

文章编号: 1000-8055(2009)06-1402-05

溅板式层板喷注单元流量及混合特性的试验

雷凡培^{1,2}, 张振鹏¹, 姚明明³, 付莉莉³, 周 军³

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团公司, 北京 100037;

3. 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘 要: 使用 $16\text{cm} \times 16\text{cm}$ 的液流收集装置, 对一种典型三角形内腔的溅板式层板喷注单元两股射流的流量和撞击后混合特性进行了试验研究. 通过改变三角形结构尺寸, 研究了扩张角和相对厚度对流量系数和混合效率因子的影响. 结果表明: 随着扩张角增大, 流量系数和混合效率因子先增加后减小, 当扩张角在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 范围中, 两者都达到了最大值, 分别为 0.773 和 82.6%; 相对厚度对流量系数和混合效率因子也产生了较为明显的影响.

关 键 词: 溅板式层板喷注器; 流量系数; 混合特性; 试验研究

中图分类号: 文献标识码: A

Experimental investigation on flow rate and mixing characteristics of splash platelet injector element

LEI Fanpei^{1,2}, ZHANG Zhenpeng¹, YAO Mingming³,
FU Lili³, ZHOU Jun³

(1. School of Astronautics,

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

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100037, China;

3. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The flow rate and mixing characteristics of splash platelet injector element with a typical triangular lumen were experimentally investigated by using a collecting device with an area of $16\text{cm} \times 16\text{cm}$. The effect of main configuration parameters, such as expending angle and relative thickness, on flow coefficient and mixing efficiency factor were obtained. The results show that, flow coefficient and mixing efficiency factor increase firstly and then decrease with the increase of expending angle. Both of them could reach their maximum value of 0.773 and 82.6% when expending angle is at the range of 60° to 75° . It is also found that the relative thickness has great influence on the flow coefficient and mixing efficiency.

Key words: splash platelet injector; flow coefficient; mixing characteristics; experimental investigation

液体火箭发动机中喷注器性能的高低对发动机性能起着决定性作用. 采用双组元推进剂液体

收稿日期: 2009-04-07; 修订日期: 2009-05-04

作者简介: 雷凡培(1963-), 男, 陕西合阳人, 博士生, 主要从事液体火箭发动机层板喷注器研究.

火箭发动机比单组元液体火箭发动机具有响应快、比冲高、寿命长、稳态及脉冲性能稳定等优点. 然而, 对高性能小推力量级发动机, 更需要有良好的撞击、雾化、混合以及稳定的燃烧, 这些都与喷注器的流量特性和推进剂在燃烧室中的混合特性密切相关.

层板喷注器采用了光刻和扩散焊工艺, 与机械加工而成的喷注器相比, 喷注器内流道及喷孔的形状和布置明显不同^[1-3]. 迄今已有溅板式、T 型式、X 型式、V 型式和涡流式等, 每一种形式中又可以组成许多方案. 与传统喷注器相比, 层板喷注器的孔型不受限制, 流道易于安排, 有利于雾化、混合, 同时加工精度高, 雾化质量好, 喷注器集液腔容积小, 脉冲性能好^[4-7].

由于层板喷注器结构形式多样, 流道型面的变化对介质的流量特性以及射流撞击后的雾化、混合特性影响很大. 为此, 本文以溅板式结构作为研究对象, 采用专用的试验测量系统, 重点研究溅板式层板喷注器三角形内腔的结构尺寸对流量特性和雾化后的混合特性的影响.

1 溅板式层板喷注器

以单一喷注单元结构作为研究对象, 其结构由四部分组成: 入口板、中间板、1# 出口板和 2# 出口板. 4 种板片示意图如图 1 所示, 入口孔的孔形为圆形, 中间孔的孔形为三角形, 出口板的孔形均为梯形. 按照需要的流道将不同层数的板片叠加在一起, 通过定位孔和螺栓将它们连接, 这样就构成了溅板式层板喷注器试验件.

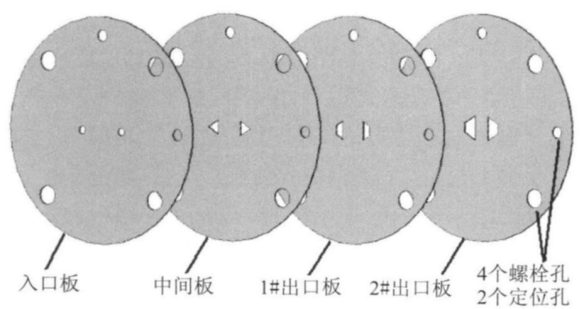


图 1 溅板式层板喷注单元结构示意图
Fig. 1 Structure of splash platelet injector element

图 2 为喷注单元单路剖面图. 图中 d_{in} 为入口直径; L_{in} 为进口板厚度; L_m 为中间板厚度; L_{o1} 为 1# 出口板厚度; L_{o2} 为 2# 出口板厚度; γ 为扩张角; E_{c1} 为出口间隙; E_{sp} 为溅板宽度; E_{o1} 为 1# 出口板出口宽度; E_{o2} 为 2# 出口板出口宽度; S_1 为

1# 出口板梯形上底边; S_2 为边长尺寸. 试验中入口板厚度 L_{in} 和两个出口板厚度 L_{o1} 、 L_{o2} 保持不变, 入口孔径 d_{in} 也保持不变. 试验中采用的收集坐标示意图如图 3. 试验中改变的结构参数有扩张角 γ 和相对厚度 L' , 其中 γ 分别为 45° 、 60° 、 75° 和 90° ; 中间板厚度 L_m 与入口板厚度之比 L' 分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0; 流量均为 4.0 g/s .

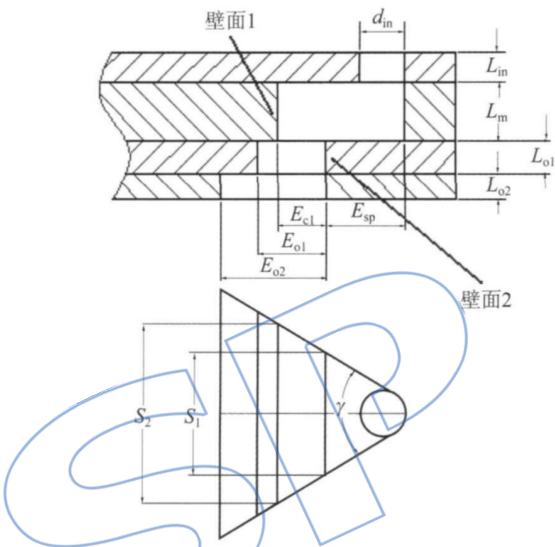


图 2 喷注单元单路剖面图
Fig. 2 Section of single channel injector element

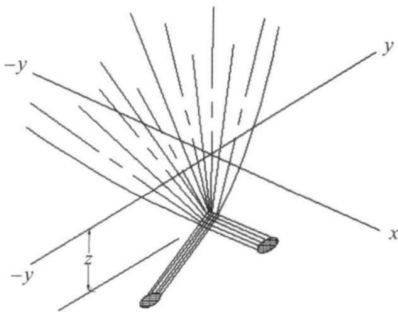


图 3 液流收集坐标示意图
Fig. 3 Coordinate of jet impinge

2 试验系统

流强、混合比试验系统由管路系统和收集台组成, 如图 4 所示. 收集台主要由收集面、试管架和支架三部分组成, 喷注器装夹在收集面的正上方, 处于中心位置, 收集面由 16×16 的单元格组成, 每个单元格为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的正方形, 单元格底下连有橡皮软管, 其出口正对着试管架里相应试管的入口. 雾化、混合后的液体流入收集面的单元格内, 经过橡皮软管流入试管架中相应的试管中, 通过测量试管中液体的流强及混合比, 就可得

到相应的流强及混合比分布. 试验中以水为介质, 其中模拟氧化剂路的水中增加染色剂, 通过光电比色仪获得混合比. 在试验件入口处安装测压点, 可得到喷注器在不同结构时的流量压降特性.

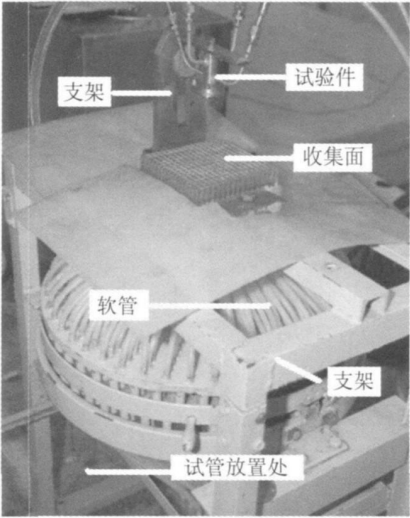


图 4 流强、混合比试验台

Fig. 4 Test bed of mass flux and mixture ratio

3 试验结果分析

溅板式层板喷注器不同于传统的喷注器, 其雾化过程起始于喷嘴内部, 且喷出时已发展成湍流状态的液扇, 喷注单元中两股射流的撞击实质上是两股射流经过层板流动通道后形成的两个相似液扇的撞击, 在冷试时, 就是两个相似液膜的撞击^[8].

常采用流量系数来表征流体经过试验件的流阻损失^[9]

$$C_d = \frac{4q_m}{\pi d_{in}^2 \sqrt{2\rho \Delta p}} \tag{1}$$

式中 C_d 为试验件流量系数; q_m 为试验件入口流量 (kg/s); d_{in} 为试验件入口孔直径 (m); ρ 为试验介质密度 (kg/m^3); Δp 为试验件压降 (MPa).

混合特性对于喷注器的重要性不亚于喷雾特性. 在工程实际中, 经常用混合效率因子 E_m 来评定混合情况, 并以此作为方案评定的标准或者确定候选喷注器的主要依据. E_m 计算方法如下^[10-11]:

$$E_m = 100\% \cdot \left[1 - K_A \left(\sum_{i=1}^n \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_t} \left(\frac{R - r_i}{R} \right) + \sum_{i=1}^{n'} \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_t} \left(\frac{R - \bar{r}_i}{R - 1} \right) \right) \right] \tag{2}$$

式中 K_A 为取样截面面积修正系数, 此处 K_A 取 1;

$\dot{m}_i/\dot{m}_t$ 为 i 取样管的质量分数, 等于当地喷雾流量与总喷雾流量之比; R 为总喷雾流量中的氧化剂质量分数; r_i 为对于 $r_i < R$ 的取样管中的氧化剂质量分数; $\bar{r}_i$ 为对于 $r_i > R$ 的取样管中的氧化剂质量分数; n 为 $r_i < R$ 的取样管数目; n' 为 $r_i > R$ 的取样管数目.

3.1 扩张角对流量系数和混合效率因子的影响

3.1.1 扩张角对流量系数的影响

图 5 给出了流量系数 C_d 随扩张角 γ 的变化情况, 并与文献[8]进行了对比. 其中, 相对出口间隙 $E'_d = \frac{E_{cl}}{R_{in}}$, R_{in} 为入口孔半径.

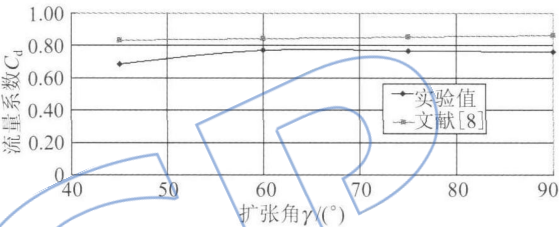


图 5 流量系数随扩张角的变化 ($E'_d = 2.5$)

Fig 5 Flow coefficient versus expanding angle

结合图 5 分析可知: 当扩张角从 45° 增加到 60° 时, C_d 变化较大, 由 0.688 增加到 0.773; 进一步增大 γ , 流量系数变化变缓. 这是因为 γ 较小时, 即三角形流道空间较小, 三角形边缘区流动分离没有足够的发展空间, 同拐角处的分离流动结合, 转向动能损失大; 随着 γ 的增大, 三角形边缘区流动分离有足够的发展空间, 转向动能损失较小, 因此, 流量系数随 γ 的增大而增大; 当大于 60° , 进一步增大 γ 又使得流体需要扩张的空间增大, 沿程损失增大, C_d 开始减小. 另外, 从试验结果发现, 试验件出口液膜流量均呈现两端偏多, 中间较少的特征, 且随着扩张角的增大, 液膜两端流量增大且连续性变差, 这对混合及撞击雾化是不利的.

3.1.2 扩张角对混合效率因子的影响

图 6 所示为 E_m 随扩张角 γ 的变化情况.

从图中可以看出, 当扩张角小于 75° 时, E_m 随角度增大而逐渐增大, 当扩张角大于 75° 后, E_m 随角度增大而减小. 这是因为在角度较小时, 出口液膜比较均匀, 液流在两边的集中程度不高, 液膜中部区域存在较大的流量, 撞击后能形成比较有规律的分布, 随着角度在一定范围内增加, 液膜中部区域的流量变少, 两边的集中程度增加, 但是撞击后仍能形成比较有规律的分布, 而且角度小意味

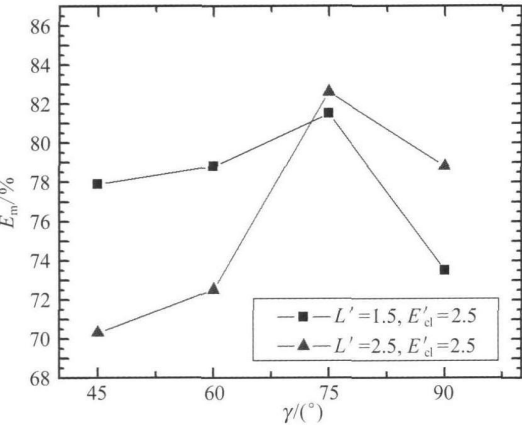


图 6 混合效率因子随扩张角的变化

Fig 6 Mixing efficiency factor versus expanding angle

着三角形通道小, 流动分离和涡流区占流场大部分, 流动损失比较大, 随着角度增加, 液流空间增大, 流动分离和涡流区所占比例降低, 流动损失相对较小, 出流速度相对较大, 有利于撞击雾化和混合, 所以在 $45^\circ \sim 75^\circ$ 之间, E_m 随着 γ 增大而增大, 最大可达 82.6%。当扩张角为 90° 时, 出口液膜的流量主要集中在液膜的两端, 液膜相撞相当于两股互相背离的圆柱射流的撞击, 虽然角度增大, 流动损失相对较小, 但不能弥补液膜撞击变成圆柱射流撞击后对混合所产生的不利影响, 混合效果变差。

研究发现: 当扩张角 γ 在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 范围内时, 流量系数 C_d 的值比较大, 在 0.7658 ~ 0.773 之间; 而且 E_m 的值也比较大, 两个试验件的最大值达到 81.5% 和 82.6%。

3.2 相对厚度对流量系数和混合效率因子的影响

3.2.1 相对厚度对流量系数的影响

图 7 给出了流量系数 C_d 随相对厚度 L' 的变化情况, 并与文献[8] 进行了对比。由图可见, 流量系数随着相对厚度的增加而增加, 当相对厚度大于 2.5 后, 流量系数增加幅度变小。这是由于溅

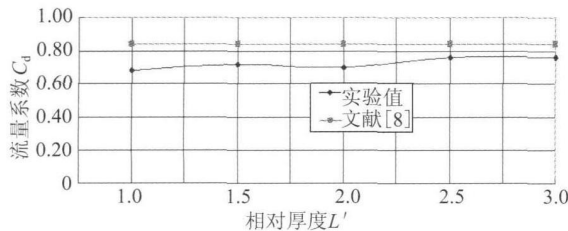


图 7 流量系数随相对厚度的变化 ($E'_{cl} = 2.5$)

Fig. 7 Flow coefficient versus relative thickness

板式层板喷注单元流道为阶梯状, 液体在三角形通道内流动时的局部损失较大. 因此相同流量条件下, 相对厚度越大, 流体有较大的溅射空间, 受到壁面影响越小, 压降越小, 即流阻随相对厚度增大而减小; 相对厚度较小时, 流体溅射腔容间小, 压力损失大, 所以流阻随着相对厚度增大而减小。

3.2.2 相对厚度对混合效率因子的影响

图 8 为 E_m 随 L' 的变化情况: 当相对出口间隙 $E'_{cl} = 1.5$ 时, 相对厚度增加, 则混合效率因子 E_m 增加, 当 $E'_{cl} > 1.5$ 后, E_m 随 L' 的变化规律不明显。这是因为 E'_{cl} 较小时, 壁面 1 和壁面 2 (参照图 2) 对液流的限流作用明显, 不利于液膜沿 y 向 (参考图 3) 扩散, 在同等条件下, 当 L' 增加时, 内流场三角形通道流通截面积增加, 液体的溅射空间增大, 流动分离和涡流区所占比例相对下降, 同时受到壁面的影响也减小, 流动损失相对降低, 液膜出流速度增加, 有利于撞击雾化和混合, 因此当 $E'_{cl} = 1.5$ 时 E_m 随着 L' 增加而逐渐增加。当 $E'_{cl} \geq 2.5$ 时, 壁面 1 和壁面 2 对液膜的限流作用减弱, 液膜沿 y 向的扩散能力逐渐增强, 同时由于 E'_{cl} 增加导致出口流通面积增加, 引起流速降低, 抵消了 L' 增加所带来的流速增加, 所以混合情况随着 L' 变化基本没有规律。

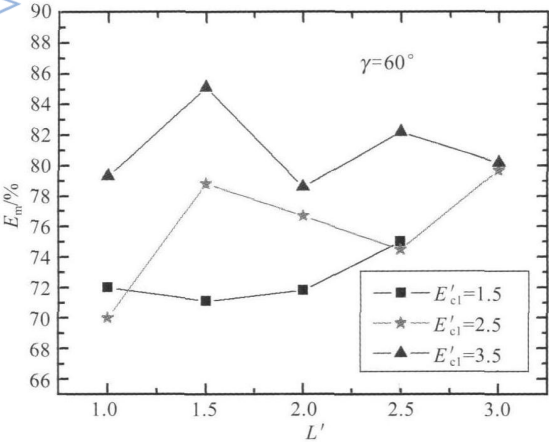


图 8 混合效率因子随相对厚度的变化

Fig 8 Mixing efficiency factor versus relative thickness

研究表明: 当 $E'_{cl} = 2.5$, 相对厚度 L' 在 1.5 ~ 3.0 范围内变动时, C_d 的值比较大, 最大值可达 0.773; 同时 E_m 的值也相对较大, 最大值可达 79.7%。

4 结 论

通过对溅板式层板喷注单元流量和混合特性

的试验研究,可以获得以下结论:

1) 溅板式层板喷注器雾化过程起始于喷嘴内部,且喷出时已发展成湍流状态的液扇,喷注器结构参数影响流量特性和液膜出口形状及撞击后流强分布和混合效果.

2) 扩张角影响三角形流道的空间大小,进而对流动损失产生影响,同时也影响出口处液膜的形状.随着扩张角增大,射流横截面上的液流倾向于在两端集中,在 90° 处形成了两个独立的圆柱射流,混合效果变差.当扩张角 γ 在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 范围内时,流量系数 C_d 的值比较大,在 $0.7658 \sim 0.773$ 之间;而且 E_m 的值也比较大,两个试验件的最大值达到 81.5% 和 82.6%.

3) 相对厚度通过影响流体在通道内的溅射空间,影响流动损失及混合效果.流量系数随着相对厚度增加而增加,当相对厚度大于 2.5 后,流量系数增加幅度变小.相对出口间隙较小时,相对厚度增大,混合效率因子增大.但是当相对出口间隙 $E'_d \geq 2.5$ 时,相对厚度对混合效率因子的影响没有规律.当 E'_d 为 2.5 时,相对厚度 L' 在 1.5~3.0 范围内变动时, C_d 比较大,最大值可达 0.773;同时 E_m 的值也相对较大,最大值可达 79.7%.

参考文献:

[1] Bassham L. B, Labotz R. J, Michel P. W. Space shuttle orbital maneuvering engine platelet injector program[R]. NASA CR-151442, N76-18231, 1976

[2] Kahl R. C, Labotz R. J, Bassham L. B. Platelet injectors for space shuttle orbit maneuvering engine[R]. AIAA 74-1108, 1974

[3] Mueggenburg H. Platelet injector design and development history[R]. AIAA/SAE/ASME/ASCE 27th Joint Propulsion Cong., 1991

[4] 周军. 层板喷注器研究总结报告[R]. 西安: 航天科技集团公司第十一研究所, 1993

[5] 周军. 层板喷注器的设计、工艺和试验研究[R]. 西安: 第二届联合推进会议, 1994

[6] 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 Zhenglin, ZHUANG Fengchen. On summary of application of platelet injectors to engines for spacecraft[J]. Chinese Space Science and Technology, 1994, (1): 33-37 (in Chinese)

[7] 周军. 溅板式层板喷注器喷雾特性研究[R]. 北京: 国家高技术航天航空技术领域第三届青年学术会议, 2002.

[8] 付莉莉. 溅板式层板喷注单元撞击雾化和流动特性研究[D]. 西安: 西安航天动力研究所, 2004.

FU Lili. Study on impinging spray and flow characteristics of splash platelet element[D]. Xi'an: Xi'an Aerospace Propulsion Institute, 2004 (in Chinese)

[9] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

[10] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.

[11] 哈杰 D. T, 里尔 F. H. 液体推进剂火箭发动机不稳定燃烧[M]. 朱宁昌, 张保炯, 译. 北京: 国防工业出版社, 1980.