

文章编号: 1000-8055(2010)10-2261-06

横向气流中的液体圆形射流破碎实验

朱 英, 黄 勇, 王 方, 王雄辉

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用了高速摄像仪对横向气流场中的液体圆形射流破碎过程进行了研究. 实验中使用的喷嘴喷孔直径为 0.3 mm, 研究液体工质采用水, 液气两相动量通量比的范围为 10.2~80. 结果表明, 射流表面初始波动是蛇形波动, 在气动力作用下逐渐发展成螺旋状表面波, 最终增长到一定程度使得液体断开. 随着气流速度的增加, 气动力在射流破碎过程中将取代表面张力而占据主导地位, 而且螺旋状表面波幅值会随气流速度增加而增加. 射流运动轨迹脉动幅度随气流速度增加而增强, 随射流速度增加而减弱. 同时给出了射流破碎位置坐标与液气两相动量通量比之间的关系式, 以及射流液柱在破碎点之前类似抛物线的轨迹曲线公式.

关 键 词: 液体圆形射流; 横向气流; 破碎机理; 射流轨迹; 高速摄像仪

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Experiment on the breakup of round liquid jets in cross airflows

ZHU Ying, HUANG Yong, WANG Fang, WANG Xiong-hui

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,

School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,

Beijing 100191, China)

Abstract: An experiment was conducted to investigate the breakup processes of round liquid jets in cross airflow with a high-speed video camera. The orifice diameter of the nozzle was 0.3 mm and the liquid used in the test was water. The liquid to air momentum flux ratio varied from 10.2 to 80. The results indicate that the initial surface waves are sinuous, which will be developed into spiral waves by aerodynamic force. When the spiral waves grow large enough, the liquid column will be either pinched due to surface tension or cut by aerodynamic force, depending on the cross airflow velocity. The amplitude of the spiral wave is increased with the rising cross airflow velocity. The fluctuations of the liquid jets trajectories are larger for higher airflow velocities, and weaker for higher liquid jet velocities. The correlations between the coordinates of the jet breakup locations and the liquid to air momentum flux ratio were concluded. The equation of the trajectory like parabola curve was derived for the jet column trajectory before breakup.

Key words: round liquid jets; cross airflow; breakup mechanism; jet trajectory; high-speed video camera

气体环境中的液体燃料喷射后的破碎及雾化, 是内燃机、航空发动机等领域的重要技术. 相比简单的自由射流雾化过程, 横向气流场中的射

流破碎形式和特征都有所不同, 而这种形式的雾化在诸如航空发动机加力燃烧室、冲压发动机燃烧室、乃至旋流器径向喷射等新概念设计中都有

收稿日期: 2009-10-09; 修订日期: 2010-01-11

作者简介: 朱英(1981-), 男, 湖北荆州人, 博士生, 主要研究方向为航空发动机液体燃料雾化.

着广泛的应用. 为了透彻研究横向气流场中液体射流雾化机理, 多年以来, 国内外学者对其进行了大量的实验和理论研究.

目前为止, 国内外研究最多的是横向射流雾化后穿透深度、液滴尺寸、以及体积通量等喷雾场特性^[1-4], 也有采用 PIV (particle image velocimetry) 测量该类型喷雾场速度分布的实验^[5], 气相流场方面, Pulat^[6] 测量了绕过液体射流时的气流尾迹特性并以此分析其对液体射流的破碎影响, 这类宏观结果对于研究横向射流初始雾化破碎机理而言还不够. Sallam 等^[7] 和 Mazallon 等^[8] 的实验中研究了非湍流射流在横向气流场中初始雾化的特性, 提出了横向气流场中液体圆形射流雾化过程, 与单个液滴在高速气流中的雾化破碎过程有很多相似之处, 比如破碎时间, 破碎形式(袋式或剪切模式), 为研究横向射流的破碎过程提供了值得借鉴的思路. 但是目前为止, 关于横向气流中液体射流发生初始破碎的过程, 研究还不够深入, 导致关于该雾化问题的雾化破碎模型和实际情况差别较远, 也影响到选取雾化模型对其进行数值模拟研究的效果, 例如文献[9]中直接假设喷射的液体射流为一系列的单个液滴喷入气流场, 其结果中贴近壁面附近液雾粒子体积分数与实际差别较大.

基于横向射流破碎过程机理研究的重要性, 本文实验采用高速摄像拍摄方法, 得到横向射流的高频动态破碎过程图片, 然后对其进行处理与分析, 找到影响破碎的表面波特征、破碎点位置以及运动轨迹脉动规律, 从而深入研究液体圆形射流在横向气流中变形破碎过程的机理.

1 实验系统

本文采用的实验系统如图 1, 实验横向气流气源由北京航空航天大学热动力工程研究所压力储气罐提供, 最高储气压力 0.8 MPa, 实验用气流经过扩张、蜂窝板整流段和压缩段之后, 流入观测段, 其四边均为有机玻璃, 截面尺寸高 100 mm × 宽 40 mm, 观测段入口装有总静压差压计, 用以测量横向气流流速. 液路供应系统采用的是气瓶高压空气挤压式, 详细介绍参考文献[10-12]. 实验用液体工质为水, 喷嘴采用直射式圆形喷孔, 内径 $d_0 = 0.3\text{ mm}$, 为了保证液体射流出喷口前充分发展, 喷孔长径比为 $L/d_0 = 40$, 上游供液管路内径为 4 mm, 在其与喷孔段之间的锥面收缩段可以避免空泡现象发生. 喷嘴安装在观测段底面中线上,

离观测段进口距离为 70 mm, 安装之后喷口平面与观测段内壁面平齐. 实验观察采用的光源为 300 W 碘钨灯, 高速摄像仪型号为美国 IDT (Integrated Design Tools) 公司的 X-stream VISION XS-3, 拍摄频率最高可达 13 000 Hz, 曝光时间范围为 10~ 30 μs , 经过之前的实验验证^[10-12], 相同的实验方法完全可以满足本文研究的要求. 实验参考坐标选取喷嘴出口中心为原点, 气流方向为 x 轴方向, 液体射流方向为 y 轴方向.

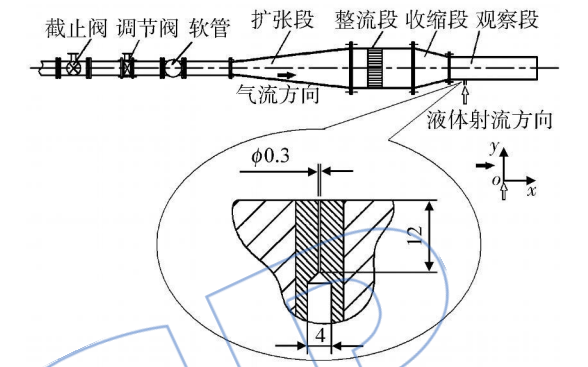


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematics of test rig

主要的实验工况参数见表 1, 表中实验参数的下标 j 表示射流参数, a 表示上游来流空气的参数, 空气密度和液滴密度、动力黏度、表面张力系数等参数分别取的是室温为 25 $^{\circ}\text{C}$ 下的值.

表 1 实验工况参数

Table 1 Experimental operation parameters

实验参数	参数值
温度 T/K	298
液体射流速度 $v_j/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.8~ 7.8
横向气流速度 $u_a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	25.6~ 35.1
液/气动量通量比 $q = \rho_j v_j^2 / \rho_a u_a^2$	10.2~ 80
射流 Reynolds 数 $Re_j = \rho_j v_j d_0 / \mu_j$	1 390~ 2 853
射流 Weber 数 $We_j = \rho_j v_j^2 d_0 / \sigma$	60~ 253.5
射流 Ohnesorge 数 $Oh = \mu_j / (\rho_j \sigma d_0)^{0.5}$	0.0026

2 实验结果及分析

2.1 横向液体射流表面波特征

在不同的横向气流速度和射流速度下, 射流表面波的形式也不相同, 其沿着下游方向发展最终影响破碎过程的特点也不一样.

图 2~ 图 4 为相同气流速度为 25.6 m/s 时, 液体射流速度从 3.8 m/s 增加到 7.8 m/s, 射流表

面波及破碎过程. 图 2~ 图 4 中气流方向从上至下, 射流方向从左至右, 图片最左边位置为喷口下游沿喷射方向距离 d_0 处. 从图 2~ 图 4 中可以看出三种工况下, 射流表面一开始都是光滑无波动, 下游某处开始出现小幅度蛇形波动, 然后波动在气动力作用下增长放大, 形式也变成螺旋状, 一个波长长度内的液体被逐渐拉长, 最终在表面张力作用下断开, 形成大尺寸的液滴. 由于非线性原理, 一个波长段的液柱不会只生成一个大液滴, 同时也有小液滴生成, 该现象类似于文献[10] 中的喷射到静止空气中的自由射流破碎过程中附带形成小液滴的情况. 两者所不同的是, 本文横向气流中的射流表面出现的初始波动是非对称的蛇形波动, 而不是低速自由射流表面的轴对称波动, 原因是横向气流的气动力作用下迎风面和背风面受力不平衡, 失去了轴对称表面波形成的条件. 经过测

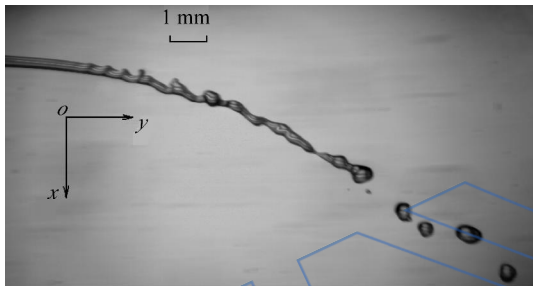


图 2 工况 $u_a=25.6\text{ m/s}$, $v_j=3.8\text{ m/s}$ 时的射流变形破碎结果

Fig. 2 Breakup process of the liquid jet at $u_a=25.6\text{ m/s}$, $v_j=3.8\text{ m/s}$

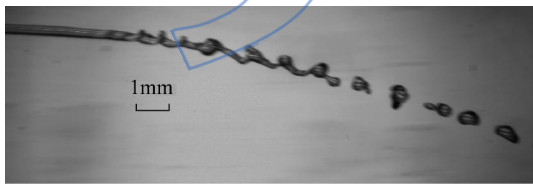


图 3 工况 $u_a=25.6\text{ m/s}$, $v_j=5.7\text{ m/s}$ 时的射流变形破碎结果

Fig. 3 Breakup process of the liquid jet at $u_a=25.6\text{ m/s}$, $v_j=5.7\text{ m/s}$



图 4 工况 $u_a=25.6\text{ m/s}$, $v_j=7.8\text{ m/s}$ 时的射流变形破碎结果

Fig. 4 Breakup process of the liquid jet at $u_a=25.6\text{ m/s}$, $v_j=7.8\text{ m/s}$

量, 对于射流速度为 $3.8, 5.7, 7.8\text{ m/s}$ 的工况, 初始出现小幅度波动位置位于沿射流下游 $7.8d_0, 12.1d_0$ 和 $15.8d_0$ 处. 可见, 随着射流速度增加, 发生初始扰动的位置也相应往下游移动增加.

图 5~ 图 7 所示气流速度为 35.1 m/s 时, 液体射流速度从 3.8 m/s 增加到 7.8 m/s , 射流表面波及破碎过程结果, 图片位置和方向与图 2~ 图 4 三幅图片相同. 从图中可以看出三种工况下, 射流表面依然是光滑没有波动的, 但是下游出现的初

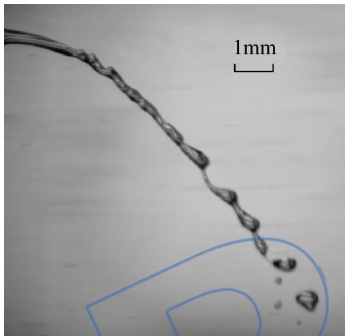


图 5 工况 $u_a=35.1\text{ m/s}$, $v_j=3.8\text{ m/s}$ 时的射流变形破碎结果

Fig. 5 Breakup process of the liquid jet at $u_a=35.1\text{ m/s}$, $v_j=3.8\text{ m/s}$

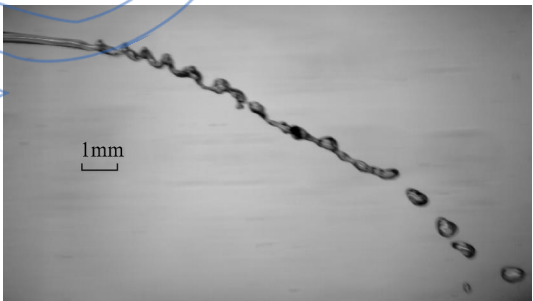


图 6 工况 $u_a=35.1\text{ m/s}$, $v_j=5.7\text{ m/s}$ 时的射流变形破碎结果

Fig. 6 Breakup process of the liquid jet at $u_a=35.1\text{ m/s}$, $v_j=5.7\text{ m/s}$

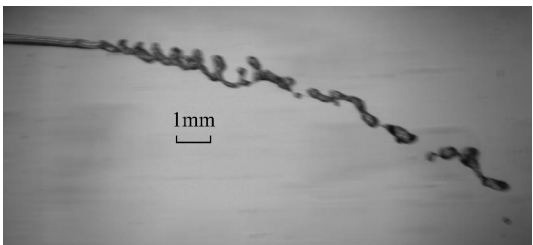


图 7 工况 $u_a=35.1\text{ m/s}$, $v_j=7.8\text{ m/s}$ 时的射流变形破碎结果

Fig. 7 Breakup process of the liquid jet at $u_a=35.1\text{ m/s}$, $v_j=7.8\text{ m/s}$

始小幅度蛇形波动已经不明显了, 这种波动出现之后很快就发展为螺旋状的大幅度波动, 而且气动力作用下螺旋状波动的幅值明显比前述气流速度工况下的波动幅值要大. 在图 7 中, 甚至出现了射流表面的波动幅值过大, 波谷处已经被高速气流吹的很薄的现象, 有点类似高速气流中液滴袋式破碎(bag breakup)的雏形, 这是由于横向气流速度增大, 进入气流场液体射流表面受到的剪切效果更强, 以至于在射流液柱断开过程中表面张力已经不起主导作用了, 气动力开始主导液柱断开的过程, 射流破碎之后生成的液滴尺寸也明显变小了. 三个工况下, 射流表面出现初始波动的位置变化不大, 约为沿着射流轨迹下游 $9d_0$ 处.

2.2 射流破碎过程的轨迹特征

由于气流和射流本身的脉动特性, 射流运动轨迹也是脉动的, 本文实验中, 高速摄影仪拍摄得到一系列连续的射流破碎图片, 在此基础上测量单帧图片中的射流位置, 就能得到轨迹以及其脉动特征.

图 8 所示为射流运动轨迹脉动多幅图片叠加的结果, 该图的实验工况是气流速度 35.1 m/s , 液体射流速度为 5.7 m/s , 由于实验中利用高速摄影仪拍摄可以得到射流破碎脉动过程的一系列动态图片, 该图显示的结果是提取其中一部分图片叠加而成, 可以清楚的看到射流运动轨迹在横向气流场里面脉动的效果. 随后, 本文在单张图片中测量记录得到相应的射流表面位置, 即可得到不同工况下, 射流运动轨迹的坐标.

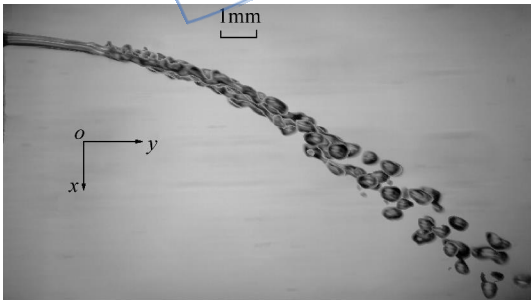


图 8 典型的射流轨迹脉动叠加图
Fig. 8 Typical result of the jet fluctuation by overlapping tested successive images

实验得到的气流速度分别为 25.6 m/s 和 35.1 m/s 时, 射流速度分别为 $3.8, 5.7\text{ m/s}$ 和 7.8 m/s 时的射流运动轨迹及脉动结果如图 9 所示. 从图中可以看出, 随着射流速度增加, 射流在横向气流中的弯曲程度减小; 而对于同样的射流速度,

增加横向气流速度会使射流的弯曲程度增大. 上述射流弯曲程度的变化规律, 很容易用宏观力学原理解释, 结合无量纲量液/气动量通量比 q , 射流运动轨迹的规律是随着 q 的增加, 射流动量越大, 在横向气流场中穿透越深, 弯曲程度也越小.

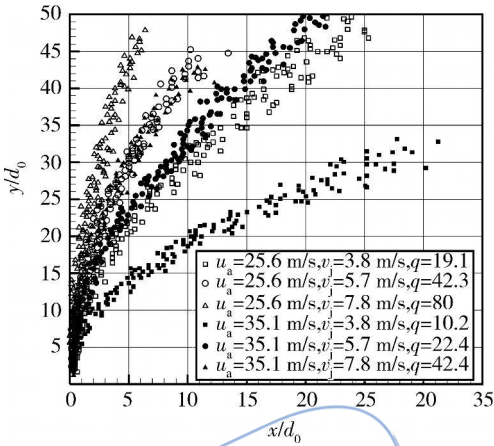


图 9 不同工况下的射流运动轨迹
Fig. 9 Trajectories of the liquid jets for all cases

除此之外, 对于本文实验射流破碎过程的连续高频采集图片进行统计, 发现射流轨迹脉动的一些规律. 保持射流速度不变时, 气流速度的增加, 射流脉动幅度也增加, 如图 9 中比较相同形状的空心图标与实心图标之间的结果所示; 而保持气流速度不变时, 射流速度的增加会减弱射流的脉动, 如图 9 中比较空心正方形、空心圆、空心三角所示结果, 以及比较实心正放心、实心圆、实心三角所示的结果. 分析其原因, 气流速度增加时, 湍流脉动也增强, 在气流气动力加速射流的过程中, 动量的传输脉动也更强烈一些. 而保持气流速度不变时, 液体射流速度增加, 在破碎点之前, 经历的时间变化不大, 在同样量级的时间内, 射流和气流之间还没有来得及完成同样程度的动量传输就破碎了, 所以脉动程度就没有那么强烈了.

2.3 核心射流破碎位置

如前所述, 射流破碎过程中, 先发生初始小幅度波动, 然后在气动力作用下, 这种波动变形拉伸形成螺旋状的大幅值波动, 根据气流速度不同, 最终在表面张力或者气动力主导作用下, 柱状的射流掐断, 该位置即为核心射流破碎位置.

图 10 所示为各种工况下的核心射流破碎位置及其脉动结果, 每种工况分别取了 15 个数据, 从图中可以看出来破碎点位置和液/气动量通量比 q 有关, 空心圆圈表示的 $q=42.3$ 时的破碎位置和实心三角表示的 $q=42.4$ 时的破碎位置非常

接近, 同样空心方块表示的 $q=19.1$ 时的破碎位置和实心圆圈表示的 $q=22.4$ 时的破碎位置也比较接近.

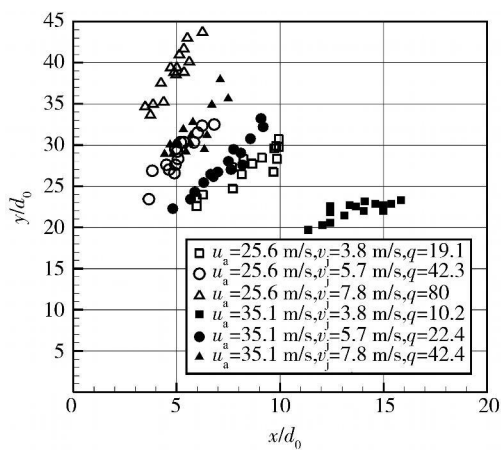


图 10 不同工况下核心射流破碎位置脉动结果
Fig. 10 Fluctuations of the breakup points of the liquid columns

对破碎位置的脉动进行统计, 即可得到时间平均后的破碎位置坐标 x_b/d_0 和 y_b/d_0 , 根据气动力作用下的牛顿第二定律原理, 射流弯曲轨迹应该近似为抛物线形式, 而破碎点又位于射流轨迹曲线上, 所以对于相同的液/气动量通量比, y_b/d_0 和 $(x_b/d_0)^{0.5}$ 成近似比例. 通过已有实验结果数据点, 可以得到 $(x_b/d_0)^{0.5}$ 和 y_b/d_0 与液/气动量通量比 q 的关系, 再反推可近似得到射流弯曲轨迹曲线公式. 图 11 所示为 $\lg(x_b/d_0)^{0.5}$ 和 $\lg(y_b/d_0)$ 与 $\lg q$ 的关系, 图中线性拟合相关系数

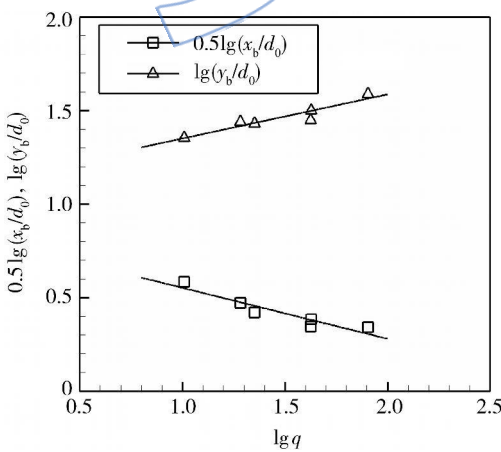


图 11 射流平均破碎位置坐标与液气动量通量比之间关系对数拟合结果
Fig. 11 Correlations between the coordinates of averaged jet breakup locations and the liquid/ air momentum flux ratio

分别为 -0.938 和 0.941 .
根据该线性拟合曲线, 可以得到破碎位置坐标公式如下:

$$\sqrt{x_b/d_0} = 6.68q^{-0.273} \tag{1}$$

$$y_b/d_0 = 12.88q^{0.235} \tag{2}$$

合并式 (1) 和 (2), 可以得到破碎点之前射流弯曲轨迹公式

$$y/d_0 = 1.93q^{0.508}(x/d_0)^{0.5}$$

3 结 论

- 1) 测量了射流初始表面波出现的位置, 该初始波动是蛇形波动, 在气动力影响下逐渐发展成螺旋状表面波, 最终增长到一定程度使得液体断开. 而随着气流速度的增加, 气动力在射流破碎过程中将取代表面张力而占据主导地位.
- 2) 总结了射流运动轨迹的规律, 随着无量纲量液/气动量通量比的增加, 射流弯曲程度减小, 反之则弯曲程度增大.
- 3) 射流运动轨迹脉动强弱受横向气流和液体射流速度影响, 脉动幅度随前者增加而增强, 后者增加而减弱.
- 4) 得到了射流破碎点脉动的结果, 并给出了平均破碎点坐标与液/气动量通量比之间的关系式.
- 5) 给出了破碎点之前的射流破碎轨迹曲线公式, 该曲线近似于抛物线.

参考文献:

[1] Tambe S B, Jeng S M, Mongia H, et al. Liquid jets in subsonic crossflow [R]. AIAA Paper 2005 731, 2005.

[2] Wu P K, Kirkendall K A, Fuller R P, et al. Spray structures of liquid fuel jets atomized in subsonic crossflows [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14 (2): 173-182.

[3] Becker J, Hassa C. Breakup and atomization of a kerosene jet in crossflow at elevated pressure [J]. Atomization and Sprays, 2002, 11: 49-67.

[4] 俞刚, 张新宇, 李建国. 超声速气流中的煤油喷雾研究[J]. 流体力学实验与测量, 2001, 15(4): 12-14.

YU Gang, ZHANG Xinyu, LI Jianguo. Investigation of kerosene spray atomization in supersonic flow [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2001, 15(4): 12-14. (in Chinese)

[5] Gopalan S, Abraham B M, Katz J. The structure of a jet in cross flow at low velocity ratios [J]. Physics of Fluids, 2004, 16(6): 2067-2087.

[6] Pulat O A. Break up of a round liquid jet in a low Weber number cross flow [D]. Norman, Oklahoma: Thesis, Uni

- versity of Oklahoma, 2007.
- [7] Sallam K A, Aalburg C, Faeth G M. Breakup of round non-turbulent liquid jets in gaseous crossflows [R]. AIAA Paper 2003-1326, 2003.
- [8] Mazallon J, Dai Z, Faeth G M. Aerodynamic primary breakup at the surface of nonturbulent round liquid jets in crossflow [R]. AIAA Paper 1998-716, 1998.
- [9] 岳连捷, 俞刚. 超声速气流中横向煤油射流的数值模拟 [J]. 推进技术, 2004, 25(1): 11-14.
YUE Lianjie, YU Gang. Numerical simulation of kerosene spray in supersonic cross flow [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 11-14. (in Chinese)
- [10] 朱英, 黄勇, 郭志辉. 液体圆形射流变形破碎及破碎长度实验 [R]. 吉林: 冲压发动机技术交流会, 2005.
ZHU Ying, HUANG Yong, GUO Zhihui. Experiment on round liquid jet deformation and breakup length [R]. Jilin: Symposium of Ramjet Engine Technology, 2005. (in Chinese)
- [11] Zhu Y, Wan Y X, Huang Y, et al. Study on the breakup lengths of free round liquid jets [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1258-1263.
- [12] 万云霞, 黄勇, 朱英. 液体圆柱射流破碎过程的实验 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 208-214.
WAN Yunxia, HUANG Yong, ZHU Ying. Experiment on the breakup process of free round liquid jet [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 208-214. (in Chinese)