

市域轨道交通 A 型列车排障器结构设计

段鹏飞 张 鹏 吴 阳 李 帅

(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] 欧洲标准 EN 15227:2020 中明确要求排障器除了具备排障功能外, 还应具备能量吸收功能, 并规定了不同速度等级列车排障器应吸收的能量值。基于此要求, 有必要对市域轨道交通 A 型列车排障器的结构设计进行研究。[方法] 结合我国某市域轨道交通列车实际项目的需求, 提出了设计速度为 140 km/h 的市域轨道交通 A 型列车排障器的结构设计方案。分别对该排障器的排障单元、吸能单元、防脱机构等主要部件的结构进行了设计。根据 EN 15227:2020 标准中静态负载及动态过载要求, 对排障器进行了静强度和动态吸能的仿真分析计算。将仿真计算结果与标准规定的性能要求进行了对比, 以评估该排障器结构设计方案的可性。[结果及结论] 排障器在 2 种静态负载工况下的最大应力均小于标准规定的防撞部件材料屈服强度。动态吸能过程中, 铝蜂窝的缓冲力较为平稳, 排障器各部件均未发生失效, 总吸能量满足标准要求, 吸能单元选型合理。由此可认为该排障器结构设计合理, 排障能力强, 具有良好的缓冲和吸能特性, 可以满足市域轨道交通 A 型列车的使用要求。

关键词 市域轨道交通; A 型列车; 排障器; 结构设计方案
中图分类号 U270.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.017

Structural Design of Obstacle Deflector on Type-A City Rail Transit Train

DUAN Pengfei, ZHANG Peng, WU Yang, LI Shuai
(National Engineering Research Center of Railway Vehicles,
CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062,
Changchun, China)

Abstract [Objective] European standard EN 15227:2020 stipulates that except the obstacle-clearing capabilities, OD (obstacle deflector) should also have energy absorption functions, specifying the energy absorption values required for trains at different speed levels. Based on this requirement, it is necessary to study the structural design of the OD for type-A city rail transit trains. [Method] In line with the requirements of the actual city rail transit train project in a Chinese city, the structural design scheme for a type-A city rail transit train OD with 140 km/h design speed is proposed. The main components of this OD, including the structures of obstacle-clearing

unit, energy-absorbing unit, and anti-trip mechanism are designed. Static strength and dynamic energy absorption simulation analysis calculations are conducted based on the static load and dynamic overload requirements outlined in the standard EN 15227:2020. The simulation calculation results are compared with the performance requirements specified by the standard to evaluate the feasibility of the OD structural design schemes.

[Result & Conclusion] The maximum stress of the OD under two static load conditions is below the yield strength of the crash component materials as specified by the standard. During the dynamic energy absorption process, the aluminum honeycomb demonstrates stable buffer force with no component failures of the OD. The total energy absorption meets the standard requirements, indicating that the selection of the energy absorption unit is appropriate. Therefore, the structural design of this OD is considered reasonable, with strong obstacle-clearing capabilities and excellent buffering and energy absorption characteristics, meeting the operational requirements of type-A city rail transit trains.

Key words city rail transit; type-A train; obstacle deflector; structural design scheme

在国外最早出现铁路的时候, 铁路线周围并没有修建保护栅栏, 所以线路上经常会出现动物(如野猪)等影响行车安全的障碍物^[1]。列车高速运行时, 一旦有动物进入车轮和轨道之间, 会造成列车和轨道分离, 严重时甚至会使列车脱轨, 而且障碍物与列车碰撞产生的能量也会对乘客安全造成一定的风险^[2]。

随着列车运行速度的持续提高, 铁路行业对列车运行安全的要求随之提高。排障器作为轨道交通列车尤其是高速列车被动安全的一个重要组成部分^[3], 有必要对其结构设计进行深入研究。

目前, 国内外普遍执行欧洲标准 EN 15227:2020《铁路设施-铁路车辆的防撞性要求》, 该标准明确要求排障器具有吸能的功能, 并明确了不同速度等级下排障器的吸能量。本文基于我国某市域轨

道交通 A 型列车(设计速度为 140 km/h)实际项目的设计需求,提出市域轨道交通 A 型列车排障器的结构设计方案,同时通过有限元软件模拟真实工作情况,对排障器的静强度和缓冲吸能性能进行仿真分析验证。

1 排障器结构设计

1.1 设计方案说明

本文设计的列车排障器主体如图 1 所示,其结构由排障单元、吸能单元、防脱机构组成。其结构件采用优质结构钢,以保证设备能够承载较大的冲击载荷。车体连接部分与排障器前端用法兰连接,以增加设备刚度。吸能单元采用蜂窝结构作为吸能器,以期在实现轻量化的同时高效、稳定吸收碰撞能量。

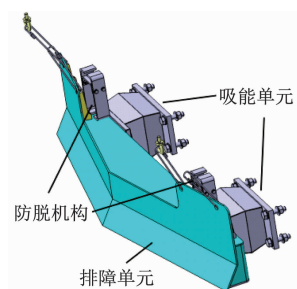


图 1 市域轨道交通 A 型列车排障器示意图

Fig. 1 Diagram of obstacle deflector for type-A city rail transit train

1.2 吸能单元

吸能单元主要由前安装法兰、后安装法兰、蜂窝吸能单元、蒙皮、导向管等组成,如图 2 所示。当吸能单元压面受到载荷冲击时,通过蜂窝吸能单元的塑性变形来消耗列车和障碍物撞击时所产生的碰撞能量。

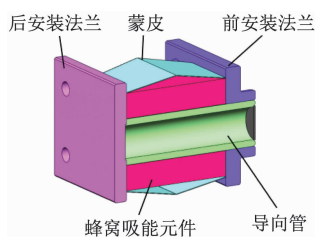


图 2 吸能单元结构组成示意图

Fig. 2 Diagram of energy absorption unit structure composition

1.3 排障单元

排障单元应具有足够的尺寸和强度,并采用连

续的屏障结构。排障单元结构如图 3 所示。从图 3 可看出,排障单元近似于 V 型轮廓(2 块屏障结构间的夹角为 157°),可有效扫除列车前端的障碍物。在 V 型轮廓基础上,排障单元进一步增加了与车辆工业设计美工方案兼容的几何表面,使排障单元在侧视图中整体呈现为凹形的前部端面,该设计既可增强排障器的外观设计,还起到除雪的作用。此外,在排障单元中间还应预留空间(虚线区域范围),以满足车钩在各种极限工况下摆动角度的要求。

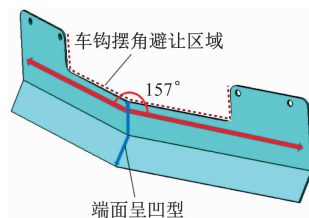


图 3 排障单元结构示意图

Fig. 3 Diagram of obstacle deflector unit structure

1.4 防脱机构

排障器设计有刚性防脱和柔性防脱 2 种结构。当排障器脱落时,排障器防脱吊耳与车体防脱板间产生刚性接触,使排障器防脱吊耳能够“挂”在车体防脱板上,从而实现排障器的防脱落功能。若排障器刚性防脱失效,如发生排障器防脱吊耳或车体防脱板断裂、开焊等情况时,可通过设置在机构内的 4 根钢丝绳吊紧拉住排障器,防止排障器脱落成为危险障碍物,进而增强了列车运行的安全性。排障器防脱机构设计示意图如图 4 所示。

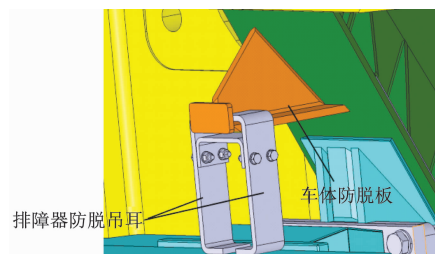


图 4 排障器防脱机构设计示意图

Fig. 4 Diagram of anti-trip mechanism design for obstacle deflector

1.5 蜂窝压缩理论计算

蜂窝强度由蜂窝材质、厚度及孔型规格确定。对于孔格形状为六边形的蜂窝而言,其孔型规格参数主要包括铝箔厚度 d 、蜂窝单边壁厚边长 l 、双倍壁厚边长 h 和六边形对边距 c ,如图 5 所示。

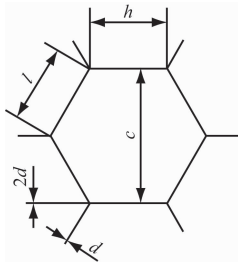


图5 六边形蜂窝状孔型规格参数图

Fig. 5 Dimension diagram of hexagonal honeycomb shape hole specification

设 σ_s 为基材的屈服强度,则蜂窝屈服强度 σ 的理论计算式为:

$$\sigma = \sigma_s \frac{\pi d \sqrt{(3\sqrt{3}/2) dl}}{hc/2 + c \sqrt{l^2 - (c/2)^2}/2} \quad (1)$$

当 $h=l$ 时, σ 的计算式可简化为:

$$\sigma = \sigma_s \frac{\pi d \sqrt{(3\sqrt{3}/2) dl}}{l(c/2) + (c/2) \sqrt{l^2 - (c/2)^2}} \quad (2)$$

当孔格为正六边形,即 $h=l=(\sqrt{3}/3)c$ 时,考虑经验修正后, σ 的计算式为:

$$\sigma = \sigma_s \frac{2\sqrt{3}}{3} \pi \left(\frac{d}{l} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

根据 EN 15227:2020 中表 6 的要求,本文设计的排障器在中心线处静态负载为 240 kN,平均分配到每个蜂窝吸能单元上的压力为 120 kN。加载过程中,蒙皮承担了一部分压力。除去蒙皮承担的压力后,每个蜂窝吸能单元需承担的压力 F 约为 110 kN。蜂窝吸能单元的面积设计值 $S = 10\,470 \text{ mm}^2$,因此,经公式 $\sigma = F/S$ 计算可得出蜂窝强度 $\sigma = 10.5 \text{ MPa}$ 。通过式(3),反推得到蜂窝基材应选用的铝箔材料牌号为 5052 (5052 号铝箔的 $\sigma_s = 220 \text{ MPa}$), $d = 0.1 \text{ mm}$, $l = 1.97 \text{ mm}$ 。

1.6 材料属性

排障器各组成部分的材料型号及相关参数如表 1 所示。

表 1 排障器各组成部分的材料型号及相关参数

Tab. 1 Material types and relevant parameters of each composition parts for obstacle deflector

组成部件	材料型号	σ_s/MPa	弹性模量/GPa	密度/(kg/m^3)	泊松比
前安装法兰、后安装法兰、导向管	Q345	345	206	7 850	0.3
蒙皮	304	206	206	7 850	0.3
排障单元	B750LD	700	206	7 850	0.3

2 排障器性能仿真结果分析

为验证本文设计排障器结构方案的合理性,采用有限元软件建立了排障器的三维几何模型,对排障器进行了静态仿真分析和动态仿真分析。

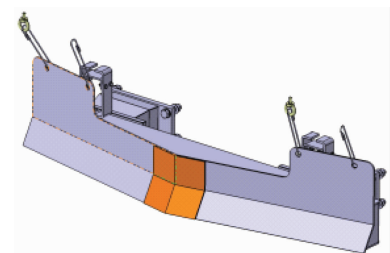
2.1 静态仿真分析

2.1.1 加载工况及边界条件

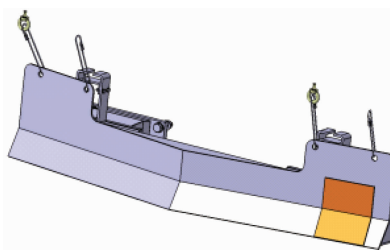
静态仿真分析主要是对排障器的静强度进行仿真分析。如图 6 所示,排障器的静强度仿真包括 2 个工况:

1) 中心静压工况:即在排障器中心线处施加静态纵向负载。在列车运行速度为 140 km/h 时,施加的纵向负载为 240 kN,约束位置为后法兰安装座。

2) 侧面静压工况:即在距离排障器中心线 750 mm 横向距离处施加静态纵向负载。在列车运行速度为 140 km/h 时,施加的纵向负载为 200 kN,约束位置同样为后法兰安装座。



a) 中心静压工况



b) 侧面静压工况

图 6 排障器静强度仿真的 2 种工况

Fig. 6 Two load conditions for the static strength simulation of obstacle deflector

2.1.2 静态仿真结果分析

排障器在2个工况下的应力云图如图7所示。由图7可知,中心静压工况下排障器的最大应力为220 MPa;侧面静压工况下排障器的最大应力为651 MPa;2种工况的最大应力均发生在排障单元上,且均小于表1中的排障单元的屈服强度值(700 MPa)。由此可认为本文的设计方案满足标准要求。

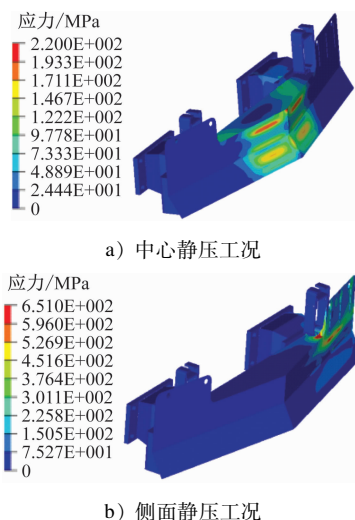


图7 排障器在2个工况下的应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of obstacle deflector under two load working conditions

2.2 动态仿真分析

2.2.1 加载工况及边界条件

动态仿真分析主要对排障器与障碍物发生碰撞下的动态吸能工况进行仿真。仿真过程中,约束位置采用后法兰安装座。根据 EN 15227:2020,排障器动态吸能工况为在排障器纵向中心进行动态压缩仿真,障碍物的加载速度 $v=2$ m/s。排障器与障碍物的碰撞工况示意图如图8所示。

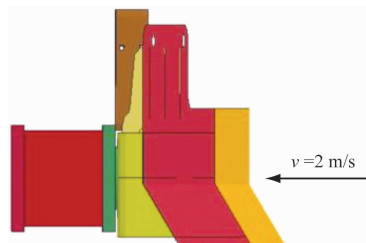


图8 排障器与障碍物的碰撞工况示意图

Fig. 8 Diagram of collision condition between obstacle deflector and obstacle

2.2.2 动态仿真结果分析

2.2.2.1 结构变形图

不同碰撞时刻 t 下的结构变形如图9所示。由

图9可看出:排障器在碰撞过程中变形形态良好,未出现结构失效的情况。

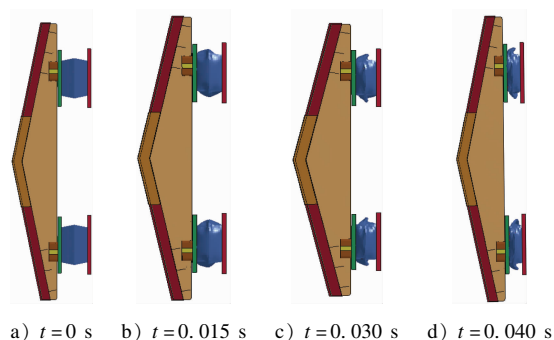


图9 不同碰撞时刻下的结构变形

Fig. 9 Structural deformation at different collision times

2.2.2.2 动态应力云图

在整个碰撞变形过程中,排障器整体结构的应力云图如图10所示。由图10可知:排障器各组成部分受到的最大应力为606 MPa,小于表1中排障单元的屈服强度值(700 MPa)。

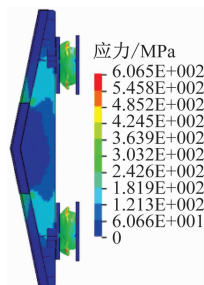


图10 排障器整体结构应力云图

Fig. 10 Overall structural stress nephogram of obstacle deflector

2.2.2.3 动态缓冲力

排障器的缓冲力-时间曲线如图11所示,缓冲力-位移曲线如图12所示。从图11、图12可看出:在动态吸能期间,排障器在吸能位移范围内的缓冲力较为平稳,平均动态缓冲力约为265 kN;在整个

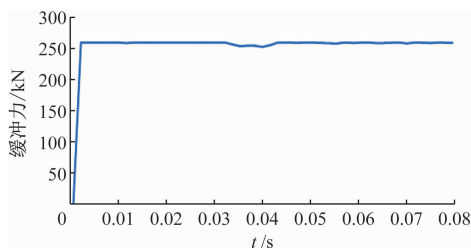


图11 排障器的缓冲力-时间曲线

Fig. 11 Buffer force-time curve of the obstacle deflector

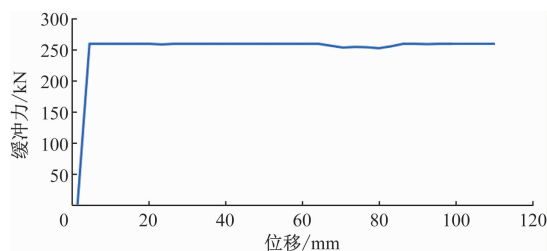


图 12 排障器的缓冲力-位移曲线

Fig. 12 Buffer force-displacement curve of the obstacle deflector

碰撞过程中,吸能位移为 110 mm,此时的总吸能量为 29.15 kJ,大于 EN 15227:2020 中对总吸能量的要求(140 km/h 等级列车排障器对应的总吸能量为 28.80 kJ)。由此可认为,本文设计的排障器可以满足标准要求。

3 结语

本文结合我国某市域轨道交通列车实际需求,提出了一种可满足设计速度为 140 km/h 的市域轨道交通 A 型列车的排障器。本文设计的排障器在结构方案上具有屏障结构连续、几何造型合理等特点,可将障碍物推到轨道两边,满足 EN 15227:2020 对排障器的外形要求。选用塑性变形可控的铝蜂窝作为吸能单元,将吸能单元设置在屏障后方两侧,当吸能单元触发后,排障器整体结构可有序稳定地后退,不会出现传统排障器在发生碰撞后仅中间吸能单元后退、两侧屏障不动的问题,也不会发生排障器夹住障碍物无法将其排至轨道两侧的情况。

静强度仿真分析结果表明,在中心静压 240 kN 和侧面静压 200 kN 这 2 种静态负载工况下,该排障

器的最大应力为 651 MPa,未超过标准规定的防撞部件材料的屈服强度值。

动态吸能仿真分析结果表明,该排障器在吸能过程中,整体结构后退趋势平稳,未发生失效。吸能单元缓冲力波动较小,总吸能量达到了 29.15 kJ,可以满足标准要求。

参考文献

- [1] 张云峰. 列车排障吸能器结构设计及仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(6): 79.
ZHANG Yunfeng. Structural design and simulation analysis of the trouble shooting and energy absorbing device for train[J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(6): 79.
- [2] 苏永章, 付耿哲, 岳译新, 等. 列车与活体侵入物高速碰撞的安全性研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(13): 79.
SU Yongzhang, FU Gengzhe, YUE Yixin, et al. Study on safety of high-speed collision between train and living invader[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(13): 79.
- [3] 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.
- [4] 胡坤镜, 袁文辉. 200 km/h 客运机车排障器强度分析及设计改进[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(1): 56.
HU Kunjing, YUAN Wenhui. Strength analysis and improved design of pilot on 200 km/h passenger locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2012, 35(1): 56.

· 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:段鹏飞,高级工程师,013200029040@crrecg.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

(上接第 79 页)

磨损量和摩擦因数的影响,分析其协同效应,以期开发出综合性能更优的复合增强体系,提升漆膜性能。

参考文献

- [1] 江林峰,陈雷,李一新. Al_2O_3 防滑粒料对防滑涂层防滑及磨损性能的影响[J]. 涂料工业, 2014, 44(1): 6.
JIANG Linfeng, CHEN Lei, LI Yixin. Effects of Al_2O_3 nonskid particles on antiskid and wear performance of non-skid coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(1): 6.
- [2] 邓琦,徐金文,高新华,等. 舰船甲板防滑涂料技术现状及发展趋势[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(2): 111.
DENG Qi, XU Jinwen, GAO Xinhua, et al. Technology and

developing tendency of warship deck paints[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(2): 111.

- [3] 陈从棕,冷晓飞,姜秀杰,等. 轻质耐磨防滑涂料的制备及其性能研究[J]. 涂料工业, 2022, 52(5): 48.

CHEN Congzong, LENG Xiaofei, JIANG Xiujie, et al. Preparation and performance of lightweight wear-resistant non-skid coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2022, 52(5): 48.

· 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:王飞,高级工程师,redstaroverworld@126.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