

# 国内自润滑轴承用材料的研究和开发

刘超锋

(郑州轻工业学院材料与化工学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 简述发展自润滑轴承材料的必要性。对自润滑轴承用材料进行分类, 包括金属基和聚合物基。金属基固体自润滑轴承包括粉末冶金整体烧结型、镶嵌型和梯度型。粉末冶金整体烧结型分为铁基、铜基、锌基、镍基; 镶嵌型分为青铜基、钢基和锌基等。梯度型是中国工作者提出的新型自润滑材料。此外, 对氟塑料基和尼龙基等非金属基自润滑轴承材料进行了综述。展望了自润滑轴承用材料的发展前景。

**关键词:** 自润滑轴承; 材料; 金属基; 聚合物基

中图分类号: TB33 文献标识码: A 文章编号: 1000-8365(2006)04-0416-05

## Advance in Research and Development of Self-lubricating Composite Used by Bearing Materials in China

LIU Chao-feng

(School of Material And Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, 450002, China)

**Abstract:** The current status of research and development of self-lubricating composite used by bearing materials in China are summarized. The importance of research and development in this field are discussed. self-lubricating composite used by Bearing materials in China include cermet and polymer. The future trend is introduced in the end of this paper.

**Key words:** Self-lubricating; Materials; Cermet; Polymer

滑动轴承有时在很苛刻的条件下工作, 且处于含尘环境中, 使得普通液体润滑轴承因其摩擦特性所限, 不能适应特殊工况的要求。自润滑技术轴承完全突破了依靠油脂润滑的局限性而实现了无油润滑, 自润滑材料轴承技术是目前润滑技术发展趋势, 力学强度高和摩擦学性能好的自润滑复合材料的开发成为摩擦学领域的重要热点。例如, 在高温条件下工作的滑动轴承, 普遍采用高硬度, 高耐磨, 高力学强度, 对各种介质作用稳定的矿物陶瓷和金属陶瓷材料; 承受高压的结构中使用的干摩擦轴承, 在无冷流介质情况下, 在轴瓦的金属底座上涂布氟塑料薄膜<sup>[1]</sup>。自 20 世纪中叶, 国际上开发成功自润滑轴承材料并应用后, 中国该领域的发展较快。本文就金属基和聚合物基固体自润滑轴承的研究和开发加以综述。

### 1 金属基固体自润滑轴承

#### 1.1 粉末冶金整体烧结固体自润滑轴承

粉末冶金自润滑轴承又名烧结金属含油轴承, 是音像设备、微特小型马达、办公机械、电动工具、洗衣

机、电风扇、缝纫机、复印机等中不可缺少的一类轴承。它是把固体润滑剂以粉末的形式作为组元添加到金属基体原料中, 通过压制成形、烧结, 形成自润滑复合材料, 以其作为轴承、轴瓦或衬板<sup>[2]</sup>。因材料本身含有固体润滑剂, 轴承在运动时由于热作用和摩擦, 使自身的固体润滑剂在相对滑动表面形成一层较为稳定的润滑膜, 并且靠本身的“自耗”来不断补充和提供固体润滑剂, 修复被撕裂或破伤的润滑膜, 达到润滑和减摩作用。

#### 1.1.1 铁基

能承受高的烧结温度而不丧失润滑特性的固体润滑剂很少, 而且其分布不均匀性和对基体连续性的破坏会显著降低复合材料的强韧性和耐磨性<sup>[3]</sup>。王砚军等<sup>[4]</sup>的研究表明: 解决高温摩擦磨损和自润滑问题的有效途径是以粉末烧结金属陶瓷为耐磨基体, 借助于原料粉的粒径、颗粒形状或成形压力以及造孔剂的数量来调整孔隙度和孔的形状、大小及分布, 浸渍合适的固体润滑材料, 使其在高温摩擦过程中通过摩擦热的作用而对摩擦表面实现自润滑。为此, 他们以 TiC/Fe-Cr-W-Mo-V 混合粉为基料, 加入 3% 的 TiH<sub>2</sub> 造孔剂和以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为惰性弥散质点, 用真空烧结法于 1 230 烧结, 研制出一种孔隙分布均匀, 且互相连通

收稿日期: 2005-12-26; 修订日期: 2006-01-09

作者简介: 刘超锋(1969-), 河南郑州人, 工学硕士, 讲师, 从事工程材料。

Email: zhryng@yahoo.com.cn

成网络状的微细孔结构的金属陶瓷烧结体,测试表明:该微细孔金属陶瓷扩散自润滑烧结体显孔隙度在17%左右,可满足扩散自润滑轴承对孔隙结构、尺寸和力学性能的要求。

冶金工业部钢铁研究总院罗锡裕等<sup>[5]</sup>发明的一种组织致密的材料,可制作冶金、机械、化工等部门在500℃温度以下工作的大尺寸自润滑轴承。其成分(w)为:青铜或铜中任一种5%~30%,钴2%~5%,锰2.0%~7.0%,铬1.0%~3.0%,共晶磷铁(Fe<sub>3</sub>P或Fe<sub>2</sub>P)3%~6%,石墨3%~15%,二硫化钼或二硫化钨中任一种2%~5%,其余为铁。该材料以铁为主要成分,基体相为珠光体,加入锰、铬、钴元素是为了提高材料的热强性和耐磨性,加入石墨、二硫化钼、青铜和共晶磷铁等以提高耐磨性和降低摩擦系数。在制造方法上,该材料采用电火花烧结或热压烧结。

#### 1.1.2 铜基

在电动工具中若采用高速(25 000 r/min以上)自润滑含油轴承替代高速精密级滚动轴承,可简化电动工具结构、缩小体积、减少装配工序。为此,孙永安等<sup>[6]</sup>采用粉末冶金工艺,以MoS<sub>2</sub>、石墨等为固体润滑剂、磷为固溶强化元素研制的青铜基高速自润滑含油轴承,在转速为25 000~27 240 r/min范围内试用,台架试验表明,负载为10 N,持续寿命大于736 h,开关次数达10 800次,该轴承具有良好的抗热咬合性、优越的自润滑性能和足够的耐磨性。

中南工业大学李溪滨等<sup>[7]</sup>先将(w)82%~88%的铜、5%~7%的锡、5%~7%的锌、2%~4%的铅,经熔炼混合均匀后,喷雾制成小于0.15 mm的铜基合金粉;然后将(重量百分比)88%~96%的铜基合金粉,石墨粉1%~2%和二硫化钼粉2%~4%的固体润滑剂,2%~5%镍粉,和1%~3%钨粉的合金基体强化元素混合8~12 h后,将混合料装模,控制压力为294~490 MPa压制成型;接着将压坯在810~850℃的温度下,通氢气进行烧结,并保温1.5~3 h;再将烧结的坯料送入真空浸油4~6 h;浸油后的坯件装入模具,控制压力为343~784 MPa进行精压,经少量后续加工,即可得到增压器浮动轴承。该轴承能满足高速旋转(至120 000 r/min)工况下运行,自润滑性能好,使用寿命长。该发明可达95%以上的成材率。

#### 1.1.3 锌基

胡长安<sup>[8]</sup>发明一种微型轴承的制造方法:先将按重量配比的锡9%~15%,铜4%~6%,铅2%~5%,铋2%~5%,铁0.5%~0.8%,镍0.5%~0.8%,锌67%~82%混合均匀,制成锌基轴承合金粉末;再取占重量80%~95%的聚四氟乙烯与5%~20%的聚苯撑

料混合制成固体润滑剂;再取占重量20%~50%的固体润滑剂与50%~80%的锌基轴承合金粉末混合制成模塑粉;将模塑粉经压制成型,将成型件放入以氮气为基的保护气氛烧结炉中进行烧结,烧结温度360~410℃,烧结30~60 min而成。用该法制成的轴承,使用时间长,效果好,成本低,且占用空间小,可推广使用。

#### 1.1.4 镍基

欧阳锦林等<sup>[9]</sup>以镍作为基材,分别以石墨、银、铋、PbO、SiC作为固体润滑剂,用冶金方法制备自润滑材料。其粉末冶金工艺采用真空中频感应加热,在1 100~1 250℃、10~25 MPa压力条件下进行高温热压烧结成形。

冶金工业部钢铁研究总院袁国栋<sup>[10]</sup>发明的无油自润滑轴承由两个组分组成,第一组分由金属Ni、Co包覆润滑剂石墨、MoS<sub>2</sub>等;第二组分由第Ⅰ、Ⅱ副族金属的碳、氮化物与Ni、Co、Mo中的一种或两种以上的金属构成。制造方法采用电火花烧结工艺。该材料强度高、韧性好和摩擦系数低。

### 1.2 金属基镶嵌型

金属基镶嵌型(又名背衬型)是在金属基体(轴瓦)上预先设计、加工好一定面积比例的孔洞或沟槽,在其中嵌入某种成分的固体润滑材料,经过特殊粘结及时效处理,将二者结合成为一个整体,以其作为轴承、轴瓦或衬板。所有镶嵌孔沿运动方向交叉布置,在轴向或径向(以运动方向而论)各孔之间应有一定的切向重叠度,以保证轴承润滑覆盖整个滑动方向,形成完整的固体润滑膜。轴承在运动时由于热作用和摩擦,使固体润滑剂不断渗出转移,同时基体磨损,固体润滑剂逐步露出,起到润滑和减摩作用。镶嵌自润滑材料的轴承具有高的承载能力和低的摩擦和磨损,自润滑性好,摩擦小,使用寿命长,可靠度高,适合于在低速、重载和特殊环境下使用,具有良好的载荷适应性,适用于多种运动形式,如旋转、摆动和往复运动。

#### 1.2.1 青铜基

水工建筑物上闸门支撑铰结构的主要部件就是自润滑关节轴承。支撑铰的作用是同弧形闸门支臂的支撑端相连接,将整个闸门所受的水压力和一部分门重传递给闸墩,并保证闸门启闭时能绕水平轴转动。支撑铰一般在水下12 m左右,大修比较困难,必须将闸内的水抽净才能进行,大修期一般为10年,支撑铰应有较好的耐磨性。船闸闸门重10~100 t。船闸开启时,摆动角度为70°,发生相对运动的材料比较容易发生磨损。同时,为了保证闸门的顺利启闭,要求支撑铰的内套和外套之间摩擦小。为保证达到上述要求,盛

选禹等<sup>[11]</sup>研制了用于支撑铰的镶嵌自润滑滑动轴承。该轴承内圈套采用铁基合金材料,外圈套采用具有一定的耐磨性和良好的润滑性能的铸造铝青铜材料。自润滑材料镶嵌在外圈套的内表面。固体润滑材料在镶嵌之前,经过混料、烘干、压制成形、烧结、车加工。该试验还证明,采用超细粉材料是使复合固体润滑材料具有低摩擦系数的重要原因之一。

### 1.2.2 钢基

铜基镶嵌型自润滑轴承以其良好摩擦磨损性能与低成本,在油脂润滑不方便的机械设备中应用得越来越广泛,摩擦因数大约为 0.15。然而其最大承载力只有 90 MPa,限制了它在重载条件下的应用,难以满足重型工程机械对自润滑轴承的要求。单昆仑等<sup>[12]</sup>利用赫兹接触理论及摩擦的粘着理论而导出的摩擦因数随载荷变化的定量关系,提出以轴承钢 GCr15 代替传统的铜合金,研制轴承钢/聚四氟乙烯镶嵌型复合材料。其实验结果表明,该材料的承载压强可达到 90 MPa,摩擦因数低于 0.15,能够满足工程机械对重载自润滑轴承的要求。该材料的特点为:钢基 GCr15 经球化退火、机加工、淬火加中温回火后,其组织为回火屈氏体,硬度 40~42 HRC;固体润滑材料的填料为石墨(1%~5%)、二硫化钼(1%~5%)和中性氧化铝粉末(10%~15%),基体为 PTFE(余量),混合后,经烘干、模压成型、烧结后得到成型的固体润滑材料。在纯聚四氟乙烯中加入填料是为了提高耐磨性。加入石墨和二硫化钼是为了保持低摩擦因数;加入氧化铝粉末以提高耐磨性能,达到减摩耐磨的目的。

氟塑料轴承材料的特点是无润滑时摩擦系数小,耐磨性高,耐水、耐石油产物、酸、碱的作用。在宽域的温度范围内(从 200 到 300 )使用性能稳定。但是,氟塑料的机械强度不高。聚四氟乙烯作为最常用的固体润滑材料,其承载能力低,耐磨性较差。因此,以纯氟塑料的形式使用会受到一定限制。在滑动轴承中可在轴瓦的工作面上薄薄地涂上一层氟塑料或者用氟塑料浸渍金属陶瓷和石墨轴瓦。通过添加碳纤维、玻璃纤维、石墨、二硫化钼等填充材料可以减小其磨损率。但是,最有效的办法是使用金属背衬。而目前使用的背衬型复合材料的寿命不够长,王春艳等<sup>[13]</sup>利用 ANSYS 软件对重载自润滑复合材料进行设计,计算了用 PTFE 复合材料镶嵌 35# 钢(润滑剂占接触面积 55%、60%、65% 三种情况)的钢-塑复合材料与 45# 钢所组成的摩擦副的承载能力,结果表明:当润滑面积占接触面积的 65% 时,不安全。此外,在他们的磨损实验中,取经 J. Khengar 等人<sup>[14]</sup>证实的摩擦因数最小、耐磨性也最好的润滑剂配方:10%~20% 的玻璃纤维(质

量%)、2%~5%(质量%)的 MoS<sub>2</sub> 及余量的 PTFE,将润滑剂混合均匀、烘干与 35# 钢压制成型然后烧结得到的自润滑试件,实测了润滑面积占接触面积的 60% 情况下该材料的摩擦磨损曲线,结果表明:该自润滑复合材料的承载能力达到 100 MPa,摩擦因数小于 0.14;在承载能力为 80 MPa、摆动频率为 8 次/min 及摆角为 ±30 的条件下,磨损率低,使用寿命长。

可以制造自润滑轴承的背衬型润滑材料由钢背-多孔青铜-高分子润滑材料复合而成,其力学性能相当于钢,摩擦学性能相当于高分子材料,具有强度高、摩擦系数小、耐磨性好、导热性优良、使用温度范围宽等特性。随着对轴承等摩擦部件的要求越来越高,传统的金属材料已不能满足要求,背衬型新型润滑材料的研究受到关注<sup>[15]</sup>。王宏刚等<sup>[16]</sup>将 200 目 PEEK(吉林大学产)与 30%(质量分数)300 目自润滑填充物充分混合均匀,粉料铺在烧结球铜粉的 45 钢板上,厚度 2~3 mm,放入烧结炉中,于 400~410 烧结 20~30 min,取出后与钢板一起放入双辊滚轧机中滚轧,得 PEEK 基背衬型复合材料。对该材料的试验结果表明:高负荷条件下,复合材料受到微切削和微犁沟作用,在对偶面(45 钢)产生较厚的转移膜,使材料磨损率下降。该材料适用于  $v=0.42$  m/s,  $P=2\ 000$  N 的高负荷条件下使用。

另外,向定汉等<sup>[17]</sup>研究了由福建龙溪轴承股份有限公司引进美国技术研制的自润滑 T 型向心关节轴承:外圈基体用轴承钢制造、淬硬,内球形面粘贴聚四氟乙烯(PTFE)编织复合材料;内圈为淬硬轴承钢,外球形滑动表面镀硬铬、抛光。结果表明:该关节轴承承载力可达到 135 MPa,摩擦系数小且稳定。自润滑性能好,连续摆动后的温升低,适用于干摩擦下的运动机械机构的润滑和防护。

宋云峰等<sup>[18]</sup>建立了自润滑关节轴承的摆动工况模拟试验方法和试验装置,试验了 PTFE/铜网复合材料衬垫的 GCr15 钢基的关节轴承在不同载荷条件下无油润滑的摩擦磨损性能,结果表明:载荷增大至 40 kN,该轴承摩擦系数和线磨损量均有所增大,摩擦状态也发生了变化;40 kN 载荷已达到或超过该衬垫关节轴承的承载极限。

在纺织机械、食品机械行业,需要使用不需润滑油润滑的无油润滑轴承。李安国<sup>[19]</sup>发明的一种无油润滑高转速复合轴承材料,它是在碳结钢制的圆柱形筒体之内壁烧结一层 0.5 mm~1.0 mm 厚的高石墨减磨材料而成的。用该材料制成的轴承耐磨性能好,机械强度大,转速可提高到 3 500 r/min,同时成本低廉,制作工艺简单。

### 1.2.3 锌基

赵长江等<sup>[20]</sup>发明的一种轴承由锌合金基体和固体润滑材料所构成。它采用铸造锌合金为基体,在其作相对摩擦运动的表面镶嵌适量的固体润滑材料而制成的新型的自润滑轴承,采用熔化后铸造的方式加工而成。该锌合金自润滑轴承,材料造价低,生产工艺简单,由于锌合金的铸造性能良好,便于加工成不同结构形状的轴承零件,广泛用于各种工程机械中。

### 1.2.4 其它

碳纤维增强复合材料是一种优良的自润滑摩擦副材料。由于碳纤维复合材料磨耗低、摩擦系数小,导热性高,尺寸稳定以及耐腐蚀性,与轴配合工作时能够自润滑,不需注油,用它制造的轴承能在润滑能力低的腐蚀性介质中使用,例如在气态和液体介质中使用的滑动轴承。九台市轴瓦厂王顺珍等<sup>[21]</sup>发明的耐高温自润滑轴承,是在基体的内壁上开有固定槽,基体的内壁上附着有碳纤维复合材料层,碳纤维复合材料层的碳纤维复合材料充满固定槽。该发明具有摩擦系数小,磨耗小、无噪音,自润滑性能强,耐磨等优点,而且对轴无磨损,使用过程中不会出现卡轴、抱轴现象,工作常温达 500℃,瞬时可达 1 000℃,运行平稳。

美国特拉华杜邦公司雅伊梅·A·安普埃罗-奥扎等<sup>[22]</sup>发明一种可饱和的无纺材料,其包含氟聚合物絮凝物和芳族聚酰胺絮凝物,它可用作自润滑轴承的衬垫基片。

### 1.3 梯度自润滑材料

一般均质自润滑滑动轴承大多用粉末冶金法生产出多孔金属基体,然后浸渍润滑油或固体润滑剂而制成。其孔隙在基体中呈均匀分布。基体强度越大,承受载荷越好,而对多孔材料来说,空隙率高基体强度小。为了提高减摩作用而储存更多的润滑剂则要求基体空隙率尽可能的高。解决此问题的关键在于解决滑动轴承在使用过程中反映出来的减摩作用与承载能力之间的矛盾。为此,金卓仁和夏永红等<sup>[23,24]</sup>设计了梯度自润滑轴承,它通过往基体中添加  $PbCO_3$  粉末,形成  $PbCO_3/Fe$  合金粉配比的梯度分布,在烧结过程中  $PbCO_3$  受热分解产生  $CO_2$  气体,从而留下孔隙, $PbCO_3$  含量不同孔隙率也就不同,轴承的支承面为 100% 金属,孔隙率最小,而强度最大,摩擦面上为 100%  $PbCO_3$ ,孔隙率最大,可以储存更多的润滑剂维持轴承的自润滑状态,同时  $PbCO_3$  分解生成的  $PbO$  本身也是一种优良的固体润滑剂。与一般的均质含油自润滑轴承相比,梯度自润滑轴承的极限  $p_v$  值提高

到 4.0 MPa·m/s,使用寿命提高 2 倍多。

## 2 聚合物基

### 2.1 氟塑料基自润滑复合材料滑动轴承

济南大学李学闯等<sup>[25,26]</sup>公开了一种耐高温的以氟塑料为基体树脂的自润滑复合材料滑动轴承。该材料中功能改性剂包括占基体材料 10%~25% (质量%)的微粒状功能填料和占基体材料 0~10% (质量%)的高分子改性剂,微粒状功能填料包括一种或一种以上的粒径 < 100 nm 的纳米粒子。该发明提供一种摩擦系数低、耐磨损性能好、使用寿命长、 $p_v$  值较高的耐腐蚀、自润滑氟塑料基复合材料滑动轴承。

### 2.2 尼龙

#### 2.2.1 尼龙自润滑轴承材料

对于在无润滑条件下工作的滑动轴承,可采用以聚酰胺和生产工艺不同的其它塑料为基础的复合材料加工,保证其尺寸稳定性好,摩擦偶的承载能力高。

黄根宝<sup>[27]</sup>发明机器制造用的尼龙自润滑轴承材料,它是在尼龙基材中添加 50%~160% 的高纯石墨及适量的二硫化钼、二硫化钨、碳纤维,经混料、辊炼、成型、浸油、软化处理等过程制得。该轴承材料具有自润滑性、良好的导热性、耐热性、耐磨性并有较高的抗压和抗冲击强度。

西安雁塔尼龙制品厂芦新选<sup>[28]</sup>的发明填充尼龙 6 基自润滑轴承材料由己内酰胺 (87%)、固体润滑材料 (10%)、填充材料 (3%) 合成,它摩擦系数小、耐磨损、储油性好、自润性强、成本低、安装方便,对于重载低速、中载中速,工作温度在 110℃ 以下的各种机械均可使用。

华洪良<sup>[29]</sup>以己内酰胺为基本原料,添加固体润滑剂,采用离心浇注方法制得自润滑铸型尼龙。在该材料中添加了作为增强材料的玻璃纤维粉,因此该材料不仅具有自润滑性而且其抗压强度、抗冲强度、耐热、耐磨减摩性能以及尺寸稳定性比 MC 尼龙基自润滑轴承材料均显著提高,从而扩大了作为耐磨减摩零件的应用范围。该材料可用于工作温度低于 100℃ 工况下低速、中速轻重载零件的无油润滑,如果在有油润滑条件下工作,其机械效率和应用范围将得到进一步提高和扩大。

中国科学院兰州化学物理研究所阎逢元等<sup>[30]</sup>发明一种自润滑纳米复合材料。它由可熔性聚酰亚胺 100 份 (重量,下同)、无机纳米 1~25 份、偶联剂 0.1~2.0 份和碳纤维 5~30 份组成。该材料适用于真空、辐射、高温等特殊环境,可在航空航天、机械化工、汽车家电等领域的自润滑轴承等部件上使用。

鞍山市金钢碳纤维复合材料有限公司徐福卿<sup>[31]</sup>

发明一种用于制造工业输送辊道中的高分子高温无润滑轴承材料。它由高温树脂、固体润滑剂、碳纤维复合成聚酰亚胺复合材料,合成聚酰亚胺有6组配方。用它制造的耐高温无润滑轴承,可取代各类粉末冶金含油轴承、金属滑动轴承、滚动轴承,具有节能、不污染环境、使用寿命长的特点。

### 2.2.2 自润滑浇铸油尼龙轴承

张静霞<sup>[32]</sup>发明一种自润滑浇铸油尼龙轴承,它适用于一般滑动轴承。其优点是机械强度高,耐磨性能好,使用寿命长,成本低,便于安装,其加工工艺简单。

### 3 结语

由于轴承工作的工况例如温度、载荷性质、载荷种类等非常复杂,尺寸规格众多,如何根据不同情况选择并设计合适的材料是个复杂的问题。发展高温、重载、低速、含衬及腐蚀性等复杂工况下的自润滑轴承材料是当务之急。需要指出的是:该领域中研究和开发者们所提出的试验方法,例如中国研究人员所提出的梯度自润滑轴承复合材料思想新颖,必将推动中国自润滑轴承用复合材料的研究和应用。

### 参考文献

- [1] 阎家宾. 自润滑滑动轴承[J]. 世界橡胶工业, 2005, 32(4): 31-35.
- [2] 杨丽颖, 李长春, 王守仁, 等. 固体自润滑轴承的设计与应用[J]. 轴承, 2004, (3): 9-11.
- [3] 孙晓丽, 刘勇兵. 粉末冶金高温金属基固体自润滑材料[J]. 粉末冶金技术, 2001, 19(2): 86-92.
- [4] 王砚军, 刘佐民. TiC/Fe-Cr-W-Mo-V 系自润滑金属陶瓷轴承烧结体的研制[J]. 轴承, 2005, (5): 20-23.
- [5] 罗锡裕, 杨凤环, 谭益钦, 等. 耐热耐磨自润滑材料及其制造方法[P]. 中国专利: CN1055397A, 1991.
- [6] 孙永安, 张玲, 李县辉, 等. 高速自润滑含油轴承的研究[J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(2): 90-93.
- [7] 李溪滨, 刘如铁, 程时和, 等. 粉末冶金技术制造涡轮增压器自润滑浮动轴承的方法[P]. 中国专利: CN1266909A, 2000-09-20.
- [8] 胡长安. 自润滑锌塑复合材料微型轴承的制造方法[P]. 中国专利: CN1419060A, 2003-05-21.
- [9] 欧阳锦林, 牛淑琴, 阮虎生, 等. 镍合金基自润滑复合材料的研究[J]. 摩擦学学报, 1993, 13(1): 33-47.
- [10] 袁国栋. 固体自润滑材料及其制造方法[P]. 中国专利: CN85107628A, 1987-09-16.
- [11] 盛选禹, 雒建斌, 温诗铸. 镶嵌自润滑关节轴承及其润滑材料的制备[J]. 机械设计, 2000, 17(8): 44-46.
- [12] 单昆仑, 向定汉. 高强度镶嵌自润滑材料的设计及摩擦实验[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 236-239.
- [13] 王春艳, 向定汉, 单昆仑, 等. 重载自润滑材料的有限元设计及摩擦实验[J]. 润滑与密封, 2005, (3): 46-48.
- [14] J Khekar, I Negulescu, E I Meletis. Sliding wear behavior of PTFE composites[J]. Wear, 2002, 252: 361-369.
- [15] Bely V A, Sviridenok A L. Friction & Wear in Polymer-based Material[M]. New York: Pergamon Press, 1976, 368.
- [16] 王宏刚, 简令奇, 杨生荣, 等. 高承载 PEEK 背衬型润滑复合材料的摩擦学性能[J]. 机械工程材料, 2002, 26(11): 24-26.
- [17] 向定汉, 潘青林, 姚正军. 聚四氟乙烯自润滑编织复合材料关节轴承的摆动摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 72-75.
- [18] 宋云峰, 郭强, 罗唯力. PTFE/铜网复合材料衬垫自润滑关节轴承的试验研究[J]. 机械工程材料, 2003, 27(6): 14-15, 32.
- [19] 李安国. 无油润滑高转速复合轴承材料[P]. 中国专利: CN1079034A, 1993-12-01.
- [20] 赵长江, 于文华. 锌合金自润滑轴承及其生产工艺[P]. 中国专利: CN1485551A, 2004-03-31.
- [21] 王顺珍, 李洪波. 碳纤维耐高温自润滑轴承[P]. 中国专利: CN1451891A, 2003-10-29.
- [22] 雅伊梅·A·安普埃罗-奥扎, 米哈伊尔·R·列维特, 阿瑟·R·纳尔逊. 用于低摩擦轴承表面的无纺材料[P]. 中国专利: CN1535344A, 2004-10-06.
- [23] 夏永红, 金卓仁, 程继贵, 等. 梯度功能材料及其在机械工程中的应用[J]. 机械工程材料, 2001, 25(5): 9-11, 35.
- [24] 金卓仁, 程继贵, 夏永红, 等. 梯度自润滑滑动轴承的研制[J]. 机械工程学报, 2001, 37(3): 81-84.
- [25] 李学闯, 贾衍才, 苏衍良, 等. 耐高温聚合物基复合材料滑动轴承[P]. 中国专利: CN1431406A, 2003-07-23.
- [26] 李学闯, 苏衍良, 赵顺伟, 等. 氟塑料基纳米复合材料滑动轴承[P]. 中国专利: CN1431407A, 2003-07-23.
- [27] 黄根宝. 含油尼龙自润滑轴承材料[P]. 中国专利: CN1043776A, 1990-07-11.
- [28] 芦新选. 填充尼龙6基自润滑轴承材料[P]. 中国专利: CN87102411A, 1988-10-12.
- [29] 华洪良. 增强自润滑铸型尼龙[P]. 中国专利: CN1032345A, 1989-04-12.
- [30] 阎逢元, 蔡辉, 刘维民, 等. 自润滑纳米复合材料及其制备方法[P]. 中国专利: CN1414037A, 2003-04-30.
- [31] 徐福卿. 高分子高温无润滑轴承材料[P]. 中国专利: CN1422902A, 2003-06-11.
- [32] 张静霞. 自润滑浇铸油尼龙轴承及其加工工艺[P]. 中国专利: CN1226477A, 1999-08-25.