

超声波喷嘴试验研究*

朱永刚

王兴甫

(航天工业总公司 31 所,北京,100074) (中国海鹰机电技术研究院,北京,100074)

摘 要: 对超声波喷嘴的工作原理及工作特性进行了理论分析和试验研究,利用计算机图象处理技术重点研究了压电器件材料物性参数 d_{33} 、激励电压 A 、喷射压力 p 、喷孔直径 d_0 、喷嘴腔纵向尺寸 δ 及激励频率 f 对射流液滴形成的影响。研究表明:较低的射流压力和较小的喷孔直径以及较大的 d_{33} 压电器件都有利于液滴的形成和工作稳定性,而激励频率 f 和喷嘴腔纵向距离 δ 都存在着最佳值。这些结论可以指导喷印机超声波喷嘴的设计。

主题词: 液体喷射,射流控制,超声波换能器,直流喷嘴

分类号: TS803,V434.24

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ULTRASONIC INJECTION NOZZLE

Zhu Yonggang

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Wang Xingfu

(China Haiying Electro-Mechanical Technology Academy, Beijing, 100074)

Abstract: A study on principle and characteristics of ultrasonic nozzle is carried out theoretically and experimentally. By use of computerized CCD videodisplay technology, the effects of piezoelectric parameter d_{33} , exciting voltage A , injecting pressure p , injection orifice diameter d_0 , nozzle gap δ and exciting frequency f on jet break-up and droplet formation are emphatically investigated. It is shown that lower injecting pressure, smaller orifice diameter, and greater piezoelectric parameter will improve the droplet formation and the operation stabilization of ultrasonic nozzle. It is also indicated that there are optimum nozzle gap and exciting frequency for droplet formation. All of these conclusions are available to design the nozzle of the ink jet printer.

Subject terms: Liquid injection, Fluidic control, Ultrasonic transducer, Spray injector

1 引言

超声波喷嘴在超声振荡换能器的激励下,可产生间距相等、尺寸非常均匀的液滴群。它的这一独特的雾化性能,使得它在航空发动机以外的技术领域里也能得到广泛的应用。喷墨打印技术便是其中的一例。

本课题通过试验探寻超声波喷嘴工作参数对射流破碎的影响。主要研究压电换能器的主

* 收稿日期:19960403,修回日期:19961110

要性能参数,激励电压的频率和幅度,射流速度和射流直径等。

2 超声波喷嘴的工作模型

图1为一超声波喷嘴示意图。在模型中,以下参数作为研究对象:喷嘴直径 d_0 (喷嘴片喷孔直径);喷腔长度 l (压电陶瓷下端面与喷嘴片之间的距离);压电换能器参数 d_{33} (压电陶瓷压电应变常数);喷射压力 p ;换能器激励频率 f 。

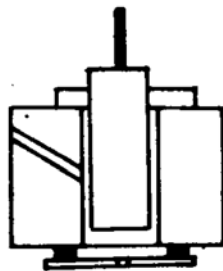


Fig. 1 Sketch map
of ultrasonic
nozzle

2.1 直射式喷嘴射流的雾化模型

瑞利理论认为,破碎雾化的液雾平均直径和射流起始直径成正比(其方次可以不是一次)。韦伯将这个分析加以扩展,把粘性力考虑进去,得

$$\frac{\lambda}{d_0} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{3\mu_1}{\sqrt{\rho\sigma d_0}} \right)^{1/2}$$

式中: μ_1 ——液体粘性(Pa·s), ρ ——液体密度(kg/m³), σ ——表面张力(N/m), d_0 ——喷嘴直径(m)。

直射式喷嘴在换能器的超声频率激励下工作,即成为超声波喷嘴。在压电换能器的作用下强迫直射式喷嘴喷出的射流在激励频率下破碎。其射流断裂长度 $\lambda=v/f$,式中: v ——射流喷射速度, f ——激励频率。显然,当超声波喷嘴的射流断裂长度 λ 与上述射流自然破碎长度相近时,所需要的激励能量最小。因此,可以根据射流介质的物性参数计算出其自然破碎的长度,从而确定所需的激励频率与工作参数(射流压力等)的关系。

2.2 超声波喷嘴内部激励模型的建立

换能器产生的超声波扰动,使喷嘴射流出口速度按周期性变化,使射流具有内在规则的断裂趋势。研究中采用PZT-4圆柱形的压电陶瓷换能器,直径为5mm,长度为10mm。压电换能器的压电方程为

$$D = \epsilon^T \cdot E + d \cdot T, S = \underline{d} \cdot E + s^E \cdot T。$$

式中 D 和 S 分别为电位移矢量和应变, E 和 T 分别为电场强度和应力, ϵ^T 为压电介质在恒应力下的自由介电常数矩阵, s^E 为压电介质在恒电场强度下的弹性顺度张量, d 为压电应变常数矩阵, $\underline{d}$ 为 d 的转置矩阵。

压电材料的纵向振动的静态关系为

$$S_3 = S_{33}^E T_3 + d_{33} E_3, \quad D_3 = \epsilon_{33}^T E_3 + d_{33} T_3$$

由上式可以看出, d_{33} 的数值大,应变变量 S_3 大;电场 E 变化的幅度 E_A 大,应变变量也大。而 S_3 与伸缩量 ξ 成正比,所以 d_{33} 和电场的变化幅度 E_A 大,换能器的发射功率将增大,换能器的效率 η 与 d_{33} 成正比。

2.3 扰动声波在喷嘴腔室内的传播过程

超声波喷嘴的腔室结构可简化为图2所示,扰动声波在图示的空间传播,其规律可由声波方程来描述。为使问题简化,假定:①媒质为理想流体;②没有声扰动时,媒质宏观上是静止的;③声波传播时,扰动传播的过程是绝热的;④媒质中传播的是小振幅波。得简化的一维声波方

$$\text{程: } \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}。$$

本试验的声波传播空间,声压比 $r_p = 0.9996 \approx 1$, 相当于声波遇到刚性壁的情况。可见在声波传播空间,有入射波和反射波共同存在。因此,可以写出稳态的声波波动方程的解

$$u(x, t) = \sqrt{2} [u_A e^{j(\omega t - kx)} + u_A e^{j(\omega t + kx)}]$$

由边界条件确定 u_A 和 $u_{A'}$ 。 $u_A = \frac{-u_0 \cdot e^{-jk l'}}{2j \sin k l'}$, $u_{A'} = \frac{u_0 \cdot e^{jk l'}}{2j \sin k l'}$ 。

由此得 $u(x, t) = \sqrt{2} u_0 e^{j\omega t} \frac{\sin k(l' - x)}{\sin k l'}$

从方程的解中可以看出,在声波的传播空间形成驻波。这里关心的只是 $\sin k(l' - x)$ 这一部分。在喷口附近,驻波的振幅大,将有利于断裂。上式中的 $l' = (1 + \epsilon)l$ 。其中 ϵ 为修正系数,考虑喷口附近媒质的宏观速度不等于零。这样可求得 $l' - x = \frac{\lambda}{4}$ 。

2.4 频率对雾化的影响

超声波喷嘴的声场可以用类比线路来描述。声顺 $C_A = \frac{V}{\rho_0 c_0^2} = \frac{\pi}{4} d_1^2 l$, 声质量 $M_A = \frac{\rho_0 l^*}{\pi a^2}$ 。为考虑喷口及喷口以外的部分液体的影响,需对 l^* 进行修正,即

$$l^* = l + l', \text{ 其中 } l' = \frac{M_{A1} \pi a^2}{\rho_0}, \text{ 式中 } a \text{ 为半径 } d_1/2, M_{A1} = \frac{8\rho_0}{3\pi^2 a} = 0.27\rho_0/a (\text{kg/m}^4),$$

$$\text{得 } l'' \approx 0.85a (\text{m}). \text{ 所以 } M_A = \frac{\rho_0}{\pi} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{0.85}{a} \right)$$

$$\text{发生谐振时的频率为: } f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_A C_A}}$$

3 试验及结果分析

超声波喷嘴产生的射流如图3所示。实验采用显微镜、CCD 摄像机和微机组成的采集/处理系统。显微镜的后部,是一台黑白 CCD 摄像机,其分辨率为 512×512 阵列,感光元件置于显微镜成象的焦平面上。摄像机产生的图象信号送入微机进行处理、分析和存贮。微机采用 40MHz 和 386DX 微处理器,配以多媒体图象采集/处理卡。

试验数据用最小二乘法进行拟合,可从作出不同的曲线图中直观地反映射流断裂规律。

3.1 d_{33} 对断裂的影响

由图4可以得出 d_{33} 增加,所需加在压电换能器上的电压降低,射流越易于断裂。从压电方程

$$S_3 = S_{33}^E T_3 + d_{33} E_3$$

中可以看出,固定 p 不变, T_3 不变, S_{33}^E 是换能器压电材料的弹性顺度,所以 $S_{33}^E T_3$ 项不变。产生相同的断裂效果, u'/u_0 相同 (u' 为激励声波扰动速度, u_0 为喷口的定常的射流平均速度)。即 S_3 相同, d_{33} 值大,需要的电场强度小。又因 $E = U/\epsilon L$, 介电常数 ϵ 和特征长度 L 恒定, E 小,所需的电压 U 小。

由曲线还可以看出,高压下, $A-d_{33}$ 曲线相对陡峭。因此,在设计超声波喷嘴时应选取 d_{33} 值较大的压电器件作为激励元件,应选用较低的喷射

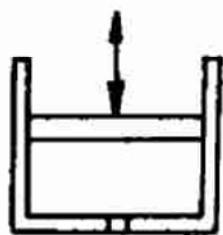


Fig. 2 Simplified of cavity

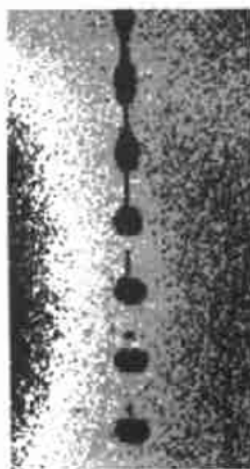


Fig. 3 Efflux of ultrasonic nozzle

压力。由图 5 知,较低的喷射压力不但降低喷嘴能耗,还可以使同一批压电器件物性参数 d_{33} 的偏差对激励电压的影响较小,有利于批量产品的性能稳定。

3.2 纵向间隙 δ 对断裂效果的影响

由图 5 可以看出,在各喷射压力下,都存在一个最佳 δ 值(δ^*),此时射流断裂所需要的激励电压最小,与模型分析结论相一致。从图 6 中也可以得出同样的结论。如果将最佳值与喷射压力画成曲线(如图 7 所示),就会发现,随着喷射压力的提高, δ^* 也逐渐增大。由图 6 还可以看出,保持值为最佳值时,不但所需激励电压较低,而且曲线也较平缓,这意味着最低激励电压随喷射压力的波动变化较小,有利于机器稳定工作。因此,从设计的角度考虑,超声波喷嘴腔室的纵向距离应设计成可以调节的,以便使其保持在最佳位置,这可以通过调节压电器件的位置来实现。

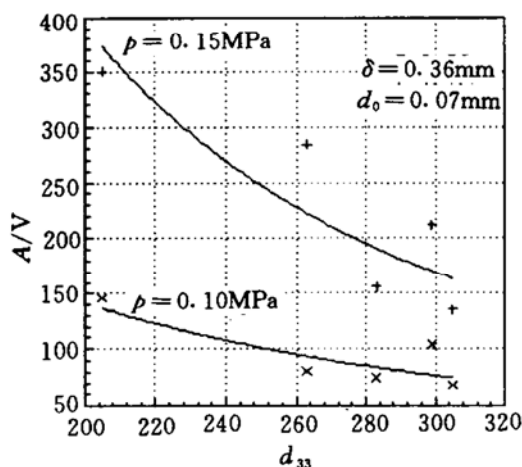


Fig. 4 Effect of d_{33} on break

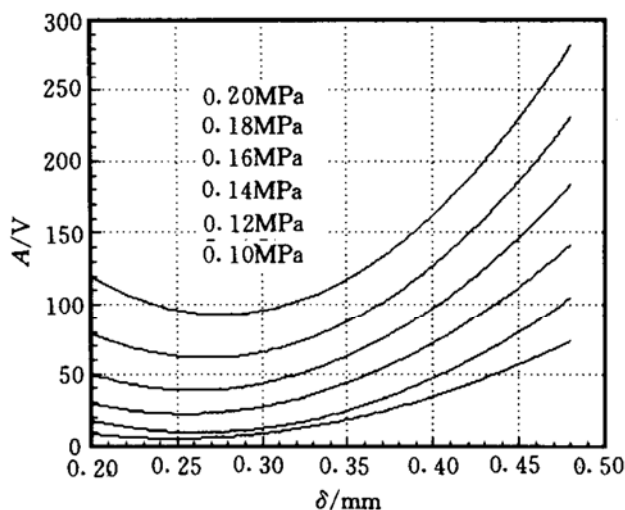


Fig. 5 Effect of δ on break

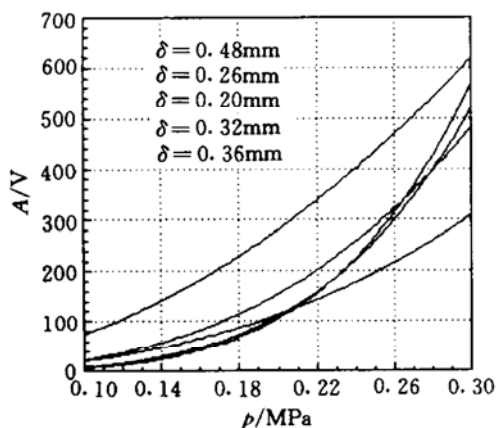


Fig. 6 Effect of p on break

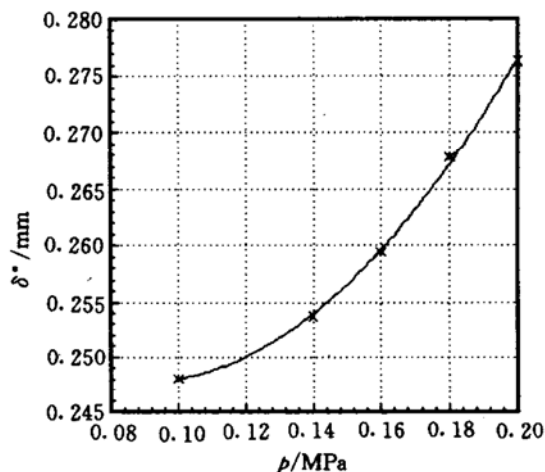


Fig. 7 The change of optimum interval with pressure

3.3 喷射压力 p 对断裂的影响

由图 5 和图 8,在各种 d_0 和 δ 条件,均可得出喷射压力高,不易于断裂的结论。从图 8 中还可以看出,喷孔直径较小时,不仅其激励电压较低,曲线也比较平缓,即喷射压力对激励电压大的影响较小。但是喷孔直径小时,易于堵塞,在设计时应综合考虑这些因素。

如果超声波喷嘴的激励状态接近其自然雾化状态,所需要的激励能量最小,即激励电压最

低。由试验得出的结果与根据韦伯理论的计算结果是比较接近的。

3.4 喷嘴直径 d_0 对断裂效果的影响

从图 9 可以看出,随着喷嘴直径增加,激励电压升高,断裂困难。这是因为喷嘴直径增大,面积增大,在激励声波功率不变的情况下, W/S (W 为声功率, S_0 为喷嘴面积)要减小,扰动相对减弱,故断裂效果减弱。高的压力下,曲线的斜率增大,此时 d_0 变化对断裂影响显著。

另外, d_0 大,断裂出来的液滴直径要大一些。这和瑞利的射流雾化理论是相一致的:雾化出来的液滴直径是和起始直径即喷嘴直径 d_0 成正比。因此,选取较低的喷射压力和较小的 δ 值,可减小喷嘴直径对激励电压的影响(即减少对射流断裂的影响),提高超声波喷嘴的工作稳定性。

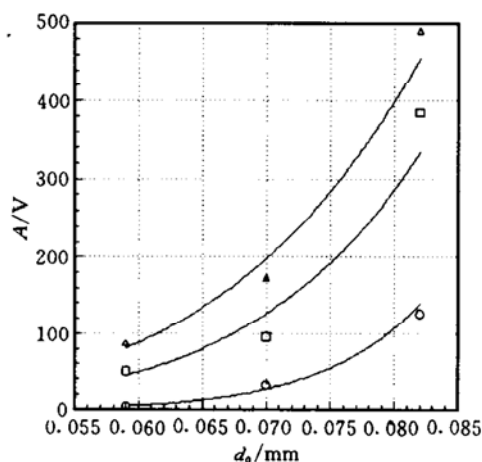


Fig. 9 Effect of d_0 on break

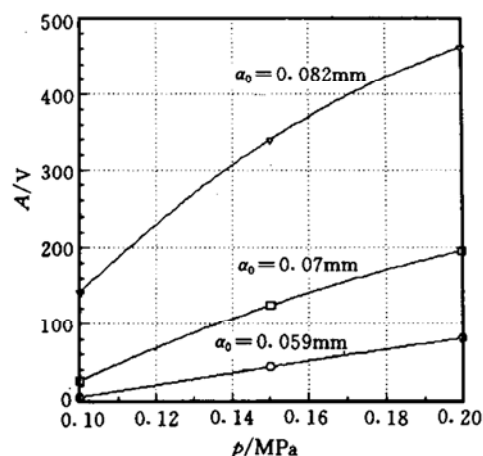


Fig. 8 Effect of p on break

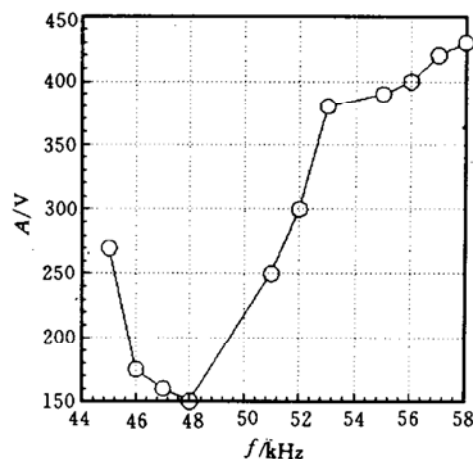


Fig. 10 Effect of f on break

3.5 激励频率 f 对断裂的影响

由图 10 可以看出在一定的工作条件下,存在着最佳激励频率,即在此频率下所需激励电压最低,即在 $A-f$ 图中存在峰值。在激励电压不变的条件下,喷射压力随激励频率的变化有最高值。这意味着在此频率下射流断裂所允许的喷射压力最高,这与图中最佳激励频率的概念是一致的。在不同的激励电压下所得到的最佳激励频率不变,即喷射压力曲线的峰值所对应的频率不变。这说明激励电压与最佳频率无关。另外,当振动腔的长度 δ 增加时,谐振频率将降低。这与理论分析中得出的结论是一致的。因为 δ 值表示超声波喷嘴腔室的纵向长度,由此还可以推论,最佳激励频率应与喷嘴的具体结构有关。因此,在设计超声波喷嘴时,其激励频率需要根据具体喷嘴结构试验确定。

必须指出,激励频率与喷印速度有关,频率高则喷印速度快。因此在选择激励频率时应综合考虑以上因素。

(下转第 107 页)

Proceedings of the 11th International Symposium on Ballistics, Brussels, 1989: 138~146

- 4 Lee T W, Faeth G M. Structure and mixing properties of combusting monopropellant sprays. J of Propulsion and Power, 1992, 8: 271~279
- 5 Zhu D L, Law C K. Aerothermochemical studies of energetic liquid materials: 1. combustion of HAN-bases liquid gun propellants under atmospheric pressure. Combustion and Flame, 1987, 70: 333~342
- 6 Beyer R A. Studies of single liquid propellant drop in hot, high pressure environments. 23rd TANNAP Combustion Meeting, Monterey, 1986: 429~438
- 7 Yonggang Y. The study of ignition, combustion and microexplosion properties for HAN-based monopropellant LP-1846 droplets. Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics. Israel, 1995: 205~214

(上接第 72 页)

4 结 论

本课题研究的这种类型的超声波喷嘴,主要有如下规律:

(1)激励电压 A 越高,射流越容易断裂。可以借提高激励电压来改善喷嘴的工作状况。

(2)应选取压电应变常数 d_{33} 大的压电陶瓷作为换能器材料,喷射压力越大, d_{33} 的影响越显著。

(3)喷嘴腔纵向间隙 δ 存在最佳值,处于最佳间隙值时,射流最容易断裂。离开这个最佳值,断裂效果逐渐变坏。

(4)喷射压力 p 高射流不容易断裂,在较低的压力下, d_{33} , δ , d_0 等因素对液滴形成的影响减弱。因此,选用较低的喷射压力对提高喷嘴的工作稳定性也是有利的。

(5)喷口直径 d_0 小,容易形成液滴,且其它参数的影响减弱。但小喷孔容易堵塞,必须提高墨水的过滤精度。

(6)在选取工作频率 f 时,要考虑与具体喷嘴结构相匹配。

参 考 文 献

- 1 西北工业大学,南京航空学院,北京航空学院合编. 航空燃气涡轮发动机原理. 北京:国防工业出版社, 1990
- 2 赵其寿. 液体燃料的雾化. 北京航空航天大学, 1979
- 3 金如山. 航空燃气轮机燃烧室. 北京:宇航出版社, 1988
- 4 应崇福主编. 超声学. 北京:科学出版社, 1993
- 5 杜功焕等编. 声学基础. 上海:上海科学技术出版社, 1981
- 6 白瑞纳克 L L 著. 声学. 北京:高等教育出版社, 1959
- 7 苏尔皇. 管道动态分析及液流数值计算方法. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1985
- 8 马大猷,沈喆编著. 声学手册. 北京:科学出版社, 1983
- 9 王矜奉,姜祖桐,石瑞大编著. 压电振动. 北京:科学出版社, 1989
- 10 王 平译. 流体力学大学. 北京:北京航空航天大学出版社, 1991
- 11 Schneider. John M. The versatility of ink jet. Hard Copy and Printing Technologies, 1990, 1252: 183