

聚四氟乙烯基纳米复合材料滑动轴承的研制^{*}

李学闵 苏衍良 孙成栋

贾衍才 赵顺伟

(济南大学, 济南 250022)

(山东省塑料研究所, 济南 250001)

摘要 以聚四氟乙烯(PTFE)、石墨、 MoS_2 、玻璃纤维、碳纤维和纳米 Al_2O_3 为原料制备了 PTFE 基纳米复合材料,研究了复合材料的力学性能,并用 PTFE 基复合材料制备了机械用滑动轴承,阐述了其设计要点、成型工艺。该复合材料轴承 PV 值可达 $1.42 \sim 1.49 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$,使用温度可达 230°C 以上,实际应用效果良好。

关键词 聚四氟乙烯 纳米复合材料 滑动轴承 摩擦磨损 PV 值

轴承是保证机械设备正常运行的关键基础件,其技术性能直接决定着设备的可靠性、使用寿命和工作效率,在工业发展进程中一直发挥着重要作用。但由于轴承制造工艺复杂、能耗高、要求使用润滑剂,所以在一些恶劣的环境下使用受到限制。复合材料具有性能可设计性,可以集高比强度、高比刚度、耐腐蚀、耐疲劳、自润滑、耐磨、耐热、减震、降噪等诸多性能优势于一身,是摩擦学领域最有应用价值的新材料之一。复合材料滑动轴承以其结构、材料、工艺性能一体性和功能的可设计性,可使多种材料相组合而产生协同效应,用于低速、重载、边界润滑或无油润滑、高温、高真空、腐蚀介质及粉尘等传统金属轴承难以适应的恶劣工况条件下,已从传统的办公机具、食品加工、造纸、轻纺、医药及家用电器等轻载、低速要求的行业扩展到一般机械传统领域^[1],展现了广阔的应用前景。

制约复合材料滑动轴承应用发展的因素主要是长期使用温度和 PV 值大小。据悉,无钢背树脂基复合材料轴承的长期使用温度不大于 60°C ,无润滑条件 PV 值小于 $1.0 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$,实难适应复杂工况条件下的实用技术要求,为此,笔者在复合材料滑动轴承的研究开发中,选用耐腐蚀、耐高温、自润滑聚四氟乙烯(PTFE)作为基体材料,选用固体润滑剂石墨、 MoS_2 作为减摩功能填料,选用碳纤维、无碱玻璃纤维作为增强材料开发复合材料轴承。随着近年纳米技术的发展,已发现纳米粒子有良好的增强增韧功能,尤其是纳米 Al_2O_3 填充 PTFE 复合材料的力学性能比纯 PTFE 提高很多,当含量为 10% 时,其综合性能最好^[2],且优于纳米 SiO_2 、 TiO_2 、 ZnO_2 填充 PTFE,因此选用纳米 Al_2O_3 作为功能组分材料。

1 实验部分

1.1 原材料

PTFE: 工业级,济南化工厂;

玻璃纤维: E 型,泰山玻璃纤维有限公司;

纳米 Al_2O_3 : 粒径不大于 30 nm ,比表面积 $600 \text{ m}^2/\text{g}$,浙江舟山纳米材料有限公司;

石墨: 粒径不大于 $30 \mu\text{m}$,山东南墅石墨矿;

碳纤维: TSX-123,山东泰安天泰新材料有限公司;

MoS_2 : 化学纯,天津试剂厂;

钛酸酯偶联剂: LOT196,美国杜邦公司。

1.2 仪器与设备

电子拉力试验机: 1121 型,美国 Instron 公司;

摩擦磨损试验机: M-200 型,上海工程试验机厂;

液压千斤顶: 30T,常熟千斤顶厂;

高温箱式电炉: 天津实验电炉厂。

1.3 总体设计

聚四氟乙烯基纳米复合材料滑动轴承研制的关键在于轴承材料的研究开发,既要保证材料有足够的强度、刚度、耐疲劳性、抗震性能以承受轴承的外载荷,又要有良好的减摩耐磨性、导热性、耐热性、自润滑性以降低摩擦系数和磨损量,提高轴承的使用寿命。其研究设计的总体思路是根据轴承在不同工况条件下的使用技术要求,按照复合材料性能可以合理设计准则,最大限度地发挥基体树脂、增强纤维、功能组分材料所具有的技术性能,并通过科学有效的复合,实现优势互补,获得单一材料难以达到的综合技术性能,且降低成本,提高使用性能。因此在研制中,采用以复合材料设计为主线,以结构设计、工艺设计为重点,有效利用材料设计和功能设计的统一性,增大自润滑轴承设计的自由度与工艺实现的可能性,并通过多种技术措施重点提高与改善复

^{*} 山东省 2000 年科技发展规划项目(003120404)

收稿日期: 2003-11-10

合材料的减摩、耐磨、承载、导热性, 以最大限度地满足轴承的需要, 实现材料、工艺、结构、功能的优化组合。

先采用 $L_9(3^4)$ 正交设计筛选配方, 再通过模压工艺制备复合材料轴承, 4 个变量分别为玻璃纤维、纳米 Al_2O_3 、石墨和 PTFE, 各变量的水平均按与基体树脂 PTFE 的质量比进行计量, 分别为玻璃纤维: 15%、10%、0; 纳米 Al_2O_3 : 10%、5%、0; 石墨: 25%、10%、5%。而碳纤维、 MoS_2 为常量, 在各配方中均等量加入。

1.4 轴承的设计概要

鉴于目前尚无复合材料滑动轴承设计标准, 而该滑动轴承的工作条件又很苛刻, 对轴承的技术性能、结构特点要求也不尽相同, 暂时难以制定出各种滑动轴承的通用设计方法。现仅以面粉加工机械中的重要部件关风器使用轴承为例, 提出其设计要点, 以供参考。

(1) 壁厚 因不使用金属钢背, 原则上在结构性能允许范围内应将复合材料轴承做成薄壁件, 以利散热, 在大多数情况下, 其壁厚可取轴直径的 10%, 当轴较细时可增大至 15%, 轴粗时可减少至 5%, 一般以 1 ~ 3 mm 为宜。

(2) 轴承长度 轴承较短容易散热, 而较长则不易散热, 所以轴承的内径 d 与其长度 L 之比 $d/L = 0.5 \sim 1$ 。金属滑动轴承的 d/L 一般为 0.5。

(3) 间隙 复合材料轴承与轴颈之间的间隙要比金属轴承的大。这是因复合材料的线胀系数大于金属, 热导率小于金属, 易产生热积聚, 增大间隙是有效解决抱轴所采取的技术措施之一。轴承与轴颈最小允许间隙由轴承、轴径的热膨胀、表面状况、润滑与冷却条件, 以及复合材料的吸油、吸湿、膨胀等多种因素决定, 一般可取轴颈的 0.3% ~ 0.4%。

(4) 凸缘 为了解决复合材料轴承的安装定位和承担短时的轴向载荷作用, 宜在其一端设置凸缘翻边, 凸缘直径一般比轴承外径 D 大 5 ~ 10 mm。

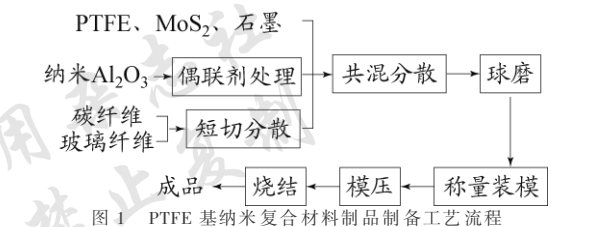
(5) 外形 一般复合材料轴承为薄壁圆筒状。但为了有效解决轴承与设备的固定连接, 防止轴承转动打滑, 也可将轴承设计成内圆外棱多边形。

(6) 油孔、油线 如需定期或不定期地对轴承进行润滑, 可在轴承内壁设置油线槽或油穴、注油孔。

1.5 工艺流程

PTFE 基纳米复合材料试样采用模压工艺制备,

工艺流程是将 PTFE 树脂与定量的预处理纳米/微米级功能组分材料进行强力搅拌, 并加入短切玻璃纤维或碳纤维, 再将其放入瓷缸球磨机中研磨 1 h 左右制成混和料。称量混合料装入模具后, 放入压机进行压制, 压力一般以 30 MPa 为宜, 压制速度为 10 ~ 20 mm/min。达到所需压力后, 保压 10 ~ 15 min, 使压力传递均匀, 然后缓慢卸压, 脱模。制品烧结在专用炉中进行, 升温速度为 60 ~ 70℃/h, 温度升到 327℃保温 1 h, 再升温至 385 ~ 390℃保温 1 h, 根据制品性能要求进行降温, 降温方式为快速冷却和缓慢降温, 缓慢降温速度为 3 ~ 4 h 内降至 250℃出炉, 冷却即可。图 1 为 PTFE 基纳米复合材料制品制备工艺流程。



1.6 性能测试

压缩强度、压缩弹性模量按 GB/T 1448 - 1983 测试;

摩擦系数、体积磨损量按 GB/T 3960 - 1983 测试;

PV 值按 GB/T 7948 - 1987 测试^[3];
失效温度用轴转动测温仪进行实测。

2 结果与讨论

2.1 材料性能

表 1 为 PTFE 基纳米复合材料性能测试结果 (取 5 个试样测试结果的算数平均值)。其中 0[#] 为纯 PTFE 对比试样。

项 目	配方编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
压缩强度 / MPa	11	17	13	12	12	14	15	13	12	6
压缩弹性模量 / MPa	315	490	426	439	456	457	495	463	451	293
摩擦系数	0.18	0.20	0.19	0.16	0.12	0.24	0.24	0.20	0.16	0.16
体积磨损量 / cm ³	0.08	0.03	0.01	0.11	0.15	0.13	0.10	0.11	0.10	0.21

由于各配方的成型工艺、工艺参数、试验条件、试验设备、试验方法均相同, 因此可以将测试结果的不同作为材料配方不同进行分析。由表 1 可见, 不管如何增加玻璃纤维和功能填料的用量, 复合材料

的压缩强度均高于基体树脂的 1 倍以上,压缩弹性模量提高约 50%,而复合材料的摩擦系数虽大多数高于 PTFE,但体积磨损量均小于 PTFE。这充分说明,通过合理配方设计,可使该纳米复合材料的综合性能优于 PTFE,既能发挥 PTFE 摩擦系数低的优势,又能有效提高力学性能、改善体积磨损量大的缺点,使其更具有使用价值。

通过对只分别添加纳米 Al_2O_3 和玻璃纤维的试验对比表明,纳米 Al_2O_3 对复合材料力学性能的影响作用不如增强纤维明显,但从表 1 中玻璃纤维含量均为 15% 的 1[#] 和 6[#] 配方看,加入 10% 纳米 Al_2O_3 的 6[#] 的压缩强度比 1[#] 提高约 27.27%,压缩弹性模量提高约 45%;同样玻璃纤维含量均为 10% 的 4[#] 和 8[#] 配方中,加入 10% 纳米 Al_2O_3 的 8[#] 的压缩强度比 4[#] 提高约 8%,压缩弹性模量提高 5.5%。由此可见,加入纳米 Al_2O_3 可使复合材料的性能有所提高。这是由于纳米 Al_2O_3 的表面积大,表面能高,在压力作用下 Al_2O_3 与 PTFE 树脂紧密结合,在烧结温度下基体熔融包容浸渍纳米粒子,二者形成良好的界面结合,对基体树脂增强增韧,能阻止或钝化应力作用下基体产生的微裂纹的扩展,吸收更多的变形,避免其发展成为破坏性开裂^[4],从而有效提高复合材料的力学性能。

从表 1 中还可可见,摩擦系数低于纯 PTFE 试样的 5[#] 配方是在纯 PTFE 中仅加入 25% 石墨,摩擦系数与纯 PTFE 试样相等的配方是加入 25% 石墨、10% 纳米 Al_2O_3 的 9[#] 和加入 10% 玻璃纤维、10% 石墨的 4[#],而摩擦系数最大值的 6[#]、7[#] 配方中仅含 5% 石墨。由此可见,石墨的减摩效果优于其它组分材料,石墨用量大者其摩擦系数低。这是由于石墨为层状固体润滑材料,其层间为弱 π 电子键结合,极易产生剪切滑移,使其具有低摩擦系数及良好的自润滑性能;基体树脂 PTFE 同时填充有石墨、 MoS_2 、纳米 Al_2O_3 、玻璃纤维等,通过模压、烧结工艺及一系列的物理化学变化后成为复合材料,当受外力的作用时,由于 PTFE 的内聚能小、分子间结合力弱,在摩擦运动过程中大分子链产生滑移或断裂,从而使石墨伴随着 PTFE 一起被拉出结晶区,成片地转移到对偶件表面,形成转移膜,有机无机固体润滑剂的功能同时发挥,致使摩擦系数降低。

由表 1 可见,5[#] 试样的摩擦系数最小,而磨损量最大,说明单一填充 25% 石墨 PTFE 的复合材料的耐磨性并不理想。相比之下,9[#] 配方在加入 25% 石

墨同时加入 10% 纳米 Al_2O_3 ,虽然摩擦系数较大,但磨损量却大为降低;石墨加入量低的两组配方 6[#] 和 7[#],不仅摩擦系数大,其磨损量也较大。由此可见,同时加入纳米 Al_2O_3 、玻璃纤维和较多石墨的各组配方,其摩擦系数、磨损量均较适中且稳定,说明由纳米粒子、石墨、玻璃纤维共同填充的 PTFE 复合材料力学性能、摩擦磨损性能都较理想,技术性能均衡匹配,最适于用作承载的摩擦制品。

分析摩擦系数、磨损量发生变化的原因可能是单一石墨填充在摩擦过程中,石墨能形成转移膜,发挥良好的润滑作用,降低复合材料的摩擦系数,但由其层间结合力弱而易剪切滑移形成转移膜损伤,随着膜的生成、损伤、修复的交替进行致使磨损量加大。石墨与纳米粒子、玻璃纤维共同填充 PTFE 后,其复合材料硬度、压缩强度、压缩弹性模量均有提高,纳米粒子和纤维起着支撑载荷并阻止含有石墨的 PTFE 膜的大量反复解脱转移的双重作用,因此摩擦系数虽然有所增大,但磨损量减小,耐磨性明显提高。

2.2 轴承性能

PV 值是衡量滑动轴承最重要的性能指标,是表征聚合物基复合材料在轴承上应用的基本设计指标和基本性能指标。工作 PV 值是指轴承的工作压力 P 与滑动速度 V 的乘积,是对轴承材料主要工作参数的表征。极限 PV 值是指轴承材料可以承受的最大压力 P 与在此压力下的最高相对速度,或在滑动速度一定的条件下,该轴承材料所能承受的最大压力的乘积,是衡量轴承材料的最重要的性能指标。 P 和 V 值的计算公式为:

$$P = W/Ld \quad (1)$$

式中: P ——极限压强, N/mm^2 ;

L ——塑料轴承长度, mm ;

d ——塑料轴承内径, mm ;

W ——极限载荷, N 。

$$V = \pi Dn / (60 \times 1000) \quad (2)$$

式中: V ——滑动速率, m/s ;

D ——轴承外径, mm ;

n ——主轴转速, r/min 。

经对各配方综合评价后,选取 2[#]、3[#]、9[#] 配方分别制成滑动轴承,并将其装配到 89 mm 超混杂复合材料托辊上,在 PV 测试机上加载运转,进行轴承耐温试验。其初始载荷均为 245 N,待运行 30 min 之后再加载,每加载一次持续运转 15 min,测温后再

继续加载,直至轴承因温升过高而熔融失效。表 2 为 PTFE 基复合材料轴承耐温试验结果,其中极限载荷为轴承失效时托辊所承受的累加外载荷总量。为探讨纳米粒子的作用,专门制作了未加纳米 Al_2O_3 的相应配方轴承以作对比试验。

表 2 PTFE 基复合材料轴承耐温试验结果

项 目	PTFE 纳米基 复合材料轴承			未加纳米 Al_2O_3 的 PTFE 复合材料轴承		
	2 [#]	3 [#]	9 [#]	A	B	C
极限载荷 /N	1420	1400	1350	1224	1211	1015
失效温度 /℃	257	262	260	252	210	240
PV 值 / $\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.49	1.47	1.42	1.285	1.272	1.066

通常一种材料的 PV 值并非定值,而是可随滑动速度的变化而变化,如填充 20% 玻纤、5% 石墨的 PTFE 复合材料滑动轴承,在滑动速度分别为 3、30、300 m/s 时所对应的 PV 值分别是 0.39、0.53、0.78 $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ ^[5]。笔者研制的 PTFE 基纳米复合材料轴承直径 20 mm,工作转速 1 500 r/min,工作压力 0.9 ~1.0 MPa,因此 $PV = 1.42 \sim 1.49 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$,比文献[1]所介绍的 PTFE 复合材料滑动轴承均有大幅度提高。因此 PTFE 基纳米复合材料滑动轴承实用性强,推广应用前景广阔。

2.3 许用温度

PTFE 基复合材料的一个显著弱点是对温度的敏感性,因此许用温度是衡量复合材料轴承应用特征的又一指标。温度对复合材料轴承的摩擦系数、磨损率和极限 PV 值均有重要影响。在正常运行期,轴承表面所产生的热量正比于 PV 值,温度小于材料的许用温度时,材料不产生永久性变形或损伤,其摩擦系数随滑动速度的增加而增大,随压力的增加而减小;磨损率随滑动速度的增加而增大,随压力的增加而增大,正比于 PV 值。当轴承温度升高到材料的许用极限温度时,其承载能力会下降到室温的 50% 以下。如再继续,则会出现急剧升温,轴承与轴会由粘弹性接触变成粘着甚至熔融破坏。此时

温度为复合材料轴承的失效温度。经测试,PTFE 纳米复合材料轴承的失效温度为 257 ~262 ℃,因此其许用温度可达 230 ℃。

3 应用实例

自 2000 年 8 月开始在关风器上应用 25 mm PTFE 基纳米复合材料轴承,通过与金属轴承比较,该轴承具有转动灵活、平稳、降噪、不怕灰尘、耐磨、使用寿命长、不污染面粉等特点,可有效节省维护保养费用,减轻维护工作量,深受用户好评。

4 结论

(1) 尽管纳米 Al_2O_3 对复合材料的增强作用远不如短切碳纤维明显,但从纤维用量相同的配方可以看出,添加纳米 Al_2O_3 可以获得更好的力学性能。

(2) 石墨的减摩效果明显优于纳米 Al_2O_3 ,而且随着石墨用量增大,复合材料的摩擦系数减小。但是单一石墨填充 PTFE 的摩擦系数虽小,体积磨损量却增大,磨损性能不理想。

(3) 通过合理设计,由玻璃纤维、纳米 Al_2O_3 、石墨、 MoS_2 共同填充增强 PTFE 复合材料的力学性能、摩擦磨损性能最佳,优于单一组分填充增强,适于用作承力摩擦制品。

(4) PTFE 基纳米复合材料滑动轴承的极限 PV 值可达 1.42 ~1.49 $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$,其工作 PV 值可定为 1.3 $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ 左右。

(5) 无润滑 PTFE 基纳米复合材料滑动轴承的极限 PV 值条件下其失效温度可达 257 ~262 ℃,因此预计其长期使用温度可达 230 ℃。

参 考 文 献

1 区英鸿. 塑料手册. 北京: 兵器工业出版社, 1991.

2 何春霞, 顾红艳, 丁为民. 不同纳米材料填充聚四氟乙烯复合材料. 工程塑料应用, 2000, 28 (12) : 1

3 GB/T 7948 — 1987 塑料轴承极限 PV 值试验方法

4 王孝军, 杨杰, 龙盛如. 纳米材料及其在工程塑料改性中的应用. 工程塑料应用, 2002, 30 (10) : 47

5 王承鹤. 塑料摩擦学. 北京: 机械工业出版社, 1994.

DEVELOPMENT OF PTFE/ Al_2O_3 MATRIX NANO-COMPOSITE SLIDING BEARING

Li Xuemin, Su Yanliang, Sun Chengdong

Jia Yancai, Zhao Shunwei

(Jinan University, Jinan 250022, China) (Shandong Plastic Institute, Jinan 250001, China)

ABSTRACT PTFE matrix nano-composite filled with graphite, MoS_2 , glass fiber, carbon fiber and nano- Al_2O_3 is prepared. The mechanical property of the composite is studied. The sliding bearings for machinery are prepared with PTFE matrix composite. Their design points and molding technology are introduced. The PV value of the composite bearings can reach 1.42 ~1.49 $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$, their service temperature is above 230 ℃ and the initial application result is good.

KEYWORDS PTFE, nano-composite, sliding bearing, friction and wear, PV value