

超声马达梯度涂层摩擦材料研究

曲建俊, 王彦利, 曲焱炎, 毛庆波

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 超声马达摩擦材料应同时具有良好的摩擦学特性和一定的接触变形要求, 目前所用单一均质结构摩擦材料较难满足这一要求, 需要研制新型摩擦材料. 本文从摩擦学的减摩结构模型反推出一种增摩结构模型, 针对超声马达对摩擦材料的要求, 提出梯度涂层摩擦材料的设计思想, 采用表面黏涂法研制了一种具有梯度结构的涂层摩擦材料. 利用超声马达模拟试验装置考察了涂层厚度对超声马达性能的影响, 初步验证了模型的正确性. 在本文的试验条件下, 当涂层材料表层厚度为 1mm, 底层厚度为 0.7mm 左右时, 超声马达具有较好的性能. 与其它种类的摩擦材料相比较, 梯度涂层摩擦材料可以满足超声马达的使用要求, 可望提升超声马达的性能, 具有良好的发展前景.

关键词: 超声马达; 摩擦材料; 涂层; 梯度

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2009)01-0025-06

摩擦材料的性能直接影响超声马达的驱动特性和使用寿命^[1]. 超声马达对摩擦材料的要求可分为两方面, 其一是摩擦材料的摩擦学特性, 具有较大的摩擦系数, 低磨损, 对偶件损伤小, 抗热衰退强; 其二是摩擦材料的接触变形特性, 需要摩擦材料具有一定的变形能力, 以利于有效地传递能量; 此外, 具有合适的硬度, 低噪音, 以及良好的热稳定性和精密加工性.

近年来, 国内外已研制出了多种超声马达摩擦材料^[2-9], 不仅如此, 在摩擦材料的性能, 如硬度、弹性模量、尺寸厚度^[2, 10-12]以及各向异性结构^[13-14]等对超声马达输出特性的影响方面也进行了试验和仿真研究. 然而, 多数研究单位或学者在试验分析过程中采用的是单一均质片状结构的摩擦材料, 此种摩擦材料要同时满足摩擦学和接触变形要求存在一定的限制, 较难进一步提升超声马达的性能.

目前, 人们一方面在研究改进现有摩擦材料, 以提高其性能; 另一方面也在探索研制新型超声马达摩擦材料. 针对超声马达对摩擦材料的特殊要求, 建立具有指导意义的摩擦材料设计模型, 以及应用现有功能材料发展技术, 是开发高性能超声马达摩擦材料的有效途径. 梯度功能材料出现至今已有二十多年的历史, 现在广泛应用于医用材料、分离膜、涂

料、黏接剂和降噪吸声阻尼材料等领域^[15-16]. 将梯度功能材料作为超声马达摩擦材料的应用还未见报道. 因此, 本文首先提出一种增摩的摩擦材料设计模型, 然后采用表面黏涂法研制一种梯度涂层摩擦材料^[17], 考察了表、底涂层厚度变化对超声马达性能的影响. 同时与使用其它摩擦材料的超声马达性能进行试验对比, 期望研制一种新型的梯度涂层超声马达摩擦材料.

1 梯度涂层摩擦材料设计原理

1.1 超声马达接触模型

图 1 所示为在半个波长上行波超声马达定转子

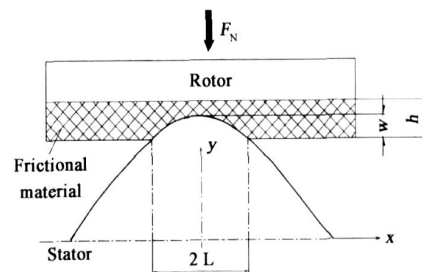


Fig 1 Contact model of stator and rotor

图 1 超声马达定转子接触模型

收稿日期: 2008-05-01; 修回日期: 2008-10-22; 联系人: 曲建俊, e-mail: qujianjun@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575055); 国家重点基础研究发展计划 973 计划资助项目(2007CB607602).

作者简介: 曲建俊(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事摩擦学功能材料, 压电驱动技术及微型超声电动机研究.

的接触情况, h 为摩擦材料厚度, w 为在预压力 F_N 作用下摩擦材料的法向接触变形量, $2L$ 为定转子的接触区域.

$$驱动力 F = \int_{-L}^L \mu_d P(x) dx$$

式中, μ_d 为摩擦系数, $P(x)$ 为接触区域单位长度上的预压力.

从驱动力公式可以看出, 摩擦材料的摩擦系数和接触区域对驱动具有重要影响.

1.2 增摩模型的建立

根据黏着理论^[18], 对于小摩擦的材料, 一种减摩模型如图 2 所示, 它是在硬基体表面设置一薄层

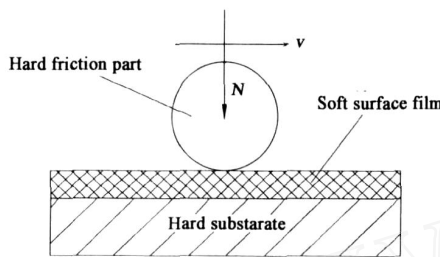


Fig 2 Anti - friction model
图 2 减摩模型

较软表面膜的复合结构, 当与对偶件摩擦时, 可获得较小的摩擦力. 摩擦力 $F = A_r \times \tau$, A_r 是接触面积, τ 是材料的剪切强度极限.

考虑摩擦材料是一种大摩擦特性材料, 可以反向应用减摩模型. 将硬薄膜层置于表层, 在其和硬基体之间增加一层软材料层, 结构如图 3 所示, 以软材

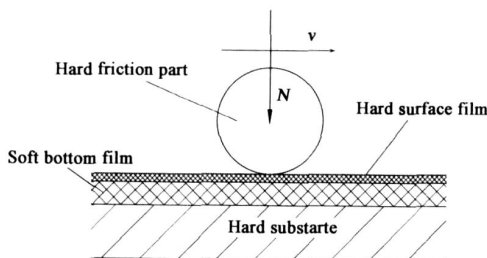


Fig 3 Increase friction model
图 3 增摩模型

料层为整体材料的底层, 硬材料层为整体材料的表层. 接触变形量在一定程度上由软底层材料决定, 在预压力一定时, 摩擦副可以获得较大的接触面积. 由黏着理论可知, 表层材料硬度大, 剪切强度极限大, 因此, 在接触面间可以获得较大的摩擦力, 此种结构

就构成了增摩模型, 同时这种结构还可以使摩擦材料获得较好的耐磨性.

1.3 梯度涂层的提出

基于增摩模型, 考虑了超声马达摩擦材料在使用过程中需要二次黏接, 以及胶层和摩擦材料之间存在一个分界面, 常因胶层的缺陷造成能量传递的损失. 为了避免这样的界面出现, 提出利用表面黏涂的方法制作摩擦材料, 在表、底层摩擦材料的结合处产生梯度过渡结构, 这样就消除了两种材料结合的明显界面, 形成整体上简单的梯度结构.

梯度涂层 (1) 如图 4 所示, 由表层部分 (2)、中间梯度过渡部分 (3) 和底层部分 (4) 组成, 中间过渡层是通过控制工艺参数产生的表底层的梯度过渡部分. 梯度涂层的表层部分主要体现材料的摩擦学特性; 底层部分一方面连接摩擦材料和基体, 另一方面承担摩擦材料的接触变形. 梯度涂层摩擦材料具有

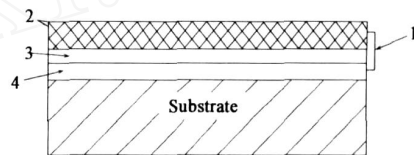


Fig 4 Structure of gradient coating
图 4 梯度涂层结构示意图

梯度功能材料的很多优点, 特殊的变刚度特性, 较好满足超声马达对摩擦材料的接触变形要求, 良好的热应力缓和功能, 不会因受热而产生翘曲, 其剪断强度和涂层平面方向的拉伸强度均有所提高等, 这些优点都使其与其它摩擦材料相比更适合在超声马达上应用.

2 梯度涂层摩擦材料的制备

2.1 梯度涂层组成及表层摩擦性能

梯度涂层摩擦材料的表层是以热固性环氧树脂胶黏剂为基体, 以 MoS_2 15 wt%、晶须 5 wt%、Cu 20 wt% 为填料, 通过正交设计和回归分析后确定的复合材料, 称为表层摩擦材料 A. 底层材料是利用另一种环氧树脂黏剂为基体, 以 Cu 20 wt% 为填料制备的复合材料 B. 中间过渡层材料是 A 与 B 复合成的过渡层. 以 8 mm 厚的聚苯酯塑料块为基体, 在其表面制成 2 mm 厚涂层摩擦材料, 摩擦试块总体尺寸为 20 mm × 7 mm × 10 mm. 采用环块式 M - 200 型磨损试验机, 以环块接触方式, 对偶件为 45# 钢环, 尺寸为 $\phi 40$ mm × 16 mm × 17 mm, 载荷 98 N, 所用转速

200 r/min,在干摩擦滑动条件下,对摩时间 30 min,测得表层 A 与 45#钢环的摩擦系数和磨损率分别为 0.54 和 $0.12 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$. 用 TH210 邵氏硬度计测量涂层 A 与 B 的硬度分别为 83.8 和 60.2

2.2 制备工艺

梯度涂层材料采用如下黏涂工艺制备,先将模具和转子基体清洗,烘干,然后把底层材料 B 刷涂在模具中,安装转子,在烘箱中烘干 B 表层,再将摩

擦材料 A 涂覆在 B 表层,把带有底层材料的转子安装在模具上压平,在 100 度固化 3 h,最后经研磨抛光,制得试样试件.

图 5 分别为 B 材料完全固化和仅表层干时制备的涂层摩擦材料界面分布的 SEM 照片.

图 5(a)为 B 完全固化制得的涂层摩擦材料的截面图,可以看出上下两层之间有明显的界面存在.图 5(b)为 B 表层干时制得的涂层摩擦材料的截面

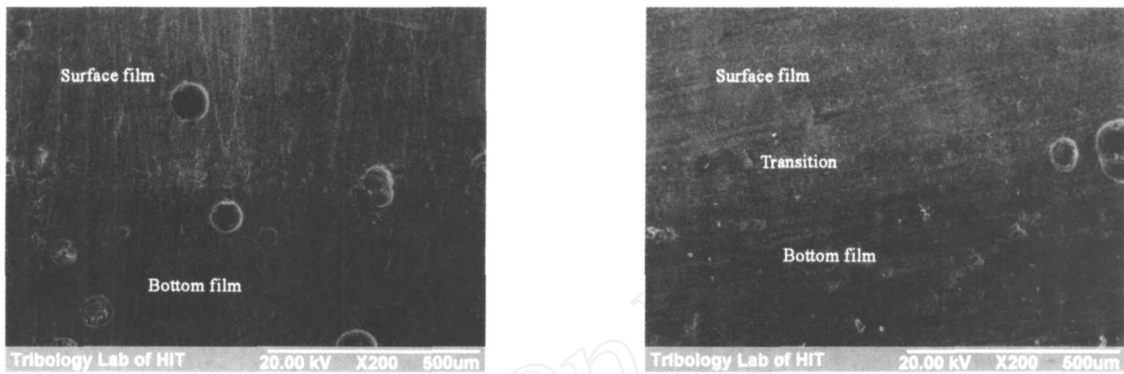


Fig 5 SEM photos of coating interface with different process

图 5 B 材料以不同工艺制备时涂层界面 SEM 照片

图,可以看出在两个涂层之间有一定厚度的过渡层.此工艺制备的涂层摩擦材料在整体上构成了简单的梯度结构,可以用于制备梯度涂层摩擦材料.图 5 中的颗粒状物体为涂层材料制备过程中,由于低分子物的存在所形成的气泡缺陷,经抛光后形成了圆形空洞.

2.3 转子梯度涂层试样制备

固定表层厚度为 1 mm,底层厚度从 0.0.5、0.7、1.0 到 1.5 mm 变化,用图 5(b)的工艺制得 5 种厚度的梯度涂层摩擦材料.试样外径为 36 mm,内径为 18 mm.梯度涂层摩擦材料整体厚度为表层与底层厚度之和,转子基体材料为硬铝 LY12CZ

2.4 试验设备

利用文献 [19] 超声马达特性模拟试验装置测试超声马达特性.

3 摩擦材料厚度对超声马达特性的影响

图 6 所示为表层材料厚度从 0.1 mm 到 2 mm 变化对超声马达驱动性能的影响,其中 n_0 、 M_d 分别为空载转速和堵转力矩.

由图 6 可见,当涂层摩擦材料厚度达到 1 mm 时超声马达的驱动性能最好,当摩擦材料厚度继续

增大时,超声马达的性能变化却不是很大.固定表层厚度为 1 mm 时,改变底层材料厚度,考察超声马达驱动性能变化,试验结果如图 7 所示.

由图 7 可见,当底层材料厚度小于 0.5 mm 时,马达的空载转速 n_0 和堵转力矩 M_d 都随底层摩擦材

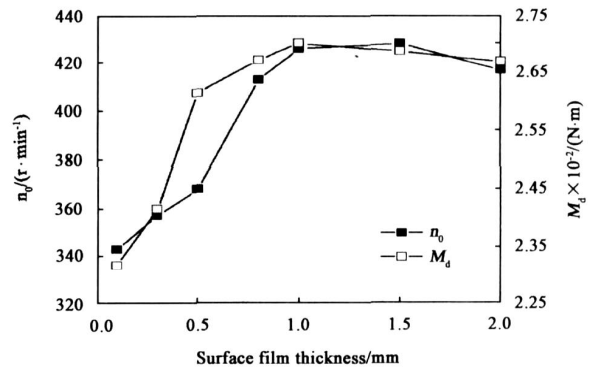


Fig 6 Variation of properties of ultrasonic motor with surface film thickness

图 6 超声马达性能随表层厚度变化

料厚度的增加而增加,当底层涂层厚度为 0.7 mm 时, M_d 达到最大,当底层涂层的厚度为 1 mm 时, n_0 达到最大.与只有表层摩擦材料相比,采用梯度涂层

摩擦材料的超声马达性能,在底层厚度为 0.7 mm 时,其空载转速增大了 6.3%,堵转力矩增大了 18.5%,表明基于增摩模型的梯度涂层摩擦材料的设计思路是合理的,可以改善超声马达性能。

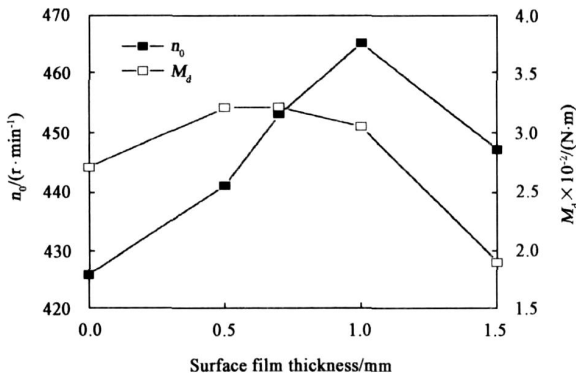


Fig 7 Variation of properties of ultrasonic motor with bottom film thickness

图 7 超声马达性能随底层厚度的变化

超声马达的空载转速 n_0 和堵转力矩 M_d 比只有表层摩擦材料时增大,与梯度涂层结构有关.底层涂层材料相对于表层涂层材料软,当底层涂层材料的厚度增加时,转子表面摩擦材料的硬度降低,在同样的预压力下,定转子的接触变形增大,增加了驱动接

触面积,增大了驱动力,使堵转力矩和空载转速增大;当底层厚度继续增加时,定转子的接触变形进一步增加,造成摩擦驱动中几何滑动和弹性滑动的损失较大,且超声振动对摩擦驱动的消极减摩作用加强,导致空载转速和堵转力矩下降。

4 梯度涂层摩擦材料与不同定子组合特性

表 1 列出了不同种类的摩擦材料,编号 1~2 为本研究组研制的超声马达摩擦材料,3 为其他单位

表 1 超声马达摩擦材料编号与名称
Table 1 Names of friction material for ultrasonic motor

No	Name	Types of friction material
1	EK1	Ekono1
2	NE2	PTFE
3	EP1	Epoxy Resin
4	GFM	Gradient Coating

研制的摩擦材料,4 为本文制备的梯度涂层摩擦材料.其中 1~3 种摩擦材料是制成厚度为 1.7 mm 的片状形式,粘帖到转子上,然后分别与定子组装成超声马达。

图 8 为不同摩擦材料与铜和铝定子组合时的超声马达性能试验结果.从图 8 中可见,本文研制的

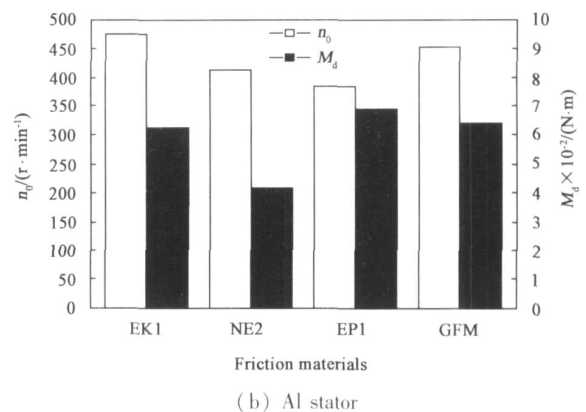
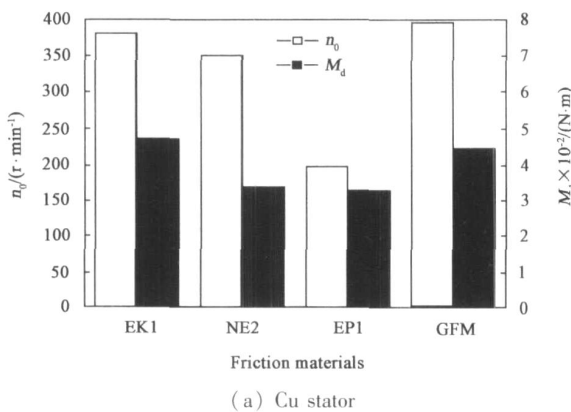


Fig 8 Properties of ultrasonic motor with different friction materials

图 8 不同摩擦材料的超声马达性能

GFM 和 EK1 在与铜、铝定子组合时超声马达的性能比较接近,比其他 2 种材料的性能略好.试验还发现,与铝定子组合相比,GFM 在与铜定子组合时,超声马达运行更加平稳,噪声小.因此,本梯度涂层摩擦材料比较适合与铜定子组合。

试验表明,所研制的梯度涂层摩擦材料可以用于超声马达,且有望提升其性能.超声马达梯度涂层

摩擦材料是一种新型结构的摩擦材料,目前尚处于初期研究阶段,制备工艺、摩擦学性能和接触力学性能等方面还有待今后做更深入地研究。

5 结论

a 针对超声马达对摩擦材料的摩擦学和接触变形要求,建立了超声马达摩擦材料的增摩结构模

型,采用黏涂法设计制备出转子梯度涂层摩擦材料。

b 超声马达梯度涂层摩擦材料的表层和底层的厚度组合对超声马达性能有较大影响。在本文的试验条件下得出表层材料厚度为 1 mm 时,超声马达的性能最佳;在固定表层厚度 1 mm,当底层涂层厚度为 0.7 mm 时,超声马达的性能最好。

c 在本文试验条件下,与表层涂层摩擦材料相比,采用梯度涂层摩擦材料的超声马达,其最大堵转力矩提高了 18.5%,空载转速提高了 6.3%,初步证实了增摩模型的合理性,并为超声马达摩擦材料的研究提供了一个新的方向。

d 与用其它摩擦材料的超声马达性能对比表明,本文研制的超声马达梯度涂层摩擦材料可以应用于超声马达并有望提升其性能。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Akira Endo, Nobutoshi Sasaki Investigation of friction material for ultrasonic motor[J]. Japanese Journal of Applied Physics 1987, 26(1): 197 - 199.
- [3] 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.
- [4] 李宝库. 新型摩擦材料的研制 [J]. 黏接, 2001, 22(3): 7 - 8
Li B K Preparation for new friction material[J]. Zhanjie, 2001, 22(3): 7 - 8
- [5] 龚文,褚祥成,李龙土. 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 Acoustooptics, 2003, 25(4): 305 - 307.
- [6] 刘旭军,李同生,田农,等. 芳香聚酰胺基摩擦材料的研制及应用 [J]. 塑料工业,1999, 27(3): 25 - 27.
Liu X J, Li T S, Tian N, et al Manufacture and application of aromatic polyamide based frictional material [J]. China Plastics Industry, 1999, 27(3): 25 - 27.
- [7] 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.
- [8] 曲建俊,孙凤艳,田秀. 聚苯酯塑料合金超声马达的摩擦材料 [P]. 中国发明专利, CN 200410043602. 1, 2004.
- [9] 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
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
- [10] 曲建俊,周铁英,齐毓霖,等. 超声马达转子摩擦材料厚度对驱动性能的影响研究 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(2): 134 - 137.
Qu J J, Zhou T Y, Qi Y L, et al Effect of thickness of rotor friction material on the performance of ultrasonic motor [J]. Tribology, 2002, 22(2): 134 - 137.
- [11] 孙凤艳. 行波超声电机黏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.
Sun Fengyan Research on visco - elastic contact model and frictional material of traveling wave ultrasonic motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [12] 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.
- [13] Qu Jianjun, Luo Yunxia, Zhao Chunsheng, et al Effects of anisotropy of friction material on properties of ultrasonic motor [C]. WCU2003, Paris, 2003, 1 605 - 1 608.
- [14] 曲建俊,曲焱炎,肖殿东. 超声马达各向异性摩擦材料性能的试验研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(11): 133 - 136
Qu J J, Qu Y Y, Xiao D D. The experimental research of anisotropy frictional materials for ultrasonic motor [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(11): 133 - 136
- [15] 朱信华,孟中岩. 梯度功能材料的研究现状与展望 [J]. 功能材料, 1998, 29(2): 121 - 127.
Zhu X H, Meng Z Y. Current research status and prospect of functionally gradient materials [J]. Journal of Functional Materials, 1998, 29(2): 121 - 127.
- [16] 赵培仲,朱金华,王源升. 高分子梯度材料的研究 [J]. 弹性体, 2006, 16(3): 58 - 60.
Zhao P Z, Zhu J H, Wang Y S Study on graded polymer materials [J]. China Elastomers, 2006, 16(3): 58 - 60.
- [17] 曲建俊,王彦利,曲焱炎,等. 具有梯度涂层摩擦材料的转子或定子 [P]. 中国发明专利, CN 200710144922. X, 2007.
- [18] F D 鲍登, D 泰伯. 固体的摩擦与润滑 [M]. 陈绍澧译. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [19] 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 - 285.
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 - 285.

Study of Gradient Coating Material for Ultrasonic Motor

QU Jian - jun , WANG Yan - li , QU Yan - yan , MAO Qing - bo

(Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Ultrasonic motor friction material should have good tribological properties and withstand contact deformation. A new type friction material was developed by increase friction. Design principle of gradient coating friction material was proposed in view of requirement for ultrasonic motor. A gradient structure friction coating material was made by technology of surface cohering. Effects of coating thickness of coating friction material on drive properties of ultrasonic motor were analyzed by simulated tester, the correctness of the model was proved preliminary. The ultrasonic motor showed good performance at surface thickness of 1mm and bottom thickness of 0.7mm. Compared with other types of friction material, the gradient coating friction material basically met requirement for ultrasonic motor. Gradient coating friction material is expected to enhance the properties of ultrasonic motor and has good prospect for application in engineering.

Key words: ultrasonic motor, friction material, coating, gradient

Author: QU Jian - jun, male, born in 1962, Ph D., Professor, e - mail: qujianjun@hit.edu.cn