

真空环境中压电激励对射流破碎特性的影响

陈鹏飞^{1,2}, 严小平³, 孙策², 洪流^{1,2}, 夏益志^{1,2}

- (1. 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100;
2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100;
3. 推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘要:针对真空环境中压电激励液滴生成技术,采用实验方法研究了压电激励波形、频率和位移等参数对射流破碎特性的影响规律。实验结果表明,对0.5 mm的射流在理论最优频率下施加振幅3 μm 的压电激励作用后,射流破碎距离缩短至90 mm左右;相对于正弦波与三角波,方波激励获得的射流破碎距离最短;在最优频率附近,随着激励频率增大,液滴粒径减小,射流破碎长度先减小后增大;随着压电装置位移幅值增大,射流破碎长度略有减小。结果表明:在压电作用下,激励频率对射流特性影响较大,并且射流最短破碎距离对应的激励频率大于理论最优频率;激励波形和位移振幅等参数对射流破碎特性的影响相对较小。

关键词:液滴发生器;真空环境;压电激励;实验研究;射流破碎

中图分类号:V419 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2020)04-0046-08

Effect of piezoelectric excitation on jet fragmentation in vacuum environment

CHEN Pengfei^{1,2}, YAN Xiaoping³, SUN Ce², HONG Liu^{1,2}, XIA Yizhi^{1,2}

- (1. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an 710100, China;
2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;
3. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at droplet generation technology in vacuum environment, the effects of piezoelectric excitation waveform, frequency and displacement on jet fragmentation were studied by experimental research. The results show that after the piezoelectric excitation of 3 μm is applied to the jet with diameter 0.5 mm at the theoretical optimal frequency, the breaking distance of the jet is shortened to about 90 mm. Compared with the sinusoidal and triangular waves, the jet breaking distance obtained by square wave excitation is the shortest. Near the optimal frequency, with the increase of excitation frequency, droplet diameter decreases, and jet breakup length decreases first and then increases. With the increase of piezoelectric displacement amplitude, jet breakup length decreases slightly. It is found that under the action of piezoelectric force, the excitation frequency has the great influence on jet characteristics, and the frequency corresponding to the shortest breaking distance is larger than the theoretical optimal frequency. The

收稿日期:2019-09-27;修回日期:2019-12-25

基金项目:国防科研项目(30504050204)

作者简介:陈鹏飞(1984—),男,硕士,高级工程师,研究领域为液体火箭发动机技术

parameters such as excitation waveform and displacement amplitude have relatively small influence on jet breaking characteristics.

Keywords: droplet generator; vacuum environment; piezoelectric excitation; experimental measurement; jet fragmentation

0 引言

射流破碎过程是开展液体火箭发动机喷雾燃烧、液体空间排放和液滴生成等技术研究的基础。早在1878年,诺贝尔物理奖获得者 Rayleigh^[1-3]就深入地分析了毛细射流在外界扰动下,崩解成液滴的机理,并得到了射流不稳定的条件。他证明了液体射流对小扰动是不稳定的,射流首先断裂成段,进而在表面张力的作用下收缩成液滴。这个初始扰动可能是由于喷孔表面粗糙或毛刺引起的随机因素,也可以是人为施加于射流之上。1931年,Weber^[4]针对高速射流引入了环境流体及介质黏性的影响,对 Rayleigh 的模型进行了改进。美国南加利福尼亚大学的 Orme 和 Muntz^[5-8]为实现空间环境中液滴群高效生成,基于 Rayleigh 和 Weber 等人的射流破碎机理,提出采用压电陶瓷施加扰动加速射流破碎的方法,从而使液滴辐射器^[9]逐步具备工程可行性。

与常规射流的湍流无序扰动不同,压电激励作用在喷注腔内产生有序的高频压力波,从而对射流施加较大的初始扰动,最终使得射流快速破碎成速度、尺寸均匀的液滴流。Muntz 等人针对液滴发生器内的压力脉动特性开展了量化研究,通过试验方法测量了喷射器内的压力振幅^[2];采用声学理论分析了喷射器内的压力传播规律,将喷射器近似处理为封闭腔之后,推导了腔内脉动压力的解析公式^[10]。随着压电技术的发展,人们对液滴生成品质、尺寸形态的控制要求不断提高。根据射流表面波不稳定碎裂机理,当激励扰动与射流最易破碎波长吻合时,较小的扰动能量就可以促使射流快速破碎^[12]。Bousfield^[13]和 Hilbing^[14]等人重点研究了压电陶瓷激励对射流速度、液滴粒径的影响;Brenn 和 Lacknermeier 针对压电激励采用波形调制方法获得了多种不同形态的液滴流^[15]。日本学者 Tsuyoshi 等人针对空间液滴生成技术,进一步在微重力环境中采用压电激励方法获得了单股微小液滴流^[16];Weierstall 等人采用压电激励技术获得了粒径仅

8 μm 的均匀微液滴流^[17]。洪流、李龙飞等人为了探索真空环境中液滴生成方法,针对真空射流破碎特性开展了大量的实验研究^[18-20]。在仿真技术方面,Chen 等人采用 VOF 方法开展了压电微喷头喷射过程的数值模拟,研究了压电驱动参数对微液滴生成的影响^[21];周诗贵等人针对压电驱动膜片式微滴喷射技术进行了仿真研究^[22];陈鹏飞等重点针对大尺寸多射流的压电激励喷射技术开展了研究,通过数值仿真方法获得了喷射器内的压力脉动特性^[23]。

整体来看,国内对受激射流破碎特性的研究起步较晚,特别是在航天领域,有关压电激励对真空射流特性影响规律的研究开展较少。本文针对空间环境中的液滴生成技术,构建真空环境减弱环境气体对射流的影响,选取低蒸气压介质避免闪蒸造成射流破碎,采用实验方法研究压电激励对射流破碎特性的影响规律,从而加深对真空环境中射流受激破碎和液滴生成过程的认识。

1 实验装置及实验方法

压电激励喷射器结构如图1所示。喷射器内的液体介质在压电装置的扰动作用下产生周期性压力波,从而激励射流快速破碎。喷射器的喷孔板面可更换,实验选取的喷孔直径为0.5 mm,喷孔数量为1~2组,喷射介质采用低黏硅油,黏度约5 mPa·s,饱和蒸气压低于0.1 Pa,表面张力约0.03 N·m^[24],射流中的硅油气泡达不到生长条件^[25],从而确保射流稳定生成。为保证实验结果的可比性,实验过程中喷射器入口压力保持为45 kPa。

压电装置及信号控制系统如图2所示。压电装置采用机械封装式压电陶瓷,压电装置输出位移与控制电压基本呈线性关系^[26],28 V 驱动电压对应位移行程约3 μm 。压电装置控制电压由信号发生系统提供,信号发生器输出一定频率的标准波形信号,经功率放大器将其电压增大至所需要的值,从而控制压电装置振动。

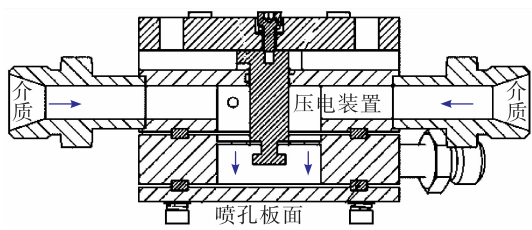


图 1 喷射器结构

Fig. 1 Droplet generator structure

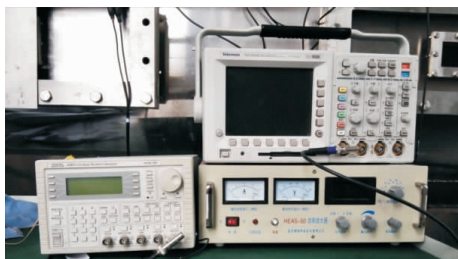
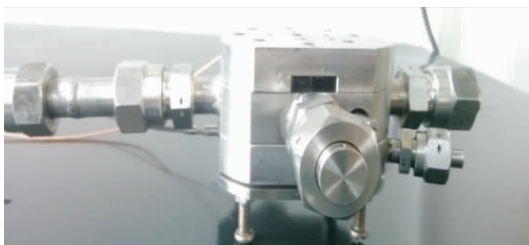
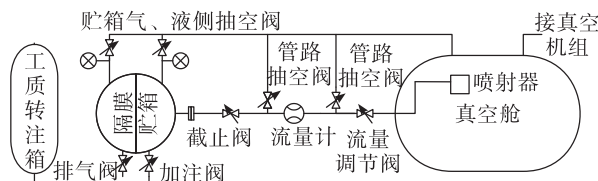


图 2 压电装置及信号控制系统

Fig. 2 Piezoelectric device and signal control system



(a) 实验真空舱



(b) 实验系统原理图

图 3 液体真空喷射雾化特性研究试验平台

Fig. 3 Liquid vacuum injection test system

液体真空喷射雾化特性研究试验平台如图 3 所示,该系统具备模拟 80 km 高空环境下射流雾化特性研究能力,可以满足不同液体工质的小流量真空喷射特性研究需求。试验过程中,配合使用隔膜贮箱以保证液体工质在挤压过程中不存在溶气等问题。系统参数如下:

真空舱有效容积为 3 m^3 ;

极限真空度 0.9 Pa,试验真空度约 50 Pa;

机组抽气量 300 L/min;

真空舱体配置 4 组光学窗口。

实验过程中采用 KISTLER 公司的 6052C 脉动压力传感器(灵敏度为 17.56 PC/bar)、电荷放大器及 OROS 来采集脉动压力。射流破碎图像采用 PhantomV12 高速相机获得,图像分辨率为 800×600 像素,采样频率 8 kHz,曝光时间 30 μs 。

2 实验结果与讨论

通过实验研究了压电激励波形、频率和位移振幅对液滴生成特性的影响,典型工况及实验结果如表 1 所示。

2.1 压电激励效果验证及喷射器内压力脉动特性分析

在真空环境下对比了有/无压电激励的射流状态差异,如图 4 所示。图 4 中观测区域中心距离喷孔出口约 90 mm。不施加压电激励时,由于射流雷诺数低,流体脉动很小,射流在观测区域仍保持连续状态,未发生破碎,也未观测到显著的对称波发展;在相同的射流条件下,利用压电装置施加人为扰动(频率 3 kHz,位移振幅 3 μm)之后,射流在喷孔出口附近仍保持连续射流,但当射流发展到观测区域时,表面波迅速增大直至射流破碎成液滴流。

在 3 kHz 压电激励作用下,喷射器内的压力脉动特性如图 5 所示,压电激励在喷射器内产生了一个显著的 3 kHz 的压力扰动。从实验测试结果来看,压电装置可以在喷射器内产生显著压力扰动,并对射流破碎特性有显著的影响。

表 1 典型实验工况及结果

Tab. 1 Typical test conditions and results							
孔径/ mm	喷射 孔数	速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	真空 度/Pa	扰动 频率/ kHz	波形	位移 振幅/ μm	破碎 距离/ mm
0.5	2	7.0	32	—	无激励	—	未破碎
0.5	2	7.0	32	3.0	方波	3.0	90.0
0.5	2	7.0	48	0.5~6.0	方波	3.0	—
0.5	1	6.9	50	3.1	方波	3.0	90.0
0.5	1	6.9	50	3.1	正弦波	3.0	96.0
0.5	1	6.9	50	3.1	三角波	3.0	99.5
0.5	1	6.8	40	2.2	正弦波	3.0	120.6
0.5	1	6.8	40	3.2	正弦波	3.0	96.2
0.5	1	6.8	40	3.6	正弦波	3.0	93.1
0.5	1	6.8	40	4.0	正弦波	3.0	88.1
0.5	1	6.8	40	5.6	正弦波	3.0	134.4
0.5	1	6.6	45	3.1	正弦波	1.0	104.4
0.5	1	6.6	45	3.1	正弦波	1.5	103.7
0.5	1	6.6	45	3.1	正弦波	2.0	100.7
0.5	1	6.6	45	3.1	正弦波	2.5	96.3
0.5	1	6.6	45	3.1	正弦波	3.0	93.4



图 4 压电激励对真空射流状态的影响
Fig. 4 The influence of piezoelectric excitation on the vacuum jet shape

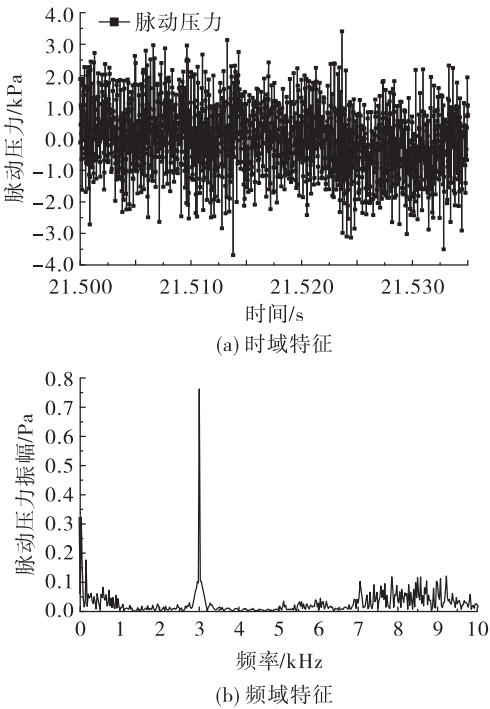


图 5 在 3 kHz 激励频率下的喷射器内压力脉动特性
Fig. 5 The pressure fluctuation in the injector at 3 kHz excitation frequency

针对喷射器内的压力脉动特性,保持其他参数不变,仅改变压电装置激励频率获得了一系列喷射器内压力脉动数据,通过 FFT 变换之后的频域数据如图 6 所示。实验结果表明,随着压电激励频率增大,喷射器内的压力脉动振幅快速增大,这表明压电激励产生的压力脉动(即射流初始扰动)与频率有关。

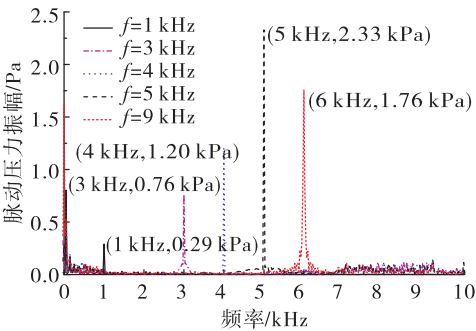


图 6 喷射器内压力脉动幅值随激励频率的变化规律
Fig. 6 Variation of pressure fluctuation amplitude with excitation frequency in injector

采用压电激励时,喷射器内的压力脉动振幅与

压电装置头部的运动加速度有关^[17]。以正弦波激励为例,喷射器内压电装置位移

$$z = \varepsilon \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: ε 为位移振幅; f 为工作频率; t 为工作时刻。

根据式(1)推导压电装置运动加速度

$$a = -(2\pi f)^2 \varepsilon \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

压力扰动振幅

$$P_a \propto (2\pi f)^2 \varepsilon \quad (3)$$

从上式可以看出,压电激励产生的压力扰动振幅随激励频率增大近似呈平方关系变化,这与激励频率小于 5 kHz 的实验数据一致。当压电装置激励频率超过 5 kHz 之后,压力脉动振幅突然减小,这可能与压力脉动过大导致压电装置性能失稳有关,具体原因还有待进一步深入分析。

2.2 激励波形对射流破碎特性的影响

保持压电装置的振动频率(3.1 kHz)、振动幅值(3 μm)等参数不变,仅改变驱动电压波形获得的射流破碎图像如图 7 所示。从图 7 中可以看出,压电装置分别在方波、正弦波和三角波驱动下,激励射流获得的破碎长度依次为 90、96、99.5 mm。与正弦波驱动相比,方波驱动压电装置形成的破碎长度减小 6.25%;三角波驱动导致破碎长度增大 3.65%。式(3)表明,压电装置激励产生的压力脉动幅值与压电装置头部的运动加速度有关;运动加速度越大,压力脉动幅值越大,射流的破碎距离越短。对比 3 种驱动波形可以发现,标准方波驱动作用下,压电装置的位移变化曲线最陡峭,运动加速度最大;其次为正弦波,三角波的位移曲线比正弦波平缓,产生的运动加速度也较小,这与高速相机观测到的射流破碎长度变化趋势一致。

利用脉动压力传感器测量了喷射器内部的脉动压力变化,实验结果如图 8 所示。不同驱动波形得到的压力脉动幅值变化趋势与前述分析一致;从量化数据来看,正弦波激励产生的压力脉动幅值约 0.8 kPa,振幅约为喷前压力的 1.78%;与正弦波激励相比,方波在喷注腔内产生的压力脉动幅值增大 24.5%,三角波产生的压力脉动幅值减小 20.9%。

不同激励波形的真空喷射实验结果表明,在 3 种激励波形中,方波驱动的压电激励能量最大,获得的射流破碎距离最短;然而从量化数据来看,方

波激励的压力脉动幅值增大了 24.5%,但破碎距离仅减小 6.25%,激励能量的增加对大幅缩短破碎距离的作用有限。

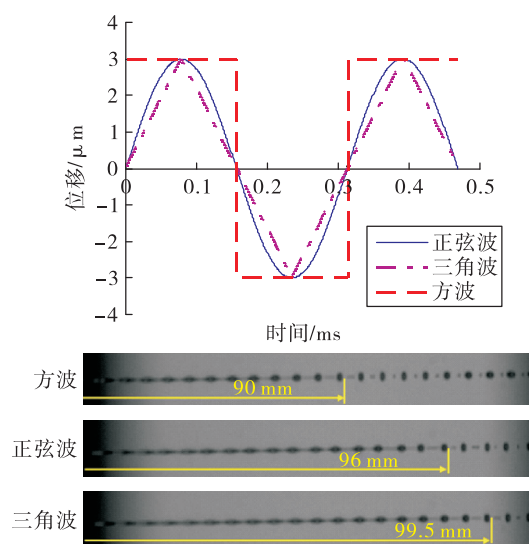


图 7 不同激励波形下的射流形态对比

Fig. 7 Jet shape corresponding to excitation waveform

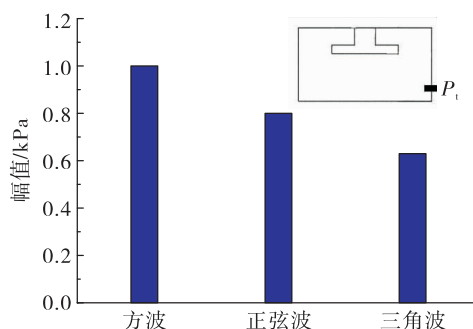


图 8 激励波形对应的脉动压力幅值

Fig. 8 Amplitude of fluctuating pressure corresponding to excitation waveform

2.3 激励频率对射流破碎特性的影响

根据 Rayleigh 射流不稳定理论,扰动增长率对射流破碎长度也有显著影响。当 $0 < kr < 1$ (k 为波数; r 为射流半径)时,任何周期性扰动都将导致射流不稳定,扰动增长率与波数的变化关系可以通过求解色散方程获得。在本文的实验条件下,根据 Rayleigh 模式计算的射流扰动增长率随激励频率的变化规律如图 9 所示。当射流的液体物性、射流直径及流速等参数相同时,存在一个最优的激励频率使得扰动增长率最大,从而加速射流更容易破碎。

理论计算表明,当低黏硅油的射流直径 0.5 mm,射流速度 6.8 m/s 时,最易破碎波长对应的最优激励频率约为 3.1 kHz。

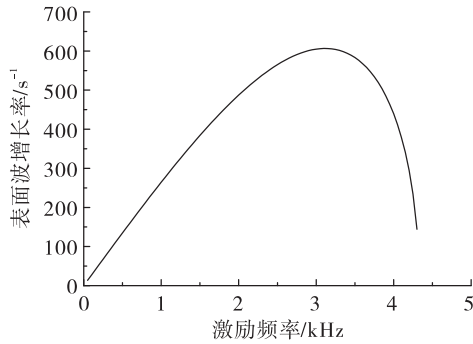


图9 扰动增长率随激励频率的变化(正弦波)

Fig. 9 Variation of disturbance growth rate with excitation frequency (sine wave)

图 10 为激励频率不同时的射流形态。从图中可以看出,改变激励频率对射流形态有显著影响。在最优激励频率附近,随着激励频率增大,射流破碎长度先减小后增大,这与理论预测趋势一致。对比几组实验结果发现,当压电装置激励频率约 4 kHz 时,射流破碎长度最短,约 88.1 mm;当激励频率为 3.2 kHz 时,此时最接近理论最优频率,但射流破碎长度达到 96.2 mm。实验结果表明,根据破碎长度确定的最优频率比理论预测值高 29%,这可能是因为破碎长度是初始扰动量和扰动最大增长率综合作用的结果。在理论最优频率附近,尽管扰动增长率最大,但初始扰动量相对较小;随着激励频率进一步增大,扰动增长率略有降低,但初始扰动量快速增大,从而导致射流破碎长度缩短;当激励频率超过一定范围之后,扰动增长率快速下降,初始扰动量增长的影响减弱,因此射流破碎长度再次变大。

在压电激励雾化工况设计时,为获得最短的射流破碎长度,需要对最优激励频率 f_{best} 进行修正

$$f_{\text{best}} = \alpha f_{\text{opt}} \quad (4)$$

式中: α 为修正系数; f_{opt} 为 Rayleigh 和 Weber 的理论预测频率。 α 的计算表达式有待进一步深入研究,在本文的实验条件下,修正系数约为 1.29。

除了射流破碎长度随激励频率变化之外,液滴的粒径也随激励频率改变而产生变化,如图 11 所示。随着激励频率的增大,液滴粒径呈减小趋势。

根据激励频率、射流速度和喷孔直径之间的相互关系,得到液滴无量纲粒径

$$D/d = \left(\frac{3u}{2fd} \right)^{1/3} \quad (5)$$

式中: D 为液滴直径; u 为喷射速度; d 为喷孔直径。

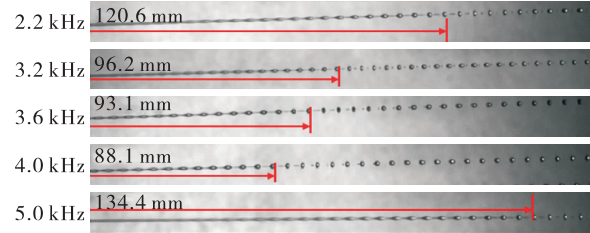


图10 激励频率对应的射流形态

Fig. 10 Jet shape corresponding to excitation frequency

当射流速度一定时,喷孔单位时间内的液流量不变,频率增大导致射流破碎的特征波长减小,单位时间所形成的液滴越多,则每个液滴的体积减小,最终导致单个液滴粒径减小。

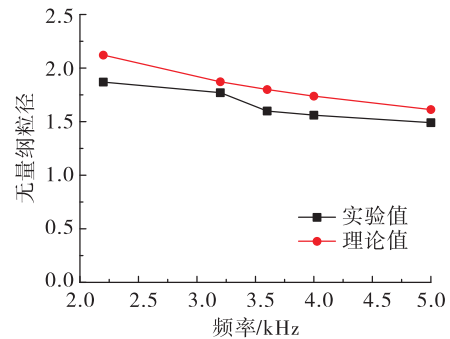


图11 激励频率对液滴粒径的影响

Fig. 11 Effect of excitation frequency on droplet size

2.4 激励位移幅值对射流破碎特性的影响

压电装置位移取决于施加在压电装置两端的电压,电压越高,位移越大,且两者近似呈线性关系,因此,压电装置位移幅值对驱动功率有较大影响,需要分析压电激励位移幅值对射流破碎过程的影响。保持压电装置的振动频率(3.1 kHz)、驱动波形(正弦波)等参数不变,仅改变压电装置激励位移,获得射流破碎特性如图 12 所示。从高速摄影图像可以看出,射流破碎长度随着压电装置激励位移幅值的增大有所减小,但不同位移振幅对应的射流状态差异不大,压电装置位移变化对射流破碎特

性的影响相对较小。

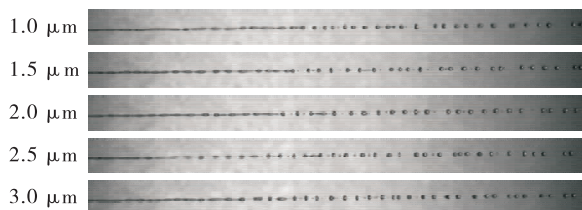


图 12 位移幅值对应的射流破碎形态

Fig. 12 Jet breaking shape corresponding to displacement amplitude

图 13 对激励位移幅值变化造成的射流破碎特性改变进行了量化分析。从图 13 中可以看出,位移振幅对射流破碎和液滴粒径影响较小,不同位移振幅对应的无量纲粒径在 1.51 ~ 1.78 之间变化;以 3 μm 位移振幅为基准,当位移振幅减小 66.7% (减小至 1 μm) 时,射流破碎长度增加 11.9%;不同位移振幅对应的液滴粒径基本一致。

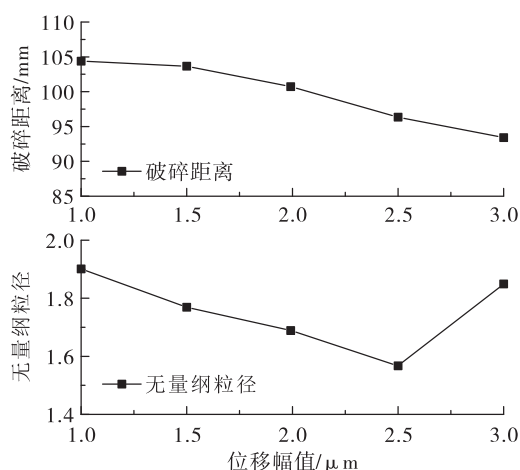


图 13 位移幅值对射流破碎特性的影响

Fig. 13 The influence of displacement amplitude on jet breaking characteristics

3 结论

本文针对真空环境下压电激励射流破碎过程开展研究,获得如下结论:

1) 压电激励作用对射流破碎特性有重要的影响,压电激励波形、频率和位移振幅等参数均会对射流破碎特性产生影响。

2) 相对于正弦波与三角波,方波驱动的压电激励能量最大,获得的射流破碎距离最短;从量化数据来看,方波激励的压力脉动幅值增大了 24.5%,但破碎距离仅减小 6.25%,激励能量的增加对大幅缩短破碎距离的作用有限。

3) 压电激励频率对射流破碎特性有较大影响,随着激励频率增大,射流的初始压力脉动量增大,生成液滴粒径减小;在最优频率附近,随着激励频率增大,射流破碎长度先减小后增大;在压电激励作用下,最短破碎距离对应的激励频率大于理论最优频率。

4) 压电装置位移振幅对射流破碎特性影响较小,随着压电装置位移幅值增大,射流破碎长度略有减小;位移振幅对液滴粒径影响较小。

参考文献:

- [1] RAYLEIGH W S. On the instability of jets[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1878(4), 10.
- [2] RAYLEIGH W S. On the instability of jets[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1879(10), 4-10.
- [3] RAYLEIGH W S. Further observations upon liquid jets [J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1982 (34), 130-145.
- [4] WEBER C. On the breakdown of a fluid jet [J]. Math and Mech, 1931, 11: 136-154.
- [5] ORME M, MUNTZ E P. The manipulation of capillary stream breakup using amplitude-modulated disturbances: a pictorial and quantitative representation [J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1990, 2(7): 1124-1140.
- [6] ORME M. On the genesis of droplet stream microspeed dispersions[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1991, 3(12): 2936-2947.
- [7] ORME M. A novel technique of rapid solidification net - form materials synthesis[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1993, 2(3): 399-405.
- [8] ORME M, WILLIS K, NGUYEN T V. Droplet patterns from capillary stream breakup[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1993, 5(1): 80-90.
- [9] 侯曾祺, 胡金刚. 航天器热控制技术: 原理及其应用 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [10] ORME M, MUNTZ E P. New technique for producing highly uniform droplet streams over an extended range of

- disturbance wavenumbers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1987, 58(2): 279-284.
- [11] MUNTZ E P, ORME M, FARNHAM T, et al. Liquid droplet generation [R]. NASA-CR-182246.
- [12] LEFEBVRE A H. Atomization and sprays [M]. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [13] BOUSFIELD D W, STOCKELI H, NANIVADEKAR C K. The breakup of viscous jets with large velocity modulations[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 218: 601.
- [14] HILBING J H, HEISTER S D. Droplet size control in liquid jet breakup [J]. *Physics of Fluids*, 1996, 8(6): 1574-1581.
- [15] BRENN G, LACKERMEIER U. Drop formation from a vibrating orifice generator driven by modulated electrical signals[J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9(12): 3658-3669.
- [16] TOTANI T, KODAMA T, NAGATA H, et al. Thermal design of liquid droplet radiator for space solar-power system [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2005, 42(3): 493-499.
- [17] WEIERSTALL U, DOAK R B, SPENCE J C H, et al. Droplet streams for serial crystallography of proteins[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(5): 675-689.
- [18] 李龙飞, 池保华, 杨伟东, 等. 真空环境下液体射流雾化特性的实验研究[J]. *火箭推进*, 2010, 36(5): 27-30.
- LI L F, CHI B H, YANG W D, et al. Experimental study on atomization characteristic of liquid jet in vacuum environment[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2010, 36(5): 27-30.
- [19] 池保华, 洪流, 李龙飞, 等. 真空模拟环境下液体推进剂蒸发特性的试验研究[J]. *火箭推进*, 2010, 36(1): 71-74.
- CHI B H, HONG L, LI L F, et al. Experimental study on evaporation characteristics of liquid propellants in vacuum environment[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2010, 36(1): 71-74.
- [20] 洪流, 池保华, 李龙飞, 等. 模拟空间环境下射流雾化特性实验[J]. *推进技术*, 2012, 33(5): 765-770.
- [21] CHEN Y S, HUANG Y L, KUO C H, et al. Investigation of design parameters for droplet generators driven by piezoelectric actuators[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49(6): 733-740.
- [22] 周诗贵, 习俊通. 压电驱动膜片式微滴喷射仿真与尺度一致性试验研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(8): 178-185.
- [23] 陈鹏飞, 徐云飞, 孙策, 等. 多射流喷射器的压电激励特性[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(8): 1815-1821.
- [24] POLING B E, PRAUSNITZ J M, O'CONNELL J P. The properties of gases and liquids [M]. 5th ed. USA: McGraw-Hill Companies, 2001.
- [25] 陈鹏飞, 周晨初, 徐云飞, 等. 真空射流闪蒸特性的气泡动力学分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2016, 36(7): 753-759.
- [26] 王社良, 刘敏, 樊禹江. 新型压电陶瓷驱动器的特性分析[J]. *材料导报*, 2012, 26(22): 153-156.