

针栓式喷注器雾化特性试验

方昕昕, 沈赤兵, 成 鹏, 汪 磊

(国防科技大学 航天科学与工程学院 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 采用高速摄影和马尔文测粒系统对针栓式喷注器雾化特性进行研究,得到了索太尔平均直径(SMD)、粒径分布均匀度指数和雾化锥角随针栓式喷注器结构参数的变化趋势。结果表明:SMD沿喷注轴向均匀不变,沿径向增加;随着气液流量比的增大 SMD 减小,而粒径分布均匀度指数先降低而后有所回升;粒径分布均匀度指数与狭缝宽度的乘积近似为常值 0.35;当气液流量比大于 0.206 时,由于气动力的作用,雾化边界可分为两段,上面段为收缩段,下面段为等直径段;在针栓式喷注器设计时,狭缝宽度取值越小越好,而液膜半锥角应当考虑 SMD 和雾化锥角折中选取。

关 键 词: 针栓式喷注器; 变推力; 火箭发动机; 雾化特性; 马尔文测量系统

中图分类号: V238 **文献标志码:** A

Experiment on atomization characteristics of pintle injectors

FANG Xinxin, SHEN Chibing, CHENG Peng, WANG Lei

(Science and Technology on Scramjet Laboratory, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To study the atomization characteristics of pintle injectors, the influences of structural parameters of pintle injectors on Sauter mean diameter (SMD), drop distribution homogeneity factors and atomization cone angles were obtained by using high-speed photography and Marvin measuring instrument. The results indicated that SMD kept constant along the injection axis direction, and increased along the radial direction. In addition, with the increase of gas-liquid mass flow ratio SMD decreased, but the drop distribution homogeneity factors reduced firstly and then increased. The product of drop distribution homogeneity factors and slit width kept constant, which was 0.35. When the gas-liquid mass flow ratio was larger than 0.206, with the effects of aerodynamic force, the atomization boundary could be divided into two zones, the upper zone as the contraction stage, and the lower zone as the equal-diameter stage. Moreover, when designing pintle injectors, the slit width should be chosen as small as possible, while the half cone angle of liquid film should be selected according to SMD and atomization cone angles.

Key words: pintle injector; variable thrust; rocket engine; atomization characteristic; Marvin measuring instrument

针栓式喷注器通过控制喷注器节流面积对推进剂流量进行调节,在美国阿波罗计划中得到了迅速发展 and 成功应用^[1]。针栓式喷注器起源于 JPL(Caltech Jet Propulsion Laboratory)在 1957

收稿日期:2015-12-13

基金项目:国防科技大学 2015 年度优秀研究生创新资助项目(S150105)

作者简介:方昕昕(1991—),男,博士生,研究方向为火箭及其组合推进技术。

引用格式:方昕昕,沈赤兵,成鹏,等.针栓式喷注器雾化特性试验[J].航空动力学报,2017,32(8):1853-1860. FANG Xinxin, SHEN Chibing, CHENG Peng, et al. Experiment on atomization characteristics of pintle injectors[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1853-1860.

年研究火箭发动机推进剂反应特性的试验,其结构就是早期针栓式喷注器的原型。后来喷注器构型经过发展,具有深度节流、快速响应和“面关机”(face shut off)等特性。美国 TRW(Thompson-Ramo-Wooldridge)公司至少发展了 60 种针栓式发动机并进行了热试车,已经有超过 130 种使用针栓式喷注器的双组元发动机取得了飞行试验的成功^[2]。此后,针栓式喷注器被改进应用在凝胶推进剂战术导弹^[3]和低温推进剂的发动机上^[4-8]。国内,陈运钦^[9]和张育林^[10]分别对变推力发动机进行了试验和仿真。早期针栓式喷注器主要应用在有毒推进剂火箭发动机上,将针栓式喷注器应用在无毒低温液氧/甲烷推进剂组合上具有广阔的前景。

关于针栓式喷注器的雾化研究还较少。Marchi 等^[11]试验研究了喷注通道出口形状对针栓式喷注器锥形液膜稳定性的影响,结果表明喷注通道内表面比外表面长有利于液膜的稳定。Gavaises 等^[12]数值仿真研究了针栓式喷注器内部流动过程,结果表明加工误差对喷注器出口处液膜流动状态有很重要的影响,仿真结果与 Nouri 等^[13]的试验结果相吻合。Nouri 等^[14]、DONG Quan 等^[15]和 Son 等^[16]试验研究了环境压力、气液动量比和韦伯数对针栓式喷注器雾化特性的影响。

针栓式喷注器的雾化试验研究分为稳态试验研究和动态试验研究。在针栓式变推力火箭发动机转工况的过程中,喷注器的雾化特性会发生变化,继而影响发动机的性能。对于稳态工作的针栓式发动机,针栓式喷注器的稳态雾化特性研究对于喷注器以及发动机的结构参数选取具有较大的参考价值。本文将对针栓式喷注器进行稳态雾化特性研究,采用的试验手段包括马尔文测量系统和高速摄影仪器。研究结果为针栓式喷注器设计提供参考。

1 试验系统与试验件

1.1 试验系统

雾化试验系统见图 1。氮气源为推进剂模拟介质贮箱增压。试验采用水和空气做为液氧和甲烷的模拟介质,分别记为模拟介质 1 和模拟介质 2,试验中保证模拟介质的流量与原推进剂流量相等。模拟介质经针栓式喷注器形成喷雾场,由漏斗型的收集装置收集并排到室外。试验测量系统与试验台系统独立。试验分为两个部分:第一部

分,使用马尔文测量系统测量喷雾场的粒径分布;第二部分,采用 CCD(charge-coupled device)数字照相机得到雾化图像,获取雾化锥角等信息,帧频设置为 10 000 帧/s,曝光时间为 1/40 000 s。

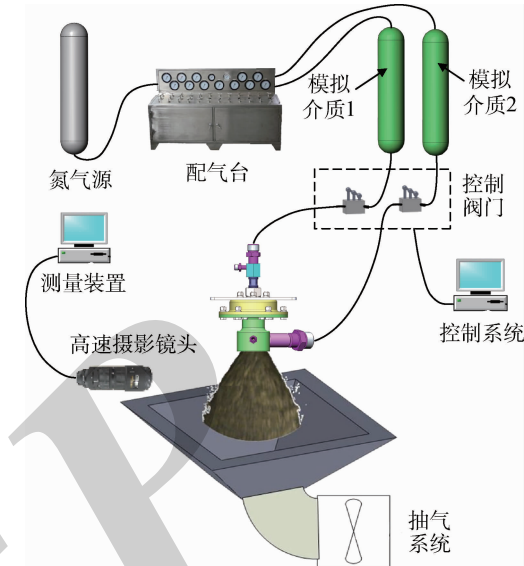


图 1 试验平台结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of experimental platform

1.2 试验件

试验的针栓式喷注器主要由 5 个部分组成:安装夹具、针阀、中心体、底座和调节垫片。通过调节垫片的更换可以调节喷注通道的面积,从而在喷注压降不变的条件下实现流量的线性调节。针栓式喷注器设计了两个压力测量通道,分别测量模拟介质水和空气的喷前压力,见图 2。中心体和针阀构成水喷注通道,底座和针阀构成空气喷注通道。

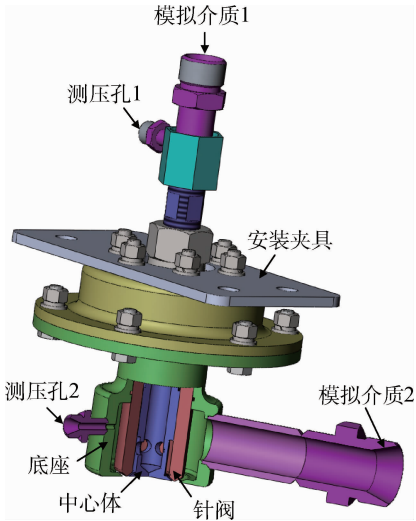


图 2 针栓式喷注器结构简图

Fig. 2 Schematic configuration of pintle injector

2 数据处理方法

2.1 粒径分布均匀度指数

R-R 分布由 Rosin 和 Rammler^[17] 首先提出, 已经成为描述雾化粒径分布的重要函数。R-R 分布以累积体积分数的表达式为^[18]

$$\varphi_c = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{\overline{D_{R-R}}}\right)^n\right] \quad (1)$$

式中 φ_c 为粒径小于 D 所有颗粒体积占总体积的比值, 表示累计体积分数; $\overline{D_{R-R}}$ 为平均粒径; n 为粒径分布均匀度指数。

由式(1)可知, 当 $D = \overline{D_{R-R}}$ 时, $\varphi_c = 1 - \exp(-1) = 0.632$ 。因此, 可以认为平均粒径 $\overline{D_{R-R}}$ 等于累积体积分数 $\varphi_c = 0.632$ 对应的粒径。即

$$\overline{D_{R-R}} = D|_{\varphi_c = 0.632} \quad (2)$$

根据式(1), 可得到均匀度指数 n 为

$$n = \frac{\ln[-\ln(1 - \varphi_c)]}{\ln \frac{D}{\overline{D_{R-R}}}} \quad (3)$$

图 3 为 $\overline{D_{R-R}} = 200 \mu\text{m}$ 时, 不同均匀度指数 n 下, 累计体积分数及体积分数(具有某一直径的所有颗粒体积占总体积的比值)分布。可以看出, n 越大累积体积分数变化曲线越陡峭, 相应的体积分数分布越集中。对比 n 分别为 1, 2 和 3 下的体积分数分布发现, 3 种情况下最大体积分数对应的粒径是相等的, 即 n 不影响 $\overline{D_{R-R}}$ 大小。根据式(2)可知, 体积分数分布最大值点连线过 3 条累积体积分数的交点。因此, 均匀度指数 n 只会影响体积分数分布的集中程度, n 越大体积分数分布越集中。

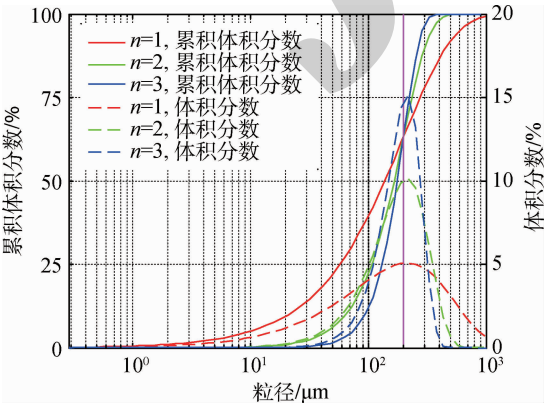


图 3 不同粒径均匀度指数下的体积分数和累积体积分数分布

Fig. 3 Volume frequency and cumulative volume frequency in different drop distribution homogeneity factors

由试验获得粒径分布, 然后经式(3)计算得到 n , 即可对试验得到的粒径分布进行拟合。

2.2 雾化锥角

为获取针栓式喷注器雾化锥角, 需要将高速摄影获取的图片进行处理, 见图 4。图 4(a)为背景图, x 方向为喷注轴向, y 方向为喷注径向。图 4(b)为雾化图片, 提取图中红色方框区域转化为二值图, 黑白的界面即为雾化界面, 见图 4(c)。其中, 分割阈值选取采用 Otsu 方法^[19]。采用最小二乘法对截面位置数据进行拟合, 得到雾化锥角, 见图 4(d), 图中红色曲线为雾化边界, 黄色直线为拟合曲线, 蓝色直线为雾化界面计算误差范围。图中 648 像素相当于 76.5 mm。

为减小图像处理误差, 计算多张图片的雾化锥角, 取其平均值。图 5 为雾化锥角随图片处理数量变化曲线。可以看出, 随着图片处理数量的

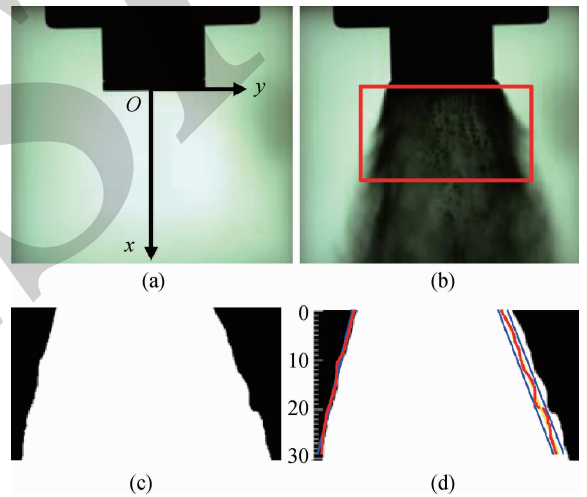


图 4 雾化锥角获取过程(单位: mm)

图 4 Acquisition of atomization cone angles (unit: mm)

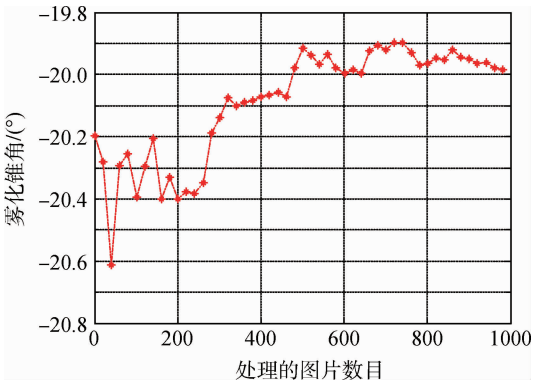


图 5 不同图片处理数量下的雾化锥角

Fig. 5 Atomization cone angles in different number of pictures dealt with

增加雾化锥角有波动,但是图片处理数量大于 500 张后,雾化锥角趋近于一个稳定值。本文选取 1000 张图片,计算其雾化锥角的平均值做为该工况下的雾化锥角。

3 试验结果与讨论

3.1 SMD 变化趋势分析

3.1.1 SMD 沿轴向和径向变化趋势

图 6 为 SMD(记为 D_{sm})沿针栓式喷注器雾化轴向的变化曲线,图中测点均分布在喷注轴线上,并且气液流量比不变。由图可知,SMD 沿雾化轴向基本不变。图 7 为距离针栓式喷注器出口 8 cm 位置处,SMD 沿径向的变化曲线,试验的气液流量比不变。因粒径分布具有对称性,试验中只测量了轴线一侧的粒径分布,图中径向位置为 0 cm 的地方即为测量平面的中心点。可以看出,SMD 沿径向位置是增大的。其主要原因是,在气动力的作用下,粒径较小的液滴向测量平面的中心位置聚集。因此,测量平面的中心位置处液滴直径较小,而且离中心位置越远液滴直径越大。

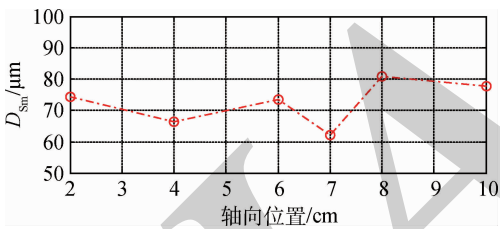


图 6 SMD 沿轴向分布曲线

Fig. 6 Variation curve of SMD along axis direction

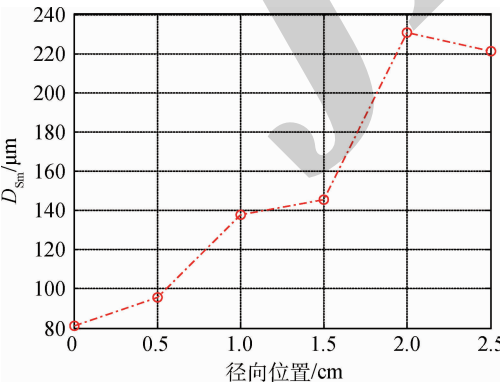


图 7 SMD 沿径向分布曲线

Fig. 7 Variation curve of SMD along radical direction

3.1.2 狭缝宽度对 SMD 的影响

图 8 为气液流量比一定的条件下,SMD 随狭缝宽度(模拟介质水喷注通道内外表面距离)变化曲线。可以看出,随着狭缝宽度的增大,SMD 近似呈直线增加。其主要原因是狭缝宽度的增大使得

液膜厚度线性增大,而在相同气液流量比下,气动力可以认为是不变的。因此,SMD 会随之变大。在针栓式喷注器设计时狭缝宽度取值越小越好。

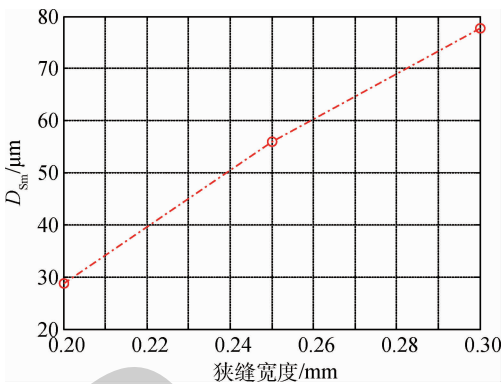


图 8 不同狭缝宽度下的 SMD

Fig. 8 SMD in different slit widths

3.1.3 液膜半锥角对 SMD 的影响

图 9 为气液流量比一定的条件下,SMD 随液膜半锥角(模拟介质水喷注角度)变化曲线,图中 SMD 为雾化场中同一位置的数据。可以看出,当液膜半锥角为 40° 时,SMD 近似为 $400\mu m$,而当液膜半锥角增大到 60° 时,SMD 减小为 $160\mu m$ 。SMD 的迅速减小主要是因为液膜半锥角越大气体和液体之间碰撞角度越大,气液相互作用越强,导致 SMD 显著减小。

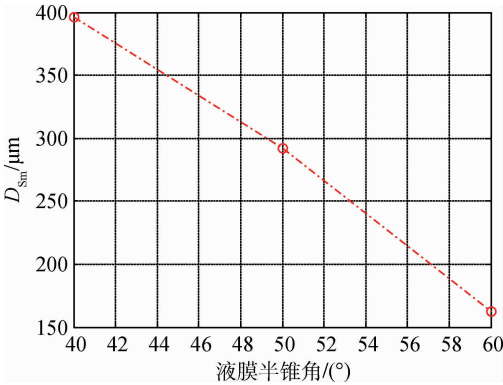


图 9 不同液膜半锥角下的 SMD

Fig. 9 SMD in different half cone angles of liquid film

3.1.4 气液流量比对 SMD 的影响

图 10 展示了气液流量比对 SMD 的影响。图中各点的液体流量不变,气液流量比的变化是由气体流量变化引起的。由图可知,气液流量比越大,SMD 越小,当气液流量比大于 0.20 后,SMD 变化很小。主要原因是气液流量比越大,气体对液膜的气动力越强,导致 SMD 减小。当气液流量比增大到一定程度时,SMD 已经达到很小的量级,此时随着气液流量比的增大 SMD 降低趋势会减弱。

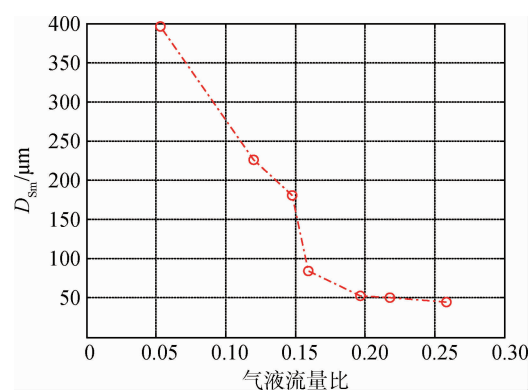


图 10 不同气液流量比下的 SMD

Fig. 10 SMD in different gas-liquid mass flow ratios

3.2 粒径分布均匀度指数变化趋势分析

3.2.1 均匀度指数沿轴向和径向变化趋势

图 11 为相同气液流量比下,液滴粒径分布均匀度指数 n 沿喷注轴向的变化曲线,图中测点均分布在喷注轴线上。可以看出,沿喷注轴向 n 近似线性增加,表明沿喷注轴向液滴粒径分布越来越集中。而 3.1.1 节分析表明,SMD 沿喷注轴向均匀不变。因此,沿喷注轴向液滴粒径分布向特征尺寸靠拢,大粒径及小粒径的液滴数量减少。

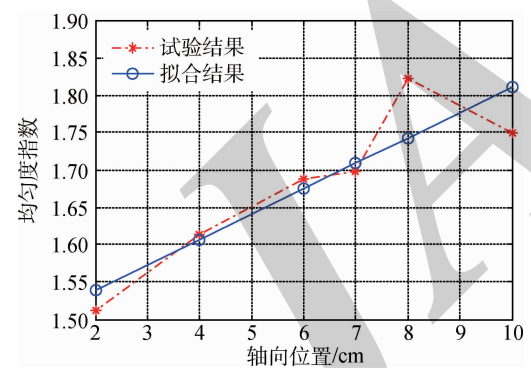


图 11 粒径分布均匀度指数沿轴向变化曲线

Fig. 11 Variation curves of drop distribution homogeneity factors along axis direction

图 12 为相同气液流量比下,同一轴向截面上均匀度指数沿径向变化曲线。可以看出,总体上均匀度指数沿径向是增加的,即沿径向液滴粒径分布越来越集中。图 13 给出了径向位置为 0.3, 1.3 和 2.0 cm 处的液滴体积分数分布。可以看出,径向位置越远,体积分数分布越集中。此外,最大体积分数对应的粒径不变。

3.2.2 狭缝宽度对均匀度指数的影响

图 14 为相同气液流量比下,同一测量位置上,均匀度指数随狭缝宽度变化曲线。分析表明,均匀度指数与狭缝宽度的乘积近似为常值 0.35。

均匀度指数表示液滴分布集中程度;而狭缝宽度反应了液膜破碎前厚度,可以代表液滴雾化前尺寸。狭缝宽度越小,液膜越薄,相同气液流量比下,雾化效果越好,液滴粒径分布也就越集中,即均匀度指数越大。

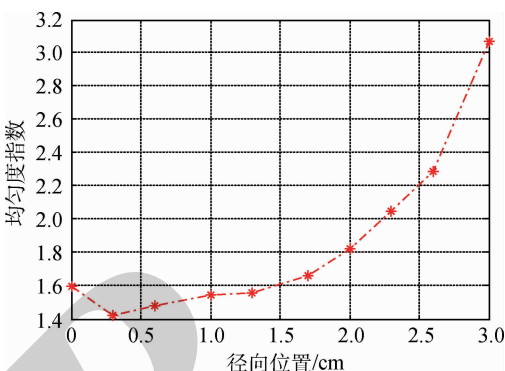


图 12 粒径分布均匀度指数沿径向变化曲线

Fig. 12 Variation curve of drop distribution homogeneity factors along radical direction

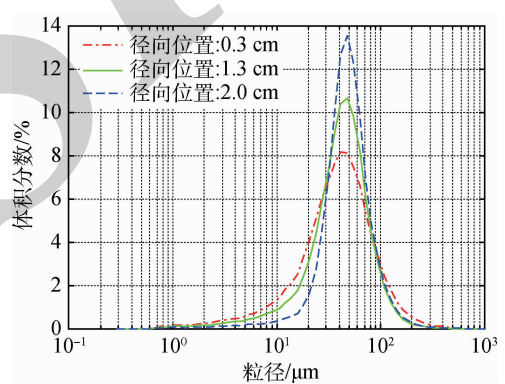


图 13 不同径向位置下的体积分数分布

Fig. 13 Volume frequency in different radical positions

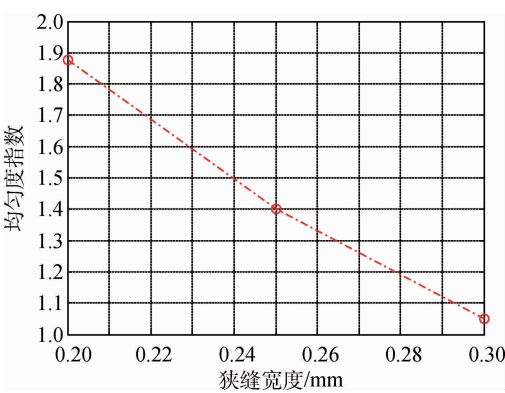


图 14 不同狭缝宽度下的均匀度指数

Fig. 14 Drop distribution homogeneity factors in different slit widths

3.2.3 液膜半锥角对均匀度指数的影响

图 15 为相同气液流量比下,均匀度指数随液

膜半锥角变化曲线。可以看出,液膜半锥角从 40° 增加到 60° , 粒径分布均匀度指数增大的幅度很小, 只有 10% 左右。根据文中第 3.1.3 节讨论, 可以认为液膜半锥角只影响 SMD, 而对液滴粒径分布均匀度指数影响很小。

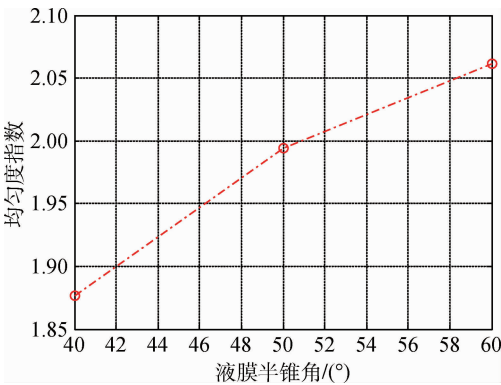


图 15 不同液膜半锥角下的粒径均匀度指数
Fig. 15 Drop distribution homogeneity factors in different half cone angles of liquid film

3.2.4 气液流量比对均匀度指数的影响

图 16 为均匀度指数随气液流量比变化曲线。可以看出, 随着气液流量比的增大, 液滴分布均匀度指数先降低而后有所回升, 即气液流量比较小和较大时, 粒径分布更集中。主要原因是液滴破碎过程是液膜首先破碎成大液滴, 而后大液滴在气动力的作用下破碎成小液滴。气液流量比较小时, 大液滴尚未完全破碎成小液滴, 因而均匀度指数更大。此外, 气液流量比较大时, 绝大部分大液滴破碎成小液滴, 因而分布更集中, 均匀度指数更大。

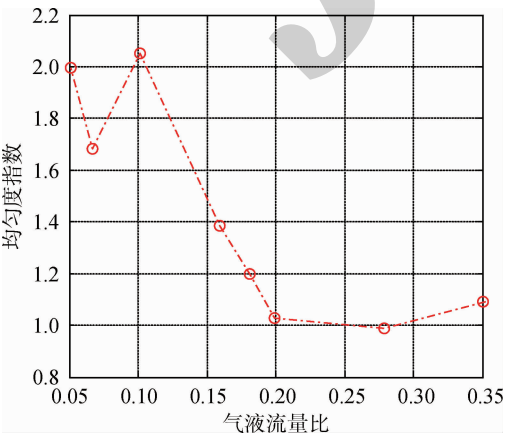


图 16 不同气液流量比下的粒径均匀度指数
Fig. 16 Drop distribution homogeneity factors in different gas-liquid mass flow ratios

3.3 雾化锥角变化趋势分析

图 17 为不同狭缝宽度下雾化锥角随气液流量比变化曲线。可以看出, 随着气液流量比的增大雾化锥角持续降低, 并且在由正角度变为负角度的地方降低趋势最快。此外, 在相同气液流量比下, 狭缝宽度越大雾化锥角越小, 雾化图像见图 18。主要原因是狭缝宽度越大, 液体喷注环缝的面积越大, 在相同流量下其喷注速度越小, 因此气液动量比越大, 气体对液体的作用越强, 导致雾化锥角更小。

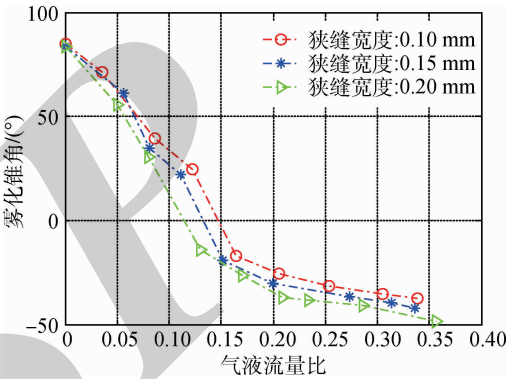


图 17 不同气液流量比下的雾化锥角
Fig. 17 Atomization cone angles in different gas-liquid mass flow ratios

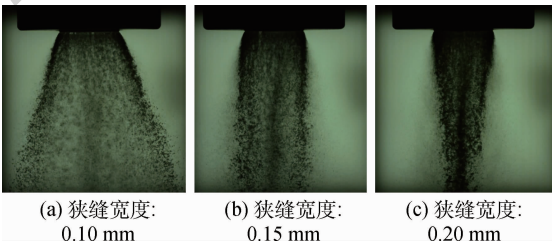


图 18 不同狭缝宽度下的雾化图像
Fig. 18 Atomization images in different slit widths

图 19 为不同气液流量比下的雾化图像。为更好地对比雾化边界的形态, 提取不同气液流量比下的雾化边界, 见图 20。图中不同颜色的曲线代表不同气液流量比下的雾化边界。可以看出, 随着气液流量比的增加, 雾化边界迅速向内收缩。当气液流量比大于 0.206 后, 雾化边界可分为两段: 上面段为收缩段, 下面段为等直径段。主要原因是此时气体的作用很强, 液膜先迅速收缩并且在气动力作用下液滴向轴线靠拢, 到达一定程度后, 雾化边界变成等直径段。

图 21 为相同气液流量比下, 不同液膜半锥角时的雾化图像。可以看出, 液膜半锥角越大, 雾化

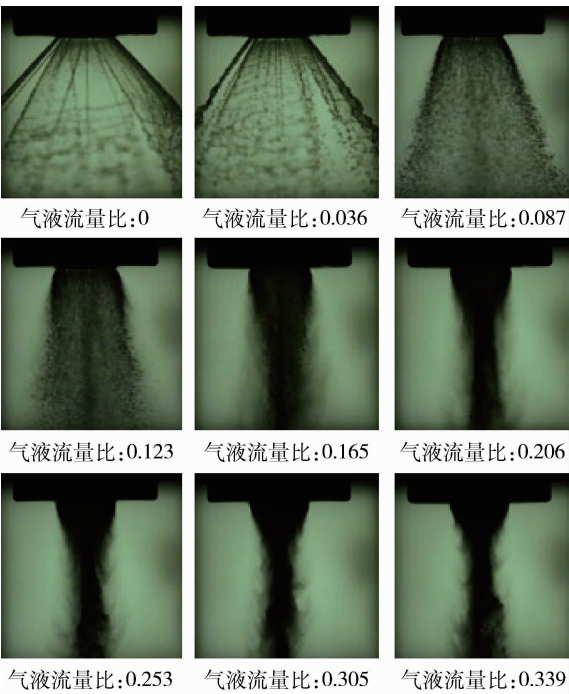


图 19 不同气液流量比下的雾化图像

Fig. 19 Atomization images in different gas-liquid mass flow ratios

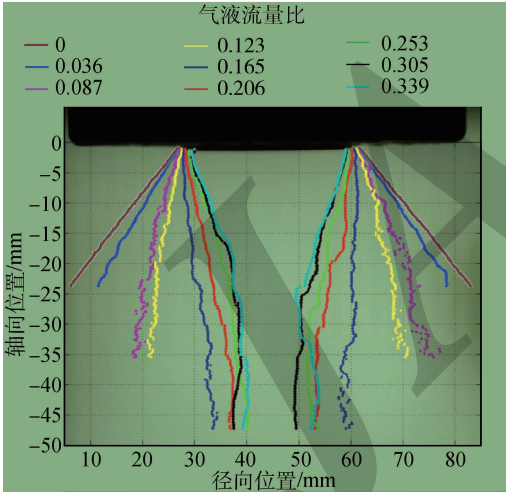


图 20 不同气液流量比下的雾化边界

Fig. 20 Atomization boundary in different gas-liquid mass flow ratios

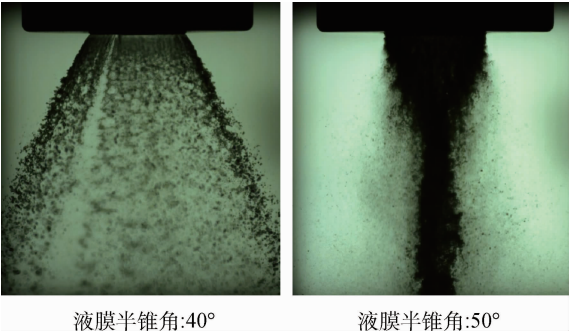


图 21 不同液膜半锥角下的雾化图像

Fig. 21 Atomization images in different half cone angles of liquid film

锥角越小。主要原因是液膜半锥角越大,气液之间的碰撞角度越大,因此气体对液体的作用越强,导致雾化锥角急剧减小。雾化锥角太小不利于推进剂的蒸发、混合和燃烧,因此在喷注器设计时液膜半锥角应当考虑 SMD 和雾化锥角折中选取。

4 结 论

对针栓式喷注器进行雾化研究,得到了喷注器结构参数对 SMD、粒径分布均匀度指数和雾化锥角的影响,主要结论如下:

1) 由于气动力的作用,沿喷注轴向均匀度指数近似呈线性增加,而 SMD 沿喷注轴向均匀不变。因此,沿喷注轴向液滴粒径分布向特征尺寸靠拢。此外,SMD 和均匀度指数沿径向均是增加的。

2) 相同气液流量比下,随着狭缝宽度的增大,SMD 近似呈线性增加,而雾化锥角减小,不利于推进剂的蒸发、混合和燃烧,影响发动机燃烧效率。因此,在喷注器设计时,狭缝宽度取值越小越好。此外,分析表明均匀度指数与狭缝宽度的乘积近似为常值 0.35。

3) 当液膜半锥角从 40°增大到 60°时,SMD 近似从 400 μ m 减小到 160 μ m,而液滴粒径分布均匀度指数只增加了 10%左右。因此,液膜半锥角只影响 SMD,而对粒径分布均匀度指数影响很小。但是,液膜半锥角的增加会导致雾化锥角迅速减小。因此,在喷注器设计时,液膜半锥角应当考虑 SMD 和雾化锥角折中选取。

4) 随着气液流量比的增大,SMD 减小,而粒径分布均匀度指数先降低而后有所回升。主要原因是液滴破碎过程是液膜首先破碎成大液滴,而后大液滴在气动力的作用下破碎成小液滴。气液流量比较小时,大液滴尚未完全破碎成小液滴,因而均匀度指数更大,液滴分布更集中。此外,气液流量比较大时,绝大部分大液滴完全破碎成小液滴,因而分布也更集中。

5) 由于气动力的作用,当气液流量比大于 0.206 后,雾化边界可分为两段:上面段为收缩段,下面段为等直径段。

参考文献:

[1] 张育林. 变推力液体火箭发动机及其控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[2] DRESSLER G A, BAUER J M. TRW pintle engine heritage and performance characteristics[J]. AIAA-2000-3871, 2000.

[3] HODGE K F,CROFOOT T A,NELSON S. Gelled propellants for tactical missile applications[R]. AIAA 96-2869, 1996.

[4] HENNEBERRY J P,STODDARD F J,GU A L,et al. Low-cost expendable launch vehicles[J]. AIAA 92-3433,1992.

[5] SACKHEIM R L,STODDARD F J,HARDGROVE J A. Propulsion advancements to lower the cost of satellite based communications systems[J]. AIAA 94-0930,1994.

[6] FRITZ D,DRESSLER G,MAYER N,et al. Development and flight qualification of the propulsion and reaction control system for ERIS[J]. AIAA 92-3663,1992.

[7] FRITZ D,GAVITT K. Gel propulsion for the fourth generation escape system component evaluation results[C]// 32nd Annual Symposium. Reno;SAFE Association,1994: 371-378.

[8] GAVITT K,MUELLER T. TRW LCPE 650 klbf LOx/LH₂ test results[J]. AIAA-2000-3853,2000.

[9] 陈运钦. 变流量喷注器的设计和性能试验[J]. 推进技术, 1988,9(4):1-6.
CHEN Yunqin. Design and functional test of controllable flow injector[J]. Journal of Propulsion Technology,1988, 9(4):1-6. (in Chinese)

[10] 张育林. 变推力液体火箭发动机动态特性的状态空间分析[J]. 国防科技大学学报,1983(3):23-37.
ZHANG Yulin. State-space analysis of the dynamic characteristics of a variable thrust liquid propellant rocket engine[J]. Journal of National University of Defense Technology,1983(3):23-37. (in Chinese)

[11] MARCHI A,NOURI J,YAN Y,et al. Spray stability of outwards opening pintle injectors for stratified direct injection spark ignition engine operation[J]. International Journal of Engine Research,2010,11(6):413-437.

[12] GAVAISES M,TONINII S,MARCHI A. Modeling of internal and near-nozzle flow of a pintle-type outwards-opening gasoline piezo-injector[J]. International Journal of Engine Research,2006,7(5):381-397.

[13] NOURI J M,ABO-SERIE E,MARCHI A,et al. Internal and near nozzle flow characteristics in an enlarged model of an outwards opening pintle-type gasoline injector[J]. Journal of Physics:Conference Series,2007,85(1):256-267.

[14] NOURI J M,HAMID M A,YAN Y,et al. Spray characterization of a piezo pintle-type injector for gasoline direct injection engines[J]. Journal of Physics:Conference Series,2007,85(1):281-292.

[15] DONG Quan,ISHIMA T,KAWASHIMA H. A study on the spray characteristics of a piezo pintle-type injector for DI gasoline engines[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2013,27(7):1981-1993.

[16] SON M,YU K,KOO J,et al. Effects of momentum ratio and Weber number on spray half angles of liquid controlled pintle injector[J]. Journal of Thermal Science,2015,24(1):37-43.

[17] BROWN W K,WOHLETZ K H. Derivation of the Weibull distribution based on physical principles and its connection to the Rosin-Rammler and lognormal distributions[J]. Journal of Applied Physics,1995,78(4):2758-2763.

[18] ZIMMERMAN R. Compressibility of Sandstones[M]. Amsterdam, Netherland;Elsevier Science Publishers,1991.

[19] 何志勇,孙立宁,陈立国. OTSU 准则下分割阈值的快速计算[J]. 电子学报,2013,41(2):267-272.
HE Zhiyong,SUN Lining,CHEN Ligu. Fast computation of threshold based on OTSU criterion[J]. Acta Electronica Sinica,2013,41(2):267-272. (in Chinese)

(编辑:陈 越)