

射流撞击雾化液滴运动过程与 粒径分布特性的试验研究

费 俊, 孙 璠, 杨伟东, 付幼明, 王 勇

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 在大气环境下, 以水为介质, 采用 PDPA 和高速动态分析系统, 针对直流撞击式喷注单元的雾场结构进行试验研究, 获得了雾化液滴速度分布、粒径分布等试验参数。从液滴运动及液滴大小分布的角度针对撞击雾化液膜破碎成液滴的过程进行了分析, 发现水平面上雾化液滴的径向速度以原点为中心对称, 且随离原点距离增大而增大; 初始雾化阶段的粒径大小分布则与径向速度分布相反。分析认为是液膜运动过程赋予了雾化液滴的初始速度, 并影响了初始雾化液滴的分布特性。

关键词: 直流撞击喷注单元; 雾化液滴; 液膜; 速度分布

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0010-05

Experimental analysis on movement and size distribution of atomized droplets from impinging liquid jet

FEI Jun, SUN Fan, YANG Wei-dong, FU You-ming, WANG Yong

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The experimental study on atomization formation and size distribution of water droplets from the impinging liquid jets was executed in atmosphere environment by using PDPA and high speed dynamic analysis system. The movement and the size distribution of droplets were analyzed. It is found that the radial velocity of droplets on horizontal plane is centrosymmetric and increases as the increasing distance from the center to the measuring point. The size distribution of droplets in the initial stage of atomization is contrary to that of radial velocity. It is believed that the initial velocity of atomization droplets and the size distribution of droplets during the initial stage of atomization are both influenced by the movement of liquid sheet.

Keywords: impinging injector; atomized droplets; liquid sheet; velocity distribution

收稿日期: 2014-06-13; 修回日期: 2014-07-09

基金项目: 国家重大基础研究项目 (613193)

作者简介: 费俊 (1981—), 女, 博士, 研究领域为液体火箭发动机基础理论

0 引言

直流撞击式喷嘴具有结构简单、制造成本低、混合效率高等优点, 目前已广泛应用于液体火箭发动机中。撞击式喷注雾化是工质在高压喷头作用下进行喷注, 使两股液体射流以一定角度进行撞击, 经过撞击滞止之后, 液体在撞击波、表面张力、气动力、粘性等作用下破碎成液滴, 实现雾化。

针对直流撞击雾化过程已经进行了大量的基础研究。W.E. Anderson 等人通过试验研究了撞击式喷嘴的雾化角、射流速度对液滴尺寸、液膜破碎长度、撞击波等的影响, 并以线性稳定性模型模拟了液膜破碎和雾化过程^[1]。H. M. Ryan 等人对撞击式喷嘴分别在层流和湍流条件下液膜破碎过程进行了研究, 并采用线性稳定性模型对不稳定波及其增长过程进行了研究, 研究结果认为射流速度与湍流强度对撞击式喷嘴雾化过程有强烈作用^[2]。P.A. Strakey 等人研究了射流速率与室压对撞击式喷嘴的液膜破碎长度、平均粒径及粒径分布特性的影响, 研究发现液膜长度随着射流速率与室内气体密度的增大而减小, 液滴尺寸和室压与距离撞击点的轴向长度存在非线性关系^[3]。P. Vassallo 等人以双击和四对喷注单元的撞击式喷嘴为研究对象, 研究了流动速度对雾化特性影响, 发现随着流速增大, 粒径减小^[4]。张蒙正等人采用激光全息及图像处理技术, 研究了双股互击式喷嘴结构参数对雾化性能的影响, 总结出了喷雾的索特尔平均直径的经验公式; 还对双股互击式喷嘴的撞击角、射流速度、射流初始状态和在液流中预混入气体对凝胶水雾化性能的影响进行了试验研究, 并与水进行了对比^[5-6]。Chen Xiaodong 等人采用 VOF 模型、表面张力模型结合八叉树自适应网格对两股射流撞击形成的液膜的动态特性进行了研究^[7]。Ma Dongjun 等人利用 VOF 方法结合 AMR 技术, 对射流撞击雾化形式和液膜破碎等现象进行了数值模拟^[8]。强洪夫等人基于光滑粒子流体动力学方法(SPH)对射流撞击形成液膜过程进行了数值模拟, 对撞击雾化模型进行了合理简化, 并与试验得到的液膜图像进行了对

比^[9]。Chihiro Inoue 等人通过数值模拟的方法对撞击式喷嘴的雾化特性进行了研究, 发现液膜的动态特性对下游的液丝和液滴的分布有重要影响^[10]。

目前, 对雾场形成过程的研究以撞击波产生过程、液膜液丝破碎等为主要研究对象, 但由于雾化过程复杂、速度快, 通过试验手段获得的雾场内某个时刻的当地现象, 不能完全得到雾场形成的整个顺序过程; 同时, 尚没有一个完善的理论模型可以较为全面地对射流撞击的雾化特性进行合理分析预测。

本文以直流撞击式喷注单元为研究对象, 采用光学诊断设备(高速动态分析系统、PDPA)对撞击雾化过程进行试验研究, 从分析液滴的速度分布以及粒径分布特性的角度理解雾场的形成过程以及射流流量对雾场粒径分布特性的影响。

1 试验装置及测量方法

1.1 研究对象

雾化喷嘴结构如图 1 所示, 是两股射流撞击雾化喷嘴, 通道孔径为 1 mm, 两个通道的中心线成一定夹角, 使水通过通道喷出后以一定撞击角在下游进行撞击, 两股直流射流在撞击时发生强烈的动量交换和能量交换, 在大气开式环境中完成撞击雾化过程。

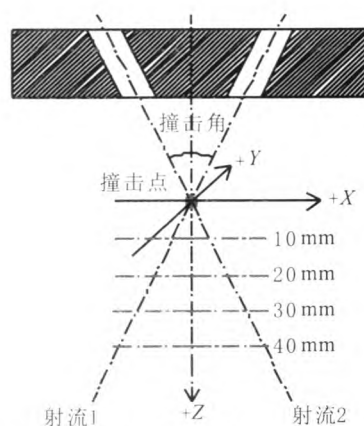


图 1 喷注单元试验件及试验测点坐标方向示意图

Fig. 1 Configuration of impinging injector and coordinate direction of measuring point

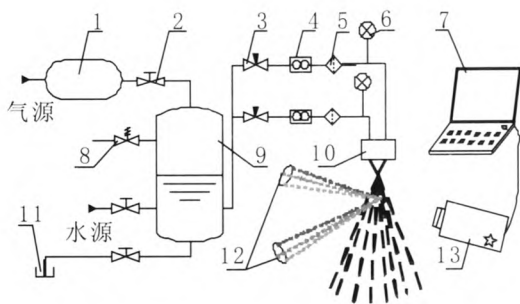
在试验中, 采用的测试点位置以撞击点为原点, 向竖直方向以下选取了四个不同高度的 XY

水平面进行测量。两股射流在 XZ 平面上以一定角度进行撞击，因此，以 XZ 面为雾场侧面，以 YZ 面为雾场正面，如图 1 所示。

1.2 试验系统与测量仪器

雾化试验系统如图 2 所示，主要由介质供应系统和光学诊断系统组成。介质供应系统包括贮箱、安全阀、手动阀、质量流量计和压力传感器等。介质在气压作用下通过一系列控制阀门进入雾化喷嘴，流量通过质量流量计测量。

光学系统主要采用高速动态分析系统与 PDPA 系统。高速动态分析系统主要由光源、高速摄影机和图像分析处理系统组成，拍摄速度为 6 200 幅 / 秒。摄影机垂直于雾场拍摄。采用 Matlab 图像处理方法对图像进行处理获得雾场结构图。PDPA 系统可对雾场内给定位置处液滴的粒径进行测量，从而获得不同位置处液滴粒径尺寸，以 5 000 个有效粒子为准进行平均获得液滴的平均直径，进而获得雾场的粒径分布特性。



1-气体贮箱；2-手动阀；3-锥阀；4-流量计；5-过滤器；
6-压力传感器；7-计算机；8-安全阀；9-液体贮箱；
10-试验喷嘴；11-水槽；12-激光器；13-PDPA 接收器

图 2 试验系统

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

2 试验结果及分析

2.1 射流撞击雾场内液滴运动过程分析

图 3 给出了单股射流流量分别为 20 g/s 与 5 g/s、动量比为 1 时的雾场正面和侧面图像，该图像采用高速动态系统拍摄。从图 3 可见，雾场

正面的雾化角明显大于侧面的雾化角，可知，在两股射流撞击滞止之后，由于产生了动量与能量交换，撞击点之后的速度方向发生了变化。大部分的介质向射流所在的 XZ 平面的法向运动。

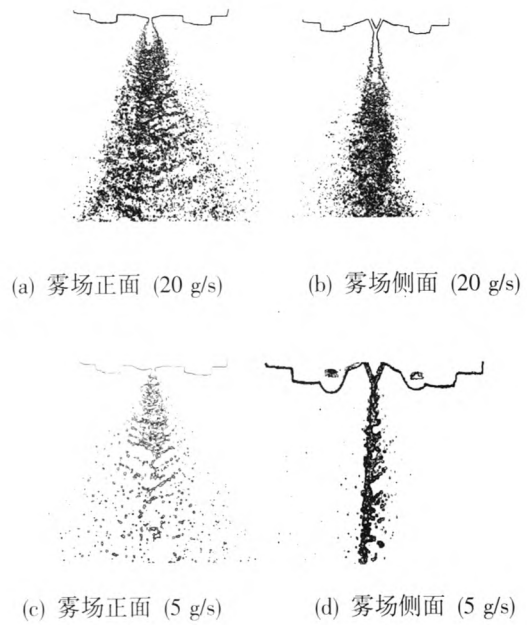
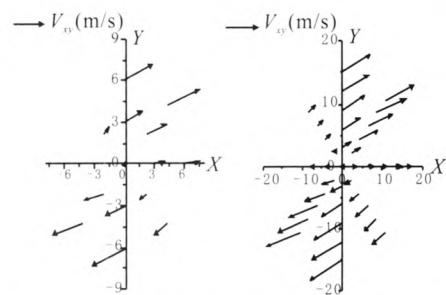


图 3 雾场结构图像(撞击角 50°)

Fig. 3 Images of atomization structure
(impinging angle is 50°)

针对不同高度的水平面，采用 PDPA 系统测量的液滴速度如图 4 所示，撞击角分别为 50° ， 70° ， 80° 。距撞击点不同高度的 XY 平面上液滴的径向运动速度 V_{xy} ，其方向以原点为对称点反向分布，且速率大小由内向外逐渐增大，位于 X 轴位置上的 V_{xy} 与其他位置处的径向速度值相较很小。说明在两股射流撞击之后介质向两股射流所在的 XZ 平面的法向发展趋势强烈，由此产生了如图 3 中雾场正面图所示的雾场结构特性。



(a) 距离撞击点位置 10mm, (b) 距离撞击点位置 20mm,
撞击角 70° 撞击角 70°

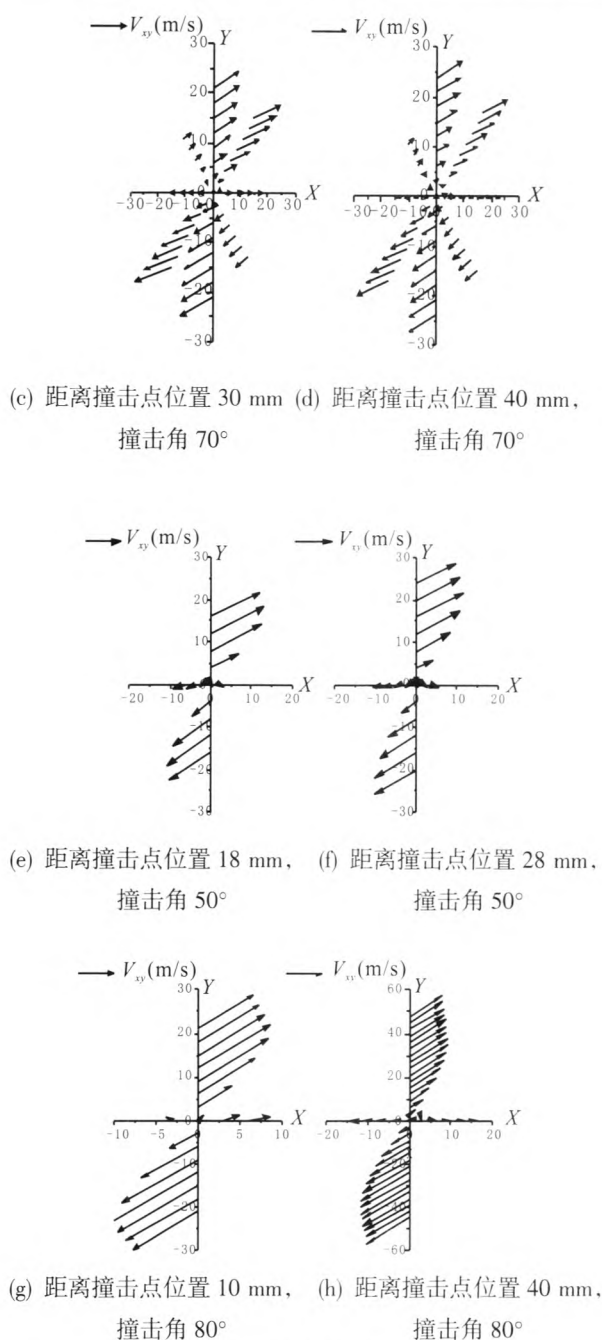


图 4 液滴径向速度分布

(单股射流质量流量 20 g/s, 动量比 1.0)

Fig. 4 Radial velocity distribution of droplets (mass flow of single stream is 20 g/s, and momentum ratio is 1.0)

由于 PDPA 光学系统测量参数时不能对多个位置处的液滴同时进行测量, 因此, 该水平面上的速度分布对应的是多个测点在不同时间内 X 和 Y 方向上的速度测量值经换算得到的径向速度, 从图 4 可知, 在不同时间内, 同一直线上的径向速度 V_{xy} 速度矢量方向平行, 其大小由内向外逐

渐增大, 可见, 液滴径向速度 V_{xy} 分布特性与位置相关、且与时间无关。

由于液滴从液膜脱落后初始速度来源于脱落时刻对应的液膜速度, 液滴脱离以后成为独立个体后所受的作用力主要有重力、空气阻力、表面张力等, 忽略重力的影响, 对液滴速度影响较大的主要因素是空气阻力, 而空气阻力对速度方向的影响较小, 因此, 可认为当液膜破碎成液滴的时刻, 是液膜的运动赋予了液滴的初速度, 使得液滴在 XY 平面上呈现出了如图 4 所示的运动速度 V_{xy} 分布, 从而形成了不同时刻对应的液滴分布特性。

文献[11]根据数值模拟的结果给出了不相容介质混合过程, 指出由于两股射流撞击之后的来回摆动与撞击波作用使液滴均匀分布。从图 3(d) 所示的雾场侧面图可知, 撞击后的液膜存在明显的波动。根据上述分析可推断, 由于液膜在 X 方向上的左右摆动、以及介质受到挤压之后导致液膜向 XZ 平面的法向运动, 导致了 XY 平面上出现了 V_{xy} 以原点为对称点反向分布。可见, 雾场内液滴速度分布取决于液膜破碎成液滴时刻对应的液膜运动状态, 液滴的分布特性应从液膜波动、破碎过程进行分析。

2.2 液滴大小分布特性

本次试验以水为介质, 各试验工况的物质属性相同, 即表面张力, 物质粘性相同, 因此, 本文对不同射流流量下的液滴分布特性进行了试验研究。

根据 2.1 的分析, 忽略重力的影响, 液滴的速度主要来自于液膜。液膜的运动过程则是两股射流撞击的结果, 因此, 本文对不同射流流量下的液滴直径变化进行了分析, 由于液滴主要分布在撞击面(XZ)的法向上, 因此主要针对 Y 方向的液滴直径进行分析。如图 5 所示, 在距离撞击点 10 mm 的水平面 (XY 平面) 的 Y 轴上液滴直径 (D_{32}, D_{50}) 分布为中间粒径大、两边粒径小; 当距撞击点 30 mm 时, 水平面 (XY 平面) 的 Y 轴上液滴直径比较接近, 且液滴直径小于距离撞击点 10 mm 水平面对应位置处的液滴直径。由此可知, 在液滴运动过程中存在二次破碎过程, 而且在距

离撞击点 30 mm 的水平面上的液滴直径趋于均匀。

图 3(c)所示为高速动态系统拍摄的某时刻撞击角为 50° 的直流喷注单元单股射流流量为 5 g/s 的雾场结构。从图 3(c)可知,射流撞击雾场的形成过程是一个首先生成液膜,液膜再逐渐从外侧开始断裂成液带、液丝,进而破裂成液滴的过程,且可明显看出,液滴分布是中间粒径大,两侧粒径小的分布特性,与图 5 所示的距离撞击点 10 mm 水平面上 PDPA 测试结果一致。

从图 3(c)可知,液丝或液带破碎成液滴的过程是从两侧开始的。如图 4 所示,液滴的水平径向速度 V_{xy} 分布为两侧速度大,位于中间位置的液滴速度小。可见液丝或液带破碎成液滴后液滴大小的分布特性与水平面上的径向速度分布刚好相反。液膜边界处的介质受到表面张力、粘性力、惯性力、气体扰动等作用,当径向速度 V_{xy} 较大时,径向惯性力就越大,易于从液膜、液丝或液带上脱落形成液滴。

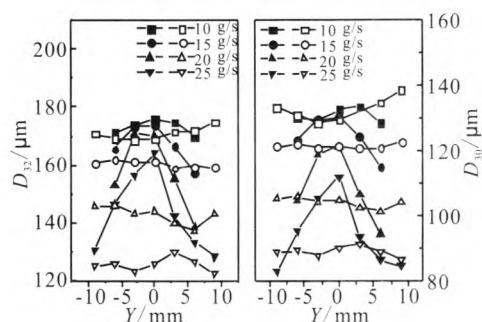


图 5 液滴直径分布(撞击角 70° , 实心点代表距离撞击点 10 mm, 空心点代表距离撞击点 30 mm)

Fig. 5 Droplet size distribution (impinging angle is 70° ; solid point and hollow point represent the distances in vertical level from impinging point to testing point which are 10 mm and 30 mm respectively)

因此,液滴首先易形成于液膜的两侧。根据 3.1 的分析, V_{xy} 的分布特性与液膜运动过程相关,由此推断,不仅雾场结构与液膜的运动过程相关,初始雾化阶段的液滴大小分布特性也与液膜自身发展过程相关。因此,当射流速度增大时,液膜

的速度增大,液膜赋予液滴的径向速度 V_{xy} 也随之增大,进而同一位置处的液滴直径随之减小,如图 5 所示。

3 结论

本文借助光学设备 PDPA 和高速动态分析系统针对直流撞击式喷注单元在大气环境下、以水为介质的雾场进行了试验研究,通过对试验结果进行分析,得到以下结论:

- 1) 液滴主要分布在撞击平面的法向位置,水平面上径向速度 V_{xy} 随距撞击点距离增大而增大,且 V_{xy} 的分布特性与时间无关,与位置相关;
- 2) 撞击雾化过程是液膜断裂成液丝或液带,进而破碎成液滴,液滴的初始速度是液膜赋予的,且液滴的速度矢量与液膜的运动过程相关。
- 3) 初始雾化阶段的液滴分布特性与水平面上的液滴的径向速度相反,径向速度越大,液滴的直径约小;径向速度来源于液膜的运动,因此,初始雾化阶段的液滴大小分布特性与液膜边界处的径向速度相关。

参考文献:

- [1] ANDERSON W E, RYAN H M, PAL S, et al. Fundamental studies of impinging liquid jets, AIAA92-0458[R]. USA: AIAA, 1992.
- [2] RYAN H M, ANDERSON W E, PAL S, et al. Atomization characteristics of impinging liquid jets, AIAA93-0230 [R]. USA: AIAA, 1993.
- [3] STRAKEY P A, TALLY D G. Spray characteristics of impinging jet injectors at high back-pressure[C]//Eighth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Pasadena, CA, USA: [s.n.], 2000: 11-16.
- [4] VASSALLO P, ASHGRIZ N, BOORADY F A. Effect of flow rate on the spray characteristics of impinging water jets[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(5): 980-986.
- [5] 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): 57-59.

(下转第 35 页)

- waves [C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Harvard, CT: AIAA, 2008: 111-115.
- [3] OSTRANDER M J, HYDE J C, YOUNG M F, et al. Standing oblique detonation wave engine performance, AIAA 1987-2002[R]. USA: AIAA, 1987.
- [4] SISLIAN J P. Propulsive performance of hypersonic oblique detonation wave and shock-induced combustion ramjets[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(3): 599-604.
- [5] FUSINA G. Formation and stability of near chapman-jouguet standing oblique detonation waves [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005, 43 (7): 1591-1604.
- [6] HARRIS P G. Structure of conical oblique detonation waves[C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Harvard, CT: AIAA, 2008: 222-228.
- [7] FUSINA G, PARENT B. Numerical study of structure and stability of oblique detonation waves [C]//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2004-1125. Reno, Nevada: AIAA, 2004: 123-128.
- [8] CARRIER G F, FENDELL F E. Nonintrusive stabilization of a conical detonation wave for supersonic combustion [J]. Combustion and Flame, 1995, 103(4): 281-295.
- [9] LEE J H S. Initiation of gaseous detonation[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 1977, 28: 75-104.
- [10] CHOI J Y. Capturing unstable wrinkled oblique detonation wave front by Hi-Fi numerical simulation, AIAA 2006-5100[R]. USA: AIAA, 2006.

(编辑: 王建喜)

(上接第 14 页)

- [6] 张蒙正, 杨伟东, 王玫. 双股互击式喷嘴凝胶水雾化特性试[J]. 推进技术, 2008, 29 (1): 22-24, 61.
- [7] CHEN Xiao-dong, MA Dong-jun, YANG Vigor. High-fidelity numerical simulations of impinging jet atomization, AIAA 2012-4328 [R]. USA: AIAA, 2012.
- [8] MA Dong-jun, CHEN Xiao-dong, KHARE Prashant, et al. Atomization patterns and breakup characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets, AIAA 2011-97[R]. USA: AIAA, 2011.
- [9] 强洪夫, 刘虎, 陈福振, 等. 基于 SPH 方法的射流撞击仿真[J]. 推进技术. 2012, 33(3):424-429.
- [10] CHIHIRO Inoue, TOSHINORI Watanabe, TAKEHIRO Himeno. Study on atomization process of liquid sheet formed by impinging Jets, AIAA 2008-4847 [R]. USA: AIAA, 2008.
- [11] CHEN Xiao-dong, MA Dong-jun, YANG Vigor. Mechanism study of impact wave in impinging jets atomization, AIAA 2012-1089 [R]. USA: AIAA, 2012.

(编辑: 陈红霞)