

UHMWPE/蒙脱土纳米复合材料滑动轴承的研制

于寿山

王庆昭

(烟台泰士塑料制品有限公司,烟台 264005) (山东科技大学化学与环境工程学院,青岛 266510)

摘要 采用蒙脱土(MMT)层间聚合改性和熔体插层方法制备了超高分子量聚乙烯(UHMWPE)/MMT纳米复合材料,并将复合材料注射成型为纯复合材料和复合型两类滑动轴承。研究了UHMWPE/MMT纳米复合材料的摩擦性能,结果表明,这是一种性能优异、成型简便的摩擦磨损材料。提出了该材料滑动轴承设计的基本要求,为实际应用提供了理论依据。

关键词 超高分子量聚乙烯 蒙脱土 纳米复合材料 摩擦 滑动轴承

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)是一种综合性能优异的热塑性工程塑料,具有其它工程塑料所无可比拟的抗冲击性、耐磨损性、低摩擦系数、自润滑性、耐化学腐蚀性、耐低温性、耐应力开裂、抗粘附能力,被认为是“令人惊异的塑料”。UHMWPE作为优良的摩擦磨损材料,已经得到了广泛的研究与应用^[1~4]。如利用UHMWPE的生物相容性、耐磨损性、自润滑性及摩擦系数低的优点制作人工关节。更多的是作为滑动轴承,用于低速、低载的场合。

UHMWPE滑动轴承具有很多优点,如使用寿命长、噪声低、可无润滑、可容纳异物等,但同样存在很多缺点,如导热性差、线胀系数大、易蠕变、成型困难等,这些缺点限制了UHMWPE滑动轴承的应用范围,导致其在实际应用中无法与聚四氟乙烯(PTFE)、聚甲醛(POM)、尼龙(PA)甚至酚醛树脂相比。

为解决UHMWPE作轴承材料使用所存在的问题,使其广泛应用于各种合适的工况,笔者制备了具有良好流动性的UHMWPE/蒙脱土(MMT)纳米复合材料^[5],从根本上解决了成型困难的问题,可方便地进行注射和模压成型,提高了热导率、降低了线胀系数,研究了摩擦性能和作为滑动轴承使用的范围,并注射成型为纯复合材料和复合型两类滑动轴承,为这种新型摩擦材料的应用奠定了基础。

1 实验部分

1.1 原材料

UHMWPE: M-II,分子量250万~300万,北京助剂二厂;

MMT:采用山东莱西膨润土矿出产的膨润土原矿,经洗选加工得到含量为95%的钠基MMT,粒度为10 μm,离子交换容量为96 meq/100 g。

甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC):聚合级,齐鲁石油化工研究院。

1.2 仪器与设备

摩擦磨损试验机: M-200型,上海工业大学;

高速混料机: SHR-10A型,张家港市轻工机械有限公司;

双螺杆挤出机: KP50-100型,南京杰恩特机电有限公司;

注塑机: BT55V-H型,广州博创机械有限公司。

1.3 UHMWPE/MMT纳米复合材料的制备

取5份钠基MMT与95份蒸馏水混合,高速搅拌20 min,得到MMT悬浮液。将DMC与蒸馏水配成10%水溶液。将2倍于MMT可交换离子物质的量的DMC水溶液与MMT悬浮液混合,在60℃下,强烈搅拌16 h,自然冷却至室温,将反应液抽滤,得白色沉淀物,用去离子水洗涤至无Cl⁻(用Ag⁺检验)。将制得的产品于80℃真空干燥24 h,研磨过30 μm(200目)筛即得DMCMMT,密封保存。

将50 g DMCMMT与少量引发剂BPO加入到60 g乙醇中,搅拌10 min,将混合液加入到1 kg UHMWPE中,在高速混料机中混合10 min后,再将共混物用双螺杆挤出机挤出造粒,此时MMT片层剥离,以纳米尺度分散于UHMWPE相中,即得UHMWPE/MMT纳米复合材料。

1.4 UHMWPE/MMT纳米复合材料轴承的制备

(1) 纳米复合材料轴承的制备

将UHMWPE/MMT纳米复合材料用注塑机注射成型为外径60 mm、内径15 mm、厚度10 mm的环形物,然后经车削加工制得各种尺寸的试验用轴承。

(2) 塑料/金属复合轴承的制备

复合轴承的结构如图1所示。将金属轴瓦置于

注塑模具内,然后将 UHMWPE/MMT 纳米复合材料注射到轴瓦的内壁(成为轴衬),得到复合轴承。轴衬厚度为 2 mm。

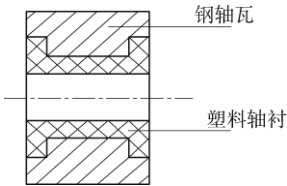


图 1 复合轴承示意图

1.5 摩擦性能测试

摩擦性能在摩擦磨损试验机上测试,试验轴承为从动试件,内表面与定轴之间进行滑动,用热敏电阻测定定轴的温度。

2 结果与讨论

2.1 用于轴承的几种常用工程塑料性能比较

作为滑动轴承使用的工程塑料,除了应具有良好的耐磨损性、低摩擦系数、自润滑性外,还应具有良好的导热性能和较低的线胀系数,以及较高的热变形温度。表 1 列出了几种常用工程塑料的相关性能。从表 1 可以看出,UHMWPE 是一种优异的摩擦磨损材料,但是热变形温度低,线胀系数大。

表 1 作为轴承使用的几种常用工程塑料的相关性能

项目	PTFE	PA6	PA66	POM	UHMWPE
磨耗强度 / mg(砂磨法)	130	100	120	170	20
动摩擦系数	无润滑	0.04 ~0.25	0.15 ~0.40	0.15 ~0.40	0.15 ~0.35
	水润滑	0.04 ~0.08	0.14 ~0.19	0.14 ~0.19	0.10 ~0.20
	油润滑	0.04 ~0.05	0.03 ~0.15	0.02 ~0.11	0.05 ~0.10
热导率 / W · (m · K) ⁻¹	0.25	0.33	0.33	0.28	0.35
线胀系数 / ×10 ⁻⁴ K ⁻¹	0.50	0.87	0.98	0.47	1.50
热变形 温度 /℃	121	180	190	170	80

在实际应用中,作为滑动轴承使用的工程塑料几乎没有纯树脂,都需经填料改性后方能使用。改性后的 PTFE 的磨损率可降低 95%,热导率可提高 5 倍;PA 和 POM 也都需添加纤维或润滑剂进行改性,以提高轴承的摩擦性能。

UHMWPE 也可以通过添加固体填料进行共混改性,但是由于 UHMWPE 的特殊聚集态结构,与固体填料的相容性差,共混改性往往达不到预期效果,甚至可能降低摩擦性能。UHMWPE 熔体呈高弹态,目前制备 UHMWPE 轴承只能用烧结法,所以填料在 UHMWPE 基体树脂中的分散很差,更重要的是

烧结法的生产效率低,成本高,并且无法成型结构复杂的轴承。笔者认为成型加工成本高和共混改性效果差是制约 UHMWPE 轴承广泛应用的关键因素。

层状结构的 MMT 剥离后,以纳米尺度均匀地分散在 UHMWPE 中,MMT 片层与 UHMWPE 大分子链之间存在着较强的相互作用,这些对 UHMWPE 的聚集态结构产生了巨大的影响,赋予了它新的性能,如降低了线胀系数、提高了热导率,最主要的是这种纳米复合材料可以像 PA 和 POM 那样进行注射成型,从根本上解决了 UHMWPE 加工难的问题。

2.2 UHMWPE/MMT 纳米复合材料的摩擦性能

摩擦系数 μ 通过试验机记录的扭矩计算得到:

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{M}{RP} = \frac{MS}{RW}$$

式中: F ——摩擦力, N;
 P ——摩擦面单位面积所承受的载荷, MPa;
 M ——扭矩, N · m;
 R ——轴承半径, cm;
 W ——施加的载荷, N;
 S ——摩擦面积, cm²。试验中 S 为试件内孔在直径上的投影面积, $S = DL$, D 为内孔直径(cm), L 为试件长度(cm)。

由于扭矩是旋转阻力的综合反映,与轴的硬度、表面粗糙度、温度、湿度,特别是轴与内孔的间隙都有密切的关系,所以试验所得的摩擦系数是一个相对值。在轴不变,温度、湿度相对恒定条件下,取轴孔间隙为 0.16 mm,然后在一定的速度和载荷下开始试验,待运转稳定后,取记录仪上平直段的扭矩作为计算摩擦系数的扭矩,这样可以排除温度的影响。

(1) 摩擦系数与滑动速率之间的关系
为了尽量与实际应用的条件相近,笔者确定的试验载荷为 90 N,换算成压力约为 0.6 MPa。

图 2 为干摩擦时摩擦系数与滑动速率的关系曲线。从图 2 中看到,摩擦系数随滑动速率提高而增加,但增加幅度较小,说明 UHMWPE/MMT 纳米复合材料的摩擦系数对滑动速率的依赖性很小。

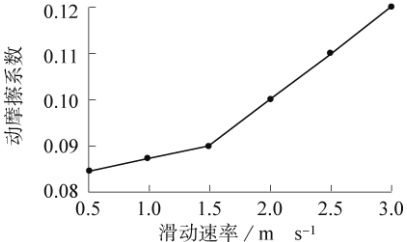


图 2 摩擦系数与滑动速率的关系曲线

UHMWPE/MMT 纳米复合材料干摩擦时摩擦系数为 0.085 ~0.12,比纯 UHMWPE 降低 25% 以上。

(2) 摩擦系数与载荷之间的关系

选择滑动速率 1.5 m/s 为额定速率,施加不同的载荷,测定相应的摩擦系数。图 3 为干摩擦时摩擦系数与载荷的关系曲线。为了方便地进行比较,将施加的载荷换算成摩擦面所承受的压力。

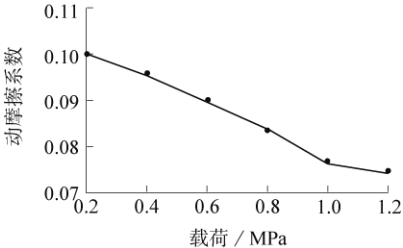


图 3 摩擦系数与载荷的关系曲线

从图 3 可见,摩擦系数随载荷的增加而减小,但减小幅度较小。其原因是随载荷的增加,轴与轴承的接触面积增大,逐渐接近表观面积。在计算摩擦系数时,假定接触面积 S 是定值,在低载荷时, S 是大于真实接触面积的,所以计算所得的摩擦系数偏大。而随着载荷增大,真实接触面积增大,逐渐接近于 S ,计算所得的摩擦系数逐渐减小,接近真实值。

(3) 润滑条件下的摩擦系数

测试摩擦系数时,采用向摩擦面连续喷水雾的方法来实现水润滑,用在轴上涂润滑脂的方法实现油润滑。在水润滑和油润滑的条件下,摩擦系数基本与滑动速率无关;而摩擦系数随载荷的变化与干摩擦相似。UHMWPE/MMT 纳米复合材料的动摩擦系数可归纳为:空气条件下(干摩擦)为 0.085 ~ 0.12;水润滑和油润滑条件下为 0.05 ~0.07。

(4) 使用极限 PV 值

PV 值是指滑动轴承摩擦面单位面积所承受的应力(P)与滑动的线速度(V)的乘积。使用极限 PV 值是指轴承可以长期使用的最大 PV 值,是衡量轴承材料的最重要的指标之一。

UHMWPE/MMT 纳米复合材料具有优异的耐磨性,其耐磨性比纯 UHMWPE 提高 40% 以上。耐磨性决定了轴承的使用寿命,而在实际应用中,轴承的失效通常并不是由于磨损造成的,而是由于使用条件不当,即超出使用极限 PV 值造成的。

影响轴承使用极限 PV 值的因素很多,但最主要的是摩擦生热使得摩擦面温度升高。温度升高到一定程度,将使轴承的压缩强度、耐磨性、耐老化性能急剧下降,导致轴承快速失效。综合考虑 UHM-

WPE/MMT 纳米复合材料的各项性能,笔者定义平衡温度 80℃ 时的 PV 值为轴承的使用极限 PV 值。

当平衡温度(也就是 ΔT_m) 确定后,摩擦系数越小,热导率越大、传热面积越大,轴承的使用极限 PV 值就越大。

笔者在室温(约 25℃) 下对 UHMWPE/MMT 纳米复合材料轴承和复合轴承分别测定干摩擦、水润滑和油润滑条件下的使用极限 PV 值。在 0.5、1.5、3.0 m/s 三种线速度下,通过逐渐增加载荷,使轴温平衡在 80℃ 左右,试验时间约 16 h,结果见表 2。

表 2 UHMWPE/MMT 纳米复合材料轴承及塑料/金属复合轴承的使用极限 PV 值 MPa · m/s

摩擦方式		线速度 / m · s ⁻¹		
		0.5	1.5	3.0
纳米复合材料轴承	干摩擦	0.55	0.35	0.24
	水润滑	1.25	0.93	0.70
	油润滑	1.04	0.85	0.75
塑料/金属复合轴承	干摩擦	0.67	0.52	0.32
	水润滑	1.30	1.12	0.78
	油润滑	1.10	1.02	0.80

从表 2 可以看出,在同等条件下,水润滑时的 PV 值最大,这是因为试验条件下,水作为散热介质,带走了大量的摩擦热。从表 2 还可以看到,使用极限 PV 值随线速度提高而以较大幅度降低,有着显著的速度依赖性,这在使用中一定要注意。

2.3 UHMWPE/MMT 纳米复合材料轴承设计

确定了材料的摩擦系数、使用极限 PV 值后,在设计 UHMWPE/MMT 纳米复合材料轴承时,还应注意以下几个问题。

(1) 运转间隙

滑动轴承与轴的运转间隙是轴承设计中的一个重要参数。运转间隙过大会导致轴的径向振动,形成冲击载荷;间隙过小会导致轴承“抱轴”,使扭矩急剧增大,温度迅速上升。

UHMWPE/MMT 纳米复合材料轴承正确的运转间隙是主轴容差、安装容差和热胀容差三部分之和。

主轴容差是指轴与轴承相对滑行的基本间隙,对所有材料的轴承都是相同的,不同轴径的主轴容差可在各种机械手册中查到,如轴径 25.4 mm,主轴容差为 0.127 mm。

安装容差是指滑动轴承过盈安装在轴承座中所产生的径向收缩,由于塑料是粘弹性材料,纯塑料轴承安装时会产生一定的形变,从而使内径减小。但是,复合轴承可以忽略安装容差。

热胀容差是指温度升高引起的径向膨胀, 从而使轴承内径减小的值。热胀容差与轴承材料的线胀系数、塑料轴承厚度、温度升高的大小有关:

$$C = \alpha H \Delta T \times 2(\text{或 } 3)$$

式中: C ——热胀容差;

α ——轴承材料的线胀系数, K^{-1} , UHMWPE/MMT 纳米复合材料的 α 为 $0.72 \times 10^{-4}/K$, 是纯 UHMWPE 的一半;

H ——塑料轴承的壁厚, mm;

ΔT ——安装和运转时的温度差, K;

2(或 3)——限制系数。

因为塑料轴承总是安装在金属轴承座或作为轴衬使用, 而金属的线胀系数比塑料的小一个数量级以上, 所以塑料轴承的外径是在限制状态下, 这时热膨胀发生在内径和厚度上, 限制系数为 2, 如果厚度方向也被限制, 则限制系数为 3。

如复合轴承安装温度 $20^\circ C$, 运转平衡温度为 $80^\circ C$, 壁厚为 2 mm, 则热胀容差为 0.23 mm; 如轴径为 25.4 mm, 主轴容差为 0.127 mm, 忽略安装容差, 那么轴承内径应为 24.7 mm。

(2) 长径比

UHMWPE/MMT 纳米复合材料的摩擦系数随载荷增加而减小, 因此, 在使用极限 PV 值的范围内, 应尽量减小轴承的长度。但也不能无限制地减小长度, 摩擦面的极限压力为 2 MPa, 这是 UHMWPE/MMT 纳米复合材料的压缩强度, 在这个压力以下, 该材料不会产生压缩形变。建议该类轴承的长径比为 1 0.5 ~ 0.8。

(3) 厚度

UHMWPE/MMT 纳米复合材料的热导率为 $0.68 W/(m \cdot K)$, 比纯 UHMWPE 提高了近 1 倍, 但仍是不良导热体。从散热和热胀容差的角度来说, 轴承

的厚度应尽量小。考虑使用寿命、成型难度和加工精度等因素, 复合轴承轴衬的厚度应为 1 ~ 2 mm。在较小 PV 值条件下可采用纯塑料轴承, 由于摩擦功较小, 温升较小, 不必考虑厚度问题, 只需考虑成型难度和制造成本。

3 结论

(1) UHMWPE/MMT 纳米复合材料是一种性能优异的摩擦、磨损材料。与纯 UHMWPE 相比, 其摩擦系数降低了 25%, 耐磨性提高了 40%, 线胀系数降低了 1 倍, 热导率提高了 1 倍。更重要的是, 这是一种成型加工性能良好的材料, 可以方便地模压或注射成各种尺寸和形状的滑动轴承。

(2) UHMWPE/MMT 纳米复合材料的摩擦系数随滑动速率的提高略有增加, 随载荷的增加而略有降低。

(3) UHMWPE/MMT 纳米复合材料轴承的使用极限 PV 值随滑动速率提高而降低。在水润滑的条件下, 其使用极限 PV 值最高。

(4) 在干摩擦条件下, 应尽量降低轴承壁厚、长径比, 提高传热效率、降低摩擦功, 以提高使用极限 PV 值。

(4) 要根据主轴容差、安装容差, 特别是热胀容差正确确定轴承运转间隙。

参考文献

- 熊党生, 何春霞. 超高分子量聚乙烯的摩擦特性. 摩擦学报, 2002(6): 454
- 陈战, 王家序, 秦大同. 超高分子量聚乙烯工程塑料的摩擦磨损性能研究. 农业机械学报, 2002(1): 103
- 叶敏, 俞建卫, 焦明华. 塑料轴承的应用特性分析. 安徽大学学报, 1996(4): 95
- 王家序, 陈战, 陈敏. 超高分子量聚乙烯塑料轴承设计研究. 润滑与密封, 2001(4): 2
- 王庆昭, 刘宗林. 超高分子量聚乙烯/纳米蒙脱土复合材料的制备与表征. 中国塑料, 2003, 17(8): 32

DEVELOPMENT OF SLIPPING BEARING OF UHMWPE/MMT NANOCOMPOSITE

Yu Shoushan

(Yantai Taishi Plastics Product Co. Ltd., Yantai 264005, China)

Wang Qingzhao

(School of Chemistry and Environmental Engineering, University of Science and Technology in Shandong, Qingdao 266510, China)

ABSTRACT Two kinds of slipping bearings, one was of pure nanocomposite and the other was of nanocomposite/steel composite, were manufactured by UHMWPE/MMT nanocomposite which was made from the mixture of interlaminated polymerization modified montmorillonite (MMT) and ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) by melt intercalation. The friction property of the nanocomposite was studied. The results indicated that this nanocomposite material was of outstanding friction performance and could be easily moulded as bearings. The foundational rule was suggested to instruct the design and application of the bearings.

KEYWORDS UHMWPE, montmorillonite, nanocomposite, friction, slipping bearing