

面向城市轨道交通车辆牵引中心销失效分析及 处置工艺研究

郑立 司媛

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘要 [目的] 针对某地铁车辆在二次大修过程中发现的牵引中心销锥面存在局部裂纹、降低与牵引中心销座配合度且对车辆后续运行产生安全隐患等问题, 有必对城市轨道交通车辆牵引中心销进行失效分析。[方法] 采用假设分析法, 结合有限元软件, 研究牵引中心销在热处理阶段及车辆日常运行过程中产生的随机振动、冲击振动、特殊条件下发生的局部接触挤压、扭转变形问题, 并建立了相应的有限元模型。分析不同置信区间下, 牵引中心销的应力分布特征及其沿不同方向上的变形程度。[结果及结论] 牵引中心销在热处理阶段积累的残余应力是后续产生局部裂纹的主要原因之一, 且与车辆日常运营过程中产生的振动、挤压、扭转等因素发生耦合, 可能导致锥面发生塑性流动, 进而产生裂纹。在架大修期间实施合理的检修工艺, 能够消除局部裂纹, 延长牵引中心销的使用期限, 降低锥面局部裂纹扩散的可能性。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 牵引中心销; 失效分析

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.046

Failure Analysis and Treatment Process of Traction Center Pins for Urban Rail Transit Vehicles

ZHENG Li, SI Yuan

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] In view of the problems found during the secondary overhaul of a subway vehicle, such as local cracks on cone surface of the traction center pin, the reduced fit with the traction center pin seat, and thus generated potential safety hazards to the subsequent operation of the vehicle, it is necessary to conduct a failure analysis on the traction center pin of urban rail transit vehicles. [Method] Combined with finite element software, the hypothesis analysis method is adopted to study the random vibration, shock vibration, local contact extrusion and torsional deformation issues under special conditions of the traction center pin during the heat treatment stage and daily vehicle operation, a corresponding finite element

model is established. The stress distribution characteristics of traction center pins under different confidence intervals and its deformation degrees along different directions are analyzed. [Result & Conclusion] Residual stress accumulated in traction center pins during the heat treatment stage is one of the main reasons for subsequent local cracks, and its coupling with vibration, extrusion, torsion and other factors generated during vehicle daily operation, may induce plastic flow on the cone surface and then form cracks. Implementing a reasonable maintenance process during frame overhaul can eliminate local cracks, extend the service life of traction center pins, and reduce the possibility of local crack propagation on the cone surface.

Key words urban rail transit; vehicle; traction center pin; failure analysis

牵引中心销作为连接车辆上体与转向架的关键零部件之一, 其结构及强度设计寿命一般为30年左右, 能够保证车辆在使用寿命范围内平稳、安全运行。在车辆架修或大修过程中, 牵引中心销视具体情况考虑是否下车, 结合其较高的设计、使用寿命, 在架修或大修过程中一般只对其做检查, 当出现明显失效缺陷时则考虑换新。

针对车辆底架设备的安装问题, 运用随机振动进行功能性分析的相关研究正在逐步深入, 部分研究内容已用于生产。文献[1]利用有限元分析方法, 模拟了充电机长寿命试验和冲击载荷试验, 研究表明, 该充电机的结构满足强度设计要求。此外, 铁路车辆吊挂托臂^[2]、转向架撒砂装置^[3]、底架吊装接线箱^[4]等同样利用随机振动相关理论进行了车辆设备研究, 并取得了一定的成果。

目前, 针对牵引中心销表面裂纹产生原因的研究相对较少, 在产生裂纹后缺乏故障诊断依据及分析思路。结合现场大修技术要求, 本文通过基于应力的模拟振动试验, 对某车辆牵引中心销锥面在检

修过程中发现的某 6 节编组列车中 1 节车的偶发性裂纹问题进行故障诊断。本文研究可为此类故障提供判别及处置依据。

1 失效理论基础

牵引中心销通常采用超高强度合金钢注模成型,再通过热处理工艺对工件刚度及强度进行改性,以满足设计要求,保证车辆安全、平稳运行。在热处理过程中,因热载荷作用导致工件内部发生金相组织变化,在提高强度的同时也保留了部分残余应力。在日常运营过程中,受钢轨接缝、地面起伏、空气气流及转弯半径变化等因素耦合作用,安装后的牵引中心销始终处于振动状态,特殊工况下可能出现冲击振动等情况。

裂纹产生的因素主要由以下 3 种单独作用或耦合所致:

1) 在热处理阶段经高温淬火、中温回火后,因热源载荷作用导致其在内部形成残余应力;在后续日常运营过程中,因缓慢释放造成表面应力分布不均发生撕裂,进而产生局部裂纹。

2) 在日常运营过程中,因受车辆自身因素、环境因素等作用产生随机振动、冲击振动,导致锥面与座面发生接触挤压的同时加速内部残余应力释放,致使表面发生塑性流动产生裂纹。

3) 在车辆加速、减速、过弯等状态下,因锥面与座面发生局部挤压扭转变形,导致局部区域应力分布不均,应力梯度区域极易因拉伸产生塑性变形,形成局部裂纹。

2 仿真分析设置

牵引中心销材料主要为 G24Mn6,采用欧洲标准 EN 10213: 2007 *Steel castings for pressure purposes* 进行 QT3 等级的热处理工艺,淬火温度范围为 880 ~ 950 °C,回火温度范围为 650 ~ 680 °C,抗拉强度为 600 ~ 880 MPa,屈服强度大于 400 MPa。仿真环境设定淬火温度达到 900 °C、回火温度达到 650 °C 时,满足要求。为了模拟油冷过程,设定淬火后油冷的对流系数为 1 500 W/m²,自然对流系数为 10 W/m²,室温设定为 22 °C。

在随机振动、冲击振动仿真模型中,一般采用概率统计学对随机振动信号进行处理,变换为具有一定特征的功率密度谱或加速度谱,便于后续分析。选用 IEC 61373—2010《铁路应用车辆设备冲

击和振动试验》标准中推荐的参数进行模拟振动分析。因牵引中心销属于上述标准中的 A 类 I 级设备,设置初始频率为 5 Hz。

为了研究牵引中心销锥面与牵引中心座发生接触挤压、扭转变形过程中的应力分布,同时能减少计算用时与计算量,将三维模型简化至二维平面,并假设接触区域夹角为 60°,设定牵引中心销座固定,对牵引中心销锥面沿轴线方向施加位移载荷,观察过程中的应力变化情况。

3 仿真结果分析

3.1 牵引中心销热处理工艺分析

通过 ANSYS 软件的 Workbench 瞬态热模块分析牵引中心销的淬火温升过程、淬火冷却过程及回火过程。依据上述分析设置,建立仿真分析环境并施加热源载荷,在完成瞬态热求解过程后,将结果作为输入,继续求解其应力分布及变形程度。淬火工艺下的牵引中心销应力分布云图如图 1 所示。

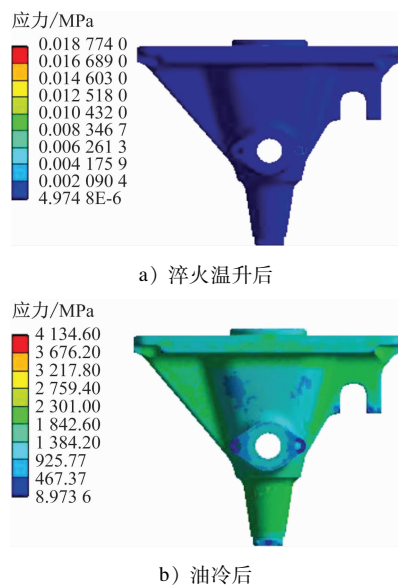


图 1 淬火工艺下的牵引中心销应力分布云图

Fig. 1 Stress distribution nephogram of traction center pin in quenching process

由图 1 a) 可知:当淬火温度达到 900 °C 后,牵引中心销最大应力值约为 0.018 8 MPa,最大应力主要集中在横向止挡橡胶安装座根部及牵引中心销锥面下端面,其他部位应力较小。由此可知,在工件缓慢温升过程中,应力变化及增量相对较小。由图 1 b) 可知:当淬火温度达到 900 °C 后、工件放入油中迅速冷却时,工件表面应力分布极速上升,在

牵引中心销锥面、侧壁等局部区域应力达到了 2 000 MPa 左右,应力最大区域主要集中在横向止挡橡胶安装座根部局部,以及牵引中心销锥面下端面局部,最大应力达到了 4 134.6 MPa。

综上所述,在淬火温升阶段,工件受热源载荷作用,牵引中心销受到的应力大小较淬冷阶段低,且其分布较为分散,整体影响不大;在淬冷阶段,工件因温升发生膨胀后急速冷却,导致金相组织发生改变,牵引中心销受到的应力急剧增大,部分应力即为后续残余应力组成部分。

进一步分析牵引中心销热处理回火过程,仿真环境中,回火温度设定为 650 ℃,冷却时采用空气对流换热。回火冷却后的牵引中心销应力分布云图如图 2 所示。由图 2 可知:经回火处理后的牵引中心销应力分布极为不均,在牵引中心销锥面根部及上端面根部应力最大,最大值约为 56.700 MPa;在横向止挡橡胶安装座及墙体表面应力最小,仅为 0.054 MPa。对比图 1 可知,经回火处理后的牵引中心销应力大小及分布有明显改善,回火阶段应力值较淬火冷却阶段应力值有明显降低。

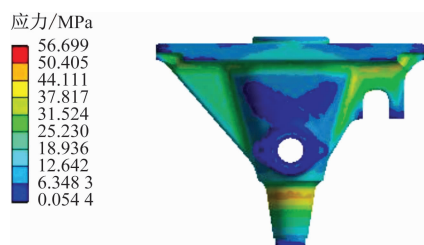


图 2 回火冷却后的牵引中心销应力分布云图

Fig. 2 Stress distribution nephogram of traction center pin after tempering and cooling

为了进一步研究热处理阶段工件的变形量,分别沿不同方向求解淬火阶段、回火阶段工件的热伸长量,结果如表 1 所示。淬火温升阶段的工件总变形量最大,最大值约为 3.94 mm;其次为淬火冷却阶段;回火冷却阶段的工件总变形量最小,约为 0.14

表 1 热处理阶段不同方向的工件变形量

Tab. 1 Deformation values of the workpiece in different directions during heat treatment stages

热处理阶段	总变形量/mm	x 方向变形量/mm	y 方向变形量/mm	z 方向变形量/mm
淬火温升	3.940 6	3.172 6	2.255 4	2.216 5
淬火油冷	3.118 6	2.189 9	1.450 4	1.401 3
回火冷却	0.139 3	0.111 7	0.087 7	0.081 4

mm。在不同方向上,3 个阶段 x 方向的工件变形量均大于其他方向上的变形量,且呈一定规律递减。工件变形量由淬火阶段至回火阶段依次降低,工件变形量主要包含可恢复的弹性变形及塑性变形。

3.2 日常运行振动分析

在日常运行阶段,因载荷变化、环境因素、自身结构等原因,当车辆轮对在通过工字型钢轨接缝处时,易产生随机振动及冲击振动。为了研究牵引中心销在日常运营过程中的随机振动及在特殊工况下的冲击振动应力分布及变形量大小,首先对牵引中心销进行模态分析,求解前 10 阶固有频率,再将结果作为输入,并参考加速度响应谱,求解随机振动过程。

3.2.1 日常运行中的随机振动

基于加速度谱的牵引中心销随机振动分析如图 3 所示。当牵引中心销安装在车体底面,即牵引中心销上端面施加固定约束且不考虑安装间隙,基于概率统计学原理,因随机振动产生的应力最大值在 δ (正态分布标准差)置信区间内为 0.05 MPa,最大应力区域主要分布在横向止挡橡胶安装座根部及锥面下端面部分区域。变形量沿 x 方向的最大值在 δ 置信区间内约为 1.04×10^{-5} mm,最大变形量同样主要集中在横向止挡橡胶安装座端面及根部,以及锥面下端面部分区域。

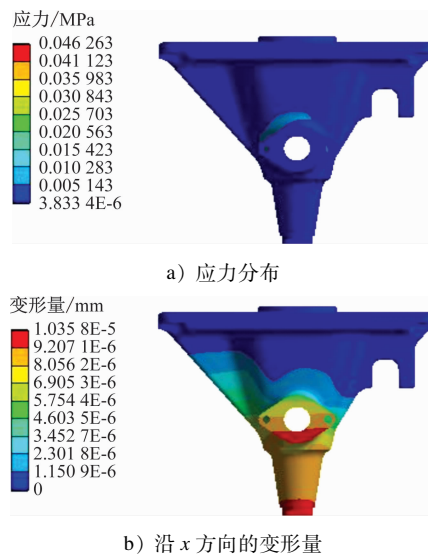


图 3 基于加速度谱的牵引中心销随机振动分析

Fig. 3 Random vibration analysis of traction center pin based on acceleration spectrum

上述结果只讨论了在 δ 置信区间的结果,为了深入研究随机振动过程的应力分布特征及变形量,

分别统计在 δ 、 2δ 、 3δ 置信区间内的应力最大值及沿不同方向上的牵引中心销变形量分布,结果如表 2 所示。

表 2 不同置信区间应力最大值及不同方向上牵引中心销变形量随机振动结果

Tab. 2 Random vibration results of maximum stress values in different confidence intervals and traction center pin deformation along different directions

置信 区间	应力最大 值/MPa	牵引中心销变形量/mm		
		x 方向	y 方向	z 方向
δ	0.046 26	$1.035\ 8 \times 10^{-5}$	$6.207\ 7 \times 10^{-6}$	$1.179\ 3 \times 10^{-5}$
2δ	0.092 53	$2.071\ 6 \times 10^{-5}$	$1.241\ 5 \times 10^{-5}$	$2.358\ 5 \times 10^{-5}$
3δ	0.138 79	$3.107\ 4 \times 10^{-5}$	$1.862\ 3 \times 10^{-5}$	$3.537\ 8 \times 10^{-5}$

由表 2 可知:在 δ 、 2δ 、 3δ 置信区间内,应力大小逐步递增,最大值约为 0.14 MPa; z 方向的牵引中心销变形量最大,3 个方向的牵引中心销变形量最大值分别约为 1.18×10^{-5} mm、 2.36×10^{-5} mm、 3.54×10^{-5} mm。由此可知,随着置信区间的不断扩大,随机振动产生的最大应力越大,最大牵引中心销变形量也越大。

3.2.2 特殊条件下的冲击振动

根据 IEC 61373: 2010 *Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests* 提供的试验条件,在不同方向施加冲击载荷后,观察工件应力分布及变形量大小。基于加速度谱的牵引中心销冲击振动分析如图 4 所示。

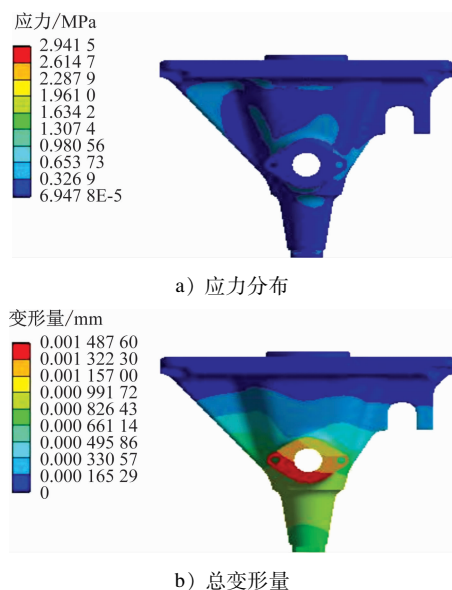


图 4 基于加速度谱的牵引中心销冲击振动分析

Fig. 4 Shock vibration analysis of traction center pin based on acceleration spectrum

由图 4 可知:当牵引中心销在安装于车体底面(即牵引中心销上端面施加固定约束且不考虑安装间隙)时,受到冲击振动所产生的应力最大值约为 2.942 MPa,最大应力区域主要分布在横向止挡橡胶安装座根部及锥面下端面部分区域,整体变形量最大值约为 0.001 5 mm,最大变形量同样主要集中在横向止挡橡胶安装座端面及根部,以及锥面下端面部分区域。分析不同方向上的变形量可知,沿 x 方向的变形量最大值为 7.92×10^{-6} mm,沿 y 方向变形量最大值为 4.54×10^{-6} mm,沿 z 方向的变形量最大值为 6.57×10^{-5} mm,即冲击振动产生的变形量沿 z 方向最大。

3.3 与牵引中心销座接触挤压分析

当车辆起步、减速或转弯时,牵引中心销锥面与牵引中心座会因局部接触产生挤压。当车辆经过股道弯道时,两者接触面在挤压的同时还会发生扭转,极易使两者在接触区域因挤压、扭转造成应力分布不均而产生塑性流动,进而导致接触表面产生裂纹。为了研究牵引中心销锥面该种失效形式,采用瞬态动力学模块进行分析,同时简化牵引中心销结构,将三维结构转化为二维结构进行分析计算。牵引中心销座受到挤压及扭转时的应力分布云图如图 5 所示。由图 5 可知:在不考虑其他材料减压、减振的条件下,牵引中心销锥面与牵引中心座接触面的最大瞬时应力可达 5 698.1 MPa,最大应力分布在接触面区域。

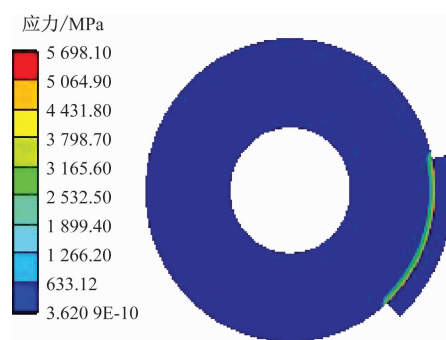


图 5 牵引中心销座受到挤压及扭转时的应力分布云图

Fig. 5 Stress distribution nephogram of traction center pin seat during extrusion and torsion

4 裂纹处置工艺

目前,现场主要采用人工目视方法进行牵引中心销表面质量预检,基于前文的分析可知,运营过

程中裂纹产生区域主要为牵引中心销锥面及下端面,因此在检修过程中应重点检查以上部位。当发现疑似裂纹时,首先对牵引中心销缺陷表面进行清洁处理,再通过探伤手段对裂纹区域进行探伤甄别,判断该部件是否需要报废。判断及处置方法主要有:

1) 采用探伤工艺判断疑似裂纹深度及裂纹分布方向。当裂纹走向为竖直方向、裂纹长度不超过 30 mm、裂纹深度不超过 1 mm 时,对裂纹区域采用粗砂纸进行打磨,去除裂纹避免其二次扩散,再通过探伤工艺进行二次检查,无明显裂纹即可继续使用。

2) 当裂纹分布方向为横向、裂纹深度超过 1 mm、裂纹长度超过 50 mm,或打磨后探伤仍发现有深度裂纹时,则该牵引中心销需整体换新。

上述检测及处置技术的优点主要为现场可操作性强,能够针对已发现的局部裂纹进行快速处置,满足大修生产要求并及时排除安全隐患。但该方法对操作人员技能水平及经验要求较高,人力依赖程度较大,且采用粗砂纸对局部裂纹进行打磨的同时易对周围区域造成二次伤害,降低了与牵引中心销座的配合度。

基于前文分析可知,牵引中心销锥面裂纹产生的主要原因为应力分布不均及缓慢释放过程中引起的塑性流动,应力主要来源之一为热处理阶段由热源载荷形成的内应力,在后续运营过程中由多因素耦合导致其缓慢释放造成锥面局部裂纹。因此,若能减小热处理阶段产生的残余应力,则可减小锥面产生裂纹的可能性。

5 结语

基于假设验证法讨论了城市轨道交通车辆牵引中心销锥面产生局部细微裂纹的可能原因,利用有限元软件仿真了牵引中心销在热处理阶段、日常运营中的随机振动、冲击振动、接触挤压过程,得出了不同工况下牵引中心销的应力分布云图及变形趋势。结合裂纹产生原因,进一步讨论了裂纹处置方法。主要获得以下结论:

1) 牵引中心销在热处理阶段会形成较大的内部残余应力,其是后续产生局部裂纹的主要原因之一。

2) 牵引中心销在日常运营过程中产生的随机振动、冲击振动、接触挤压等现象会导致并加速锥面产生裂纹。

3) 通过架大修期间重点检查牵引中心销锥面及下端面,发现裂纹后结合具体探伤检查及修复工艺等方法,可以延长该牵引中心销的使用期限,降低锥面局部裂纹扩散的可能性。

参考文献

- [1] 刘金鑫,魏兴,李博,等.某城轨车辆充电电机疲劳耐久性及其冲击强度分析[J].电力机车与城轨车辆,2021,44(4):39.
LIU Jinxin, WEI Xing, LI Bo, et al. Fatigue durability and impact strength analysis of an urban rail vehicle charger[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2021, 44(4): 39.
- [2] 王晓军,刘元君,李宁.基于频响的轨道车辆吊挂托臂随机振动疲劳仿真[J].机械工程与自动化,2022(2):79.
WANG Xiaojun, LIU Yuanjun, LI Ning. Random vibration fatigue simulation of rail vehicle suspension support arm based on frequency response[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(2): 79.
- [3] 何佳捷,鞠增业,刘韶庆,等.转向架撒砂装置随机振动疲劳分析与状态监测研究[J].铁道车辆,2022,60(1):94.
HE Jiajie, JU Zengye, LIU Shaoqing, et al. Random vibration fatigue analysis and condition monitoring study of a certain type of bogie sanding device[J]. Rolling Stock, 2022, 60(1): 94.
- [4] 王剑,王兆明,李嘉明,等.轨道车辆底架吊装接线箱随机振动疲劳及瞬态冲击性能研究[J].大连交通大学学报,2021,42(5):13.
WANG Jian, WANG Zhaoming, LI Jiaming, et al. Random vibration fatigue of junction box hoisted under rail vehicle underframe and transient impact performance studies[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(5): 13.

· 收稿日期:2023-03-17 修回日期:2023-04-25 出版日期:2025-05-10

Received:2023-03-17 Revised:2023-04-25 Published:2025-05-10

· 通信作者:郑立,助理工程师,2445448903@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license