

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqfh.250499

公路防撞垫安全裕度提升设计方案研究

时文成¹, 王 新², 胡学成², 刘思源²

(1. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014; 2. 北京华路安交通科技有限公司, 北京市 100070)

摘 要: 随着交通量增大和运行速度提升, 防撞垫安全裕度不足的问题日渐凸显, 为了契合国家打造平安交通和品质工程的政策指引, 遵循以人为本、安全至上的原则, 开展了防撞垫安全裕度提升设计研究。以通过实车足尺碰撞试验验证的防撞垫为对象, 利用缓冲吸能优越的泡沫铝材料, 采用计算机仿真手段进行方案系统分析, 研究提出了安全可靠、普适性强、造价合理及工艺简便的防撞垫安全裕度提升设计方案, 并从缓冲指标和防护速度角度对防撞垫安全裕度提升效果进行了验证。研究表明, 在防撞垫端部斜撑内填充泡沫铝新材料, 可以增大对车辆碰撞能量的吸收, 使乘员缓冲指标更小且防护碰撞速度更高, 体现了更好的防护效果及更大的防护范围, 提高了公路运营安全水平, 也对同类防撞垫结构设计与工程应用提供重要支撑。

关键词: 公路; 防撞垫; 安全裕度; 提升; 实车足尺碰撞试验; 计算机仿真

中图分类号: U491.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0054-07

Study on Safety Margin Improvement Design Scheme of Highway Anti-collision Pad

SHI Wencheng¹, WANG Xin², HU Xuecheng², LIU Siyuan²

(1. Shandong Expressway Co., Ltd., Jinan 250014, China; 2. Beijing Hualu'an Traffic Technological Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: With the increase of traffic volume and the vehicle speed, the problem of insufficient safety margin of anti-collision pad is becoming more and more obvious. In order to comply with the national policy guidelines to create the safe traffic and quality projects, follow the principle of putting people first and prioritizing safety, the safety margin improvement design of anti-collision pad is studied. Taking the anti-collision pad verified through the full-scale collision test of real vehicles as the object, and using the foam aluminum material with superior buffering and energy absorption, the scheme system analysis is carried out by means of computer simulation. The safety margin improvement design scheme of anti-collision pad is put forward, which is safe and reliable, universal, reasonable in cost and simple in technically, and the safety margin improvement effect of the anti-collision pad is verified from the buffer index and the protection speed. Research shows that filling the diagonal braces at the end of the anti-collision pad with new aluminum foam material can increase the absorption of vehicle collision energy to make the passenger buffer index smaller and the collision protection speed higher, which embodies the better protection effect and larger protection range, improves the highway operation safety level, and also provides the important support for the structural design and engineering application of similar anti-collision pads.

Keywords: highway; anti-collision pad; safety margin; improvement; full-scale impact test with real vehicle; computer simulation

0 引 言

公路交通分流处或障碍物(桥墩、收费站导流岛、隧道洞口等)前端是交通安全的薄弱位置, 设计规范^[1]要求采用防撞垫进行安全防护。防撞垫可以

通过结构变形来吸收碰撞能量, 使车辆得到缓冲、减速并安全停驶, 或者将其导正至正确的行驶方向, 降低事故严重程度。目前防撞垫已被世界各国公认其功效, 成为保障公路交通分流处或障碍物前端安全的一种重要防护设施。

目前, 我国高速公路最高限速为 120 km/h, 交通安全设施防护范围为 85%, 设计规范^[1]规定防撞垫最高等级的设计防护速度为 100 km/h。鉴于交通环境的变化(如交通量增大、运行速度提升)、国家政策的更新(如平安交通、品质工程), 遵循以人为本、安

收稿日期: 2025-05-10

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目(2020B24)

作者简介: 时文成(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事路桥建设管理工作。

通信作者: 胡学成(1995—), 女, 本科, 工程师, 从事车辆工程研究工作。电子信箱: 1767285648@qq.com

全至上的原则,结合相关事故特点,防撞垫在安全裕度提升方面有着切实需求,而且交通安全本身就是一项不断适应新环境、新条件和持续改进的工作。

1 防撞垫安全应用现状

近年来,我国交通行业主管部门及科研单位集中发力,在借鉴国外先进有效经验的基础上,结合我国国情将防撞垫作为解决方案纳入了设计规范^[1],制定了防撞垫评价标准^[2],并研发了一些经碰撞试验验证的防撞垫设施成果^[3-6],有效降低了应用路段事故严重程度,取得了一定积极效果,见图 1。



图 1 防撞垫及应用效果

然而,通过调研与总结应用经验发现,现有防撞垫成果仍有继续优化空间,其中安全防护裕度尤为关键。原因是,实际碰撞事故中,一些防撞垫存在被事故车辆完全压扁,甚至脱离固定轨道的情况(见图 2),说明防撞垫自身吸能限值未能满足事故车辆的碰撞能量要求。



图 2 防撞垫碰撞后被压扁、甚至脱离的事故照片

因此,有必要提升防撞垫的安全裕度(安全裕度是防撞垫防撞速度超出设计要求或标准规定的防撞速度的余量),使其能够更好地应对实际碰撞事故,提高公路运营安全水平。

2 设计原则和技术方向

2.1 安全裕度提升设计原则

通过分析防撞垫使用需求,结合市场环境特点,提出防撞垫安全裕度提升设计原则:

(1)明确对象

将经过实车足尺碰撞试验验证的防撞垫成果作为对象,开展安全裕度提升设计,可以最大程度的解决工程应用安全问题,避免重复开发带来的资源浪费。

(2)普遍适用

现有防撞垫成果较为丰富,需要了解结构受力特点,总结共性设计,从普遍适用角度出发,提出防撞垫安全裕度提升设计方案,满足大部分以现有防撞垫成果的使用需求。

(3)微调高效

防撞垫结构组成构件较多,从实施方便性角度出发,利用新理念、新材料、新方式,通过小范围结构调整,最有效的实现安全裕度提升目标。

(4)安全可靠

从安全性和规范符合性角度出发,对现有防撞垫进行安全裕度提升设计后,依据技术规程^[3]采用仿真手段^[4]对其安全性能做进一步评价,保证工程应用的可靠性。

(5)造价合理

在提升防撞垫安全裕度的同时,需符合市场需求,不应大幅增加防撞垫的造价成本,契合经济节约型社会的政策指导。

(6)工艺简便

防撞垫安全裕度提升设计不应过于复杂,需要具有较好的加工和施工方便性,易于控制产品质量,以及满足批量化生产的需求。

2.2 安全裕度提升技术方向

防撞垫多采用金属框架结构,主要依靠金属材料的变形以及框架空间进行缓冲吸能,其吸能效果和溃缩距离依赖于金属的压缩性能以及空间的大小。目前,在一定造价成本和容许设置空间范围内,利用传统钢材进行防撞垫结构设计,已经基本实现了吸能最优化。

为了进一步提升防撞垫吸能效果,结合防撞垫安全裕度提升设计原则,应用“新材料”无疑是一种有效方式。近年来,交通行业也在大力倡导新材料在交通安全设施方面的推广应用,已突破技术瓶颈、提升设施性能及解决工程问题。

对现有材料在吸能效率、成本、耐久性等方面进行对比,发现泡沫铝材料综合性能优势大,且泡沫铝材料已在航空航天领域、军事空投及装甲领域、汽车领域等进行了成功应用。泡沫铝是铝合金发泡生产的新型轻金属材料^[7-8](见图 3),吸能密度可达到 4 ~ 20 J/cm³,且具有宽而平的应力平台,在压缩全过程可以持续吸能,压缩应变可达到 70% 左右,比传统金属材料要好(见图 4),在高强度防撞缓冲领域,拥有良好的优越性能,且具有环保耐久特性,可将其作为

防撞垫吸能安全裕度提升设计的重要技术方向。



图3 泡沫铝材料

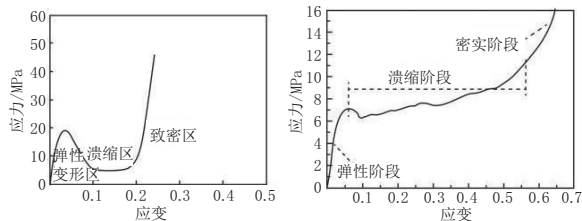


图4 金属框架结构压缩特性曲线与泡沫铝材料压缩特性曲线

虽然,泡沫铝材料的压缩吸能特性十分优越,但其市场价格较高,从经济性出发,泡沫铝材料在防撞垫基本结构中的应用方式至关重要。

3 防撞垫基本结构

以TS级防撞垫成果为例,设计防护能力为三(TS)级,整体结构主要由鼻端、8个吸能单元、8个横向框架、1个端部锚固支架、双道导向滑轨、双侧导向板、前后基础锚固及拼接连接构件组成,整体长度6028 mm,整体宽度996 mm,路面以上整体高度850 mm,见图5。



图5 TS级防撞垫成果

按照评价标准^[2]规定的碰撞条件(见表1),开展小型客车正碰、偏碰、斜碰及正向侧碰防撞垫共四次实车足尺碰撞试验。

表1 防撞垫碰撞条件

碰撞类型	碰撞车型	车辆总质量/ kg	碰撞速度/ (km·h ⁻¹)	碰撞角度/ (°)
正碰	小型客车	1 500	100	0
斜碰		1 500	100	15
偏碰		1 500	100	0
正向侧碰		1 500	100	20

通过试验检测,小型客车多角度碰撞后,防撞垫构件及其脱离件没有侵入车辆乘员舱且无散落现象,阻挡功能良好;车辆碰撞后没有翻车,且车辆轮

迹没有越出导向驶出框,导向功能良好;乘员碰撞速度均小于12 m/s,乘员碰撞后加速度均小于200 m/s²,缓冲功能良好。该防撞垫成果各项指标均满足评价标准^[2]要求,达到三(TS)级防护能力,安全性能可靠,见图6。

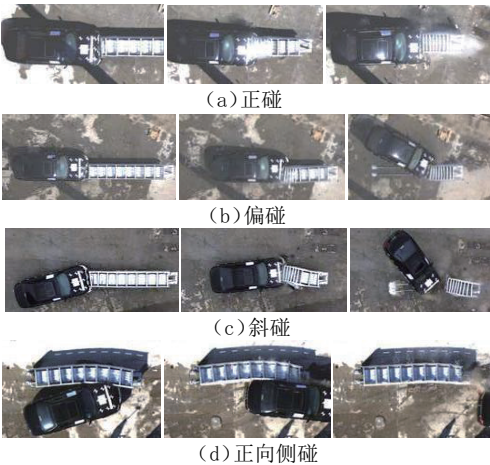


图6 车辆行驶路径俯视图

与此同时,从碰撞能量更大且受力更均衡的正碰试验效果来看,防撞垫基本结构的8个吸能单元被全部有序压缩,乘员碰撞后最大加速度为185 m/s²(见图7),说明整体结构设计合理,缓冲功能满足要求。防撞垫吸收能量达到最大,但在安全裕度方面还有进一步提升空间。

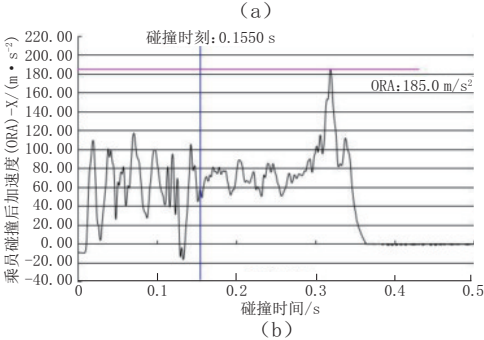


图7 防撞垫基本结构正碰压缩情况及加速度曲线

4 防撞垫安全裕度提升设计方案

目前,防撞垫成果的差异化主要体现在吸能单元结构上,而鼻端、横向框架、端部锚固支架多为共

性设计构件,见图8。

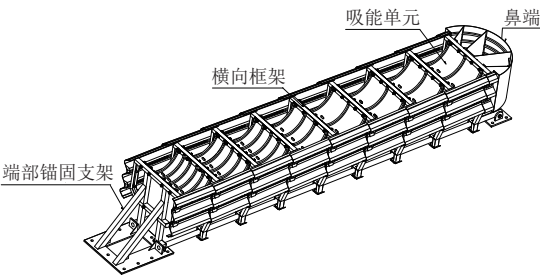


图8 防撞垫共性设计构件

根据防撞垫结构受力特点,结合成果普遍适用的需求,将共性设计构件做为防撞垫安全裕度提升设计的载体,进而利用泡沫铝材料优异的压缩吸能特性,考虑优化吸能、造价合理、工艺可行等因素,提出三种防撞垫安全裕度提升设计方案,具体如下:

(1)泡沫铝设于鼻端:防撞垫鼻端是车辆正碰、偏碰、斜碰过程中最先接触的吸能构件,根据防撞垫鼻端特点,尝试将泡沫铝材料填充于鼻端中间的类梯形吸能盒内,见图9。

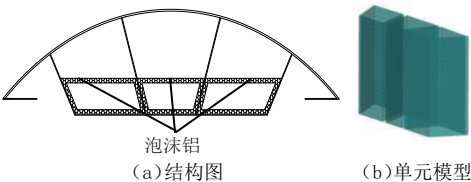


图9 泡沫铝设于防撞垫鼻端吸能盒

(2)泡沫铝设于横向框架:防撞垫沿纵向设置多个横向框架,车辆碰撞过程中横向框架受吸能单元或导向板挤压,从优化吸能角度,尝试将泡沫铝材料填充于横向框架内,见图10。

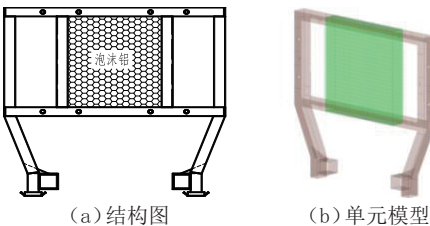


图10 泡沫铝设于防撞垫横向框架

(3)泡沫铝设于端部斜撑:防撞垫末端锚固支架是碰撞能量的终端承载结构,结合端部支架采用三角斜撑的设计方式,从优化吸能角度,尝试将泡沫铝材料填充于端部斜撑内,见图11。

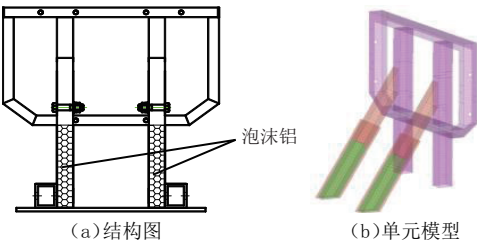


图11 泡沫铝设于防撞垫端部斜撑

针对上述三种泡沫铝在防撞垫结构中的应用方式,为了更显著的表征泡沫铝材料的吸能效率,采用更均衡的小型客车正碰进行仿真碰撞分析^[9-10]。从仿真结果来看,车辆碰撞后,鼻端和横向框架内的泡沫铝结构变形并不明显,端部斜撑内泡沫铝则发生明显压缩变形,见图12。

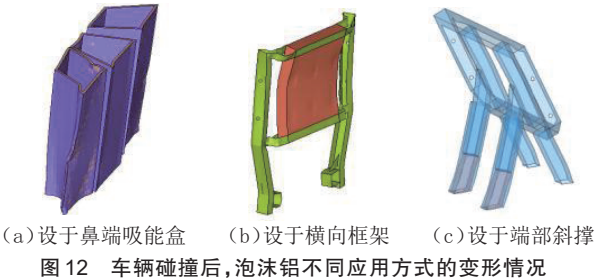


图12 车辆碰撞后,泡沫铝不同应用方式的变形情况

通过对仿真数据进行提取、处理与分析发现,车辆碰撞过程中,同一时刻(0.3 s)条件下,鼻端吸能盒内泡沫铝材料的吸能效率为183 452 kJ/m³;横向框架内泡沫铝材料的吸能效率为47 590 kJ/m³;端部锚固支架内泡沫铝材料的吸能效率为4 678 250 kJ/m³。图13为泡沫铝不同应用方式的吸能效率对比曲线,说明端部锚固支架内设置泡沫铝的方式最优。

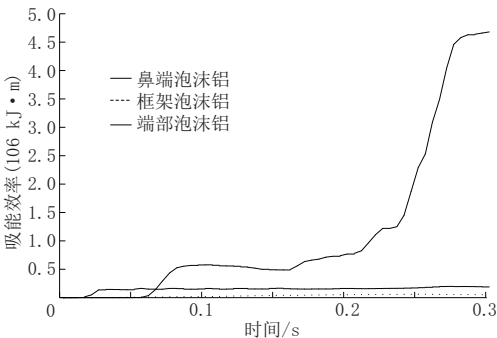


图13 泡沫铝不同应用方式的吸能效率对比曲线

基于上述分析,得到防撞垫安全裕度提升设计方案,见图14。该方案是在防撞垫基本结构的基础上,将端部锚固支架的斜撑从一体式结构改为嵌套式结构,由上部方管、下部方管、泡沫铝、连接螺栓组成,其中泡沫铝填充在下部方管内,上部方管的底封板与泡沫铝呈面接触,碰撞过程中,通过上部方管的两侧长孔和连接螺栓进行滑动,使上部方管可以对泡沫铝材料实现定向压缩,进而增加对碰撞能量的吸收。

5 防撞垫安全裕度提升结构安全评价与效果分析

5.1 计算机仿真技术可靠性验证

建立车辆和护栏的仿真模型^[11],并与实车碰撞

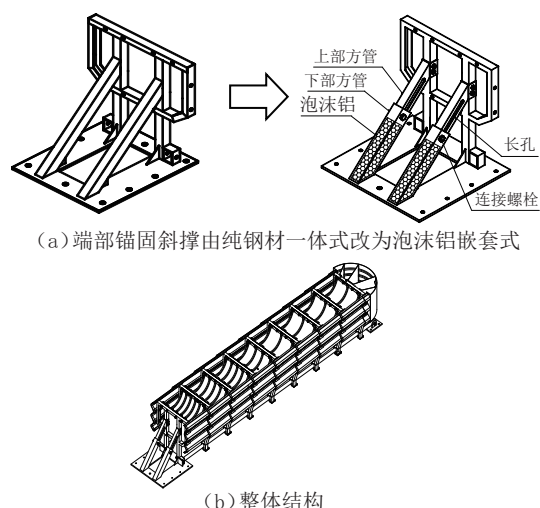


图14 防撞垫安全裕度提升设计方案

试验结果进行对比校核,保证了仿真模型的准确性。图15、图16从车辆行驶姿态角度、护栏变形角度验证了仿真模型的可靠性。

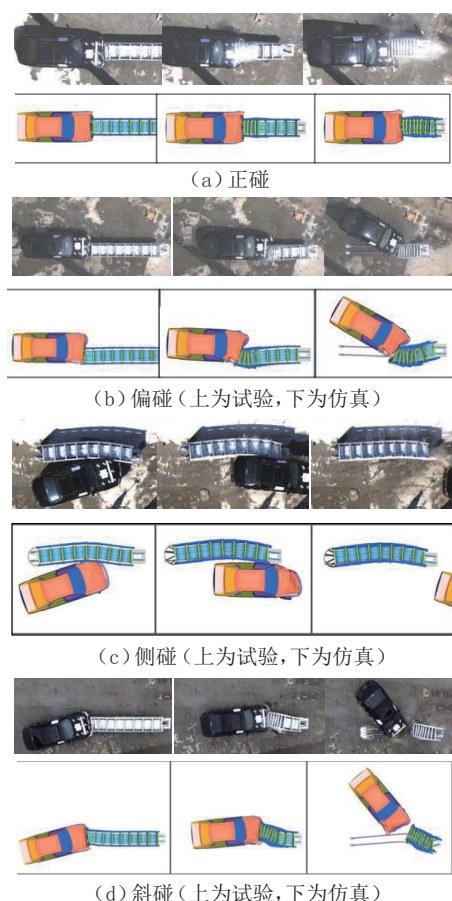


图15 小型客车碰撞防撞垫过程仿真与试验对比

5.2 结构安全性能评价

按照技术规程^[3]要求,建立了防撞垫安全裕度提升结构的有限元仿真模型,采用标准碰撞条件(见表1),进行正碰、偏碰、斜碰及正向侧碰四种类型的仿真碰撞计算,见图17。

通过仿真评价可知,小型客车多角度碰撞后,防

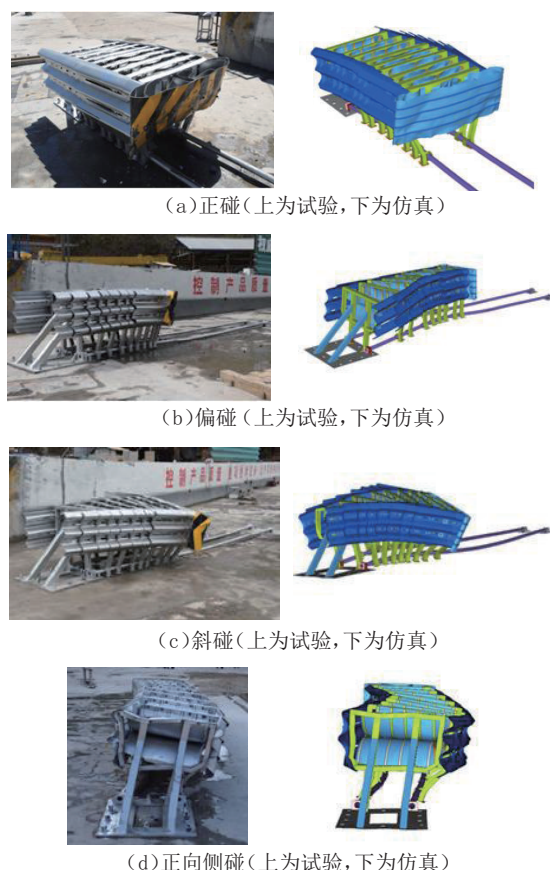


图16 防撞垫变形仿真与试验对比

图17 建立的防撞垫安全裕度提升结构仿真模型

撞垫构件及其脱离件没有侵入车辆乘员舱且无散落现象,阻挡功能良好;车辆碰撞后没有翻车,且车辆轮迹没有越出导向驶出框,导向功能良好,见图18;乘员碰撞速度最大值10.2m/s,小于限值12m/s,乘员碰撞后加速度最大值156.7m/s²,小于限值200m/s²,缓冲功能良好,见图19。

以上研究说明,防撞垫安全裕度提升结构安全性能可靠,达到三(TS)级防护能力。

5.3 安全裕度提升效果分析

为考察防撞垫安全裕度提升效果,针对防撞垫基本结构和安全裕度提升结构(见图20),从缓冲指标和防护速度两个方面进行了安全裕度量化分析。

(1) 缓冲指标裕度分析

表2为标准碰撞条件(碰撞速度100 km/h)下防撞垫基本结构和安全裕度提升结构的缓冲指标数据对比。

从表2可以看出,相较防撞垫基本结构,防撞垫

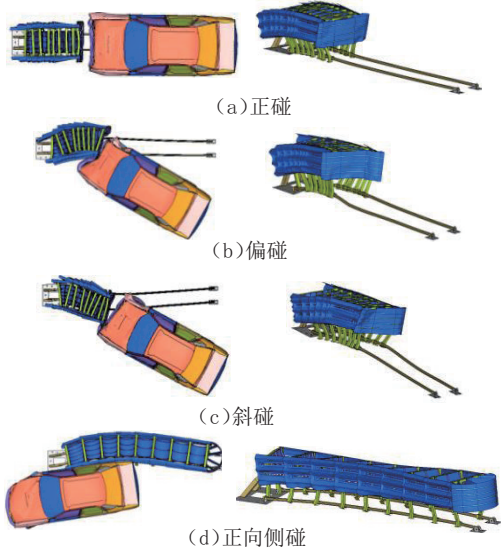


图 18 防撞垫安全裕度提升结构阻挡和导向功能评价结果

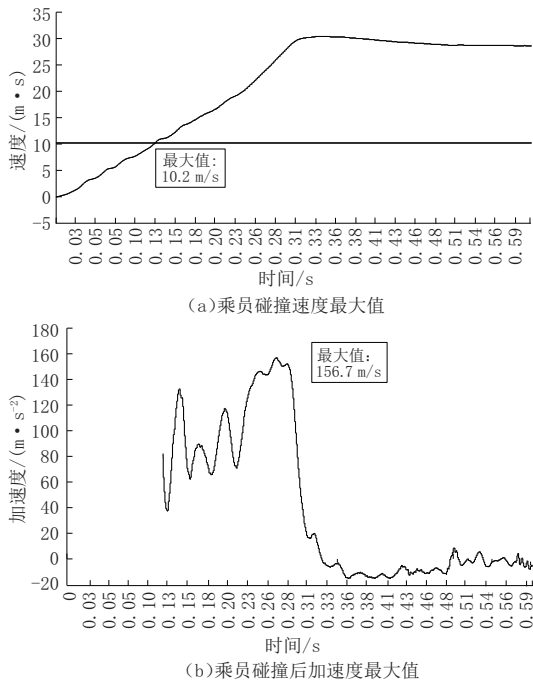


图 19 防撞垫安全裕度提升结构缓冲功能评价结果

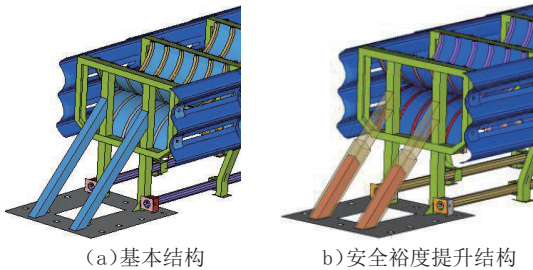


图 20 防撞垫基本结构和安全裕度提升结构

安全裕度提升结构的乘员碰撞速度和乘员碰撞后加速度指标整体减小,说明在缓冲性能方面安全裕度有所提升,对乘员安全防护的表现更优。

(2)防护速度裕度分析

将 1.5 t 小型客车的碰撞速度从 100 km/h 提升到

表 2 100 km/h 碰撞速度,防撞垫基本结构和提升结构的缓冲指标

项目	乘员碰撞速度/ (m·s ⁻¹)		乘员碰撞后加速度/ (m·s ⁻²)	
	纵向	横向	纵向	横向
防撞垫基本结构	正碰	10.2	0.1	178.9
	偏碰	9.9	0.8	193.8
	斜碰	10.4	0.2	138.9
	正向侧碰	5.9	5.5	173.2
防撞垫安全裕度提升结构	正碰	10.2	0	156.7
	偏碰	9.9	0.8	144.6
	斜碰	10.2	0.2	115.3
	正向侧碰	5.1	5.7	110.6

110 km/h,并采用碰撞能量更大且更为均衡的正碰类型,碰撞角度为 0°。基于该碰撞条件,按照技术规程^[3]要求,建立了相应仿真模型,分别对防撞垫基本结构和安全裕度提升结构进行仿真碰撞计算。

仿真结果显示,防撞垫基本结构和安全裕度提升结构均可对 110 km/h 的小型客车进行有效阻挡和导向,没有发生构件侵入车辆乘员舱、翻车及越出导向驶出框的情况,见图 21、图 22。

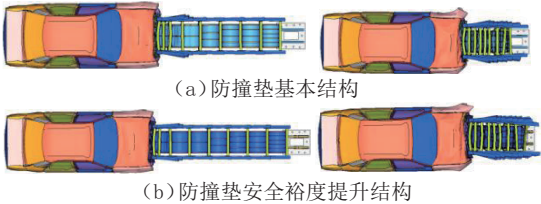


图 21 110 km/h 碰撞速度,防撞垫基本结构和提升结构的车辆行驶路径

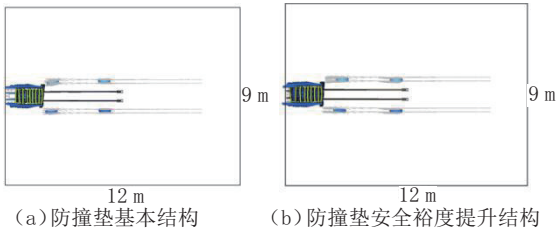


图 22 110 km/h 碰撞速度,防撞垫基本结构和提升结构的导向框

在乘员保护方面,110 km/h 碰撞条件下,防撞垫基本结构的缓冲指标中乘员碰撞后加速度纵向最大值 278.2 m/s²,大于限值 200 m/s²;防撞垫安全裕度提升结构的缓冲指标中乘员碰撞后加速度最大值 196.3 m/s²,小于限值 200 m/s²,见图 23。并且,由表 3 可知,防撞垫安全裕度提升结构的正碰缓冲指标数据均满足要求。

可以看出,相较防撞垫基本结构,防撞垫安全裕度提升结构能够有效防护更高的碰撞速度,说明在防护速度方面安全裕度有所提升,体现了更好的防护效果及更大的防护范围。

与此同时,通过提取不同碰撞速度下,防撞垫安

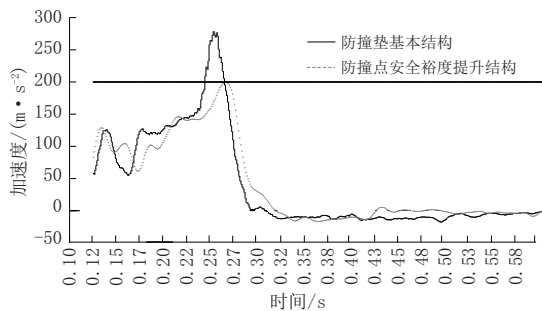


图 23 110 km/h 碰撞速度,防撞垫基本结构和提升结构加速度曲线

表 3 110km/h 碰撞速度,防撞垫基本结构和提升结构的缓冲指标

项目		乘员碰撞速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		乘员碰撞后加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	
		纵向	横向	纵向	横向
防撞垫基本结构	正碰	10.9	0.1	278.2	39.2
是否满足要求		是	是	否	是
防撞垫安全裕度提升结构	正碰	10.9	0.0	196.3	22.2
是否满足要求		是	是	是	是

全裕度提升结构端部斜撑内泡沫铝材料的变形形态和吸能曲线,发现车辆碰撞速度越大,端部斜撑内泡沫铝材料压缩变形越明显,且吸收的碰撞能量也越多,见图 24。进一步说明,防撞垫采用端部斜撑内填充泡沫铝的方式,可以有效提升其安全裕度,得到验证。

6 结 语

以 TS 级防撞垫基本结构为例,充分利用泡沫铝新材料优越特性,从防撞垫安全裕度提升角度,进行了系统研究与效果验证。探究发现,在防撞垫端部斜撑内填充泡沫铝新材料,可以增大对车辆碰撞能量的吸收,使乘员缓冲指标更小且防护碰撞速度更高,体现了更好的防护效果及更大的防护范围,也对

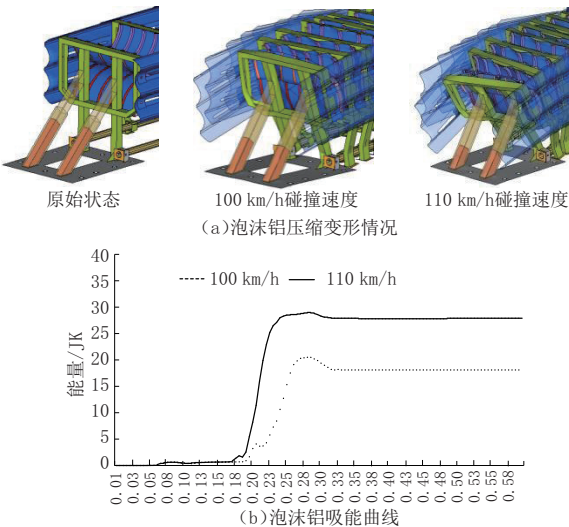


图 24 不同碰撞速度,防撞垫内泡沫铝材料变形及吸能情况
同类防撞垫结构设计与工程应用提供重要支撑。

参考文献:

[1] JTG D81—2017,公路交通安全设施设计规范[S].
[2] JTG B05-01—2013,公路护栏安全性能评价标准[S].
[3] 赵永成,李勇,贾宁,等.新型防撞垫安全性能仿真与试验[J].公路,2015,60(11):210-215.
[4] 钱坤,张晓锋,曾维成,等.高速公路高吸能型防撞垫结构探析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(8):254-255.
[5] 邵永刚,韦胜,刘小勇,等.高等级可导向防撞垫的实车碰撞试验研究[J].北京工业大学学报,2014,40(6):889-893.
[6] 雷正保,周伟正,涂晓威.超弹性可导向防撞垫设计[J].振动与冲击,2021,40(10):35-40,88.
[7] 姚广春.泡沫铝材料[M].北京:科学出版社,2013.
[8] 张红英,欧阳八生,朱国军.泡沫铝材料的研究与应用[J].粉末冶金技术,2021,39(1):69-75.
[9] T/GDHS 001—2020,公路护栏安全性能仿真评价技术规程[S].
[10] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J].振动与冲击,2011,30(1):152-156.
[11] 张宇航,宋秀豪,毛一波,等.钢箱-混凝土组合梁滑移有限元分析[J].特种结构,2022,39(5):32-36.