

谐波齿轮传动减速器的固体润滑失效机理*

翁立军 汪晓萍 李陇旭 孙嘉奕 孙晓军 于德洋

(中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室 兰州 730000)

摘要 在同型号的谐波齿轮传动减速器和相同的试验条件下,考察了不同固体润滑薄膜体系的润滑性能和磨损特性;结合试验后柔轮和刚轮的工作表面形貌和磨粒的分析,初步探讨了固体薄膜润滑下谐波减速器的磨损机理及其润滑失效机理。结果表明,谐波减速器齿轮摩擦副的润滑薄膜配伍是影响谐波减速器润滑状态和运行寿命的重要因素。在分析研究的基础上,提出了改进谐波减速器齿轮副固体润滑的设想,并且研制出在给定条件下适用的固体润滑薄膜体系。

关键词 谐波传动 齿轮 固体润滑薄膜 寿命试验 失效机理

分类号 TH132.43

随着空间技术的发展,50年代出现了谐波传动这一新型机械传动技术^[1]。与常规齿轮传动相比,谐波传动具有传动比大、体积小、质量轻和传动精度高等优点,但其缺点是由于油脂容易挥发和爬行,需要采取严格的密封措施,致使设备的体积增大、质量增加并使机构复杂化,不能满足空间机械轻量化和高可靠性的要求。因此,对谐波齿轮传动机构采用固体润滑,是实现其在空间应用的主要研究方向^[2]。作者对应用最广泛的油或脂润滑的谐波齿轮传动减速器(简称谐波减速器)采用物理气相沉积(PVD)固体薄膜润滑进行了试验研究。通过对其工作表面磨损状况的显微分析,结合真空环境中模拟试验的运行情况,对这种类型谐波减速器的固体润滑失效机理进行了初步分析,为改善其摩擦学性能提供了实验和理论依据。

1 试验部分

采用XB3-60扁平式谐波减速器(减速比为100),对其工作表面进行PVD镀膜之后组

* 国家自然科学基金资助项目/1996-08-08收到初稿,1997-04-04收到修改稿/本文通讯联系人翁立军

翁立军 男,1966年4月生,浙江省龙游县人,1988年毕业于兰州大学材料科学系,目前主要从事物理气相沉积薄膜及其摩擦学研究,发表论文10余篇,现为中国科学院兰州化学物理研究所助理研究员

汪晓萍 女,1956年11月生,安徽省桐城市人,1993年毕业于兰州大学成人教育学院,目前主要从事物理气相沉积润滑薄膜工艺研究,发表论文10篇,现为中国科学院兰州化学物理研究所实验师

李陇旭 女,1955年9月生,上海市人,1973年至今一直从事固体润滑薄膜工艺研究,发表论文10余篇,现为中国科学院兰州化学物理研究所实验师

孙嘉奕 男,1971年5月生,辽宁省丹东市人,1993年毕业于合肥工业大学材料系,1995年至今在中国科学院兰州化学物理研究所攻读硕士学位,主要从事物理气相沉积薄膜摩擦学研究,发表论文4篇

孙晓军 男,1965年7月生,甘肃省甘谷县人,1987年毕业于兰州大学物理系,目前主要从事物理气相沉积薄膜摩擦学性能研究,发表论文10余篇,现为中国科学院兰州化学物理研究所助理研究员

于德洋 男,1937年10月生,山东省威海市人,1962年毕业于山东大学物理系,目前主要从事物理气相沉积薄膜及其摩擦学研究,发表论文60余篇,现为中国科学院兰州化学物理研究所研究员、硕士生导师

装成套, 再在真空环境中进行模拟运行试验

1.1 试验样品

- 在1[#]套谐波减速器齿轮副的表面分别溅射MoS₂基复合润滑膜和软金属多层膜;
- 在2[#]套齿轮副的表面分别溅射MoS₂基复合润滑薄膜和离子镀TiN薄膜;
- 在3[#]套齿轮副的表面分别溅射MoS₂基双层复合润滑薄膜和软金属多层薄膜

1.2 运行试验条件和方法

试验条件: 真空度为5 mPa, 谐波减速器输入轴的转动速度为75 r/min, 其输出轴的扭矩为6 Nm, 环境温度为室温

试验方法: 通过监测驱动电机的输出功率(以驱动电机的电压表征)和谐波减速器温升的变化, 考察谐波减速器的润滑状态。当谐波减速器的摩擦力矩明显增大并伴随产生明显的摩擦噪声时, 判定为润滑失效。

将运行试验后的谐波减速器各元件清洗干净, 用高倍光学显微镜观察分析其工作表面形貌, 用X射线能量色散谱仪(EDAX)分析磨屑成分。

2 试验结果

2.1 运行试验结果

图1给出的是在谐波齿轮传动减速器的运行试验过程中, 驱动电机电压随着输入转数变化的关系曲线。可以看出, 在3套谐波减速器运行状态之间存在着较明显的差异, 其中1[#]套的摩擦力矩呈现出持续上升的趋势直至润滑失效; 当2[#]套平稳运行到 1.0×10^5 r时, 其摩擦力矩开始增大, 运行至 2.7×10^5 r时的摩擦力矩突然急剧增大而卡死; 3[#]套的运行一直相当平稳, 摩擦力矩始终略呈下降的趋势。

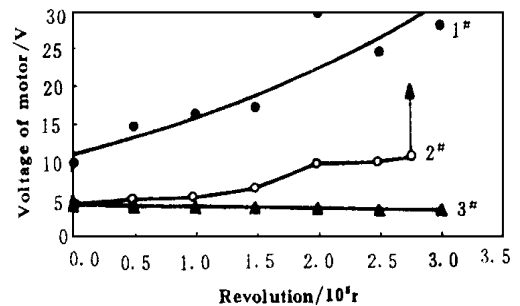


Fig 1 Voltage change of motor driving harmonic drive reducers lubricated by solid films

图1 固体薄膜润滑谐波减速器驱动电机电压输入转数变化的关系曲线

2.2 柔轮和刚轮齿面磨损分析结果

图2所示为3套谐波齿轮传动减速器柔轮齿面的磨损情况的显微照片。可以看出, 在1[#]套谐波减速器柔轮的齿面发生了明显的磨损, 分析发现磨屑中含29.40% (以质量分数计, 下同) Si, 0.52% S, 1.25% Cr, 0.48% Mn, 1.71% Mo, 余为Fe; 在2[#]套谐波减速器柔轮的齿面上发生的是磨损严重, 产生了大量的磨屑; 在3[#]套柔轮的齿面上仅呈现出轻微的摩擦痕迹。显微镜观察发现, 刚轮的齿面上磨损情况与柔轮的一致(见图3所示)。

3 讨论

3.1 固体薄膜润滑下谐波减速器齿轮副的磨损

图4是谐波齿轮传动的工作原理简明示意图, 可见随着谐波减速器波发生器的连续旋转, 柔轮在波发生器的作用下不断变形, 柔轮与刚轮之间重复进行着啮入→啮合→啮出→脱开→啮入的循环过程^[1,3]。在齿轮副相互啮合过程中, 齿面之间发生滑动摩擦且伴有滚动摩

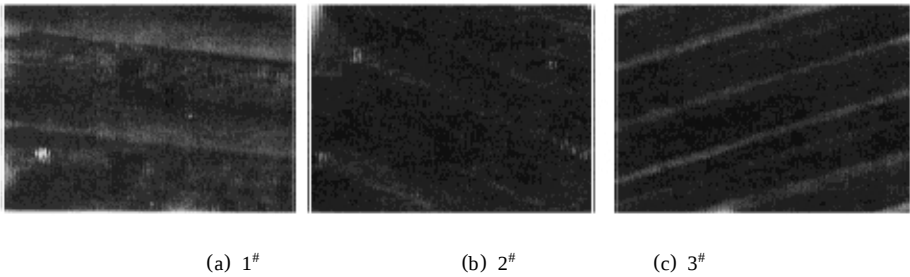


Fig 2 Microphotographs of the flexspline surfaces after test(40 ×)

图 2 试验后柔轮齿面的显微照片 (× 40)

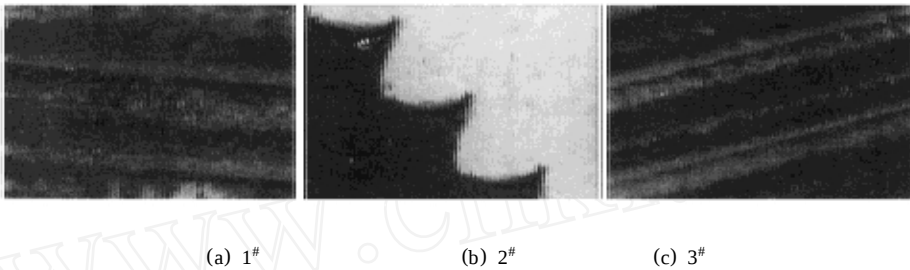


Fig 3 Microphotographs of the circular spline surfaces after test(40 ×)

图 3 试验后刚轮齿面的显微照片 (× 40)

擦 这种情况下, 柔轮齿廓与刚轮齿廓不能构成理想的共轭齿廓, 这会在很大程度上影响啮合参数, 以致在齿轮副啮合中出现弹性变形干涉, 导致齿面发生非正常磨损 在油或脂润滑

条件下, 当弹性变形干涉量较小时, 采用磨合的方法能够有效地消除干涉; 然而对于采用固体薄膜润滑的谐波减速器来说, 其齿轮副在磨合过程中会由于齿面粗糙度偏高, 以及小量弹性变形干涉而产生磨粒磨损, 致使固体薄膜遭受破坏 因此, 须要在进行镀膜前降低齿面粗糙度并选择适当的啮合参数

3 2 谐波减速器的固体润滑失效机理

由图1所示可以看出, 对于啮合参数一致的谐波减速器采用不同的润滑薄膜体系, 其试验结果明显不同 齿轮副经过镀膜以后, 如果膜层之间的匹配不好, 容易产生磨粒磨损, 使润滑薄膜过早破坏, 薄膜润滑失效, 摩擦力矩明显增大, 并且产生明显的摩擦噪声 如2#套齿轮副的一方因采用离子镀 TiN 薄膜, 这种膜的硬度明显比偶件的高而首先使后者磨损, 随后其自身亦被磨损, 使齿轮副严重磨损, 致使

Fig 4 Diagram of operating principle of hamonic drive

图 4 谐波传动工作原理简明示意图

谐波减速器被卡死; 尽管1#套的寿命比2#套的长, 但由于上述原因齿轮副仍然发生了明显的磨损; 3#套的试验结果则相当好 基于这些分析, 提出改进这类谐波齿轮传动减速器润滑性能的设置: 针对固体薄膜润滑不同于油或脂润滑的特点, 降低工作面的粗糙度, 重新优选齿轮副的啮合参数; 在固体润滑薄膜与底材之间增加中间层并进行活化处理, 以改善固体润滑薄膜与底材(尤其是挠性部件)的匹配状态和结合强度, 从而延长固体润滑薄膜

的使用寿命; 优选固体润滑薄膜配伍, 改善固体润滑薄膜体系中各摩擦副薄膜之间的性能匹配, 最大限度地改善谐波减速器的润滑性能

4 结论

谐波减速器齿轮副的柔轮-刚轮齿面之间以滑动摩擦为主, 伴随有滚动摩擦, 彼此很难实现理想的共轭齿廓, 啮合时容易发生弹性变形干涉, 使齿面产生非正常磨损, 而且齿面粗糙度偏高还会产生明显的磨粒磨损, 从而导致固体润滑失效; 润滑薄膜的配伍是影响谐波减速器的润滑状态及其运行寿命的重要因素; 提出了改进谐波减速器润滑性能的设想, 研制出在本试验条件下适用的固体润滑薄膜体系, 能使谐波减速器在真空环境中平稳运行, 摩擦力矩略呈下降趋势, 始终处于良好的固体润滑状态

致谢 本文报道的研究工作得到中国机械工业技术总公司北京市克美谐波传动精密机械公司李克美、朱青和于树凡等多位先生的热情支持, 在此深表谢意

参 考 文 献

- 1 沈允文, 叶庆泰 谐波齿轮传动的理论和设计. 北京: 机械工业出版社, 1985 1~ 15
- 2 Wyn-roberts D. New frontiers for space tribology. Tribol Inter, 1990, 23(2): 149~ 155
- 3 伊万诺夫 谐波齿轮传动 沈允文, 李克美编译 北京: 国防工业出版社, 1987 127~ 129

The Failure Mechanism of the Solid Lubrication of a Harmonic Drive Reducer

W eng L ijun W ang Xiaoping L iLongxu Sun Jiayi Sun Xiaojun Yu Deyang

(Laboratory of Solid Lubrication Lanzhou Institute of Chemical Physics
the Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000 China)

Abstract Lubrication behaviors, friction and wear properties of different thin solid films were investigated for the same type of harmonic drive reducer under the same test conditions. The mechanism of friction, wear and lubrication failure were primarily studied with the morphology analysis of working surfaces and the element analysis of abrasive particles for the tested flexspline and circular spline. It was revealed that the compatibility of the lubricating films is an important factor to influence the lubrication and service life for harmonic drive reducer. A proposal for improving the solid lubrication of the gear couple in a harmonic drive is suggested, and a better PVD solid films have been prepared.

Key words harmonic drive gear solid lubrication film endurance life test failure mechanism

Classifying number TH132 43