

一种旋流式喷嘴的实验和数值研究^{*}

王国辉, 蔡体敏, 何国强, 胡春波

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 对一种小尺寸复杂结构的旋流式喷嘴进行了实验和数值研究。实验研究中确定了喷嘴前后压差与流量间的对应关系。数值研究中应用 VOF 方法对喷嘴内三维气液两相流动进行了计算, 并与实验结果做了比较, 二者吻合较好。而后应用该算法对喷嘴在不同结构尺寸下的流动过程进行了计算, 对比分析后发现: 旋流室及旋流器的结构和尺寸均会对喷嘴出口速度产生影响, 但只有旋流器螺旋升角和槽道数目才会对喷嘴雾化角产生显著影响。

关键词: 喷嘴; 雾化; 二相流; 数值计算; 实验

中图分类号: V233.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 01-0028-05

Experimental and numerical investigation of a swirl atomizer

WANG Guo-hui, CAI Ti-min, HE Guo-qiang, HU Chun-bo

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: Experimental and numerical study on a small swirl atomizer with complex structure was conducted. In the experimental research, the relationship between pressure difference of atomizer and mass flow rate was decided. In numerical research, 3-D gas-liquid flow in the atomizer was calculated employing VOF method, which was validated by the experimental data with good agreement each other. Then, with this methodology, flow process in the atomizer with different structure and dimension was simulated. After analysis about these numerical results, it was found that: the atomizer exit velocity can be affected by both the structure and dimension of swirl chamber and swirler, and the atomization angle mainly decided by the screw rise angle and the number of the swirler grooves.

Key words: Injector; Two phase flow; Atomization; Numerical calculation; Experimentation

1 引 言

在诸多种类的喷嘴中, 旋流式喷嘴几何尺寸相对较小, 内部形状复杂, 使用中可望获得尽量大的雾化角、尽量小的雾化粒径和尽量均匀的雾化度。以前对各类喷嘴的研究^[1~3]多以实验为主, 从更为直观的角度获取喷嘴雾化特性参数。而对喷嘴内外流动进行数值研究还不多见, 尤其是气液两相流动的数值计算工作更加稀少。这主要是由于喷嘴外的液膜撕裂、破碎、雾化过程过于复杂, 还难以建立一种合理的、具有普适性的数学模型; 而对喷嘴内流动, 也仅是跟踪气液两相界面。本文对旋流式喷嘴的内部流动进行了两相数值模拟, 建立出口流动参数(速度大小及方向等)与辅助实验所得雾化特征参数(雾化角、粒径、速

度等)之间的对应关系, 然后在此基础上计算其它结构、工况的喷嘴内气液两相流动, 获取喷嘴出口流动参数, 进而来预示其雾化特征参数, 这样可以为喷嘴结构优化提供基于一定“量值”基础上的定性理论关系, 减少大量的实验操作。

2 物理模型

本文研究的旋流式喷嘴设计流量为 50g/s, 三维简单结构如图 1(a)所示, 主要包括旋流器和旋流室两部分。旋流器(图中的 B 段)由 3 道螺旋升角为 30°的凹槽组成, 它们沿圆周成 120°角均匀分布, 横截面积为 1mm × 1.2mm, 沿流动方向长度为 4mm。旋流室由 3 个区构成, 其中 iv 区(图中 A 段 1 区)为圆柱形, 长度为 2mm, 直径为 3mm, ㊟区(图中 A 段 2 区)为圆

^{*} 收稿日期: 2002-01-04; 修订日期: 2002-04-29。

作者简介: 王国辉 (1974—), 男, 博士后, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

台形, 长度为 3mm, 大端直径为 7mm, 小端直径为 3mm, ㊟区(图中 A 段 3 区)亦为圆柱形, 长度为 2mm, 直径为 7mm。

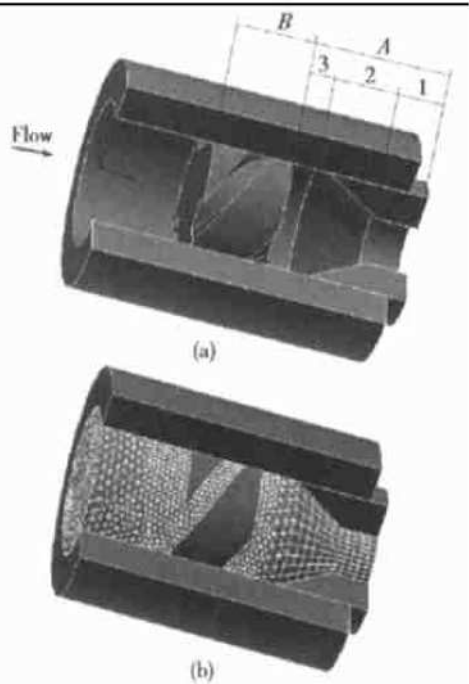


Fig. 1 Schematics of swirl atomizer and calculation grid

3 实验研究

3.1 实验系统

实验系统主要由高压气瓶、管路、燃料贮箱、流量计、压力测量仪表和旋流式喷嘴组成。高压气瓶内填充氮气, 经减压后进入燃料贮箱, 给液体燃料加压, 燃

料经过流量计、喷嘴前测压表后被挤入喷嘴, 在喷嘴出口处实现雾化。通过调整减压阀来改变喷嘴前压力, 通过流量计来测量喷嘴流量。喷雾场由数码摄像机拍摄, 从其图片中可以粗略测量雾化角, 定性地了解雾化效果(因为不能获得精确的雾化粒径和分布)。实验的主要目的是确定喷嘴前后压差与流量的关系, 以便于在 RBCC 二次燃烧实验中合理给定喷嘴压差, 保证所需要的煤油流量。同时这些实验数据还可以为喷嘴内气液两相流动数值计算提供校验依据。

3.2 实验研究结论

实验研究中使用水作为工质, 共测量了 9 个压差下的喷嘴流量, 图 2 给出了每个实验的雾化情形, 表 1 给出了实验测量结果。通过这些实验, 确定了喷嘴前后压差与流量的对应关系。结果发现, 随着喷嘴前后压差的增加, 流量相应增加, 雾化效果越来越好(现场感性观察), 但雾化角度变化不大, 均在 120° 上下波动。从这点来说, 对于本文所研究的旋流式喷嘴而言, 改变其前后压差, 并不能大幅度改变其雾化角度, 但可以调整流量大小。

Table 1 Experiments results

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mass flow rate/(g/s)	40	44	47.1	48.2	50.4	53.5	55.3	58.7	64
Pressure difference/MPa	0.8	0.85	0.95	1.05	1.16	1.22	1.3	1.5	1.75
Atomization angle/(°)	116°	118°	120°	121°	119°	120°	118°	120°	121°

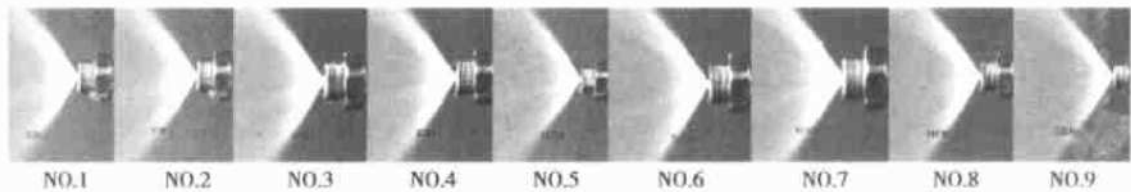


Fig. 2 Atomization photos of 9 experiments

4 数值研究

4.1 数学方法

旋流式喷嘴内流动是典型的气液两相流动, 本文使用 VOF 模型对这一流动过程进行模拟。假定气液两相之间不存在化学反应和物理相变, 且不考虑相间和相内的热交换。流动按照不可压处理, 计算过程采用 SIMPLE 算法, 数学模型如下:

连续方程 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$

动量方程 $\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial W}{\partial x_j} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + \rho g_i + F_j$
体积分数守恒方程 $\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0$

在上述方程中密度 $\rho = F \rho_1 + (1 - F) \rho_2$; 速度 $u_i = F u_{i1} + (1 - F) u_{i2}$; 流体体积分数 F 处于 0, 1 之间(即交界面附近)时使用 Euler 隐式方法处理。

计算中粘性系数按照层流模型给定。进口边界, 取为速度进口, 给定来流速度; 出口边界, 取为压强出

口, 给定反压; 其它边界为粘性固体壁面边界, 速度为 0, 压力梯度为 0。

4.2 典型算例分析

首先对 50g/s 喷嘴流量工况进行了计算, 流动介质为水和空气。计算中不考虑重力影响, 假定流动过程全部在常温下进行, 出口处液体尚未发生雾化, 但再向出口方向前进无限小的距离即开始与周围的空气相互作用。喷嘴结构尺寸与图 1(a) 所示相同, 取流体域为计算域, 使用非结构化计算网格(如图 1(b)所示), 共取 232000 个计算单元。计算中坐标系取定如下: 沿流动方向为 z 向, 与其垂直的平面为 $x-y$ 平面, 坐标原点取在液体进口圆面的中心。

图 3(a) 给出了 $x=0$ 平面液相分布。由图可见, 在喷嘴旋流室中部存在一个明显的纯气相区, 该区已经贯穿整个旋流室, 而液相在喷嘴出口处以极薄(计算中发现不足 0.25mm)的液膜形式喷出。同时可以看到, 部分气相成分与液相成分是“交溶”的, 这主要是气液分界面处的网格不够密集引起的, 一定程度上暴露了 VOF 方法在模拟气液交界面时对网格要求较高的缺陷。从图 3(b) 给出的压强分布来看, 要满足 50g/s 的质量流率, 约需 1.1MPa 的驱动压差。同时可以发现, 在旋流室中心存在一个比较明显的半径略小于喷嘴出口半径的圆台低压区。这个低压区是由于液相流经横截面积微小的螺旋器凹槽加速后在旋流

室中继续螺旋式前进、难以进入旋流室中心区域形成的, 保证了旋流室内纯气相区域的存在。

图 4(a) 给出了出口平面 $y=0$ 线(定义此线为研究目标线)上的速度分布。由图可见, x 向速度接近于零, y 向速度左侧为正, 右侧为负, 说明出口平面上速度是旋转的。 z 向速度在两个外缘处大, 比中间高出近一倍。最后三个方向的合成速度为图中黑色圆点曲线。很明显, 两侧速度高, 是中间速度的 2 到 3 倍。而且最大速度所占区域并不是很大, 很快向中间收敛变小, 说明喷嘴出口处高质量流率区是比较小的一个环形域。另外, 本文通过计算喷嘴出口平面上液相速度与主流方向(z 向)的夹角来预示喷嘴的可能雾化半角。图 4(b) 给出了出口平面 $y=0$ 线上合成速度与 z 向速度夹角。由于在这条线上存在气相、液相和气液交界三个部分, 便于观察和分析, 本文只给出了液相和气液交界部分的雾化半角分布情况, 将其余部分做“黑箱”处理。由图可见, 最大雾化半角可达 50° 。实验中雾化半角在 60° 左右, 预示值偏低。

4.3 数值校验

应用相同的方法计算了喷嘴在不同流量情况下的流动状态, 得到了对应每种流量的喷嘴前后压差, 并与实验结果比较(见图 5)二者吻合较好, 一定程度上证明了本文算法的有效性。



Fig. 3 Liquid phase distribution (a) and pressure distribution (b) on the $x=0$ section

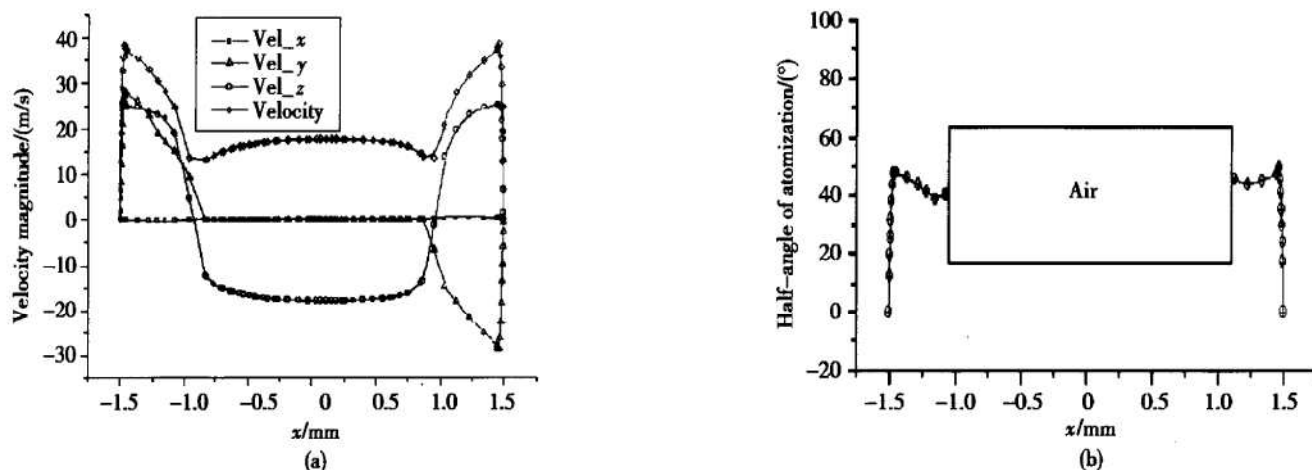


Fig. 4 Velocity distribution (a) and half angle of atomization (b) on the $y=0$ line of atomizer exit section

图6(a)给出了每种工况下出口平面 $y=0$ 线上速度大小的分布, 图中各线的流量值从上到下依次为 95g/s, 70g/s, 60g/s, 55g/s, 50g/s, 45g/s, 40g/s 和 30g/s。从中可以发现, 随着流量的增加, 喷嘴出口速度不断增加。一般来说, 绝对速度的增加意味着喷嘴雾化效果的提高。另外, 从计算结果来看, 雾化半角一直在 50° 附近变化, 没有因为流量的增加而发生明显变化, 这一点与实验结论趋于一致。出口平面 $y=0$ 线上雾化半角的分布情况与图4(b)相仿。

图6(b)中给出了气相体积分数的分布, 图中各线从内到外依次对应流量为 95g/s, 70g/s, 60g/s, 55g/s,

50g/s, 45g/s, 40g/s 和 30g/s 时的情形。从中可以发现, 随着流量的增加, 气相体积分数分布曲线范围变得狭窄, 说明液膜厚度有所增加, 但增加的幅度不是很大, 这是一种不利于雾化过程的现象。由此可见, 对于本文所研究的喷嘴而言, 随着喷嘴流量的增加, 出口速度大小和液膜厚度对雾化效果的影响是相互矛盾的。

综合考虑喷嘴出口速度矢量、液膜厚度和实验研究结论, 认为对于本文所研究的旋流式喷嘴, 出口速度矢量在影响喷嘴雾化效果的诸多因素中起主要作用, 可以用喷嘴出口速度大小、方向和分布来表征、预示和比较此处所研究的喷嘴的雾化效果。

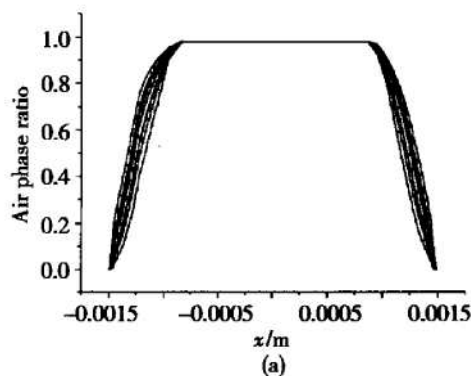
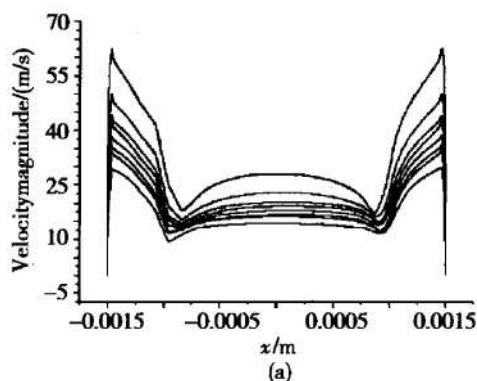
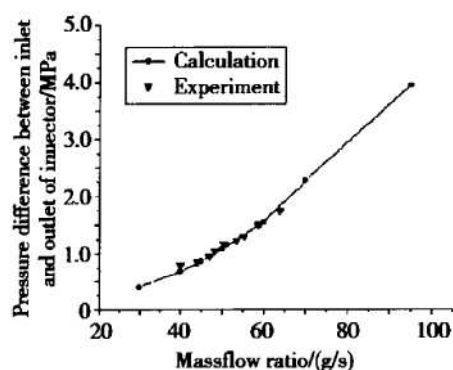


Fig. 5 Relationship between pressure difference and mass flow rate obtained from calculation and experiment

Fig. 6 Velocity distribution (a) and gas phase ratio distribution (b) on the $y=0$ line of atomizer exit

4.4 数值研究结果分析

计算了不同旋流室和旋流器结构尺寸下喷嘴内三维气液两相流动, 喷嘴流量全部为 50g/s, 喷嘴构型均为图1所示构型的变异, 分析了诸多因素对这种旋流式喷嘴雾化性能的影响。计算结果分析中。

4.4.1 旋流室结构尺寸影响分析

(1) 旋流室 iv 区直径的影响: 改变旋流室 iv 区直径, 即改变出口直径, 这也意味着改变 ㊟区锥台锥角 (因 ㊟区长度保持不变)。喷嘴出口直径取 2mm, 3mm 和 4mm。图7为 $x=0$ 截面上气相的分布情况。计算分析发现: 在保证流量的前提下, 减小喷嘴出口直径有助于提高雾化效果, 但不会改变雾化角的大小。

(2) 旋流室 I 区形状的影响: 将旋流室 iv 区形状由圆柱型面改为圆台形, 喷嘴出口直径仍然保持为 3mm, iv 区长度依然保持为 2mm, iv 区圆台的非出口端直径为 2mm, 相应 ㊟区收敛角发生变化, 但其长度不变。图8给出了喷嘴出口目标线上速度和雾化半角的分布情况。结果发现: 使用圆台形 iv 区, 在目前

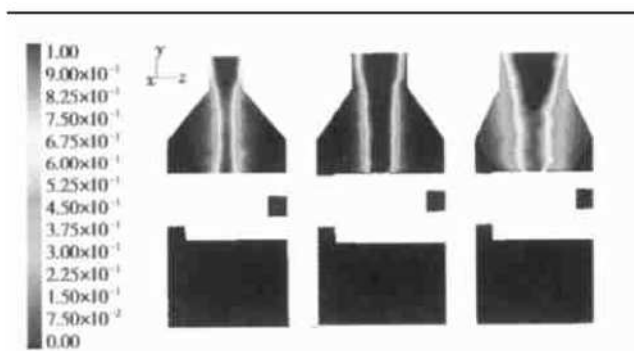


Fig. 7 Gas phase distribution on the $x=0$ section with different atomizer exit diameter

的流量要求下, 不利于雾化效果的提高, 反而需要更高的驱动压力来满足流量要求。

(3) 旋流室 ㊟区长度的影响: 旋流室 ㊟区长度分别取 0mm, 1.5mm 和 3mm, $x=0$ 面上气相的分布情况 (见图9)。计算分析发现: ㊟区长度变化不会引起雾化角度的变化; 过短的 ㊟区长度会抑制旋流室的整流作用, 从而影响雾化均匀度, 且需要更高的驱动压差,

会给喷嘴及辅助设施的结构强度和密封问题提出更高的要求,带来更多的困难;过长的㊟区长度则会促进喷嘴出口液膜的增长加厚,不利于雾化效果,而且需要更多的无效压能驱动。

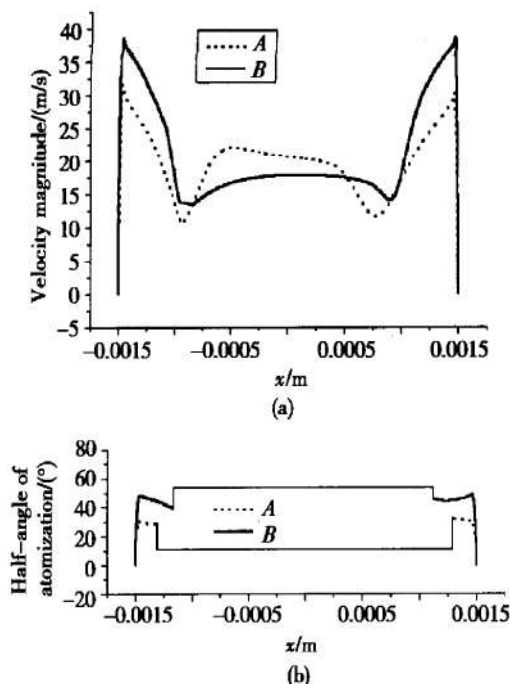


Fig 8 Velocity distribution (a) and half-angle of atomization (b) on the $y=0$ line of atomizer exit with different type (A- Cone shape I section; B- Cylinder shape I section)

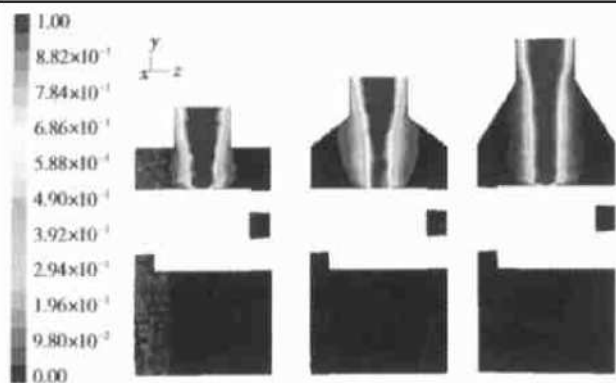


Fig 9 Gas phase distribution on the $x=0$ section with different length of ㊟section of swirl chamber

(4) 旋流室 ㊟区长度的影响: 将旋流室 ㊟区长度由原来的 2mm 改变为 0mm 和 1mm, 计算分析发现: 未引起雾化角度的明显变化, 其长度为 0 时可以提高出口速度及相应的雾化质量, 但需要更高的驱动压差作保障。同时, 需要指出, ㊟区的长度与出口速度、喷嘴前后压差之间是比较复杂的非线性关系, 在喷嘴性能优化过程中需予以关注。

4.4.2 旋流器结构尺寸影响分析

(1) 旋流器槽道横截面积的影响: 槽道横截面尺

寸分别取 $1\text{mm} \times 0.6\text{mm}$, $1\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ 和 $1\text{mm} \times 1.2\text{mm}$, 计算分析发现: 通过减小喷嘴旋流器槽道横截面面积, 可以提高喷嘴出口速度, 提高雾化质量, 但不能改变雾化角的大小, 同时要满足相同流量的要求, 必须提高喷嘴前后压差。

(2) 旋流器槽道螺旋升角的影响: 在保证相同流量的前提下, 改变旋流器槽道螺旋升角(分别取为 20° , 30° 和 40°) 可以改变喷嘴出口最大速度, 同时能够改变雾化半角, 说明旋流器槽道升角在确定旋流式喷嘴工作特性的过程中具有重要作用。计算结果中, 升角为 30° 时的喷嘴工作特性相对最好, 说明这个角度适合该喷嘴的其它结构和尺寸组合, 适合 50g/s 的工作流量要求。

(3) 旋流器槽道数目的影响: 在保证喷嘴流量 50g/s 的前提下, 改变旋流器槽道数目(分别取 2 个, 3 个和 4 个, 沿周向分布) 能够改变雾化半角的大小, 而且会影响雾化质量, 且较少的槽道数目需要更高的驱动压差来满足流量的要求。在本文计算的工作条件下, 3 个螺旋槽道喷嘴的雾化效果相对最好。

5 结 论

(1) 对于一定流量的旋流式喷嘴来说, 喷嘴各部分的结构与尺寸都会对其出口速度产生或大或小的影响, 但这些因素中只有旋流器螺旋升角及其槽道数目可对出口雾化角产生明显影响。

(2) 本文使用的实验和数值模拟相结合的旋流式喷嘴研究思路, 可以在不进行全面雾化场计算的情况下相对深入、经济地研讨喷嘴雾化效果, 建议在工程中推广使用。

(3) 本文的研究工作还存在许多不足, 如实验中由于条件的限制还不能获得足够多的有效信息, 计算中没有应用更加精确的算法、更加高效的计算手段等等, 这些都是以后的研究中需要不断改进之处。

参考文献:

- [1] 张蒙正, 张泽平, 李 鳌, 等. 两股互击式喷嘴雾化性能实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(1).
- [2] Miller Michael F, McManus Keith R, Allen Mark G. An aerodynamic control system for modifying fuel spray distributions [R]. AIAA 2000-0192.
- [3] Brankovic A, McKinney R, Ouyang H, et al. Comparison of measurements and predictions of flow in a gas turbine engine fuel nozzle [R]. AIAA 2000-0331.

(编辑: 梅 瑛)