

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

丁庆军, 姚志远, 郑伟, 赵淳生

(南京航空航天大学 精密驱动研究所, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对超声电机的工作特性,以环氧树脂为基体,石墨、三氧化二铝和聚四氟乙烯等为填料,采用粘涂法研制出行波型超声电机定子用摩擦材料,与同种转子摩擦材料进行了对比试验研究.结果表明:所研制的定子摩擦材料在 60 超声电机中具有良好的机械特性,工作频率明显变宽,半峰宽提高 2 倍左右,可以提高电机的工作稳定性;随着预压力增加,定子摩擦材料在超声振动条件下的摩擦系数降幅变小,其磨损机制主要为粘着磨损和疲劳磨损.

关键词: 粘涂法; 超声电机; 定子摩擦材料; 摩擦磨损性能

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2007)06-0578-05

超声电机是近 20 年来发展起来的一类靠摩擦力传递驱动的新概念动力装置^[1~3].在超声电机的工作状态下,定子齿存在法向振动和切向振动,法向振动不仅改变作用于摩擦界面的预压力,而且对转子表面形成振动冲击,使转子加速破坏和产生腾空现象^[4];切向振动则改变摩擦偶件表面的相对运动速度,同时加载力矩也对相对运动速度影响很大,从而使得其摩擦机理更加复杂化. Maeno 等^[5]研究发现,代入比普通滑动摩擦试验的低摩擦系数才能使理论计算与实测结果一致.贺思源^[6]发现,超声振动使定子和转子的平均真实接触面积减小是其摩擦系数降低的原因.黄明军等^[7]发现,超声振动使定子和转子的接触时间减少,从而导致摩擦系数降低. Störck 等^[8]提出了基于行波型超声电机的超声振动减摩理论.曲建俊等^[9~12]研制出以改型酚醛树脂和聚四氟乙烯为基体的系列定子摩擦材料. Endo 等^[13]研究了摩擦材料的摩擦系数和硬度对超声电机性能的影响,并研制出以氯丁橡胶为基体的摩擦材料. Rehbein 等^[14]在自制的高频摩擦磨损试验机上对聚四氟乙烯 (PTFE)、聚酰亚胺 (PI) 及其复合材料进行研究.国内信息产业部电子二十一所研制的摩擦材料已有单位使用报告^[15],清华大学^[16]研制出以超高分子量聚乙烯为基体的摩擦材料,但其耐热性能较差.

目前,各种功能摩擦材料的研究都已取得长足进展^[17~20],但是,定、转子摩擦材料大都是加工成型后粘贴在转子上,对于新型或形状异常的摩擦材料要求不易满足,制作工艺复杂,不利于工业化推广.国内外对于直接在定子上制作的摩擦材料的研究报道还不多见.本文作者直接在定子上以粘涂法制作摩擦材料,研制出行波型超声电机定子摩擦材料,并研究其磨损机制及其对电机性能的影响.

1 实验部分

1.1 原材料及样品制备

所用 AG-80 型环氧树脂为红棕色液体,黏度为 (50~) 10 000 mPa·s,由上海合成树脂厂生产;石墨型号为 F00 号 (1.5 μm),由上海胶体化工厂生产;三氧化二铝 (超细粉) 由南京智宁填料有限公司产; PTFE (细粉) 由南京智宁填料有限公司产;纳米耐磨粉由上海大学提供.

以 5 g 的液态环氧树脂为基体,添加 2 g PTFE、1 g 石墨、1 g 三氧化二铝、1 g 固化剂及其他助剂等组成粘涂料,混合、熟化.熟化料通过模具分别粘涂于定子表面 (外径为 59 mm,内径为 18 mm) 和转子 (外径为 58 mm,内径为 11 mm) 表面,加热 80 °C 固化 2 h 后机加工至所需厚度 0.2 mm,与未涂有摩擦材料的定、转子配对组装成电机.

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助 (50235010).

收稿日期:2006-12-13;修回日期:2007-02-05 联系人丁庆军, e-mail: dingqingjun@nuaa.edu.cn

作者简介:丁庆军,男,1975 年生,博士,讲师,目前主要从事超声电机摩擦学及摩擦材料研究.

1.2 性能测试

在 Polytec 激光测试仪 (PSV-300F 型) 上测试定子的频率响应情况。

经过 40 h 磨合期后,在自制摩擦磨损试验机上测试定、转子摩擦副在 2 种不同状态下的摩擦系数:

(1) 20 N, 压力 100 ~ 250 N; (2) 20 N, 压力 100 ~ 250 N, 单相加电 15 V, 频率 $f = 38$ kHz, 振幅 $2 \mu\text{m}$, 即模拟行波状态. 文中所提及的摩擦状态皆为干摩擦, 定子材质为磷青铜, 转子材质为硬铝, 试验中固定上端夹持转子的机械臂, 下端定子在一一定的预压力下以 12 r/min 的速度转动, 通过传感器将数据采集到 PC 机中进行处理, 计算出定、转子之间的摩擦系数。

经过 40 h 磨合期运转进入摩擦稳定期后,对电机定、转子进行实机摩擦磨损试验,在常温、预压力 250 N、转速 80 r/min、时间 100 h 下进行,采用 PL303 型电子天平 (精度 0.1 mg) 测量定、转子的磨损质量损失. 在上海沪江新技术研究所提供的 AG-38 型电机机械特性测试系统上测试电机的工作性能,工作电压 15 V, 频率 38 kHz

2 结果及讨论

2.1 定子扫频测试

图 1 所示为定子的频率响应频率曲线. 可见,定子表面含摩擦材料时的响应频率没有明显偏移,振

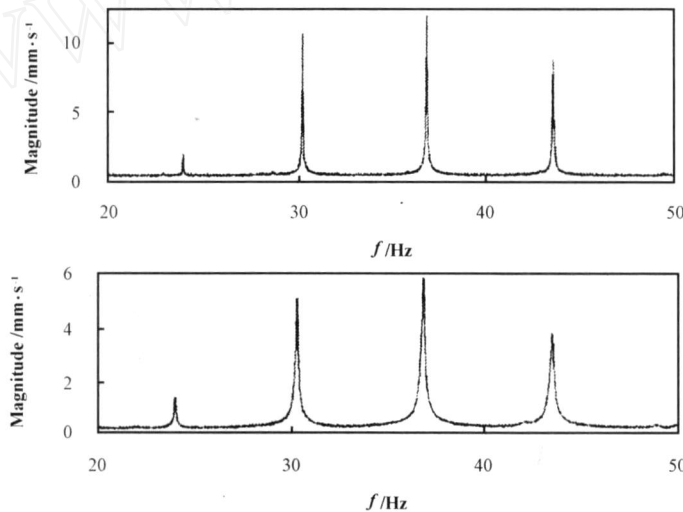


Fig 1 Frequency response of the stator

图 1 定子的频率响应频率曲线

动响应频宽增大,半峰宽增加约 2 倍. 说明定子摩擦材料不仅能够将定子的微观振动转化为转子的宏观转动或直线运动,还可以通过增大响应频宽来提高

电机的工作稳定性和电机工作状态的可调节性。

2.2 定子摩擦材料的摩擦性能

表 1 列出了 2 种不同状况下定 / 转子对摩时的

表 1 定子摩擦材料与转子之间的摩擦系数

Table 1 Frictional coefficient between frictional material and rotor

Preload / N	Frictional coefficient		Variation rate / %
	Normality	Simulate traveling wave	
100	0.1507	0.1194	- 20.7
150	0.1534	0.1232	- 19.7
180	0.1543	0.1316	- 14.7
200	0.1581	0.1407	- 11.0
250	0.1607	0.1438	- 10.5

摩擦系数. 可以看出,在一定预压力时,模拟行波工作状态下的摩擦系数比通常摩擦状态降低 10% ~ 20%, 这种变化趋势与 Maeno 等^[5]研究转子摩擦材料的试验结果一致. 这是由于在超声振动条件下,

模拟行波工作状态的定子和转子的实际接触面积比通常情况小. 随着预压力增加,转子在振动下的腾空幅度变小,另外由于摩擦材料具有一定韧性,在较大压力下的变形使得接触面积增加,所以,在较大预压

力下,定、转子在模拟行波工作状态下的实际接触面积降幅较小,摩擦系数的降幅较小.

在超声电机的真实工作状况下对摩擦材料进行

磨损试验,在经过 40 h 的磨合期运转后,其磨损进入稳定期,以 100 h 为单位进行磨损试验的结果见表 2 可见定、转子摩擦材料的磨损量均很小,我们

表 2 超声电机在实机条件下的磨损试验结果

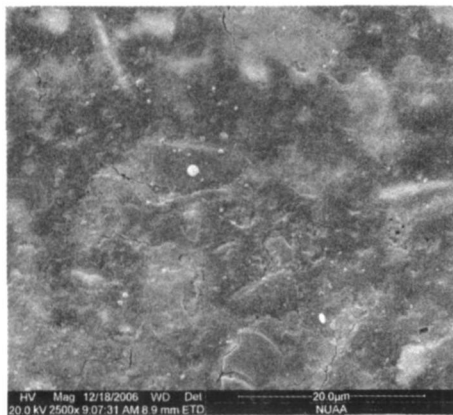
Table 2 Wear results of ultrasonic motors

	Material	Wear mass loss/g (100 h)	Predictive life/h
1	Stator with friction material	0.007	2470
	Rotor without friction material	0.004	
2	Stator without friction material	0.003	8650
	Rotor with friction material	0.002	

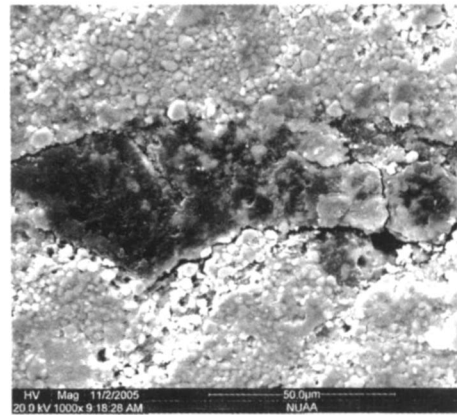
可以根据磨损面的大小、摩擦材料的厚度及密度来计算摩擦材料在低载或空载条件下的预期使用寿命,厚度为 0.2 mm 的转子摩擦材料预计使用寿命可达 8 000 h 以上,基本上可以满足工作环境对超声

电机的要求,而厚度为 0.2 mm 的定子摩擦材料预计寿命有 2 000 h 以上,这 2 种摩擦材料的寿命较以前使用的摩擦材料均有很大提高.

图 2 所示为实机试验后摩擦材料的磨损表面形



(a) 200 h



(b) 600 h

Fig 2 SEM images of friction surface

图 2 摩擦材料的磨损表面 SEM 图

貌 SEM 照片.可见,经 200 h 实机摩擦后,其磨损表面产生微小裂纹,经 600 h 摩擦后,磨损表面出现磨屑剥离、脱落,说明摩擦材料的磨损机制可能是由于粘着磨损和疲劳磨损共同作用的结果,属于复合型磨损形态.由此可以认为,在选择超声电机摩擦材料时,除了考虑材料的耐磨性能和摩擦性能等因素外还应考虑材料的抗疲劳性能.

2.3 电机性能测试

图 3 所示为采用同种定子摩擦材料的电机性能测试结果和转子摩擦材料的电机性能测试结果,其中 W_{out} 为输出功率 (W), η 为效率, n 为转速 (r/min), I 为工作电流 (A), U 为输入电压 (V), W_{in} 为输入功率 (W), M 为扭矩 (N·m). 可见,2 个电机的转速均达到 180 r/min 左右,堵转力矩在 1.2 N·m 以上,最大效率为 25% 左右,说明定子摩擦材料在

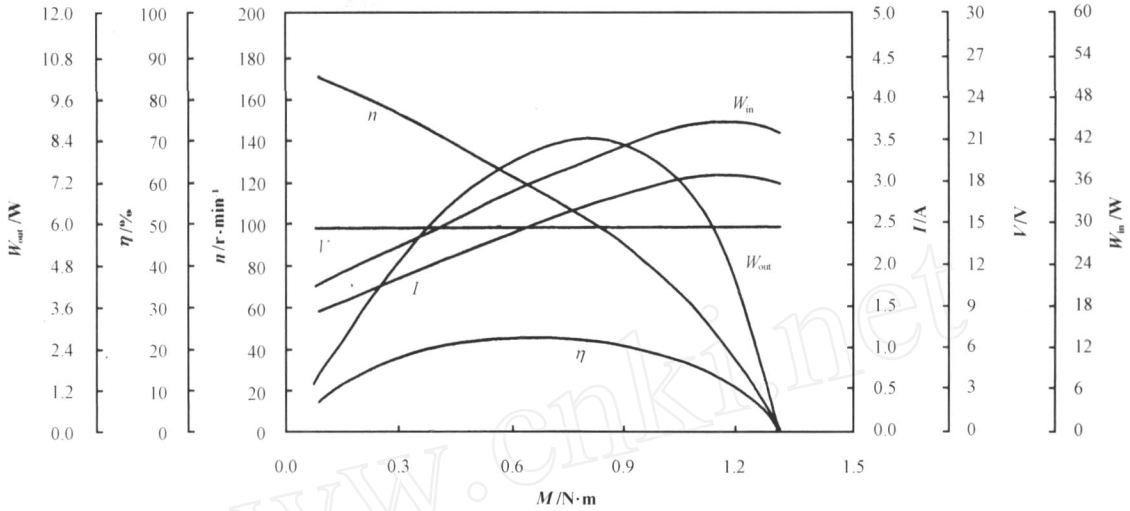
提高电机其他性能的同时没有降低其最主要的机械特性,如定子摩擦材料能够明显增加电机的工作频宽,解决电机工作状态的不稳定性且改善了电机的启动特性.

3 结论

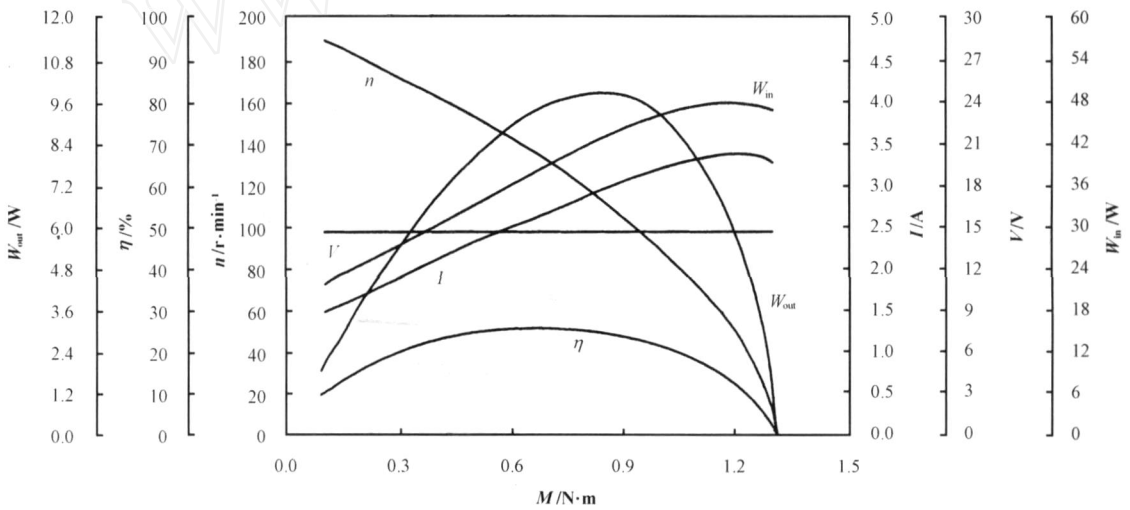
a 采用粘涂法在定子表面制备出环氧树脂基定子摩擦材料,与同种材料的转子摩擦材料对比试验表面,所研制的定子摩擦材料可以使电机的工作频率变宽、工作稳定性提高.

b 在超声振动下,定、转子之间的摩擦系数降低 10% ~ 20%,且在较高预压力下的摩擦系数降幅较小;摩擦材料的磨损机制为粘着磨损和疲劳磨损共同作用的结果,属于典型的复合型磨损形态.

c 与转子摩擦材料相比,使用定子摩擦材料



(a) Friction material on stator



(b) Friction material on rotor

Fig 3 Mechanical characteristic of ultrasonic motors

图 3 超声电机机械特性曲线

对电机机械特性没有不良影响,堵转力矩略有增加。

参考文献:

[1] 赵淳生. 面向 21 世纪的超声电机技术 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 86-91.
Zhao C S Ultrasonic motor techniques for 21st century[J]. Engineering Science, 2002, 4(2): 86-91.

[2] Yoseph Bar-Cohen, Nesbitt W Hagood, Argelio M, et al. Development of an ultrasonic solid state motor for space applications[M]. A Proposal to the JPL Directors Discretionary Fund, FY '94, MIT, 1-11.

[3] Anita M, Foynn K R, Udayakumar, et al. Barrett Tomorrow's Surgery: Micromotors and Microbots[M]. Massachusetts Institute of Technology Artificial Intelligence Laboratory, 1992, 1-8.

[4] 程光明, 曾平, 邱晓阳, 等. 超声振动减摩现象的研究 [J]. 压电与声光, 1998, 20(5): 322-325.

Cheng GM, Zeng P, Qiu X Y, et al. Study on ultrasonic vibration antifriction phenomenon [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 1998, 20(5): 322-325.

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

[6] 贺思源. 超声电机理论模型与新型驱动器的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 1998.
He Siyuan. Study of theoretical modeling of ultrasonic motor and a novel type of driver [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1998.

[7] 黄明军, 周铁英, 巫庆华. 超声波振动对摩擦力的影响 [J]. 声学学报, 2000, 25(2): 115-119.
Huang M J, Zhou T Y, Wu Q H. The influence of on friction force by ultrasonic vibration [J]. Acta Acustica, 2000, 25(2): 115-119.

- [8] Störck H, Littmann W, Wallaschek J, *et al* The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to traveling wave ultrasonic motors[J]. *Ultrasonic*, 2002, 40(18): 379-383.
- [9] 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): 497-500.
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): 497-500.
- [10] 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.
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.
- [11] 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.
Qu J J, Zhang K, Jiang K L, *et al* Study on wear properties of motor friction material of ultrasonic motor[J]. *Tribology*, 2001, 21(4): 283-287.
- [12] 罗云霞,曲建俊,徐晓希. 超声波驱动的摩擦特性研究[J]. *润滑与密封*, 2005, 169(3): 29-31.
Luo Y X, Qu J J, Xu X X. Research on friction properties of ultrasonic drive[J]. *Lubrication Engineering*, 2005, 169(3): 29-31.
- [13] Endo Akira, Nobutoshi Sasaki Investigation of frictional material for ultrasonic motor[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1987 (26): 197-199.
- [14] Rehbin P, Wallaschek J. Friction and wear behaviour of polymer-steel and alumina-alumina under high-frequency fretting conditions[J]. *Wear*, 1998, (216): 97-105.
- [15] 李宝库. 新型摩擦材料的研制. 粘接, 2001, 22(3): 7-8.
Li B K Preparation for new friction material [J]. *Zhanjie*, 2001, 22(3): 7-8.
- [16] 龚文,褚祥成,李龙士. 行波超声马达摩擦材料研究[J]. *压电与声光*, 2003, 25(4): 305-307.
Gong W, Chu X C, Li L T. Research on friction material for traveling wave ultrasonic motor [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2003, 25(4): 305-307.
- [17] 于鹤龙,徐滨士,许一,等. 纳米铜添加剂改善铜-铝摩擦副摩擦磨损性能的研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(5): 432-437.
Yu H L, Xu B S, Xu Y, *et al* Friction and sliding wear behavior of steel/aluminum tribopair improved by nanocopper additive [J]. *Tribology*, 2006, 26(5): 432-437.
- [18] 包丹丹,程先华. 稀土处理碳纤维填充聚四氟乙烯复合材料在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(2): 135-139.
Bao D D, Cheng X H. Tribological behavior of polytetrafluoroethylene composites filled with rare earths treated carbon fiber under dry friction condition [J]. *Tribology*, 2006, 26(2): 135-139.
- [19] 韩建民,徐向阳,崔世海,等. 铁道车辆用新型减振材料的摩擦磨损行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2005, 25(4): 369-373.
Han J M, Xu X Y, Cui S H, *et al* Friction and wear behavior of new damping materials for slanting wedge and wear plate of railway freight car [J]. *Tribology*, 2005, 25(4): 369-373.
- [20] 李小成,吕晋军,杨生荣. 单晶硅滑动磨损性能及其相变研究[J]. *摩擦学学报*, 2005, 25(4): 326-330.
L I X C, Lu J J, Yang S R. Sliding wear behavior and phase transformation of single crystal silicon [J]. *Tribology*, 2005, 25(4): 326-330.

Experimental Study of Friction Material adhere to the Stator of the Traveling Wave Type Rotary Ultrasonic Motor

D N G Q ing-jun, YAO Zhi-yuan, ZHENG Wei, ZHAO Chun-sheng

(Precision Driving Laboratory, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Experiment of friction material adhere to the stator of the traveling wave type rotary ultrasonic motor was carried out. The friction material was composed of epoxy resin as matrix and was filled with graphite, Aluminum oxide and PTFE. Compared with the identical material without fillers on rotor, the results show that both the breadth of the work frequency and stability of the motor were increased. The frictional coefficient decreased slightly when the pre-load was higher, and adhesive wear and fatigue were the dominant mechanisms under the ultrasonic vibration.

Key words: coat, ultrasonic motor, friction material on stator, friction and wear behavior

Author: D N G Q ing-jun, male, born in 1975, Ph D., e-mail: dingqingjun@nuaa.edu.cn