

基于有限元分析的地铁列车鼓形齿式联轴节配合失效原因研究

穆涛¹ 周琳² 白翔¹ 张宇¹ 胡少明³

(1 北京市地铁运营有限公司 北京 100044; 2 北京电子科技职业学院 北京 100176; 3 北京新兴日祥科技发展有限公司 北京 100176)

摘要: 联轴节是地铁车辆走行部传递运动的重要部件之一,联轴节与齿轮箱小轴配合的接触压力,是保证轴毂间转矩的传递,抵抗轴毂相对运动的重要因素。为解决地铁列车鼓形齿式联轴节与小轴弹出配合失效问题,本文以北京地铁房山线列车为例,通过有限元分析对联轴节与齿轮箱小轴过盈配合联结进行弹性有限元模拟和弹塑性有限元模拟,对弹性应力及应变进行分析,校核配合强度,计算联接传动能力,分析出配合失效原因,为地铁列车鼓形齿式联轴节的改造与检修提供理论依据。

关键词: 地铁列车; 有限元分析; 联轴节; 配合失效

1 鼓形齿式联轴节结构及原理

鼓形齿联轴节主要由两个半联轴节组成,每个半联轴节主要由一个外齿毂和一个内齿筒组成,两个外齿毂分别组装在两个轴头上,两个内齿筒通过螺栓连接在一起。它是靠啮合的内齿轮副来传递转矩和旋转运动的装置^[1]。在其啮合的齿间有一定的齿侧间隙,因此允许两轴有适当的角位移和径向位移;内啮合齿轮副允许有一定的轴向滑动,因此可以补偿两轴间有少量的轴向位移。

联轴节的两个外齿毂通过过盈连接到两个轴头上,故联轴节的浮动件为两个内齿筒,两个内齿筒通过螺栓连接成为一个整体。在运行中通过内齿筒来调节联轴节的对中。安装在轮齿中心线上的非金属止推环被用来在轴向上保持套筒的对中位置。

2 问题的提出

2.1 联轴节与小轴配合失效

2014年4月,北京地铁房山线007列2号车频繁报速度传感器1故障。检查接线正常,更换速度传感器、MCC(电动机控制插件)、SMC(系统管理与通信插件)板故障仍然存在。列车静止状态下检查2号车1台转向架发现,1轴联轴节与齿轮箱小轴能够自由转动。分离此位联轴节后发现,齿轮箱小轴与齿轮箱侧联轴节配合表面严重磨损,齿轮箱侧联轴节及齿轮箱小轴失效,如图1和图2所示。

2.2 联轴节与电动机及齿轮箱小轴无法正常拆卸及装配

联轴节与电动机及齿轮箱小轴拆卸作业时,拆卸工装液压装置高于正常操作压力值才可将联轴节分离。检查分离后的联轴节及小轴,发现小轴注油孔与联轴节外齿毂



图1 齿轮箱小轴磨损情况



图2 联轴节外齿毂磨损情况

配合部位, 覆着黑色油脂混合物, 如图3和图4所示。冬季对联轴节压装工装更换液压油时发现液压油有结晶现象, 如图5所示。

联轴节与电动机及齿轮箱小轴压装安装作业后, 对达到保压时间的联轴节与小轴相对深度测量, 发现联轴节有弹出现象。

综上所述, 以上问题严重影响40万修程工期及正线列车运营安全。



图3 齿轮箱小轴覆着油脂

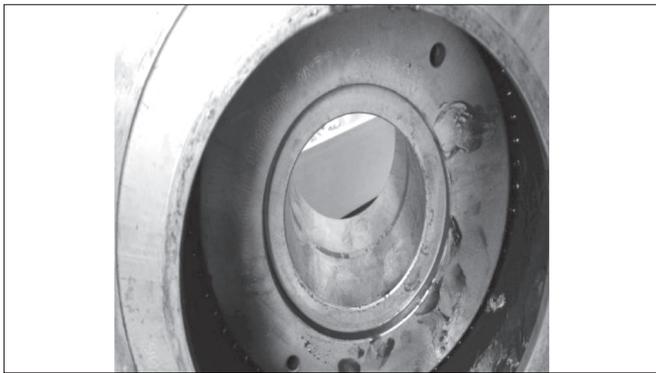


图4 联轴节外齿毂覆着油脂



图5 液压工装结晶

3 故障原因分析

3.1 联轴节压装工艺分析

根据房山线车辆40万修程联轴节维修记录统计,前三组40万修程车FS007~FS009电动机侧及齿轮箱侧联轴节保压后不同车位复测值高于压装垫片值,判定为联轴节外齿毂与小轴发生弹出现象。根据数据可知一列车32个联轴节中共发现12个联轴节与小轴弹出,配合失效率高达37.5%。

根据丙三醇物理性能参数^[2]表1可知,当环境温度为20℃时,达到熔点温度,此时丙三醇液体黏度为243MPa·s,温度继续下降到低于20℃时,其液体逐渐结晶、黏度继续增大。

压装时,通过液压泵给超高压泵A注油,液压油通过小轴注油孔进入联轴节外齿毂环形油槽后,液压力的

表1 丙三醇物理性能参数

序号	物理特性	数值
1	熔点 (°C, 流动点)	20
2	黏度 (MPa·s, 20°C)	243
3	黏度 (MPa·s, 25°C)	56
4	黏度 (MPa·s, 30°C)	18
5	黏度 (MPa·s, 50°C)	18

作用使联轴节外齿毂涨开,此时联轴节外齿毂内径增大并形成油膜,覆盖于外齿毂与小轴配合表面,压力达到200MPa后,通过液压泵B给轴向施加压力,低压油缸将联轴节推入配合位置^[3]。

由于北方冬季气候特点较为寒冷,一般室外环境温度均低于0℃,修程库室内温度低于20℃,此时在联轴节压装时,压装液压油丙三醇黏度增大且流动性降低。经过有限元模拟分析,液压工装提供的轴向力按压装规定的时间撤出时,液压油没有完全覆盖于小轴与联轴节外齿毂配合面形成完整油膜,小轴与联轴节外齿毂没有达到规定过盈配合位置,由于外齿毂为结构钢材质抵抗弹性形变,与小轴产生作用力弹出,最终导致配合失效。

3.2 损伤联轴节理化分析

根据房山线40万修程联轴节损伤统计,总共124个联轴节外齿毂内壁(环注油槽向)发现伤痕现象。

为进一步确认联轴节外齿毂内壁损伤原因,随机取3个典型损坏联轴节及已使用压装液压油进行理化分析,通过断口、组织结构及成分对联轴节进行失效原因分析。分析试验方法及仪器设备如表2所示。

表2 试验方法及仪器设备

分析内容		试验方法	仪器设备
断口分析	宏观分析	肉眼或放大镜	LEICA M205A 体视显微镜
	微观分析	JB/T 6842-1993《扫描电子显微镜试验方法》	Quanta400FEG 扫描电子显微镜 (SEM)
	微区成分	GB/T17359-2012 微束分析及能谱法定量分析	EDAX 能谱仪
组织结构分析	低倍组织	GB/T226-1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》	肉眼或 LEICA M205A 体视显微镜
	高倍组织	GB/T13298-2015《金属金相组织检验方法》等	ZEISS Observer Z1 光学显微镜
成分分析	钢中 C、S	GB/T20123-2006《钢和铁总碳及总硫量的测定感应炉中燃烧后的红外吸收法(常规法)》	CS901B 红外碳硫仪
	钢中 Si、P、Mn、Cr、Mo	GB/T4336-2002《碳素钢和中低合金钢火花源原子发射光谱分析方法(常规法)》	ARL4460 光电直读光谱仪
	压装油中 Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻		ICS-5000+

通过宏观分析可知，锥孔表面可见环形损伤，损伤位于锥孔上与电动机或齿轮箱输入轴配合位置，如图6所示。

通过SEM（扫描电子显微镜）形貌分析与EDS能谱分析，联轴节锥孔表面普遍存在氧化现象，环形伤痕损伤较轻区域呈大片的孔洞，部分孔洞可见异物；损伤较严重的区域可见明显腐蚀，并且锥孔表面受到了均匀氧化腐蚀如表3所示。

通过经过有限元模拟分析和金相分析可知，材料内部存在较多的非金属夹杂物，锥孔表面损伤处可见非金属夹杂物如图7所示，并且可检测出硫元素与氯元素，说明腐蚀介质在夹杂物间与金属基体的间隙堆积，形成腐蚀环境。

对3个样品中残留液压油分析，发现其存在硫元素与氯元素，这两种元素为腐蚀性元素。

根据以上分析，联轴节锥孔表面的环形损伤为露出表面的夹杂物导致的缝隙腐蚀。其外来夹杂物成分为压装油中带有腐蚀性硫、氯元素。联轴节工装液压油型号为丙三醇（化学式为 $C_3H_8O_3$ ），经查看产品成分表发现其确实存在氯化物及硫酸盐成分。

联轴节材质为42CrMo4或34CrNiMo6结构碳素钢。经证实由于原有联轴节工装液压油中含有腐蚀性元素，并对联轴节材质有缝隙腐蚀作用，使联轴节外齿毂内壁材质形成熔坑，改变原有联轴节及小轴表面加工精度，会导致联轴节与小轴配合失效。

4 结语

本文针对地铁列车鼓形齿式联轴节与小轴弹出配合失效问题，通过进行故障分析，有限元模拟分析，得出了联轴节配合失效的原因，主要包括：(1) 在联轴节压装时，小轴与联轴节外齿毂未达到规定过盈配合位置，外齿毂发生抵抗弹性形变，与小轴产生作用力弹出，导致配合失效；(2) 联轴节工装液压油中含有腐蚀性元素，对联轴节材质有缝隙腐蚀作用，使联轴节外齿毂内壁材质形成熔坑，改变原有联轴节及小轴表面加工精度，导致联轴节与小轴配合失效。故在今后的检修与改造中要特别针对上述原因提出具体解决方案。

参考文献：

[1] 北京地铁房山线车辆使用维护说明书-第三分册转

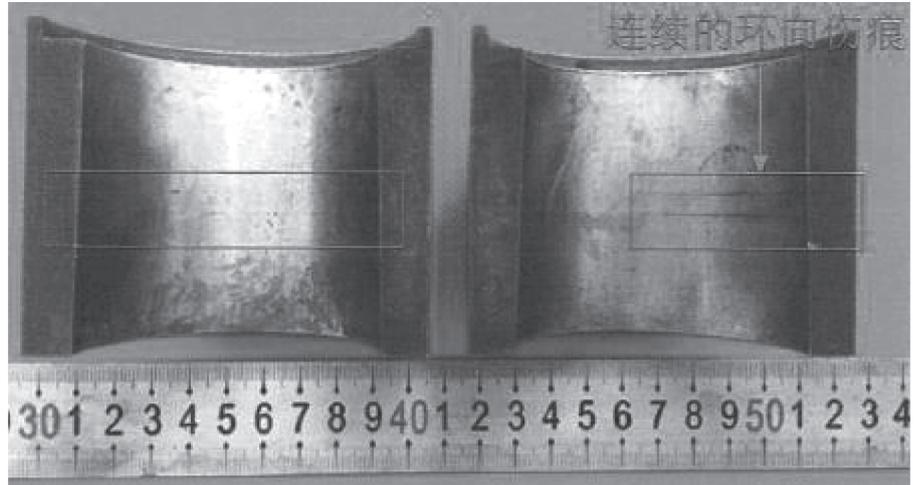


图6 联轴节宏观分析

表3 EDS能谱分析结果/%

位置	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe
1. 腐蚀	1.56	27.17	1.51	0.64	0.9	0.86	0.63	5.42	0.93	0.56	0.77	59.05
2. 腐蚀	1.1	27.48			1.32	2.76	0.74	5.8	0.95	0.82	1.03	58
3. 损伤区域	0.46	3.79								1.28	1.43	93.04
4. 损伤区域	0.38	2.68								1.34	1.22	94.38

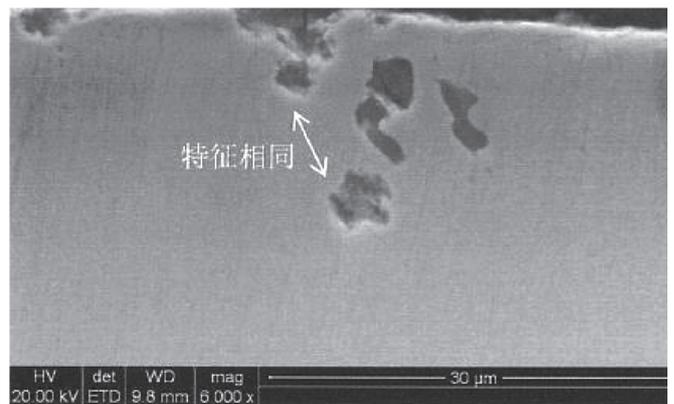


图7 锥孔表面损伤处SEM外貌

向架 [Z]. 2007.

[2] 成大先. 机械设计手册: 第5卷 [M]. 6版. 北京: 化学工业出版社, 2017.

[3] 成大先. 机械设计手册: 第2卷 [M]. 6版. 北京: 化学工业出版社, 2017.

课题项目: 北京电子科技职业学院横向课题 (2021H049-KQ)。

作者简介: 穆涛 (1983-), 男, 汉族, 北京人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 轨道交通车辆检修与维护、轨道交通运营与管理、轨道交通车辆安全等。