

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*

张康隆¹ 卢 翀² 卫 亮^{3,4} 张惠涛⁵

(1. 湖北工程职业学院电子信息学院, 435004, 黄石; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所, 100081, 北京;
3. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲; 4. 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; 5. 石家庄学院计算机科学与工程学院, 050035, 石家庄//第一作者, 讲师)

摘 要 压溃式半永久钩缓装置是城市轨道交通列车中间车厢耐撞性吸能的主要部件。在分析压溃式半永久钩缓装置结构与功能的基础上,建立了压溃式钩缓部件的有限元模型。基于 EN 15227—2008《车体防撞性要求》的城市轨道交通列车中间车厢耐撞性评估场景,分析了压溃式半永久钩缓装置在 12.5 km/h 速度撞击工况下的动态响应。数值仿真结果表明:具备压溃吸能结构的半永久钩缓装置能有效吸收撞击动能。该装置通过减小撞击力峰值,起到了保护中间车厢车体结构、避免人员伤亡的作用。

关键词 城市轨道交通车辆; 钩缓装置; 有限元建模; 耐撞性评估

中图分类号 U270.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.040

Simulation Analysis of Pressing-Crack Energy Absorption of Urban Rail Transit Train Coupler Buffer Device Based on Finite Element
ZHANG Kanglong, LU Chong, WEI Liang, ZHANG Huitao

Abstract Pressing-crack type semi-permanent coupler buffer device is the main component of crashworthiness energy absorption of urban rail transit train middle compartment. Based on the analysis of structure and function of the device, finite element model of a pressing-crack type coupler buffer component is established. Based on the crashworthiness evaluation scenario of train middle compartment specified in EN 15227—2008 Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies, the dynamic response of the device under the impact condition of 12.5 km/h is analyzed. The numerical simulation results show that the semi-permanent coupler buffer device with pressing-crack energy absorption structure can effectively absorb the impact kinetic energy, protecting the body structure of the middle

compartment and avoiding casualties by reducing the peak impact force.

Key words urban rail transit vehicle; coupler buffer device; finite element modeling; crashworthiness evaluation

First-author's address School of Electronic and Information, Hubei Engineering Institute, 435004, Huangshi, China

城市轨道交通列车中间车厢车体的两端没有设置非载人区域,因而无法通过非载人区域的变形来提高列车整体的耐撞性能^[1-2]。位于两节车厢中间、用于连接和缓冲运行冲击的半永久车辆钩缓装置,是城市轨道交通列车在中低速碰撞场景下的主要吸能部件^[3-6]。在列车的日常运行中,具备吸能功能的半永久钩缓装置依靠橡胶、胶泥或汽液缓冲器的弹性变形来吸收、缓冲车辆的纵向冲击。列车发生碰撞事故时,撞击力一旦超过缓冲器变形的极限,扩张式压溃管将触发塑性变形,吸收撞击产生的冲击能量,以达到保护车厢结构、避免人员伤亡的功能^[7-8]。

建立压溃吸能的半永久钩缓装置有限元模型,成为城市轨道交通列车中间车厢整体耐撞性评估不可或缺的关键部分。本文在建立压溃式钩缓部件的有限元模型的基础上,对压溃式半永久钩缓装置在 12.5 km/h 速度撞击工况中的动态响应进行仿真分析。

1 压溃式半永久钩缓装置的结构特点

如图 1 所示,典型的压溃式半永久钩缓装置主要由牵引杆、导向杆、压溃管、橡胶缓冲装置、回转机构和安装座等部件构成。其中,橡胶缓冲装置和

* 石家庄市科学研究与发展计划项目(211080251A);中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题(2020YJ155)

扩张式压溃管承担了吸收冲击动能的作用。

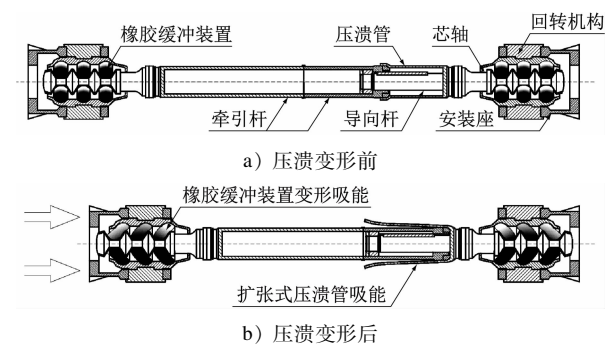


图1 压溃式半永久钩缓结构示意图

Fig. 1 Diagram of pressing-crack type semi-permanent coupler buffer device structure

橡胶缓冲装置通过1组3条橡胶缓冲环安装于车钩的基座内。当钩缓装置受到纵向冲击力时,橡胶缓冲装置首先产生弹性变形和摩擦,以消耗撞击动能。图2为橡胶缓冲装置的压缩力随位移的变化曲线,其最大压缩位移为65 mm,此时受到的最大静态压缩力为600 kN,设计吸能容量约为12 kJ。

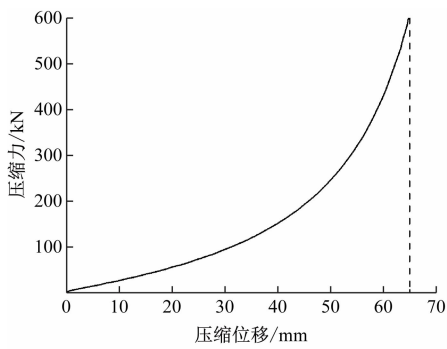


图2 橡胶缓冲装置压缩力-压缩位移曲线^[7]

Fig. 2 Performance curve of rubber buffer device^[7]

当撞击力超过650 kN且撞击行程超过55 mm时,橡胶变形吸能结束,扩张式压溃管在导向杆的引导下发生扩张式塑性变形,其最大压缩位移为350 mm,此时的压溃力保持在600 kN,设计吸能容量为210 kJ^[9]。

因此,当列车的中间车厢(质量为40 t)以12.5 km/h的速度发生撞击时,由两组橡胶缓冲装置和压溃管构成的1对半永久钩缓装置吸收的撞击动能可达到234 kJ。

2 压溃式半永久钩缓装置有限元模型

根据半永久钩缓装置的功能结构与三维模型,利用Hypermesh软件对不同部位的构件分别使用壳

单元、实体单元和非线性弹簧单元建立有限元模型,如图3所示。该压溃式钩缓装置模型共包含7 843个壳单元,1 494个实体单元和96个梁单元,其中,最小网格尺寸为10 mm。

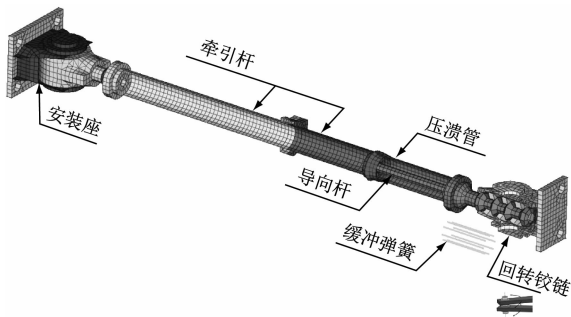


图3 压溃式半永久钩缓有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the pressing-crack type semi-permanent coupler buffer device

将连接车钩钩身与安装座的回转轴承机构简化为刚性的回转铰链连接,采用有限元软件LS-DYNA中的关键字CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE进行定义,以实现车钩钩身与安装座之间的转动自由度。

安装座及其附属结构的结构较厚、刚度较大,因此采用三维实体单元予以划分,材料本构模型使用MAT_ELASTIC弹性模型;牵引杆、导向杆和压溃管的厚度较薄,在碰撞冲击中将产生压缩变形,因此采用壳单元予以划分,材料本构模型使用MAT_PLASTIC_KINEMATIC塑性材料模型。车钩各部位的材料型号与材料参数如表1所示。

表1 半永久车钩的材料型号及其性能参数

Tab. 1 Type and performance parameters of semi-permanent coupler material

部件	材料型号	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	切线模量/MPa	抗拉极限/MPa
牵引杆	25CrMo4	200	575	1 430	800
导向杆	25CrMo4	200	575	1 430	800
安装座	42CrMo4	200	650	715	750
压溃管	26CrMo4	200	650	715	750

承担压缩吸能的橡胶缓冲装置,模拟时共计使用3组共48个弹簧单元,采用串联和并联的方式构成1组近似于鸟笼的弹簧结构。压缩弹簧的材料模型采用MAT_GENERAL_NONLINEA_6DOF_DISCREYE_BEAM非线性离散梁单元。梁单元的压缩特性则采用图2的压缩力-压缩位移曲线。

3 半永久钩缓装置的碰撞响应试验

碰撞场景采用 EN 15227—2008《车体防撞性要求》附录 D.4 中对于中间车厢耐撞性评估的场景,即 1 节中间车厢以 12.5 km/h 的速度撞击固定的中间车厢。本文将中间车厢简化为 40 t 的质量单元附着在安装座的刚性面上,同时约束刚性面在垂直方向与水平方向的位移,模拟轨道约束的边界条件,使用 LS-DYNA 非线性有限元软件对钩缓装置的碰撞吸能响应进行仿真分析。在撞击过程中,使用自动单面接触关键字定义钩缓内部各部件间的摩擦系数,设定动摩擦系数为 0.1,静摩擦系数为 0.3。

使用 DELL 工作站计算整个碰撞过程(历时 300 ms)中 1 节 40 t 车厢以 12.5 km/h 的初速度运动,钩缓结构的能量随时间变化曲线如图 4 所示。在碰撞发生时,整个碰撞模型具有的初始动能为 242 kJ。碰撞吸能过程发生在 0~210 ms,期间系统的动能迅速下降(在 213 ms 时降至 0.13 kJ),钩缓结构的内能迅速上升(在 213 ms 时达到最大值 240 kJ)。沙漏能在碰撞结束时为 1.06 kJ,占模型整体能量的 0.4%,可见模型没有出现明显的沙漏状态。

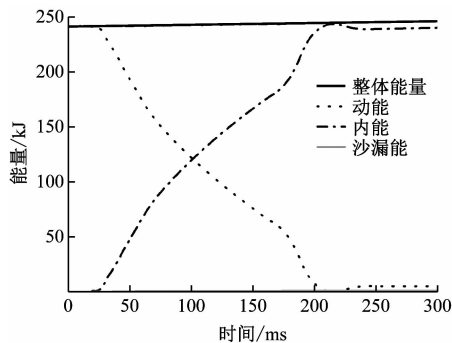


图4 碰撞能量-时间变化曲线

Fig.4 Variation curve of collision energy-time

整个撞击过程中钩缓装置的等效力分布与结构变形过程如图 5 所示,撞击力与时间、压缩位移的曲线如图 6 所示。

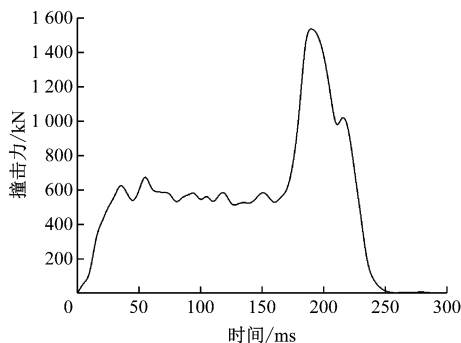
如图 5~6 所示,通过对变形过程与撞击力的变化分析,整个钩缓装置撞击吸能过程可以分为 3 个阶段:

1) 第 1 阶段:撞击发生后的第 0~70 ms,橡胶缓冲装置吸能。撞击力从 0 开始迅速升高,并且到达第 1 个峰值 715 kN,此阶段车钩的橡胶缓冲弹簧

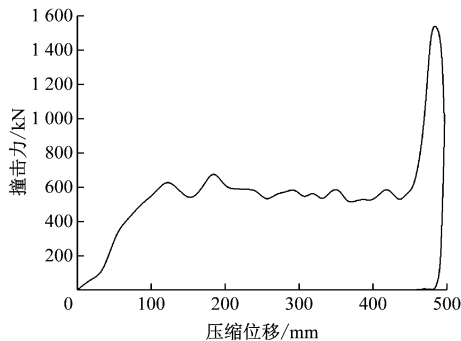


图5 撞击过程中钩缓装置压溃变形与等效力分布

Fig.5 Pressing-crack deformation and equivalent stress distribution of the coupler buffer device during impact



a) 撞击力-时间曲线



b) 撞击力-压缩位移曲线

图6 压溃式半永久钩缓在碰撞过程中撞击力的变化

Fig.6 Impact force variation of the pressing-crack type coupler buffer device during collision

起主要的吸能作用。压缩位移增大至 130 mm 左右时,两端的橡胶缓冲装置吸能达到极限,橡胶缓冲装置失效。

2) 第 2 阶段:撞击发生后的第 55~170 ms,压

溃管变形吸能。橡胶缓冲装置吸能结束后,压溃管在导向管的引导下,膨胀压溃吸能。当压缩位移处于 100 ~ 460 mm 阶段时,通过调整压溃管厚度控制压溃力,使压溃力保持在 550 kN 左右。此阶段压溃管局部区域达到了材料的抗拉极限,其等效应力达到 750 MPa 后将发生压溃断裂。压溃管的有限元模型在删除达到抗拉极限的单元后,模拟压溃管的断裂过程如图 5 b) 和图 5 c) 所示。

3) 第 3 阶段:撞击发生后的第 170 ~ 220 ms,牵引杆变形吸能。在压溃管完成变形吸能后,牵引杆由于撞击力的作用部分弯曲,进一步吸收剩余动能。牵引杆上的等效应力达到 800 MPa,作用点位于牵引杆与轴芯碰撞接触位置。此时撞击力达到整个碰撞过程的最大值(1 550 kN)。此后,随着压缩位移的增大,转动机构与牵引杆之间发生偏转,如图 5 d) 所示。撞击发生后的第 220 ~ 300 ms,撞击力下降到 0,撞击动能被弯曲吸收,整个碰撞吸能过程结束。

4 结语

本文在分析半永久钩缓装置的功能结构及其三维模型的基础上,采用 Hypermesh 软件对半永久钩缓装置不同部位的构件,使用壳单元、实体单元和非线性弹簧单元,建立了具备压溃吸能作用的半永久钩缓装置有限元模型。基于 EN 15227—2008 的城市轨道交通中间车厢耐撞性评估场景(即采用 1 节 40 t 的中间车厢以 12.5 km/h 撞击固定的中间车厢),使用数值仿真的方法模拟了压溃式半永久钩缓装置在该撞击工况中的动态响应。研究结果表明:

1) 在列车的中低速碰撞过程中,具备压溃吸能结构的半永久钩缓装置能完全吸收整个撞击过程中的动能。

2) 橡胶缓冲机构和压溃管吸收了大部分的撞击动能,牵引杆部件的塑性变形也吸收了部分的撞击动能。

3) 在撞击力的作用下,牵引杆与转动机构之间产生偏转。这种横向摆动对列车碰撞过程的蛇行、脱轨等现象的影响需作进一步的讨论和研究。

参考文献

[1] 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.

[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(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.

[3] 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.

[4] 肖守讷,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.

[5] 杨宝柱,肖守讷,杨超. 能量吸收方案对列车碰撞响应的影响[J]. 城市轨道交通研究,2018(3):48.

YANG Baozhu, XIAO Shoune, YANG Chao. Effect of energy absorbing schemes on train crash response[J]. Urban Mass Transit, 2018(3):48.

[6] 陆青松,吕效忠. 车钩缓冲装置在碰撞仿真中的模拟方式[J]. 铁道车辆,2015(11):8.

LU Qingsong, LYU Xiaozhong. The way of simulation for coupler draft gears in the collision simulation[J]. Rolling Stock, 2015(11):8.

[7] 帅纲要,常明,何华. 城市轨道交通车辆车钩缓冲器的配置与能量吸收[J]. 电力机车与城市轨道交通车辆,2009(5):17.

SHUAI Gangyao, CHANG Ming, HE Hua. Coupler and buffer configuration and energy absorption of mass transit vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2009(5):17.

[8] 李立恒. 浅谈城市轨道交通车辆端部碰撞能量吸收区设计[J]. 铁道车辆,2018(3):16.

LI Liheng. Discuss the design of the collision energy absorption part at the end of an urban rail vehicle[J]. Rolling Stock, 2018(3):16.

[9] 庞艳凤,陈凯. 国内城市轨道交通车辆车钩缓冲装置应用情况和统型设想[J]. 铁道车辆,2011(1):22.

PANG Yanfeng, CHEN Kai. Application of coupler draft gears on domestic urban rail vehicles and the idea of unifying models[J]. Rolling Stock, 2011(1):22.

(收稿日期:2020-02-09)