

某型地铁车辆轴箱弹簧下盖螺栓断裂机理分析

李国栋 战立超 姜朝勇 吴金贤

(中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春//第一作者, 正高级工程师)

摘要 地铁车辆轴箱弹簧系统属于复杂的螺栓连接结构。通过有限元方法研究了在运用过程中其下盖螺栓断裂的机理。原结构 U 型底漆调整垫抗滑能力不足, 在纵向载荷作用下发生滑动接触, 导致螺栓承受较大交变弯矩, 最终发生断裂。改进的圆型打砂调整垫显著提高了抗滑能力, 改善了螺栓受载环境, 大幅度降低了螺栓承受的弯矩载荷。结果表明: 被紧固结构的接触状态直接影响紧固螺栓的使用寿命。

关键词 地铁车辆; 轴箱弹簧; 螺栓; 断裂机理

中图分类号 U270.331⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.003

Analysis of Bolt Fracture Mechanism on the Axle Box Spring Lower Cover of A Metro Vehicle

LI Guodong, ZHAN Lichao, JIANG Chaoyong, WU Jinxian

Abstract Metro axle box spring system is a kind of complex bolt connection structure. The mechanism of lower cover bolt fracture occurred during application is studied by using finite element method (FEM). Due to the insufficient anti-sliding ability of the original structure U-type primer adjustment pad, the sliding contact occurs under the action of longitudinal load, and the bolt is subjected to large alternating bending moment and eventually breaks. Modified round milled sand adjustment pad could significantly improve the anti-sliding ability and the bolt loading environment, reduce the bending moment load on the bolt. The results show that the contact state of the fastened structure directly affects the life span of the tightening bolt.

Key words metro vehicle; axle box spring; bolt; fracture mechanism

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

地铁车辆的轴箱弹簧装置将轮对与构架联系在一起, 主要起传递载荷及过滤由轨道传递到构架的振动作用, 不仅直接影响轨道车辆动力学性能, 影响车辆乘坐舒适性, 同时也影响车辆运行安全

性^[1]。某型地铁车辆在运用过程中发生了轴箱弹簧下盖螺栓断裂故障, 威胁了车辆的正常运营。

螺纹连接结构以结构简单、便于拆卸更换等优点, 被广泛应用于机械结构中。相关研究结果表明: 在横向载荷作用下, 螺栓的轴向力下降显著, 螺栓更容易发生松动; 界面状态对螺栓的性能具有显著影响^[2-3]; 增大接触界面摩擦系数, 能够显著提高抗滑动能力^[4-5]。

针对某型地铁车辆轴箱弹簧下盖螺栓的断裂故障, 台架试验证明了调整垫形式对螺栓受力状态影响显著^[6]; 但限于试验设备无法监测调整垫接触状态, 故未能揭示故障根本原因。本文通过仿真分析, 研究了不同形式调整垫在工作载荷下的界面接触状态, 并对螺栓断裂的根本原因进行了研究。

1 轴箱弹簧下盖螺栓断裂断口分析

1.1 某型地铁车辆轴箱弹簧结构简介

某型地铁车辆轴箱弹簧装置结构如图 1 所示^[6], 弹簧心轴下部与轴箱体弹簧定位孔间隙配合。为调整弹簧高度差及轮重, 可在弹簧心轴支撑座与轴箱体弹簧定位孔之间安装 U 型底漆调整垫, U 型垫开口方向为纵向(车辆前进方向, 图 1 中 x 轴方向)。心轴底部与轴箱下盖由 2 颗螺栓连接, 螺栓规格为 M16 \times 55, 强度等级为 8.8 级, 紧固力矩为 150 N \cdot m。螺栓紧固后将弹簧心轴、调整垫、轴箱体及轴箱下盖夹紧。螺栓孔位于下盖纵向中心线上, 对称分布于横向(车轴方向, 图 1 中 y 轴方向)中心线两侧。

1.2 轴箱弹簧下盖螺栓断口分析及故障件分解检查

经检测, 断裂螺栓的材料成分、硬度、缺陷等级、金相组织均满足标准要求, 螺栓的抗拉强度和屈服强度等力学性能满足标准要求。断口失效分析显示, 疲劳瞬断区为等轴状韧窝, 表明交变弯矩

导致螺栓断裂,如图2所示^[7]。进一步对故障件分解发现,U型调整垫有滑动痕迹,判断故障原因为

纵向交变载荷作用下,被紧固件的滑动导致螺栓承受较大交变弯矩,最终发生疲劳断裂。

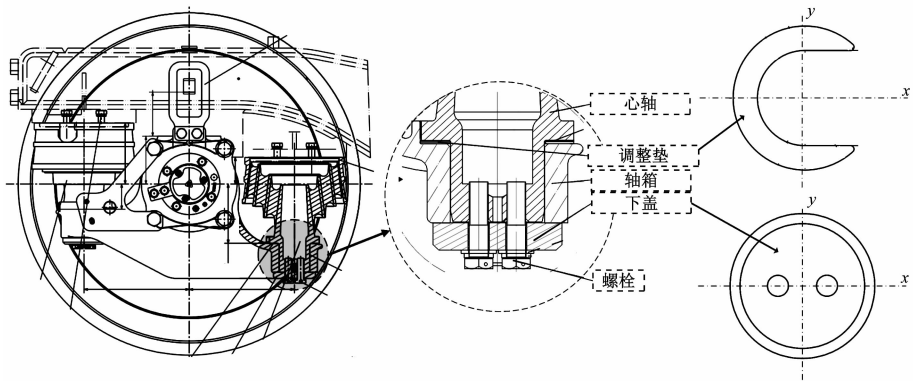
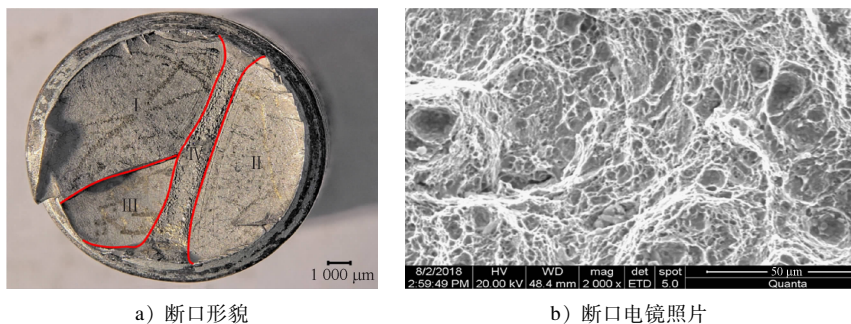


图1 某型地铁车辆轴箱弹簧结构



a) 断口形貌

b) 断口电镜照片

图2 断裂螺栓断口分析

1.3 某型地铁车辆轴箱弹簧结构改进

为增强调整垫抗滑移能力,将弹簧心轴支撑座与轴箱体弹簧定位孔之间调整垫由U型改进为圆型,并将表面处理工艺由涂底漆改进为打砂处理。

2 仿真分析流程

本文基于通用有限元仿真分析软件 ANSYS,采用瞬态动力学分析,研究在纵向工作载荷作用下,U型调整垫轴箱弹簧结构与圆型调整垫轴箱弹簧结构中调整垫的接触状态、弹簧心轴滑动状态以及螺栓受力状态,进一步分析螺栓断裂机理。

2.1 有限元模型

轴箱弹簧结构仿真分析模型如图3所示。弹簧心轴、调整垫、轴箱下盖、螺栓及轴箱弹簧定位孔采用实体单元模拟,并在各接触面建立接触单元;采用预紧单元模拟螺栓预紧力;对轴箱体主体主要关注其运动状态,采用刚体模拟;轴箱弹簧采用弹簧单元模拟。轴箱体与车轴连接位置约束三向平动自由度以及绕x轴、z轴(垂直轨道平面方向)转动自由度,在轴箱弹簧上施加纵向载荷 37.5 kN。

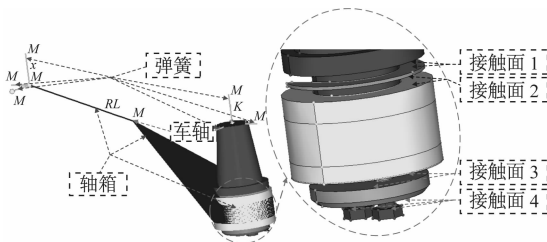


图3 有限元模型

2.2 加载载荷步

根据设计参数,仿真分析加载载荷步如下:① 载荷步 1~5,施加螺栓预紧载荷,模拟螺栓预紧力及车体与转向架的垂向载荷;② 载荷步 5~25,轴箱弹簧上施加 0~37.5 kN 线性增大纵向载荷,模拟构架纵向载荷;③ 载荷步 26~35,轴箱弹簧上施加恒定纵向载荷 37.5 kN,保证计算结果趋于稳定。

2.3 结果提取

针对仿真分析研究目的,提取以下结果分析:① 提取调整垫上下表面的界面接触状态;② 提取弹簧心轴相对于轴箱弹簧定位孔的位移,研究弹簧心轴与轴箱体滑动状态;③ 提取螺栓弯矩研究螺栓受力状态。

3 仿真分析结果

3.1 U 型调整垫轴箱弹簧结构

各载荷步下纵向载荷、调整垫接触状态、弹簧心轴相对于轴箱弹簧定位孔的位移以及螺栓弯矩如图 4 和图 5 所示。

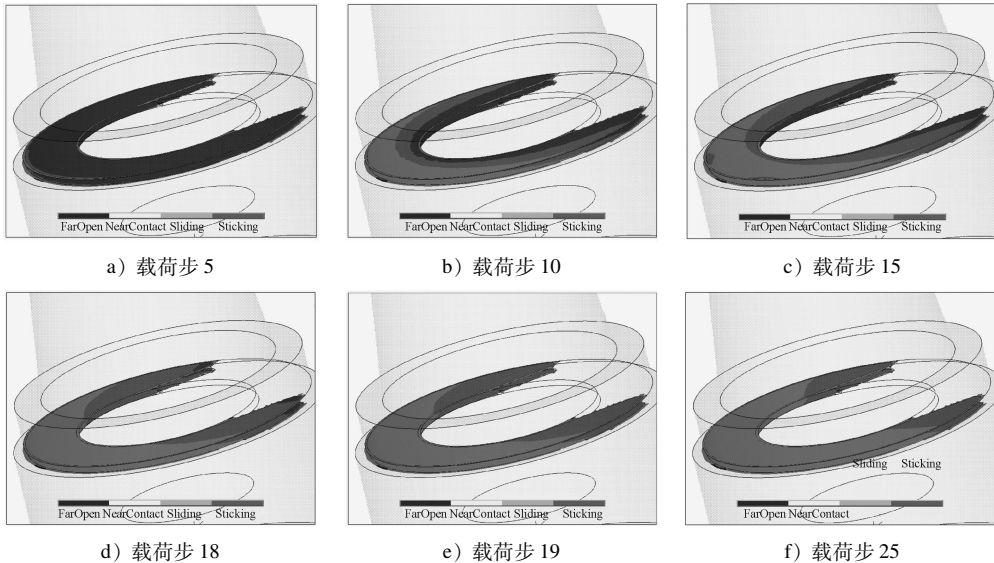


图 4 U 型调整垫轴箱弹簧结构调整垫接触状态

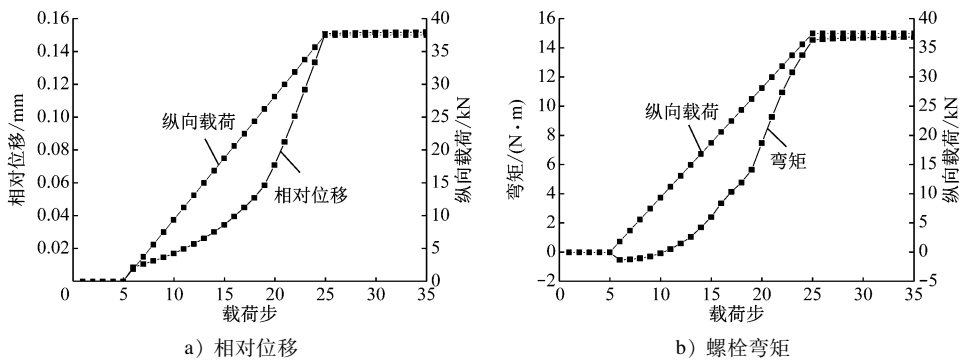


图 5 不同纵向荷载下 U 型调整垫轴箱弹簧结构相对位移及螺栓弯矩

图中可见,在纵向载荷由 0 加载至 37.5 kN(载荷步 5~35)过程中,调整垫界面的接触状态变化可分为以下两个阶段:

1) 部分区域滑动接触阶段。当螺栓完成预紧且纵向载荷为 0(载荷步 5)时,调整垫完全处于黏着接触状态。施加纵向载荷后,调整垫逐渐有区域进入滑动接触状态甚至接近接触状态,发生滑动。弹簧心轴相对于轴箱弹簧定位孔的位移与螺栓弯矩逐渐增大,且随着滑动接触与接近接触状态的区域增大,弹簧心轴相对于轴箱弹簧定位孔的位移与螺栓弯矩的增大速率也逐渐增大。

2) 全部区域滑动接触阶段。当纵向载荷大于 25 kN(载荷步 19)时,调整垫完全进入滑动接触状态或者接近接触状态,全部区域发生滑动,弹簧心轴相对于轴箱弹簧定位孔的位移与螺栓弯矩继续

增大,且增大速率显著提高。当纵向载荷达到 37.5 kN 时,弹簧心轴与定位孔的相对位移为 0.15 mm,螺栓弯矩达到 14.5 N·m。

3.2 圆型打砂调整垫

各分析载荷步下纵向载荷、调整垫接触状态、弹簧心轴相对于轴箱弹簧定位孔的位移以及螺栓弯矩如图 6 和图 7 所示。

图中可见,在纵向加载由 0 加载至 37.5 kN(载荷步 5~35)过程中,调整垫界面接触状态始终由黏着接触状态占据主导。弹簧心轴与定位孔的相对位移与螺栓弯矩增大速率较为稳定,近似于线性增长。当纵向载荷加载到 37.5 kN,弹簧心轴与定位孔的相对位移 0.014 mm,螺栓弯矩仅 0.9 N·m。

3.3 结果分析

在相同纵向载荷作用下,圆型调整垫界面滑动

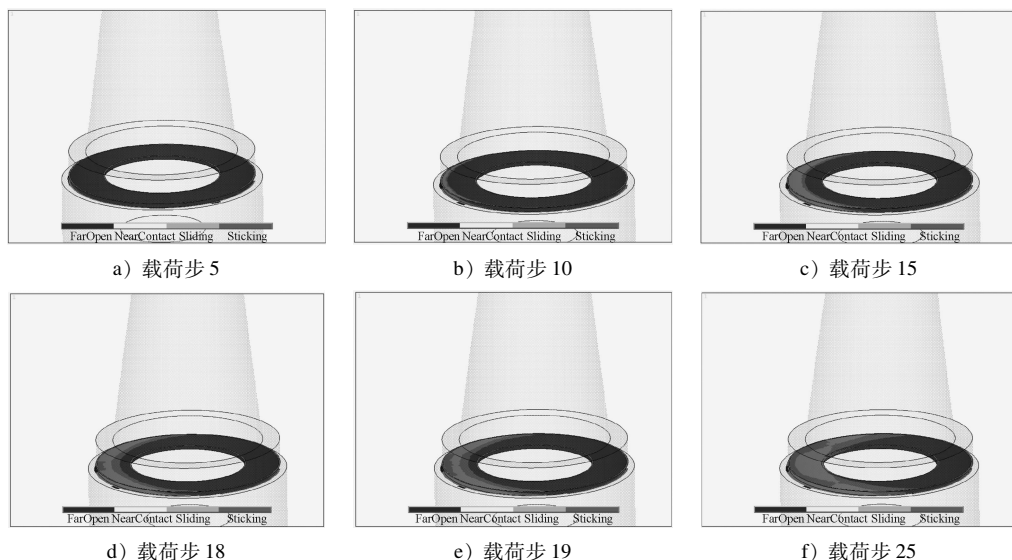


图6 改进结构调整垫接触状态

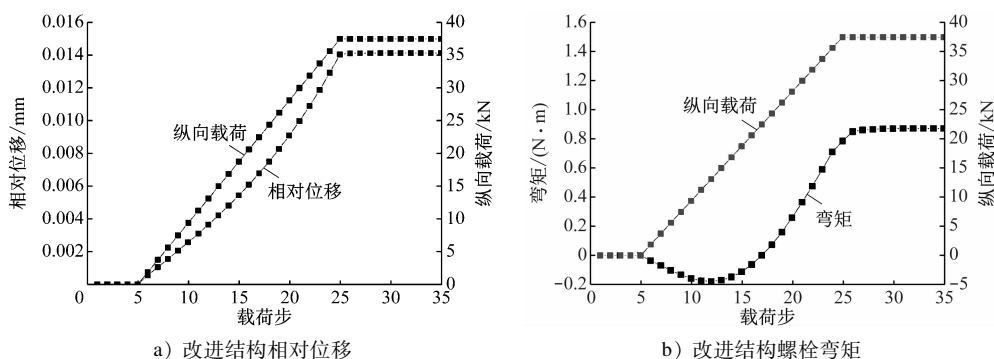


图7 改进结构相对位移及螺栓弯矩

区域远小于 U 型调整垫。当纵向载荷达到 37.5 kN 时,U 型底漆调整垫轴箱弹簧下盖螺栓弯矩达到 $14.5 \text{ N} \cdot \text{m}$;圆型打砂调整垫轴箱弹簧下盖螺栓弯矩为 $0.9 \text{ N} \cdot \text{m}$,降低 93.8%。综上,调整垫抗滑动能力不足,发生大面积滑动接触甚至接近接触,是螺栓承受较大弯矩并导致断裂的根本原因。

4 结语

针对某型地铁车辆轴箱弹簧下盖螺栓断裂故障,本文基于仿真分析,研究了 U 型底漆调整垫与圆型打砂调整垫接触状态对下盖螺栓受载状态的影响。结果表明:U 型底漆调整垫由于抗滑动能力不足,在纵向载荷作用下发生滑动,是导致螺栓承受较大交变弯矩,最终发生疲劳断裂的原因;与 U 型底漆调整垫相比,圆型打砂调整垫抗滑动能力显著提升,在相同纵向载荷作用下,使下盖螺栓承受的弯矩降低 90% 以上。可见,在螺栓紧固结构中,被紧固件的接触状态直接影响螺栓的受力状态。本文的分析结果可为复杂紧固结构的设计提供

参考。

参考文献

- [1] 严隽堯,傅茂海. 车辆工程[M]. 北京:中国铁道出版社, 2008,50.
- [2] JIANG Y Y, ZHANG M, PARK T W, et al. An experimental investigation on self-loosening of bolted joints [C]// Bijan Azadi-Borujeni. Proceedings of the ASME 2003 Pressure Vessel and Piping Conference. Cleveland, Ohio, USA: ASME, 2003:55.
- [3] JUNKER G H. New criteria of self-loosening faster under vibration [J]. SAE Transactions, 1969, 78:314.
- [4] KARAMIS M B, SELCUK B. Analysis of the friction behavior of bolted joints [J]. Wear, 1993, 166(1):73.
- [5] HOUSARI B A, NASSAR S A. Effect of thread and bearing friction coefficients on the vibration-induced loosening of threaded fasteners [J]. Journal of Vibration and Acoustic, 2004, 129(4): 484.
- [6] 高鹏燕. 地铁转向架一系簧下盖螺栓断裂分析及改进措施[J]. 城市轨道交通研究,2019(2):48-52.
- [7] 逯连文,刘晓琴,杨建,丁术涛,等. 轴箱弹簧下压盖板紧固螺栓的断裂原因分析[J]. 工程与试验,2016,56(4):36.

(收稿日期:2019-10-24)