

Research on Micro Motion Wear Mechanism and Failure Characteristics of Involute Spline Pair in Agricultural Machinery Hydraulic Pump

Jia Liu Tongwei Xu Cong Zhou

Weichai Power Co., Ltd., Weifang, Shandong, 261061, China

Abstract

In recent years, the level of mechanization of agricultural machinery has been continuously improved, and the integration of mechanical, electrical, and hydraulic systems has developed rapidly. Hydraulic technology is increasingly widely used in agricultural machinery equipment, and hydraulic drive has significantly improved the overall efficiency of mechanical transmission. The involute spline pair is one of the key components in the hydraulic transmission system, and its wear characteristics and working life play a decisive role in the safety of the working system. The involute spline pair is composed of internal and external splines. Compared with other key connections, the involute spline pair has the characteristics of good automatic centering, stable tooth contact, high load-bearing capacity, and long service life. However, the actual operating conditions of the involute spline are very complex. The vibration generated by alternating loads can cause slight displacement of the spline, and the tooth surface is prone to friction and wear, leading to connection failure and tooth biting phenomenon. The paper focuses on the wear problem of internal and external splines in agricultural machinery direct connected pumps, and studies the failure mechanism of involute spline connection wear. Starting from the structural characteristics, force analysis, and fracture analysis of the involute spline pair, the root cause of the fault is identified, and measures to prevent wear of involute splines are proposed, providing reference for the design and failure analysis of involute splines.

Keywords

directly connected pump; involute spline pair; fretting wear; reason analysis; preventive measure

农机液压泵渐开线花键副微动磨损机理及失效特性研究

刘佳 徐统伟 周聪

潍柴动力股份有限公司, 中国·山东 潍坊 261061

摘要

近年来农机电液一体化水平不断提高, 机电液一体化发展迅猛, 液压技术在农业机械装备中的应用越来越广泛, 液压驱动明显提高了机械传动的总效率, 而渐开线花键副是液压传动系统中的关键零部件之一, 其磨损特性和工作寿命对工作系统的安全性起着决定性作用。渐开线花键副由内、外花键构成, 与其他键连接相比, 渐开线花键副具有自动定心好、齿面接触稳定、承载能力大、使用寿命长等特点, 但渐开线花键的实际运转工况十分复杂, 交变载荷产生的振动会使花键产生微位移, 齿面极易发生摩擦磨损而导致连接失效, 产生啃齿现象。论文针对农机直连泵内外花键磨损问题, 对渐开线花键连接磨损失效机理进行研究, 从渐开线花键副的结构特点、受力分析、故障件断口分析等方面着手分析, 锁定故障根本原因, 提出防止渐开线花键磨损的措施, 为渐开线花键的设计及失效分析提供参考。

关键词

直连泵; 渐开线花键副; 微动磨损; 原因分析; 预防措施

1 引言

渐开线花键副因具有承载能力高、定心性能好、结构紧凑等优点, 在现代化农机装备中被广泛应用, 在实际工作过程中, 渐开线花键工作环境恶劣, 在交变载荷和冲击振动

作用下工作, 对可靠性要求极高, 某农机用直连液压泵发生渐开线花键严重磨损, 传动失效, 导致整车无法行走。针对此故障, 论文从花键副故障件形貌分析入手, 结合发动机后取力总成的公差分析, 锁定导致花键连接磨损失效的关键因素, 通过改进后市场验证跟踪, 确认改进措施的有效性。

2 问题描述

2022年10月起, 如图1、图2所示, 某款农用收获机械动力传动系统采用发动机与液压泵直连结构, 液压泵泵轴

【作者简介】刘佳(1982-), 女, 中国山东青州人, 本科, 工程师, 从事发动机、液压及电器件产品质量问题分析研究。

通过止口法兰（保证同轴度）与发动机飞轮壳上的内花键齿轮轴相连，发动机后取力通过花键副将动力传递至液压泵，将机械能转化为液压能，该机构大幅提高了动力链的传动效率，同时又为整机布置节省空间，但花键副的可靠性成为该动力总成结构的关键指标。

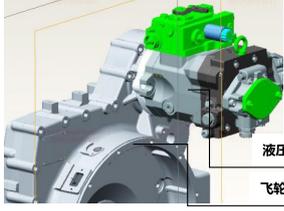


图 1 发动机直连泵结构

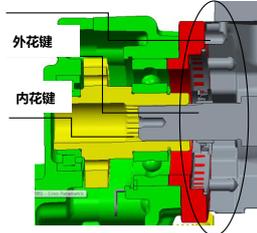


图 2 内外花键连接副

由于发动机和液压泵均为某公司成熟产品，该结构经实验室台架验证后不久便投入量产。两个作业季后终端用户市场反馈发动机直连液压泵泵轴啃齿问题多起，故障时间 200~1000h，故障表现为整车无法行走，拆检发现发动机后取力齿轮轴内花键与行走液压泵主轴外花键磨损，故障率 30%。

图 3、图 4 为内外花键磨损情况（14 齿花键副）。



图 3 外花键磨损情况



图 4 内花键磨损情况

3 问题分析

3.1 花键连接特点

渐开线花键连接的工作特点主要取决于齿圈的同轴度，当轴、套的轴线重合时（图 5），齿的圆柱渐开线表面是等距的（在同一基圆上形成的），扭矩作用时，所有工作齿形点都进入接触，而与齿之间的初始间隙无关，非工作齿形间的所有点，都具有同样的法向间隙。当轴、套的轴线平行偏移一个值时，花键连接的工作特性和齿的接触状况就要发生剧烈的变化，这种情况下，只有坐标角处在等于渐开线展成角的那些齿形点才进入接触，其余齿形点将产生间隙。

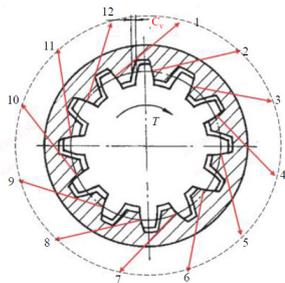


图 5 内外花键轴重合图

内外花键均为渐开线花键，理论啮合状态下，内外花键之间不会产生滑动；当存在一定的同轴度时（图 6），相互啮合的齿面会产生相对滑动现象；当同轴度超差时，相互啮合的齿面相对滑动加大，导致磨损。

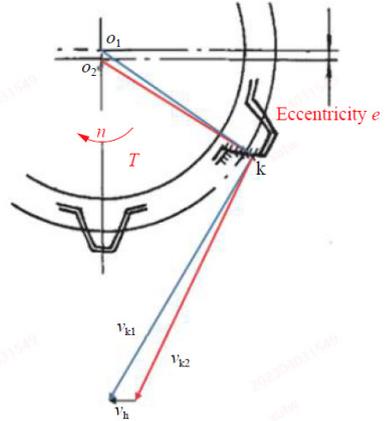


图 6 内外花键轴不同轴

3.2 故障分析

经理化分析，内花键淬硬层深度、硬度、金相组织均无问题。经电镜观察微观形貌，发现花键磨损区域形貌为碾压折叠、材料堆积，金相中存在挤压变形，该形貌为磨损形成，图 7 为断口分析。

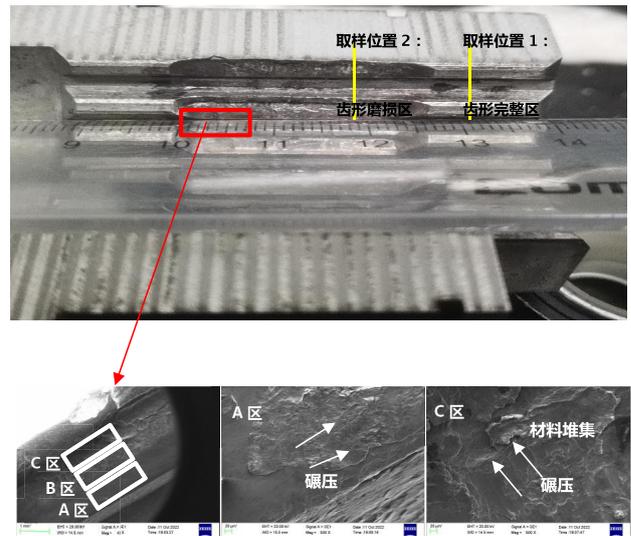


图 7 内外花键轴重合

经分析，图 2 止口法兰起到花键定心的作用，其同轴度要求较为苛刻，市场故障件返回后，排查发现止口法兰多处几何公差不合格，主要不合格特性包括，内外部止口直径、同轴度，测量数据如表 1 所示。

3.3 原因分析

经故障多功能分析小组讨论确定图 8 所示故障树，结合止口法兰的尺寸测量和花键强度校核计算分析，判定本次花键啃齿的主要原因为：止口法兰同轴度不合格导致内外花键不同心、14 齿花键强度不够。

表 1 止口法兰故障件测量数据

序号	运行时间	外定位止口 120 (-0.012, -0.047)	外止口圆度	内定位止口 127 (0,+0.04)	内止口圆度	同轴度 0.03	垂直度 0.05	平行度 0.05
1	261 小时	119.9456	0.0265	127.0598	0.0285	0.0795	0.0013	0.0548
2	176 小时	119.9509	0.0194	127.0606	0.028	0.0831	0.0022	0.0794
3	132 小时	119.9029	0.0253	127.0951	0.0445	0.0627	0.0024	0.0683
4	590 小时	119.9599	0.0184	127.037	0.0175	0.065	0.0044	0.0636
5	448 小时	119.9549	0.0242	127.0586	0.0304	0.0926	0.0027	0.0584
6	226 小时	119.945	0.0236	127.0488	0.0283	0.0704	0.0051	0.1123
7	325 小时	119.9627	0.0121	127.0567	0.0324	0.0801	0.0023	0.0521
8	211 小时	119.9425	0.0155	127.0631	0.0351	0.0832	0.0021	0.0477
9	519 小时	119.9618	0.0197	127.0401	0.0177	0.0448	0.0052	0.0685
10	300 小时	119.9554	0.0229	127.0444	0.0207	0.0883	0.006	0.0234



图 8 花键磨损故障树

经决策，改进方案采用合格止口法兰，加长 14 齿花键配合长度，改进后花键（14 齿）配合长度 37mm，重新装车验证，市场验证两个作业季后，排查确认是否啃齿。

3.4 改进验证

改进后整车验证 350 小时，如图 9 所示，经市场排查确认，内外花键不再出现啃齿磨损现象，证明改进措施有效。

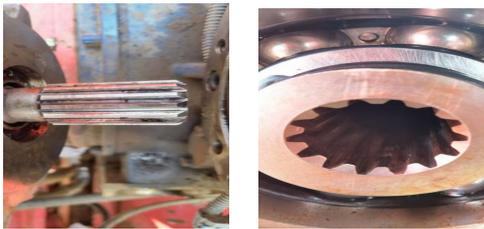


图 9 改进后磨损效果图

4 措施与建议

4.1 控制渐开线花键连接的偏移、偏斜

花键连接存在偏移、偏斜时会减少同时承载的齿数，增加接触应力，同时还还会导致花键副产生滑动摩擦，因此设计时应尽量减小装配误差，保证内外花键连接的同轴度。

4.2 齿面硬化

渐开线花键齿面硬化可以起到改善其磨损特性的作用，

淬火热处理容易导致工件变形，它对载荷分配起到不利的影 响，所以对硬化连接需要精加工，对于由于结构限制无法进行精加工的花键，建议表面进行软氮化处理。

4.3 增加齿数

在花键弯曲疲劳强度满足要求的情况下，尽量增加齿数，减小模数，这样可以增加承载齿数、减小齿面接触应力、减少磨损。

5 结语

论文通过对农机直连泵内外花键啃齿故障的磨损机理分析，总结了渐开线花键连接的失效特点，定位了花键副啃齿的直接原因，提出了防止花键副啃齿的预防措施并验证有效，对同类结构花键副设计改进和可靠性研究具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 明翠新,常宝印,郭霓虹,等.花键承载能力计算方法[Z].北京:国家机械工业局,1999.
- [2] 伍利群.花键连接磨损的可靠性设计[J].现代机械,2005(6):32-34.
- [3] 朱孝录,胡炜,薄文丽,等.花键过度磨损原因分析[J].失效分析与预防,2020,15(6):388-392.
- [4] 胡娟娟,胡检发,谭援强,等.渐开线花键副齿廓修行研究[J].机械强度,2018(40):138-144.