

碰撞事故车辆车体结构破坏分析

卫亮^{1,2*} 康巍^{1,2} 万平^{1,2}

(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 412001, 株洲;

2. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲//第一作者, 工程师)

摘要 针对 2015 年 3 月 25 日发生在北京的城市轨道交通车辆碰撞事故, 通过对事故车辆车体的结构破坏进行调查, 拼接还原事故车厢的最终状态。车体结构破坏调查分析的研究结果表明: 在复杂事故地形和钩缓系统引导的共同作用下, 各节车厢发生了一系列相互错位的碰撞。事故车辆车体结构破坏的位置主要集中在驾驶室框架、底架、侧墙和端墙等模块连接处。由于驾驶室框架与底架连接处的失效, 在与河道接触碰撞过程中, 驾驶室内部空间被入侵约 50 cm。第二节车厢是事故中变形破坏最严重的车厢, 其紧邻头车的 I 端位纵向压缩量约为 30 cm、垂向变形约为 10 cm; 与第三节车碰撞的 II 端位纵向压缩量约为 40 cm, 并在侧墙出现长约 28 cm 的裂纹。事故中涉及的全自动车钩和半永久车钩部分压溃, 起到了一定的吸能作用。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 车体结构; 碰撞事故; 结构破坏

中图分类号 U270.32

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.027

Analysis of Vehicle Body Structure Destruction in Collision Accident

WEI Liang, KANG Wei, WAN Ping

Abstract Targeting the urban rail transit vehicle collision accident which occurred in Beijing on March 25, 2015, the damage to accident vehicle structure is investigated and the final status of the accident compartment is reproduced. The research results of the structure damage investigation analysis show that: under the combined action of the complex accident geological condition and the guidance of coupler system, the compartments undergo a series of misalignment collision. The structural damage of the accident vehicle mainly concentrate in the connection between modules including driver's cabin frame and chassis, side wall and end wall. Because of the failure of driver's cabin frame and chassis connection, during collision with river, the space inside driver's cabin is invaded by about 50 cm. The second compartment is the most deformed in the

accident. The longitudinal compression of approximately 30 cm and the vertical deformation of about 10 cm is at the I end next to the leading vehicle. The longitudinal compression of about 40 cm and 28 cm fracture on side wall appear at the II end collision with the third vehicle. The automatic coupler and semi-permanent coupler involved in the accident are partially collapsed, managing certain level of energy absorption.

Key words urban rail transit; vehicle; car body structure; collision accident; structure damage

Author's address The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, 412001, Zhuzhou, China

对事故车辆车体结构破坏吸能与动态响应过程的调查研究, 是提高轨道车辆耐撞性设计的基础性问题。目前, 国内关于轨道列车耐撞性设计的研究中, 尚未有事故车辆结构破坏情况的公开研究报道。城市轨道交通车辆运营环境单一, 发生事故的的概率很低, 但车辆在调试、调车等非运营情况下发生事故的情况并不罕见。自 2014 年以来, 仅在北京地区就发生过 3 起不同严重程度的地铁、有轨电车事故。这些事故虽均未造成严重的人员伤亡, 但该非典型工况下的城市轨道交通车辆碰撞事故仍然具备一定风险。

本文以 2015 年 3 月 25 日北京轨道交通车辆某线列车的脱轨碰撞事故为例, 通过对事故列车车体的结构破坏进行调查, 分析车辆结构的破坏特征, 拼接还原事故中各车辆的最终状态, 为后续的城市轨道交通车辆耐撞性研究与事故动态仿真提供一定的理论基础。

1 事故简介

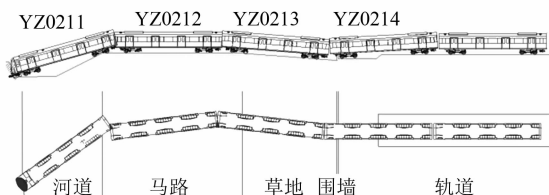
事故发生于 2015 年 3 月 25 日 15:00, 列车从车

* 通信作者

辆段内部测试轨道尽头冲出,与河道发生脱轨碰撞事故,列车横穿公路,最终车头栽入紧靠公路的河道里。该列车为6辆编组(YZ0211—YZ0216)。事故导致4节列车车体产生严重变形(见图1)。事故发生时,列车处于车辆调试阶段,并没有搭载乘客,事故地点附近也没有其他行人或车辆,事故仅导致一名驾驶员腿部骨折。



a) 事故现场照片



b) 车辆碰撞最终状态

图1 车辆碰撞现场及最终状态示意图^[1]Fig. 1 Diagram of site and final status of vehicle collision^[1]

本次事故中,列车初时速度为30~40 km/h,其穿过长为22 m的草地,击穿栅栏后直接窜上公路,穿行约60 m后车头插入路边河堤中。事故导致头车(YZ0211)车体驾驶室严重变形,后继中间车(YZ0212—YZ0214)车体由于铁道路基、草地、公路路基的地形起伏,在巨大撞击动能作用下,各车厢之间发生垂直方向上的爬车和水平方向上的蛇行错位碰撞现象。车体的主要破坏变形区域集中在驾驶室以及各节车厢之间相互挤压的碰撞区域,其不锈钢车体底架、顶棚、侧墙和端墙等模块间的连接处在事故中受到了严峻的考验。

2 事故车辆结构破坏变形分析

2.1 头车及驾驶室结构变形破坏分析

事故车辆为B型不锈钢车体,其结构如图2所示。该型号车辆车体采用301L车辆专用不锈钢,通过焊接形成薄壁整体承载结构。车体由侧墙、端墙、底架、顶棚和驾驶室等模块组成,各模块之间通过点焊连接。侧墙、端墙顶棚由外墙薄板与补强型材点焊连接形成空腔结构。车前底架设有防爬器,在防爬器后的底架设有诱导孔的吸能变形区。

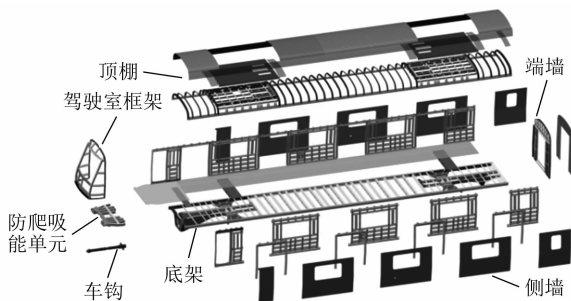


图2 不锈钢车辆结构图

Fig. 2 Diagram of stainless steel vehicle structure

YZ0211车体插入河堤中发生变形,前端最终状态示意图如图3 a)和图3 b)所示。YZ0211车体设有防爬器和具备诱导孔的吸能单元,如图3 c)所示。车头撞入河道泥土,因泥土刚度相对较低,所以防爬器及后面能量吸收单元没有发生明显的塑性变形。头车落入河道过程中,YZ0211车体的转向架与车体发生相对较大角度的摆动。由于转向架上的悬挂与抗侧滚、抗翻转等设施的综合作用,转向架只与底架上的电气管线发生撞击,并没有撞击到车体底架,如图3 d)所示。

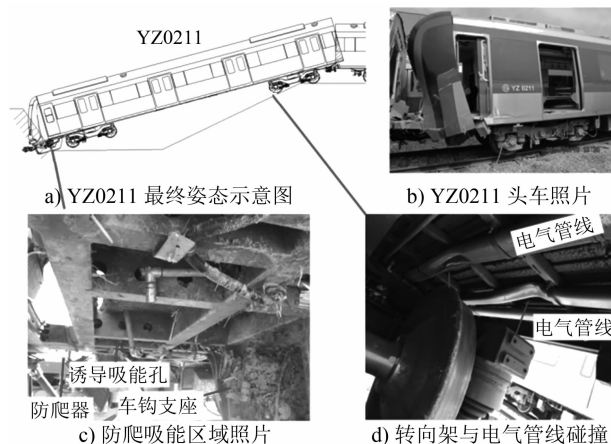


图3 YZ0211车体前端最终状态示意图

Fig. 3 Diagram of final status of YZ0211 vehicle body front end

事故后,驾驶室内部被入侵的情况如图4所示。撞击发生后,窗下横梁与窗下立柱发生严重变形并内翻,座椅上的司机被翻转的操作台压住,座椅随着驾驶室的入侵也被迫向后倾倒,司机腿部由于空间不足导致骨折。

驾驶室框架通过8根立柱与底架连接。中间4根较短的窗下立柱位于驾驶室正前方,通过螺栓连接于驾驶室地板上。事故中,由于车头框架受力,窗下立柱产生形变并带起地板,进而螺栓受力被拔出(见图5)。4根较短的窗下立柱失效后,随着驾

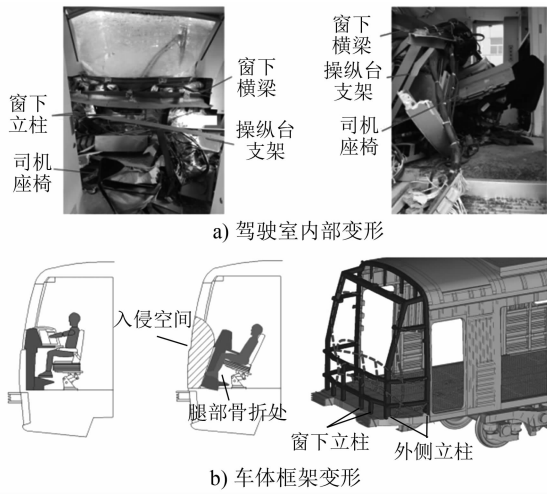


图 4 驾驶室内部变形图

Fig. 4 Diagram of driver's cabin interior deformation

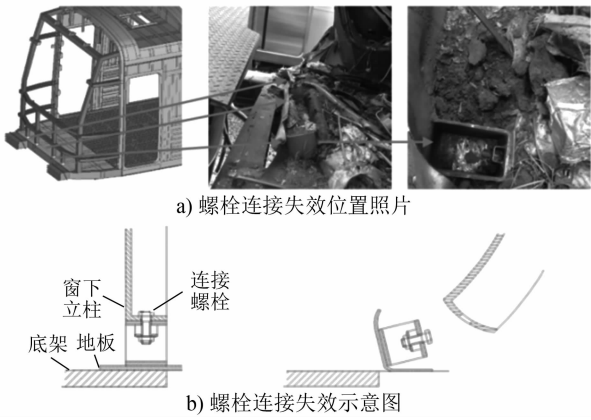


图 5 窗下立柱螺栓连接失效示意图

Fig. 5 Diagram of failure of bolt connection between beams and under-frame

驾驶室框架继续变形,大部分撞击力由外侧 2 根较长的立柱承担,导致立柱与底架焊缝处发生断裂(见图 6)。最终,驾驶室正前方的 6 根立柱连接全部失效,驾驶室框架失去了底架的支撑,发生严重形变而被入侵约 50 cm。

2.2 中间车结构变形破坏分析

在撞击河道后,YZ0211 车体停止运动,但后继 5 辆车仍具有相当大的动能,进而发生了一系列的连续碰撞。YZ0212 车体端墙与翘起的 YZ0211 车尾端底架碰撞,如图 7 所示。在后继车辆的连续冲击力作用下,YZ0212 车体侧墙也跟随端墙发生严重屈曲变形,端墙的纵向压缩量约为 30 cm,底架垂向变形量约为 10 cm。YZ0213 车体在制动过程中,受到地形与钩缓结构引导发生爬车趋势,其底架嵌入前车 YZ0212 车体端墙,YZ0212 车体端墙纵向压

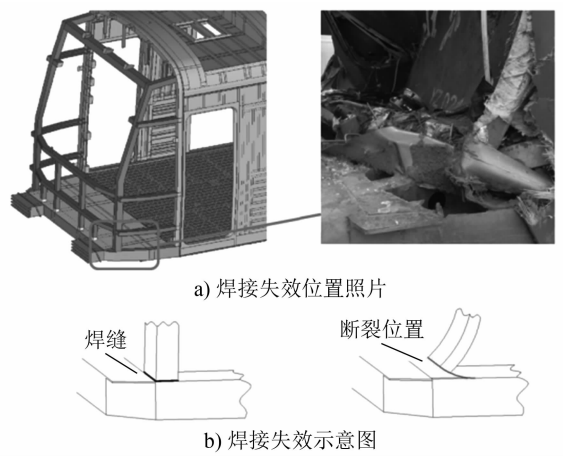


图 6 窗下立柱焊接失效示意图

Fig. 6 Diagram of failure of welding connection between beams and under-frame

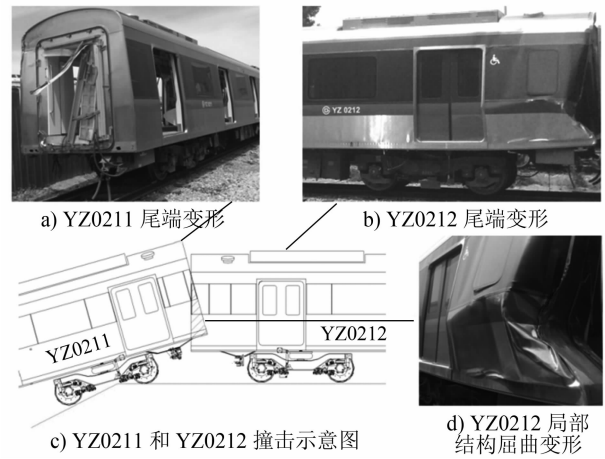


图 7 YZ0211 车体与 YZ0212 车体撞击后的变形照片

Fig. 7 Photo of deformation after collision between YZ0211 and YZ0212 vehicle bodies

缩约 40 cm(见图 8),车厢侧墙发生断裂,裂纹长度约为 28 cm。这种爬车现象让车厢变形主要集中在端墙、侧墙、底架和顶棚等模块的连接处。

这种车辆之间的错位碰撞现象,对中间车车体造成了严重的破坏。文献[2]将这种现象简化为采用完全重叠工况和垂向偏移工况的静载试验,并通过试验研究表明,相比于完全重叠工况,垂向偏移工况下,车体的抗压缩能力下降了 60%,在相同变形情况下的能量吸收也大大减少。点焊工艺的抗剪切能力高于抗拔拉能力。YZ0212 车体侧墙与底架的连接在母材已经出现裂纹的情况下,焊点只发生了少数的剪切失效(见图 8 d))。而在 YZ0213 车体端墙与顶棚的连接位置,点焊受到拔拉方向的力而发生变形,发生大面积的焊点拔拉失效(见图 8



图8 YZ0212车体与YZ0213车体撞击后的变形照片

Fig. 8 Photo of deformation after collision between YZ0212 and YZ0213 vehicle bodies

f))。YZ0212车体在端墙受到后车底架冲击后,端墙外蒙皮与底架连接的塞焊剪切失效(见图8e))。

碰撞结束时,YZ0214车体后半部分停留在高为0.5 m的轨道上,其前半部分与YZ0213车体相撞。由于两节车厢位于整列车的中间位置,发生碰撞时的动能相对较小,仅仅在顶棚与端墙连接处发生了小面积的塑性变形(见图9)。

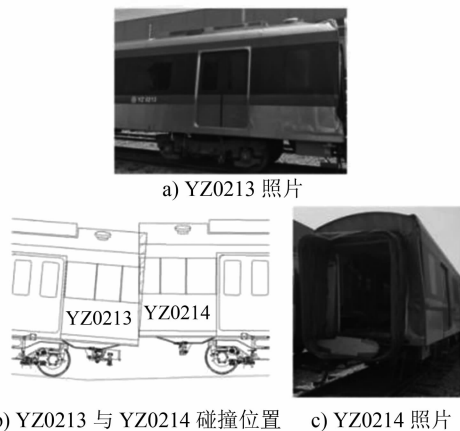


图9 YZ0213车体与YZ0214车体撞击后的变形照片

Fig. 9 Photo of deformation after collision between YZ0213 and YZ0214 vehicle bodies

3 钩缓连接系统的破坏调查

钩缓连接系统的动态行为对列车纵向动力学能够产生极大的影响^[3-7]。城市轨道交通车辆的钩缓连接系统除了担负车辆之间的连接以及传递和缓冲车辆的运动外,也是城市轨道交通车辆多级吸能中不可缺少的环节。文献[8]指出,对于有多级吸能设计的轨道车辆,钩缓装置应在中、低速碰撞中起到主要的吸能缓冲作用。本文所涉及事故车辆全自动车钩

(头车)和半永久车钩(中间车)在碰撞过程中相继发生破坏变形,起到了部分吸能作用。

3.1 全自动车钩的变形破坏

事故车辆的全自动车钩由连接系统、扩张式压溃管和橡胶回转支座等3个部分组成,如图10a)所示。压溃吸能管在事故过程中发生扩张式压溃,事故后只有橡胶回转机构与车体保持连接,如图10b)所示。

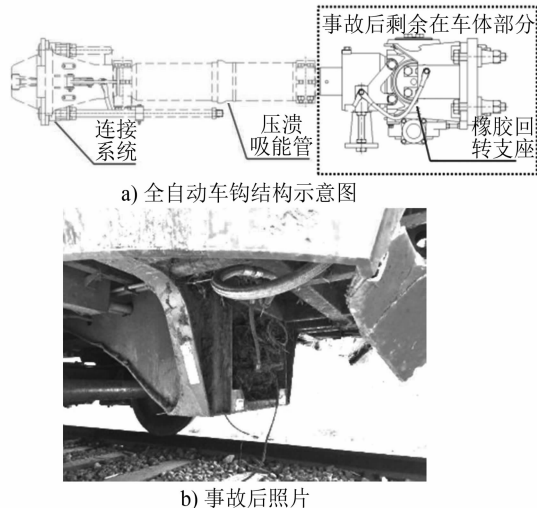


图10 碰撞后仅剩下支座的全自动车钩

Fig. 10 Automatic coupler with only bracket after collision

3.2 半永久车钩的变形破坏

事故列车的各车辆间由一对半永久车钩相连接。半永久车钩主要由回转机构、橡胶缓冲器、牵引杆、压溃管、导向杆和安装座等构成。在碰撞事故中,半永久车钩主要依靠橡胶缓冲变形以及扩张式压溃管破裂吸能^[8]。

本次事故中,只有头车 YZ0211 车体尾端的半

永久车钩触发了压溃失效,事故后仅剩下车座与回转机构,如图 11 a)所示,其余各节车体发生碰撞的半永久车钩的压溃机构并没有被触发,如图 11 b)和图 11 c)所示。事故中,各车厢之间一方面受到前后撞击力的挤压,另一方面由于地形的起伏,部分纵向撞击力被转化为垂向的冲击力矩作用于中间车钩上,后车底架被抬起进而撞击到前车底架,如图 11 d)所示。由图 11 可知,在垂向的冲击力矩作用下,车钩的牵引杆部分与底架发生碰撞,并留有撞击凹痕。

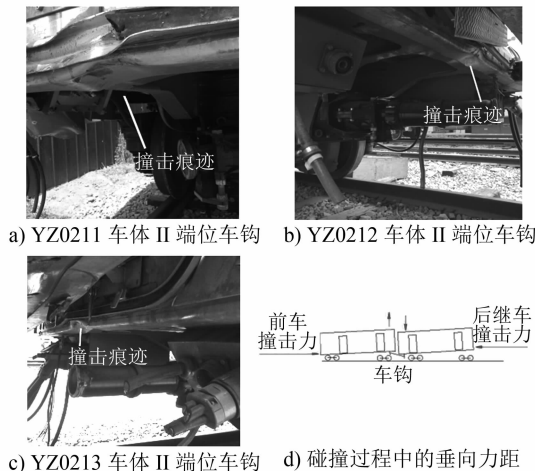


图 11 事故后的半永久车钩照片及其垂向力矩示意图

Fig. 11 Picture of semi-permanent coupler and diagram of its vertical force moment after accident

4 结论

1) 该次事故中,车体结构破坏的位置主要集中在驾驶室框架、底架、侧墙和端墙等模块的连接处。驾驶室框架在与河道接触碰撞过程中与底架的连接失效,驾驶室内部空间被入侵约 50 cm。

2) 在复杂的事故地形和钩缓系统的共同影响下,各节车厢在冲击力作用下发生了一系列相互错位的碰撞。车体破坏表现为塑性变形与多种形式的韧性断裂。YZ0212 车体是事故中变形断裂最为严重的车厢,其紧邻头车 YZ0211 的 I 端位纵向压缩量约为 30 cm,垂向变形约为 10 cm;与 YZ0213 车体碰撞的 II 端位纵向压缩量约为 40 cm,并在侧墙出现长约 28 cm 的裂纹。

3) 事故中涉及的全自动车钩和半永久车钩在碰撞过程中部分压溃,起到了一定的吸能作用。半

永久车钩在事故中由于垂向的力矩与底架发生碰撞。

参考文献

- [1] 新京报. 亦庄线一调试列车脱轨冲上公路[N/OL]. 新京报电子版. (2015-03-26)[2021-05-10]. http://epaper.bjnews.com.cn/html/2015-03/26/content_568344.htm?div=-1. The Beijing News. A train on commissioning on Yizhuang Line derailed and rushed on road[N/OL]. The Beijing News Digital Version. (2015-03-26)[2021-05-10]. http://epaper.bjnews.com.cn/html/2015-03/26/content_568344.htm?div=-1.
- [2] OKINO T. Evaluation of compression behavior of the end-structure of intermediate car[J]. Railway Technology Avalanche, 2008(22/23):130.
- [3] 肖守纳,张志新,阳光武,等. 列车碰撞仿真中钩缓装置模拟方法[J]. 西南交通大学学报, 2014(5):831. XIAO Shoune, ZHANG Zhixin, YANG Guangwu, et al. Simulation method for couplers and buffers in train collision calculations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014(5):831.
- [4] 王浩,佟鑫,卫亮. 基于有限元的半永久性车钩耐撞性分析[J]. 铁道车辆, 2018(3):5. WANG Hao, TONG Xin, WEI Liang. Analysis of crashworthiness of semi-permanent couplers based on finite elements[J]. Rolling Stock, 2018(3):5.
- [5] 张勇,韦海菊. 基于逐级吸能原理的地铁 B 型车耐撞性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017(8):37. ZHANG Yong, WEI Haiju. Analysis of B-type subway train crashworthiness based on step-by-step energy absorption principle[J]. Urban Mass Transit, 2017(8):37.
- [6] 雷成,王丽红,吴敏. 基于显式有限元软件的地铁列车耐撞性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016(6):22. LEI Cheng, WANG Lihong, WU Min. On the crashworthiness of metro train based on explicit finite element[J]. Urban Mass Transit, 2016(6):22.
- [7] 陈静,禹建伟. 西安地铁 1 号线列车车钩缓冲装置吸能仿真计算[J]. 城市轨道交通研究, 2014(3):112. CHEN Jing, YU Jianwei. Energy-absorbing simulation calculation for coupler buffer device of Xi'an Metro Line 1[J]. Urban Mass Transit, 2014(3):112.
- [8] 张康隆,卢翀,卫亮,等. 基于有限元的城市轨道交通列车车钩缓冲装置压溃吸能仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022(3):187. ZHANG Kanglong, LU Chong, WEI Liang, et al. Simulation analysis of pressing-crack energy absorption of coupler and buffer based on finite element[J]. Urban Mass Transit, 2022(3):187.

(收稿日期:2021-11-04)