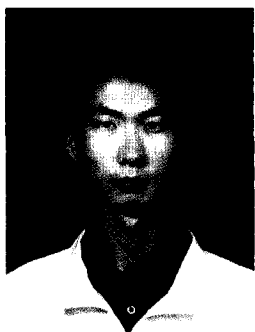


周期供油气动雾化喷嘴喷雾特性试验研究

朱志新,何小民,吴泽俊,金 义,丁国玉
(南京航空航天大学 能源与动力学院,南京 210016)



朱志新(1987),男,在读博士研究生,研究方向为新概念燃烧技术。

收稿日期:2012-04-07

摘要:为满足小型无人机用活塞发动机对航空煤油雾化效果的要求,设计了某新型气动雾化喷嘴并进行了雾化性能试验研究。该喷嘴的结构主要由电磁直射喷嘴、气-液混合室和空气喷嘴 3 部分组成。试验分别对电磁直射喷嘴和空气喷嘴进行了流量标定,研究了喷油脉宽 t_1 、时间延时 t_2 、喷气脉宽 t_3 和喷气压力对燃油雾化性能的影响,得出喷油脉宽减小、喷气脉宽增加、喷气压力增大均可提高雾化质量,最佳值处于 $t_1=2$ ms, $t_2=1$ ms, $t_3=5$ ms 时,此时 $D_{50} < 10$ μm 。

关键词:喷嘴;雾化特性;试验;航空煤油;活塞发动机;燃烧

Experimental Investigation on Spray Characteristics of an Air Assisted Fuel Injector Working Periodically

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

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A new air assisted fuel injector was designed and its experimental investigation of spray characteristics was conducted to satisfy the requirements of good fuel atomization for UAV's piston engines. This injector consists of the electromagnetic fuel injector, the air/fuel interface and the air assisted injector. The flux of the electromagnetic fuel injector and the air assisted injector was metered independently. The important impact factors of fuel spray characteristics were studied, such as the fuel duration t_1 , the fuel air delay t_2 , the air duration t_3 and the air jet pressure. The results show that reducing t_1 , increasing t_3 and air jet pressure can improve the quality of spray characteristics. The optimal D_{50} value is less than 10 μm when $t_1=10$ ms, $t_2=1$ ms, $t_3=5$ ms.

Key words: injector; spray characteristics; experiment; fuel; piston engine; combustion

0 引言

当把小功率活塞发动机配装于舰艇用飞行器上时,为保证安全和燃料后勤保障的统一性,有必要把汽油改成航空煤油等安全性更高的燃料。由于煤油与汽油的雾化特性有很大差别,用煤油代替汽油后,将会带来一些技术问题,如导致点火困难和燃烧完全性差,关键技术难点是煤油如何从液态变成气态和形成均匀混气,否则发动机可能不能完成点火,即使点燃了其燃烧效率也不会高。燃料改换为煤油后为保证其性能,要研究适合煤油的供油方案。煤油的雾化效果是供油方案中的关键问题,设计出的喷嘴必须适合以煤油为燃料的活塞发动机。

国外许多研究单位针对以煤油代替汽油后所带

来的关键问题提出了许多解决方案,如法国石油研究所开发的 IAPAC (Injection Assisted Par Air Comprime)和 SCIP 系统,澳大利亚澳必托公司开发的 OCP (Orbital Combustion Process)系统,美国福特汽车研究所开发的 AFI (Air-Forced Injection)系统,这些系统都是利用夹气的方法改善了喷油系统并取得良好效果。而目前国内相关研究较少,且处于研究的初始阶段。

本文针对国外航空煤油活塞发动机的发展动态,分析其发展趋势,借鉴其发展思路,初步设计了 1 种活塞发动机用新型气动雾化喷嘴,利用高速流体的气动力对燃油进行雾化。试验研究了燃油雾化性能随喷油脉宽 t_1 、时间延时 t_2 、喷气脉宽 t_3 和空气喷嘴喷气压力的变化的一般规律,为研究 Rotax914 活塞发动

机用煤油喷油器提供了参考,为煤油供油方案的研究和确定奠定了基础。

1 试验模型、方案和测试系统

1.1 喷嘴模型和工作原理

本文设计的周期供油气动雾化喷嘴组装如图1

所示。该喷嘴由3个主要部件组成:电磁直射喷嘴、燃油-空气混合室和空气喷嘴。其中电磁直射喷嘴计量一定量的燃油送入混合室,空气喷嘴再将燃油-空气混合物喷入内燃机汽缸中组织燃烧。

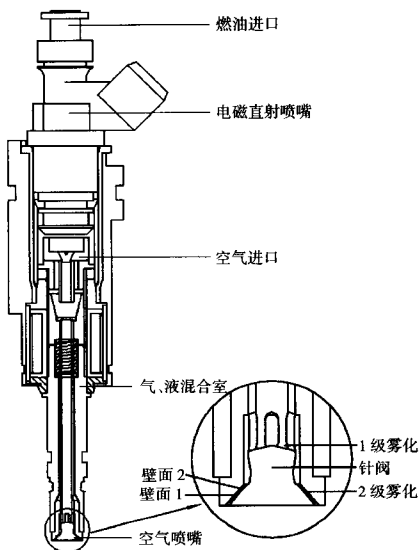


图1 气动雾化喷嘴组装

喷嘴工作时,空气-燃油混合室内空气压力为 P_0 ,燃油进口压力为 P_1 ,在内外压差 P_1-P_0 作用下,燃油由电磁直射喷嘴计量喷入空气-燃油混合室,打击在底部针阀壁面上形成液膜。打开空气喷嘴,液膜在高速气流的气动力作用下产生波动和皱褶,分离出液体碎片或细丝,产生1级雾化。

空气喷嘴的开关由电磁阀的开关控制。电磁阀不工作时,不产生吸力,针阀在弹簧弹性力作用下壁面1与壁面2线接触,阻止流体流出,空气喷嘴关闭;电磁阀工作时,产生吸力,针阀受到吸力向下移动一固定距离,此时在针阀壁面1与壁面2之间形成收缩-扩张通道,空气流速在通道喉道处能够达到临界状态。上游产生的燃油颗粒在此缩放通道内进一步与空气相互作用,破碎成更细小的液珠,产生2级雾化。经过2级雾化后的细小液珠被吹入汽缸内组织燃烧。

1.2 试验测量系统

雾化试验系统主要由 Winner312 工业喷雾激光粒度分析仪、燃油喷雾室、油路、气路和电脑分析系统组成,如图2所示。雾化空气由空气瓶提供,燃油则通过油泵从油桶抽出,经过减压阀流进输油管道,最后由雾化喷嘴喷入测量区域。

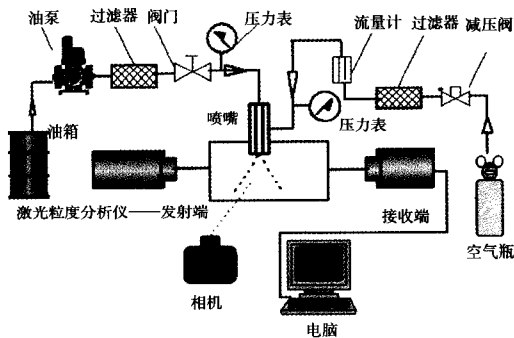


图2 雾化试验系统

试验时,喷嘴进口燃油压力、进口空气压力分别由各自的减压阀调节。空气流量通过浮子流量计测定。

喷嘴雾化粒径和均匀度分布指数均由 Winner312 工业喷雾激光粒度分析仪测定,通过计算机测量软件进行数据处理。Winner312 工业喷雾激光粒度分析仪包括激光发射和接收单元,基于激光前向散射原理。激光颗粒测量原理如图3所示。当1激光束照射到被测液滴时,受液滴的散射作用,激光会向四面八方散射,其中大部分光能量处于前向方向,散射光能的分布与被测液滴的大小有关,采用专门设计的扇形多元光电探测器测出前向散射光能的分布,根据光散射理论和反演算法对测得的散射光能分布数据进行处理,得到被测液滴的粒径大小和粒径分布。

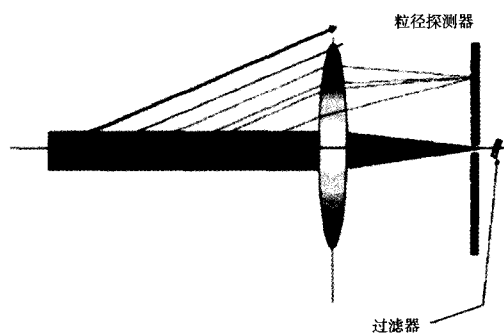


图3 Winner312 激光粒度分析仪测量原理

1.3 试验方案设定

在建立的燃油喷嘴雾化试验系统上进行雾化性能试验。根据喷嘴在不同工况下的燃油雾化效果总结出影响燃油雾化性能的主要因素。由于该喷嘴主要设计用于 Rotax914 活塞式航空发动机,因此喷嘴的工作过程具有周期性,这一功能由控制程序控制。控制过程:打开电磁直射喷嘴,计量一定量的燃油喷入空气-燃油混合室中,喷油脉宽为 t_1 (即1个周期内喷油持续时间),时间延时 t_2 (即喷油结束到喷气开始的

时间间隔)后再打开空气喷嘴喷气,喷气脉宽为 t_3 。喷嘴试验现场如图4所示。



图4 喷嘴试验现场

雾化试验主要从以下几方面来研究:

(1)气动雾化喷嘴的流量特性曲线标定。试验参数:喷嘴工作周期为20 ms(6000 r/min)。

(2)研究不同 t_1 、 t_2 和 t_3 对燃油雾化性能的影响。试验参数:喷油压力为0.8 MPa,喷气压力为0.6 MPa,周期为20 ms。

(3)研究不同喷气压力对雾化性能的影响。试验参数:周期为20 ms,喷油压力与喷气压力压差0.2 MPa, $t_1=4$ ms, $t_2=1$ ms。

2 试验结果和分析

2.1 气动雾化喷嘴流量特性标定

(1)燃油喷嘴流量特性标定。给定喷嘴燃油进口压力分别为0.2 MPa和0.315 MPa,喷嘴工作周期为20 ms,喷油2000次, t_1 从1 ms变化到10 ms,标定喷油量的变化如图5所示。

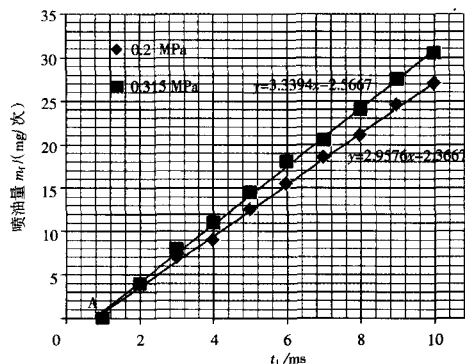


图5 燃油喷嘴流量特性曲线

(2)空气喷嘴流量特性标定。给定喷嘴工作周期为20 ms,空气喷嘴喷气压力从0.1 MPa变化到0.6 MPa, t_3 从1 ms变化到10 ms,标定喷气量的变化如图6所示。

从图5中可见,油压一定时,喷油量随 t_1 的增大逐渐增加,二者基本成线性关系。 t_1 一定时,油压增大,喷油量增加。这是因为油压一定时,喷嘴中燃油流

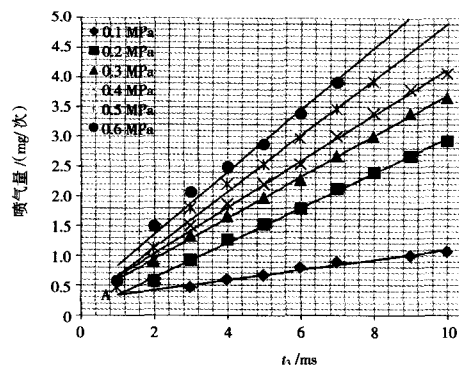


图6 空气喷嘴流量特性曲线

出速度 V_f 一定,喷油量 Q 为 V_f 、喷嘴出口面积 S 、 t_1 与喷油次数的乘积,即 $Q=2000 \times V_f \times S \times t_1$ 。 t_1 一定时,油压增大, V_f 增大,从而喷油量增加。图中A点说明 $t_1=1$ ms时喷油量为0,这是因为电磁直射喷嘴从响应到完全打开存在机械延迟的缘故。

从图6中可见,空气喷嘴流量变化规律与燃油喷嘴类似,喷气量与 t_1 也成线性关系。

2.2 燃油雾化性能试验结果分析

2.2.1 t_1 和 t_3 对雾化性能的影响

t_1 和 t_3 的影响实际是气油比对雾化粒径的影响。试验中给定喷油和喷气间隔时间 $t_2=1$ ms, t_1 和 t_3 从2 ms变化到5 ms,燃油雾化粒径 D_{SM} 变化曲线如图7所示。

由图7中可见,随着 t_3 的增加, D_{SM} 逐渐减小;随着 t_1 的增加, D_{SM} 逐渐增大;即随气油比的增大, D_{SM} 减小。这是因为气油比增大,气动力增大,加强了油珠与气体之间的相互作用,从而获得的粒径 D_{SM} 逐渐减小。 D_{SM} 最小值出现在状态 $t_1=2$ ms、 $t_2=1$ ms、 $t_3=5$ ms, $D_{SM} < 10 \mu\text{m}$,此时气油比为最大值。油雾R-R分布均匀度指数 n 随 t_1 和 t_3 变化的关系曲线如图8所示。从图8中可见,增加 t_3 或减小 t_1 均能使 n 增大,即雾化粒径越集中和均匀。 n 最大值同样出现在状态 $t_1=2$ ms、 $t_2=1$ ms、 $t_3=5$ ms,说明该状态下燃油雾化质量最佳。

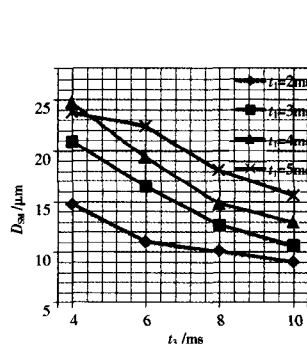


图7 雾化粒径随 t_1 和 t_3 的变化曲线

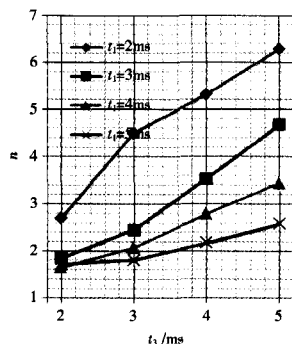


图8 均匀度指数随 t_1 和 t_3 的变化曲线

$t_1=t_3$ 情况下的 D_{SM} 和 n 的变化关系曲线分别如图 9、10 所示。从图中可见, $t_1=t_3$ 时, D_{SM} 和 n 的变化都很小, 可认为基本不变。

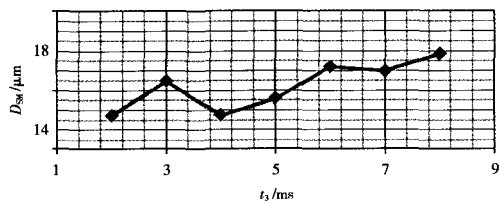


图 9 $t_1=t_3$ 时 D_{SM} 变化曲线

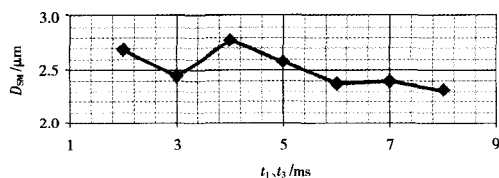


图 10 $t_1=t_3$ 时 n 变化曲线

从燃油喷嘴、空气喷嘴流量标定曲线得知, 喷气量与 t_3 、喷油量与 t_1 均成线性关系, 即 $t_1=t_3$ 时, 喷气量与喷油量比值(气油比)变化不大, 因而 D_{SM} 和 n 变化幅度很小。

2.2.2 t_2 对雾化性能的影响

(1) $t_1, t_3=4$ ms, t_2 从 0 变化到 5 ms, 如图 11 所示。

(2) $t_3=7$ ms, $t_1=4$ ms, t_2 从 -2 ms (负数表示喷气比喷油提前) 到 5 ms, 如图 12 所示。

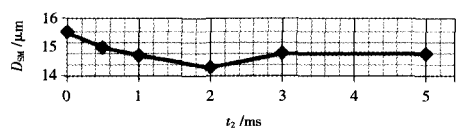


图 11 时间延时对雾化粒径的影响
($t_1, t_3=4$ ms, $t_2=0\sim 5$ ms)

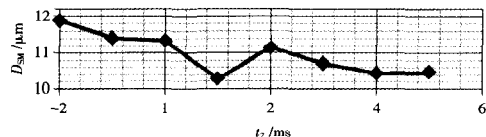


图 12 时间延时对雾化粒径的影响
($t_3=7$ ms, $t_1=4$ ms, $t_2=-2\sim 5$ ms)

从图 11、12 中可见, 在 t_1, t_3 保持定值的情况下, 随间隔延时的变化, D_{SM} 的变化幅度很小, 影响不大。因为 t_2 的变化不影响喷气量与喷油量, 即不影响气油比的大小, 所以雾化粒径基本保持不变。

2.2.3 喷气压力对雾化性能的影响

喷气压力的大小决定了气流速度的大小, 从而影响气动力的大小, 影响燃油的雾化质量, 因此需研究喷气压力对雾化性能的影响。试验给定参数: 周期

$T=20$ ms, 压差为 0.2 MPa, $t_1=4$ ms, $t_2=1$ ms, 喷气压力从 1 bar 变化到 0.5 MPa, t_3 从 2 ms 变化到 10 ms。气压对雾化粒径和均匀度指数的影响分别如图 13、14 所示。

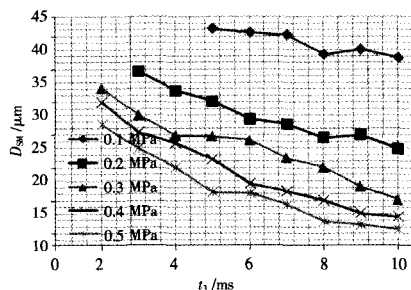


图 13 喷气压力对雾化粒径的影响

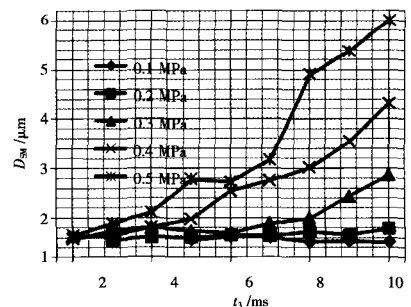


图 14 喷气压力对均匀度指数的影响

随气压降低, 气动力作用减弱, D_{SM} 增大, n 减小, 整体雾化质量下降。若要得到较高的燃油雾化质量则需要延长 t_3 , 当气压小于 0.2 MPa 时, D_{SM} 基本上在 25 μm 以上, 无法满足要求。此时 $n < 2$, 延长喷 t_3 无法再提高均匀度指数。

3 结论

对以煤油为燃料的活塞发动机的气动雾化喷嘴的雾化性能进行的试验研究发现, 喷油脉宽 t_1 、喷气脉宽 t_3 、喷气压力对燃油雾化性能的影响较大。通过分析得出以下几点结论:

(1) t_3 增加, 油珠粒径 D_{SM} 减小, 分布均匀度指数 n 增大; t_1 增加, D_{SM} 逐渐增大, n 减小; 即随气油比的增大, D_{SM} 减小, 粒径分布越集中、均匀。雾化质量最佳值出现在状态 $t_1=2$ ms、 $t_2=1$ ms、 $t_3=5$ ms, 此时 $D_{SM} < 10$ μm , 能够满足要求。

(2) $t_1=t_3$ 时, 可认为气油比变化不大, D_{SM} 和 n 的变化均相对较小。

(3) t_1, t_3 不变的情况下, t_2 对雾化性能几乎无影响, 可以忽略。

(4) 喷气压力是影响雾化性能的另一重要因素。

随着气压的增大, D_{SM} 逐渐减小, n 增大。当气压小于 0.2 MPa 时, D_{SM} 基本都大于 25 μm , 无法满足需求。

从以上结果可以总结出, 影响雾化性能的主要影响因素是气油比, D_{SM} 随气油比的增大而减小。在油压和气压固定的情况下, 则体现为 t_1 、 t_3 对雾化性能的影响。

参考文献:

- [1] 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: 20-21.
- [2] Boretti 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 2007-01-1415.
- [3] Jin S H, Brear M, Watson H, et al. An experimental study of the spray from an air-assisted direct fuel injector [J]. Department of Mechanical Engineering, 2008, 222 (10): 1883-1894.
- [4] Cathcart G, Tubb J. Application of air assisted direct fuel injection to pressure charged gasoline engines [R]. SAE 2002-01-0705.
- [5] Boretti A, Jin S H, Brear M, et al. Experimental and numerical study of a spark ignition engine with air-assisted direct injection[J]. Department of Mechanical Engineering, 2007, 222 (6): 1103-1119.
- [6] 曾卓雄, 姜培正, 谢蔚明. 喷嘴雾化粒径的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2000(34): 75-77.
- [7] 甘晓华著. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 173-199.
- [8] Sampson M J, Heywood J B. Analysis of fuel behaviour in the spark-ignition engine start-up process[R]. SAE 950678, 1995.
- [9] Lefebvre A H. Energy considerations in twin-fluid atomization [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1992, 114(1): 89-97.
- [10] LeGal P, Farrugia N, Greenhalgh D A. Laser sheet dropsizing of dense sprays [J]. Optics & Laser Technology, 1999, 31(1): 75-83.
- [11] Cathcart G, Houston R, Ahern S. The potential of gasoline direct injection for small displacement 4-stroke motorcycle applications[R]. SAE 2004-32-0098.

(上接第 57 页)

参考文献:

- [1] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 61-70.
- [2] 赵猛, 张以都, 马良文, 等. 装配结构模态仿真与实验对比研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(1): 28-30.
- [3] 陈果. 双转子航空发动机整机振动建模与分析[J]. 振动工程学报, 2011, 24(6): 619-632.
- [4] 王海涛. 带预紧力螺栓连接的机匣刚度分析 [J]. 航空发动机, 2010, 36(3): 33-35.
- [5] 王有智, 贺红兵. 发动机连杆的瞬态响应计算[J]. 内燃机学报, 1998(3): 105-110.
- [6] Desai C S, Zaman M M, Lightner J G, et al. Thin-layer elements for numerical and joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods of Geomechanics, 1984, 8 (1): 19-43.
- [7] 饶柱石. 栏杆组合式特种转子动力学特性及其接触刚度的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1992.
- [8] 赵丹, 艾延廷, 翟学, 等. 法向接触刚度对螺栓连接结构振动模态的影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 54-57.
- [9] Ahmadian H, Ebrahimi M, Mottershead J E, et al. Identification of bolted joints interface models [C]// Proceedings of ISMA 2002: Noise and Vibration Engineering conference. Leuven: Katholieke University, 2002: 1741-1747.
- [10] 苏春峰, 艾延廷, 娄小宝. 接触非线性仿真中接触刚度因子选取的方法研究 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 26(3): 5-9.