

轨道交通车辆扶手吊碎裂问题分析及优化方案

周鑫弘¹ 高 畅¹ 贾 旭² 董涛涛² 刘 宁³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司新产业事业部, 130062, 长春; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春; 3. 长春职业技术学院机电学院, 130033, 长春//第一作者, 工程师)

摘 要 针对某型轨道交通车辆扶手吊碎裂问题, 跟踪调查维修车辆的扶手吊碎裂售后反馈信息发现, 质保期内发生碎裂的扶手吊数量较多, 且碎裂发生的区域基本一致, 由此初步判断, 扶手吊碎裂源于设计缺陷。通过对扶手吊强度及工艺等进行分析发现, 扶手吊碎裂由自身结构不合理、加工工艺不完善及装配紧固力矩控制不到位等多种因素导致。根据分析结果, 针对产品结构和工艺提出优化方案, 并对优化后的样件进行了试验验证。试验结果表明, 优化后的扶手吊碎裂问题得到明显改善。

关键词 轨道交通车辆; 扶手吊碎裂; 强度分析

中图分类号 U270.38+9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.030

Analysis and Optimization Scheme of Rail Transit Vehicle Grab Handle Fragmentation Problem

ZHOU Xinhong, GAO Chang, JIA Xu, DONG Tao-tao, LIU Ning

Abstract Aiming at the fragmentation problem of a certain type of rail transit vehicle grab handle, the after-sales follow-up investigation of the grab handle fragmentation of the maintained vehicle discovers that a large number of grab handle breaks within the warranty period, and the cracks basically occur in the same area. It can be primarily judged that grab handle breaks because of the design flaw. Through research and analysis of grab handle strength and manufacturing process, it is found that there are multiple factors leading to the fragmentation including unreasonable structure, inadequate processing technology and insufficient control of assembly tightening torque. According to the analysis results, an optimization scheme for product structure and manufacture process is proposed, and optimized samples are tested. Test results show that the fragmentation problem of optimized grab handle is significantly improved.

Key words rail transit vehicle; grab handle fragmentation; strength analysis

First-author's address New Industry Business Division,

CRRC Changchun Railway Vehicles, 130062, Changchun, China

轨道交通车辆的扶手吊是乘客把扶的重要安全设备之一, 是旅客界面利用率较高的设备^[1], 目前仅有对扶握系统的人机布置^[2-3]及扶手力学分析等方向的相关研究^[4]。某型轨道交通车辆扶手吊通过分瓣金属夹固定于扶手上, 扶手吊的强度和完整性是影响乘客乘车安全的重要因素^[5]。某型轨道交通车辆扶手吊碎裂问题较多, 部分有断裂现象^[6], 且问题主要集中在扶手吊紧固螺栓附近。本文针对此问题, 从扶手吊碎裂调查、强度验证、工艺过程验证等几方面进行分析, 并根据分析结果提出优化方案。

1 碎裂情况

针对某型轨道交通车辆扶手吊碎裂情况, 本研究调查了某线路的20列列车。该型轨道交通车辆的扶手吊通过分瓣金属夹固定于扶手上, 配置数量为22个/列。自2020年8月9日至2021年8月5日该线路运营期间, 扶手吊因碎裂问题而更换新产品的数量已高达1343个(存在同位置频繁多次更换的情况)。

调查发现, 扶手吊碎裂问题主要集中在把手折弯处的螺栓紧固区域。扶手吊碎裂照片如图1所示。



图1 扶手吊碎裂照片

Fig.1 Pictures of broken grab handle

随机选取调查期间 2 次月检的扶手吊碎裂情况统计信息如表 1 所示。

表 1 扶手吊在 2 次月检期内的碎裂情况统计

Tab.1 Statistics of grab handle fragmentation condition during the two monthly inspection periods

车号	碎裂时间	碎裂数量/个	车号	碎裂时间	碎裂数量/个
B18	2020-08-09	1	B9	2020-09-23	1
B4	2020-08-23	5	B5	2020-09-26	1
B12	2020-08-26	7	B5	2020-09-26	6
B10	2020-09-01	2	B5	2020-09-27	10
B3	2020-09-09	32	B11	2020-09-29	1
B24	2020-09-10	3	B11	2020-09-30	13
B6	2020-09-15	2	B19	2020-10-02	11
B22	2020-09-20	9	B7	2020-10-03	9
B22	2020-09-20	18	B4	2020-10-04	3

2 碎裂原因分析

2.1 扶手吊结构

扶手吊结构如图 2 所示。扶手吊主要由上部夹、下部夹、铰链、硅橡胶管、左把手、右把手及安全螺栓等 7 部分组成。其中:上部夹及下部夹通过螺栓固定于扶手管上;左把手及右把手通过安全螺栓固定,把手通过铰链同上部夹及下部夹连接,使施加在把手上的载荷能通过铰链传递到上部夹和下部夹;铰链外部设置了硅橡胶管进行防护,使把手通过软接触来实现多方向把扶功能,避免把手端部与保护套管在把手运动过程中因材质过硬发生碎裂。

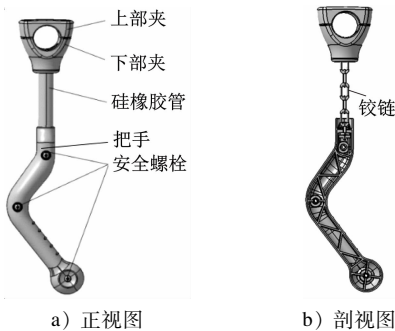


图 2 扶手吊结构

Fig. 2 Grab handle structure

2.2 强度仿真分析

根据技术要求对扶手吊进行强度仿真分析。扶手吊材料属性如表 2 所示。扶手吊静荷载计算工况如图 3 所示:静荷载为 2 200 N,沿垂直向下方向

施加于扶手吊相应位置,施载时间持续 5 s^[7-8]。

表 2 扶手吊材料属性

Tab.2 Material properties of grab handle

部件	材料	密度/ (kg/m ³)	杨氏模量/ MPa	泊松比
上部夹	不锈钢 316	7.93 × 10 ³	193	0.30
下部夹	不锈钢 316	7.93 × 10 ³	193	0.30
把手	ABS + PC	2.7 × 10 ³	2 × 10 ⁻³	0.33
铰链	不锈钢	7.93 × 10 ³	193	0.30

注:ABS 为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物;PC 为聚乙烯。



图 3 扶手吊静荷载计算工况示意图

Fig.3 Diagram of grab handle static load calculation condition

扶手吊静强度仿真分析结果如图 4 所示。最大应力发生在把手折弯内侧区域,与实际把手碎裂位置相同。最大应力为 136.45 MPa,大于许用值 (65.00 MPa),不满足强度要求。

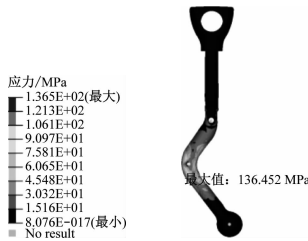


图 4 扶手吊静强度分析云图

Fig.4 Nephogram of grab handle static strength analysis

分析计算结果可知,把手结构存在应力危险区域。拆解碎裂把手时发现,在把手折弯弯曲内侧 2 个半模之间的接合处普遍存在裂纹。进一步分析可知,由于注塑成型工艺较粗糙,扶手吊把手内部腔体及加强筋节点易在注塑成型定位工具作用下产生尖锐点,形成应力集中。尤其在螺栓固定的凸台周围存在很多尖锐节点。因此,需优化把手结构,并严格进行产品生产过程管控。把手的尖锐点如图 5 所示。

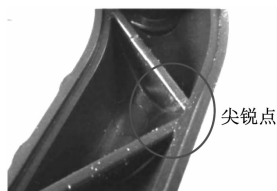


图5 把手尖锐点

Fig. 5 Sharp point of grab handle

2.3 工艺分析

从现场调研的产品碎裂情况发现,产品制造工艺同样存在问题。

2.3.1 加工工艺

由图6的把手端部可见,在产品的模具浇口区域存在明显质量缺陷。经分析,形成该缺陷的原因是产品在注塑过程中掺杂了水分,未按标准工艺要求进行干燥处理,导致其塑性材料性能下降,强度、韧性和化学抵抗力下降,致使最后成型的产品变脆。



图6 把手端部的质量缺陷

Fig. 6 Quality defect of grab handle end

2.3.2 紧固力矩

根据安装技术要求,应对左把手、右把手的安全螺栓施加 $1.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 力矩进行紧固。但在对碎裂产品进行力矩检测时发现,实际紧固力矩大多为 $1.7 \sim 2.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。经调查:产品在装配过程中未使用力矩扳手,安装后未经校准保证要求的力矩值,仅通过人工随机锁紧固定,造成实际紧固力矩过大。在对碎裂扶手吊进行拆解查看内部结构时发现,把手处的螺栓在使用工具前提下无法松开拆除。这也验证了螺栓处紧固力矩过大造成局部应力集中的事实。螺栓紧固力矩过大造成的裂纹如图7所示。



图7 螺栓紧固力矩过大裂纹实景图

Fig. 7 Picture of cracks caused by excessive bolt tightening torque

对已安装但未正式运营的车辆扶手吊进行调

查发现,部分把手在折弯区域的螺栓处已存在细小裂纹,若后续投入运营,随着列车的起停,在乘客把持产生的多方向冲击力作用下,或长时间把持的静载力重复施加作用下,细小裂纹会逐渐加重加深,最终发生大面积碎裂甚至断裂。

3 优化方案

由上述分析可知,扶手吊的碎裂问题由自身结构、加工工艺及装配工艺等多重原因导致,为缩短检修周期,降低运维成本,提高乘客的安全性及舒适性,从结构至工艺装配过程等方面对扶手吊进行优化。

3.1 结构优化方案

针对扶手吊原结构的应力集中问题,本文提出多个方案进行对比分析。

方案1:为提高扶手吊结构可靠性,将把手顶部壁厚随型线由 1.75 mm 加厚到 4.30 mm ,并保证整体型线柔和;将把手原结构中含加强筋的空腔结构的局部区域优化为实心体,强化把手端部及折弯等危险区域。方案1优化后的扶手吊结构及抗拉强度仿真计算结果如图8所示。

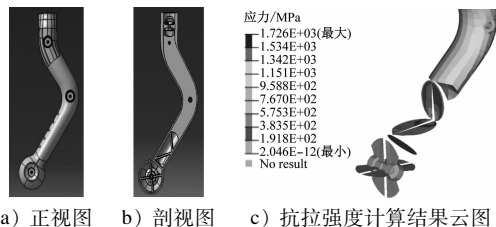


图8 方案1优化后的扶手吊结构及仿真计算结果

Fig. 8 Grab handle structure and simulation calculation results of scheme 1 after optimization

方案2:将把手顶部壁厚随型线由 1.75 mm 加厚到 4.30 mm ,并保证整体型线柔和;将把手原结构中含加强筋的空腔结构全部优化为实心体,强化把手端部及折弯等危险区域。方案2优化后的扶手吊结构及强度仿真计算结果如图9所示。

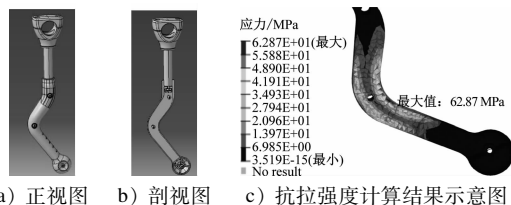


图9 方案2优化后的扶手吊结构及仿真计算结果

Fig. 9 Grab handle structure and simulation calculation results of scheme 2 after optimization

方案3:把手原结构保持加强筋的空腔结构,仅将把手折弯处螺栓安装位置下移,以减少应力集中危险。方案3优化后的扶手吊结构及抗拉强度仿真计算结果如图10所示。

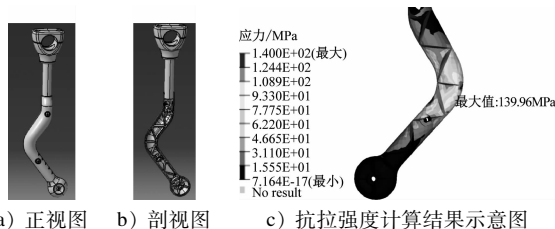


图10 方案3优化后的扶手吊结构及仿真计算结果

Fig. 10 Grab handle structure and simulation calculation results of scheme 3 after optimization

方案4:将方案2及方案3整合,即将空腔结构全部优化为实体,并将拐点处螺栓安装位置下移。方案4优化后的扶手吊结构及强度仿真计算结果如图11所示。

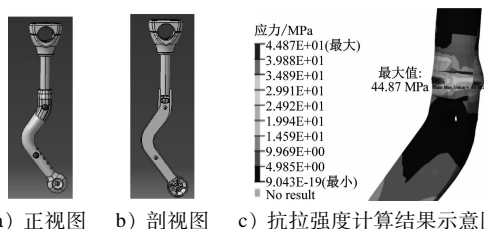


图11 方案4优化后的扶手吊结构及仿真计算结果

Fig. 11 Grab handle structure and simulation calculation results of scheme 4 after optimization

分析上述计算结果可知:方案1最大应力为172.60 MPa,发生在把手下部未填充区域内侧,大于标准许用值(65.00 MPa),不满足强度要求;方案2最大应力为62.87 MPa,发生在把手折弯内侧,虽小于标准许用值(65.00 MPa),但大于断裂强度(51.00 MPa),不满足强度要求;方案3最大应力为139.96 MPa,发生在把手折弯处外侧,大于标准许用值(65.00 MPa),不满足要求;方案4最大应力为44.87 MPa,发生在扶手把手与硅橡胶管连接处,小于标准许用值(65.00 MPa),满足强度要求。由此确定,使用方案4进行结构优化。

从工艺实现性、许用值满足两方面确认方案可行。通过多种方案的强度计算分析对比,方案4结构合理,满足给定工况。

3.2 加工及装配工艺优化方案

3.2.1 加工工艺管控的优化方案

通常塑性材料在高温下对微量水分较敏感。

PC(聚乙烯)在高温下会水解,加上熔融温度高、熔融黏度大,易发生应力开裂现象。若原材料含水,这些水分在成型过程中会由于受热挥发,导致熔体起泡或膨胀,致使产品出现水气纹、气泡、透明度变差,甚至破裂及强度下降等问题。因此注塑前必须进行严格彻底的干燥作业^[9-11]。

本文中扶手吊把手加工应执行 CMS 5754:2009 规范要求:控制含水量在 0.02% 以下,干燥温度为 82.2 ~ 87.8 °C,干燥时间约为 3 ~ 4 h,最长 8 h,前部温度为 243 ~ 226 °C,中间温度为 221 ~ 266 °C,后部温度为 221 ~ 254 °C,防止温度过高或停留时间过长造成材料严重降解,使产品内部产生气泡、材料发生变质而降低产品性能。同时,需确保切割的刀具温度控制在 100 °C 左右,并应进行长时间冷却以减小残余应力,防止内应力叠加到使用期间的应力中,形成裂纹。

除此之外,把手材质本身有熔体黏度大、易发生应力开裂的特点。而回收 PC 材料的相对分子质量下降、质量分布变宽,少量存在的水分、颜料、杂质及溶剂等极易引发开裂现象。由此产生的内应力会令产品在储存和使用过程中发生开裂,在实际生产中也需要严格管控。

3.2.2 装配过程管控的优化方案

装配过程应严格按照技术要求执行。在使用力矩扳手对螺栓进行紧固时,要防止因人为紧固力矩过大造成产品产生局部应力而出现裂纹^[12]。

4 试验验证

通过上述优化措施,进行新结构扶手吊的实物制作,并进行试验验证。

4.1 静强度试验

随机选取 10 个新扶手吊,将其安装在扶手管上,并在把手下部中间处施加 5 s 的 2 200 N 垂向载荷。静强度试验结果如图 12 所示。

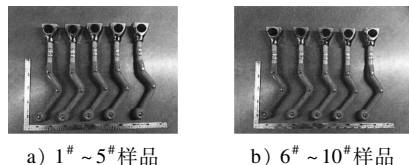


图12 静强度试验结果

Fig. 12 Static strength test results

在给定工况下,产品外观无破损或断裂,说明满足静强度要求。

4.2 耐久试验

随机选取3个外观无裂痕的新扶手吊进行耐久试验(如图13所示)。对把手施加频率为1 Hz;施载次数为 1×10^5 次;垂向载荷为900 N,作用点在把手下部中间区域。

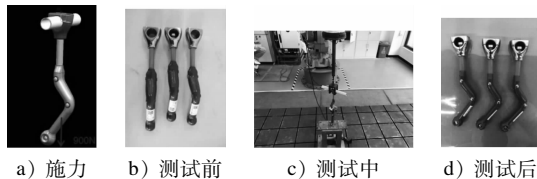


图13 耐久试验示意图

Fig.13 Diagram of endurance test

测试结果表明,在给定工况下,产品无外观破损或断裂,优化后的结构满足耐久试验要求。

5 结语

对扶手吊碎裂问题进行分析,提出了4种结构优化方案,在同种工况下对不同方案的结构进行仿真分析计算,在保证所供产品外观一致的前提下确定最优方案,并对新结构产品进行相关试验验证,得到如下结论:

1) 扶手吊碎裂主要原因是结构设计不合理及工艺过程失控。

2) 把手自身结构设计存在应力集中风险,按最优方案生产的新产品能满足要求。

3) 工艺过程对塑料产品质量影响较大,从干燥温度、干燥时长、刀具温度以及螺栓紧固力矩等角度梳理了工艺管控过程的规范要求,规范后试验样件未出现大量碎裂的质量问题。

4) 扶手吊作为车辆运营旅客界面中涉及安全的重要部件之一,安全可靠是前提,产品的设计和制造需遵循标准的设计及制造流程。

参考文献

- [1] 陈力嘉. 乘客行为导向的城际列车扶手优化设计研究[J]. 设计, 2021, 34(17): 14.
CHEN Lijia. Research on passenger behavior-oriented optimization design of intercity train handrail [J]. Design, 2021, 34(17): 14.
- [2] 姜亮, 鲁晓涛, 何思俊, 等. 地铁车内扶握系统设计现状与优化研究[J]. 设计, 2020, 33(10): 110.
JIANG Liang, LU Xiaotao, HE Sijun, et al. Research on the design status and optimization of the grip system in the metro car [J]. Design, 2020, 33(10): 110.
- [3] 王硕, 李然, 安静. 地铁客室扶握系统优化设计研究[J]. 设

计, 2020, 33(5): 16.

WANG Shuo, LI Ran, AN Jing. Research on the optimal design for the grip system of the metro passenger room [J]. Design, 2020, 33(5): 16.

- [4] 魏峰, 徐伯初, 支锦亦, 等. 地铁客室乘坐设备人机功能尺寸设计[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 865.
WEI Feng, XU Bochu, ZHI Jinyi, et al. Man-machine functional dimension design of riding equipment in subway passenger compartments [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 865.
- [5] 李斌斌, 张国旺, 丁洁琼, 等. 关于某地铁车辆立扶手安装的力学分析与结构优化[J]. 智能制造, 2019(10): 57.
LI Binbin, ZHANG Guowang, DING Jieqiong, et al. Mechanical analysis and structural optimization of vertical handrail installation of a metro vehicle [J]. Intelligent Manufacturing, 2019(10): 57.
- [6] 姜翠香. 轨道车辆内装扶手技术要求解析[J]. 交通标准化, 2013, 41(6): 96.
JIANG Cuixiang. Technical specifications analysis on track vehicle interior handrail [J]. Transportation Standardization, 2013, 41(6): 96.
- [7] 王子明, 王剑. 地铁车辆环形扶手结构强度校核分析[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(8): 122.
WANG Ziming, WANG Jian. Strength check and analysis of ring handrail structure for metro vehicles [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, 56(8): 122.
- [8] 姜红岩, 盖杰, 马书元. 地铁车内扶手强度校核工况分析和仿真计算[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(2): 71.
JIANG Hongyan, GAI Jie, MA Shuyuan. Strength check performance analysis and FEM calculation of subway handrails [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(2): 71.
- [9] 范联甫. 注塑件内应力形成机理及消除方法探讨[J]. 科技创新与应用, 2018(17): 18.
FAN Lianfu. Discussion on formation mechanism and elimination method of internal stress in injection molding parts [J]. Technology Innovation and Application, 2018(17): 18.
- [10] 董钜潮, 周颖南, 黄建军, 等. PC 注塑制品常见缺陷分析及解决方法[J]. 工程塑料应用, 2003, 31(9): 23.
DONG Juchao, ZHOU Yingnan, HUANG Jianjun, et al. Analysis of common defects in the injected PC products and their solving methods [J]. Engineering Plastics Application, 2003, 31(9): 23.
- [11] 郭国谊. 浅析 PC 注塑成型中降低内应力的方法[J]. 新余高专学报, 2005, 10(2): 24.
GUO Guoyi. Analysis of the lowering of the internal stress of PC moulding [J]. Journal of Xinyu College, 2005, 10(2): 24.
- [12] 贾振岗. 轨道交通车辆内饰扶手的设计及安装工艺[J]. 机械, 2017, 44(2): 48.
JIA Zhengang. Design and installation of the interior decoration armrest of metro vehicle [J]. Machinery, 2017, 44(2): 48.

(收稿日期:2022-07-31)