

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.001

预浸料含水率对麻纤维增强水性树脂的性能影响

张东辉¹, 王春红¹, 潘国立², 王利剑¹, 刘胜凯¹

(1. 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 扬州超峰汽车内饰件有限公司, 江苏扬州 225000)

摘要: 为研发节能、环保、健康的绿色麻纤维增强树脂复合材料, 以水性丙烯酸树脂(WAP)为基体, 以黄麻纤维(JF)为主增强体, 聚丙烯(PP)纤维为抗泳移剂, 制备了WAP/JF-PP复合材料, 探究了预浸料成型过程中水溶剂对WAP/JF-PP的力学性能的影响。分别采用热解析法和袋子法探究了预浸料含水率对总挥发性有机物释放量(TVOC)、三醛释放量(甲醛、乙醛、丙烯醛)的影响, 并采用扫描电子显微镜(SEM)技术探究了纤维和树脂的界面结合性能。结果表明: 随着预浸料含水率的增加, WAP/JF-PP的力学性能呈现逐步变缓的上升趋势, WAP 0 (预浸料含水率为0%)/JF-PP到WAP 10 (预浸料含水率为10%)/JF-PP提升最大。SEM结果表明, 水溶剂增强了模压过程树脂的流动性, 有利于纤维和WAP的界面结合。由于树脂包覆和水溶剂的汽提剂作用, 预浸料含水率为10%时, WAP 10/JF-PP的TVOC和三醛释放量最低, 分别为53.95 $\mu\text{g/g}$ 和0.62 mg/m^3 , 相比与纯纤维毡(JF-PP)分别降低了74.3%和19.5%。综合来看预浸料含水率在10%时复合材料性能达到最佳。

关键词: 水性树脂; 麻纤维; 挥发性有机物释放量; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0001-07

Effect of Moisture Content of Prepreg on Properties of Jute Fiber Reinforced Water-Based Resin

Zhang Donghui¹, Wang Chunhong¹, Pan Guoli², Wang Lijian¹, Liu Shengkai¹

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Yangzhou Chaofeng Automotive Interior Parts Co. Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract : In order to develop energy-saving, environmentally friendly and healthy green hemp fiber reinforced resin composites, water-based acrylic resin (WAP)/jute fiber (JF)-polypropylene (PP) fiber composite was prepared with WAP as matrix, JF as main reinforcement and PP fiber as anti-migration agent. The effect of water solvent on the mechanical properties of WAP/JF-PP during prepreg molding was investigated. The effects of water solvent on the release of total volatile organic compounds (TVOC) and tri-aldehyde (formaldehyde, acetaldehyde and acrolein) were investigated by thermal analysis and sampling bag method, respectively. The interfacial bonding properties of fibers and resins were investigated by scanning electron microscope(SEM). The results indicate that the mechanical properties of WAP/JF-PP increase gradually with the increase of water solvent content of prepreg, and the increase from WAP0 (water solvent content of prepreg is 0%)/JF-PP to WAP10 (water solvent content of prepreg is 10%)/JF-PP is the largest. The increase of water solvent content of prepreg enhance the fluidity of the resin during the molding process, and the SEM results show that it is beneficial to the interface bonding of the fiber and WAP. Due to the effect of resin coating and water solvent stripping agent, when the water solvent content of the prepreg is 10%, the TVOC and tri-aldehyde release of WAP/JF-PP are the lowest, which are 53.95 $\mu\text{g/g}$ and 0.62 mg/m^3 , respectively, which are 74.3% and 19.5% lower than pure fiber felt (JF-PP). Overall, when the water solvent content of prepreg is 10 %, the performance of the composite material is the best.

Keywords : water-based resin ; jute fiber ; volatile organic compounds ; composite ; mechanical property

基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2021057)

通信作者: 王春红, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为植物纤维绿色复合材料研究与工程应用

收稿日期: 2023-03-01

引用格式: 张东辉, 王春红, 潘国立, 等. 预浸料含水率对麻纤维增强水性树脂的性能影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5): 1-7, 13.

Zhang Donghui, Wang Chunhong, Pan Guoli, et al. Effect of moisture content of prepreg on properties of jute fiber reinforced water-based resin[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 1-7, 13.

目前,发展低碳环保的绿色材料已经成为全球的共识,而我国也提出了在2030年实现“碳达峰”,2060年实现“碳中和”的目标。而麻纤维作为一种天然纤维,拥有可再生、质量轻、比强度、比模量高的优点,是非常优异的环保材料。其中黄麻纤维(JF)相比其他麻纤维来说,成本低,产量大。以其为增强体的树脂基复合材料作为非承力结构可作为一种优异、环保、经济的石油基材料的替代品,它已经在汽车内饰、体育用品和家装建筑等行业被广泛应用^[1-2]。

然而,JF作为亲水性纤维与传统疏水性树脂界面结合性差是限制其应用的一大难题^[3]。此外,传统石油基树脂生产过程中使用的含有大量挥发性有机物(VOC)的原料和助剂,被认为是天然纤维复合材料中VOC的主要来源^[4-6]。JF中含有半纤维素、木质素、果胶等在高温下也易分解产生VOC^[4-9]。这些VOC分子在使用过程中对人体危害极大^[7-9]。而水性树脂本身含有的亲水性基团可与JF表面羟基相连或化学键结合^[4,10-11],而且采用水作为溶剂减小了有机溶剂的使用,极大降低了VOC的释放,近年来水性树脂已经作为一种环保涂料和面漆被广泛应用^[12]。

目前对于天然纤维增强水性树脂的研究主要集中在如何通过成型工艺或者物理和化学改性来提高复合材料的力学性能^[10-11],比如对成型工艺参数进行优化^[4,13];对麻纤维进行碱热处理,或者以葵花籽油、纤维素纳米晶体作为改性剂改善了复合材料的耐摩擦、力学和耐气候等性能^[14-16];Rasyid M F A采用硅酸钠作为阻燃剂提高其阻燃性能^[17];Tamrakar S通过纤维混杂方式提高耐湿热和力学性能^[18]。学者们对天然纤维增强水性树脂的物理或者化学改性对力学和耐老化性能方面研究较为深入,但是忽略了对VOC释放性能的探讨,且水溶剂作为水性树脂的重要特点之一,其对复合材料的影响机制尚不明确。笔者针对这一问题,探究了水溶剂在复合材料成型过程中对力学性能和VOC释放性能的影响机制。

1 实验部分

1.1 主要原材料

JF:平均长度87.54 mm,平均直径52.8 μm ,平均拉伸强度527 MPa,扬州超峰汽车内饰件有限公司;

聚丙烯(PP)纤维:平均长度51 mm,平均细度30.83 μm ,平均拉伸强度382 MPa,泰州海仑化纤有限公司;

纤维毡(JF-PP):JF,PP质量含量分别为80%,20%,扬州超峰汽车内饰件有限公司;

水性丙烯酸树脂(WAP):Acrodur 950L,pH值3-4,含固率50%,德国巴斯夫公司。

1.2 主要设备及仪器

电热恒温鼓风干燥箱:GT-7024-EM1型,东莞市高铁检测仪器有限公司;

卧式小轧车:P-BO型,佛山市亚诺精密机械制造有限公司;

模压机:无锡市强通有限公司;

拉力试验机:AGS-X-5KN型,日本岛津公司;

热脱附气质联用仪:TD-GC/MS 7820A型,美国安捷伦公司;

高效液相色谱仪:1220LC型,美国安捷伦公司;

扫描电子显微镜(SEM):TM3030型,日本株式会社日立高新技术事业所;

综合热分析仪:STA 449 F5 (TG-DSC)型,德国耐驰制造有限公司。

1.3 试样制备

将尺寸为30 cm×30 cm的JF-PP在80 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干3 h备用,工艺制备流程图如图1所示。按图1所示,将WAP溶液和水按1:1(质量比)混合稀释,放入胶槽备用。将烘干后的纤维毡浸入胶槽待完全浸透后,放入小轧车挤出多余胶液制成预浸料,挤压辊压力0.15 MPa。将预浸料放入烘箱,每30 min称重一次。预浸料含水率分别烘干至0%,10%,20%,30%,制备的复合材料分别以WAP0/JF-PP, WAP10/JF-PP, WAP20/JF-PP, WAP30/JF-PP表示。

预浸料含水率 W 可由下式可得:

$$W = \frac{m_3 - [m_1 + (m_2 - m_1)P]}{m_3} \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$m_3 = \frac{m_1 + (m_2 - m_1)P}{1 - W} \quad (2)$$

其中: W 为预浸料含水率,%; m_1 为烘干纤维毡的质量,g; m_2 为挤压过后预浸料质量,g; m_3 为烘干过程中预浸料的质量,g; P 为树脂溶液的含水率,为75%。

将烘干完成的预浸料上、下、左、右各切除3 cm。将切好的预浸料放入模具,在170 $^{\circ}\text{C}$ 、4 MPa下

成型,排气循环如图1所示。所制备的复合材料(WAP/JF-PP)纤维占比见表1。

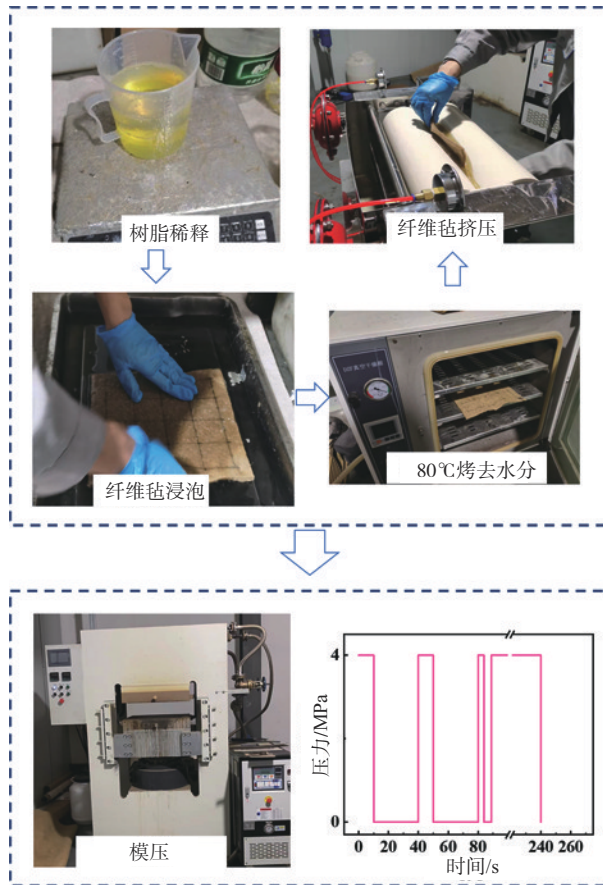


图1 工艺制备流程图

表1 不同组WAP/JF-PP中JF-PP的质量占比 %

项目	WAP0/JF-PP	WAP10/JF-PP	WAP20/JF-PP	WAP30/JF-PP
JF-PP 占比	61	59	60	59

1.4 性能测试

拉伸性能按 ASTM D638-2014 测试,试样尺寸为 160 mm×12.5 mm×1.6 mm,拉伸标距为 90 mm,加载速度为 5 mm/min,结果取 5 次测试的平均值。

弯曲性能按 ASTM D790-2010 测试,试样尺寸为 60 mm×12.5 mm×1.6 mm,弯曲隔距为 25.6 mm,加载速度为 2 mm/min,结果取 5 次测试的平均值。

剪切强度按 JC/T773-2010 测试,试样尺寸为 60 mm×10 mm×1.6 mm,剪切隔距为 8 mm,加载速度为 2 mm/min,结果取 5 次测试的平均值。

总挥发性有机物(TVOC)释放浓度测试:参考 VDA 278-2011,采用热脱附气质联用(GC-MS)法进行测试,复合材料制备完成后在通风处、室温下放置 7 d。取 20 mg 样品放入石英玻璃管中 90 °C 下热脱附 30 min,将气体收集到-30 °C 的硅烷化玻璃棉

中,热脱附完成后在 300 °C 条件下解析进入 GC-MS 系统进行定量和定性分析。JF-PP 经过与复合材料相同热压工艺后进行测试。

三醛类物质释放性能测试:按照 QBJZC 168003-2015,采用 10 L 袋子法,检测甲醛、乙醛和丙烯醛的释放。毡材和板材样品尺寸为 10 cm×8 cm,测试前样品在通风处,室温下放置 7 d。

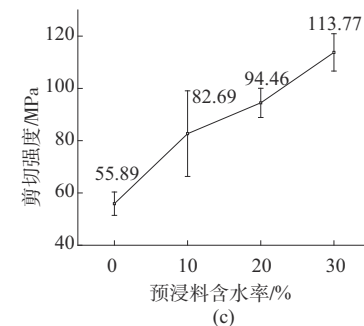
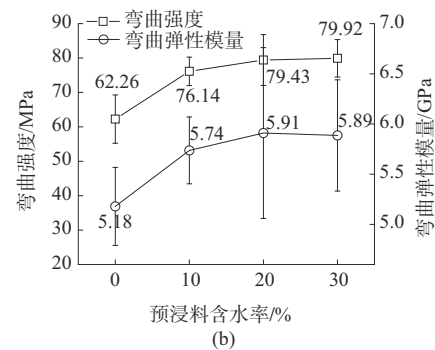
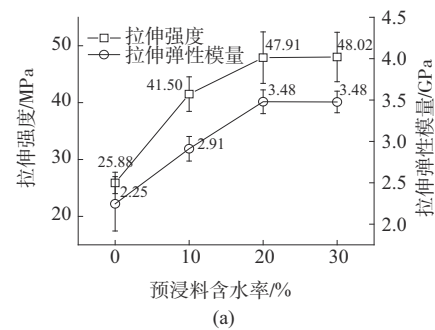
微观形貌测试:采用 SEM 观察各组样品断裂面和表面。

热稳定性:分析各组复合材料的热学性能。氮气气氛,升温速率 10 °C/min,温度范围 25 ~ 600 °C。

2 结果与讨论

2.1 预浸料含水率对力学性能的影响

图2对比了在不同预浸料含水率下制备的复合材料的拉伸、弯曲和层间剪切性能。由图2可知,随着水溶剂的增加复合材料的拉伸性能和弯曲性能



a—拉伸性能;b—弯曲性能;c—剪切强度

图2 预浸料含水率对WAP/JF-PP材料力学性能的影响

升高趋势逐渐变缓;当预浸料含水率为10%时(WAP10/JF-PP),其拉伸强度和弯曲强度分别为41.50 MPa和76.14 MPa,相比0%(WAP0/JF-PP)分别提升了60.4%和22.3%;拉伸弹性模量和弯曲弹性模量为2.91 GPa和5.74 GPa,分别提升了29.3%和10.8%。但预浸料含水率为30%时(WAP30/JF-PP),其拉伸强度和弯曲强度分别为48.02 MPa和79.92 MPa,相比WAP10/JF-PP的性能仅提高了15.7%和5%;拉伸弹性模量和弯曲弹性模量仅提高了19.6%和2.6%。WAP0/JF-PP到WAP30/JF-PP层间剪切强度呈准线性增加,WAP0/JF-PP到WAP10/JF-PP提升了48%,效果最明显。而后两组相比前一组则分别提升了14%和20%。

图3为不同组样品的弯曲断裂形貌。由图3可以看出,WAP0/JF-PP的断面中观察到了大量JF处于游离状态并没有与基体很好结合在一起;随着预浸料含水率的增加,裸露的JF消失,断裂面中抽拔出的PP占主要成分。

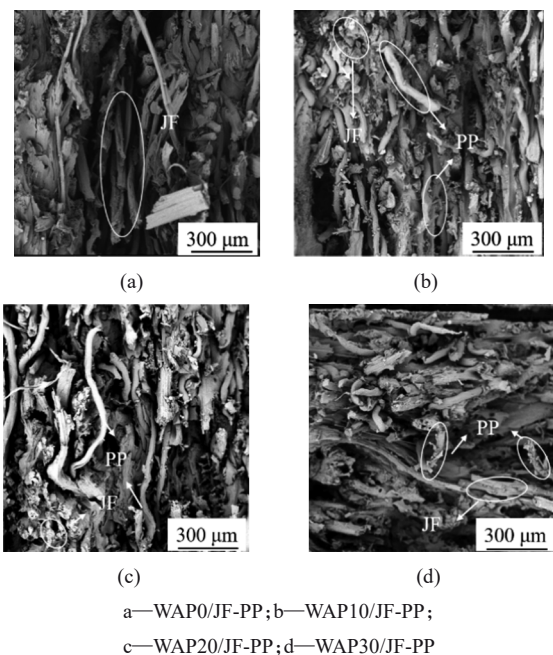


图3 不同组WAP/JF-PP拉伸样品的断裂面SEM照片

图4进一步展示了WAP0/JF-PP样品弯曲断裂后的表现形貌和微观结构,可以看出树脂富集在样品表面,内部存在大量裸露纤维。WAP10/JF-PP样品弯曲断裂面整齐,纤维与基体结合良好。这与预浸料在烘干过程中产生的泳移有关,由于纤维毡的表面直接接触热空气,因此水分的蒸发速率快,在纤维内部形成了溶液的浓度梯度差,在浓度梯度差的作用下溶液向毡子表面富集^[19-20];而预浸料含水

率的提升增加了树脂的流动性^[21],预浸料受到模具的挤压时,树脂的流动填充了板材内部空隙,对纤维形成了更好的包覆。根据复合材料界面的机械黏结理论,液态或者熔融态下的树脂可以在成型过程中包覆纤维,树脂固化后发生机械啮合^[22]。因此预浸料含水率的升高提高了复合材料的界面性能,图2中层间剪切强度的提升也可以证明这一点。

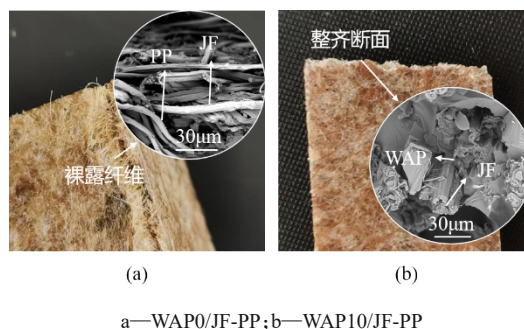


图4 WAP0/JF-PP和WAP10/JF-PP的弯曲断裂样品SEM照片

2.2 预浸料含水率对VOC释放性能的影响

图5为JF-PP和不同组复合材料TVOC的变化趋势。可以看出,JF-PP在结合树脂后TVOC释放量大大减小,释放浓度最低的为WAP10/JF-PP,释放浓度为53.95 $\mu\text{g/g}$,相比JF-PP的210.38 $\mu\text{g/g}$ 降低了74.4%。表2为JF-PP和在不同预浸料含水率下制备的复合材料的单项VOC识别结果和TVOC的释放量。

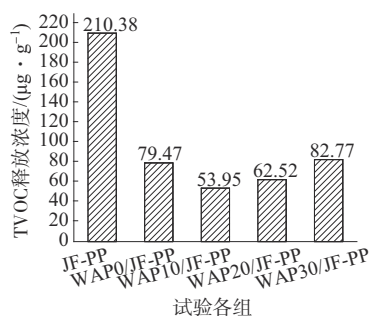


图5 不同组WAP/JF-PP样品的TVOC释放浓度

板材在空气中VOC的释放过程大致可以分为三个阶段,第一个阶段为浓度梯度差的作用下,VOC分子由板材内部的纤维表面传递到板材和空气的接触面;第二个阶段为VOC分子在空气-界面-板材不断进行交换达到平衡;第三个阶段为在对流传质作用下VOC分子由界面传递到空气中,导致空气中VOC浓度升高,其中第一阶段占主要作用^[23]。因此,VOC分子释放过程可简化为,VOC分子从纤维表面传递至复合材料表面的过程。包裹在纤维表面的树脂可视为阻隔层,阻隔层的存在可

表2 JF-PP原料及不同组WAP/JF-PP的释放产物及浓度

物质名称	释放浓度					物质名称	释放浓度				
	JF-PP	WAP0/ JF-PP	WAP10/ JF-PP	WAP20/ JF-PP	WAP30/ JF-PP		JF-PP	WAP0/ JF-PP	WAP10/ JF-PP	WAP20/ JF-PP	WAP30/ JF-PP
苯	5.43	3.04	1.71	2.79	3.15	丙酮	0.17	0.12	0.18	0.17	0.08
甲苯	0.27	ND	ND	ND	ND	2-茛酮	0.27	0.04	0.07	0.11	0.03
乙苯	0.27	ND	ND	ND	ND	4-甲基-2-己酮	ND	ND	ND	ND	ND
二甲苯	0.32	ND	ND	ND	ND	二甲基环戊酮	0.09	ND	ND	ND	ND
苯乙烯	0.57	ND	ND	ND	ND	异戊二烯	0.25	ND	ND	ND	ND
1-甲基-2-异丙基苯	2.12	ND	0.26	ND	0.22	环己烯	ND	ND	ND	ND	ND
(1-甲基乙基)-苯	0.09	ND	ND	ND	ND	十三烯	0.82	0.12	0.79	0.32	1.45
苯甲醛	0.22	ND	ND	ND	ND	十五烯	0.46	ND	ND	ND	ND
苯酚	0.35	ND	ND	ND	ND	邻苯二甲酸二乙酯	12.57	ND	ND	ND	ND
氯二甲苯酚	0.11	ND	ND	ND	ND	乙酸异丁酯	1.76	0.24	1.76	0.73	3.60
2,4-二叔丁基苯酚	2.37	1.98	0.67	1.55	1.64	邻苯二甲酸二丁酯	7.19	1.18	1.77	1.49	2.10
己醛	0.15	ND	ND	ND	ND	1,2-苯二甲酸丁辛酯	3.96	0.22	0.47	0.33	0.23
糖醛	ND	0.13	0.04	0.13	0.08	棕榈酸甲酯	2.40	ND	ND	ND	ND
壬醛	ND	0.07	0.12	0.09	0.06	正戊醇	0.07	ND	ND	ND	ND
2,3,6-三氯苯甲醛	0.11	ND	ND	ND	ND	顺式-11-十六烯-1-醇	0.14	ND	ND	ND	ND
十一醛	0.26	0.16	0.40	0.18	0.11	C ₃ -C ₁₀	2.16	0.03	0.20	0.18	0.02
十二醛	ND	ND	ND	ND	ND	C ₁₁ -C ₁₆	0.22	14.97	ND	ND	ND
乙酸	0.48	0.74	0.33	0.32	0.40	C ₁₆ -C ₂₀	157.5	56.08	44.61	53.73	68.97
十六烷酸	4.70	0.35	0.41	0.40	0.58	C ₂₀ -C ₂₄	ND	ND	ND	ND	ND
二甲酯十一烷酸	2.58	ND	0.15	ND	0.07	总和	210.4	79.47	53.95	62.52	82.77

注:ND表示未检出。

以增加VOC分子的传质阻力^[24],因此WAP/JF-PP的TVOC释放浓度相比JF-PP大大减少。

随着预浸料含水率的变化,复合材料的TVOC释放量先减少后增大,即TVOC浓度:WAP10/JF-PP < WAP20/JF-PP < WAP0/JF-PP < WAP30/JF-PP。相比WAP10/JF-PP, WAP0/JF-PP的TVOC释放浓度增长了47.3%, WAP20/JF-PP略微增长了15.9%, WAP30/JF-PP增长最多为53.4%。

由以上讨论可知,预浸料含水率由0%增长到10%时,树脂对纤维的包覆性增强,剪切性能提升最明显。因此WAP10/JF-PP的TVOC释放下降是因为更好的界面性能抑制了VOC分子的释放^[25]。而预浸料含水率达到20%和30%时TVOC的增加,是因为在模压过程中包括水蒸气在内的气体小分子的脱挥形式发生了变化。在工业上聚合物脱挥的过程中,根据挥发性物质的含量不同,脱挥形式可分为三种^[26-27]:挥发分含量在20%以上时,主要是闪蒸脱挥,在高温低压下使挥发物快速气化从而排出大量的挥发分;挥发分含量在5%~20%时,主要是气泡脱挥,利用挥发分在聚合物中的起泡、聚集、移动来排出挥发分;在含量低于5%时扩散脱挥为主要形式,主要受气体的传质系数,界面两侧的浓度梯度差的影响。在脱挥效率上,闪蒸脱挥>气泡

脱挥>扩散脱挥。预浸料含水率大于10%的状态下模压过程如图6所示,水分的加入发挥了汽提剂的效果,在高温高压下,树脂中的水分蒸发产生的气泡降低了体系中挥发分的分压,从而减少了平衡态时挥发分的质量分数;同时气泡的产生促进了树脂的沸腾、增大了传质效率,也增加了挥发分的传质面积^[28]。另外预浸料在模具中处于相对封闭的状态,因此VOC分子大量聚集到了预浸料表面。

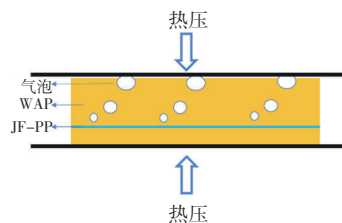


图6 预浸料模压过程示意图

热压过程中不断经历加压、卸压循环,可视为在高温状态下从高压状态突然转到低压状态。因此在预浸料含水率大于20%时,产生类似闪蒸的效果,将纤维中大量VOC分子带到板材表面。预浸料含水率在10%时,随着挥发分含量降低,模压过程产生气泡脱挥,被带到板材表面的VOC分子减少。

2.3 预浸料含水率对醛类释放性能的影响

表3为不同预浸料含水率条件下制备的WAP/JF-PP的三醛释放浓度。由表3可知, WAP10/JF-

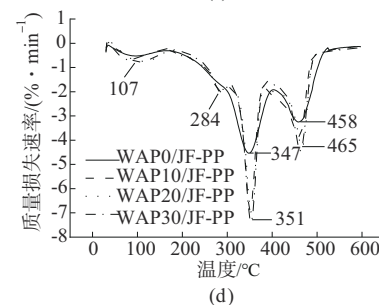
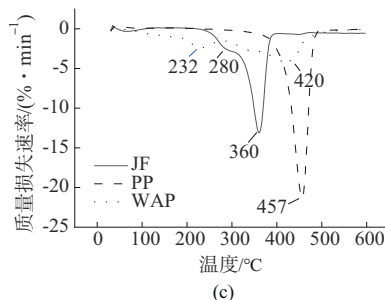
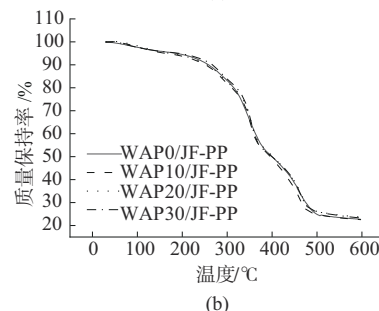
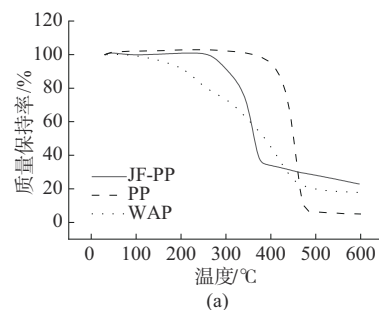
物质种类	JF-PP	WAP0/ JF-PP	WAP10/ JF-PP	WAP20/ JF-PP	WAP30/ JF-PP
甲醛	0.27	0.44	0.14	0.2	0.45
乙醛	0.33	0.63	0.39	0.41	0.9
丙烯醛	0.17	0.05	0.08	0.05	0.14
总和	0.77	1.11	0.62	0.66	1.49

PP, WAP20/JF-PP 的三醛释放浓度分别为 $0.62 \text{ mg}/\text{m}^3$ 和 $0.66 \text{ mg}/\text{m}^3$, 相比 JF-PP 释放浓度分别下降了 20.4% 和 15%, WAP0/JF-PP 和 WAP30/JF-PP 均出现了提升。随着预浸料含水率的增加, 变化趋势与 TVOC 相同。

WAP/JF-PP 在预浸料含水率为 0% 和 30% 条件下相比 JF-PP 三醛类释放浓度增加的原因可能是酸性条件下造成了 JF 中半纤维素和木质素的降解从而导致醛类增多。已有研究证明半纤维素中含有的乙酰基团在酸性条件下可以水解为乙酸, 产生的乙酸又进一步催化半纤维素的分解^[29]。此外半纤维素在酸性条件下高温氧化也会产生大量糖醛^[12,30], 因此乙酸和糖醛可作为半纤维分解的标志性产物。由 TVOC 测试中也可以看出, JF-PP 的糖醛和乙酸释放浓度分别为 $0, 0.48 \mu\text{g}/\text{g}$; WAP0/JF-PP 的糖醛和乙酸释放浓度分别为 $0.13, 0.74 \mu\text{g}/\text{g}$, 二者均出现大幅度上升。进一步说明了混入树脂后, 酸性条件促进了 JF 的水解。

图 7a 和图 7c 分别为 JF, PP 和 WAP 的 TG 和 DTG 曲线, 可以看出 JF 的主分解峰出现在 360°C , 280°C 出现微弱的分解峰, 此峰为半纤维素的降解^[25]; PP 只有一个分解峰。WAP 在 DTG 中表现出两个分解峰, 第一个峰的起始点在 170°C , 峰值为 232°C 。此为 WAP 在固化过程中因为酯化反应产生的脱水引起失重, 第二失重峰值发生在 420°C , 此为 WAP 的分解峰。

图 7b 和图 7d 为不同组的 WAP/JF-PP 的 TG 和 DTG 曲线, 可以看出 WAP/JF-PP 的主分解峰发生在 351°C 和 465°C 附近, 分别对应 JF 的纤维素分解和 PP, WAP 的分解。在 284°C 位置除 WAP0/JF-PP 外, 其余三组均出现一个小分解峰, 对应麻纤维半纤维素的分解。这是因为在树脂中的酸性基团随着水分的增加电离程度提高, 酸性条件促进了半纤维素的水解, 与前文所述一致。同时, 由于酸性条件对 JF 的破坏, WAP/JF-PP 中纤维素的分解温度相比于 JF 降低了 $9 \sim 13^\circ\text{C}$ 。



a, b—JF, PP, WAP 的 TG 图, 各 WAP/JF-PP 材料的 TG 图;

c, d—JF, PP, WAP 的 DTG 图, 各 WAP/JF-PP 材料的 DTG 图

图7 JF, PP, WAP 和 WAP/JF-PP 的 TG, DTG 曲线

3 结论

(1) 采用低 VOC 挥发 WAP 后, WAP/JF-PP 复合材料的 TVOC 大幅度减少, 预浸料含水率为 10% (WAP10/JF-PP) 时释放量最少, TVOC 释放量为 $53.95 \mu\text{g}/\text{g}$; 三醛类(甲醛、乙醛、丙烯醛)的释放浓度为 $0.62 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。相比于纤维毡(JF-PP), TVOC 下降了 74.3%, 三醛类(甲醛、乙醛、丙烯醛)释放浓度下降了 19.5%。

(2) 随着预浸料含水率的增加, 纤维和树脂的界面性能逐渐提升, WAP/JF-PP 的力学性能呈逐步变

缓的增加趋势。

(3) VOC 释放同时受到 WAP/JF-PP 的界面性能和预浸料含水率的影响,预浸料含水率较低时界面增强占主导作用,随着预浸料含水率的增加水分的汽提剂效应占主导。

参考文献

- [1] Devarajan B, Lakshminarasimhan R, Venkateswaran B, et al. Additive manufacturing of jute fiber reinforced polymer composites: A concise review of material forms and methods[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(10):6 735–6 748.
- [2] 赵鑫,汪殿龙,孙占英.天然纤维表面改性及其在复合材料中的应用进展[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(10):167–171.
Zhao Xin, Wang Dianlong, Sun Zhanying. Progress on surface modification of natural fiber and its application in composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(10):167–171.
- [3] More A P. Flax fiber-based polymer composites: a review[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(1):1–20.
- [4] Islam M S, Miao M. Optimising processing conditions of flax fabric reinforced acrodur biocomposites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 48(26):3 281–3 292.
- [5] Hernandez-fernandez J, Lopez-martinez J, Barcelo D. Quantification and elimination of substituted synthetic phenols and volatile organic compounds in the wastewater treatment plant during the production of industrial scale polypropylene[J]. *Chemosphere*, 2021, 263. DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.128027.
- [6] Zhang J J, Song F F, Tao J, et al. Research progress on formaldehyde emission of wood-based panel[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2018. DOI:10.1155/2018/9349721.
- [7] Manninen A-M, Pasanen P, Holopainen J K. Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated scots pine wood[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(11):1 763–1 768.
- [8] 谈政,梅皓然,王艳红.汽车内饰件用麻纤维板 VOC 的探讨[J]. *汽车零部件*, 2015(6):19–22, 30.
Tan Zheng, Mei Haoran, Wang Yanhong. Discussion on VOC natural hemp fiber board used in automotive interior decoration parts[J]. *Automobile Parts*, 2015(6):19–22, 30.
- [9] 林天扬.竹纤维提取及其增强聚丙烯复合材料 VOC 性能研究[D].天津:天津工业大学,2018.
Lin Tianyang. Study on VOC performance of bamboo fiber extraction and reinforced polypropylene composites[D]. Tianjin: Tian-gong University, 2018.
- [10] Liang K, Gao Q, Shi S Q, et al. Kenaf fiber/soy protein based biocomposites modified with poly(carboxylic acid) resin[J]. *J Appl Polym Sci*, 2013, 128(2):1 213–1 218.
- [11] Francucci G, Manthey N, Cardona F, et al. Processing and characterization of 100% hemp-based biocomposites obtained by vacuum infusion[J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(11): 1 323–1 335.
- [12] Huang Y X, Zhang Y M, Qi Y, et al. Identification of odorous constituents of bamboo during thermal treatment[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203:104–110.
- [13] Salim M, Rasyid M A, Taib R M, et al. Processing parameters optimisation of nonwoven kenaf reinforced acrylic based polyester composites[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2017, 1901:110007. DOI:10.1063/1.5010548.
- [14] Salim M S, Ariawan D, Rasyid M F A, et al. Accelerated weathering and water absorption behavior of kenaf fiber reinforced acrylic based polyester composites[J]. *Frontiers in Materials*, 2020, 7. DOI:10.3389/fmats.2020.00026.
- [15] Amini E, Tajvidi M. Mechanical and thermal behavior of cellulose nanocrystals-incorporated Acrodur® sustainable hybrid composites for automotive applications[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(22):3 159–3 169.
- [16] Akpan E, Wetzel B, Friedrich K. A fully biobased tribology material based on acrylic resin and short wood fibres[J]. *Tribology International*, 2018, 120:381–390.
- [17] Rasyid M F A, Salim M S, Akil H M, et al. Non-woven flax fibre reinforced acrylic based polyester composites: The effect of sodium silicate on mechanical, flammability and acoustic properties[J]. *Express Polymer Letters*, 2019, 13(6):553–564.
- [18] Tamrakar S, Kiziltas A, Mielewski D, et al. Characterization of kenaf and glass fiber reinforced hybrid composites for underbody shield applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 216. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.108805.
- [19] Broadbent A D, Thérien N, Zhao Y. Comparison of the thermal fixation of reactive dyes on cotton using infrared radiation or hot air[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, 37(5): 1 781–1 785.
- [20] 徐敏.分散染料在涤纶涂层织物上的迁移及色变研究[D].杭州:浙江理工大学,2012.
Xu Min. Study on the dye transfer and color change of coated polyester fabrics[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012.
- [21] 苗冰杰. VARI 工艺下植物纤维渗透性及其复合材料成型质量的优化研究[D].天津:天津工业大学,2021.
Miao Bingjie. Study on the optimization of plant fiber permeability and the molding quality of composite materials under VARI process[D]. Tianjin: Tiangong University, 2021.
- [22] 张静静,梁森,汤超.微波对碳纤维的改性作用及其对电子束固化 CFRP 界面性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2023. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220922.004.
Zhang Jingjing, Liang Sen, Tang Chao. Modification of carbon fiber by microwave and its effect on interfacial properties of electron beam cured CFRP[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20220922.004.
- [23] 李丹丹.人造板释放污染物的识别与控制研究[D].北京:清华大学,2016.
Li Dandan. Research on the Identification and control of pollutants released from wood-based panel[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.

(下转第 13 页)