

DOI:10.16078/j.tribology.2015.02.008

# PTFE 基超声电机摩擦材料磨合阶段 摩擦磨损特性研究

李锦棒, 曲建俊\*

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 在超声电机运行 200 h 时间内, 对超声电机的运行参数进行监测, 采用激光共聚焦显微镜对定、转子表面粗糙度、表面形貌和磨屑特征等进行观察分析, 探讨超声电机磨合期的时间及磨合期、稳定期的摩擦磨损特性。结果表明: ① 经过 80 h 磨合后, 超声电机性能基本稳定。② 磨合初期, 摩擦材料磨损形式以黏着磨损为主, 在定子表面可观测到尺寸较大的片状磨屑, 进入摩擦稳定期后摩擦材料表面出现大量点蚀凹坑, 表面疲劳磨损成为磨损形式之一, 磨粒磨损始终存在并占重要部分; 定子表面可观测到明显犁沟, 磨损形式以磨粒磨损为主。③ 由于超声振动的存在, 摩擦产生的磨屑不易在摩擦表面停留, 进入稳定期后在摩擦界面难以观测到磨屑的大量存在, 超声振动有排除磨屑的作用。

**关键词:** 超声电机; 表面形貌; 磨合; 摩擦; 磨损

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2015)02-0176-07

## Friction and Wear Properties of PTFE – Based Friction Material Used in Ultrasonic Motor during Running – in Stage

LI Jin – bang, QU Jian – jun\*

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

**Abstract:** In 200 hours, the operating parameters of ultrasonic motor (USM) were monitored and surface roughness, surface morphology, debris characteristics of stator and rotor were observed and analyzed used laser scanning confocal microscope to discuss friction and wear properties of USM. The result show that after running for 80 h, the performance of USM became stable. In the early stage, adhesive wear was the main wear mechanism and there were many large lump debris on the surface of stator. In stable friction stage, there were many corrosive pitting on worn surface of friction material and a small amount of particulate wear debris can be observed on stator surface. Fatigue wear was one of wear mechanisms. Abrasive wear was always the important wear mechanism in this stage. Apparent ploughs can be seen on the stator surface, the wear mechanism was abrasive wear. Due to the ultrasonic vibration, wear debris was removed from the friction surface in stable wear stage and therefore it is hard to observe wear debris on the interface of stator and rotor. The ultrasonic vibrations had an effect of eliminating the debris from the friction surface.

**Key words:** ultrasonic motor, surface morphology, running – in, wear, friction

Received 30 May 2014, revised 31 August 2014, accepted 17 November 2014, available online 28 March 2015.

\* Corresponding author. E – mail: qujianjun@hit.edu.cn, Tel: +86 – 451 – 86402016.

The project was supported by the National Key Basic Research Program of China (973) (2013CB632305) and the National Natural Science Foundation of China (50975057, 51175104).

国家重点基础研究发展规划项目(973) (2013CB632305) 和国家自然科学基金(50975057, 51175104)资助。

超声电机是靠定转子之间的摩擦力进行驱动的,摩擦磨损成为影响超声电机性能的重要因素.超声电机定、转子接触表面高频振动的存在,使摩擦副的摩擦变得复杂,给摩擦学研究带来了新问题,形成了超声电机摩擦学新领域<sup>[1]</sup>. Maeno 等<sup>[2]</sup>在超声波电机测试中发现,只有把普通摩擦条件下测得的更小的摩擦系数带入理论公式中,才能与试验结果取得一致.曲建俊等<sup>[3]</sup>将定子表面质点振动分为垂直和水平振动,并揭示了减摩成因,并利用试验研究了超声波振动减摩<sup>[4]</sup>. Storck 等<sup>[5]</sup>提出了超声波电机的振动减摩理论.

由于摩擦磨损的不可控性,使得超声电机的性能随着摩擦的进行而变化,对摩擦材料性能的评价、磨损率的测量及超声电机性能的测试均需要在超声电机进入摩擦稳定期后进行.关于超声电机磨合期,国内外尚无统一的标准,文献<sup>[6]</sup>中将磨合期取为40 h,但并没有详细说明原因.对超声电机摩擦磨损规律的研究大多集中在不同摩擦材料之间的对比<sup>[7-9]</sup>及摩擦材料的研制<sup>[10-11]</sup>上,对同一种材料不同阶段摩擦磨损的演变规律研究较少.因此,对超声电机磨合期的测定及摩擦磨损机制的变化规律的研究十分必要.

在磨合阶段,定转子接触界面处于快速磨损阶段,其摩擦磨损特性更具代表性.研究磨合期超声电机的摩擦磨损特性有助于揭示接触界面的摩擦磨损规律,进一步指导超声电机摩擦材料的制备及超声电机性能寿命的预测等.本文中研究电机运行200 h时间内,电机性能参数的变化及定转子表面粗糙度、表面形貌及磨屑特征的变化,探讨磨合期超声电机的摩擦磨损特性.

## 1 实验部分

### 1.1 试验材料

超声电机选用60型行波超声电机,定子材料为黄铜.摩擦材料选用聚四氟乙烯基摩擦材料,厚度为0.2 mm,黏贴在铝转子表面.摩擦材料基体为聚四氟乙烯与聚苯酯混合材料,质量百分数为45%~65%,填料有玻璃纤维、纳米金刚石及稀土材料等,质量百分数为35%~55%.

### 1.2 试验方法

定、转子摩擦副如图1所示,施加预压力后,定、转子均会产生变形,由于转子刚度相对较小,变性大,导致不完全接触,转子表面内圈与定子表面首先接触,随着磨合的进行,定、转子表面才会完全接触.

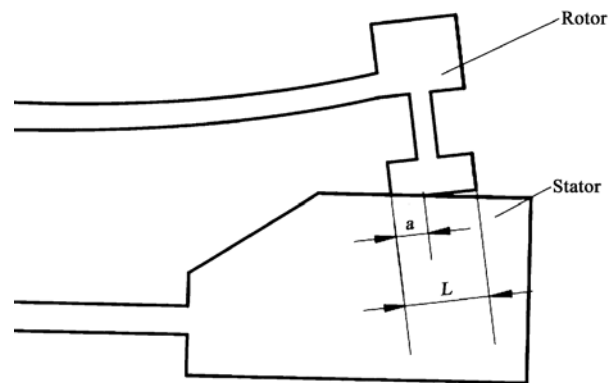


Fig. 1 Diagram of friction pairs consist of stator and rotor

图1 定转子摩擦副示意图

为方便控制定转子之间的预压力,设计制作预压力可控的超声电机性能测试装置.本装置对超声电机外壳简单加工,采用开放式加载,方便拆卸,如图2所示.将超声电机原装外壳后盖打开即不完全外壳8,使其不对转子9施加压力,设计等效外壳7与轴承配合对转子施加压力,压力传感器5与燕尾槽导轨固接,6为传感器压头与等效外壳配合,通过旋转测微头1使燕尾槽导轨移动,控制预压力的加载.5~8组成刚度等效机构,其组合刚度与原外壳的刚度保持一致.

试验条件:①初始预压力250 N;②超声电机驱动频率 $41.180 \pm 0.003$  kHz,驱动电压峰峰值 $410 \pm 10$  V;③负载为空载;④采用风扇散热,超声电机外壳稳定温度为30℃左右.

采用OLS3000激光共聚焦显微镜对定、转子表面粗糙度、表面形貌、磨屑等进行观察分析,试验分为三个阶段:第一阶段(0~20 h),每隔5 h测试一次;第二阶段(20~40 h),每隔10 h测试一次;第三阶段(40~200 h)每隔20 h测试一次.利用SL06转速转矩传感器测量转速、转矩;摩擦材料的厚度采用分辨率为1 μm的数显千分尺测量,沿转子圆周均匀选取8个点,每个点测3次取平均值.

## 2 结果与讨论

苏联学者克拉盖尔斯基<sup>[12]</sup>将磨合定义为摩擦初期摩擦面几何形状和材料表层物理-机械性能的变化过程,通常表现为在外部条件不变时摩擦功、温度和磨损率的降低.他还指出经过磨合后,会出现“平衡粗糙度”.本文作者从超声电机性能变化、输入功率、磨损率、定转子接触率及表面粗糙度来研究超声电机磨合期所需的时间及磨合阶段定转子的摩

擦磨损特性.

## 2.1 超声电机性能分析

超声电机转速及堵转力矩、输入功率随时间的变化如图3所示. 图中转速随时间变化曲线的尖锐波动是由于每次超声电机启动时, 温度较低, 随着电机的运行, 摩擦界面产生热量, 温度升高, 压电陶瓷性能及定子谐振频率发生变化, 导致转速下降, 达到热平衡后转速逐渐稳定, 该过程所需时间约为

30 min. 随着电机的运行, 定、转子接触界面的摩擦系数逐渐降低, 摩擦损耗下降, 导致空载转速、堵转力矩及输入功率均有下降趋势, 但下降幅度较小, 空载转速下降约 18 r/min, 最后稳定在 110 r/min 左右, 堵转力矩下降 0.04 N·m, 最后稳定在 0.77 N·m 左右, 输入功率下降约 1.1 W, 最终值为 26.34 W. 由图3可看出, 80 h 以前超声电机的性能有较大波动, 80 h 以后波动逐渐变小.

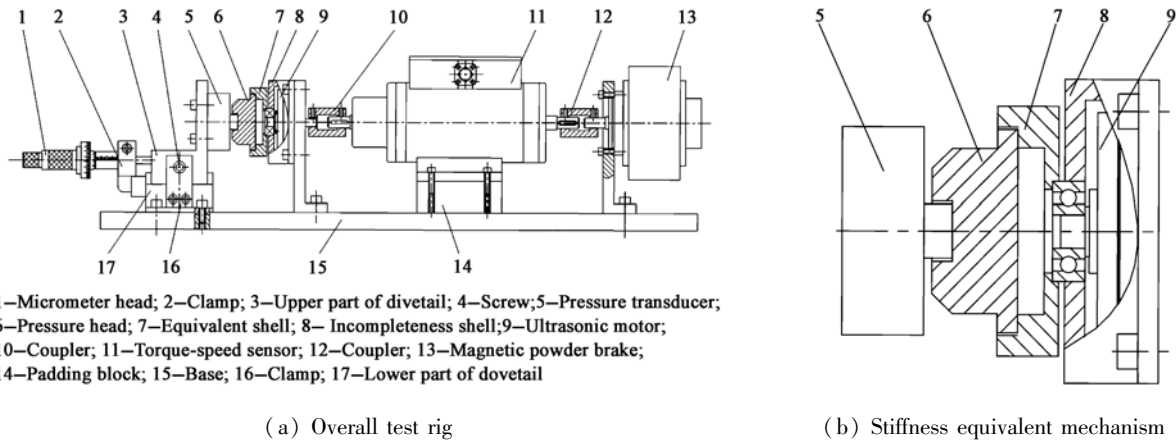


Fig. 2 Pre-pressure controlled ultrasonic motor performance test rig

图2 预压力可控的超声电机性能测试装置

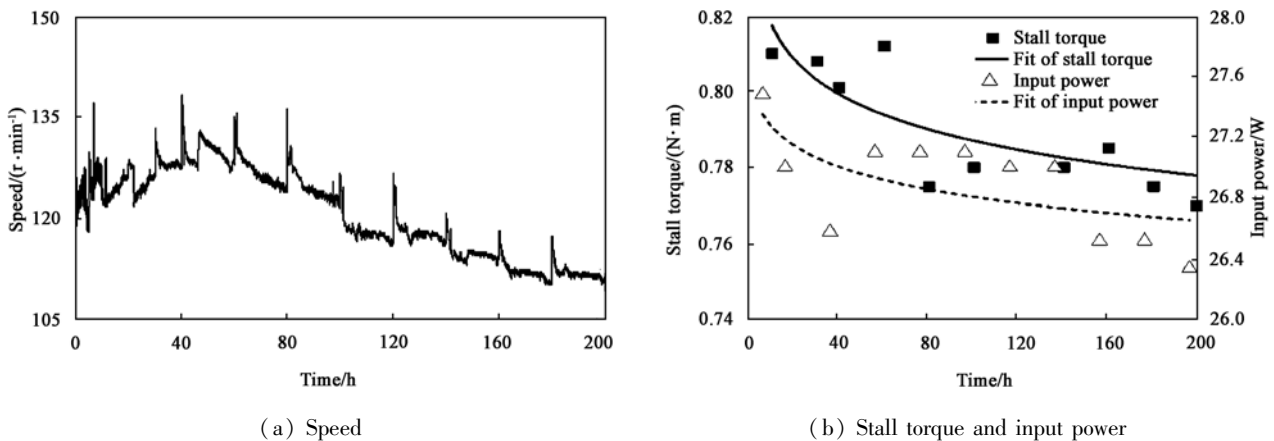


Fig. 3 Variation of ultrasonic motor performance with time

图3 超声电机性能参数随时间的变化

## 2.2 定转子接触界面参数分析

对摩擦材料的厚度变化及定转子的接触率进行测量, 结果见图4. 磨合初期, 磨损较剧烈, 电机运行 30 h 摩擦材料厚度下降约 2.9  $\mu\text{m}$ , 30 h 后摩擦材料厚度以较稳定速率下降; 接触率为已接触区域宽度与摩擦材料宽度的比值即  $a/L$  (见图2), 磨合 10 h 时定转子接触率即达到 85%, 80 h 后定转子接触率达到 90% 以上.

采用激光共聚焦显微镜测量定转子表面粗糙

度  $R_a$  值, 测量部位分为磨痕外部、中部和内部. 为使测量结果具有对比性, 通过参考表面形貌的细节特征, 保证每次所选取的测量区域大致相同, 如图5所示.

测量结果, 如图6所示. 从图6中可看出, 80 h 以前定子和转子表面粗糙度波动较大, 80 h 后逐渐趋于稳定. 定子表面内部、中部和外部粗糙度变化趋势基本一致, 转子表面内部和中部与粗糙度较外部先趋于稳定, 符合定转子接触规律.

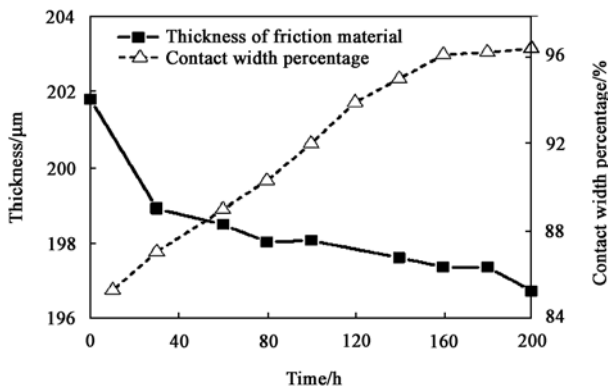


Fig. 4 Thickness of friction material and contact width percentage variation with time  
图 4 摩擦材料厚度及接触率随时间的变化

### 2.3 定、转子接触界面摩擦磨损特性分析

用 OLS3000 激光共聚焦显微镜对定转子表面放大 240 倍进行观察,如图 7 所示. 电机运行 5 h 后,定子表面黏着有呈片状的大块摩擦材料磨屑. 摩擦材料磨损形式为黏着磨损,摩擦材料由于黏着效应涂抹在定子表面. 同时在定子表面有轻微犁沟,说明同时存在磨粒磨损. 电机运行 80 h 后,在定转子表面均可观察到与摩擦方向一致的犁沟. 说明定子

和转子的磨损形式为磨粒磨损,定子材料较硬,使摩擦材料表面形成犁沟,同时摩擦材料中的硬质填料也会使定子表面产生犁沟,即定转子通过犁沟效应相互作用. 定子表面不再有大块磨屑.

利用高倍镜头放大 2 400 倍进行更细致的观察,如图 8 所示. 从图 8 中可看出,超声电机运行过程中,转子表面点蚀凹坑逐渐增多,电机运转 200 h 后,转子表面产生大量点蚀凹坑,凹坑二维尺寸大多数在 5 μm 以下,符合疲劳磨损的特征,因此表面疲劳磨损成为转子摩擦材料磨损形式之一.

对定子表面形貌进行三维重构,如图 9 所示. 从图 9 中可看到定子表面明显的犁沟和团聚的磨屑,但没有明显的点蚀. 磨屑高度在 3 μm 左右,与摩擦材料表面点蚀凹坑尺寸一致,说明摩擦材料疲劳剥落的磨屑转移到定子表面. 随着电机的运行,定子表面的磨屑并没有增加反而减少. 电机运行 200 h 后,定子表面仅有极少量的磨屑,需要在显微镜下仔细寻找,说明定子的超声振动起到了排除磨屑的作用. 因此,定转子表面能始终保持良好稳定的摩擦特性,使得超声电机寿命较长,性能稳定. 已有实验表明,在摩擦材料只有 0.2 mm 厚度情况下,超声电机能

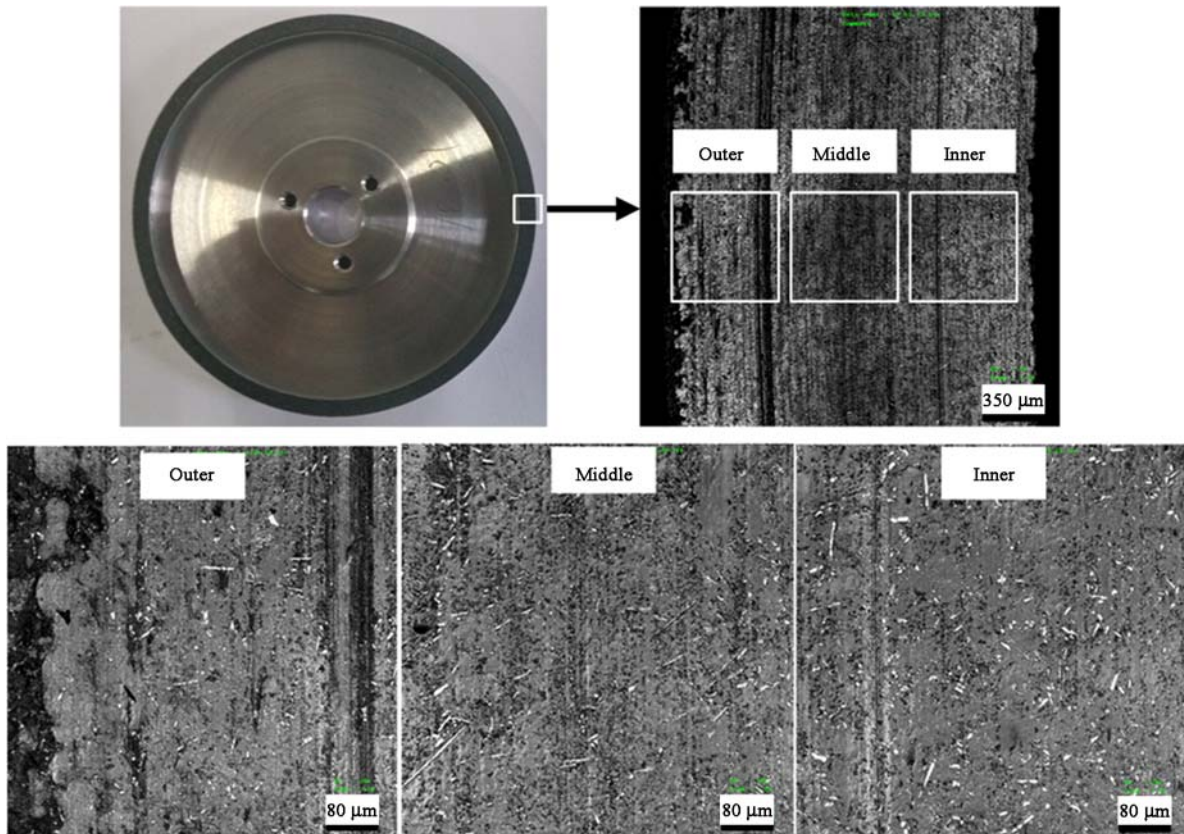
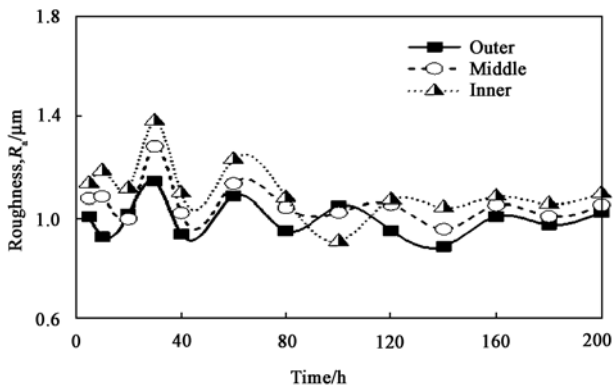
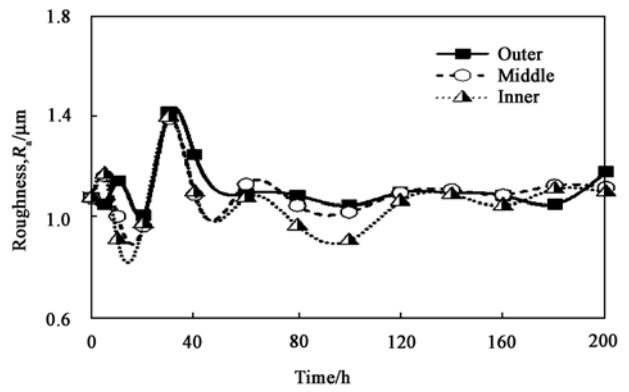


Fig. 5 Diagram of roughness test regions on friction material surface  
图 5 摩擦材料表面粗糙度测试区域示意图



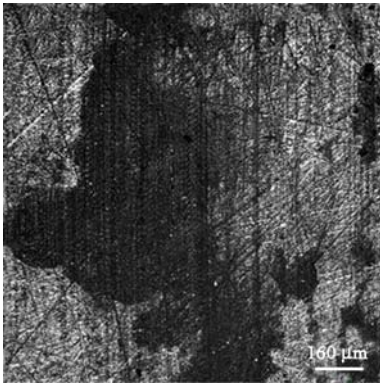
(a) Roughness of stator



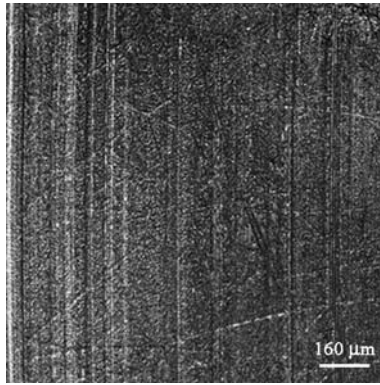
(b) Roughness of rotor

Fig. 6 Roughness test results

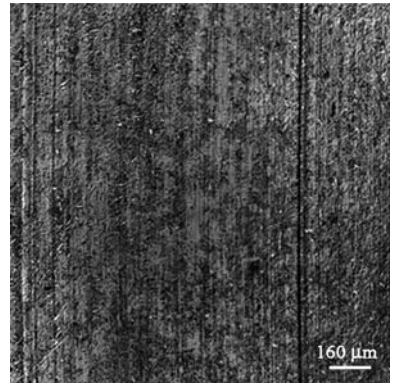
图6 粗糙度测试结果



(a) Stator, 5 h



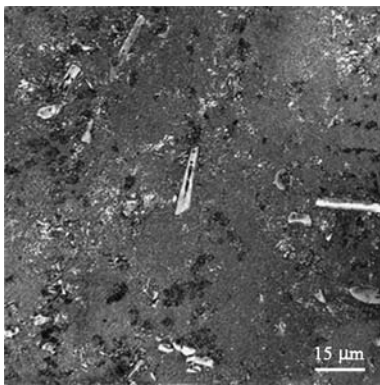
(b) Stator, 80 h



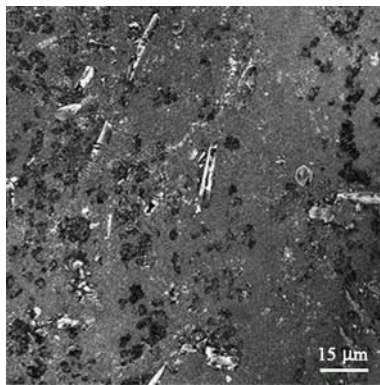
(c) Rotor, 80 h

Fig. 7 Surface of stator and rotor

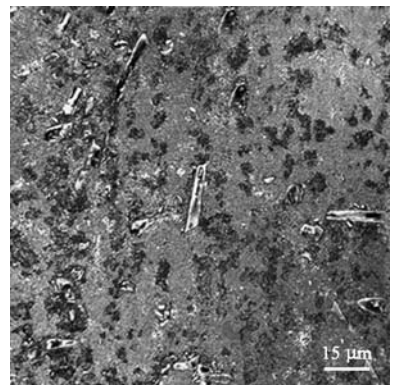
图7 定转子表面形貌



(a) 5 h



(b) 140 h



(c) 200 h

Fig. 8 Morphology of rotor surface

图8 转子表面微观形貌

稳定运行 3 000 h 以上.

国内外学者对超声电机定转子接触区进行了大量研究<sup>[13-16]</sup>,研究表明接触区可分为驱动区(图中②、③)和阻尼区(图中①、④),如图10所示.驱动区定子表面质点的切向速度大于转子表面质点,对

转子起到驱动作用;阻尼区定子表面质点的切向速度小于转子表面质点,对转子起到阻尼作用.由于超声电机的驱动频率一般在40 kHz以上,转子表面质点所受到的摩擦力大小和方向均呈高频周期性变化,且在法向受到方向向上,大小周期性变换的压

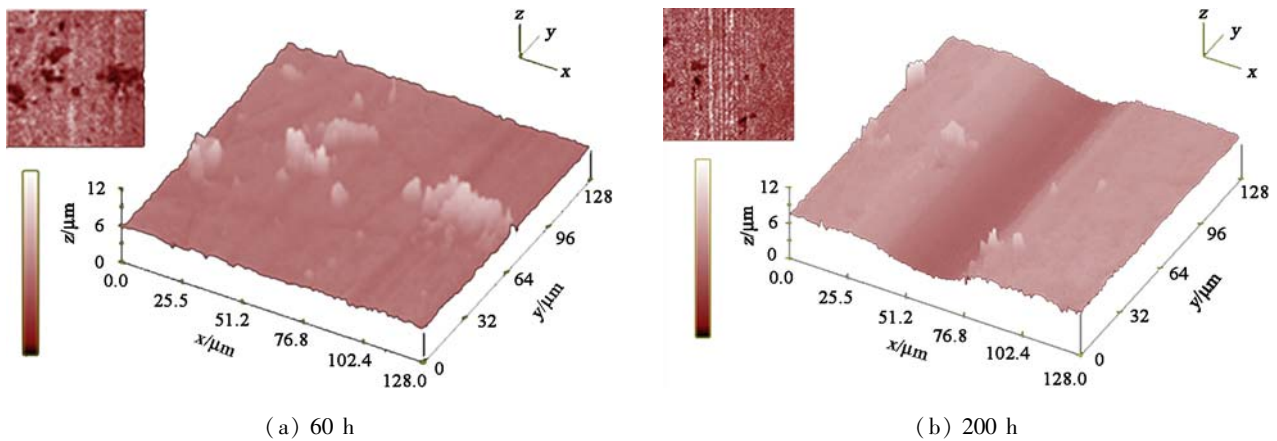


Fig. 9 Morphology of stator surface  
图 9 定子表面微观形貌

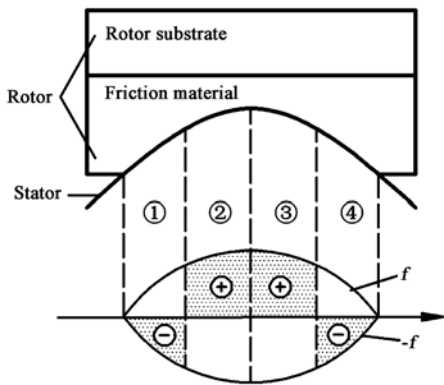


Fig. 10 Contact regions of stator and rotor  
图 10 定转子接触区示意图

力. 由此分析, 由于转子表面在切向和法向受力均呈周期性变化, 在摩擦稳定期, 表面疲劳磨损成为重要部分.

### 3 结论

a. 针对所选取的聚四氟乙烯基摩擦材料, 经过 80 h 磨合后, 转速、堵转力矩基本稳定, 输入功率、磨损率均明显下降并趋于稳定, 定转子接触率达到 90% 以上, 定转子表面粗糙度无较大波动.

b. 磨合阶段初期, 摩擦材料磨损形式以黏着磨损为主, 在定子表面可观测到尺寸较大的片状磨屑, 进入摩擦稳定期后摩擦材料表面出现大量点蚀凹坑, 表面疲劳磨损成为磨损形式之一, 磨粒磨损始终存在并占重要部分; 定子表面可观测到明显犁沟, 磨损形式以磨粒磨损为主.

### 参考文献:

[ 1 ] Qu J J, Wang Y L. Research progresses in friction material for

ultrasonic motor [ J ]. Tribology, 2010, 30 ( 5 ): 513 - 520 ( in Chinese ) [ 曲建俊, 王彦利. 超声波电机用摩擦材料的研究进展 [ J ]. 摩擦学学报, 2010, 30 ( 5 ): 513 - 520 ].

[ 2 ] Maeno T, Tsukimoto T, Miyake A. Finite element analysis of the rotor/stator contact in a ring - type ultrasonic motor [ J ]. IEEE Trans UFFC, 1992, 39 ( 6 ): 668 - 674.

[ 3 ] 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 ].

[ 4 ] Qu J J, Jiang K L, Zhang K, et al. Study on antifriction effect of ultrasonic vibration in ultrasonic driving [ J ]. Acta Acustica, 2001, 26 ( 6 ): 497 - 502 ( in Chinese ) [ 曲建俊, 姜开利, 张凯, 等. 超声驱动的超声波振动减摩作用研究 [ J ]. 声学学报, 2001, 26 ( 6 ): 497 - 502 ].

[ 5 ] Storek H, Littmann W, Wallaschek J. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibration and its relevance to traveling wave ultrasonic motors [ J ]. Ultrasonics, 2002, 40: 379 - 383.

[ 6 ] Zhao C S. Ultrasonic motors technologies and applications [ M ]. Beijing: Science Press, 2007 ( in Chinese ) [ 赵淳生. 超声电机技术与应用 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2007 ].

[ 7 ] H P Ko, S Kim, J S Kim, et al. Wear and dynamic properties of piezoelectric ultrasonic motor with frictional materials coated stator [ J ]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 90 ( 2 - 3 ): 391 - 395.

[ 8 ] P Rehbein, J Wallaschek. Friction and wear behaviour of polymer/steel and alumina/alumina under high - frequency fretting conditions [ J ]. Wear, 1998, 216: 97 - 105.

[ 9 ] Xiu Tian, Jian - jun Qu. Life prediction model of friction material for traveling wave ultrasonic motor [ C ]. 2011 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, 2011, 403 - 406.

[ 10 ] Fan Yu, Ding Qing - Jun, Yao Zhi - Yuan. Properties of potassium titanate whisker reinforced polytetrafluoroethylene -

- based friction materials of ultrasonic motors [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 125: 3 313 – 3 317.
- [ 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 ] Kragelsk ii I V, Dobychen M N, Komlov V S . Wang Y L translated . Friction and wear calculation methods[M]. Oxford, New York; Pergamon, Beijing: China Machine Press, 1982( in Chinese)[克拉盖尔斯基,德拜齐恩,康巴诺夫著.汪一鳞译.摩擦磨损计算原理[M].北京:机械工业出版社, 1982].
- [ 13 ] Sattel T, Hagedorn P, Schmidt J. The contact problem in ultrasonic traveling – wave[J]. *Journal of Applied Mechanics – Transactions of the Asme*, 2010, 77(3): 031014.
- [ 14 ] J Wallaschek. Contact mechanics of piezoelectric ultrasonic motors[J]. *Start Mater. Struct.*, 1998, 7: 369 – 381.
- [ 15 ] F Lu, H P Lee, S P Lim. Contact modeling of viscoelastic friction layer of traveling wave ultrasonic motors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10: 314 – 320.
- [ 16 ] H Storck, J. Wallaschek. The effect of tangential elasticity of the contact layer between stator and rotor in traveling wave ultrasonic motors[J]. *International Journal of Non – Linear Mechanics*, 2003, (38): 143 – 159.