

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.10

轨道车辆吸能装置准静态试验测试技术研究

刘艳文¹, 滕万秀¹, 许平², 李本怀¹, 修瑞仙³

(1. 中国中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062;

2. 中南大学 交通运输工程学院 轨道交通安全教育重点实验室, 湖南 长沙 410075;

3. 长春师范大学工程学院, 吉林 长春 130032)

摘要: 试验研究方法是轨道车辆吸能装置耐撞性最直接、最具有说服力的研究方法。针对目前国内文献鲜有通过试验对吸能装置耐撞性进行研究的现状, 本文设计出一种轨道车辆吸能装置准静态试验测试方法, 并对某地铁列车吸能装置进行试验, 得到吸能装置压缩力、压缩位移两个关键吸能特性指标; 通过准静态试验边界条件, 建立等同的仿真分析模型, 通过仿真分析方法研究吸能装置的吸能特性并与试验结果进行对比。研究表明: 此吸能装置准静态试验测试方法具有可行性, 能够满足实际工程需要; 分析结果与试验结果一致性较好, 验证了分析结果的准确性和试验测试方法的有效性, 通过试验与分析结合的方法为吸能装置吸能特性及后续结构优化提供了理论和试验支撑。

关键词: 轨道车辆; 吸能装置; 准静态试验; 耐撞性

中图分类号: TB92; TH761

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)02-0044-07

Quasi-static Test Technique Research on Railway Vehicle Energy-absorbing Device

LIU Yanwen¹, TENG Wanxiu¹, XU Ping², LI Benhuai¹, XIU Ruixian³

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co. Ltd., Changchun 130062, China; 2. Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry of Education, School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

3. Changchun Normal University, School of Engineering, Changchun 130032, China)

Abstract: The test research method is the most direct and persuasive the crash-worthiness of a for railway vehicle energy absorbing device (RVEAA). In view of the current situation that few domestic literatures reported the test of energy absorbing device crash-worthiness, a quasi-static test method is designed for RVEAA, and is carried out on some metro train energy absorbing devices. The two key characteristics of compression force and compression stroke for energy absorbing device are obtained. According to the test boundary conditions, the equivalent simulation analysis model is established, the crash-worthiness of the energy absorbing device is studied and simulation results are compared to the test results. The research results show that the designed quasi-static test method is feasible and can meet the needs of practical engineering. The simulation results are in good agreement with the test results, which verifies the accuracy of the analysis results and the validity of the test method, the combination method of test and simulation analysis provides theoretical and experimental support for energy absorption characteristics and subsequent structural optimization of energy absorption device.

Key words: railway vehicle; energy-absorbing device; quasi-static test; crash-worthiness

0 引言

随着近年来轨道交通在世界范围内的飞速发展及列车运行速度的提升, 轨道车辆的碰撞事故屡见不鲜, 据不完全统计, 仅 2017~2018 年两年内, 世界范围内比较严重的列车碰撞事故就有 20 多起, 范围涉及发达国家、发展中国家。

轨道车辆碰撞安全系统包括主动安全系统和被动安全系统^[1], 轨道列车运行系统的复杂性使得先进的

主动安全系统在完全避免列车碰撞事故发生面前也显得苍白无力^[2], 被动安全系统是减小列车碰撞损失的最后一道防线, 常见的被动安全系统是在车辆端部设计吸能装置, 吸能装置耐撞性研究目前已经成为轨道车辆设计的重点和难点。

吸能装置耐撞性的研究方法主要有仿真分析研究和试验研究。仿真分析研究方法具有成本低、可以任意次重复进行、可以对结构任意位置进行直观观察的优点, 成为很多研究人员的首选方法, 梁炬星^[3]采用

数值仿真分析方法对一种新型切削式吸能装置耐撞性进行研究,研究切削厚度和切削行程对吸能装置耐撞性的影响;刘亚妮^[4]等以某城市轨道交通车辆的防爬器为研究对象,采用 Johnson – Cook 本构模型对其耐撞性进行研究;雷成^[5-6]等对轨道车辆车端专用吸能装置耐撞性进行了数值仿真分析研究。

仿真分析方法虽然有其独特的优点,但因为仿真分析方法所有的边界条件都处于完全理想状态,这与实际列车碰撞状态存在一定差异,同时仿真分析结果的准确性也需要试验进行验证,所以,试验研究为吸能装置耐撞性最直接也是最具说服力的一种研究方法。而现状是鲜有相关文献通过试验对吸能装置耐撞性进行研究和验证。

本文以某地铁列车吸能装置为研究对象,设计了一种能满足实际工程需要的吸能装置准静态试验测试方法,通过试验结果与仿真分析结果的对比,验证了试验方法的可行性及分析结果的准确性,为吸能装置吸能特性及后续结构优化提供了理论和试验支撑。

1 轨道车辆吸能装置准静态试验测试方法

轨道车辆吸能装置的吸能特性主要由压缩力和压缩位移两个关键因素确定,因此,在准静态试验测试方法设计中,如何准确地测量到这两个参数是试验测试方法设计成败的关键。采用不同的试验装置,具体的试验设计测试方法不尽相同,但最终得到的试验测试结果是一致的。基于已有的试验测试装置及试验条件,设计出一种能满足实际工程需要的轨道车辆吸能装置准静态试验测试方法。

轨道车辆吸能装置准静态试验测试装置如图 1 所示,整个测试装置主要包括:油压加载系统、测力系统、刚性支撑墙及位移计等,吸能装置放置于油压加载装置和测力系统之间,为了记录整个测试过程中试验数据,通常采用数据采集系统及彩色摄像机。

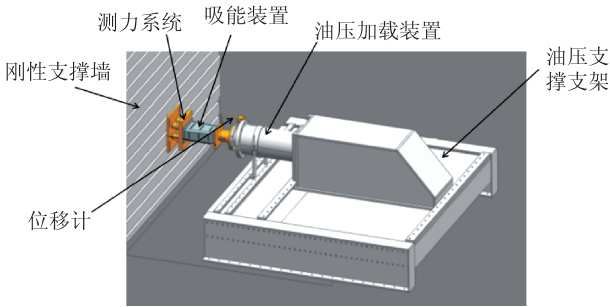


图 1 轨道车辆准静态试验测试装置

1.1 油压加载系统

油压加载系统主要由支撑支架和油压加载装置组成,在试验中提供动力压缩吸能装置。支撑支架两侧支座放置在地面上,通过螺栓与地面进行连接(每侧 40 个螺栓),试验中理想状态为支撑支架与地面处于刚性连接,支架相对于地面的位移为零。

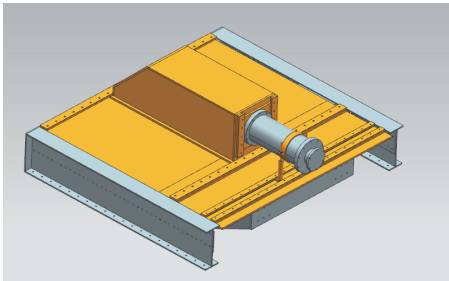


图 2 油压加载系统

油压加载装置坐落在支撑支架上,通过油压进行驱动,最大可以产生 4 MN 的压缩力,油压加载头前端安装有测力传感器,可以实时监控压缩力的大小(量程 4 MN)。油压加载装置可以通过位移或压力进行自动控制,控制误差小于 0.01 mm 或 0.001 MPa,最大压缩位移可达 800 mm,进给速度为 10 ~ 60 mm/min,在试验中通常采用位移控制,进给速度为 20 mm/min。

1.2 测力系统

测力系统主要由连接板、匀力板和测力传感器构成,如图 3 所示,连接板固定于刚性支撑墙上,采用螺栓连接;测力传感器与连接板通过螺栓刚性连接,方便拆卸,与匀力板采用弹性连接,在套筒里加装有橡胶垫,确保在试验过程中 4 个测力传感器(量程 1 MN)受力均匀,测力传感器的布置见图 4。

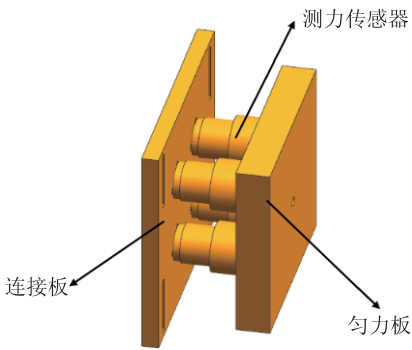


图 3 测力系统

测力系统用来测量吸能装置的压缩力,为保证试验数据的准确性,避免由于工装设计及其他原因导致

试验数据错误, 试验中设计测力系统和油压头前端测力传感器两套独立的测力设备, 通过两者压缩力值比较验证试验数据的准确性。

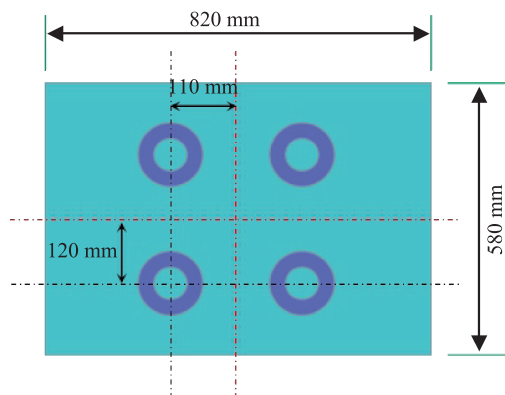


图4 测力传感器布置图

1.3 位移计

为了准确测量吸能装置的压缩位移, 在试验中设计安装有4个独立的位移计, 如图5所示。位移计1(LVDT1)位于油压加载装置支撑支架与地面之间, 用于测量在试验过程中支撑支架的刚性位移; 位移计2(LVDT2)位于匀力板和地面之间, 用于测量在试验过程中匀力板的刚性位移; 位移计3(LVDT3)和位移计4(LVDT4)都位于油压加载装置和地面之间, 用于测量吸能装置的压缩位移, 分别布置于油压加载装置的左右两侧, 通过比较两者位移值验证试验数据的准确性。

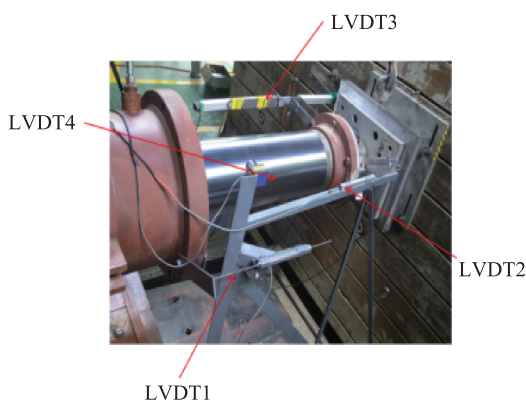


图5 位移计布置图

1.4 数采采集系统

数采采集系统用来采集吸能装置在试验过程中压缩力、压缩位移试验数据, 对数采装置没有特殊要求, 一般常规的数据装置都可以满足试验需求, 本试验中需要数采装置具有9个采集通道, 如图6。

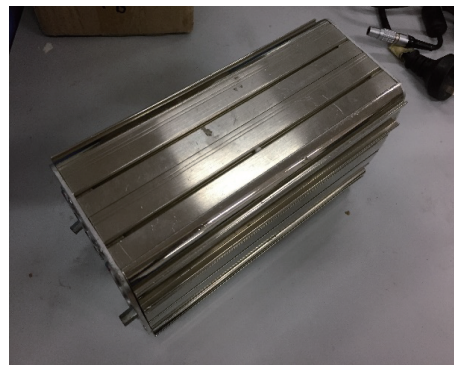


图6 数采装置

1.5 彩色摄像机

在试验中至少布置两台彩色摄像机, 如图7, 一台摄像机布置为全局视角, 用于监视所有测量设备在试验过程中的状态, 另一台则局部锁定吸能装置, 用于记录吸能装置在试验全过程的状态。如果试验过程中发生问题, 试验视频可以对问题进行复现, 便于问题的及时修正。



图7 彩色照相机

1.6 试验步骤

吸能装置整个准静态试验过程可以按照如下步骤进行: ①安装试验工装及试验样件; ②安装所有测试设备及数采装置; ③记录所有设备的序列号、物理位置, 检查所有测试设备的标定证书; ④试验前对所有的试验工装、测试设备、试验样件进行拍照; ⑤调整油压加载装置加载速度为20 mm/min, 检查确认所有测试设备状态; ⑥试验开始; ⑦在吸能装置的压缩力、压缩位移及结构进行实时记录; ⑧当压缩力或压缩位移达到预期的值时(实际中可以采用当压缩力突变上升时), 试验停止, 油压加载装置卸载; ⑨对试验数据进行后处理, 确保试验数据有效; ⑩试验结束。

2 准静态试验测试方法应用实例

以某海外出口地铁项目吸能两种不同类型的吸能装置为例, 如图8所示, 应用上述给出的准静态试验方法的进行试验, 研究吸能装置的耐撞性特性, 证明试验方法的可行性。

吸能装置准静态试验过程如图9所示, 每种类型

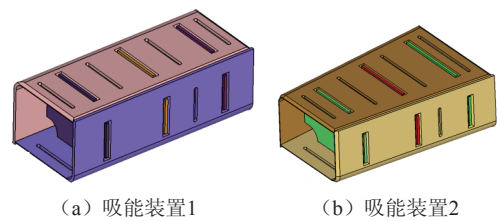


图 8 吸能装置

的吸能装置进行三次相同的试验(3 个试验样件), 以验证试验的重复性和数据的有效性。

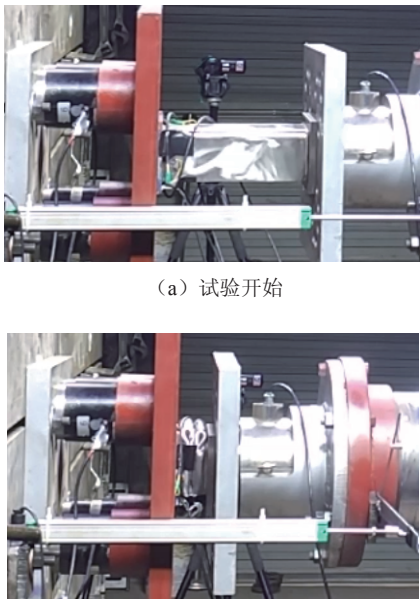


图 9 吸能装置 1 准静态试验

吸能装置 1 三次准静态压缩位移见表 1 所示, 三次试验的压缩位移分别为 223. 493, 222. 763, 223. 639 mm, 压缩比分别为 0. 820, 0. 817, 0. 821, 三次试验的压缩比均大于 0. 8, 满足标准 BS EN 15227: 2008 + A1: 2010 对试验的要求。

表 1 吸能装置 1 准静态试验压缩位移

名称	原始长/mm	压缩位/mm	压缩比
试验 1	272. 5	223. 493	0. 820
试验 2	272. 5	222. 763	0. 817
试验 3	272. 5	223. 639	0. 821

吸能装置 1 三次准静态试验压缩力随位移变化的曲线如图 10 所示, 三次试验的一致性较好。

通过对压缩力随位移变化的曲线进行积分, 得到吸能装置 1 吸能量随位移的变化曲线, 如图 11 所示, 三次试验的吸能曲线非常一致。

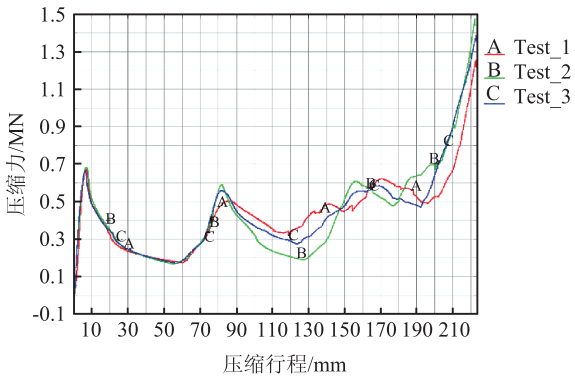


图 10 吸能装置 1 压缩力 - 位移曲线

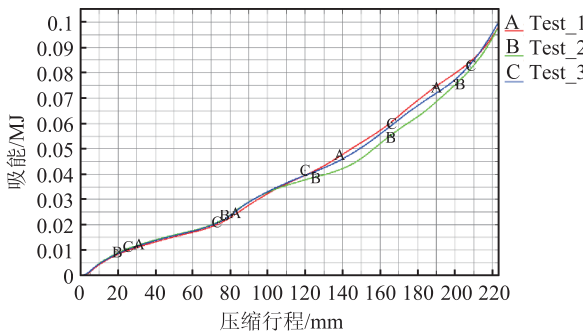


图 11 吸能装置 1 吸能 - 位移曲线

表 2 详细列出了吸能装置 1 三次试验的压缩位移及能量吸收信息, 由此可以计算出三次试验的平均压缩力分别为 439. 03, 436. 43, 448. 18 kN。

表 2 吸能装置 1 准静态试验平均压缩力

名称	压缩长度/mm	吸收能量/kJ	平均压缩力/kN
试验 1	223. 493	98. 12	439. 03
试验 2	222. 763	97. 22	436. 43
试验 3	223. 639	100. 23	448. 18

同样, 吸能装置 2 三次准静态压缩位移见表 3 所示, 三次试验的压缩位移分别为 226. 046, 224. 879, 225. 608 mm, 压缩比分别为 0. 830, 0. 825, 0. 828, 三次试验的压缩比均大于 0. 8, 满足标准 BS EN 15227: 2008 + A1: 2010 对试验的要求。

表 3 吸能装置 2 准静态试验压缩位移

名称	原始长度/mm	压缩位移/mm	压缩比
试验 1	272. 5	226. 046	0. 830
试验 2	272. 5	224. 879	0. 825
试验 3	272. 5	225. 608	0. 828

吸能装置 2 三次准静态试验压缩力随位移变化的曲线及吸能量随位移的变化曲线分别如图 12 和图 13 所示,三次试验的一致性较好。表 4 详细列出了吸能装置 2 三次试验的压缩位移及能量吸收信息,由此可以计算出三次试验的平均压缩力分别为 475.61, 497.87, 466.30 kN。

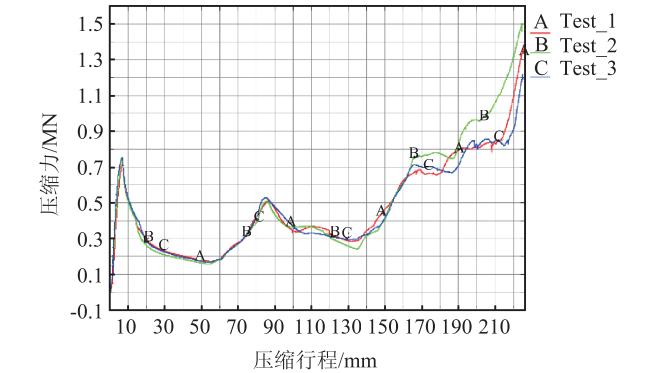


图 12 吸能装置 2 压缩力 - 位移曲线

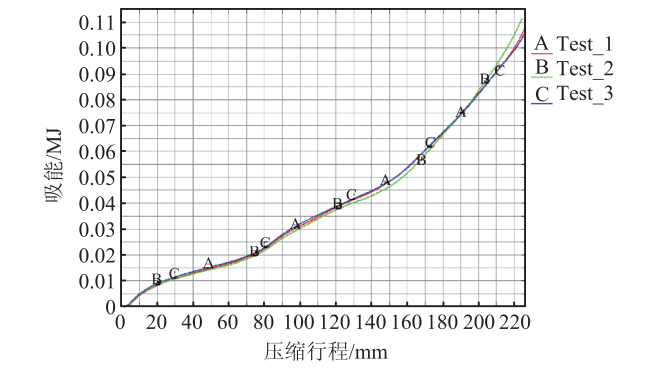


图 13 吸能装置 2 吸能 - 位移曲线

表 4 吸能装置 2 准静态试验平均压缩力

名称	压缩长度/mm	吸收能量/kJ	平均压缩力/kN
试验 1	226.046	107.51	475.61
试验 2	224.879	111.96	497.87
试验 3	225.608	105.2	466.30

3 试验结果与仿真分析结果对比

对吸能装置进行准静态试验,主要目的有二个,一是验证设计结构的吸能特性,同时检查结构的焊接工艺、制造质量;另一个是验证仿真分析方法及结果的准确性,常采用的方法是将试验结果与分析结果从结构变形、压缩位移、吸能量及平均压缩力等几个方面进行对标。

如图 14 所示,按照吸能装置试验边界条件,建立吸能装置准静态仿真分析模型,结构采用壳单元进行划分。

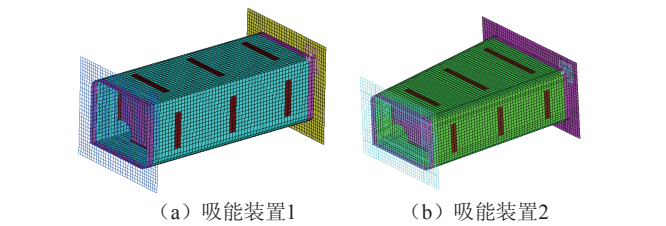


图 14 吸能装置有限元仿真分析模型

吸能装置 1 结构变形试验与分析结果对比如图 15 所示,给出不同压缩阶段的结构变形,可知结构变形模式分析结果与试验结果相同,吸能装置最开始发生变形位置及变形顺序分析结果与试验结果都一致。

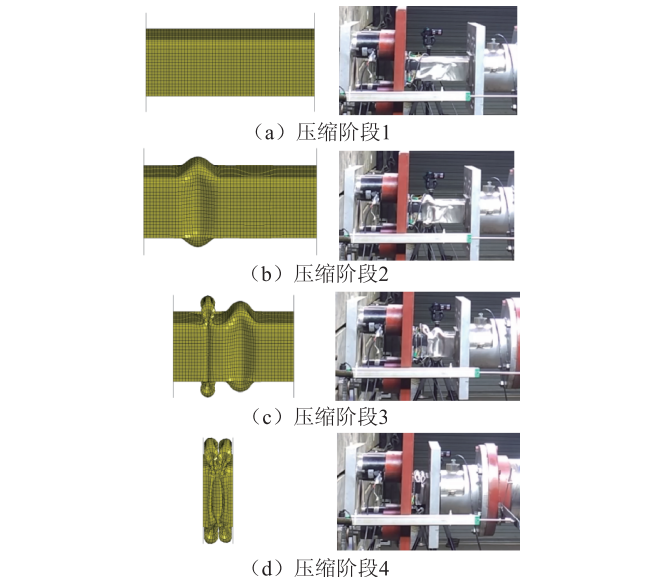


图 15 吸能装置 1 结构变形试验与分析结果对比

图 16、图 17 分别给出了吸能装置 1 压缩力随位移变化曲线、吸能量随位移变化曲线试验与分析结果对比,可知曲线的整体趋势分析结果与试验结果基本一致。表 5 ~ 表 7 详细列出了吸能装置 1 压缩位移、吸能量及平均压缩力试验与分析结果对比信息,可知分析结果与试验结果的对比误差都在 10% 以内,满足标准 BS EN 15227: 2008 + A1: 2010 对试验的要求,同时验证了仿真分析方法及结果的准确性。

同样,能装置 2 结构变形试验与分析结果对比如图 18 所示,结构变形模式分析结果与试验结果相同,吸能装置最开始发生变形位置及变形顺序分析结果与试验结果都一致。

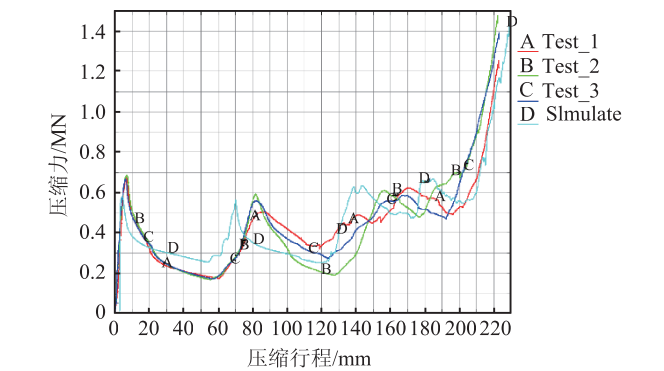


图 16 吸能装置 1 压缩力随位移变化曲线
试验与分析结果对比

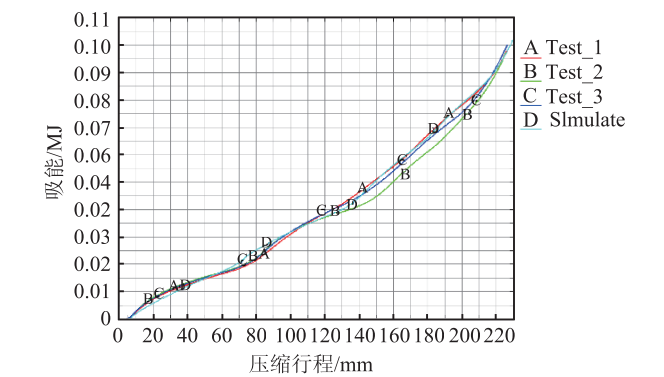


图 17 吸能装置 1 吸能量随位移变化曲线
试验与分析结果对比

表 5 吸能装置 1 压缩位移试验与分析结果对比			
名称	试验压缩位移 /mm	仿真分析压缩位移 /mm	相对误差 /%
试验 1	223.493	230	2.91
试验 2	222.763	230	3.25
试验 3	223.639	230	2.84

表 6 吸能装置 1 吸能量试验与分析结果对比			
名称	试验吸能量/kJ	仿真分析吸能量/kJ	相对误差/%
试验 1	98.12	106.22	8.26
试验 2	97.22	106.22	9.26
试验 3	100.23	106.22	5.98

表 7 吸能装置 1 平均压缩力试验与分析结果对比			
名称	试验平均压缩力 /kN	仿真分析平均压缩力 /kN	相对误差/%
试验 1	439.03	461.83	5.19
试验 2	436.43	461.83	5.82
试验 3	448.18	461.83	3.05

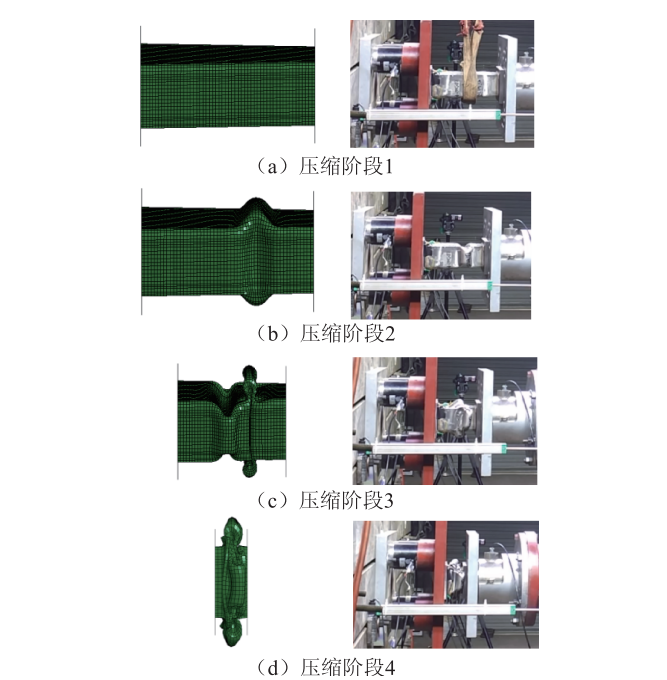


图 18 吸能装置 2 结构变形试验与分析结果对比

图 19、图 20 别给出了吸能装置 2 压缩力随位移变化曲线、吸能量随位移变化曲线试验与分析结果对比，可知曲线的整体趋势分析结果与试验结果基本一致。表 8 ~ 表 10 详细列出了吸能装置 2 压缩位移、吸能量及平均压缩力试验与分析结果对比信息，可知分析结果与试验结果的对比误差都在 10% 以内，满足标准 BS EN 15227：2008 + A1：2010 对试验的要求，同时验证了仿真分析方法及结果的准确性。

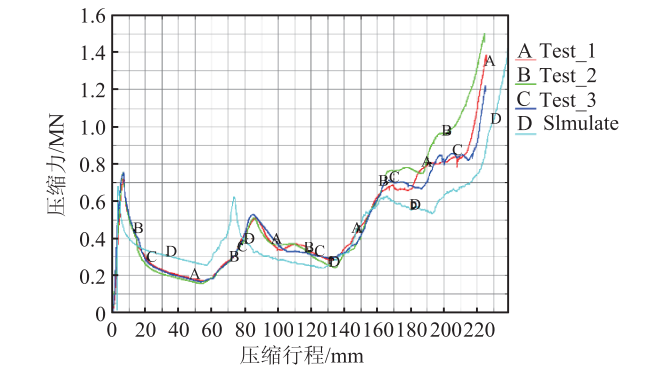


图 19 吸能装置 2 压缩力随位移变化曲线
试验与分析结果对比

表 8 吸能装置 2 压缩位移试验与分析结果对比			
名称	试验压缩位移 /mm	仿真分析压缩位移 /mm	相对误差 /%
试验 1	226.046	236	4.40
试验 2	224.879	236	4.95
试验 3	225.608	236	4.61

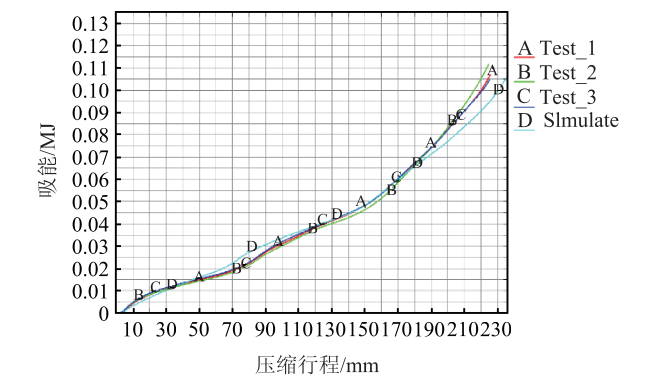


图 20 吸能装置 2 吸能量随位移变化曲线
试验与分析结果对比

表 9 吸能装置 2 吸能量试验与分析结果对比			
名称	试验吸能量/kJ	仿真分析吸能量/kJ	相对误差/%
试验 1	107.51	110.46	2.74
试验 2	111.96	110.46	1.34
试验 3	105.20	110.46	5.00

表 10 吸能装置 2 平均压缩力试验与分析结果对比			
名称	试验平均压缩力 /kN	仿真分析平均压缩力 /kN	相对误差 /%
试验 1	475.61	468.05	1.59
试验 2	497.87	468.05	5.99
试验 3	466.30	468.05	3.75

4 结论

- 1)对于吸能装置耐撞性研究,仿真分析方法具有成本低、重复性强、任意位置观察等特点,试验方法为最直接、最具有说服力的研究方法,实际研究中可以二者结合。
- 2)基于已有的试验测试装置及试验条件,设计出的轨道车辆吸能装置准静态试验测试方法可以满足实

际工程需要,通过某地铁车辆吸能装置准静态试验,验证了准静态试验方法的有效性。

3)基于试验边界条件,建立等同的仿真分析模型,分析结果与试验结果对比一致性较好,验证了分析结果的准确性及试验方法的可行性,为吸能装置吸能特性及后续结构优化提供了理论和试验支撑。

参 考 文 献

[1] 刘艳文. 轨道客车碰撞被动安全性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013

[2] 刘艳文, 修瑞仙, 李本怀, 等. 基于动态 J-C 本构的轨道交通车辆新型切削式吸能装置耐撞性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016(6): 28-33.

[3] 梁炬星. 一种新型切削防爬器研究[J]. 机车电传动, 2018(3): 48-51.

[4] 刘亚妮, 陈晶晶, 袁文辉. 轨道车辆吸能装置碰撞试验和数字仿真研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2017(6): 46-51.

[5] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 轨道车辆新型车端专用吸能装置[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(4): 738-744

[6] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 轨道车辆切削式吸能装置吸能特性研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 263-267

收稿日期: 2019-02-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200404-02); 长春师范大学自然科学基金项目(长师大自然合字[2014]第 008 号)

作 者 简 介



刘艳文(1988-),男,硕士,工程师,研究方向为轨道车辆被动安全技术,轨道车辆碰撞分析与试验技术。

2013年毕业于西南交通大学牵引动力国家重点实验室,同年到中车长春轨道客车股份有限公司工作至今。主持承担纽约资审项目、洛杉矶地铁项目等 10 余个国内外项目碰撞分析与试验,授权专利 4 项,发表论文 3 篇,授权软件著作权 3 项。

