

文章编号: 1000-8055(2009)05-0987-07

侧喷挡板式雾化喷油杆喷雾特性实验

柳 杨, 马文杰, 李瑞明, 邢 菲, 杨茂林
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 发展了一种新型侧喷挡板式雾化喷油杆, 使用 Malvern 激光粒度仪, 对其在横向气流中所形成的雾场进行测量, 获得其雾化特性参数. 分析了初始雾化过程和雾场结构, 初步研究了油压、气流速度以及喷油杆几何结构对喷雾特性的影响. 研究结果对于该型喷油雾化方式的应用研究以及数值计算有着重要的意义.

关 键 词: 喷油杆; 挡板式喷油杆; 激光粒度仪; 侧喷; 雾化

中图分类号: V231. 2

文献标识码: A

Experiment on spray characteristics of baffle-type injector in cross flow

LIU Yang, MA Wen-jie, LI Rui-ming, XING Fei, YANG Mao-lin

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A new type of fuel baffle-type injector was developed. With the injector spraying in cross flow, Malvern laser particle analyzer was used to measure the spray characteristic parameters. The initial atomization process and special spray feature were analyzed. Furthermore, the paper made a primitive study of the influences of air velocity, fuel injection pressure and injector structure design sizes on the atomizing characteristics. The results are of significance to the application and numerical calculus of this injector.

Key words: injector; baffle-type injector; laser particle analyzer;
injection into the cross flow; atomization

涡喷涡扇发动机加力燃烧室和冲压发动机燃烧室的燃油喷射, 应用较为广泛的是直射式喷嘴侧喷方式^[1]. 国内对直射式喷嘴侧喷方式做了大量的雾化特性研究^[2-4]. 但是, 侧喷方式的燃油穿透深度会随发动机工作状态的变化而改变, 从而使后方燃油浓度中心发生改变^[5]. 根据 Ernst 建立的总的喷射油气当量比 ϕ 和尾迹当量比 θ 的关系式^[6]可知, 由于燃油浓度中心的改变会较大程度影响火焰稳定器上的燃油收集系数 β , 从而影响火焰稳定器的尾迹当量比. 文献^[7]使用了一种为主流供油的侧喷挡板喷油杆, 作者认为该型喷油装置一方面控制了燃油穿透深度, 减小了其对工作条件变化的敏感程度; 另一方面, 挡板的喷溅

作用能在一定程度上改善雾化质量. 基于这种侧喷挡板喷油杆, 作者研究了主流供油与尾缘吹气稳定器局部供油的燃油匹配规律. 选择了两种型式的主稳定器, 将其与逆喷挡板供油方式进行了燃烧性能对比. 初步实验结果说明, 在其实验的参数范围内, 侧喷挡板匹配方案的性能要优于逆喷挡板. 但目前对该喷油方式的雾化特性尚缺少研究.

本文采用 Malvern 激光粒度仪, 测量横向气流中侧喷挡板喷油杆形成的喷雾场, 获得其下游不同截面上液雾的粒度、均匀度和浓度分布. 研究油压、气流速度以及喷油杆几何结构对喷雾特性的影响. 以求对该型喷油杆的初始雾化过程和喷

收稿日期: 2008-05-26; 修订日期: 2009-03-02

作者简介: 柳杨(1981-), 男, 安徽淮南人, 博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究

雾场有较全面的了解.

1 侧喷挡板喷油杆的工作方式

如图 1(a) 所示,目前直射式喷油杆的喷射方式有侧喷、逆喷、顺喷和斜喷 4 种方式,其中侧喷方式使用最为广泛. 挡板式喷油杆中已有的是逆喷雾化槽式喷油杆(图 1(b) 左). 图 1(b) 右图是本文所研究的侧喷挡板雾化喷油杆:由喷油杆及与其平行的平挡板组成,燃油喷孔与挡板内表面垂直,喷孔与挡板内表面有一定的距离. 使用时,燃油喷射方向与气流方向垂直,燃油从喷孔喷出,与挡板发生撞击后被横向气流吹向下游.

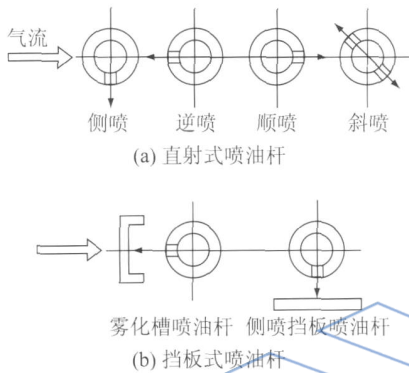


图 1 直射式喷油杆喷射方式和挡板式喷油杆
Fig. 1 Inject mode of direct injector and baffle-type injector

2 实验装置与测量方法

2.1 喷油杆实验件结构

图 2 为挡板雾化喷油杆结构示意图.

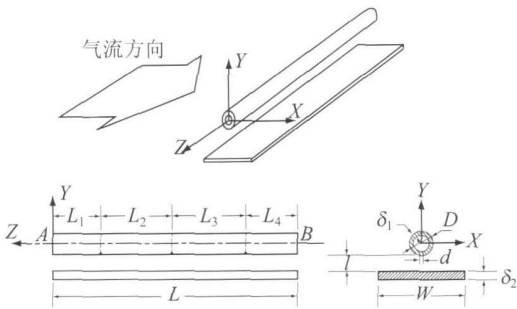


图 2 挡板雾化喷油杆结构示意图
Fig. 2 Schematics of baffle-type injector structure

图 2 中:
 L - 喷油杆、挡板长度;
 l - 喷油孔距挡板的垂直距离;
 W - 挡板宽度;

D - 喷油杆外径;
 d - 喷油孔孔径;
 δ_1 - 喷油杆壁厚;
 δ_2 - 挡板厚.

实验中所选用的喷油杆的结构参数如下:

$L = 140\text{ mm}$; $W = 22, 12\text{ mm}$; $l = 3.75, 5.75, 7.75\text{ mm}$; $D = 6\text{ mm}$; $d = 0.6\text{ mm}$; $\delta_1 = 1\text{ mm}$; $\delta_2 = 2\text{ mm}$;
喷油杆 A 端进油, B 端封闭, 沿轴向分布 3 个喷油孔, $L_1 = L_4 = 20\text{ mm}$, $L_2 = L_3 = 50\text{ mm}$.

2.2 实验系统

雾化实验系统由供气系统、供油系统和测试系统组成.

如图 3 所示,侧喷挡板雾化喷油杆水平安装在测试实验段中,喷油方向垂直向下以保证与气流垂直,测试实验段为两侧开窗的矩形通道(横截面为 $200\text{ mm} \times 300\text{ mm}$),窗口两侧分别放置 Malvern 激光粒度仪的激光发生器部件和激光接收器部件,并可通过位移机构在 X 和 Y 方向移动. 前方供气装置可提供马赫数从 $0 \sim 0.3$ 的整流后冷态空气来流. 供油装置可以向喷油杆提供 $0 \sim 30\text{ MPa}$ 的油压(本实验用水代替). 激光粒度仪的检测数据由计算机自动采集,通过数据分析软件进行图形显示并实时记录数据.

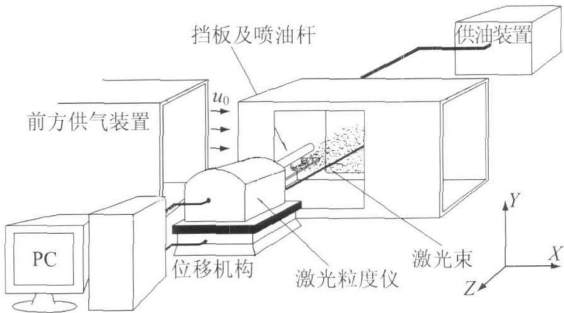


图 3 喷雾特性测量实验系统图
Fig. 3 System of atomization test device

在实验中,每当确定一组工况参数和结构参数时,将会通过位移机构使 Malvern 激光粒度仪在平面 XY 上移动,采集点与喷油杆的位置关系如图 4 所示.

图 4 中, XY 轴的原点设在喷油杆轴向垂直截面圆的圆心上. 采集点在 Y 方向等间距 (4 mm) 地分布在 4 个下游采集截面上,截面的 X 坐标分别为 $32, 42, 62, 82\text{ mm}$. 实验中粒度仪扫描各采集点,计算机自动采集数据.

实验中使用的 Malvern 该激光粒度仪测量粒

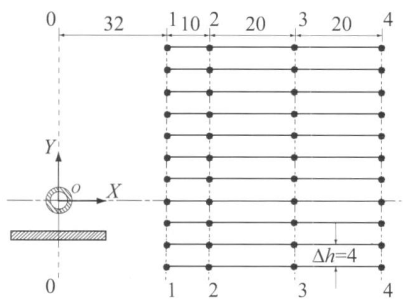


图 4 激光粒度仪采集点分布示意图

Fig. 4 Positions of measured points of laser particle analyzer

子直径的范围为 $4.6 \sim 323 \mu\text{m}$, 测量误差小于 3%。激光粒度仪在各采集点测量出 $\phi 8 \text{ mm}$ 激光束所穿过雾区粒子的粒径 $R-R$ 分布、平均直径 SMD 和均匀度指数 N 。本文采用 Malvern 激光粒度仪测量参数中的“样品浓度(激光束的遮光率)”来近似反映激光束所穿过雾场的液雾浓度的变化规律。

实验中水压 p_t 的选择: $0.2, 0.8, 1.3 \text{ MPa}$; 气流马赫数 Ma 的选择: $0.1, 0.16, 0.28$ 。

3 实验结果及分析

3.1 初始雾化过程分析

图 5(a) 是侧喷挡板实验件雾化照片(单孔, $Ma=0.16$, $p_t=1.3 \text{ MPa}$), (b) 图为雾化过程的示意图, (b) 图中的被编号的黑实线代表液雾或射流。侧喷挡板的初始雾化主要由以下几个过程组成: 首先是液体从喷孔喷出与挡板发生碰撞前的雾化过程。该过程包括液体的压力雾化和气流的剪切雾化。在这个过程中, 粒径较小的液体颗粒(线 1) 将会在气流的气动力的作用下, 直接进入后方雾场而不与挡板发生碰撞。然后是多数液体(线 2) 与挡板发生碰撞的过程, 在这个过程中发生碰撞破碎雾化, 形成液雾进入下游(线 4)。碰撞后, 一部分液体(线 3) 反弹并在气动力作用下进入后方雾场, 另一部分液体在挡板上形成液膜。液膜沿挡板内表面移动, 大部分在惯性的作用下直接脱离挡板的内边缘进入后方雾场(线 5), 少部分在挡板的内边缘实现翻越, 到达挡板外边缘时与主气流相遇, 高速气流对液膜进行剪切雾化(线 6)。概括来说, 侧喷挡板的初始雾化主要包括液体压力雾化、碰撞破碎雾化和气体的剪切雾化三种雾化方式。

3.2 固定气液条件下的雾场结构

为分析该喷油杆的雾化场结构, 实验选定水

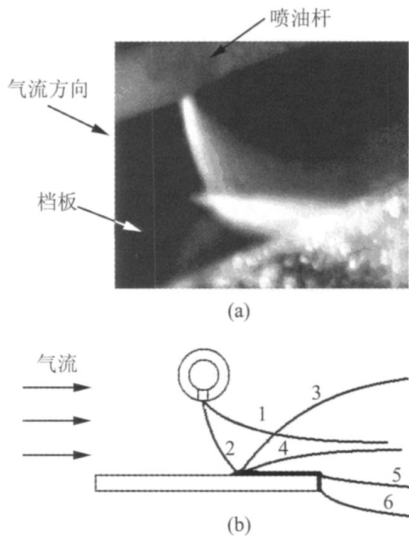


图 5 侧喷挡板喷油杆雾化过程

Fig. 5 Atomization process of baffle-type injector

压 p_t 为 0.8 MPa , 气流马赫数 Ma 为 0.16 , 分别在 X 向距离为 $32, 42, 62, 82 \text{ mm}$ 的截面上, 沿 Y 向进行测量。

3.2.1 不同粒径液滴的空间分布

图 6 是 $X=32 \text{ mm}$ 和 $X=82 \text{ mm}$ 两个下游截面上不同粒径液滴的累积体积百分比沿 Y 轴的分布。从图 6(a) 可以看出在 $X=32 \text{ mm}$ 处, 不同粒径液滴的累积体积百分比变化范围较大。粒径为 $20 \sim 80 \mu\text{m}$ 的液滴累积体积百分比在 $Y=-4 \text{ mm}$ 附近形成了一个波峰, 该区域位于喷油杆喷孔与挡板之间。粒径为 $80 \sim 120 \mu\text{m}$ 的液滴累积体积百分比在 $Y=-4 \text{ mm}$ 出现波谷。挡板下方 ($-16 \text{ mm} < Y < -8 \text{ mm}$), 粒径为 $80 \sim 120 \mu\text{m}$ 的大液滴占有较大的比例, 其次是粒径为 $40 \sim 80 \mu\text{m}$ 的液滴, $0 \sim 40 \mu\text{m}$ 小粒径液滴的累积体积百分比小。在喷油杆喷孔与挡板之间 ($-8 \text{ mm} < Y < 0 \text{ mm}$), 主要是粒径为 $0 \sim 80 \mu\text{m}$ 的液滴, 而 $80 \sim 120 \mu\text{m}$ 大液滴占有较小的比例。当 $0 \text{ mm} < Y < 24 \text{ mm}$ 时(喷油杆上方), 小液滴累积体积百分比迅速下降, 粒径为 $40 \sim 120 \mu\text{m}$ 的液滴则占有较大的比例, 而且随着 Y 的增加而增加。可见在压力雾化、碰撞破碎雾化和气动剪切雾化的共同作用下, 挡板与喷油杆之间产生大量的小粒径液滴, 粒径较大的液滴在挡板下方和喷油杆的上方所占的比例较大。

由于液滴的扩散和气流的进一步剪切, 在 $X=82 \text{ mm}$ 处的截面上(见图 6(b)), 不同粒径液滴累积体积百分比的变化较为平缓。小液滴在喷油杆喷孔与挡板之间出现的波峰不再明显, 而使得其

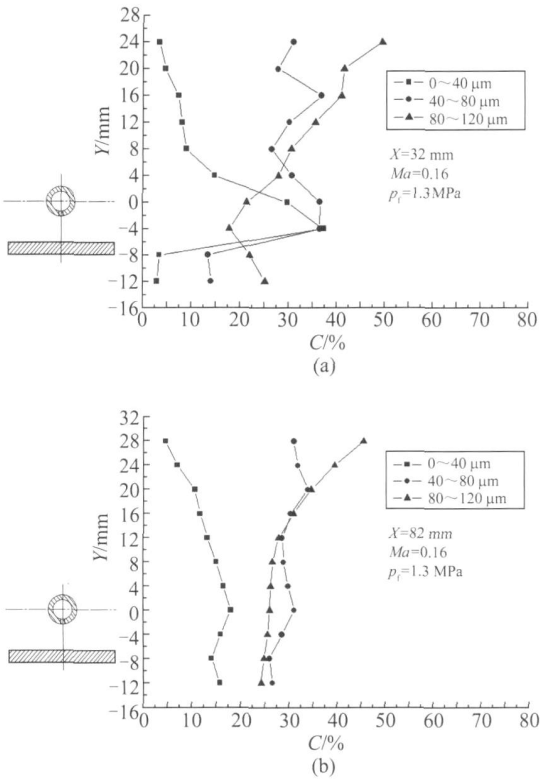


图 6 不同粒径液滴的累积体积百分比沿 Y 轴的分布
Fig. 6 Distribution of accumulative percent by volume for different size drops in Y direction

在 Y 轴其他区域的累积体积百分比有所增加。

3. 2. 2 液雾 SMD 分布

从图 7 可以看出,各下游截面 SMD 沿 Y 正方向先减小,在 $-4\text{ mm} < Y < 0\text{ mm}$ 达到最小值,然后缓慢增大.出现这种情况,是因为在 $Y = -8\text{ mm}$ 附近(挡板下沿区域)液体与挡板发生碰撞后形成的液膜在脱离挡板内侧边缘时会有较大的顺流速度,削弱了气流的剪切雾化,会形成较大粒径的液珠;然而在压力雾化、碰撞破碎雾化和气动剪切雾化的共同作用下, $-4\text{ mm} < Y < 0\text{ mm}$ (挡板与

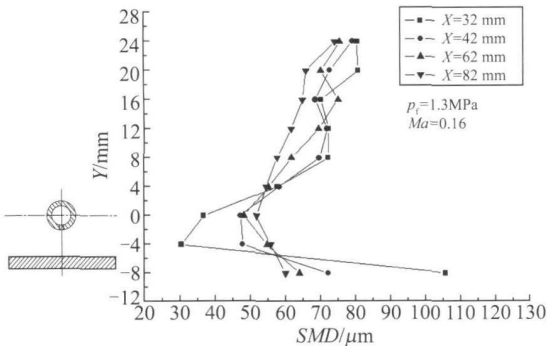


图 7 SMD 沿 Y 轴的分布

Fig. 7 SMD distribution in Y direction

喷油杆之间)出现 SMD 的最小值;随后在喷油杆上方 SMD 的缓慢增大,是因为液体在与挡板碰撞反弹后,大粒子具有较大的惯性和穿透深度,沿 Y 方向大粒子数量增加。

对于直射式喷油杆的侧雾化,由于气流的剪切作用和液滴的蒸发,距离喷油杆越远的下游截面,其液雾的 SMD 越小^[3].而本实验中,在 $-4\text{ mm} < Y < 0\text{ mm}$ 区域,液雾的 SMD 随着 X 方向增大.初步分析认为,该区域的初始雾化过程产生大量小粒径的液雾.在图 6(a)中可以看出, $X = 32\text{ mm}$ 的截面上 $0 \sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 小粒径液滴在 $-4\text{ mm} < Y < 0\text{ mm}$ 区域有着较大的体积累积百分比,而在该区域外体积累积百分比迅速减小.由于小粒径的液雾在气流中有着更大的扩散角,使得随着 X 的增加,该区域小粒径液雾所占的比例减小,见图 6(b).这就使得 SMD 沿着 X 方向增大。

3. 2. 3 液雾均匀度分布

从图 8 可以看出,当 X 较小时,液雾的均匀度指数 N 沿 Y 轴的变化比较明显,并在 $-4\text{ mm} < Y < 0\text{ mm}$ 区域出现最小值,然后又迅速增加.随着 X 的增大, N 沿 Y 轴的变化趋于平缓,总体沿着 Y 轴正方向增加.结合图 6 可以看出,当 X 较小时,在 $Y = -4\text{ mm}$ 附近小粒径的液滴所占比例突然增大(见图 6(a)),从而打破了该区域液雾粒径分布均匀性,导致 N 出现最低值.随着 Y 的增大,小粒径的液滴的迅速减少会使液雾的均匀度增加.由于扩散作用和空气的继续剪切,随着 X 的增加,小粒径液滴数量沿 Y 轴的变化趋于平缓(见图 6(b)),使得 N 沿 Y 轴的变化趋于平缓.可见,侧喷挡板喷油杆所形成的液雾中小粒径液滴数量在空间的变化较大,所以小粒径液滴对液雾的均匀度空间分布有着很大的影响,当某区域小粒径液滴数量增大,则会使该区域的均匀度降低。

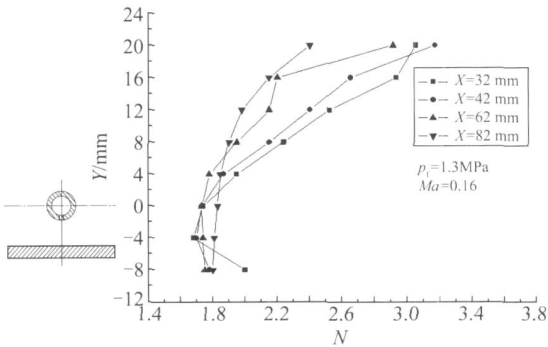


图 8 均匀度指数 N 沿 Y 轴的分布

Fig. 8 Evenness index N distribution in Y direction

同样,图中可以看到,当 $Y > 4 \text{ mm}$ 时,随着 X 的增大,液雾的均匀度降低.这是由于,随着 X 增大,扩散到该区域的小粒径液滴越多,从而降低了该区域液雾的均匀度.

3.2.4 液雾浓度分布

用激光束的遮光率 K 来近似反映激光束穿过雾区的液雾浓度.从图 9 可以看出,液雾各截面上的浓度分布都存在一个波峰,在 $Y = -4 \text{ mm} \sim 0 \text{ mm}$ (挡板与喷孔之间) 达到最大值,说明挡板与喷孔之间的压力雾化、气流剪切雾化和碰撞破碎雾化中存在侧喷挡板雾化的主要雾化方式.而气流对液膜进行剪切雾化只占很小的比重.

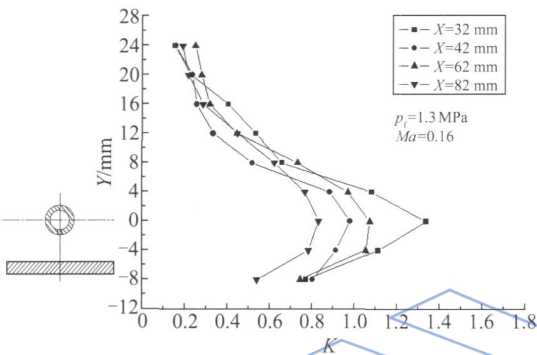


图 9 浓度沿 Y 轴的分布

Fig. 9 Concentration distribution in Y direction

以上对 SMD , N 和浓度的分析可以看出,侧喷挡板雾化在挡板与喷孔之间的范围内可以同时达到 SMD 最小和浓度的最大.这说明在多种雾化方式的共同作用下,该区域有着较高的雾化质量,并且是浓度的中心.但是,该区域液雾的均匀度较低.

3.3 水压对 SMD 的影响

图 10(a) 是不同水压下 SMD 随 Y 轴变化的曲线.总的来说随着液体喷射压力的升高, SMD 是下降的.这说明,液体压力的提高,液体的喷射速度加快,一方面,射流与气流的相对速度变大;另一方面射流自身的扰动也加剧,更为重要的是射流撞击挡板的动量增大,因而导致 SMD 下降.同时可以看出,随着水压的减小, $-4 \text{ mm} < Y < 0 \text{ mm}$ 区域(挡板与喷孔之间)有着较高雾化质量的优势也变得不明显.这是因为水压的降低削弱了射流与挡板的碰撞破碎雾化.图 10(b) 是不同来流马赫数下雾场中 $X = 32 \text{ mm}$, $Y = 0 \text{ mm}$ 位置上液雾 SMD 随水压的变化规律.可以看出,在该位置,来流马赫数的增大可以减弱水压对 SMD 的影响.

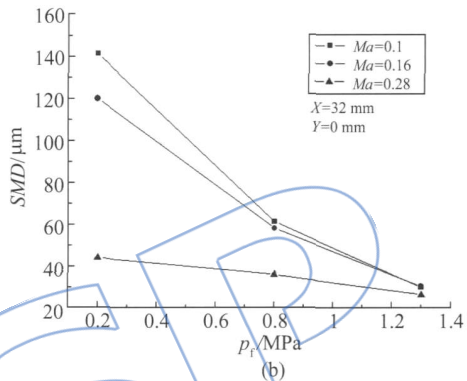
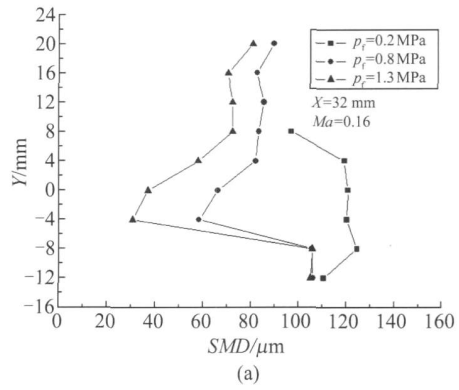


图 10 水压 p_t 对 SMD 的影响

Fig. 10 Effect of p_t on SMD

3.4 气流速度对 SMD 的影响

图 11(a) 是不同气流马赫数下 SMD 随 Y 轴变化的曲线.从图中可以看出在 $Y < -4 \text{ mm}$ (挡板下方) 的区域,气流速度对雾化质量的影响较为明显,马赫数越大, SMD 越小.这是因为该区域的液雾主要是空气的剪切雾化形成的.在 $Y > -4 \text{ mm}$ (挡板上方) 的区域,气流速度对雾化质量的影响不大,这是因为该区域内液雾主要是液体刚喷出时的压力雾化和液体撞击挡板时碰撞破碎雾化形成的.在一定的水压保证下,该区域的雾化质量对气流的速度不敏感.图 11(b) 不同水压下雾场中 $X = 32 \text{ mm}$, $Y = 0 \text{ mm}$ 位置上 SMD 随气流马赫数的变化规律.可以看出当水压增大时,气流速度对液雾 SMD 的影响在减弱.这也说明,气流的剪切雾化并不是该型喷油杆的主要雾化方式.

3.5 结构参数对 SMD 的影响

图 12(a) 是不同挡板宽度下 ($W = 12, 22 \text{ mm}$),在 $X = 32 \text{ mm}$ 截面上液雾的 SMD 分布.从图中可以看到,两种不同的挡板宽度下 SMD 沿 Y 轴的变化规律基本相同,但是窄挡板总体上有着较小的 SMD .

图 12(b) 是 SMD 随 l (喷口与挡板距离) 的变

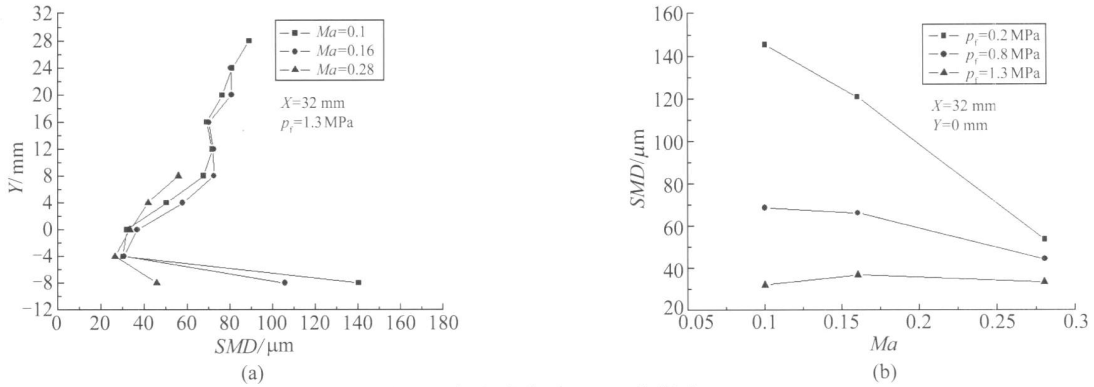


图 11 气流速度对 SMD 的影响
Fig. 11 Effect of air velocity on SMD

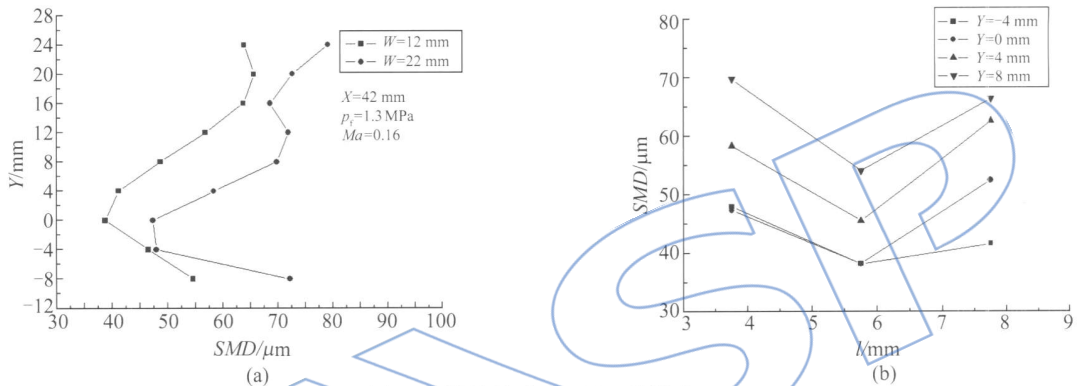


图 12 结构尺寸对 SMD 的影响
Fig. 12 Effect of structure sizes on SMD

化规律,可以看出 SMD 随 l 的增加先减小后增大,在 $l=5.75\text{ mm}$ 附近达到最小值.这表明在挡板宽度一定的情况下,喷口与挡板距离存在一个最佳值,能达到最好的雾化效果.这是因为当 l 较小时,从喷孔喷出的射流还没有完成最初级的压力雾化就与挡板发生碰撞,减弱了初始的压力雾化作用,而且喷油杆与挡板间的气流速度会减小,气流剪切雾化作用减小,从而影响了雾化效果.当 l 过大时,射流在撞击挡板前受到气流的作用时间较长,因此有较大的动量损失,并且使射流撞击挡板时的入射角增大,这将会影响碰撞破碎雾化的雾化效果.所以,喷孔与挡板距离存在一个最佳值,能够使得射流的初始压力雾化和与挡板的碰撞破碎雾化达到最佳的结合,以达到最好的总体雾化质量.

4 结 论

- 1) 得到该型喷油杆下游不同截面上的雾化粒度、均匀度和浓度的数值及变化规律.
- 2) 该型喷油杆的液雾由多种雾化方式形成,液体的初始压力雾化和碰撞破碎雾化为主要的雾化方式.

3) 在本实验工况下,液体压力和气流速度对液雾的 SMD 有一定影响,其中气流速度的影响较小.

4) 在两种不同挡板宽度的对比实验中,较窄的挡板有着较小的液雾 SMD,对于固定的挡板宽度,喷口与挡板距离存在一个最佳值,使得液雾的 SMD 最小.该结果需要进行进一步研究.

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会.《航空发动机设计手册》第 11 册:加力燃烧室[M].北京:航空工业出版社,2001.
- [2] 王俭,顾善建,杨茂林,等.直射式喷嘴跨流喷射的雾化特性实验研究[J].航空学报,1990,11(4):157-164.
WANG Jian, GU Shanjian, YANG Maolin. Study on atomization features of a plain injector in high speed transverse air stream[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990,11(4):157-164. (in Chinese)
- [3] 徐行,郭志辉,边寿华.直射式喷嘴喷雾特性的实验研究[J].航空动力学报,1997,12(4):341-344.
XU Hang, GUO Zhihui, BIAN Shouhua. Experiment on spray characteristics of direct injector[J]. Journal of Aerospace Power, 1997,12(4):341-344. (in Chinese)
- [4] 张岩,朱俊勇,侯木玉,等.横向气流中直射式喷嘴雾化

实验研究 [R]. 北京:北京航空学院科学研究报告,1986.

[5] 侯晓春,季鹤鸣,刘庆国,等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

[6] Ernst R C. A combustion model for low frequency instability in turbofan augmentors [R]. AIAA Paper 762680.

[7] 马文杰, 杨阳, 柳杨,等. 尾缘吹气稳定器与前方溅板式喷油匹配试验 [J]. 航空动力学报, 2007, 22 (12) : 1977-1983.

MA Wenjie , YANG Yang , LIU Yang , et al. Experimental study of fuel match on EBMC flame holder and frontal atomizing platelet injectors [J].Journal of Aerospace Power ,2007 ,22(12) :1977-1983. (in Chinese)

