

超声马达转子摩擦材料厚度对驱动性能的影响研究

曲建俊^{1,2}, 周铁英¹, 齐毓霖², 张志谦²

(1. 清华大学 物理系, 北京 100084; 2. 哈尔滨工业大学 机械工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 制备了一系列不同厚度的摩擦材料, 利用超声马达摩擦特性模拟试验装置, 研究了摩擦材料厚度对超声马达空载转速和堵转力矩的影响。基于一个简化的行波超声马达定子和转子接触模型, 用有限元法计算了定子和转子接触变形随摩擦材料厚度的变化规律, 提出了定子和转子具有合理接触变形的摩擦材料厚度范围。根据试验和理论计算结果确定了摩擦材料最佳厚度, 为超声马达摩擦材料厚度设计提供了理论依据。

关键词: 超声马达; 接触; 摩擦材料; 厚度

中图分类号: TM 359.9; TH 117.1

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)02-0134-04

正确选择摩擦材料是超声马达设计的关键技术之一^[1,2]。近年来, 国内外许多学者研究了摩擦材料的性能, 如硬度、弹性模量和摩擦系数等对超声马达输出特性的影响^[3-5]。然而, 关于摩擦材料的结构尺寸, 如厚度和各向异性等对超声马达性能影响的研究局限于不同厚度的摩擦材料^[6-8], 且主要是理论计算^[9], 缺乏系统的研究, 特别是对于同样的马达, 使用不同学者的计算公式所得到的结果不一致。这就要求在进一步进行理论研究的基础上, 开展实验研究。有限元计算表明, 摩擦材料的厚度和各向异性等对定子和转子的接触状态具有显著的影响^[10], 而定子和转子的接触状态直接影响马达的驱动行为。此外, 厚度过小使得加工难度增大, 还会影响摩擦材料的使用寿命。本文作者研究摩擦材料的厚度对超声马达驱动性能的影响, 建立定子和转子接触变形随摩擦材料厚度的变化规律, 为摩擦材料厚度的选择提供理论依据。

1 实验部分

1.1 试样制备与性能

用丁晴橡胶改型酚醛树脂作粘合剂, 选择高岭土、氧化铜、硅线石和聚四氟乙烯 4 种填料和长度为 3~5 mm 短切芳纶纤维作增强材料, 以基体树脂为 1, 按高岭土: 氧化铜: 硅线石: 聚四氟乙烯= 2: 50: 0.10: 0.03: 0.03 的比例, 并加入适量芳纶纤维, 用模压法制成摩擦材料(简称 FM)^[4]。FM 的基本性能

为: 与硬铝对摩时的干摩擦系数为 0.52, 洛氏硬度 90HRM, 弹性模量 4.0 GPa。将 FM 制成不同厚度的环形试样并用 SA 102 胶分别粘贴在铝质转子上, 制得具有复合结构的非标准试样, 采用 FM 洛氏硬度测试原理测定的转子表面硬度见表 1。

表 1 不同厚度 FM 的转子表面硬度

Table 1 Surface hardness of rotor friction material

Thickness b_l /mm	Hardness H_{RM}
0.1	122
0.2	120
0.5	104
1.0	98
2.0	92
3.0	90

1.2 试验方法

在超声马达摩擦特性模拟试验装置上进行试验, 该装置的结构和原理参见文献[4 和 11]。其通过更换贴有不同厚度 FM 的转子, 模拟马达的工作条件, 定子和转子接触总预压力为 7 N, 定子驱动电压 $V_{p-p} = 80$ V。转子的 FM 尺寸为外径 36 mm, 内径 18 mm。定子为圆盘形, 外径 40 mm, 内径 14 mm, 齿环面尺寸为外径 28 mm, 内径 22 mm。试验前, 将定子和转子 FM 表面用 800# 水砂纸精磨, 用酒精清洗烘干。在试验过程中, 当马达转速趋于稳定时开始测试各种厚度的 FM 对马达空载转速 N_0 和堵转力矩 M_d 的影响, 并以此表征超声马达的驱动特性。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19874039)。

收稿日期: 2001-09-07; 修回日期: 2001-11-18/联系人曲建俊, E-mail: thqjj@263.net

作者简介: 曲建俊, 男, 1962 年生, 博士后, 副教授, 目前主要从事超声马达摩擦学及其摩擦材料研究



2 结果与分析

2.1 FM 材料厚度对 M_d 和 N_o 的影响

图 1 示出了马达 M_d 和 N_o 随 FM 材料厚度 (b_1)

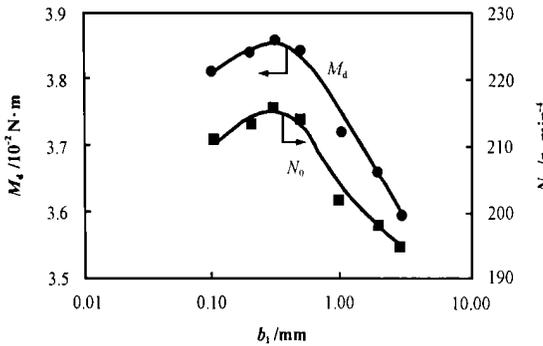


Fig 1 Variation of N_o and M_d of ultrasonic motor with b_1 of friction material

图 1 超声马达 M_d 和 N_o 随 FM 材料的 b_1 值变化的关系

的变化 可以看出, 当 FM 材料的 b_1 从 3.0 mm 减小到 1.0 mm 时, M_d 缓慢增加; 当 $b_1 < 1.0$ mm 时, M_d 迅速增加, 并在 b_1 减小到约 0.3 mm 时达到最高值; 随着 b_1 的继续减小, M_d 反而逐渐下降且波动加剧 此外, N_o 随 FM 材料 b_1 的变化规律与 M_d 相似, 当 b_1 达到约 0.3 mm 时, N_o 达到最高值, 当 b_1 从 0.3 mm 进一步减小时, N_o 减小非常缓慢, 并出现一定波动 因此, 当转子 FM 的 b_1 为 0.3 mm 左右时, 超声马达的 M_d 和 N_o 值较高

2.2 FM 材料厚度对马达定子和转子接触状态影响

2.2.1 有限元分析模型

本文模拟一台 B_{13} 模圆板型行波超声马达的转子和定子^[12], 其材料的性能见表 2 当定子振动时, 其齿

表 2 转子和定子的材料及其性能

Table 2 Materials and performance of stator and rotor

Element	Material	Elastic module/GPa	Poisson ratio μ	Density $\rho/g \cdot cm^{-3}$
Rotor	LY12CZ	70.0	0.33	2.7
FM	Eng. plastic	4.0	0.35	1.8
Stator	LY12CZ	70.0	0.33	2.7
PZT	PZT4	73.0	0.38	7.6

圆周上共有 3 个波峰同时与转子 FM 接触, 3 个波峰呈 120° 对称, 取一个波长作为定子和转子接触研究区域, 有限元计算接触模型如图 2 所示 计算时, 假设每个波峰接触区域的应力分布相同, 定子行波波面为刚性体, 转子 FM 为线弹性体, 沿定子波面变形, 转子基体为刚性不变形; 因与定子粘结的压电陶瓷与定子材

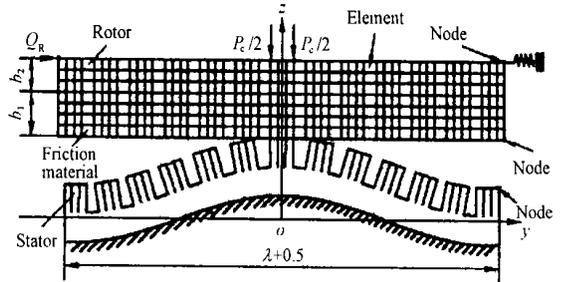


Fig 2 Contact model of FEM between stator and rotor
图 2 定子和转子有限元计算的接触模型

料的弹性模量和泊松比接近, 将其与定子视为同一种材料; 转子基体与 FM 牢固粘结, 忽略胶层的影响

因为定子齿沿径向的宽度与波长之比不大, 故可将定子和转子的接触问题简化为存在摩擦的二维平面接触问题 由于转子稳态工作时匀速转动, 定子和转子接触呈平衡状态, 因此选择一个驱动周期内定子和转子的对称接触状态, 按准静态接触问题研究 FM 厚度对定子和转子接触状态的影响, 采用 ADINA 有限元程序进行计算

2.2.2 求解条件

计算时取定子振幅 $A_s = 1.2 \mu m$, 弯曲行波波长 $\lambda = 26.2 mm$. 将图 2 模型中每个定子齿分别沿波面按 3 等分划分为棒状刚性单元, 共 39 个单元 52 个节点 将 FM 和转子基体分为 2 个单元组, 分别划分 4 层和 3 层, 共计 357 个单元 416 个节点 为模拟堵转条件进行接触状态分析, 分别在转子基体上施加横向 (y 向) 集中载荷 Q_R 和纵向 (z 向) 集中载荷 P_c ; 选用与模拟试验相同的接触预压力, 即 $P_c = 2.33 N$ (总预压力为 $7 N$) 和 $Q_R = 0.616 N$, 作为计算载荷

2.2.3 表面节点接触变形功

当计算平衡时, 将接触区 FM 表面各节点在 y 方向的接触力 F_y 与各节点在该方向的表面位移 D_y 的乘积之代数和定义为接触区 y 向表面节点接触变形功, 简称接触变形功, 用 A_y 表示 A_y 描述在固定的接触条件下, FM 表面各节点处于弹性接触状态下, 表面节点沿接触力方向产生弹性变形需要的功 A_y 反映了接触表面因接触弹性滑动损失功率的一部分 A_y 越大, FM 与定子接触过程中需要消耗的能量越大, 转子获得的有效驱动能量越低 该值与 FM 的弹性模量、动摩擦系数和厚度等参数有关

2.2.4 数值分析

设 FM 的弹性模量 $E = 4.0 GPa$, 摩擦系数 $f = 0.52$, 泊松比 $\mu = 0.35$, 厚度 b_1 在 $0.05 \sim 3.00 mm$ 范围内取 10 个变化值, 在固定载荷条件下, 分别计算

FM 的接触节点数 N 和 A_y 随 FM 的 b_1 变化, 结果如图 3 所示 可见, 接触区 N 随 FM 的 b_1 值的减小而减

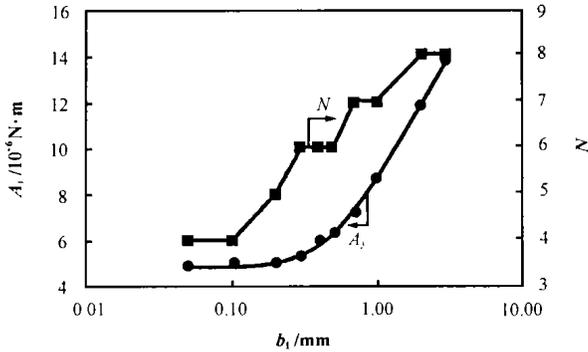


Fig 3 Variation of N and A_y with b_1

图 3 接触区 N 和 A_y 随 FM 材料厚度变化的关系曲线

少, 当 b_1 处于 0.3~0.5 mm 范围时, 接触区 N 出现一个平台; 而当 b_1 小于 0.1 mm 时, N 又开始减少. 因此, 当 $b_1=0.3\sim 0.5$ mm 时, 定子和转子可望保持一定的接触宽度. 与此同时, 接触区 A_y 随 b_1 的减小而逐渐减小; 即当 b_1 较小时, 定子和转子在接触过程中因 y 方向产生的弹性滑动而导致的功率损失也较小. 当 b_1 小于 0.2 mm 时, 随着 b_1 的减小, A_y 保持不变. 可见, 在一定条件下, 选择较薄的 FM 材料 (b_1 值较小), 难以减小因弹性滑动而导致的功率损失.

图 4 示出了 FM 沿 z 向的最大变形 D_m 和该变形

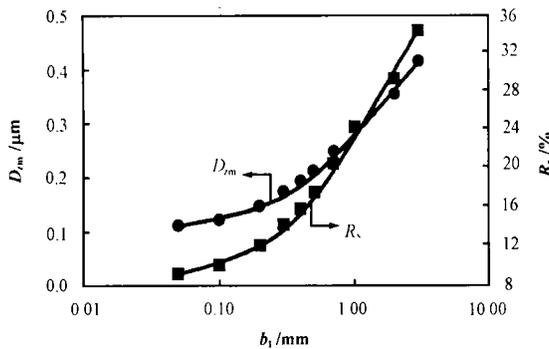


Fig 4 Variation of D_m with b_1

图 4 超声马达 FM 材料沿 z 向的最大变形 D_m 随 b_1 变化的关系

与 A_s 的比值 R_s 随 b_1 的变化情况. 可见, 随着 b_1 减小, D_m 和 R_s 都减小, 表明 FM 侵入定子行波表面的深度减小. 由文献[1]可知, 定子和转子合理的接触变形条件是 FM 的 R_s 值为 12.5%~20.0%. 根据图 4 可以拟合出 R_s 与 b_1 的关系式如下:

$$R_s = 23.36 + 20.36 \lg b_1 + 4.67 \lg^2 b_1 - 2.04 \lg^3 b_1 \quad (1)$$

根据 R_s 的取值范围要求, 由式(1)确定的 b_1 值的

范围为 0.21~0.68 mm, 试验确定的最佳 b_1 值处于该范围内, 表明当 $b_1=0.3$ mm 时, 定子和转子具有较合适的接触变形, 马达具有较好的驱动特性.

由图 3 可以看出, 当 FM 的 b_1 值由 0.5 mm 增大为 3.0 mm 时, A_y 增加了 57.2%, D_m 也相应增加了 48.8% (见图 4). 当 FM 的 b_1 值较大时, 转子表面的硬度较低, 接近 FM 的硬度, 在同样条件下, FM 的弹性变形较大, 定子和转子的接触宽度较大, 摩擦驱动中几何滑动和弹性滑动损失都较大, 而接触宽度增加还使垂直超声波振动对摩擦驱动的消极减摩作用加强^[4], 导致马达 M_d 和 N_o 降低. 当 b_1 值减小时, 转子表面的硬度增大, 弹性变形减轻, 接触宽度减小, 几何滑动和弹性滑动损失也减小, 使 N_o 和 M_d 增大. 然而, 当 $b_1=0.2$ mm 时, 转子表面硬度增加较大, 接触宽度明显减小, 这虽然可以减小摩擦驱动的几何滑动, 但是接触状态容易受转子加工精度的影响, 导致接触不均匀现象^[13]以及 N_o 和 M_d 的波动.

3 结论

建立了一种确定超声马达定子和转子接触变形与 FM 材料厚度关系的方法, 采用该方法可以方便地考察 FM 摩擦材料厚度对超声马达驱动性能的影响, 并根据超声马达定子和转子接触变形的要求, 确定适宜的 FM 材料厚度. 在本文试验条件下, 当 FM 的厚度为 0.3 mm 时, 定子和转子具有较合适的接触状态, 超声马达具有较好的输出特性. 厚度过小, 超声马达工作特性不稳定, 而且使得加工制造难度增大.

参考文献:

- [1] Chen Yongjia (陈永校), Guo Jifeng (郭吉丰). Ultrasonic motor (超声波电动机) [M]. Hangzhou (杭州): Zhejiang University Publishing Company (浙江大学出版社). 1994. 19-21.
- [2] Qu Jianjun (曲建俊), Qi Yulin (齐毓霖), Zhang Zhiqian (张志谦), et al. Advances on tribology of ultrasonic motor and its friction materials (超声马达摩擦学及其摩擦材料研究进展) [J]. Tribology (摩擦学学报), 1998, 18 (1): 80-87.
- [3] Nakamura K, Kurosawa M, Kurebayahi H, et al. An estimation of load characteristics of an ultrasonic motor by measuring transient responses [J]. IEEE Trans on U F F C, 1991, 38 (5): 481-485.
- [4] Qu Jianjun (曲建俊). Friction driving mechanism and friction material research on ultrasonic motor (超声马达的摩擦驱动机理及摩擦材料研究) [D]. Harbin (哈尔滨): Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology (哈尔滨工业大学理学院应用化学系), 1998.
- [5] Ueha S, Tomikawa Y. Ultrasonic Motor—Theory and Applications [M]. Oxford: Clarendon. 1993. 291.

- [6] Hirata H, Ueha S. Design of a traveling wave type ultrasonic motor[J]. IEEE Trans on U F F C, 1995, 42 (2): 225-230
- [7] Yang M, Que P. Performance estimation of a rotary traveling wave ultrasonic motor based on two-dimension analytical model [J]. Ultrasonics, 2001, 39: 115-120
- [8] Lu F, Lee H P, Lin S P. Contact modeling of viscoelastic friction layer of traveling wave ultrasonic motor [J]. Smart Mater Struct, 2001, 10: 314-320
- [9] Cao X, Wallaschek J. Estimation of the tangential stresses in the stator/rotor contact of traveling wave ultrasonic motors using visco-elastic foundation models[C]. Proc 2nd Int Conf on Contact Mechanics, 1995, 2: 53-61.
- [10] Qu J J, Zhang K, Zhou T Y. Numerical simulation of contact state of stator and rotor in ultrasonic motor[C]. In the abstract of paper: 5th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics, Beijing 2001, (1): 100
- [11] Qu Jianjun(曲建俊), Zhang Kai(张凯), Jiang Kaili(姜开利), *et al*. Study on wear properties of rotor friction material of ultrasonic motor(超声马达转子摩擦材料磨损特性研究) [J]. Tribology(摩擦学学报), 2001, 21(4): 283-287.
- [12] Chen Weishan(陈维山). Theoretical and experimental research on traveling wave ultrasonic motors(行波超声马达的理论与实验研究) [D]. Harbin(哈尔滨): Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学机电学院), 1996
- [13] Honda T, Kato K. Fundamental properties of friction and wear on friction drive by traveling wave type ultrasonic[J]. Japanese journal of tribology. 1993, 38(8): 727-734

Effect of Thickness of Rotor Friction Material on the Performance of Ultrasonic Motor

QU Jian-jun^{1,2}, ZHOU Tie-ying¹, QI Yu-lin², ZHANG Zhi-qian²

(1. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A series of friction materials with different thickness for traveling wave ultrasonic motor (TWUSM) were developed. The effects of the thickness of the friction material on the un-load speed and stalling torque of TWUSM were investigated with a simulated tester of TWUSM. A simple contact model with friction between the stator and rotor of a TWUSM was established. The variations of the contact state between the stator and rotor with the thickness of the friction material were simulated numerically using finite element method based on the contact model. The range of thickness of friction material with suitable contact deformation between the stator and the rotor was presented. It has been found that the optimum thickness of the friction material for TWUSM can be determined conveniently based on the method established, by taking into account the requirement for suitable contact deformation of the stator and rotor. Appropriate output performance of the ultrasonic motor is attainable at a thickness of 0.3 mm of the friction material, while un-stability and processing difficulty are caused when the thickness of the friction material is too small.

Key words: ultrasonic motor; contact; friction material; thickness; performance

Author: Qu Jianjun, male, born in 1962, Ph. D., Associate Professor, E-mail: thqjj@263.net