

研究论文 (120~128)

镶嵌用固体润滑剂对锡青铜轴承 摩擦学性能影响的研究

陶 江 李同生 李伟麟

(中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室, 兰州)

摘 要: 用端面摩擦试验机考察了几种镶嵌用固体润滑剂及添加剂在常温条件下对锡青铜轴承摩擦磨损性能的影响, 并用X-射线衍射法、俄歇电子能谱法分析了摩擦表面转移膜的化学组成和结合情况。结果表明, 几种固体润滑剂的嵌入均可提高轴承的耐磨性, 并对减小摩擦系数有一定的作用; 摩擦表面固体润滑剂转移膜的形成能够有效地减少摩擦副表面间的粘着现象, 是改善轴承摩擦磨损性能的主要原因。

关键词: 镶嵌用固体润滑剂, 锡青铜轴承, 镶嵌轴承的摩擦学性能, 固体润滑剂转移膜

The Effect of embedded Solid Lubricant on the Tribological Properties of Tin-Bronze Bearings

Tao Jiang Li Tongsheng Li Weilin

(Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute
of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou)

Abstract: The effects of several embedded solid lubricants and additives on the friction and wear properties of tin-bronze bearings under room temperature are examined by using an end-face friction test machine, moreover, the chemical compositions and combinations of transfer film of

1990-05-06收到初稿, 1990-12-06收到修改稿

120

friction surfaces are analysed by X-ray diffraction and Auger electron spectroscopy. The results show that PTFE, MoS₂ and graphite as solid lubricants of tin-bronze bearings can reduce the friction and wear under dry friction. The transfer film of solid lubricant on friction surface can reduce effectively the adhesion of surfaces of friction pairs.

Key words: embedded solid lubricant, tin-bronze bearing, tribological property of embedded bearing, transfer film of solid lubricant

1. 前言

镶嵌轴承材料是一种以嵌入的固体润滑剂润滑减摩和以金属基材支承载荷的自润滑复合材料。常用的金属基材有高强度黄铜、青铜、铸铁和不锈钢等,固体润滑剂可用石墨、二硫化钼(MoS₂)、二硫化钨(WS₂)、聚四氟乙烯(PTFE)、铅和氧化铅等。可以针对不同的使用要求在较大范围内选配金属基材和固体润滑剂,因而它是一类用途相当广泛的轴承材料[1]。杉本等[2]曾报道了不同金属基材对镶嵌轴承摩擦磨损性能的影响,多田[3]还就添加剂与石墨减摩作用的关系作了综述介绍,但有关镶嵌用固体润滑剂对轴承摩擦学性能影响的研究报道却还很少。本文对以石墨、MoS₂、PTFE为主要成分的镶嵌用固体润滑剂和以硫酸钡(BaSO₄)为添加剂[4]的六种配方进行了摩擦磨损性能的考察,并且结合X-射线衍射分析、俄歇电子能谱分析等探讨了它们的润滑作用机理。

2. 试验部分

2.1 摩擦副的选择与试样的制备

2.1.1 固体润滑剂

镶嵌用固体润滑剂的组成如表1所列,制备方法是首先将固体润滑剂与粘结剂按一定的百分比混合均匀,接着用金属模具以150MPa的比负荷将其压制成圆柱状颗粒,最

表1 固体润滑剂的组成

配方	组成				
	石墨	MoS ₂	PTFE	BaSO ₄	酚醛树脂
A 1 (1)	+				+
A 2 (1) (2)	+			+	+
A 3 (1) (3)	+	+			+
B 1 (3)		+			+
C 1 (4)			+		
C 2 (4)	+		+		

(1) 以石墨为主要成分; (2) 以BaSO₄作添加剂[4]; (3) 以MoS₂为主要成分或含有MoS₂; (4) 以PTFE为主要成分。

后进行高温固化。

2.1.2 试样的制备

镶嵌轴承试样的基材是铸造锡青铜(ZQSn5-5-5,以下简称ZQ),毛坯尺寸为 $\phi 46\text{mm} \times \phi 32\text{mm}$,在其上按一定的排列方式钻孔(10— $\phi 5\text{mm}$ 均布),再把制备好的固体润滑剂颗粒用粘结剂嵌入孔中,固化后车削加工摩擦面。

2.1.3 偶件

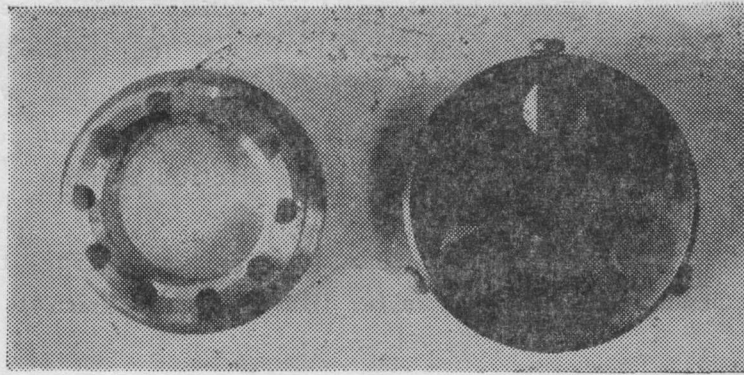
偶件材料为45#钢,淬火处理后的硬度为HRC45~50,摩擦面用400#砂纸单方向打磨,表面粗糙度的算术平均偏差Ra为0.26~0.53 μm 。接触方式为三点端面接触。

试样及其偶件的照片见图1。

2.2 摩擦磨损试验

2.2.1 试验机

用端面滑动摩擦形式的三号试验机进行摩擦磨损试验。为使试样与偶件摩擦面接触



(a) 试样

(b) 偶件

图1 试样及其偶件的照片

良好，将原栓式接触方式改为三点接触，改装后的部分如图2所示。

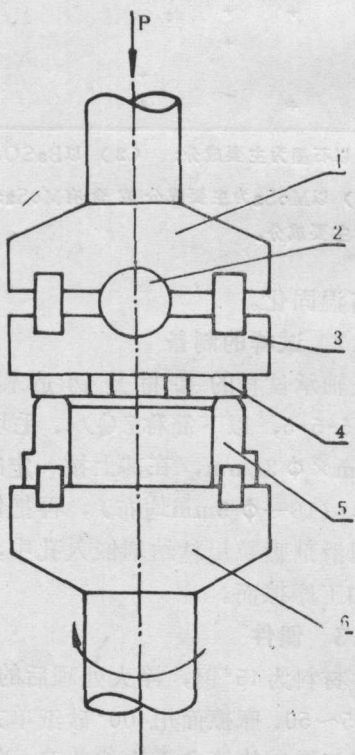


图2 改装后的试验装置简图

- 1—上夹具；2—调整钢球；
- 3—调整垫；4—偶件；
- 5—试样；6—下夹具

2.2.2 试验条件

试样摩擦面尺寸约为 $\phi 42\text{mm} \times \phi 36\text{mm}$ ，偶件摩擦面宽8mm，试验前均用丙酮棉球

擦拭干净。试验在空气中于无油润滑状态下进行，其余试验条件为：比负荷5MPa，滑动速度0.16m/s，相对湿度20~30%，试验温度室温，试验时间8h。用BLR-50拉压传感器接长图记录仪测定摩擦力矩后再算出摩擦系数；用精度为0.001mm的千分尺测量试样的磨损量（本文给出的磨损量均为3次以上结果的平均值）。

2.3 摩擦表面的分析

2.3.1 X-射线衍射分析

用日本理学电机株式会社D/MAX-III B自动X-射线衍射仪分析摩擦表面转移膜的化学组成。

2.3.2 俄歇电子能谱分析

在美国Perkin-Elmer PHI550型多功能电子能谱仪上，采用俄歇电子能谱法分析摩擦表面转移膜对金属基材的结合情况。

3. 结果与讨论

3.1 摩擦磨损试验

3.1.1 摩擦性能

图3为各试样摩擦性能的典型结果。可以看出，固体润滑剂的嵌入对减小锡青铜轴承的摩擦系数起着一定的作用。其中，以PTFE为固体润滑剂主要成分之配方(C1、C2)的摩擦系数比较平稳，而且在PTFE中

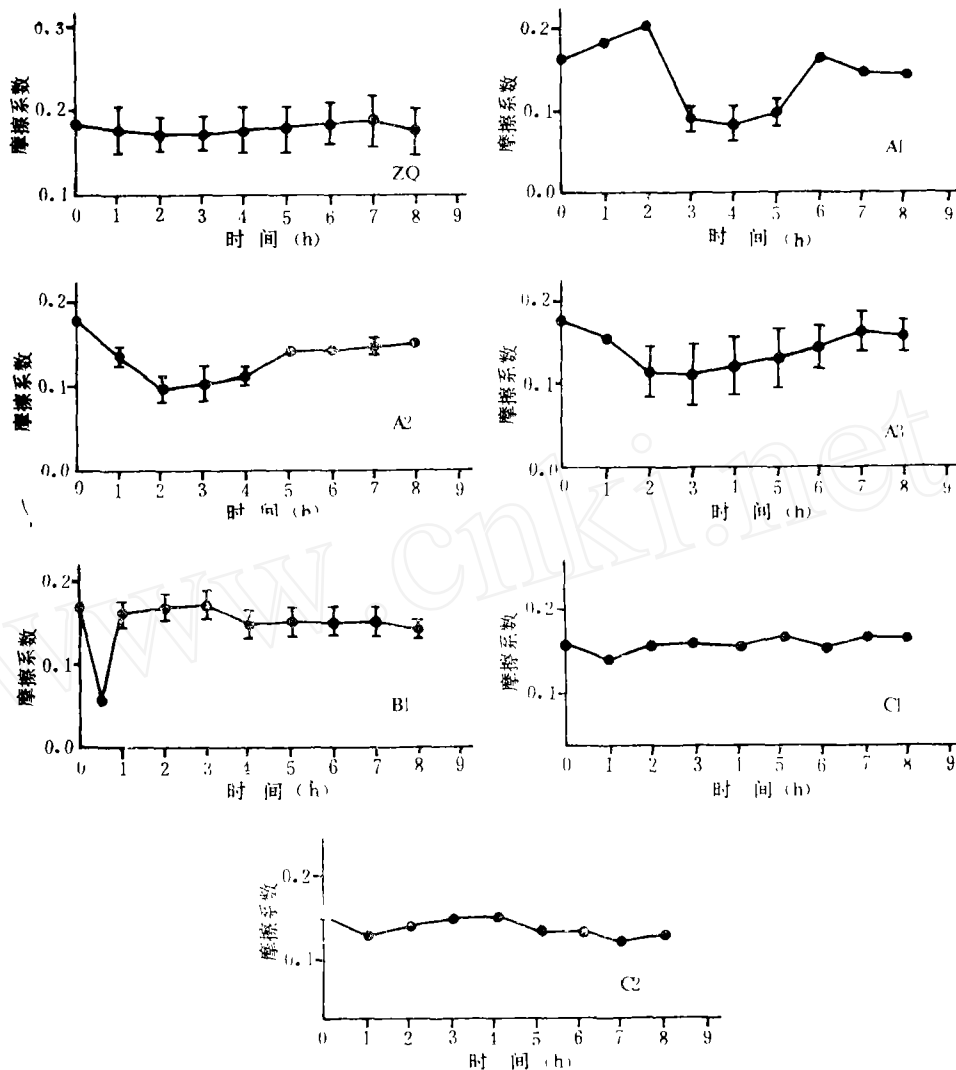


图3 几种轴承的摩擦系数-时间关系曲线

添加少量石墨还有进一步减小摩擦系数的作用。

3.1.2 磨损性能

图4为锡青铜及镶嵌轴承试样的磨损试验结果。可以看出,几种配方之固体润滑剂的嵌入都能够明显地提高轴承的耐磨性,其中以PTFE为主要成分之配方(C1、C2)的耐磨性比锡青铜的高3个数量级,以石墨或 MoS_2 为主要成分之配方(A1、A2、A3、B1)的耐磨性也都比锡青铜的高1个

数量级。就单组分固体润滑剂而言,PTFE(C1)提高锡青铜轴承耐磨性的效果最好, MoS_2 (B1)次之,石墨(A1)最差。对比C1和C2及A1和A3可以看出,将石墨加入PTFE中或将 MoS_2 加入石墨中均有助于提高轴承的耐磨性。A1和A2的结果表明,将 BaSO_4 加入石墨中反而使轴承的耐磨性有所变差,这与文献[4]报道的结果不同,可能是试验材料和条件(如湿度、接触方式)等不同所致。

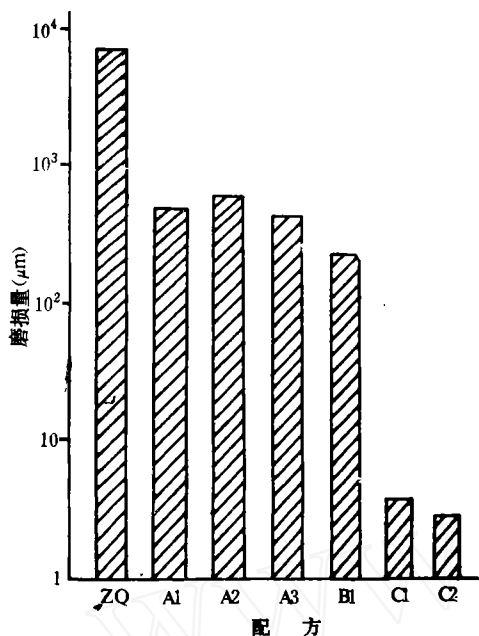


图4 几种轴承的磨损性能比较

3.2 摩擦表面的观测与分析

3.2.1 表面观测

图5为试验后的试样与偶件实物照片。对比ZQ可见，镶嵌试样表面的拉伤及变形均有不同程度的下降，其中C1和C2试样表面的划伤都非常轻微。

用肉眼和读数显微镜观测可以发现，除ZQ外，其余试件的摩擦表面均有黑色物附着，这可能是嵌入的固体润滑剂在摩擦过程中向表面发生转移的结果。B1和A3摩擦表面黑色附着物的分布基本呈连续状态且较均匀，但A1和A2摩擦表面的黑色附着物很少且不连续，表明 MoS_2 较容易在摩擦表面形成连续的转移膜，而石墨则较难，这与西靖则等[4]报道的研究结果完全吻合。用丙酮棉球反复擦拭时发现，C1和C2摩擦表面擦拭下来的黑色物较少，表面附着物也较难被擦拭掉；A1和A2表面擦拭下来的黑色物也不太多，但擦拭后的摩擦面几乎再观测不到黑色附着物；B1和A3表面擦拭下来的黑色物较多，并且还残留着一部分较难被擦拭掉的黑色附着物。这些情况说明，不同固体润

滑剂的转移膜与摩擦表面的结合强度互不相同。

3.2.2 表面分析

3.2.2.1 摩擦表面的化学组成

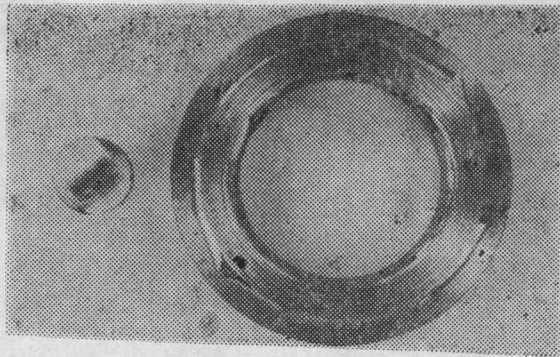
根据摩擦表面出现的黑色附着物判断固体润滑剂转移膜的形成只是一个定性的认识过程，因而又用X-射线衍射法分析了试验后摩擦副表面的化学组成（测试条件：射线 $\text{CuK}\alpha$ 、50kV、150mA、扫描速度 $5^\circ/\text{min}$ ），所得结果分别示于图6和图7。

由图6可以看出，镶嵌试样摩擦表面除有基材Cu的衍射峰外，还有与嵌入固体润滑剂的成分相对应的衍射峰，表明固体润滑剂的所有成分在摩擦过程中都向摩擦表面发生了转移。可以认为，镶嵌轴承耐磨性的提高是固体润滑剂转移膜形成致使摩擦副表面间金属直接接触减少的结果，而几种轴承摩擦磨损性能上的差异则与固体润滑剂转移膜的成分不同有关。另外，C1和C2试样的摩擦表面还出现了 Fe_3O_4 的衍射峰，说明偶件表面也有磨损，而 Fe_3O_4 的存在是否有助于减小轴承的磨损尚需进一步研究。

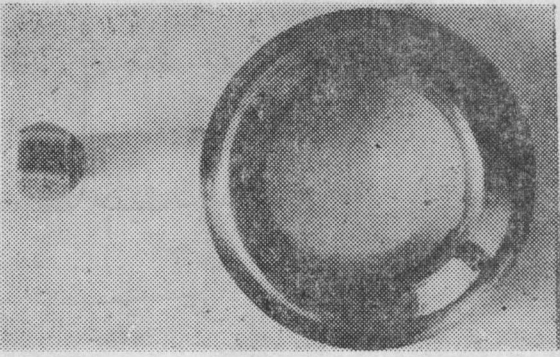
由图7所示偶件摩擦面的衍射谱线可见，与锡青铜及几种耐磨性较差的镶嵌试样配副之偶件的摩擦面都出现了明显的Cu衍射峰，而与耐磨性较好的C1和C2配副之偶件的摩擦面却都没有Cu的衍射峰出现。这表明镶嵌轴承的抗磨性不好是因为未能有效地阻止基材Cu向偶件表面的转移。这种转移必然导致摩擦副表面间出现一定程度的“铜-铜”接触，于是形成了同种金属的对磨，这更容易发生粘着现象，因而试样的磨损更加严重。

3.2.2.2 转移膜与金属基材的结合情况

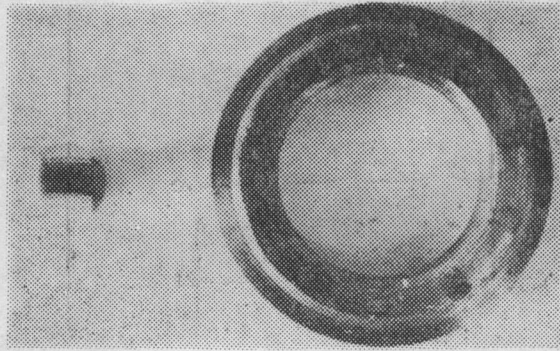
仅用丙酮棉球擦拭摩擦表面只能定性地判断转移膜与金属基材的结合情况，因而又用俄歇电子能谱法考察了转移膜对金属基材的结合力。这种方法的原理是随着 Ar^+ 溅射



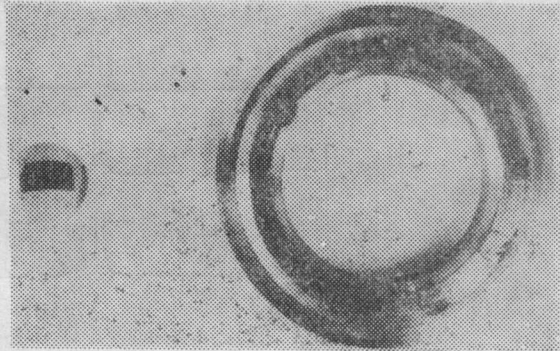
(a) ZQ



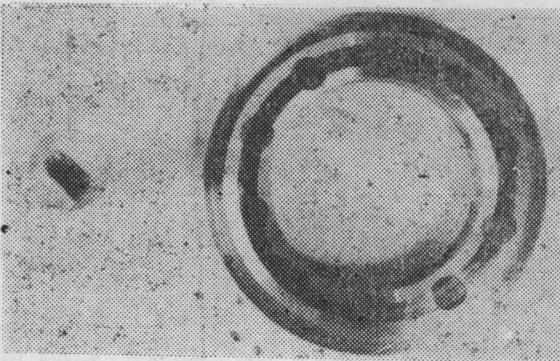
(b) A 1



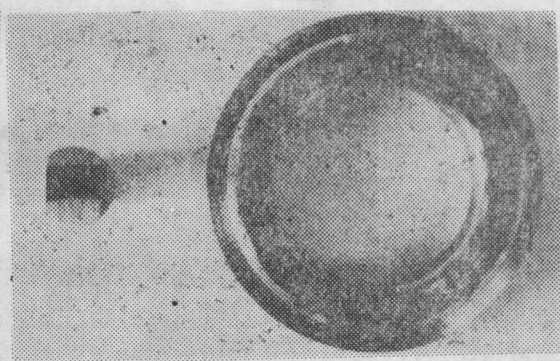
(c) A 2



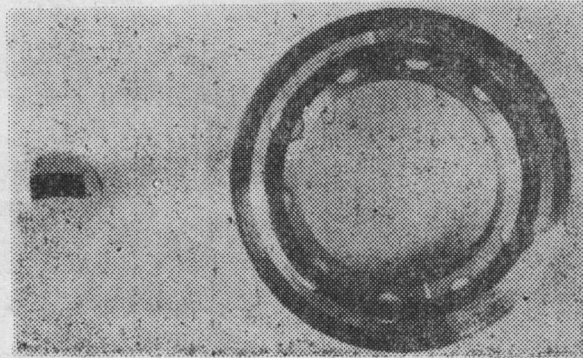
(d) A 3



(e) B 1



(f) C 1



(g) C 2

图5 试验后几种试样与偶件的实物照片

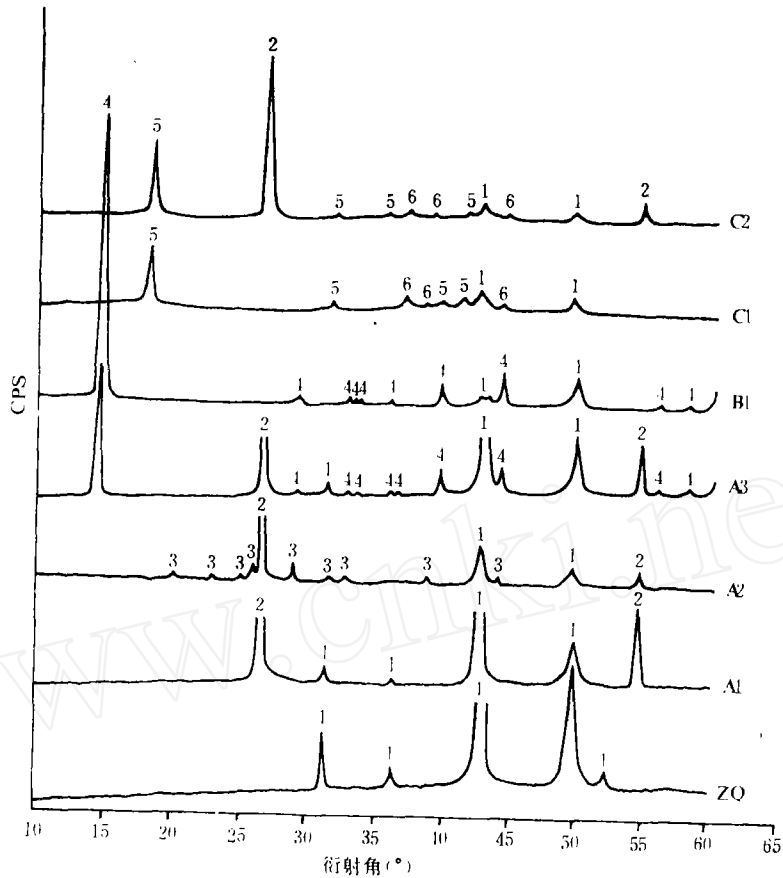


图6 几种试样摩擦面的X-射线衍射谱图

1—Cu; 2—石墨; 3—BaSO₄;
4—MoS₂; 5—PTFE; 6—Fe₃O₄

刻蚀时间的延长,在转移膜被逐渐刻蚀除去的同时,金属基材也逐渐暴露出来。由于能谱可以相应地检测出该过程中原子浓度随时间的变化,通过检测转移膜和金属基材中各种原子的浓度随时间的变化便能定性地表征转移膜的结合情况(文献[5]就曾用这种方法成功地鉴别过MoS₂转移膜与不同金属基材结合的牢固程度)。

在相同的测试条件(氩离子刻蚀:加速电压为试样1kV、偶件4kV,刻蚀面积1×1mm²,俄歇点分析:4kV、10μA)下,对试验后的试样及偶件摩擦表面进行了C、F、Cu原子深度分布(深度用溅射刻蚀时间表示)的剖面分析,结果分别如图8、图9和

图10所示。

由图8可见,3种试样摩擦表面碳原子的浓度顺序是A3>A1>A2,表明MoS₂的加入具有促进石墨向摩擦表面转移和增强石墨与金属基材结合力的作用,而BaSO₄的加入非但没有促进石墨的转移,反而还使石墨固有的结合力遭受削弱。图9所示结果表明,试样C2摩擦表面的F原子浓度比C1摩擦表面的大,因而添加石墨可以促进PTFE向摩擦表面转移。联系摩擦磨损试验结果认为,凡是有助于固体润滑剂向摩擦表面转移的因素,一般都可以使轴承的抗磨性提高。

图10所示为与不同试样对摩的偶件表面Cu的深度分布。可以看出,各偶件表面均有

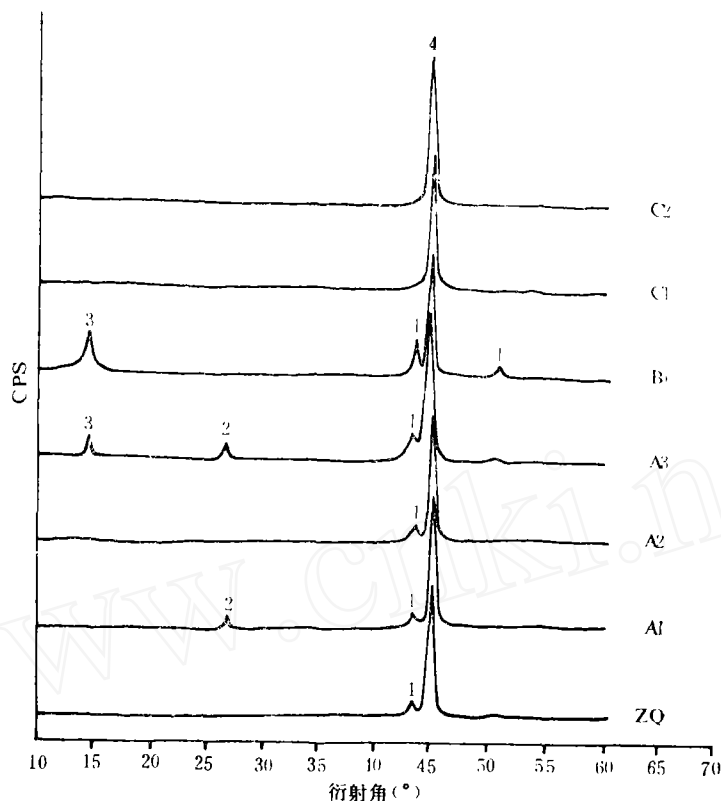


图7 偶件摩擦面的X-射线衍射谱图

1—Cu; 2—石墨; 3—MoS₂; 4—Fe

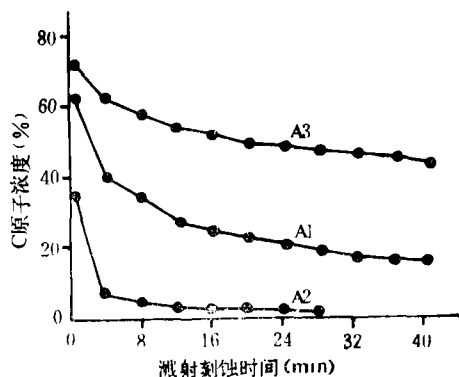


图8 A1、A2和A3试样摩擦表面之C原子的深度分布

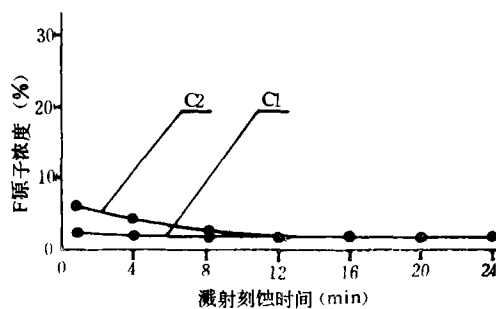


图9 试样C1和C2摩擦表面之F原子的深度分布

Cu的附着,说明摩擦过程中试样基材也向偶件表面发生了转移,因而摩擦副表面间均程度不同地会发生粘着现象。分别与试样C1、C2对摩的偶件表面Cu的原子浓度相对较低,

Cu比较容易被Ar⁺刻蚀除去,证明Cu的附着量和结合力都比较小;分别与试样ZQ、A1、A2、A3、B1对摩的偶件表面Cu的原子浓度都比较高,Cu较难被Ar⁺刻蚀除去,说明Cu

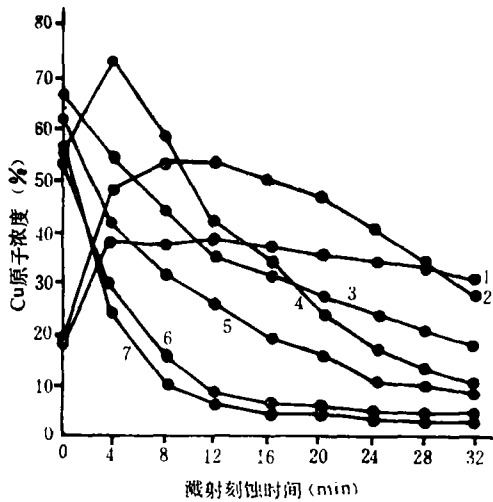


图10 偶件摩擦表面Cu原子的深度分布

对摩试样: 1—A3; 2—B1; 3—ZQ;
4—A2; 5—A1; 6—C1; 7—C2

在这些偶件表面的附着量和结合力都比较大(参见图7)。由Cu被 Ar^+ 刻蚀去除的难易程度可知,其在偶件表面结合力的大小依次为:A3、B1、ZQ、A2、A1、C1、C2。显然,除了含有 MoS_2 的配方(A3、B1)外,上述结果与轴承的磨损量之大小一致。A3和B1的结果也符合Cu在偶件表面的结合力增大磨损加剧的规律。可以认为,固体润滑剂的嵌入效果主要是通过减小摩擦副表面间的粘着来实现的。十分有趣的是,配方A3和B1的偶件表面上Cu的结合力较其余配方的大,但它们的磨损却不是最严重的,这可能是由于偶件表面转移膜表层的含Cu量较小(在开始溅射时Cu的原子浓度相对较低),摩擦副表面间发生“铜-铜”粘着现象相对较轻的

缘故。

4. 结论

a. PTFE、 MoS_2 、石墨作为锡青铜轴承镶嵌用固体润滑剂,在干摩擦下均可起到降低摩擦和磨损的作用,其中以PTFE的效果最好,而以石墨的效果最差。

b. 镶嵌用固体润滑剂的减摩抗磨作用是通过生成固体润滑剂转移膜而减少摩擦副表面间发生粘着的结果。

c. 添加少量石墨有助于PTFE向摩擦面转移,可以提高PTFE镶嵌轴承的耐磨性;少量 MoS_2 的加入,可以促进石墨在金属基材上的转移,而 $BaSO_4$ 的添加效果则恰好相反。

致 谢

本工作得到中国科学院兰州化学物理研究所高玲、张兵、丛秋滋、欧阳明安,杨伟等同志的帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 李同生, 固体润滑, 9 (1989) 69.
- [2] 杉本丰, 安部亘, 润滑(日), 19 (1974) 829.
- [3] 多田博, 日本机械学会第304回讲习会, 69-2-19-20.
- [4] 西靖则, 长英夫, 特许公报(日), 昭 51-43558 (1976).
- [5] 齐尚奎, 赵家政, 党鸿辛, 固体润滑, 2 (1982) 65.