

三亚有轨电车齿轮箱联轴节端齿断裂问题分析与改进

饶河平¹ 任启伟² 周莲锐²

(1 广州有轨电车有限责任公司 广东 广州 510335; 2 三亚市轨道交通有限公司 海南 三亚 572029)

摘要: 三亚有轨电车原齿轮箱联轴节端齿断裂失效是由于T型端面齿制式选择不当、沉孔结构设计不合理、螺栓设置位置不当导致的。针对此问题, 本文对端齿结构进行优化设计, 取消背部的沉孔, 采用圆角与周围凸台圆滑过渡, 避免过于单薄的结构造成应力集中; 增加零件厚度, 减小应力; 优化端面齿结构, 将T型端面齿更改为 40° 牙形角的希斯端面齿。新型齿轮箱联轴节端齿经过载荷和疲劳试验合格后成功进行装车运用。

关键词: 有轨电车; 联轴节; 应力集中; 疲劳试验

1 项目背景

三亚有轨电车的齿轮传动原理是由驱动电动机输出的动力, 通过齿轮箱输入联轴节传递到齿轮箱, 经过二级传递, 从输出空芯轴传出, 再经过输出联轴节传递到车轴, 最后利用轮对与轨道的摩擦推动列车运动。在车辆运营时间达到一年半后, 出现批量齿轮箱联轴节内侧端齿面断裂问题。

2 问题现象与分析

2.1 问题现象

车辆的齿轮传动装置和车轴之间通过输出联轴节总成连接, 输出联轴节与齿轮箱通过端面齿及螺栓连接, 输出联轴节与车轮通过端面齿连接。联轴节主要结构包含五部分: 两组由橡胶块拼接构成的橡胶环、连接两组橡胶环的过渡筒端齿、连接齿轮箱与橡胶环的连接座端齿、连接橡胶环与车轮的车轴连接盘。连接座端齿结构图如图1所示。

联轴节端齿为橡胶弹性联轴节中一个部件, 其主要功能为将齿轮箱输出轴转矩传递至联轴节的橡胶块上, 其主体结构为圆周对称结构, 包含6个枝杈状的结构和中间环形结构。其中枝杈状结构与橡胶块连接, 圆环状结构上设置有端面齿以及连接端面齿的螺栓过孔。该端面齿制式采用的是T型端面齿结构, 端面齿牙形角为 20° , 齿形端面为梯形, 齿形为等厚齿, 端面齿分为2组, 每组9个齿, 两组之间夹角为 70° 。

通过拆解和检查端齿面, 可发现连接座端齿已完全断裂为两部分, 连

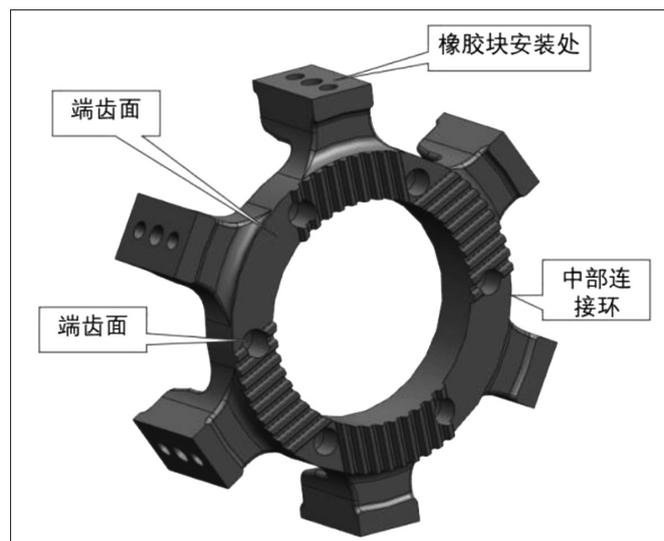


图1 连接座端齿结构图

接座端齿零件从螺栓过孔处断裂为两块, 断裂位置为没有端面齿覆盖处所对应的两个螺栓过孔, 螺栓过孔处的2颗齿完全断裂并脱落。除上述2处贯穿性裂纹外, 还存在5处裂纹, 其中4处位于沉孔与内孔连接的薄壁位置, 1处位于齿根处。断裂的端齿面如图2所示。

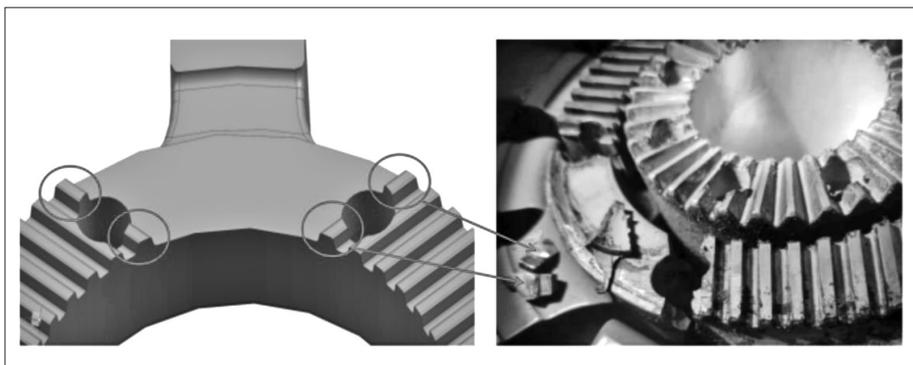


图2 断裂的端齿面

2.2 断口及材质分析

对沉孔薄壁处进行放大,可明显观察到油漆层、渗氮层和金属基体层。经放大处理后,该处裂纹较陈旧,裂纹两侧金属层之间反复挤压造成断口已变得光滑平整,无法观察断口细节,仅能初步判断出疲劳裂纹扩展特性。对齿根侧进行放大,可明显观察到裂纹源于齿根根部,并沿着金属扩展,且可明显观察到贝纹线和二次裂纹,属于典型的疲劳裂纹。齿根处断口形貌如图3所示。

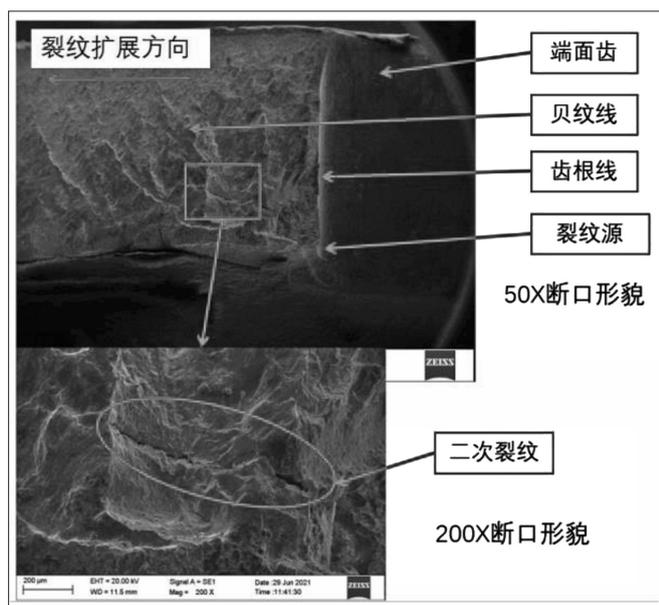


图3 齿根处断口形貌

从整个断口分析可知,该处断裂由2处裂纹引起,其中1处在螺栓沉孔最薄处产生,并沿着薄弱结构扩展,但该裂纹在延伸至沉孔底部时已经停止扩展。另外1处裂纹在齿根处产生,并沿齿根向下扩展,当该处裂纹扩展至螺栓沉孔处时,剩余金属无法承受外部载荷,出现韧性断裂。

从失效零件本体取样,分析零件化学成分符合 GB/T 17107 标准要求,材料满足要求;测量零件表面硬度值为:688、683、657HV0.3,满足要求;有效硬化层深0.4mm,满足要求;渗氮层脆性1级,符合要求;渗氮层中氮化物2级,符合要求;材料芯部组织1级,芯部硬度29HRC,符合要求。

从上述断口及材质分析可知,零件材质、组织和硬度满足设计要求,材质本身无问题,裂纹首先从齿根根部和零件薄弱位置生成并扩展,最终2处裂纹贯穿造成材料最终断裂。

2.3 强度和疲劳分析

通过有限元模型对联轴节在不同工况下的荷载强度进行分析,有限元模型及各工况对应工况详细参数和材料参数如下表所示。

表 各工况下载荷

工况		启动工况 1-F3	启动工况 2-F4
转矩 /Nm		6210.28	- 6210.28
X向相对位移 /mm		2.67	- 2.67
Y向相对位移 /mm		4.67	- 4.67
Z向相对位移 /mm		13.33	- 13.33
加速度 g	X	3.5	- 3.5
	Y	5.5	- 5.5
	Z	6.5	- 6.5

2.3.1 F3 工况强度分析结果

联轴节端齿在F3工况加载时的最大应力为1229.5MPa,同时在螺栓过孔所对应的前2颗端面齿齿根处存在应力集中,通过测量局部应力达到880MPa。

2.3.2 F4 工况强度分析结果

联轴节端齿在F4工况加载时的最大应力为1316.5MPa,同时在螺栓过孔所对应的前2颗端面齿齿根处存在应力集中,通过测量局部应力达到900MPa。

2.3.3 疲劳评估—平均应力

联轴节端齿以F3和F4工况为循环周期评估疲劳,断裂处的2颗不完整端面齿处平均应力非常高,达到500MPa以上。联轴节连接座端齿的平均应力元图如图4所示。

2.3.4 疲劳评估—应力幅值

联轴节端齿以F3和F4工况为循环周期评估疲劳,断裂处的2颗不完整端面齿处应力幅值非常高,达到800MPa以上。联轴节连接座端齿的应力幅值元图如图5所示。

2.3.5 疲劳评估—107 疲劳安全云图

在沉孔对应位置和断裂齿根位置,平均应力非常高,且对应的应力幅值也非常高,其疲劳安全系数小于1,采用海格图评估,危险点处落在海格图外,见图6。

上述分析结果说明,因端面齿制式选择不当,在螺栓连接处的齿根处存在非常大的应力集中,疲劳评估风险较高位置与实际断裂故障位置相同,从齿根和沉孔薄壁位置产生,并沿金属扩展,最终造成零件断裂失效,体现出以下三点问题:

(1) 结构设计不合理,体现在T型端面齿制式选择不当,6个枝杈结构中有2个无法得到端面齿的支撑,这2个枝杈结构所传递转矩由断裂处的2~3颗端面齿承受,因此在该处齿根部存在较大的应力集中,在启动工况下疲劳安全系数小于1,存在疲劳破坏风险。

(2) 零件沉孔结构设计不当,局部厚度偏薄,在端面齿选型不当的情况下,造成应力传递至该处,应力较高,在启动工况下疲劳安全系数小于1,存在疲劳破坏风险。

(3) 螺栓设置位置不当,其中4处设置于T型端面齿边缘,造成该处在初始预紧后会造成偏载,引起断裂

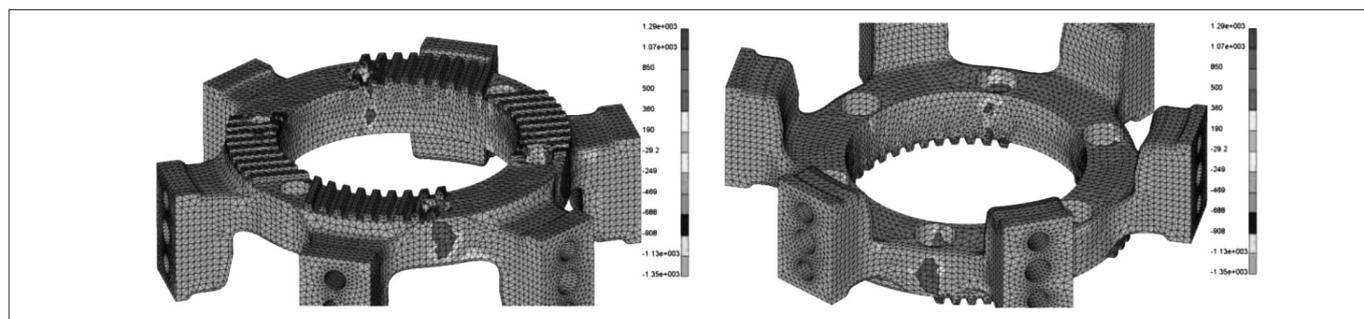


图4 联轴节连接座端齿的平均应力元图

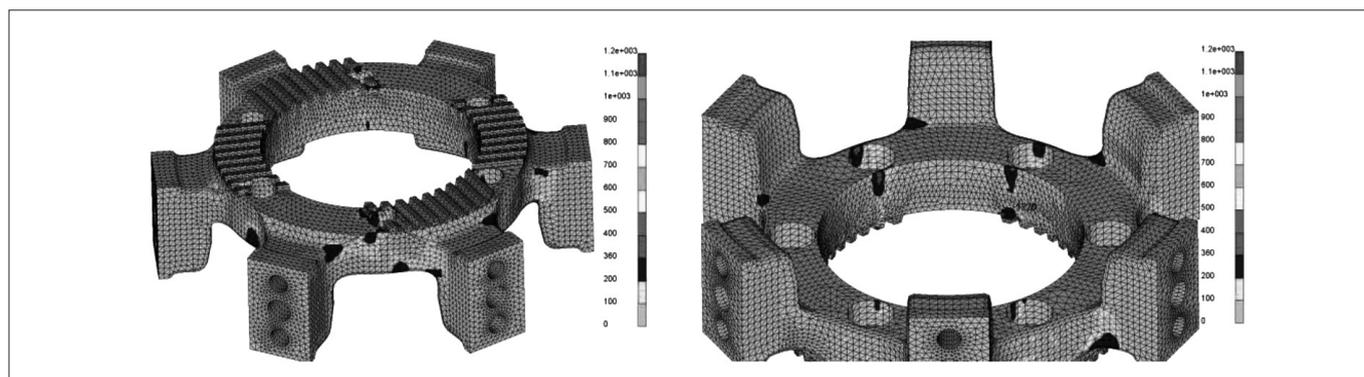


图5 联轴节连接座端齿的应力幅值元图

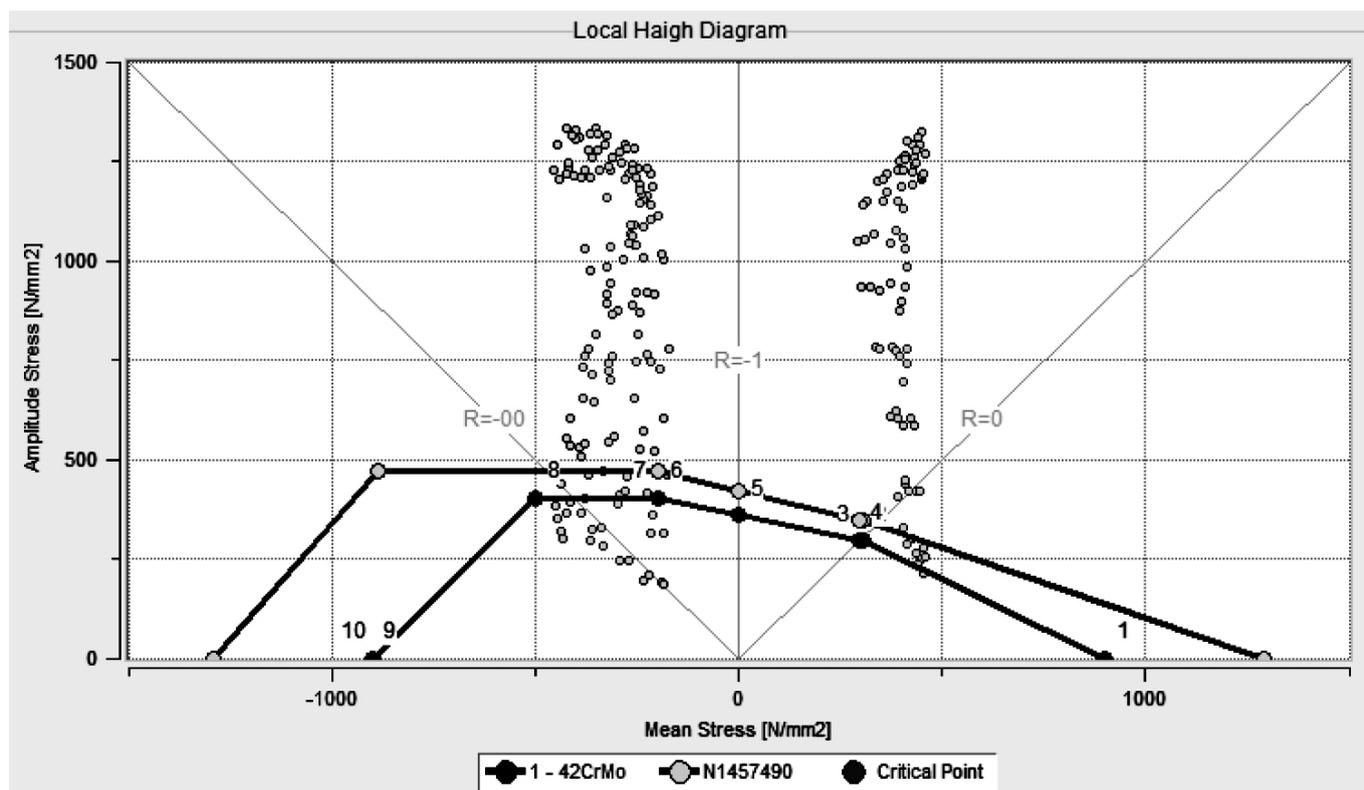


图6 危险点海格图

处的端面齿弯曲应力较高。

3 优化研究和验证

3.1 结构优化

齿轮箱联轴节端面齿断裂问题由设计原因引起，为消除应力集中，须对原结构进行优化：①取消背部的沉孔，并用圆角与周围凸台圆滑过渡，避免过于单薄的结构造成应力集中。同时，在不造成联轴节变形干涉的前

前提下,加厚螺栓过孔处的厚度,加厚3mm;②为增加零件厚度,减小应力,将M12螺钉更改为M10螺钉;③优化端面齿结构,将T型端面齿更改为40°牙形角的希斯端面齿。

3.2 试验验证

3.2.1 旋转疲劳试验

将组装好的联轴节安装于试验工装上,并调整出F3和F4工况的变位量,施加恒定的启动转矩后,进行旋转疲劳试验。试验变位量用于模拟交变载荷:动态变位载荷+准静态变位载荷;启动转矩用于模拟平均应力载荷:额定转矩载荷+初始安装载荷,试验周期1000万次。

由于联轴节横向载荷是对称载荷,如果将其考虑为静态载荷,则危险截面上的平均应力会增大或减小,同时应力幅值会下降。考虑到联轴节轴向刚度较低,其引起的应力幅值较小,在枝杈状结构根部的应力在10MPa左右,如图7所示。

3.2.2 扭转疲劳试验

将组装好的联轴节安装于试验工装上,并调整出正反启动转矩6210Nm,施加正反交变的启动转矩后,进行扭转疲劳试验,试验周次1000万次。

3.2.3 极限强度试验

电动机特性中存在短路转矩特性,其输出转矩较高,为消减该转矩对齿轮箱和后续传动链的破坏,在齿轮箱输入联轴节处设置有转矩保护装置,转矩保护装置可传递转矩被称为打滑转矩。输出联轴节的极限强度试验为验证是否能够承受该打滑转矩和极限变位载荷。

试验时将联轴节固定在试验工装上,并调整出极限变位量,对联轴节施加正反最大打滑转矩,检测联轴节关键件的应力。

3.3 验证结果

(1) 疲劳分析结果:联轴节部件在启动旋转工况、正反启动工况作用下,各零件应力幅和平均应力都在海格图内,满足运营工况要求。

(2) 打滑工况分析结果:联轴节部件在打滑工况作用下,过渡筒端齿应力最大,最小安全系数1.06,满足超常工况的静强度要求。

4 结语

针对齿轮箱联轴节端齿面断裂失效问题,本文对端齿结构进行优化设计。新型联轴节齿轮箱端齿在经过充分的荷载和疲劳试验等型式试验,最后经专家评审通过后装车验证,端齿面断裂问题得到有效解决,至今已经整改完成5列车,消除了车辆的重大安全隐患。

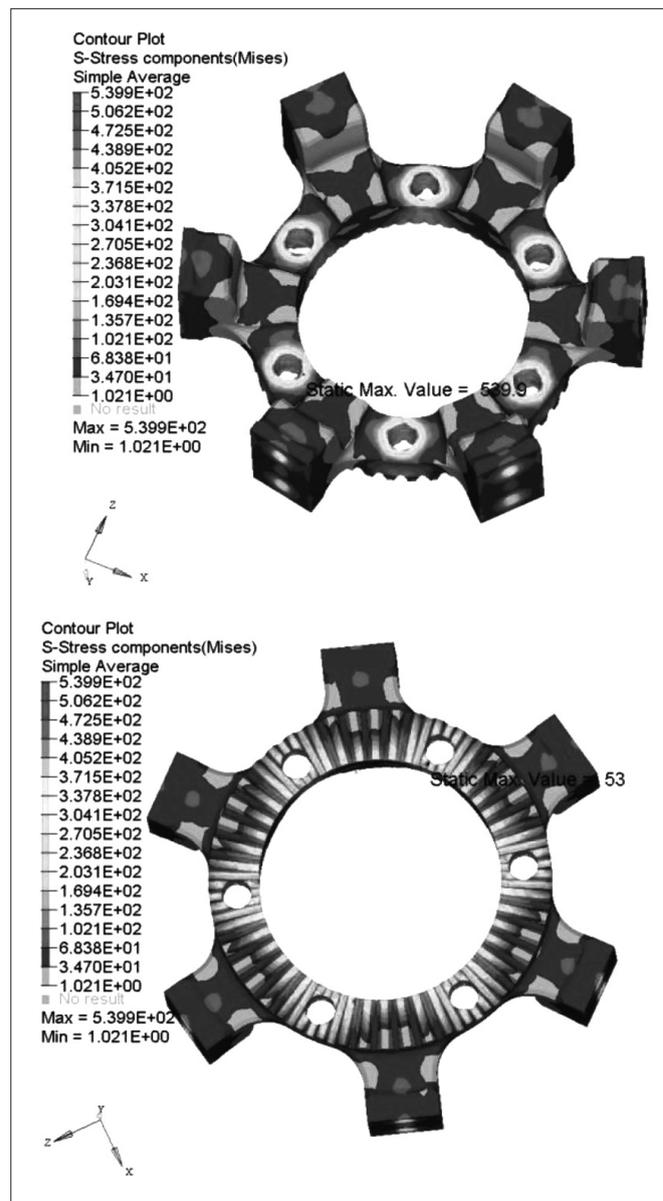


图7 受到轴向拉力和螺栓预紧载荷时的应力分布

参考文献:

- [1] 刘莹,陈瑞兴,周骥.低地板车辆端齿橡胶联轴节的应用研究[J].机车车辆工艺,2020(04):11-12+15.
- [2] 何鹏辉,李富强,贺世忠,等.一种城轨列车齿式联轴节结构设计与试验研究[J].机械传动,2022,46(10):71-76
- [3] 吴四二.地铁车辆转向架齿轮箱失效型式分析[J].现代城市轨道交通.2021(01):29-34.
- [4] 彭立群,林达文,王进,等.低地板车弹性联轴器力学性能试验设计及应用[J].特种橡胶制品.2021,42(06):35-40.