

文章编号:1000-8055(2012)07-1517-06

一种离心甩油盘雾化性能的试验

熊 纯¹, 宋双文², 陈 剑², 李 志², 李文高²(1. 长沙航空职业技术学院 航空装备维修工程系, 长沙 410124;
2. 中国航空工业集团公司 航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 在离心甩油盘性能试验器上对一种离心甩油盘雾化性能进行了较详细的试验研究, 用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)测量了不同转速下甩油盘的燃油雾化粒度索太尔平均直径(SMD)、雾化锥角等性能参数. 试验结果表明: 在试验转速范围内, 随甩油盘转速增大, 甩油盘雾化锥角 α 逐渐减少; 随甩油盘转速增大, 雾化粒度 SMD 值逐渐减少, 当甩油盘转速大于 25 000 r/min 时, 燃油的 SMD 值基本保持不变; 在同一甩油盘转速下, 燃油的 SMD 值随离心甩油盘喷油孔距离的增大而增大.

关 键 词: 折流燃烧室; 离心甩油盘; 相位多普勒粒子分析仪 (PDPA); 雾化粒度; 雾化锥角

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experimental study of atomization performance on a fuel slinger

XIONG Chun¹, SONG Shuang-wen², CHEN Jian², LI Zhi², LI Wen-gao²(1. Aeroequipment Repairing Engineering Department,
Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha 410124, China;
2. China Aviation Powerplant Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: An experimental study was performed to investigate the atomization performance on a rotating fuel injection system in a fuel slinger test rig. Performance parameters such as fuel droplet size Sauter mean diameter (SMD) and spray cone angle etc was measured by using phase Doppler particle analyzer (PDPA) system under different slinger rotary speeds. The test results indicate that during the given rotational speed ranges, the fuel atomization cone angle of the slinger is gradually decreased with increasing shaft speed, the fuel droplet size of the slinger is gradually decreased while the rotational speed increased. Over than 25 000 r/min, SMD is not changed and kept constant, under the same rotary speed, the droplet size increased when the distance away from the fuel slinger hole increased.

Key words: slinger combustor; fuel slinger; phase Doppler particle analyzer (PDPA); fuel droplet size; spray cone angle

与常规的离心喷嘴等燃油雾化装置相比, 离心甩油盘具有燃油的雾化质量优良、供油压力低、加工方便、不易堵塞等优点, 因而在中小型航空发动机上得到了广泛应用.

离心甩油盘一般固定在发动机转子上, 在发

动机工作时, 随同转子一同转动. 甩油盘中燃油的雾化主要依赖高速旋转时燃油承受的离心力而形成的压力, 当甩油盘结构确定后该压力随甩油盘转速而改变, 燃油的雾化质量主要取决于甩油盘转速. 由于甩油盘产生的离心力很大, 燃油的黏性

收稿日期: 2011-11-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120801.1438.201207.1517_011.html

作者简介: 熊纯(1973—), 男, 湖南双峰人, 讲师, 主要研究方向航空发动机使用和维修.

影响很小,故可以使用煤油、柴油甚至于重油和原油等各种各样的燃料。

影响电油盘雾化质量的因素包括:电油盘的转速、燃油流量、燃油的种类和黏度、电油盘直径、喷油孔的长径比及喷油孔的直径等。

虽然国外在 20 世纪 40 年代就由法国透博梅卡公司把电油盘应用于航空发动机上,但有关电油盘设计、试验和性能特点的公开资料却不多。已公开发表的文献,一般只涉及简单的电油盘工作原理和结构介绍,较少涉及具体的电油盘雾化性能试验,没有提供具体测量得出的电油盘雾化性能数据等试验值。

文献[1-7]介绍了折流燃烧室及其所用的电油盘的基本结构、优缺点、雾化机理和实际使用情况;文献[8]对早期航空发动机如 J69 使用的中心供油式电油盘的结构、工作原理、性能特点和影响因素进行了介绍;文献[9]对 YJ402-CA-400 所用电油盘的结构进行了介绍,并示出了用高速摄影得到的燃油离开喷油孔时的雾化过程;文献[10]在一个由气涡轮驱动的试验器上,使用照相法对一电油盘的雾化性能进行了比较系统的试验研究,并得出了用水进行试验时索太尔平均直径(Sauter mean dimteter,简称 SMD)的经验关系式

$$D_{32}=0.033U^{-0.7}Q^{0.2}D^{0.3}$$

其中 U 为电油盘外圆周向速度,单位为 m/s ; D 为电油盘外圆直径,单位为 m ; Q 为液体流量,单位为 m^3/s 。文献[11]则用振动频谱的观点解释了电油盘的雾化过程,同时对影响电油盘雾化性能的各种因素进行了初步分析。文献[12]利用流动显示技术对影响电油盘雾化过程的下列变量进行了试验研究:喷油孔形状、尺寸、液体流量和电油盘转速,并根据试验结果对适用于小型燃气涡轮的圆孔电油盘的设计和性能准则进行了基本的技术分析。文献[13-14]则利用相关试验设备对折流燃烧室所用电油盘的雾化特性与转速的关系及该燃烧室的点火和燃烧特性等进行了试验研究。文献[15]则对使用高密度燃油的折流燃烧室的性能进行了相应的试验研究。

而国内由于使用电油盘的发动机均为国外引进,同时由于缺乏先进的试验设备和测试手段,对电油盘性能的试验研究尚处于起步阶段。

本次试验利用一专用的电油盘性能试验器,用先进的相位多普勒粒子速度分析仪(PDPA),对某离心电油盘在不同电油盘转速下的雾化性能进行了较详细的试验研究,为进一步了解电油盘

的雾化机理和工作特性提供了必要的试验验证。

1 试验件和试验设备

试验用电油盘为圆环薄壁件(图 1),燃油通过其上的喷油小孔电入燃烧室火焰筒内。

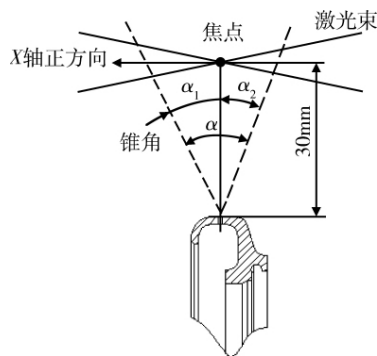


图 1 电油盘试验件及雾化参数测量位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fuel slinger and the measure location on atomization parameters

专用电油盘雾化性能试验器示意图见图 2。整台试验器由下列主要系统组成:动力系统、抽风系统、燃滑油系统、空气系统、测试系统、PDPA 激光相位多普勒粒子分析仪等。电油盘由电主轴驱动,其工作转速连续可调。抽风系统能及时抽走试验箱体內的油雾,避免浮余细小油雾对测试精度的影响,保证试验时无油雾翻滚、油雾回流和油雾外溢现象。试验箱体两侧安装有玻璃观察窗,便于 PDPA 仪的测量。美国 TSI 公司生产的 PDPA 仪由激光器、光纤耦合器、发射探头、接收探头、光电转换器、信号处理器、三维移动坐标架、计算机及光缆等组成,可对电油盘的雾化粒度、雾化锥角、油滴运动速度等进行测量。

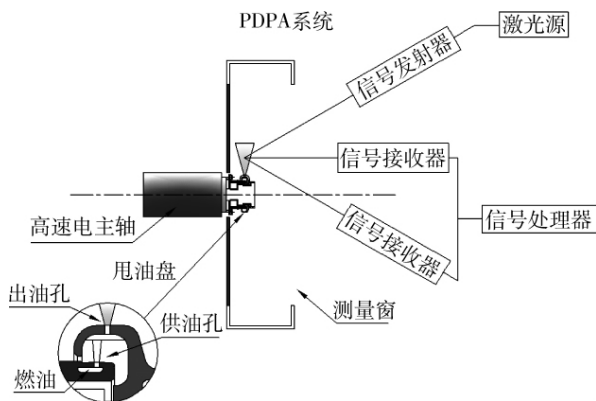


图 2 电油盘雾化性能试验器示意图

Fig. 2 Sketch of the slinger test rig

测量参数范围及精度: 试验件转速用霍尔元件测量, 测量精度 $\pm 0.25\%$, 范围 $0 \sim 70\,000\text{ r/min}$; 燃油流量用质量流量计测量, 测量精度 $\pm 0.2\%$ F. S; 索太尔平均直径 SMD 测量精度 $\pm 1\%$ F. S; 雾化锥角 α 测量精度 $\pm 0.5^\circ$.

2 试验条件及内容

试验介质为 RP-3 航空煤油, 试验时燃油温度保持 $27 \sim 29^\circ\text{C}$. 试验过程中保持喷射油道供油压差为 0.12 MPa , 此时燃油的流量为 927.0 g/min . 分别在电油盘工作转速 n 为 $5\,000, 10\,000, 15\,000, 20\,000, 25\,000, 30\,000, 35\,000, 40\,000, 45\,000, 50\,000\text{ r/min}$ 下, 测量燃油的喷雾锥角 α 、索太尔平均直径 SMD.

激光测量位置如图 1, 激光焦点原点在电油盘出油孔平面上, 距出油孔 30 mm 处. 计算机控制 PDPA 激光发射和接收探头坐标架于 X 轴正负方向移动, 测量给定点的燃油索太尔平均直径 SMD 及油雾场体积分数. 喷雾锥角的边界点由 PDPA 仪测试的油雾场体积分数数据率变化值来判定. 由此计算出雾化锥角 α . 测量中定义了两个锥角: 电油盘喷油孔出口中心平面把喷雾锥角分为两半, X 轴正方向的半锥角定义为 α_1 , 负方向半锥角定义为 α_2 .

3 试验结果及分析

3.1 雾化锥角

图 3 为电油盘喷雾锥角随转速变化曲线. 由图 3 知, 电油盘的雾化锥角随转速增大而逐渐变小. 电油盘转速为 $5\,000\text{ r/min}$ 时, 雾化锥角 α 为 54.68° , 电油盘转速为 $50\,000\text{ r/min}$ 时, 雾化锥角为 28.82° , 几乎缩小了一半, 这是由于电油盘相当于多个直射喷嘴的组合, 电油盘转速的增加, 使其产生的当量供油压力增大, 燃油的喷出速度增大, 从而导致其锥角减少. 由于电油盘转速对雾化锥角有较大影响, 因此在确定折流燃烧室火焰筒头部相关结构时, 必须考虑转速对喷雾锥角的影响, 避免出现发动机工作过程中油雾锥打壁情况.

试验过程中, 测得的雾化半锥角 α_1 和 α_2 值并不相等. 主要是由于试验器设计时在电油盘开口处一侧设有一挡油的侧壁, 而另一侧则为开放式, 便于抽风时空气的进入, 因而在试验器抽风装置工作时, 在吸入空气的作用下, 油雾会朝侧壁一侧运动; 加上电油盘的离心作用会造成侧壁一侧的空气从电油盘的开口处进入电油盘内腔, 再从喷

油孔甩出, 也会在该侧壁处形成一股朝向电油盘开口处的强烈卷吸气流. 在这两个因素的作用下, 油雾会偏向里侧流动 (图 4), 从而导致喷嘴孔形成的油雾锥左右两侧锥角值有差别.

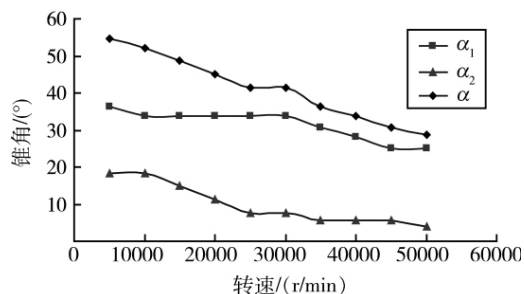


图 3 雾化锥角随电油盘转速变化曲线

Fig. 3 Spray cone angle versus slinger rotary speed

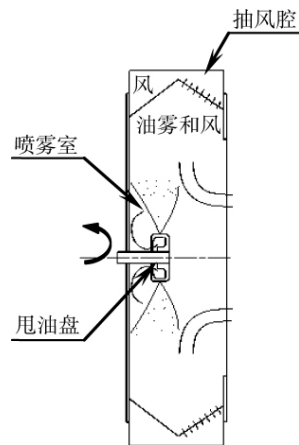


图 4 电油盘实际雾锥示意图

Fig. 4 Sketch of the slinger real spray cone

3.2 索太尔平均直径 SMD

图 5 为电油盘燃油雾化粒度索太尔平均直径 SMD 随电油盘转速变化曲线图. 由图 5 可知, 随着电油盘转速的增加, 燃油的雾化粒度逐步变小. 在电油盘的转速为 $10\,000\text{ r/min}$ 时, 其当量供油压力仅为 0.9 MPa , 但 SMD 值已达 $55\text{ }\mu\text{m}$. 而目前常规的雾化技术离心喷嘴等在正常的工作压力范围内也只能使燃油油滴达到小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的水平^[13], 如国内某型航空发动机所使用的单油路离心喷嘴在供油压力为 2.25 MPa 时, 其燃油油滴的 SMD 也仅为 $34\text{ }\mu\text{m}$ 左右. 当电油盘转速为 $25\,000\text{ r/min}$ 时, 燃油的 SMD 值已达 $23.33\text{ }\mu\text{m}$, 此后再增加转速, 燃油的 SMD 值基本保持不变.

这是因为电油盘燃油的雾化主要取决于燃油射流的紊流脉动及外界气流对液面的作用, 当电

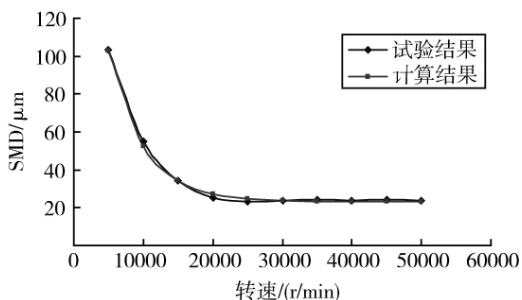


图 5 燃油的索太尔平均直径 SMD 随电油盘转速变化曲线

Fig. 5 Fuel droplet size SMD versus slinger rotary speed

油盘转速增大时,其旋转产生的离心力形成的当量供油压力也增大,使得燃油在电油盘喷油孔出口处喷射速度增大,除了表面张力、惯性力及黏性力的作用外,气流对液膜的作用也将大大增强,燃油离开喷油孔会立即破碎雾化,大油滴会分裂雾化化成大量细小油滴,而且该过程会反复进行。当燃油从喷油孔甩出的喷射速度大到一定值时,由于油滴直径与喷射速度存在如下关系: $U_f \propto 1/\sqrt{D}$, 由大油滴不断破裂而形成的细小油滴的直径已很小,其 We 最终将低于临界值,从而导致细小油滴直径会基本维持现状,不再变小。

利用文献[4]中电油盘雾化粒度等经验公式计算知,本次研究用的电油盘在工作转速 25 000 r/min 下,喷油孔处燃油喷射速度达 111 m/s,此时电油盘的当量供油压力为 5.3 MPa。而在在工作转速 50 000 r/min 下,喷油孔处燃油的喷射速度达 222 m/s,此时由于高速旋转引起的电油盘当量供油压力达 21.2 MPa(图 6),已远远高于常规离心喷嘴的工作供油压力。

试验中发现的“在转速增大到一定程度后,油滴直径基本不再变化”这一现象说明继续增大电油盘的转速对燃油的雾化并无大的影响,燃油的雾化粒度并不总是与电油盘的转速成正比。故在实际的折流燃烧室设计过程中,应综合考虑雾化和其他因素的需求来确定电油盘的工作转速。

根据这一特性,在进行折流燃烧室热态性能试验时,电油盘的转速可不必按实际工作状态下的整机转速值,而是可以在保持燃油的索太尔平均直径 SMD 和雾化锥角基本一致的情况下,选定一个合适的电油盘转速来进行试验,既可保证试验设备安全,又能得到准确的燃烧室性能参数。

另外,根据试验结果,即使在电油盘的转速只有 10 000 r/min 时,燃油的索太尔平均直径 SMD

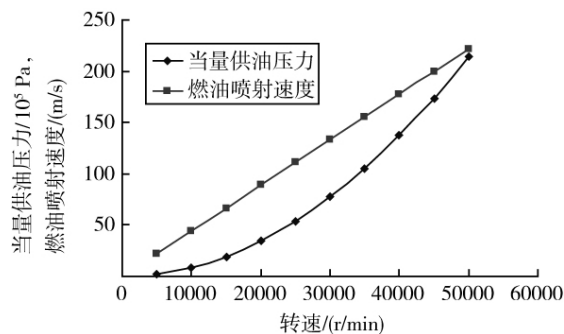


图 6 燃油喷射速度和当量供油压力随电油盘转速变化曲线

Fig. 6 Fuel velocity and pressure versus slinger rotary speed

已达到了 $55 \mu\text{m}$,已足可以保证发动机的起动点火顺利进行。而对于中小航空发动机而言,其设计点工作转速一般在 35 000 r/min 以上,起动点火时发动机的带转转速一般也会大于 10 000 r/min,因而采用折流燃烧室的中小发动机一般具有较优秀的起动点火和高空性能。

根据上述试验结果,还拟合得出了在使用 RP-3 燃料时该电油盘燃油雾化粒度的索太尔平均直径(单位: μm)与转速 n (单位: r/min)的关系式

$$D_{32} = 214.60592 \times e^{-n/5042.45569} + 23.13335$$

经验算,该式与试验结果的吻合度非常好(图 5),试验值与计算值之间的最大偏差为 7.55%。

在试验中,还测量了同一电油盘转速下、分别离喷油孔径向距离为 10, 20, 30 mm 测量截面处的燃油雾化粒度索太尔平均直径值(图 7~图 10)。

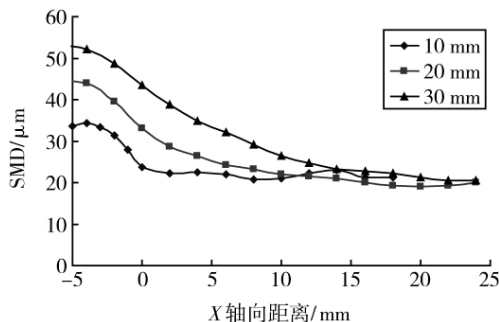


图 7 20 000 r/min 时 X 轴向不同截面的 SMD 值

Fig. 7 SMD along X axis at the rotary speed of 20 000 r/min

由结果可知,在同一电油盘转速下,测量所得的燃油 SMD 随离喷油孔径向距离的增大而增大。如当电油盘转速为 40 000 r/min 时,在 $Y=10$

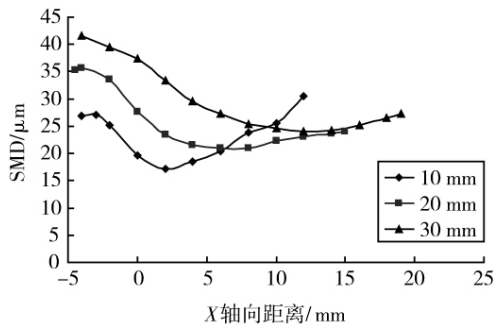


图 8 30 000 r/min 时 X 轴向不同截面的 SMD 值

Fig. 8 SMD along X axis at the rotary speed of 30 000 r/min

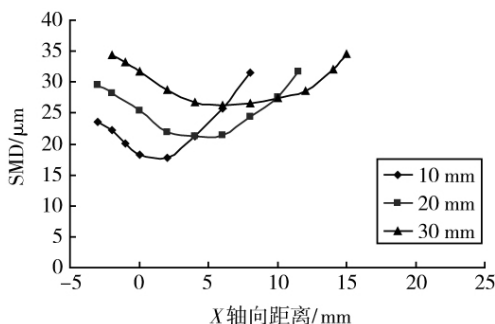


图 9 40 000 r/min 时 X 轴向不同截面的 SMD 值

Fig. 9 SMD along X axis at the rotary speed of 40 000 r/min

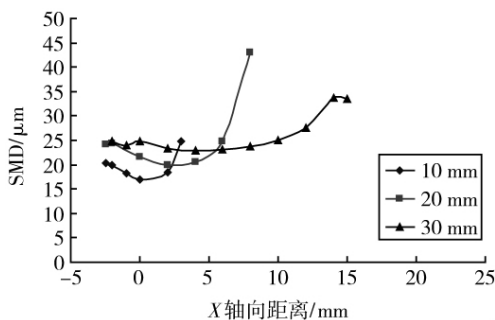


图 10 50 000 r/min 时 X 轴向不同截面的 SMD 值

Fig. 10 SMD along X axis at the rotary speed of 50 000 r/min

mm 测量截面处的最小 SMD 值为 $X=2$ mm 处的 $17.69\mu\text{m}$, 而 $Y=20$ mm 测量截面处最小 SMD 值为 $X=4$ 处的 $21.18\mu\text{m}$, $Y=30$ mm 测量截面处的最小 SMD 值为 $X=6$ mm 处的 $26.26\mu\text{m}$.

这是由于油膜在离开喷油孔后,不断破裂,并且大油滴不断破碎成更小的小油滴,燃油的索太尔平均直径 SMD 不断减少.但小油滴直径小,其穿透能力也弱.大油滴则具有较大动能,能向前运

行更远的距离,因而离喷油孔径向距离增大,测量得出的 SMD 值愈大.

不同径向测量截面处的最小 SMD 值出现的 X 方向的位置变动,则是由前面提到的试验器箱体两侧结构不同以及电油盘旋转引起的气流卷吸这两个因素造成的气流流动偏向 X 轴正向而引起的.

4 结 论

1) 随电油盘转速增加,燃油的雾化粒度逐步变小.当电油盘的转速大于 25 000 r/min 时,燃油的索太尔平均直径 SMD 基本保持不变.

2) 电油盘的转速对喷雾锥角有较大的影响,电油盘的喷雾锥角随转速增大而逐渐变小.

3) 在同一电油盘转速下,测量所得的燃油索太尔平均直径 SMD 随离电油盘喷油孔径向距离的增大而增大.

参考文献:

- [1] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [2] Lefebvre A H. Atomization and sprays[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [3] Meller A M. Design of modern turbine combustor[M]. New York: Academic Press Inc., 1990.
- [4] 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)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [5] 宋双文, 罗辉. 离心电油盘特性浅析[C]//中国航空学会第三界小发动机学术讨论会. 北京: 中国航空学会, 2000: 125-133.
- [6] 宋双文. 折流环形燃烧室结构特点分析[C]//湖南省航空学会 2001 年学术年会. 长沙: 湖南省航空学会, 2001: 24-32.
- [7] 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.
- [8] Maskey H C, Marsh F X. The annular combustion chamber with centrifugal fuel injection[R]. SAE-444C, 1962.
- [9] Rogo C, Trauth R L. Design of high heat release slinger combustor with rapid acceleration requirement[R]. SAE-740167, 1974.
- [10] Morishita T. A development of the fuel atomizing device utilizing high rotational speed[R]. ASME GT 81-180, 1981.
- [11] 贾永忠. 电油盘的雾化分析[J]. 推进技术, 1995, 16(4): 45-49.
- [12] JIA Yongzhong. An analysis on atomization of fuel slinger[J]. Journal of Propulsion Technology, 1995, 16(4): 45-49. (in Chinese)
- [12] Dahm W J A, Patel P R, Lerg B H. Visualization and fundamental analysis of liquid atomization by fuel slingers in small gas turbine engines[R]. AIAA-2002-3183, 2002.

-
- [13] Lee K Y, Choi S M, Han Y M, et al. Ignition characteristics on the annular combustor with rotating fuel injection system[R]. ASME-GT2004-53233, 2004.
- [14] Choi S M, Lee D H, Park J. Ignition and combustion characteristics of the gas turbine slinger combustor[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22 (3): 538-544.
- [15] Brackett C L, Trauth R L. Small turbine engine experience with high density fuels[R]. AIAA 83-1177, 1983.