

# 指数复合型低频压电雾化喷头的设计

靳振伟<sup>1</sup>, 储成智<sup>1</sup>, 谷森<sup>1</sup>, 徐伟<sup>1</sup>, 汝长海<sup>1,2</sup>

(1. 苏州大学 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021; 2. 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215021)

**摘要:**设计一种频率为 40 kHz 的指数复合型低频压电雾化喷头, 建立有限元模型, 通过喷头模型的模态分析和谐响应分析来测定喷头模型的振动形态、谐振频率和雾化振幅。模态在八阶时喷头为纯拉伸状态, 谐振频率为 39 550 Hz, 在设定电压为 26 V 时, 仿真得到雾化振幅为 3.9  $\mu\text{m}$ 。采用德国 Polytec 高性能单点式激光测振仪测得喷头样机的振动幅值为 3.94~4.32  $\mu\text{m}$ , 误差小于 10%, 符合设计的要求。采用马尔文 Spraytec 型激光粒度仪对样机雾滴均匀性进行测量, 当驱动电压为 26 V 时, 喷头雾化产生的雾滴直径为  $\varnothing(30\sim95)\mu\text{m}$ , 占比超过 85%, 结果表明, 该喷头雾化液滴分布较均匀。

**关键词:**压电喷头; 指数型; 有限元分析; 均匀性

中图分类号: TN204

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.017

## Design of Exponential Composite Low Frequency Piezoelectric Atomizing Nozzle

JIN Zhenwei<sup>1</sup>, CHU Chengzhi<sup>1</sup>, GU Sen<sup>1</sup>, XU Wei<sup>1</sup>, RU Changhai<sup>1,2</sup>

(1. Robotics and Microsystems Center of Soochow University, Suzhou 215021, China;

2. Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Suzhou 215021, China)

**Abstract:** An exponential composite low frequency piezoelectric atomizing nozzle with a frequency of 40 kHz was designed. The finite element model was established, and the vibration mode, resonance frequency, and atomization amplitude of the nozzle model were determined by modal analysis and harmonic response analysis of the nozzle model. When the mode was at the eighth order, the nozzle was in a purely tensile state with a resonant frequency of 39 550 Hz. When the voltage was set to 26 V, the simulated atomization amplitude was 3.9  $\mu\text{m}$ . The vibration amplitude of the nozzle prototype measured by German Polytec high-performance single-point laser vibrometer ranged from 3.94  $\mu\text{m}$  to 4.32  $\mu\text{m}$ , the error was less than 10%, which met the design requirements. The Malvine Spraytec laser particle size analyzer was used to measure the droplet uniformity of the prototype. When the driving voltage was 26 V, the droplet diameter generated by the nozzle atomization was  $\varnothing(30\sim95)\mu\text{m}$ , accounted for more than 85%. The results showed that the droplet distribution of the spray nozzle was uniform.

**Key words:** piezoelectric nozzle; exponential type; finite element analysis; uniformity

### 0 引言

随着以半导体材料、微电子、柔性导电薄膜和太阳能电池为代表的行业技术的快速发展, 先进的薄膜制备技术成为关键, 对这些行业技术的发展起着重要的推动作用。与传统的压力喷涂和静电喷涂相比, 压电喷涂使用压电雾化的方式能使雾滴粒径达微米级, 压电涂覆法为薄膜制备技术的进一步发展提供了新方向<sup>[1]</sup>。压电喷涂是利用超声波振动产生的毛细波, 对流经超声波换能器工作端的液体进行

雾化, 产生微米级细小液滴的技术, 适用于精确层应用, 可以喷涂任何形状的物体, 具有涂层均匀, 压电雾化喷涂量可控, 喷涂质量可靠, 能耗低, 雾化效率高优点。压电雾化被广泛应用于印刷电路制备<sup>[2]</sup>、太阳能光伏电池<sup>[3]</sup>、TCO 导电涂层<sup>[4-5]</sup>、抗菌涂层<sup>[6-7]</sup>等方面。

压电喷涂系统的核心部分是压电喷头, 目前使用的喷头分为低频和高频<sup>[8]</sup>两种。高频喷头多用于喷涂量少的精密涂覆中, 在工业应用中存在雾化量

收稿日期: 2018-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61774107)

作者简介: 靳振伟(1992-), 男, 河南省开封市人, 硕士生, 主要从事压电喷头方面的研究。E-mail: 1368392072@qq.com。通信作者: 汝长海, 教授, 博士生导师, 主要从事自动化微操作、微纳米驱动系统及控制技术方面的研究。E-mail: rechai@gmail.com。

小,超声换能器的可靠性差、极易产生疲劳断裂、喷头对溶液的粘度要求较高、易堵塞等问题。为满足喷涂效率高、均匀性优异的要求,用途最广的是低频喷头,但目前的低频喷头存在工作效率低,喷雾不均匀、液滴粒径大等缺点。Frangois Lacas 等<sup>[9]</sup>研究了喷头雾化液滴尺寸分布和均匀性等问题的关键参数,其雾化过程中难以同时控制液滴直径、液体流量和液滴均匀性。国内也有一些低频喷头的研究,如高建民等做了一些低频的压电喷头<sup>[10]</sup>,但主要方向是微型的,尺寸很小,那么就决定了其雾化量不大,不能满足大幅面喷涂的应用。

为克服高频压电喷头和目前低频压电喷头存在的雾化量小、喷雾不均匀等方面的问题。本文拟设计一种新型低频压电雾化喷头,该低频压电雾化器雾化量大,雾化液滴粒径小,可靠性较高,可以连续长时间的正常工作,并且喷头喷涂雾滴的均匀性好,能够很好地提升涂层的均匀程度。

### 1 喷头结构设计

图1为压电喷头结构图。图中, $R_1$ 为变幅杆的大端直径, $R_2$ 为小端直径, $l_n$ ( $n=1,2,3,4,5,6$ )为压电喷头各段的长度。变幅杆主要有圆锥形、指数形、悬链线形及阶梯形,为增强变幅杆的某些性能,常将两种或两种以上不同形状的变幅杆组合成复合变幅杆<sup>[11]</sup>。结合阶梯形和指数形变幅杆的特点,本文选用阶梯形带圆弧过渡段的复合指数型变幅杆,其放大倍数大且应力分布均匀。

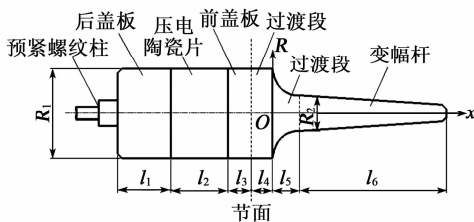


图1 压电喷头结构图

根据涂层均匀性要求雾化液滴粒径为 $\varnothing(30 \sim 95) \mu\text{m}$ ,通过粒径方程 SMD 可计算出压电喷头的频率约 40 kHz。粒径  $d_{\text{SMD}}$  计算式为

$$d_{\text{SMD}} = 0.34 \left( \frac{8\pi T}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: $T$ 为表面张力系数; $\rho$ 为液体密度; $f$ 为声波频率。

由于喷头振动强度和压电换能器放大性能的要求,喷头的材料选用钛合金 Ti150A,压电材料选用

4 块圆环形的 PZT-8 压电陶瓷片,其材料性能如表 1 所示。

表1 材料的性能参数

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	声速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	泊松比
钛合金	4 500	11.6	6 100	0.33
压电陶瓷片	7 600	—	4 100	—

根据半波长的设计把该指数复合型喷头分为 6 段,总长  $L \approx 76 \text{ mm}$ ,过渡段和变幅杆即为复合变幅杆,后盖板、压电陶瓷及前盖板组成了压电雾化喷头的换能器,选定节面位于前盖板、过渡段中间处,节面处喷头左右长度均为  $\lambda/4$ ( $\lambda$ 为波长),其中压电陶瓷片部分总长度为  $l_2$ ,后盖板长度为  $l_1$ 。结合等截面杆振动方程的通解式及边界条件,可得节面左侧  $\lambda/4$  振子简化的频率方程为

$$\frac{Z_1}{Z_2} \tan k_2 l_2 \tan k_1 l_1 + \frac{Z_1}{Z_3} \tan k_3 l_3 \tan k_1 l_1 + \frac{Z_2}{Z_3} \tan k_3 l_3 \tan k_2 l_2 = 1 \quad (2)$$

式中: $Z_i = \rho_i c_i S_i$  ( $i=1,2,3$ ),  $\rho_i$ 为材料密度,  $c_i$ 为材料纵波传播波速,  $S_i$ 为各段的截面积; $k_n = \omega_n / c_n$  ( $n=1,2,3$ )为圆波数,  $\omega_n$ 为圆频率,  $c_n$ 为纵波传播速度。

压电陶瓷片每片的外径为 $\varnothing 20 \text{ mm}$ ,内径为 $\varnothing 6 \text{ mm}$ ,厚为 3 mm,所以  $l_2 = 12 \text{ mm}$ ,根据式(2)计算可得  $l_1 = 12.5 \text{ mm}$ ,由于  $l_3 = l_4$ ,结合节面右端边界条件,通过频率方程确定  $l_3 = 5 \text{ mm}$ , $l_4 = 5 \text{ mm}$ 。指数形过渡段的截面半径  $R$  与坐标  $x$  的关系为

$$R = R_1 e^{\frac{1}{5} \ln(R_2/R_1) x} \quad (3)$$

由  $R_1 = 20 \text{ mm}$ , $R_2 = 4 \text{ mm}$  可计算出指数形过渡段的参数和结构。根据已知条件和我们所预期的设计频率,通过仿真分析的方法不断对喷头结构进行优化,使喷头的仿真频率接近 40 kHz(设计频率),从而达到更好的共振效果并符合设计要求。最终确定喷头结构的基本尺寸为  $l_1 = 12.5 \text{ mm}$ , $l_2 = 12 \text{ mm}$ , $l_3 = 5 \text{ mm}$ , $l_4 = 5 \text{ mm}$ , $l_5 = 9 \text{ mm}$ , $l_6 = 32.5 \text{ mm}$ , $R_1 = 20 \text{ mm}$ , $R_2 = 5 \text{ mm}$ 。

### 2 压电喷头模态及谐响应分析

利用 ANSYS 仿真软件对设计的喷头模型进行模态分析,设定模态分析阶数为 8 阶,在 0~41 kHz 内进行分析。由于喷头压电雾化需通过换能器的纵向振动打散液滴,当喷头频率为固有频率时,压电喷

头的振动为纯拉伸的模式。由模态分析结果可知,喷头的固有频率为 39 550 Hz,振型云图如图 2 所示。

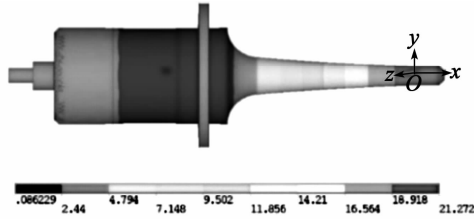


图 2 压电喷头的振型云图

谐响应分析采用完全法 (Full), 设置频率为 39 100~39 900 Hz, 所得结果如图 3 所示。由图 3(b)可看出,喷头所加频率与其固有频率达到共振时,喷头振幅约为 3.9  $\mu\text{m}$ 。由压电喷头能够实现雾化的振幅要求可知,当雾化面的振幅达 2  $\mu\text{m}$  时可使液流雾化,所以从谐响应分析的结果可确定该喷头设计满足要求。

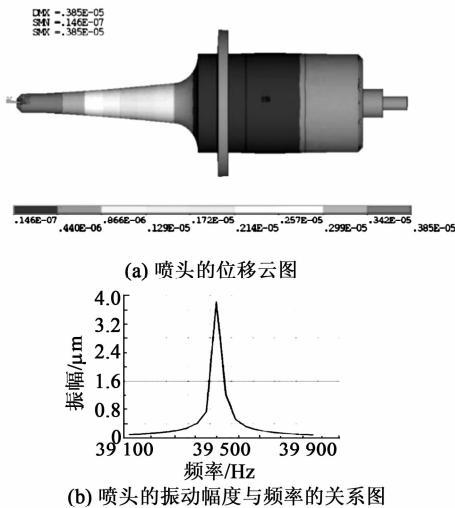


图 3 喷头谐响应分析图

### 3 喷头样机实际频率和振幅测试

#### 3.1 喷头阻抗测试及对比分析

有限元仿真分析得到了压电喷头的设计频率,下面实验使用 PV520A 阻抗分析仪测试样机的实际频率。启动阻抗分析仪输入频率的搜索范围为 35 000~45 000 Hz,选用自动跟踪方式进行扫描,其扫描结果如图 4 所示。由图可以看出,压电喷头样机的实际频率为 39 912 Hz,与仿真分析结果 (39 550 Hz) 的误差为 0.9%,在允许的误差范围 (小于 5%) 内,说明喷头仿真分析频率与喷头实际频率基本吻合。

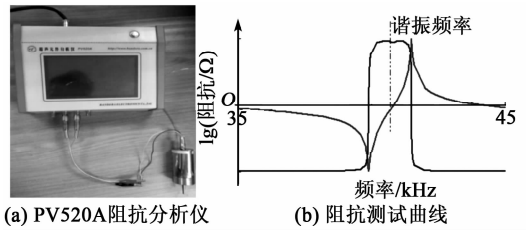


图 4 阻抗测试

#### 3.2 喷头实际振幅测试及对比分析

本文采用德国 Polytec 高性能单点式激光测振仪对喷头的振动幅值进行测量 (见图 5), 该测振仪的控制器选用最新的高性能宽带数字解码技术的 Polytec OFV-5000, 以及与之配套的高敏度光学头 Polytec OFV-525。喷头实际振幅的测量方法: 激光测振仪把光的信号转化为电信号, 电信号通过外部连接的示波器显示出来, 然后再根据转换参数换算成对应的振幅。



图 5 激光测振仪测定喷头的实际振幅图

设测振仪控制器的参数为 3.2  $\mu\text{m}/\text{V}$ , 测振仪的控制器与示波器连接, 测量的位移结果经控制器转换放大后, 以电压的形式反馈在示波器屏幕。以喷头的数字电源电压为变量来检测喷头实际振幅的变化情况, 表 2 为不同电源电压下的测试结果。

表 2 在不同电源电压下示波器测定喷头的实际幅值

次数	示波器反馈电压/V	喷头实际振幅/ $\mu\text{m}$
1	1.23	3.94
2	1.24	3.97
3	1.24	3.97
4	1.33	4.25
5	1.32	4.22
6	1.34	4.28
7	1.35	4.32
8	1.35	4.32

通过谐响应分析的结果可知,喷头的振幅约为 3.9  $\mu\text{m}$ , 用激光测振仪测试的实际振幅为 3.94~4.32  $\mu\text{m}$ , 误差在 10% 内, 在工程设计的允许范围内, 说明结构设计符合喷头实际雾化所需振幅的要求。

#### 4 压电喷头雾化试验与结果分析

图6为激光粒度分析仪测得驱动电压不同条件下雾滴粒径分布情况。为了看出雾滴各粒径段分布情况,统计的数据结果如表3所示。通过雾滴各粒径段占比的对比可直观地看出喷头电源电压与雾滴均匀性的关系。

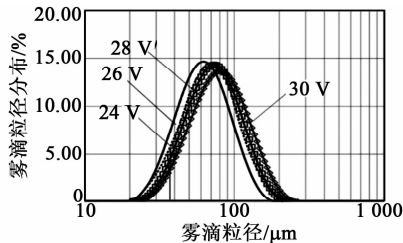


图6 不同驱动电压下雾滴粒径分布曲线图

表3 不同电压下雾滴在各粒径段占比

电压/ V	各粒径段雾滴占比/%				
	$\varnothing(0\sim 3)\mu\text{m}$	$\varnothing(3\sim 30)\mu\text{m}$	$\varnothing(30\sim 73)\mu\text{m}$	$\varnothing(73\sim 95)\mu\text{m}$	$\geq\varnothing95\mu\text{m}$
24	0	1.74	51.36	25.77	21.13
26	0	3.79	62.98	22.13	11.10
28	0	1.15	50.40	14.08	34.37
30	0	0.67	42.42	13.61	43.30

由表3可看出,当压电喷头在不同的驱动电压下,粒径为 $\varnothing(30\sim 95)\mu\text{m}$ 的雾滴分布较集中,占比高于55%。当驱动电压为26V、喷头雾化产生的雾滴直径为 $\varnothing(30\sim 73)\mu\text{m}$ 时占比达62.98%,且驱动电压增加时雾滴粒径分布不集中,说明喷头在26V电压下其雾滴分布最均匀。结果说明,该压电喷头所加电压与喷头雾化液滴粒径有关,但不是电压及喷头振幅越大,雾化的均匀性就越好。

#### 5 结束语

通过压电喷头的模态分析和谐响应分析确定喷头的频率与振动幅值,证明该喷头设计的合理性。喷头样机测试结果与仿真分析结果的对比,其误差在允许的范围内,说明有限元仿真法满足该喷头实际设计的要求。喷头电源电压在24~30V时,激光测振仪测得喷头雾化的实际振幅为3.94~4.32 $\mu\text{m}$ ,符合溶液超声雾化的要求。使用激光粒度仪对雾滴均匀性进行测量,通过测试可知,压电喷头的振幅与雾滴的粒径和雾化的均匀性有关,当压

电喷头电源电压在26V时雾滴粒径的均匀性最好。

#### 参考文献:

- [1] 陈涛, 王晓彧, 章德, 等. 压电换能式超声波雾化喷嘴的研究进展[C]//腾冲:2010中国西部声学学术交流会议论文集, 2010.
- [2] MIAO C F, ZHAI R A, CHU C Z, et al. Fabrication of flexible printed circuit by ultrasonic spray coating[J]. *Electroplating & Finishing*, 2016(17):917-921.
- [3] TAIT J G, RAND B P, HEREMANS P. Concurrently pumped ultrasonic spray coating for donor, acceptor and thickness optimization of organic solar cells[J]. *Organic Electronics*, 2013, 14(3):1002-1008.
- [4] ZHAO G S, WANG Q Z, GUO T Y, et al. Preparation of large-area TCO films for solar cells with ultrasonic spray deposition method[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, 18(11):1317-1321.
- [5] JO W, KANG H S, CHOI J, et al. Plasticized polymer interlayer for low-temperature fabrication of a high-quality silver nanowire-based flexible transparent and conductive film[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 41(17):15114-15121.
- [6] KOO H Y, YI J H, KANG Y C. Characteristics of nano-sized silver-glass composite powders prepared by flame spray pyrolysis[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2010, 489(2):456-460.
- [7] ABBASI A R, BOHLOULZADEH M, MORSALI A. Preparation of AgCl nanoparticles ancient textile with antibacterial activity under ultrasound irradiation[J]. *Journal of Inorganic & Organometallic Polymers & Materials*, 2011, 21(3):504-510.
- [8] CAI C, SANG N, TENG S, et al. Superhydrophobic surface fabricated by spraying hydrophobic R974 nanoparticles and the drag reduction in water[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 307:366-373.
- [9] FRANGOIS L, PHILIPPE V, PHILIPPE S, et al. Design and performance of an ultrasonic atomization system for experimental combustion applications[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 1994, 11(2):166-171.
- [10] 高建民, 陆岱鹏, 刘昌鑑, 等. 微型指数振子低频超声雾化喷头的研制及喷雾试验[D]. 镇江:江苏大学, 2014.
- [11] 孙涛. 正弦形复合变幅杆的设计及其动力学分析[D]. 太原:太原理工大学, 2015.