

# 轨道车辆用侧墙板碳足迹核算对比研究

陈国帼<sup>1</sup> 李拥军<sup>1</sup> 王晓玲<sup>1</sup> 孙方<sup>1</sup> 古立然<sup>2</sup> 韦北胜<sup>2</sup>

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京; 2. 广电计量检测集团股份有限公司, 510656, 广州)

**摘要** [目的]通过对2种不同材料的侧墙板的碳足迹进行研究,探索其内装产品碳足迹的核算方法,以期指导设计师实现低碳设计。[方法]选取轨道车辆内装PC(聚碳酸酯)材料侧墙板及玻璃钢侧墙板为研究对象,按照英国标准协会发布的PAS 2050:2011《商品和服务在生命周期温室气体排放的评价规范》的全生命周期评价方法,核算了2种不同材料的侧墙板生命周期各阶段的碳足迹及贡献度。[结果及结论]在系统边界范围内,玻璃钢侧墙板碳足迹核算结果比PC侧墙板碳足迹核算结果大,且2种侧墙板在原材料获取阶段碳足迹的贡献度最大。在满足车辆性能前提下,选择碳足迹更低的PC侧墙板,更有利于整车降碳。

**关键词** 轨道车辆; 全生命周期; 侧墙板; 碳足迹核算; 贡献度

中图分类号 U270.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.023

## Comparative Study on Carbon Footprint Accounting of Side Wallboard for Rail Vehicles

CHEN Guoguo<sup>1</sup>, LI Yongjun<sup>1</sup>, WANG Xiaoling<sup>1</sup>, SUN Fang<sup>1</sup>, GU Liran<sup>2</sup>, WEI Beisheng<sup>2</sup>

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. GRG Metrology & Test Group Co., Ltd., 510656, Guangzhou, China)

**Abstract** [Objective] By studying the carbon footprint of two kinds of side wallboard made of different materials for rail vehicles, the accounting method for the carbon footprint of interior products is explored to guide designers in achieving low-carbon design. [Method] Side wallboards made of PC (polycarbonate) and FRP (fiberglass-reinforced plastic) for rail vehicle interiors are selected as research objects. Following the lifecycle assessment method outlined in PAS 2050:2011 'Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services', published by the British Standards Institution, the carbon footprints and contributions of the two different materials' side wallboards at each lifecycle stage are calculated. [Result & Conclusion] Within the defined system boundaries, the carbon footprint of FRP side wallboard is greater than that of PC one, with the highest contribution to the carbon footprint observed during the raw material

acquisition stage for both types of wallboards. Under the premise of meeting vehicle performance requirements, selecting PC side wallboards with a lower carbon footprint is more conducive to overall vehicle decarbonization.

**Key words** rail vehicle; full lifecycle; side wallboard; carbon footprint accounting; contribution degree

随着我国“双碳”战略的提出,各行各业全面向绿色低碳转型。开展轨道车辆零部件碳足迹评价是降低碳排放以实现整车低碳设计制造的基础。

本文选取轨道车辆内装的2种不同材料的侧墙板作为研究对象。FRP(玻璃钢)侧墙板以其高强度、耐腐蚀性好及易造型等优点被广泛应用,但其环保性较差,且不可回收,对环境造成一定的影响;而PC(聚碳酸酯)侧墙板是近几年应用的新兴材料,其主要具有轻量化、环保节能及可回收等优点。选取2种典型材料的侧墙板,参照英国标准协会发布的PAS 2050:2011《商品和服务在生命周期温室气体排放的评价规范》、国际标准化组织的ISO 14067:2018《温室气体-产品的碳排放量 量化和交流的要求和指南》、ISO 14040:2006《环境管理-生命周期评价:原则与框架》和ISO 14044:2006《环境管理-生命周期评价 要求与指南》等国际标准要求,采用全生命周期评价的方法,对2种不同材料的侧墙板全生命周期各阶段产生的碳足迹进行核算并分析其贡献度。通过研究,统计出这2种不同材料的侧墙板碳排放的相关数据,以为设计人员在零部件材料选择及工艺设计等环节的绿色制造提供选型依据。此外,研究成果也可为轨道交通车辆其他零部件碳足迹研究提供参考。

## 1 侧墙板碳足迹评价

### 1.1 侧墙板系统边界的确定

本文选取同一厂家2种不同材质但相同规格的侧墙板作为研究对象(见表1),即PC侧墙板和FRP侧墙板进行碳足迹核算对比。

表 1 2 种不同材质的侧墙板规格

Tab. 1 Specifications for two side wallboards of different materials

名称	规格
PC 侧墙板	3 280 mm(长)×1 155 mm(宽)×4 mm(厚)
FRP 侧墙板	3 280 mm(长)×1 155 mm(宽)×4 mm(厚)

本次研究的系统边界为 2 种不同材料的侧墙板的原材料获取、生产制造和回收过程;其中,产品生产制造过程主要为电力类能源获取。

基于 PAS 2050:2011 和 ISO 14067:2018 标准的取舍规则及实际数据获取的约束条件,对产品部分碳足迹阶段进行如下简化:

1) 研究的 2 种不同材料的侧墙板都选择同一厂家,运输的路程相同,因此本研究中暂不考虑运输过程产生的碳排放;

2) 生产设备的生产制造及其维修保养,除生产辅助工具模具外,其他设备难以获取确切数据,标准也没有要求,不计入统计分析范围;

3) 2 种不同材料的侧墙板产品在装上车辆后,其使用阶段数据需要地铁运营商来量化,现阶段获取数据存在较大困难,不做统计分析。

因此,研究涉及到的 2 种不同材料的侧墙板系统边界内的各阶段过程如表 2 所示。

表 2 2 种不同材料的侧墙板系统边界

Tab. 2 System boundary for two side wallboards of two different materials

包含的过程	未包含的过程
原辅材料的获取	生产设备设施的生产及维修
产品生产及电力的获取	原辅材料的运输
产品回收	材料产品的运输
	产品运营使用

## 1.2 侧墙板生产过程的工艺流程

产品生产过程中的能耗是本次核算的重点。为了有效、准确地核算产品的碳足迹,需要对 PC 侧墙板和 FRP 侧墙板的生产工艺流程进行梳理。PC 侧墙板主要工艺流程为:配料、混合、挤出成型、模具制作、吸塑成型、切割成型、粘接组装、油漆和包装。其中,成型、吸塑、切割、粘接和油漆等工序在 PC 侧墙板的生产和存在能源消耗。FRP 侧墙板主要工艺流程为:带木堆料、带木基膜处理、玻璃钢模具制作、模具性能测试、纤维铺设、袋膜铺设、树脂调配、真空导入、固化、脱模、后处理、嵌件粘接、涂装前处理、涂装烘烤、涂装喷漆、装配和包装。与 PC

侧墙板不同,FRP 侧墙板生产工艺中每个环节都存在着能源消耗。

## 1.3 核算采集的数据、数据模型建立及数据库使用

数据收集包括实景数据收集及背景数据的使用。实景数据是指产品生命周期中的实际数据,包括资源消耗、能源消耗等。本文按照既定的功能评价单元,依据 PAS 2050:2011 等标准,设定采集的数据收集周期为 2 种不同材料的侧墙板 1 年的实际数据,其采用直接调研的方式,进行单独实测;背景数据源自 CPCD(中国产品全生命周期温室气体排放系数集)。

研究采用行业内常用的碳足迹分析 Simapro 软件系统,建立 2 种不同材料的侧墙板的生命周期模型,并计算其结果;核算过程中大部分采用的数据库是 CPCD,并参考了瑞士生命周期研究中心开发的 Ecoinvent 数据库资料。

## 2 侧墙板碳足迹计算

### 2.1 2 种不同材料的侧墙板原材料构成及碳排放

通过调研整理 2 种不同材料的侧墙板原材料清单,在数据库中查找对应的排放因子,利用式(1)计算 PC 侧墙板和 FRP 侧墙板各组成原材料的碳排放;并在此基础上,进一步衍化得到各组成原材料碳排放的贡献度,它反映了每种原材料的碳足迹贡献大小,相关的结果及分析见表 3 及表 4。

$$C_{\text{mat}} = \sum_{i=1}^n m_i \times E_{F,i} \quad (1)$$

表 3 PC 侧墙板各材料碳排放及贡献度数据

Tab. 3 Carbon emission and contribution data of each material component of PC side wallboard

原材料清单	质量/ kg	碳排放因子 <sup>a)</sup> / (kg/kg)	碳排放量 <sup>b)</sup> / kg	贡献度/ %
CPVC	5.20	4.79	24.91	10.541
ABS 塑料	4.62	16.60	76.69	32.453
PMMA	1.73	5.98	10.35	4.380
加强筋	6.17	18.30	112.91	47.780
水性聚氨酯漆	1.50	1.20	1.80	0.762
HT1830 型结构胶	0.50	2.40	1.20	0.508
莫顿带	0.40	16.60	6.64	2.810
窗边胶条	0.75	2.40	1.80	0.762
尼龙搭扣	0.07	0.08	0.01	0.004
小计			236.31	100.000

注:CPVC 表示聚氯乙烯氯化改性;ABS 塑料表示丙烯腈(A)、丁二烯(B)、苯乙烯(S)3 种单体的三元共聚物;PMMA 表示聚甲基丙烯酸甲酯。a) 单位材料所产生的温室气体排放系数;b) 以 CO<sub>2</sub> 当量表示温室气体的总排放量。

表4 FRP侧墙板各材料碳排放及贡献度数据

Tab.4 Carbon emission and contribution data of each material component of FRP side wallboard

原材料清单	质量/ kg	碳排放因子/ (kg/kg)	碳排放量/ kg	贡献度/ %
聚酯树脂	9.45	74.279	701.94	83.457
玻璃纤维布	11.55	1.28	14.78	1.757
加强筋	6.17	18.30	112.91	13.424
水性聚氨酯漆	1.50	1.20	1.80	0.214
HT1830型结构胶	0.50	2.40	1.20	0.143
莫顿带	0.40	16.60	6.64	0.790
窗边胶条	0.75	2.40	1.80	0.214
尼龙搭扣	0.07	0.08	0.01	0.001
小计			841.08	100.000

式中:

$C_{\text{mat}}$ ——原材料获取阶段碳排放总和;

$m_i$ ——第*i*类原材料的质量;

$E_{\text{F},i}$ ——第*i*类原材料的排放因子;

$n$ ——原材料的个数。

由表3和表4的计算结果可知:

1) PC侧墙板在原材料获取阶段9种组成材料中,铝材质加强筋的碳排放数值最大,为112.91 kg,ABS塑料的次之,为76.69 kg,两者贡献度达到80.23%,而在FRP侧墙板的8种组成材料中,聚酯树脂的碳排放数值最大,为701.94 kg,贡献度为83.46%;加强筋处于第二位,贡献度为13.42%。由此可见,2种不同材料的侧墙板主要原材料的碳排放贡献度占比最大。

2) 2种不同材料的侧墙板在原材料获取阶段碳排放最终结果是FRP侧墙板大于PC侧墙板,前者约为后者的3.6倍。

## 2.2 2种不同材料的侧墙板生产制造阶段的碳排放

侧墙板生产制造过程中的工艺环节有能源消耗,从而会产生碳排放。经过现场调研及数据收集,2种不同材料的侧墙板的能源消耗为电量的使用而产生。利用式(2)计算两者的碳排放量。

$$C_{\text{pro}} = Q_{\text{pro}} \times E_{\text{F,elec}} \quad (2)$$

式中:

$C_{\text{pro}}$ ——生产制造阶段的碳排放总和;

$Q_{\text{pro}}$ ——侧墙板生产制造阶段消耗的用电

总量;

$E_{\text{F,elec}}$ ——电力的排放因子。

由表5计算结果可知,在生产环节,FRP侧墙板用电量大于PC侧墙板的用电量,从而最终核算出生产制造阶段的碳排放FRP侧墙板比PC侧墙板的大,是PC侧墙板的3.5倍;FRP侧墙板的生产需要进一步考虑优化工艺,节约用电。

表5 2种不同材料的侧墙板生产阶段碳排放

Tab.5 Production phase carbon emission for two two side wallboards of two different materials

产品名称	能源名称	用电量/ (kWh)	电力碳排放因子/ (kg/kWh)	碳排放量/ kg
PC侧墙板	电力	81.93	0.682 9	55.95
FRP侧墙板	电力	281.66	0.682 9	192.35

注:电力排放因子数据来源为江苏电网排放因子数据库(2019年)。

## 2.3 2种不同材料的侧墙板回收阶段的碳排放

根据表3和表4可知:2种不同材料的侧墙板主要回收材料为6063T5铝型材和PC等塑料件,因此回收阶段碳排放核算主要考虑回收的铝型材和塑料成品件,其他材料暂不考虑回收,碳排放忽略不计,按式(3)计算回收阶段的碳排放。PC侧墙板属于热塑性塑料,可以被重塑和回收再利用;FRP侧墙板属于热固性塑料,在回收阶段只能做粉碎填埋处理,处理过程消耗的能源为电能。

$$C_{\text{rec}} = \sum_{x=1}^m m_x \times E_{\text{F},x} \quad (3)$$

式中:

$C_{\text{rec}}$ ——侧墙板回收阶段的碳排放总和;

$m_x$ ——第*x*类回收过程中材料的质量;

$E_{\text{F},x}$ ——第*x*类回收过程中材料的排放因子;

$m$ ——回收材料的个数。

2种不同材料的侧墙板回收阶段计算结果分别如表6和表7所示。

表6 PC侧墙板回收阶段碳排放

Tab.6 Recovery phase carbon emission of PC side wallboard

回收材料清单	质量/ kg	碳排放因子/ (kg/kg)	碳排放量/ kg
加强筋(6063 T5)	6.17	0.72	4.44
PC侧墙板板材	11.55	-0.451 31	-5.21
小计			-0.77

表 7 FRP 侧墙板回收阶段碳排放

Tab. 7 Recovery phase carbon emission of FRP side wallboards

回收材料清单	数量	碳排放因子	碳排放量/kg
加强筋(6063T5)	6.17 kg	0.720 0/(kg/kg)	4.44
FRP 板材	2.00 kWh	0.682 9/(kg/kWh)	1.37
小计			5.81

1) 结合表 3 及表 6 可知:废铝材可以回收再利用,在回收阶段核算碳排放结果相对于原铝碳排放量减少了 96.07%;由此可见以废铝材为主要原料的再生铝与原铝相比具有明显的节能减排优势,使用再生铝有利于减少碳排放。

2) 表 6 和表 7 结果表明:在回收阶段 FRP 侧墙板碳排放量仍然大于 PC 侧墙板,出于对环境保护角度的考虑,可优先考虑选用对环境友好型的可回收利用的 PC 侧墙板。

#### 2.4 侧墙板各阶段的碳排放总和及贡献度

通过对 2 种不同材料的侧墙板系统边界范围内各阶段的碳排放量进行计算,可得出 PC 侧墙板和 FRP 侧墙板生命周期碳排放量及贡献度如表 8 所示。

表 8 2 种不同材料的侧墙板生命周期碳排放量及贡献度  
Tab. 8 Life cycle carbon emission and contribution between two side wallboards of two different materials

产品	各阶段	碳排放量/kg	贡献度/%
PC 侧墙板	原材料	236.31	81.07
	生产	55.95	19.19
	回收	-0.77	-0.26
共计		291.49	100.00
FRP 侧墙板	原材料	841.08	80.93
	生产	192.35	18.51
	回收	5.81	0.56
共计		1 039.24	100.00

由表 8 可知:在系统边界范围内,各阶段碳排放量的核算结果显示 FRP 侧墙板碳排放量始终比 PC 侧墙板碳排放量大;而从贡献度来看,原材料获取阶段碳排放的贡献度最大,占生命周期的 81% 左右;因此在主材料不变情况下,建议选择低碳的辅料有利于减少原材料获取阶段碳排放。

### 3 生产辅助工具模具的碳排放

考虑到模具的生产对侧墙板的生產有重要的

影响,除了参照 PAS 2050:2008《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》和 ISO 14067《温室气体-碳足迹-产品类别规范与指南》等常规的产品碳足迹核算方法外,本研究将模具的生产排放纳入研究范围。所涉及的 2 种不同材质的侧墙板,在生产过程中都需要用到模具作为辅助工具,其碳排放情况如表 9 所示。

表 9 2 种不同材料的侧墙板模具碳排放量

Tab. 9 Mold carbon emission of side wallboards between two different materials

产品	模具碳排放量/kg
PC 侧墙板	9 433.09
FRP 侧墙板	2 568.92

由表 9 可知:PC 侧墙板模具制作过程中产生的碳排放量大于 FRP 侧墙板;模具生产的碳排放为一次性排放,而产品规格不变,故模具可以不断重复使用。

本研究结合式(4),设  $C_{\text{mold}}$  为 2 种不同材料的侧墙板模具制作一次性排放总量, $Z$  为产品整数数量, $O$  为产品数量  $Z$  的模具排放的平均值,综合考虑产品批量的因素。

$$O = C_{\text{mold}}/Z \quad (4)$$

结合表 8 的 2 种不同材料的侧墙板生命周期碳排放数据,经计算可得:当产品数量较少时( $Z < 10$  件),FRP 侧墙板碳足迹值较小;随着产品数量增多( $Z \geq 10$  件),PC 侧墙板的碳足迹值比 FRP 侧墙板碳足迹值小。

以—列 6 辆编组的地铁 B 型车为例,侧墙板的数量为 36 件( $Z = 36$ ),PC 侧墙板与玻璃钢侧墙板的碳足迹对比参见表 10。

表 10 2 种不同材料的侧墙板碳足迹对比

Tab. 10 Carbon footprint comparison between two side wallboards of two different materials

产品	碳排放量/kg
PC 侧墙板	553.52
FRP 墙板	1 110.6

由表 10 可以看出,产品数量越多,PC 侧墙板的碳足迹优势越明显。因此,在进行产品设计时,需综合考虑多方面因素,选取合适的材料以及加工工艺,以便达到低碳设计的目的。

### 4 结语

依据生命周期评价方法,通过对 2 种不同材料

侧墙板的碳足迹研究,得到如下结论:

1) 相同功能的侧墙板内装产品,不同材质、不同工艺计算得到的碳排放结果相差较大,FRP 侧墙板碳排放大于 PC 侧墙板碳排放。可考虑在满足车辆性能的前提下,优先采用碳排放较低的 PC 侧墙板,从而降低整车的碳排放。

2) PC 侧墙板和 FRP 侧墙板产品生产过程碳排放占生命周期的 18% 以上,需要通过优化生产技术等来实现侧墙板生产过程中的碳减排。建议进一步优化能源结构,从传统电力向清洁能源过渡,提高清洁能源使用比例,从而降低侧墙板生产过程中的碳排放。

3) PC 侧墙板板材可以回收再利用,为了减少碳排放,设计选型时可优先考虑选用对环境友好型的可回收利用的 PC 侧墙板。

4) 针对产品碳足迹研究在轨交行业才刚刚起步,在数据方面本文只研究了侧墙板原材料获取、生产过程和回收过程中主要的碳排放来源。未来需持续进行产品碳足迹全过程中数据的积累和记录,同时进一步研究复杂情况下产品的碳排放,并对数据进行进一步优化。

(上接第 112 页)

1) 最大程度地利用电制动停车,以减少空气制动在制动过程的运用,从而减低制动摩擦产生噪声。方法有:① 修改牵引软件,常用制动时将电制动发挥到最大,可采用电制动到零方案;② 电空配合可采用电空浮空点配合,即不再采用固定点退出电制动,可根据电制动能力设置电制动完全退出点;每次可根据实际所需制动力与最后完全退出点,反推出空气制动开始补偿点,充分利用电制动停车。

2) 通过改变夹钳振动频率:① 对所有闸片进行切片处理;② 对制动夹钳安装螺栓等进行更换等。

### 3 结语

通过对出现异常制动噪声现象的某地铁列车进行整车制动试验,结合振动噪声测试、制动压力与列车速度同步测试等现场测试,明确了此城际列车的异常噪声频率分析得出以下结论:

1) 噪声产生原因主要为制动夹钳与制动盘共振产生。共振频率在 25 ~ 30 Hz 之间。

2) 制动级位越大,产生的噪声越大。常用级位在 25% 时噪声会明显减小。

### 参考文献

- [1] British Standards Institution. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services (British Standard): PAS 2050: 2011[S]. British Standards Institution, 2011.
- [2] International Organization for Standardization. Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification and communication: ISO/TS 14067: 2013[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2013.
- [3] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework: ISO 14040: 2006[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [4] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines: ISO 14044: 2006[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

· 收稿日期:2023-12-02 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-12-02 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10  
· 通信作者:陈国恒,高级工程师,chengguo43@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

### 参考文献

- [1] 李建熹,莫继良,王东伟,等. 制动力对制动尖叫噪声及磨损特性的影响[J]. 润滑与密封,2017(42):49.  
LI Jianxi, MO Jiliang, WANG Dongwei, et al. The influence of braking force on brake squeal noise and wear characteristics [J]. Lubrication and Sealing, 2017(42): 49.
- [2] 王文竹,李杰,刘刚,等. 汽车盘式制动器制动噪声优化抑制仿真[J]. 计算机仿真,2019,36(1):171.  
WANG Wenzhu, LI Jie, LIU Gang, et al. Optimal suppression simulation on automotive disc brake noise[J]. Computer Simulation, 2019, 36(1): 171.
- [3] 贺义,陈光雄,张捷,等. 制动压力对某城际列车异常制动噪声的影响[J]. 噪声与振动控制,2020,40(1):116.  
HE Yi, CHEN Guangxiong, ZHANG Jie, et al. Influence of braking pressure on abnormal braking noise of an intercity train[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(1): 116.

· 收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-11-12 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10  
· 通信作者:王芬,高级工程师,wangfen\_pzcsr@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