

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.014

苎麻织物增强不饱和聚酯树脂复合材料成型工艺及其阻燃性能

李明,王利剑,刘胜凯,王春红,陈澄,左祺

(天津工业大学纺织科学与工程学院,天津 300387)

摘要: 为了探究苎麻织物增强不饱和聚酯(UP)树脂复合材料的模压成型工艺以及提升其阻燃性能,通过差示扫描量热对树脂固化工艺进行研究,通过对苎麻织物克重、模压压力以及织物铺层层数进行探究,得出复合材料的最佳制备工艺;利用植酸(PA)对苎麻织物进行阻燃改性,研究PA含量对复合材料阻燃及其力学性能的影响。结果表明,UP的最佳固化工艺为:由35℃升温至60℃,保温3 h,然后升至100℃,保温1 h使树脂完全固化。复合材料的最佳制备工艺为:苎麻织物克重190 g/m²,模压压力20 MPa,织物铺层层数14层。PA阻燃改性使UP/苎麻复合材料的极限氧指数(LOI)由未阻燃的33.8%提升到PA质量分数为7%的40.1%,成炭量得到提高,但复合材料的力学性能出现了一定程度的下降。当PA质量分数为3%和5%时,复合材料可满足LOI ≥ 35%、弯曲强度 ≥ 150 MPa的标准要求。

关键词: 苎麻织物; 不饱和聚酯树脂; 成型工艺; 阻燃; 植酸

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0078-08

Molding Process and Flame Retardant Properties of Ramie Fabric Reinforced Unsaturated Polyester Resin Composites

Li Ming, Wang Lijian, Liu Shengkai, Wang Chunhong, Chen Cheng, Zuo Qi

(School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to explore the compression molding process of ramie fabric reinforced unsaturated polyester (UP) resin composites as well as improving its flame retardant performance, the resin curing process was studied by differential scanning calorimetry, and the optimal preparation process of the composites was studied by the ramie fabric weight, the molding pressure and the number of ramie fabric layers. Phytic acid (PA) was utilized to conduct the flame-retardant modification on ramie fabrics for studying the effect of PA on the flame-retardant modification and mechanical properties of the composites. The results show that, the optimal curing process for UP is as follows: heating from 35℃ to 60℃, holding for 3 h, then raising to 100℃, and keeping the temperature for 1 h to completely cure the resin. The optimal preparation process of the composite is as follows: the weight of the ramie fabric is 190 g/m², the molding pressure is 20 MPa, and the number of the ramie fabric layers is 14. The flame retardant modification of PA increases the limiting oxygen index (LOI) of the UP/ramie composite from 33.8% of non-flame retardant to 40.1% of 7 wt% PA, and the char yield is improved, while the mechanical properties of the composite decrease to a certain extent. When the content of PA is 3 wt% and 5 wt%, the composites can meet the standard requirements of LOI ≥ 35% and bending strength ≥ 150 MPa.

Keywords: ramie fabric; unsaturated polyester resin; molding process; flame retardant; phytic acid

随着人们出行需求的日益增加,轨道交通车辆的使用也越来越多。玻璃纤维增强树脂基复合材料相比于芳纶纤维、碳纤维制备的复合材料,由于其价格相对低廉而在轨道交通车辆上广泛使用^[1-2]。然而,玻璃纤维存在不可再生、不可回收以及生产制造

过程中能量消耗巨大等问题,与之相比苎麻纤维质量轻,比强度、比模量与玻璃纤维相近,有望广泛用于轨道交通车辆上^[3]。虽然苎麻纤维增强树脂基复合材料在一定程度上能够替代传统的玻璃纤维增强树脂基复合材料,但在力学性能与阻燃性能上还与

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802205),天津市研究生科研创新项目(2020YJSB063)

通信作者: 王春红,教授,博士,主要研究方向为天然纤维增强复合材料

收稿日期: 2021-10-27

引用格式: 李明,王利剑,刘胜凯,等. 苎麻织物增强不饱和聚酯树脂复合材料成型工艺及其阻燃性能[J]. 工程塑料应用,2022,50(1):78-85.

Li Ming, Wang Lijian, Liu Shengkai, et al. Molding process and flame retardant properties of ramie fabric reinforced unsaturated polyester resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):78-85.

玻璃纤维增强树脂基复合材料存在一定差距,因此提高苧麻纤维增强树脂基复合材料的力学性能和阻燃性能成为当前的研究热点。

复合材料的力学性能与其成型工艺有关,目前苧麻纤维增强树脂基复合材料的成型工艺主要有缠绕成型、模压成型、铺放成型、热压罐成型、树脂传递模塑成型等方式^[4], Prasad 等^[5]采用手糊成型和模压成型制备亚麻增强不饱和聚酯(UP)树脂复合材料,研究结果表明模压成型工艺制备的复合材料性能更优。模压成型工艺相较于其它成型方式具有生产效率高、产品强度高、人员要求较低、可重复性好等优势而被大量使用,因此笔者拟采用模压成型工艺制备 UP/ 苧麻复合材料。

UP/ 苧麻复合材料阻燃性能较差的原因与其增强体苧麻纤维有关,这是由于苧麻纤维主要由碳、氢、氧等元素构成,在受热过程中极易燃烧并释放出大量热量及水和二氧化碳等物质^[6],其易燃特性容易在复合材料中形成“烛芯效应”,使得 UP/ 苧麻复合材料阻燃性能难以满足轨道交通车辆的阻燃标准,因此有必要对苧麻纤维进行阻燃改性,从而拓宽 UP/ 苧麻复合材料在轨道交通领域上的应用。目前,苧麻纤维的阻燃改性方法主要有直接浸渍法^[7]、层层自组装法^[8-9]、溶胶-凝胶法^[10]、接枝改性法^[11]、共混改性等方式^[12],直接浸渍法由于具有操作简便、成本较低、织物力学性能影响较小等优势,适于 UP/ 苧麻复合材料的阻燃改性。

笔者制备的 UP/ 苧麻复合材料应用领域为轨道交通领域,其性能要求主要参考 TB/T 3138-2006《机车车辆阻燃材料技术条件使用要求》、TB/T 3138-2018《机车车辆用材料阻燃技术要求》以及 JT/T 1095-2016《营运客车内饰材料阻燃特性》三种标准,标准中要求复合材料的极限氧指数(LOI) $\geq 35\%$,弯曲强度 ≥ 150 MPa。

因此,笔者选用一种阻燃 UP 树脂制备 UP/ 苧麻复合材料,经过文献调研发现改性处理对复合材料的最优成型工艺探究没有影响^[13],故首先探究了 UP 树脂的固化工艺,然后对 UP/ 苧麻复合材料的模压成型工艺进行优化,结果表明其弯曲性能满足标准要求,但阻燃性能不能满足标准要求。基于上述结果,在前期复合材料成型工艺基础上采用植酸(PA)对苧麻织物进行阻燃改性以提高复合材料的阻燃性能,进而制得阻燃性能和力学性能均能满足标准要求的 UP/ 苧麻复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原材料

苧麻织物: 织物克重 130,190,310 g/m², 湖南华升洞庭麻业有限公司;

氢氧化钠(NaOH): 分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;

硅烷偶联剂 KH550: 分析纯,鼎海塑胶化工有限公司;

PA: 分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

阻燃 UP 树脂: 常州市华润复合材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

塑料制品液压机: YTD71-45A 型,天津天锻液压有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: DHG-9240A 型,巩义市予华仪器有限公司;

万能试验机: Instron3369 型,美国英斯特朗公司;

扫描电子显微镜(SEM): Phenom XL 型,上海复纳科学仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC200F3 型,德国耐驰公司;

LOI 仪: HC-2C 型,美国阿特拉斯公司;

热重(TG)分析仪: TG209F3 型,德国耐驰公司;

X 射线光电子能谱(XPS)仪: NEXSA 型,美国赛默飞世尔公司。

1.3 试样制备

(1) 未阻燃苧麻织物处理及复合材料的制备。

首先配置质量分数为 3% 的硅烷偶联剂 KH550 溶液,苧麻织物与硅烷偶联剂 KH550 溶液的质量比为 1:20,将苧麻织物充分浸没在上述溶液中,每 10 min 搅拌一次,2 h 后取出并放于烘箱中(80℃)烘干至恒重。然后按苧麻织物与 UP 树脂质量比 30:70 将 UP 树脂均匀涂抹到苧麻织物上,制得 UP/ 苧麻预浸料,最后将制备的预浸料借助模压工艺制备成 UP/ 苧麻复合材料。

(2) 阻燃改性苧麻织物处理及复合材料的制备。

首先将 PA 均匀分散于质量分数为 3% 的硅烷偶联剂 KH550 溶液中,制得 PA 质量分数为 1%, 3%, 5%, 7% 的阻燃溶液,苧麻织物与阻燃溶液的质量比为 1:20,将苧麻织物充分浸没在上述阻燃溶液中,每 10 min 搅拌一次,30 min 后取出并放于烘箱中(80℃)烘干至恒重。然后按苧麻织物与 UP 树脂质量比 30:70 将 UP 树脂均匀涂抹到阻燃改性苧

麻织物上,最后依据前期探讨出的最优模压成型工艺制备阻燃改性 UP/ 苎麻复合材料。

1.4 性能测试与表征

(1) 力学性能测试。

拉伸性能测试:使用万能试验机,按照 ASTM D638-2014 进行测试,试样尺寸为 160 mm × 12.5 mm × 3 mm,夹持隔距为 90 mm,加载速度为 5 mm/min。

弯曲性能测试:使用万能试验机,按照 ASTM D790-2017 进行测试,试样尺寸为 60 mm × 12.5 mm × 3 mm,试样跨距为 48 mm,加载速度为 2 mm/min。

(2) DSC 测试。

使用 DSC 仪进行测试,称取 UP 树脂 5 ~ 10 mg 放入坩埚并压实密封,依次以 5, 10, 15, 20 °C/min 的升温速率对样品进行测试,气体氛围为 N₂,测试区间为 20 ~ 220 °C。

(3) SEM 表征。

采用 SEM 观察复合材料的断裂界面以及残炭形貌,观察前需要对样品表面进行喷金处理,测试温度 25 °C,测试电压 10 kV。

(4) LOI 测试。

LOI 按照 GB/T 2406.1-2009 进行测试。试样尺寸为 100 mm × 50 mm × 3 mm,燃烧筒内气体流速 40 mm/s,使用顶面点燃法燃烧时间 3 min 或燃烧长度 50 mm (二选一)。

(5) TG 分析。

取 10 ~ 20 mg 实验样品,在 N₂ 保护下以 10 °C/min 的升温速率由室温加热至 800 °C。

(6) XPS 分析。

采用 XPS 仪的全谱能量扫描对苎麻织物表面的化学成分进行定性定量分析。

2 结果与讨论

2.1 UP 树脂固化工艺分析

UP 树脂在不同升温速率下的 DSC 曲线如图 1 所示。UP 树脂的固化为放热反应,在 DSC 图谱中以吸热单峰呈现,单峰的峰始温度、峰顶温度、峰终温度分别对应于树脂固化开始、最高以及终止时刻的峰值温度。由图 1 可知,不同升温速率下固化反应特征变化明显,随着升温速率的增加,放热峰向高温方向移动且峰型尖锐程度逐渐增强,固化反应的特征峰温度均呈现增大的趋势。主要原因是在升温速率较低时,树脂体系有足够的时间进行反应,放

热过程较为缓和。随着升温速率的逐渐提高,树脂体系在单位时间内产生的热效应增大,因此其固化峰变得愈发尖锐^[14]。由图 1 的 DSC 曲线可以得出试样在不同升温速率下的固化起始温度 T_i 、固化峰值温度 T_p 和固化终止温度 T_f ,具体数据参见表 1。

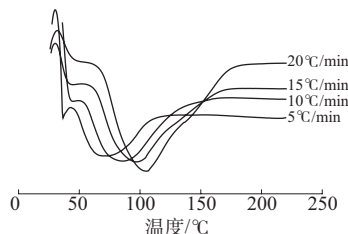


图 1 不同升温速率下的 UP 树脂升温固化 DSC 曲线

表 1 UP 树脂在不同升温速率下的特征温度

升温速率/(°C · min ⁻¹)	T_i /°C	T_p /°C	T_f /°C
5	42.7	71.4	114.2
10	49.5	85.4	141.3
15	55.9	94.7	163.6
20	63.9	105.6	175.1

根据表 1 中 UP 树脂在不同升温速率下的特征温度,采用外推法得到升温速率为 0 °C/min 时对应的特征温度分别为 35.5, 59.9, 96.5 °C, 如图 2 所示,其分别对应于树脂固化的起始温度、峰值温度、结束温度。因此该 UP 树脂在固化时需要由起始固化温度 35 °C 缓慢升温到 60 °C 恒温固化,最后升到 97 °C 保持一段时间才能完全固化。基于前期试验得出树脂的最佳固化工艺为:由 35 °C 升温至 60 °C,保温 3 h,然后升温至 100 °C,保温 1 h,使树脂完全固化。

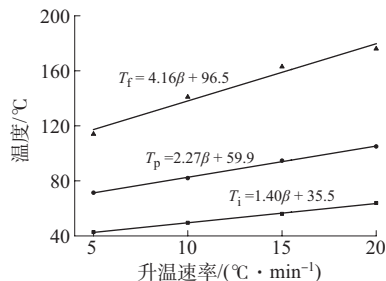


图 2 UP 树脂的温度-升温速率外推曲线(图中公式的 β 表示升温速率)

2.2 成型工艺对 UP/ 苎麻复合材料力学性能影响

(1) 模压压力对 UP/ 苎麻复合材料性能影响。

模压压力对于复合材料的成型和性能有着很重要的影响。为了研究 UP/ 苎麻复合材料的成型工艺,首先对模压成型工艺中的加压压力进行探究。以克重为 130 g/m² 的苎麻织物为增强体、织物铺层层数为 24 层制备了复合材料,探究了不同模压压力下苎麻复合材料的拉伸性能、弯曲性能,结果如图 3 所示。由图 3a 可以看出,随着模压压力不断增大,UP/ 苎麻复合材料的拉伸强度呈现逐渐上升

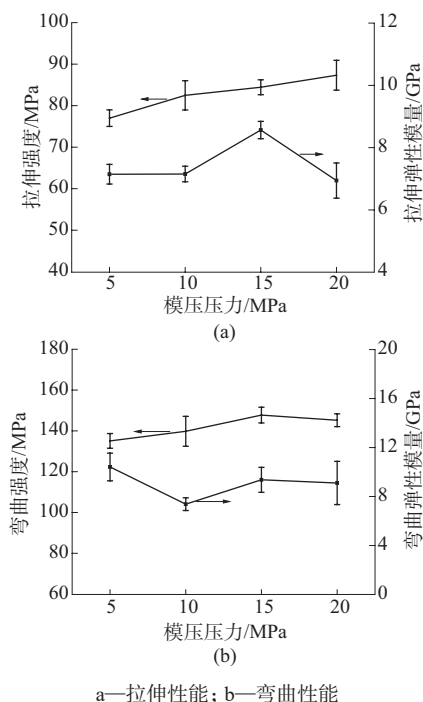


图3 不同模压压力的 UP/ 苧麻复合材料力学性能

的趋势,当压力为 20 MPa 时,拉伸强度达到最大为 87.44 MPa,比压力为 5 MPa 时提升了 13.41%。而拉伸弹性模量呈现先上升后下降的趋势,在模压压力 15 MPa 时达到最大为 8.57 GPa。这是因为随着压力的增大,树脂对织物的浸润效果得到提升,复合材料的致密程度增加,从而提高了苧麻纤维和树脂之间的接触面积和粘附力,使得复合材料拉伸强度提高^[15]。由图 3b 可以看出,随着模压压力的增大,苧麻复合材料的弯曲强度呈现先上升后下降的趋势。当压力为 15 MPa 时,苧麻复合材料的弯曲强度最大为 147.89 MPa、此时弯曲弹性模量为 9.64 GPa。模压压力过大时,复合材料在成型过程中会有较大残余应力的存留,导致树脂基体在受压力的情况下交联固化成型,而这种残余应力在材料层间体现的更加严重,在弯曲测试时会将这种残余应力释放。残余应力越大对复合材料层间结合性能越不利,使得复合材料弯曲性能下降^[16],但整体来看,下降的幅度相对不大。

通过分析对比不同模压压力下复合材料的拉伸性能、弯曲性能可知,当模压压力为 20 MPa 时,苧麻复合材料的综合力学性能较好,最终确定复合材料的模压压力为 20 MPa。

(2) 织物克重对 UP/ 苧麻复合材料性能的影响。

选取三种不同克重的苧麻织物作为增强体,克重分别为 130, 190, 310 g/m²。在模压压力

20 MPa,纤维树脂质量比不变条件下(即苧麻织物克重为 130, 190, 310 g/m²时铺层层数分别为 24 层、17 层、10 层),探究三种不同克重苧麻织物对复合材料拉伸性能、弯曲性能的影响,结果如图 4 所示。

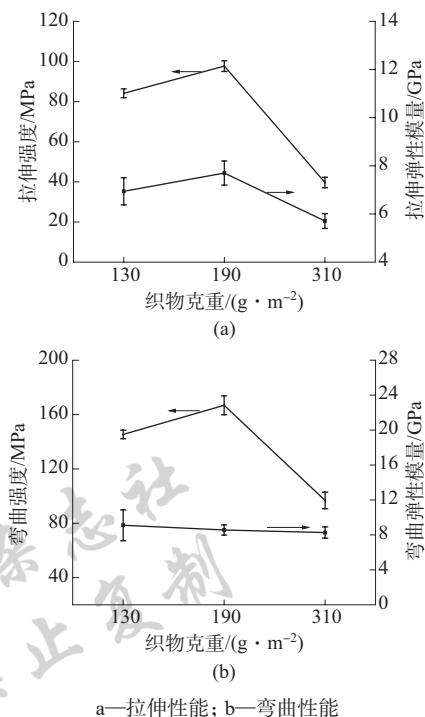


图4 不同织物克重的 UP/ 苧麻复合材料力学性能

由图 4 可知,克重为 190 g/m²的苧麻织物制备复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲弹性模量均较好,分别为 97.69 MPa, 7.70 GPa, 166.83 MPa, 8.57 GPa。对织物厚度进行测试,发现当织物克重增加时,织物厚度也随之增加。190 g/m²的苧麻织物厚度处于克重为 130 g/m²和 310 g/m²的苧麻织物之间,厚度适中有利于树脂对苧麻织物的浸润,提高复合材料性能。综上可知,当苧麻织物克重为 190 g/m²时,复合材料的性能最好。

(3) 织物铺层层数对 UP/ 苧麻复合材料性能的影响。

以模压压力 20 MPa,克重为 190 g/m²的苧麻织物为增强体,制备不同铺层层数的 UP/ 苧麻复合材料,探究了织物铺层层数对苧麻复合材料拉伸性能、弯曲性能的影响,结果如图 5 所示。

为了进一步优化苧麻织物克重为 190 g/m²的复合材料的力学性能,苧麻织物的铺层层数不宜过大,这是因为铺层层数过大会影响树脂对纤维的浸润导致复合材料界面结合性能下降,因此在探讨铺层层数时最大选择 20 层。由图 5 可知,随着织物铺层层数的增加,UP/ 苧麻复合材料的拉伸强度、

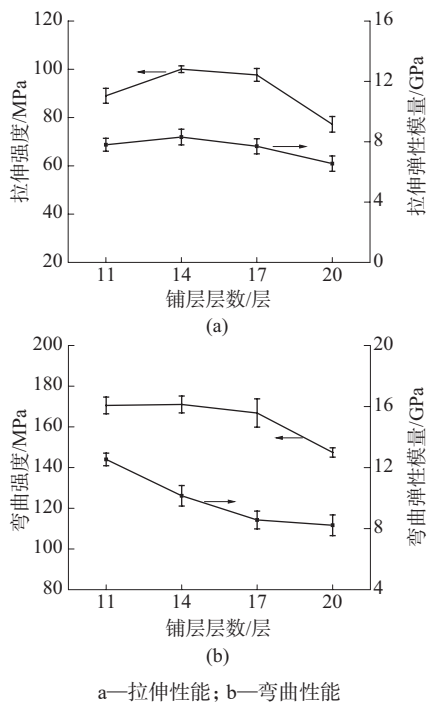


图5 不同铺层层数的UP/苎麻复合材料力学性能

弯曲强度呈先上升后下降的趋势,当织物铺层层数为14层时性能最好,拉伸强度、弯曲强度分别为100.06 MPa和171.03 MPa。这是因为随着织物铺层层数的增多,增强体对树脂的增强效果逐渐增强;当织物铺层层数为20层时,树脂不能完全浸润织物,严重影响了纤维与树脂之间的界面结合强度,使得复合材料的力学性能下降。

综上所述,以拉伸性能、弯曲性能为指标探讨UP/苎麻复合材料的成型工艺,确定其最佳制备工艺为模压压力20 MPa、织物克重190 g/m²以及织物铺层层数14层。

2.3 PA对UP/苎麻复合材料阻燃性能影响

(1) PA对UP/苎麻复合材料LOI影响。

不同PA含量的UP/苎麻复合材料LOI测试结果见表2。由表2可见,与未阻燃UP/苎麻复合材料相比,PA改性UP/苎麻复合材料LOI随着PA含量的增加而提高,即苎麻织物阻燃性能提高的同时会使复合材料阻燃性能提高。PA与硅烷偶联剂KH550中的硅-磷-氮元素在复合材料燃烧过程中能够充分发挥协同阻燃效果,PA质量分数达到3%

表2 不同PA含量的UP/苎麻复合材料LOI %

PA 质量分数	LOI
0	33.8
1	34.5
3	36.8
5	39.7
7	40.1

后,阻燃改性复合材料的LOI均超过35%,满足了标准中复合材料LOI ≥ 35%的要求。当PA质量分数为7%时,阻燃改性复合材料的LOI超过40%,达到40.1%,相较于未阻燃复合材料提高了18.6%。

图6为未阻燃和PA质量分数为7%的UP/苎麻复合材料表面残炭形貌图。由图6可知,未阻燃UP/苎麻复合材料燃烧后炭层较薄且较为松散,单根纤维结构清晰可见,此炭层结构不能有效阻止燃烧过程中热量以及可燃性气体的传递,复合材料的阻燃效果较差,阻燃UP/苎麻复合材料燃烧后纤维与纤维之间相互粘结,形成的炭层结构致密且表面多处膨胀,有效降低了复合材料内部的缝隙孔洞,减少了可燃性气体的挥发同时隔绝外部氧气,阻燃性能得到提高。

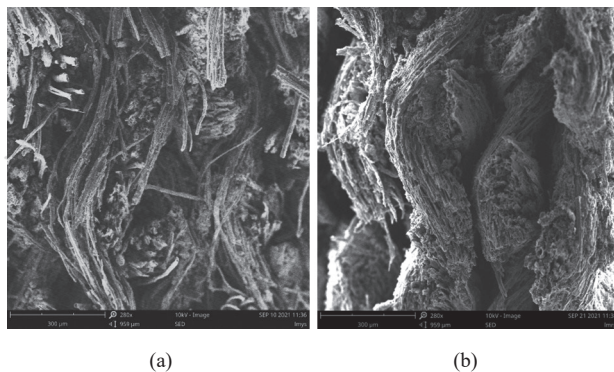


图6 未阻燃及阻燃UP/苎麻复合材料残炭形貌

(2) PA阻燃机理探究。

图7为未阻燃和PA质量分数为7%的苎麻织物XPS能谱图。由图7可以看出,在285 eV和535 eV附近出现的强峰分别为苎麻纤维中的C、O

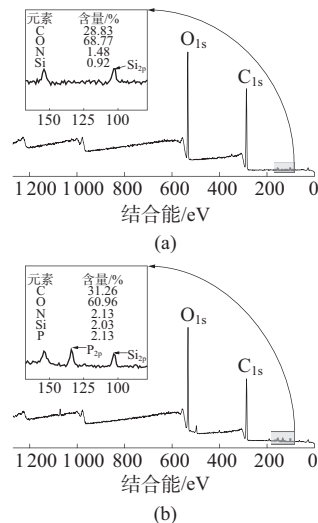


图7 未阻燃及阻燃苎麻织物XPS能谱图

元素对应的峰。未阻燃苧麻织物元素中出现了 Si 和 N, 这是因为硅烷偶联剂 KH550 附着在了织物表面。阻燃织物在 134 eV 附近出现了 P_{2p} 峰, 说明 PA 已经接枝到了织物表面。

PA 阻燃苧麻织物的机理如图 8 所示。首先 PA 中的 $-OH$ 和硅烷偶联剂 KH550 中的 $-NH_2$ 反应

生成胺盐, 然后硅烷偶联剂 KH550 水解生成硅醇, 硅醇中的硅羟基与苧麻纤维表面羟基脱水缩合生成 $-Si-O-C-$ 键, 有效降低了 PA 直接阻燃改性对苧麻纤维的损伤, 同时 PA 和硅烷偶联剂 KH550 中的硅磷氮元素发挥协同阻燃作用, 使 UP/ 苧麻复合材料的阻燃性能得到进一步提升。

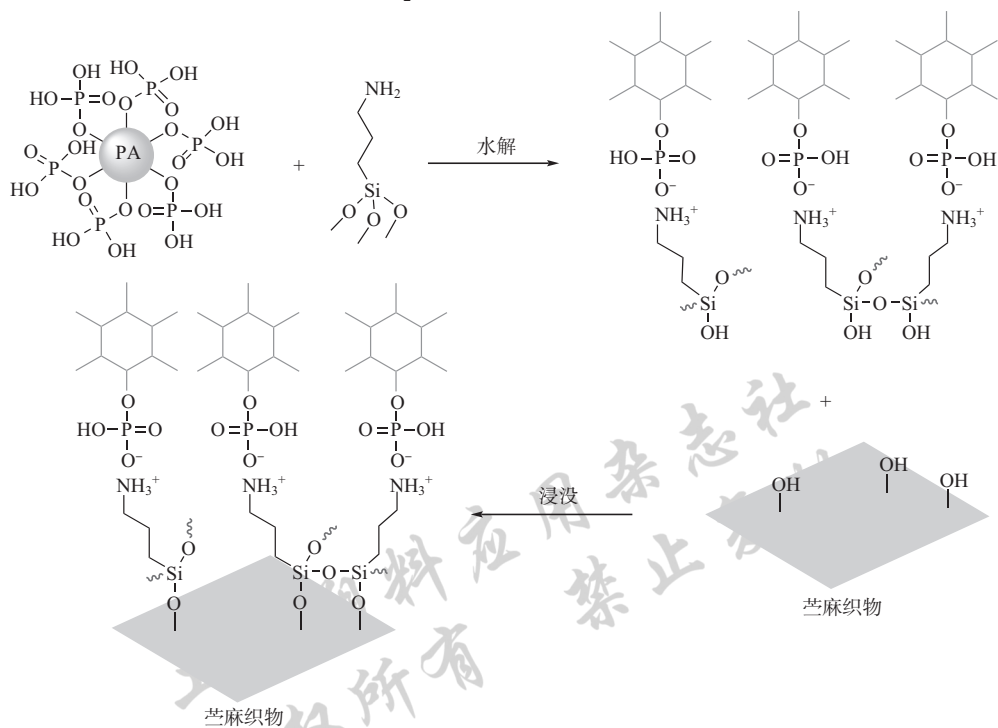
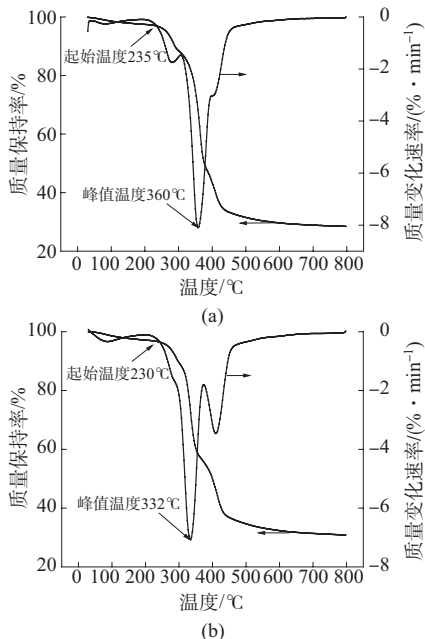


图 8 苧麻织物阻燃机理图

(3) PA 对 UP/ 苧麻复合材料热稳定性影响。

图 9 为未阻燃和 PA 质量分数为 7% 的 UP/ 苧



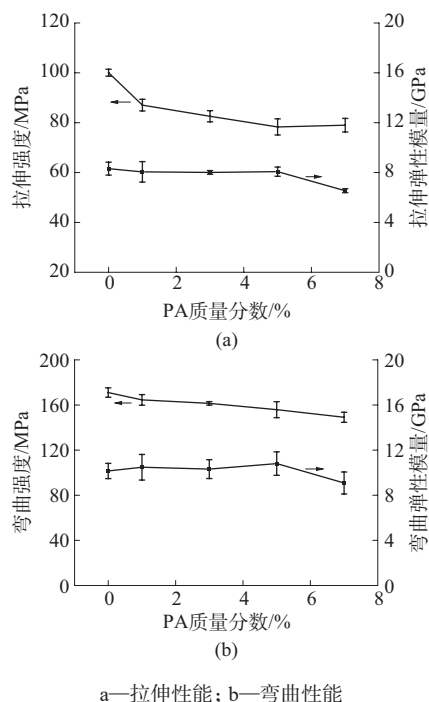
a—未阻燃复合材料; b—PA 质量分数为 7% 的阻燃复合材料

图 9 未阻燃及阻燃 UP/ 苧麻复合材料 TG 和 DTG 图

麻复合材料 TG 和 DTG 图。由图 9 可知, 经过 PA 阻燃改性苧麻织物后, 复合材料的残炭率由 28.45% 提升到 30.88%, 热分解峰值温度从 360℃ 降低到 332℃。这是因为 PA 热分解温度较低, 约为 120℃ 左右, 能提前受热分解产生磷酸, 催化织物热解形成炭层, 延缓基体材料的进一步热分解, 使得复合材料热降解峰值温度左移, 但成炭量增多^[17]。这些结果证明 PA 提升了复合材料的阻燃效果和成炭量, 这与复合材料的 LOI 测试结果一致。

2.4 PA 对 UP/ 苧麻复合材料力学性能影响

不同 PA 含量的 UP/ 苧麻复合材料的拉伸性能如图 10a 所示。由图 10a 可知, 与未阻燃复合材料相比, PA 阻燃复合材料的拉伸性能随着 PA 含量的增加逐渐降低, 拉伸强度分别下降 13.00%, 17.48%, 21.76%, 21.07%, 当 PA 质量分数为 7% 时, 拉伸弹性模量下降 21.26%。复合材料拉伸性能下降一方面是由于 PA 中含有磷酸基团, 磷酸在一定温度条件下会对纤维素结构产生破坏使织物强力下降, 进而导致复合材料拉伸性能下降; 另一方面是由于 PA



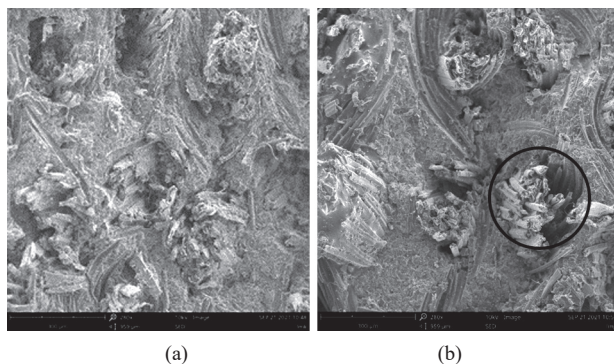
a—拉伸性能; b—弯曲性能

图10 不同PA含量的UP/苧麻复合材料力学性能

的添加会破坏纤维与树脂之间硅烷偶联剂 KH550 形成的化学键,使得复合材料界面结合性能下降,导致外部载荷不能有效传递到纤维上,纤维起不到增强作用^[18-19]。

不同 PA 含量的 UP/ 苧麻复合材料的弯曲性能如图 10b 所示。由图 10b 可知,未阻燃复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量较高,这是因为硅烷偶联剂 KH550 能够减少苧麻纤维表面羟基,增强纤维与树脂的界面强度使得复合材料弯曲性能提升。阻燃后复合材料的弯曲强度相比未阻燃复合材料分别下降了 3.8%, 5.61%, 8.87%, 12.83%, 当 PA 质量分数为 3% 和 5% 时,复合材料的弯曲强度分别为 161.43 MPa 和 155.86 MPa,均能满足标准要求;当 PA 质量分数为 7% 时,弯曲弹性模量下降最大为 10.47%。这是由于 PA 是一种磷酸基团含量较高的物质,磷酸基团会对纤维素结构产生一定破坏,从而影响苧麻纤维与 UP 树脂的界面结合效果,进而使复合材料弯曲性能下降。

图 11 为未阻燃及阻燃 UP/ 苧麻复合材料拉伸断裂形貌图。由图 11 可以看出,未阻燃复合材料断裂面比较整齐,纤维多为树脂包裹,抽出或拔出现象较少;而经过 PA 阻燃处理后,复合材料的断面粗糙不平整,且存在许多纤维抽拔后留下的孔洞,树脂基体的连续性遭到破坏,界面结合性能较差使得复合材料力学性能下降。



a—未阻燃复合材料; b—PA 质量分数为 7% 的阻燃复合材料

图11 未阻燃和PA质量分数为7%的UP/苧麻复合材料断裂形貌

3 结论

(1) UP 树脂的最佳固化工艺为: 由 35℃ 升温至 60℃, 保温 3 h, 然后升至 100℃, 保温 1 h 使树脂完全固化。UP/ 苧麻复合材料的最佳制备工艺为压力 20 MPa, 织物克重 190 g/m² 以及铺层层数 14 层。

(2) PA 阻燃改性使 UP/ 苧麻复合材料的极限氧指数由未加阻燃剂的 33.8% 提升到 PA 质量分数为 7% 的 40.1%, 成炭量得到提高。

(3) PA 阻燃改性使 UP/ 苧麻复合材料的力学性能降低, 当 PA 质量分数为 3% 和 5% 时, 复合材料的弯曲强度分别为 161.43, 155.86 MPa, 均能满足标准要求。当 PA 质量分数为 7% 时, 复合材料的力学性能最差, 相比未阻燃复合材料其拉伸强度和拉伸弹性模量分别下降了 21.07%, 21.26%; 弯曲强度和弯曲弹性模量分别下降了 12.83%, 10.47%。

参考文献

- [1] Sathishkumar T P, Satheeshkumar S, Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(13): 1258-1275.
- [2] Singh J, Kumar S, Mohapatra S K, et al. Properties of glass fiber hybrid composites: A review[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2017, 56(5): 455-469.
- [3] 李晓丹, 唐莹, 冯佳成, 等. 天然纤维增强复合材料性能的研究及应用[J]. 化工新型材料, 2021, 49(6): 231-235.
Li Xiaodan, Tang Ying, Feng Jiacheng, et al. Research and application of natural fiber reinforced composite[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(6): 231-235.
- [4] 史如静, 吴举, 周剑锋, 等. 模压成型工艺参数对 CF/PEEK 复合材料 I 型层间断裂韧性的影响[J]. 高科技纤维与应用, 2020, 45(1): 26-32.
Shi Rujing, Wu Ju, Zhou Jianfeng, et al. Influence of hot-press molding parameters for processing CF/PEEK composites on type I interlaminar fracture toughness[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2020, 45(1): 26-32.

- [5] Prasad V, Hunize C, Abhiraj R I, et al. Advances in industrial and production engineering[M]. Berlin:Springer, 2019.
- [6] 严立云. 纺织用品中阻燃纤维的阻燃性能阐述[J]. 轻纺工业与技术, 2021, 50(9):113–114.
- Yan Liyun. Expounding on flame retardant properties of flame retardant fibers in textile products[J]. Light and Textile Industry and Technology, 2021, 50(9):113–114.
- [7] 林生根, 刘晓辉, 苏晓伟, 等. 新型植酸基阻燃剂改性 Lyocell 纤维与织物的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2021, 42(7):25–30.
- Lin Shenggen, Liu Xiaohui, Su Xiaowei, et al. Preparation and properties of Lyocell fibers and fabrics modified with new phytic acid based flame retardant[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(7):25–30.
- [8] Li Shanshan, Ding Fang, Lin Xinghuan, et al. Layer-by-layer self-assembly of organic-inorganic hybrid intumescent flame retardant on cotton fabrics[J]. Fibers and Polymers, 2019, 20(3):538–544.
- [9] Chang S C, Slopek R P, Condon B, et al. Surface coating for flame-retardant behavior of cotton fabric using a continuous layer-by-layer process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(10):3 805–3 812.
- [10] Alongi J, Colleoni C, Rosace G, et al. The role of pre-hydrolysis on multi step sol-gel processes for enhancing the flame retardancy of cotton[J]. Cellulose, 2013, 20(1):525–535.
- [11] 谢雨彤, 孙陵, 王晓雪, 等. 磷/氮协同阻燃棉织物制备工艺及性能研究[J]. 纤维素科学与技术, 2020, 28(2):64–70.
- Xie Yutong, Sun Ling, Wang Xiaoxue, et al. Preparation and properties of phosphorus/nitrogen synergistic flame retardant cotton fabrics[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2020, 28(2):64–70.
- [12] 刘延松, 王阳, 郭寻, 等. 阻燃纤维素纺织品的研究进展[J]. 精细化工, 2020, 37(11):2 208–2 215.
- Liu Yansong, Wang Yang, Guo Xun, et al. Research progress of flame retardant cellulose fabrics[J]. Fine Chemicals, 2020, 37(11):2 208–2 215.
- [13] 薛昊, 徐灿, 白天, 等. 竹纤维-环氧树脂复合材料的树脂传递模塑成型制备工艺及界面改性[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(12):106–111, 123.
- Xue Hao, Xu Can, Bai Tian, et al. Preparation and interfacial modification of bamboo fiber/epoxy resin composites via RTM process[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(12):106–111, 123.
- [14] 刘晓龙, 谢利鹏, 张鹏, 等. 聚丙二醇二缩水甘油醚改性环氧力学性能及固化动力学[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(4):109–114.
- Liu Xiaolong, Xie Lipeng, Zhang Peng, et al. Mechanical properties and curing kinetics of epoxy resin modified by polypropylene glycol diglycidyl ether[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4):109–114.
- [15] 程遥辉, 丁武学, 孙宇. 汽车内饰用酚醛树脂/黄麻纤维复合材料的拉伸性能[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(12):63–67.
- Cheng Yaohui, Ding Wuxue, Sun Yu. Tensile properties of phenolic resin/jute fiber composites used in automotive interior[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(12):63–67.
- [16] 莫正才, 胡程耀, 霍冀川, 等. 苧麻短纤维层间增韧碳纤维/环氧树脂复合材料[J]. 复合材料学报, 2017, 34(6):1 237–1 244.
- Mo Zhengcai, Hu Chengyao, Huo Jichuan, et al. Interlayer-toughening carbon fiber/epoxy composites with short ramie fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(6):1 237–1 244.
- [17] 余小娟. 阻燃改性苧麻增强不饱和聚酯复合材料的制备及其性能和机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- Yu Xiaojuan. Study on preparation, properties and mechanisms of flame retardant modified ramie fabric-reinforced unsaturated polyester resin[D]. Hefei:University of Science and Technology of China, 2017.
- [18] Younis A A. Optimization of mechanical, thermal, and ignition properties of polyester fabric using urea and phosphoric acid[J]. Journal of Industrial Textiles, 2018, 49(6):791–808.
- [19] Xie Yanjun, Hill C A S, Xiao Zefang, et al. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites:A review[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(7):806–819.
- [20] 陈钰玮, 简凌峰, 翁梦蔓, 等. 聚酰亚胺介电性能改性的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(9):9–14.
- Chen Yuwei, Jian Lingfeng, Weng Mengman, et al. Research progress on dielectric properties modification of polyimide[J]. Insulating Materials, 2021, 54(9):9–14.
- [21] Wu Y C, Ji J Q, Huang H H, et al. Facile synthesis of acyloxy-containing fluorene-based Cardo polyimides with high optical transparency, fluorescence and low dielectric constant[J]. Reactive and Functional Polymers, 2021, 166. DOI:10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104979.
- [22] 谢高艺, 马春平, 全大萍, 等. 低介电聚合物材料研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(9):15–29.
- Xie Gaoyi, Ma Chunping, Quan Daping, et al. Research progress of low dielectric polymers[J]. Insulating Materials, 2021, 54(9):15–29.
- [23] 曹传昊. 基于不同单体的聚酰亚胺薄膜透明性及导热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- Cao Chuanhao. Study on transparency and thermal conductivity of polyimide films based on different monomers[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2021.

(上接第 32 页)