

有色金属与滑动轴承^①

Collyear, John

(英国材料学会)

摘 要

给出了滑动轴承的定义。阐述了轴承材料的性能要求。介绍了轴承材料的历史及最新进展。比较了不同轴承材料的使用性能。

关键词: 滑动轴承 巴比合金 钢基底铝合金 钢基底铜-铅合金 铸造 轧制 烧结 热处理

我选择“有色金属与滑动轴承”作为演讲题目,是因为我不是冶金学家,但对滑动轴承确实有所了解。稍后我将向诸位说明这一点。

曾经用于或正用于制造滑动轴承的有色金属种类极其广泛,例如,Cu、Sn、Sb、Pb、As、Ni、Al、Zn、Bi、Cd和In等。这些材料的用量也许并不大,然而,它们却是衡量当时消费水平的有效准则之一。五十年代我在格雷西亚(Glacier)金属公司担任制造工程师期间,该公司仅为制造滑动轴承,每星期购买的锡金属就达10吨。

1 起 源

在此,我将向诸位简要介绍一下我的个人经历,由此可知我并不是材料工程师。二十五岁左右时,我来到格雷西亚公司担任机械工程师,主要从事制造工作。格雷西亚公司一直是全世界最著名的滑动轴承制造厂。我在该公司任职三十余年,并最终当选为AE PLC的主席。AE PLC管辖格雷西亚及其他公司。这些公司主要制造发动机上承受高应力的部件。此外,它们还制造活塞、活塞环、凸轮轴、阀门及涡

轮机与压缩机的叶片。

涉足这种行业,材料必然会引起我的极大关注,因为使用高性能材料及工艺是开发新产品的主要途径之一。我对材料的兴趣正是源于我们利用材料制造上述产品。

2 滑动轴承

为完整起见,先给滑动轴承下一个定义。所谓轴承,是指一类能最有效地传递相对运动的部件之间的相互作用力的装置。当然,这个定义也包括滚动轴承,但除了在此提到它外,我将不对它作进一步讨论,因为我的兴趣几乎完全集中在滑动轴承上。有色金属对滑动轴承十分重要。

值得一提的是,动态密封圈在设计与制造方面与轴承并无多大差别。动态密封圈是一类允许系统的部件之间以最小的压力损失或流体损失发生运动的装置。

轴承用途广泛。它们既可以是旋转型的,也可以是直线滑移型的;既可以承受循环载荷,也可以承受冲击载荷;既可以做单向连续运动,也可以做循环往复运动。显然,滑动轴

① 1992年10月20日收到英文稿(载本刊英文版,1993,第三卷第四期),彭超群译,赖海辉校

承最主要的是用在往复式发动机的曲轴上。

3 历史回顾

埃及人曾经使用木制转轮或润滑厚板,罗马人曾经使用木制圆锥滚柱轴承,但无疑摩擦和磨损都很严重。到了十九世纪初期,人们开始特别关注滑动轴承专用材料的开发。青铜,这种具有五千年应用历史的金属材料,此时得到了重点研究,部分原因是为了研制合适的枪管金属。但青铜具有良好的性能,尤其是经磷化处理后的青铜性能更好。因此,在某些需要高硬度、高强度的场合(如泵柱塞、阀门及轴衬),青铜得到了人们的赏识。

1839年,伊萨克·巴比(Isaac Babbitt)研制了一种适合于蒸汽发动机的轴承材料并申请了专利,但该专利仅涉及了使用一种由硬外壳支承的软金属的原理。专利中提到的合金成分为89Sn-9Sb-2Cu(wt.-%)。巴比合金具有双相结构,即硬颗粒镶嵌在软基体上。当时,建立了这样一种理论,该理论认为:这些硬颗粒形成了支承载荷的“硬铺面”,而基体则磨损至比该“硬铺面”稍低的位置,从而为润滑剂提供许多通道。锑通过固溶及与锡形成立方体形硬质颗粒,使合金强化;铜与锡则形成针状硬质颗粒 Cu_6Sn_5 ,它们能输送SnSb颗粒并使其分布均匀。然而,人们现在对这一类理论中的许多看法提出了疑问。

所谓巴比合金,现泛指三类合金:(a)高锡($\geq 90\text{wt.-%}$)无铅合金;(b)高铅($\geq 70\text{wt.-%}$)合金;(c)基体中含锡和铅的中间类合金。

工业革命以来,工程学的发展要求人们加强对轴承材料工程学的研究,而对于更高承载能力、更高温度、更好的耐强性及更低的摩擦的要求则加快了轴承材料工程学的研究步伐。

4 滑动轴承的性能要求

绝大多数场合下,主要通过滑动面之间

形成一层流体润滑膜(多为油膜)来降低摩擦与磨损,因此,只有在不存在油膜或油膜不连续的情况下才有必要使用专用轴承材料。事实上,如果确实能够形成一层连续的理想油膜,则选用能满足力传递所需强度要求的材料即可,而没有必要在运动表面上使用专门的轴承材料。然而,在实际中很少有轴承在理想条件下工作。将发动机从静止启动,除非单独施加压力,否则在润滑剂中不存在压力,因此不能满足流体润滑条件,而且,当载荷的方向以轴速的一半旋转时,还会产生流体压力。润滑膜也经常被镶嵌在轴或轴承上的杂质粒子中断。因此,在承载条件下,即使使用了润滑油,也只有理想条件下才能获得连续流体润滑。在使用其他常规的润滑方法时,偏离理想的流体润滑就更远了。结果,轴与轴承之间有部分载荷是通过固相面之间的直接滑动接触来传递的。极薄的润滑膜的存在能对此有所缓和。这种润滑情况我们称之为“边界润滑”。如果这些极薄膜也被破坏,则将在固相面之间发生干摩擦。轴和轴承在那些突出点上发生直接接触时,将产生固体摩擦。在直接接触的地方,会产生弹性变形和塑性变形,且常为塑性变形,从而两接触面之间将依材质和表面杂质(如氧化物)的存在状况发生一定程度的粘连。发生塑性变形和断开两接触面之间的粘连需吸收能量。当颗粒从轴或轴承表面撕裂下来时会产生磨损,这些颗粒通常为氧化物,其自身就可以充当研磨剂而加剧磨损。由于连续塑性变形造成的破坏也是产生磨损的原因之一。润滑剂对轴和轴承具有腐蚀作用,因而抗腐蚀性也是轴承材料的另一个性能要求。

总之,润滑轴承的性能要求有两点,即低的磨损速率和在不发生粘连、无显著塑性变形、机械破坏或明显腐蚀情况下的承载能力。

那么,对滑动轴承材料的性能有什么要求呢?首先,必须有足够的强度以承受简单载荷和疲劳载荷(可能包括振动载荷)。第二,必须有一定程度的磨合性,即允许发生一定程度的变形,允许轴和轴承之间或滑动面或滑动面之

间存在一定的不同轴度。显然,如果存在变形或不同轴度,则实际传力面积比设计值小。通过产生一定程度的磨合,可以增大承载面积,从而降低应力。第三,也是很重要的一个性能要求,即抗粘连能力。所谓抗粘连能力,是指滑动轴承相对于某一特定面滑动时,不容易产生化学粘连的性能。这种化学粘连能引起局部焊合或表面熔化,它可以用润滑性能来表示。轴承材料或至少其中某些相的熔点,是润滑性能很重要的一个方面,因为有理论认为,在完全的金属对金属接触的某些情况下,随着温度迅速升高,轴承材料的局部熔化可以提供一种润滑,使轴承度过无油润滑时期(当然,时间可能只有几秒钟)。第四,轴承材料必须能够吸收杂物。极富磨损能力的杂质粒子不会嵌入轴承材料,而是伸到轴和轴承的间隙里,从而对轴产生磨损。理想的轴承材料应当能够吸收杂质粒子,以免其突出在轴承表面上磨损轴。此外,轴承必须有良好的热传导能力,尤其是在“边界润滑”条件下,热传导能力的重要性显得更加突出。最后,轴承材料还必须具有抗腐蚀的能力且价格不能太贵。

评价轴承性能好坏的根本困难在于,润滑轴承的运转性能除了依赖其材质外,还与一系列其他因素有关,例如,润滑系统、润滑剂的物理和化学性质、研磨剂的存在、载荷性质、间隙大小及表面精度等。在某种条件下显得完美无瑕的轴承材料,当条件改变时会变得毫无用处。而且,没有衡量性能良好的简单判据。因为在某些情况下希望磨损速率最小,在某些情况下要求在不发生粘连和过热时有最大的承载能力;而在另外一些情况下,则要求在严格润滑条件下运转的时间尽可能长。这些衡量性能的不同标准,可以解释关于各种轴承材料优越性结论的多样性。

5 轴承材料

巴比合金是继巴比专利之后约一百年内最

主要的专用轴承材料。现在,在改变合金系及设计和制造方法方面取得了诸多的进展。

巴比合金的成分多种多样,例如,锡基金通常含有~11 wt.-%的锑及可以高达10 wt.-%的铜。最常用的锡基金合金含锑7 wt.-%,含铜3 wt.-%~5 wt.-%。锡基金合金的主要组成为 β 相(Sb Sn)、 γ 相(Cu_6Sn_5)以及一个三元亚共晶复合相。通常认为铅在这些合金中是有害元素,因为它的存在会引起固相线急剧下降。另有研究者宣称铅存在于这些合金中可以改善轴承的运转性能,但对于受承高负荷的合金,其铅含量宜控制在0.35 wt.-%以下。镉可以提高锡基金合金的硬度、拉伸强度及疲劳强度,添加镍和碲也是基于同一目的。在通常使用的合金成分范围内,锡基金合金的拉伸性能及硬度受成分变化的轻微影响。常用合金中,最软的含锑7 wt.-%,含铜3.5 wt.-%,在100℃下的硬度约为HV11;最硬的含锑10 wt.-%,含铜1 wt.-%,在100℃下的硬度为HV16。疲劳强度在某种程度上受成分影响。铅基巴比合金通常以锑、锡和铜做合金元素,其金属间化合物(SbSn和 Cu_6Sn_5)与锡基金合金基本相同。一个具有代表性的铅基合金的成分为:Pb-14Sb-10Sn-0.5Cu(wt.-%)。通常认为铅基合金比锡基金合金便宜,它可以充当锡基金合金的低级替代物。铅基合金比锡基金合金脆,但硬度和强度相似。还有一种观点认为,铅基合金的承载能力及耐磨性比锡基金合金差。一种含碲3 wt.-%的合金曾一度被认为比锡基金合金具有更高的强度,而另一种含碲1 wt.-%的合金(SAE15)则已在美国广泛应用于内燃发动机轴承的轴衬上。

据说,低锡铅基合金在较高温度下的疲劳性能优于锡基金合金。这可以从铅基合金具有较高的固相线温度想到。巴比合金的组织越细,其承载性能越好,这一事实已被人们发现并获得共识。要获得细晶组织,必须对轴承材料进行快速凝固。这可以解释为什么轴承材料的实际厚度已被减至尽可能的薄,因为其目的就是获得更快速度的凝固。巴比合金由于要求快速

凝固且价格相当昂贵,已促使人们开发将轴承材料压焊在另一种材料(通常为钢,偶尔为青铜)上的多种技术。这些技术要求轴承材料与基底材料之间结合良好,因为结合好坏对结构的刚度和热传导有重要影响。为此,许多制造方法(包括模铸、离心铸造及带坯连铸)已被采用。如果能制得极薄($<250\text{ }\mu\text{m}$)的轴承材料,则由力传递过程引起的最大应力将存在于基底材料上而非衬料上。本世纪三十年代早期,人们研制了将轴承材料连铸到带钢上的技术,该技术迅速成为大量生产汽车曲轴轴承及轴瓦的主要方法,其优点是能够控制产品的质量和精度。

更高的负荷对轴承材料提出了更高的要求。为适应这一要求,人们开发了新的合金系统,但这些合金也常有缺点。另一个大的飞跃是铜-铅合金的研制。虽然铅化青铜与铜-铅合金无本质区别,但后者常含有 $20\text{ wt.}\% \sim 50\text{ wt.}\%$ 的铅及总量不超过 $5\text{ wt.}\%$ 的锡、镍和银。自本世纪三十年代开始应用铜-铅合金以来,该类合金已被广泛应用于制造飞机和柴油机发动机的轴承。它们是在二次世界大战中,为了使其应用于飞机、军用机车和船舶而获得深度开发的,但这类合金的强度不够高,容易变形,不能充分吸收力,因而常用钢做基底。目前,使用更多的则是一种含铅 $20\text{ wt.}\% \sim 30\text{ wt.}\%$,并含少量或不含锡的合金。对于负荷更高的场合,常使用一种含铅 $20\text{ wt.}\% \sim 50\text{ wt.}\%$,含锡 $2\text{ wt.}\% \sim 4\text{ wt.}\%$ 的合金。要使铜-铅合金轴承材料与钢基底结合良好,并同时使轴承材料获得适当的冶金组织并不容易。因此,这些年来,为找到令人满意的工艺方法,人们进行了大量艰苦的研究工作。

第一种制造铜-铅合金双金属带材的方法,是将熔融铜-铅合金连铸到经过适当处理的带钢上。该方法曾一度被认为是一种非常好的工艺,但它像其他所有的制造轴承材料的方法一样,困难在于如何确定合适的工艺条件,以便既使轴承合金与钢基底之间结合良好,又得到合适的组织结构。

随后,人们研制了另一种工艺来制造双金属带材,该工艺也很成功。其具体做法是,连续地将铜-铅合金粉末均匀地铺在钢基底上,然后进行烧结。开发这种工艺花了很长时间,但它非常成功且十分方便,因为在保持基本的烧结工艺不变的情况下,它允许改变各合金系列的成分。

轴承材料的研究进展似乎都遇到了同样的问题,即强度的改善通常以牺牲其他必要性能为代价。硬度过高会降低轴承材料的磨合性和可嵌入性,用电镀的方法镀上薄层($\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)软性轴承材料。但高温下锡的迁移,常在轴承金属与涂复层之间夹一层镍。用铟代替锡,可以避免扩散引起的问题。

多年来,铝已成为一种有用的轴承材料,尤其是近年来,其应用日益普遍。铝合金专用轴承材料的开发可以追溯到1935年。当时,在英国,美国和德国对该类合金开始了广泛研究。研究该类合金的主要动力,是为了找到这样的轴承材料:它们不但能够承受比巴比合金高得多的负荷,而且能避免铜-铅合金的某些制造和运行方面的问题。在德国,为了避开使用锡金属的意图,则是研究铝合金轴承材料的另一个战略性诱因。选取铝合金作为研究对象,主要是由于铝是熔点紧接在锡、铅和锌后面的第二种最容易获得的金属。

下面介绍三种迥然不同的制造铝合金的专用轴承材料的工艺方法,它们都在一定程度上,或至少在某些领域里,取得了成功。

第一种方法是由德国开发的,其目的是希望制造一种组织结构与锡基、铅基巴比合金相类似的合金,也就是组织结构为硬相加软基体的合金。该工艺的基础是关于轴承承载行为的假设。这种假设现已被认为可能是错误的,但它曾开发过一系列适应于一般用途的合金,其中有几种含铜 $2\text{ wt.}\% \sim 15\text{ wt.}\%$,其他则含少量铅、铋、铜、镁及铁等。

第二种工艺方法定由美国和英国共同研制的,当时的目的是为了寻找这样一种合金:它的强度刚够使其充当无基底轴承,但含有一定

量的低熔点组分,以改善其承载性能。铝-锡合金就是这样一类合金。在锡含量不超过 25 wt.-%时,铝-锡合金的耐磨性随锡含量增大而提高,但当锡含量高于 10 wt.-%以后,由于锡有形成连续相的趋势,从而拉伸强度、屈服强度及延性随锡含量增大而降低。因此,适宜的锡含量为 5 wt.-%~10 wt.-%。

第三种将铝合金制作成专用轴承合金的方法,是基于许多有色金属膨胀系数不同的考虑而衍化出来的。其合理的步骤是将薄层铝合金压焊在较厚的钢基底上,从而整体的立体行为主要由钢基底决定。该方法的困难在于,怎样使铝和钢之间发生反应,形成铝-铁化合物层。该化合物层迅速达到相当厚度,从而使铝和钢基底之间的结合脆化。用固相压焊方法可以避免产生铝-铁化合物层。为此,人们研制了几种现已商业化的轧制工艺。英国格雷西亚金属公司,锡金属研究所及福尔梅(Fulmer)公司研究的工艺具体步骤如下:擦刷钢基底表面,将经过擦刷的铝薄膜通过冷轧方法置于铝合金薄带上,接着用轧制方法将铝带和钢基底焊合,最后用热处理使焊合更加牢固并使铝合金退火。通过适当的热处理,可使铝合金发生再结晶,形成一种网状组织,从而改善合金的组织结构。该合金中锡和铜的含量分别为 20 wt.-%和 1 wt.-%。这类合金不需涂复层也能运转良好,是一类很成功的轴承材料。

以铝为基,可以研究成许多轴承合金。为满足更高负荷要求,目前格雷西亚金属公司正在生产一种 Al-Si 合金(AS124),该合金的成分为:Al-12Sn-4Si-2Cu(wt.-%)。

本世纪三十年代,镉合金当然具有比锡基和铝基合金更好的疲劳性能,但它们价格昂贵且存在腐蚀问题。

锌的熔点低、硬度低、价格便宜且容易获得,很明显可以考虑将其用作轴承材料。它们已应用于某些承受轻负荷的轴衬上,但不能肯定它能用于负荷更高的场合。

银是另一种曾一度引起广泛兴趣的轴承材料,现已不再受到关注。有一个时期曾广泛应

用纯银制作飞机轴承,但由于它易产生突发性粘连,为此常在其表面镀一层铝,再在铝上镀一层铜以防腐蝕。含铝 3 wt.-%~5 wt.-%的银-铝合金已进入实用,但人们对该合金的兴趣正在降低。这可能是由于其他类型的轴承合金,例如,具有涂复层的铜-铝合金、铝化青铜及铝合金等,在实际中似乎至少具有与银合金相当的良好使用性能,而价格却比银-铝合金便宜得多。

总之,目前发动机轴承上使用最广的是钢基底铜-铝合金和钢基底铝合金。

6 最新进展

如前所述,自格雷西亚金属公司将 AS15 铝合金成功地用作轴承材料,钢基底铝合金轴承在汽车上的应用已有许多年历史。钢基底 AS15 铝合金轴承材料不需电镀涂复层,也能在铸钢轴或球墨铸铁轴表面上运转良好,且对酸性机油具有抗腐蚀性。然而,在小型发动上,由于单位面积承受的负荷提高,格雷西亚金属公司认为有必要研究一种在价格上具有竞争能力,而强度又比 A15 高 15%的轴承材料。为此,通过七年的开发和试用,该公司成功地开发了 AS124 合金。

在需要涂复层的场合,人们开发了多种新工艺来代替电镀方法。采用溅射喷镀,可以在轴承材料上形成与其具有高度相容性的薄层。溅射在真空下完成,基体上都是用原子或离子轰击目标靶,使原子从目标靶上射出。最简单的一种形式,是保持一个等离子区,在该区内,氩离子通过一个负压作用向目标靶加速。

轴承材料的未来发展,首先可能受到三维表面绘图技术的强烈影响。其次随着承载面积分布及表面粗糙度的定量化,人们有可能开展最低极限油膜厚度的研究。此外,人们正在继续研究不同硬度、不同规格的材料之间的结合效应。