Journal of Mechanical Strength 机械强度 2024,46(4): 877-886

DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2024.04.016

地铁车辆前端组合式吸能结构的研究与分析*

RESEARCH AND ANALYSIS OF COMBINED ENERGY-ABSORBING STRUCTURE FOR FRONT END OF METRO VEHICLES

苏 强**[1] 王旭东[1] 张 杰[1] 刘 凯[1] 邢松龄[2]

(1. 北京轨道交通技术装备集团有限公司, 北京 100166)

(2. 北京市基础设施投资有限公司, 北京 100101)

SU Qiang[1] WANG XuDong[1] ZHANG Jie[1] LIU Kai[1] XING SongLing[2]

(1. *Beijing Rail Transit Technology Equipment Group Co., Ltd., Beijing* 100166, *China*)

(2. *Beijing Infrastructure Investment Co., Ltd., Beijing* 100101, *China*)

摘要 介绍了一种新型的地铁车辆前端吸能结构,将成熟吸能元件与组合式吸能结构模块化,利用有限元软件进行动态碰撞仿真计算,模拟车辆前端吸能结构的碰撞形态、分析吸能过程,对车辆碰撞界面力值、车体变形量、能量吸收值进行计算,最后通过碰撞试验验证车辆前端吸能结构的变形吸能稳定性,试验与仿真结果匹配,能够满足车辆碰撞标准要求。

关键词 前端吸能 组合式吸能 动态仿真 碰撞试验

中图分类号 U260.32

Abstract A new type of front-end energy-absorbing structure for metro vehicles was introduced. The mature energy-absorbing components and the combined energy-absorbing structure were modularized, and the dynamic collision simulation was carried out by using the finite element software, the impact shape of the front-end energy-absorbing structure was simulated, the process of energy-absorbing was analyzed, and the values of vehicle impact interface force, vehicle body deformation and energy-absorbing were calculated. Finally, the deformation and energy-absorbing stability of the front-end energy-absorbing structure of vehicles were verified by the test. The test and simulation results match and can meet the requirements of the vehicle collision standard.

Key words **Front-end energy absorbing; Combined energy absorption; Dynamical simulation; Collision test**

Corresponding author: SU Qiang, E-mail: suqiang2383103@163.com

Manuscript received 20220905, in revised form 20240228.

0 引言

目前轨道交通行业迅猛发展, 随着列车速度的不断提高,对列车运行安全性能的要求越来越高。城轨车辆多运行在人口密集的城市,目前发生撞击事故的情况也屡见不鲜,甚至威胁到了乘客的生命安全,也造成了极大的经济损失,因此运营商对城轨车辆碰撞吸能特性的要求越来越高[1]。目前许多成熟的吸能元件已经应用在车辆的前端,例如车钩缓冲吸能装置、防爬器等吸能元件,但随着车辆速度等级的提高,以及碰撞工况的复杂性,仅通过吸能元件吸能已远远不能够满足车辆的碰撞要求,因此对车辆结构变形吸能的设计显得尤为关键。

本文以地铁 B 型车辆为研究对象,在选配了车辆前端成熟吸能元件基础上,对铝合金车体前端变形区的结构进行设计,采用动态大变形非线性有限元技术,结合仿真计算结果对车体前端结构进行优化,最终得到满足车辆碰撞要求的吸能结构,提高车辆运行的安全性。

1 前端吸能装置设计

根据 EN 15227:2020 标准的定义,C-II 类型车辆需要满足两列 AW0 状态下相同配置列车在 25 km/h 速度等级碰撞时产生的能量吸收[2]。车体压缩静载荷不低于 1 000 kN,拉伸载荷不低于 800 kN。车辆前端碰撞吸能共有两大类吸能装置,分别为车钩缓冲装置和车端吸能装置,如图 1 所示。其中,车钩缓冲装置包括车钩缓冲器和压馈管,车端吸能装置主要包括防

* 20220905 收到初稿, 20240228 收到修改稿。

** 苏 强, 男, 1987 年生, 河北石家庄人, 汉族, 北京轨道交通技术装备集团有限公司高级工程师, 硕士, 主要研究方向为城市轨道交通地铁车辆设计。

爬器、蒙皮铝蜂窝吸能箱、车体前端变形区[3]，如图 2 所示。其中，防爬器与蒙皮铝蜂窝吸能箱插接安装，形成组合式吸能单元。防爬器采用刨削式防爬器，主要通过刨削刀进行吸能管刨削吸能；铝蜂窝吸能箱采用蒙皮铝蜂窝结构，压缩能力强，吸能效果好[4]；车体前端变形区主要包括司机室骨架变形区和底架前端变形区，底架前端变形区采用变形梁拼焊，并装有波纹地板，司机室骨架变形区由矩形梁拼焊，在变形位置做削弱孔，以便于变形吸能[5]。

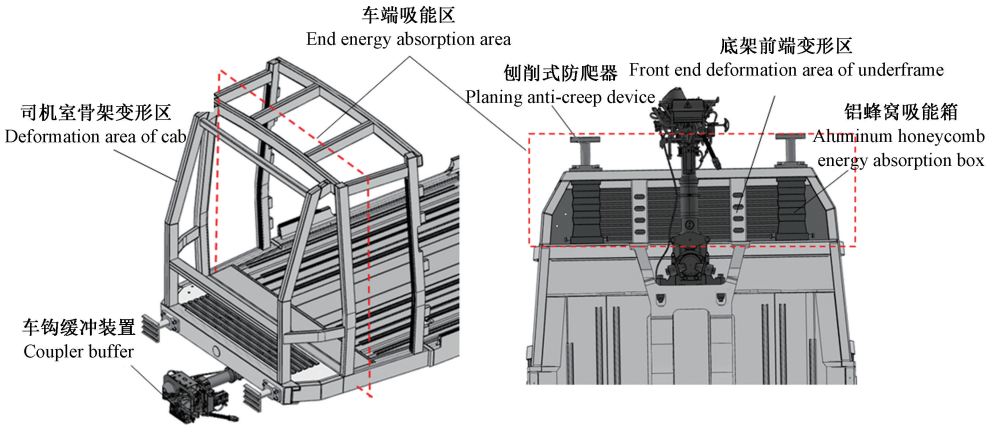


图 1 前端吸能布置图

Fig. 1 Front end energy absorption layout

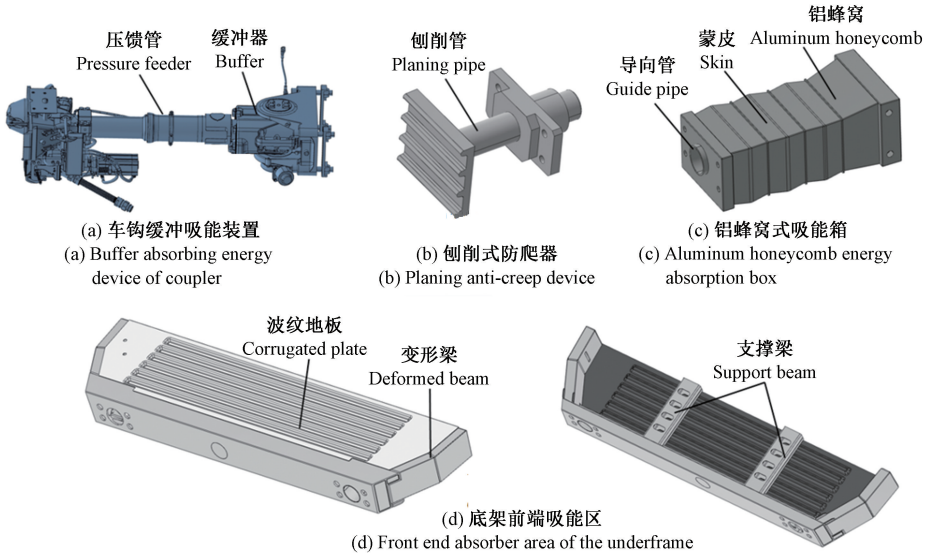


图 2 前端吸能组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the front end energy absorption composition

2 仿真计算

2.1 吸能结构材料

吸能结构的材料种类及属性如表 1 所示[6]。

2.2 网格划分

采用 Hypermesh 对模型划分网格，以壳单元为主，网格尺寸控制在 5 mm 左右。由于相对于导向管来说，金属蒙皮及蜂窝对垂向承载能力贡献很小，所以在进行仿真计算时忽略金属蒙皮和蜂窝的影响，有限元模型如图 3 所示。

2.3 防爬器垂向承载

依据头车车体质量，可以得出每节车防爬器承受的垂向载荷约为 84 kN，为了验证车端吸能装置配置方案能够满足每个防爬器 84 kN 的垂向力要求，利用有限元软件对车辆前端结构进行垂向载荷仿真计算，有限元模型及加载工况如图 4 所示。

如图 5 所示，经过仿真计算，应力集中区域主要位于：①底架前端变形区的变形梁折弯处，最大应力为 189.8 MPa，但未超过母材屈服强度(215 MPa)；②司机室骨架变形区的司机室前柱，最大应力为 169.4 MPa，但未超过母材屈服强度(215 MPa)。车端吸能装置方案能够满足每个防爬器 84 kN 的垂向力载荷要求。

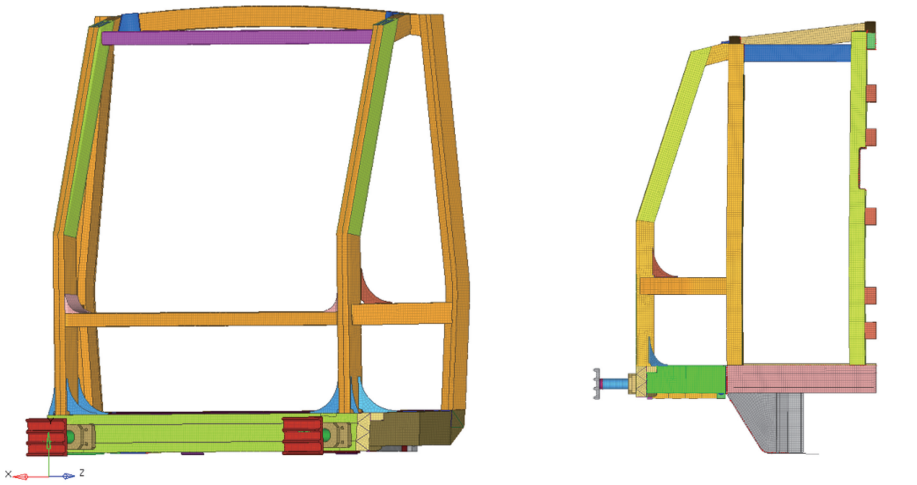
2.4 动态碰撞能力仿真计算

装有吸能装置的一车端沿 X 方向以 25 km/h 的初始速度迎面撞击另一辆装有相同吸能装置并且静止的车端，模拟实际车辆发生碰撞时车端吸能装置及车

表 1　材料属性

Tab. 1　Material attribute

组件名称 Component name	零部件名称 Part name	材料牌号 Material grade	弹性模量 Elastic modulus/ GPa	泊松比 Poisson's ratio	密度 Density/ (kg/m^3)	屈服强度 Yield strength/ MPa	抗拉强度 Tensile strength/MPa
刨削式防爬器 Planing type creeper	防爬齿 Anti-crawling teeth	Q235B	210	0.3	7 850	235	390
蒙皮蜂窝式吸能器 Aluminum honeycomb energy absorber	前端安装板 Plate	Q235B	210	0.3	7 850	235	390
	导向管 Guide pipe	40Cr	210	0.3	7 850	810	990
	安装座 Mounting seat	40Cr	210	0.3	7 850	810	990
底架前端吸能区 Absorber area of underframe	变形梁 Deformed beams	6005A-T6	70	0.3	2 700	215	255
	地板 Floor	6082-T6	70	0.3	2 700	250	290

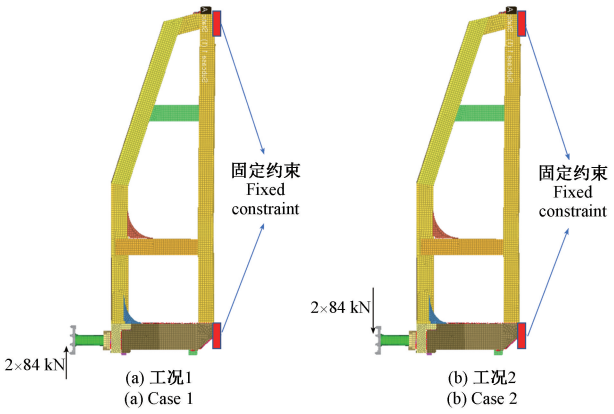


(a) 有限元模型正视图
(a) Main view of the finite element model

(b) 有限元模型侧视图
(b) Side view of the finite element model

图 3　有限元模型

Fig. 3　Finite element model



(a) 工况1
(a) Case 1

(b) 工况2
(b) Case 2

图 4　加载及边界条件

Fig. 4　Load and boundary conditions

体的变形吸能情况，主要查看碰撞过程中防爬器及蒙皮蜂窝箱的吸能变形、车体前端结构的变形吸能情况[7]。车端碰撞吸能装置错位 40 mm。车端吸能装置实际对撞如图 6 所示[8]。

因为车辆在 15 km/h 速度碰撞时，车钩缓冲装置缓冲器及压馈管已完成吸能，且依据车钩缓冲器及压馈管的吸能行程及触发力可以计算得出车钩缓冲装置的吸能量，所以在 25 km/h 碰撞吸能动态仿真计算中不再对车钩缓冲装置吸能进行校核，此阶段主要考虑刨削式防爬器、蒙皮铝蜂窝箱、车体变形吸能区的仿真计算。

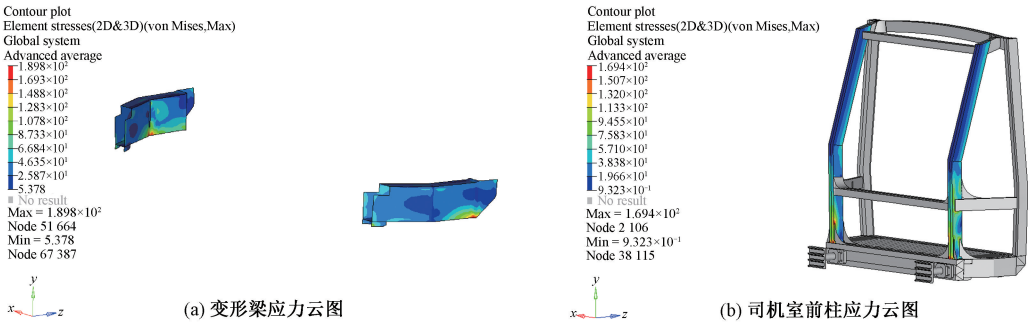
设置车体配重 M=40 t，本次对撞仿真主要是查看碰撞过程中刨削防爬器变形、蒙皮铝蜂窝吸能箱变形及车体前端变形。

2.4.1　碰撞形态

经过动态仿真计算，防爬齿在碰撞过程刨削防爬器、蒙皮铝蜂窝吸能箱及车体前端正常变形吸能，延长了碰撞接触时间，起到缓冲吸能的作用，如图 7 所示。

2.4.2　吸能分析

由图 7 可知，碰撞初始阶段，防爬齿啮合，刨削防爬器开始工作；当刨削防爬器行程达到设计行程后，防

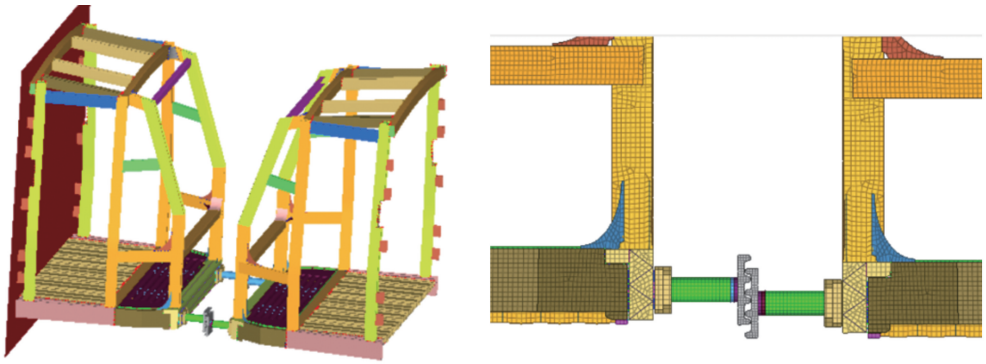


(a) 变形梁应力云图
(a) Stress nephogram of deflection beam

(b) 司机室前柱应力云图
(b) Stress nephogram of driver's cab front column

图 5 应力集中区仿真计算应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of simulation and calculation in stress concentration region

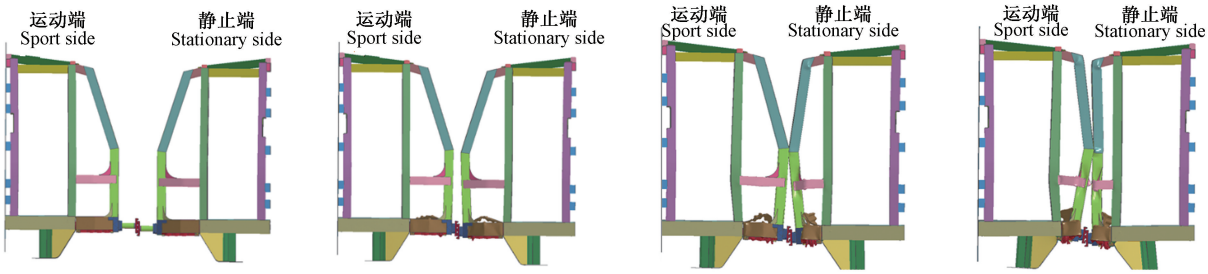


(a) 碰撞前示意
(a) Schematic diagram before collision

(b) 吸能装置错位
(b) Dislocation of the energy absorption device

图 6 车端吸能装置对撞示意图

Fig. 6 Collision diagram of end energy absorber



(a) 0 s (b) 0.075 s (c) 0.15 s (d) 0.3 s

图 7 车端吸能装置碰撞过程

Fig. 7 Collision process of end energy absorber

爬齿与法兰接触;随着碰撞的继续进行,蒙皮铝蜂窝吸能箱及车体前端变形区同时开始变形吸能。

图 7 所示的最终结果说明车端吸能路径可控,车端吸能装置压缩变形正常。其中,两车端碰撞过程中的压溃力变化如图 8 所示。

由图 8 可知,吸能参数满足 720(1±7.5%)kN(190 mm)~815(1±10%)kN(320 mm),峰值力为 1 090 kN,超车体强度部分持续时间小于 5 ms,对车体无损害,车体吸能占比 39.3%。碰撞过程中,总吸收能为 395.16 kJ,具体参数见表 2。

2.4.3 界面力分析

在碰撞过程中,两个司机室碰撞界面始终处于紧密接触状态。在 0~0.16 s 时,界面力约为 700 kN,该力为车钩压缩时传递至车体的力;0.16 s 时防爬齿发生啮合,刨削式吸能防爬器开始变形吸能,平均缓冲力为 720 kN;0.32 s 时刨削式吸能防爬器压缩到底,此时蒙皮蜂窝式吸能器和车体开始变形,在 0.324 s 时刻产生了较大的界面力,并超过了 1 000 kN,但是其持续时间较短且小于 5 ms,可认为不会对车体产生损害;到 0.98 s 时,由于碰撞能量逐渐被吸收完,蒙皮蜂窝式吸能器和车体压缩至最大量;1 s 后,碰撞完成,车体界面力开始下降。界面力时程曲线如图 9 所示。

2.4.4 车体变形量分析

EN 15227:2020 标准对生存空间提出了规定,要求生存空间的结构须保持完好,并能抵抗吸能元件崩溃期间受到的最大外力。乘客生存空间长度的减小量每 5 m

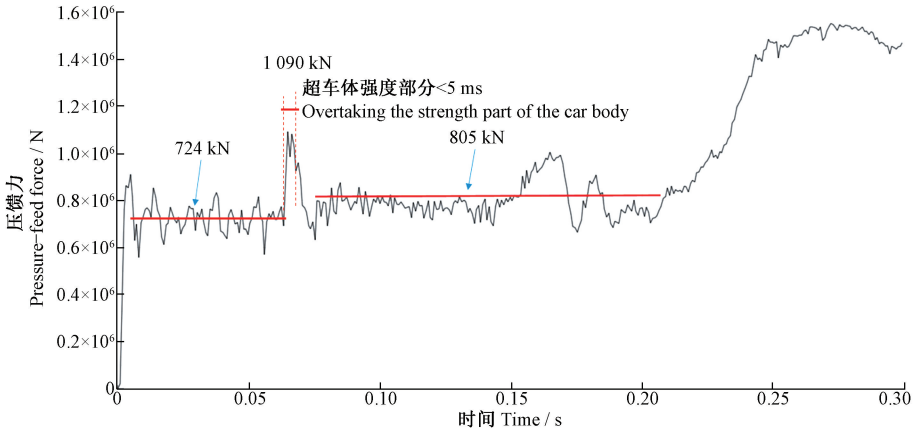


图 8　碰撞过程中的压馈力

Fig. 8　Pressure-feed force in the collision process

表 2　吸能统计

Tab. 2　Energy absorption statistics

吸能部分 Energy absorbing part	平均压馈力 Average pressure-feed force/kN	与设计值偏差 Deviation from design value/%	压缩行程 Compression stroke/mm	吸能量 Absorbed energy/kJ
刨削式防爬器 Planing anti-creep device	724	0.56	190	137.56
铝蜂窝吸能箱 Aluminum honeycomb energy absorption box	320	−1.23	320	102.4
底架前端吸能区 Front-end energy absorption area of the underframe	485		320	155.2
合计 Total				395.16

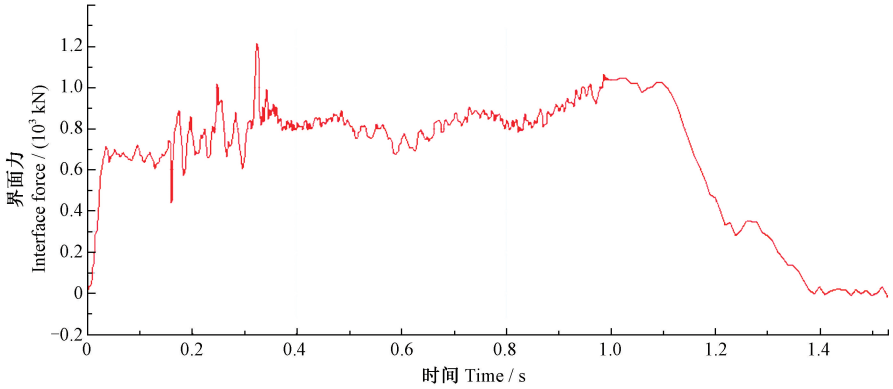


图 9　界面力时程曲线

Fig. 9　Time-history curve of the interface force

应不大于 50 mm，或者这些区域内的塑性应变不超过 10%。如果 5 m 长度正好位于车厢端部，那么它的长度最多可以减少 100 mm。乘客区域变形量计算结果如图 10 所示。

由图 10 可知，乘客区域最大变形量为 12.2 mm，远小于规范要求的最小变形量。因此，该车辆满足 EN 15227:2020 标准对生存空间的要求。

2.4.5　能量分析

装有车端吸能装置的两车端对撞结束后，能量曲线如图 11 所示。由图 11 可知，滑移能很小，说明通过摩擦消耗的能量占的比例很小；动能初始时刻与总能量相等，随后逐渐减小；内能初始时刻为 0，随后逐渐增加。随着吸能装置分级吸能及车体变形后，动能最终全部转化为内能。以上结果说明，车端吸能装置能够完全吸收实际对撞工况下车辆的初始动能，并将其转换为吸能装置及车体的内能。

2.4.6　仿真结论

1）防爬齿在碰撞过程中正常啮合。

2）刨削式吸能防爬器正常吸能，蜂窝吸能器及车端结构正常变形吸能，可以满足吸能要求。

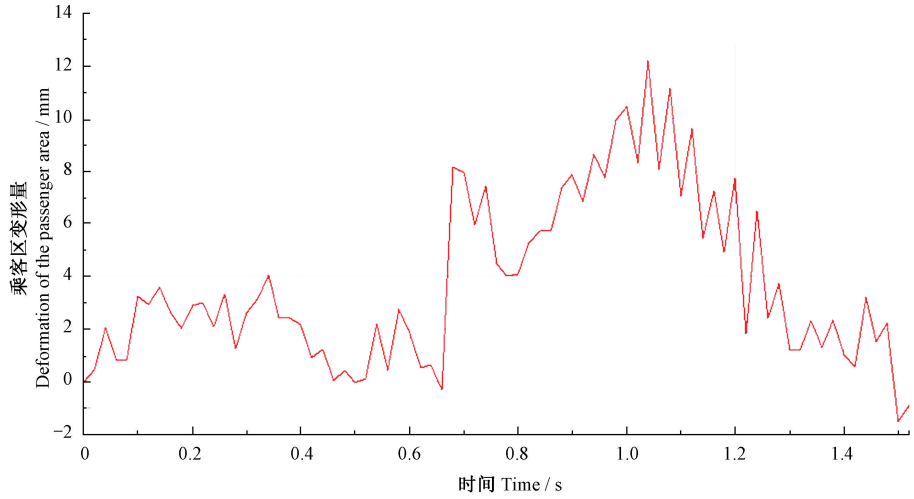


图 10 乘客区变形量

Fig. 10 Deformation of the passenger area

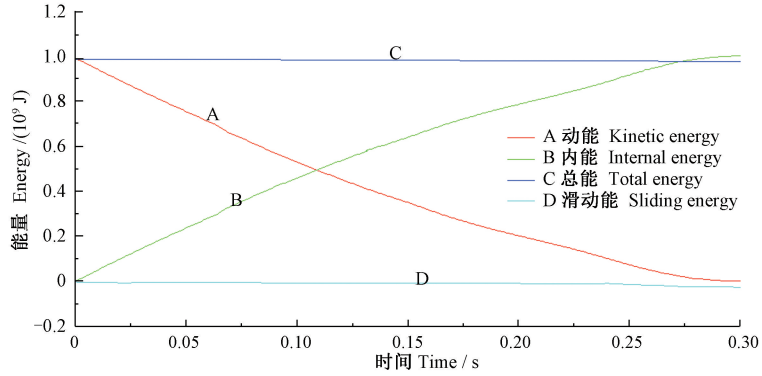


图 11 车端吸能装置对撞能量结果

Fig. 11 Collision energy results of end energy absorber

3) 整体吸能装置正常工作,延长了碰撞接触时间,起到缓冲吸能的作用,能够将车辆动能有效转化为蜂窝的内能。

3 碰撞试验

车辆前端吸能装置主要包括车钩缓冲装置和端部吸能装置,车钩缓冲装置为成熟应用的吸能元件,其吸能特性已经非常成熟,不需要试验验证。然而,防爬器与铝蜂窝吸能箱通过插接组合到一起,构成组合式吸能装置,其吸能特性需要进一步试验验证。

依据 EN 15227:2020 标准,对组合式吸能装置进行动态冲击试验,验证防爬器与铝蜂窝吸能箱的撞击变形及撞击力等耐撞性指标。

在进行碰撞试验时,头车前端组合式吸能装置安装在试验台车上,试验台车通过配重块配重到目标质量,由智能驱动系统通过车钩牵引试验台车(包括组合式吸能装置、配重块)进行加速,加速到预定速度,在距离刚性墙 100 m 时进行车钩解钩,同时智能驱动系统进行减速,试验台车随后以一定速度撞击刚性墙,完成碰撞试验[9],如图 12 所示。

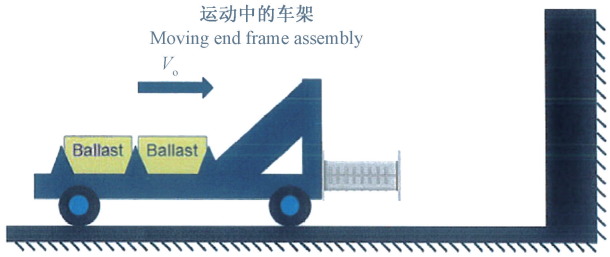


图 12 组合式吸能装置碰撞示意图

Fig. 12 Collision diagram of the combined energy absorber

3.1 主要试验装置

3.1.1 碰撞台车系统

设计质量为 15 t,配重最大质量为 30 t,通过配重块进行调节。组合吸能结构安装在碰撞台车系统前端,后端通过车钩与驱动智能系统进行连挂,如图 13 所示。

3.1.2 动态测力系统

用于在碰撞试验中对试验样件碰撞压缩力进行测量,动态测力系统通过螺栓固定安装于刚性墙上,动态测力系统由连接板、测力传感器,以及匀力板组成,如图 14 所示。



图 13　碰撞台车系统

Fig. 13　Crash trolley system

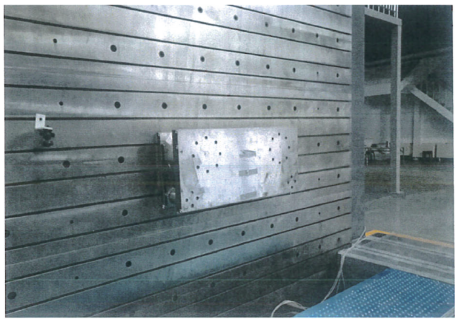


图 14　动态测力系统

Fig. 14　Dynamic force measurement system

3.1.3　其他试验系统

包括加速度测试系统、速度测试系统、灯光控制系统、高速摄像系统等，共同完成此次碰撞试验。

3.2　试验条件

组合式吸能装置碰撞试验样件如图 15 所示，该结构通过转接工装与台车 T 型槽进行连接。样件相关参数记录如表 3 和表 4 所示。

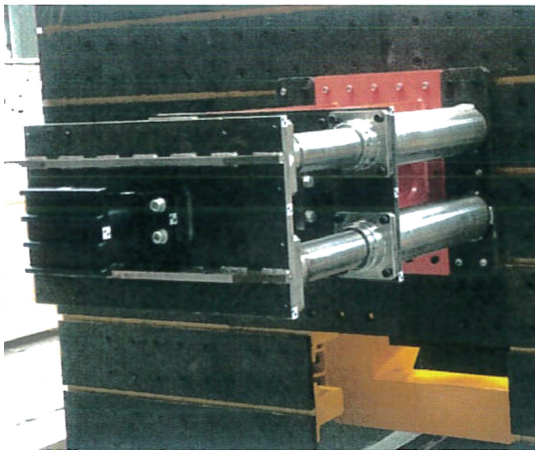


图 15　安装于碰撞台车系统的组合系统装置

Fig. 15　Combined system device installed in the crash trolley system

3.3　试验结果

3.3.1　撞击变形

组合式吸能装置撞击刚性墙碰撞试验结构变形过程如图 16 所示。由图 16 可知，结构在碰撞试验中沿着导轨移动压缩组合式吸能装置，刨削式防爬器与铝蜂窝吸能箱依次变形吸能，和图 7 中所示的防爬器与铝蜂窝箱的仿真变形分析基本一致。在碰撞初始阶段，防爬器啮合，刨削防爬器开始工作；当刨削防爬器行程达到设计行程后，防爬齿与法兰接触；随着碰撞的继续进行，蜂窝吸能器及车体吸能区同时开始变形吸能，试验结果与仿真分析相匹配，仿真数值具有有效性，符合设计理念。

表 3　组合式吸能装置试样样件尺寸信息记录单

Tab. 3　Record sheet of sample size information for combined energy absorber

项目 Project	编号 Number	试样样件 Sample/ mm
测量尺 Measurement of dimensions	1	224
	2	480

表 4　碰撞质量及速度记录单

Tab. 4　Record sheet of mass and velocity under collision condition

名称 Name	目标值 Target value	实际测量值 Actual measurement
试验台车质量 Mass of the test trolley/t	16	16.540
碰撞速度 Collision velocity/(km/h)	12.7~13	12.7

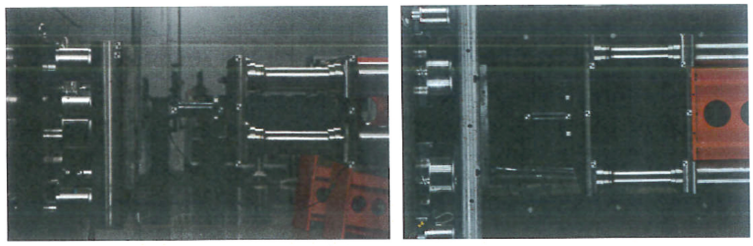
3.3.2　撞击力

组合式吸能装置撞击刚性墙碰撞试验中，单个测力传感器撞击力随时间变化曲线如图 17 所示。碰撞过程中测力传感器 5（中左）、测力传感器 6（中右）承载了主要的撞击力，测力传感器 1（左上）、测力传感器 2（右上）、测力传感器 3（左下）、测力传感器 4（右下）进行相加得到撞击力。通过高速摄像系统记录的标记点的位置，可得到位移随时间变化的曲线。将两条曲线拟合后得到力与位移的关系，撞击力-位移曲线如图 18 所示。撞击过程中撞击力迅速上升，刨削式防爬器在撞击过程中出现一个撞击平台力，其平均值为 343 kN；第二阶段铝蜂窝在撞击过程中的平台力为 169 kN。

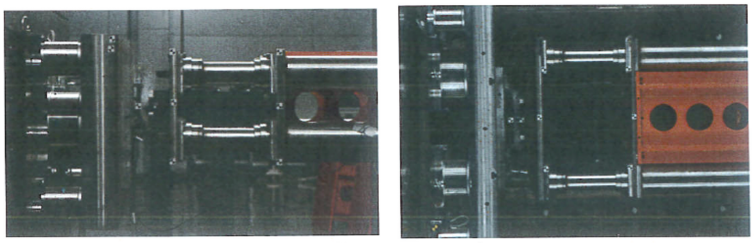
此防爬器与铝蜂窝箱的试验撞击力值与图 8 和表 2 仿真计算的撞击力值相匹配。表 2 中防爬器的撞击力值为 724 kN，即单个防爬器仿真力值为 362 kN，与试验平均值为 343 kN 相近；表 2 中铝蜂窝箱撞击力值为 320 kN，即单个铝蜂窝箱撞击力值为 160 kN，与试验力值 169 kN 相近。因此，试验与仿真计算结果相匹配，仿真数值具有有效性。

3.3.3　吸能行程和吸能量

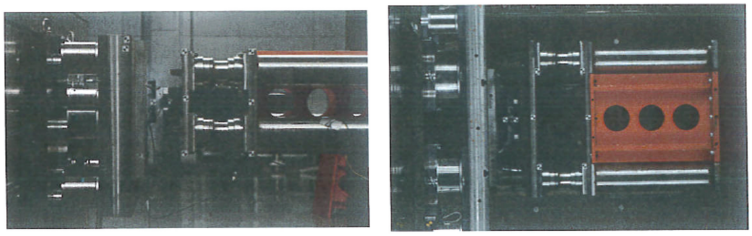
组合式吸能装置吸能行程如表 5 所示。



(a) 碰撞试验开始
(a) Crash test begins



(b) 碰撞试验进行约一半
(b) Crash test is in the middle



(c) 碰撞试验结束
(c) Crash test is over

图 16 碰撞试验结构变形过程

Fig. 16 Structural deformation process in the impact test

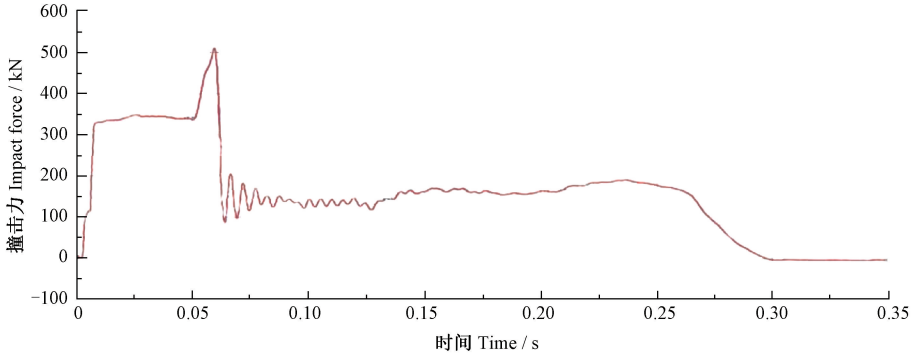


图 17 单个测力传感器撞击力曲线

Fig. 17 Curve of the impact force measured by the single force sensor

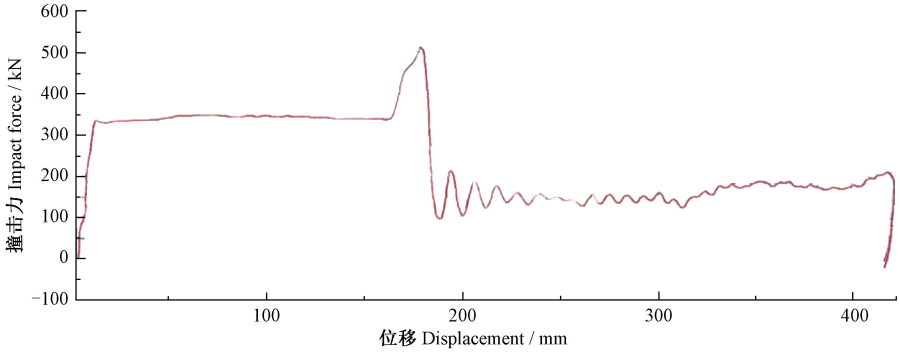


图 18 撞击力-位移曲线

Fig. 18 Impact force-displacement curve

表 5　组合式吸能装置碰撞试验压缩行程记录表(手动测揽)

Tab. 5　Combined energy absorber impact test compressed stroke log (manual survey)

试验样件编号 Number of test sample	纵向长度 Longitudinal length/mm		压缩位移 Compression displacement/mm
	试验前 Before the test	试验后 After the test	
1	224	59	165
2	480	228	252

由表 2 仿真计算结果可以得出,防爬器与铝蜂窝吸能箱的仿真计算压缩行程为 190 mm + 320 mm = 510 mm,与表 5 试验结果压缩行程 165 mm+252 mm = 417 mm 相比,压缩行程略大,但考虑实物试验中的环境与仿真计算存在差异,且试验数据为手动测量,存在测量误差等因素,可以得出仿真计算数值与试验数值相比具有时效性。试验结果如图 19 所示。

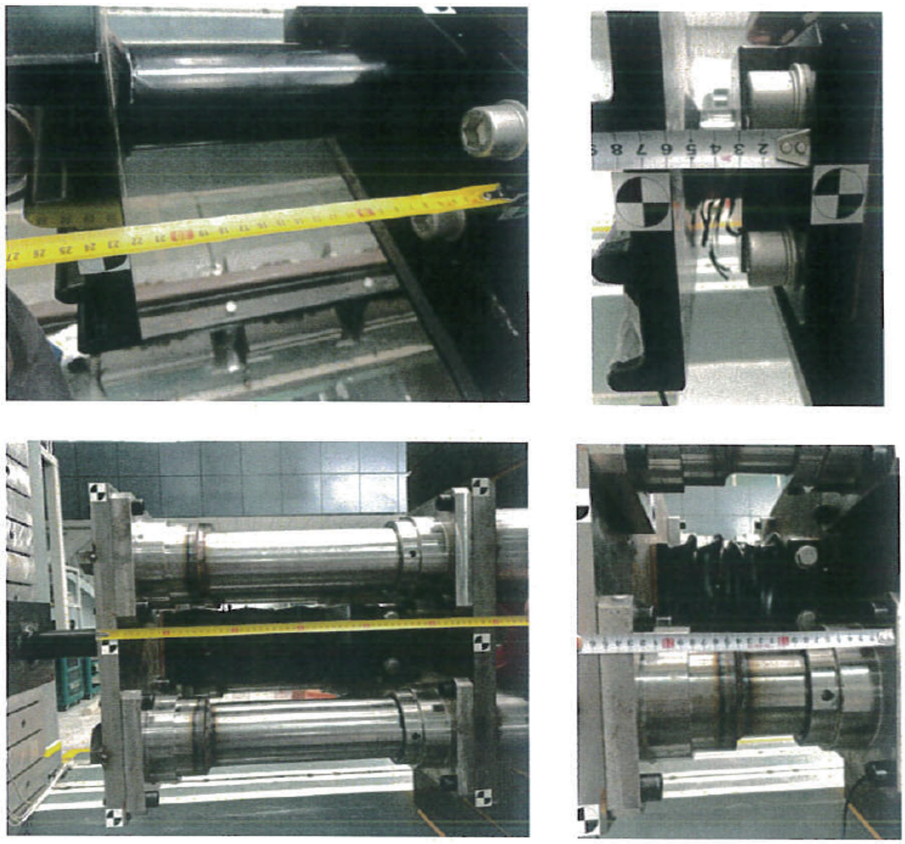


图 19　试验前后手动测量结果

Fig. 19　Manual measurement results before and after the test

图 18 中,曲线与横坐标轴围成区域的面积即为所吸收的能量,通过积分计算我们可以得出该头车组合式吸能装置在本次碰撞试验中通过塑性变形所吸收的能量为 99. 7 kJ。

由表 2 仿真计算结果可以得出,单个防爬器与铝蜂窝吸能箱的仿真吸能量为 137. 56 kJ/2 + 102. 4 kJ/2 = 119. 98 kJ,与试验数据 99. 7 kJ 相近,考虑到试验时实物与仿真计算模型及环境的差异性,试验数据略低于仿真计算数据,属于正常现象。

3. 4　试验结论

根据 EN 15227:2020 标准,对组合式吸能装置进行撞击刚性墙试验,结构变形稳定,压馈力在预期范围内,组合式吸能装置撞击变形、撞击动态位移及撞击力满足设计及 EN 15227:2020 标准。

4　结论

通过对车端碰撞吸能结构的设计,并基于有限元的动态碰撞仿真计算及试验的数据对比,结果表明,车辆碰撞的仿真计算数据与试验数据基本相近,车端碰撞吸能结构设计合理,碰撞后变形顺序有序可控,触发力和行程都在设计值范围内,能够有效吸收 25 km/h 速度碰撞下的能量,且对车体主结构损伤或塑性变形在可控范围内,符合安全保护原则。

参考文献(References)

[1] 张志新,田爱琴,车全伟,等. 高速列车车体端部吸能结构研究[J]. 机车电传动,2013(1):43-47.
ZHANG ZhiXin, TIAN AiQin, CHE QuanWei, et al. Research on energy-absorbing structures for two ends of high-speed train car body [J]. Electric Transmission of Locomotive, 2013 (1): 43-47 (In Chinese).

[2] 杨思源,宋绪丁,张 雷. 基于载荷谱的装载机驱动桥轮边减速器齿轮接触疲劳寿命分析[J]. 机械强度, 2023,45(5):1242-1248.
YANG SiYuan, SONG XuDing, ZHANG Lei. Contact fatigue life analysis of wheel edge reducer gear of drive axle of loader based on load spectrum[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023,45 (5): 1242-1248(In Chinese).

[3] 臧兰兰. 城轨车辆钩缓装置配置与头车前端底架的碰撞吸能区设计[J]. 现代城市轨道交通,2013(2):1-4.
ZANG LanLan. The configuration of coupler and retarder of urban rail vehicle and the design of collision energy absorbing area of front-end chassis of front-end vehicle [J]. Modern Urban Rail Transit, 2013(2):1-4(In Chinese).

[4] 孙煜洲, 杨卓然, 夏 炎, 等. 杨桃启发的仿生星形薄壁结构耐撞性研究[J]. 机械强度, 2024,46(1):40-47.
SUN YuZhou, YANG ZhuoRan, XIA Yan, et al. Research on crashworthiness of bionic pentacle thin-walled structure inspired by carambola[J]. Journal of Mechanical Strength,2024,46(1):40-47 (In Chinese).

[5] 姜士鸿, 王成强, 金 辉, 等. 缠绕式圆筒蜂窝的结构参数对吸能特性影响研究[J]. 机械强度, 2022,44(2):485-490.
JIANG ShiHong, WANG ChengQiang, JIN Hui, et al. Study on the influence of the structure parameters of the wound cylindrical honeycomb on the energy absorption characteristics[J]. 2022, 44 (2):485-490(In Chinese).

[6] 黄春曼,李慧敏. 车辆碰撞及吸能材料结构研究进展综述[J]. 装备制造技术,2012(1):112-114.
HUANG ChunMan,LI HuiMin. Review of research progress in vehicle collision and energy-absorbing materials [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(1):112-114(In Chinese).

[7] 刘艳文,肖守讷,张志新,等. 轨道车辆新型组合结构吸能装置耐碰撞性分析[J]. 计算机辅助工程,2012,21(5):6-10.
LIU YanWen, XIAO ShouNe, ZHANG ZhiXin, et al. Crashworthiness analysis of a new combined structure energy-absorbing device for rail vehicles [J]. Computer-Aided Engineering, 2012,21(5):6-10(In Chinese).

[8] 刘兆鑫, 李永宽, 夏东伟. 基于 ASME RT-2 标准的地铁吸能装置设计及仿真验证[J]. 机械强度, 2023,45(4):948-954.
LIU ZhaoXin, LI YongKuan, XIA DongWei. Design and simulation verification of metro energy absorbed structure based on ASME RT-2 standard[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023,45(4):948-954(In Chinese).

[9] 刘亚妮,陈晶晶,袁文辉. 轨道车辆吸能装置碰撞试验与数字仿真研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2017,40(6):46-51.
LIU YaNi,CHEN JingJing, YUAN WenHui. Crash Test and digital simulation of energy-absorbing device for rail vehicle [J]. Electric Locomotives and Urban Rail Vehicles, 2017, 40 (6): 46-51 (In Chinese).