

通用机械传动部件的磨损机理

孙吉杰

青岛四三零八机械厂，山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ME.2025090034

摘要：蜗轮蜗杆传动部件的结构紧凑、传动比大，凭借其优势广泛应用于通用机械中，但其运行过程中容易磨损，直接影响传动效率与使用寿命。因此，文章聚焦于蜗轮蜗杆传动部件的磨损机理，系统分析了磨粒磨损、疲劳磨损及腐蚀磨损等主要磨损形式，探讨了影响磨损行为的关键因素，总结了改善润滑方式、表面处理工艺、优化材料选择等优化策略，可显著提升其抗磨性能和使用寿命，对于蜗轮蜗杆传动系统可靠性设计优化具有一定的借鉴与参考价值。

关键词：磨损机理；机械传动部件；疲劳磨损；腐蚀磨损；润滑方式

Wear Mechanism of General Mechanical Transmission Components

Sun Jijie

Qingdao 4308 Machinery Factory, Qingdao, Shandong 266000

Abstract : Worm gear and worm transmission components, characterized by their compact structure and large transmission ratio, are widely used in general machinery due to their advantages. However, they are prone to wear during operation, directly affecting transmission efficiency and service life. Therefore, this article focuses on the wear mechanism of worm gear and worm transmission components, systematically analyzing major wear forms such as abrasive wear, fatigue wear, and corrosive wear. It explores key factors influencing wear behavior and summarizes optimization strategies such as improving lubrication methods, surface treatment processes, and optimizing material selection. These strategies can significantly enhance their wear resistance and service life, providing valuable reference for the reliability design optimization of worm gear and worm transmission systems.

Keywords : wear mechanism; mechanical transmission components; fatigue wear; corrosive wear; lubrication method

蜗轮蜗杆传动属于通用机械领域中的常见动力传递装置，凭借其传动比大和结构紧凑等优势，在机床、起重设备以及船舶系统等领域广泛应用。但实际运行中却由于其独特的啮合特性，接触应力集中、以滑动摩擦为主，容易出现表面损伤或材料磨损等问题，严重影响传动系统的运行效率和使用寿命。磨损作为蜗轮蜗杆传动失效的主要形式之一，会改变齿面几何形态，增加传动间隙，情况严重下可能出现点蚀或胶合等故障。尤其在润滑不良和长期重载条件下，磨损加剧，导致传动系统的可靠性大幅下降。因此，剖析蜗轮蜗杆传动部件的磨损机理，并尝试提出优化策略，对于提升产品可靠性和指导工程实践大有裨益。

一、蜗轮蜗杆传动部件的基本原理和受力特性

(一) 结构原理与运动关系

蜗轮蜗杆传动系统主要包括两部分，蜗杆以螺旋状安装在输入轴上，蜗轮则安装在输出轴上，其齿廓形沿着螺旋方向与蜗杆匹配，多选择青铜等材料降低磨损。两轴保持90°交错布置，蜗杆转动过程中通过螺旋面，带动蜗轮齿面，驱动蜗轮围绕轴线转动。传动比公式如下：

$$i = \frac{z_2}{z_1}$$

蜗杆头的数量多1~4范围内，蜗轮齿数较多，因此二者结合

的传动系统可提供较大的减速比。在特定导程角条件下，蜗轮蜗杆具有自锁特性，无法反向转动，在制动装置或提升机构等领域有着特殊的价值。

(二) 接触几何特征

蜗轮蜗杆啮合时，接触形式介于点/线接触之间。具体形式则取决于蜗轮蜗杆的制造精度和蜗杆类型。以阿基米德蜗杆为例，与蜗轮接触时为一条瞬时接触线，但仅为理论层面，实际中由于制造偏差和装配误差等因素影响，导致接触区域往往呈现局部点状或窄带状接触；蜗轮蜗杆啮合属于一种以滑动为主、滚动为辅的运动形式，啮合点存在明显的相对滑动速度，而滚动分量则可忽略不计。正是这种高比例的滑动运动，使得蜗轮蜗杆啮合区域的摩擦功耗大，产生大量的热量，加之散热效果较差，容易出现

啮合失效的问题^[1]。

二、蜗轮蜗杆传动部件的主要磨损形式及机理

(一) 磨粒磨损

磨粒磨损是一种常见的传动系统磨损形式，其主要是由于金属屑、灰尘等硬质颗粒游离于摩擦区域，在相对滑动中对齿面产生犁沟或切削等作用，导致材料剥落、磨损。由于蜗轮蜗杆传动部件的封闭性相对较差，后期维护不到位，容易出现外界污染物或金属屑侵入润滑系统，从而加剧传动部件磨损。磨粒磨损主要分为两类，一种是二体磨粒磨损，硬质颗粒直接附着在蜗杆等表面，在相对滑动运动过程中刮削蜗轮表面；另一种是三体磨粒磨损，大量游离颗粒在齿面之间滚动，导致双向磨损。通常情况下，蜗轮多为锡青铜等软性金属材料制造而成，即便一定程度上可起到减轻摩擦损耗的作用，但抗磨能力较弱。如果润滑系统出现污染，齿面则会出现大小不一的划痕，加剧疲劳裂纹产生情况严重下则会导致耦合失效^[2]。

(二) 疲劳磨损

疲劳磨损是蜗轮蜗杆传动在长期高负荷运转下，受接触应力作用形成的一种失效形式，表现为齿面点蚀或材料剥落（如图1），即便蜗轮蜗杆以滑动运动形式为主，但二者啮合过程中仍存在一定程度的周期性载荷作用，频繁启停工况下同样会增加接触区域的承载力，随着时间推移，表面出现大小不一的裂纹。点蚀现象多出现在齿面次表层剪切应力区域，受循环应力作用导致微裂纹逐步延伸扩展，最终相连接出现大面积的表层材料脱落、凹坑现象^[3]。点蚀发生的初期阶段，对于蜗轮蜗杆传动部件的性能影响微乎其微，但后期随着点蚀区域逐步扩大，将严重影响齿轮啮合精度，甚至出现噪声增加和震动加剧等问题，成为其他磨损形式诱发的主要因素之一。若疲劳损伤持续发展，裂纹覆盖范围扩大，可能导致大面积片状材料剥落，加剧蜗轮蜗杆传动部件受损程度。导致疲劳磨损的因素主要有以下几点：①材料纯净度、抗疲劳性能；②接触应力幅值、循环应力大小；③表面粗糙度等^[4]。

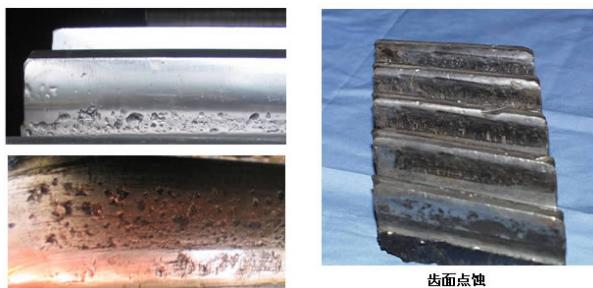


图1 蜗轮蜗杆的齿面点蚀

(三) 腐蚀磨损

腐蚀磨损通常是电化学或化学腐蚀等多种因素共同作用下的结果，在日常维护中受重视程度普遍不高。腐蚀磨损腐蚀介质或润滑环境恶化等工况条件下，如水分侵入或润滑油老化产生有机酸物质，与机械磨损联动下，产生严重的腐蚀磨损现象。腐蚀磨损过程中，铜合金材质的蜗轮表面与腐蚀介质接触发生化学反

应，可能产生硫化物或氧化物等产物，这些产物硬度低，附着力较弱，受滑动摩擦作用下容易去除，从而露出新的金属表面，但腐蚀会继续加剧，最终形成恶性循环。蜗轮蜗杆叶和齿面出现局部变色，表面粗糙度增加，但并未出现明显的机械划痕。另外，高温条件下可能导致部分含硫的添加剂分解出活性元素，抗胶合能力即便在一定程度上提升，但金属蜗轮的腐蚀程度可能进一步加剧，需要根据实际情况选择合理的润滑剂配方^[5]。

(四) 粘着磨损

粘着磨损也称之为胶合，属于混合润滑条件下的一种严重失效形式。本质在于高压高温条件下，蜗轮蜗杆摩擦齿面出现了局部微观焊合现象，在相对滑动运动过程中，致使材料从一方向另一方撕裂转移。蜗轮蜗杆啮合过程中滑动速度较高，二者的接触面积较小，快速摩擦产生的热能会导致接触区域温度迅速升高，一旦温度超过润滑油承载限值，可能导致油膜破裂，金属表面直接接触在高温高压作用下出现塑性变形，甚至发生粘连，随着后期运动持续加快，粘连点随之剪切，致使青铜蜗轮的材料转移至蜗杆表面，造成大面积的啮合面摩擦损伤。胶合磨损是不可逆的，多伴有噪音增加和温度迅速升高等现象。导致粘着磨损的因素主要有润滑油的极压性能和材料配对相容性较差、载荷过大或是频繁停机情况下，同样会影响油膜形成，加剧啮合面磨损程度^[6]。

三、蜗轮蜗杆传动部件的磨损优化措施

(一) 优化材料与热处理工艺

材料选择是否合理，很大程度上影响着蜗轮蜗杆传动的磨损程度。结合蜗轮蜗杆的工况特点，做好材料配对和热处理工艺优化是必然选择。在材料配对优化方面，蜗杆多为20CrMo、20CrMnTi的低碳合金结构钢材料，具有芯部韧性高、淬透性优良等特点，碳氮共渗后其表面硬度可提升至58HRC ~ 62HRC范围，大幅增强蜗杆的抗疲劳强度以及抗磨性。针对一些中低速轻载作业场景，适合选择40Cr、45钢等调质钢，经过表面淬火后提升整体强度。蜗轮材料以ZCuSn10P1、ZCuSn5Pb5Zn5锡青铜材料为主，材料中的Cu₃₁Sn₈弥散于软基体中，具有优良的顺应性、承载性，在降低胶合磨损几率方面优势鲜明。对于一些成本要求高且低速运转场景，适合选择ZCuAl10Fe3铝青铜材料，但其抗疲劳性能较之前者有所不足。除了上述几种材料外，经过技术革新升级，逐渐涌现出了诸多新型材料，如PEEK/PTFE填充青铜材料，此种聚合物基复合材料以及粉末冶金含油轴承材料有着良好的抗磨性能，在部分特定工况下应用效果显著，能有效降低后期维护成本^[7]。

在热处理工艺优化方面，主要表现为以下几种：一是渗碳淬火工艺，此项工艺多应用于低碳合金钢蜗杆制造领域，可形成0.8mm ~ 2.0mm的高碳马氏体表层，大幅提升材料表面的接触疲劳强度和硬度，并提供抗冲击载荷的能力。二是氮化/气体氮化工艺，在促使氮原子在500°C ~ 580°C区间时渗入钢材表面，从而形成低摩擦系数和高硬度的氮化层，多应用于一些精密蜗杆，变形

程度较小。三是感应淬火工艺，多应用于大型蜗杆制造领域，能够起到局部强化齿面的效果，但需要做好硬化层均匀性控制，避免后期产生大量的微裂纹。四是蜗轮热处理工艺，采用铸造与退火工艺加工处理，能够消除蜗轮表面细化的晶粒以及内应力，特殊场景下通过固液与时效处理工艺，可大幅提升蜗轮强度^[3]。

（二）改进润滑方式

润滑性能是影响蜗轮蜗杆传动磨损的核心因素之一，选择合理的润滑方式，致力于在严苛的滑动摩擦条件下，为其形成强度适宜的润滑膜，分散接触应力，降低啮合面的摩擦系数，并且冲洗啮合区域中产生的碎屑。

润滑剂的选择方面，优先选择 ISO VG 460 或 680 类的极压性和粘度高的润滑油，此类润滑油即便在高压高温环境下仍然可形成足够强度的油膜。但需要加入适量高效的挤压抗磨添加剂，从而在高温高压环境下与金属表面产生化学反应，生成高强度的边界润滑膜，可有效降低磨损程度。由于蜗轮蜗杆传动部件的作业温度高、散热条件较差，所选择的润滑油应具有高温下粘度下降小的性能，借此避免高温氧化条件下产生大量油泥或酸性物质加剧腐蚀磨损。在高速或极端温度工况下，聚乙二醇 PAG 类的合成润滑油同样可起到理想的润滑效能，相较于常规的润滑剂而言，可提供理想的氧化安定性以及更低的摩擦系数^[4]。

润滑方法创新方面，优先选择强制循环以及喷射润滑的方式，相较于常规的浸油润滑方式，只需要借助油泵建立强制循环系统，即可喷射润滑油至啮合区域，提供充足供油量同时，还可有效控制啮合区域温度升高速度，避免热量积蓄，在应对高速、重载工况挑战中具有鲜明的优势。优化设计油路与喷口结构，促使润滑油可沿着啮合运动方向均匀喷射在啮合区域；润滑回路中配备水冷式油冷却器，根据工况条件主动控制润滑油温度，确保其温度始终处于 80℃ 以下，有效改善高温条件下的油膜失效问题^[10]。

除此之外，为了实时监控润滑系统的运作状态，可安装油压、油温或油温传感器，实现油液在线监测与分析，发现污染物含量和粘度变化超出阈值，即刻停止作业、更换润滑油，从而实

现蜗轮蜗杆传动部件的预防性维护。若长期处于重载或极端低速条件下，润滑油中可适量加入含二硫化钼、石墨等成分的润滑剂，起到辅助润滑作用，最大程度降低啮合面磨损程度^[11]。

（三）引入表面改性技术

表面改性技术致力于改变蜗轮蜗杆齿面表层的物理或化学性能，在保证基体材料强度基础上，有效增强其抗胶合与耐磨性能。蜗杆多为渗碳钢材材料加工制造形成，表面改性主要为了降低摩擦系数、提高表面硬度。选择物理或化学的气相沉积技术，蜗杆精磨处理后在表面形成硬质涂层，主要包括：①氧化钛 (TiN)、氧碳化钛 (TiCN) 等涂层，硬度最高达到 2000 以上，显著提升蜗杆的耐磨粒磨损性能；②类金刚石碳膜 (DLC)，可提供 0.05 ~ 0.15 区间的低摩擦系数以及高硬度，避免磨粒附着加剧磨损。此外，引入深层渗氮处理工艺，表面可形成 0.3mm ~ 0.6mm 的氮化物扩散层，硬度在 900–1200 区间，有效提高蜗杆的抗疲劳点蚀性能。

由于蜗轮制造材料多为铝青铜或锡青铜，其表面改性多侧重于提高抗咬合能力以及磨合性。蜗轮表面进行磷化处理，可生成一层多孔磷酸盐转化膜，能够存储润滑油，改善拟合初期磨合程度，并提供额外防护，最大程度上避免突发性胶合；采用电化学方法在蜗轮表面形成一层复合镀层，弥散分布 SiC 以及金刚石等硬质颗粒，提高镀层整体的耐磨性以及硬度，有效降低啮合面的摩擦系数；表面采用激光工艺对蜗轮表面微熔、淬火处理，形成硬化区域，对于提升蜗轮表面局部区域的抗疲劳性、耐磨性等大有裨益。

四、结论

综上所述，磨损优化是一项系统工程，针对蜗轮蜗杆等通用机械传动部件磨损问题，需要精准识别磨损形式，并通过改进润滑方式、优化材料选择和热处理工艺、引入表面改性技术，实现各类磨损的有效防护，提高传动效率和使用寿命，对于保障机械设备高效、稳定运行具有重要作用。

参考文献

- [1] 马海波. 高效能机械传动系统的材料选用与应用分析 [J]. 信息记录材料, 2025, 26 (10): 26–28.
- [2] 曹镇军. 商用车动力传动系统故障识别与维修技术实践 [J]. 商用汽车, 2025, (04): 94–97.
- [3] 程文捷, 刘雪峰, 张黎, 等. 机械传动部件危险区域识别方法研究 [J]. 中国机械, 2025, (22): 129–132.
- [4] 曹欢. 基于人工智能技术的起重机机械传动系统故障分析与维修 [J]. 张江科技评论, 2025, (04): 156–158.
- [5] 朱德强. 冶金机械传动系统动态特性分析与振动抑制方法研究 [J]. 山西冶金, 2025, 48 (02): 153–155.
- [6] 孟铂森, 张露予, 王嘉, 等. 考虑运动副间隙的机械传动机构退化建模及可靠性评估 [J]. 振动与冲击, 2025, 44 (02): 312–320.
- [7] 沈锋. 基于有限元分析的机械传动齿轮齿面磨损检测方法 [J]. 家电维修, 2025, (01): 122–124.
- [8] 宫子乔, 周龙龙, 王煦嘉, 等. 压水泵控制棒驱动机构传动部件磨损研究现状 [J]. 表面工程与再制造, 2024, 24 (05): 50–58.
- [9] 姜春雷, 樊智敏, 姜宇, 等. 考虑磨损故障的双渐开线齿轮传动系统动态特性研究 [J]. 机电工程, 2024, 41 (05): 775–785.
- [10] 李政, 王海岗. PSA 程控阀传动件磨损原因及国产化改造 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2022, 39 (05): 42–45+55.
- [11] 陈虎, 张鹏墨, 吕勤. 机械式停车设备传动系统零部件的失效及报废 [J]. 西部特种设备, 2021, 4 (01): 63–67.