

高速齿轮箱圆锥滚子轴承滚道接触损伤机理分析

戴晓超, 王兴宇, 王泽飞, 徐 芳, 吕 义, 李国栋

(中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)

摘 要: 为了确定高速动车组齿轮箱圆锥滚子轴承滚道剥离的原因, 对故障样件进行了理化检测和轴承运动几何分析, 确定了导致损伤的主要原因是由于滚动接触疲劳, 反映出轴承工作过程中存在润滑不充分的事实。建立了滚动体与滚道的受力模型, 对两者相互接触弹性变形的特征进行了分析。基于舍弗勒公司的高速滚动轴承动力学仿真软件对轴承运动状态进行了仿真验证, 模拟了轴承运转过程中滚动体的自转效应及滚动体与滚道瞬时接触区域, 阐明了润滑油膜厚度不足是诱发圆锥滚子轴承滚道接触损伤的重要原因。

关键词: 高速动车组; 轴承; 损伤; 失效分析; 齿轮箱

中图分类号: U292.91⁺4; U260.332; U260.331⁺2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.03.012

Contact Damage Mechanism Analysis of Tapered Roller Bearing Raceway Surface in High-speed Gearbox

DAI Xiaochao, WANG Xingyu, WANG Zefei, XU Fang, LYU Yi, LI Guodong

(CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: In order to found the reason for the raceway stripping of tapered roller bearing of high-speed EMUs gearbox, physical and chemical testing as well as geometric analysis of failure bearing were carried out, and rolling contact fatigue was determined to be the root reason of damage, which indicated the fact that the lubrication was insufficient during bearing working process. A mechanical model of roller and raceway was established, and the contact deformation was analyzed between roller and raceway. The bearing movement status was simulated and verified with bearing dynamic simulation software developed by SCHAEFFLER company, and the self-rotating effect of roller and the instant contact area between roller and raceway had been simulated, which illuminated that contact damage between tapered roller and raceway was mainly caused by insufficient lubrication.

Keywords: high-speed EMUs; bearing; damage; failure analysis; gearbox

0 引言

高速动车组齿轮箱输出端轴承是传动齿轮箱的一个关键部件, 它直接影响到齿轮箱的使用寿命, 其选型根据安装空间、负荷性质、负荷方向、最高转速及支撑结构确定, 通常选择圆锥滚子轴承。目前发现部分轴承的圆锥滚子与滚道存在接触损伤现象, 经过检

测分析, 确定损伤原因属于滚动接触疲劳失效, 虽然已有很多关于轴承滚动体和和滚道接触损伤的研究, 如赫兹理论^[1], 然而实际运转中的圆锥滚子轴的接触问题并非理想的赫兹接触问题, 而是受润滑和摩擦及挤压共同作用边界问题, 滚动接触疲劳特征表现为接触面出现凹凸点, 引起局部应力集中进而产生表面剥离, 特征有点状剥离和疤状剥落。近年来, 数值方法被越来越广泛地应用于轴承受力分析和接触损伤分析中,

收稿日期: 2017-04-24

本文参考有关文献对于滚动接触疲劳的研究结果^[2-4], 对圆锥滚子轴承在复杂受力情况下的接触失效问题进行研究, 分析损伤产生的根本原因。

1 圆锥滚子轴承滚道损伤特征

本文讨论的是齿轮箱输出端单列圆锥滚子轴承, 轴承滚道损伤发生在圆锥滚子轴承的内圈、外圈滚道面上, 呈现鱼鳞状和疤状的表面剥离现象。图1是齿轮箱输出端内外滚道面损伤的图片, 剥离呈现扩散性剥离特征。此外, 滚道面还存在轻微的氧化变色痕迹, 表明滚道与滚动体之间已发生摩擦升温迹象。



图1 外圈滚道表面损伤

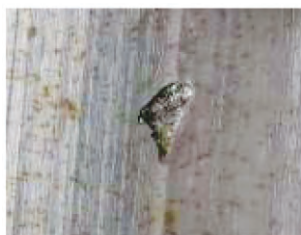


图2 内圈滚道面损伤

对损伤位置取样进行分析, 观察通过高放大倍数放大的显微形貌, 如图2和图3所示。图中可见非常明显的反复挤压和擦滑损伤的痕迹。

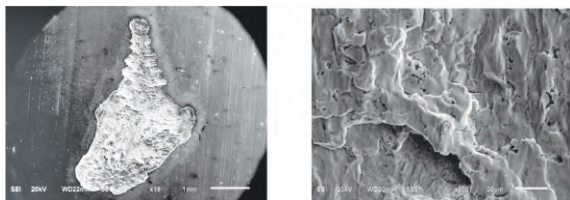


图3 滚道面破损形貌

对其工作面上的麻坑进行系统分析可知, 这类损伤的坑底部均存在擦滑挤压损伤, 呈现二次裂纹以及部分清晰的沿晶脆性开裂的显微痕迹, 这类点坑均具备接触疲劳损伤特征。

2 接触失效机理分析

2.1 轴承几何分析

在轴承滚动体与内、外滚道接触运动过程中, 三者相对位置时刻发生变化, 初始状态如图4。

在内圈受外载荷而发生径向位移前, 内圈与外圈同心, 内圈圆心到各滚动体中心的距离为

$$S = r_{in} + r_{out} + \frac{Y}{2} \quad (1)$$

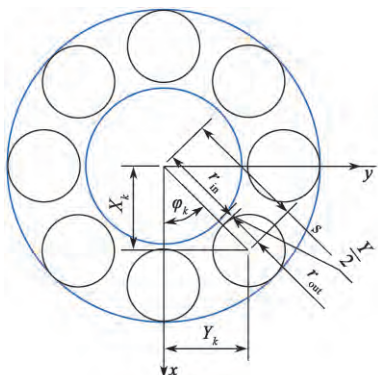


图4 内圈移动前后滚动体与套圈接触情况(移动前)

$$X_k = S_k \cos \varphi_k \quad (2)$$

$$Y_k = S_k \sin \varphi_k \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: r_{in} 、 r_{out} 分别为内圈滚道、滚动体端面半径; Y 为轴承工作游隙; φ_k 为第 k 个滚动体的位置角。滚动体位于最低位置时, φ_k 为零。

在内圈受外载荷而发生径向位移后, 如图5所示, 此时内圈向下移动位移为 δ_{xt} 。

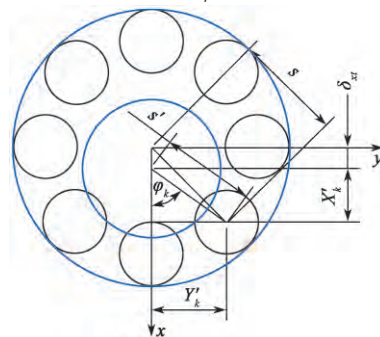


图5 内圈移动前后滚动体与套圈接触情况(移动后)

$$X'_k = S_k \cos \varphi_k - \delta_{xt} \quad (4)$$

$$Y'_k = S_k \sin \varphi_k \quad (5)$$

$$S'_k = \sqrt{(S_k \cos \varphi_k - \delta_{xt})^2 + (S_k \sin \varphi_k)^2} \quad (6)$$

因此, 滚动体与内圈滚道的接触变形量为

$$\delta_k^i = S_k - S'_k - \frac{Y}{2} \quad (7)$$

根据式(7): 当 $\delta_k^i > 0$ 时, 滚动体与内圈发生接触; 当 $\delta_k^i \leq 0$ 时滚动体与内圈脱离。

在图6中, 滚动体与内滚道的接触角为 α , 滚动体半锥角为 β , 滚动体与外滚道的接触角是 $\alpha + 2\beta$, 滚动体个数为 N 。设旋转轴受到竖直向下并且作用在轴线上的载荷为 F , 忽略轴承自身的重量, 则每个滚动体受到内、外滚道垂直于母线的大小相同的均布压力, 其大小分别为 F_1 和 F_2 , F_1 的轴向分力为 F_{a1} , 径向分力为 F_{r1} ; F_2 的轴向分力为 F_{a2} , 径向分力为 F_{r2} 。

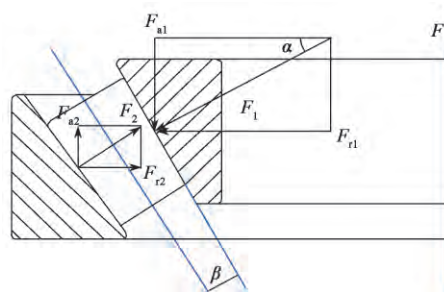


图6 圆锥滚子轴承受力分析
对滚动体与内滚道受力分析可知:

$$F_{a1} = \frac{F}{N}$$

由几何关系得:

$$F_{a1} = F_1 \cdot \sin \alpha$$

因此, 滚动体母线与外圈滚动面的均布载荷为

$$F_1 = \frac{F}{N \cdot \sin \alpha} \quad (8)$$

同理, 可得圆锥滚子母线与内圈滚道面的均布载荷为

$$F_2 = \frac{F}{N \cdot \sin(\alpha + 2\beta)} \quad (9)$$

2.2 滚动体与滚道接触力分析

文中的圆锥滚子轴承的滚动体与外圈滚道是属于凸-凹接触,而滚动体与内圈滚道属于凸-凸接触,如图7~图9所示。两种接触变形量的计算公式不同^[5-7]。

①对于凸-凸面接触,接触面半宽度为

$$b_1 = 1.59 \sqrt{\frac{F_1}{l} \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2) E'}} \quad (10)$$

两圆心的弹性趋近量:

$$\delta_1 = \frac{2Q \left(\ln \frac{4R_1 R_2}{b_1^2} + 0.834 \right)}{\pi l E'} \quad (11)$$

②对于凸-凹接触,接触面半宽度为

$$b_2 = 1.59 \sqrt{\frac{F_2}{l} \frac{R_2 R_3}{(R_3 - R_2) E'}} \quad (12)$$

接触面的弹性趋近量:

$$\delta_2 = \frac{2F_2}{l E'} (1 - \ln b_2) \quad (13)$$

式中: E' 为轴承材料的综合弹性模量; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为滚动体、内滚道和外滚道的曲率半径 (R_1 对应前文的 r_{out} , R_2 对应前文的 r_{in}); F_1 为内滚道作用于滚动体母线的载荷; F_2 为外滚道作用于滚动体母线的载荷; l 为滚动体与滚道有效接触长度。

$2b_1$ 、 $2b_2$ 为滚动体与内外圈接触的宽度; δ_1 、 δ_2 为滚动体与内外滚道接触表面的弹性趋近量,如图7~图9所示。

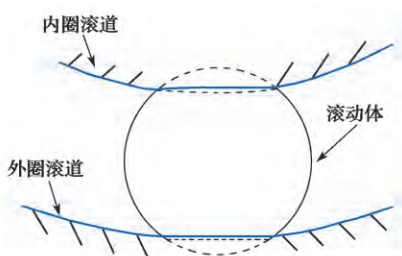


图7 滚动体与内外滚道接触变形区域

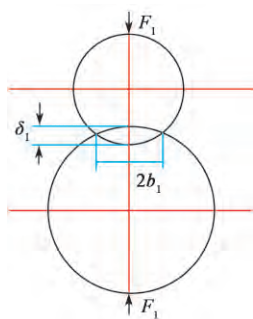


图8 凸-凸接触变形

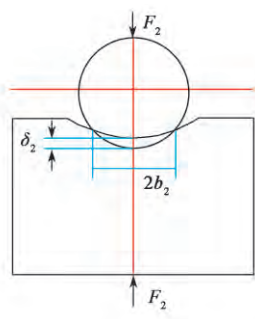


图9 凸-凹接触变形

2.3 润滑油膜擦滑分析

前面2.2节的分析中,滚动体和内、外圈的接触载荷引起弹性变形,而这种弹性变形是理论下的纯滚动,未考虑擦滑摩擦状态,一般滚动摩擦力与润滑膜厚度及接触表面的粗糙度有关。最小油膜厚度与表面综合粗糙度的比值表达式为

$$\kappa = h_{\min} / \sigma \quad (14)$$

式中:当 $\kappa < 0.4$ 时,摩擦为干摩擦;当 $\kappa > 3$ 时,摩擦为

全弹流摩擦;当 $0.4 \leq \kappa \leq 3$ 时,为混合摩擦。

根据这一规律,滚动体与滚道间的接触摩擦力可由下式计算:

$$T_e = \mu_a Q_a + \mu_e (Q - Q_a) \quad (15)$$

式中: Q_a 为粗糙微凸体承受的接触法向载荷; Q 为总的接触法向力; μ_a 为干摩擦系数; μ_e 为弹流摩擦系数;

由于相对滑动速度的存在,无论是干摩擦系数,还是弹流摩擦系数,都不是常数,而是随相对滑动速度变化的量。根据相关文献^[8],当接触面相对滑动速度较小时,摩擦系数与滑动速度成正比,当相对滑动速度达到一定值后,摩擦系数与滑动速度的关系就变化为非线性的,如图10所示。

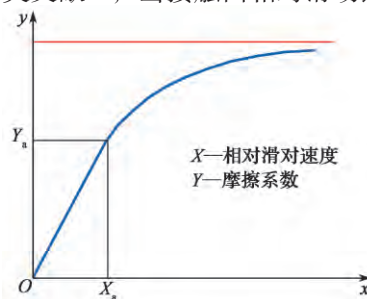


图10 摩擦系数与滑动速度的关系

$$Y = \begin{cases} \frac{Y_a}{X_a} X & 0 \leq X \leq X_a \\ Y_a (1 + Y_o X_o / (Y_o X_a + X_o Y_a)) & X_a < X < \infty \end{cases} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} Y_o &= 1 - Y_a \\ X_o &= X - X_a \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

3 仿真实验

为了模拟滚动体与滚道间的擦滑磨损,本文借助舍弗勒公司开发的高速滚动轴承动力学软件对圆锥滚子轴承的滚动状态进行仿真分析,以滚动体自身转动计算结果为例,当轴承达到一定转速后,其滚动体随时间的自转角速度及角加速度如图11和图12所示。

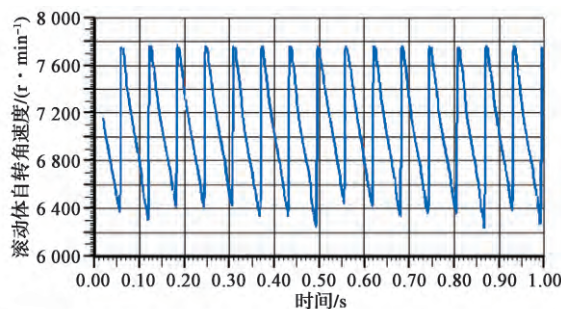


图11 滚动体自转角速度-时间曲线

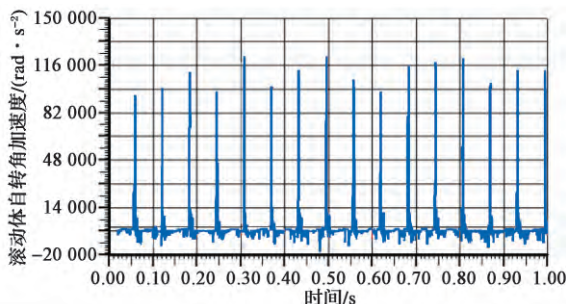


图12 滚动体自转角加速度-时间曲线

在图 11 中, 滚动体的自转角速度随着转动周期呈现周期变化。结合图 12, 当滚动体处于重力载荷作用区域时, 滚动体的自转角加速度会迅速增大到一个正峰值, 此时滚动体的自转角速度加快, 随着轴承转动角继续增大, 而当滚动体离开载荷作用区域后, 滚动体的自转角加速度又会迅速下降, 并且达到负值, 其自转角速度明显减小。这种运动姿态可以解释为: 由于重力载荷作用力使得轴承内圈滚道向下偏移, 当滚动体旋转至载荷区时, 内圈对滚动体的接触压力所产生的弹流摩擦力会对其自转产生作用力矩, 且这一作用力矩远大于其他反向作用力矩, 故轴承滚动体瞬间加速自转; 而当滚动体随着轴承保持架旋转至离开载荷作用区后, 滚动体所受内圈滚道的接触压力迅速减小直到为零, 滚动体的自转受到润滑剂的弹流摩擦阻力矩、搅拌力矩及保持架的拖曳力矩, 滚动体的自转开始迅速减缓。在这个过程中, 如果接触中心油膜厚度达不到混合摩擦厚度, 则滚动体与滚道面间的滑动摩擦就会加剧, 接触疲劳损伤就会不断积累。图 13 为滚动体作用于滚道表面的瞬时接触区域。不难看出, 接触区域集中在滚道中心范围内, 此区域是承受关键重力载荷区域, 也是滚道接触摩擦相对集中的区域, 持续滚道接触摩擦会损伤滚道表面, 继而不断恶化接触区域。

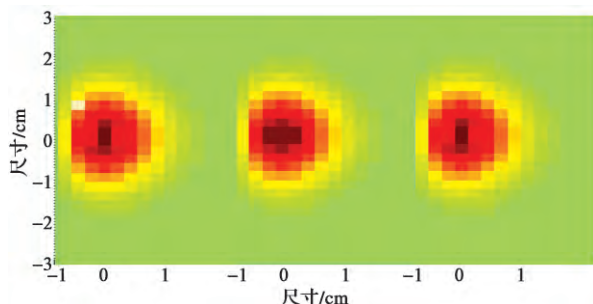


图 13 滚道表面瞬时接触区域

4 结语

本文针对应用在高速动车组齿轮箱的圆锥滚子轴

承, 根据轴承滚道表面损伤的特征开展机理分析, 建立了滚动体与滚道的受力模型, 对两者相互接触弹性变形的特征进行了分析, 同时建立了润滑油膜在考虑滑擦接触的滚动体和滚道滚动接触模型, 确定了摩擦系数与滑动速度的关系。主要研究解释了滚动体在承载区的擦滑运动状态, 阐述了滚动体在滚道表面瞬间接触区域, 在滚动体进入承载区时会被瞬间加速旋转。如第 3 章所述, 如果接触中心油膜厚度达不到混合摩擦厚度, 则滚动体与滚道面间的滑动摩擦就会加剧, 为了预防磨损恶化, 轴承润滑条件就必须得到满足。本文结合理化检测所判断的轴承滚道表面损伤属于滚动接触疲劳, 通过机理分析, 讨论了滚动体与滚道之间因润滑不良会加剧接触摩擦, 继而诱发接触表面的损伤。

参考文献:

- [1] 钱伟长, 叶开源. 弹性力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 王度伟, 罗继伟, 陈立平. 圆锥滚子轴承接触分析 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2007, 35(9): 19-21.
- [3] 罗继伟, 张俊杰. 圆锥滚子接触应力数值求解 [J]. 轴承, 2004(9): 1-3.
- [4] 马国华. 元摩擦弹性接触问题的数值计算分析及其在滚动轴承中的应用 [D]. 西安: 西安交通大学机械工程学院, 2002.
- [5] Jonson K L. Contact mechanics [M]. London: Cambridge University Press, 1985.
- [6] 吴昊, 王建文, 安琦. 弹流润滑悬挂式转子支承轴承轴向刚度的计算 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2008, 34(3): 447-451.
- [7] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] 黄冠华. 高速列车齿轮传动系统动态特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

作者简介: 戴晓超 (1985-), 男, 工程师, 从事转向架设计工作。

(上接第 61 页)

- [12] 宋文胜, 冯晓云. 电力牵引交流传动控制与调制技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [13] 赵卫, 刘文生. 牵引变流器网侧电流低次谐波抑制的研究 [J]. 机车电传动, 2017(3): 1-6.
- [14] 高金源, 夏洁. 计算机控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 128-155.
- [15] 朱俊杰, 马伟明, 聂子玲. 一种用于静止式中频电源的比例谐振控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(10): 79-85.
- [16] Yang H, Lin H, Lv Y, et al. A multi-resonant PR inner current controller design for reversible PWM rectifier [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2013: 316-320.
- [17] 王亮, 王冰, 黄存荣. 基于比例谐振控制器的逆变控制系统设计与参数整定 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(28): 8268-8273.

- [18] 余福斌. 基于 FPGA 的并联型有源电力滤波器研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 25-44.
- [19] 钱强, 谢少军, 季林, 等. 一种提升逆变器对电网适应能力的电流控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6193-6201.
- [20] Yepes A G, Freijedo F D, Óscar Lopez, et al. Analysis and Design of Resonant Current Controllers for Voltage-Source Converters by Means of Nyquist Diagrams and Sensitivity Function [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5231-5250.
- [21] 徐海亮. 双馈风电变流器的谐振控制技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 43-57.
- [22] 杨化承. 应用于储能系统的三相电压型 PWM 整流器研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 10-29.

作者简介: 刘通 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力牵引及传动控制。