

文章编号: 1006-9941(2015)06-0583-06

大气环境中双股自击式喷嘴雾化液滴的运动特性

刘焜¹, 余永刚¹, 赵娜², 王珊珊³

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099; 3. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘要: 为了研究大气环境中双股自击式喷嘴雾化液滴的运动特性, 设计了双股自击式射流喷雾实验装置, 运用多普勒相位粒子动态分析仪(PDPA), 观测了喷嘴压降对于雾化液滴运动特性的影响, 着重分析了液滴轴向速度和径向速度的分布。结果表明: 随着测量截面与喷嘴间的距离由 25 mm 增到 100 mm, 液滴平均直径(D_{30})变大; 当喷嘴压降为 2.2 MPa, D_{30} 由 44.26 μm 增大到 61.26 μm , 当喷嘴压降为 2.6 MPa, D_{30} 由 42.88 μm 增大到 55.49 μm ; 距离喷嘴越远, 液滴轴向速度和径向速度越小; 测量点距离中心轴越远, 液滴轴向速度越小, 径向速度脉动越大; 喷嘴压降增大, 液滴平均直径减小, 液滴轴向速度分布均匀性变好, 径向速度分布均匀性变差。

关键词: 双股自击式喷嘴; 雾化; 粒子; 速度分布

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.015

1 引言

喷嘴的雾化和混合性能直接影响着液体火箭发动机燃烧室的稳定性和可靠性。双股自击式喷嘴具有结构简单、响应时间短、雾化效果好的特点, 是液体火箭发动机中最常用的一种喷注器^[1-3]。

目前关于双股自击式喷嘴的研究主要集中在撞击力的分布、液膜破碎机理、喷雾过程特征等方面。Ibrahim 等^[4-5]观测了双股射流对撞雾化实验后, 根据液膜韦伯数大小提出了两种液膜破碎机理: 韦伯数小于 2000 时液膜破碎由泰勒心形波动决定; 韦伯数大于 2000 时凯文-亥姆霍兹不稳定波动成为液膜破碎的主导因素。此外, 他还提出了一个二维非线性模型, 预测了液膜的厚度和形态和雾化液滴直径, 与实验结果吻合较好。Vassallo 等^[6]实验测量了喷嘴雷诺数从 3000 到 7500 工况下 90° 夹角双股射流和 45° 夹角四股射流的撞击雾化场参数分布。Anderson^[7]和 Ryan^[8]等人, 分别研究了不同射流条件和几何结构下的自击式喷嘴雾化场特性, 并对射流撞击形成的液膜建

立了数学模型以分析导致液膜不稳定性的因素。Ri^[9]等在 Ibrahim 的理论基础^[4-5]上发展出液膜的五步破碎机理, 指出液膜的雷诺数与喷嘴的雷诺数呈对应关系, 破碎时液膜的尺寸与边缘处的韦伯数线性相关, 系数与撞击角度有关。Jung 等^[10]分别研究了层流和湍流状态下液膜的破碎过程, 并且上溯到撞击前射流的状态, 探讨了射流的空泡现象对于雾化性能的影响。Chen 等^[11]采用流体体积模型(VOF)^[12]结合网格自适应技术(AMR)^[12]模拟了射流撞击后液膜形成到破碎成液滴的过程。Inamura 等^[13]研究了射流撞击后液膜的速度分布, 并推广到雾化液滴的速度分布。Jayaprakash 等^[14]设计了以煤油和铝粉为主要成分的凝胶推进剂双股自击式喷嘴雾化实验装置, 通过改变喷嘴的出口直径、喷射夹角和喷嘴压降测量了液滴直径分布、喷雾破裂长度和雾化角变化。

孙纪国等^[15]运用激光散射测粒仪和探针研究了 40° 撞击角双股自击式喷嘴的雾化质量和流强分布, 统计分析了该喷嘴冷试验和在液氧介质下热试验时的喷嘴流量系数。宋玉宝等^[16]利用 FAM 型激光粒度仪对自击式喷嘴的雾化特性进行了测试, 并采用 Monte Carlo 法^[12]建立了对撞喷嘴雾化液滴粒度分布模型。杨立军等^[17]研究了凝胶推进剂双股射流撞击后液膜的破碎过程并进行了数值模拟。赵娜等^[18]采用 RNI 理论对双股自击式喷嘴喷雾场参数的分布均匀特性进

收稿日期: 2014-04-25; 修回日期: 2014-7-26

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(201132191110024)

作者简介: 刘焜(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事含能液体喷雾与燃烧方面的研究。e-mail: liukun_012@163.com

通信联系人: 余永刚(1963-), 男, 教授, 主要从事含能材料的燃烧理论与控制技术方面的研究。e-mail: yonggangy@21cn.com

进行了定量分析。目前,各国学者的研究工作普遍采用实验测量与理论分析相结合的方式进行,然而关于喷嘴的雾化机理仍然处于累积阶段。

本研究采用三维相位多普勒粒子动态测试系统(PDPA),测量了大气环境下双股自击式喷嘴的流场参数,从液滴直径、轴向速度和径向速度等方面分析了喷嘴的雾化特性,侧重分析了前人研究较少的雾化液滴速度的周向分布和数目分布,以期对双股自击式喷嘴的雾化机理研究提供参考。

2 喷雾实验装置

图1为喷雾实验装置,包括喷嘴、压力计、流量计、PDPA、压缩机、储液罐、调节阀等。其中PDPA测试系统由激光器、入射光单元、接收光单元、光电转换器、信号处理器及计算机等组成。本实验PDPA测试系统的主要性能:速度测量范围 $-300 \sim 1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,测量精度0.1%;液滴直径测量范围 $0.5 \sim 200 \mu\text{m}$,测量精度1%。

实验采用的双股自击式喷嘴结构如图2所示,喷孔直径 d_0 为 0.23 mm ;中心距 l 为 3 mm ;两股射流间的撞击角 2θ 为 30° 。喷嘴加工采用激光校准打孔,误差率小于0.1%。雾化工质采用模拟液体推进剂,粘度为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,喷嘴压降分别取 2.2 MPa 和 2.6 MPa 。

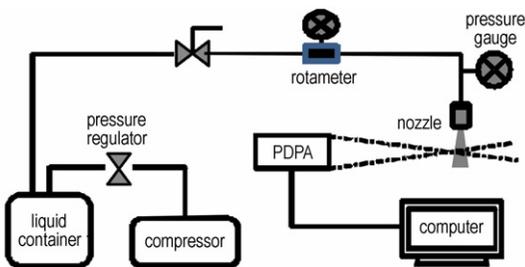


图1 喷雾实验装置
Fig.1 Scheme of the spray system

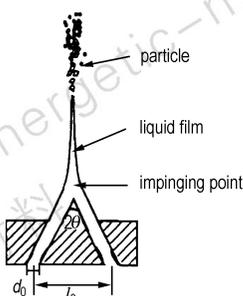


图2 双股自击式喷嘴示意图
Fig.2 Sketch diagram of the impinging nozzle

坐标轴确定方法如图3所示。喷嘴出口方向为 z

轴,两个喷嘴连线的中点为坐标系原点 O 。垂直于 z 轴的截面视为 xoy 平面,在该平面内与 z 轴相交且平行于两个喷嘴连线方向为 x 轴, y 轴垂直于喷嘴连线。 x 轴、 y 轴和 z 轴三者方向符合右手螺旋关系。为了便于说明雾化场参数的分布特性,采用柱坐标形式定义测量点位置。所示周向角度 α ,取 x 轴正向为 0° ,沿顺时针方向为正方向取角。 r 为原点 O 到测量点在平面 xoy 上的投影点间的距离。 z 为测量点到 xoy 平面的距离。

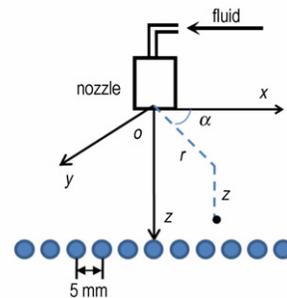


图3 坐标系示意图
Fig.3 Sketch diagram of coordinate system

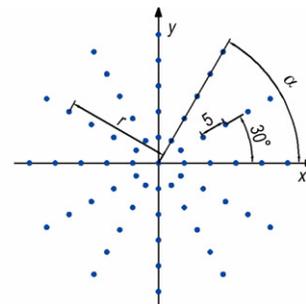


图4 截面上测量点布置图
Fig.4 Distribution of measuring points on section

本实验系统是开放性喷雾系统,雾化形成的雾滴就是流场中的颗粒相,作为PDPA系统测试的示踪粒子,获得喷雾流场的运动特性。实验采用三维PDPA测试系统,PDPA光束交点即为数据测量点。实验选取距喷嘴距离为 $25, 50, 80, 100 \text{ mm}$ 共4个测量截面,每个截面上以每间隔 30° 按测试点与原点 O 在截面上的投影点间的距离 $r=0, 5, 10, 15, 20, 25 \text{ mm}$ 取6个实验点,共计61个测量点进行测量,截面上测量点布置如图4所示。

2 实验结果与分析

2.1 喷雾场液滴平均直径与数目分布

实验测量了喷嘴压降(p) $2.2, 2.6 \text{ MPa}$ 下液滴体积平均直径 D_{30} 。图5给出了不同喷嘴压降下雾化液滴平均直径 D_{30} 沿轴向的变化。由图5可以看出,当 $p=$

2.2 MPa 时, $z=25\text{ mm}$, $D_{30}=44.26\text{ }\mu\text{m}$; $z=100\text{ mm}$, $D_{30}=61.26\text{ }\mu\text{m}$; 当 $p=2.6\text{ MPa}$ 时, $z=25\text{ mm}$, $D_{30}=42.88\text{ }\mu\text{m}$; $z=100\text{ mm}$, $D_{30}=55.49\text{ }\mu\text{m}$ 。说明液滴平均直径 D_{30} 均随着测量截面与喷嘴的轴向距离增加而变大, 这是由于距离喷嘴越远, 液滴速度越小, 液滴发生碰撞聚合的概率越大, 液滴平均直径也就越大。

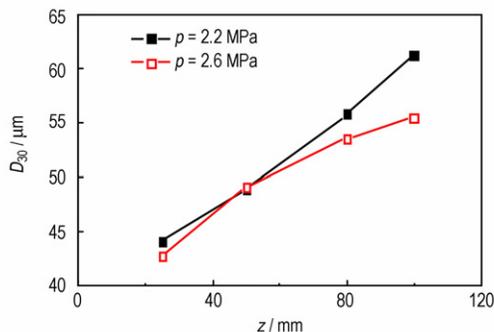


图5 雾化液滴平均直径 D_{30} 沿轴向的变化关系

Fig.5 Mean diameter (D_{30}) of the droplets changing with the axis

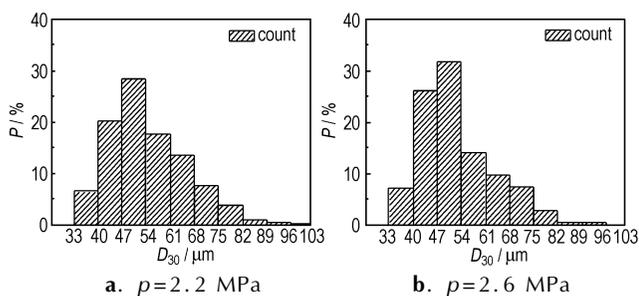


图6 液滴平均直径 D_{30} 的数目分布

Fig.6 Number distribution of D_{30} for droplets

图6为喷嘴压降2.2, 2.6 MPa下液滴平均直径 D_{30} 的数目分布。由图6可以看出, 两种压降下雾化液滴分布图十分接近。大部分液滴集中在 $40\sim 54\text{ }\mu\text{m}$ 直径范围内, 在 $33\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 液滴数目基本相同, 直径大于 $54\text{ }\mu\text{m}$ 的液滴数则按照直径划分的区间依次递减。对比两图发现, 在 $40\sim 54\text{ }\mu\text{m}$ 直径范围内 $p=$

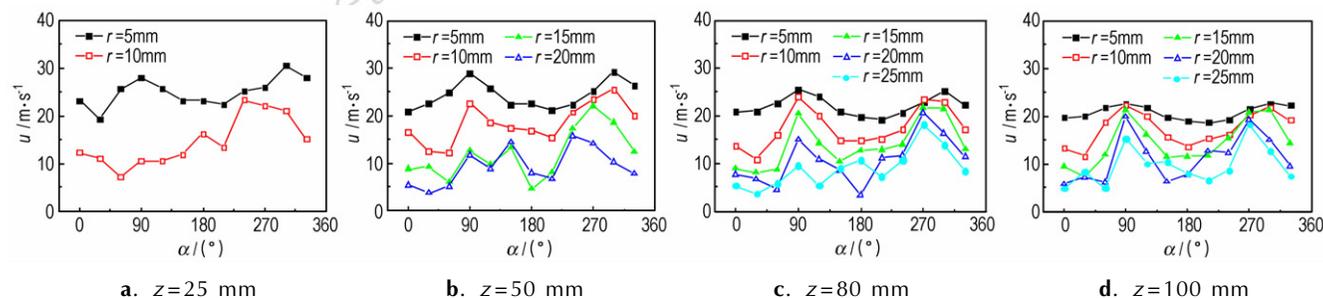


图7 2.2 MPa 工况液滴轴向速度的周向分布

Fig.7 Circumferential distribution of axial velocity under 2.2 MPa for droplets

2.6 MPa 工况的液滴数目大于 $p=2.2\text{ MPa}$ 工况下的液滴数目, 说明喷嘴压降增大, 液滴尺寸分布向小粒径偏移, 雾化效果较好。这是由于提高喷嘴压降使撞击射流的动量增大, 加剧了环境中空气的扰动, 液滴更容易发生二次碎裂, 从而减小了液滴平均直径。

2.2 液滴轴向速度的周向分布

图7、图8分别为喷嘴压降为2.2, 2.6 MPa下不同截面上液滴轴向速度的周向分布。由图7可见, 液滴轴向速度在 $\alpha=90^\circ$ 和 270° 上呈现双峰分布。基于对撞击射流雾化的特性, 可以推断 $\alpha=90^\circ$ 和 270° 是射流撞击生成液膜的扩展方向。在液膜的扩展方向上, 受表面张力和扰动力的作用, 液膜较容易破碎成液滴, 此时液滴的轴向速度和液膜的扩展速度基本相同, 因此在 $\alpha=90^\circ$ 和 270° 角度上液滴轴向速度大于其他角度上的速度, 这与 Inamura^[13] 的研究结果是一致的。

由图7、图8可见, 在同一压降工况下, $r=5\sim 25\text{ mm}$ 曲线基本按照由高到低顺序排列, 可见距离中心轴越远, 液滴轴向速度越小。同时, 以比较图7中 $z=25, 50, 80, 100\text{ mm}$ 截面上波动较小的 $r=5\text{ mm}$ 曲线, 发现液滴轴向速度的平均值分别为 $25.2, 24.65, 22.45, 21.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 可见随着测量截面到喷嘴的距离越远, 液滴轴向速度越小。这是由于喷雾在沿轴向和径向扩展过程中, 雾化液滴受到气动力作用, 轴向速度逐渐减小。

为了说明液滴轴向速度与喷嘴压降的关系, 统计了喷嘴压降2.2, 2.6 MPa 工况下不同截面上液滴轴向速度的数目分布, 如图9、图10所示。由图9可见, 大部分液滴集中在 $21\sim 27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度段。在 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, 液滴数较少, 特别是在 $0\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段的液滴数极其稀少。在图9a中, 54%的液滴集中在 $21\sim 27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段内, 在速度较高的 $27\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 段液滴数为18%, $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的液滴仅占12%。与图9a相比, 图9b中, $27\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度段的液滴

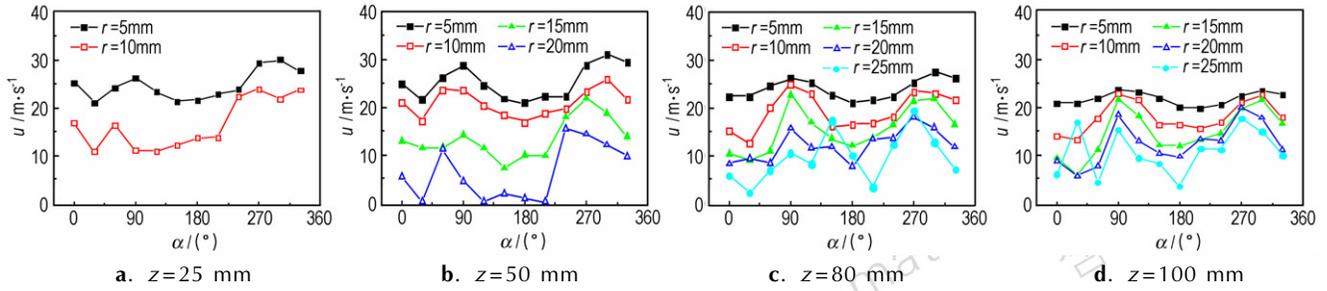


图 8 2.6 MPa 工况液滴轴向速度的周向分布

Fig. 8 Circumferential distribution of axial velocity under 2.6 MPa for droplets

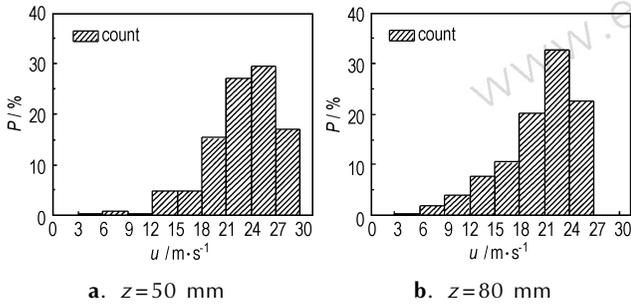


图 9 2.2 MPa 工况液滴轴向速度的数目分布

Fig. 9 Number distribution of axial velocity under 2.2 MPa for droplets

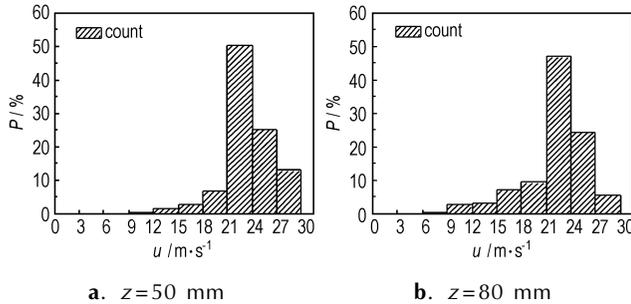


图 10 2.6 MPa 工况液滴轴向速度的数目分布

Fig. 10 Number distribution of axial velocity under 2.6 MPa for droplets

逐渐消失, 24 ~ 27 m · s⁻¹ 段液滴数由 30% 减少到 23%, 21 ~ 24 m · s⁻¹ 段液滴数增加, 有 55% 的液滴集

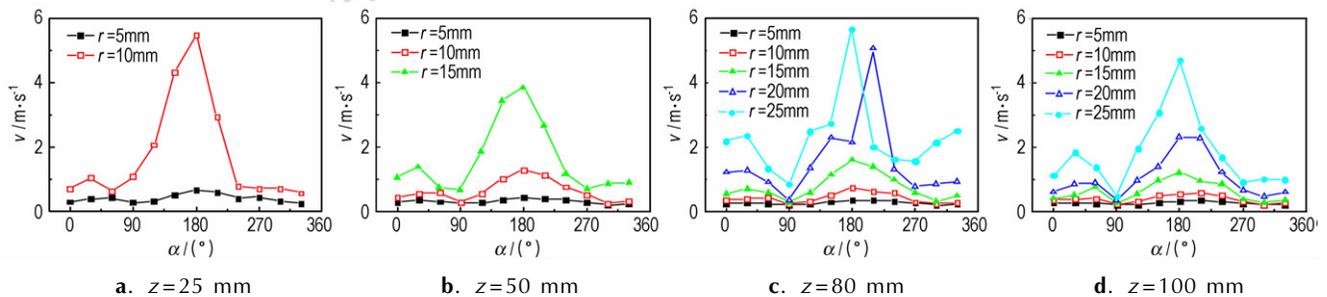


图 11 2.2 MPa 工况液滴径向速度的周向分布

Fig. 11 Circumferential distribution of radial velocity under 2.2 MPa for droplets

中在 21 ~ 27 m · s⁻¹ 内, 18 m · s⁻¹ 以下速度段液滴数略有增加。与图 9 相比, $p=2.6$ MPa 时, 更多的液滴集中在 21 ~ 27 m · s⁻¹ 段, 图 10a 中该速度段内的液滴数达到总数的 75%, 图 10b 中 21 ~ 27 m · s⁻¹ 段液滴数为 71%, 其它速度段内液滴数有所减少。可见喷嘴压降增大, 液滴轴向速度趋于某一狭窄速度段, 分布均匀性变好。

2.3 液滴径向速度的周向分布

图 11、12 分别为喷嘴压降 $p=2.2$ MPa 和 $p=2.6$ MPa 工况下液滴径向速度的周向分布。由图 11 可以发现, 径向速度曲线以 $\alpha=90^\circ$ 和 270° 两个分界点分为三段: $0^\circ \sim 90^\circ$, $90^\circ \sim 270^\circ$, $270^\circ \sim 330^\circ$ 。由于 $\alpha=90^\circ$ 和 270° 是液膜的扩展方向, 所以多条曲线出现拐点, 径向速度显著下降, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$, $90^\circ \sim 270^\circ$, $270^\circ \sim 330^\circ$ 三个区间内径向速度出现波动性变化。从图 11、图 12 中 $r=5 \sim 25$ mm 曲线的排列顺序可见, 距离中心轴越远, 液滴径向速度越大, 径向速度的脉动也越大。这是由于随着喷雾的发展, 射流中心的动量逐渐向外传递, 液滴径向速度逐渐增大, 特别在 0° 和 180° 与液膜垂直的方向上液滴聚合破裂导致径向速度脉动较大。这种趋势直至喷雾边缘处受气动力作用, 液滴径向速度降低为零。比较图 11 中 $z=25, 50, 80, 100$ mm 截面上 $r=5$ mm 曲线, 液滴径向速度

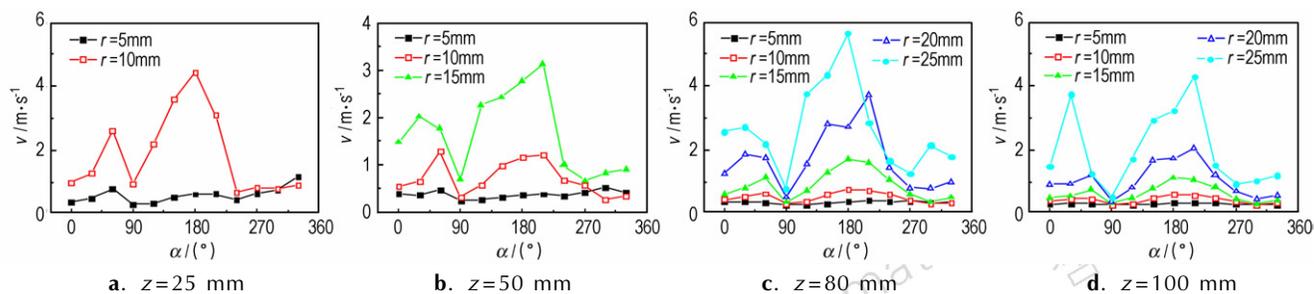


图 12 2.6MPa 工况液滴径向速度的周向分布

Fig. 12 Circumferential distribution of radial velocity under 2.6 Mpa for droplets

的平均值分别为 0.36, 0.3, 0.26, 0.25 $m \cdot s^{-1}$, 可见随着测量截面到喷嘴的距离越远, 液滴径向速度越小。

由于液滴径向速度整体较小, 喷嘴压降对于径向速度的周向分布影响不明显。现根据液滴径向速度的数目分布来分析说明径向速度与喷嘴压降的关系。图 13、图 14 分别为 $p=2.2$ MPa 和 $p=2.6$ MPa 工况下不同轴向截面上液滴径向速度的数目分布。 $z=25$ mm 截面上, 图 13a 中液滴径向速度按从小到大阶梯分布, 液滴主要分布在 $0.2 \sim 0.4 m \cdot s^{-1}$ 区间, 其中 52% 的液滴径向速度在 $0.2 \sim 0.3 m \cdot s^{-1}$ 区间, 26% 的液滴径向速度在 $0.3 \sim 0.4 m \cdot s^{-1}$ 区间, 大于 $0.4 m \cdot s^{-1}$ 的液滴数目较小且随机波动。图 14 a 中, $0.2 \sim 0.3 m \cdot s^{-1}$ 段液滴数为

32%, $0.3 \sim 0.4 m \cdot s^{-1}$ 段液滴数为 24%, 与图 13a 相比, 处于 $0.2 \sim 0.4 m \cdot s^{-1}$ 这一较低速度区间的液滴数较少, 而 $0.4 m \cdot s^{-1}$ 以上的较高速度段内液滴数较多。 $z=80$ mm 截面上, 图 13b 中 $0.2 \sim 0.3 m \cdot s^{-1}$ 和 $0.3 \sim 0.4 m \cdot s^{-1}$ 区间内液滴数分别为 57% 和 26%, 而图 14b 中 $0.2 \sim 0.3 m \cdot s^{-1}$ 段液滴数为 42%, 并且 $0.3 \sim 0.4 m \cdot s^{-1}$ 段内液滴数也达到了 38%。可见随着喷嘴压降增大, 液滴径向速度总体趋于增大, 分布均匀性变差。

4 结论

(1) 随着测量截面与喷嘴间的距离 (z) 增加, 液滴平均直径 (D_{30}) 增大, 由 z 由 25 mm 增到 100 mm, 喷嘴压降为 2.2 MPa 时, D_{30} 由 $44.26 \mu m$ 增大到 $61.26 \mu m$, 当喷嘴压降为 2.6 MPa, D_{30} 由 $42.88 \mu m$ 增大到 $55.49 \mu m$; 同时, 喷嘴压降越大, 液滴平均直径越小, 雾化效果越好。

(2) 喷雾场中液滴轴向速度在周向上呈双峰分布, $\alpha=90^\circ$ 和 270° 分别为两个峰值点; 同一压降工况下, 液滴轴向速度随着测量点与中心轴的距离增大而减小; 距离喷嘴越远, 液滴轴向速度越小; 喷嘴压降增大, 液滴轴向速度集中在 $21 \sim 27 m \cdot s^{-1}$ 速度段, 均匀性变好。

(3) 喷雾场中液滴径向速度的周向分布呈分段波动性变化, 测量点距离中心轴越远, 液滴径向速度脉动越大; 测量截面距离喷嘴越远, 液滴径向速度越小; 喷嘴压降增大, 液滴径向速度分布均匀性变差。

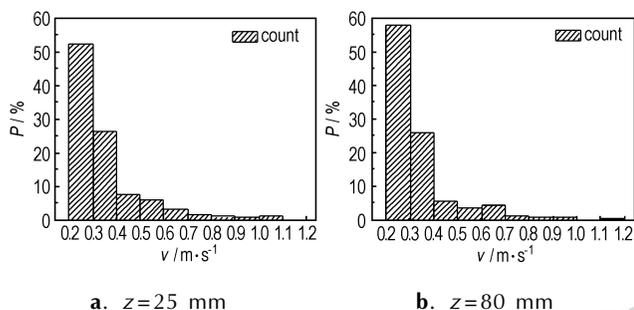


图 13 2.2 MPa 工况液滴径向速度的数目分布

图 13 Number distribution of radial velocity under 2.2 MPa for droplets

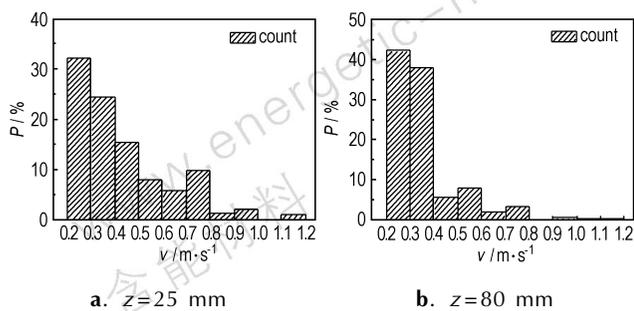


图 14 2.6 MPa 工况液滴径向速度的数目分布

图 14 Number distribution of radial velocity under 2.6 MPa for droplets

参考文献:

[1] 曹建明, 喷雾学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
CAO Jian-ming. Atomization [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
[2] Yetter R A, Yang V, Aksay I A, et al. Meso and micro scale propulsion concepts for small spacecraft[R]. ADA-455414, 2006.

- [3] Casiano M J, Hulka J R, Yang V. Liquid-propellant rocket engine throttling: A comprehensive review [R]. AIAA-2009-5135; 2009.
- [4] Ibrahim E A, Przekwas A J. Impinging jets atomization[J]. *Physics of Fluids A (Fluid Dynamics)*, 1991, 3(12): 2981-2987.
- [5] Ibrahim E A, Outland B E. A non-linear model for impinging jets atomization [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2008, 222(2): 213-224.
- [6] 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.
- [7] Anderson W E, Ryan H M, Pal S, et al. Fundamental studies of impinging liquid jets[R]. AIAA-1992-0458; 1992.
- [8] Ryan H M, Anderson W E, Pal S, et al. Atomization characteristics of impinging liquid jets[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(1): 135-145.
- [9] Ri L, Ashgriz N. Characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets[J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(8): 1-13.
- [10] Jung K, Khil T, Yoon Y. Effects of orifice internal flow on breakup characteristics of like-doublet injectors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(3): 653-660.
- [11] Chen X, Ma D, Yang V, et al. High-fidelity simulations of impinging jet atomization[J]. *Atomization and Sprays*, 2013, 23(12): 1079-1101.
- [12] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
YAN Chao. Computational fluid dynamics and application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006.
- [13] Inamura T, Shirota M. Effect of velocity profile of impinging jets on sheet characteristics formed by impingement of two round liquid jets[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 60: 149-160.
- [14] Jayaprakash N, Chakravarthy S R. Impingement atomization of gel fuels[R]. AIAA-2003-316; 2003.
- [15] 孙纪国, 王珏, 沈赤兵, 等. 一种 40° 撞击角双股自击式喷嘴试验[J]. 推进技术, 2002, 23(3): 207-208, 222.
SUN Ji-guo, WANG Jue, SHEN Chi-bing, et al. Experimental for a like-doublet injector with 40° impingement angle[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(3): 207-208, 222
- [16] 宋玉宝, 章明川, 尹斌, 等. Y 型喷嘴液膜随机破碎模型研究[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(2): 153-156.
SONG Yu-bao, ZHANG Ming-chuan, YIN Bin, et al. Mathematical modeling on random breakup characteristics of liquid sheet shed from Y-jet nozzle[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2003, 9(2): 153-156.
- [17] Yang L, Fu Q, Qu Y, et al. Breakup of a power-law liquid sheet formed by an impinging jet injector[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 39: 37-44.
- [18] 赵娜, 余永刚, 陆欣, 等. 对撞喷嘴喷雾场周向分布特性的实验研究[J]. 弹道学报, 2013, 25(3): 95-99, 106.
ZHAO Na, YU Yong-gang, LU Xin, et al. Experiment study on circumferential distribution characteristics in spray field of impinging jet injector[J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(3): 95-99, 106.

Motion Properties of Spray Particles from Impinging Nozzle at Atmospheric Environment

LIU Kun¹, YU Yong-gang¹, ZHAO Na², WANG Shan-shan³

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Yang 712099, China; 3. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: An impinging nozzle was designed to investigate the motion properties of spray particles from impinging nozzle at atmospheric environment. Phase doppler particle analyzer(PDPA) was used to record the effects of the nozzle pressure on the motion properties of spray particles. The distributions of axial velocity and radial velocity for particles were analyzed emphatically. Results indicate that as the distance between the measurement section and the nozzle increases from 25 mm to 100 mm, the mean diameter (D_{30}) of the particles at the pressure drop of 2.2 MPa increases from 44.26 μm to 61.26 μm and from 42.88 μm to 55.49 μm at the pressure drop of 2.6 MPa. The further away from the nozzle, the smaller the axial velocity and the radial velocity of the particles. The axial velocity of the particles decreases and the radial velocity fluctuation increases with distance between the measuring points and the center axis increasing. The D_{30} of the particles decreases when the nozzle pressure increases, and the distribution uniformity of the particles is better for the axial velocity but worse for the radial velocity.

Key words: impinging nozzle; spray; particle; velocity distribution

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.015