为 0.1 MPa 时的实验数据) 两者拟合系数的相对差异约为 7%, 可将正癸烷经过适当的修正之后做为航空煤油雾化过程的代理燃料.

表 2 拟合公式的系数和相关系数
Table 2 Coefficients and correlation coefficients of fitting formula

工况	C_3		e		相关系数
	计算值	标准误差	计算值	标准误差	
RP-3, 0 Pa	28.1407	0.3125	0.6368	0.0064	0.9990
RP-3, 500 Pa	28.4856	0.3253	0.5460	0.0070	0.9984
RP-3, 2 000 Pa	31.2264	1.1680	0.3975	0.0252	0.9541
<i>n</i> -decane, 0 Pa	31.2620	0.6938	0.6029	0.0131	0.9956
<i>n</i> -decane, 500 Pa	30.4727	0.2842	0.5355	0.0057	0.9989
<i>n</i> -decane, 2 000 Pa	32.3123	1.3948	0.4091	0.0288	0.9426

图5 雾化 d_{32} 实验数据和拟合数据对比Fig. 5 Comparison of experimental data and fitting data of atomization d_{32}

3 结 论

本研究通过对航空煤油和正癸烷在不同气流压力降下旋流流场中的雾化数据进行分析,深入讨论各物理量对雾化的影响规律,得到了以下结论:

1) 供油压力增大到 0.5 MPa 以上时, d_{32} 减小速度缓慢,表明两种燃料的雾化过程基本完成,雾化 d_{32} 介于 30~45 μm 之间;并且燃料物性及周围气流气动力对雾化的影响可以忽略,导致两种燃料的雾化 d_{32} 非常接近。

2) 因为黏度和表面张力稍大的关系,气流压力降相同时,正癸烷的雾化 d_{32} 比航空煤油稍大,雾化效果稍差。

3) 航空煤油在旋流流场中的雾化 d_{32} 表达式为

$$d_{32, \text{RP-3}} = 29.2842 \Delta p_1^{-0.6199} \Delta p_a^{-0.0311}$$

正癸烷在旋流流场中的雾化 d_{32} 表达式为

$$d_{32, \text{n-decane}} = 31.3490 \Delta p_1^{-0.6199} \Delta p_a^{-0.0311}$$

两者拟合系数的相对差异约为 7%,可将正癸烷经过适当的修正之后做为航空煤油雾化过程的代理燃料。

参考文献:

- [1] Dagaut P, Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: a review of experimental and kinetic modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(1): 48-92.
- [2] Dagaut P, Bakali A E, Ristori A. The combustion of kerosene: experimental results and kinetic modelling using 1-to

3-component surrogate model fuels[J]. Fuel, 2006, 85(7): 944-956.

- [3] Honnet S, Seshadri K, Niemann U, et al. A surrogate fuel for kerosene[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 485-492.
- [4] Kurman M S, Natelson R H, Cernansky N P, et al. Preignition oxidation chemistry of the major JP-8 surrogate component: *n*-dodecane[R]. AIAA-2009-1526, 2009.
- [5] Strelkova M I, Kirillov I A, Potapkin B V, et al. Detailed and reduced mechanisms of jet a combustion at high temperatures[J]. Combustion Science and Technology, 2008, 180(10): 1788-1802.
- [6] Mawid M A, Sekar B. Development of a detailed JP-8/Jet-A chemical kinetic mechanism for high pressure condition in gas turbine combustion [R]. ASME Paper GT2006-90478, 2006.
- [7] 范学军, 俞刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 187-192.
FAN Xuejun, YU Gang. Analysis of thermophysical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 187-192. (in Chinese)
- [8] Gokulakrishnan P, Gaines G, Klassen M S, et al. Autoignition of aviation fuels: experimental and modeling study [R]. AIAA-2007-5701, 2007.
- [9] Lindstedt R P, Maurice L Q. Detailed chemical kinetic model for aviation fuels[J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16(2): 187-195.
- [10] 王慧汝, 金捷, 王静波, 等. 正癸烷燃烧机理及航空煤油点火延时动力学模拟[J]. 高等学校化学学报, 2012, 33(2): 341-345.
WANG Huiru, JIN Jie, WANG Jingbo, et al. Combustion mechanism of *n*-decane at high temperatures and kinetic modeling of ignition delay for aviation kerosene[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2012, 33(2): 341-345. (in Chinese)

[11]

Rizk N K. Fuel atomization effects on combustor performance[R]. AIAA-2004-3540,2004.

[12]

Edwards T, Maurice L Q. Surrogate mixture to represent complex aviation and rocket fuels[J]. Journal of Propulsion and Power,2001,17(2):461-466.

[13]

Yang S L, Siow Y K, Peschke B D, et al. Numerical study of nonreacting gas turbine combustor swirl flow using Reynolds stress model[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2003,125(3):804-811.

[14]

Jawarneh A M, Vatas G H. Reynolds stress model in the prediction of confined turbulent swirling flows[J]. Journal of Fluids Engineering,2006,128(6):1377-1382.

[15]

Gran I R, Ertesvag I S, Magnussen B F. Influence of turbulence modeling on predictions of turbulent combustion[J]. AIAA Journal,1997,35(1):106-110.

[16]

Relation H L, Ng W F, Battaglioli J L. Numerical simulations of nonreacting flows for industrial gas turbine combustor geometries[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1998,120(3):460-467.

[17]

Sloan D G, Smith P J, Smooth L D. Modeling of swirl in turbulent flow systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science,1986,12(3):163-250.

[18]

马沛生. 有机化合物实验数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2006.

[19]

Lefebvre H, Ballal D R. Gas turbine combustion[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press Inc,2010.

[20]

黄勇, 林宇震, 樊未军, 等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,2009.

(编辑:叶 青)