

固体润滑概论(10)

西村 允

(日本航空宇宙技术研究所)

10、复合材料和固体润滑膜以外的固体润滑滑动材料

10.1 前言

固体润滑膜的耐载荷能力优良, 但其耐久性不佳, 而自润滑复合材料的缺点则是承载能力差。因此, 为了满足实际使用的要求, 有的固体润滑滑动构件应兼备两者的优点。一种办法是将固体润滑剂浸渍在多孔性烧结金属或增强纤维织物中, 使之作为表面覆盖物而粘结成固体润滑膜。为了提高其耐载荷能力, 还可以加上背衬。另一种办法是在底材的各处钻孔或开槽, 预先将固体润滑剂镶嵌于其中, 借以在底材表面形成固体润滑膜。这些都是固体润滑剂的供给源, 因而在固体润滑膜磨完之后还能继续保持润滑性。本文把前者称为背衬型轴承, 而把后者叫做镶嵌型轴承。

10.2 背衬型轴承的种类、特征和用途

背衬型轴承有使用烧结金属基增强材料的和保持增强纤维强度的两种。

使用烧结金属基增强材料的背衬型轴承的截面模型如图10.1所示。将青铜等多孔性烧结金属层涂覆在背衬上, 並以固体润滑剂将空隙填充起来, 然后再使固体润滑膜粘结其上。为了简化工艺, 可以使用与浸渍的固体润滑剂相同成分的固体润滑膜。

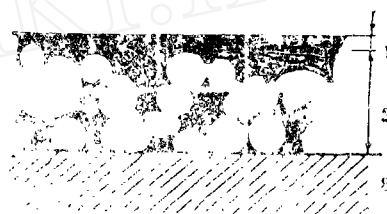


图10.1 金属基背衬型轴承的截面图

1—表面层; 2—烧结材料; 3—背衬

使用的固体润滑剂主要是聚四氟乙烯(PTFE), 此外还添加了 MoS_2 或Pb等。以聚缩醛为主成分的含油固体润滑剂已经商品化。

最有名的背衬型轴承是英国Glacier公司的DU轴承。它是在钢质背衬表面烧结一层厚度为0.3mm的青铜粉(11%Sn-Cu), 再在其上粘结25 μm 厚的固体润滑膜^[1]。通常的固体润滑膜厚只有7~15 μm , 而增加厚度可以提高其耐久性。此外, 通过镶嵌在增强材料间隙(孔隙率一般大于27%)中的固体润滑剂的补给也有助于改善耐久性。这就是本轴承的设计思想。当然, 增加固体润滑膜的厚度必然会导致其耐载荷能力降低。尽管如此, 若是在接近静态的使用条件下, 其静载能力仍可达到 $14 \times 10^7 \text{ Pa}$ ^[1]。

固体润滑剂的组成为PTFE80%+Pb20%^[1]。铅的添加效果是偶然发现的^[2]。

起初,这种轴承仅以PTFE为固体润滑剂,直到1955年发现一使用镀铅的旋转轴,这种轴承的性能就可得到明显的改善,于是才开展了给PTFE添加铅的试验〔2〕。

添加铅的成功是在本世纪五十年代实现PTFE工业化生产以后不久发现的。据作者考察认为,这是添加金属粉末或金属氧化物以改善PTFE润滑性的开端。因此,铅的添加效果的发现具有极其重大的意义。

添加铅何以能够改善PTFE的润滑性呢? Pratt曾对此作了这样的解释〔2〕:一旦摩擦条件变得很苛刻,对偶材料的表面就会形成局部高温。与此高温部位接触的PTFE就同铅反应,结果PTFE便作为单分子层牢固地粘结在对偶材料上。在此过程中,青铜起着催化剂的作用。一旦PTFE在对偶材料表面形成了非常稳定的转移膜,随后的摩擦就发生在PTFE转移膜与轴承上的PTFE膜之间,因而磨损速率明显降低。这就表明,铅和青铜对对偶材料上形成转移膜起着很大的作用。但是,铅或青铜究竟与PTFE发生了怎样的反应尚不清楚。除了它们之外,其它金属也能使PTFE粘结牢固,然而机理均有待探讨。

以上说明,这方面的研究进展还相当迟缓,而且宏观看来原因也十分复杂。例如,在摩擦条件并不苛刻的场合,复合材料表面也能形成与其组成不同的膜,这对摩擦磨损也有影响〔3〕。关于这方面的详细情况将在以后叙述。总之,若要对微观分析结果与宏观现象作出统一的解释还为时尚早。

这种轴承在通常条件下使用时的摩擦系数是0.12~0.18,而在承受如桥梁支承那样高载荷的情况下,其摩擦系数就降低到0.02~0.05。当PV值分别为 $1.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 和 $1.5 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 时,这种轴承的耐久性就相应为4000小时和200小时〔1〕。PTFE-Pb复合材料与其它几种PTFE基复合材料,以及聚酰亚胺基复合材料之比磨损量的比较示

于图10.2〔4〕。可以看出,在耐磨性方面,能与这种轴承材料相比拟的只有添加15%碳纤维的PTFE,然而后者尚缺少200℃以上的数据,而且温度上升对其磨损的影响也不清楚。但是,由于PTFE的磨损是随温度升高而增大的,所以断定这种材料也具有与此相似的磨损特性。实际上,这种新材料自五十年代问世以来,一直受到人们的关注,即使在目前也还有生命力。

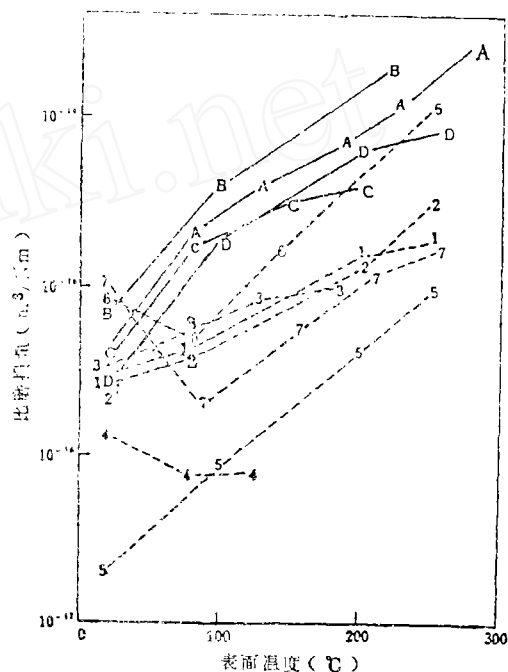


图10.2 PTFE-Pb复合材料与其它几种复合材料比磨损量的比较〔4〕

PTFE基复合材料:

- 1—矿物填料; 2—矿物填料; 3—60%青铜;
- 4—15%碳纤维; 5—PTFE-Pb, 烧结青铜;
- 6—碳-石墨; 7—碳-石墨

聚酰亚胺基复合材料:

- A—40%石墨-10%碳纤维; B—15%石墨;
- C—40%石墨; D—5%石墨-10%PTFE

就其与油的共存性来说,洁净的润滑油不仅具有消除摩擦热的效果,而且还能改善它的润滑性,然而污染的油却会加剧其磨损〔1〕。

可以认为,使用铅是今后生产这种材料

的一大问题,因为铅会引起重金属公害,所以进行其替代材料的开发研究是刻不容缓的课题之一。

在使用多孔性烧结金属的滑动材料方面,浸渍含油聚缩醛已经商品化^[5]。这种滑动材料的容许PV值高达 $5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 。

高分子基背衬型轴承是用在背衬上粘结玻璃纤维或PTFE织物,并且浸渍PTFE,然后再行表面涂层来制造的。近年来,一种以高强度为目标而利用碳纤维和Quebra纤维(芳族聚酰胺纤维之一的商品名)的试验研究也正在开展。欧美已经将这种轴承应用于宇航方面,但在日本还处于推广阶段。

高分子基背衬型轴承的剖视图示于图10.3^[6]。

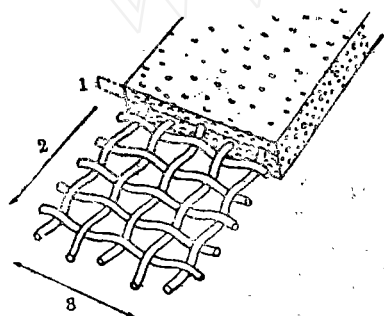


图10.3 高分子基背衬型轴承的剖视图^[6]

1—表面涂层; 2—纬线; 8—经线

从五十年代开发之初直至最近,这种轴承材料一直是由PTFE纤维+玻璃纤维+酚醛树脂所组成。随着增强纤维的种类、纤维的排列方向、表面涂层的厚度以及树脂的种类等基础研究的进展,包括耐载荷能力和耐久性在内的所有性能都有明显提高,现在已经进入其第二代发展期^[9]。

目前,PTFE基背衬型轴承的动载能力和静载能力分别可达 $30 \times 10^7 \sim 35 \times 10^7 \text{ Pa}$ 和 $90 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。B-1型超音速战略轰炸机和F-14型战斗轰炸机等均以主翼作为可变

翼,而用作其支持轴承的就是PTFE基背衬型轴承^[7]。这种轴承在飞机其它部位的应用可见图10.4所示^[8]。

图10.3所示为第二代背衬型轴承材料有代表性的例子,平织的增强纤维浸渍树脂加PTFE粉末并固化。织物(布)的厚度为0.3~0.4cm,其上施以约0.2cm厚的表面涂层。这就使其结构变得相当复杂,因而应对各参量的最佳化大力进行实验研究。例如,就纤维的种类及其组织的取向而言,除了玻璃纤维和PTFE纤维之外,诸如碳纤维、Aramid纤维(一种芳族聚酰胺纤维的商品名)和聚酯纤维等均可制作成平纹组织、双平纹组织或缎纹组织以便调节其性能^[6]。结果,若能变成图10.3所示的结构,则纤维的差异就变得相当微小,即使纤维不同,例如玻璃纤维、Quebra纤维、Nomex纤维(芳族聚酰胺耐高温纤维的商品名)和碳纤维等也都能显示出同等程度的磨损特性。

可以用作基材和粘接剂的有酚醛树脂、环氧树脂、聚酰亚胺和硅树脂等。试验结果表明,它们的影响都很小。重要的并不是固化处理中残留在树脂内的孔隙,而是包括消除孔隙的前处理在内的热处理工艺的控制。有关以上所述参量最佳化的详细论述见文献^[6]。

下面谈谈这种材料的磨损寿命问题。寿命决定于所用间隙的容许量。因为轴与轴承的间隙是随磨损加剧而增大的,所以假定可容许的间隙很小,那就可以断定其使用期不长。像直升飞机操纵系统的连杆轴承那样,在间隙容许量仅为数十微米的情况下,其更换期就很短。相反,如果容许间隙达到0.25mm,即使涂层全部磨完直至露出增强纤维也还可以使用。具有图10.3所示结构的轴承在载荷为450N和磨损速率为 $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m/h}$ 的情况下,假定容许磨损的深度为200 μm ,则其耐久性就是400小时。

对PTFE背衬型轴承磨损机理的研究也

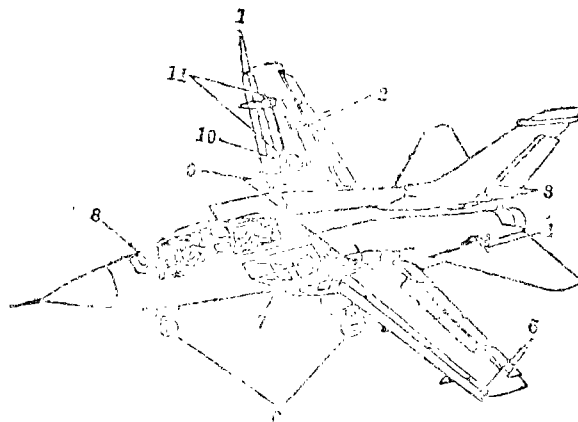


图10.4 PTFE背衬型轴承在飞机上的应用举例〔8〕

- 1—襟翼和前缘缝翼的铰链；2—副翼片的调节器铰链；3—方向舵的铰链和调节器；
4—尾翼副翼铰链和调节器；5—襟翼和前缘缝翼的铰链；6—着陆装置的液压油缸轴承和调节器；
7—空气入口调节器的铰链；8—操纵装置的铰链；9—主起落架轴承；10—起落架连杆；11—悬臂轴承

是由Lancaster进行的。他采用两种X-射线光谱分析仪从摩擦一开始就对双向滑动面进行了追踪观察〔8〕。结果发现，许多复合材料表面有玻璃纤维、树脂和PTFE混合组成的薄膜（称之为第三物相）。因为对偶材料表面也形成了转移膜，所以摩擦就发生在薄膜之间。这些薄膜的形成对复合材料的摩擦磨损影响很大。磨屑是由这层膜被撕碎所形成的，因而在出现稳定薄膜时的磨损就减小。然而在此之前对其实质还一无所知，也不清楚那稳定的薄膜到底是怎样形成的。但是，Lancaster认为，这两种膜的组成没有多大的差异，特别是可以明显地观察到在对偶材料的表面上有PTFE分解出来。人们也许由此可以得到一些启示。

这种轴承主要应用在飞机上。但是，除了像飞机那样十分洁净的环境之外，其在水、海水、液压油和润滑油等污染状态下的应用也会很多。因此，应当重视研究液体污染对其摩擦磨损特性的影响。

PTFE背衬型轴承在90N载荷下分别于空气、水、OM-15液压油中的摩擦试验结果见图10.5所示〔8〕。在这种载荷较低的情况下，与无油润滑时的情形相比，油润滑的

磨损小，摩擦系数也低。但是，一旦载荷增

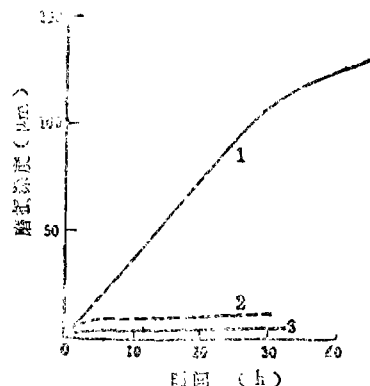


图10.5 液体污染对PTFE背衬型轴承磨损的影响（40MPa，90N）〔8〕

- 1—水中（0.11），2—空气中（0.14），
3—液压油中（0.06）

大，油的存在就反而会加剧磨损。虽然这种磨损变化也与摩擦速度直接相关，但却只发生在50~60MPa的载荷范围内。可以认为，这是由于当载荷增大时，油就浸入到转移膜与对偶材料表面的界面，以及第三物相层与轴承材料表面的界面中，从而促使其剥离的结果。不论载荷如何，水总是加速磨损的。

将这种轴承简化为在背衬上贴有复合材料带的卷绕套筒，可以广泛应用于轻型机械

和家用电器等。

10.3 镶嵌型轴承

与固体润滑膜不同，镶嵌型轴承是将固体润滑剂供给源设置在滑动面上。其目的是实现桥梁、堤坝闸门、水轮机和大型机械在低速、高载荷条件下的润滑。这些机械都必须能够在长期不维修的情况下正常运转。当预先粘结的固体润滑膜磨完之后，就由嵌入滑动面的固体润滑剂来供给而实现润滑。

基底金属除了锡青铜和铸铁以外还有不锈钢。固体润滑剂的嵌入方法是首先在滑动面上钻孔或开槽，然后再将它嵌入其中。为了满足长期使用的要求，应当选用耐腐蚀性良好的固体润滑膜，而嵌入的固体润滑剂则应配以时效变化小的材料。

要使这种轴承能够很好地给滑动面供给嵌入其中的固体润滑剂，就必须进行多方面的精心设计。例如，将热膨胀系数大的化合物或金属嵌入孔穴内，当滑动面与金属接触且温度上升时，就可以利用其受热膨胀而将固体润滑剂挤压出来。这方面已有专利发表。

这种轴承最典型的应用实例是本四架桥用的支承。它系由高强度黄铜制造，固体润滑剂的主要成分是PTFE，其添加成分有石墨、MoS₂或Pb等[9]。对偶材料是不锈钢 SUS 431。利用直径为 1 m 的塔架环柱支撑总重量为 1 万吨这样大型的吊桥（图10.6所示），并在100年间也无需维修，真可谓之为超绝技术。

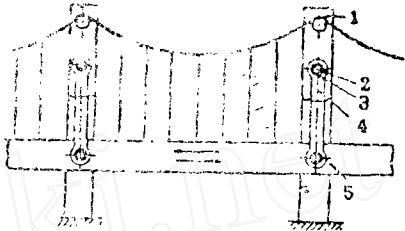


图10.6 吊桥与塔架环柱轴承[9]
1—主塔（塔架）； 2—塔架环柱（柱径约1 m）；
3—塔架环套筒； 4—塔架连杆（上下柱中心间距约10 m）； 5—加强构架

参考文献（略）

（王安钧译自日刊《机械の研究》37
（1985），10：1173~1176）

（上接第243页）

元，而且修理时间缩短一半左右，取得了一定的经济效益。因此我们认为这种工艺值是

得推广的。

表 修复车床尾座体孔新旧工艺费用对比

项 目 费用（元） 工 艺	镗孔	研磨	车削	磨削	钳 工	套筒	底板	棉纱	绸布	纱布	火油	丙酮	FT料	脱模剂	其它	合 计
旧工艺	40	40	50	100	288	80	50	4	5		8					665
新工艺	60		30	20	64			4		0.5		5	50	10	50	293.5