

# 摩擦材料应用方式对超声波电机驱动特性的影响

王彦利, 曲建俊\*, 田 秀

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 摩擦材料是超声波电机的关键零件, 其应用方式直接影响超声波电机的驱动特性. 以行波超声波电机为研究对象, 将摩擦材料分别应用到转子和定子上, 与相应的定子和转子组合, 模拟超声波电机的接触方式, 研究了超声波电机的负载和磨损特性随摩擦材料应用方式的变化规律. 借助于阻抗仪测试了摩擦材料应用到定子齿面前后的阻抗特性, 采用精密粗糙度仪和金相显微镜评价了超声波电机定子和转子接触界面磨损前后的形貌变化及其磨损模式. 结果表明: 当摩擦材料应用到定子齿面时, 定子的谐振频率略微降低; 当2台超声波电机空载转速相同时, 摩擦材料应用到定子齿面与金属转子配副时可获得较大的堵转力矩, 定子摩擦材料表面呈现抛光的磨损特征, 而当摩擦材料应用到转子表面与金属定子配副时, 转子摩擦材料表面呈现较严重的犁沟磨损.

**关键词:** 超声波电机; 摩擦材料; 磨损; 应用方式

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2010)04-0321-07

## Effect of Application Mode of Friction Material on Driving Characteristics of Ultrasonic Motor

WANG Yan-li, QU Jian-jun\*, TIAN Xiu

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Friction material is one of the most important parts in ultrasonic motor. Its application modes affect directly the characteristics of ultrasonic motor. Using two traveling wave ultrasonic motors which the friction material was applied on rotor and stator, respectively, then the rotor and stator were matched with their corresponding stator and rotor to simulate the contact behavior of ultrasonic motor. The variations of load and wear properties of ultrasonic motor with the application modes of friction material were studied. Impedance characteristics of the stator were measured by impedance analyzer before and post applying on friction material layer. The unworn and worn surface morphologies and surface roughness of contact surfaces of the two ultrasonic motors were studied by metalloscope and JB-4C precision roughness instrument. The wear mechanism was analyzed. The results showed that resonance frequency of stator with friction material on decreased slightly. The motor with friction material applied on stator obtained higher stall torque at two ultrasonic motors without loading at same speed. Polishing wear was the dominant mechanism of the stator with friction material, while ploughing wear was the dominant mechanism of the rotor with friction material.

**Key words:** ultrasonic motor, friction material, wear, application mode

超声波电机依靠定/转子间的摩擦力驱动转子转动, 接触界面间的摩擦驱动及磨损特性直接影响其转换效率和使用寿命等指标<sup>[1]</sup>. 近年来, 一些研究单位为改善接触界面的磨损行为, 将摩擦材料应

用到定子齿面与金属转子配副. 此种应用方式与应用到转子上的传统应用方式相比, 摩擦界面的驱动与磨损行为等明显不同. 因此, 急需开展超声波电机接触界面驱动、摩擦磨损等特性随摩擦材料应用方

式的变化差异研究,从而为超声波电机摩擦材料的应用方式提供指导。

国内外学者对摩擦材料应用到转子与定子组合<sup>[2-3]</sup>的超声波电机摩擦驱动特性及磨损特性<sup>[4-5]</sup>进行了一些研究,并得出许多结论<sup>[1,6-7]</sup>。近年来,一些学者开始对摩擦材料应用到定子齿面时的超声波电机的接触特性和摩擦学行为进行研究。曲建俊等<sup>[8]</sup>建立了摩擦材料在定子表面的接触模型,并模拟分析了定转子的接触特性。朱涛涛等<sup>[9]</sup>研究了摩擦材料应用到定子上与几种转子镀层的摩擦匹配关系。韩国学者 Hyun - Phill Ko 等<sup>[10]</sup>研究了 GET、TiAlN、TiN、DLC 和 Si - DLC 5 种定子表面涂层的磨损特性,并得出 Si - DLC 镀层的定子显示出较好的动态特性。丁庆军等<sup>[11]</sup>制作了 1 种定子摩擦材料,研究显示摩擦材料应用到定子上时可以使波电机工作频率变宽。然而以上试验研究是在不同的摩擦组合副间进行的,并没有考虑摩擦副材质的一致性,不能确切地反映摩擦材料不同应用方式对超声波电机驱动及摩擦磨损特性的影响差异。

本文以行波超声波电机为研究对象,将摩擦材料分别应用到转子和定子上,在保持摩擦副材质一致性的前提下,与相应的定子或转子组合,研究摩擦材料的不同应用方式对超声波电机的负载特性和摩擦磨损特性的影响,以期对超声波电机摩擦材料与定子或转子的优化组合提供实验依据,并为定转子接触界面间摩擦副的摩擦匹配优化组合提供指导。

## 1 实验部分

### 1.1 摩擦副准备

选择 2 个共振频率较为接近的同种型号的  $\phi 40$  型行波型超声波电机定子和 2 个转子,定子与转子材料都选择磷青铜 Qsn6.5 - 0.1。定子 1 的共振频率为 45.6 kHz,定子 2 的共振频率为 47.2 kHz。摩擦材料为哈尔滨工业大学摩擦学实验室自行研制的超声波电机用聚四氟乙烯基复合材料<sup>[12]</sup>,将摩擦材料制成 0.3 mm 厚的圆环形式样分别粘贴到定子 1 和 1 个转子上。

在实际应用中粘贴到定子齿面的摩擦材料并不一定与铜转子组合,但从摩擦学角度来说,摩擦副的材质对摩擦驱动特性是有影响的,以不同材质的摩擦副组合,研究摩擦材料应用方式对摩擦驱动的影响是有误差的。因此为了单纯比较应用方式的影响,本文设置了相同材质组合的 2 对摩擦副。将粘贴摩擦材料的定子 1 与无摩擦材料的转子和定子 2 与粘

贴摩擦材料的转子分别组合配对组装成试验用超声波电机。在装配前定子、转子的接触摩擦表面先后在 1 500# 和 2 000# 的水砂纸上研磨、抛光并用丙酮擦洗,烘干。

### 1.2 试验装置

图 1 为超声波电机负载特性测试台示意图,用以测试 2 台超声波电机的负载特性。图中摩擦材料应用在定子齿面上,超声波电机的转速和转矩由转速转矩测量装置采集,负载由磁滞制动器加载,定子和转子间的预压力由弹簧施加。

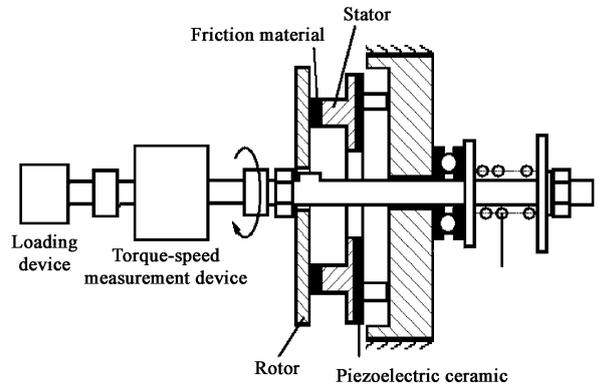


Fig. 1 Schematic of experimental rig for ultrasonic motor

图 1 超声波电机性能测试装置示意图

### 1.3 试验条件与性能测试

#### 1.3.1 阻抗测试

在阻抗分析仪(PV70A)上测试定子 1 的粘贴摩擦材料磨损试验前后的阻抗特性。

#### 1.3.2 负载特性

在其他条件固定,仅改变驱动频率时,一台超声波电机在工作频域内具有唯一转速。因此,在 2 台电机工作参数不尽相同时,为便于对比 2 台电机的负载特性,使 2 台电机具有相同的转速,可以在一定程度上评价 2 台电机的驱动特性差异。本次试验选择预压力 16 N,驱动电压峰 - 峰值 200 V,2 台电机空载转速同为 100 r/min,测试 2 台超声波电机的负载特性。

#### 1.3.3 磨损形貌

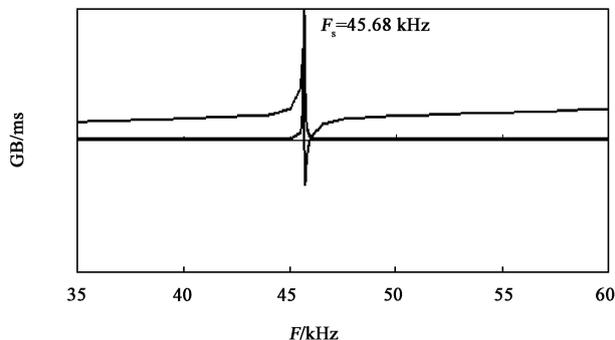
利用金相显微镜和 JB - 4C 精密粗糙度仪分别采集抛光处理后的定子和转子摩擦表面形貌照片与表面径向粗糙度,径向取样长度为 0.8 mm,并记录采集位置。在 2 台超声波电机空载转速保持  $100 \pm 3$  r/min 时,连续运行 3 h 后,采用金相显微镜和 JB - 4C 精密粗糙度仪分别采集定、转子记录位置的磨损表面形貌与径向粗糙度。

## 2 结果与讨论

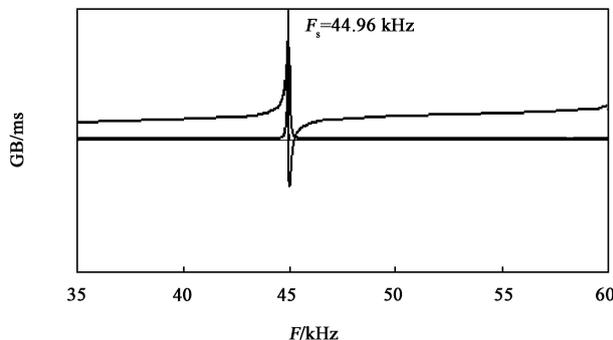
### 2.1 定子阻抗特性

摩擦材料应用到定子上对定子本身振动参数有一定的影响,利用阻抗测试仪测试定子应用摩擦材料前后的阻抗特性,分析其主要参数的变化.此处给出了频率与导纳的关系图及主要参数,如图2(a)和(b)分别为定子1应用摩擦材料前后的阻抗特性测试结果.

由图2可以看出,定子齿面粘贴摩擦材料后的



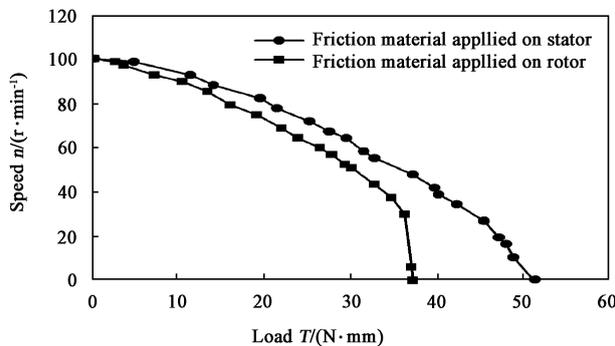
(a) Without friction material



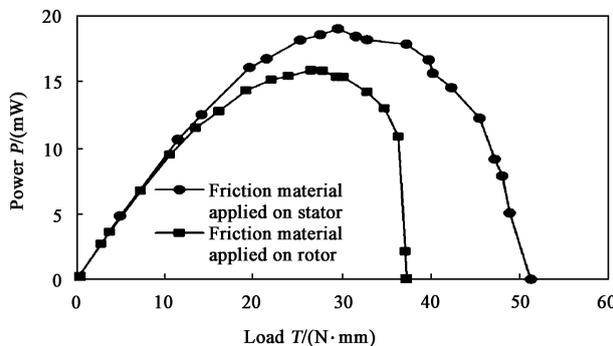
(b) With friction material

Fig.2 Impedance characteristics of stator 1

图2 定子1的阻抗特性



(a) Load characteristics



(b) Power characteristics

Fig.3 Characteristics of load and power of ultrasonic motors

图3 超声波电机负载与功率曲线

由图3可见,摩擦材料应用到定子齿面上的超声波电机获得的负载特性和输出功率均优于摩擦材料应用到转子面上的超声波电机.其中,摩擦材料应用到定子上的电机堵转力矩为51.2 N·mm,应用到转子上的电机堵转力矩为37.2 N·mm.

在本文试验条件下,获得上述结果有2个原因,一是超声振动减摩程度不同,2台超声波电机空载转速相同时,摩擦材料应用到定子齿面与转子面的超声波电机的定子的孤极反馈电压峰-峰值分别为

谐振频率  $F_s$  由45.68 kHz降低到44.96 kHz,降低了0.72 kHz.这是因为摩擦材料粘贴到金属定子齿上后,导致定子齿附加质量,从而使得定子谐振频率略微降低.

### 2.2 负载特性

调节2台电机驱动频率使得空载转速均达到100 r/min时进行测试,摩擦材料应用到转子上与定子2组合的超声波电机电源驱动频率为47.5 kHz;摩擦材料应用到定子1上与铜转子组合的超声波电机电源驱动频率为49.5 kHz.测试结果如图3所示.

27和40 V.孤极电压的大小反映着定子振动的强烈程度,也就是说在该试验中,摩擦材料应用到定子齿面的电机接触界面间的定子振动振幅小于应用到转子面时的电机.研究发现<sup>[13]</sup>,接触面间的定子振幅越大,则摩擦接触面的减摩程度越强.因此,摩擦材料应用到定子齿面时,接触界面间可获得较大的摩擦力,使得超声波电机获得较大的堵转力矩.二是摩擦材料在不同应用方式时,接触界面间摩擦力传递过程不同,使电机获得的堵转力矩不同.当摩擦材料

应用在定子齿面时,堵转力矩由摩擦材料直接作用到转子上的摩擦力产生.而当摩擦材料应用在转子上时,接触界面的摩擦力由定子齿面传递到摩擦材料,再由摩擦材料传递到转子,而摩擦力经过黏弹性摩擦材料接触层传递时,或多或少存在能量损失<sup>[14]</sup>.由此可知,摩擦材料应用到定子齿面时,电机可望获得较大的堵转力矩.

## 2.3 磨损特性

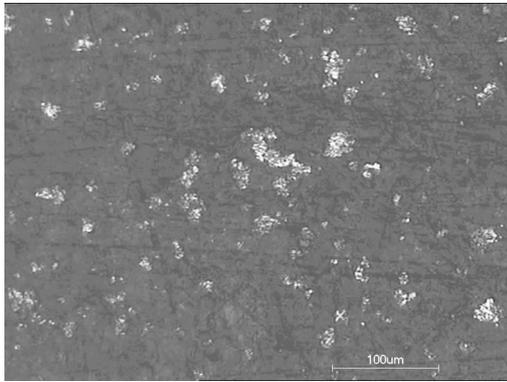
### 2.3.1 摩擦材料的磨损

图4为摩擦材料磨损前后的金相显微照片.由

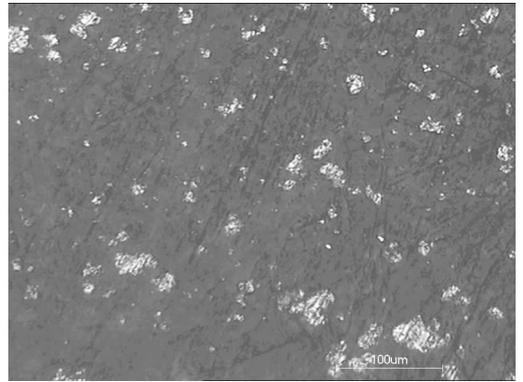
图4可见,摩擦材料磨损表面在金相显微镜下都可见沿滑动方向的条纹状划伤痕迹,其中图4(c)中的划痕较宽大且深,图4(d)中的划痕宽度较小且浅.在相同初始条件、磨损行程内,转子摩擦材料与定子摩擦材料的磨损形式均以犁沟磨损为主,这主要是因为磨损初期2个摩擦副表面的微凸峰相互作用所致,但相比之下转子摩擦材料磨损较为严重.

### 2.3.2 摩擦材料的粗糙度

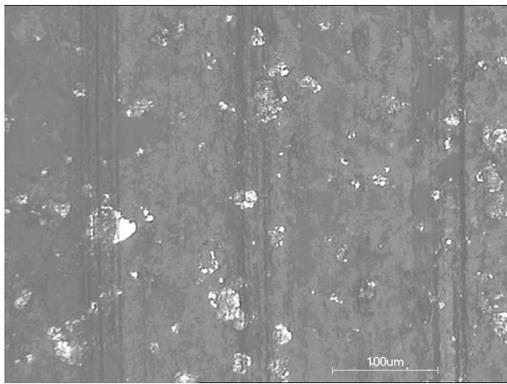
图5为摩擦材料磨损前后的粗糙度,接触摩擦区径向取样长度为0.8 mm.



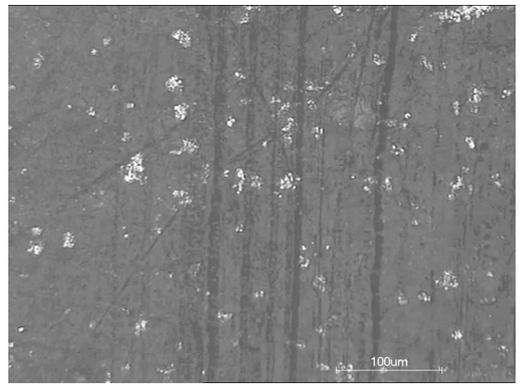
(a) Unworn surface (on rotor)



(b) Unworn surface (on stator)



(c) Worn surface (on rotor)



(d) Worn surface (on stator)

Fig. 4 Metallographs of unworn and worn surfaces of friction material

图4 摩擦材料磨损前后的金相显微照片

由图5(a)和(c)可见,摩擦材料在磨损前的粗糙度基本相同,由图5(b)和(d)可见磨损后的摩擦材料表面粗糙度不同程度减小了,磨损表面呈现出表面抛光的特征.这是因为摩擦副在接触压力作用下经历了磨合作用,在接触滑动过程中,摩擦材料表面的轮廓峰减小所致,由数据表中也可以看出,磨损后表面的 $R_{\max}$ 值比磨损前减小.由图5(b)和(d)可知,定子摩擦材料的表面粗糙度 $R_a$ 由 $0.174 \mu\text{m}$ 减小到 $0.130 \mu\text{m}$ ,而转子摩擦材料粗糙度 $R_a$ 由

$0.175 \mu\text{m}$ 减小到 $0.150 \mu\text{m}$ ,定子摩擦材料表面粗糙度减小的程度更大一些,由此可以推论,转子摩擦材料与金属铜定子摩擦时两表面的轮廓峰间的相互作用较为强烈,与图4(c)和(d)呈现的磨损表面特征基本吻合.

### 2.3.3 金属定子和转子的磨损

图6为金属铜定子和转子的磨损前后的金相显微照片.由图6(c)可见,与转子摩擦材料配副的定子表面沿滑动方向呈现严重的犁沟磨损,而与定子

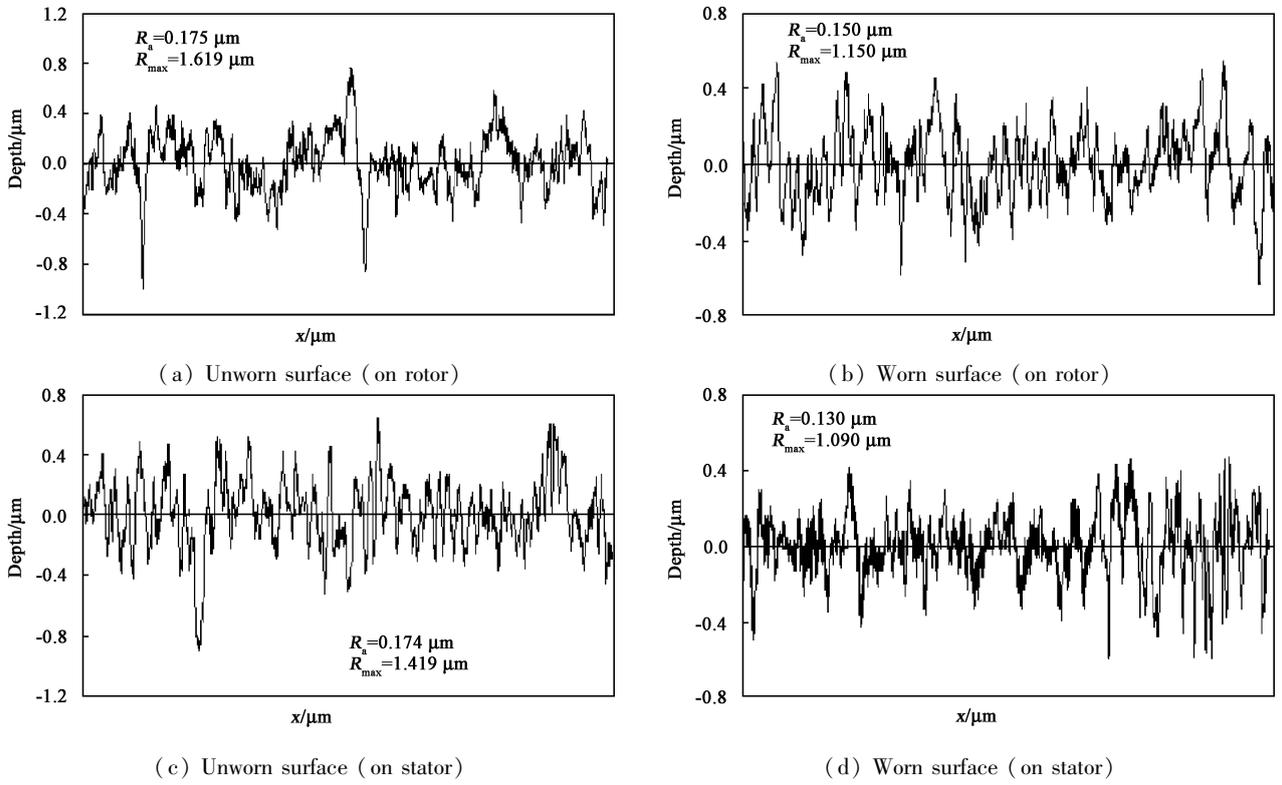
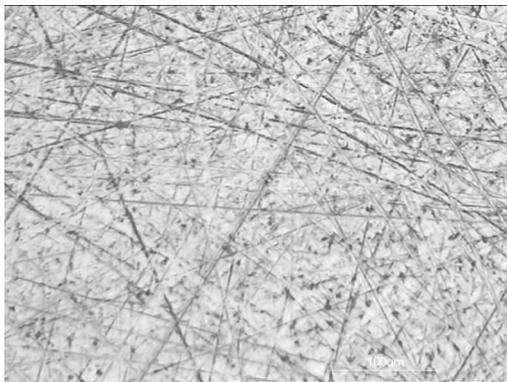
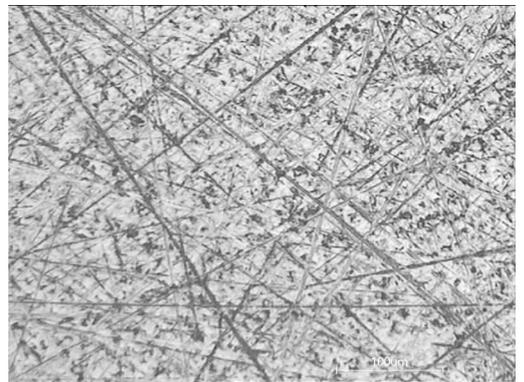


Fig. 5 Surface profiles of unworn and worn surfaces of friction material

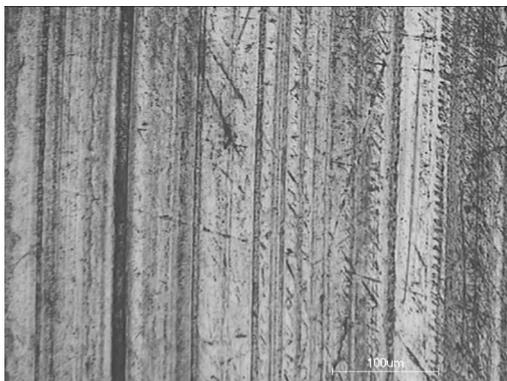
图5 摩擦材料磨损前后的粗糙度



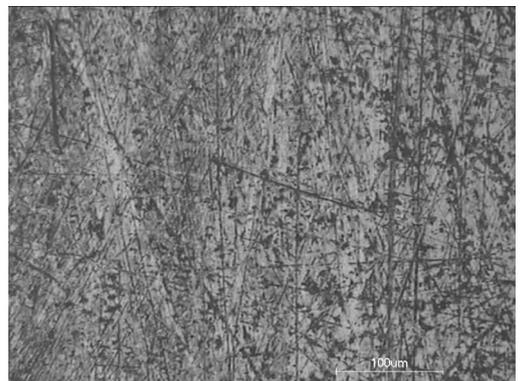
(a) Unworn surface (stator)



(b) Unworn surface (rotor)



(c) Worn surface (stator)



(d) Worn surface (rotor)

Fig. 6 Metallographs of unworn and worn surface of stator and rotor

图6 定子和转子的磨损前后的金相显微照片

摩擦材料配副的铜转子表面有明显的摩擦痕迹但未见明显的犁沟,如图6(d)所示.两金属铜的磨损表面仍以犁沟磨损为主,转子摩擦材料与金属铜定子摩擦时两表面的轮廓峰间的相互作用较为强烈,铜定子磨损亦较为严重;定子摩擦材料与金属铜转子摩擦时两表面的轮廓峰间的相互作用较为和缓,铜转子磨损较为轻微,此结果亦可由其对应的摩擦材料表面磨损形貌得到印证.

### 2.3.4 金属定子和转子的粗糙度

图7为金属铜定子和转子的磨损前后粗糙度.由图7(a)和(c)可见,铜定子和转子在摩擦前的表面粗糙度 $R_a$ 值基本相同,由图7(b)可见,与转子摩擦材料配副的铜定子磨损后的表面粗糙度变大, $R_{max}$ 由磨损前的 $0.743\ \mu\text{m}$ 增大到了 $1.957\ \mu\text{m}$ ,说

明铜定子表面犁沟磨损较为严重,与图6(c)定子磨损后的表面形貌基本吻合.由图7(d)图可见,与定子摩擦材料配副的铜转子表面粗糙度变小,由 $0.098\ \mu\text{m}$ 减小至 $0.084\ \mu\text{m}$ , $R_{max}$ 值由 $0.841\ \mu\text{m}$ 减小至 $0.733\ \mu\text{m}$ ,磨损表面呈现表面抛光的特征,与图6(d)转子磨损后的表面形貌基本吻合.

试验结果表明:摩擦材料应用方式对超声波电机的驱动及接触表面的摩擦磨损具有重要影响,本文仅进行了1种摩擦材料的应用方式对驱动特性影响差异的初步试验研究,接触面间的摩擦驱动机理、作用力、不同摩擦材料等对超声波电机驱动、磨损及瞬态特性等方面的影响差异有待进一步深入研究.此工作的研究将为超声波电机接触界面摩擦副匹配优化组合提供指导作用.

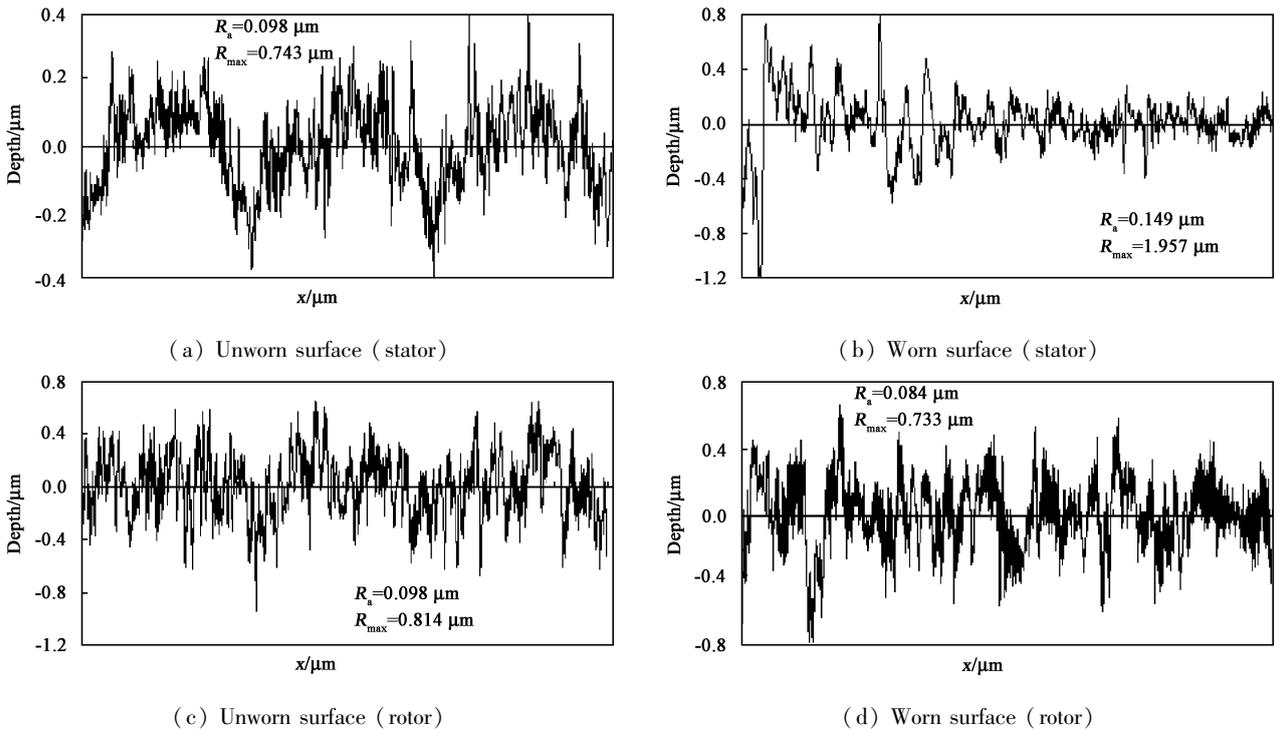


Fig. 7 Surface profiles of unworn and worn surfaces of stator and rotor

图7 定子和转子磨损前后的粗糙度

## 3 结论

a. 摩擦材料应用到定子齿面后,定子的谐振频率略微降低.

b. 在本文试验条件下,当2台超声波电机空载转速相同时,摩擦材料应用到定子齿上的电机获得的负载特性和输出功率均优于摩擦材料应用到转子表面上的电机.

c. 当摩擦材料应用到定子齿面与金属转子配

副时,磨损表面粗糙度均下降,摩擦材料磨损表面具有轻微的犁沟磨损,转子表面未见明显的犁沟磨损,表现为抛光的磨损特征.当摩擦材料应用到转子表面与金属定子配副时,转子摩擦材料的磨损表面粗糙度略微下降,而金属定子摩擦表面粗糙度增大;两摩擦表面均呈现较为严重的犁沟磨损.

## 4 致谢

本研究得到国家自然科学基金项目(50575055,

50975057)和国家重点基础研究发展计划973计划项目(2007CB607602)的资助,在此表示感谢.

### 参考文献:

- [ 1 ] Qu J J, Qi Y L, Zhang Z Q, *et al.* Advances on tribology of ultrasonic motor and its friction materials[J]. Tribology, 1998, 18(1):80-87 (in Chinese)[曲建俊, 齐毓霖, 张志谦, 等. 超声马达摩擦学及其摩擦材料研究进展[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(1):80-87].
- [ 2 ] Kentaro Nakamura, Minoru Kurosawa, Hisayuki Kurebayashietal. An estimation of load characteristics of an ultrasonic motor by measuring transient responses[J]. IEEE Transactions on UFFC, 1991, 38(5): 481-485.
- [ 3 ] P Rehbein, J Wallaschek. Friction and wear behaviour of polymer/steel and alumina/alumina under high - frequency fretting conditions[J]. Wear, 1998, 216(2): 97-105.
- [ 4 ] Takaai Ishii, Kentaro Nakamura, Sadayuki Ueha, *et al.* A wear evaluation chart if friction materials used for ultrasonic Motors [C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1998: 699-702.
- [ 5 ] Qu J J, Zhang K, Jiang K L, *et al.* Study on wear properties of rotor friction material of ultrasonic motor [J]. Tribology, 2001, 21(4):283-287 (in Chinese)[曲建俊, 张凯, 姜开利, 等. 超声马达转子摩擦材料磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(4):283-287].
- [ 6 ] Akira Endo, Nobutoshi Sasaki. Investigation of friction material for ultrasonic motor[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1987, 26(1): 197-199.
- [ 7 ] Takashi Maeno, Takayuki Tsuukimoto, Akira Miyake. Finite - element analysis of the rotor/stator contact in a ring - type ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on UFFC, 1992, 39: 668-674.
- [ 8 ] Qu J J, Sun F Y, Zhao C S. Performance evaluation of traveling wave ultrasonic motor based on a model with visco - elastic friction layer on stator[J]. Ultrasonics, 2006, 45(1-4):22-31.
- [ 9 ] Zhou T T, Gong H S, Xu J L. Experimental analysis of friction contact interface of ultrasonic motor[C]. Proceedings of the 3rd China Theory and Application Technology Conference, Hangzhou, 2005: 70-72 (in Chinese)[朱涛涛, 贡洪生, 徐进亮. 超声波电机摩擦面试验分析[C]. 杭州:全国第三届超声波电机理论和应用技术研讨会论文集, 2005:70-72].
- [ 10 ] Hyun Phill Ko, Sangsig Kim, Jin Sang Kim, *et al.* Wear and dynamic properties of piezoelectric ultrasonic motor with frictional materials coated stator[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 90: 391-395.
- [ 11 ] Ding Q J, Yao Z Y, Zheng W, *et al.* Experimental study of friction material adhere to the stator of the traveling wave type rotary ultrasonic motor [J]. Tribology, 2007, 27(6):578-582 (in Chinese)[丁庆军, 姚志远, 郑伟, 等. 行波型超声电机定子摩擦材料的研制及其摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(6):578-582].
- [ 12 ] Qu J J, Li X L, Song B Y. PTFE composites friction material for ultrasonic motor[P]. CN03132555.6, 2003 (in Chinese)[曲建俊, 李显凌, 宋宝玉. 聚四氟乙烯基超声马达的摩擦材料[P]. 中国发明专利, CN 03132555.6, 2003].
- [ 13 ] Qu J J, Tian X, Sun F Y. Experiment study on friction reduction of ultrasonic vibration based on traveling wave ultrasonic motor[J]. Tribology, 2007, 27(1):73-77 (in Chinese)[曲建俊, 田秀, 孙凤艳. 基于行波超声马达的超声波振动减摩试验研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(1):73-77].
- [ 14 ] Sun Fengyan. Research on visco - elastic contact model and frictional material of traveling wave ultrasonic motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007 (in Chinese)[孙凤艳. 行波超声电机粘弹性接触模型及摩擦材料研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007].