



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405713

引用格式:冉小丰,刘宇思,阳婷,等.连续油管注入头链传动系统损伤原因分析[J].科学与技术工程,2025,25(10):4086-4092.

Ran Xiaofeng, Liu Yusi, Yang Ting, et al. Cause analysis of damage of coiled tubing injection head chain drive system[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4086-4092.

连续油管注入头链传动系统损伤原因分析

冉小丰¹, 刘宇思¹, 阳婷^{1*}, 郑伟², 阮传信³, 刘少胡¹

(1. 长江大学机械工程学院, 荆州 434023; 2. 中石化四机石油机械有限公司, 荆州 434000;
3. 武汉齐达康能源装备有限公司, 武汉 431400)

摘要 注入头是连续油管作业机中驱动连续油管上提下放的关键设备。LG450 型注入头作业期间发生故障, 拆解后发现链传动系统损伤严重。对链传动系统进行宏观微观形貌分析, 发现轮齿外侧有弧形刮痕, 齿面存在倾斜擦痕。对链轮轮齿进行化学成分检测、硬度试验及金相试验, 结果显示材料达到工艺要求。对链轮和链条的啮合过程进行有限元仿真, 结果显示接触压力分布与失效链轮齿面及侧面摩擦痕迹一致。揭示了该注入头链传动系统失效原因为链条滚子与链轮轴线空间交叉, 滚子与轮齿非正常啮合。研究表明链轮链条的运动状态会对注入头工作安全性产生重要影响, 对指导注入头设计和加工有重要意义。

关键词 注入头; 链轮; 失效分析; 有限元仿真; 磨损

中图分类号 TE924; **文献标志码** A

Cause Analysis of Damage of Coiled Tubing Injection Head Chain Drive System

RAN Xiao-feng¹, LIU Yu-si¹, YANG Ting^{1*}, ZHENG Wei², RUAN Chuan-xin³, LIU Shao-hu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. Sinopec Four Machinery Petroleum Machinery Co., Ltd., Jingzhou 434000, China; 3. Wuhan Qidakang Energy Equipment Co., Ltd., Wuhan 431400, China)

[Abstract] The injection head is the key equipment to drive the coiled tubing in the coiled tubing operation machine. A fault occurred during the operation of a LG450 injection head, and it was found that the chain drive system was seriously damaged after disassembly. The macro and micro morphology analysis of the chain drive system shows that there are arc-shaped scratches on the outer side of the gear teeth and inclined scratches on the tooth surface. The chemical composition test, hardness test and metallographic test were carried out on the sprocket teeth, and the results showed that the material met the process requirements. The finite element simulation of the meshing process of the sprocket and the chain is carried out. The results show that the contact pressure distribution is consistent with the friction marks on the tooth surface and side of the failed sprocket. It is revealed that the failure reason of the chain drive system of the injection head is the spatial intersection of the chain roller and the sprocket axis, and the abnormal meshing of the roller and the gear teeth. This study shows that the motion state of the sprocket chain will have an important impact on the safety of the injection head, which is of great significance to guide the design and processing of the injection head.

[Keywords] injection head; sprocket; failure analysis; finite element simulation; wear

注入头是连续油管作业机中将连续油管下入和起出井筒的关键设备。随着中外石油天然气开采技术的发展, 连续管作业技术现已广泛应用于油气田中^[1-2]。链传动系统作为连续油管注入头结构中的重要组成部分, 控制着连续油管上下提放。

磨损是链轮失效的主要形式之一, 在链轮与链条发生接触摩擦时易产生^[3]。上下链轮共面度、链轮链条的材料、润滑情况等因素会影响链传动的平稳性和链轮的磨损程度^[4]。张东阳等^[5]借助有限元仿真软件对注入头链轮轮齿进行静强度分析, 研

究表明轮齿工作时的危险区域集中在轮齿根部附近。胡政等^[6]建立了注入头链条与链轮轮齿啮合接触力学模型, 研究表明注入头工作载荷对链传动性能有较大影响。王杰之等^[7]指出箱体变形会导致链传动系统运行不稳定, 造成链轮磨损。许峰^[8]提出引发刮板输送机链轮故障的原因有疲劳磨损、过载断裂等。管佳伟等^[9]研究了药仓推药链系统滚轮磨损和链轮磨损两种磨损形式下的链传动特性, 结果表明磨损会使链传动运动精度和平稳性下降。Li 等^[10]利用自制的花键联轴器试验台, 研究了

收稿日期: 2024-07-30; 修订日期: 2025-01-17

基金项目: 中油国家油气钻井装备工程技术研究中心开放项目 (NO. BOMCO-J118-JKY011-2022); 国家自然科学基金 (62273060); 湖北省教育厅科技创新服务项目 (F2023003)

第一作者: 冉小丰 (1983—), 男, 汉族, 湖北松滋人, 博士, 副教授。研究方向: 石油装备失效分析。E-mail: Ranxf@yangtzeu.edu.cn。

* 通信作者: 阳婷 (1988—), 女, 汉族, 湖北公安人, 博士研究生, 讲师。研究方向: 石油机械。E-mail: yangting@yangtzeu.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

轴线不对中对花键联轴器齿面磨损的机理。Sun等^[11]基于 Archard 磨损模型等对小模数齿轮的动态磨损问题进行了分析。陈爽等^[12]研究发现主从动轮表面粗糙度和硬度参数不匹配导致渐开线齿轮磨损严重。赵富等^[13]研究发现重载齿轮在传动中常出现齿轮弯曲疲劳、齿面接触疲劳和齿面磨损3种失效模式。针对链传动系统的损伤问题,当前的研究主要以有限元方法对链轮进行力学分析,对链传动系统提出优化。

经现场调查和查阅文献^[14]发现,连续油管注入头在使用过程中链传动系统普遍存在振动、噪音、链轮齿面和链条磨损等现象,影响注入头寿命,而本文研究在连续油管施工现场发现 LG450 型注入头作业初期出现剧烈振动,发出刺耳卡壳声,1 d 后停止运转。拆解该注入头后,通过观察链传动系统的损伤形貌,进行物化检测,结合有限元数值模拟,分析链传动系统损伤原因,并提出改进措施,以消除此类事故风险。

1 注入头链传动系统损伤形貌分析

故障注入头如图 1 所示。连续油管两侧共设有两组链轮链条。传动链轮为主动轮,张紧链轮为从动轮,张紧链轮位于传动链轮正下方,现场的链轮链条如图 2 所示。将链轮安装减速器一侧命名为 A 端,安装马达一侧为 B 端。齿轮侧面靠近两端的为

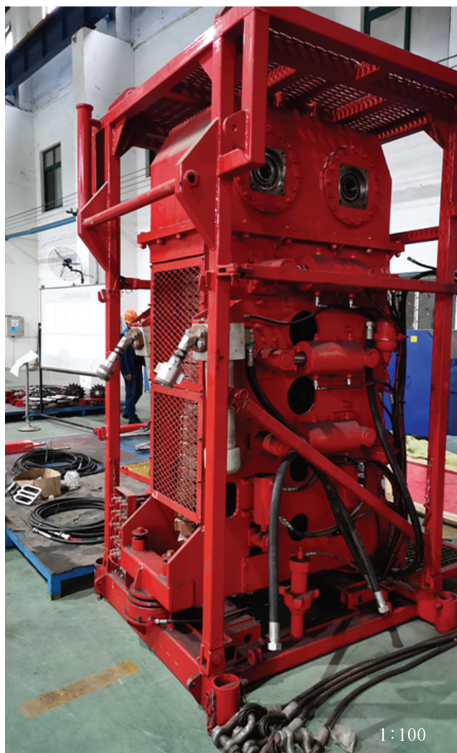
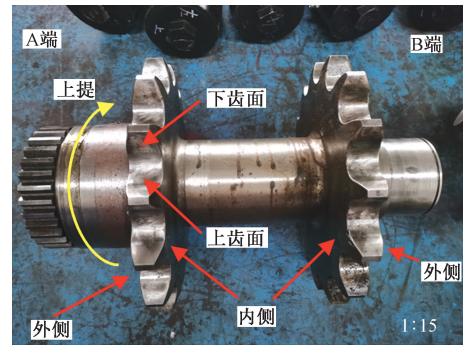
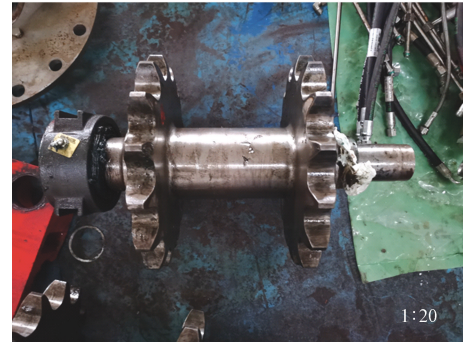


图 1 故障注入头

Fig. 1 Fault injection head



(a) 传动链轮



(b) 张紧链轮



(c) 链条

图 2 链轮链条现场图

Fig. 2 Chain wheel chain scene diagram

外侧,靠近中心的为内侧。从 A 端看,轮齿左侧齿面为上齿面,右侧齿面为下齿面。宏观形貌观察发现,传动链轮和张紧链轮上存在多种损伤,包括凹坑、碎屑堆积、擦痕以及刮痕等,链条滚子及内链板上也存在磨损和压痕。

1.1 刮痕

传动链轮 B 端齿轮齿侧形貌如图 3 所示。如图 3(a) 所示传动链轮 B 端轮齿外侧面摩擦光亮,带有弧形沟槽。为链条滚子啮入时,链板内侧与其发生刮擦产生。最深的沟槽是与右侧齿底圆同心圆的逆时针圆弧。划痕最深反映此时载荷最大,判断为上提连续油管过程,并且右侧齿底中的链条滚子已经啮合,左侧齿底中的链条滚子正在啮合。同时可判断出上提连续油管时,该链轮旋转方向为顺时针(从 B 端看)。

如图 3(b) 所示轮齿内侧表面无磨损。传动链



图3 传动链轮 B 端齿侧形貌
Fig. 3 Morphology on the tooth side of the B-end gear of the transmission sprocket

轮 A 端和张紧链轮同样发现轮齿外侧磨损严重,内侧无磨损或磨损轻微,判断链条在啮入时轴向偏移严重。

1.2 磨损

在链传动系统运行期间,链轮与链条滚子之间发生相对滑动或滚动,引起接触面材料转移或分离,即链轮表面被磨损。严重的磨损将使齿形失真,齿侧间隙增大,齿顶磨平,影响链轮链条的形状、配合间隙和接触面形貌,从而影响传动精度和链条的稳定性,产生冲击和噪音,甚至发生齿轮折断。注入头链传动系统正常工作时,链条滚子与链轮齿面平行接触,齿面与滚子接触区域摩擦均匀且贯穿于齿面^[15]。

齿轮齿面磨损形貌如图 4 所示,图 4(a)为上齿面,图 4(b)为下齿面。图 4 中左侧 5 组为传动链轮齿面,右侧 4 组为张紧链轮齿面。可见传动链轮的上齿面损伤重,存在向左倾斜的偏斜擦痕,下齿面可见右侧倾斜啮合痕迹,上下齿面均为偏斜擦痕。传动链轮齿顶右侧棱边出存在摩擦痕迹如图 5 所示。张紧链轮的齿面上也存在摩擦痕迹,损伤轻于传动链轮,上齿面的摩擦光亮区域集中在两侧,下齿面整条贯穿。分析链条滚子与传动链轮轴线严重倾斜,偏斜啮合。链条滚子与张紧链轮轴线略微倾斜,但链条滚子左右振动较大。

对传动链轮的轮齿上齿面进行取样,如图 6 所示。利用扫描电镜进行观察 6 个位置,各处微观形貌如图 7 所示。4 号位置摩擦痕迹不明显,其他位置

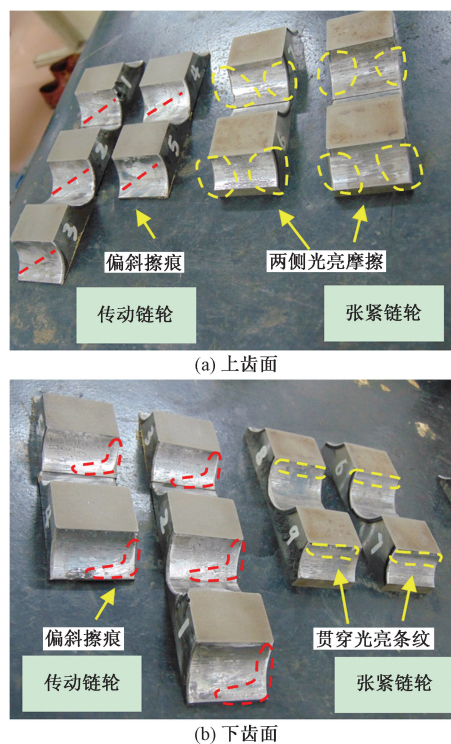


图 4 链轮齿面磨损形貌
Fig. 4 Wear morphology of sprocket tooth surface

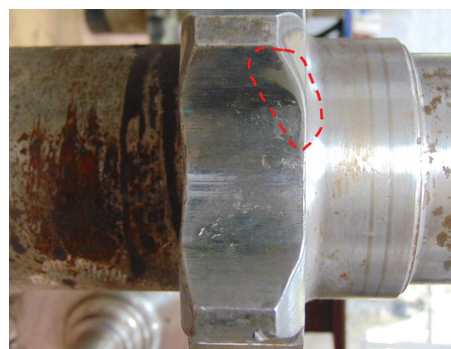


图 5 齿面磨损轮廓
Fig. 5 Wear profile of tooth surface

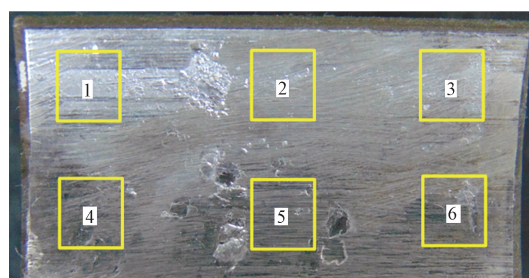


图 6 齿面扫描电镜观察部位
Fig. 6 Observation site of tooth surface by scanning electron microscope

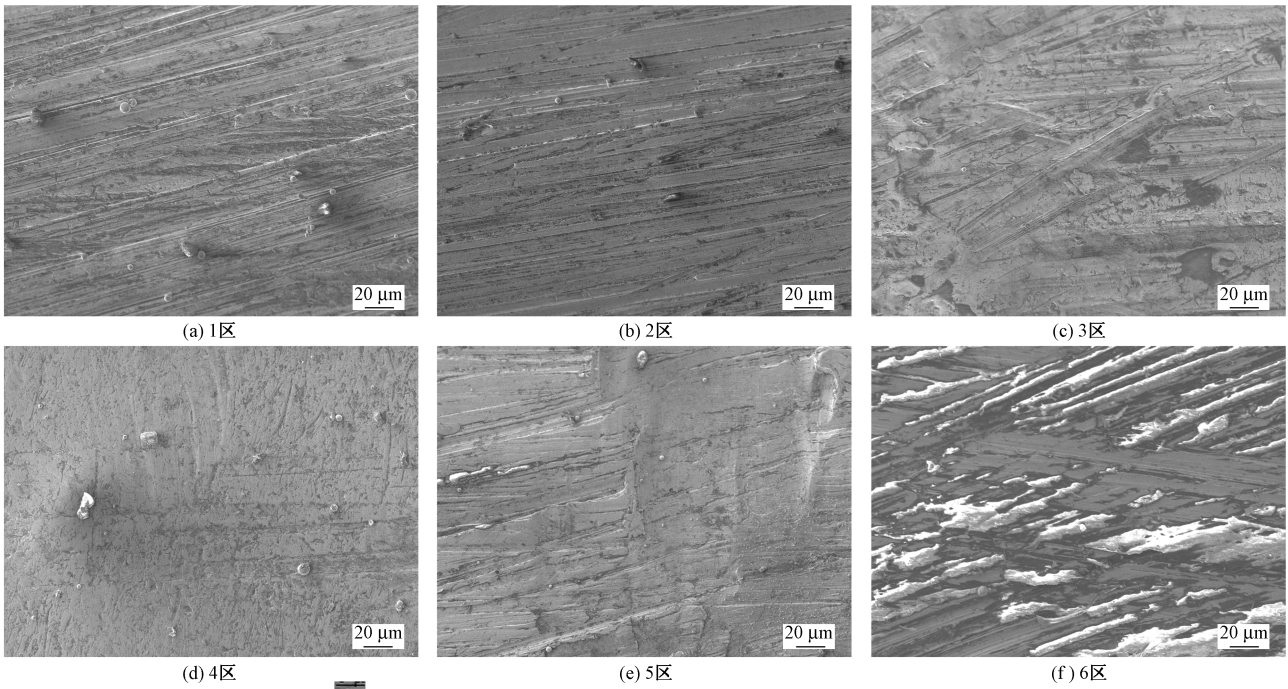


图7 齿面微观图

Fig. 7 Micrograph of tooth surface

存在明显的犁沟状磨削痕迹,以及大小不一的磨削颗粒,为磨粒磨损的典型特征。犁沟痕迹倾斜,表明链条滚子与传动链轮上齿面啮合时倾斜接触,局部接触应力过大,发生磨粒磨损。

此外,链条上的链板内侧也出现局部严重磨损,如图8所示,磨损量为0.5 mm。表明链轮齿在链条中居中程度很差,啮合时端部接触,发生严重刮擦。此磨损形貌与图3(a)中的刮痕为同时产生。

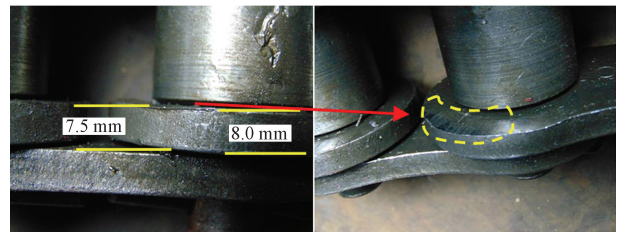


图8 链板内侧磨损

Fig. 8 Internal wear of chain plate

2 链轮轮齿理化检测分析

2.1 尺寸测量

对现场链轮尺寸进行测量,测量结果如表1所示,测得链轮表面粗糙度为3.2 μm,链轮尺寸和粗糙度均在误差范围内,均符合工艺设计要求。

2.2 化学成分检测

对注入头链轮轮齿取样进行化学成分检测,利用直读光谱仪检测其化学成分,结果如表2所示。结果表明,该链轮轮齿的化学成分分析结果符合国家标准 GB/T 3077—2015 中 42CrMo 的化学成分要求。

2.3 硬度试验

分别取链轮上的两个轮齿作为1号样品和2号样品,使用洛氏硬度计对样品近表面处的5个位置进行硬度测试,如图9所示。工艺要求调质硬度为28~32 HRC。测试结果如表3所示,显示该样品材料硬度符合工艺设计要求。

表1 链轮尺寸参数

Table 1 Sprocket size parameters

链轮参数	节距/mm	滚子外径/mm	齿数	齿厚/mm	量柱测量距/mm
标准值	63.5	39.68	15	35.2	343.427
误差范围	±0.1	±0.1	0	-0.2	-0.36
测量值	63.5	39.7	15	35.1	343.3

表2 链轮轮齿的化学成分检测结果

Table 2 Chemical composition analysis results of sprocket teeth

元素	质量分数/%	
	轮齿样品	GB/T 3077—2015
C	0.43	0.38~0.45
Si	0.24	0.17~0.37
Mn	0.79	0.5~0.8
P	0.015	≤0.035
S	0.011	≤0.035
Cr	1.20	0.9~1.2
Ni	0.036	≤0.3
Mo	0.19	0.15~0.25
Cu	0.041	≤0.3

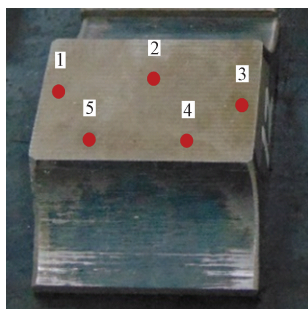


图9 洛氏硬度试验位置示意图

Fig. 9 Diagram of Rockwell hardness test position

表3 链轮轮齿的洛氏硬度(HRC)

Table 3 Rockwell hardness of sprocket teeth (HRC)

测试位置	1	2	3	4	5	平均值
1号样品	29	30	31	31.5	31	30.5
2号样品	29	31	32	30	31.5	30.7

2.4 金相试验

在链轮轮齿上取样,进行金相分析。金相组织形貌如图10所示,基体组织为回火索氏体和少量铁素体,组织分布均匀,回火索氏体为主,铁素体呈块状及针状分布。依据GB/T13320—2007《钢质模锻件金相组织评级图及评定方法》,试样金相组织符合调质钢调质组织500倍下4级标准,表明该轮齿材料组织及热处理工艺符合要求。

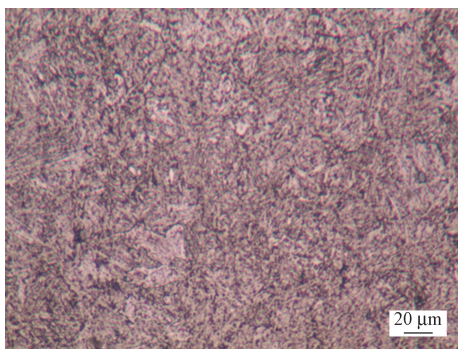


图10 链轮轮齿金相组织

Fig. 10 Metallographic structure of sprocket tooth

3 分析与讨论

3.1 接触仿真分析

根据失效形貌分析和检测结果初步判断,造成链轮磨损的主要原因是链条与链轮偏斜啮合。运用有限元方法对链条和链轮啮合过程进行模拟仿真,建立链轮链条倾斜接触模型,研究倾斜啮合对链传动系统的影响。

简化链轮链条模型,取3个轮齿与一个链节作为研究对象。滚子长度为38.5 mm,链轮厚度为

35.2 mm,内链板与链轮侧面存在缝隙,为模拟链条偏斜啮入链轮的过程,建模时将链节向一侧偏移,如图11(a)所示。滚子外径为39.86 mm,链轮外径为168.42 mm。

采用ABAQUS有限元仿真软件对其进行分析,采用六面体单元C3D8R对链条进行网格划分,大小为1 mm,链轮采用大小为2 mm的C3D10四面体单元进行网格划分,如图11(b)所示。链条的材料为20CrNiMo,链轮的材料为42CrMo,材料性能参数如表4所示。将整个链节与参考点RP1耦合,两个滚子分别与参考点RP2和RP3耦合。模型采用通用接触,摩擦系数设置为0.15。

对链轮施加固定约束,共创建两个动力显示分析步。第一个分析步给RP1施加一个绕基准坐标系X轴旋转的载荷,使滚子轴线偏移,内链板与链轮侧面接触。第二个分析步施加载荷使左侧滚子绕中心RP2的X轴向下旋转,模拟滚子啮入链轮的过程。载荷施加如图11(c)所示。

表4 材料性能参数

Table 4 Material performance parameters

材料名称	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性 模量/ MPa	泊松比	屈服 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa
20CrNiMo(链条)	7.89	2.07×10^5	0.3	785	980
42CrMo(链轮)	7.87	2.08×10^5	0.295	930	1 080

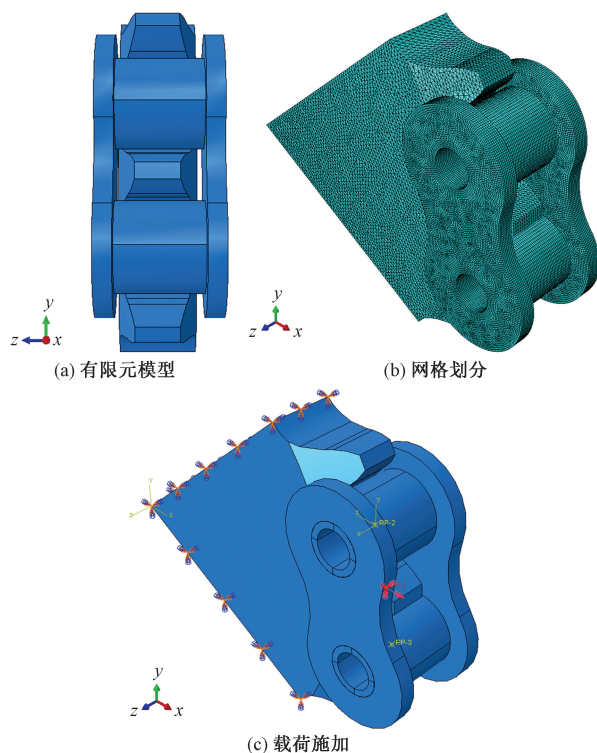


图11 有限元分析模型

Fig. 11 Finite element analysis model

仿真分析结果如图 12 所示。可以看出滚子和齿轮在相对运动时, 链轮齿面上所受应力集中分布于齿轮根部右侧, 最大应力分布于链轮侧面, 大小为 2 025 MPa, 远超过材料的抗拉强度。齿轮根部的最大接触压力为 6 856 MPa, 位于链轮齿侧, 同时链轮齿面也存在接触压力集中。仿真结果显示链节偏斜啮入时, 滚子与齿面倾斜接触, 齿面右侧相较于齿面左侧磨损更严重。内链板与链轮齿侧发生刮擦, 应力超过抗拉强度, 材料产生破坏。仿真结果与传动链轮实物上的损伤形貌一致, 齿面偏磨, 内链板磨损, 链轮齿侧产生刮痕。

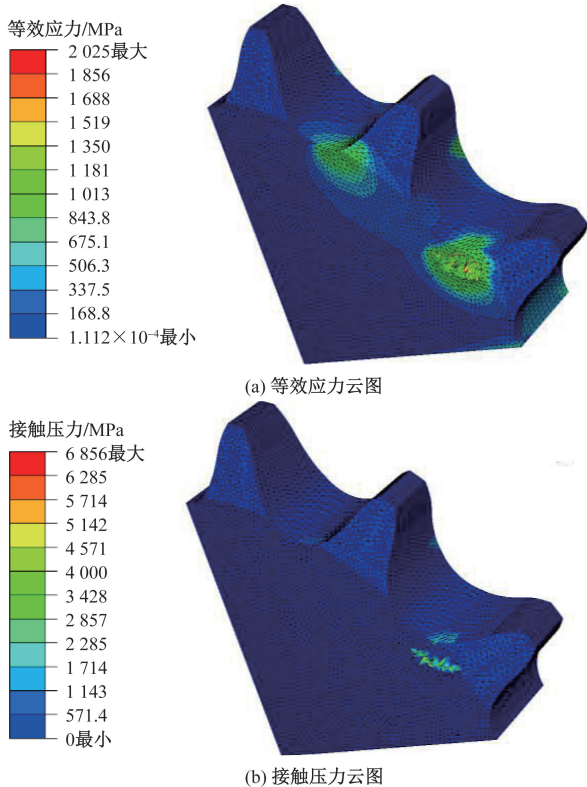


图 12 链轮链条偏斜啮入仿真结果

Fig. 12 Sprocket chain deflection meshing simulation results

3.2 损伤原因分析

失效链轮的损伤形貌研究发现轮齿外侧均存在严重的刮擦弧线, 部分链条内链板磨损后局部厚度减薄。主动链轮齿底圆面(非主啮合面)有方向的摩擦纹路、齿顶棱角处(非啮合面)发生磨损; 从动轮上也存在类似的磨损痕迹, 程度相对较轻。在齿轮与链条啮合时, 存在着相对滑动, 在载荷的作用下, 接触面上的灰尘, 碎屑等引起磨粒磨损。结合有限元仿真分析结果, 接触压力分布区域与实际发生磨损位置一致, 实验分析与数值模拟结果均表明链条与链轮偏进入啮合, 链条滚子与链轮轴线空间交叉。

进一步测量注入头箱体各处空间位置, 发现箱

体存在明显变形如图 13 所示。图 13 中矩形框上部 4 个顶点代表箱体法兰面位置, 下部顶点代表箱体安装张紧链轮位置。虚线为标准箱体位置, 实线为实测位置。可见箱体下部向 A 侧偏离基准达 3 mm, 箱体上部向 B 侧偏离达 6.44 mm。箱体上部与下部的相对偏差为 9.44 mm。同时箱体上部的前端和后端侧偏程度不同, 说明箱体还存在扭转, 如图 14 所示, 扭转在俯视情况下为逆时针方向。而箱体变形会导致链轮轴偏离标准位置, 造成链轮链条的偏载、偏移, 使链传动系统无法平稳运行。

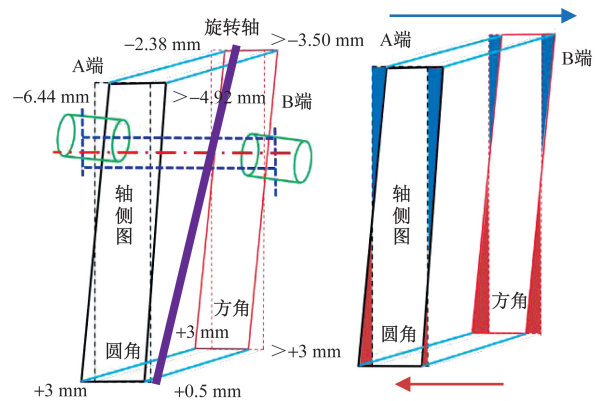


图 13 箱体几何变形

Fig. 13 Geometric deformation of box body

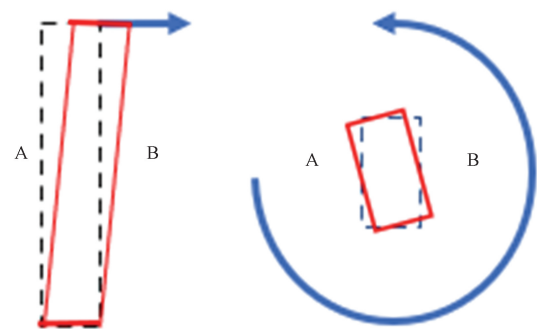


图 14 箱体变形扭转示意图

Fig. 14 The deformation torsion diagram of the box body

综合所述, 该注入头箱体变形过大是该注入头链传动系统发生磨损失效的主要原因。该注入头箱体变形过大引起主从动链轮轴错位, 导致链条偏斜进入啮合, 轮齿外侧与链条内链板刮擦, 形成刮痕; 链轮齿面与滚子倾斜接触, 发生偏载, 形成偏磨。链轮轮齿齿面的磨损机理主要为磨粒磨损。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 链传动系统损伤形貌分析表明, 主、从动链轮轴线空间交叉, 链条滚子偏斜啮入, 且链条滚子左右振动。微观形貌分析发现链轮齿面存在大面积倾斜摩擦痕迹。轮齿表面存在材料缺失, 表现为

明显的犁皱沟槽,链轮齿面磨损机理为磨粒磨损。

(2)失效样品材料检测结果显示链轮洛氏硬度为28~32 HRC,工件经调质处理后基体组织为回火索氏体和少量铁素体,组织分布均匀,回火索氏体为主,铁素体呈块状及针状分布,理化检测均符合标准要求,表明该注入头链轮齿材料和加工工艺符合要求。

(3)对链轮和链条偏斜啮合过程进行有限元接触仿真,其接触应力分布与链轮实物损伤形貌一致。齿面应力集中,导致严重磨损,齿侧接触应力过大造成材料缺失,形成刮痕,影响链传动系统安全。

4.2 建议

装配时必须保证链条滚子和链轮轴线的平行度,滚子和轮齿正常啮合。可选择更耐磨的材料制造注入头链轮链条,以延长注入头链传动系统的磨损寿命。采用合适的热处理工艺适当提高齿面硬度;制造时适当降低齿面粗糙度,通过增加润滑油使润滑充分,减少链轮与链条之间的摩擦,以减轻齿面磨损;可定期检查和校正链传动是否正常啮合,及时做出调整,定期检查和更换链轮链条。

参 考 文 献

- [1] 刘寿军. 国产连续管作业机的研究现状及应用[J]. 焊管, 2023, 46(7): 29-37.
Liu Shoujun. Research status and application of domestic coiled tubing machine[J]. Welded Pipe, 2023, 46(7): 29-37.
- [2] 杜宇成, 康凯, 于志军, 等. 连续管作业机载荷实时监测预警系统开发及应用[J]. 钻采工艺, 2023, 46(4): 116-120.
Du Yucheng, Kang Kai, Yu Zhijun, et al. Development and application of real-time monitoring and early warning system for coiled tubing machine load[J]. Drilling and Production Process, 2023, 46(4): 116-120.
- [3] 郭建军, 王鹏. 浅谈矿用刮板输送机链轮报废及维修标准[J]. 煤矿机械, 2023, 44(11): 151-154.
Guo Jianjun, Wang Peng. Mine scraper conveyor sprocket scrap and maintenance standards[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(11): 151-154.
- [4] Amiruddin H, Abdollah M F B, Mohamad Nizar M A D. Measurement of roller chain wear lubricated with palmoil-based hexagonal boron nitride nanoparticles[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2020, 72(10): 1199-1204.
- [5] 张东阳, 韩军. 连续油管注入头链条轮齿力学分析与优化[J]. 中国重型装备, 2022(2): 38-41.
Zhang Dongyang, Han Jun. Mechanical analysis and optimization of chain gear teeth of coiled tubing injector[J]. China Heavy Equipment, 2022(2): 38-41.
- [6] 胡政, 马卫国, 曲宝龙, 等. 连续管注入头链传动啮合及接触分析[J]. 机械传动, 2023, 47(4): 138-145.
Hu Zheng, Ma Weiguo, Qu Baolong, et al. Meshing and contact analysis of coiled tubing injector head chain drive[J]. Mechanical Drive, 2023, 47(4): 138-145.
- [7] 王杰之, 马卫国, 曲宝龙, 等. 箱体初始变形对注入头工作性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4194-4201.
Wang Jiezhi, Ma Weiguo, Qu Baolong, et al. Effect of initial deformation of the box on the working performance of the injection head[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4194-4201.
- [8] 许峰. 刮板输送机链轮传动系统分析及故障试验[J]. 机械管理开发, 2023, 38(1): 238-239.
Xu Feng. Analysis and fault test of sprocket transmission system of scraper conveyor [J]. Mechanical Management Development, 2023, 38(1): 238-239.
- [9] 管佳伟, 李志刚, 潘润超. 药仓推药链故障仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 256-261.
Guan Jiawei, Li Zhigang, Pan Runchao. Simulation study on the failure of the medicine pushing chain in the medicine storehouse [J]. Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 256-261.
- [10] Li X, Xu Y, Sun X, et al. Experimental investigation on the effect of misalignment on the wear failure for spline couplings[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131. DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105755.
- [11] Sun Y, Li Y, Zhang Q, et al. Wear analysis and simulation of small module gear based on Archard model [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 144. DOI: 10.1016/j.Engfailanal.2021.105755.
- [12] 陈爽, 肖友谱. 高速数滚机床齿轮箱轮齿失效分析[J]. 热加工工艺, 2022, 51(2): 160-164.
Chen Shuang, Xiao Youpu. Failure analysis of gear teeth in gearbox of high-speed rolling machine [J]. Hot Working Process, 2022, 51(2): 160-164.
- [13] 赵富, 张鹏, 刘海鹏, 等. 重载传动齿轮失效模式分析[J]. 新技术新工艺, 2023(12): 62-66.
Zhao Fu, Zhang Peng, Liu Haipeng, et al. Failure mode analysis of heavy-duty transmission gears [J]. New Technology and New Process, 2023(12): 62-66.
- [14] 李银银, 周志宏, 曾华, 等. 连续管注入头与滚筒液压系统的耦合动力学[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1945-1952.
Li Yinyin, Zhou Zhihong, Zeng Hua, et al. Coupling dynamics of coiled tubing injector head and drum hydraulic system [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 1945-1952.
- [15] 胡政. 连续管注入头链传动齿面磨损性能研究[D]. 荆州: 长江大学, 2023.
Hu Zheng. Study on wear performance of chain drive tooth surface of coiled tubing injector head [D]. Jinzhou: Yangtze University, 2023.