

# 内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速列车排障器 设计方案力学性能分析

李宏双 李 赫 许 鹏 张浩森 邱正成

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春)

**摘 要** [目的]排障器作为在高速列车被动安全防护的主要设备,可以有效排除进入车轮和轨道之间的障碍物。但排障器传统设计方案不能满足 EN 15227:2020 标准中排障器新增中间位置过载情况下的吸能要求,为此,需要优化高速列车排障器的吸能设计方案。[方法]对排障器的既有设计方案进行了优化,提出了内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速列车排障器设计方案。建立了内置铝蜂窝包覆式吸能器高速列车排障器的三维模型,采用 LS-DYNA 软件对排障器压缩过程进行计算分析,得到了排障器的缓冲力-位移仿真曲线。使用 500 t 压力机对该排障器进行准静态压缩试验,得到了排障器的缓冲力-位移试验曲线。将仿真曲线和试验曲线进行对比,以验证仿真计算结果的可靠性。[结果及结论]仿真结果和试验结果均满足 EN 15227:2020 标准的要求,仿真曲线和试验曲线具有高度的一致性,可采用所建排障器三维模型及仿真计算结果来指导方案设计。在仿真压缩和试验压缩过程中,优化后的排障器压缩性能表现均很稳定,其缓冲力-位移曲线平稳可控。

**关键词** 高速列车;排障器;铝蜂窝包覆式吸能器;力学性能分析

**中图分类号** U270.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.02.011

## Mechanical Performance Analysis of Design Scheme for High-speed Train Obstacle Deflector with Built-in Aluminum Honeycomb Covered Energy Absorber

LI Hongshuang, LI He, XU Peng, ZHANG Haomiao, QIU Zhengcheng

(National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] The OD (obstacle deflector) serves as a primary passive safety device on high-speed trains, effectively clearing obstacles between the wheels and the tracks. However, conventional OD designs do not meet the energy absorption requirements under the newly-added intermediate position overloading conditions specified in the EN 15227:2020

standard. Therefore, it is necessary to optimize the energy absorption design of high-speed train OD. [Method] The existing OD design is optimized, and a new design incorporating a built-in aluminum honeycomb covered energy absorber is proposed. A 3D model of the high-speed train OD with the built-in energy absorber is created, and the LS-DYNA software is used for computational analysis of the OD compression process, obtaining a simulated buffer force-displacement curve of the pilot. A quasi-static compression test is conducted on the OD using a 500-ton press machine, and the experimental buffer force-displacement curve of the OD is obtained. The simulated and experimental curves are compared to verify the reliability of the simulation results. [Result & Conclusion] Both the simulation and experimental results meet the requirements of EN 15227:2020, and the simulated curve shows high consistency with the experimental curve, confirming the feasibility of applying the established 3D OD model and simulation calculations results for guiding design proposals. During both the simulated and experimental compression processes, the optimized OD demonstrates stable compression performance, with a stable and controllable buffer force-displacement curve.

**Key words** high-speed train; obstacle deflector; aluminum honeycomb covered energy absorber; mechanical performance analysis

轨道交通列车的安全防护分为主动安全防护、被动安全防护 2 种形式<sup>[1]</sup>。排障器作为轨道交通列车被动安全防护设备之一,其主要作用是在列车行驶过程中排除轨道上的障碍物,保护车体不受损或仅轻微受损,避免发生列车脱轨等事故<sup>[2]</sup>。

为加强列车的安全防护,众多学者针对列车排障器的结构设计开展了深入研究。文献[3]对欧洲标准 EN 15227:2020《铁路设施-铁路车辆的防撞性要求》中市域铁路列车的排障器进行了吸能设计,并通过有限元分析验证了其结构的可靠性。文献[4]通过拓扑优化及响应面法,对现有高铁列车排障器的冗余材料进行了减重设计,列车质量降幅达

17%。文献[5]通过有限元分析优化了排障器的安装方案,并通过德国工程师协会发布的 VDI 2230:2015《高应力螺栓连接系统计算》标准对优化后的排障器结构进行了校核。文献[6]以变密度法为基础,运用 OptiStruct 结构拓扑,对机车排障器进行了优化设计,排障器质量降幅达 9.29%。

本文针对高速列车排障器的吸能设计,提出铝蜂窝包覆式吸能器内置排障器的设计方案,并通过准静态仿真分析和试验,检验此方案的可行性。

## 1 内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速列车排障器方案设计

### 1.1 方案介绍

为了优化排障器的吸能能力,本文基于既有的排障器结构,提出了内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速列车排障器优化设计方案。内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速列车排障器结构组成如图 1 所示。优化后的排障器分为 3 个部分:滑动部、铝蜂窝包覆式吸能器及固定部。滑动部与固定部为刚性结构,滑动部的结构如图 2 所示,固定部的结构如图 3 所示。铝蜂窝包覆式吸能器的结构如图 4 所示。

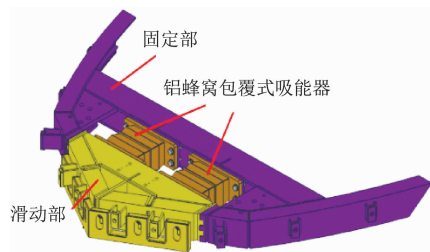


图1 内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速列车排障器结构组成

Fig. 1 Structural composition of a high-speed train obstacle deflector with built-in aluminum honeycomb encapsulated energy absorber

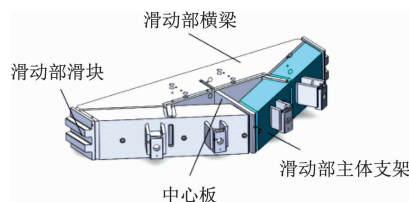


图2 滑动部结构示意图

Fig. 2 Diagram of sliding part structure

如图 2—图 4 所示:

1) 滑动部主体支架通过中心板与滑动部横梁连接成 1 个整体,并在两侧安装了滑动部滑块。

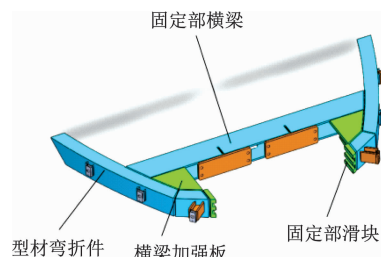
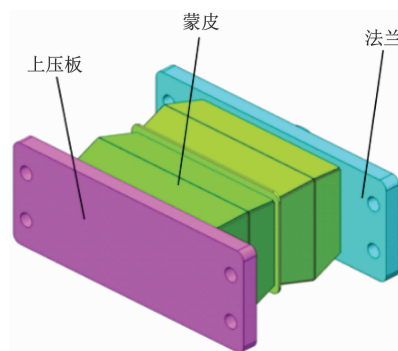
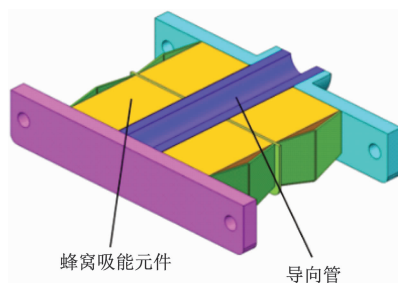


图3 固定部结构示意图

Fig. 3 Diagram of fixed part structure



a) 吸能器立面图



b) 吸能器剖面图

图4 铝蜂窝包覆式吸能器结构示意图

Fig. 4 Diagram of aluminum honeycomb encapsulated energy absorber structure

2) 固定部支架主要由固定部横梁、横梁加强板和 2 个型材弯折件组成。固定部滑块安装于固定部内侧,与滑动部滑块相嵌合,当列车发生碰撞时,可通过这两部分滑块来保证滑动部在列车行进方向上处于正常状态。

3) 铝蜂窝包覆式吸能器主要包括上压板、导向管、法兰、蒙皮、蜂窝吸能元件等 5 个部分,其中:上压板用于与滑动部连接,将外部冲击带来的压力传递给蜂窝吸能元件;导向管和法兰上的中心孔相配合,用于承担非轴向载荷,保证蜂窝在压缩过程中仅沿轴向发生形变;法兰用于与固定部连接,并与导向管配合使用;蒙皮对铝蜂窝进行包裹,以保证结构内部与自然界空气的隔绝<sup>[7]</sup>。

## 1.2 蜂窝吸能元件选取

按照 EN 15227:2020 的规定,排障器中间位置的静态承载能力不得小于 300 kN。考虑到车体强度问题,本文设定的排障器缓冲力为  $350 \pm 30$  kN,

吸能行程不少于 120 mm,排障器中间位置的过载吸能量不得少于 36 kJ。设压缩时长为  $t$ ,排障器蒙皮部分在仿真压缩过程中的计算结果如图 5 所示。由图 5 可知:在稳定压缩阶段,蒙皮所受压力约为 20 kN。

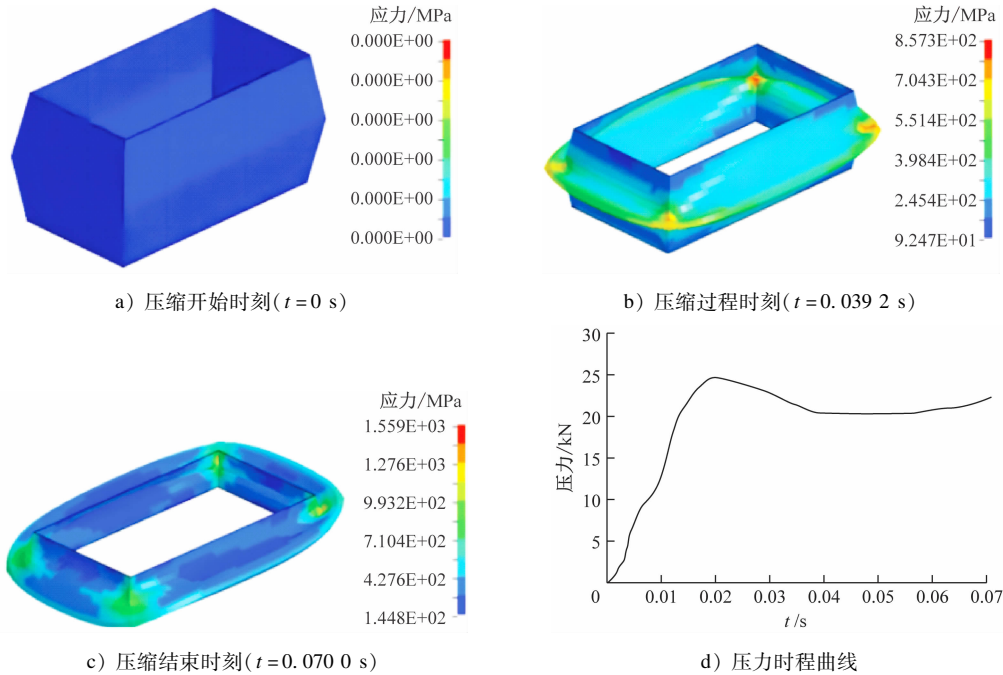


图 5 蒙皮在仿真压缩过程中的计算结果

Fig. 5 Calculation results of the obstacle deflector skin during simulation compression process

设蜂窝胞元边长为  $l$ ,蜂窝胞元壁厚为  $d$ 。蜂窝结构的相对密度等于蜂窝结构基体密度  $\rho_h$  与蜂窝结构密度  $\rho_b$  的比值,其计算式为:

$$\frac{\rho_h}{\rho_b} = \frac{8d}{3\sqrt{3}l} \quad (1)$$

由式(1)可知,蜂窝结构的相对密度仅与  $l$ 、 $d$  有关<sup>[8]</sup>。对于正六边形结构,蜂窝塑性屈服极限应力的计算式为:

$$\frac{\sigma_{pl}^3}{\sigma_{ys}^3} \approx 2\left(\frac{d}{l}\right)^2 \quad (2)$$

式中:

$\sigma_{pl}$ ——平台应力;

$\sigma_{ys}$ ——蜂窝材料的屈服强度。

按照式(1)、式(2)进行分析计算,最终选取的铝蜂窝材料型号为 5052-H18,其基本参数如下:  
 $\rho_h = 200 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_b = 215 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.33,  $l = 2.5 \text{ mm}$ ,  $d = 0.1 \text{ mm}$ 。

## 2 排障器准静态压缩过程仿真计算

利用 Solidworks 软件建立排障器的三维模型,

为保证网格可以正常画出,去除了模型相关的小型倒角,并做了适应性调整。将建好的排障器三维模型通过 Hypermesh 仿真软件进行网格划分,其结果如图 6 所示。

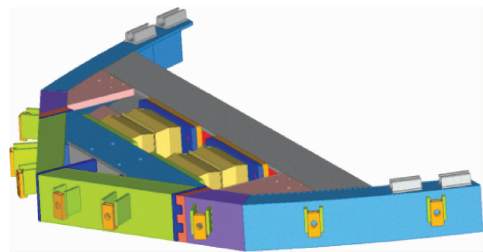


图 6 采用六边形网格划分的排障器三维模型

Fig. 6 Obstacle deflector three-dimensional model adopting hexagonal mesh division

图 7 为排障器准静态压缩过程仿真计算结果。由图 7 可知:在排障器的准静态压缩过程中,作为刚性结构的滑动部和固定部未被破坏,中间位置的铝蜂窝包覆式吸能器被逐步压缩,蒙皮与内部的铝蜂窝结构由滑动部一端开始变形,直到被完全压实。

整合仿真所得的数据,将数据输入 LS-DYNA



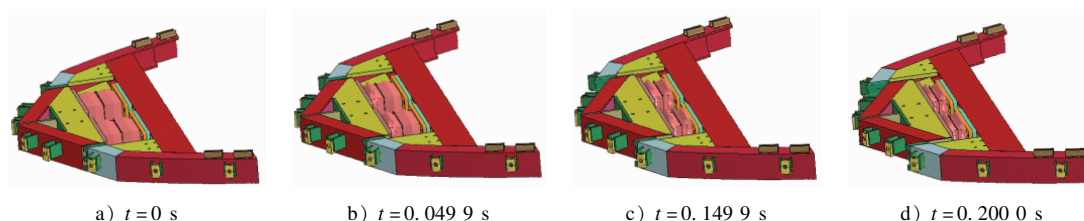


图7 排障器准静态压缩过程仿真计算结果

Fig. 7 Simulation calculation results of obstacle deflector quasi-static compression process

软件中,对排障器压缩过程进行进一步的计算分析,得到排障器缓冲力-位移仿真曲线,如图8所示。由图8可知:在压缩的初始阶段,缓冲力迅速增加;排障器滑动部位位移增至7 mm后形成了1个平台压缩阶段,此时缓冲力保持稳定;排障器滑动部位位移增至140 mm时,缓冲力再次迅速增加。从图6的曲线可以得到平台压缩阶段的吸能行程为120 mm,缓冲力的平均值为364.52 kN。吸能量等于缓冲力与位移的乘积,在缓冲力-位移曲线中体现为曲线与横轴的面积,计算方式为平均缓冲力乘以吸能行程,由此计算可得此时的吸能量为45.2 kJ。仿真得到的吸能量和缓冲力均符合本文拟定的设计要求。

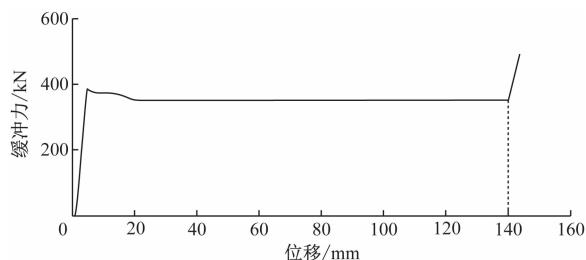


图8 排障器缓冲力-位移仿真曲线

Fig. 8 Simulation curve of obstacle deflector buffer force and displacement

### 3 排障器准静态压缩试验

基于上文的仿真计算结果,使用500 t压力机对该排障器进行准静态压缩试验,以验证仿真计算结果的可靠性。排障器准静态压缩试验过程现场实物如图9所示。将试验件固定部后端进行支撑固定,压力机上板对排障器施加匀速压缩的压力。在压缩过程中,压缩速度为1 mm/s,与仿真计算的压缩速度保持一致。由图9可知,在压缩过程中,排障器的滑动部和固定部均可保持自身强度,结构稳定且无变形,内置的铝蜂窝包覆式吸能器由一侧开始变形压缩,直至被完全压实。

对试验所得结果利用LS-DYNA软件进行数据分析,得到排障器缓冲力-位移试验曲线如图10所示。



a) 压缩初始时刻



b) 压缩结束时刻

图9 排障器压缩试验过程现场实物图

Fig. 9 Photo of obstacle deflector compression experiment process site

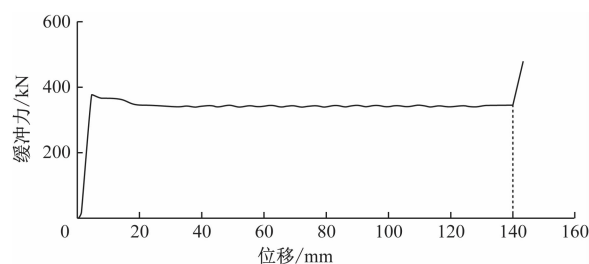


图10 排障器缓冲力-位移试验曲线

Fig. 10 Obstacle deflector buffer force-displacement test curve

示。由图10可知:在试验的平台压缩阶段,吸能行程为140 mm,缓冲力的平均值为353.88 kN,计算可得此时的吸能量为45.5 kJ。试验得到的吸能量和缓冲力均符合本文拟定的设计要求。

对比图8和图10可知:

1) 试验结果与仿真结果间的偏差仅为2.9%,此偏差源于仿真时模拟材料的力学性能过于理想化。因偏差非常小,可以认为试验曲线与仿真曲线

高度吻合。

2) 仿真结果与试验结果呈现高度一致性:在平台压缩阶段,缓冲力值平稳可控,蒙皮和蜂窝吸能元件变形稳定且均匀;排障器均从滑动部一侧开始压缩;当排障器被完全压溃后,缓冲力迅速上升。试验结果与仿真结果均满足 EN 15227:2020 的要求,因此,可采用本文的三维模型及其仿真结果来指导排障器的方案设计。

## 4 结语

本文利用铝蜂窝材料作为吸能结构,对高速列车排障器进行了优化设计,通过仿真结果与试验结果的对比验证了本设计方案的可行性。本文提出的内置铝蜂窝包覆式吸能器的高速铁路排障器优化设计方案可为蜂窝结构的实际应用提供新的思路,同时该设计的试验结果和仿真结果也可为后续排障器的优化及应用提供一定的数据支持。

## 参考文献

- [1] 李本怀. 轨道客车车体碰撞吸能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
LI Benhuai. Study on energy absorption of rail passenger car body in collision[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [2] 李松晏. 高速列车吸能结构研究与明线交会安全评估[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.  
LI Songyan. Study on energy absorbing structure of high-speed trains and safety assessment of open line intersection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [3] 李茁, 陈旭, 方甄, 等. 基于 EN 15227 标准的市域车排障器性能分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(31): 102.  
LI Zhuo, CHEN Xu, FANG Zhen, et al. Performance analysis of

urban vehicle obstacle eliminator based on EN 15227 standard [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(31): 102.

- [4] 刘星宇, 李娅娜. 动车组排障器优化设计[J]. 机械, 2023, 50(1): 35.  
LIU Xingyu, LI Yana. Optimization design of EMU cowcatcher [J]. Machinery, 2023, 50(1): 35.
- [5] 杨红波, 王海钧, 王少君, 等. 排障器结构强度与螺栓连接强度校核[J]. 计算机辅助工程, 2023, 32(2): 21.  
YANG Hongbo, WANG Haijun, WANG Shaojun, et al. Check of structure strength and bolt connection strength of obstacle deflector [J]. Computer Aided Engineering, 2023, 32(2): 21.
- [6] 谭惠日, 秦睿贤, 陈秉智. 多工况载荷下车排障器拓扑和尺寸优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2021, 42(4): 28.  
TAN Hui, QIN Ruixian, CHEN Bingzhi. Research on topology and size optimization of locomotive cowcatcher under multiple loads [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(4): 28.
- [7] 陈佳明, 朱涛, 肖守讷, 等. 结构参数对铝蜂窝防爬器吸能特性影响[J]. 机车电传动, 2022(2): 155.  
CHEN Jiaming, ZHU Tao, XIAO Shoune, et al. Influence of structural parameters on energy absorption characteristics of aluminum honeycomb anti-crawling device[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(2): 155.
- [8] LU Y, XIANG P, DONG P, et al. Analysis of the effects of vibration modes on fatigue damage in high-speed train bogie frames[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 89: 222.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10  
· 第一作者:李宏双,高级工程师,crclihs@163.com  
通信作者:李赫,工程师,like17767893740@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 51 页)

- YANG Zhiyong, LI Wupeng, ZHANG Yu, et al. Influence of stirring head structure on the defect formation mechanism in friction stir welding [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(2): 374.
- [2] 罗以洪. TRIZ 集成创新方法的系统结构及设计应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
LUO Yihong. Research on system structure, design and application of TRIZ integrated innovation method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
  - [3] 宿浩. 搅拌杆截面形状对搅拌摩擦焊接热过程和塑性材料流动的影响[D]. 济南: 山东大学, 2015.  
SU Hao. Effect of cross-section shape of stirring needle on thermal process and plastic material flow in friction stir welding[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
  - [4] 刘迪. 搅拌摩擦焊隔热搅拌头研究[D]. 杭州: 浙江理工大

学, 2017.

- LIU Di. Study on heat insulation stirring head of friction stir welding[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017.
- [5] 牛瑾. 基于层次分析法和模糊综合评价的中国高铁核心能力评价[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.  
NIU Jin. Core competence evaluation of China high-speed railway based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10  
· 通信作者:黄林,高级工程师,013200023871@crregc.cc  
· ©《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