

X70 型集装箱专用平车风缸吊架裂损故障分析及对策

黄勇

中国铁路南宁局集团有限公司 南宁南车辆段, 中国·广西 南宁 530000

摘要: X70 型集装箱专用平车风缸吊架裂损故障是当前车辆运用过程中频发的典型故障, 对铁路运输安全构成严重威胁。本文基于南宁南车辆段近年列检作业发现的故障统计数据, 针对占比高达 11% 的风缸吊架裂损问题开展系统性深入分析。通过精准梳理故障的分布规律与形貌特征, 重点剖析吊架在螺栓孔、吊座边缘、折弯处及焊接点等关键应力敏感部位的裂损机理, 从设计结构、制造工艺、检修作业和运用管理四个核心维度, 全面揭示故障产生的复合性根源, 最终构建并提出一套涵盖“源头设计优化、制造精度控制、检修标准细化、运用维护强化”的全链条综合治理方案。实践应用结果表明, 所提出的系列改进措施可有效降低风缸吊架裂损故障发生率, 显著提升车辆运行可靠性, 为铁路集装箱运输安全提供有力技术支撑。

关键词: X70 型平车; 风缸吊架; 裂损机理; 结构优化; 综合治理

Analysis and Countermeasures of Cracking Failure in X70 Type Container Flatcar Air Cylinder Hanger

Huang Yong

China Railway Nanning Group Co., Ltd. Nanning South Depot, China Guangxi Nanning 530000

Abstract: Cracking faults of the air spring hanger on the X70 type container flatcar are currently a common fault during vehicle operation, posing a serious threat to railway transport safety. Based on recent fault statistics from inspection work at Nanning South Depot, this paper conducts a systematic in-depth analysis of the air spring hanger cracking issue, which accounts for as much as 11%. By precisely sorting out the distribution patterns and morphological characteristics of the faults, the study focuses on the cracking mechanisms in critical stress-sensitive areas such as bolt holes, hanger edges, bends and welding points. From the four core dimensions of design structure, manufacturing process, maintenance operations and operational management, the paper comprehensively reveals the complex origins of the faults, ultimately constructing and proposing a comprehensive full-chain governance plan encompassing "source design optimisation, manufacturing precision control, refined maintenance standards, and enhanced operational upkeep." Practical application results indicate that the proposed series of improvement measures can effectively reduce the occurrence of air spring hanger cracking faults and significantly enhance vehicle operational reliability, providing strong technical support for the safety of railway container transportation.

Keywords: X70 type flat car; Air cylinder hanger; Cracking mechanism; Structural optimisation; Comprehensive management

1 问题的提出

X70 型集装箱专用平车作为我国铁路集装箱运输的骨干车型, 在长期运用过程中频繁发生风缸吊架裂损故障。风缸是车辆制动系统的核心部件, 其吊架可靠性直接关系到行车安全。据统计, 2024 年南宁南车辆段列检作业共发现铁路货车典型故障 5236 件, 其中 X70 型集装箱专用平车风缸吊架裂损故障达 576 件, 占总量的 11%。该故障不仅影响运输效率, 更可能引发风缸脱落等严重事故, 对铁路运输安全构成直接威胁。

目前, 对该故障的处理主要采取捆绑加固或甩车扣修

等临时措施, 虽能暂时消除隐患, 但无法从根本上解决问题。随着车辆运行里程的增加, 这一故障呈现高发态势, 亟需从技术层面进行系统分析, 并提出长效解决方案。本文旨在通过深入分析故障机理, 从车辆全生命周期管理的角度, 构建综合治理体系, 为提升车辆运行可靠性提供技术支持。

2 故障统计与裂损特征分析

2.1 故障数据的统计分布

通过对南宁南车辆段 2024 年故障数据的系统分析, 发现 X70 型平车风缸吊架裂损具有明显的规律性:

从风缸类型分布看,副风缸吊架裂损 524 件,占比 91%;降压风缸吊架裂损 40 件,占比 7%;加速缓解风缸吊架裂损 12 件,占比 2%。这一分布与各风缸的重量直接相关,副风缸体积最大、最重,其吊架承受的动载荷最大。

从裂损位置分布看,故障主要集中在几个特定的应力敏感区域。其中,吊架螺栓孔两侧是裂损的绝对高发区,占比超过 80%,故障状态如图 1 所示;其次为吊架与吊座边缘的接触处,故障状态如图 2 所示;吊架构件的折弯区域裂损,故障状态如图 3 所示;各焊接接头也是裂纹常见的萌生位置,故障状态如图 4 所示。

从裂损形态分类看,主要呈现以下几种类型:螺栓孔单侧或双侧断裂、吊座边缘接触处的剪切型开裂、折弯处的拉伸型裂纹,以及焊接缺陷处的疲劳裂纹和修复部位的二次开裂,如下图所示。



图1 螺栓孔单侧或双侧断裂

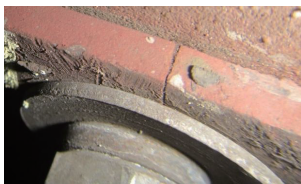


图2 吊座边缘接触处的剪切型开裂



图3 折弯处的拉伸型裂纹

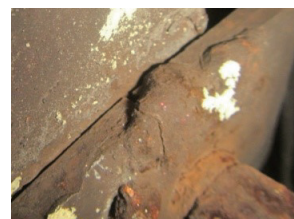


图4 修复部位的二次开裂

2.2 典型裂损模式的机理分析

2.2.1 螺栓孔区域断裂机理

螺栓孔区域断裂由动态应力集中、装配偏差及紧固力

矩过载等多重因素叠加导致。从应力特性来看,依据弹性力学理论,带孔构件存在明显应力集中现象,应力集中系数通常大于 2,而车辆运行中的随机振动会使风缸产生交变载荷,该载荷反复作用于螺栓孔边缘,当交变应力幅值超过材料疲劳极限时,孔壁应力集中最大处会萌生微裂纹,且随着运行里程增加,微裂纹不断扩展。从装配影响来看,现场调研发现大量故障车辆的吊架与吊座孔存在不同程度错位,由于风缸吊座为两个独立焊接件,焊接过程中的热变形与定位误差难以完全消除,螺栓孔中心偏移时的强行装配,会在孔周产生额外装配应力,此应力与工作应力叠加后,会显著加速疲劳损伤进程。从紧固操作来看,X70 型平车车底的镂空结构为安装人员施加扭矩提供了较大空间,易导致紧固力矩过载,过大的预紧力使螺栓杆与孔壁间产生极高接触压应力,在振动工况下,孔壁承受反复剪切作用,最终引发径向开裂。

2.2.2 其他典型裂损部位分析

吊座边缘、折弯处及焊接接头的开裂,分别与设计缺陷、工艺问题及质量管控不足直接相关。吊座边缘开裂根源在于接触设计不合理,未做倒角处理的吊座边缘与吊架形成尖锐线接触,导致接触应力急剧升高,车辆运行中的微动现象会在接触边缘产生交变剪切应力,微动磨损与微动疲劳的协同作用,最终引发边缘开裂。折弯处开裂则与制造工艺缺陷密切相关,当弯曲半径与料厚之比较小时,构件外层纤维伸长率超出材料耐受极限,易产生微观裂纹或宏观毛刺,这些缺陷成为应力集中源,在动态载荷作用下逐步扩展为宏观裂纹,同时折弯过程中的加工硬化会降低材料塑性,进一步削弱其抗疲劳性能^[1]。焊接接头开裂主要由焊接质量缺陷导致,焊接不平整、咬边、气孔、未熔合等几何不连续性问题,会大幅降低结构疲劳强度,且焊接热影响区的材料性能变化、焊接残余应力的存在,使焊接接头成为结构薄弱环节,此外,点焊操作不当造成的电弧灼伤,会形成焊接接头缺陷,成为裂纹萌生的源头。

3 系统性综合治理对策

3.1 设计源头优化

材料升级是提升吊架抗裂性能的根本性措施。建议在新造 X70 型集装箱专用平车或换件修过程中,将风缸吊架材质由现有普通钢材升级为 Q450NQR1 高强度耐候钢。该类型钢材具有更高的屈服强度、抗拉强度及疲劳极限,且耐大气腐蚀性能优异,能够显著提升吊架的静强度与抗疲劳能力,从材料层面降低裂损故障发生概率。

结构细节优化是消除应力集中的关键手段。对吊架及

吊座的结构设计进行全面优化,所有吊座与吊架接触边缘均加工形成 R3-R5 的平滑圆角,将原有的尖锐线接触转变为面接触,根据接触力学理论,面接触可显著降低接触应力峰值,有效避免接触边缘应力集中引发的开裂故障。同时,在满足吊架整体强度校核要求的前提下,适当增大螺栓孔径,预留合理的装配间隙,容纳制造与装配过程中产生的微小偏差,减少强行装配带来的初始应力。

引入缓冲隔振系统是降低动态载荷影响的创新举措。在风缸吊架与吊座之间增设 5mm 厚橡胶缓冲垫,橡胶垫材质及性能需符合 TB/T 2843—2007《机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件》中设备支撑用橡胶弹性元件 B 类的规定,确保其具有良好的弹性、阻尼特性及耐老化性能^[2]。通过橡胶缓冲垫的弹性变形与能量吸收作用,可有效隔离和衰减车辆运行过程中的高频振动能量,将风缸传递给吊架的剧烈动态载荷转化为缓和的准静态载荷,大幅降低吊架各部位的应力幅值,延缓疲劳损伤进程,具体改进结构如图 5 所示。



图5 风缸吊架与吊座间增设5mm厚橡胶垫

3.2 制造过程精密控制

工艺革新是提升制造质量的基础保障。淘汰传统的剪切下料工艺,全面推广等离子切割或激光切割工艺,该类切割方式具有切口平整、热影响区小、尺寸精度高的优势,可有效减少下料过程中产生的微观缺口与加工缺陷。同时,制定严格的边缘处理标准,对所有切割边缘强制进行打磨倒角处理,消除边缘毛刺与微观裂纹,避免加工缺陷成为后续裂纹萌生的源头^[3]。

焊接工装夹具化是控制制造精度的关键环节。针对吊座焊接过程中易产生定位偏差的问题,设计并使用专用组装焊接夹具,通过夹具的精准定位的刚性约束,确保两个独立吊座的螺栓孔同轴度、孔距等关键尺寸控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 的公差范围内。同时,优化焊接工艺参数,采用分段对称焊接方式,减少焊接热变形对尺寸精度的影响,从制造工艺层面杜绝装配偏差引发的应力集中问题。

建立制造过程全检机制。在吊架制造过程中增设关键工序质量检测节点,对下料尺寸、折弯角度、焊接质量、螺栓孔位置精度等进行全面检测,及时发现并剔除不合格

产品,确保出厂吊架的制造质量符合设计要求。

3.3 检修维护标准化

建立分级分类检查制度。将风缸吊架状态检查全面纳入列检、段修、厂修的标准作业流程,明确不同修程的检查重点与检查方法。列检作业中以目视检查为主,重点关注螺栓孔周边、折弯处、焊接接头等易裂部位的外观状态,检查是否存在裂纹、变形、松动等异常情况;段修及以上修程须进行详细近观检查,对关键应力敏感区域进行全面检测,确保及时发现隐蔽性裂纹缺陷^[4]。

实施紧固作业定量化管理。针对螺栓紧固力矩过载问题,根据不同规格、等级螺栓的力学性能参数,通过专项试验确定科学合理的标准紧固力矩值,并将其纳入检修规程,明确操作要求。为现场作业人员配备定期校准的定力矩扳手,强制要求按照标准力矩进行紧固操作,同时加强作业过程监督检查,杜绝紧固力矩过大或过小的问题,避免因螺栓紧固不当引发的裂损故障。

规范裂损修复工艺标准。制定风缸吊架裂损故障修复专项技术规程,明确规定修复作业流程与质量要求。修复过程中,严禁采用直接表面堆焊的简单修复方式,必须先将风缸拆下,彻底清除裂纹及周边疲劳损伤区域,开制标准坡口,选用低氢型焊条进行满焊作业,确保焊缝与母材实现良好熔合。焊后需对焊缝进行打磨处理,使焊缝表面与母材平滑过渡,消除应力集中,同时对修复部位进行无损检测,确保修复质量符合标准。

3.4 运用维护闭环管理

建立大数据分析预警机制。构建铁路货车故障信息管理系统,详细记录每例裂损故障的车辆车号、故障位置、裂损形态、运行里程、运用环境等关键信息,形成完整的故障数据库。定期对故障数据进行统计分析,挖掘故障发生的规律与趋势,识别高频故障车型、批次及关键风险部位,提前发布故障预警信息,指导现场开展针对性的专项检查与预防性维护,实现从“事后修”向“状态修、精准修”的转变^[5]。

加强技术培训与经验反馈。收集整理风缸吊架典型故障案例、裂损高清图片、机理分析资料及正确检修方法,制作成可视化培训教材,定期组织列检、检修及技术管理人员开展专项培训,提升全员对故障的识别能力、分析能力与处置能力。建立顺畅的信息反馈渠道,鼓励现场作业人员及时反馈故障隐患、改进建议等信息,形成“发现问题—分析研究—制定措施—推广应用—效果评估”的闭环管理机制,使现场实践经验快速转化为技术改进动力^[6]。

持续更新完善技术规程。将经过实践验证有效的改进措施及时修订、补充到车辆检修规程、作业指导书及制造技术标准中,实现技术成果的标准化与制度化。定期对技术规程的执行情况进行评估与优化,结合车辆运用过程中出现的新问题、新情况,不断完善治理措施,形成长效管理机制,确保风缸吊架裂损故障得到持续有效控制。

4 结语

通过对 X70 型平车风缸吊架裂损故障的系统分析得出以下结论:该故障是以振动疲劳为主导、多种因素共同作用的复合型故障,其高发部位均与结构应力集中密切相关;故障根源涉及设计、制造、检修、运用等多个环节,包含结构细节设计不完善、制造精度控制不严、检修作业标准执行不细等系统性因素;本文提出的“源头设计优化、制造精度控制、检修标准细化、运用维护强化”全链条综合治理方案,具备强针对性与可操作性,其中“加装橡胶缓冲垫”等措施在实践中已展现出良好的故障防控效果。展望未来,为进一步提升车辆安全性能,建议深入开展有限元仿真分析以优化设计参数,研究橡胶垫刚度与阻尼特性的精细匹配方案,并探索关键部位在线监测技术,通过

持续的技术创新与精细化管理,不断提升铁路货车本质安全水平,为保障铁路物流大动脉安全畅通筑牢坚实基础。

参考文献:

- [1] 王正品,李炳. 工程材料[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
 - [2] TB/T2843-2007,机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件[S].
 - [3] 胡文浩,王广英,杨鑫华. 高速动车组转向架构架焊接残余应力研究(三)[J]. 焊接技术,2018,47(3):19-22.
 - [4] 陈晓峰,周建,吴敏. 铁路货车风缸吊架螺栓孔区域疲劳裂纹扩展机理研究[J]. 中国铁道科学,2024,45(3):56-63.
 - [5] 王丽萍,刘强. 高速动车组转向架构架焊接残余应力消除方法对比分析[J]. 机械工程学报,2025,61(8):120-127.
 - [6] 张昭,李娜,王浩. 搅拌摩擦焊与 TIG 焊残余应力分布对比及疲劳性能研究[J]. 材料工程,2023,51(9):89-96.
- 作者简介:黄勇(1992.05-),男,壮族,广西壮族自治区来宾市人,工程师,本科,研究方向:车辆检修。