

## 城市轨道交通列车脱轨碰撞事故仿真研究

卫 亮<sup>1,2,3</sup> 连海山<sup>3</sup> 易甫清<sup>4</sup>

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲; 2. 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 412001, 株洲;  
3. 岭南师范学院机电工程学院, 524048, 湛江; 4. 宜春开放大学, 336001, 宜春)

**摘 要** [目的] 针对 2015 年发生的一次城市轨道交通不锈钢车体列车脱轨事故的过程进行仿真, 重现复杂事故场景中的车体破坏的直接原因和过程。[方法] 在调查事故场景和不锈钢车体结构与特点的基础上, 使用有限元方法重建事故模型, 分析了整个事故中车辆的速度、加速度、能量变化。[结果及结论] 仿真研究的结果表明, 事故发生时的巨大能量和地面的高低起伏, 导致中间车辆发生爬车、蛇行及相互碰撞, 是造成本次事故中不锈钢车体结构发生断裂失效的重要原因。车体断裂位置主要集中在驾驶室框架与底架、端墙与顶棚、底架与侧墙和端墙的连接处。

**关键词** 城市轨道交通; 列车; 不锈钢车体; 脱轨碰撞; 有限元仿真; 事故重现

**中图分类号** U298.5<sup>+</sup>1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.037

## Simulation Research on Train Derailment and Collision Accident in Urban Rail Transit

WEI Liang<sup>1,2,3</sup>, LIAN haishan<sup>3</sup>, YI Fuqing<sup>4</sup>

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., 412001, Zhuzhou, China; 2. The State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive, 412001, Zhuzhou, China; 3. School of Electromechanical Engineering, Lingnan Normal University, 524048, Zhanjiang, China; 4. Yichun Open University, 336001, Yichun, China)

**Abstract** [Objective] The process of a stainless steel train body derailment accident in urban rail transit in 2015 is simulated, reproducing the direct cause and process of the car body damage in the complex accident scene. [Method] Based on the investigation of the accident scene and the stainless steel car body structure and characteristics, the finite element method is used to reconstruct the accident model and analyze the changes of the speed, acceleration and energy of the train. [Result & Conclusion] Simulation results show that the intermediate cars climbing, snaking and colliding with each other caused by huge energy and rugged ground at the time of the accident forms the main reason for the fracture failure of stainless steel car body structure in the accident. The car body fractures mainly locate

at the connections between the cab frame and the under-frame, the end wall and the roof, the under-frame and the side wall, as well as the under-frame and the end wall.

**Key words** urban rail transit; train; stainless steel car body; derailment and collision; finite element simulation; accident reproduction

列车脱轨引起的车辆碰撞事故是一个复杂的连续碰撞过程, 受轮轨约束、多辆联挂、大质量等因素影响, 车辆脱轨的过程中伴随着碰撞、爬车等<sup>[1-2]</sup>现象。这些现象在以耐撞性评估为目的的标准耐撞性设计场景<sup>[2]</sup>中很难实现, 而且轨道车辆耐撞性试验由于代价高昂, 时间周期长很难进行实车试验。

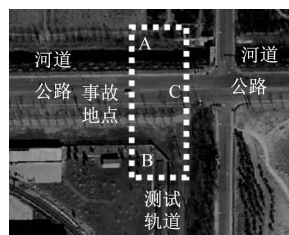
因此, 通过对真实发生过的事故进行重现分析, 对研究轨道列车碰撞机理、研究车体的碰撞破坏原因、探讨极限状态下轨道车辆的耐撞性能有着重要的意义。

本文在对 2015 年发生的城市轨道交通不锈钢车体列车某次脱轨事故安全调查的基础上<sup>[3]</sup>, 使用有限元方法对事故车辆碰撞破坏过程进行重现分析。研究的目的在于: 一方面通过重建分析轨道车辆车体在事故中的速度、加速度变化, 研究车体碰撞破坏的过程, 探讨事故中人员受伤的原因; 另一方面通过事故中车辆破坏的结果与数值模拟的结果进行对比研究, 以进一步探索列车碰撞的机理。

## 1 某次列车脱轨事故简介

事故发生在 2015 年 3 月 25 日下午 3 点左右, 6 节编组的列车从测试轨道的尽头冲出, 发生脱轨事故。地铁列车横穿公路, 最终头车载入紧靠公路的河道里, 事故现场照片<sup>[3]</sup>如图 1 所示。

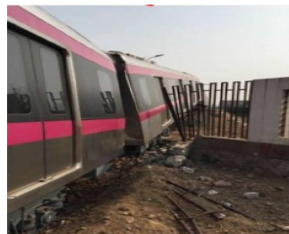
由于本次事故中脱轨列车冲出轨道后, 在轨道、草地、公路、河道等处行驶而过, 造成了一系列的碰撞。使用数值仿真的方法重现整个碰撞过程, 就需分别对场地模型、事故车辆模型进行建模。



a) 事故位置示意



b) 头车脱轨撞击河道(图 a)A 处)



c) 列车击穿围栏(图 a)B 处)



d) 脱轨列车横穿公路(图 a)C 处)

图1 事故发生后现场照片

Fig. 1 On-site pictures after the accident occurred

## 2 事故模型

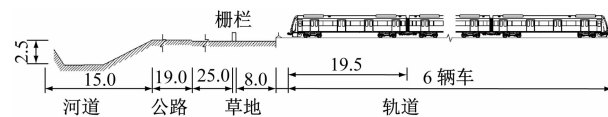
### 2.1 事故地形场景模型

脱轨事故发生地点的地形复杂,地面高低变化是造成车体间相互骑跨碰撞破坏的重要原因。从事故现场调查分析,事故发生位置的纵断面示意图如图2 a)所示。事故的场景可分为3部分:①轨道,在事故发生时4节车辆(编号 YZ0211—YZ0214)依次冲出轨道,2节车辆(编号 YZ0215、YZ0216)制动停留在轨道上。②地面,头车离开轨道后在草地上行驶8 m后击穿围墙(如图1 c)所示),后经过25 m的草地,横穿上19 m宽的沥青公路(如图1 d)所示)。③河道,头车最终落入河道内,并与河道的泥土碰撞发生变形。

依据这3个不同场景特点,分别采用不同的单元类型和材料模型,建立碰撞场景的有限元模型。轨道部分使用3维实体单元建模,单元尺寸为20 mm;考虑轨道在整个碰撞过程中主要起到初始的约束作用,刚度相对车体较大,采用 LS\_DNYAR7.1 软件的弹性材料模型;高低变化的地面采用壳单元建模,单元长度为500 mm,地面的变形也相对较小,使用 LS\_DNYAR7.1 软件的刚性材料建立模型。

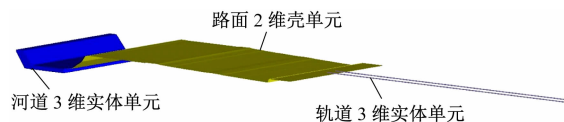
车头在脱轨事故中落入河道中,与泥土构成的河堤发生碰撞并导致变形。与头车发生碰撞的泥土采用3维实体单元建模,采用 LS\_DNYAR7.1 软件的材料模型。整个事故地形场景有限元模型如图2 b)所示,共由11 412个实体单元,1 020 596个

壳单元组成。



尺寸单位:m

a) 事故场景纵断面示意图



b) 事故场景有限元模型

图2 事故场景模型

Fig. 2 Models of the accident scene

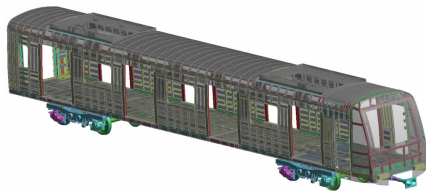
### 2.2 事故车辆模型

事故车辆为B型地铁车辆,事故发生时车体均为空载。不锈钢车体是由高强度不锈钢材料通过点焊等连接方式而成的薄壁筒形整体承载结构。车体组成采用模块化设计,由底架、侧墙、顶棚和端墙4个部分形成一个上部为圆弧、下部为矩形的封闭壳体结构,如图3所示。各部件内部采用由301L-HT不锈钢构成的加强梁与301L-DLT不锈钢构成的外墙通过点焊连接。底架牵枕缓梁部件由耐候钢09CuPCrNi-A构件通过塞焊和手工电弧焊焊接而成。

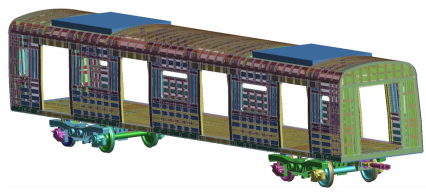
合理的简化是有限元模型评估准确性的基础。本文依据 LS\_DNYA R7.1 软件的计算特点,采用 HyperMesh14.0 前处理软件将车体几何模型离散成



a) 事故的同型号车辆



b) 事故头车模型



c) 事故中间车模型

图3 事故车辆有限元模型

Fig.3 Finite element models of the accident vehicle

有限元模型。不锈钢地铁车体是大型的板、梁式结构,车体结构主要采用 Belytschko-Tsai 壳单元模拟。

### 2.3 车体材料模型

本文依据 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法标准》,在 WDW-10000 万能试验机进行标准拉伸试验,测量得到车体不同材料的真实应力-塑性应变曲线如图 4 所示。有限元车体金属材料模型的塑性材料模型是使用多段线性弹塑性材料模型。

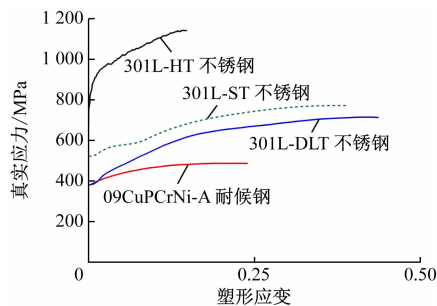


图4 车体金属材料真实应力-塑性应变曲线

Fig.4 True stress-plastic strain curve of the car body metal materials

头车的驾驶室外罩由酚醛玻璃钢构成,酚醛玻璃钢采用 LS\_DNYAR7.1 软件的材料模型,玻璃钢

材料参数<sup>[4]</sup>见表 1。驾驶室的挡风玻璃为夹层玻璃,两层玻璃中夹着树脂,采用 LS\_DNYAR7.1 软件的材料模型,材料参数如表 1 所示。

表1 驾驶室外壳玻璃钢和挡风夹层玻璃材料参数

Tab.1 Parameters of the cab housing fiberglass and windshield interlayer material

材料名称	参数	参数值
酚醛玻璃钢	弹性模量/GPa	10
	体积质量/(kg/m <sup>3</sup> )	2 000
	泊松比	0.4
	失效应变	0.1
夹层玻璃	弹性模量/GPa	74
	体积质量/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500
	泊松比	0.227
	失效应变	0.001
树脂	厚度/mm	4.2
	弹性模量/GPa	2.6
	体积质量/(kg/m <sup>3</sup> )	1 100
	泊松比	0.435
	厚度/mm	0.76

### 2.4 车钩模型

以钩缓装置为代表的列车联挂系统,在中低速的车辆碰撞中起着重要吸能和传递车体运动的作用<sup>[5-6]</sup>。连挂系统建模是列车耐撞性仿真技术不可忽视的重要部分。事故车辆的车钩分为,头车使用的自动车钩和中间车连接的半永久车钩。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,如图 5 所示。在车钩受到冲击力压缩变形时,首先橡胶缓冲器的橡胶变形吸能,橡胶缓冲器的初压力为 80 kN、最大行程 67 mm、最大阻力 620 kN。当撞击力进一步升高达到 650 kN 时,橡胶变形吸能结束;在导向杆的引导下,压溃管发生压溃变形,其最大行程 252 mm、阻力 650 kN。

## 3 脱轨事故动态响应仿真结果

在脱轨事故发生后,整个过程可以分为 3 个阶段:

1) 穿过路面:脱轨后,头车 YZ0211 行驶 12 m 后与围墙发生碰撞(如图 1 c)所示),围墙的强度较小,直接撞碎;接着,列车随着地面的起伏继续前进到达河岸边,这时列车的运行速度为 9.6 m/s;车体由



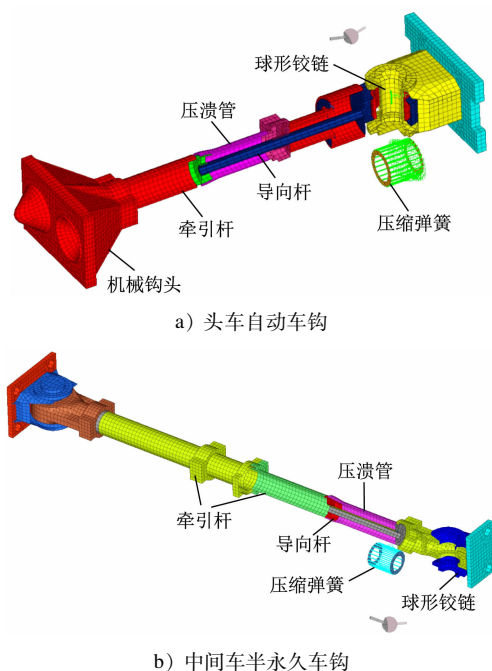


图5 车钩有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the coupler

于强度较大,车辆的变形以弹性为主,但是在撞击力与后继车体的冲击作用下头车 YZ0211 和 YZ0212 车发生蛇行运动,偏转角度分别为  $10^\circ$  和  $5^\circ$ ,如图 6 所示。

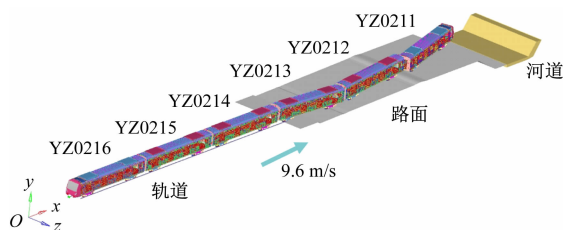


图6 列车脱轨事故重现的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the accident reproduction

2) 冲入河堤:车辆以  $34.5 \text{ km/h}$  的初速度,在重力的影响下,掉入河道,撞击在对岸的河堤上。头车驾驶室框架变形,头车运动停止。

3) 后继车辆相互碰撞:在头车落入河道停止后,后继车辆间发生一系列的骑跨碰撞,直到整个碰撞过程结束。

对于本次脱轨事故中第一阶段,撞击力较小,不会导致车体发生大面积的塑性变形。为缩减计算量,有限元计算的初始条件从第二个阶段开始,重点分析车体在脱轨事故中的动态响应与变形。

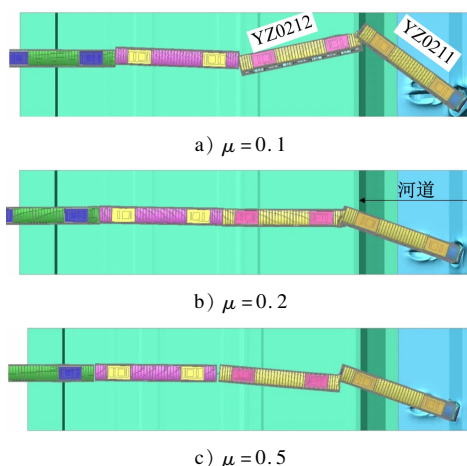
最终整个重现模型共包括 8 025 459 个壳单元,141 704 个实体单元,8 928 个弹簧阻尼单元,

74 492 个梁单元(如图 6 所示),整个碰撞过程的计算模拟时间  $t$  为 3 000 ms。计算一共使用 48 个 CPU(中央处理器)计算,大约运行 252 h。

### 3.1 摩擦因数对碰撞事故仿真的影响

该次事故的地貌较为复杂,涉及车轮与沥青路面的摩擦,车轮和车头与河道的摩擦、车轮和钢轨的摩擦,以及车辆间的相互碰撞摩擦等多种摩擦同时发生。而相关研究表明,摩擦因数的大小对于脱轨后车辆的动态响应有显著的影响。在进行结构破坏分析前,需要先对摩擦因数的选取进行单独讨论。

文献[7]指出:在不同的制动条件下,轮轨的摩擦因数变化范围为  $0.10 \sim 0.55$ 。为了获得接近事故现场的摩擦因数,本文将摩擦因数  $\mu$  设定为  $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.5$ ,使用的全自动罚系数接触方法,分别对不同摩擦因数碰撞事故的有限元模型进行计算,计算结果如图 7 所示。通过对不同摩擦因数碰撞事故有限元模型的计算表明,摩擦因数为  $0.2$  时,车体碰撞破坏位置与事故现场调查一致。最终计算的动态响应结果,如图 8、图 9 所示。

图7 不同摩擦因数下车体姿态仿真计算结果截图  
( $t = 3\,000 \text{ ms}$ )Fig. 7 Screenshots of the simulated calculation results of the car body attitude with different friction coefficients ( $t = 3\,000 \text{ ms}$ )

### 3.2 总体能量分析

在整个脱轨事故中,一方面由于脱轨车体具有较大动能,另一方面由于地貌、地物的变化和重力做功,整体能量出现上升趋势。总能量由初始的  $5\,063 \text{ kJ}$  上升到  $6\,218 \text{ kJ}$ 。有限元仿真计算的能量随时间变化,如图 10 所示。

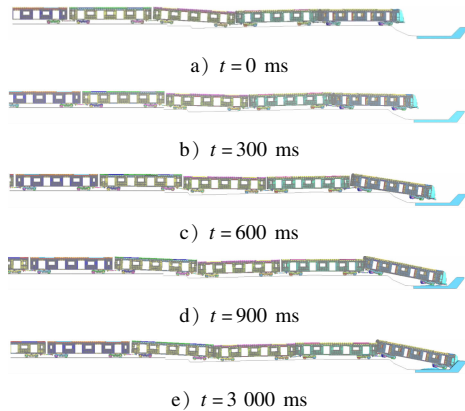


图8 列车脱轨事故动态重现图(侧视图)

Fig. 8 Dynamic reproduction of the train derailment accident (side view)

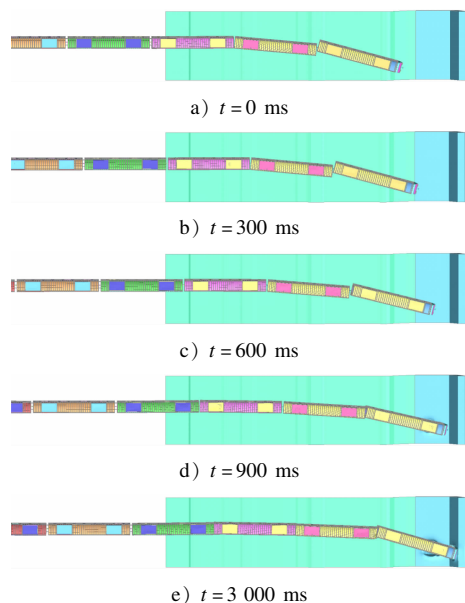


图9 列车脱轨事故动态重现图(俯视图)

Fig. 9 Dynamic reproduction of the train derailment accident (top view)

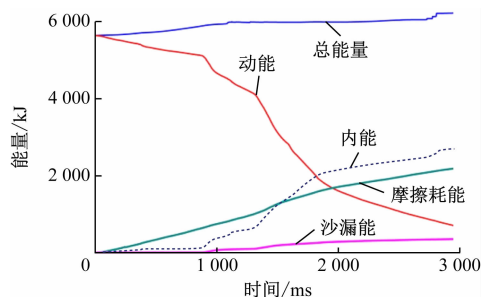


图10 有限元仿真计算的能随时间的变化曲线

Fig. 10 Energy versus time curve calculated by finite element simulation

车体在碰撞运动的过程中大量的动能转化成内能与摩擦损耗。全局动能随着每个阶段碰撞的

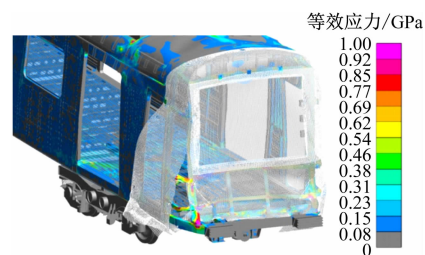
发生呈阶梯形减小,相应的内能呈阶梯形上升,摩擦耗能随着时间的变化逐渐增大。碰撞动能由初始 5 633 kJ,到撞击结束时剩余动能 605 kJ(占初始动能的 10.7%);在 3 000 ms 碰撞结束时,内能上升到 2 698 kJ,占总体能量的 44%;摩擦损耗能量为 2 203 kJ,占总体能量的 35%。由于整个碰撞过程接触状况复杂,网格变形大,沙漏能在碰撞结束时为 354 kJ,占模型总体能量的 6%,模型总体没有出现大范围的沙漏状态。泥土、车体和车钩三个部位在碰撞过程中吸收了 2 698 kJ 的动能而转化为内能。

### 3.3 YZ0211 号头车与河道碰撞破坏过程分析

本次脱轨事故中头车最终落入河道, YZ0211 号头车插入河堤中发生变形。在 900 ms 时前车钩和河道底部发生接触碰撞,车钩断裂失效;100 ms 时,驾驶室与河堤发生碰撞,在撞击动能的作用下头车驾驶室框架发生变形,玻璃纤维外罩断裂破坏,框架整体内凹变形,最大变形量达 487 mm(如图 11 所示)。由于车前底架与驾驶室框架刚度的差异性,在冲击力的作用下,两者变形不一致,驾驶室框架与底架连接处发生断裂。



a) 车头破坏情况



b) 车体变形等效应力分布云图

图11 YZ0211 号车体破坏情况

Fig. 11 Damage of YZ0211 car body

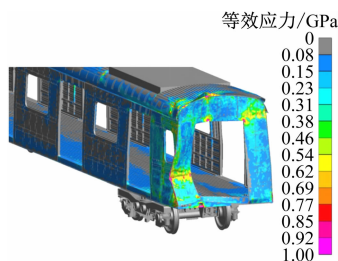
### 3.4 YZ0211 号头车 II 端位与 YZ0212 号车 I 端位的破坏过程

YZ0211 号头车完全落入河道后,在 1 400 ms 时, YZ0211 号车底架与 YZ0212 号车端墙发生碰撞,如图 12 所示。撞击位置位于 YZ0212 端墙与侧

墙连接处, YZ0212 侧墙和端墙被挤压严重变形, 车体纵向压缩量达 323 mm。



a) YZ0212 号 I 端位



b) YZ0212 号 I 端位等效应力分布图

图 12 YZ0212 号 I 端位的变形破坏情况

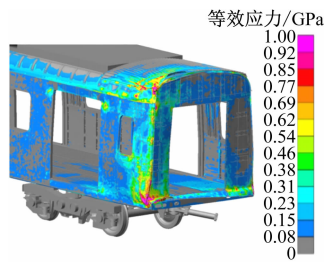
Fig. 12 Deformation and damage of YZ0212 carbody I end

### 3.5 YZ0212 号车 II 端位与 YZ0213 号车 I 端位的破坏过程

中间车变形最大的位置为 YZ0212 号车 II 端位侧墙与底架连接处, 如图 13 所示。该处纵向变形为 410 mm。在撞击力, 车钩和地貌、地物的共同作用下, YZ0213 号车在 1 500 ms 发生上冲的爬车趋势;



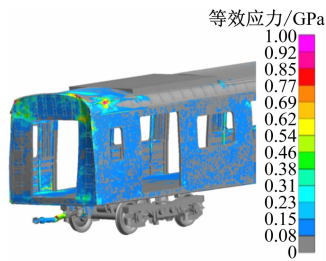
a) YZ0212 号车 II 端位



b) YZ0212 号车 II 端位等效应力分布



c) YZ0213 号车 I 端位



d) YZ0213 号车 I 端位等效应力分布

图 13 YZ0212 号车 II 端位与 YZ0213 号车 I 端位变形破坏情况

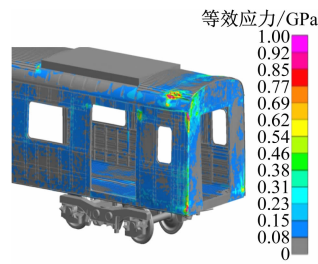
Fig. 13 Deformation and damage of car body YZ0212 end II and YZ0213 end I

在 1 580 ms 时 YZ0213 号车底架骑跨到 YZ0212 号车的底架上, 车辆间的相互骑跨导致 YZ0212 号车底架与端墙的连接和侧墙与端墙的连接位置处发生应力集中。

在 1 450 ms 左右, YZ0213 号车与 YZ0214 号车发生碰撞, 如图 14 所示。由于 YZ0214 号车的后半部分停留在比公路面高 0.5 m 左右的轨道路基上, 前半部分与 YZ0213 号车相撞。1 500 ms 后, 摩擦力消耗部分动能, 且两车位于列车中间, 仅顶棚与端墙连接处发生塑性变形与小面积塑性变形及屈曲变形。



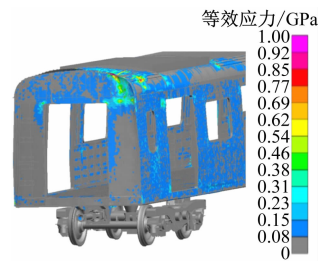
a) YZ0213 号车 II 端位



b) YZ0213 号车 II 端位等效应力



c) YZ0214 号车 I 端位



d) YZ0214 号车 I 端位等效应力

图 14 YZ0213 号车 II 端位与 YZ0214 号车 I 端位变形破坏情况

Fig. 14 Deformation and damage of car body YZ0213 end II and YZ0214 end I

## 4 结语

本文针对 2015 年发生的一次不锈钢车体列车脱轨事故, 在调查事故场景和不锈钢车体结构与特点的基础上, 建立了符合真实情况的列车脱轨事故的有限元模型, 进行了事故中车辆的动态响应的模拟仿真。通过分析列车在事故中的碰撞响应过程, 研究车辆碰撞机理, 探讨极限状态下城市轨道交通车辆的耐撞性表现。主要结论如下:

1) 事故发生时的巨大能量和地面的高低起伏, 导致中间车之间发生爬车、蛇行及相互碰撞, 是造成本次事故中不锈钢车体结构发生断裂失效的重要原因。车体断裂位置主要集中在头车驾驶室框



架与底架、端墙与顶棚、底架与侧墙和端墙的连接处。

2) 在本次低速脱轨事故中,除了头车与河道接触碰撞吸收较大的动能外,第2节车在与头车和第3节车的碰撞过程中也吸收了较大的动能,因此对于列车的耐撞性设计不仅只考虑单节车,应该从整个列车系统加以考虑。

## 参考文献

- [1] 卫亮, 康巍, 万平. 碰撞事故车辆车体结构破坏分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 136.  
WEI Liang, KANG Wei, WAN Ping. Analysis of vehicle body structure destruction in collision accident[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 136.
- [2] 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, 19(6): 22.  
LEI Cheng, WANG Lihong, WU Min. On the crashworthiness of metro train based on explicit finite element[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 22.
- [3] 杨峰. 亦庄线一调试列车脱轨冲上公路[N]. 新京报. 2015-03-26(16).  
YANG Feng. Yizhuang Line a derailment train rushed onto the road [N]. Beijing News. 2015-03-26(16).
- [4] 卫亮. 基于损伤断裂模型的地铁车辆碰撞事故仿真研究[D].

北京: 北京交通大学, 2021.

WEI Liang. Simulation study of subway vehicle collision based on damage and fracture model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

- [5] 张康隆, 卢翀, 卫亮, 等. 基于有限元的城市轨道交通列车钩缓装置压溃吸能仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 187.  
ZHANG Kanglong, LU Chong, WEI Liang, et al. Simulation analysis of pressing-crack energy absorption of urban rail transit train coupler buffer device based on finite element[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 187.
- [6] ZHU X, LU X Z, CHENG Q L, et al. Simulation of the running attitude of a train after derailment[J]. International Journal of Crashworthiness, 2020, 25(2): 213.
- [7] ALARCÓN G I, BURGELMAN N, MEZA J M, et al. The influence of rail lubrication on energy dissipation in the wheel/rail contact: a comparison of simulation results with field measurements[J]. Wear, 2015, 330: 533.

· 收稿日期:2022-05-30 修回日期:2022-09-06 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-05-30 Revised:2022-09-06 Published:2024-09-10  
· 通信作者:卫亮,高级工程师, weiliang174@163.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

(上接第 207 页)

重分配策略,发现转向架级电子机械制动系统失效时,其余转向架进行制动力重分配,在黏着限制前提下实现整车级无制动力损失。

## 4 结语

本文介绍了有轨电车电子机械制动的系统构成,通过模糊故障树分析了该系统的顶事件发生概率与底事件的模糊重要度,并筛选出了系统的薄弱环节;针对系统薄弱环节,增加冗余并预先确定故障导向策略,这可提升有轨电车电子机械制动系统的安全性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 王永志, 孙超凡, 高明亮. 基于模糊故障树的动车组空调系统可靠性分析[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(2): 5.

WANG Yongzhi, SUN Chaofan, GAO Mingliang. Reliability analysis of EMU air conditioning system based on fuzzy fault tree[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(2): 5.

- [2] 李兴运, 齐金平. 基于 T-S 模糊故障树的受电弓系统可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 33.  
LI Xingyun, QI Jinping. Reliability analysis of the pantograph system based on the T-S fuzzy FTA[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1): 33.

· 收稿日期:2022-05-27 修回日期:2022-06-21 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-05-27 Revised:2022-06-21 Published:2024-09-10  
· 第一作者:苗峰,高级工程师, miaofeng646@126.com  
通信作者:王聪,工程师, 15966852285@163.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