

自润滑关节轴承衬垫磨损机理研究

董炳武, 邓四二, 张文虎

(河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 为了研究自润滑衬垫材料 PTFE 织物复合材料在高频轻载条件下的磨损性能, 本文以高频轻载自润滑关节轴承关键部件自润滑衬垫为研究对象, 深入研究了自润滑材料的失效模式, 结合高速压摆轴承试验机对自润滑衬垫材料磨损性能进行分析。结果表明: 在相同条件下, 外加载荷越大, 材料温度上升越高, 磨损量也越大; 在相同条件下, 摆动频率越大, 材料温度上升越高, 磨损量也越大。

关键词: 自润滑关节轴承; 衬垫材料; 磨损机理

1 引言

在自润滑关节轴承中, 失效模式主要为自润滑衬垫材料的磨损失效, 刘建等^[1]研究了 PTFE 编织复合材料在不同摆动频率、载荷下对摩擦因数的影响规律, 表明材料的摩擦因数随载荷增大呈稳定降低趋势, 最后趋于平稳且载荷对摩擦因数的影响大于频率的影响, 对不同载荷频率下产生的 PTFE 编织复合材料转移膜的分析, 从微观上解释了摆动频率、载荷对 PTFE 编织复合材料摩擦因数的作用机理。张智源等^[2, 3]研究了循环次数和循环温度对 PTFE 编织复合材料摩擦因数的影响, 表明随着循环次数的增加 PTFE 编织复合材料的摩擦因数先升高后趋于平稳, 在达到极限磨损量后, 摩擦因数急剧上升, 材料发生失效; 同时摩擦温度的升高会导致 PTFE 编织复合材料进入非正常磨损状态。

King R.B^[4]研究了自润滑衬垫在常温和高温下的磨损特性, 表明在高温条件下自润滑衬垫更容易发生失效。王彻^[5]制备 TiC/Y₂O₃/TiAl 基自润滑材料制备的关节轴承并在高温条件下进行试验, 表明该基体磨损率远低于普通的关节轴承。综上所述, 国内外专家学者对自润滑关节轴承衬垫材料的磨损性能进行了大量研究, 但是缺乏对于该材料在高频轻载工况下的磨损机理研究。鉴于此, 本文研究了自润滑衬垫

材料 PTFE 织物复合材料在高频轻载条件下的磨损性能, 为高频轻载自润滑关节轴承磨损寿命模型提供了理论基础。

2 试验方法

自润滑关节轴承一般运动模式为绕内圈外球面进行摆动, 是一种简单的滑动摩擦, 参考 ISO-7148-1999^[6]。通过加载油缸对摩擦副进行加载, 试样运动方式为对偶环与动力轴相连接, 做左右往复运动, 模拟关节轴承摆动过程, 试验所用衬垫和下方试验台进行贴合处理, 运动过程中保持静止。加载方式为油缸输出一定载荷对材料进行施压, 摩擦副结构如图 1、图 2 所示。关节轴承试验中关于材料的摩擦磨损试验有多种, 一般有销盘接触形式、环块接触形式、轴瓦接触等形式。自润滑材料用于关节轴承铰接处, 为往复的摆动磨损形式, 结合自润滑关节轴承的实际情况, 选用轴瓦摆动接触形式。为了更好地对摩擦副进行观察与数据的采集, 将自润滑材料粘结在关节轴承的支撑座上。本研究采用轴瓦式结构的支撑方式模拟径向自润滑关节轴承寿命试验, 试验工况与径向自润滑关节轴承工况条件基本相同, 此摩擦副主要由三个部件组成: 芯轴、衬垫、支撑座, 支撑座加载系统相连, 施加并保持一定的压力, 随着芯轴的往复摆动, 自润滑材料衬垫出现磨损。

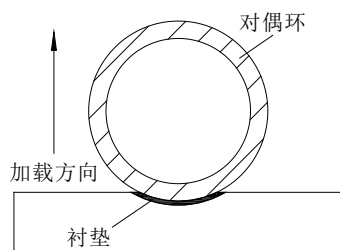


图 1 摩擦副接触形式

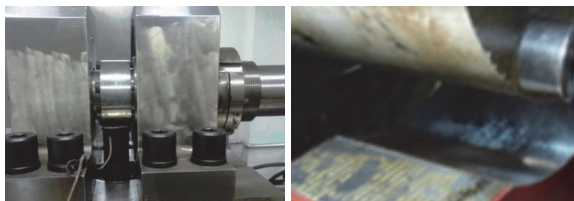


图 2 摩擦副实物图

在对高频轻载自润滑关节轴承衬垫材料进行试验前,对偶环化学成分如表 1 所示。试样托过度夹具化学成分如表 2 所示。

表 1 9Cr18 不锈钢化学成分

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr
含量 %	0.9~1.0	0.8	≤0.8	0.03	0.035	17~19

表 2 17-4PH 不锈钢化学成分

元素	C	Cr	Ni	Cu	Nb/Cb	Mn
含量 %	0.04	16.5	4.5	3.3	0.3	0.7

3 参数设置

试验之前使用砂纸将试样进行打磨,然后用特殊溶液对材料进行清洗。安装完成后,用温度控制箱控制外界环境因素保持不变,实验室环境为室温 25℃,相对湿度 60%,保持试件初始温度恒定,对试样进行 35 min 静态加载。针对特定的工况条件下,在六个不同试验载荷和频率条件下测量自润滑材料的摩擦温度和磨损量的变化规律。试验参数如下:液压缸加载载荷分别为 2.5 MPa、5 MPa、7.5 MPa、10 MPa、12.5 MPa 和 15 MPa;摆频分别 5 Hz、10 Hz、15 Hz、20 Hz、22 Hz 和 25 Hz;摩擦循环为 120 000 次,初始条件保持摆角 3° 不变,试验参数取值如表 3 所示。

试验前需要静止加载额定载荷 15 min,保持自润滑材料处于稳定的压力状态,试验过程中,观测试件在不同载荷和频率下的磨损特性。在整个试验中,安装在托件下方的温度检测器实时监测温度变化,位移传感器来监控磨损量变化。每组试验完成后对摩擦副材料进行自然冷却降至室温。

表 3 载荷与频率数值

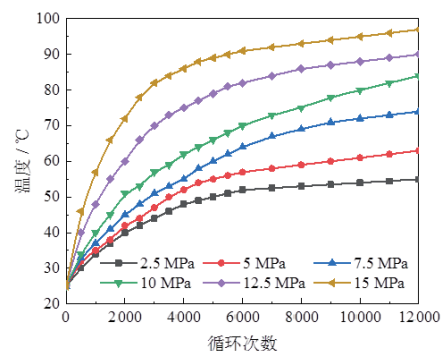
参数	数值					
应力 P/MPa	2.5	5	7.5	10	12.5	15
频率 f/Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	22 Hz	25 Hz

4 试验结果与讨论

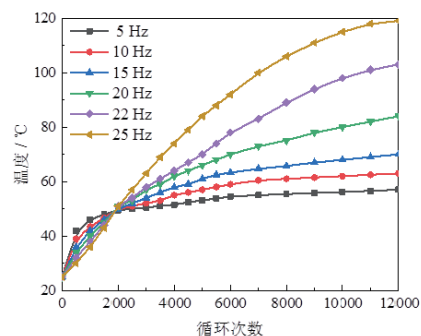
编织材料存在高频轻载的使用工况,为分析其在该工况条件下的摩擦磨损性能,对材料在高频轻载下的摩擦学性能进行探究。

衬垫材料在高速压摆试验机作用下磨损性能会发生一部分改变,摩擦副在高速摆动下剧烈摩擦,产生大量的热量,由摩擦做功变为热能。此时,摩擦副温度升高,材料耐磨损性能降低,由温度监测装置实时记录温度的变化。

对全寿命摆动周期的温升数据进行整理分析,如图 3 所示为摩擦温度随摆动次数的变化关系,在摩擦初期,摩擦温度急剧上升,经过 2 500 次摆动摩擦温度上升到 51℃,此时的温度变化的斜率最大。由 2 500 至 12 000 的摆动次数情况分析,这一阶段的摩擦温度上升趋势处于稳定阶段,衬垫在这一范围内自润滑关节轴承衬垫处于良好的润滑状态 and 具有良好的热稳定状态。



(a) 载荷对温度的影响



(b) 频率对温度的影响

图 3 不同工况下对温度的影响

由图 3 可知: 在高频轻载工况下, 保持频率不变, 衬垫表面温度随载荷增加而增加, 当摆次较大时, 摩擦温度随频率和应力增加有较大幅度的提升, 当摆次一定时, 摩擦温度随频率的增加而升高, 相较于载荷的增加, 频率的提高对摩擦温度有较大的影响。在摩擦过程中, 产生的摩擦热如公式 (1) 所示。

$$Q = kP^m v^n \quad (1)$$

式中, Q 是磨损过程中产生的摩擦热; v 是摩擦速度, 在高速压摆试验机中频率对应的是摩擦速度, 摆动频率越快, 代表线速度越高; P 是接触应力。

由式 (1) 可知, 在摩擦过程中, 增加接触压力或摩擦速度都会增加摩擦副产生的热量。由热力学第二定律可知, 摆动频率越快, 摩擦热散热越快, 所以最后温度趋于稳定。

图 3 (a) 为保持频率和摆角一定, 在不同载荷条件下温度随摆动次数的变化曲线, 在不同载荷条件下, 摩擦温度均在摩擦初期急剧升高, 且随着摩擦时间的增加, 该变化减缓。这是由于摩擦发热阶段一般有三个, 第一阶段属于上升期, 第二阶段属于平稳期, 第三阶段属于剧烈上升失效阶段, 由于设计时间不足以达到衬垫剧烈磨损阶段, 只能从图中反映出第一、二阶段。图中各条曲线表明, 频率和摆动角度保持不变, 摩擦热随载荷的增加而升高, 且载荷越大温度达到平稳期所需时间更长, 载荷为 2.5 MPa、摆次为 2 500 次左右时摩擦温度在 50℃ 左右稳定 (在一定范围内波动); 载荷为 15 MPa、摆次为 4 000 次左右时摩擦温度稳定在 80℃ 左右 (在一定范围内波动)。

图 3 (b) 为保持载荷和摆角一定, 在不同频率条件下温度随摆动次数的变化曲线。从图中可以看出, 摩擦温度随着摆动次数的增加而升高, 且前期循环过程中温度剧烈升高, 在摆动中期, 温度上升趋势逐渐变小, 在摆动后期, 温度达到稳定, 此时, 摩擦副材料进入稳定磨损阶段。对比图中不同频率下的曲线可以看出, 在循环前期, 频率越低温度上升越快, 频率越高温度上升得越慢, 这是由于摆动频率越快, 摩擦热散热越快, 所以最后温度趋于稳定。同时, 低频条件下温度达到平衡状态的温度大约为 55℃, 而在高频条件下温度还未达到平衡状态, 说明此时材料还未进入稳定磨损阶段, 同时也说明高频比低频达到温度稳定状态的时间越长如公式 (2) 所示, 解释了这一现象。衬垫材料在高速压摆试验机作用下磨损性能会发生一部分改变, 摩擦

副在高速摆动下剧烈摩擦, 产生大量的热量, 由摩擦做功变为热能。此时, 摩擦副温度升高, 材料耐磨损性能降低。在摩擦副中, 根据热力学定律, 摩擦产生的摩擦热会先向受热能力强的材料中转移, 在此过程中, 慢慢向受热能力弱的材料中转移。

$$\frac{q_1}{q_2} = \sqrt{\frac{c_1 \rho_1 \lambda_1}{c_2 \rho_2 \lambda_2}} \quad (2)$$

式中, c 表示比热容, ρ 表示密度, λ 表示导热系数。

对上述试验在不同条件摩擦下, 由摩擦升温产生的磨损量进行检测, 图 4、图 5 分别为磨损量与应力、频率的变化关系。

自润滑衬垫和衬垫的失效主要由于摩擦副之间的相互对磨产生的磨损, 即磨损失效。一般自润滑材料的整个磨损由三个阶段, 其中磨合阶段, 属于跑和阶段, 衬垫和衬垫会产生轻微的磨损, 导致此时的摩擦系数偏大, 而稳定磨损阶段, 自润滑衬垫的磨损率最小且最为稳定。由图 4、图 5 可知, 在达到 12 000 次左右, 自润滑衬垫开始发生剧烈的磨损, 摩擦系数开始增大, 此时会产生振动和噪声, 表明衬垫即将失效。在摆动过程中, 随着摆动次数的增加, 使得自润滑关节轴承衬垫形成连续的润滑转移膜的摩擦系数逐渐形成稳定状态, 由于在摩擦的初始状态下, 衬垫的表面留有一层自润滑层, 导致起始阶段衬垫的摩擦系数随着摆动次数的增加涂层表面波峰平稳而摩擦系数略微减小, 当达到平稳磨损阶段后次后, 衬垫的摩擦系数不再发生剧烈的变化。此时说明制备的自润滑衬垫在摩擦磨损过程中, 内部材料具有均匀性、一致性和稳定性, 达到磨损后期, 摩擦系数出现急剧上升, 自润滑衬垫出现剧烈磨损阶段, 即磨损失效阶段。综上所述, 此自润滑材料的摩擦磨损总体比较平稳, 摩擦系数较小。

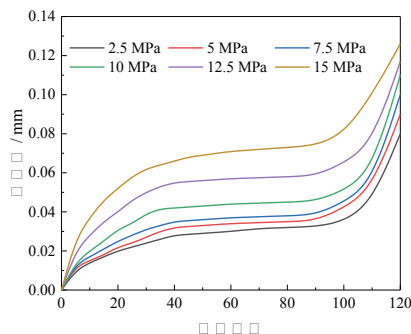


图 4 不同载荷下衬垫磨损量的变化曲线 (循环次数 × 100)

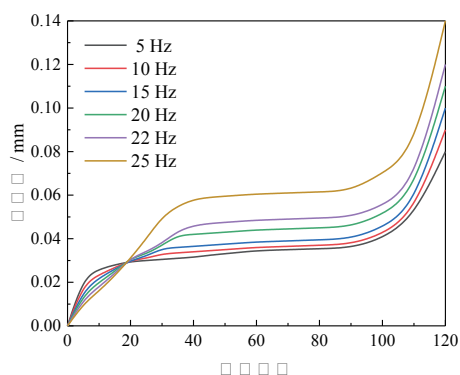


图5 不同频率下衬垫磨损量的变化曲线（循环次数 $\times 100$ ）

从图4、图5中可以看出载荷 P 或频率一定时，衬垫磨损量随着循环时间的增加而增加，且磨损初期衬垫的磨损量变化率较大，此时衬垫材料磨损过程处于磨合阶段；在磨损中期衬垫的磨损量变化率减小，此时是衬垫材料磨损过程处于正常磨损状态；在磨损后期，衬垫材料经由剧烈磨损进入异常磨损阶段，此时的关节轴承磨损机理发生变化，轴承很快进入失效状态。衬垫材料经由磨损后状态如图6所示。

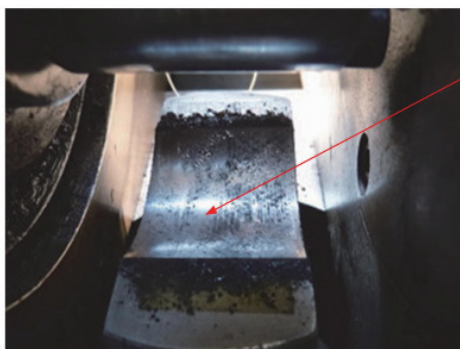


图6 自润滑衬垫失效表面

从图6中可以看出，自润滑衬垫存在磨损不均匀的现象，且磨损严重的区域出现在支撑座粘结的自润滑衬垫的两端，有比较严重的磨粒磨损和粘着磨损情况，而根据摩擦磨损的基本规律试样的磨穿现象应该发生在中间温度较高的区域，由此可见，试样的摩擦严重磨损过程可能并非出现在中间较高的区域。从图中，选取A点局部进行观察衬垫的磨损情况，此处A点表面涂层磨痕存在剥落、磨屑，磨痕区域凹凸不平，材料内部结构不够致密使得在摩擦磨损过程中出现裂纹，在循环载荷的作用下，裂纹不断地扩大，使得磨损表面部分区域出现剥落现象和剥落坑等情况，一部分在循环载荷的作用下，对弥散在周围摩擦表面受到接触压力起到压实的作用，防止裂纹的扩展。衬垫局部剥落放大图如图7所示。

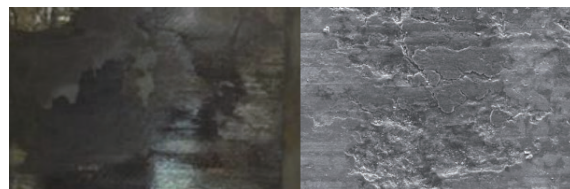


图7 局部剥落放大图

5 结语

在高频轻载工况下，保持频率不变，衬垫表面温度随载荷增加而增加，当摆次较大时，摩擦温度随频率和应力增加有较大幅度的提升，当摆次一定时，摩擦温度随频率的增加而升高，相较于载荷的增加，频率的提高对摩擦温度有较大的影响。

载荷 P 或频率一定时，衬垫磨损量随着循环时间的增加而增加，且磨损初期衬垫的磨损量变化率较大，此时衬垫材料磨损过程处于磨合阶段；在磨损中期衬垫的磨损量变化率减小，此时是衬垫材料磨损过程处于正常磨损状态；在磨损后期，衬垫材料经由剧烈磨损进入异常磨损阶段，此时的关节轴承磨损机理发生变化，轴承将快速进入失效状态。

自润滑衬垫存在磨损不均匀的现象，且磨损严重的区域出现在支撑座粘结的自润滑衬垫的两端，有比较严重的磨粒磨损和粘着磨损情况，根据摩擦磨损的基本规律试样的磨穿现象应该发生在中间温度较高的区域。

参考文献

- [1] 刘建, 张永振, 杜三明, 刘敬超. PTFE 编织复合材料摩擦特性研究 [J]. 材料工程, 2012 (08): 69-72.
- [2] 张智源, 杜三明, 张永振, 康克家. 高速条件下 PTFE 编织复合材料的摩擦磨损性能 [J]. 机械工程材料, 2014, 38 (04): 46-49+54.
- [3] 康克家, 杜三明, 张永振, 赵飞. 高速摆动条件下 PTFE 编织复合材料干摩擦热行为研究 [J]. 材料工程, 2011 (11): 15-17+22.
- [4] King R.B.. Wear properties of dry bearing liners at ambient and elevated temperatures [J]. Elsevier, 1979, 56 (1).
- [5] 王彻. TiC/Y₂O₃/TiAl 基自润滑关节轴承摩擦磨损特性研究 [D]. 济南大学, 2019.
- [6] 滑动轴承 - 轴承材料的摩擦特性试验; 第一部分: 边界润滑条件下轴承材料 / 配对材料 / 油组合的摩擦磨损特性试验 [J]. 内燃机配件, 1987 (S2): 110-114.