

文章编号: 1000-8055 (2005) 02-0202-06

侧向互击型层板喷注单元的喷雾特性

郭志辉, 曹永, 黄勇

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力国防科技重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对侧向互击型层板喷注单元的喷雾特性进行了试验研究。利用PDA测量了喷雾场下游典型截面上各点的液滴速度、直径、体积通量等参数。分析了喷注单元的雾化过程和喷雾特点, 同时研究了混合比和喷注单元的结构参数流道截面积比、喷口宽度的影响。实验结果表明, 混合比的提高有利于雾化和喷雾分布; 喷注器的结构参数对雾化质量、液雾的空间分布特性具有重要影响。在喷口槽宽合适时, 存在最佳的流道截面比, 有利于改善雾化。对于一定的流道截面比和混合比, 存在最佳的喷口尺寸使雾化质量和喷雾分布最优。结果表明, 对于侧向互击型层板喷注器, 通过合理的选结构参数, 能够控制推进剂的雾化、空间分布和混合, 实现所需要的喷雾分布。

关键词: 航空、航天推进系统; 层板喷注器; 互击; 雾化; 喷雾特性

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Spray Characteristics of Side unlike Impinging Platelet Injector

GUO Zhi-hui, CAO Yong, HUANG Yong

(National Key Laboratory of Aircraft Engine,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An experimental study of the spray characteristics of side unlike impinging platelet injector was conducted using a Particle Dynamics Analyzer (PDA). The droplet velocities, diameter and flux density of the spray were measured at three axial locations. The atomization process and special spray feature have been analyzed. The results show that the atomization process is different from that of common impinging injector. The mixing ratio γ_m and geometric parameters have important effect on the atomization and spray distribution. For a certain γ_m and passage area ratio γ_a , there is an optimum nozzle geometry to attain good atomization and spray pattern. On the other hand, both higher γ_a and γ_m can improve atomization performance within an appropriate nozzle width. The atomization performance and spray pattern can be controlled by selecting appropriate and geometric parameters.

Key words: aerospace propulsion system; platelet injector; unlike impinging; atomization; spray pattern

层板式喷注器由于具有优良的雾化及混合性能, 相容性好, 有自冷却功能, 特别适用于液体火箭发动机, 已广泛应用于航天飞机轨道机动发动

机、低推力姿控发动机和燃气发生器^[1]。此类喷注器的结构灵活多样, 可根据不同的用途进行具体安排^[1~3]。国内也开展了对层板式喷注器的研究工

收稿日期: 2004-02-24; 修订日期: 2005-02-27

作者简介: 郭志辉 (1969-), 男, 黑龙江望奎人, 北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室副教授, 主要从事液雾燃

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作^[2, 3]。目前对典型的互击型喷注器的雾化机理、雾化特性研究得比较深入^[4, 5]，但有关层板喷嘴的设计和雾化特性研究的文献较少。本文所研究的侧向互击型层板喷注单元不同于传统的互击型喷注单元,通过调整结构参数和工作参数能够控制喷雾特性。实验结果,为此类喷注器的设计提供依据。

1 试验装置和试验方法

1. 1 喷注单元的结构特点

试验中采用的简单层板喷注单元为 90°互击型,均由3块厚度为 1.0 mm 的不锈钢薄板叠合在一起组成,每块板的相应位置上带有孔、槽,作为液体的入口、流道和喷嘴,基本结构见图 1。层板内部的燃料流道截面积为 $A_f=1.0\times1.0\text{ mm}^2$,氧化剂孔径 $d_0=1.13, 1.4, 1.8\text{ mm}$,相应情况下流道面积比 γ_a 为 1.0, 1.54, 2.54,槽形喷口的宽度 w 为 $1.0d_0, 1.5d_0, 2.0d_0$,长度 l 为 12 mm。

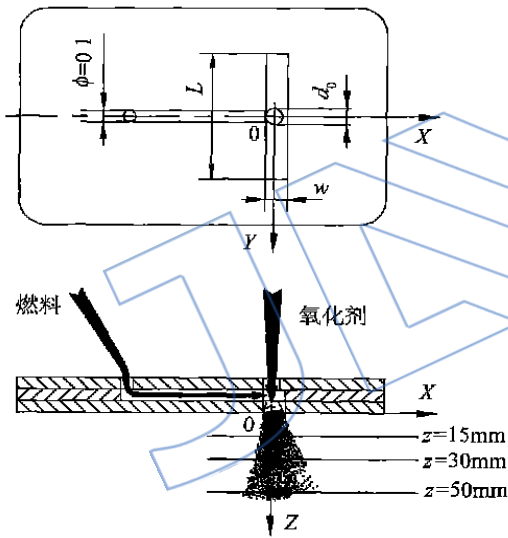


图 1 喷注单元结构及测试截面选取示意图
Fig. 1 Schematic of the injector and test coordinate

1. 2 实验装置和实验方法

喷雾实验台包括两路推进剂供给系统、测试系统和排雾系统^[6],燃料和氧化剂都用水模拟,由压缩空气挤压供给,流量由 LWGY-4 型涡轮流量计精确测量。液雾的测量采用二维激光粒子动态分析仪(即 2D-PDA),同时测量喷雾场中任一点液滴的二维速度、直径和浓度等参数。

试验中,燃料流量 q_{mf} 始终保持不变,混合比的变化通过改变氧化剂的流量 q_{mo} 实现。其中混和比

$\gamma_m=q_{mf}/q_{mo}$,实验中 $\gamma_m=1, 1.65, 2.2$ 。

测量截面选取喷注单元喷口下游 $z=15\text{ mm}, 30\text{ mm}, 50\text{ mm}$ 三个截面。由于喷雾场关于 XOZ 平面对称,试验中只测量了喷雾场的上半部分($Y\geq 0$), Y 向测点间距 5 mm, X 向测点间距 3 mm,每个截面测点 140~180 个,每个测点取 5 000 个有效粒子。测试选取的坐标见图 1。

同时,利用激光片光源对喷雾截面进行照射,拍下 XOZ 和 YOZ 两个方向喷雾场照片。

1. 3 数据处理

PDA 测量空间一点的液滴时,得到的粒径和速度是基于通过测量体的液滴的统计平均,并不是代表整个液雾的特性,而需要进行相应的处理。下文中对液雾的 SMD 进行了线平均,对应于每一个 Y 值上所有的测点,按各点的数量密度,进行加权平均,得出了线平均 SMD 值,以比较喷雾的整体特性。

计算方法为:

$$SMD_y = \frac{\sum_i d_{30xi}^3 \cdot con_{xi}}{\sum_i d_{20xi}^2 \cdot con_{xi}}$$

con_{xi} 为每条线上第 i 个测点处的液滴数量密度。

同样,为便于比较液雾的分布,对于每个 Y 值上所有测点的体积通量进行求和,即沿 Y 向的体积通量累积分布,计算方法为:

$$V.Flux_y = \sum_i v.flux_{xi}$$

2 试验结果和分析

2. 1 雾化过程分析

同传统的互击式喷注器一样,侧向互击型层板喷注器利用射流动能雾化,但喷口的结构尺寸对液雾的雾化、液雾的结构和空间分布具有重要作用。显然,这和传统的互击式喷注器的雾化过程不同^[5]。

图 2 是某典型工况下,喷雾的正面(YOZ 方向)、侧面(ZOX 方向)的图象,喷雾扇沿着槽型喷口方向形成,喷雾扇截面大致呈弧形,明显倾斜于层板流道内氧化剂侧,而且液雾在喷雾扇的中间和两侧较为集中,喷雾的分布受到喷口尺寸和混合比的影响。实验中发现,在相同结构尺寸条件下偏角一般随着氧化剂流量的增大而减小。实际设计喷注器时,从壁面的传热和相容性考虑,需要合理选择各喷注单元相对于燃烧室壁面的角度。

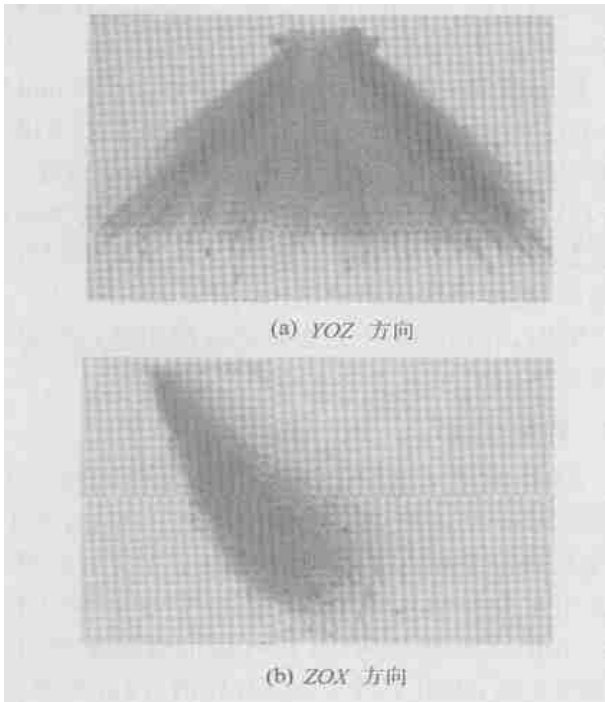


图2 某工况下喷雾的YOZ向和ZOX向照片
Fig. 2 Spray picture at YOZ and ZOX

2. 2 液雾的空间分布特性

图3~图5 为某典型实验状态下 ($Y_m=1.65$, $Y_m=1.54$, $w=2.1$ mm), 喷雾上半部分的液滴速度、体积通量、和SMD的等值线分布。

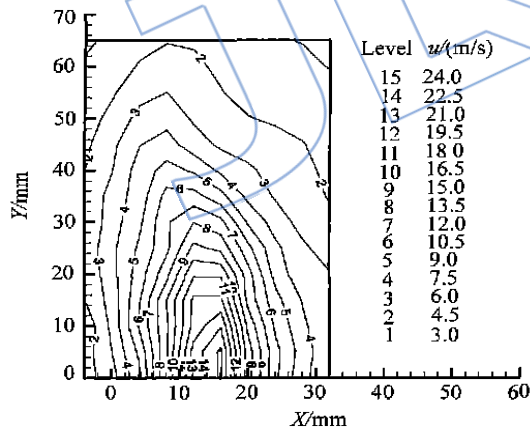


图3 液雾轴向速度分布
Fig. 3 Contour of droplets axial velocities

图3 表明该截面上液雾的轴向速度分布, 在喷雾场的中间区域液滴的轴向速度明显大于周边区域, 而且在X方向的速度变化大于Y方向, 表明两股射流相互作用强烈。而径向速度最大的区域对应于喷口端部的喷雾(图略)。图4 为液雾的体积通量等值线分布, 反映了液雾呈扇型分布的特点, 在喷雾场的大部分区域液雾的分布比较均匀, 在周边通

量值较小。图7 中对应的通量积分沿Y向的分布表明通量分布的特点, 通量积分值最大的部分两股射流撞击时被挤向喷口两侧的部分。

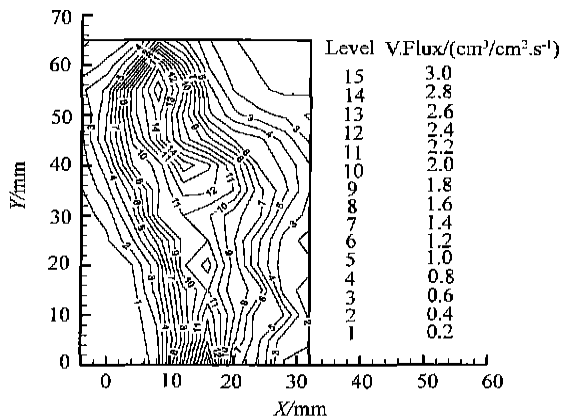


图4 液雾体积通量分布
Fig. 4 Contour of droplets volume flux

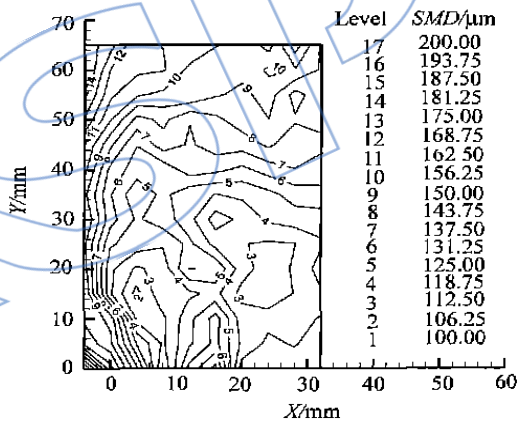


图5 SMD 空间分布
Fig. 5 Contour of droplets SMD

图5 给出了喷雾场的SMD分布图, 基本情况是: 大部分区域的SMD在120~180 μm之间, 可见比通常的互击喷注单元雾化效果好, 因为两股射流在喷口处直接撞击和喷口侧壁及锐边的作用使的射流的动能得到充分利用。在喷雾扇的周边液滴的直径较大, 尤其是氧化剂侧; 在X方向, SMD减小, 在Y方向上SMD增加。

图6 是3个截面上Y方向SMD_y分布, 在喷口附近SMD_y分布很不均匀, 随着喷雾场的发展, SMD_y在Y方向上趋向平缓, 这是液滴扩散运动的结果。

图7 可以看出, 液雾通量在流动方向上发展的变化规律, 在Y方向上液雾通量的分布趋向均匀, 这与液雾的运动相关。

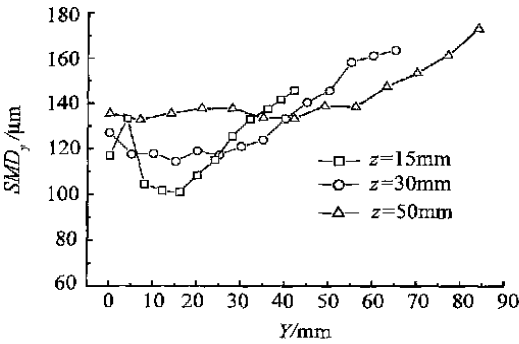


图6 线平均 SMD_y 分布

Fig. 6 The distribution of SMD_y

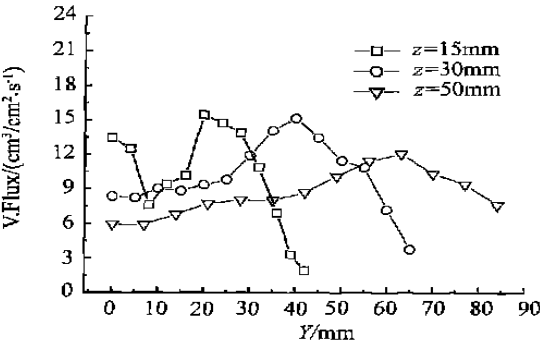


图7 3个截面上通量积分的分布

Fig. 7 The distribution of cumulation v. flux

2. 3 混合比对喷雾特性的影响

为研究混合比对喷雾特性的影响,实验中研究了3个典型混合比即 $\gamma_m=1.0, 1.65, 2.2$ 时的喷雾特性,即燃路流量保持不变,增加氧化剂路的流量。实验中发现,随着混合比的增加,喷雾扇在 z 方向的倾斜角减小,这是由于氧化剂射流速度增大,使喷雾的轴向速度增大。而在 Y 方向的展角略有增大,则是由于流向喷口两端的流量增加所致。

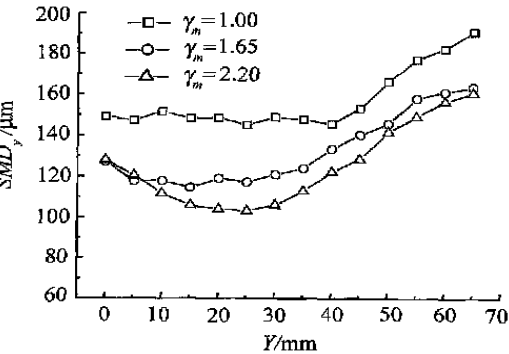


图8 混和比对 SMD_y 的影响

Fig. 8 The effect of mixing ratio on SMD_y

图8是混合比对 Y 向 SMD_y 的影响情况, γ_m 的

增大有利于改善雾化,这是因为随着氧化剂流量的增大,两股液流撞击的动能增加,有利于液体破碎成液滴,而且喷出后的液滴速度也增加了,也有利于二次雾化。

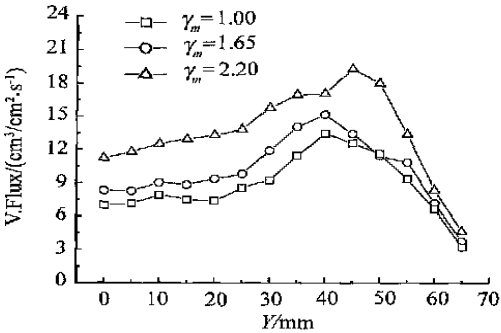


图9 混合比对 Y 向通量分布的影响

Fig. 9 The effect of γ_m on cumulation v. flux

图9是混合比对液雾体积通量的影响,显然,增加,对应于每一个 Y 值的所有的测点的累积通量都有所增加,在喷口附近特别明显;同时,通量分布的均匀性相对增加。

2. 4 结构参数的影响

2. 4. 1 流道截面比的影响

流道截面比 γ_a 用来调节燃料和氧化剂的混合比和喷注动量比,决定两股射流相互作用的程度,控制推进剂雾化和混合,是喷注器设计的一个重要几何参数。下面分两种情况分析 γ_a 的影响。

(1) 混合比 γ_m 一定,槽宽 w 一定时, γ_a 的影响。

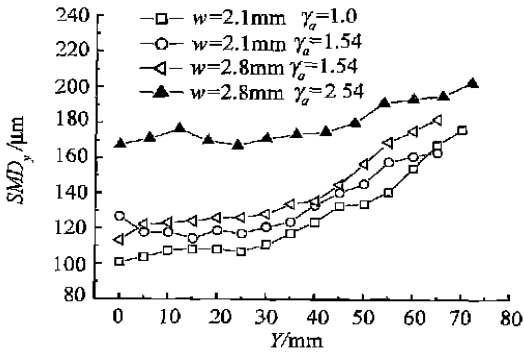


图10 流道截面比对 SMD_y 的影响

Fig. 10 The effect of γ_a on SMD_y

在混合比一定时,流道截面比 γ_a 用来调节喷注动量比。从图10可看出,在混合比一定,槽宽相同的情况下,较小的 γ_a 的喷注单元雾化性能较好,这是由于参与撞击的推进剂增多且速度大(动能大),使推进剂的动能得到充分利用。同时可以推

断较小的流道截面比 γ_a 对组元的混合是有利的。喷嘴槽宽相同时,流道截面比 γ_a 对通量分布的影响不大,但过小的 γ_a 不利于喷雾的散开。

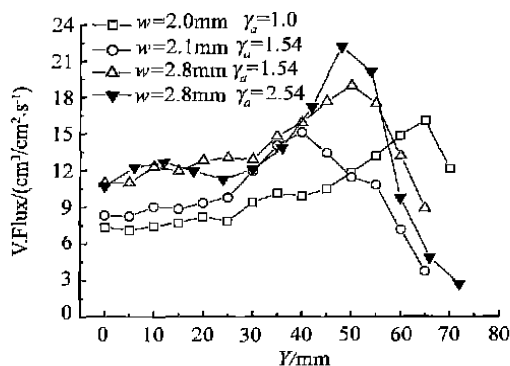


图 11 流道截面对 Y 向通量分布的影响

Fig. 11 The effect of γ_a on cumulation v. flux

(2) 混合比 γ_m 一定,槽宽比 w/d_0 一定时, γ_a 的影响。

图 12 是在 γ_m 一定,槽宽比 $w/d_0=1.5$ 一定时, SMD_y 的比较。图 12 表明,在 $w/d_0=1.5$ 条件下,随着 γ_a 的增大,雾化质量变差; $\gamma_a=2.54$ 与 $\gamma_a=1.0, 1.54$ 的情况相比, SMD_y 值明显增大,这是因为此时所需要的氧化剂的压力减小,致使相应情况下喷注动量比减小,3个工况下喷注动量比1:0.65:0.39。

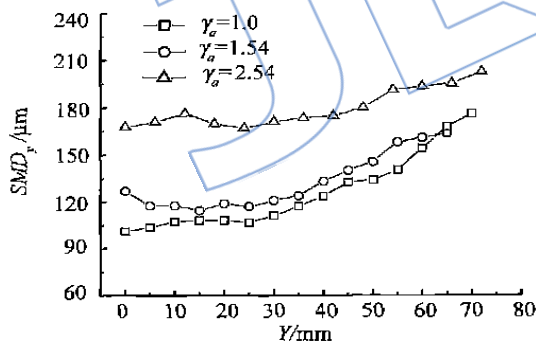


图 12 流道截面对 SMD_y 的影响

Fig. 12 The effect of γ_a on SMD_y

考虑,不希望出现这种情况。从液雾通量的分布看,较大的 γ_a 可获得较均匀的分布。因此, γ_a 的选取需要综合考虑。从雾化和混合的角度看,选取较小的有利于雾化和混合;从推力室系统工作参数看,选择过小的 γ_a 并非有利。对于本文的实验结果, γ_a 取1.54可获得较好的喷雾性能,这一点与传统的互击喷注单元最佳孔径比取1.22^[4]比较接近。

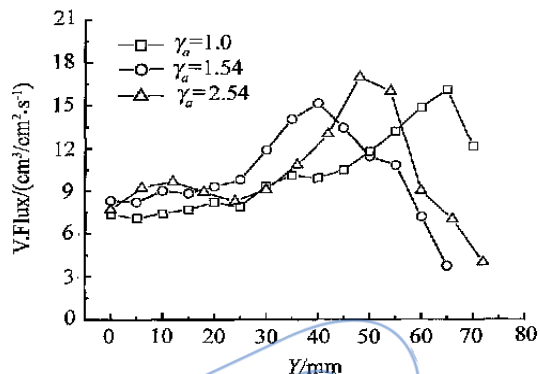


图 13 流道截面对通量分布的影响

Fig. 13 The effect of γ_a on cumulation v. flux

2. 4. 2 喷嘴槽宽的影响

喷注单元的喷嘴槽宽 w 是一个重要的参数,槽宽对雾化性能影响显著。图 14 为槽宽对 SMD_y 的影响,可见,当槽宽由1.4 mm增加到2.1 mm

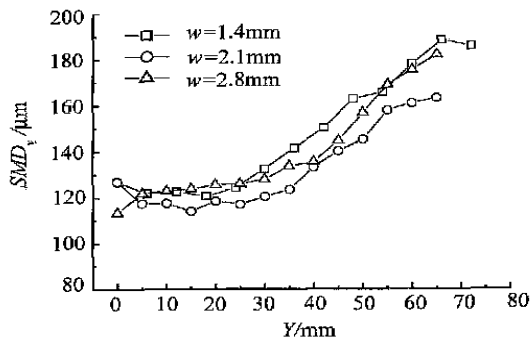


图 14 喷嘴槽宽对 SMD_y 的影响

Fig. 14 The effect of w on SMD_y

图 13 是相应情况下, γ_a 对通量分布的影响。可见,喷嘴槽宽相同时,流道截面比 γ_a 对通量分布的影响不大,但过小的 γ_a 不利于喷雾的散开。从通量分布看,较大的 γ_a 可获得较均匀的分布,这与喷嘴的槽宽有关。

从以上两种情况分析看,较小流道面积比有利于雾化,但当混和比提高时,需要较高的组元压降,这样会造成两组元较大的压差,从推力室系统设计

后,雾化有所改善,但槽宽变为2.8 mm后,雾化变差。这说明了喷嘴过小对雾化并非有利,较小槽宽有较强的限流作用,使较大一部分液体无法直接从喷嘴槽中间喷出,而是涌向槽两端,使这两股流集中且动量损失大,雾化变差;此外,当槽宽和氧化剂孔径相同时,两股液流撞击后直接受到槽壁的阻碍,不能有效利用燃料来流下游方向的槽边锐缘。但宽度也不能过大,这样做会使槽边锐缘对喷出液体的作用减弱甚至完全失去作用。从以上分析

看, 对于一定的流道截面比 γ_a 和混合比 γ_m , 存在一个最佳的喷嘴槽宽 w 。

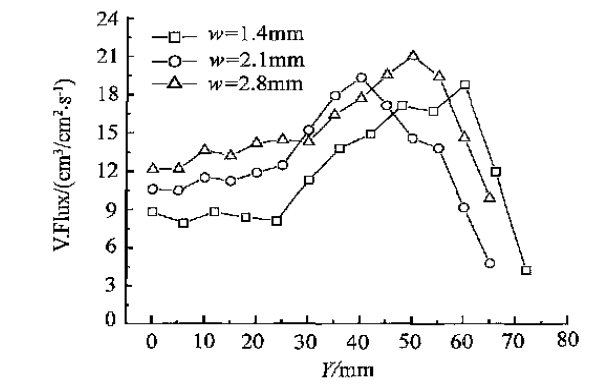


图 15 喷嘴槽宽对通量分布的影响

喷嘴槽宽对喷雾分布的影响显著, 如图 15 所示, 随着槽宽的增大, 喷雾在 X 方向喷雾的宽度明显增大, 而在 Y 方向的展角略有减小, 液雾通量在空间的分布更加均匀。

3 结 论

- (1) 与传统互击喷注单元相比, 侧向层板喷注单元的推进剂射流在喷口内撞击, 没有明显液膜形成, 形成的喷雾扇沿着槽型喷口方向形成, 喷雾扇截面大致呈弧形。沿流向发展, 液滴的 SMD 和通量分布趋向均匀。
- (2) 随着混合比的增加, 喷雾扇在 X 方向的倾斜角减小, 而在 Y 方向的展角略有增大。 γ_m 的增大有利于改善雾化, 通量分布的均匀性相对增加。
- (3) 喷口的结构尺寸对雾化、喷雾结构和空间分布具有重要作用。在喷嘴槽宽合适时, γ_a 的适当增大有利于雾化; 如果混合比一定, 较小的流

道截面比 γ_a 有利于雾化。对于一定的流道截面比 γ_a 和混合比 γ_m , 存在一个最佳的槽宽, 使雾化质量最优。

(4) 对于侧向互击层板喷注器, 通过合理的选结构参数, 能够控制推进剂的雾化、空间分布和混合, 实现所需要的喷雾分布。

参考文献:

[1] 石少平, 陆政林, 庄逢辰. 层板式喷注器在空间飞行器发动机中的应用综述 [J]. 中国空间科学技术, 1994, (1): 33~37.
Shi Shaoping, Lu Zhenlin, Zhuang Fengchen. On Summary of Application of Platelet Injectors to Engines for Spacecraft [J]. Chinese Space Science and Technology, 1994, (1): 33~37.

[2] 沈赤兵. 溅板式喷嘴雾化特性的试验研究 [J]. 中国空间科学技术, 1994, 15 (5): 10~16.
Shen Chibing. Experimental Investigation on Atomization Characteristics of Splash-Plate Platelets Injector [J]. Chinese Space Science and Technology, 1994, 15 (5): 10~16.

[3] 葛国华. 双组元微型变轨发动机 [J]. 推进技术, 1998, 19 (4): 7~10.
Ge Guohua. Bipropellant Miniature Divert Thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19 (4): 7~10.

[4] 张蒙正, 傅永贵, 张泽平, 等. 两股互击式喷嘴雾化研究及应用 [J]. 推进技术, 1999, 20 (4): 73~76.
Zhang Mengzheng, Fu Yonggu, Zhang Zeping, et al. Spray Property Reasearch and Application of Unlike Imoinging Injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20 (4): 73~76.

[5] Anerson W E, Rtan H M, Santoro R J, etc. Impinging Jet Injector Atomization. Liquid Rocket Engine Combustion Instability [A]. Progress in Astronautics and Aeronautics [C]. AIAA Inc., 1995, 169: 215~246.

[6] 曹永. 互击式层板喷注器的喷雾特性研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学学位论文, 2001.

[7] Vassallo P, Ashgriz N, Boorady F A. Effect of Flow Rate on the Spray Characteristics of Impinging Water Jets [J]. Journal of Prpulsion and Power, 1992, 8 (5): 821~829.