

螺旋离心式喷嘴雾化特性试验与仿真研究

吴高杨, 苏凌宇, 聂万胜, 何浩波, 乔 野

(装备学院, 北京 101416)

摘 要: 为了研究螺旋离心式喷嘴液膜形态及锥角变化规律, 运用高速摄影仪与 VOF 方法对该型喷嘴进行了不同喷注压降及不同背压下的雾化特性试验与数值仿真研究。试验与数值仿真结果分析表明: 提高喷注压降能明显加剧液膜一次破碎, 缩短破碎长度, 而提高背压对二次破碎的影响更明显, 更有助于改善雾化效果; 随着喷注压降与背压的提高, 液膜锥角均逐渐增大, 但改变背压对液膜锥角的影响明显小于改变喷注压降; 液膜锥角沿轴向增大且变化率逐渐减小, 最后锥角基本保持定值。数值仿真所得到的液膜形态及锥角与试验结果吻合较好。

关键词: 螺旋离心式喷嘴; 雾化特性; VOF 模型; 雾化锥角

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 06-0021-06

Experiment and simulation on atomization characteristics of screw centrifugal nozzle

WU Gaoyang, SU Lingyu, NIE Wansheng, HE Haobo, QIAO Ye

(Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: The spray morphology and angle variation law of screw centrifugal nozzle were researched via high-speed camera and volume of fluid (VOF) model at different injection pressure and back pressure. The results show that the primary breakup of drop can be exacerbated significantly and the broken length of drop can be shortened at higher injection pressure drop, and the greater impact on secondary breakup of drop will appear at the higher back pressure and it is helpful to improve atomization quality; with higher back pressure and injection pressure drop, the spray angle increases gradually to a constant value, but the increase of back pressure will have much smaller contribution to the angle gradient than the increase of injection pressure drop, it means that the influence of the former on spray angle is more significantly. The numerical simulation results of spray morphology and angle agree well with those of the experiment.

Keywords: screw centrifugal nozzle; atomization characteristic; VOF model; spray angle

收稿日期: 2015-03-20; 修回日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(91441123, 51206185)

作者简介: 吴高杨 (1991—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机

0 引言

离心式喷嘴是航空航天等与液体燃料燃烧相关领域运用最为广泛的雾化设备，其雾化特性为燃料后续的蒸发、混合与燃烧提供了初始条件，是影响整个燃烧过程的关键因素。

当前，对离心式喷嘴雾化特性研究的主要方法是试验与数值仿真。在试验研究方面，粒子图像测速仪（PIV）技术得到广泛运用，Holtzclaw 和 Jeng 利用该技术测量了透明离心式喷嘴内部的速度场^[1-2]。Takao 用接触探针测量了离心式喷嘴出口处的液膜厚度，并证明了喷嘴出口处液膜厚度的非均匀性^[3]。在国内，杨立军等运用高速动态测量分析系统研究了离心式喷嘴雾化特性，分析了喷嘴压降以及几何特性参数的变化对液膜相关参数和雾化场轴向速度的影响^[4-5]；张征等使用激光相位多普勒分析仪研究了双路离心式喷嘴的雾化特性^[6]。在数值研究方面，目前基于 VOF 模型的界面追踪法是在喷嘴雾化数值仿真研究中采用的主要方法之一^[7]，其他用于捕捉气液相交界面的方法还包括 Level set，Lagrangian，Arbitrary-Lagrangian-Euler（ALE）等^[8]。Ashraf 利用 VOF 方法分析了离心式喷嘴出口处的液膜厚度、

喷雾锥角以及速度分布，发现随着环境气体压力增高，喷嘴内部的气核直径小幅度减小^[9]。刘娟等基于 VOF 方法模拟了离心式喷嘴内部流动过程，得到了 15 个喷嘴构型的流量系数、液膜厚度以及雾化锥角^[10]。

由于试验测量设备的局限，当前试验还难以准确揭示喷嘴内部流动特征，而且由于计算资源与物理模型的不足，数值模拟仍然存在误差，不可能完全模拟真实的流场。因此，现阶段将试验与数值仿真相结合是研究喷嘴雾化特性的主要方法。

本文所涉及到的螺旋离心式喷嘴有别于常用的切向入口离心式喷嘴，关于后者的理论与经验公式难适用于前者，因此对前者的研究显得非常必要。本文基于试验与仿真 2 种方法对螺旋离心式喷嘴进行了研究，有助于进一步认识该类型离心式喷嘴的雾化特性。

1 试验研究

1.1 试验系统

雾化试验系统由试验工质供应系统、测量系统、控制系统、反压雾化舱、喷注器及其安装板等组成，如图 1 所示。

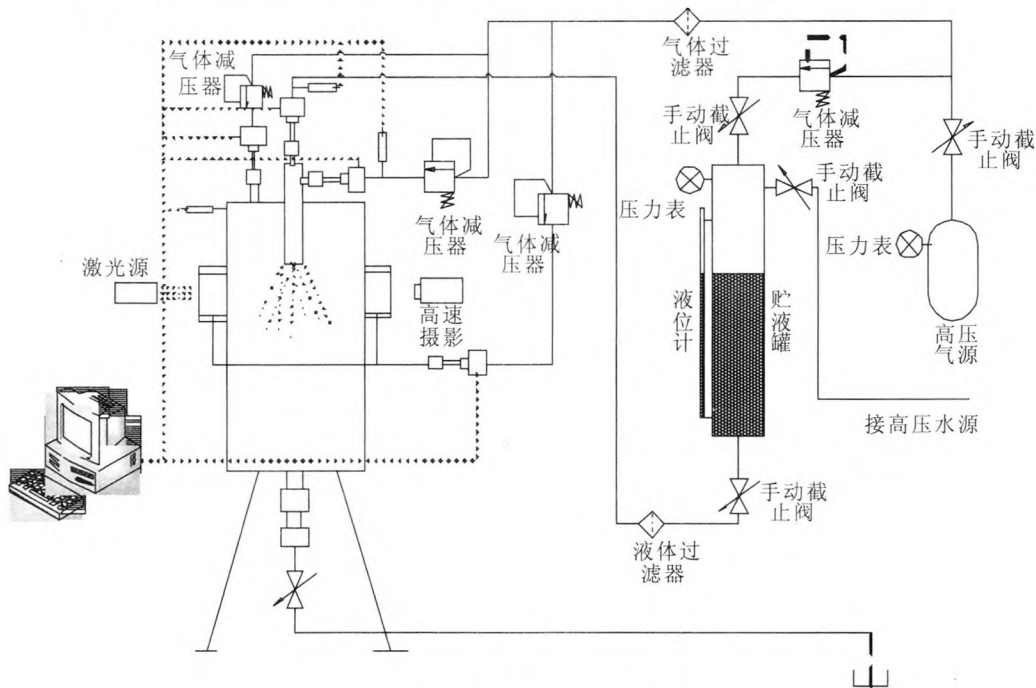


图 1 雾化试验系统示意图

Fig. 1 Schematic of spray test system

工质供应系统有 1 路液体供应和 2 路气体供应。液体供应系统由贮箱及增压系统、气动阀和减压器等部分组成, 贮箱工作压力上限为 7 MPa。气体供应系统由高压气源、气动阀和减压器等部分组成, 气源最高供应压力为 10 MPa。

测量系统由压力传感器、激励电源单元、数字显示单元、计算机采集系统、激光源和高速数字摄像机等部分组成。压力传感器是膜片电阻传感器。控制系统主要由控制信号模板、中继与显示模板、驱动模板和电源 4 部分构成。

图 2 给出了试验与仿真研究所使用的螺旋离心式喷嘴内流场结构简图。喷嘴由环形入口、2 道螺旋槽、旋流腔、收敛段及出口组成。

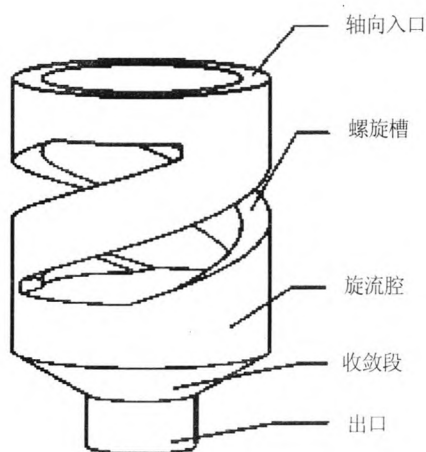


图 2 螺旋离心式喷嘴内流场示意图

Fig. 2 Schematic of flow field in screw centrifugal nozzle

1.2 试验结果分析

1.2.1 雾化形态分析

试验在常温下进行, 以水为工质。图 3 与图 4 分别为不同压降及背压下的雾化形态。从图 3 可知, 在背压力 $p_b=0.1$ MPa, 压降较低时, 喷嘴出口处形成了规整、清晰的液膜, 液膜表面存在较大幅度的波动; 随着压降的提高, 液膜边界的模糊区域逐渐向上移动, 液膜破碎长度逐渐减小, 雾化效果逐渐改善。研究证明对于液膜包括锥形液膜的一次破碎主要是由于液膜表面波动引起, 与液膜自身运动有直接关系。Stappe 研究表明低速液膜会不断拉伸, 且振幅沿运动方向增大, 最终撕裂液膜^[11], 这与图 3 中喷注压降 $\Delta p=0.07$ MPa 的试验结果相符。因喷注压降的增大, 液膜轴向速度与周向速度均增加, 表面波动频率提高, 所以致使液膜一次破碎加剧, 破碎长度减小。

由图 4 可知, 在 $\Delta p=0.3$ MPa 不变的情况下, 随着背压的升高, 破碎长度变化并不明显, 但雾化效果得到明显改善。这是因为在当前的压降下一次破碎已较为剧烈, 雾化效果主要取决于二次破碎, 即液滴破碎。影响二次破碎的主要因素是气动力与液相表面张力的比值, 即韦伯数 We , 随着 We 增大, 液滴破碎越细小, 雾化效果越好。 We 定义如下:

$$We = \frac{\rho_g U^2 d}{\sigma} \quad (1)$$

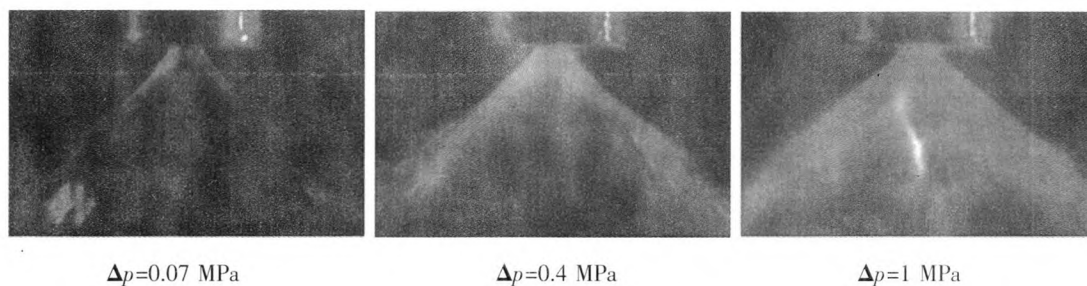
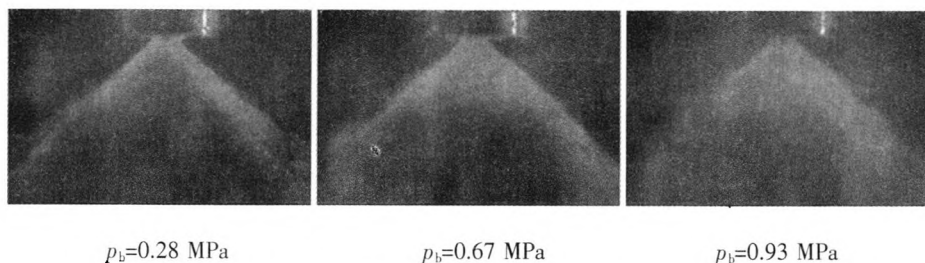


图 3 不同压降下雾化形态 ($p_b=0.1$ MPa)

Fig. 3 Atomization morphology at different Δp ($p_b=0.1$ MPa)

图 4 不同背压下雾化形态($\Delta p=0.3$ MPa)Fig. 4 Atomization morphology at different p_b ($\Delta p=0.3$ MPa)

式中: ρ_g , U , d , σ 分别表示气体密度、相对运动速度、液滴直径和液体表面张力系数。

由式 (1) 可知, 因背压的升高, We 随着气体密度增大而增大, 从而加剧了二次破碎, 所以随着背压的提高, 雾化效果得到明显改善。

1.2.2 雾化锥角分析

雾化锥角 α 的定义因研究目的的不同有多种定义方式。为了便于试验测量研究, 本文以液膜外边界与喷嘴中轴线的夹角为雾化半角的方式来定义^[12]。

图 5 给出了背压 $p_b=0.1$ MPa 条件下压降 Δp 分别为 0.07 MPa, 0.17 MPa, 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.65 MPa, 0.78 MPa 和 1 MPa 时的雾化锥角。由图可知, 喷雾锥角随着压降的增大而增大, 且递增趋于平缓。由最大流量原理可知^[13], 喷嘴流量不会随着压降的增大而无限增加, 其存在一个最大流量值, 则液膜出口速度也会逐渐趋于定值。由文献 [14] 可知, 雾化锥角可由液膜出口切向速度与轴向速度的比值来定义, 所以随着压降的增加, 液膜锥角也会逐渐趋于定值, 这与试验结果相符。

通过对试验所测得数据进行多项式拟合得到在大气环境压力以及试验进行的压降范围内该型喷嘴的雾化锥角与喷注压降近似呈二次函数关系, 函数关系式

$$\alpha = -7.52\Delta p^2 + 16.9\Delta p + 92.82 \quad (2)$$

图 6 给出了在喷注压降 Δp 为 0.3 MPa 及背压 p_b 分别为 0.1 MPa, 0.28 MPa, 0.45 MPa, 0.67 MPa, 0.77 MPa 和 0.93 MPa 时的雾化锥角。由图可知, 随着背压增加, 雾化锥角逐渐增大。

这与 Youngbin 等在试验中拍摄的离心式喷嘴雾化锥角随背压的变化趋势一致^[15]。这主要是因为背压的增加加剧了二次破碎, 液滴尺寸明显减小, 分布范围明显增大所致。

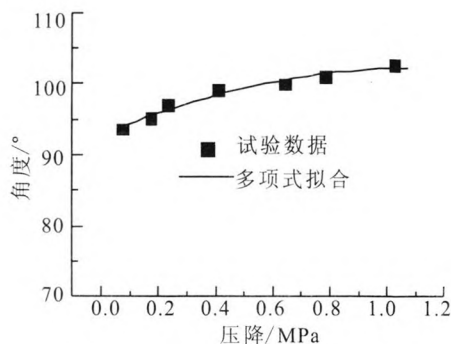


图 5 雾化锥角随压降变化关系

Fig. 5 Spray angle vs pressure drop

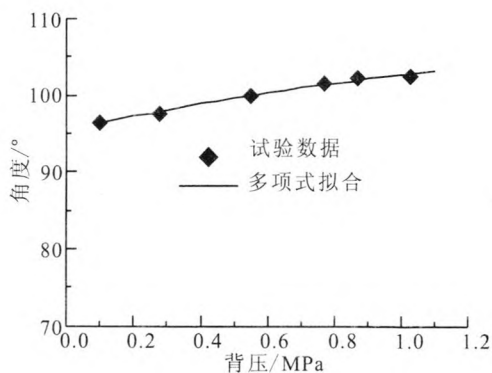


图 6 雾化锥角随背压变化关系

Fig. 6 Spray angle vs back pressure

对所测得数据经多项式拟合后, 得到在当前工况下雾化锥角与背压的关系式为

$$\alpha = -2.39p_b^2 + 9.65p_b + 95.38 \quad (3)$$

与式 (2) 比较可知, 式 (3) 中角度相对于压力的变化率较小。这说明在改变一个参量的情况下, 改变喷注压降对雾化锥角的影响明显大于改变背压的影响。

2 数值仿真研究

2.1 控制方程及求解设置

2.1.1 控制方程

基于 VOF 模型对该型喷嘴的雾化特性进行数值仿真研究。水与空气均按低速不可压处理, 则流动控制方程如下:

质量守恒方程

$$\nabla(\mathbf{V})=0 \tag{4}$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V})+\nabla \cdot(\rho \mathbf{V} \mathbf{V})=-\nabla p+\nabla \cdot\left[\mu\left(\nabla \mathbf{V}+\nabla \mathbf{V}^T\right)\right]+\rho \mathbf{g}+\mathbf{F} \tag{5}$$

式中: \mathbf{V} 为速度矢量; \mathbf{g} 为体积力; p 为压力。动量方程通过动力粘度 μ 与密度 ρ 与体积分数相关联。

对于两相不可压流动而言, VOF 模型体积分数方程可简化为

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} \nabla(h \mathbf{V})=0 \tag{6}$$

式中 h 表示第二相不可压流体在网格计算单元中所占的体积比。VOF 模型中只能包含一种可压缩流体, 且第一相的密度比第二相小, 在本文研究中将空气定义为第一相, 水为第二相。当 $h=0$ 时表示网格中全为空气; 当 $h=1$ 时表示网格中全为水; 当 h 介于 0 和 1 之间时表示网格中为水和空气的混合物。流体的密度与粘度通过如下公式得到:

$$\begin{aligned} \rho &=(1-h) \rho_g+h \rho_l \\ \mu &=(1-h) \mu_g+h \mu_l \end{aligned} \tag{7}$$

式中下标 g 与 l 分别表示气体与液体。

2.1.2 求解设置

采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型及标准壁面函数, 求解算法采用 SIMPLE 算法。出入口边界均设为压力边界, 边界设置参数如表 1 所示。

表 1 进出口压力设置

Tab. 1 Pressure setting at inlet/outlet	
进口表压/MPa	出口表压/MPa
0.17	0
0.4	
0.65	
1	

2.2 结果分析

图 7 给出了 3 个工况下 XY 平面内的液相分布图。由图可知, 液膜在喷嘴出口处有一弧形扩张段, 这与对应工况下的试验结果一致。说明液膜锥角沿轴向并不是保持恒定不变的, 而是逐渐增大, 且锥角变化率逐渐减小, 最后锥角保持定值。液膜厚度在液膜扩张的过程中同时逐渐减小, 最后破碎成液滴, 且随着压降提高, 液膜厚度变薄。根据液膜的变化可知, 液膜失去壁面约束后在离心力的作用下逐渐扩张, 直径增大, 致使液膜厚度变薄, 内部聚合力减小, 进而加速了液膜扩散并最终破裂。由此可知, 出口液膜厚度、直径及 3 个速度分量是影响液膜一次破碎的主要因素。

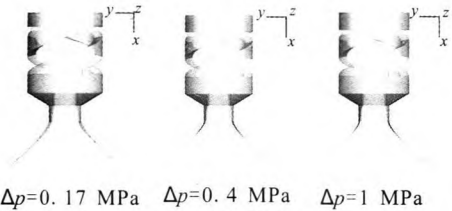


图 7 不同压降下液相分布(XY 平面)
Fig. 7 Liquid phase distribution at different Δp (XY plane)

为了揭示螺旋离心式喷嘴出口处的速度分布特征, 图 8 给出了压降 Δp 为 0.4 MPa 时, 喷嘴出口处沿 Y 轴方向的速度分布。由图可知, 气相在喷嘴出口中心区域存在回流, 在贴近液相附近为正向流动, 且整个气相区域随液相旋转, 这与常见的切向入口离心式喷嘴的气相流动状态相似。切向速度与轴向速度在液相区域均达到最大值, 且两者相差不大。因为螺旋槽的构型为液相

进入旋流室提供了初始的轴向速度,通过调节螺旋槽的升角等参数可以调节喷嘴出口处切向与轴向速度的比例,进而调节雾化锥角。这正体现了螺旋离心式喷嘴有别于切向入口离心式喷嘴的特点,切向入口式离心喷嘴出口处的切向速度往往较轴向速度大^[16]。

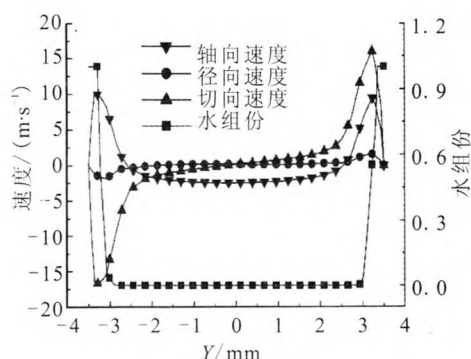


图 8 喷嘴出口速度分布

Fig. 8 Velocity distribution at outlet of nozzle

在大气环境中不同喷注压降下雾化锥角的仿真结果与试验结果见表 2。

表 2 雾化角试验与仿真结果

Tab. 2 Experiment/simulation results of spray angle

压降/MPa	试验角/(°)	仿真角/(°)
0.17	95.18	92.6
0.4	99.2	96.9
0.65	100	97.7
1	102.6	98.8

由表 2 中数据可知,仿真得到的锥角变化趋势与试验相同,两者最大误差为 3.7%,试验与数值仿真结果吻合很好。分析误差来源可知,误差主要存在于试验测量阶段。由于喷注压降在试验过程中不能保持恒定,有小幅下降,且在改变背压时,密闭容器的压力会随着水的喷入而有小幅上升,这些因素都会导致压力测量不准确且难以与拍摄图像精准对应起来。同时在角度测量上也存在人为误差。这些误差因素也是后续试验研

究时有待改进的地方。

3 结论

本文采用试验与数值仿真相结合的方法研究了螺旋离心式喷嘴雾化形态及锥角与喷注压降和背压的关系。得到结论如下:

1) 提高喷注压降能明显加剧液膜一次破碎,缩短破碎长度,而提高背压对二次破碎的影响更明显,有助于改善雾化效果。

2) 在当前试验工况下,随着喷注压降与背压提高,液膜锥角均逐渐增大。改变背压对液膜锥角的影响明显小于改变喷注压降。

3) 数值仿真所得到的液膜形态及锥角与试验结果吻合较好,但 2 种方法均存在误差,试验方法与物理模型有待进一步优化改进,且试验与仿真表明液膜锥角沿轴向逐渐增大,且变化率逐渐减小,最后锥角基本保持定值。

参考文献:

- [1] HOLTZCLAW D, SAKMAN T, BENJAMIN M A. Investigation of flow in a simplex fuel nozzle[J]. AIAA Journal, 1997, 33(7): 1-8.
- [2] JENG S M, JOG M A, BENJAMIN M A. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle[J]. AIAA Journal, 1998, 36(2): 201-207.
- [3] INAMURA T, TAMURA H, SAKAMOTO H. Characteristics of liquid film and spray injected from swirl coaxial injector[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(4): 632-639.
- [4] 杨立军,葛明和,张向阳,等. 喷口长度对离心喷嘴雾化特性的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 209-214.
- [5] 杨立军,葛明和,张向阳. 液体离心喷嘴雾化场动态特性的初步研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 1803-1807.
- [6] 张征,樊未军,杨茂林. 双路离心式喷嘴雾化特性研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 153-156.
- [7] 赵大勇,李伟仲. VOF 方法中几种界面重构技术的比较[J]. 热科学技术, 2003, 2(4): 318-323.
- [8] 岳明,徐航,杨茂林. 离心式喷嘴内气液两相流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 888-890.

(下转第 79 页)

4 结论

以制造单元模式鲁棒性理论为基础, 采用层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 与模糊综合评价法研究了影响制造单元系统稳定性的因素, 得出了制造单元系统稳定性运行的评判准则, 即制造单元鲁棒性因子 $I_j > 70\%$, 产品不合格率 $< 5\%$, 生产准备时间 $F_j \cong 0$ 。阀体制造单元模式的运行和计算表明: 阀体制造单元鲁棒性因子 $I_j = 94\%$, 表明阀体制造单元系统处于稳定运行状态; 阀体制造单元模式生产周期降低了 78.5%; 生产成本比原来降低了 31.8%; 阀体生产制造与组织管理能力得到了明显提高; 不仅提高了阀体制造生产效率, 而且提高了阀体制造生产经济效益。

参考文献:

- [1] 刘飞. 先进制造系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.
- [2] 王国平, 胡新平. 首都航天机械公司集成制造系统顶层设计[J]. 航天制造技术, 2005: 9-10.
- [3] 王国平, 胡新平, 刘欣, 等. 传统组件制造单元在首都机械公司的实践[J]. 航天制造技术, 2006: 4-6.
- [4] 周平来, 刘胤, 尉世厚, 等. 太阳翼基板单元制造模式实践研究[J]. 航天制造技术, 2012(12): 5-7.
- [5] 刘志峰, 李钢. 绿色设计与绿色制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [6] 刘胜军. 精益“一个流”单元生产 [M]. 深圳: 海天出版社, 2009.
- [7] 刘志峰, 李钢. 绿色设计与绿色制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [8] 马玉敏, 陈斌森. 单元化制造系统评价体系[J]. 同济大学学报, 2003(11): 1324-1327.

(编辑: 王建喜)

(上接第 26 页)

- [9] IBRAHIM A A, JOG M A. Nonlinear breakup model for a liquid sheet emanating from a pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2007, 129(4): 945-953.
- [10] 刘娟, 孙明波, 李清廉, 等. 基于 VOF 方法分析离心式喷嘴结构参数对性能影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2826-2833.
- [11] STAPPER B E, SOWA W A, SAMUELSON G S. An experimental study of the effects of liquid proportion on the breakup of a two-dimensional liquid sheets [J]. ASME Journal of Engineering of Gas Turbines and Power, 1992, 114(1): 39-45.
- [12] RIJZK N K, LEFEBVRE A H. Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 2004(1/2): 65-74.
- [13] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [14] KIM D, IM J H, KOH H. Effect of ambient gas density on spray characteristics of swirling liquid sheets[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(3): 603-611.
- [15] YOON Y, JEUNG I S. Effects of ambient gas pressure on the breakup of sprays in like-doublet and swirl coaxial injectors [C/OL]. International Symposium on Energy Conversion Fundamentals. Istanbul, Turkey, June 21-25, 2004[2015-03-02]. <http://www.researchgate.net/publication/235065914>.
- [16] 刘娟, 李清廉, 王振国, 等. 基于 VOF 方法模拟离心式喷嘴内部流动过程[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 1986-1994.

(编辑: 陈红霞)