

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.008

聚氨酯夹层结构聚丙烯 / 竹纤维汽车内饰构件制备与评价

程海涛¹,苑之童¹,李明鹏¹,李文婷¹,王翠翠¹,王巍²

[1. 国际竹藤中心竹藤科学与技术重点实验室,北京 100102; 2. 奇竹(北京)科技发展有限公司,北京 100162]

摘要:以聚丙烯(PP)/竹纤维(BF)复合板为蒙皮,聚氨酯(PUR)泡沫为芯材,采用夹层结构设计,制成 PUR 夹芯结构 PP/BF 复合材料,再经异型模压成型工艺制备 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件,通过万能试验机和色差仪对 PP/植物纤维复合材料的性能进行测试与表征,结果表明, PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料的滚筒剥离强度、弯曲性能及在 4 次循环试验后的尺寸稳定性能良好,未出现显著变色,20 天内无发霉现象,可满足汽车主机厂的使用要求。PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件的单位能耗为 30.65 MJ/kg, CO₂ 排放量为 2.74 kg/kg,与 PUR 夹层结构 PP/麻纤维(JF)汽车内饰构件相比,分别降低了 16.80% 和 0.55 kg/kg,说明 BF 替代 JF 用于汽车内饰构件具有可行性。

关键词:竹纤维;夹层结构;复合材料;汽车内饰构件;轻量化

中图分类号:S784 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2022)09-0045-06

Preparation and Evaluation of Polypropylene/Bamboo Fiber Automotive Interior Components with Polyurethane Sandwich Structure

Cheng Haitao¹, Yuan Zhitong¹, Li Mingpeng¹, Li Wenting¹, Wang Cuicui¹, Wang Wei²

[1. Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science and Technology, International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China;

2. Qizhu (Beijing) Technology Development Co., Ltd., Beijing 100162, China]

Abstract : The polypropylene (PP)/bamboo fiber (BF) composites with polyurethane (PUR) sandwich structure was prepared by sandwich structure design and using PP/BF composite board as the skin and PUR foam as the core. Then PP/BF automotive interior components with PUR sandwich structure was prepared by special-shaped molding process. The properties of composites were tested and characterized through universal testing machine and colorimeter. The results show that the PP/BF composite with PUR sandwich structure have great roller peel strength and bending performance, and the dimensional stability after 4 cycles of testing is well. There is no significant discoloration and no mildew for 20 d, which can satisfy the requirements of car makers. The specific energy consumption of PP/BF automotive interior component with PUR sandwich structure is about 30.65 MJ/kg, and the CO₂ emission is about 2.74 kg/kg, which is 16.80% and 0.55 kg/kg less than PP/flax fiber (JF) automotive interior component with PUR sandwich structure, which shows that BF is feasible to replace JF in automotive interior components.

Keywords : bamboo fiber ; sandwich structure ; composite ; automotive interior component ; lightweight

联合国于 2020 年 12 月 12 日召开了“气候雄心峰会”,旨在到 2030 年实现 CO₂ 排放量减少 45%、到 2050 年实现碳中和;我国也于 2020 年 9 月提出了“双碳”战略目标,以期有效控制 CO₂ 排放量。当前我国碳排放达 110 亿 t,据中汽中心测算,汽车碳排放占全社会碳排放 7.5% 左右,占我国交通领域碳排放 80% 以上;2020 年,汽车使用阶段碳排放

约 7.2 亿 t,约占汽车碳排放 90%,可见,汽车节能减排迫在眉睫。世界汽车协会报告指出,汽车质量每减少 10%,燃油能耗可降低 6%~8%,CO₂ 排放可降低 13%。因此,轻量化是汽车节能减排最有效的方法之一,也是政策重点支持的领域之一,如国家发改委在《产业结构调整指导目录(2019 年本)》中提到,将汽车轻量化材料应用列为国家鼓励发展产业,

基金项目:国家自然科学基金项目(32101607),北京市自然科学基金项目(6222059)

通信作者:王翠翠,博士后,主要研究方向为竹纤维复合材料

收稿日期:2022-06-21

引用格式:程海涛,苑之童,李明鹏,等. 聚氨酯夹层结构聚丙烯 / 竹纤维汽车内饰构件制备与评价[J]. 工程塑料应用,2022,50(9):45-50.

Cheng Haitao, Yuan Zhitong, Li Mingpeng, et al. Preparation and evaluation of polypropylene/bamboo fiber automotive interior components with polyurethane sandwich structure[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):45-50.

同时中国汽车工程学会在《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》也指出,到 2030 年,汽车减重目标是较 2015 年减重 35%。

轻量化的技术路径有材料轻量化、结构设计轻量化和制造工艺创新三种,其中材料轻量化是实现汽车轻量化的重要趋势^[1]。目前汽车工业应用较为广泛的轻量化复合材料主要有碳纤维增强复合材料、玻璃纤维增强复合材料等,然而,其面临着原材料危机、成本高、能耗大、产品难降解等问题。植物纤维增强复合材料由于来源广、密度小、环境友好等特点,更符合“双碳”战略下的绿色环保发展趋势。近年来,以麻纤维(JF)为代表的植物纤维增强复合材料已应用在汽车门板、座椅靠背、顶棚、仪表板等内饰构件上^[2-6]。截至 2021 年底,全国汽车年产 2 608 万辆,按每辆汽车平均使用 40 kg 热塑性植物纤维增强复合材料计算,则总需求量可达 104.3 万 t,合计 62.6 亿元,市场规模巨大,应用前景广阔。据统计,2019 年,我国麻类总产量为 23.39 万 t,远不能满足车用麻纤维的需求,目前主要依赖于进口,而且麻纤维成本也会越来越高;而我国竹材资源十分丰富,第九次森林资源清查结果表明,我国竹林面积为 641 万 hm^2 ,占全球竹资源面积的 20%,竹材年产量约为 4 000 万 t,仅占竹林可砍伐量的 1/4 左右,每年约有 1.1 亿 t 竹材未被开发利用,可利用空间巨大^[7-8],因此竹纤维(BF)增强复合材料非常适合汽车内饰构件的轻量化。

然而,目前鲜有文献定量表征 BF 增强复合材料应用于汽车工业的减碳优势,以及报道夹层结构竹纤维增强复合材料在汽车轻量化领域的应用。因此,为了探究 BF 代替 JF 应用于汽车内饰件的可行性,笔者基于聚丙烯(PP)/JF 复合材料在汽车工业应用的成熟案例,以 PP/BF 复合毡制备的复合板为蒙皮,聚氨酯(PUR)泡沫为芯材,采用夹层结构设计,通过热压成型制备热塑性植物纤维增强复合材料,再通过异型模压成型工艺制备汽车内饰构件,以尺寸稳定性、力学性能、发霉、表观材色等性能为指标,验证其是否满足主机厂关键性能指标要求,并对全过程单位能耗与 CO_2 排放量进行估算,旨在推进汽车轻量化技术的可持续发展,为夹层结构 PP/BF 复合材料在汽车内饰构件的应用提供研究思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

BF: 平均直径 0.18 mm,福建 3 a 生毛竹;

JF: 平均直径 0.087 mm,湘南郴州麻业有限公司;

PP/BF 复合毡: PP 与 BF 质量比 50 : 50,自制;

PP/JF 复合毡: PP 与 BF 质量比 50 : 50,某汽车主机厂;

PUR 泡沫、PP 胶膜: 某汽车主机厂。

1.2 主要仪器与设备

热压机: CARVER 3895 型,美国 Carver 公司;

万能试验机: CMT6503 型,美特斯工业系统(中国)有限公司;

色差仪: BYK-Gardner 型,德国毕克化学公司。

1.3 试样制备

通过热压成型,将 PP/BF 复合毡和 PP/JF 复合毡制备成 PP/BF 复合板和 PP/JF 复合板,作为上下蒙皮,单层厚度约为 1.15 mm,热压参数为: 温度 110~160 $^{\circ}\text{C}$,时间 5 min,压力 2~4 MPa。以 PUR 泡沫为芯材,采用夹层结构设计,通过热压成型制备热塑性植物纤维增强复合材料,尺寸为 2440 mm $\times$ 1 220 mm $\times$ 7.5 mm,热压参数为: 温度 180~200 $^{\circ}\text{C}$,时间 10 min,压力 0.5~1.5 MPa,工艺流程如图 1 所示。然后以 PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料为原材料,在 200~220 $^{\circ}\text{C}$ 条件下加热使其软化,后在异型模具内冷成型(室温,压力不小于 1 MPa)制备汽车内饰构件,如图 2 所示。以 PUR 夹层结构 PP/JF 汽车内饰构件为对照样。

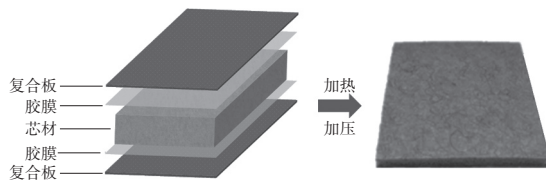


图 1 夹层结构热塑性植物纤维复合材料的制备工艺流程

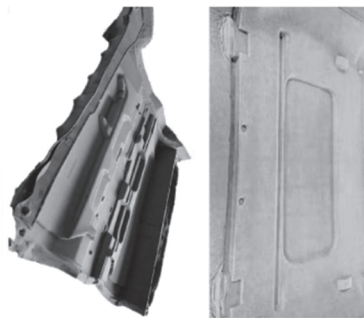


图 2 某汽车主机厂 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件

1.4 性能测试与表征

(1) 汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料。

①滚筒剥离强度。

参考 GB/T 1457-2005,采用万能试验机测试蒙皮与芯材分离时单位宽度上的抗剥离力矩,测试装置如图 3 所示,滚筒直径和凸缘直径分别为 100 mm 和 125 mm,试样宽度为 60 mm,加载速度为 25 mm/min,通过载荷-剥离距离曲线获得抗力载荷和平均剥离载荷,根据式 (1) 计算平均剥离强度。每组有效试样均为 3 个,结果取平均值。

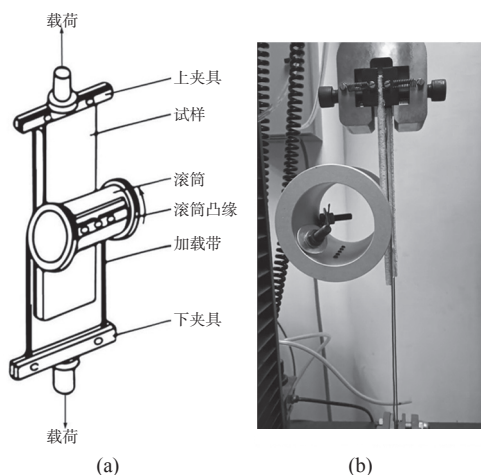


图 3 滚筒剥离强度测试示意图; b—滚筒剥离强度设备测试图

图 3 滚筒剥离强度测试图

$$\overline{M} = \frac{(P_b - P_0)(D - d)}{2b} \quad (1)$$

式中: $\overline{M}$ ——平均剥离强度, (N·mm)/mm;

P_b, P_0 ——分别为平均剥离载荷和抗力载荷, N;

D ——滚筒凸缘直径, mm;

d ——滚筒直径, mm;

b ——试样宽度, mm。

②弯曲性能。

参考 GB/T 1449-2005,采用万能试验机测试 PUR 夹层结构 PP/BF 复合板的弯曲性能,试样尺寸为 150 mm × 15 mm × 7.5 mm,跨距为厚度的 16 倍,测试速度为 5 mm/min,每组有效试样均为 6 个,结果取平均值。

(2) PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件。

①尺寸稳定性。

参考某汽车主机厂的测试标准,将试样依次在 90℃ / 3 h → 冷却 / 1 h → -40℃ / 3 h → 过渡 / 1 h → 55℃,相对湿度 95% / 15 h → 过渡 / 1 h 下保持 24 h,此为 1 个循环,共进行 4 次循环试验。试验结束后,测量每个试样的质量和尺寸(长度、宽度、厚度),并分别计算质量变化率,以及长度、宽度和厚度方向的尺寸变化率。每组有效试样均为 3 个,结果取平均

值。

②表观材色。

参考国际照明委员会(CIE)于 1976 年提出的 $L^*a^*b^*$ 颜色空间系统,采用色差仪测试试样表面的材色,通过式 (2)~式 (5) 计算色差,平行测试 5 次,结果取平均值。

$$\Delta L^* = L_2^* - L_1^* \quad (2)$$

$$\Delta a^* = a_2^* - a_1^* \quad (3)$$

$$\Delta b^* = b_2^* - b_1^* \quad (4)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (5)$$

式中: L_1^*, L_2^* ——4 次循环试验前、后的亮度;

a_1^*, a_2^* ——4 次循环前、后的红绿指数;

b_1^*, b_2^* ——4 次循环前、后的黄蓝指数;

ΔE^* ——色差;

ΔL^* ——亮度差;

Δa^* ——红绿指数差;

Δb^* ——黄蓝指数差。

③发霉测试。

在汽车内饰构件上裁取试样,置于装有 200 mL 去离子水的密封容器中,试样下边缘距水面 15 mm 以上,每 5 d 观察一次,直至出现发霉现象,记录发霉时间。

④汽车内饰构件生产全过程单位能耗及 CO₂ 排放量测算。

基于中国能源研究会能效与投资评估专委会对竹缠绕复合管生产全过程能耗计算方法学的研究成果^[9],并参考文献[10]计算 PUR 夹层结构 PP/植物纤维汽车内饰构件的生产全过程能耗。PUR 夹层结构 PP/植物纤维汽车内饰构件的单位能耗为生产该产品所需每种原料的单位能耗与生产该产品的单位能耗之和,其中,单位能耗数据为某汽车主机厂生产某汽车零部件全过程的用电量(0.6 元/度)和用气量(2.5 元/m³)的数据统计,CO₂ 排放量基于各能量源的碳排放系数^[11-12]计算得出。

2 结果与讨论

2.1 汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料分析

(1) 滚筒剥离强度。

表 1 为汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/植物纤维复合材料的滚筒剥离强度。由表 1 可以看出,汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料的平均剥离载荷为 69.70 N,平均剥离强度为 13.58 (N·mm)/mm,分别较汽车内饰构件用 PUR

夹层结构 PP/JF 复合材料提高 4.01% 和 38.15%,满足某汽车主机厂中规定的平均剥离强度 ≥ 10 (N·mm)/mm 的要求。

表 1 汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/植物纤维复合材料的滚筒剥离强度

试样	平均剥离载荷 / N	平均剥离强度 / [(N·mm)·mm ⁻¹]
PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料	69.70	13.58
PUR 夹层结构 PP/JF 复合材料	67.01	9.83

(2) 弯曲性能。

表 2 为汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/植物纤维复合材料的弯曲性能。由表 2 可以看出,汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/植物纤维复合材料的密度均处于 0.2 g/cm³ 水平,汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料的弯曲弹性模量和弯曲强度比 PUR 夹层结构 PP/JF 复合材料低,但其弯曲性能满足某汽车主机厂对轻质化材料规定的弯曲弹性模量 ≥ 180 MPa、弯曲强度 ≥ 2 MPa 的要求。

表 2 汽车内饰构件用 PUR 夹层结构 PP/植物纤维复合材料的弯曲性能

试样	密度 / (g·cm ⁻³)	弯曲弹性模量 / MPa	弯曲强度 / MPa
PUR 夹层结构 PP/BF 复合材料	0.208	205.15 ± 10.04	3.02 ± 0.31
PUR 夹层结构 PP/JF 复合材料	0.202	255.75 ± 6.23	3.51 ± 0.11

2.2 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件

(1) 尺寸稳定性。

对于汽车内饰构件而言,尺寸稳定性是需要着重考虑的指标,如果尺寸稳定性差,材料在储存和使用过程中会产生严重变形,影响汽车内饰构件的正常使用。一般汽车内饰构件的尺寸稳定性通过尺寸变化率进行衡量^[13],主机厂不同,测试方法也不尽相同。表 3 为 PUR 夹层结构 PP/植物纤维汽车内饰构件的尺寸稳定性。由表 3 可以看出,经过 4 次循环试验后, PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件在长度、宽度、厚度三个方向上的变化率分别为 0.16%,0.38% 和 0.12%,即尺寸变化率 $\leq 0.38\%$,质量变化率为 0.91%; PUR 夹层结构 PP/JF 汽车内饰构件在长度、宽度、厚度三个方向上的变化率分别为 0.16%,0.85% 和 0.65%,尺寸变化率 $\leq 0.85\%$,质量变化率为 0.28%。可见, PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件的尺寸变化率比 PUR 夹层结构 PP/JF 汽车内饰构件小,且在 4 次循环试验后并未出现显著

的变形、开裂现象,尺寸稳定性满足某汽车主机厂对汽车内饰构件规定的变化率为 -0.2%~0.4% 的要求。

表 3 PUR 夹层结构 PP/植物纤维汽车内饰构件的尺寸稳定性

项目	PUR 夹层结构 PP/JF 汽车内饰构件		PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件	
	循环 试验前	4 次循环 试验后	循环 试验前	4 次循环 试验后
长度 /mm	141.49	141.27	140.52	140.30
宽度 /mm	16.55	16.41	15.78	15.72
厚度 /mm	7.65	7.70	8.16	8.17
长度方向变化率 /%	0.16		0.16	
宽度方向变化率 /%	0.85		0.38	
厚度方向变化率 /%	0.65		0.12	

(2) 表观材色。

BF 表面有大量亲水基团,由其制成的复合板材吸湿后其材色会发生改变,而对于汽车内饰构件来说,材色的变化影响其美观性,导致板面颜色深浅不一,难以迎合消费者的审美需求。一般来说, CIE1976 中的 ΔL^* , Δa^* , Δb^* 及 ΔE^* 可以定量反映 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件的材色变化情况。表 4 为 4 次循环试验前后 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件的表观材色,由表 4 可得,经 4 次循环试验后,某汽车主机厂 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件的亮度 (L^*),红绿指数 (a^*) 和黄蓝指数 (b^*) 均呈减小趋势。

表 4 4 次循环试验前后 PUR 夹层结构 PP/BF

汽车内饰构件的表观材色					
L_1^*	L_2^*	a_1^*	a_2^*	b_1^*	b_2^*
71.58	71.43	9.67	8.86	22.06	19.50

表 5 为 4 次循环试验后某汽车主机厂 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件的 ΔL^* , Δa^* , Δb^* 以及色差计算结果 ΔE^* ,由表 5 可得,某汽车主机厂 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件 ΔL^* 为负数,即亮度降低,说明 BF 吸水之后导致复合板材颜色加深, ΔE^* 为 2.69,但并未出现显著变色等异常现象,在特定应用中可接受^[14-15],满足主机厂对汽车内饰构件材色变化的要求。

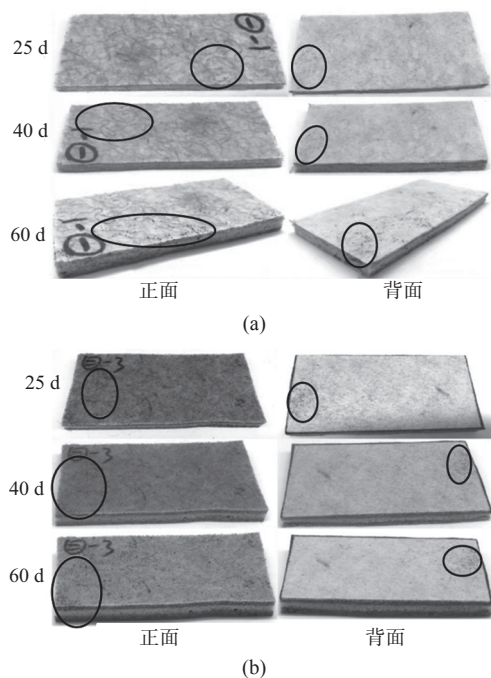
表 5 PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件的 ΔL^* , Δa^* , Δb^* 及 ΔE^*

ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
-0.15	-0.81	-2.56	2.69

(3) 发霉测试。

汽车内饰构件出现发霉现象主要与材料的吸水性有关,而 BF 表面有大量羟基,赋予其良好的亲水性,但这一特性导致的汽车内饰构件防腐抗菌性能下降会加快其老化速度^[16],进而影响其正常使用。图 4 为某汽车主机厂 PUR 夹层结构汽车内饰

构件发霉试验结果的照片。由图4可以看出,在发霉测试的第25 d, PUR夹层结构PP/BF和PP/JF汽车内饰构件开始出现发霉现象,呈“星星点点”状散列分布;在第40 d时,发霉状态与第25 d类似;在第60 d时,发霉现象加剧,呈“珠粒”状紧密分布,此时霉味明显。由上述结论可得, PUR夹层结构PP/BF和PP/JF汽车内饰构件均在发霉测试的第25 d时表现出较好的防霉性,可满足某汽车主机厂规定的20 d内无发霉现象产生。鉴于BF天然变异性大,为满足汽车内饰构件将来更严苛的适用环境,可考虑进行防霉处理。



a—PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件;
b—PUR 夹层结构 PP/JF 汽车内饰构件
图4 不同测试时间 PUR 夹层结构 PP/ 植物纤维
汽车内饰构件发霉试验结果的照片

(4) 生产能耗及碳排放。

表6为PUR夹层结构PP/植物纤维汽车内饰构件的单位能耗及CO₂排放量,由表6可知, PUR夹层结构PP/BF汽车内饰构件的单位能耗为30.65 MJ/kg,与PUR夹层结构PP/JF汽车内饰构件的能耗相比,降低了16.80%,说明相比于汽车工业目前主要采用的轻量化材料,PP/BF复合材料在能耗和减排方面具有优势,对汽车内饰件的可持续发展具有推进作用。

1 hm²毛竹林年固定CO₂量可达24.3 t,相当于25辆小汽车1 a的CO₂排放量,一些学者估算,我国竹林年净固定CO₂量为1.129亿t,生态系统碳

表6 PUR 夹层结构 PP/ 植物纤维
汽车内饰构件的单位能耗及 CO₂ 排放量

试样	单位能耗 /(MJ · kg ⁻¹)	CO ₂ 排放量 /(kg · kg ⁻¹)
PUR 夹层结构 PP/JF 汽车内饰构件	36.84	3.29
PUR 夹层结构 PP/BF 汽车内饰构件	30.65	2.74

储量大约为780.16 × 10⁶ t, 占我国森林总碳储量的9.28%^[17-18], 并以54.81 × 10⁶ t/a的平均积累速率递增^[19], 通过全程跟踪竹林产品碳转移发现, 我国竹子采伐后每年有效转移至竹产品中的年储碳量约为1340万t^[17], 可见, 竹子快速增长速率, 暗含着较高的固碳速率。与PUR夹层结构PP/JF汽车内饰构件的CO₂排放量相比, PUR夹层结构PP/BF汽车内饰构件的CO₂排放量减少0.55 kg/kg, 这也是其替代传统轻量化材料用于汽车工业的一大优势。

3 结论

汽车内饰构件用PUR夹层结构PP/BF复合材料的平均剥离强度为13.58 (N · mm)/mm, 弯曲弹性模量为(205.15 ± 10.04) MPa, 弯曲强度为(3.02 ± 0.31) MPa; PUR夹层结构PP/BF汽车内饰构件在4次循环试验后的尺寸变化率≤0.38%, 并未出现明显变色, 20 d内无发霉现象产生, 满足某汽车主机厂的判定需求。PUR夹层结构PP/BF汽车内饰构件的生产全过程单位能耗和CO₂排放量较低, 较PUR夹层结构PP/JF汽车内饰构件降低了16.80%和0.55 kg/kg, BF具有明显的减碳优势。因此BF用于替代传统轻量化材料制备汽车内饰件, 潜力巨大, 应用前景广阔。

参考文献

[1] 王翠翠,李明鹏,王戈,等. 植物纤维/热塑性聚合物预浸料在汽车轻量化领域的应用进展[J]. 林业科学, 2021, 57(9):168-180.
Wang Cuicui, Li Mingpeng, Wang Ge, et al. Application progress of plant fiber/thermoplastic polymer prepreg in automotive lightweight field[J]. Scientia Silvae Science, 2021, 57(9):168-180.
[2] 李光霁,刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(5):47-61.
Li Guangji, Liu Xinling. Literature review on research and development of automotive lightweight technology[J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(5):47-61.
[3] Sharma S, Sudhakara P, Misra S K, et al. A comprehensive review of current developments on the waste-reinforced polymer-matrix composites for automotive, sports goods and construction applications:Materials, processes and properties[J]. Materials Today:Proceedings, 2020, 33(3):1 671-1 679.
[4] Perumal C I, Sarala R, Muthuraja R. A review on characteristic of polymer composites with natural fiber used as a reinforcement

- material[J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2018, 6(1):1 213–1 217.
- [5] Mastura M T, Sapuan S M, Mansor M R, et al. Environmentally conscious hybrid bio-composite material selection for automotive anti-roll bar[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89:2 203–2 219.
- [6] Ahmad F, Choi H S, Park M K. A review:natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2015, 300(1):10–24.
- [7] 江泽慧,叶铃,费本华. 竹缠绕复合材料的研发、应用及产业化现状与前景[J]. 世界竹藤通讯, 2020, 18(2):1–11.
- Jiang Zehui, Ye Ling, Fei Benhua. Development, application and industrialization of bamboo winding composites:Status and prospect[J]. World Bamboo and Rattan, 2020, 18(2):1–11.
- [8] 吴文娟. 竹缠绕复合材料掀起绿色发展新浪潮[J]. 浙江林业, 2016(9):20–21.
- Wu Wenjuan. Bamboo winding composites set off a new wave of green development[J]. Zhejiang Forestry, 2016(9):20–21.
- [9] 焦健. “管道节能”——一个新型节能低碳产业的崛起[R]. 北京:中国能源研究会能效与投资评估专业委员会, 2014.
- Jiao Jian. “Pipeline energy saving”——The rise of a new energy-saving and low-carbon industry[R]. Beijing:Professional Committee of Energy Efficiency and Investment Evaluation of China Energy Research Society, 2014.
- [10] Wu Y J, Xia C L, Cai L P, et al. Development of natural fiber-reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184:92–100.
- [11] 周亚兰,龚本刚,张孝琪. 汽车生产过程中能源消耗的碳排放计算与分析[J]. 巢湖学院学报, 2014, 16(3):92–98.
- Zhou Yalan, Gong Bengang, Zhang Xiaqi. Calculation and analysis of the carbon emissions of energy consumption in the automobile manufacturing[J]. Journal of Chaohu College, 2014, 16(3):92–98.
- [12] 熊阳欣,秦之涓,胡秋萍,等. 城市汽车年检碳排放数据挖掘及其应用研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12):5 083–5 092.
- Xiong Yangxin, Qin Zhimei, Hu Qiuping, et al. Research on carbon emission data mining and application in urban vehicle emission inspection[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12):5 083–5 092.
- [13] 何宏,李华冠,陈书云. 汽车内饰用麻纤维增强 PET/PP 非织造复合材料的制备与性能研究[J]. 玻璃纤维, 2017(5):22–26.
- He Hong, Li Huaguan, Chen Shuyun. Preparation and properties of jute fiber reinforced PET/PP nonwoven composite material used for car interior[J]. Glass Fiber, 2017(5):22–26.
- [14] 刘弘渊. 汽车内饰件色差分析及控制[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- Liu Hongyuan. Analysis and improvement of color difference for automobile interior parts[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [15] 王凤影,陈承勇. 汽车色差评价方法研究[J]. 时代汽车, 2020(9):38–39, 78.
- Wang Fengying, Chen Chengyong. Research on the evaluation method of automobile color difference[J]. Auto Time, 2020(9):38–39, 78.
- [16] 孙旭鹏. 汽车内饰用黄麻纤维/聚乳酸复合板的制备及性能研究[D]. 上海:东华大学, 2019.
- Sun Xupeng. Preparation and properties of jute fiber/polylactic acid composites for automotive interior[D]. Shanghai:Donghua University, 2019.
- [17] 费本华,马欣欣,石雷,等. 竹材碳足迹内涵及其对产业发展的调控作用[J]. 世界竹藤通讯, 2020, 18(2):12–17.
- Fei Benhua, Ma Xinxin, Shi Lei, et al. Connotation of bamboo carbon footprint and its regulating effect on bamboo industrial development[J]. World Bamboo and Rattan, 2020, 18(2):12–17.
- [18] 蔡萌. 丹心一片育竹林——记 2017 年度国家科技进步奖二等奖获得者周国模[J]. 中国科技奖励, 2018(5): 68–69.
- Cai Meng. The heart is full of bamboo forests——A record of Zhou Guomo, the second prize winner of the 2017 National Science and Technology Progress Award[J]. China Awards for Science and Technology, 2018(5): 68–69.
- [19] 王兵,魏文俊,邢兆凯,等. 中国竹林生态系统的碳储量[J]. 生态环境, 2008, 17(4):1 680–1 684.
- Wang Bing, Wei Wenjun, Xing Zhaokai, et al. Carbon storage of bamboo forest ecosystem in China[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4):1 680–1 684.