

# 竹纤维复合材料薄板的性能研究及优化

茹燕平<sup>1,2</sup>, 崔萍<sup>2</sup>, 张昭环<sup>1,\*</sup>, 黎云玉<sup>1</sup>

(1. 西安工程大学 纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**选取了竹纤维为增强材料, 聚丙烯纤维为基体材料, 运用正交设计试验方案、模压成型工艺来制备竹/聚复合材料板材。通过分析模压温度、模压保温时间、竹/聚质量比三因素对复合材料板材力学性能的影响, 最终得出最佳优化工艺: 模压温度为 180 °C, 模压保温时间为 30 min, 竹/聚质量比为 50/50, 此工艺条件下复合材料板材的综合力学性能较好。

**关键词:**竹纤维; 聚丙烯纤维; 复合板材; 模压成型; 性能测试

**中图分类号:** TB332

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-0356(2020)12-0019-05

随着社会发展和工业化的进程, 化石资源日益短缺, 环境污染和循环利用等新问题的出现, 制约着碳纤维/玻璃纤维增强聚合物基复合材料的进一步发展<sup>[1-2]</sup>, 新型环保材料成为了新型材料中一个新的研究方向<sup>[3-5]</sup>。大量研究表明, 竹纤维被用作碳纤维和玻璃纤维等的替代品, 可以用来增强聚合物基复合材料<sup>[6]</sup>。竹纤维作为天然植物纤维, 来源广泛、价格低廉, 具有较高的强度和长径比, 是制备植物纤维增强树脂基复合材料的优质原料, 是一种理想的纤维增强材料, 在环保和资源保护方面具有重要意义, 已逐步成为当前研究的热点<sup>[7-9]</sup>。

聚丙烯具有质轻、价廉、合成简单、原料丰富等特点, 其应用领域非常广泛<sup>[10]</sup>。聚丙烯纤维与其他纤维不同的是, 在不同的干湿度环境下, 可以保持自身优异的性能和强度<sup>[11-12]</sup>, 具有较好的耐腐蚀性和稳定性, 但这使它不容易在土壤中被分解, 聚丙烯纤维是一种成本较低且应用广泛的高分子聚合物材料, 但其低温下易脆裂、抗冲击性差<sup>[13-14]</sup>。选择了竹纤维作为增强体, 改善聚丙烯纤维脆性大、抗冲击性差等缺点, 制备的竹纤维/聚丙烯纤维复合材料, 可用于汽车内饰件等领域<sup>[15-16]</sup>。

## 1 试验部分

**收稿日期:** 2020-07-08

**作者简介:** 茹燕平(1994-), 女, 硕士研究生在读, 主要研究方向为纺织材料与纺织品设计, E-mail: 2593700939@qq.com。

\* **通信作者:** 张昭环(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为纺织材料结构与性能、功能性纺织品、纺织纤维改性等, E-mail: zzhm@126.com。

### 1.1 原料及仪器

试验所用的原料及仪器见表 1。

表 1 试验原料及仪器

原料/仪器	规格/型号	厂家
竹纤维	漂白毛条	兰州三毛有限公司
聚丙烯纤维	30 mm 纤维束	甘肃纺织研究所
小型梳棉机	6MTB180V	眉山市红旗机器厂
平板硫化机	QLB25-Q350×350×2	青岛光越橡胶机械制造有限公司

### 1.2 试验方案

试验采用正交设计方法, 设计不同模压温度(A)、不同模压保温时间(B)、不同竹/聚质量比(C), 采用三因素三水平正交表, 因素—水平表见表 2, 正交试验方案见表 3。

表 2 因素—水平表

水平	A/°C	B/min	C/%
1	170(A1)	20(B1)	60/40(C1)
2	180(A2)	30(B2)	70/30(C2)
3	190(A3)	40(B3)	50/50(C3)

表 3 正交试验方案表

试验号	A/°C	B/min	C/%
1	A1	B1	C1
2	A1	B2	C2
3	A1	B3	C3
4	A2	B1	C2
5	A2	B2	C3
6	A2	B3	C1
7	A3	B1	C3
8	A3	B2	C1
9	A3	B3	C3

### 1.3 复合材料板材的制备

根据正交设计质量比对竹纤维和聚丙烯纤维进行

称重,每份质量大约为 55 g,将竹纤维与聚丙烯纤维进行充分开松、混合处理,后在小型梳棉机上梳理成网。研究表明<sup>[17]</sup>铺叠层数至少 6~8 层,为保证纤维网的均匀度,采用了铺网层数为 8 层<sup>[18]</sup>。根据模具尺寸大小,纤维网裁剪成 200 mm×250 mm 的矩形。

在模具上下模板内表面均匀地涂抹脱模剂,将裁剪好的纤维网放入模具后将模具放入平板硫化机内,自动加热升温至所需温度,按正交设计时间进行保温保压,固化成板材后,自然冷却至室温后脱模。

### 1.4 复合材料板材性能测试

拉伸强度和拉伸断裂伸长率分别参照 GB/T 1446—1983、GB/T 1040—1992 在 YG(B)026H-250 型织物强力

仪上测试<sup>[19]</sup>;顶破强力和顶破伸长分别参照 GB/T 8878、GB/T 7742 在 YG(B)026H-250 型织物强力仪上测试;芯吸速率在 YG(B)871 型毛细管效应测定仪上进行测试,测试时间为 10 min,温度设定为(27±2)℃。

## 2 结果与分析

采用综合平衡法进行分析<sup>[20]</sup>,极差分析未将偶然误差和条件误差分开,需与方差分析结合,得到每个指标影响因素的主次及优化方案。

### 2.1 极差分析

竹/聚复合材料板材性能测试结果及极差分析见表 4。

表 4 竹/聚复合材料板材性能测试结果与极差分析表

试验号	A /℃	B /min	C /%	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率 /%	顶破强力 /N	顶破伸长 /mm	芯吸速率 /%	
1	A1	B1	C1	7.02	2.951	2 303.2	18.146	312.35	
2	A1	B2	C2	6.33	2.145	2 064.1	22.721	291.00	
3	A1	B3	C3	11.04	3.791	1 476.6	16.442	195.18	
4	A2	B1	C2	10.87	4.094	1 899.4	18.976	273.17	
5	A2	B2	C3	8.47	3.291	1 894.9	20.927	331.33	
6	A2	B3	C1	13.41	4.235	928.7	13.729	126.19	
7	A3	B1	C3	12.04	3.868	1 756.8	16.240	217.07	
8	A3	B2	C1	8.75	2.711	1 634.5	15.814	256.16	
9	A3	B3	C2	12.17	3.376	935.9	13.033	135.00	
拉伸强度/MPa	K1	24.39	29.93	29.18	断裂伸长率/%	K1	8.887	10.913	9.897
	K2	32.75	23.55	29.37		K2	11.620	8.147	9.615
	K3	32.96	36.62	31.55		K3	9.955	11.402	10.950
	k1	8.13	9.98	9.73		k1	2.962	3.678	3.299
	k2	10.92	7.85	9.79		k2	3.873	2.716	3.205
	k3	10.99	12.21	10.52		k3	3.318	3.801	3.650
	极差	2.86	4.36	0.97		极差	0.911	1.085	0.445
因素主次: B>A>C				因素主次: B>A>C					
优化方案: A3B3C3				优化方案: A2B3C3					
顶破强力/N	K1	5 844.0	5 959.4	4 866.4	顶破伸长/mm	K1	57.309	53.362	47.689
	K2	4 723.0	5 593.5	4 899.4		K2	53.632	59.462	54.730
	K3	4 327.2	3 341.3	5 128.4		K3	45.087	43.204	53.609
	k1	1 948.0	1 986.5	1 622.1		k1	19.103	17.787	15.896
	k2	1 574.3	1 864.5	1 633.1		k2	17.877	19.821	18.243
	k3	1 442.4	1 113.8	1 709.5		k3	15.029	14.401	17.870
	极差	505.6	872.7	87.4		极差	4.074	5.42	2.347
因素主次: B>A>C				因素主次: B>A>C					
优化方案: A1B1C3				优化方案: A1B2C2					
芯吸速率/%	K1	216.30	217.41	224.49	芯吸速率/%	k1	72.10	72.47	74.83
	K2	230.47	226.80	205.08		k2	76.82	75.60	68.36
	K3	197.83	200.39	215.03		k3	65.94	66.80	71.68
	极差					极差	10.88	8.80	6.47
因素主次: A>B>C				因素主次: A>B>C					
优化方案: A2B2C1				优化方案: A2B2C1					

注: K1、K2、K3 行分别表示因素 A、B、C 的第一水平、第二水平、第三水平所对应的测试指标之和。k1、k2、k3 分别表示 K1、K2、K3 值的平均值,其值的大小来确定优化方案。极差 R 为 k1、k2、k3 中最大值减去最小值,其值的大小来判断各因素对试验指标的影响主次,R 值越大,则该因素对此项试验指标的影响越大,反之则小。

由表4可知,对于拉伸性能, $R_B > R_A > R_C$ ,即各因素对板材影响因素的主次依次为 $B > A > C$ , $k_3 > k_2 > k_1$ ,即模压成型的优化方案为A3B3C3。对于顶破性能,(1)顶破强度 $R_B > R_A > R_C$ ,各因素对板材影响因素的主次依次为 $B > A > C$ , $k_3 > k_2 > k_1$ ,即优化方案为A1B1C3;(2)顶破伸长 $R_B > R_A > R_C$ ,即各因素对板材影响因素的主次依次为 $B > A > C$ , $k_2 > k_1 > k_3$ ,即

优化方案A1B2C2。芯吸速率 $R_A > R_B > R_C$ ,即各因素对板材影响因素的主次依次为 $A > B > C$ , $k_2 > k_1 > k_3$ ,即优化方案为A2B2C1。

## 2.2 方差及显著性分析

采用SPSS软件对试验数据进行方差分析<sup>[20]</sup>,在方差分析中,利用均方分析来判断各因素主次,利用F值做显著性检验。

表5 竹/聚复合材料板材力学性能的方差及显著性分析

因素	拉伸强度/MPa		断裂伸长率/%		顶破强力/N		顶破伸长/mm		芯吸速率/%	
	均方 S	F 值	均方 S	F 值	均方 S	F 值	均方 S	F 值	均方 S	F 值
A	15.931	5.266	1.265	7.719	412.672	16.066	26.213	73.023	6201.423	286.110
B	28.476	9.412	2.054	12.536	1340.135	52.173	44.969	125.273	33757.155	1.748
C	1.156	0.382	0.330	2.015	13561.804	0.528	9.542	26.582	486.831	9.513
因素主次	B>A>C		B>A>C		B>A>C		B>A>C		B>A>C	

$F_{0.01}(2,2)=99.01, F_{0.05}(2,2)=19, F_{0.1}(2,2)=9, F_{0.2}(2,2)=4$

注: $F > F_{0.01}(2,2)$ 表示高度显著, $F_{0.01}(2,2) > F > F_{0.05}(2,2)$ 表示显著, $F_{0.05}(2,2) \geq F > F_{0.1}(2,2)$ 表示有影响, $F_{0.1} \geq F \geq F_{0.2}$ 表示有一定影响, $F_{0.2}(2,2) \geq F$ 表示无影响。

由表5可知, $S_B > S_A > S_C$ ,即各因素对板材影响因素的主次依次为 $B > A > C$ 。对于拉伸性能,A因素: $F_{0.1} > F_A > F_{0.2}$ ,即对板材拉伸性能有一定影响;B因素: $F_{0.05} > F_B > F_{0.1}$ ,有影响;C因素: $F_{0.2} > F_C$ ,无影响。对顶破性能,(1)顶破强力:A因素: $F_{0.1} > F_A > F_{0.2}$ ,即对板材顶破强力有一定影响;B因素: $F_{0.01} > F_B > F_{0.05}$ ,影响显著;C因素: $F_{0.2} > F_C$ ,无影响。(2)顶破伸长:A因素: $F_{0.01} > F_A > F_{0.05}$ ,影响显著;B因素: $F_B > F_{0.01}$ ,影响高度显著;C因素:

$F_{0.01} > F_C > F_{0.05}$ ,影响显著。对芯吸性能,A因素: $F_{0.2} > F_A$ ,即对板材芯吸性能无影响;B因素: $F_{0.05} > F_B > F_{0.1}$ ,有影响;C因素: $F_{0.2} > F_C$ ,无影响。

综合极差、方差显著性分析,得出板材力学性能优化方案为:拉伸性能优化方案A3B3C3;顶破性能优化方案A1B2C3;芯吸速率优化方案A2B2C1。

## 2.3 各因素对复合材料板材力学性能影响分析

### 2.3.1 竹/聚质量比对复合材料板材力学性能的影响

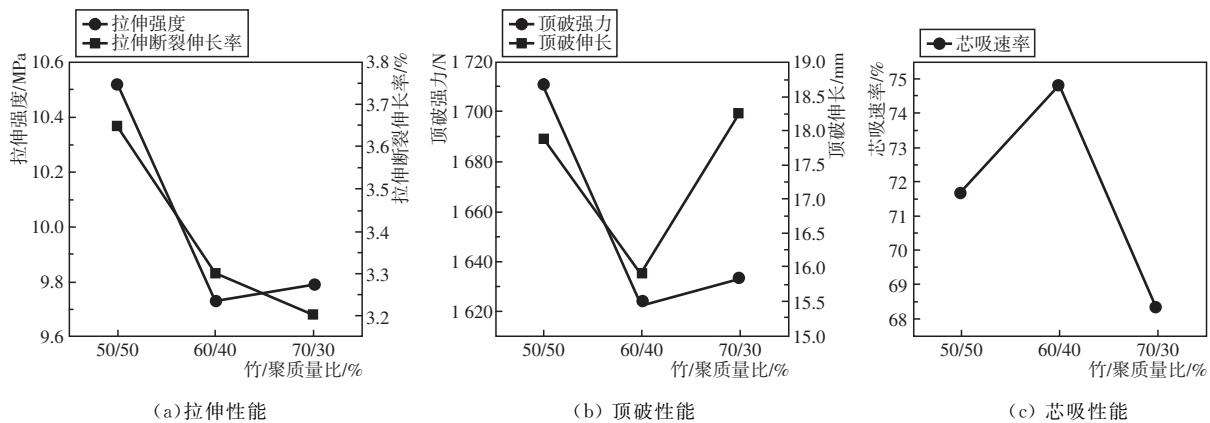


图1 竹/聚质量比对板材力学性能影响

由图1(a)、图1(b)看出,当竹纤维与聚丙烯纤维的质量比为50/50,相比60/40与70/30,板材的拉伸性能和顶破性能较高,分析认为这可能由于一方面随着竹纤维含量增加,聚丙烯纤维含量逐渐减少,在模压成型过程中,增强体与树脂间不能充分接触,板材的界面结合较弱,基体不

能及时传递应力,造成应力集中现象,使板材过早破坏;另一方面竹纤维与聚丙烯纤维的极性不同,造成2种纤维相容性差,界面粘结不良<sup>[21]</sup>。由图1(c)看出,当竹/聚质量比为60/40,板材的芯吸速率较其他2种比例高,说明板材的芯吸性能是由竹纤维的亲水性和内部空隙决定的,当竹

纤维含量小于60%时,竹纤维对板材的增强作用减弱,当大于60%时,界面粘结差,影响芯吸性能。综合考虑,最佳

竹/聚质量比为50/50。

### 2.3.2 模压温度对复合材料板材力学性能的影响

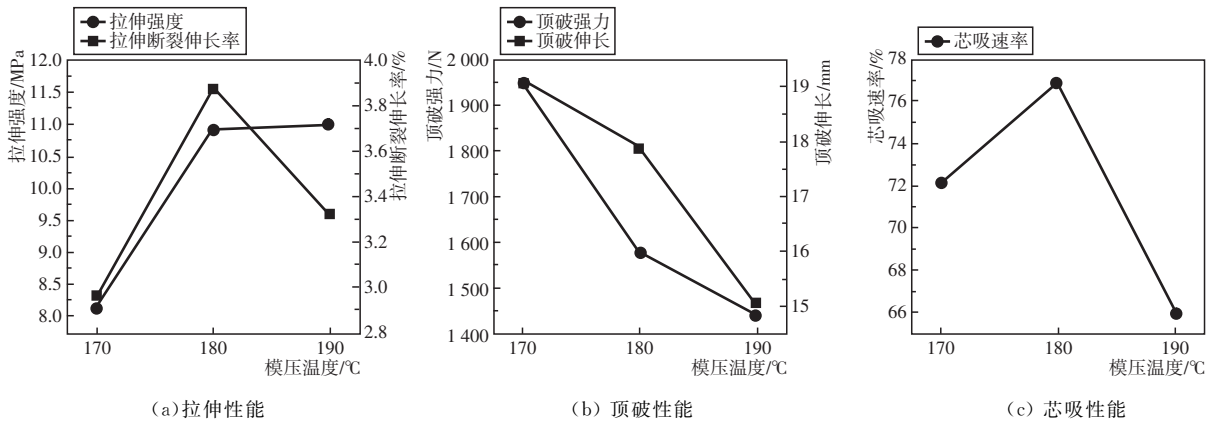


图2 模压温度对板材力学性能影响

由图2(a)、图2(c)看出,当模压温度为180℃时,相比170℃与190℃,板材的拉伸性能和芯吸速率相对较高,分析认为这可能由于一方面当温度过低,板材的成型固化速度快,内部的气泡没有及时排出,增强体与基体间存在空隙,导致板材界面粘结性差;另一方面温度过高,板材表面

比内层固化快,影响芯吸速率<sup>[17]</sup>。由图2(c)看出,当模压温度为170℃,板材的顶破性能好,可能由于随着温度升高,板材易热解脆化,韧性降低,导致其性能下降。综合考虑,最佳模压温度为180℃。

### 2.3.3 模压保温时间对复合材料力学性能的影响

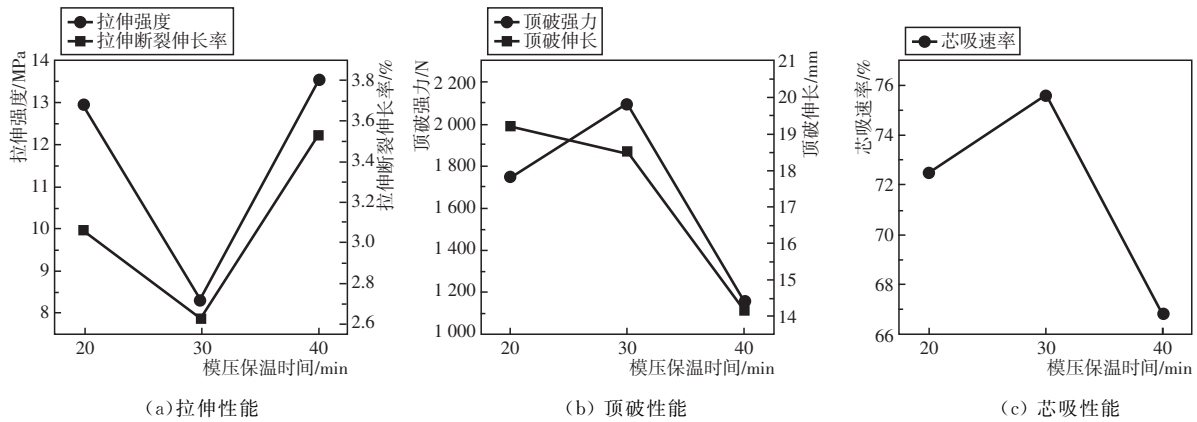


图3 模压保温时间对板材力学性能影响

由图3(a)看出,随着模压保温时间的延长,板材的拉伸性能先下降后上升,当模压保温时间为40min时,板材的拉伸性能好。分析认为可能由于时间越长,聚丙烯纤维的流动性越好,有利于竹纤维的浸润,板材内部空隙率降低,提高其拉伸性能。从图3(b)、图3(c)看出,当模压保温时间为30min时,板材的顶破性能和芯吸性能好。分析认为可能由于时间过短,聚丙烯纤维熔融不充分,增强体和基体之间界面结合性较差,板材发生翘曲变形,影响板材拉伸性能。当时间过长,一方面板材内部产生较大的内应力,另一方面浪费

能源、效率降低。综合考虑,最佳模压保温时间为30min。

## 3 结论

综合分析,竹/聚复合材料板材在模压成型过程中,当模压温度为180℃,模压保温时间为30min,竹/聚质量比为50/50时,复合材料板材的各向力学性能最佳。其当竹/聚质量比为60/40时,板材的芯吸性能最好,50/50时板材的顶破性能和拉伸性能最好,得出最佳竹/聚质量比为50/50;当模压温度为170、180℃

时,板材的顶破性能较好;180℃时板材的拉伸性能和芯吸性能最好,得出最佳模压温度为180℃;当模压保温时间为30 min时,板材的顶破性能和芯吸性能最好,40 min时板材的拉伸性能最好,考虑到制备的竹/聚复合材料板材主要应用于汽车内装饰等领域,要求耐冲击性和吸湿排汗性能好,得出最佳模压保温时间为30 min。即竹/聚复合材料板材最佳模压成型工艺为:A2(180℃)B2(30 min)C3(50/50)。

#### 参考文献:

- [1] 唐启恒,程海涛,王戈,等.竹纤维组合形态对竹纤维/聚丙烯复合材料性能的影响[J].复合材料学报,2019,36(11):2561-2567.
- [2] 胡玉安,何梅,宋伟,等.竹塑复合材料界面改性研究现状及展望[J].江西农业大学学报,2019,41(1):114-123.
- [3] 唐启恒,王云飞,郭文静.竹纤维/聚丙烯复合材料密度对其保温和力学性能的影响[J].木材工业,2018,32(2):45-48.
- [4] WEI Y, JI X, DUAN M, *et al.* Flexural performance of bamboo scrimber beams strengthened with fiber-reinforced polymer[J]. Construction and Building Materials, 2017,142:66-82.
- [5] 王江凯,苏梦宇,孙占英,等.聚丙烯/植物纤维复合材料的研究进展[J].工程塑料应用,2019,47(7):151-155.
- [6] 金霄,张效林,邓祥胜,等.竹纤维增强热塑性塑料复合材料研究进展[J].中国塑料,2017,31(10):6-11.
- [7] 高中海.竹纤维的制备、结构与性能研究进展[J].林产工业,2013,40(4):17-19.
- [8] 赵星,纪雨辛,郑霞,等.竹纤维质量分数对PCL/PLA/竹纤维复合材料性能的影响[J].塑料科技,2016,44(10):71-74.
- [9] 张庐陵.竹纤维复合材料的组织设计、制备与性能研究[D].南京:南京林业大学,2009.
- [10] 周颖,罗阳,郭建兵,等.麻纤维增强聚丙烯复合材料研究进展[J].工程塑料应用,2018,46(7):142-145.
- [11] WANG S, MALLICK R B, RAHBAR N. Toughening mechanisms in polypropylene fiber-reinforced asphalt mastic at low temperature[J]. Construction and Building Materials, 2020,248:118-690.
- [12] WANG X, QIANG D, HOSIER I, *et al.* Effect of water on the breakdown and dielectric response of polypropylene/nano-aluminium nitride composites [J]. Journal of Materials Science, 2020,55(21):8900-8916.
- [13] KHANDELWAL S, RHEE K Y. Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface[J]. Composites Part B-Engineering, 2020,192:108-011.
- [14] 陈龙,潘丹.先进的聚丙烯纤维生产发展趋势[J].当代石油石化,2017,25(11):8-14.
- [15] 唐元军.竹纤维毡增强聚丙烯复合材料的制备与性能研究[D].上海:华东理工大学,2014.
- [16] 陈涵.竹纤维/聚丙烯复合材料的耐老化性能[J].福建林业科技,2012,39(2):52-54.
- [17] 崔萍,楚晓,艾宏玲,等.聚丙烯/亚麻纤维复合材料的成型工艺及力学性能研究[J].工程塑料应用,2010,38(4):43-46.
- [18] 邵刚强,李国萍.竹纤维-聚丙烯复合材料板材的成型工艺研究及优化[J].合成纤维,2015,44(1):40-42.
- [19] HUANG J, YOUNG W. The mechanical, hygral, and interfacial strength of continuous bamboo fiber reinforced epoxy composites [J]. Composites Part B-Engineering, 2019,166:272-283.
- [20] 何为,薛卫东,唐斌.优化试验设计方法及数据分析[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [21] WANG C, LIU S, YE Z. Mechanical, hygrothermal ageing and moisture absorption properties of bamboo fibers reinforced with polypropylene composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016, 35(13):1062-1074.

## Performance Research and Optimization of Bamboo Fiber Composite Sheet

RU Yan-ping<sup>1,2</sup>, CUI Ping<sup>2</sup>, ZHANG Zhao-huan<sup>1,\*</sup>, LI Yun-yu<sup>1</sup>

(1.School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Taking bamboo fiber as the reinforced material, polypropylene fiber as the matrix material, bamboo/polypropylene composite plates were prepared by orthogonal design test and molding process. By analyzing the influence of three factors: molding temperature, molding insulation time, and bamboo/polypropylene mass ratio on the mechanical properties of composite plates, the optimal optimization process was finally obtained: molding temperature was 180℃, molding insulation time was 30 min, bamboo/polypropylene mass ratio was 50/50, the composite plates had good comprehensive mechanical properties under this process.

**Key words:** bamboo fiber; polypropylene fiber; composite plate; molding process; performance test