

关于精密陀螺轴承的表面润湿性的研究

刘承烈 贾林贤 张显江 王淑芹 叶慧珠

摘要 本文首先论述了精密陀螺轴承的表面润湿性对形成弹性流体润滑有重要作用，所以应设法提高轴承的表面能，改善轴承表面润湿性，使轴承保证流体润滑状态，有助于延长轴承寿命。

本文对润湿性好的轴承表面从各方面深入进行了试验研究探讨。试验结果表明润湿性好的试片及轴承摩擦系数低，耐磨性好。润湿性好的轴承容易形成油膜而在噪音和振动上没有表现出特殊情况。对润湿性好的轴承表面结构通过金相试验、软x射线光电能谱议，气相色谱法等试验进行了深入研究。结果认为用磷酸三甲酚酯处理后得到润湿性好的表面形成 $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ·对流体润滑很有利。因此认为采用磷酸三甲酚酯处理轴承表面可以改善轴承表面润湿性，有助于延长轴承寿命。

一、引 论

精密陀螺轴承一般是转数高、精度高、摩擦力矩较小的滚珠轴承。润滑油是一次加入而且不能多，尤其卫星姿态控制用精密陀螺轴承要连续工作几年以上，但既不能更换轴承又不能从外部再补充供应润滑油，为保持轴承的弹性流体润滑状态，首先考虑的要选用性能好的润滑油和保持架并采取密封措施。当然理想的润滑油应具有表面张力小而吸附力强的性质，这样在轴承滚道表面上就容易形成油膜而又不易被挤破。对一般润滑油来讲，这两个性质是矛盾的，粘度小的润滑油表面张力小但吸附力弱，因而容易形成油膜，但也容易被挤破；粘性大的润滑油则相反，吸附力强但表面张力大，因而油膜虽不易破坏，但不易形成。在润滑油中添加少量的某些添加剂可以改善润滑油的性质。但只从润滑油和保持架及密封方面来考虑改善润滑性能这是有限的。所以也应该从轴承表面本身方面来考虑润滑性能。当然使轴承的表面光洁度好些能使油膜参数 λ 增大，因为 $\lambda = \frac{h}{\sigma}$ （ h ：油膜厚度； σ ：表面光洁度）。如能使油膜参数 λ 保证在3至4之间时则可保持弹性流体润滑状态。除改善轴承表面光洁度之外也应考虑其他改善轴承表面润湿性的办法。

轴承表面润湿性实际上是个表面能的问题。固体表面能大时则吸附力强，清净表面容易受周围气体污染，容易吸附油使其润湿性好。因此轴承表面能愈大，轴承的润湿性愈好，位于液体表面中的每一个分子比起液体内部分子具有较大的势能，表面中全部分子所具有的额外势能的总和叫做表面能。由于表面能比内部能量大所以液体表面分子有从表面进入内部的趋势，因而液体要尽可能地缩小它的表面面积，这种收缩力则称为表面张力。如此，表面能和表面张力的概念是相关的，用其任一个术语来表示都可以，只是表示表面能用焦/厘米²，表示表面张力是用达因/厘米的单位而已。固体的表面能的绝对值是难以确定的，所以固体的表面能，可通过与液体接触时其形状的改变能推断出来。当固体表面上的液体、气体三者的表面能平衡时则 $r_{SV} - r_{SL} = r_{LV} \cos \theta$ 式中 θ 为固——液界面与液体表面切线之

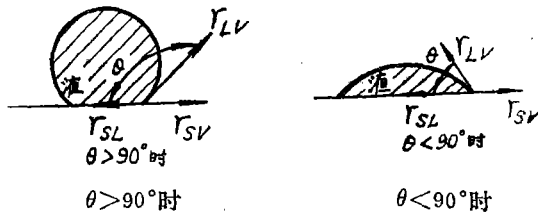


图1 固—液界面接触时的润湿角

r_{SL} 为固—液界面间之表面能
 r_{SV} 为固—气界面间之表面能
 r_{LV} 为气—液界面间之表面能

夹角，有人称它为接触角。但这容易和常用滚动轴承本身的接触角的概念混淆，而且实际它是表示润湿性指标的概念，所以我们称之为润湿角。如图1所示。

当 $\theta < 90^\circ$ 时，能产生润湿， $\theta > 90^\circ$ 时，不能润湿；当 $\theta = 0$ 时，则完全润湿。因此，可用固—液相的润湿角 θ 的大小表示该液体对固体表面润湿的程度。液体的表面能比固体的表面能小就可产生润湿，而且其差值越大，就越容易润湿。因此设法提高轴承的表

面对保证轴承形成油膜，很好润滑是个重要课题。有鉴于此，我们则用磷酸三甲酚酯处理轴承表面等办法，来提高其表面能，改善润湿性。研究试验结果表明用磷酸三甲酚酯处理的轴承表面确实是润湿性好，即达到了提高轴承的表面能的目的。我们还对润湿性好的表面摩擦磨损性能、油膜形成情况、表面结构，及其噪音振动等基本问题进行了深入研究。

二、试验结果及其分析讨论

1. 润湿性试验结果

润湿性的评定我们用了两种方法。第一种方法是将润滑油滴在试片上，在30秒的短时间内利用工具显微镜测出，油滴在试片表面上的润湿直径，以此评定润湿性。第二种方法是用润湿角测量仪，测量润湿角。我们已设计制造一种润湿角测量仪如图2。

用第一种方法的测定结果如表1：

表1 润滑油滴在试片上的润湿直径（单位毫米）

处理情况	试片编号					平均值
	1	2	3	4	5	
未处理	6.75	6.20	6.60	6.40	6.80	6.48
磷化处理	6.71	6.96	7.50	6.42	6.80	6.86
磷酸三甲酚酯处理	7.45	7.45	7.40	7.20	7.00	7.30

用第二种方法测定润湿角的结果如表2：

表2 润滑油滴在试片上润湿角

处理情况	试样编号			平均值
	1	2	3	
未处理	37°	37°	37°	37°
磷化处理	20°	19°	20°	20°
磷酸三甲酚酯处理	18°	10°	18°	18°

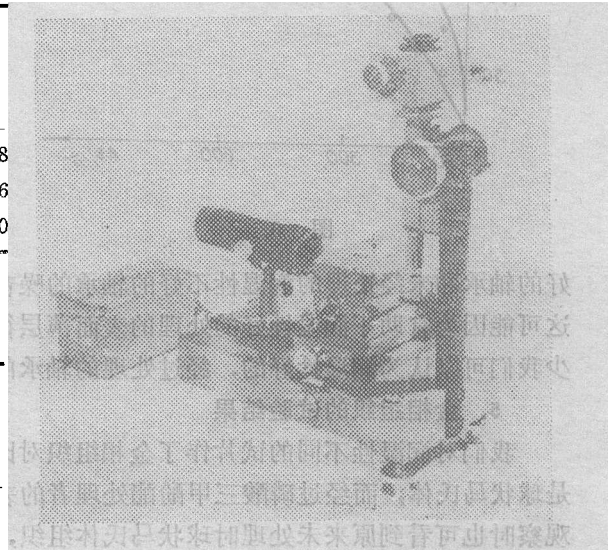


图2 润湿角测量仪

从上述两种方法的测定结果可以看到，未处理的试片润湿直径小并且润湿角大，也就标志着润湿性不如磷化处理或磷酸三甲酚酯处理的好。而且磷酸三甲酚酯处理的润湿性为最

好。这两种方法的测定结果是一致的，因此，这两种评定润湿性的方法是可行的。从试验结果可清楚地看到用磷酸三甲酚酯处理后的表面润湿性是很好的，也说明表面能可以增大很多。因此，我们设想的从轴承表面方面来提高表面能，改善表面润湿性以保证弹性流体润滑状态，这是很有效的办法，是可行的。

2. 摩擦磨损的试验结果

摩擦磨损试验我们在MM-200型摩擦磨损试验机上用 $\phi 28$ 毫米的试片试验的，其结果如表3：

未经处理者其摩擦系数比经过磷酸三甲酚酯处理的要大，其磨损也比经过处理者快。这个试验结果与前面润湿性的试验结果是一致的。即润湿性好者摩擦系数也小，耐磨性也好。

经过磷酸三甲酚酯处理的轴承和未经磷酸三甲酚酯处理的轴承的摩擦力矩方面，我们都得到1分40秒相同的惰转停止时间的试验结果，没有看出差别。从理论上分析来看本应有差别的，但为什么没有看到差别，我们分析认为是保持架的摩擦大大超过球与滚道的摩擦，所以显示不出由于磷酸三甲酚酯处理的表面的降低摩擦系数的情况。

3. 油膜形成的试验结果

用未经处理的轴承和经过磷酸三甲酚酯处理的表面润湿性好的轴承，作了油膜形成情况对比试验，其试验结果如图3所示。其纵座标为电压，如果未形成油膜时则构成短路电压是零，充分形成弹性流体润滑时电压则达到一定程度。显然经过处理的表面润湿性好的轴承在420转/分即7秒时就能形成油膜，未经处理的轴承则需要660转/分即11秒时才能形成油膜。如此明显地看出润湿性好的轴承很容易形成油膜。

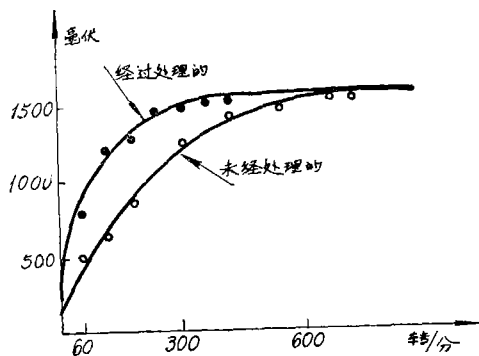


图 3

好的轴承和未经处理的润湿性不好的轴承的噪音与振动基本上是一样的，没有表现出差异。这可能因为有助于润湿性好的处理的表面薄层很薄，不致于对噪音、振动有影响，因此，至少我们可以认为润湿性好的，经过处理的轴承的噪音不比未处理者差，这样可以放心使用。

5. 金相组织的试验结果

我们对润湿性不同的试片作了金相组织对比。从照片可以看到未经处理者，其金相组织是球状马氏体，而经过磷酸三甲酚酯处理者的表面形成一层 $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的膜层，不过仔细观察时也可看到原来未处理时球状马氏体组织，这个膜层是一种拉长的波纹组织，排列是有规则的，如图4、图5。

6. 表面层结构的测定结果

对润湿性好的经过磷酸三甲酚酯处理的试片用软x射线光电能谱仪测定结果如图6

从测定结果的三个曲线可以知道试件表面膜层含有 $\text{Fe}^{(++)}$ 、 P^{+6} 、 O (两种状态)。 O 的两

表 3 试片的摩擦磨损试验结果

处理状态	摩擦系数	耐磨时间
未经处理件	0.14	3秒
经磷酸三甲酚酯处理	0.12	7秒

摩擦磨损数据

4. 噪音与振动试验结果

我们对经过磷酸三甲酚酯处理的轴承进行了噪音对比试验，结果两种情况下的噪音基本上都是43分贝，在振动上也没有表现出差别。看来经过磷酸三甲酚酯处理后润湿性

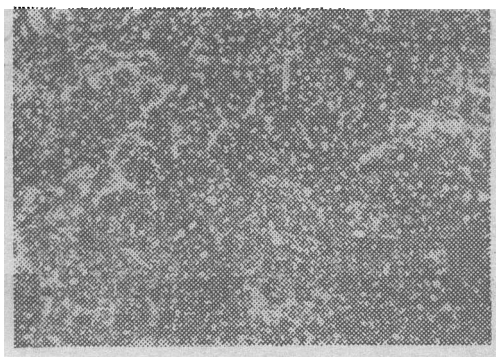


图4 未经处理的金相照片

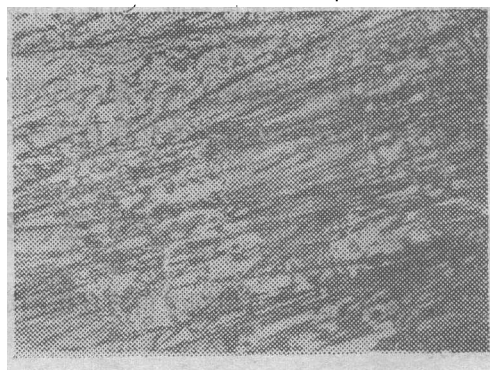


图5 经磷酸三甲酚酯处理的表面

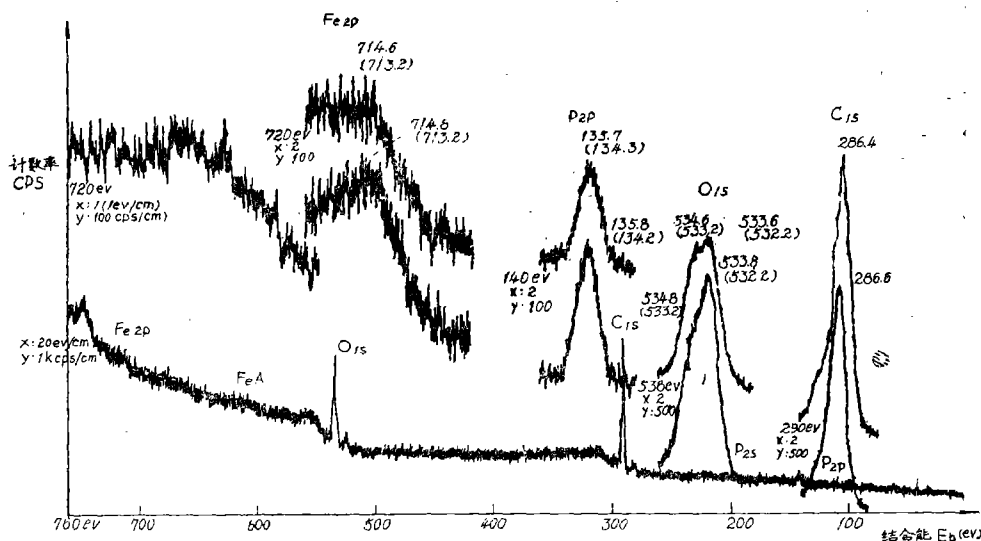


图6 表面膜层含有元素结合能的曲线图

种状态之一是 PO_4 状态，另一种是 H_2O 状态，认为该层物质结构是 $FePO_4 \cdot 2H_2O$ 。

图6下边的曲线是粗扫描时的曲线，发现有元素后再移到上边放大。

图6上边两个相同的放大曲线是测定两个同样材料，同样处理条件的试片的结果。试片1和试片2的测定曲线结果基本上是一致的。

图中碳元素放大曲线是真空泵气室内油挥发的C元素结合能与标准C元素结合能之差，对画出的其他元素结合能进行校正用，有括号的值是校正后的结合能值。用气相色谱法检测结果如下：

从这个测定结果可以知道经过磷三甲酚酯处理的表面确实存在磷酸三甲酚酯，从而表现润湿性好。

7. 分析讨论

上述六项试验结果表明润湿性好的表面层由于形成 $FePO_4 \cdot 2H_2O$ 的薄层并存在着磷酸三甲酚酯之类的物质所以有助于形成弹性

表4 色谱法测定结果

试片	色谱峰保留时间值
No.1	6'41"
No.2	6'40"
No.3	6'41"
磷酸三甲酚酯标准样品	6'42"

流体润滑，可以延长轴承寿命。因此这个磷酸三甲酚酯之类磷化合物只有在摩擦表面的凸起部局部发热的高温部分起反应形成磷化铁而它又与下层构成低熔点合金，一旦融化则流入凹部填平，如此摩擦表面成为很平滑，则消除了局部承受大载荷，从而不会发生高热，对润滑有利更不致于发生两金属体直接接触或焊合的情况。

三、结 论

1. 评定润湿性可用润湿角的直接测定方法和测油滴直径法，这两种方法的测定结果是一致的。
2. 润湿角小即润湿性好，这样的表面的摩擦系数低，耐磨性也好。
3. 经过磷酸三甲酚酯处理润湿性好的轴承在较低转数时即形成油膜，显然润滑性能比较好。
4. 润湿性应列为评价轴承的关键性能之一，应作为检验轴承指标之一。
5. 经过磷酸三甲酚酯处理润湿性好的轴承的噪音与振动和未经处理的润湿性差的轴承的噪音与振动基本上一样没有看到差异。
6. 经过磷酸三甲酚酯处理的轴承表面层结构是 $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 并存在磷酸三甲酚酯之类物质，所以润湿性好。因此采用磷酸三甲酚酯处理轴承表面润湿性好，有助于延长轴承寿命。