中图分类号：U260.38; TB332; O313.4　　文献标志码：A　　文章编号：2097-017X(2026)05-0100-07
DOI:10.3969/j.issn.2097-017X.2026.05.011

# 某城轨列车复合材料司机室头罩的碰撞性能仿真与结构优化设计

邱　琳[1]，杨国栋[2]，刘志达[2]，陈东东[1]，汪依宁[1]，肖守讷[1]

（1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；
2. 中车唐山机车车辆有限公司，河北 唐山 064000）

**摘要：**为提升碳纤维复合材料司机室头罩的被动安全性能，结合EN 15227：2020《铁路应用—铁路车辆的耐撞性要求》标准要求，建立了某城轨列车司机室头罩的碰撞仿真模型，开展司机室端部结构有限元仿真计算。基于计算结果，研究头罩结构耐撞性提升设计方法，并提出了两种头罩结构改进方案：改进方案一对头罩前端开口包覆，设置变厚度增强筋板并使用更高性能材料替代；改进方案二材料与改进方案一保持一致，设置头罩前侧环形多胞增强结构，在钩缓两侧对称设吸能管。对比结构改进前后司机室头罩碰撞过程中的破坏模式、吸能量和平均力值，发现相较于原始方案，两种优化方案均改善了头罩整体变形稳定性，远离碰撞位置区域的褶皱与屈曲变形得到有效抑制。其中改进方案二头罩的吸能量与平均力值分别提升了74.0%和77.3%，改进方案一头罩的吸能量与平均力值分别提升了59.1%和62.1%。

**关键词：**城轨车辆；司机室头罩；复合材料；碰撞仿真

# Collision performance simulation and structural optimization design of the composite cab hood of urban rail trains

QIU Lin[1], YANG Guodong[2], LIU Zhida[2], CHEN Dongdong[1], WANG Yining[1], XIAO Shoune[1]

(1. *State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System*, *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu* 610031, *China*; 2. *CRRC Tangshan Co.*, *Ltd.*, *Tangshan* 064000, *China*)

**Abstract:** To enhance the passive safety performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) driver's cab hoods, this paper establishes a collision simulation model for an urban rail transit train driver's cab hood in accordance with the standard EN 15227:2020 "railway applications - crashworthiness requirements for rail vehicles" and conducts finite element analysis on the cab's end structure. Based on the calculation results, a design approach for improving crashworthiness of the hood structure is proposed. To be specific, scheme I involves cladding the front opening of the hood, setting variable-thickness reinforcing ribs, and substitutes the material with a higher-performance alternative. Scheme II uses the same materials as scheme I, sets an annular multi-cell reinforcing structure on the front side

**收稿日期：**2025-05-14
**基金项目：**国家自然科学青年基金资助项目(52305284)
**第一作者简介：**邱　琳(2003—)，男，硕士研究生。研究方向：轨道交通车辆耐撞性及复合材料。
**通信作者简介：**肖守讷(1964—)，男，硕士，研究员。研究方向：机车车辆结构设计及理论、车体与转向架结构强度、碰撞动力学、复合材料与结构轻量化。

of the hood, and symmetrically installs energy-absorbing tubes on both sides of the coupler. The crushing failure mode, energy absorption and mean collision force of the cab hood during collisions are compared and analyzed. The results show that compared with the original scheme, both optimized schemes significantly enhance the deformation stability and suppress the buckling failure of the front collision deformation position of the hood. Specifically, scheme II demonstrates more excellent performance in terms of energy absorption and mean collision force, with the hood's energy absorption and mean collision force increase by 74.0% and 77.3%, respectively, while for scheme I, the energy absorption and mean collision force increase by 59.1% and 62.1%, respectively.

**Keywords**: urban rail vehicle; cab hood; composite material; collision simulation

头罩作为司机室的重要组成部分，具有保护司机室前端设备、降低风阻和美观等多种功能和性能需求[1-3]。列车碰撞事故中，头罩通常最先承受冲击载荷，其变形过程的稳定性和能否稳定承载，对后续钩缓、防爬吸能装置等部件的稳定变形有重要影响[4]。然而在以往轨道车辆司机室耐撞性设计中，研究重点多聚焦于钩缓装置、防爬器等主要吸能部件，较少考虑司机室头罩结构对整车耐撞性的影响[5-7]。

传统轨道车辆司机室头罩通常使用玻璃纤维增强复合材料制成，相比传统金属材质头罩，玻璃纤维增强复合材料头罩具有成型工艺简单、比强度高、耐腐蚀、生产周期短等优势，得到了广泛使用[8-11]。随着列车轻量化要求进一步提升，碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymers, CFRP)因其相比玻璃纤维具有更高的强度、更低的密度等优点获得广泛关注[12-13]。此外，相关研究表明，不同于传统金属材料通过塑性变形吸收能量，CFRP材料主要通过脆性断裂、分层以及基体失效等复杂的破坏方式吸收冲击能量，并展现出更高的能量吸收效率[14-18]。

近年来，碳纤维头罩在工程应用方面已取得显著进展。2011年，中车青岛四方机车车辆股份有限公司在其试验车中首次使用CFRP材料制成的头罩，冲击与静载荷试验表明，CFRP材料车头罩具有优良的抗冲击性能和力学性能[19]。2014年，唐山轨道客车有限责任公司对CFRP材料头罩进行了仿真研究，发现CFRP材料头罩刚度较高，整体结构变形协调，能够满足现代城轨车辆性能需求[20]。2022年，国内首个使用CFRP材料头罩的地铁列车“湾区蓝”列车在广州地铁18线正式启用运营。尽管这些应用取得了一定成果，但当前头罩结构设计大多仅考虑刚/强度，鉴于碰撞过程中复合材料失效模式的复杂性，相关研究方法和结论并不适用于结构耐撞性设计。

本文参考标准EN 15227：2020《铁路应用——铁路车辆的耐撞性要求》[21]，建立某型城轨列车CFRP材料司机室头罩有限元仿真模型。开展36 km/h正面碰撞刚性墙仿真，在此基础上提出两种结构耐撞性提升方案：(1) 改进方案一：通过对头罩前端开口位置进行包覆并设置变厚度增强筋板，同时将原T300材料替换为性能更优的T800材料；(2) 改进方案二：材料与改进方案一保持一致，设置头罩前侧环形多胞增强结构，并在钩缓两侧同一高度对称设置吸能管。通过对比分析三种结构方案的碰撞变形过程、平均力值和吸能量等指标，为CFRP材料头罩结构的耐撞性设计提供参考。

## 1　有限元模型的建立

### 1.1　几何模型及网格划分

如图1所示，某城轨列车头车碰撞吸能系统由头罩、全自动车钩及内部金属结构组成。采用大型商业有限元软件LS-DYNA建立头车端部有限元模型，如图2所示。本研究重点关注头罩变形过程，因此对头罩及与其接触部分结构进行精细化建模，并

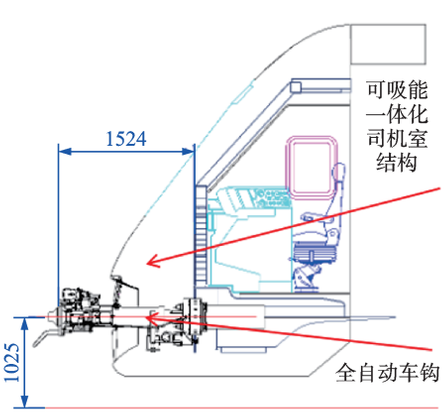


图1　头车端部布局方案（单位：mm）

Fig.1　Layout of the leadign car end (Unit: mm)

图2　头车司机室有限元模型

Fig.2　Finite element model of the leading car cap

在非变形区结构设置质量点来模拟整车重量(47 t),通过刚性单元连接质量点与司机室内部承载结构。为提高计算效率,钩缓和螺栓均采用梁单元模拟,司机室头罩、排障器以及内部承载结构均选择缩减积分单元,网格尺寸为10 mm。最终模型单元总数为979697,节点总数为967266。

### 1.2　边界条件

为充分考虑碰撞过程中不同结构间的相互作用,在刚性墙与钩缓装置、刚性墙与司机室头罩间设置自动面面接触,对复合材料司机室头罩设置自接触。图3所示为司机室端部约束设置示意图,在司机室端部截面部分节点设置边界条件,并约束节点相关方向的自由度。将碰撞速度设置为36 km/h。

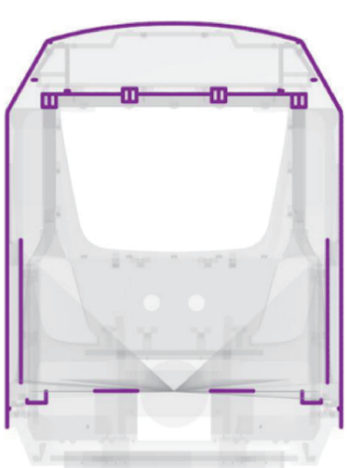

图3　约束设置

Fig.3　Constraint settings

### 1.3　材料模型及参数

使用LS-DYNA软件的20号材料定义司机室前方的刚性墙,弹性模量和泊松比分别为210 GPa和0.33。司机室承载结构使用24号材料定义,采用的T6005-t6铝合金材料弹性模量为69 GPa、泊松比为0.34,屈服强度为200 MPa。

头罩原材料为T300 CFRP平纹织物和环氧树脂基体。计算采用的本构模型为54号材料,该材料模型常用于复合材料的碰撞模拟仿真[16]。平面应力下,应力-应变关系为:

$$\varepsilon_{aa}=\frac{1}{E_a}(\sigma_{aa}-\nu_{ab}\sigma_{bb}) \tag{1}$$

$$\varepsilon_{bb}=\frac{1}{E_b}(\sigma_{bb}-\nu_{ba}\sigma_{aa}) \tag{2}$$

$$2\varepsilon_{ab}=\frac{1}{G_{ab}}\sigma_{aa}-\alpha\sigma_{ab}^3 \tag{3}$$

式中,a、b分别表示纤维方向与面内垂直纤维的方向,即纵向与横向;$\nu_{ab}$为泊松比;$E_a$、$E_b$与$G_{ab}$分别为材料的弹性模量与剪切模量;$\alpha$为剪切应力的非线性影响参数。

使用Chang-Chang失效准则判断复合材料的失效行为,Chang-Chang准则输入变量少且能够考虑拉伸、压缩等不同载荷下复合材料的失效模式,因而被广泛应用于CFRP结构的碰撞分析[22-25]。同时,该准则已集成在54号材料当中,具体如下[16]:

纤维拉伸

$$e_f^2=\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2+\beta\left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2-1 \tag{4}$$

纤维压缩

$$e_c^2=\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2-1 \tag{5}$$

基体拉伸

$$e_m^2=\left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2-1 \tag{6}$$

基体压缩

$$e_d^2=\left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2+\left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2-1\right]\left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_c}\right)+\left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2-1 \tag{7}$$

式中,$\beta$为纤维拉伸模式下剪切项的加权因子:$e_f^2$、$e_c^2$、$e_m^2$、$e_d^2$分别为纤维拉伸、纤维压缩与基体拉伸、基体压缩失效模式所对应的失效指数,当失效指数$\geqslant 0$时,表明对应模式发生失效。司机室蒙皮铺层共40层,铺层方案为$[0/90]_{20}$,每层厚度为0.2 mm,总厚度为8 mm。计算采用的材料参数如表1所示。

使用119号材料来模拟钩缓,加载和卸载曲线如图4所示,钩缓失效行程为703 mm。

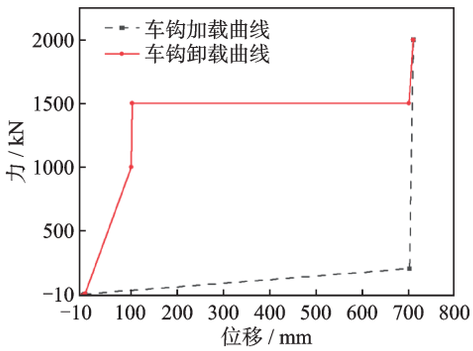


图 4　钩缓加载卸载曲线

Fig.4　Coupler buffer loading and unloading curves

**表 1　CFRP 材料参数**

**Tab.1　Material parameters of CFRP**

| 参数 | T300 | T800 |
|---|---|---|
| 密度 $\rho$/(g·cm$^{-3}$) | 1.45 | 1.45 |
| 纵向弹性模量 $E_a$/GPa | 50.38 | 75.60 |
| 横向弹性模量 $E_b$/GPa | 50.38 | 75.60 |
| ab 面泊松比 PRBA | 0.052 | 0.052 |
| ab 面剪切模量 $G_{ab}$/GPa | 3 | 3 |
| bc 面剪切模量 $G_{bc}$/GPa | 1 | 1 |
| ca 面剪切模量 $G_{ca}$/GPa | 1 | 1 |
| 纵向拉伸强度 $X_t$/MPa | 504 | 780 |
| 纵向压缩强度 $X_c$/MPa | 320 | 320 |
| 横向拉伸强度 $Y_t$/MPa | 504 | 780 |
| 横向压缩强度 $Y_c$/MPa | 320 | 320 |
| 剪切强度 $S_c$/MPa | 109 | 109 |

## 2　计算结果分析

图 5 所示为 57、110、160 和 260 ms(碰撞结束)时刻司机室头罩的碰撞变形过程。其中,57 ms 时头罩接触刚性墙并开始变形。观察可知,原始方案头罩前侧环向开孔的存在降低了其整体结构刚度,导致碰撞过程中头罩前端整体结构出现向下的翻转变形,与此同时,远离碰撞区域出现了大面积褶皱变形。观察碰撞结束时刻的整体破坏形态可知,头罩结构碎屑尺寸较大且结构完整性较好,表明碰撞过程中材料自身变形的吸能效率较低。

碰撞过程中司机室部件与刚性墙间的力-位移曲线如图 6 所示。观察可知,碰撞过程中,车辆碰撞能量主要由钩缓、头罩和承载结构吸收。碰撞开始时刻,钩缓力随碰撞位移的增大迅速增大,随后稳定承载,平台力为 1500 kN。位移约 525 mm 时头罩参与变形吸能,此时钩缓未完全压溃。随着位移的增大,头罩变形力逐渐增大,并在位移超过 1450 mm 后头罩迅速压实,导致碰撞力急剧增大。对司机室各部件力-位移曲线积分,计算得到碰撞过程中,钩

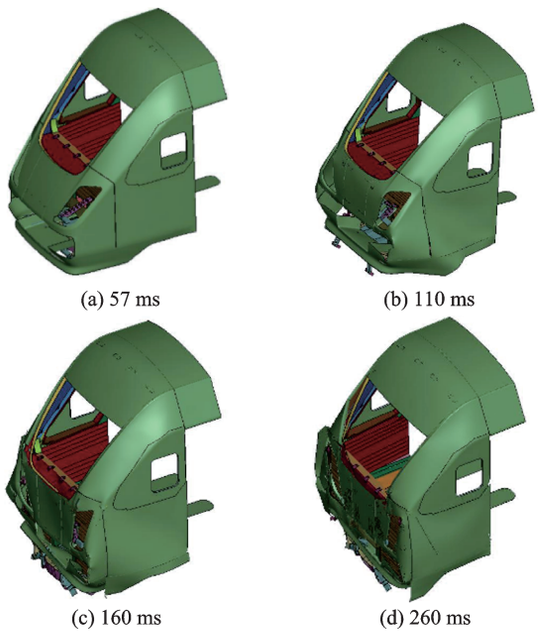


图 5　司机室不同时刻碰撞变形图

Fig.5　Collision deformation diagrams of the cab at different times

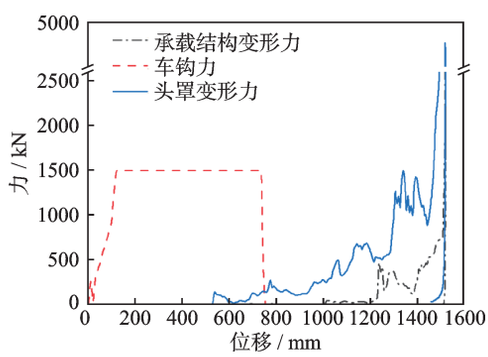


图 6　原始方案司机室部件与刚性墙间的力-位移曲线

Fig.6　Force-displacement curves of driver's cab components of the original scheme and rigid wall

缓装置吸收能量 1004.766 kJ,司机室头罩变形吸能 390.647 kJ,头罩平均承载力为 442.463 kN。

## 3　结构方案优化

为改善司机室碰撞过程中头罩的非稳定变形过程,从材料和结构设计两方面开展优化设计,并对改进后方案的撞击响应进行有限元计算。

### 3.1　改进方案一仿真分析

图 7 所示为改进方案一头罩结构示意:在原司机室头罩结构基础上,对开口位置进行包覆(绿色区域),考虑复合材料头罩的工艺可实现性,包覆位置厚度与周围区域厚度一致,为 8 mm;设置头罩前侧变厚度且宽 200 mm 的横向筋板以提高整体刚度,平面接触区域厚度为 16 mm(黄色),过渡区域为

12 mm(深蓝色);头罩材质由T300替换为T800(计算参数见表1)。

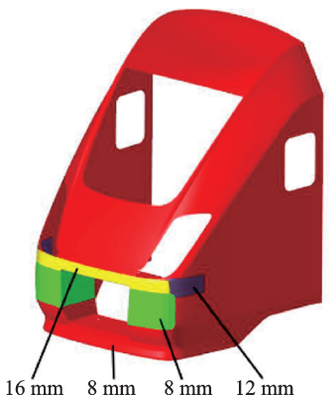


图7 改进方案一有限元模型

Fig.7 FEM of improvement scheme one

图8所示为改进方案一头罩在碰撞过程中典型时刻的变形情况。观察可知,整个碰撞过程共持续260 ms,头罩整体破坏模式虽和第2节原始方案结果接近,但改进方案头罩远离碰撞位置区域的褶皱和屈曲变形现象都有所改善。此外,头罩前端的碰撞变形位置在碰撞过程中的变形稳定性和破坏模式相较于原始方案表现更好。

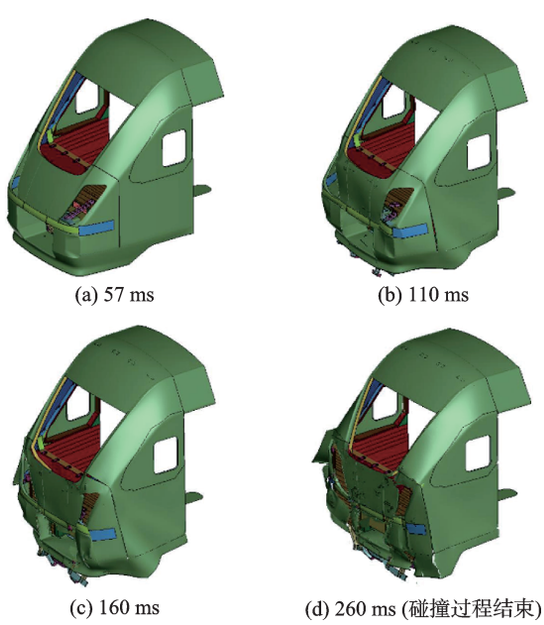


图8 改进方案一司机室不同时刻碰撞变形图

Fig.8 Collision deformation diagrams of the cab for improvement scheme one at different times

改进方案一的司机室部件力-位移曲线如图9所示。可以看到,与原始方案相比,头罩筋板加厚以及开口包覆设计显著改善了头罩承载能力。如表2所示,头罩吸能量和平均力分别为621.831 kJ和717.381 kN,相比原始方案分别提高了59.1%和62.1%。

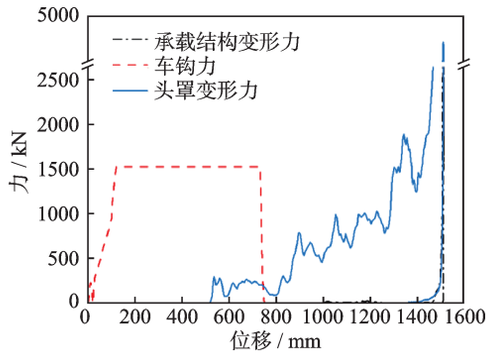


图9 改进方案一司机室部件力-位移曲线

Fig.9 Force-displacement curves of the cab components for improvement scheme one

**表2 三种方案耐撞性指标对比**

**Tab. 2 Comparison of crashworthiness indicators for three schemes**

| 名称 | 吸能量/kJ | 平均力/kN |
|---|---|---|
| 原始方案 | 390.647 | 442.463 |
| 改进方案一 | 621.831 | 717.381 |
| 改进方案二 | 679.816 | 784.678 |

### 3.2 改进方案二仿真分析

图10所示为头罩改进方案二:在头罩前侧筋板采用环形多胞("日字形"截面,由2个50 mm×25 mm矩形管)结构方案,厚度为5 mm,且多胞筋板结构垂直于撞击方向区域整体轮廓尺寸不变,从车灯下方延伸直至头罩侧面,截面尺寸逐渐减小。在钩缓两侧同一高度对称设置变厚度的复合材料吸能管。吸能管截面为圆形,长度和直径分别为1000 mm和160 mm,沿碰撞方向设置台阶铺层,分别为2 mm(200 mm长度段)和4 mm(800 mm长度段),

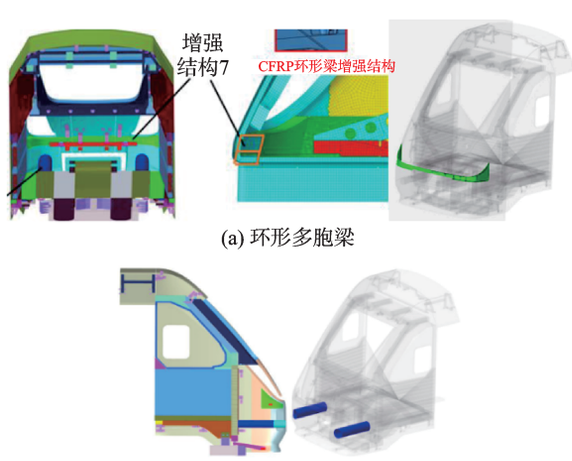


图10 改进说明

Fig.10 Improvement instructions

吸能管一端固定于安装墙，另一端粘结于头罩内部结构。

改进方案二的碰撞过程如图11所示。观察可知，整个碰撞过程共持续210 ms，与改进方案一的开口包覆设计相比，环形多胞梁与变截面筋板设计使得改进方案二的头罩前端变形更加稳定。头罩远离碰撞位置区域的褶皱和屈曲变形现象得到进一步改善，吸能管的引入也使得头罩吸能效率得到了显著提升。

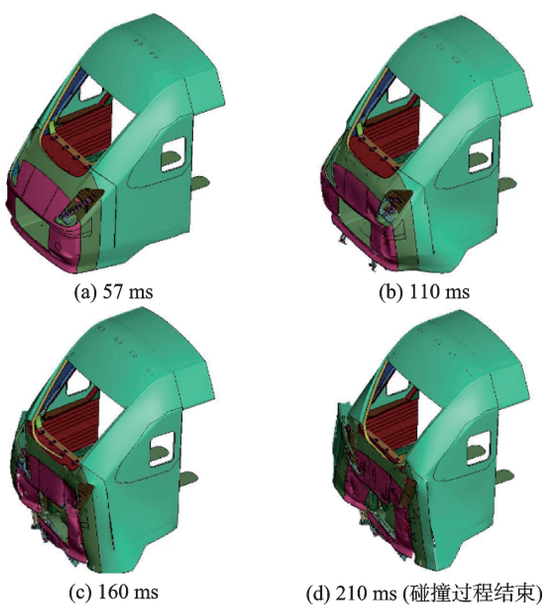


图11　改进方案二司机室不同时刻碰撞变形图

Fig.11　Collision deformation diagrams of the cab for improvement scheme two at different times

改进方案二司机室部件力-位移曲线如图12所示。可以看到，改进方案二的司机室头罩结构承载能力得到了进一步提升。如表2所示，根据曲线积分得到头罩吸能量和平均力分别为679.831 kJ和784.678 kN，相比原始方案分别提高了74.0%和77.3%。

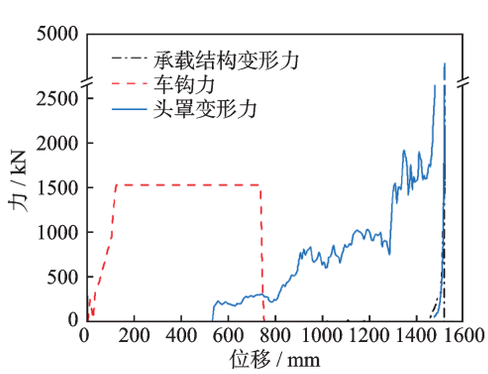


图12　改进方案二司机室力-位移曲线

Fig.12　Force-displacement curves of the cab components for improvement scheme two

## 4　结　论

本文参考标准EN 15227：2020《铁路应用——铁路车辆的耐撞性要求》，开展某型列车头车司机室端部结构有限元仿真计算，在此基础上提出结构耐撞性提升方案，计算结果表明：

（1）原始方案司机室头罩前侧环向开孔降低了整体结构刚度，致使碰撞时头罩前端出现向下翻转变形，远离碰撞区域产生大面积的屈曲失稳。同时，头罩结构碎屑尺寸大、完整性好，这表明材料自身变形吸能效率较低。在碰撞过程中，头罩变形吸能390.647 kJ，平均承载力为442.463 kN。

（2）两种改进方案均显著改善了头罩远离碰撞位置区域的褶皱与屈曲变形现象，并提升了头罩前端碰撞变形位置在碰撞过程中的变形稳定性。与原始方案相比，改进方案一头罩的吸能量和平均力值相比原始方案分别提升了59.1%和62.1%；改进方案二的吸能量与平均力值相比原始方案分别提升了74.0%和77.3%。其中，改进方案二相比改进方案一有更高的吸能量和平均力值。

传统复合材料司机室头罩结构设计通常基于相关标准规定仅考虑刚/强度需求。本文结合某型城轨车辆耐撞性提升需求，提出一种考虑耐撞性的结构设计方法，并针对EN 15227标准中司机室以36 km/h的速度正面碰撞刚性墙工况进行研究。考虑实际轨道车辆运营环境的复杂性，后续可拓展至不同速度、角度和不同类型障碍物等复杂碰撞工况。

**参考文献：**

[1] 武舒然，王会娟，闫宏芳，等. 时速160公里智能市域动车组司机室头罩的结构设计[J]. 科技创新与应用，2021，11(17)：91-93.

[2] 邹欣. 考虑气动与被动安全性的新型城际列车司机室头罩设计[D]. 大连：大连理工大学，2020.

[3] 张长庚，陈晶晶，卫亮. 某地铁车辆考虑头罩的碰撞性能仿真对比研究[J]. 技术与市场，2024，31(5)：36-39.

[4] 朱云，金希红，陆军. 基于TSI要求的高安全性司机室结构设计[J]. 电力机车与城轨车辆，2022，45(4)：37-40.

[5] 谢素超，杜炫锦，马闻. 铁道车辆底架前端承载式吸能结构设计及优化[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2022，53(5)：1760-1769.

[6] 靳智慧. 双向承载蜂窝防爬器的设计与碰撞吸能评估研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.

[7] 朱小波，许齐，李培功. 内燃机车司机室防撞结构轻量化及耐撞性研究[J]. 铁道机车与动车，2020(8)：34-37.

[8] 冯彬，沈裕文. 五模块低地板有轨车辆头罩设计[J]. 轨道交通装备与技术，2019，27(1)：1-4.
[9] 孟庆利，杨国纪. 城轨车辆司机室头罩的结构功能以及造型分析[J]. 电力机车与城轨车辆，2011，34(1)：21-24.
[10] 肖守讷，江兰馨，蒋维，等. 复合材料在轨道交通车辆中的应用与展望[J]. 交通运输工程学报，2021，21(1)：154-176.
[11] 李明高，张丽娇. 轨道交通装备复合材料应用现状及发展趋势展望[J]. 纺织导报，2020(7)：19-24.
[12] 凌攀，黄洋，任万跃. 玻璃钢与碳纤维头罩应用对比分析[J]. 轨道交通材料，2024，3(4)：38-41.
[13] JIANG J，ZHANG Z F，FU J Y，et al. Impact damage behavior of lightweight CFRP protection suspender on railway vehicles[J]. Materials & Design，2022，213：110332.
[14] WANG D F，LIU B C，LIANG H Y. Investigation into design strategy of aluminum alloy-CFRP hybrid tube under multi-angle compression loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences，2023，248：108207.
[15] 宋燕利，杨龙，郭巍，等. 面向汽车轻量化应用的碳纤维复合材料关键技术[J]. 材料导报，2016，30(17)：16-25.
[16] 庄蔚敏，刘洋，刘西洋. 碳纤维增强环氧树脂基复合材料圆管轴向压溃分层失效仿真[J]. 机械工程学报，2020，56(12)：107-115.
[17] 张新元，何碧霞，李建利，等. 高性能碳纤维的性能及其应用[J]. 棉纺织技术，2011，39(4)：65-68.
[18] 陈东东，肖守讷，阳光武，等. 触发机制对复合材料吸能结构轴向压溃行为的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2022，53(5)：1804-1812.
[19] 丁叁叁，田爱琴，王建军，等. 高速动车组碳纤维复合材料应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆，2015，38(增刊1)：1-8.
[20] 王永刚，李东锋，刘森. 城市轨道交通车辆轻量化司机室结构研究[J]. 铁道机车与动车，2013(11)：5-7.
[21] EN 15227：2020 铁路应用——铁路车辆的耐撞性要求[S].
[22] GOUZI M B，EL FAKKOUSSI S，EL KHALFI A，et al. Numerical study of an automotive crash box in carbon fiber reinforced polymer material using Chang failure criteria[J]. Mathematics，2024，12(23)：3673.
[23] 彭煜轩，周先军. 碳纤维复合材料保险杠碰撞性能研究[J]. 机电工程技术，2024，53(12)：192-197.
[24] 周政言，李响，朱璐，等. 复合材料折纸管吸能特性多目标优化设计[J]. 复合材料科学与工程，2024(2)：102-108.
[25] 万江鹏. 双舷侧复合材料船舶碰撞响应与损伤研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2022.

(上接第27页)

[17] WU Y C，QI Z P，SHI Z W，et al. BlockGaussian：efficient large-scale scene novel view synthesis *via* adaptive block-based Gaussian splatting[EB/OL]. (2025-04-12). https://arXiv.org/abs/2504.09048.
[18] XU Q S，SU W J，LIAO X Y，et al. Geo-3DGS：multi-view geometry consistency for 3D Gaussian splatting and surface reconstruction[EB/OL]. (2024-09-27)[2026-09-12]. https://openreview.net/forum?id=c4Nh4A8Xn5.
[19] LIU S Y，TANG X，LI Z H，et al. OccluGaussian：occlusion-aware Gaussian splatting for large scene reconstruction and rendering[C]//Proceedings of IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE，2025：26643-26652.
[20] 高建，陈林卓，沈秋，等. 基于三维高斯溅射技术的可微分渲染研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2024，61(16)：1611010.
[21] YANG L H，KANG B Y，HUANG Z L，et al. Depth anything V2[C]//Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems 37. Neural Information Processing Systems Foundation，Inc. (NeurIPS)，2024：21875-21911.
[22] CHUNG J，OH J，LEE K M. Depth-regularized optimization for 3D Gaussian splatting in few-shot images[C]//Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). IEEE，2024：811-820.
[23] TRIGGS B，MCLAUCHLAN P F，HARTLEY R I，et al. Bundle adjustment：a modern synthesis[C]//Vision Algorithms：Theory and Practice. Berlin，Heidelberg：Springer，2000：298-372.
[24] WANG Z，BOVIK A C，SHEIKH H R，et al. Image quality assessment：from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing，2004，13(4)：600-612.
[25] HORÉ A，ZIOU D. Image quality metrics：PSNR vs. SSIM[C]//Proceedings of 20th International Conference on Pattern Recognition. IEEE，2010：2366-2369.
[26] ZHANG R，ISOLA P，EFROS A A，et al. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric[C]//Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE，2018：586-595.