

文章编号 1004-924X(2008)01-0103-05

双作用压电泵绝缘压电振子

吴丽萍^{1,2},程光明²,杨志刚²,曾平²,吴银柱¹

(1. 长春工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:提出了对压电泵中的动力元件—压电振子进行特殊绝缘处理的方法,使压电振子在两个方向弯曲变形时都有输出工作能力,形成双面作用的绝缘压电振子。阐述了由一个绝缘压电振子形成两个工作腔体的双作用压电泵结构。根据小挠度弹性弯曲理论导出了绝缘圆形复合压电振子的弹性曲面微分方程,阐述了绝缘处理方案和过程,并对其绝缘特性进行了分析。对绝缘压电振子进行了实验测试,实验结果表明:双作用绝缘压电振子不仅具有绝缘特性,而且具有良好的韧性和强度,其击穿电压比未经绝缘处理的压电振子的击穿电压提高了20~30 V。

关键词:压电泵;双作用;绝缘压电振子

中图分类号:TH38;TN384 **文献标识码:**A

Research on insulated bimorph in piezoelectric pump with double functions

WU Li-ping^{1,2}, CHENG Guang-ming², YANG Zhi-gang², ZENG Ping², WU Yin-zhu¹

(1. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In order to improve the work efficiency of a piezoelectric pump, an insulated bimorph with double functions was proposed through insulation process of bimorph. The insulated bimorph as a driving component of piezoelectric pump could be curved in two directions and could form the outputs. A piezoelectric pump's structure with double functions was obtained by making an insulated bimorph into two antrums. Some elastic curved surface differential equations of insulated circular piezoelectric composite laminates were derived from the elastic thin plate bending theory based on small deflection, and the project and course of insulated process of bimorph were introduced and analyzed. The experimental results show that the insulated bimorph not only has insulated characteristic but also has favorable tenacity and considerable intensity. The breaking voltage of bimorph can increases more 20~30 V than that of uninsulated bimorph, which shows that a new piezoelectric component with double functions is offered for correlative manufacture and scientific research.

Key words: piezoelectric pump; double functions; insulated bimorph

1 引言

近年来,在流体驱动系统中应用压电驱动技术的压电泵引起国内外有关研究人员的关注。由于压电泵具有结构紧凑、无电磁干扰、响应特性快、可以实现精密输送等特点,在微小型流体驱动装置、生物技术方面的微流体输送、医疗药液的输送等方面具有较好的应用前景。压电双晶片振子是压电泵的驱动部件,在压电泵工作时通过压电双晶片的弯曲变形,形成泵腔体积的变化,使流体形成定向流动。因此,压电振子弯曲变形能力是直接影响容积式压电泵输出性能的关键。由于压电陶瓷本身硬且脆,所产生的位移或力很小,因而压电陶瓷本身不能作为压电振子直接使用,通常把压电陶瓷与某种金属弹性材料黏接在一起共同构成振动体,称其为复合压电振子^[1-2]。一般压电泵的驱动元件主要采用黏贴式圆形复合压电振子^[3-4]。

压电泵工作时,通过压电振子两根输出导线施加正弦驱动电压,使其产生弯曲变形。两根输出导线均位于压电振子黏贴压电陶瓷一侧,其中,一根焊接在压电陶瓷上,另一根焊接在金属基板(薄铜片)上;压电振子金属基板一侧作为压电泵工作面。目前,作为压电泵驱动元件的压电振子,国内外通常只利用压电振子金属基板一侧与泵体构成工作腔体,形成压电泵的工作腔,而压电振子黏贴压电陶瓷一侧,虽然也可以和泵体构成工作腔体。但是由于压电陶瓷和带电导线与流体介质-水接触时,容易出现短路,击穿损坏压电振子。因此,压电振子黏贴压电陶瓷一侧和输送的流体介质不接触。作为目前研究应用的压电泵因为只有压电振子一侧和流体介质接触,虽然可以满足工作要求,但是压电泵工作时,压电振子的双侧弯曲变形仅能在一侧产生工作能力。为了提高压电泵的工作性能,本文采用了在压电振子两侧分别与压电泵壳体构成工作腔体的方法,使压电振子两面都能作为工作面,形成双作用压电泵的工作方式。以双作用压电泵应用的驱动动力元件为研究对象,针对该类型压电泵采用的双面作用绝缘压电振子进行了分析研究。

2 双作用压电泵结构

目前,压电泵结构通常采用一个压电振子形成一个工作腔体的方式,即单作用压电泵,其结构如图 1(a)所示,利用压电振子一个侧面与泵体构成腔体作为工作腔体,压电振子另一侧面因粘贴了压电陶瓷和连接导线,通电时,不能与流体介质-水直接接触,虽与泵体也构成了腔体,但不能作为压电泵的工作腔体。

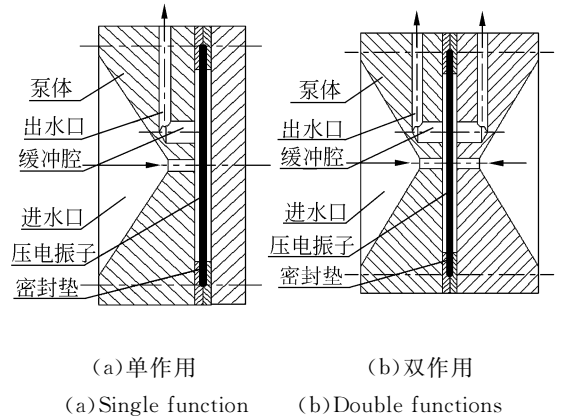


图 1 单作用与双作用压电泵结构简图
Fig. 1 Structural schematics of piezoelectric pump with single and double functions

为了提高压电泵的工作性能,本文提出充分利用压电振子两个侧面,分别与泵体形成工作腔体,使压电振子双侧弯曲变形在两侧均产生工作能力,提高压电振子工作效率的方法。在单作用压电泵的基础上,采用对称结构设计制作了双作用压电泵,其结构如图 1(b)所示,为防止压电陶瓷和带电导线与水接触,出现短路,击穿损坏压电振子,还对压电振子进行了绝缘处理。

3 绝缘压电振子的弹性曲面微分方程

圆形复合压电振子坐标的选取及其结构如图 2 所示。图中 r_1 和 h_1 分别为复合压电振子金属基板的半径和厚度; r_2 和 h_2 分别为压电陶瓷的半径和厚度; z 轴为圆形复合压电振子的对称轴。基于小挠度弹性弯曲理论以及复合压电振子的结构形式,由克希霍夫假设^[5]圆形压电振子薄板小挠度弯曲变形的应变与挠度的几何方程为:

$$\epsilon_r' = \frac{du_r}{dr} = -\frac{d^2 w}{dr^2} z \quad \epsilon_\theta' = \frac{u_r}{r} = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} z, \quad (1)$$

式中, u_r 为径向位移; w 为 z 方向变形位移, 即挠度; ϵ_r' 为径向应变分量; ϵ_θ' 为环向应变分量。压电振子进行特殊绝缘处理后, 其表面形成一层薄膜, 由于该绝缘膜相当薄, 为简化计算, 其厚度忽略不计。该膜使压电振子的径向和环向变形均减小, 设绝缘压电振子径向应变分量为 $\epsilon_r < \epsilon_r'$; 环向应变分量为 $\epsilon_\theta < \epsilon_\theta'$ 。

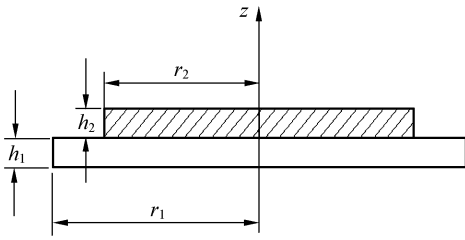


图2 绝缘圆形复合压电振子

Fig. 2 Insulated circular piezoelectric composite laminates

绝缘圆形复合压电振子薄板的应力 σ 、应变 ϵ 及电场 E 关系的压电方程为:

$$\sigma_r = \frac{c}{1-\mu^2} (\epsilon_r + \mu\epsilon_\theta) - \frac{cd_{31}}{1-\mu} E, \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{c}{1-\mu^2} (\mu\epsilon_r + \epsilon_\theta) - \frac{cd_{31}}{1-\mu} E, \quad (3)$$

式中, d_{31} 为压电应变常数; c 为压电陶瓷的弹性模量; μ 为压电陶瓷的泊松比; E 为施加在绝缘压电振子上的电场强度, 得出弯矩和载荷表示的平衡方程为:

$$\frac{d^2 M_r}{dr^2} + \frac{d}{dr} \left(\frac{M_r - M_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{dM_r}{dr} + \frac{M_r - M_\theta}{r^2} + p = 0. \quad (4)$$

绝缘圆形复合压电振子薄板的弹性曲面的微分方程为:

$$\frac{c(Z_2^3 - Z_1^3)}{3(1-\mu^2)} \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = -\frac{cd_{31}}{1-\mu} \int_{z_1}^{z_2} z \left(\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} \right) dz + p. \quad (5)$$

式中, Z_1 、 Z_2 分别为金属基板、压电陶瓷 z 轴方向坐标; p 为液体对压电泵膜的压强。

4 压电振子的绝缘处理

4.1 绝缘处理的要求

由于压电振子上黏贴的压电陶瓷片既薄又脆, 两端加上电压后, 产生的变形量很小, 这就要求对压电振子做绝缘处理时, 绝缘层既要薄又要有很好的韧性。绝缘层太厚阻碍压电振子的变形, 而且压电振子的变形在微米级很小会被厚厚的绝缘层吸收; 绝缘层太薄, 强度不够, 会因高频弯曲变形而断裂; 绝缘层韧性差, 绝缘层弯曲变形未能在高频率变形下快速恢复变形, 甚至变形不能恢复而成为永久变形, 造成绝缘层与压电陶瓷分层, 压电振子变形只能发生在绝缘层内部, 以至于压电泵腔体没有容积的变化, 不能实现吸、排水的功能。同时压电振子一直与水接触, 应该具有较好的稳定性, 不软化, 不分解, 不对水等液体有污染。因此, 绝缘处理的具体要求如下:

(1) 对压电陶瓷片、焊点和连接线的表面进行绝缘处理后, 与水接触能够正常工作。

(2) 经过绝缘处理的压电振子, 应保持原有的基本特性。绝缘层应与压电振子紧密结合形成一体。当压电振子工作变形时, 绝缘层与之相适应, 二者不能产生分层现象, 应结合牢固、可靠。

(3) 绝缘层应具有较好的延展性, 与压电振子的变形相适应。所以要求绝缘层厚度不但要薄, 具有一定的强度, 而且还要有良好的韧性, 否则, 绝缘层会影响压电陶瓷片的变形和工作特性。

(4) 绝缘层应具有稳定性好, 寿命长。也就是说不但要防水, 而且在水中长期浸泡不改变其特性, 尤其在通电施加电压情况下, 绝缘层不能分解, 保持绝缘防水的稳定性。

4.2 绝缘处理的方案

为了较好地实现压电振子的处理过程, 设计了一些具体实施方案, 通过实验寻求符合压电泵特殊要求的绝缘处理方法。

方案一: 采用弹性、韧性较好的薄膜, 利用压膜设备, 经过加温、压制, 使薄膜与压电陶瓷、焊点和局部导线黏接在一起, 经过这样处理过的压电振子能够起到绝缘、隔水、不导电作用, 基本上能够达到要求, 但也有不足之处:

(1) 压电振子的变形频率较快, 薄膜变形频率较慢, 结果造成不同步, 工作一段时间后, 薄膜与

压电振子产生分离现象。

(2)在压制过程中,因压电陶瓷较脆,极易压碎。

(3)由于薄膜较薄,导线和焊点的凸起,易破坏薄膜,使薄膜寿命降低。

方案二:首先对压电振子表面进行清理,然后将焊有导线的压电振子放入稀释后的液态绝缘材料中,最后进行加热处理。于是在压电振子表面形成薄且均匀、韧性好、具有一定强度的绝缘层。

经过上述处理后,液态绝缘材料在一定温度下发生化学反应,牢牢地黏附在压电振子的表层,与压电陶瓷形成一体,其特点:(1)液态绝缘材料在压电陶瓷的表面形成的保护膜,不仅很难将绝缘层从压电振子的表层剥离开,而且弥补了压电陶瓷易碎裂的不足,对压电陶瓷起到保护作用,使压电振子耐压能力得以提高。(2)将绝缘处理后压电振子放入水中长期浸泡,绝缘层不退色,不改变其特性;(3)将绝缘处理过压电振子放在水中,并施加正弦交变电压使之产生变形,绝缘层组成成分稳定,没有发生绝缘层与压电振子分层现象。

5 绝缘层对压电振子变形量的影响

为了更好地了解绝缘压电振子的振动变形情况,分别对未绝缘与绝缘的压电振子施加正弦波驱动电压信号使之产生振动,对比测试其中心变形量与径向变形量。测试所用压电振子直径 20 mm,总厚度 0.6 mm,压电片直径 12 mm,直径比 0.6。

5.1 实验设备

实验测试所用设备:AG1200 任意波形发生器,7058 功率放大器,LV-1610 激光多普勒测振仪,CF-5210/5220 多功能 FFT 分析仪,Agilent4294A 精密阻抗分析仪。

利用任意波形发生器产生不同频率及波形的电压信号,如正弦波等,经功率放大器将驱动电压放大,把经过放大的信号施加到压电振子上,使压电振子产生往复振动,将激光多普勒测试仪的激光摄像头对准压电振子的中心位置,动态采集压电振子往复振动的数据,最后通过多功能 FFT 分析仪获得振子的压电振动变形量。

5.2 中心变形量对比实验

分别对绝缘处理前后的压电振子中心变形量

进行了测试,得到如图 3 所示曲线。从图中可以看出:在频率一定的情况下,随着输入电压的增大,压电振子与绝缘压电振子中心点的变形量均逐渐增大,基本呈线性关系;由于绝缘层的影响,绝缘压电振子中心变形量低于未绝缘处理压电振子中心变形量;在不超过压电振子的击穿电压情况下,通过提高电压可以提高压电振子变形量;绝缘压电振子的击穿电压比未绝缘处理压电振子的击穿电压高出 20~30 V,说明绝缘处理后压电振子的耐压能力提高。

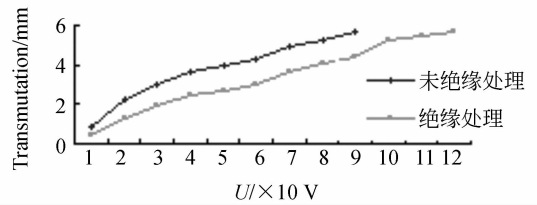


图 3 压电振子中心变形量曲线

Fig. 3 Curves of bimorph center transmutation

5.3 压电振子与绝缘压电振子径向方向的各点变形量对比实验

在电压 90 V、频率 255 Hz 情况下,对压电振子与绝缘压电振子沿径向各点的变形量分别进行了测试,结果如图 4 所示。从图中可以看出:在压电振子周边固定的情况下,压电振子中心变形量最大,离中心越远变形量越小,而且距离中心相等处点的变形量相等;绝缘压电振子沿径向各点的变形量均低于未绝缘处理压电振子沿径向各点的变形量。因此,根据压电振子各点变形情况,在设计压电泵腔体结构时,腔体的形状应与压电振子变形形成的曲面相吻合,从而形成均匀的液流输出带,避免形成涡流区,提高压电泵输出性能。

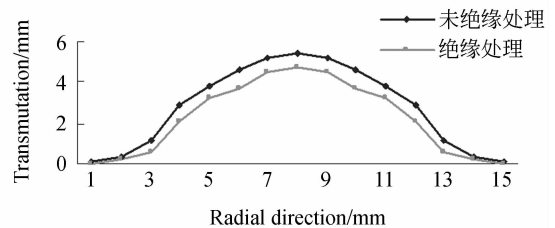


图 4 压电振子径向方向上变形量曲线

Fig. 4 Curves of bimorph point transmutation on radial direction

6 结 论

综上所述,为了提高压电泵的工作性能,采用在压电振子双侧都设计为工作腔的方法,使压电振子两侧面都能作为工作面,形成双作用压电泵的方式。为此,采用液态绝缘材料在压电振子表层形成薄且均匀、韧性好、具有一定强度的绝缘

层;由于绝缘层的影响,双作用绝缘压电振子的变形量低于未绝缘处理压电振子的变形量,但其耐压能力得以提高,其击穿电压提高了20~30 V;绝缘压电振子抗腐蚀能力强,稳定,不易分层,未改变原有压电振子的特性;利用绝缘压电振子作为容积式双作用压电泵驱动元件,与泵体形成两个工作腔体,提高了压电泵的工作效率。

参考文献:

- [1] 龚俊,杨瑞锋,刘永平. 双振子压电微泵的结构设计与流量分析[J]. 液压与气动,2007,1(4):31-32.
GONG J, YANG R F, LIU Y P. The structure design and flow analysis for piezoelectric micropump with double vibrator[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2007,1(4):31-32. (in Chinese)
- [2] 曾平,程光明,刘九龙,等. 双腔薄膜阀压电泵的实验研究[J]. 光学精密工程,2005,13(3):312-313.
ZENG P, CHENG G M, LIU J L, et al.. Experimental research on double-chambered piezoelectric pump with membrane valves[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3):312-313. (in Chinese)
- [3] 阚君武,彭太江,唐可宏,等. 两腔压电泵结构与特性[J]. 压电与声光,2006,28(1):39-40.
KAN J W, PENG T J, TANG K H, et al.. The structure and performance of double chamber piezoelectric pumps [J]. *Piezo Eelctrics & Acoustooptics*, 2006,28(1):39-40. (in Chinese)
- [4] 舒乃秋,李玲,毛慧和. 复合压电振子粘接层及粘接工艺的研究[J]. 武汉大学学报,2001,34(3):51-54.
SHU N Q, LI L, MAO H H. Study on sticking layer and making technique for complex piezoelectric vibrator[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2001,34(3):51-54. (in Chinese)
- [5] 贾建援,黄新波,康春霞. 微泵的结构与流体分析[J]. 微纳电子技术,2004,41(5):41-44.
JIA J Y, HUANG X B, KANG CH X. Analysis on the structure and hydrokinetics of micropump[J]. *Micronano-electronic Technology*, 2004,41(5):41-44. (in Chinese)

作者简介:吴丽萍(1965—),女,河北石家庄人,博士研究生,副教授,主要从事机械设计、压电驱动与控制技术的教学和科研工作。E-mail: wyzwlpl@163.com