

DOI: 10.16078/j.tribology.2019015

定子表面织构对超声电机性能的影响

曾帅帅, 李锦棒*, 陈鹏飞, 崔玉国

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对超声电机摩擦材料磨损严重和温升高的问题, 采用在定子表面加工微织构的方法, 提高了电机机械特性并降低了摩擦材料磨损。首先, 用显微镜测量超声电机定子表面摩擦材料黏着区域, 设计出三种不同密度的凹坑织构, 采用激光的方法加工在定子表面; 然后, 测试超声电机负载特性、效率特性和温升特性并观察定子表面。结果表明: 3-凹坑织构定子电机空载转速最高, 相比光滑定子电机高出 12.1%, 5-凹坑织构定子电机堵转转矩和最大效率最高, 分别高于光滑定子电机 13.04% 和 17.1%, 同时电机的温升也有所降低。通过观察定子表面发现, 凹坑织构有大幅降低摩擦材料黏着的作用, 这种作用可以增加电机接触界面能量转换效率, 提高了电机的性能并降低了摩擦材料的磨损。

关键词: 超声电机; 机械特性; 温升特性; 摩擦磨损; 表面织构

中图分类号: TM354

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)04-0504-07

Effect of Stator Surface Texture on the Performances of an Ultrasonic Motor

ZENG Shuaishuai, LI Jinbang*, CHEN Pengfei, CUI Yuguo

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Zhejiang Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at the problem-solving of the severe wear and temperature rise of friction materials used in ultrasonic motors, by using the method of fabricating micro-texture on the stator surface, the mechanical properties of ultrasonic motor was improved and the wear of friction material was reduced. Firstly, the positions of material adhesive area on the stator surface was measured by a microscope. After that three different density textures were designed and fabricated on stator surface by laser. Then, the speed-torque characteristics, efficiency-torque characteristics and temperature rise of the motor were tested. Meanwhile, the stator surface was observed. The results showed that the no-load speed of 3-dimple-texture stator was the highest, which was 12.1% higher than that of smooth stator. The stall torque and efficiency of 5-dimple-texture stator was the highest, which were 13.04% and 17.1% higher than that of smooth stator motor respectively. The temperature rise of textured stator was also reduced. By observing stator surface, it was found that the dimple texture greatly reduced the adhesion of the friction material, which can increase the energy conversion efficiency of the motor contact interface, improved the motor performance and reduced the wear of the friction material.

Key words: ultrasonic motor; mechanical characteristics; temperature characteristics; friction and wear; surface texture

超声电机是利用定转子间的摩擦力驱动转子运动的压电驱动器。相比传统电机, 超声电机具有低速大转矩、断电自锁、启停响应快、运行无噪声和无电磁

干扰等优点, 目前在医疗设备、航空航天和机器人等领域有广泛的应用前景, 同时也存在一些缺点, 例如效率低、寿命短和发热严重等^[1]。

Received 21 January 2019, revised 1 April 2019, accepted 24 April 2019, available online 28 July 2019.

*Corresponding author. E-mail: lijnbang@nbu.edu.cn, Tel: +86-18758328822.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51675288) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LQ18E050002).

国家自然科学基金项目(51675288)和浙江省自然科学基金项目(LQ18E050002)资助。

目前,提高超声电机性能的主要方法有优化摩擦材料和改进定子结构.摩擦材料的基体通常为具有自润滑性的聚合物材料,一般需要添加摩擦改进剂提高其性能.常用的改进剂有玻璃纤维、钛酸钾晶须、碳纤维、芳纶纤维和二硫化钼等^[2-5].Song等^[2]在PTFE基摩擦材料中添加了玻璃纤维,研究发现高真空条件下,由于摩擦热较高摩擦材料易发生黏着磨损.Fan等^[3]研究发现在超声电机用PTFE基摩擦材料中添加质量分数为5%钛酸钾晶须,可以有效地提高其摩擦系数和耐磨性.丁庆军等^[6]研究发现将环氧树脂基摩擦材料粘涂在定子表面,有效地减少了定转子接触界面间的摩擦系数.Rahman等^[7]通过在定子上打孔增加了中性轴到定子顶面的位置,研究发现改进后的电机具有更高的效率特性.上述研究在一定程度上改善了超声电机的摩擦磨损特性,并提高了电机的输出性能,但是由于超声电机的摩擦驱动原理,摩擦材料的磨损及摩擦带来的温升问题依然是制约超声电机进一步应用的难题,也是超声电机领域的研究热点之一.

激光表面织构是一种改善摩擦副摩擦学特性的有效方法,它具有减少摩擦磨损和提高耐磨性等优点^[8-11].胡天昌等^[12]研究了织构对45#钢摩擦性能的影响,研究发现较大织构密度和较大孔径更有利于减磨抗磨.目前,织构主要应用于转子的摩擦片上来改善

超声电机的性能.王丰等^[13]研究发现摩擦材料表面加工织构可以减少定转子接触面间的摩擦系数以及降低磨损量.Liu等^[14-15]研究了聚酰亚胺摩擦材料表面织构化对超声电机性能的影响,研究发现织构化的摩擦材料提高了超声电机的输出性能.针对超声电机定子和转子接触界面磨损问题,可以探索织构在超声电机中的应用,以改善接触界面的磨损并提高电机性能.

本文作者采用激光加工的方法在行波超声电机定子表面加工织构,测试超声电机机械特性、温升特性及摩擦磨损特性,揭示织构对电机特性的影响规律,为行波超声电机定子表面织构的设计与应用提供试验基础.

1 超声电机性能测试装置

本文作者采用超声电机性能测试装置,如图1所示.该装置组成部分包括:螺旋测微头、燕尾导轨、压力传感器、定子、转子、速度-转矩传感器以及磁粉制动器.压力传感器与燕尾槽导轨上部固定,螺旋测微头可移动燕尾导轨给电机施加预紧力.压力传感器可精确测量预紧力的大小,转矩-转速传感器用来采集超声电机的转矩和转速,磁粉制动器用于给电机施加转矩.该试验装置能够精确测试电机的负载特性和效率特性,满足本文中的试验需求.

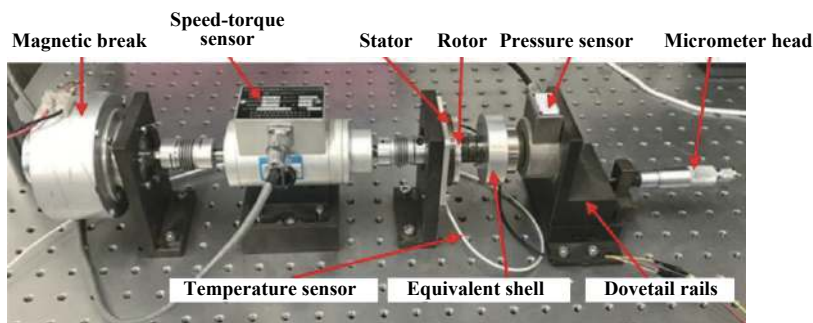


Fig. 1 Ultrasonic motor test device

图1 超声电机测试装置

试验采用西安创联超声技术有限公司生产的USM60-2型行波超声电机,其定转子结构如图2所示.定子材料为锡青铜,直径为60 mm,转子材料为铝合金,转子表面粘贴厚度为0.2 mm的摩擦材料.摩擦材料由基体和摩擦改进剂组成,基体为聚四氟乙烯,重量占45%~65%,摩擦改进剂包括碳纤维和纳米金刚石等,重量占35%~55%.

超声电机在工作时,定子外环发生超声振动,内环与外壳连接无振动,为了测试电机的温升,将温度

传感器布置在底座与定子内环连接部分,如图2所示.定子与支架的间隙较小,选择尺寸为3 mm×2 mm×1 mm的热电阻温度传感器,并在底座上开一个凹槽,用来布置连接线,连接温度显示仪.

2 定子表面织构位置确定

在定子上布置过多的微织构会降低定转子间的摩擦系数,使电机的性能下降,因此,需要根据摩擦材料的黏着位置布置凹坑织构.为了确定摩擦材料在定

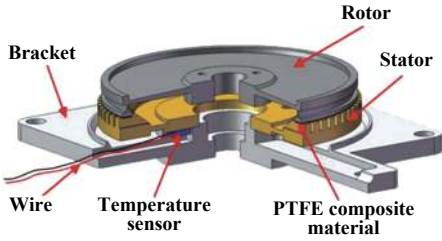


Fig. 2 The stator and rotor structure and temperature sensor arrangement in ultrasonic motor

图2 超声电机定转子结构和温度传感器的布置

子表面的黏着位置,给电机施加250 N的预紧力,运行2 h后,观察定子表面并对黏着区域进行测量.通过多个定子齿上黏着区域的测量发现,黏着区域的位置相对稳定,为半径 R_1 到 R_2 的面域(其中, $R_1=27.978$ mm和 $R_2=28.760$ mm).在黏着区域上,设计出三种不同密度织构,即1-凹坑、3-凹坑和5-凹坑织构,如图3所示.

采用Nd:YA固体脉冲激光器在定子表面加工出这三种织构,如图4所示.图4(a)为1-凹坑织构,凹坑布置在黏着区域中间;图4(b)为3-凹坑织构,在1-凹坑织构外侧 d_1 处布置两个凹坑(其中 $d_1=0.403$ mm);图4(c)为5-凹坑织构,在3-凹坑织构内侧 d_2 处布置两个凹坑, (其中 $d_2=0.403$ mm);图4(d)凹坑织构三维形貌,凹坑宽度约为 $312.5\ \mu\text{m}$,深度约为 $210.4\ \mu\text{m}$.脉冲激光器的

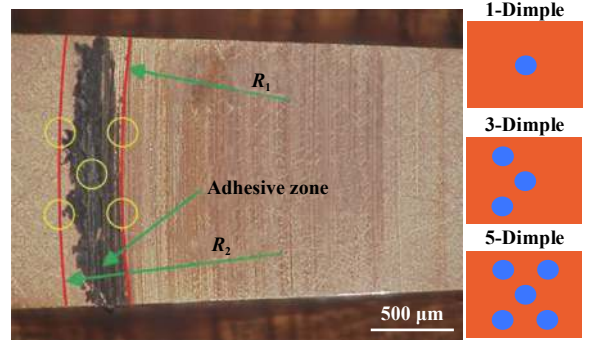


Fig. 3 Friction and wear of stator surface of ultrasonic motor
图3 超声电机定子表面摩擦磨损

工作参数为电流为220 A,脉宽为0.2 ms,频率为2 Hz.激光器加工凹坑织构时会产生铜屑飞溅到定子表面,加工织构后,采用2 000目砂纸将定子表面打磨平整,并用超声波清洗机清洗定子表面.

3 测试结果

3.1 织构对电机机械特性的影响

采用图1所示超声电机测试装置,设置预紧力250 N,改变磁粉制动器的输入电流给电机施加不同的转矩,测试电机的负载特性和效率特性.在测试中,以负载 $0.05\ \text{N}\cdot\text{m}$ 为步长递增,在每个负载下保持20 s,记录直

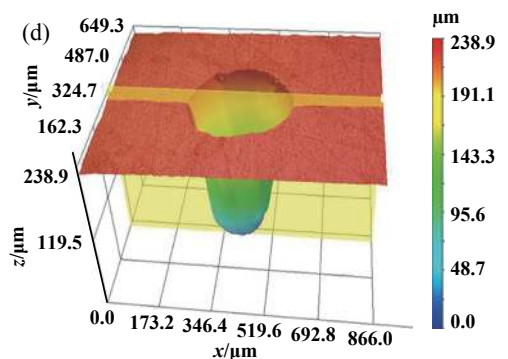
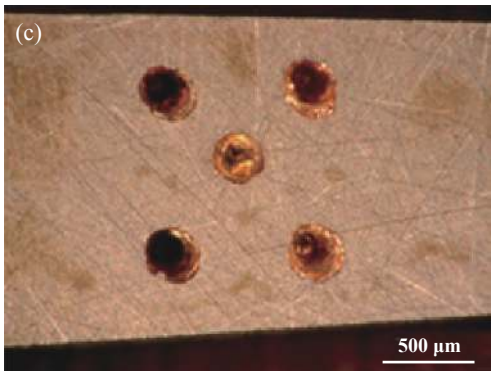
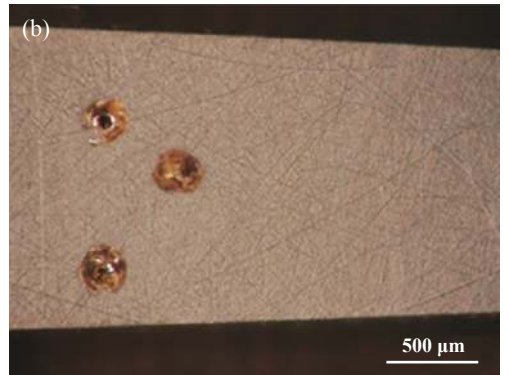


Fig. 4 Surface texture of stator: (a) 1-dimple texture; (b) 3-dimple texture; (c) 5-dimple texture; (d) 3D morphology of dimple

图4 定子表面织构:(a)1-凹坑织构;(b)3-凹坑织构;(c)5-凹坑织构;(d)凹坑3D形貌

流稳压电源的电流和电机的转速, 并计算平均值. 电机的输入功率为稳压电源电压与电流的乘积, 输出功率通过转速和负载计算. 这样即可得到电机的负载特性和效率特性, 测试结果如图5所示. 由图5(a)得出, 随着凹坑织构密度的增加, 电机的负载特性有着明显提高. 光滑、1-凹坑织构、3-凹坑织构以及5-凹坑织构定子电机的空载转速分别为89.16、96.58、99.91和97.20 r/min. 3-凹坑织构定子电机空载转速最高, 相比光滑定子电机高出12.1%. 光滑、1-凹坑织构、3-凹坑织构和5-凹坑织构定子电机的堵转转矩分别为1.15、1.15、1.2和1.3 N·m. 其中, 5-凹坑织构定子电机的堵转转矩最高, 相比光滑定子电机高出13.04%. 当转矩为0.85 N·m时, 5-凹坑织构定子电机转速与光滑定子电机转速的最大差值为15.17 r/min. 由图5(b)可以看出, 加工织构后, 超声电机的效率有不同程度的提高. 光滑、1-凹坑织构、3-凹坑织构和5-凹坑织构定子的最大效率分别为30.67%、32.58%、33.99%和35.91%. 5-凹坑织构定子电机最大效率最高, 相比光滑定子电机提高了17.1%. 当

转矩小于0.9 N·m时1-凹坑织构定子电机效率大于光滑定子电机效率. 当转矩大于0.9 N·m时1-凹坑织构定子的效率略小于光滑定子的效率. 试验表明, 定子表面织构可以提高超声电机负载特性与效率特性, 其中, 3-凹坑织构负载特性较好, 5-凹坑织构效率特性较好.

3.2 超声电机温升特性

采用贴片式热电阻温度传感器测试超声电机温升特性, 传感器的测量精度为0.3 °C. 为防止温度过热损坏定子, 预紧力设为200 N, 测试时间为35 min, 每隔1 min观察并记录仪表显示值, 每组数据测量3次, 然后计算出平均值. 为保证测试条件一致, 每次测试前, 首先使电机温度降至28 °C, 测试结果如图6所示. 由图6(a)可得出, 织构定子可以改善电机的温升趋势. 经过35 min, 光滑、1-凹坑织构、3-凹坑织构和5-凹坑织构定子电机温度分别为41.67、40.67、40.33和40.33 °C. 5-凹坑织构与3-凹坑织构定子电机温度最低, 相比光滑定子电机降低1.34 °C. 由图6(b)可得出, 定子表面织

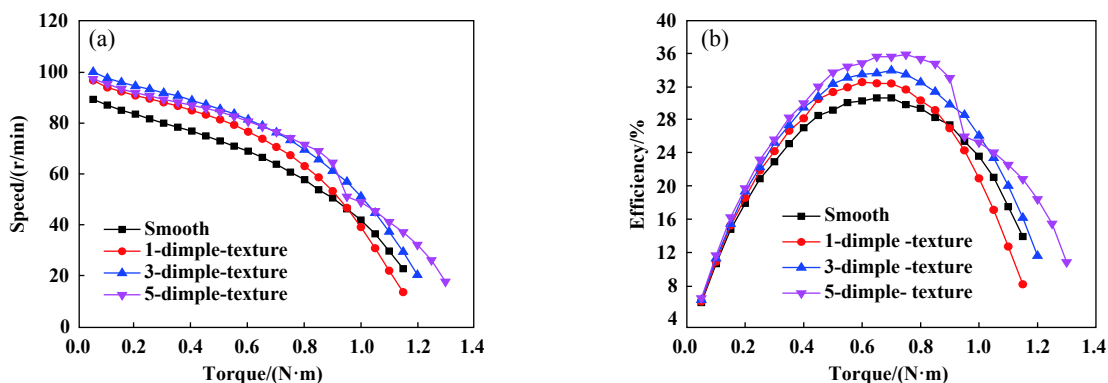


Fig. 5 Mechanical characteristics of ultrasonic motor with different stator surface textures: (a) Load characteristics; (b) Efficiency characteristics

图5 不同定子表面织构超声电机机械特性:(a)负载特性;(b)效率特性

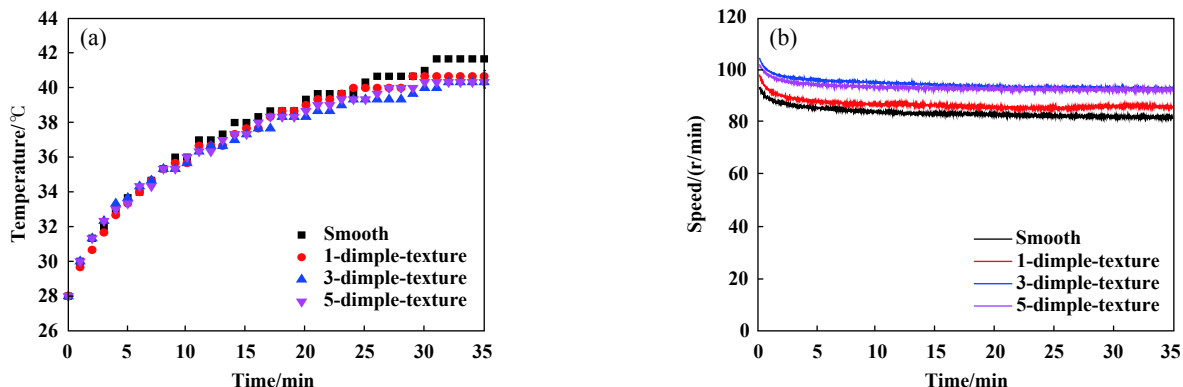


Fig. 6 Temperature rise of ultrasonic motor with different stator surface texture: (a) Temperature-time; (b) Speed-time

图6 不同定子表面织构超声电机温升:(a)温度-时间;(b)转速-时间

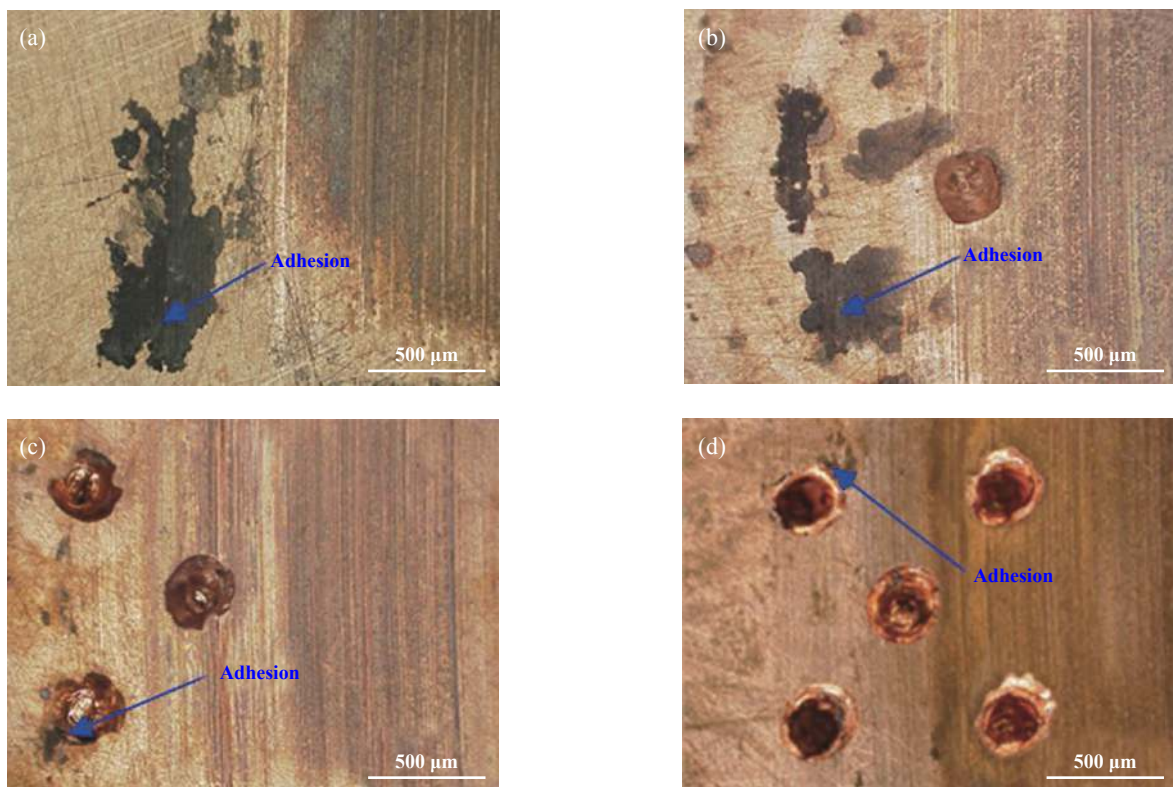


Fig. 7 Surface wear of stators with different textures: (a) smooth; (b) 1-dimple texture; (c) 3-dimple texture; (d) 5-dimple texture

图7 不同织构定子表面磨损: (a)光滑; (b)1-凹坑织构; (c)3-凹坑织构; (d)5-凹坑织构

构对电机转速下降幅度有着明显的影响. 在0~35 min内, 光滑、1-凹坑织构、3-凹坑织构、5-凹坑织构定子电机转速下降幅度分别11.50、12.07、11.40和9.49 r/min. 其中, 5-凹坑织构定子电机转速下降幅度最低.

3.3 织构对电机定子表面磨损的影响

给定、转子施加250 N的预紧力, 运行5 h后, 观察定子表面, 四种定子表面如图7所示. 由如图7(a)可看出, 光滑定子表面有大片的摩擦材料黏着, 黏着物颜色较深, 说明黏着物有较大的厚度. 1-凹坑织构定子表面摩擦材料黏着呈现分散状态, 黏着物个体尺寸较小, 颜色较浅, 如图7(b)所示. 由图7(c~d)可看出, 3-凹坑织构定子和5-凹坑织构定子表面只有少量黏着物, 黏着物呈颗粒状, 无明显的黏着现象. 试验结果表明, 织构可以减少定子表面摩擦材料黏着, 随着凹坑织构数量的不断增加, 定子表面摩擦材料的黏着逐渐减少.

4 讨论

超声电机是由定子和转子间的摩擦力进行驱动的, 所以定、转子接触界面的磨损是不可避免的. 由于超声振动的存在, 定、转子组成一对特殊的摩擦副, 其摩擦磨损特性也具有特殊性. 研究表明, 超声电机中

PTFE基摩擦材料的磨损以黏着磨损和疲劳磨损为主^[16-17]. PTFE材料很容易在对摩件表面形成一层转移膜, 可以有效降低接触面的摩擦系数, 但往往使PTFE的磨损加重. 超声电机中需要一定的摩擦力, 保证电机的驱动性能, 同时需要降低摩擦材料的磨损, 提高电机的寿命. 因此, 在超声电机接触界面上, 转移层是需要尽可能避免的.

在本研究中, 首先测量了摩擦材料在定子表面的黏着区域, 在该区域上, 布置三种凹坑织构, 研究了织构对材料摩擦磨损特性, 电机输出特性及温升特性的影响. 结果表明, 凹坑织构大大减少了摩擦材料的黏着现象, 磨损量也大幅减低, 同时电机的速度和效率也有不同程度的提高, 电机温升有明显的下降.

定子和转子的摩擦示意图如图8所示. 对于光滑定子, 定子表面对摩擦材料有较强的黏着作用, 在超声振动的作用下, 摩擦材料表面极易因疲劳产生裂纹, 然后黏结到定子表面. 加工织构以后, 凹坑织构降低了定子表面对摩擦材料的黏着面积, 打断了黏结的连续性, 这样就避免了摩擦材料大块的剥落和转移. 转移层的减少保证了接触界面的摩擦力, 增大了定转子接触界面的能量转换效率, 使电机的速度和效率均

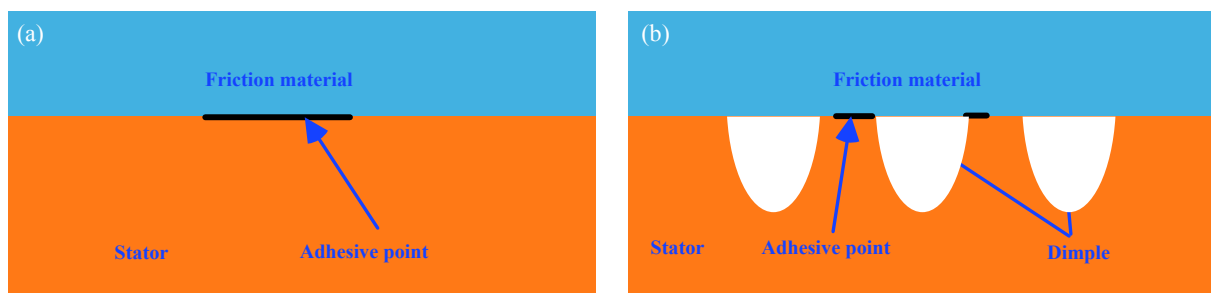


Fig. 8 Wear mechanism of friction material and stator contact surface: (a) Smooth stator; (b) Textured stator

图8 摩擦材料和定子接触表面磨损机理: (a)光滑定子; (b)织构定子

有提升,同时也降低了电机的温升。

5 结论

a. 织构可以有效提高超声电机负载特性与效率特性。相比光滑定子电机,3-凹坑织构定子电机空载转速提高12.1%,5-凹坑织构定子电机最大效率提高17.1%、堵转转矩提高13.04%。

b. 织构可以有效降低超声电机温升。对电机温升测试,经过35 min,5-凹坑织构与3-凹坑织构定子电机温度低于光滑定子电机1.34 °C。在0~35 min内,5-凹坑织构定子电机转速下降幅度最小。

c. 织构可以大幅降低定子和转子接触界面摩擦材料的黏着。1-凹坑织构有大片黏着,3-凹坑织构有少量黏着,5-凹坑织构几乎无黏着,凹坑可大幅降低摩擦材料的黏着,提高超声电机接触界面的能量转换效率。

参考文献

- [1] Guo Jifeng, Bai Yang, Wang Jian. Recent development and prospect of multi-degree-of-freedom ultrasonic motors[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(15): 65–68 (in Chinese) [郭吉丰, 白洋, 王剑. 多自由度超声波电机的研究进展和展望[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(15): 65–68].
- [2] Song Fuzhi, Yang Zhenhui, Zhao Gai, et al. Tribological performance of filled PTFE-based friction material for ultrasonic motor under different temperature and vacuum degrees[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(39): 45358. doi: 10.1002/app.v134.39.
- [3] Fan Yu, Ding Qingjun, Yao Zhiyuan. Properties of potassium titanate whisker reinforced polytetrafluoroethylene-based friction materials of ultrasonic motors[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 125(5): 3313–3317. doi: 10.1002/app.v125.5.
- [4] Wang Qihua, Song Fuzhi, Zhang Xinrui, et al. Impact of fillers and counter face topography on wear behavior of PTFE polymers for ultrasonic motor[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(19): 48835.
- [5] Zhao Gai, Wu Chuhan, Zhang Liangchi, et al. Friction and wear

behavior of PI and PTFE composites for ultrasonic motors[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, 29(5): 1487–1496. doi: 10.1002/pat.v29.5.

- [6] Ding Qingjun, Yao Zhiyuan, Zheng Wei, 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]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2007.06.016.
- [7] Romlay Fadhlur Rahman Mohd, Yusoff Wan Azhar Wan, Piah Kamal Arifin Mat. Increasing the efficiency of traveling wave ultrasonic motor by modifying the stator geometry[J]. *Ultrasonics*, 2016, 64: 177–185. doi: 10.1016/j.ultras.2015.09.002.
- [8] Yang Xiao, Meng Xiangkai, Peng Xudong, et al. A TEHD lubrication analysis of surface textured mechanical seals[J]. *Tribology*, 2018, 38(2): 204–212 (in Chinese) [杨笑, 孟祥铠, 彭旭东, 等. 表面织构化机械密封热弹流润滑性能分析[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(2): 204–212]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.02.011.
- [9] Zhao Shuai, Wang Xiaolei. The effects of surface texture on the wear properties of mechanical seals made of metal and molybdenum[J]. *Tribology*, 2015, 35(6): 761–767 (in Chinese) [赵帅, 王晓雷. 高分子材料机械密封磨损特性及表面织构的影响[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(6): 761–767]. doi: 10.16078/j.tribology.2015.06.016.
- [10] Lu Chongyang, Yang Xuefeng, Wang Shouren, et al. Dynamic pressure lubrication and anti-friction characteristics of the working surface of the cemented carbide with triangular grooved microtexture[J]. *Tribology*, 2018, 38(5): 537–546 (in Chinese) [鹿重阳, 杨学锋, 王守仁, 等. 三角沟槽形织构化硬质合金工作表面动压润滑及减摩特性[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(5): 537–546]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.05.006.
- [11] Yan Zhen, Sun Jiayi, Jiang Dong, et al. Tribological behavior of laser textured TiN films under dry friction condition[J]. *Tribology*, 2017, 37(4): 518–526 (in Chinese) [刻珍, 孙嘉奕, 姜栋, 等. 激光织构化TiN薄膜的干摩擦性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(4): 518–526]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.04.014.
- [12] Hu Tianchang, Hu Litian, Ding Qi. Tribological properties of laser textured surfaces of 45# steel under dry friction[J]. *Tribology*, 2010, 30(1): 46–52 (in Chinese) [胡天昌, 胡丽天, 丁奇. 45#钢表面激光

- 织构化及其干摩擦特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 46–52]. doi: [10.16078/j.tribology.2010.01.014](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2010.01.014).
- [13] Wang Feng, Ding Qingjun, Zhao Gai, et al. Study on properties of surface texturing polyimide films friction materials of ultrasonic motor[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(9): 1859–1862 (in Chinese) [王丰, 丁庆军, 赵盖, 等. 表面织构化聚酰亚胺薄膜超声电机摩擦材料性能研究[J]. 应用化工, 2017, 46(9): 1859–1862]. doi: [10.3969/j.issn.1671-3206.2017.09.049](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3206.2017.09.049).
- [14] Liu Xiaoliang, Qiu Jinhao, Zhao Gai. Improved energy conversion efficiency of the ultrasonic motor with surface texture[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(9): 1729–1736. doi: [10.1108/ILT-02-2018-0053](https://doi.org/10.1108/ILT-02-2018-0053).
- [15] Liu Xiaoliang, Qiu Jinhao, Zhao Gai. Effect of laser surface texturing on tribological properties of polyimide composites in the application of traveling wave rotary ultrasonic motor[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(4): 569–577. doi: [10.1108/ILT-06-2016-0130](https://doi.org/10.1108/ILT-06-2016-0130).
- [16] Li Jinbang, Qu Jianjun, Zhang Yanhu. Wear properties of brass and PTFE–matrix composite in traveling wave ultrasonic motors[J]. Wear, 2015, 338-339(1): 385–393.
- [17] Mazza Luigi, Trivella Andrea, Grassi Roberto, et al. A comparison of the relative friction and wear responses of PTFE and a PTFE-based composite when tested using three different types of sliding wear machines[J]. Tribology International, 2015, 90: 15–21. doi: [10.1016/j.triboint.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.001).