

有轨电车复合顶盖用 PET 泡沫夹层板 抗冲击性能分析*

廖婷婷 王明猛 肖守讷 阳光武 杨 冰 朱 涛

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 对某泡沫夹层板进行落球冲击实体试验, 测试了落球冲击对上面板造成的凹坑尺寸; 建立有限元模型, 从夹层板各部位能量吸收比重、接触力、上面板最大有效应力和变形特征等方面对上面板厚度不同的夹层板抗冲击性能进行分析比较; 明确上面板厚度为 0.8 mm、下面板厚度为 0.6 mm 的 PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)泡沫夹层板为有轨电车复合顶盖的最优选择。该板兼具较优的抗冲击性能和经济实用性。对某有轨电车复合顶盖进行有限元建模, 计算了 7 个典型冲击工况下复合顶盖的结构强度和变形特征, 验证了该泡沫夹层板顶盖结构的可靠性和安全性。

关键词 有轨电车顶盖; 泡沫夹层板; 抗冲击性能

中图分类号 U482.105

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.013

Impact Resistance Analysis of PET Foam Sandwich Panels for Composite Roof of Tram

LIAO Tingting, WANG Mingmeng, XIAO Shoune, YANG Guangwu, YANG Bing, ZHU Tao

Abstract Ball drop impact performance physical test is carried out on a foam sandwich panel, and the size of the dent on panel made by the ball drop impact is measured. Finite element model is established. The impact resistance of sandwich panels with upper panel of different thickness is comparatively analyzed from the four aspects of the energy absorption ratio of each part of the sandwich panel, the contact force, the upper panel maximum effective stress and the deformation characteristics. It is found that when the upper panel thickness is 0.8 mm, the lower one thickness is 0.6 mm, the PET sandwich panel is the optimal choice for tram composite roof, and possesses both optimized impact resistance and economic feasibility. Finite element model of a tram composite roof is established, and the structural strength and deformation characteristics of the composite roof under 7 typical impact conditions are calculated, verifying the reliability and safety of PET sandwich

panel roof structure.

Key words tram roof; PET sandwich panel; impact resistance performance

Author's address State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

泡沫夹层板具有质轻、比刚度高、耐腐蚀性好、稳定性强等特点, 在铁路行业中广泛应用^[1-3]。夹层板面板需有良好的拉伸压缩强度, 以承受弯曲和皱曲载荷; 芯子材料需要在厚度方向具有足够的拉伸与剪切刚度, 以抵抗皱曲和局部凹陷失效。由于泡沫芯子的低密度特性, 故在质量相同的条件下, 泡沫芯材夹层板的结构刚度较实心夹层板结构刚度更优^[4]。

PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)泡沫因具有良好的静力和动力性能, 以及可使用环境的温度范围大、耐水性好等优点^[5], 作为夹层板内心结构, 被广泛用于列车的地板、裙板及顶盖等承力部件。车辆用夹层板部件不可避免会受到冲击载荷。低速冲击会影响复合材料夹层板结构的完整性, 使其刚度和强度都大幅下降。可见, 夹层板在冲击载荷作用下的动力响应对评价列车运行安全性至关重要。

国内外学者对于不同夹层板的低速冲击性能和影响其冲击性能的因素进行了广泛的研究。文献[6]研究结果表明: 形状记忆合金混合面板泡沫夹层板低速冲击响应试验中的损伤面积明显减小, 最大接触力增加; 文献[7]在缝纫复合材料泡沫芯夹层结构的低速冲击损伤数值分析中发现, 未缝纫和缝纫的三明治结构损伤模式不同; 文献[8]发现在正多边形金属点阵格栅夹层结构中增加三明治板芯层格栅单元边数, 能提高板的抗冲击性能及整体刚度; 文献[9]提出了新的泡沫夹层板理论模型。

* 国家重点研发计划课题(2016YFB1200602-14)

本文对某顶盖泡沫夹层板试件进行落球冲击实体试验,基于夹层板承载能力和变形特征,采用有限元分析方法对夹层板进行选型,并对某低地板有轨电车复合顶盖进行仿真分析、评估,以验证顶盖结构的可靠性和安全性。

1 落球冲击实体试验

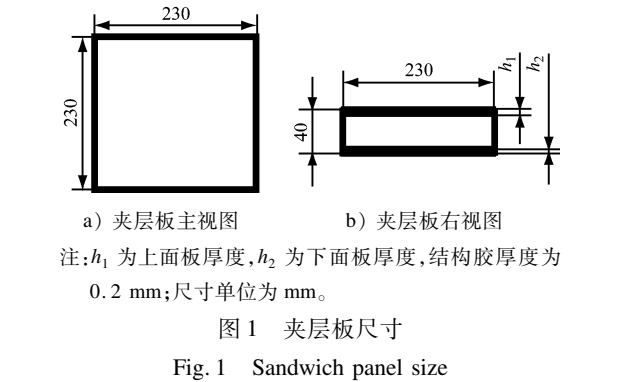
本研究通过落球冲击实体试验来验证夹层板的抗冲击性能。落球冲击实体试验采用的钢球和夹层板规格如表 1 所示。

表 1 钢球和夹层板规格

Tab.1 Specifications of steel ball and sandwich panel

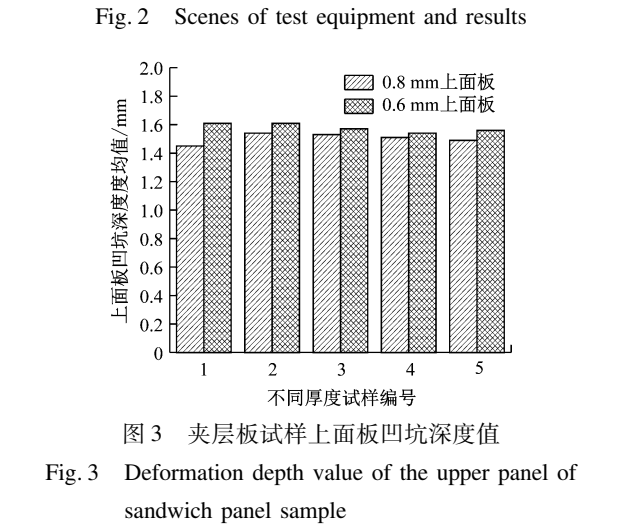
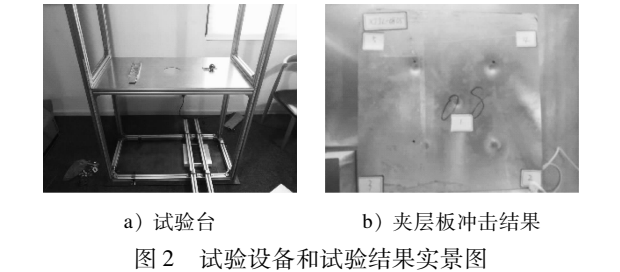
参数	取值	
钢球质量/g	342	
钢球直径/mm	42.8	
第一组夹层板	上面板厚度 h_1 /mm	0.8
	下面板厚度 h_2 /mm	0.6
第二组夹层板	上面板厚度 h_1 /mm	0.6
	下面板厚度 h_2 /mm	0.6
夹层板总厚度/mm	40	

夹层板尺寸如图 1 所示。2 组夹层板的上、下面板均采用轻质铝合金,芯材采用高强度 PET 泡沫。芯材与面板用结构胶粘接。



试验过程为:首先,将夹层板固定放于地面上,将钢球置于一带孔平台,并使钢球下表面与夹层板上面板间距离 H 保持为 0.8 m;然后,钢球自由落下冲击夹层板,且每个夹层板均在不同的位置重复 5 次冲击。试验设备和试验结果图片如图 2 所示,上面板凹坑深度统计如图 3 所示。计算可得, $h_1 = 0.8$ mm 时的上面板平均凹坑深度为 1.504 mm, $h_1 = 0.6$ mm 时的上面板平均凹坑深度为 1.578 mm。

在落球冲击载荷作用下,上面板的变形可以分



为两个区域:在落球作用区域,变形表现为局部压缩;在落球作用的周边区域,变形表现为明显的大变形。在夹层板的撞击加载和爆炸加载试验中也观察到类似的现象^[10-11]。

由能量守恒定律,钢球的临界冲击速率 v_j 为:

$$v_j = \sqrt{2gH} \tag{1}$$

由动量和动能公式,得到动量 p 和冲击能 E :

$$p = mv_j \tag{2}$$
$$E = \frac{1}{2}mv_j^2 \tag{3}$$

式中:

- g ——重力加速度;
- m ——钢球的质量。

计算可得, $v_j = 3.962$ m/s, $p = 1.355$ kg m/s, $E = 2.684$ J。

2 有限元模型计算及夹层板选型

2.1 有限元模型的建立及力学参数的选择

考虑到碰撞机理的复杂性,为更加深入地研究钢球对夹层板的冲击作用,建立有限元模型,进行动态接触分析。

定义钢球与上面板的接触为面-面接触。为了防止穿透,夹层板各层之间定义自接触,并控制沙

漏现象,长度、质量和时间的计算单位分别为 mm、t 及 s。有限元模型如图 4 所示。

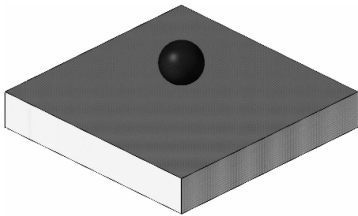


图 4 落球冲击过程有限元模型

Fig. 4 Finite element model of falling ball impact process

有限元模型中:夹层板的上、下面板均使用壳单元离散,芯材、钢球和胶层采用实体单元离散;上、下面板采用塑性运动强化(Plastic Kinematic)材料模型,芯材采用低密度泡沫(Low Density Foam)材料模型,钢球采用刚体(Rigid)材料模型。为了准确模拟胶粘连接方式,胶层采用带失效模式的内聚力(Cohesive)材料模型。该模型基于粘接域理论,建立界面牵引力与界面上下表面间相对位移之间的关系。本文选用界面牵引力-界面相对位移的三线性本构关系。

2.2 有限元模型的可靠性验证

本文从凹坑深度和接触力数值两方面进行分析。将试验凹坑深度和理论解析解的接触力分别与相应有限元计算结果对比,验证有限元模型的准确性。

当 $h_1=0.8\text{ mm}$ 、 $h_2=0.6\text{ mm}$ 时,由式(1)将钢球从 0.8 m 高度落下等效为钢球以 3 937 mm/s 从 10 mm 高度落下,有限元计算总时长取 0.01 s 即可模拟出完整冲击过程。在钢球冲击夹层板后,接触力开始激增,达到最大值后迅速衰减至 0。引入动量计算式(见式(4)),计算在钢球与夹层板接触过程中的接触力,与有限元模型仿真结果进行对比。

$$mv_j = F\Delta t \tag{4}$$

式中:

Δt ——钢球最初接触夹层板直到钢球速度为 0 的时间间隔;

F ——钢球与上面板之间的接触力;有限元模型仿真计算中, F 取 Δt 内的接触力平均值。

由计算结果得到钢球接触的时间和接触时的速度如表 2 所示。有限元模型计算中,夹层板有 2 种约束条件:①底面全约束,与实体试验一致;②底面四周约束。仿真得到上面板凹坑深度及接触力如表 3 所示。

表 2 钢球接触时间和速度

Tab. 2 Steel ball contact time and velocity

项目	数值
最初接触时间/s	0.002 49
$v_j/(\text{mm/s})$	3 962
钢球速度为 0 的时间/s	0.003 34
$\Delta t/\text{s}$	8.5×10^{-4}

表 3 上面板凹坑深度和接触力对比

Tab. 3 Comparison of dent deformation depth and contact force of upper panel

项目	凹坑深度/mm	F/N
实体试验结果	1.504	1 604.2
底面全约束的计算值	1.535	1 508
底面四周约束的计算值	1.621	1 465

由表 3 可知:与实体试验结果相比,在底面全约束条件下,上面板的凹坑深度计算值误差仅为 2.1%, F 计算值误差仅为 6.0%,说明仿真计算结果和实体试验结果吻合较好;当小能量冲击时,设置用底面全约束或四周约束的约束条件,对仿真结果影响不明显。这证明了该有限元模型仿真计算方法的有效性和准确性。

2.3 夹层板选型

本文基于能量吸收分配、冲击过程接触力、上面板最大应力及变形特征等方面有限元模型计算结果,对不同尺寸夹层板进行选型。

2.3.1 能量吸收分配

当 $E=20\text{ J}$ 时,不同夹层板各部位吸收的能量占总吸收能量的比例 α 如表 4 所示。

表 4 夹层板不同部位的 α

Tab. 4 α of different parts of the sandwich panel

部位	$\alpha/\%$			
	$h_1=0.4\text{ mm}$	$h_1=0.6\text{ mm}$	$h_1=0.8\text{ mm}$	$h_1=1.0\text{ mm}$
上面板	26.05	22.51	18.11	10.37
上胶层	1.39	1.41	1.08	1.00
芯材	72.30	75.82	80.55	88.38
下胶层	0.26	0.26	0.26	0.25

由表 4 可以看出:上面板和芯材是主要的吸能部位; h_1 越大,上面板能量吸收比例越小,相应的芯材能量吸收比例越大。可见, h_1 过大时,芯材容易发生破坏,所以不能一味地增大 h_1 。

2.3.2 接触力

有限元模型计算可得 h_1 不同时的 F 最大值

F_{\max} , 及其与 $h_1 = 0.4\text{ mm}$ 时 F_{\max} 相比的变化比例 β_1 , 如表 5 所示。在冲击过程中, F_{\max} 越大, 说明夹层板的抗冲击性能越好。从表 5 可以看出: h_1 越大, 夹层板抗冲击性能越好; $h_1 = 0.8\text{ mm}$ 时, 夹层板抗冲击性能最优。但结合表 4 及表 5 来看, $h_1 > 0.8\text{ mm}$ 时, 增加 h_1 对夹层板提高抗冲击性能意义不大。

表 5 冲击过程中 F_{\max} 及 β_1

Tab.5 Maximum value of F and β_1 during impact		
h_1/mm	F_{\max}/N	$\beta_1/\%$
0.4	2 166	
0.6	2 296	6.00
0.8	2 409	11.20
1.0	2 455	13.30

2.3.3 上面板最大应力

表 6 为 h_1 不同时夹层板在冲击过程中的最大有效应力 σ_{\max} , 及其与 $h_1 = 0.4\text{ mm}$ 时 σ_{\max} 相比的变化比例 β_2 。在冲击过程中, 上面板 σ_{\max} 越大, 说明上面板越容易失效, 夹层板的抗冲击性能越差。

表 6 冲击过程中上面板的 σ_{\max} 及 β_2

Tab.6 σ_{\max} and β_2 of the upper panel during impact		
h_1/mm	σ_{\max}/MPa	$\beta_2/\%$
0.4	231.0	
0.6	228.6	-1.0
0.8	226.9	-1.8
1.0	226.6	-1.9

从表 6 可以看出: h_1 越大, 夹层板的抗冲击性能越好; 与 $h_1 = 0.4\text{ mm}$ 相比, $h_1 = 0.8\text{ mm}$ 的夹层板能更有效地抵抗冲击; $h_1 = 0.8\text{ mm}$ 的夹层板与 $h_1 = 1.0\text{ mm}$ 的夹层板抗冲击性能差别微小。

2.3.4 变形特征

夹层板结构受冲击载荷作用的动态过程可分为 3 个阶段: 第 1 阶段为冲击传播到上面板阶段, 上面板获得一定速度, 其他部位保持静止; 第 2 阶段为芯材压缩阶段, 冲击传播到芯材, 芯材被压缩, 而下面板保持静止; 第 3 阶段为弯曲拉伸阶段, 上面板和芯材共同变形, 冲击能量被耗散和吸收^[12]。

图 5 为 h_1 不同的夹层板在不同能量冲击下的上面板凹坑深度。由图 5 可见: 在 E 相同时, h_1 越大, 夹层板变形越小; $h_1 > 0.8\text{ mm}$ 时, h_1 的增加对夹层板凹坑深度减小的作用越来越小。

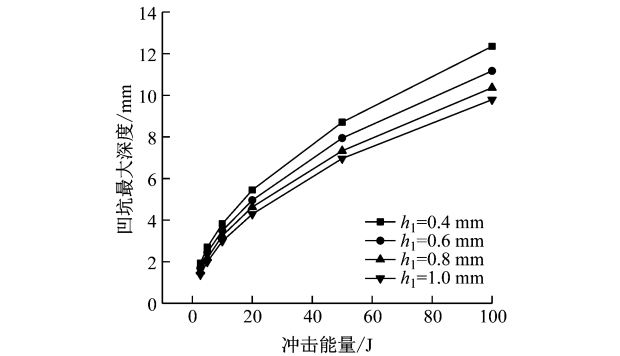


图 5 不同冲击能量下上面板中心凹坑深度
Fig. 5 Deformation of the center of the upper panel under different impact energies

图 6 为 4 种 h_1 不同的夹层板在 $E = 20\text{ J}$ 冲击工况时的上面板变形分布云图。各上面板总变形区域直径 d 及其与 0.4 mm 厚夹层板相比的变化比例 β_3 如表 7 所示。

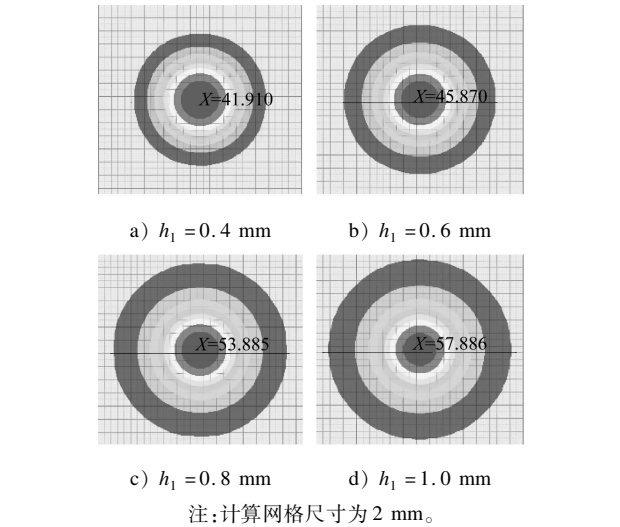


图 6 $E = 20\text{ J}$ 时的上面板变形云图
Fig. 6 Deformation nephogram of the upper panel at $E = 20\text{ J}$

表 7 冲击后上面板的 d 及 β_3

Tab.7 d and β_3 of the upper panel after impact		
h_1/mm	d/mm	$\beta_3/\%$
0.4	40.31	
0.6	45.57	13.00%
0.8	52.29	29.70%
1.0	54.89	36.17%

可知, 上面板厚度越大, 总变形区域越大, 受冲击后产生的变形分配越均匀。但当上面板厚度达到 0.8 mm 后, 增大厚度对变形分配的均匀性影响不再明显。

2.3.5 顶盖夹层板选型

根据有限元模型计算结果,综合考虑夹层板抗冲击性能、夹层板总体质量和成本等, $h_1=0.8\text{ mm}$ 、 $h_2=0.6\text{ mm}$ 的 PET 泡沫夹层板为最优选择。本文以该型号夹层板作为某有轨电车复合顶盖进行抗冲击性能分析。

3 有轨电车复合顶盖的抗冲击性能

为了满足轻量化要求,某有轨电车复合顶盖采用 $h_1=0.8\text{ mm}$ 、 $h_2=0.6\text{ mm}$ 的 PET 泡沫夹层结构,其主要由边框型材、设备安装座及三明治夹层板等组成。复合顶盖的三维模型如图 7 所示。为了提高有限元模型仿真结果的准确性,本研究对顶盖中粘接胶层等结构也建立了有限元模型。

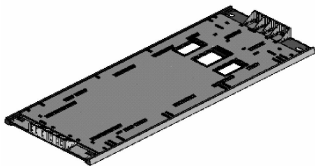


图 7 低地板有轨电车复合顶盖三维模型
Fig.7 3D model of composite roof for low-floor tram

3.1 有限元模型说明

复合顶盖各部件具体材料参数如表 8 所示。

表 8 复合顶盖结构及材料

Tab.8 Composite roof structure and material				
部件	结构	厚度/mm	材料	屈服强度/MPa
三明治夹层板	上面板	0.8	6 系铝合金	210.0
	下面板	0.6	6 系铝合金	210.0
	芯材	38.2	轻质高强度泡沫	1.4
	胶层	0.2	结构胶	3.2
型材	边框型材	3.0,3.5,4.0	6 系铝合金	215.0
胶层	粘接夹层板和骨架	7.2,10.7	弹性胶	

有限元模型中,复合顶盖结构主要包括层合板单元、实体单元、壳单元及 1D 单元(线单元)等。

3.2 边界条件及载荷设置

基于低地板有轨电车复合顶盖实体模型,建立三维有限元模型,并根据文献[13]选取 6 个冲击载荷工况及 1 个落球冲击工况。7 种工况如表 9 所示。有限元模型中,车体主结构为全约束。

表 9 7 个冲击载荷工况详述表

Tab.9 Details of 7 impact load working condition				
工况	工况描述	载荷加速度/g		
		横向	纵向	垂向
1	纵向正冲击	5		1
2	纵向负冲击	-5		1
3	横向正冲击		3	1
4	横向负冲击		-3	1
5	垂向正冲击			3+1
6	垂向负冲击			3-1
7	落球冲击			1

3.3 复合顶盖结构强度计算结果

在工况 1~6 下,复合顶盖结构最大变形与各部件最大应力的有限元计算结果如表 10 所示。此外,工况 7 中,在落球冲击载荷作用下,落球冲击处凹坑深度为 1.98 mm,面板变形区域直径为 27.98 mm。

表 10 复合顶盖最大变形与各部件最大应力

Tab.10 Maximum deformation of the composite roof and the maximum stress of each component

工况	最大应力/MPa				最大变形/mm	最大变形位置
	面板	芯材	型材	胶层		
1	38.83	0.58	10.14	2.49	2.95	高速断路器安装座
2	38.25	0.54	7.72	2.43	3.37	蓄电池安装座
3	42.70	0.49	7.71	1.35	2.11	空调安装处面板
4	41.42	0.49	7.35	1.35	2.12	空调安装处面板
5	96.79	1.05	19.84	2.77	6.84	空调安装处面板
6	48.39	0.53	9.92	1.39	3.42	空调安装处面板

由有限元模型仿真计算结果可知, $h_1=0.8\text{ mm}$ 、 $h_2=0.6\text{ mm}$ 时,在工况 1~6 下,复合顶盖各部位强度都满足要求;最大变形都出现在复合顶盖与大型设备相连处;纵向载荷下,最大变形出现在设备的安装座上;横向和垂向载荷下,最大变形出现在安装大型设备的面板处;变形量均满足使用要求。在落球冲击载荷下,上面板出现的凹坑与试验结果吻合,凹坑变形特征满足使用要求。

4 结语

针对某低地板有轨电车复合顶盖的泡沫夹层

板,通过实体试验测试了落球冲击对上面板造成的凹坑尺寸,基于有限元模型仿真计算结果,综合考虑夹层板的承载能力和经济性,选择了合适的面板尺寸,并通过三维有限元模型对复合顶盖进行抗冲击性能分析,主要结论如下:

1) 对比落球冲击试验与有限元模型的仿真计算结果可知,在小能量冲击下,有限元模型可以有效模拟落球冲击过程,计算结果基本准确。

2) 从夹层板各部位能量吸收比重、接触力、上面板最大有效应力和变形特征等方面进行有限元模型仿真计算, $h_1=0.8\text{ mm}$ 、 $h_2=0.6\text{ mm}$ 的PET泡沫夹层板为最优选择,其抗冲击性能较优且兼具经济实用性。

3) 由低地板有轨电车复合顶盖在7个典型冲击载荷工况下的变形特征可知:最大变形都发生在与大型设备连接处或落球冲击处;纵向载荷下最大变形出现在设备安装座上,横向和垂向载荷下最大变形发生在夹层板面板上;强度和变形都满足使用要求;落球冲击载荷下夹层板的变形特征满足使用要求。

参考文献

- [1] 张广成,何祯,刘良威,等. 夹层结构复合材料低速冲击试验与分析[J]. 复合材料学报,2021(4):170.
ZHANG Guangcheng, HE Zhen, LIU Liangwei, et al. Low-velocity impact experiment and analysis of sandwich structure composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021(4):170.
- [2] WANG J, WAAS A M, WANG H. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels[J]. Composite Structure, 2013,96:298.
- [3] ZHOU J, HASSAN M Z, GUAN Z, et al. The low velocity impact response of foam-based sandwich panels[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72:1781.
- [4] HOSUR M V, ABDULLAH M, JEELANI S. Manufacturing and low-velocity impact characterization of foam filled 3-D integrated core sandwich composites[J]. Composite Structures, 2005,

69:167.

- [5] 李涛,陈蔚,成理,等. 泡沫夹层结构复合材料的应用与发展[J]. 科技创新导报,2009(14):3.
LI Tao, CHEN Wei, CHENG Li, et al. The development and application of foam sandwich structure composites[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009(14):3.
- [6] LI H, WANG Z, YU Z, et al. The low velocity impact response of foam core sandwich panels with a shape memory alloy hybrid face-sheet[J]. Materials, 2018,11:1.
- [7] 郑晓霞,郑锡涛,屈天骄,等. 缝纫泡沫芯夹层结构低速冲击损伤分析[J]. 西北工业大学学报,2010(5):774.
ZHENG Xiaoxia, ZHENG Xitao, QU Tianjiao, et al. Exploring damage characteristics of stitched foam-core sandwich structure under low-velocity impact[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010(5):774.
- [8] 杨辉,尹冠生,李轩,等. 金属点阵格栅三明治结构低速冲击响应分析[J]. 塑性工程学报,2018(4):245.
YANG Hui, YIN Guansheng, LI Xuan, et al. Analysis on response of metal lattice sandwich structures under low velocity impact[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018(4):245.
- [9] FELI S, JAFARI S S. Analytical modeling for perforation of foam-composite sandwich panels under high-velocity impact[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017,39:401.
- [10] 宋延泽,王志华,赵隆茂,等. 撞击载荷下泡沫铝夹层板的动力响应[J]. 爆炸与冲击,2010(3):301.
SONG Yanze, WANG Zhihua, ZHAO Longmao, et al. Dynamic response of foam sandwich plates subjected to impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2010(3):301.
- [11] ZHU F, ZHAO L, LU G, et al. Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels-experimental investigations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35:937.
- [12] NURICK G N, LANGDON G S, CHI Y, et al. Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast-part1: experiments[J]. Composite Structures, 2009,91:433.
- [13] BSI. Railway applications-structural requirements of railway vehicle bodies. Part 1: locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons): BS EN 12663-1:2010[S]. Brussels: CENELEC, 2014.

(收稿日期:2020-05-24)

全国城市轨道交通运营里程超9 000 km

截至2022年6月底,我国内地31个省(自治区、直辖市)共有51个城市开通运营城市轨道交通线路277条,运营里程达9 067 km。实际开行列车279万列次,完成客运量为17.8亿人次,进站量为10.8亿人次。6月份,新增运营里程150 km,其中:新增运营线路2条,分别为长沙地铁6号线和昆明地铁5号线;新增运营区段5个,分别为杭州地铁3号线一期后通段、10号线一期一站一区间,重庆地铁4号线二期,郑州地铁城郊线二期,嘉兴有轨电车一期工程T1线后通段。6月份,51个城市完成客运量环比增加4.5亿人次,增长33.8%,同比去年6月减少2.1亿人次,下降10.6%。

(来源:交通运输部官网)