文章编号:1004-2474(2016)05-0824-05

聚合物微结构超声压印精密加工系统研究

张 亭,刘长军,李 锦,夏旭峰

(华东理工大学 机械与动力工程学院,上海 200237)

摘 要:超声压印技术是一种聚合物微结构成形的新方法。针对微米级超声加工系统的高精度和高可靠性的 要求,设计了用于聚合物微结构超声压印的精密加工系统,推导了换能器动力学模型并求解特征参数,进行了有限 元仿真与优化,并搭建了基于压力反馈的精密压印测控平台。实验结果与理论分析结果吻合,设计的换能器系统 改善了微米级加工中的加工精度、能量控制和可靠性,为快速批量精密压印成形的加工系统提供了设计和优 化方法。

关键词:超声压印;换能器;频率方程;有限元;柔性电子 **中图分类号:**TN710;TM13;TH16;TB55 **文献标识码:**A

Study on Ultrasonic Embossing System for Polymer Microstructure Imprinting

ZHANG Ting, LIU Changjun, LI Jin, XIA Xufeng

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China) **Abstract**: The ultrasonic embossing technology is a kind of new technology for the polymer microstructre fabricating. In view of the high accuracy and high reliability of micro scale ultrasonic machining system, an ultrasonic embossing system for polymer microstructure imprinting has been studied. The dynamic model of the transducer has been derived and the characteristic parameters have been solved. The finite element simulation and optimization of the device have been carried out and the experimental platform based on the force feedback control has been set up. The experimental results agree well with the theoretical model. The proposed transducer system has improved the fabrication accuracy, energy control and reliability of the micro-scale machining. This study provides a theoretical method for designing micro-scale actuator for ultrasonic embossing, and shows great potential for fast fabrication of polymer microstructures with low cost and energy consumption.

Key words: ultrasonic embossing; transducer; frequency equation; FEM; flexible electronics

0 引言

聚合物材料柔性微机电系统(MEMS)器件具 有质量轻,抗腐蚀,绝缘性能好及成形效率高等优 点,在精密仪器、柔性电子、生物分析芯片等领域有 广阔的应用前景^[1]。聚合物热压印技术是近年发展 起来的一种高效率、低成本的微结构复制方法,但是 热压成形需要将基片的温度加热到玻璃转化温度以 上,成形周期长,热影响区大、易变形,因此许多学者 将超声能量作为辅助热能引入到热压成形中^[14]。 超声压印的加热效果集中在表面,能量传递快速、 易控制,具有较高的加工效率和加工精度,是一种 新型的聚合物微结构成形方法。由于微米级加工 中对加工精度、能量控制和可靠性的标准远高于 传统塑性成形工艺,因此,对用于超声压印的核心 部件超声换能器系统的设计与优化提出了更高的 要求。超声换能器的振幅控制、相应的机电特性 和动力学响应是精密控制能量传递的基础,是影 响超声压印效果的一个核心因素^[5]。因此设计谐 振点各参数精确可控的超声换能器是保证精密压 印成形的关键技术。

本文将针对微尺度下的聚合物压印成形设计超 声换能器系统。基于一维纵振动波动理论,建立换 能器系统的解析模型,推导了 1/4 波长圆柱形和圆

收稿日期:2015-10-26

基金项目:中央高校基本科研业务费基金资助项目(WG1514031)

作者简介:张亭(1989-),女,河北沧州人,硕士生,主要从事微纳加工方面的研究。通信作者:刘长军(1972-),男,安徽人,教授,博士生导师。

锥形复合变幅杆的频率方程,并通过有限元分析对 换能器系统进行了建模与仿真,分析其动力学响应 和电学参数。将通过搭建超声压印实验测试平台, 对设计的超声换能器系统进行实验验证。

1 超声压印换能器系统理论模型

在功率超声加工处理的设备中,我们将由换能器、变幅杆、加工工具头等所组成的系统称为超声换 能器系统^[6]。针对传统功率超声换能器不能满足精 密超声压印加工精度要求的不足,本文在经典朗之 万振子的基础上,设计并优化了用于精密超声压印 的超声换能器系统。

超声压印换能器系统由夹心式换能器、变幅杆 和工具头组成,结构示意图如图1所示。夹心式换 能器利用压电陶瓷(PZT)材料的逆压电效应实现了 将电能转化为机械能的能量转化,变幅杆实现了能 量的聚集放大,工具头的表面刻有微结构图形,利用 超声能量将微结构复制到聚合物基底上。考虑到超 声压印工具头易损和降低超声压印的成本,将工具 头作为可拆卸器件通过紧密螺纹连接与换能器装 配。为降低能量损耗,提高能量的利用率,将超声换 能器系统通过节面位置的法兰盘固定。



图 1 超声换能器系统的结构示意图

1.1 变截面一维纵振波动方程

假设变截面棒由均匀、各向同性材料组成,不考 虑材料的机械损耗,并假设一维平面波沿棒的轴向 传播,在这种假设下,变截面棒横截面上的应力分布 是均匀的,细棒横截面上各质点做等幅同相振动,棒 中任意截面上的位移可用棒轴线上的坐标表示。假 定沿细棒的轴线方向为坐标 *x* 方向,对于厚度为 d*x* 的小体元,作用在其上的合力为 $\frac{\partial(S\sigma)}{\partial x}$ d*x*,根据牛顿 第二定律可得细棒的动力学方程为

$$\frac{\partial (S_{\sigma})}{\partial x} \mathrm{d}x = S_{\rho} \mathrm{d}x \frac{\partial^2 \boldsymbol{\xi}}{\partial t^2} \tag{1}$$

式中:S(x)为 x 位置处的横截面面积函数; $\xi = \xi(x)$ 为质点位移函数; $\sigma = \sigma(x) = E \frac{\partial \xi}{\partial x}$ 为应力函数; ρ 为材料的密度;E为材料的杨氏模量。

在简谐振动的情况下,式(1)可写成

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{\xi}}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\xi}}{\partial x} + k^2 \boldsymbol{\xi} = 0$$
⁽²⁾

及变截面细棒的一维纵振动波动方程,波动方程的 解^[7]为

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{S}} (A \sin Kx + B \cos Kx) \tag{3}$$

式中: $k = \frac{\omega}{c}$ 为声波波数, ω 为振动的圆频率,

 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 为纵波在细棒中的传播速度; A 和 B 的值 取决于初始条件; K 是由 k、S 和 x 共同决定 的变量。

1.2 超声换能器系统的纵振频率求解

根据共振设计原理,超声换能器系统是由换 能器和变幅杆组成的半波振子,工具头为半波长 等截面细杆,这样可使变幅杆和工具头的接触面 处于换能器系统的位移波腹处,即应力波节处,此 状态下工作效率最高^[8]。我们将位移截面作为换 能器和变幅杆的分界面,把换能器和变幅杆组成 的半波振子看作由 1/4 波长的夹心式换能器和 1/ 4 波长的复合变幅杆组成,此时分界面处于波节 处,振动位移或速度为 0。在共振设计原理的基础 上,可以推导出 1/4 波长圆柱形和圆锥形复合变 幅杆的频率方程。

对于 1/4 波长的夹心式换能器,根据变截面细 棒的一维纵振动波动方程和前盖板、压电陶瓷和后 盖板的连接面处,力和位移的连续性边界条件可建 立其频率方程的解析模型,得到换能器的频率 方程^[7]:

$$\frac{z_3}{z_2} \tan k_2 l_2 \tan k_3 l_3 + \frac{z_3}{z_1} \tan k_1 l_1 \tan k_3 l_3 + \frac{z_2}{z_1} \tan k_1 l_1 \tan k_2 l_2 = 1$$
(4)

式中 z_1 、 z_2 、 z_3 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 l_1 、 l_2 、 l_3 分别为1/4波长 夹心式换能器前端、压电陶瓷片、后端的波阻抗、波 数及长度。

对于换能器位移截面前面的部分,即 1/4 波长 圆锥形和圆柱形复合变幅杆,圆锥形变幅杆和圆柱 形变幅杆波动方程的解分别为

$$\xi_4 = \frac{1}{x - \frac{1}{\alpha}} (A_1 \cos kx + B_1 \sin kx) \tag{5}$$

$$\frac{\partial \xi_4}{\partial x} = \frac{1}{x - \frac{1}{\alpha}} (-A_1 k \sin kx + B_1 k \cos kx) - \frac{1}{\alpha} (A_1 \cos kx + B_1 \sin kx) - \frac{1}{\alpha} (A_2 \cos kx + B_2 \sin kx)$$

$$\frac{1}{(x-\frac{1}{\alpha})^2}(A_1\cos kx + B_1\sin kx) \qquad (6)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{5} = A_{2} \cos kx + B_{2} \sin kx \tag{7}$$

$$\frac{\partial \xi_5}{\partial x} = -A_2 k \sin kx + B_2 k \cos kx \tag{8}$$

令圆锥形变幅杆和圆柱形变幅杆的接触面处为 坐标零点,1/4 波长复合变幅杆的边界条件为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi}_{4}/_{x=-l_{4}} = 0\\ \frac{\partial \boldsymbol{\xi}_{2}}{\partial x}/_{x=l_{5}} = 0\\ \boldsymbol{\xi}_{4}/_{x=0} = \boldsymbol{\xi}_{5}/_{x=0}\\ \frac{\partial \boldsymbol{\xi}_{4}}{\partial x}/_{x=0} = \frac{\partial \boldsymbol{\xi}_{5}}{\partial x}/_{x=0} \end{cases}$$
(9)

由式(5)~(9)推得 1/4 波长复合变幅杆的频率 方程为

$$k_1 \tan k_1 l_5 - \frac{k_1}{\tan k_1 l_4} = \alpha \tag{10}$$

式中: $\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 l_4}$, D_1 、 D_2 分别为圆锥宽端和窄端直径: l_4 , l_5 分别为圆锥形和圆柱形变幅杆的长度。

为了获得最大的前、后盖板位移振幅比,提高换 能器系统的前向辐射能力,金属后盖板选用密度较 大的45号钢,前盖板、变幅杆和工具头选用轻金属 铝合金6061,压电陶瓷选用强电场介电损耗低、机 械强度高、稳定性好的PZT-8。材料的性能参数如 表1所示。

表1 材料性能

++ *1	密度/(lag/m ³)	磁烘描具/(10 ¹⁰ D₂)	近ねい
1/1 1/1	密度/(Kg/m)	理性模里/(10 Fa)	们们们
45 号钢	7 890	20.9	0.269
PZT-8	7 600	7.2	0.300
铝 6061	2 700	6.9	0.330

根据精密超声压印换能器系统的需求,本文设计的超声压印换能器系统的设计频率为 23 kHz。 根据上述推导的频率公式,给定超声换能器系统的 部分尺寸,结合表 1 中的材料参数则可计算出其他 部分尺寸,如给定 *D*₁,*D*₂,*l*₁,*l*₂,利用式(4)可求得 *l*₃;给定 *l*₅,利用式(10)可求得 *l*₄。

2 超声换能器系统的有限元分析

有限元分析法可大幅度减少限制条件,自动满 足复杂的结构和边界,在压电陶瓷换能器设计方面 具有强大的功能,已成功应用于研究和优化换能器的设计中^[9]。本文利用 ANSYS 15.0 对设计的超 声换能器系统进行三维建模和仿真,通过模态分析 和谐响应分析模拟了超声换能器系统的机电耦合特 性,得到了换能器系统的谐振状态、工作端面的振 幅、轴线振幅及其他电学参数,验证了理论模型的可 靠性。

2.1 模态分析

模态分析模拟了超声换能器机电耦合系统,通 过模拟仿真可得其谐振频率和谐振频率状态下的振 动形态、变形云图及零位移节点位置。利用 AN-SYS 对设计的超声换能器系统进行三维有限元建 模,采用模态分析法(Block Lanczos)进行模态分 析,模态分析的扫频范围为 8~28 kHz。通过模态 分析得到了超声换能器系统的多阶振动模态, 洗取 第二阶纵振模态为其工作模态,得到了工作模态下 的谐振频率为 23.315 kHz,与设计频率的相对偏差 为1.35%,说明该设计方法完全满足工程设计需 要。超声换能器系统的振动模态位移云图如图 2 所 示,轴向位移分布如图3所示。由图2,3可知,超声 换能器系统的工具头端面的振幅最大,后盖板的位 移很小,实现了超声能量的单向辐射;由图3可知, 在法兰盘部位的位移近似为 0,以此为固支面减少 了机械损耗。有限元仿真结果与设计结果存在一定 偏差的原因可能有:

1) 设计理论存在一定的假设。

2) 理论设计未考虑固支法兰圆盘。

3) 有限元仿真忽略了倒角和应力螺栓的 预应力。





2.2 谐响应分析

对压电陶瓷施加正弦激励电压,采用模态叠加 法对超声换能器系统进行谐响应分析,模拟仿真了 超声换能器系统在简谐激励电压下的动态响应。考 虑到超声换能器系统内部结构的能量损失,在仿真 时设置了阻尼比。超声换能器系统在 8~28 kHz 频率范围内的动态响应如图 4 所示。利用阻抗分析 仪对超声换能器系统进行阻抗分析测试。由图可 知,实验结果和有限元仿真结果具有较好的一致性。 图 5 为工具头端面的轴向振动位移随频率的变化曲 线,由图可知,在第二阶纵振谐振频率下,工具头的 振幅最大,能量的利用率最高。



3 实验研究

为验证该套换能器的压印成形效果,搭建了聚 合物微结构精密超声压印成形系统,并进行了实验 研究,其测试与控制系统如图 6 所示。计算机通过 电机驱动器控制步进电机带动滚珠丝杆,实现了超 声换能器竖直方向定位与工作面压力控制;然后发 出正弦激励信号,经功率放大器将电压施加到压电 换能器上进行压印;同时通过压力传感器实时监测 实验过程中的压力变化,并驱动步进电机改变竖直 方向位置进行补偿,实现了基于压力反馈的超声压 印实验。



图 6 聚合物微结构超声压印成形测试及控制系统

3.1 超声换能器系统的电学参数测试

利用精密阻抗分析仪对设计的超声换能器系统 进行阻抗(Z)测试,测得了其随频率变化的动态响 应及其电学参数。在 8~30 kHz 频率范围内进行 扫频实验,实验测试结果如图 7 所示。阻抗测试实 验得到了超声换能器系统的谐振频率和阻抗等电学 参数,Z最小时对应的频率为超声换能器系统的谐 振频率,此时能量利用率最高,系统的工作性能最 好。实验测试的谐振频率为 23.15 kHz,与有限元 计算结果相对偏差为 0.65%,阻抗测试结果与谐响 应分析结果较符合,完全满足工程设计的需求。





3.2 压印实验及结果分析

超声压印,即带有微结构的工具头与聚合物基 底接触,在一定的压力下,对超声换能器系统施加正 弦激励电压。工具头输出放大后的机械振动,使工 具头和聚合物间产热,在摩擦产热机理和黏弹性产 热机理的共同作用下,聚合物的温度达到玻璃转化 温度,聚合物的形态发生变化。在一定的保压压力 下,聚合物冷却,则完成了超声压印成形。

实验采用的聚合物基底为聚对苯二甲酸乙二醇 酯(PET),厚度为180 μm。设计了栅状结构工具头 和正方形柱状结构工具头两种微结构工具头。其中 微结构突起的高均为 100 μm,线条凸起的宽均为 120 μm。试验的激励频率为 23.1 kHz。

利用两种不同工具头的超声压印换能器系统进行压印实验,并用光学显微镜拍摄其成形效果,压印成形效果如图 8 所示。图 8(a)、(b)显示了栅状工 具头的压印成形效果,图 8(a)中线条左侧有明显的 剪切现象,线条右侧的压印深度较左侧深,造成这一 现象的原因是样品台与工具头不平行。利用微位移 平台调整样品台使其与工具头平行,图 8(b)显示了 调平后的压印效果,从图中可看出线条轮廓清晰,成 形精度高。



图 8 超声压印微结构成形

实验中,检测到聚合物基底受到的压力会减小。 因此,我们设计了压力补偿压印实验与无压力补偿 压印实验,并利用柱状工具头换能器系统进行了实 验探究,压印成形效果如图 8(c)、(d) 所示。由图 8(c)、(d)可知,图8(c)的边界较图8(d)模糊,边界 弧度较大,压力补偿的压印成形较无压力补偿的压 印成形效果好。因为压印过程中,聚合物材料在摩 擦产热和黏弹性产热的作用下,材料的形态由玻璃 态转化成高弹态,材料的弹性模量降低,造成了工具 头和聚合物间压力缺失,模具对聚合物材料的约束 力减小,从而造成成形不规则。两图中的右上角都 存在结构畸变,这可能是模具的畸变引起的,因为实 验所用模具是采取机加工的方式加工的,而在机械 精加工领域 120 μm 的尺度较难精准实现。拍摄图 中有黑点,可能是材料中存在杂质和气泡等缺陷造 成的。在后续的研究中,我们会提高模具的加工精 度和材料的纯度,从而进一步提高成形质量。

4 结束语

本文基于一维纵振动波动理论建立了聚合物精 密超声压印的超声换能器系统的解析模型,并通过 有限元建模和仿真分析,较准确地得到了超声换能 器系统的工作端面振幅分布、轴线振幅分布、谐振频 率、固支平面参数和阻抗等电学参数;理论计算的结 果和有限元分析的结果吻合,验证了本文提出的超 声压印换能器系统的解析模型可用于工程设计,为 超声换能器系统的精密驱动和声辐射能量精确控制 提供了理论基础。通过搭建的基于力反馈的聚合物 超声压印成形测试系统的实验,得到了较好的超声 压印成形效果,验证了设计的超声换能器系统可实 现较精确的聚合物成形,并且发现了压印过程参数 对压印效果有一定的影响,因此在今后的研究中,应 进一步讨论压印工艺,并对工艺参数进行优化,以实 现高精度超声压印成形。

参考文献:

- [1] 王良江.聚合物微结构超声波压印工艺研究[D].大 连:大连理工大学,2012.
- [2] MEKARU H, GOTO H, TAKAHASHI M. Development of ultrasonic micro hot embossing technology[J]. Microelectronic Eng, 2007, 84(5):1282-1287.
- [3] SEO Y S,PARK K. Direct patting of micro-features on a polymer substrate using ultrasonic vibration[J]. Microsyst Technol,2012,18(12):2053-2061.
- [4] ALTMAN B, AHREN R, WELLE A, et al. Microstructuring of multiwall plates for three-dimen- sional cell culture applications by ultrasonic embossing[J]. Biomed Microdevices, 2012, 14(2): 291-301.
- [5] 王晓东,罗怡,张宗波,等.聚合物微器件超声波成形与 封接技术[M].北京:科学出版社,2014.
- [6] 林中茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [7] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [8] 林书玉,鲜小军.功率超声换能振动系统的优化设计及 其研究进展[J].陕西师范大学学报,2014,42(6):31-39. LIN Shuyu, XIAN Xiaojun. Progress and optimization design of high power piezoelectric ceramic ultrasonic vibrating system[J]. Journal of Shanxi Normal University, 2014,42(6):31-39.
- [9] BAO X Q, BAR-COHEN Y, CHANG Z, et al. Modeling and computer simulation of ultrasonic/sonic driller/ corer (USDC) [J]. IEEE Trans Ultr Ferr Freq Contr, 2003,50(9):1147-1159.