

文章编号:1674-2974(2016)08-0070-08

## 纳米坡缕石改进水润滑轴承性能的研究\*

王家序<sup>1,2†</sup>, 潘 阳<sup>1</sup>, 李俊阳<sup>1</sup>, 肖 科<sup>1</sup>, 周广武<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**水润滑轴承的摩擦性能取决于橡胶轴瓦的润滑状态、硬度、动态粘弹性等。选取坡缕石(AT)纳米粉体,经硅烷偶联剂KH-550表面改性处理后,加入NBR制成AT/NBR橡胶轴瓦硫化胶试件与AT/NBR水润滑轴承试件。检测表明,AT/NBR橡胶轴瓦硫化胶试件的综合力学性能、硬度提高。动态力学分析仪DMA测得,NBR,AT/NBR橡胶轴瓦硫化胶试件0℃时的损耗因子大约相等,表明两者的湿滑能力基本不变。通过轴承摩擦磨损试验机,测出AT/NBR轴承试件的水润滑摩擦噪声、摩擦系数与磨损量降低。以上实验表明,AT/NBR轴承试件比NBR轴承试件的摩擦磨损等性能指标有所提高,并达到了美军标(船舶)MIL-DTL-17901C(SH)的规定。

**关键词:**水润滑;轴承;纳米坡缕石;丁腈橡胶;摩擦性能

**中图分类号:**TH133.3; TH117.1

**文献标识码:**A

## Study on Nano-palygorskite Improving upon Performance of Water-lubricated Bearing

WANG Jia-xu<sup>1,2†</sup>, PAN Yang<sup>1</sup>, LI Jun-yang<sup>1</sup>, XIAO Ke<sup>1</sup>, ZHOU Guang-wu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing Univ, Chongqing 400030, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan Univ, Chengdu, Sichuan 610065, China)

**Abstract:** The friction performance of water-lubricated bearing depends on the lubricated conditions, hardness, dynamic viscoelasticity of rubber, and so forth. After the surface was modified with silane coupling agent KH-550, palygorskite (AT) nano-powder was added to NBR rubber to prepare AT/NBR rubber-liner vulcanizate sample and AT/NBR water-lubricated bearing sample. Proved by testing results, the comprehensive mechanical properties and the hardness of AT/NBR rubber-liner vulcanizate sample were enhanced. Detected by dynamic mechanical analyzer (DMA), the loss factor values at 0℃ of NBR and AT/NBR rubber-liner vulcanizate samples were approximately the same, and the wet sliding properties almost remained unchanged. When tested with friction wear-test machine of bearing, the water-lubricated friction coefficient of AT/NBR bearing sample decreased. Those experiments have shown that the performance index of AT/NBR bearing sample is better than that of the NBR bearing sample and meets the requirements of MIL-DTL-17901C (SH) specification.

**Key words:** water-lubricated; bearing; nano-palygorskite; acrylonitrile butadiene rubber; friction performance

\* 收稿日期:2015-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175521, 51375506), National Natural Science Foundation of China(51175521, 51375506);

重庆市“两江学者”计划专项经费资助项目

作者简介:王家序(1954-),男,重庆人,重庆大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: jxwang@cqu.edu.cn

水润滑橡胶轴承是一种滑动轴承,用于矿山采掘设备、船舶螺旋桨轴、水轮机、水泵和涡轮钻机等机械传动装置,轴瓦衬里是橡胶,由大量水介质润滑,能经受水中漂浮固体粒子的磨耗;橡胶弹性模量小,对载荷缓冲良好,能自动调位和有效减振降噪。其设计与工作条件、摩擦材料及润滑介质特性、润滑介质量和润滑方式等因素有关<sup>[1]</sup>。水润滑橡胶轴承静态接触面积与动态摩擦力的统计相关分析表明,二者线性相关显著,即改善轴承摩擦性能的关键因素,是橡胶材质的选择<sup>[2]</sup>。

在低速、重载、启动、停机等一些特殊工况下,水润滑轴承处于边界润滑或与轴颈直接接触的干摩擦状态,橡胶轴瓦会产生严重的磨损。因此,性能优良的水润滑轴承,不仅湿摩擦系数很低,而且耐磨性能很好。氧化锌晶须能显著提高橡胶的强度、耐磨性、防滑性、减振抗冲能力<sup>[3]</sup>,但同时也会增大橡胶的摩擦系数。

坡缕石(坡缕鎢石, palygorskite),又名凹凸棒石(attapulgitite),简称凹土(AT),是含水的层链状镁质硅酸盐粘土矿物,可作吸附剂、橡胶填料、钻井泥浆等<sup>[4]</sup>。通过常规加工混炼,天然凹土微米粉体就可解离、分散为纳米针状单晶,以棒晶-纳米短纤维方式分散在聚合物基体中,对橡胶基体产生优异的增强效果,且加工性能更好<sup>[5]</sup>。王益庆等<sup>[6]</sup>用机械共混法成功制备了新型凹土/橡胶纳米复合材料,TEM观察表明,绝大部分AT在丁腈橡胶基体中达到纳米级分散,并确认硅烷偶联剂Si-69改性凹土、制备NBR复合材料有良好的增强效果,性能达到N330炭黑的增强水平。胡志孟等<sup>[7]</sup>将改性纳米级凹凸土作为丁腈橡胶的浅色补强剂,能有效改善丁腈橡胶的性能指标,可以取代常规的炭黑和昂贵白炭黑,主要性能指标达到了锭子橡胶的石油部标准。尹芳华等<sup>[8]</sup>利用硅烷偶联剂Si-69改性AT,填充到NBR中制备复合材料,得到性能优异的纳米AT/NBR复合材料,并比较不同AT的改性方式对NBR补强的效果。尹慧等<sup>[9]</sup>研究了AT加入量对AT/NBR复合材料综合性能的影响。

另外,由硅烷偶联剂KH-550改性剂制备的聚合物复合材料,填充颗粒在基体中分散均匀,且具有良好的热稳定性<sup>[10]</sup>。

本文选取NBR极性橡胶作为基体,采用硅烷偶联剂KH-550改性坡缕石,制备AT/NBR橡胶轴瓦硫化胶试件,检测其力学性能;制作AT/NBR轴承试件,并进行轴承摩擦磨损试验。探讨坡缕石优化水润滑橡胶轴承工艺性能的途径,研究坡缕石提高轴承摩擦性能的有效方法。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料及配方

#### 1.1.1 原材料

NBR,牌号N41(兰州石化),丙烯腈含量约0.28~0.30;坡缕石纳米粉体(原矿产自贵州大方),纯度95%,由贵州大学机械学院丁旭老师提供;改性剂,硅烷偶联剂KH-550,化学纯,南京曙光化工有限公司;无水乙醇,分析纯,重庆川江化学试剂厂;其他补强剂和助剂均为橡胶工业市售。

#### 1.1.2 配方

参照专利(申请号:ZL 200810070080.2)《橡胶合金材料及利用该材料制造传动件的方法》,选取试验胶料基本配方(质量 phr):NBR 100,氧化锌 7.1,硫磺 2.9,促进剂 CZ 2.9,防老剂 NBC 2.9, C<sub>18</sub>饱和脂肪酸 2.9,半补强炭黑 100,填充剂玻璃纤维57.1,纳米坡缕石粉体 9.6,硅烷偶联剂 KH-550 取坡缕石用量的 1%。

### 1.2 仪器及设备

QM-3SP4 行星式球磨机,南京大学仪器厂;AL204 电子天平,美国梅特勒-托利多公司;X(S)K-160 型双辊开炼机,无锡华源橡塑机械厂;C-XLB-D500×500-1000 III 单层平板硫化机(制备胶料)、XLB/DZ-1950×2270-1000 抽真空平板硫化机(制作轴承),宁波千普机械有限公司;DXLL-5000 电子拉力试验机、XY-1 型橡胶硬度计、MH-74 型阿克隆磨耗试验机,上海德杰仪器设备有限公司;JEM-2000FX II 型高分辨透射电镜 TEM,日本电子公司;KYKY-2008B 型扫描电镜 SEM,中科院科学仪器厂;Q800 DMA 动态热机械分析仪,美国 TA 仪器公司;MPV-20D 屏显式摩擦磨损试验机;AWA5661 型声级计,杭州爱华仪器有限公司。

### 1.3 实验方法与步骤

#### 1.3.1 坡缕石粉体改性处理

采用湿式球磨法,在乙醇介质的作用下,将坡缕石矿物棒晶体打断、解束并改性。

1) 配制坡缕石与改性剂混合液。三口烧瓶中加入 50 mL 乙醇、坡缕石质量 1% 的改性剂 KH-550 搅拌,使 KH-550 充分溶解于乙醇,之后加入去离子水搅拌;混合液中缓慢加入坡缕石粉体,搅拌均匀;一个颈口接入冷凝器,另一个颈口插温度计且没入混合液,中间颈口安装搅拌器,烧瓶 50~60 °C 边加热边搅拌 30 min;产物用乙醇洗涤 5 次,混合液再用无水乙醇稀释至 600 mL。

2) 球磨。将偶联剂-乙醇与坡缕石粉体混合液

装罐,用QM-3SP4行星式球磨机,湿式球磨(工艺参数:球料比1:2,转速150 r/min,交替10 min)2 h,然后在80℃烘干备用。

### 1.3.2 橡胶轴瓦硫化胶的制备与轴承试件的制作

1) NBR, AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶的制备. 工艺路线:生胶→塑炼→(加入配合剂)混炼→成型、硫化→制样。

工艺流程:在双辊开炼机上先用小辊距冷辊胶料;辊距调至最小,控制混炼温度在50℃左右,辊筒速比1:1.2,加入配合剂和改性坡缕石纳米粉体(分多次加入),割胶翻炼;薄通、打三角包6次以上,反复压炼、捣胶,形成均匀的AT/NBR混炼胶;由硫化仪测定正硫化时间;用硫化机模压制成2 mm厚的AT/NBR硫化胶试片,在硫化压力18 MPa、硫化温度160℃下,硫化18 min,冷却至室温;取出试片放置12 h。

同期制备等量未加坡缕石的NBR硫化胶,备用。

2) NBR, AT/NBR 轴承试件的制作. 用硫化机将AT/NBR混炼胶模压成型,同时硫化粘接在铜套内表面,制成水润滑直槽轴承试件,其工艺参数为硫化压力20 MPa,硫化温度160℃,硫化时间30 min。

同期制作相等尺寸、未加坡缕石的NBR轴承,

备用。

### 1.3.3 橡胶轴瓦硫化胶试件的力学性能测试

用电子拉力机测试定伸应力、拉伸强度和拉伸伸长率,拉伸速度500 mm/min,测试温度(22±1)℃,相对湿度60%±1. 试件冲裁成哑铃状,取10个NBR, AT/NBR试件分别测试,取其平均值. 拉伸性能按GB/T 528—2009标准测定. 邵氏硬度按GB/T 531—1999方法测定. 撕裂强度按GB/T 529—2008标准,制成直角形试样测定. 耐磨性能按GB/T 1689—1998标准,制成胶轮试样,用阿克隆磨耗试验机,测试设定压力下与砂轮直接对磨的磨损量。

### 1.3.4 橡胶轴瓦硫化胶的动态力学性能测试

用动态热机械分析仪DMA分别测试NBR, AT/NBR橡胶轴瓦硫化胶试件在-80~100℃的损耗因子tanδ. 试件尺寸13.97 mm×6.61 mm×2 mm。

测试条件:拉伸夹具;频率1 Hz;升温速度3℃/min;应变0.5%;预加力0.01;力跟踪125%;泊松比0.44;温度为-80~100℃。

### 1.3.5 水润滑轴承试件的摩擦性能测试

试验采用的水润滑轴承摩擦磨损试验机,由交流电机拖动,液压油泵加载,计算机自动采集处理实验数据,直接读出摩擦系数. 其原理图如图1所示。

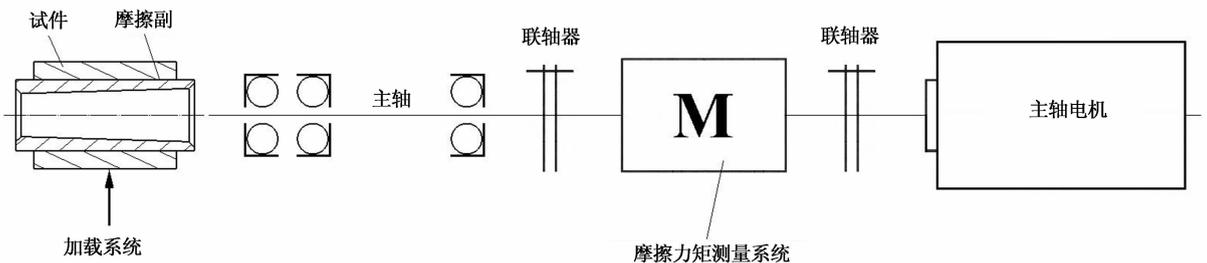


图1 MPV-20D摩擦磨损试验机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of MPV-20D friction wear-test machine

1) 设备组成及功能. ①供水系统由水箱、流量阀、水泵、水管等组成,为水润滑轴承运转提供润滑介质;②试验系统由电机、联轴器、支架等组成,模拟运转轴系;③加载系统由液压泵、液压缸组成,给试件施加径向载荷;④控制系统,启停水泵、控制电机转速并加载;⑤输出设备,动态记录并输出实验数据。

2) 试验对象. 水润滑NBR, AT/NBR直槽轴承,尺寸 $d = 40$  mm,  $D = 60$  mm,  $L = 80$  mm,橡胶轴衬厚6 mm,8个纵向水槽。

3) 润滑介质. 清水(自来水),润滑水流量 $Q = 0.5$  L/min。

4) 试验方法及步骤. ①采用体积法,将轴承试件完全浸入水中,测定与其体积等量的排水量,间接测出其磨损量. 试验前,分别测定未磨损NBR, AT/NBR轴承试件的排水量 $V_0$ ,水的体积用酸式滴定管测出。

②分别将NBR, AT/NBR轴承试件装入试验台,顺序调节轴转速200,400,600,800和1000 r/min,顺序加载荷640,800,960 N,每个工况运转1.6 h,连续运转共24 h;各工况每隔1 min读取较稳定的摩擦噪声声压值、摩擦系数示数,分别得出NBR, AT/NBR轴承试件转速-载荷与摩擦噪声、摩擦系数的关系. 试验环境温度为室温22~25℃。

③ 运转结束,将磨损的轴承试件冲洗干净,分别测定磨损后 NBR, AT/NBR 轴承试件的排水量  $V_1$ , 根据磨损前后轴承试件排水量的体积差  $\Delta V = V_1 - V_0$ , 计算得到轴承试件的磨损量  $\Delta m = \Delta V \rho$  (其中,  $\rho$  为橡胶轴瓦的密度)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 试验结果与分析

#### 2.1.1 坡缕石纳米粉体的微观结构

实验用坡缕石粉体在水中超声分散,滴膜法制样,用透射电镜 TEM 观察其微观结构,如图 2 所示,改性后坡缕石粉体单根棒晶的直径大约为 20~100 nm 左右,长径比在 10~50 之间,达到纳米级。



图 2 改性纳米坡缕石的 TEM 照片  
Fig. 2 TEM photo of nano-palygorskite after surface modification

#### 2.1.2 加入坡缕石前后橡胶轴瓦硫化胶试件的力学性能

加入坡缕石后橡胶轴瓦硫化胶的力学性能如表 1 所示,表中 0# 试件不含坡缕石,1# 试件添加胶料质量约 1/10 的坡缕石。

加入坡缕石的 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件,定伸应力、拉伸强度、断裂伸长率、邵氏硬度、撕裂强度、耐磨性能都有所提高,比原 NBR 橡胶轴瓦胶料更强韧、更硬。

阿克隆磨耗试验中,胶轮试件与标准砂轮在设定压力下直接接触对磨的磨损量,可以反映轴承橡胶轴瓦在干摩擦、磨粒磨损条件下的耐磨性能<sup>[11]</sup>。AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的阿克隆磨耗量降

低,即 AT/NBR 轴承试件在干摩擦、磨粒磨损条件下的耐磨性能提高。

在一定程度上,胶料共混的均匀程度会影响其中各成分的均匀分散,从而影响硫化胶的交联网络,也就影响其常规物理力学性能(拉伸强度、定伸应力、撕裂强度和永久变形等)。所以,可以用间接方法——通过测定硫化胶的物理力学性能,评价橡胶共混体系均匀性、分散性的好坏<sup>[12]</sup>。

表 1 橡胶轴瓦硫化胶试件的物理力学性能

Tab. 1 Physics and mechanical properties of rubber-liner vulcanizate samples

物理与力学性能	试件	
	0#	1#
100%定伸应力/MPa	2.5	2.9
300%定伸应力/MPa	6.3	7.5
拉伸强度/MPa	15.3	16.8
断裂伸长率/%	392	591
邵氏硬度	72	74
撕裂强度/MPa	34.2	35.8
阿克隆磨耗量/(cm <sup>3</sup> /1.61 km)	0.23	0.22

#### 2.1.3 加入坡缕石前后橡胶轴瓦硫化胶试件的动态力学性能

NBR 与 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的动态力学性能,如图 3 所示。NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的玻璃化转变温度  $T_g$  为  $-12.99$  °C,对应的  $\tan \delta_{\max}$  为 1.211; AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的玻璃化转变温度  $T_g$  为  $-12.63$  °C,对应的  $\tan \delta_{\max}$  为 1.136。

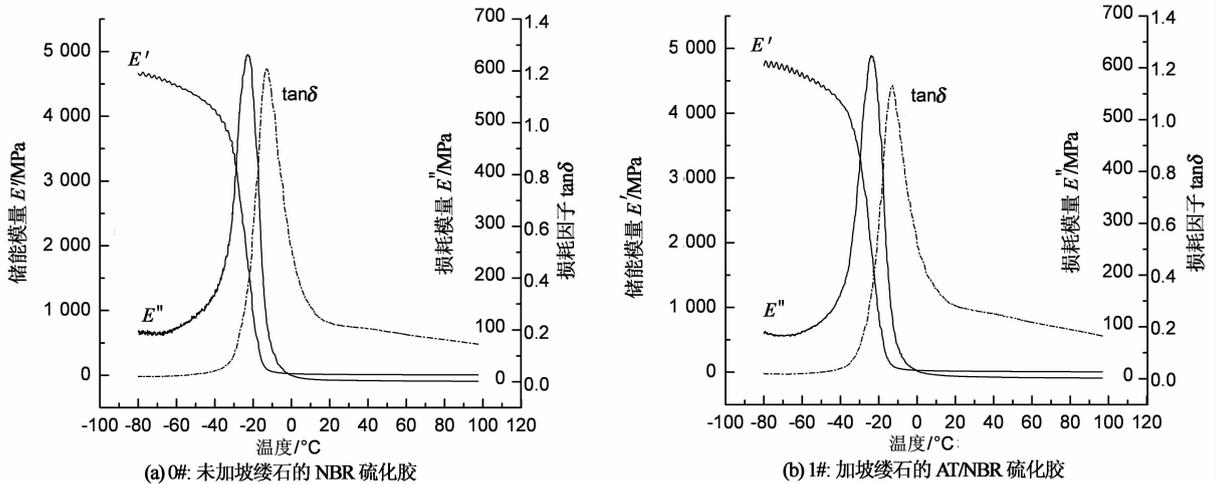
NBR 与 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件动态储能模量的对比如图 4 所示。相对于 NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件,AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的初始储能模量较大,说明 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的交联点密度相对比较均匀<sup>[13]</sup>,其工艺性能得到改善。

NBR 与 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件损耗因子的对比如图 5 所示。通过  $\tan \delta - T$  曲线对比,0 °C 时 NBR, AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的损耗因子  $\tan \delta$  差异很小,可看作近似相等,即两者湿滑能力相当。在轴承 0~60 °C 正常工作温度的范围内,AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的损耗因子较大,这有助于提高轴承减振降噪的能力。

#### 2.1.4 两种轴承试件的水润滑摩擦磨损试验

NBR, AT/NBR 轴承试件的水润滑摩擦磨损试验结果如图 6 所示。

图 6(a)(b)为轴承试件的摩擦噪声测试结果。启动后,轴承试件声压值随转速增加而增加,在 800 r/min 达到最大,之后开始减小。



(a) 0#: 未加坡缕石的 NBR 硫化胶

(b) 1#: 加坡缕石的 AT/NBR 硫化胶

图 3 NBR 与 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的动态力学性能

Fig. 3 Dynamic properties of NBR and AT/NBR rubber-liner vulcanizate samples

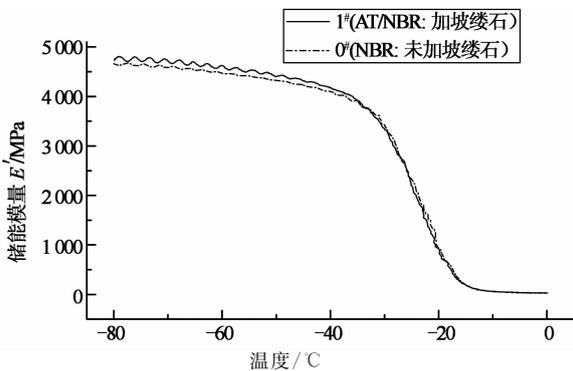


图 4 NBR 与 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件动态储能模量的对比

Fig. 4 Storage modulus comparison of NBR and AT/NBR rubber-liner vulcanizate samples

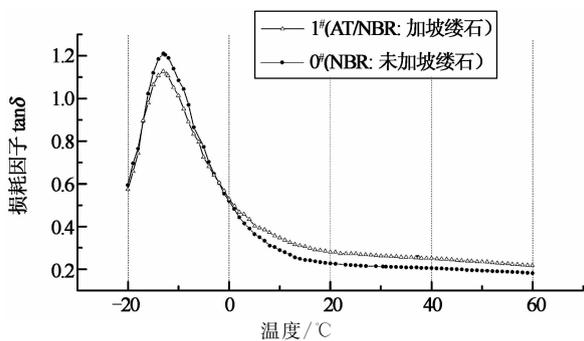
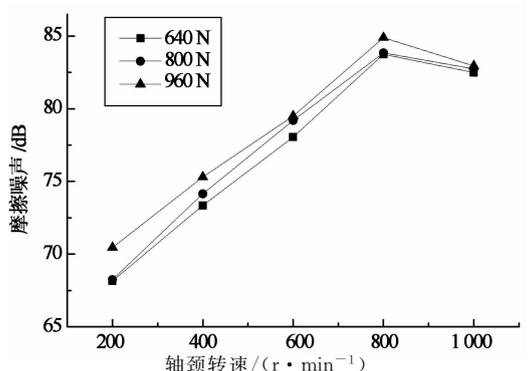


图 5 NBR 与 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件损耗因子的对比

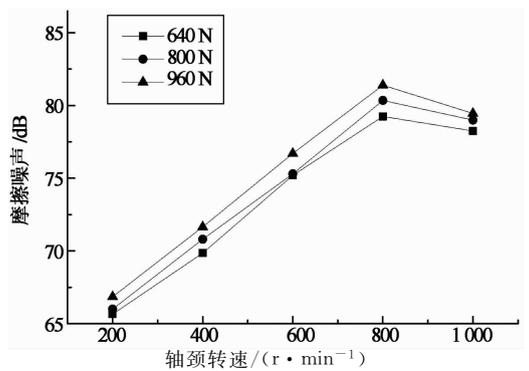
Fig. 5 Loss factor comparison of NBR and AT/NBR rubber-liner vulcanizate sample

整体上,各工况 AT/NBR 轴承试件的摩擦噪声声压值小于 NBR 轴承试件的摩擦噪声声压值。

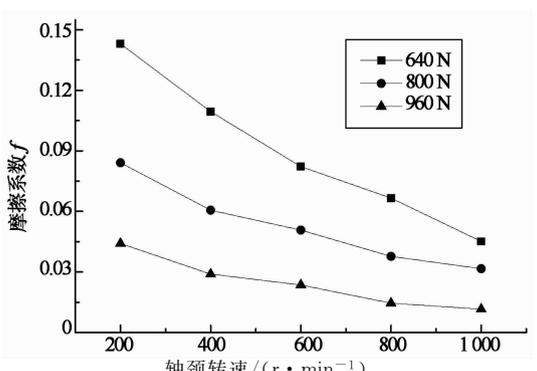
图 6(c)(d)为轴承试件的摩擦系数测试结果。低速时随转速升高摩擦系数明显减小;中间转速时随转速升高,摩擦系数略微减小。任何一个特定速度,摩擦系数均随载荷增大而减小,这主要是因为载



(a) 未加坡缕石的 NBR 轴承



(b) 加坡缕石的 AT/NBR 轴承



(c) 未加坡缕石的 NBR 轴承

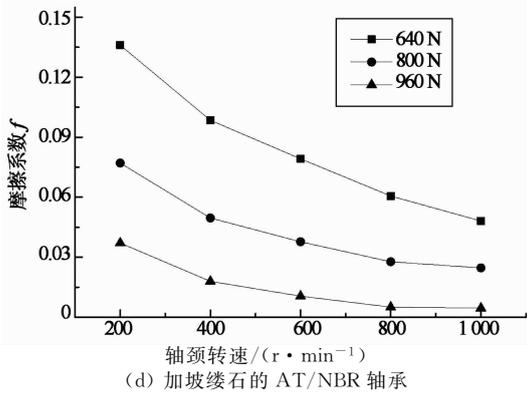


图 6 轴承试件的水润滑摩擦磨损试验结果  
Fig. 6 Friction and wear test results of bearing samples with water lubricating

荷较低,轴承承压较小,橡胶弹性形变很微小,还不能形成连续的润滑水膜,即轴承内部润滑不良.随着载荷增大,橡胶产生弹性形变,逐渐形成弹性流体润滑状态,因此摩擦系数降低.整体上,各工况 AT/NBR 轴承试件的摩擦系数小于 NBR 轴承试件的摩擦系数.

#### 2.1.5 轴承试件的磨损量

轴承试件磨损后减少的质量分别为  $\Delta m_{\text{NBR}} =$

$0.2304 \text{ g}$ ,  $\Delta m_{\text{AT/NBR}} = 0.1728 \text{ g}$ ,相对于 NBR 轴承试件,AT/NBR 轴承试件的磨损量减小.

## 2.2 讨论

### 2.2.1 坡缕石对水润滑轴承摩擦性能的影响

橡胶元件(例如轮胎)摩擦的产生与动态性能有关,在发生摩擦的振动频率  $10^4 \sim 10^8 \text{ Hz}$  范围<sup>[14]</sup>内,因为微观橡胶分子链与接触面的粘附、滞后,产生摩擦力,之后周期重复,粘-滑过程<sup>[15]</sup>的频率即摩擦产生的频率,这是橡胶摩擦过程与动态性能相关的根本原因.用  $1 \text{ Hz}$ ,  $0^\circ\text{C}$  下的  $\tan\delta$  表征橡胶的抗湿滑性能,已作为轮胎胶料中聚合物和填料开发的判据<sup>[16]</sup>.

弹性体的摩擦力由粘附摩擦力和迟滞摩擦力两部分组成<sup>[17-18]</sup>,粘附摩擦力是表面力,在接触面分子尺度范围内发生;迟滞摩擦力是体积力,在体积变形范围内发生,由弹性体大的变形产生.摩擦力与弹性体的  $\tan\delta$  成正比,粘附摩擦力随硬度增加而减小<sup>[18]</sup>.

本文所用的水润滑橡胶合金轴承是径向滑动轴承;其横截面水膜形成和运动的规律如图 7 所示,轴承逆时针转动, $O$  为轴承中心, $O'$  为轴颈中心, $e$  为轴颈偏心距.

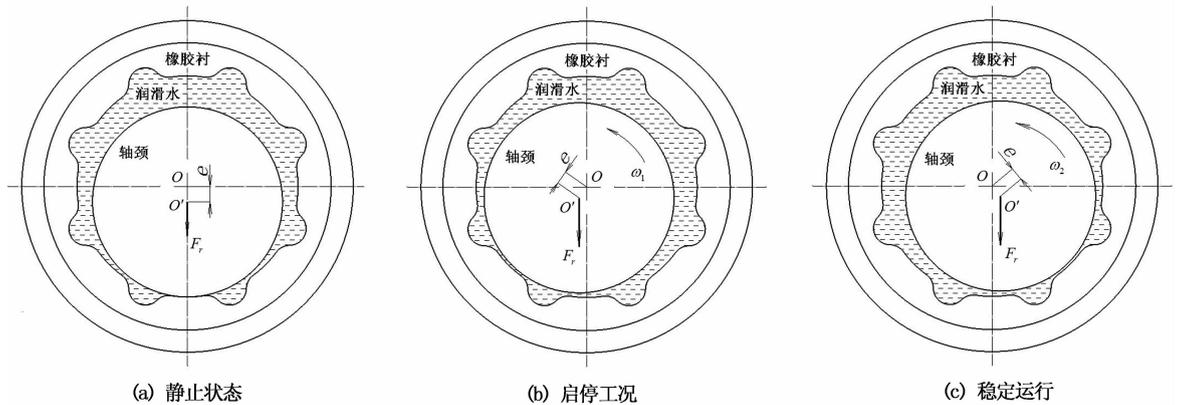


图 7 轴承运转工况的水润滑状态

Fig. 7 Water-lubricated stage in running conditions of the bearing

水润滑轴承的承载原理:轴承橡胶轴瓦(橡胶衬)、轴颈摩擦副之间形成楔形水隙,粘性剪切力使水隙形成径向速度梯度,整个间隙腔内的润滑水膜产生流体动压,与其自重、外载相平衡,形成流体动压润滑.与干摩擦不同,湿摩擦由于水膜润滑的作用,影响因素较复杂.水润滑轴承的摩擦性能,取决于轴承橡胶轴瓦表面增加水膜厚度的能力.其中,重要的影响因素是润滑状态、胶料粗糙度<sup>[19-20]</sup>等.

1) 坡缕石对硬度的影响.水润滑橡胶轴承物理力学性能的重要指标——硬度,反映了轴承橡胶轴瓦的受压变形程度与抗刺穿能力.橡胶轴瓦的硬度

越大,刚性越强.硬度提高,弹性下降,可以减少迟滞摩擦;但硬度过高容易刺穿水膜.硬度适中的水润滑轴承橡胶轴瓦,摩擦性能较优异.

美国国防部军用标准(船舶)MIL-DTL-17901C (SH)规定,轴承橡胶轴瓦的邵氏硬度为  $65 \sim 75$ .

加坡缕石后,AT/NBR 轴承橡胶轴瓦的邵氏硬度由 72 增加到 74(参见表 1).

2) 坡缕石对轴承橡胶轴瓦摩擦系数的影响.胶料的摩擦是粘附摩擦与迟滞摩擦的总和.AT/NBR 轴承橡胶轴瓦胶料试件,硬度提高,弹性下降,迟滞摩擦减小.相对于 AT/NBR 轴承橡胶轴瓦胶料试

件, NBR 轴承橡胶轴瓦胶料试件的拉伸强度较小, 橡胶-填料的界面结合力较低, 摩擦过程中容易脱落、形成凹陷, 使胶料表面粗糙度增加, 导致粘附摩擦增大. 相对于 NBR 轴承橡胶轴瓦胶料试件, AT/NBR 轴承橡胶轴瓦胶料试件的迟滞摩擦、粘附摩擦均较小, 所以 AT/NBR 轴承试件的摩擦系数小于 NBR 轴承试件的摩擦系数.

### 2.2.2 坡缕石对水润滑轴承橡胶轴瓦耐磨损性能的影响

1) 弹流润滑状态. 在轴承水润滑工况的稳定运行阶段, 因为水膜传递载荷, 橡胶轴瓦表面承受交变应力, 两表面不直接接触(存在弹流动压水膜), 会发生疲劳磨损——在周期性载荷、粘着作用相当小的情况下产生, 是一种非常缓慢、不可忽视的磨损. 疲劳磨损有一个过程, 而且其疲劳过程只局限在薄的表层内, 某应力值下经过多次循环才发生. 橡胶轴瓦摩擦表面的微凸体应力场周期变化, 循环交变接触应力周期作用在摩擦表面, 接触表层多次变形而萌生裂纹, 裂纹逐渐扩展直至引起材料脱落, 使材料表面疲劳, 产生滑动(接触)疲劳磨损. 橡胶疲劳磨损是在给定条件下橡胶表层破坏并脱离基体的变形次数, 也是应力状态的函数; 随着法向载荷的增加、抗拉强度的下降以及动态疲劳特性指数的减小, 疲劳磨损增大<sup>[21]</sup>.

相对于 NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件, AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的拉伸强度、韧性增加, 有利于改善轴承橡胶轴瓦的耐疲劳磨损能力. 本试验条件下, 相对于 NBR 轴承试件, 稳定运行情况下 AT/NBR 轴承试件的磨损量减小, 即 AT/NBR 轴承试件的水润滑耐磨性能得到改善.

2) 边界润滑及干摩擦状态. 在低速、重载、启停等特殊工况下, 水润滑轴承处于边界润滑状态, 甚至会发生橡胶轴瓦与轴颈直接接触的干摩擦, 导致橡胶轴瓦的严重磨损. 胶轮与标准砂轮干摩擦对磨的阿克隆磨耗量, 可以反映轴承橡胶轴瓦在干摩擦、磨粒磨损条件下的耐磨性能. AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的阿克隆磨耗量减小, 即 AT/NBR 轴承试件在干摩擦、磨粒磨损条件下的耐磨性能有所提高.

### 2.2.3 坡缕石对橡胶轴瓦物理力学等性能的影响

加入改性纳米坡缕石粉体的 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件, 其物理力学等性能提高, 这是因为:

1) 填料增强橡胶的三要素是“填料的粒径、结构、表面性质”, 如果纳米填料颗粒在橡胶基体中达到纳米级分散, 即使不添加任何改性剂, 其小尺寸效应和界面效应, 也会产生优异的增强效果. 坡缕石是一种天然无机纳米材料, 具有流变性、催化性和热稳定性等独特的性

能<sup>[4,22]</sup>, 比表面大、表面活性高, 纳米棒晶通常容易团聚<sup>[23]</sup>; 另一方面, 其表面含大量极性羟基-亲水基团, 易吸附水分子, 与非极性、憎水有机高聚物的亲和性相当差; 所以在一些橡胶、塑料中, 坡缕石达不到很好的补强效果, 制得的产品理化性能不好, 通常只能作惰性填料<sup>[24-25]</sup>. 可用物理化学、机械等方法对粉体表面进行处理, 改变其润湿性, 改善其在高聚物基体中的分散、与基体的结合力<sup>[26]</sup>. 采用简单有效的工艺技术, 将坡缕石解离、表面有机化改性, 使之与橡胶基体良好浸润、均匀分散, 增加补强的效果, 提高复合材料性能又降低成本<sup>[27]</sup>.

2) NBR 复合材料的性能取决于 AT 粉体的分散、AT 粉体与基体界面的结合. AT 粉体分散性越好(颗粒分布均匀且大小精细), 界面结合越强, 复合材料性能越优异; 反之, 若 AT 粉体分散性差、界面结合弱, 橡胶基体难以传递所受力给刚性填料, 较高形变下界面会发生相对滑移. 因此, 本文用硅烷偶联剂 KH-550 作为表面改性剂, 通过同时有 2 种以上相异反应性基团的有机硅化物——硅烷偶联剂, 在无机物、有机物界面间架起“分子桥”, 连接 2 种性质迥异的材料, 从而提高无机-有机相的结合强度, 改善橡胶复合材料的性能. 具有特殊结构的低分子硅烷偶联剂, 通式为  $RSiX_3$ , 式中 R 代表与聚合物分子有亲和力或反应能力的活性官能团, X 代表能够水解的烷氧基<sup>[26]</sup>. 进行偶联时 X 基水解形成硅醇, 然后与 AT 粉体颗粒表面的羟基反应, 形成氢键并缩合为  $-SiO-M$  共价键(M 表示 AT 颗粒表面); 同时 KH-550 各分子的硅醇相互齐聚、缔合, 形成网状结构的膜覆盖在 AT 颗粒表面, 使其表面有机化; 硅烷取代填料 AT 表面的水分子且包覆颗粒, 使 R 基团朝外, 变得亲油疏水, 并易于被基料润湿; 基料分子插入、隔开填料 AT 的颗粒, 使其分散稳定并防止结块, 降低了填料 AT 与 NBR 基体间的结构化作用.

另外, 硅烷偶联剂 KH-550 小分子通过化学作用吸附在 AT 单晶表面, 削弱单晶自聚力, 降低表面能, 提高与胶料的亲合, 混合、剪切过程中便于 AT 充分解离, 提高其分散性; 另一端的官能团与橡胶反应, 增强填料-橡胶基界面的化学键合, 阻止纳米纤维再聚集. 而且, KH-550 带有氨基, 胶料采用硫磺硫化时, 活泼的氨基参与硫化反应、牢固界面作用, 利于基体传递载荷给刚性无机填料, 充分发挥填料的增强作用.

3) 实验中采取二段混炼法、增加薄通次数、延长贮存时间等系列工艺措施, 降低 NBR 分子链、提高 NBR 分子活性, 使纳米坡缕石纤维结构在橡胶中取向<sup>[27-28]</sup>排列.

### 3 结 论

1) 纳米坡缕石粉体经过硅烷偶联剂 KH-550 表面改性,加入 NBR 制备出的 AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件,工艺性能改善,综合力学性能提高. AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件的抗拉强度、韧性增加,有助于提高轴承试件水润滑工况的耐磨损性能.

2) NBR, AT/NBR 橡胶轴瓦硫化胶试件 0 °C 时的损耗因子  $\tan\delta$  基本相等,两者的湿滑能力相当.

3) 轴承试件摩擦磨损试验结果表明,相对于 NBR 轴承试件,AT/NBR 轴承试件的水润滑摩擦噪声、摩擦系数和磨损量减小. AT/NBR 轴承试件的性能指标有所提高,并达到了美国国防部军用标准(船舶) MIL-DTL-17901C(SH) 的规定.

### 参考文献

- [1] 吴仁荣,林志强,吴书朗. 泵用水润滑轴承的研发和应用[J]. 水泵技术,2012(1): 1-7.  
WU Ren-rong, LIN Zhi-qiang, WU Shu-lang. Research development and application of water lubricated bearing used for pump[J]. Pump Technology, 2012(1): 1-7. (In Chinese)
- [2] 段芳莉. 橡胶轴承的水润滑机理研究[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2002: 73-74.  
DUAN Fang-li. Study on water lubrication mechanism of rubber bearings [D]. Chongqing: College of Mechanical Engineering, Chongqing University, 2002: 73-74. (In Chinese)
- [3] 孟季茹,赵磊,梁国正,等. 无机晶须在聚合物中的应用[J]. 化工新型材料, 2001, 29(12): 1-6.  
MENG Ji-ru, ZHAO Lei, LIANG Guo-zheng, et al. The applications of inorganic whiskers in polymers[J]. New Chemical Materials, 2001, 29(12): 1-6. (In Chinese)
- [4] 郑自立,宋绵新,易发成,等. 中国坡缕石[M]. 北京:地质出版社, 1997: 107-108.  
ZHENG Zi-li, SONG Mian-xin, YI Fa-cheng, et al. Palygorskite in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 107-108. (In Chinese)
- [5] 张立群. 橡胶的纳米增强技术与理论[C]//何晓玫. 2004 年国际橡胶会议论文集(A). 北京:中国化工学会, 2004: 57-66.  
ZHANG Li-qun. The theory and technology of rubber reinforcement [C]//Edited by HE Xiao-mei. 2004 International Rubber Conference Collections(A). Beijing: Chemical Industry and Engineering Society of China, 2004: 57-66. (In Chinese)
- [6] 王益庆,张立群,张慧峰,等. 凹凸棒石/橡胶纳米复合材料结构和性能研究[J]. 北京化工大学学报, 1999, 26(3): 25-29.  
WANG Yi-qing, ZHANG Li-qun, ZHANG Hui-feng, et al. Study on the structure and property of attapulgite/rubber nano-composites[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 1999, 26(3): 25-29. (In Chinese)
- [7] 胡志孟,赖世全,李同生,等. 凹凸棒石/丁腈橡胶纳米复合材料的制备与性能[J]. 弹性体, 2004, 14(3): 39-42.  
HU Zhi-meng, LAI Shi-quan, LI Tong-sheng, et al. Study on preparation and properties of the composites of NBR/attapulgite hybrids [J]. China Elastomerics, 2004, 14(3): 39-42. (In Chinese)
- [8] 尹芳华,姚超,张国庆,等. 纳米 AT/NBR 复合材料的制备与研究[J]. 化工新型材料, 2008, 36(12): 30-32.  
YIN Fang-hua, YAO Chao, ZHANG Guo-qing, et al. Study on preparation of nano-attapulgite/NBR composite[J]. New Chemical Materials, 2008, 36(12): 30-32. (In Chinese)
- [9] 尹慧,强颖怀,陈辉. 凹凸棒土/丁腈橡胶纳米复合材料性能研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2011(4): 24-32.  
YIN Hui, QIANG Ying-huai, CHEN Hui. Study on preparation and properties of NBR/AT nanocomposites[J]. China Non-Metallic Min-

- erals Industry, 2011(4): 24-32. (In Chinese)
- [10] 李湘洲,钱伟,吴志平,等. 硅烷偶联剂改性茶皂素膨胀阻燃剂及涂料应用[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2014, 41(2): 119-124.  
LI Xiang-zhou, QIAN Wei, WU Zhi-ping, et al. Silane coupling agent modified tea saponin intumescent flame retardants and its application in coatings[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(2): 119-124. (In Chinese)
- [11] 余江波. 基于资源节约与环境友好的高性能水润滑轴承关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2006: 69.  
YU Jiang-bo. Key technology study of resource-saving and environmental friendly high performance water lubricated bearings[D]. Chongqing: College of Mechanical Engineering, Chongqing University, 2006: 69. (In Chinese)
- [12] HESS W E. Elastomer blend properties-influence of carbon black type and location[J]. Rubber Chem Technol, 1977, 50(2): 301-326.
- [13] MEDALIA A I, LAUBE S G. Influence of carbon black surface properties and morphology on hysteresis of rubber vulcanizates[J]. Rubber Chem Technol, 1978, 51(1): 89-109.
- [14] PAN X D, KELLEY E D, HAYES M W. Bulk viscoelastic contribution to the wet-sliding friction of rubber compounds[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2003, 41(8): 757-771.
- [15] HEINRICH G, KLUPPEL M. Rubber friction, tread deformation and tire traction[J]. Wear, 2008, 265(7/8): 1052-1060.
- [16] 王梦蛟. 聚合物填料和填料相互作用对填充硫化胶动态力学性能的影响[J]. 轮胎工业, 2000, 20(10): 601-605.  
WANG Meng-jiao. Effect of polymer-filler and filler-filler interactions on dynamic properties of filled vulcanizates[J]. Tire Industry, 2000, 20(10): 601-605. (In Chinese)
- [17] MOORE D F. The friction and wear in rubber and tyres[J]. Wear, 1980, 61(2): 273-282.
- [18] MOORE D F. Principles and applications of tribology[M]. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1975: 4.
- [19] PINNINGTON R J. Rubber friction on rough and smooth surfaces [J]. Wear, 2009, 267(9/10): 1653-1664.
- [20] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics [J]. Chem Phys, 2001, 8(115): 3840-3861.
- [21] 张嗣伟. 橡胶磨损原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1998: 128-130.  
ZHANG Si-wei. Principle of rubber wear[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 128-130. (In Chinese)
- [22] YAN Wen-chang, LIU Dong, TAN Dao-yong, et al. FTIR spectroscopy study of the structure changes of palygorskite under heating[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2012, 97(11): 1052-1057.
- [23] 钱运华,金叶玲,陈振国. 凹凸棒土填充硬质聚氯乙烯塑料[J]. 塑料, 1998, 27(2): 37-39.  
QIAN Yun-hua, JIN Ye-ling, CHEN Zhen-guo. Attapulgite filled rigid PVC plastics[J]. Plastics, 1998, 27(2): 37-39. (In Chinese)
- [24] 沈钟,褚翠英,邵长生,等. 凹凸棒土表面的有机化改性及其在橡胶中的应用[J]. 化学工程师, 1996(2): 3-5.  
SHEN Zhong, CHU Cui-ying, SHAO Chang-sheng, et al. Surface organic modification of attapulgite and its application in rubber[J]. Chemical Engineer, 1996(2): 3-5. (In Chinese)
- [25] 金叶玲. 凹凸棒石粘土的性能及其在聚氨酯革中的应用[D]. 南京: 南京工业大学化学化工学院, 2004: 14-18.  
JIN Ye-lin. Performance of attapulgite and its application in polyurethane leather[D]. Nanjing: College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, 2004: 14-18. (In Chinese)
- [26] 郑水林. 粉体表面改性[M]. 2 版. 北京:中国建材工业出版社, 2003: 1-2, 79.  
ZHENG Shui-lin. Surface modification of powder[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Materials Press, 2003: 1-2, 79. (In Chinese)
- [27] 梁文利. 凹凸棒土(AT)增强橡胶复合材料的制备及其结构与性能研究[D]. 北京:北京化工大学材料科学与工程学院, 2004: 26, 79-83.  
LIANG Wen-li. Preparation, structure and properties of attapulgite reinforced rubber composites[D]. Beijing: College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2004: 26, 79-83.
- [28] 金日光. 高分子物理[M]. 3 版. 北京:化学工业出版社, 2007: 62-66.  
JIN Ri-guang. Polymer physics[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 62-66. (In Chinese)