

低速大扭矩液压马达摩擦副磨损机制研究

葛正菊

佛山市顺德区中意液压有限公司 广东省 佛山市 528300

摘要: 低速大扭矩液压马达因低噪声、大输出扭矩、高效率、低速稳定性的特点得到广泛应用,而摩擦副磨损对低速大扭矩液压马达的应用性能造成了极大的威胁。因此,文章以低速大扭矩液压马达为研究对象,结合低速大扭矩液压马达的结构,论述了低速大扭矩液压马达摩擦副的磨损特性和机制,希望为低速大扭矩液压马达摩擦副的运行维护提供一些参考。

关键词: 低速;大扭矩;液压马达;摩擦副;磨损机制

前言: 近几年,全球各个地区高度关注环保问题,使用环保型高水基液的液压马达成为现代液压技术研究的热点。当前,环保型高水基液因独具无毒性、抗燃性、低粘度、大刚度特点,在低速大扭矩液压马达中得到了广泛应用。但是,因高水基介质润滑性不佳,低速大扭矩液压马达摩擦副的磨损问题亟待解决。因此,研究低速大扭矩液压马达摩擦副磨损机制具有非常突出的现实意义。

1 低速大扭矩液压马达的结构

低速大扭矩液压马达的输出扭矩与最大角速度比值大于 $5N \cdot m \cdot s/rad$,可以在 $100r/min$ 下直接为额定负载无波动运转提供动力,并保证最大角速度与最小角速度差值、平均角速度的比小于等于 10% 。从基本形式来看,低速大扭矩液压马达包括静力平衡马达、曲柄连杆马达、多作用内曲线马达、径向柱塞摆缸式马达等,其平稳运转速度分别为 $<5r/min$ 、 $>3r/min$ 、 $0.5\sim 1r/min$ 、 $5r/min$ ^[1]。

静力平衡马达无连杆,因零件数量少、结构简单、外特性佳的优势而广泛应用。该马达由壳体、五星轮、柱塞、压力环、配流轴组成,主要工作部件停留在静力平衡状态,额定工作压力大于 $14MPa$ 但小于 $25MPa$,排量大于 $0.83L/r$ 但小于 $7.72L/r$,最大工作压力大于 $17.5MPa$ 但小于 $30.0MPa$ 。

曲柄连杆马达兼具性能可靠、结构简单、价格低廉、转速适中的优势,由缸体、连杆、活塞、曲轴、配油轴、配流套组成,额定工作压力可达 $25MPa$ 。

多作用内曲线马达多用于挖掘机、石油钻探设备、铺路机、钻机、扫路机、叉车等设备内,由前端盖壳体、后端盖壳体、定子轨道、转子、配流器、联接法兰、传力轴、柱塞滚子组件、制动器壳体、制动器流道、制动簧片、制动片、后盖等组成^[2]。

径向柱塞摆缸式马达由摆缸、柱塞、端盖、曲轴、

球形座、轴承、配流盘、挡圈组成。因马达壳体内设置可摆动轴,曲轴旋转时柱塞、缸体与偏心轴心一一对应,柱塞对缸体侧压力趋近于 0 ,马达机械效率、低速稳定性均处于较高状态。同时其管子轴承两端配置的弹性柱塞夹持环,可以避免柱塞、轴承脱离或者马达吸空时柱塞摆动,提高马达作业安全性。

2 低速大扭矩液压马达摩擦副磨损特性

2.1 磨损类型

摩擦副的磨损性能对液压马达的使用寿命具有直接影响^[3]。磨损本质上是对偶摩擦副相对运动阶段元件表面材料持续损伤的过程,涉及了胶合、点蚀、擦伤、微观磨损、剥落等几种形态,受速度、荷载、温度、表面性质、润滑状态、运动形式等诸多因素影响,可总体划分为磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损、表面疲劳磨损。

磨粒磨损是对偶摩擦副相互运动时表面粗糙峰、硬突起物脱落的结果。即将对偶摩擦副表面分别视为一系列具有半角的硬圆锥形粗糙微凸体、软质平坦材料,在性质不同的表面相互运动时,硬质表面可以致使软表面出现微切削(或微裂纹、微犁耕),进而材料表面出现切屑。这一磨损与磨损距离、荷载、被磨损材料硬度均具有一定关系。

粘着磨损是对偶摩擦副相互运动时表面粘着力作用的结果,具体表现为一个表面脱落的磨屑粘附在另外一个表面,与施加法向荷载、滑动摩擦距离、磨损系数、材料宏观硬度等具有较大关系。

腐蚀磨损主要指对偶摩擦副相对运动时与周围介质发生电化学反应(或化学反应),致使表面材料向另一个方向转移或减少,包括氧化、气蚀、特殊介质腐蚀等几种状态,与环境中酸碱介质、水分与材料性质具有较大关系^[4]。

表面疲劳磨损主要包括对偶摩擦副相对运动时表

面点蚀（裂纹起源于表面）、亚表面剥落（起源于表层），与接触应力、材料性能、接触表面、润滑条件等均具有较大关系。

2.2 磨损阶段

一般低速大扭矩液压马达摩擦副磨损可以划分为跑和阶段、稳定磨损阶段、剧烈磨损阶段三个阶段。

跑和阶段是正常运行条件创造的依据，磨损较轻微，处于低速大扭矩液压马达摩擦副运动初始阶段，因此时摩擦副表面较为粗糙，较小的微凸体接触面积促使接触应力处于较高水平，磨损速度处于较高水平。

稳定磨损阶段是低速轻微磨损。因摩擦副接触面积增加，摩擦表面出现硬化，微观几何形状随着接触表面的平整磨耗而变化，实际接触面压强下降，磨损状态较稳定。

剧烈磨损阶段是磨损速度高水平增长的阶段，伴随振动、噪声。因摩擦副运行时间延长，温度显著提升到较高水平，摩擦副金属组织异变，零件精度丧失，机械效率下降，甚至出现完全失效现象^[5]。

3 低速大扭矩液压马达摩擦副磨损机制

3.1 搭建摩擦副磨损试验平台

根据低速大扭矩液压马达的工作机理与摩擦副的接触情况，搭建摩擦副磨损试验平台。低速大扭矩液压马达的摩擦副上试件安装于主轴，经伺服电机驱动，运转速度调节范围为0rpm~3000rpm，下试件安装于下盒，经液压缸加载，加载力小于等于10kN。摩擦副磨损试验期间，上下试件封闭于盒内，盒进口位置与小型泵连接，动力液体基金出口过滤器（过滤动力液内杂质颗粒、磨屑等污染物，过滤精度达1 μ m）回流^[6]。上下试件之间的摩擦力矩经力矩轮检测，温度监测则借助热电偶，并经节流阀与风冷却器完成温度调节，摩擦系数为力矩轮转矩除以加载力、力矩轮半径。进而经计算机完成测试时间、加载力、注重转速的测试，每间隔1s记录1次。

3.2 试件制造与处理

首先，选择硬度差距较大的材料作为配对摩擦副，如球墨铸铁（或38CrMoAl、42CrMo）等硬材料与复杂黄铜C69710等软材料。其中球墨铸铁抗拉强度大于600MPa，条件屈服强度大于370MPa，伸长率大于3%，硬度在190~270HB之间，热处理参考温度为930 $^{\circ}$ C，2h正火空冷+600 $^{\circ}$ C，2h，回火空冷；复杂黄铜抗拉强度大于315MPa，伸长率大于25%。

其次，结合低速大扭矩液压马达摩擦副接触形式，结合试验台原有夹具，设计上试件、下试件形状、尺寸。其中上试件为圆柱形缸体，下试件为圆盘状环面^[7]。

最后，利用铸造/锻造方法处理上试件球墨铸铁，同时以固定速率加热到730 $^{\circ}$ C到850 $^{\circ}$ C之间，加热时间为90min，保持120min，而其他试件利用车、磨、铣削方法或SLM（选择性激光融化）快速成型方法处理。选择性激光融合快速成型中激光波长为1071nm，激光扫描方式为二维振镜聚焦，激光束最小光斑直径、最大扫描速度、定位精度分别为70 μ m、2m/s、0.02mm，曝光时间为100 μ s，激光功率为200W，铺粉层厚度大于10 μ m但小于80 μ m。

3.3 摩擦副磨损试验

首先，利用乙醇—超声波清洗程序，处理加工完毕后对偶摩擦副，清洗后放入烘干机，恒温烘干至表面重量恒定。在称量天平上测量配对摩擦副上试件、下试件重量，连续称量3次计算平均值并观测摩擦副表面。

其次，在摩擦副磨损试验平台上安装配对摩擦副上试件、下试件，进行加载力、下试件运转速度的初步调整。在10h的磨损时间内，分5段磨损，观察低速大扭矩液压马达摩擦副摩擦系数变更情况。同时，观察高运转速度下润滑油飞溅情况，根据观察结果及时加注润滑油。在摩擦副磨损试验进入尾声后，逐步卸除试验力、试件，利用75%酒精清洗试件预磨磨屑，将磨屑冷却到室内温度，经超声波清洗并在恒温烘干机内烘干至恒定重量，经电子天平称量试件重量，观测试件表面^[8]。

最后，重复磨损试件安装、磨损操作、拆除过程，完成实验任务。

3.4 摩擦副磨损机制

3.4.1 转速影响机制

液体压力稳定在5MPa、试件加工工艺一定时，低速（15r/min）工况下，上试件球墨铸铁与下试件复杂黄铜对磨时的摩擦系数建立稳定所需的时间更长，多处于大范围波动状态。在0~7200s摩擦时间段内，随着上试件、下试件的不断磨合，摩擦系数随摩擦时间增加而朝着低水平发展。即在摩擦时间为0时，摩擦系数为0.090；在摩擦时间为1200s时，摩擦系数为0.080；在摩擦时间为2400s时，摩擦系数为0.075；在摩擦时间为3600s时，摩擦系数为0.070；在摩擦时间为7200s时，摩擦系数为0.065。0~7200s摩擦时间段内对应的磨损率为0.00~0.66 μ g/（m \cdot N）。而在7200s~14400s时间段内，上试件、下试件的摩擦系数在0.07~0.08范围内波动，对应的磨损率为0.33~0.66 μ g/（m \cdot N）；在14400~28800s摩擦时间段内，上试件、下试件的摩擦系数波动与0~7200s摩擦时间段内波动规律一致，对应的磨损率为0.33~1.59 μ g/（m \cdot N）。

在高速(90r/min)工况下,上试件球墨铸铁与下试件复杂黄铜对磨时的摩擦系数建立稳定所需的时间较短,摩擦系数波动范围较小。在0~14400s摩擦时间段内,上试件、下试件的摩擦系数稳定在0.042,对应的磨损率为0.00~0.88 $\mu\text{g}/(\text{m}\cdot\text{N})$;在14400s~28800s摩擦时间段内,上试件、下试件的摩擦系数增大至0.075,对应的磨损率为0.58~0.71 $\mu\text{g}/(\text{m}\cdot\text{N})$,这可能是由于高水基润滑液含量下降加剧摩擦副之间磨损,上试件涂层脱落,涂层之间摩擦引发摩擦系数突变,或者高速运转时上试件转动离心力促使润滑盒内润滑液飞溅,对偶摩擦副润滑条件变差,摩擦系数突变。

总的来说,速度的增加有利于摩擦副相互运动阶段摩擦系数稳定,且高速下的磨损率小于低速运转下的摩擦副磨损率,这主要是由于低速运转下的摩擦副以质量磨损(磨粒磨损、粘着磨损等)为主,后期存在粘着问题,磨损量随时间延长而加重,而高速运转下的摩擦副以表面疲劳磨损为主,磨损率随时间延长而减轻。

3.4.2 液体压力影响机制

在上试件球墨铸铁与下试件复杂黄铜配对的情况下,运转速度稳定在90r/min,5MPa压力下,摩擦副摩擦系数随着时间的增加先减小后增大,0~300s摩擦时间段内,摩擦副之间摩擦系数为0.15~0.14;300s~900s摩擦时间段内,摩擦副之间摩擦系数为0.12~0.14;900s~1800s摩擦时间段内,摩擦副之间摩擦系数为0.12~0.15。这一水平下对应的磨损率为0.18 $\mu\text{g}/(\text{m}\cdot\text{N})$ 。

15MPa压力下,摩擦副摩擦系数随着时间的增加先增大后减小,0~300s摩擦时间段内,摩擦副之间摩擦系数为0.125~0.13;300s~900s摩擦时间段内,摩擦副之间摩擦系数为0.13~0.135;900s~1800s摩擦时间段内,摩擦副之间摩擦系数为0.11~0.135。这一水平下对应的磨损率为0.12 $\mu\text{g}/(\text{m}\cdot\text{N})$ 。

总的来说,5MPa压力下的摩擦副摩擦系数(0.11~0.12)低于15MPa压力下的摩擦副摩擦系数(0.125~0.15),两者差异不显著。同时,15MPa压力下的摩擦副表现更低的

磨损率,摩擦副磨损率与液体压力成负相关。这可能是由于液体压力较大时,液压膜厚度挤压时间缩短,提高液压膜系统响应灵敏度,促使液压膜达到低磨损稳定状态的效率更高。

结束语

综上所述,摩擦副磨损是低速大扭矩液压马达性能下降的原因之一。转速、液体压力是摩擦副磨损的主要因素。因此,作业者可以适当增加液压马达摩擦副运转速度,抑制剪切流作用。同时,在一定范围内增加液体压力,提高液压膜系统的响应灵敏度,为液压马达摩擦副系统的低磨损平稳运行提供保障。

参考文献:

- [1]李凯.基于润滑油浸润的船舶主轴承摩擦副磨损状态研究[J].自动化技术与应用,2022,41(04):19-22.
- [2]曹四龙,王凌倩,胥卫奇,周健松.水介质下2种摩擦副材料磨损行为和机理研究[J].水下无人系统学报,2021,29(06):709-715.
- [3]王志辉,樊新波,简忠武,吴安如.压铸ZL101A铝合金摩擦磨损性能及机理的研究[J].湖南工业职业技术学院学报,2021,21(04):7-12.
- [4]李威,李昊,黄磊,陈雪辉,何鸿斌.挖掘机铲斗关节端面摩擦副磨损性能分析与优化[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2022,40(01):69-72.
- [5]王天瑞,丁雪兴,陆俊杰,张炜.机械密封单/双端面纹理摩擦副的摩擦磨损特性研究[J].化工机械,2021,48(05):664-670.
- [6]管永强,王建梅,侯定邦.基于灰色理论的尼龙/碳钢摩擦副磨损量预测[J].润滑与密封,2022,47(09):11-16.
- [7]田洪志,王文东,王飞.不同条件下SA533 Gr.B合金钢与石墨摩擦副的摩擦磨损性能[J].机械工程材料,2022,46(04):56-61.
- [8]窦振华,王翔宇,郝惠敏,兰媛,黄家海.盘式摩擦副沟槽织构摩擦磨损特性研究[J].机械工程学报,2022,58(11):200-209.