

文章编号:1000-8055(2013)02-0307-09

周期性供油气助雾化直喷喷嘴雾化特性试验

吴泽俊, 何小民, 朱志新, 金 义, 丁国玉

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 对一种典型的周期性供油气助雾化直喷喷嘴的雾化特性进行试验研究, 分析总结了喷油脉宽、间隔时间、喷气脉宽以及空气压力对雾化性能的影响规律。试验中使用 RP-3 航空煤油作用工质, 使用压缩空气作为介质; 用激光粒度分析仪对油雾场进行测量并进行处理分析; 喷油脉宽与喷气脉宽变化范围为 2~8 ms, 间隔时间为 -2~5 ms, 空气压力为 0.1~0.65 MPa。研究表明: 随着油气比的增加, 索太尔平均直径减小, 均匀程度增加, 雾化性能提高; 增加空气压力, 可以使空气密度增加, 加大空气与燃油的气动作用力, 有利于雾化性能的提高; 增加间隔时间也可使雾化性能有小幅度的提升; 在较大的平均粒径下, 更加分散的粒径分布仍然可以具有较大的均匀度分布指数。对试验数据进行分析, 在较高空气压力下, 得到了该周期性供油气助雾化直喷喷嘴的平均粒径的经验计算模型。

关 键 词: 周期性供油气助雾化直喷喷嘴; 雾化特性; 索太尔平均直径; 均匀度分布指数; 激光粒度分析仪

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experiment on spray characteristics of periodic air-assist direct injection atomizer

WU Ze-jun, HE Xiao-min, ZHU Zhi-xin, JIN Yi, DING Guo-yu

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An experimental study on spray characteristics of a typical periodic air-assist direct injection atomizer was presented. Attention was focused on the effect of a series of parameters (such as duration of fuel injection, space time, duration of air injection and pressure of air) on spray characteristics. The fuel employed was RP-3, and the medium employed was compressed air. Laser particle analyzer was employed for spray measurement. Duration of fuel injection, space time and duration of air injection was changed from 2 ms to 8 ms, -2 ms to 5 ms, and 2 ms to 8 ms, respectively. The range of air pressure provided was 0.1~0.65 MPa. The results show that the performance of atomization is improved as the ratio of air and fuel is increased. The increase of air density and space time is also beneficial for atomization. Additionally, the distribution uniformity index value may be greater while the range of drop-size spreads more widely and the mean diameter is higher. For condition of high pressure, mean drop size is correlated using empirical equations.

Key words: periodic air-assist direct injection atomizer; spray characteristics; Sauter mean diameter; distribution uniformity index; laser particle analyzer

收稿日期: 2012-03-09

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130131.0829.201302.307_010.html

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0167)

作者简介: 吴泽俊(1984—), 男, 湖北恩施人, 博士生, 主要从事燃烧理论与燃烧室技术研究。

航空活塞发动机使用何种燃料一直是经济性与勤务性(易安装、维修、储存、运输等)之间矛盾的焦点. 而选择燃料的基本要求是能尽可能减少发动机所需燃料的种类, 同时采用更加易于存储的燃料以减轻勤务负担. 军用活塞发动机都希望找到一种能覆盖战场上所有工具和装备的通用燃料, 能同时满足安全性和勤务性的要求, 这就是“通用燃油政策”^[1]. 由于煤油具有较高的闪点, 使得它更容易存储和处理, 并且在发生意外时发生爆炸和被引燃的概率大大降低, 这使得煤油成为航空活塞发动机的首选燃料之一; 而且目前航空动力燃料大部分使用航空煤油作为燃料, 所以从燃料通用性方面考虑, 航空煤油也是航空活塞发动机燃料的一个很好的选择.

另外, 由于压燃式活塞发动机存在着一些固有的缺点, 比如功质比低、冷启动性能差、噪声、振动、声振粗糙度(NVH)特性差^[1]、机体笨重等, 所以航空活塞发动机的工作方式以点燃式为主. 由于物理性质等方面的差别, 用航空煤油代替汽油作为点燃式活塞发动机的燃料之后, 将带来一些技术性难题: 启动困难、积炭严重、工作范围窄、燃烧效率低等. 目前最佳解决方案就是缸内直喷技术, 而缸内直喷的关键技术之一是燃油喷射系统. 大多数缸内直喷发动机若要达到可接受的 UHC(未燃碳氢)排放和 IMEP(平均指示有效压力)的循环变动系数, 其 ϕ_{Smd} (索太尔平均直径)应小于 $25 \mu\text{m}$. 由于 ϕ_{Smd} 的大小也影响燃油蒸发时间, 故有人提出 ϕ_{Smd} 小于 $15 \mu\text{m}$ 的喷雾才适用于缸内直喷发动机^[2].

国外围绕缸内燃油喷射系统进行了大量研究, 主要包括两种类型: 一种是高压旋流喷油器, 如 AlliedSignal 高压旋流喷油器, Zexel 高压旋流喷油器, 以及三菱、丰田公司都已经开发出的高压旋流喷油器^[2]; 另一种是空气辅助喷油器, 以澳大利亚 Orbital 发动机公司开发的气助雾化直喷系统(AADI)为代表, 也已经应用到了各种活塞发动机上^[1,3-6]. 气助雾化直喷系统具有穿透深度小、雾化粒径微小(可接近 $5 \mu\text{m}$)、有利于点火、易于控制空燃比、燃烧效率高等优点, 所以该系统将会在重油和混合燃油发动机上有着广泛的应用前景. 国内主要以航空燃气轮机喷嘴技术^[7-9]为基础, 进行了缸内直喷技术燃油系统方案研究.

雾化性能对于发动机的点火性能、燃烧效率以及排放性能有着非常重要的影响^[10-11,14-15]. 过去对于雾化性能的研究主要集中在航空涡轮发动

机的喷嘴上, 相应活塞发动机燃油喷射系统雾化性能的研究比较欠缺. 本文在前期工作的基础上, 针对周期性供油气助雾化直喷喷嘴进行了雾化性能的试验研究, 试图找出各工况参数对雾化性能的影响规律.

1 周期性供油气助雾化直喷喷嘴工作原理

本文用喷嘴如图 1 所示, 图 1(a) 包括了周期性燃油供给系统(喷油器)、空气供给系统、电磁阀系统、油气混合喷射系统几个部分. 试验中采用的周期性燃油供给系统为活塞发动机中常见的电喷喷油器.

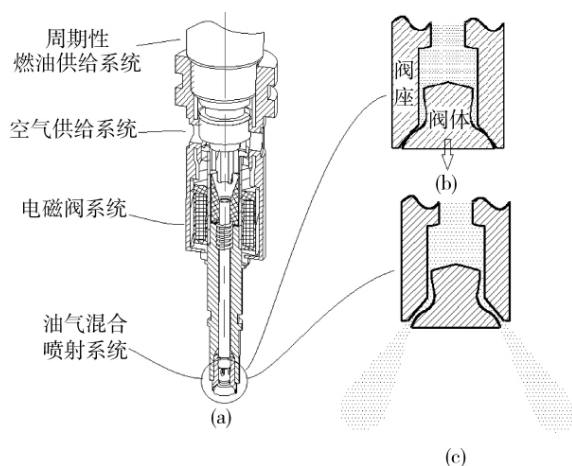


图 1 气助雾化直喷喷嘴

Fig. 1 Air-assist direct injection atomizer

首先, 气助雾化直喷喷嘴处于关闭状态, 如图 1(b) 所示: 在电磁阀系统的弹簧力作用下, 阀体与阀座接触, 将喷嘴内高压空气与环境隔绝; 在预定的时刻利用电磁阀将周期性燃油供给系统打开, 燃油喷入压缩空气室内; 经过一段时间 t_1 之后, 将周期性燃油供给系统关闭, 停止供油; 间隔时间 t_2 之后, 给电磁阀系统供电, 阀体在电磁力与弹簧力的合力作用下向下运动, 与阀座分开(如图 1(c) 所示), 油气混合喷射系统打开, 高压气体带着燃油喷射到环境中, 形成所需的雾化形态; 持续时间 t_3 之后, 电磁阀系统断电, 在弹簧力的作用下, 阀体与阀座又回到图 1(b) 的状态, 将油气混合喷射系统关闭. 至此, 气助雾化直喷喷嘴完成一个完整的工作循环. 其中油气混合喷射系统的开启和关闭由电磁阀系统控制. 图 2 为气助雾化直喷喷嘴的工作时序图, 其中 BTDC(before top dead center)代表所在时刻对应的曲轴转角上上

点前的角度. 由图可见, 整个循环主要分为两个过程: 燃油计量与燃油喷射.

2 试验系统与试验参数

2.1 试验系统

试验在常温常压下进行, 如图 3 所示, 试验系统可分为三个部分: ①燃油供给系统; ②空气供给系统; ③测量系统. 雾化粒径测量仪器采用 winner312 激光粒度分析仪, 测量范围为 $4.6 \sim 323 \mu\text{m}$, 准确性误差小于 3%. 激光粒度分析仪采用信息光学原理, 通过测量颗粒群的散射谱, 来分析其粒度分布. 激光粒度仪工作原理如图 4 所示.

激光粒度分析仪所测得的典型粒径分布如图 5 所示.

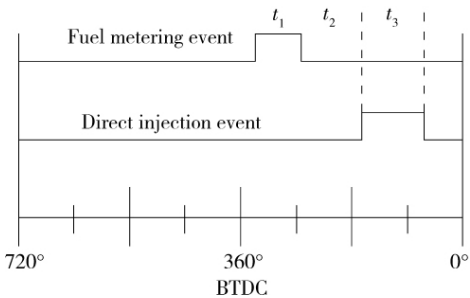


图 2 气助雾化直喷嘴典型工作时序图^[1]
Fig. 2 Schematic of typical injection sequence for air-assist direct injection atomizer

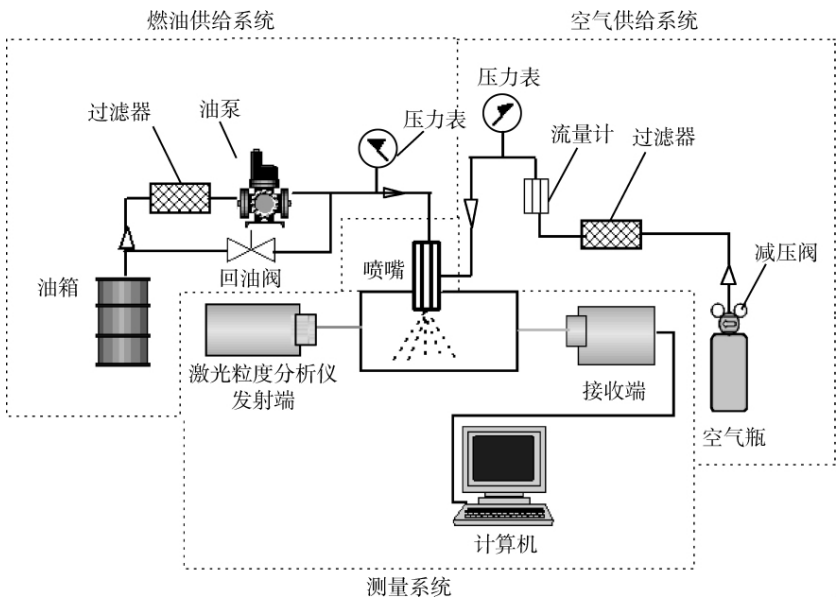


图 3 试验系统图
Fig. 3 Experimental system

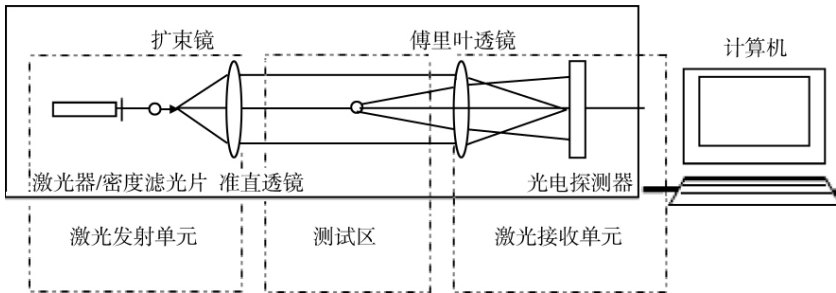


图 4 激光粒度仪工作原理框图
Fig. 4 Schematic of principle of the laser particle analyzer

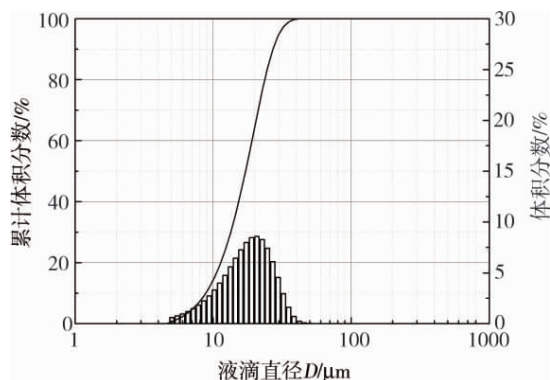


图 5 典型粒径分布

Fig. 5 Typical drop-size distribution

2.2 试验状态参数及雾化性能评估参数

影响喷嘴雾化特性的主要因素包括喷嘴结构尺寸、燃油与介质的物理性质、工况参数等。

本文主要研究工况参数(喷油脉宽 t_1 、间隔时间 t_2 、喷气脉宽 t_3 以及空气压力 p_a)对雾化粒径大小及分布的影响。 t_1, t_2, t_3 的含义如图 2 所示。以 6000 r/min 的活塞发动机为基础,确定试验状态参数见表 1,其中压力为表压。为了便于控制喷油量,将燃油压力 p_f 与压缩空气压力 p_a 之间的差值 Δp 保持为定值 0.2 MPa,这样喷油量只与喷油脉宽 t_1 有关。研究的喷嘴为一种典型的周期性气助雾化直喷喷嘴,燃料为 RP-3 航空煤油,介质为压缩空气。测量位置位于喷嘴出口正下方 60 mm 处。

表 1 试验参数

Table 1 Experiment parameters

t_1 / ms	t_2 / ms	t_3 / ms	p_a / MPa
2~8	-2~5	2~8	0.1~0.65

喷嘴雾化性能评估指标通常有两种方式:①液雾平均直径;②液滴尺寸分布。本文中液雾平均直径使用最常用的索太尔平均直径(ϕ_{Smd}),而液滴尺寸分布用体积微分分布与体积累积分布,然后由此得出其 R-R(Rosin-Rammler)分布函数表达式的 n 值。其中 ϕ_{Smd} 和液滴尺寸分布可由测量仪器测量经过软件计算得出,而 R-R 分布的函数表达式则经过对试验数据的处理得到。

R-R 分布函数可由如下方程表示^[12-13]:

$$1 - Q = \exp[-(D/X)^n] \quad (1)$$

式中 Q 是直径不超过 D 的所有液滴的总体积, X 和 n 为常数。

激光粒度分析仪所测得的原始数据经过处理

方法,可得到如图 6 所示的形式,对其进行线性拟合,得出直线斜率和和截距,即可得到 n 与 X ,从而得到粒径分布函数表达式。

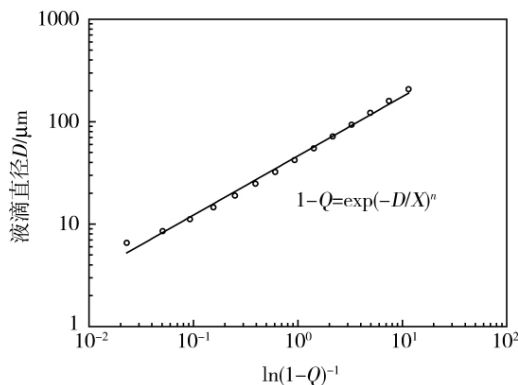
图 6 典型 R-R 分布曲线^[12]

Fig. 6 Typical R-R distribution plot

3 试验结果

3.1 喷油脉宽 t_1 对雾化性能的影响

图 7~图 9 即为喷油脉宽 t_1 对喷嘴雾化特性影响规律的结果。

保持空气压力 p_a 为 0.6 MPa,间隔时间 t_2 为 1 ms 的情况下,改变喷油脉宽 t_1 和喷气脉宽 t_3 所得的索太尔平均直径 ϕ_{Smd} 如图 7 所示。当喷油脉宽 t_1 从 2 ms 增加到 5 ms 时,喷油量增加,在空气压力 p_a 不变的情况下,空气流量不会有显著的变化,所以气油比减小,作用在单位质量燃油的空气量变少,故对应的 ϕ_{Smd} 曲线向上移动。

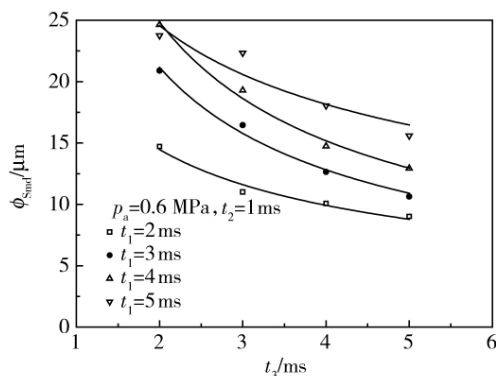
图 7 喷油脉宽 t_1 和喷气脉宽 t_3 对 ϕ_{Smd} 的影响Fig. 7 Influence of duration of fuel injection t_1 and duration of air injection t_3 on ϕ_{Smd}

图 8 为不同喷油脉宽 t_1 下的粒径体积微分分布和累积分布。与图 7 对应,当喷油脉宽 t_1 较小时,更多的油滴集中在小直径范围内,累积体积

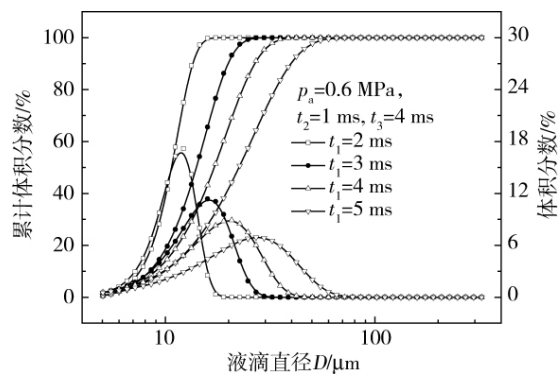


图8 不同喷油脉宽 t_1 下粒径体积微分分布和累积分布

Fig. 8 Differential and cumulative distribution of drop-size volume at different duration of fuel injection t_1

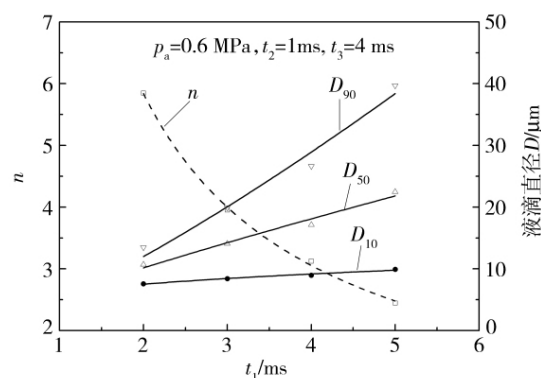


图9 喷油脉宽 t_1 对粒径分布范围及 n 值的影响

Fig. 9 Influence of duration of fuel injection t_1 on drop-size range and the value of n

分布和体积微分分布均比较陡峭;当喷油脉宽 t_1 增加时,油滴尺寸分布向直径增大的方向移动,累积体积分布和体积微分分布曲线变得平缓。

图9中3条实线分别为粒径体积累积分布比例为10%,50%,90%所对应的直径随喷油脉宽 t_1 变化的曲线,分别用 D_{10} , D_{50} , D_{90} 表示;虚线为均匀度分布指数 n 随喷油脉宽 t_1 变化的曲线。由图可见, D_{10} , D_{50} , D_{90} 线均随着喷油脉宽 t_1 的增加而增加, D_{90} 与 D_{10} 线之间的差值也随着 t_1 的增加而增加。可见,油滴直径分布随着喷油脉宽 t_1 的增加而增加,且越来越分散,这与 n 值线反映出的规律是一致的。

3.2 间隔时间 t_2 对雾化性能的影响

图10~图12为 $p_a = 0.6$ MPa, $t_1 = 4$ ms,且保持 t_3 为定值时所得到的结果,目的是研究间隔时间 t_2 对雾化性能的影响规律。

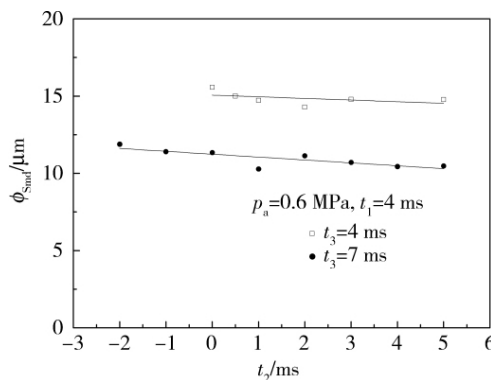


图10 间隔时间 t_2 对 ϕ_{Smd} 的影响

Fig. 10 Influence of space time t_2 on ϕ_{Smd}

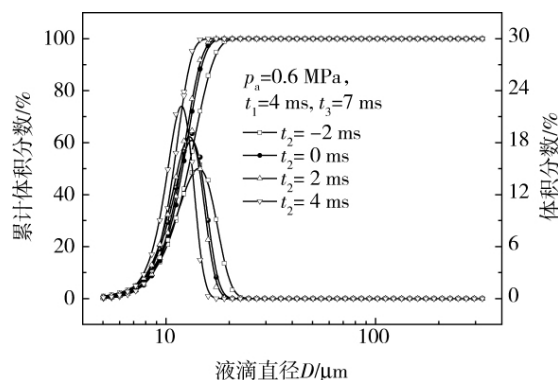


图11 不同间隔时间 t_2 下粒径体积微分分布和累积分布

Fig. 11 Differential and cumulative distribution of drop-size volume at different space time t_2

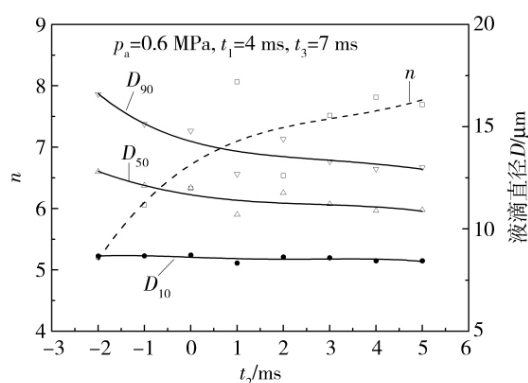


图12 间隔时间 t_2 对粒径分布范围及 n 值的影响

Fig. 12 Influence of space time t_2 on drop-size range and the value of n

如图10所示,在间隔时间 t_2 增加的过程中,由于燃油的喷射质量与空气的喷射质量均没有变化,气油比没有变化,所以 ϕ_{Smd} 没有明显的变化,但是由于空气与燃油作用的时间增加,所以 ϕ_{Smd} 略有减小。

图 11 中粒径体积微分分布与累积分布说明油滴直径分布缓慢地向较小的直径收敛. 图 12 中的 D_{10} , D_{50} , D_{90} 线以及 n 值线呈现出了与之相符的趋势.

3.3 喷气脉宽 t_3 对雾化性能的影响

从图 7 中可以看出,在喷油脉宽 t_1 保持为定值的情况下,当喷气脉宽 t_3 增加时, ϕ_{Smd} 随之减小,这是由于喷油脉宽 t_1 保持为定值,即单次喷油量没有变化,而喷气脉宽 t_3 增加意味着空气喷射量的增加,即气油比增加,作用在单位燃油质量上的空气量增加,有利于得到更小的雾化粒径.

图 13 所反映的粒径体积微分分布与累积分布也说明了喷油脉宽 t_1 保持为定值,喷气脉宽 t_3 增加,油滴直径向较小的直径范围内收敛,从而得到更好的雾化质量. 图 14 中的 D_{10} , D_{50} , D_{90} 线以及 n 值线体现出了与之相符合的特点.

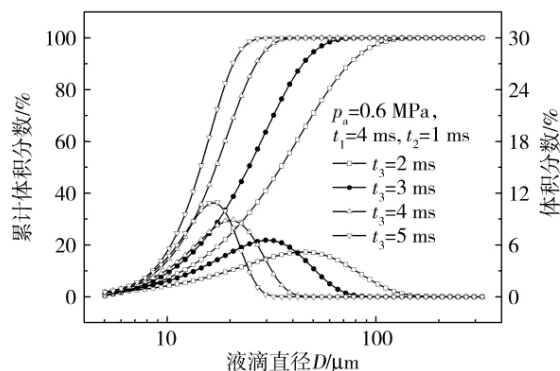


图 13 不同喷气脉宽 t_3 下粒径体积微分分布和累积分布

Fig. 13 Differential and cumulative distribution of drop-size volume at different duration of air injection t_3

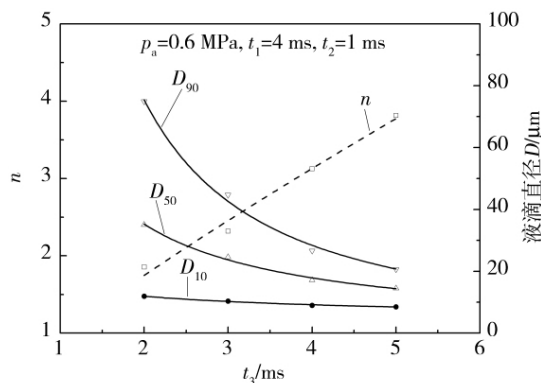


图 14 喷气脉宽 t_3 对粒径分布范围及 n 值的影响

Fig. 14 Influence of duration of air injection t_3 on drop-size range and the value of n

3.4 喷油脉宽 t_1 与喷气脉宽 t_3 相等时对雾化性能的影响

图 15~图 17 为 $p_a = 0.6 \text{ MPa}$, $t_2 = 1 \text{ ms}$ 时,保持 $t_1 = t_3$ 的情况下所得到的结果, t_1 和 t_3 在 2~8 ms 范围内变化.

由图 15 可知,在 t_1 和 t_3 增大的过程中, ϕ_{Smd} 总体上呈现上升的趋势,但是增长的速度比较缓慢. 当 t_1 和 t_3 从 2 ms 增加到 8 ms 的过程中,单次喷射的空气质量和燃油质量的比值从 0.14 减小到 0.08 了,这样与单位质量燃油相作用的空气质量就减小了,但是,随着 t_1 和 t_3 的增加,单次喷射中空气与燃油作用的时间延长了,所以 ϕ_{Smd} 总体呈缓慢上升的趋势.

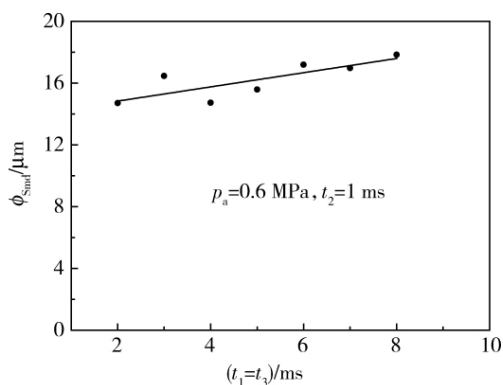


图 15 喷油脉宽 t_1 等于喷气脉宽 t_3 时对 ϕ_{Smd} 的影响

Fig. 15 Influence of duration of fuel injection t_1 and duration of air injection t_3 on ϕ_{Smd} when they are equal

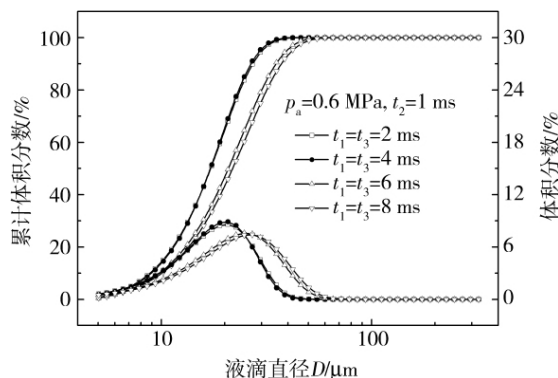


图 16 喷油脉宽 t_1 与喷气脉宽 t_3 相等时的粒径体积微分分布和累积分布

Fig. 16 Differential and cumulative distribution of drop-size volume when duration of fuel injection t_1 is equal to duration of air injection t_3

与之对应,从图 16 中可以看出,随着 t_1 和 t_3

的增加,粒径体积微分分布与累积分布和变得平缓,油滴直径分布向较大的直径缓慢地分散。

图 17 为 t_1 和 t_3 从 2 ms 增加到 8 ms 的过程中的 D_{10} , D_{50} , D_{90} 线以及 n 值线。随着 t_1 和 t_3 的增加, D_{10} , D_{50} , D_{90} 均呈上升的趋势,而且 D_{10} 与 D_{90} 的差值呈增大的趋势,这说明油滴直径分布更加分散,粒径分布趋于不均匀;但是此时的均匀度分布指数 n 反而增加,而 n 值越大说明粒径分布越均匀。但是这并不矛盾,因为 n 值的大小只是在具有相同的特征直径 $D_{63.2}$ (即 X 值)下才能比较粒径的均匀程度,也就是说在较大的平均粒径下,更加分散的粒径分布仍然可以具有较大的均匀度分布指数 n 值。从这个意义上来说,要反映雾化性能的好坏至少需要 2 个参数,比如 R-R 分布函数表达式中的 $X(D_{63.2})$ 值与 n 值,或者粒径体积累积分布中的 D_{50} , D_{90} 和 D_{10} 。

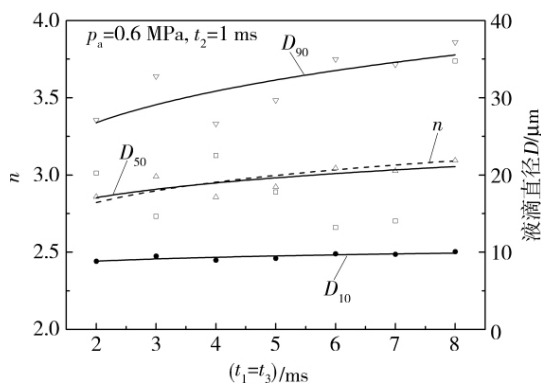


图 17 喷油脉宽 t_1 等于喷气脉宽 t_3 时对粒径分布范围及 n 值的影响

Fig. 17 Influence of duration of fuel injection t_1 and duration of air injection t_3 on drop-size range and the value of n when they are equal

3.5 空气压力 p_a 对雾化性能的影响

试验中另外一个对雾化性能有着重要影响参数是空气压力 p_a , 图 18~图 20 是研究空气压力 p_a 对雾化性能影响规律所得到的结果。试验中空气压力 p_a 从 0.1 MPa 增加到 0.6 MPa。

如图 18 所示,在 $t_1=4$ ms, $t_2=1$ ms 的情况下得到的不同空气压力下的 ϕ_{Smd} 曲线。从理论上讲,当空气压力 p_a 在 0.1 MPa 以上时,整个喷嘴内的流动达到超临界状态,可认为喉道处的马赫数均为 1;另外,可认为整个过程在常温下进行,所以,随着空气压力 p_a 的增加,喉道处的速度与流量系数均不变,但是由于进口空气压力 p_a 的增加使空气密度增加,所以空气质量流量在随着空气压力

p_a 的增加而增加,气油比增加,作用在单位燃油质量上的空气量增加,且随着密度的增加,空气与燃油表面的气动力增加,更加有利于改善雾化效果。综上,各个压力下的 ϕ_{Smd} 线将会随着空气压力 p_a 的增加而向下移动。

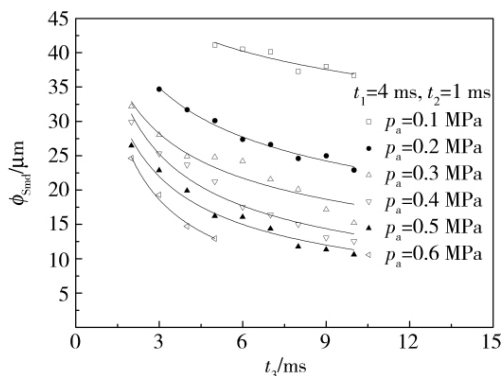


图 18 空气压力 p_a 与喷气脉宽 t_3 对 ϕ_{Smd} 的影响

Fig. 18 Influence of air pressure p_a and duration of air injection t_3 on ϕ_{Smd}

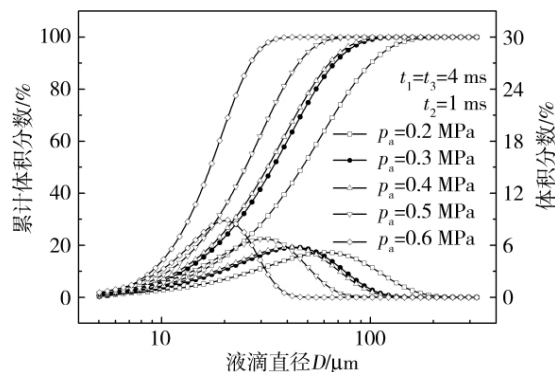


图 19 不同空气压力 p_a 下粒径体积微分分布和累积分布

Fig. 19 Differential and cumulative distribution of drop-size volume at different pressure of air p_a

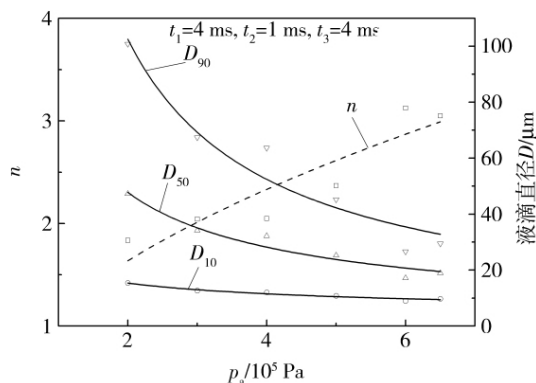


图 20 空气压力 p_a 对粒径分布范围及 n 值的影响

Fig. 20 Influence of pressure of air p_a on drop-size range and the value of n

图 19 为 $t_1 = t_3 = 4 \text{ ms}$, $t_2 = 1 \text{ ms}$ 的情况下, 各个空气压力 p_a 值下的粒径体积微分分布与累积分布. 随着空气压力 p_a 的增加, 两种分布曲线均变得平缓, 油滴直径向较大值的方向分散, 均匀程度减小. 图 20 中的 D_{10} , D_{50} , D_{90} 线以及 n 值线表现出了与上述结果相符的趋势.

4 数据分析

试验中采用的周期性燃油供给系统为活塞发动机中常见的电喷喷嘴, 它的出口为 1 个直径 d_0 约 0.5 mm 的小孔, 故该喷嘴可视为射流式气助雾化直喷喷嘴; 且试验中的各状态压比较高, 喷嘴出口速度很高, 燃油雾化非常快, 故可采用 Lefebvre 提出的快速雾化模型^[14] 预测 ϕ_{Smd} :

$$\frac{\phi_{\text{Smd}}}{d_0} = 1.5 \times \left(1 + \frac{CWe}{1 + r_{\text{af}}^{-1}}\right)^{-1} \quad (2)$$

由于试验中的喷嘴是周期性工作的, 从试验结果可以看出每个周期的喷油脉宽 t_1 和喷气脉宽 t_3 对 ϕ_{Smd} 影响较大, 而间隔时间 t_2 影响较小, 因此, 雾化模型中应该考虑 t_1 和 t_3 . 将气油比定义为每个周期内喷射的空气质量 m_{air} 与燃油质量 m_{fuel} 的比值:

$$r_{\text{af}}^* = m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}} \quad (3)$$

其中空气质量 m_{air} 与燃油质量 m_{fuel} 分别与每个周期的喷油脉宽 t_1 和喷气脉宽 t_3 呈线性关系.

通过对试验所得到的数据进行拟合, 得到新的经验关系式:

$$\frac{\phi_{\text{Smd}}}{d_0} = 1.815 \times 10^5 \times \left(1 + \frac{5.04 \times 10^{-6} We}{1 + r_{\text{af}}^{*-1}}\right)^{-1} \quad (4)$$

其中 d_0 为喷嘴出口直径, We 为韦伯数, $We = \rho_l u_a^2 d_0 / \sigma$.

如图 21 所示, 将试验所得到的结果与由式

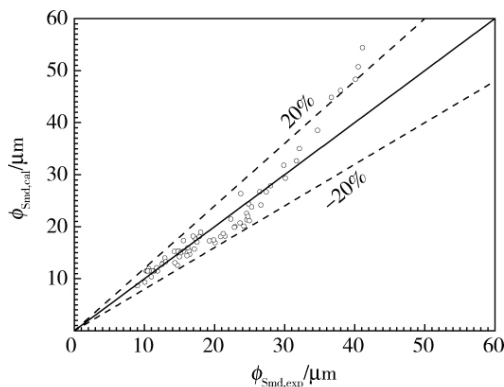


图 21 ϕ_{Smd} 试验值与公式(4)计算值比较

Fig. 21 Comparison of ϕ_{Smd} between experimental and calculated from Eq. (4)

(4) 计算得到的结果在同一张表中进行比较, 空气压力 p_a 较高 ($> 0.1 \text{ MPa}$) 时, 误差在 20% 以内; 空气压力 p_a 较低 ($\leq 0.1 \text{ MPa}$) 时, 误差超过了 20%.

5 结论

通过对试验中各种可调工况参数对周期性供油气助雾化直喷喷嘴雾化性能的影响规律研究, 可以得出以下 5 个结论:

1) 随着气油比的增加, 雾化性能提高, 包括 ϕ_{Smd} 的减小和均匀程度的增加. 使气油比增加的方法有很多种, 比如增加喷气脉宽从而增加空气喷射量, 减小喷油脉宽从而减小喷油量, 增加空气压力从而增加空气流量, 等等.

2) 增加空气压力可增加空气密度, 加大空气与燃油的气动作用力, 有利于雾化.

3) 适当增加喷油与喷气的间隔时间, 也可使雾化性能有小幅提升, 这是因为增加了燃油与空气的作用时间.

4) 在较大的平均粒径下, 更加分散的粒径分布仍然可以具有较大的均匀度分布指数 n 值, 所以, 要反映雾化性能的好坏至少需要 2 个参数, 例如 R-R 分布函数表达式中的 $X(D_{63.2})$ 值与 n 值, 或者粒径体积累积分布中的 D_{10} , D_{50} , D_{90} .

5) 对试验数据进行分析, 在较高空气压力下, 得到了该周期性供油气助雾化直喷喷嘴的平均粒径 ϕ_{Smd} 的经验计算模型.

参考文献:

- [1] Cathcart G, Dickson G, Ahern S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines[R]. SAE Paper, 2005-32-0065, 2005.
- [2] 尚秀镜, 江俊峰, 张建昭, 等. 汽油机缸内直喷的关键技术和发展现状[J]. 汽车技术, 2001, 3: 7-10.
- [3] Coplin N. Simplification of air assisted direct injection via performance benchmarking [R]. SAE Paper, 1999-01-3310, 1999.
- [4] Cathcart G, Tubb J. Application of air assisted direct fuel injection to pressure charged gasoline engine[R]. SAE Paper, 2002-01-0705, 2002.
- [5] Boretta A A, Jin S H, Zakis G. Experimental and numerical study of an air assisted fuel injector for a D. I. S. I. engine [R]. SAE Paper, 2007-01-1415, 2007.
- [6] Brewster S. Initial development of a turbo charged direct injection E100 combustion system[R]. SAE Paper, 2007-01-3625, 2007.
- [7] 谢昆. 以煤油为燃料的内燃机气助雾化喷嘴方案研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

- XIE Kun. The design of air assist atomizer for kerosene internal-combustion engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [8] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册第9册: 主燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 185-217.
- [10] Rizk N K, Lefebvre A H. Drop-size distribution characteristics for spill-return atomizers[J]. AIAA Journal Propulsion and Power, 1985, 1(1): 16-22.
- [11] Wang X F, Lefebvre A H. Mean drop size from pressure-swirl nozzles[J]. AIAA Journal Propulsion and Power, 1987, 3(1): 11-18.
- [12] Rosin P, Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal[J]. J Inst. Fuel, 1933, 7(31): 29-36.
- [13] Lefebvre A H. Atomization and sprays[M]. New York, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [14] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. New York, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [15] Hendricks R C, Ryder R C, Brankovic A, et al. Computational parametric study of fuel distribution in an experimental trapped vortex combustor sector rig[R]. ASME Paper GT2004-53225, 2004.