

高扰动燃油喷嘴雾化试验

陈雷¹, 杨聪¹, 隆武强², 田华², 曾文¹, 马洪安¹

- (1. 沈阳航空航天大学 辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;
2. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 辽宁 116024)

摘 要: 为改善航空发动机的燃油雾化、验证高扰动雾化方案应用于航空发动机燃油喷射的可行性,采用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)及高速摄影技术,对不同夹角、不同孔径结构条件下的V形交叉孔高扰动喷嘴和单孔喷嘴的喷雾场粒子特性进行了测量。结果表明:随着供油压差增大,雾化锥角随之增大,索太尔平均直径(SMD)值随之减小;交叉孔结构对燃油雾化有明显促进作用,在相同的供油压差、出口截面积条件下,交叉孔的雾化锥角更大,SMD更小;在SMD相同时,交叉孔所需的喷射压力远小于圆直孔;随着交叉角的增加,雾化锥角、SMD均有明显改善;采用空气辅助能够有效增大雾化锥角、降低SMD值,但改善效果随气压增加而逐渐减弱。与传统单孔喷孔方案相比,高扰动喷孔能够在相同压力条件下极大的改善燃油雾化效果。

关键词: 高扰动喷嘴; 多普勒粒子分析仪(PDPA); 喷嘴结构; 索太尔平均直径(SMD); 雾化锥角

中图分类号: V233.2⁺2

文献标志码: A

Experiment on atomization of high disturbance fuel nozzle

CHEN Lei¹, YANG Cong¹, LONG Wuqiang²,
TIAN Hua², ZENG Wen¹, MA Hongan¹

- (1. Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technology for Aviation Propulsion System, Liaoning Province, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. School of Energy and Power Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to improve the fuel atomization and verify the feasibility of high perturbed atomization scheme applied to the fuel injection of aero-engine, the spray characteristics of V-shaped cross hole nozzles and single hole nozzles were measured by using phase Doppler particle analyzer (PDPA) and high-speed photography technology. Results showed that with the increase of injection pressure, the atomization angle increased and the Sauter mean diameter (SMD) value decreased. The cross-hole structure had a significant promoting effect on fuel atomization. Under the same injection pressure and exit cross-section area conditions, the atomization cone angle of the cross-hole was larger and the SMD was smaller; at the same SMD, the required injection pressure of the cross-hole was much smaller than that of the traditional circular straight hole; with the increase of intersection angle, the spray cone angle and SMD were both improved. Air-assisted method can effectively increase the spray cone angle and reduce the SMD value, but the improvement effect decreased gradually

收稿日期: 2019-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(51509035, 51409158, 51779044); 辽宁省自然科学基金(20170540693)

作者简介: 陈雷(1981—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事燃油雾化及燃烧研究。

引用格式: 陈雷, 杨聪, 隆武强, 等. 高扰动燃油喷嘴雾化试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(10): 2091-2097. CHEN Lei, YANG Cong, LONG Wuqiang, et al. Experiment on atomization of high disturbance fuel nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(10): 2091-2097.

with the increase of air pressure. Compared with the traditional single hole nozzle scheme, the high perturbation nozzle can greatly improve the atomization effect of the fuel under the same pressure conditions, and has great potential for aero engine application.

Key words: high disturbance nozzle; phase Doppler particle analyzer (PDPA); nozzle structure; Sauter mean diameter (SMD); spray angle

合理组织的燃油雾化是实现高效、清洁燃烧的必要条件,也是满足航空发动机高温升、低污染发展趋势的重要途径^[1-3]。燃油雾化的效果决定于燃油喷嘴的工作状态,燃油喷嘴的性能直接决定了油雾的雾化粒度,通常以索太尔平均直径(SMD,记为 D_{32})及雾化锥角等参数,SMD越小、雾化锥角越大则容易点火且燃烧越充分;反之则油束集中,易产生黑烟以及积碳,造成局部高温、甚至烧蚀火焰筒^[4]。为得到更加细化、更加均匀的雾化效果,人们在航空发动机上先后采用了不同的供油技术及喷嘴结构,得到了良好的雾化效果^[5]。

在发动机燃油喷射研究中,增大喷射压力、减小喷孔直径是获得良好喷雾的有效方法^[6]。然而,采用高压喷射技术势必增加系统的重量,因此不适合应用于航空发动机;航空发动机较大的燃油流量决定了其喷嘴的喷孔直径不能过小。因此,通过优化喷孔结构来实现喷雾特性优化就成为改善航空发动机燃油雾化的重要途径^[7]。

采用V形交叉结构的高扰动喷嘴是近年来发动机燃油雾化研究领域的新成果^[8]。大连理工大学的试验数据表明^[9],当应用于柴油机燃油喷射领域时,在相同的孔径、压差条件下,与传统的圆孔结构相比,高扰动燃油喷射能够获得更加细化的喷雾粒径及更大的喷雾锥角;当雾化粒度相同时,高扰动燃油喷雾的喷射压力可远小于圆孔喷雾^[9-11]。

高扰动燃油喷射方案在柴油机上的成功应用,为改善航空发动机燃油雾化提供了全新的思路。对于直射式航空发动机喷嘴,仅靠喷射压差难以实现良好雾化。因此,若将高扰动燃油喷雾方案应用于航空发动机直射式燃油喷嘴(横向射流、加力喷油杆等),能够在小喷射压力条件下实现理想雾化;此时再与高速空气相结合,能够进一步提升燃油雾化效果。但航空发动机燃油雾化压力远小于柴油机,不同工况条件下的燃油喷射、破碎、雾化、蒸发等过程有很大差异,在高喷射压力条件下所得的试验数据并不能够直接用于指导低压喷射方案的设计。因此,需要获得航空发动机

燃油喷射的具体工况下采用高扰动交叉喷雾的试验数据。

为验证高扰动燃油喷射方案应用于航空发动机燃油喷射的可行性,结合航空发动机工况设计了高扰动交叉喷孔喷嘴验证方案,采用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)及CCD(charge coupled device)相机,对不同夹角、不同孔径结构条件下的V形交叉孔高扰动喷嘴和单孔喷嘴的喷雾场粒子特性进行了测量。

1 试验设备及方法

1.1 试验系统

本实验是在沈阳航空航天大学辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室的燃油喷嘴综合实验系统(如图1所示)上进行的,该系统包括:供气系统、供油系统(包括主、副两条油路)、试验喷嘴、相位多普勒粒子分析仪、高速摄影系统、回油系统、计算机数据采集系统等。雾化粒度测量采用美国TSI公司生成的相位多普勒粒子分析仪,该仪器包含5 W大功率激光器,分光器,发射探头,接收探头,数据处理器等,其测量范围为 $0.1\sim 1000\mu\text{m}$ 。

1.2 喷嘴参数

高扰动喷嘴结构示意图如图2所示,主要包括旋流器、油管以及可拆卸的喷头三部分。由于交叉孔扰动作用导致供油雾形从轴向视角来看并非周向对称结构,因此从两个相互垂直的视角来研究喷嘴雾化锥角的变化。具体方法是:将两子喷孔中心线的夹角定义为交叉角、喷孔中心线所组成的平面称为交叉面(XOZ)、与之垂直的平面称为碰撞面(YOZ),结构简图如图3所示。

喷雾锥角定义为喷雾最外轮廓切线的夹角。本试验利用图像识别软件^[12]自动提取喷雾轮廓并进行锥角测量,其具体过程为:图像灰度化、增强对比度、确定喷雾边界、测量锥角。本实验共采用了5种结构的喷孔,分别是圆直孔,以及交叉角 θ 分别为 30° 、 60° 、 90° 、 120° 的交叉孔,其结构图如图4所示。

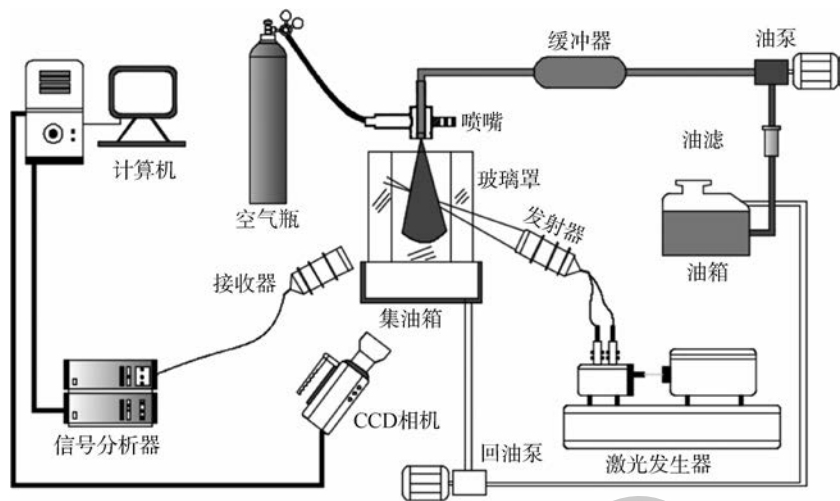


图 1 试验装置布置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental test rig

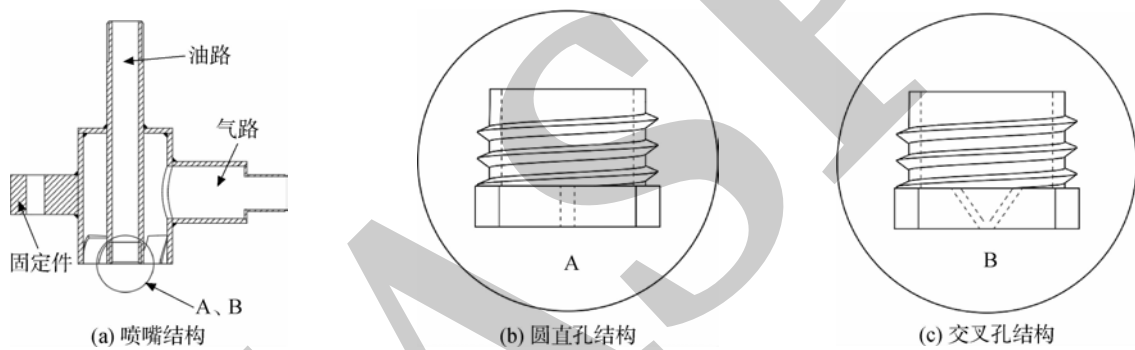


图 2 喷嘴及喷孔结构示意图

Fig. 2 Schematic of nozzle and orifice structure

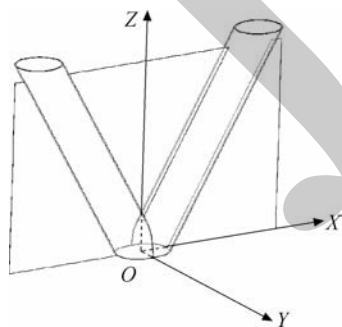


图 3 交叉面、碰撞面结构示意图

Fig. 3 Schematic of the intersection-flat and collision-flat

表 1 所示为喷孔参数表。其中 JC 表示为交叉孔,后面数字表示交叉角分别为 30° 、 60° 、 90° 、 120° , ZS 表示圆直孔。为保证试验精度,所选喷嘴间的流量误差在 5% 之内。

1.3 试验工况选择

本试验采用的供油压差分别为 0.2、0.4、

0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 MPa 及 1.6 MPa,供气压力分别为 0.2、0.4 MPa。

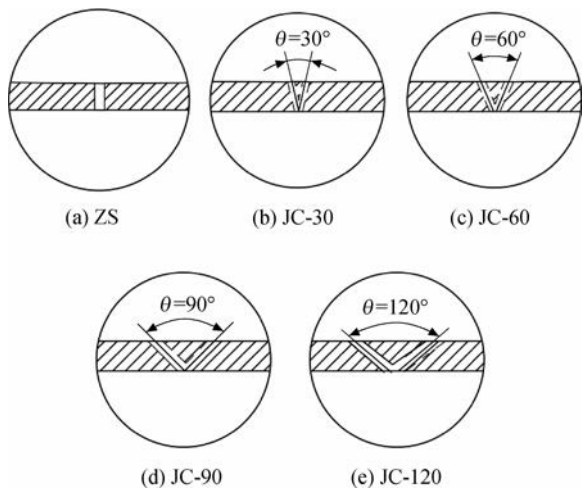


图 4 喷孔局部放大图

Fig. 4 Partial enlargement of the nozzle

表 1 喷孔参数
Table1 Nozzle parameters

喷孔	编号	孔径/mm
交叉孔	JC-30	0.42
	JC-60	0.40
	JC-90	0.35
	JC-120	0.3
直孔	ZS	0.42

2 试验及结果分析

本试验主要分析了喷孔结构、喷射压差、空气辅助等因素对雾化锥角及雾化粒度的影响。

2.1 雾化锥角分析

图 5 所示是供油压差 Δp 一定时的喷雾过程照片。如图所示,5 种喷嘴结构的雾化锥角存在明显差异。无论是从交叉面还是碰撞面看,交叉孔的喷雾锥角都要明显大于圆直孔的喷雾锥角;随着交叉角的增加,雾化锥角显著增大。

图 6 所示为不同供油压差下雾化锥角的变化。如图所示,尽管供油压差不同,但交叉孔喷嘴在两个平面上的雾化锥角都明显大于圆直孔喷嘴。这表明在相同的条件下,交叉孔喷嘴由于两个子喷孔之间的燃油相互撞击、挤压,在喷孔出口前已开始混合^[13],与圆直孔相比增强了喷嘴的初始混合效果。从图上还可看出,4 个交叉孔喷嘴的交叉面雾化锥角均大于碰撞面雾化锥角;在相同的供油压差条件下,交叉孔喷嘴在两个面上的

雾化锥角随交叉角的增大而增大。子喷孔内的燃油在喷嘴出口处发生撞击,在喷嘴出口射流两侧产生较强破碎,大量的细小液滴从液核中剥离出来,因而油液在交叉面产生了较强的径向速度,在碰撞面产生相对较弱的径向速度^[14]。所以,与不具备子喷孔撞击效应的圆直孔喷嘴相比,交叉孔喷嘴的雾化锥角在两个面上均大于圆直孔喷嘴。随着交叉孔喷嘴子喷孔几何夹角的增大,子喷孔内燃油在径向方向的速度分量增加,撞击效应进一步加大。因此,随着交叉孔喷嘴夹角的增大,雾化锥角也随之增大。

如图 6 所示,交叉面在较小的 Δp 下就能得到较大的雾化锥角,随着 Δp 增大,交叉面的雾化锥角变化总体呈增大趋势,但是变化幅度较小;而碰撞面的雾化锥角呈现出先较快增长、后逐渐平缓的趋势。其原因可能为:供油压差较小时,燃油流量较小、流速较小,雾化效果较差;随着 Δp 的增大,燃油流速随之增大,表现为雾化锥角增长较快,但是当 Δp 达到一定压力后,燃油流量增大变慢、流速增长变缓,雾化锥角表现为增幅缓慢。

图 7、图 8 所示分别为各喷嘴在空气辅助及供油压差共同作用下,交叉面、碰撞面的雾化锥角变化趋势。如图所示,所有试验喷嘴的雾化锥角在通入空气后均有增加,但交叉面与碰撞面锥角受辅助空气压力增加的影响幅度有所差别,碰撞面锥角的增长幅度要大于交叉面锥角的增长幅度。空气辅助对交叉面、碰撞面锥角影响差异的原因可归因于两个面与旋流器出口的夹角。受安装空间限制,旋流器出口方向与碰撞面的夹角小

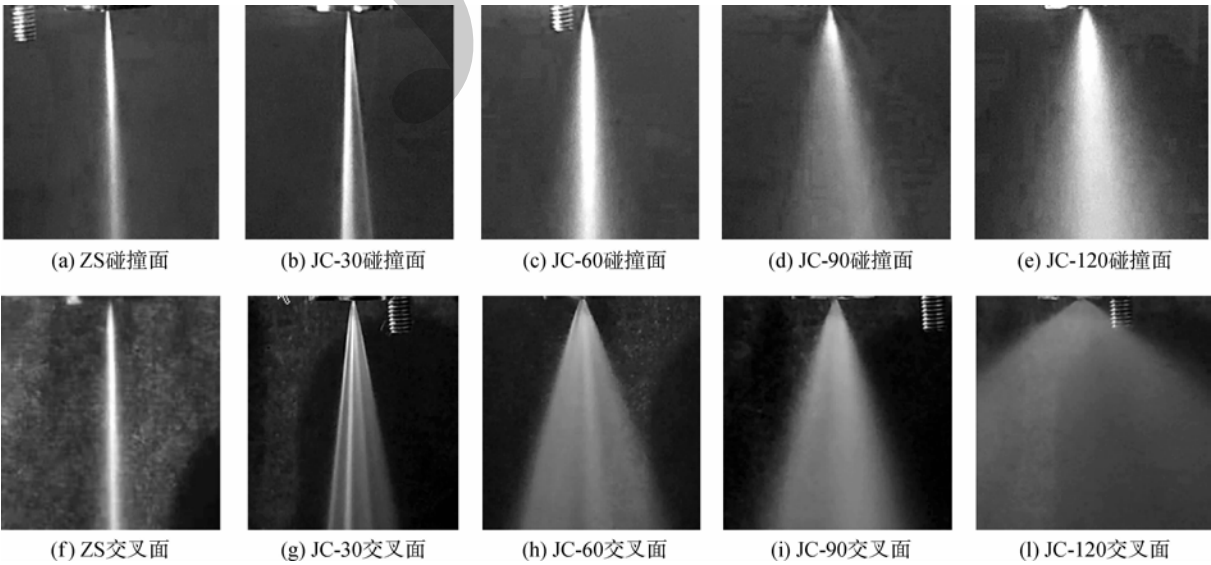


图 5 Δp 一定时喷嘴喷雾图像对比

Fig. 5 Nozzle spray image contrast when Δp is constant

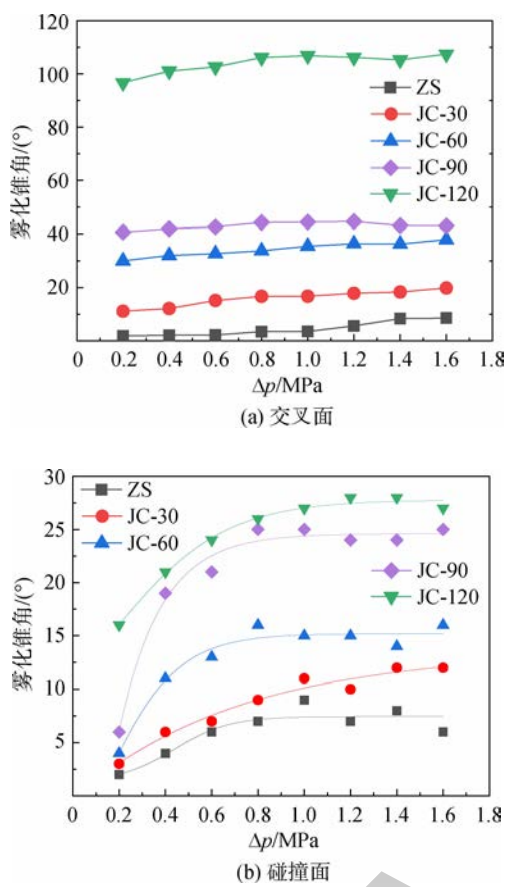


图 6 雾化锥角随 Δp 的变化
Fig. 6 Effect of changing Δp on spray angle

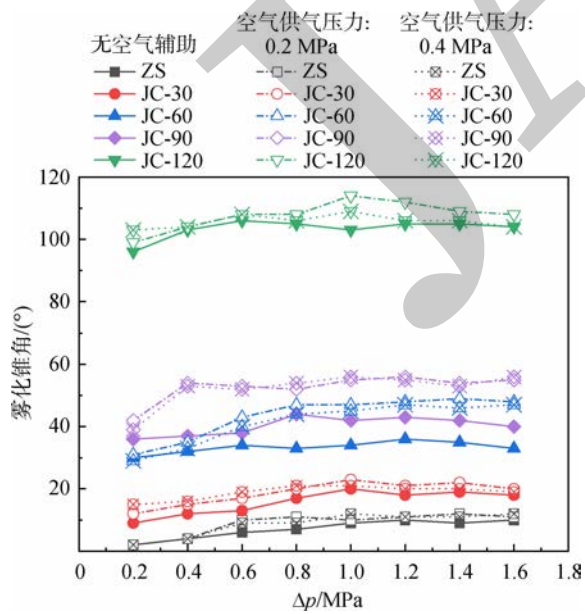


图 7 交叉面各喷嘴空气辅助及供油压差共同作用下雾化锥角变化趋势
Fig. 7 Change trend of atomization cone angle under the action of air assist and injection pressure on each nozzle of the intersection

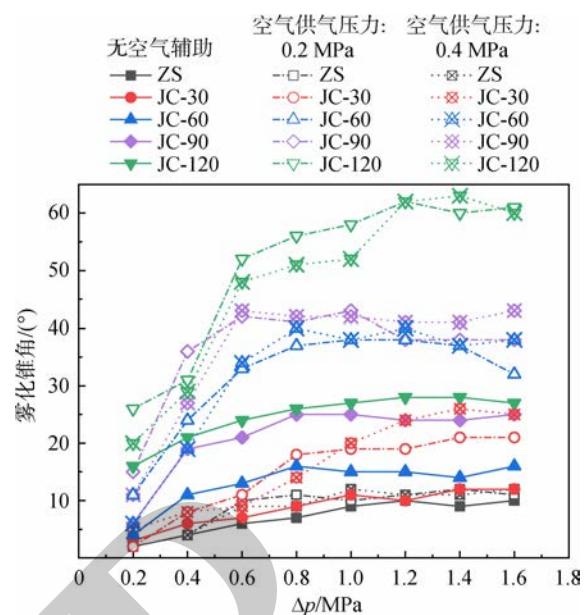


图 8 碰撞面各喷嘴空气辅助及供油压差共同作用下雾化锥角变化趋势
Fig. 8 Change trend of atomization cone angle under the action of air assist and injection pressure on each nozzle of the collision

于其与交叉面的夹角。因此,流经旋流器的高速气体在碰撞面方向上的速度分量更大^[15],从而导致雾锥在碰撞面径向上被加速,从而具有更大的扩散范围,因此雾化锥角随之增大。

2.2 雾化粒度分析

图 9 中所示为各喷嘴的雾化粒度变化情况。如图所示,在 Δp 相同的条件下各交叉孔喷嘴的 SMD 值均小于圆直孔喷嘴,且 SMD 随着交叉角的增大而减小。在供油压差较低的条件,交叉孔喷嘴相较于圆直孔喷嘴能够极大的降低 SMD 的数值,即在相同的 SMD 条件下交叉孔喷嘴所需的供油压差要远小于目前广泛使用的圆直孔喷嘴。图中所示,当 SMD 一定时(如 $40\mu\text{m}$),所需供油压差从小到大依次是交叉孔 120° 、 90° 、 60° 、 30° 及圆直孔喷嘴。这是由于两个子喷孔中的燃油在喷孔出口处发生碰撞进而破碎,同时使喷雾与周围气体间的动量交换更加充分^[16]。交叉孔喷嘴出口处的碰撞效应,受子喷孔几何夹角和供油压差的共同影响,几何夹角越大、供油压差越大,其碰撞效应越剧烈^[17]。而且交叉孔内部的液力作用所形成的较大内部扰动也有益于油液的快速雾化。所以采用交叉孔方案可以在相对较低的供油压差下满足特定的雾化粒度,可以大大降低供油系统的负荷。

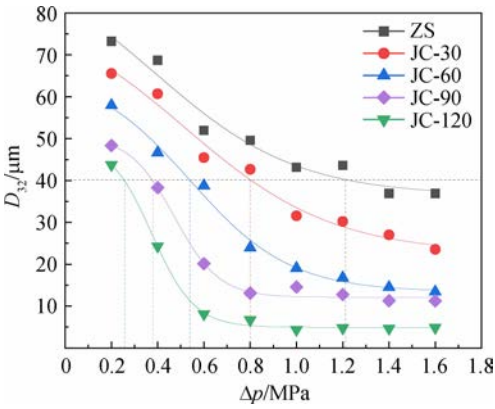


图 9 SMD 随供油压差变化趋势

Fig. 9 SMD changes with injection pressure

从图 9 中可以看出,供油压差的变化对圆直孔喷嘴和交叉孔喷嘴的影响程度不同。对于圆直孔喷嘴,随着 Δp 的增加其 SMD 亦逐渐下降;对于交叉孔喷嘴,随着交叉角的增加,SMD 呈现先显著下降、后趋于平稳的趋势。这是由于,供油压差较小时,燃油质量流量较小,液膜速度较低,喷嘴出口液膜破碎成小液滴后在空气阻力作用下速度迅速降低。与圆直孔相比,交叉孔喷嘴子喷孔的油束扰动效果明显,增大了液膜与周围空气的相对速度,从而达到较好的雾化效果,具体表现为在 Δp 条件下 SMD 值极大降低。随着供油压差的增大,液膜速度增大,空气与液膜的相互作用加大,雾化效果受 Δp 的影响作用减弱。

图 10 所示为空气辅助对各喷嘴雾化粒度的

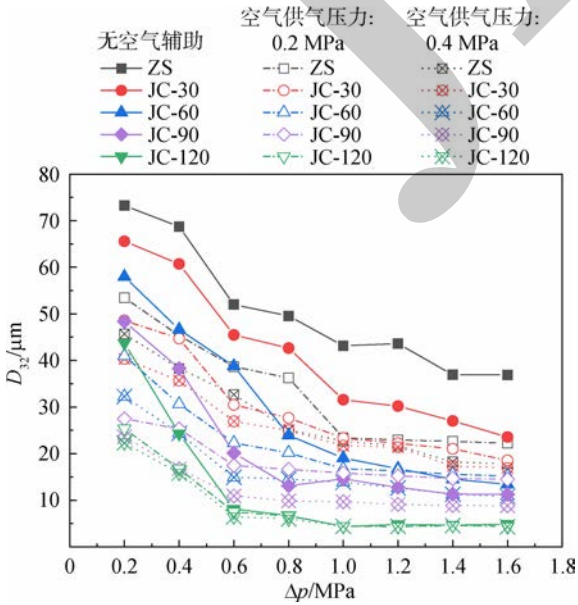


图 10 喷嘴辅助气压条件下 SMD 随供油压差变化趋势
Fig. 10 Trend of SMD with injection pressure under nozzle-assisted air pressure

影响。如图所示,通入空气后圆直孔喷嘴和交叉孔喷嘴的雾化粒度均有下降,但不同喷嘴变化幅度不同。ZS、JC-30、JC-60 三种喷嘴在较低供油压差下,随通入空气压力的增大,其 SMD 数值均降到原来的一半以下;但随着供油压差的增大,空气辅助的影响随之下降。其原因在于,从旋流器喷出的高速气流与液膜呈一定夹角撞击切割,增大了液膜附近的空气扰动,使液膜扭曲成波纹形,继而破碎成小液滴^[18]。随着供油压差的增大,喷油速度增加,其与旋流空气的速度差减小,旋流空气对液膜的切割作用减弱。

3 结 论

进行了不同结构参数的高扰动交叉喷孔与圆直孔的雾化过程对比试验,结果表明:

- 1) 随着 Δp 增大,雾化锥角随之增大,雾化粒径 SMD 值随之减小;随着交叉角的增加,雾化锥角、SMD 均有明显改善;
- 2) 交叉孔结构对燃油雾化有明显促进作用,在相同的 Δp 、出口截面积条件下,交叉孔的雾化锥角更大,SMD 更小;在 SMD 相同时,交叉孔所需的喷射压力远小于圆直孔;
- 3) 在航空发动机燃油喷射的压力条件下,仅通过改变燃油喷孔结构即实现了 SMD 和雾化锥角的极大改善。因此,采用高扰动交叉喷孔方案具有优化直射式航空发动机燃油喷嘴雾化特性的巨大潜力,在中心分级燃烧室燃油雾化、以及加力燃烧室燃油雾化领域均有实际应用价值。

参考文献:

[1] 张宝诚. 航空发动机燃烧室的现状和发展[J]. 航空发动机, 2013, 39(6): 67-73.
ZHANG Baocheng. Status and development of aeroengine combustors[J]. Aeroengine, 2013, 39(6): 67-73. (in Chinese)

[2] 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: 15-55.

[3] LECUORT R, BARRICAU P, STEELANT J. Spray velocity and droplet size measurements in flashing conditions [J]. Journal of the International Institutes for Liquid Atomization and Spray Systems, 2008, 19(2): 103-133.

[4] 马洪安, 张宝诚, 刘凯. 某型航空发动机燃油喷嘴对比试验研究[J]. 航空发动机, 2009, 35(3): 54-57.
MA Hongan, ZHANG Baocheng, LIU Kai. Comparative experiment study of fuel nozzles for an aeroengine[J]. Aeroengine, 2009, 35(3): 54-57. (in Chinese)

[5] 姚春德, 耿培林, 银增辉, 等. 喷嘴结构对喷雾特性的影响[J]. 内燃机学报, 2016, 34(1): 41-47.
YAO Chunde, GENG Peilin, YIN Zenghui, et al. Effect of

- nozzle geometry on spray characteristic[J]. Transactions of CSICE, 2016, 34(1): 41-47. (in Chinese)
- [6] 黄豪中, 安彦召, 苏万华, 等. 喷射压力和喷孔直径对柴油机混合燃料喷雾特性的影响[J]. 内燃机学报, 2013, 31(3): 200-207.
- HUANG Haozhong, AN Yanzhao, SU Wanhua, et al. Investigation on the influence of injection pressure and nozzle diameter on the spray of blended fuel in diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(3): 200-207. (in Chinese)
- [7] 王振华, 王亮. 航空发动机试验测试技术发展探讨[J]. 航空发动机, 2014, 40(6): 47-51.
- WANG Zhenhua, WANG Liang. Development of aero-engine testing measurement technology[J]. Aeroengine, 2014, 40(6): 47-51. (in Chinese)
- [8] 董全, 隆武强, 田江平, 等. 激光诊断及数值仿真在柴油机 V 形交叉孔油嘴研究上的应用[J]. 内燃机工程, 2012, 33(4): 28-35.
- DONG Quan, LONG Wuqiang, TIAN Jiangping, et al. Application of laser diagnosis and numerical simulation in study on V-type intersecting hole nozzle for diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(4): 28-35. (in Chinese)
- [9] 董全. 交叉孔和外开式喷油器喷雾特性的测量研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2012.
- DONG Quan. Diagnostics for the spray characteristics of intersecting hole injector and outwards-opening injector [D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 冷先银, 金煜, 何志霞, 等. 交叉孔喷油嘴内部流动特性的模拟[J]. 内燃机学报, 2015, 33(6): 522-529.
- LENG Xianyin, JIN Yu, HE Zhixia, et al. Numerical simulation on internal flow characteristics of intersecting hole nozzles[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(6): 522-529. (in Chinese)
- [11] 隋永旭. 柴油机交叉孔喷油嘴内三维流动分析[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2011.
- SUI Yongxu. Analysis on the flow in the intersecting hole nozzle of diesel engines[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 伍文锋, 吴建华, 钟柳花, 等. 航空发动机燃油喷嘴雾化角度测量研究[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 69-73.
- WU Wenfeng, WU Jianhua, ZHONG Liuhua, et al. Research on aeroengine fuel nozzle spray angle measurement [J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 69-73. (in Chinese)
- [13] 张宇璠. 柴油机交叉孔喷嘴自由喷雾与平板碰撞特性实验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2016.
- ZHANG Yupan. Experimental study on free and flat wall impinging spray characteristics of diesel V-type intersecting-hole nozzles[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] 金煜. 交叉孔喷油嘴内部流动和喷雾特性的研究[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2017.
- JIN Yu. Researches on the internal flow and spray characteristics for intersecting-hole nozzles[D]. Zhenjiang Jiangsu: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [15] 赵明. 交叉孔喷油嘴与双层分流燃烧系统的喷雾和燃烧特性实验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2015.
- ZHAO Ming. Experimental study on spray and combustion characteristics of V-type intersecting hole nozzle and in double-layer diverging combustion system[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] 于忠强. 空气雾化喷嘴雾化特性的实验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2014.
- YU Zhongqiang. An experimental study on the spray characteristics of the air-blast atomizer[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] HU Jingchao, LIU Bolan, ZHANG Chao, et al. Experimental study on the spray characteristics of an air-assisted fuel injection system using kerosene and gasoline[J]. Fuel, 2019, 235: 782-794.
- [18] 衡思江. 小型航空发动机气动雾化喷嘴雾化特性研究[D]. 北京: 中国科学院, 2015.
- HENG Sijiang. Investigations of spray characteristics of air-blast fuel nozzle for small aircraft engine[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

(编辑: 李岩梅、张 雪)