

回收塑料-木材纤维复合材料的工艺及性能

王 正¹ 赵行志² 郭文静¹

(1 中国林业科学研究院木材工业研究所 2 北京林业大学材料科学与技术学院)

摘要: 该文利用聚苯乙烯、聚乙烯和聚丙烯等 3 种回收塑料与木材纤维复合制备复合材料, 分析不同回收塑料种类、木材纤维与塑料不同质量比和热压温度等工艺条件对复合材料物理力学性能的影响。结果表明: 3 种回收塑料中回收聚苯乙烯塑料性能最好, 回收聚丙烯塑料其次, 回收聚乙烯塑料最差。木塑质量比 50:50 效果最好。塑料含量低时, 内结合强度和拉伸强度低, 吸水厚度膨胀率高; 塑料含量过高时, 静曲强度和弹性模量降低。热压温度在 190℃ 效果最好。温度过低时, 静曲强度、弹性模量、拉伸强度和内结合强度较差; 温度过高时, 木材纤维降解加剧, 塑料少量溢出, 性能反而有所下降。通过极差和方差分析知, 本研究 F 值的最佳工艺条件为: 采用回收聚苯乙烯、木塑质量比 50:50、热压温度 190℃。

关键词: 回收塑料-木材纤维复合材料, 木塑质量比, 尺寸稳定性, 工艺因子

中图分类号: TS653.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1522(2005)01-0001-05

WANG Zheng¹; ZHAO Xingzhi²; GUO Wenjing¹. **Process factors and performances of recycled plastic-wood fiber composites.** *Journal of Beijing Forestry University* (2005)27(1)1-5 [Ch., 16 ref.]

1 Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China;

2 School of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

The influence of the process factors on the physical properties of recycled wood-plastic composite panels was investigated. Three recycled plastics (polystyrene, polyethylene, and polypropylene) and poplar (*Populus* sp.) fiber were used as the main raw material, and the various process factors such as different kinds of plastics, the mixing ratio between the wood material and its plastic counterpart and hot-pressing temperature were examined. The results show that in terms of desirable properties the preferential order of three plastics is polystyrene, polypropylene and in last place, polyethylene. The mixing ratio between wood and plastics has its best performance at 50/50 wood-plastics ratio. Properties of tensile strength and IB decrease when the wood-plastic ratio is lower and properties of MOR and MOE are weakened when it becomes higher. A hot-pressing temperature of 190℃ is the best among three levels of temperature. MOR , MOE , tensile strength and IB decrease when temperatures are lower. At extremely high temperature the wood fiber material degrades drastically and starts to seep out. Based on both of the maximum difference analysis and the variance analysis, significance test shows the optimum conditions for recycled plastics/composites to be polystyrene, a wood-plastic ratio of 50/50 and a hot-pressing temperature of 190℃.

Key words recycled plastic-wood fiber composites, wood fiber-plastic ratio, dimensional stability, process factor

近几年来, 利用回收塑料与木材纤维复合制备新型材料的研究, 已经成为木材工业材料研究的新领域^[1-7]。回收塑料-木材纤维复合材料是以木质纤维为主要原料, 适量添加树脂、耐水剂、改性处理剂

再与回收塑料经一定工艺复合而成的新型材料。与单一塑料和木材相比, 回收塑料-木材纤维复合材料具有尺寸稳定性好、防水性能高、加工曲面构件相对容易、产品易于回收利用和热稳定性好等优

收稿日期: 2004-02-09

<http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目: “863” 国家高新技术项目 (2002AA245141)、中日合作 JICA 项目。

第一作者: 王正, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 人造板技术与应用。电话: 010-62889421 地址: 100091 北京中国林业科学研究院木材工业研究所。

点,能够改进材料的物理力学性能,降低成本并扩大其应用范围,提高产品的附加值^[8]. 这种材料的产生能有效缓解和解决大中城市中“白色污染”问题,并可用于生产轿车内衬件,加快和促进轿车国有化的步伐. 木塑纤维复合材料在西方工业发达国家的汽车工业已经广泛应用,被视为当代汽车工业“绿色革命”的重要内容,现正向其他工业不断延伸^[9].

1 材料与方法

1.1 实验材料

回收包装塑料(主要成分为 polystyrene, 简称 PS), 回收塑料布(主要成分为 polyethylene, 简称 PE), 回收塑料袋(主要成分为 polypropylene, 简称 PP)和速生杨木材纤维(fast-growing poplar wood fiber, 简称 WF).

1.2 实验设备

塑料粉碎机:SCP-160B 型, 南通市如皋塑料机械厂制造, 用来粉碎塑料至小片碎料.

植物样品粉碎机:PS-J114 型, 原农林牧渔业部扶沟科学仪器厂生产, 用来将塑料碎料粉碎成粉料.

高速混合机:GH-10DY 型, 北京华新科塑料机械有限公司生产, 用于塑料和木材纤维高速混合.

热压机:80 t 人造板试验压机, 上海人造板机器厂生产.

冷压机:刨花板试验压机, 上海人造板机械厂制造.

万能力学试验机:日本岛津(SHIMADU)公司制造, 最大载荷 5 t.

5J 简支梁冲击试验机:河北承德试验机总厂制造.

1.3 实验方法

1.3.1 木材纤维的处理

用间隙式热磨机处理纤维, 然后用工业标准筛筛分, 取筛孔径为 0.3~1 mm, 干燥含水率 2%~7%, 用薄膜塑料袋密闭包装备用.

1.3.2 回收塑料的处理

回收聚乙烯塑料和回收聚丙烯塑料用塑料粉碎机粉碎成小片, 清洗干燥后, 再用植物样品粉碎机粉碎成粒料. 回收聚苯乙烯塑料清洗后用干燥箱高温处理, 然后用塑料粉碎机粉碎成粒料, 干燥后再用植物样品粉碎机粉碎成粒料, 粉碎筛孔直径为 1.25 mm.

1.3.3 工艺因子的选择和设计

本研究重点考察 3 个工艺因子:塑料种类、木塑质量比和复合材料热压温度;每个工艺因子选用 3 个水平(见表 1). 工艺因子和水平的试验排布采用正交试验设计(见表 2), 采用方差、极差分析确定各

个工艺因子对复合材料性能影响的显著性和因子内的水平差异.

表 1 回收塑料-木材纤维复合材料制备工艺因子、水平

因子	水平		
	1	2	3
A 塑料种类	聚丙烯(PP)	聚苯乙烯(PS)	聚乙烯(PE)
B 木塑质量比	30:70	50:50	70:30
C 热压温度/℃	170	190	210

表 2 回收塑料-木材纤维复合材料的正交试验设计

TABLE 2 The experiment design of the recycled plastic-wood fiber composite panels			
试验号	A 塑料种类	B 木塑质量比	C 热压温度/℃
1	1(PP)	1(30:70)	1(170)
2	1(PP)	2(50:50)	2(190)
3	1(PP)	3(70:30)	3(210)
4	2(PS)	1(30:70)	2(190)
5	2(PS)	2(50:50)	3(210)
6	2(PS)	3(70:30)	1(170)
7	3(PE)	1(30:70)	3(210)
8	3(PE)	2(50:50)	1(170)
9	3(PE)	3(70:30)	2(190)

其他不变的工艺条件如下:热压压力 4 MPa;压板每毫米热压时间 2 min;设计目标密度 1 g/cm³;板材厚度 3 mm;板材幅面 260 mm×260 mm.

按试验设定工艺条件称量塑料和杨木纤维, 用高速混合机机械混合, 手工铺装成板坯, 然后送入热压机进行热压. 每个条件试验重复 2 次. 被测试板材在制备试件室温停放 24 h 后裁制性能测试试件. 其中, 密度、平面抗拉强度和吸水厚度膨胀率按文献[10]测试, 弹性模量和弯曲强度按文献[11]测试, 拉伸强度按文献[12]测试, 冲击强度按文献[13]测试.

2 结果与讨论

物理力学性能测试结果见表 3, 工艺因子极差、方差及显著性分析分别见表 4、5.

表 3 回收塑料-木材纤维复合材料板材实验结果

TABLE 3 Test results of recycled plastic-wood fiber composites							
试 验 号	密度/ (kg· m ⁻³)	24 h 吸水 厚度膨 胀率/%	冲击 强度/ (kJ·m ⁻²)	静曲 强度/ MPa	弹性 模量/ MPa	内结合 强度/ MPa	拉伸 强度/ MPa
1	1.03	1.90	8.48	24.76	2 217.46	2.52	13.53
2	0.99	5.51	8.14	27.03	2 192.69	1.84	14.09
3	0.97	12.01	7.59	19.12	1 902.58	1.14	7.24
4	1.08	1.26	4.40	35.87	2 853.17	2.71	22.91
5	0.99	1.79	3.95	46.22	4 093.41	2.75	24.12
6	0.85	17.39	4.41	22.40	1 724.12	0.47	10.74
7	0.98	0.77	12.84	14.87	928.57	2.54	10.56
8	0.88	4.67	8.51	17.85	1 292.14	1.42	10.01
9	1.04	7.96	7.98	24.53	2 037.24	1.03	14.29
平均值	0.98	5.92	7.37	25.85	2 137.93	1.82	14.17

表 4 工艺因子水平指标的极差分析

TABLE 4 The maximum difference analysis under the process

factors and levels				
工艺因子	水平值	塑料种类	木塑质量比	热压温度
24 h 吸水厚度 膨胀率	1	0.55	−4.61	2.06
	2	0.89	−1.93	−1.01
	3	−1.45	6.53	−1.06
	极差 R	2.35	11.14	3.13
冲击强度	1	0.7	1.2	−0.57
	2	−3.12	−0.5	1.09
	3	2.41	−0.71	−0.53
	极差 R	5.53	1.91	1.66
静曲强度	1	−2.21	−0.68	−4.18
	2	8.98	4.52	3.29
	3	−6.76	−3.83	0.89
	极差 R	15.74	8.35	7.47
弹性模量	1	−33.69	−138.2	−393.36
	2	752.3	388.15	223.10
	3	−718.61	−249.95	170.25
	极差 R	1 470.92	638.1	616.46
内结合强度	1	0.01	0.77	−0.35
	2	0.16	0.18	0.04
	3	−0.16	−0.94	0.32
	极差 R	0.31	1.71	0.67
拉伸强度	1	−2.55	1.5	3.14
	2	5.09	1.9	−2.38
	3	−2.55	−3.42	−0.78
	极差 R	7.64	5.32	5.52

2.1 工艺因子对 24 h 吸水厚度膨胀率的影响

塑料种类对 24 h 吸水厚度膨胀率影响不显著。但从表 4 的数据中可以看出,以回收聚乙烯为原料的板材 24 h 吸水厚度膨胀率小于另外两种塑料制成的板材。

木塑质量比对 24 h 吸水厚度膨胀率影响非常显著。且在木塑质量比 50:50 增加至 70:30 时,24 h 吸水厚度膨胀率增加;在 30:70 时制成的板材吸水厚度膨胀率最低。其原因是塑料含量增加时,进入木材纤维细胞腔空隙部分的塑料分子增加,防水性能也相应增加。

热压温度对 24 h 吸水厚度膨胀率有一定的影响。在 3 种不同的温度下,190 和 210℃ 条件下 24 h 吸水厚度膨胀率相差不大,但均比 170℃ 条件下小。其原因是温度较高时塑料流动性能提高,更易于在杨木材纤维上铺展。

2.2 工艺因子对冲击强度的影响

塑料种类对回收塑料-木材纤维复合板材的冲击强度影响不显著。由表 4 可知其中回收聚苯乙烯材料制成的板材冲击强度最差,回收聚乙烯材料性能最好。

表 5 工艺因子水平的方差分析及显著性检验

TABLE 5 The variance analysis and significance test of the process factors

性能	工艺因子	自由度	偏差平方和	平均偏差平方和	F 值	显著性
24 h 吸水厚度 膨胀率	塑料种类	2	19.334	9.667	1.12	0.360 7
	木塑质量比	2	406.007	203.004	23.53	0.000 1
	热压温度	2	38.489	19.244	2.23	0.153 8
	误差	11	94.920	8.629		
	总计	17	558.750			
冲击强度	塑料种类	2	0.981	0.491	0.75	0.474 1
	木塑质量比	2	0.832	0.416	0.64	0.530 6
	热压温度	2	1.642	0.821	1.26	0.288 7
	误差	94	61.297	0.652		
	总计	100	64.753			
静曲强度	塑料种类	2	5 199.449	2 599.724	46.20	0.000 1
	木塑质量比	2	1 581.731	790.866	14.08	0.000 1
	热压温度	2	1 303.452	651.726	11.60	0.000 1
	误差	90	5 055.754	56.175		
	总计	96	13 140.385			
弹性模量	塑料种类	2	35 593 202.928	17 796 601.464	29.62	0.000 1
	木塑质量比	2	7 733 747.759	3 866 873.880	6.44	0.002 4
	热压温度	2	7 726 103.365	3 863 051.682	6.43	0.002 5
	误差	90	54 081 067.433	600 900.749		
	总计	96	105 134 121.485			
内结合强度	塑料种类	2	0.606	0.303	1.38	0.268 0
	木塑质量比	2	17.537	0.768	39.92	0.000 1
	热压温度	2	2.918	1.459	6.64	0.004 4
	误差	28	6.150	0.220		
	总计	34	27.211			
拉伸强度	塑料种类	2	1 299.729	649.864	30.07	0.000 1
	木塑质量比	2	470.003	235.001	10.87	0.000 1
	热压温度	2	507.616	253.808	11.74	0.000 1
	误差	89	1 923.322	21.610		
	总计	95	4 200.670			

注:显著水平 $\alpha=0.05$ 。

木塑质量比对回收塑料-木材纤维复合板材的冲击强度影响不显著. 从表 4 中可知木塑质量比在 50:50 和 70:30 时冲击强度相差不大, 木塑质量比为 30:70 时稍好.

热压温度对回收塑料-木材纤维复合板材冲击强度影响不显著. 从表 4 可知温度在 190℃ 时较好, 温度在 170 和 210℃ 时较差.

2.3 工艺因子对静曲强度的影响

塑料种类对回收塑料-木材纤维复合板材的静曲强度影响非常显著. 在 3 种不同的回收塑料中, 回收聚苯乙烯材料制成的板材的静曲强度最高, 其他两种回收塑料制成的板材性能均在平均值以下(表 4). 不同塑料制成的木塑复合板材强度性能的差异主要是由于塑料表面自由能不同(聚丙烯塑料的表面自由能为 28.0 mJ/m²、聚乙烯 35.5 mJ/m²、聚苯乙烯 44 mJ/m²)^[14] 以及其熔融温度不同(低密度线性聚乙烯的熔融温度为 115~118℃, 聚丙烯的熔融温度为 170℃, 聚苯乙烯没有明显的熔点)造成的^[15].

木塑质量比对回收塑料-木材纤维复合板材的静曲强度影响非常显著(表 5). 在 3 种不同的木塑质量比中, 木塑质量比 50:50 时静曲强度最大, 30:70 时次之, 70:30 时最低(表 4). 造成这种差异的原因可能是塑料含量较高时塑料与木材纤维的分散性较好.

热压温度对回收塑料-木材纤维复合板材的静曲强度影响非常显著(表 5). 3 种不同热压温度中, 温度在 190℃ 时静曲强度最好, 210℃ 次之, 170℃ 最差. 其原因是塑料在温度较高时(如 190℃), 流动性能增加, 能更好地与木材纤维进行复合, 但温度继续增加(210℃)时, 木材纤维热降解加剧^[16], 静曲强度反而有所下降.

2.4 工艺因子对弹性模量的影响

塑料种类对回收塑料-木材纤维复合材料的弹性模量影响非常显著(表 5). 3 种不同塑料种类中聚苯乙烯制成的材料的弹性模量性能最好, 聚丙烯塑料次之, 聚乙烯塑料最次. 造成这种差异的原因与塑料的表面自由能和熔融温度相关.

木塑质量比对回收塑料-木材纤维复合材料的弹性模量影响非常显著(表 5). 从表 4 中可以看出木塑质量比较低时(木塑质量比由 30:70 增至 50:50), 弹性模量随之增加, 木塑质量比再增加时, 弹性模量又有轻微下降.

热压温度对回收塑料-木材纤维复合材料的弹性模量影响非常显著(表 5). 从表 4 中可知热压温度对弹性模量影响的曲线与木塑质量比对它影响的曲线相似. 造成这种现象的原因可能是由于塑料含量增加, 温度升高时, 塑料的流动性能增加, 进入木

材纤维细胞腔内塑料成分增加; 但温度过高时, 木材纤维降解增加, 弹性模量反而有所下降.

2.5 工艺因子对内结合强度的影响

塑料种类对回收塑料-木材纤维复合材料的内结合强度影响不显著(表 5). 从表 4 中可知回收聚苯乙烯塑料制成的材料性能较好.

木塑质量比对回收塑料-木材纤维复合材料的内结合强度影响非常显著(表 5). 由表 4 知, 随着塑料含量的增加, 内结合强度也随之增加, 这可能是由于塑料增加时, 与木材纤维的结合点增多造成的.

热压温度对回收塑料-木材纤维复合材料的内结合强度影响非常显著(表 5). 由表 4 知, 内结合强度随热压温度的增加而增加, 这可能是由于温度高时, 更有利于塑料在木材纤维表面的分布造成的.

2.6 工艺因子对拉伸强度因素的影响

塑料种类对回收塑料-木材纤维复合材料的拉伸强度影响非常显著(表 5). 3 种回收塑料中, 聚苯乙烯塑料制成的板材拉伸强度最高, 聚乙烯塑料和聚丙烯塑料的相差不大(表 4). 造成这种差异的原因可能是 3 种塑料的分子结构不同.

木塑质量比对回收塑料-木材纤维复合材料的拉伸强度影响非常显著(表 5). 由表 4 知, 木塑质量比为 50:50 时拉伸强度最大, 30:70 时较低, 70:30 最差. 这一点也能说明塑料在板材内部为流动相, 而木材纤维为固体相.

热压温度对回收塑料-木材纤维复合材料的拉伸强度影响非常显著(表 5). 由表 4 知, 热压温度在 190℃ 时拉伸了强度达到最大值, 这可能是由于热压温度较高时塑料流动性能增加, 易于在木材纤维表面铺展; 但温度过高时, 木材纤维热降解加剧, 性能反而有所下降.

3 结 论

在研究制造的回收木塑复合板材中, 塑料种类、木材纤维-塑料混合比和热压温度等复合工艺因子均对板材性能有不同程度的影响. 在复合材料静曲强度、弹性模量和拉伸强度方面, 塑料种类、木塑质量比和热压温度影响都非常显著. 在 24 h 吸水厚度膨胀率方面, 木塑质量比的影响达到统计学上的很显著. 在内结合强度方面, 木塑质量比和热压温度都达到统计学上的很显著. 在冲击强度方面, 塑料种类、木塑质量比和热压温度影响不显著.

综上所述, 当采用回收塑料为回收聚苯乙烯(PS)、木塑质量比为 50:50、热压温度为 190℃ 时, 板材的各项指标都达到最大值. 回收聚乙烯塑料和回收聚丙烯在木塑质量比为 50:50 和热压温度为

190℃制成的板材较其他条件制成的材料性能较好,其中回收聚乙烯塑料性能相对稍差,建议采用与聚苯乙烯共聚的方法加以改性.

参 考 文 献

[1] 王正,鲍甫成,郭文静. 木塑复合工艺因子对复合材料性能的影响[J]. 林业科学,2003,39(5):87-94.
WANG Z, BAO F C, GUO W J. The effect of the process factors on the properties of wood-plastic composite panel[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(5):87-94.

[2] 杨文斌,刘一星. 再生聚丙烯与木刨花复合材料的密度和木塑比对复合材料主要性能的影响[J]. 林产工业,2003,30(4):29-31.
YANG W B, LIU Y X. Main properties of WPC made from recycled PP and wood particle[J]. *China Forest Product Industry*, 2003, 30(4):29-31.

[3] 秦特夫. 改善木塑复合材料界面相容性的途径[J]. 世界林业研究,1998(3):46-51.
QIN T F. The approach to improve the interface compatibility between wood and synthetic polymers[J]. *World Forestry Research*, 1998(3):46-51.

[4] 闫昊鹏,王建军. 木材纤维-合成纤维复合的研究[J]. 木材工业,2001,15(4):9-11,18.
YAN H P, WANG J J. Study on the composite of wood-synthetic fiber[J]. *China Wood Industry*, 2001, 15(4):9-11, 18.

[5] 刘文斌,刘一星,李坚,等. 木刨花与再生塑料复合材料的物理力学性能[J]. 福建林学院学报,2002,22(4):299-303.
LIU W B, LIU Y X, Li J, et al. Physical and mechanical properties of composites made with wood particle and recycled EPS plastic[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2002, 22(4):299-303.

[6] YOUNGQUIST J A, KRZYSIK A M, MUEHL J H, et al. Mechanical and physical properties of air-formed wood-fiber/polymer-fiber composites[J]. *Forest Product Journal*, 1992, 42(6):42-48.

[7] LIANG B H, MOTT L, SHALER S M, et al. Properties of transfer-molded wood-fiber / polystyrene composites [J]. *Wood and Fiber*

Science, 1994, 26(3):382-389.

[8] 中国林科院木工所木质纤维复合材料专题组. 木/塑复合工程材料工艺试验研究[J]. 木材工业,1998,12(4):14-17.
Research Group of Wood-Plastic Fiber Composite, Chinese Academy of Forestry. Study on manufacturing technology of engineering composite materials from wood-plastic fiber [J]. *China Wood Industry*, 1998, 12(4):14-17.

[9] 王恺. 木质纤维复合材料——一种有发展前景的复合材料[J]. 木材工业,1994,8(2):32-35.
WANG K. Wood fiber composite: A composite of prospect development[J]. *China Wood Industry*, 1994, 8(2):32-35.

[10] GB/T 17657-1999 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].
GB/T 17657-1999 Test methods of evaluating the properties of wood-based panels and surface decorated wood-based panels[S].

[11] GB/T 1043-93 塑料弯曲性能试验方法[S].
GB/T 1043-93 Plastics-determination of hexural properties of rigid plastics[S].

[12] GB/T 1040-90 塑料拉伸试验方法[S].
GB/T 1040-90 Plastics-determination of tensile properties[S].

[13] GB/T 9341-88 硬质塑料简支梁冲击试验方法[S].
GB/T 9341-88 Plastics-determination of charpy impact strength of rigid materials[S].

[14] 顾惕人,朱埏瑶,李外朗,等. 表面化学[M]. 北京:科学出版社,1999.
GU T R, ZHU S Y, LI W L, et al. *Surface chemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1999.

[15] 黄德余,朱埏瑶,李外朗,等. 塑料性能评定[M]. 北京:中国标准出版社,1990.
HUANG D Y, ZHU S Y, LI W L, et al. *Evaluation of plastic properties* [M]. Beijing: China Standard Press, 1990.

[16] 成俊卿. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,1981.
CHENG J Q. *Wood science* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1981.

(责任编辑 李文军)

本刊 2005 年第 2 期要目预告

- 旷远文等:鼎湖山季风常绿阔叶林各层次优势种热值研究
- 罗 辑等:贡嘎山天然林营养元素生物循环特征
- 徐秋芳等:灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究
- 赵廷宁等:平行高立式沙障对严重沙化草地植被及土壤种子库的影响
- 王安志等:云杉截留降雨实验与模型
- 张 志等:晋西黄土区蔡家川流域景观地形分异格局研究
- 毕华兴: 基于 DEM 的数字地形分析研究
- 郝朝运等:濒危植物七子花种群间遗传分化的初步研究
- 明 军等:梅花品种资源核心种质构建
- 王鸿斌等:油松萜烯类挥发物释放规律与红脂大小蠹危害关系研究
- 刘海军等:北京地区红脂大小蠹、美国白蛾和锈色粒肩天牛风险评价
- 宋瑞清等:四种毒蘑菇菌株及其毒素对杨树烂皮病菌生长的抑制作用
- 钱 桦等:淬火圆锯片回火残余应力的实验研究
- 吴 娟等:大片刨花板热压的传热过程