

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.12.010

AKD改性PETG/废纸粉木塑复合材料制备工艺^{*}

黄丽婕¹,徐铭梓¹,张晓晓²,宗梦婷²,陈杰²,黄崇杏¹,柴坤刚¹,李珊珊¹

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 南宁 530004; 2. 齐鲁工业大学制浆造纸科学与技术教育部/山东省重点实验室齐鲁工业大学, 济南 250353)

摘要: 为了提高废纸的利用率, 保护森林资源, 开发绿色无污染的木塑复合材料, 使用废弃纸箱和聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己二甲酯 (PETG) 作为原料, 利用烷基烯酮二聚体 (AKD) 对其进行改性制备木塑复合材料。选取碱处理浓度、时间、温度和 AKD 添加量四个方面进行实验, 探究对 PETG 木塑复合材料力学性能、吸水性能和热稳定性的影响, 并结合红外和微观形貌表征, 确定了对废纸纤维进行改性的木塑复合材料的最佳工艺为: NaOH 溶液浓度 15%, 碱处理温度 60℃, 碱处理时间 60 min, AKD 最佳添加量为废纸粉质量的 2%。

关键词: 废弃纸箱; 聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己二甲酯; 烷基烯酮二聚体; 木塑复合材料

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)12-0049-06

Process of AKD Modified PETG/Waste Paper Wood-Plastic Composites

Huang Lijie¹, Xu Mingzi¹, Zhang Xiaoxiao², Zong Mengting², Chen Jie², Huang Chongxing¹, Chai Kungang¹, Li Shanshan¹

(1. Institute of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Pulp and Paper Science and Technology of Ministry of Education/Key Laboratory of Shandong Province, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China)

Abstract: In order to improve the utilization of waste paper and protect forest resources and develop environmental wood plastic composite materials, waste carton and poly ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexylene (PETG) were used as raw materials to prepare modified wood-plastic composite materials. The effects of alkali treatment concentration, time, temperature and alkyl ketene dimer (AKD) addition on effects of mechanical strength, water absorption and thermal stability of the composites were investigated. Combined with infrared and micro topography characterization, the optimum process of modified wood-plastic composites is as follows: the concentration of NaOH solution is 15%, the alkali treatment temperature is 60℃, the alkali treatment time is 60 min, and the optimum dosage of AKD is 2% of the waste paper powder.

Keywords: waste carton; poly ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexylene; temperature and alkyl ketene dimer; wood-plastic composite material

我国是一个人口基数极为巨大的国家, 而且还在逐年增长, 这就造成我国每年的消费品消耗量和废弃物产出量都是一个很巨大的数字^[1]。目前, 中国在纸制品的进出口上的份额已经处于世界前列, 且文化纸、包装纸等各类纸品消耗量仍在以每年 10% 的速度剧增^[2]。将废纸采用有效的方式重新利用起来不仅可以开发废弃物的利用价值, 增加其附加值, 还可以减少环境污染, 将仅存的而且数量还在快速减少的珍贵森林资源保护起来, 利用使用过后被丢弃的废纸资源作为生产材料重新造纸或者制造其它有价值的产品, 还可以减轻制造商的生产负担, 以更低花费生产高利用价值的物品, 降低产品定价, 获得更高的销量和利润, 重新赋予废纸高附加值^[3]。

聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己二甲酯 (PETG) 是一种绿色无污染的材料, 完全燃烧后仅产生二氧化碳, 无其它有毒气体, 也可以通过填埋的方

式进行处理, 同样不会对土地和水源造成污染, 十分符合当下的环保理念, 这更使得它具有良好的前景和应用空间^[4]。并且由于 PETG 其高度的透明性和安全性, 在食品包装领域也有很大应用^[5]。

木塑复合材料 (WPC) 是一类利用植物纤维与塑料通过共混复合而制备成的高性能复合材料。木塑复合材料的原材料来源非常广泛, 除了常见的各种木材纤维, 许多废弃植物纤维材料, 如各类树叶、果壳、蔗渣、竹子、秸秆等也被纷纷开发利用, 用于制备木塑复合材料, 将废弃植物材料重新利用, 赋予其更高的利用价值, 远优于传统的掩埋火焚烧的处理

^{*} 制浆造纸科学与技术教育部/山东省重点实验室基金项目 (KF201628), 广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室开放基金项目 (ZR201602)

联系人: 黄丽婕, 副研究员, 主要从事生物质材料开发与应用研究
收稿日期: 2017-10-03

方式,更加绿色环保^[6,7]。日常生活中常见的热塑性塑料如各类聚烯烃塑料和聚酯塑料,还有使用后被丢弃的塑料饮料瓶,洗化用品瓶,废弃塑料外壳等均可与植物纤维复合制备全新木塑复合材料^[8]。木塑复合材料的出现,为很多废纸植物原料提供了全新的利用途径,其应用领域如建筑、装修、汽车装饰等逐渐被开发,但仍有很大的市场空间未能得到开发,其前景非常值得关注^[9]。笔者利用废纸与 PETG 先通过碱处理,随后添加烷基烯酮二聚体(AKD)的方式制备木塑复合材料,不仅将废纸废物利用,降低成本,制备得到的复合材料燃烧不生成任何有毒或是污染性气体,完全绿色环保,并且经过改性,提高废纸纤维和 PETG 间的粘结牢固度,提升复合材料的力学性能,可以广泛应用于塑料外壳制造,容器生产和装饰板材等领域。

1 实验部分

1.1 主要原材料

废弃纸箱:自行收集;

PETG 塑料颗粒:GN071,美国伊士曼公司;

AKD 蜡片:佛山市骏能化工有限公司;

正己烷:分析纯,成都科龙化工试剂厂;

氢氧化钠:分析纯,成都科龙化工试剂厂。

1.2 主要设备及仪器

分析天平:BSA224S 型,赛多利斯(北京)公司;

电热鼓风干燥箱:101-1 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

高速混合机:SHR-10A 型,张家港市亿利机械有限公司;

平板硫化机:XLB25-D 型,青岛金润琪橡胶机械有限公司;

电子万能材料试验机:3367 型,美国英斯特朗公司;

粉碎机:15.4020 / 02552 型,德国 FRITSCH 公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:FTIR-7600 型,澳洲 Lambda 公司;

同步热分析仪:ZRY-2P 型,上海精科公司。

1.3 试样制备

(1) 原材料预处理。

碱处理:利用粉碎机将废纸箱粉碎、过筛、保留 80~100 目(150~180 μm)的纸粉,在 105℃的烘箱中烘干 6 h。分别配置 7%,9%,11%,13%,15% NaOH 溶液,按照 1:10 的固液比分别与干燥后的废纸粉混合,搅拌均匀,分别在 20,40,60,80,100℃

下处理 30,60,90,120,150 min。碱处理完成后将碱液用浆袋滤出,随后使用蒸馏水将废纸粉洗涤,洗涤过程中从废纸粉中挤出清液,滴入酚酞试剂,当清液不变蓝即可停止洗涤,挤干多余水分,最后将废纸粉置于 105℃烘箱中烘干 12 h,取出冷却至室温,装入密封袋备用。

AKD 改性处理:取碱处理过的废纸粉质量的 1%,2%,3%,4%,5% 的 AKD 蜡片,置于正己烷中,将烧杯口密封直到 AKD 蜡片在正己烷中完全溶解。按照 1:10 的固液比,将纸粉加入到溶解有 AKD 的正己烷中,搅拌均匀,用保鲜膜将烧杯口密封,常温下浸泡 2 h,中间每隔 20 min 搅拌一次。浸泡完成后,将液体滤出,在通风橱中风干一夜,待正己烷充分挥发后,将废纸粉置于 105℃的烘箱中烘干 3 h,取出冷却至室温,装入密封袋备用。

PETG 预处理:取 PETG 塑料颗粒,在 65℃下的烘箱中烘干 6 h,冷却至室温后装入密封袋备用。

(2) PETG/废纸粉复合材料的制备。

将经过 AKD 处理的废纸粉过筛,取 60~80 目的废纸粉,按照废纸质量分数 10% 与 PETG 塑料颗粒混合,放入高速混合机中混合 30 min 取出。将混合好的样品按照每个样品 70 g 的质量放入模具中,使用 190℃的热压温度,10 MPa 的压力,在平板硫化机中热压 10 min,随后冷压 10 min,冷却,脱模。

1.4 性能测试

(1) 改性废纸粉 FTIR 分析。

使用 FTIR 仪对添加 AKD 的废纸粉进行分析,观察其特征峰变化,扫描范围为 400~4000 cm^{-1} 。

(2) 复合材料力学性能测试。

利用电子万能材料试验机对 PETG/废纸粉材料进行力学性能测试。

拉伸强度按照 GB/T 1040.2-2006 进行测试,拉伸速率 10 mm/min,每种样品至少重复测量五次,取平均值。

弯曲强度按照 GB/T 1449-2005 进行测试,夹头下降速率 2 mm/min,每种样品至少重复测量三次取平均值。

(3) 复合材料吸水性测试。

①吸水率测试:采用浸泡法对 PETG/废纸粉复合材料的吸水性能进行研究。测试前先将制得的木塑复合材料在 105℃下烘干直至质量恒定,冷却后备用。将样品放入密封容器中,注入蒸馏水至漫过复合材料样品,浸泡 24 h 后取出样条,用吸水纸

将残留在复合材料表面的水分擦拭干净,最后用分析天平进行称量。PETG/废纸粉复合材料的吸水率按照以下公式计算:

$$C = [(m_2 - m_1) / m_1] \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, C 为复合材料的吸水率, %; m_1 为试样浸泡前质量, g; m_2 为试样浸泡后质量, g。每种样品在相同实验条件下测量三组,取平均值。

②吸水率随时间变化规律测试:按照吸水率测试的方法,分别对样品浸泡 12, 24, 36, 48, 50, 72 h, 探究随着浸泡时间的增长,复合材料吸水性能变化情况。

(4) 复合材料微观形貌表征。

取复合材料样条,置于 65℃ 烘箱中烘干 6 h 后,将断面表面喷金,通过扫描电镜观察断面形貌特征和废纸粉与 PETG 的结合状态。

(5) 复合材料热性能测试。

使用粉碎机将复合材料粉碎,过 100 目 (150 μm) 筛,随后在 105℃ 烘箱中干燥 6 h。使用同步热分析仪对复合材料进行热稳定性测试,温度范围 25 ~ 500℃,升温速率 5, 10, 15℃/min,气氛为氮气,流量 20 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 改性废纸粉的红外光谱

图 1 和图 2 分别为 AKD 的红外光谱图、未改性废纸粉和添加了 AKD 的废纸粉的红外光谱图。

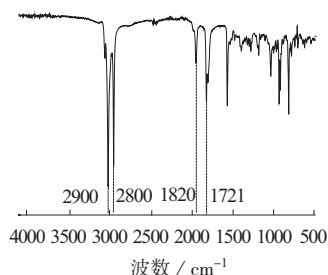


图 1 AKD 的 FTIR 谱图

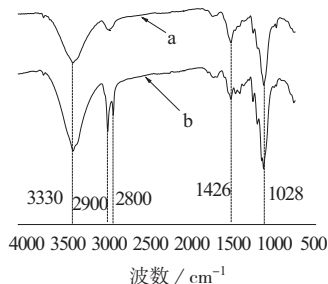


图 2 AKD 改性废纸粉与原废纸粉 FTIR 谱图

图 2 中曲线 a 为未改性废纸粉的红外光谱图,曲线 b 为添加 AKD 的废纸粉的红外光谱图。从图中来看,3330 cm^{-1} 处为羟基的特征峰,1089 cm^{-1}

处的峰为植物纤维的特征峰,这些峰值两者基本相同。不同的是,图 2 中 2800 cm^{-1} 和 2900 cm^{-1} 左右处的峰值为 AKD 的特征峰,这些峰值出现在了改性废纸粉的红外光谱图中,这些峰值的出现说明 AKD 成功添加到了废纸粉中。

2.2 PETG/废纸粉木塑复合材料力学性能

(1) 碱处理浓度对复合材料力学性能的影响。

固定碱处理温度 60℃、处理时间 60 min, 2% AKD 添加量,采用不同浓度的 NaOH 溶液处理废纸粉,并与 PETG 制备得到复合材料,其力学性能变化如图 3 所示。从图 3 可以看到,增加处理过程中碱液的浓度后, PETG/废纸粉木塑复合材料拉伸强度逐渐增大,当碱液浓度达到 15% 时拉伸强度达到最大值。在一定范围内提高碱液浓度可以提升复合材料的弯曲强度,但当碱液浓度超过 13% 时,则会造成弯曲强度的下降。拉伸强度最高值与最低值相差 12 MPa,弯曲强度最大值与最低值相差 14.61 MPa。

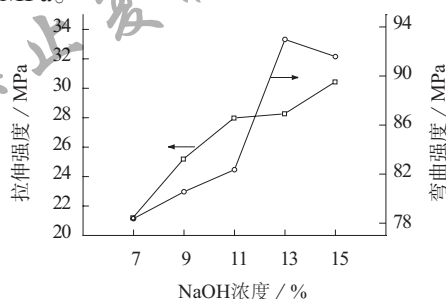


图 3 不同碱液浓度下 PETG/废纸粉木塑复合材料的力学性能

废纸粉中的纤维由于经过了制浆造纸和回用过程,表面发生一定的角质化,末端分丝帚化较差,经过碱液处理,可以增加纤维表面粗糙度,增加纤维之间的连接强度和纤维与塑料基体的粘结性能,使得在拉伸强度测试过程中,复合材料对应力的承受能力更强,拉伸强度更高。但是弯曲强度测试与拉伸强度不同,一旦碱液浓度过高,其对纤维刚度的破坏作用就高于其对纤维结合力的增强作用,导致复合材料的弯曲强度发生下降。但综合拉伸强度和弯曲强度的变化,笔者选择 15% 的碱液浓度对废纸粉进行处理,以获得最佳的综合性能。

(2) 碱处理时间对复合材料力学性能的影响。

固定碱液浓度 13%,碱处理温度 60℃, AKD 添加量 2%,图 4 为改变碱处理时间后,废纸 / PETG 木塑复合材料力学强度的变化趋势。由图 4 可以看到适当提高碱液与废纸粉的作用时间,可以改善纤维特性,使拉伸强度和弯曲强度得到一定的上升,但

是当作用时间达到 60 min 后继续延长时间则会对复合材料的性能产生负面作用,最合适的处理时间为 60 min。在不同的处理时间下拉伸强度最高值与最低值相差 10.27 MPa,弯曲强度最高值与最低值相差 12.57 MPa。

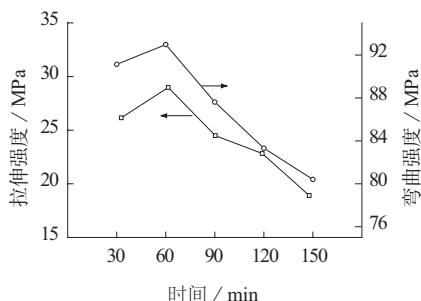


图4 不同碱处理时间下 PETG/废纸粉末塑复合材料力学性能

增加碱处理时间,可以使碱液更充分地废纸粉发生反应,改善废纸纤维的润胀程度,增加表面粗糙度和空隙,提高比表面积和反应可及度,但随着碱处理时间的过度延长,碱液对废纸纤维的润胀过度,吸水性增加,导致纤维过于松散,纤维间结合力降低,不利于应力传递,最终导致一定的强度损失,不利于提高复合材料的力学性能。

(3) 碱处理温度对复合材料力学性能的影响

固定碱液浓度为 15%, AKD 添加量 2%, 碱处理时间 60 min, 探究使用不同的温度条件下处理废纸粉纤维后, 复合材料力学强度的变化情况如图 5 所示。由图 5 可以看出, 提高碱处理温度可获得更理想的力学性能, 当温度达到 60℃ 时, 复合材料各项力学性能均达到最佳值, 在此温度之后继续升温, 复合材料的力学性能则会发生一定程度下滑。其中拉伸强度在 40~80℃ 间的变化幅度相对较小, 逐渐趋于稳定。

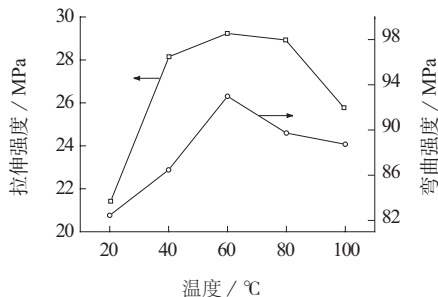


图5 不同碱处理温度下 PETG/废纸粉末塑复合材料力学性能

在碱处理温度为 60℃ 时, 拉伸强度和弯曲强度的最大值分别为 92.98 MPa 和 29.04 MPa。与碱处理时间对复合材料力学性能的影响类似, 适当提高处理时的温度, 可以强化碱液对废纸纤维的作用, 提升反应活性, 促进碱液向废纸粉内部渗透, 加快反应

速度, 更有效的改善废纸纤维性能, 进而增强复合材料的力学性能, 但过高的温度, 使得反应过于剧烈, 导致纤维过度粗糙, 表面缝隙过大, 彼此间的粘结力和连接强度下降, 受到外部拉力和压力作用时, 容易发生断裂, 复合材料力学性能降低。

(4) AKD 添加量对复合材料力学性能的影响

固定碱液浓度为 15%, 碱处理温度为 60℃, 碱处理时间为 60 min, 分别添加废纸粉质量 1%, 2%, 3%, 4%, 5% 的 AKD, 探究使用不同 AKD 添加量制备成的 PETG/废纸粉末塑复合材料力学性能的区别, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 随着 AKD 添加量的增加, 复合材料拉伸强度先小幅增加, 随后降低, 在 AKD 添加量为 2% 时达到最高值, 为 28.65 MPa。弯曲强度随 AKD 添加量的增加, 弯曲强度先增加, 随后出现小范围内波动, 当 AKD 添加量为 2% 时, 弯曲强度出现最大值, 为 85.4 MPa。相对而言, 改变 AKD 添加量对拉伸强度的影响要高于对弯曲强度的影响。

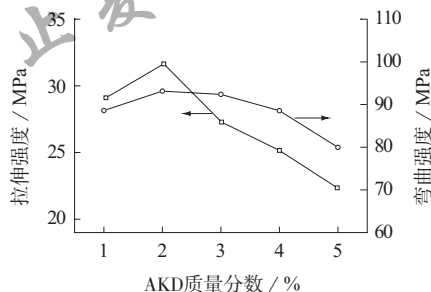


图6 不同 AKD 添加量下 PETG/废纸粉末塑复合材料力学性能

AKD 主要通过废纸纤维表面的羟基发生反应或是附着在纤维表面, 降低废纸纤维的吸水性, 提高与 PETG 塑料基体间的相容性, 随着 AKD 添加量的提升, 废纸表面逐渐被均匀包覆, 性能逐渐达到最佳。但是继续提高 AKD 添加量, 多余的 AKD 已经不会再与纤维发生反应, 而是以固体沉积的形式附着在纤维上, 这种附着并不牢固, 而且会严重影响纤维之间的粘结性能, 此外, 多余 AKD 可能会在复合材料中发生团聚, 破坏复合材料内部的均匀性, 在受到外部作用力时受力应力不能在材料中均匀快速的传递, 导致应力集中在受力部位, 复合材料材料体系发生崩溃, 容易出现断裂。

2.3 PETG/废纸粉末塑复合材料吸水性

(1) AKD 添加量对复合材料吸水性的影响

固定碱液浓度为 15%, 碱处理温度为 60℃, 碱处理时间为 60 min, 探究 AKD 不同添加量时复合材料吸水性, 如图 7 所示。从图 7 可以看到, 添加

AKD 有助于降低复合材料的吸水性能,随着 AKD 添加量的不断增加,复合材料的吸水率逐渐降低。这是由于 AKD 一方面可以与废纸纤维中的羟基发生反应,生成非极性的基团,降低纤维表面极性,减弱对水的吸附作用,从而降低吸水性,另一方面随着 AKD 添加量的不断增加,AKD 将会因为过量而不再继续与废纸纤维发生反应,而是成膜状包覆在废纸粉颗粒表面。由于 AKD 是蜡状物质,对水有很大的排斥性,将废纸粉与水分隔绝开,从而阻止废纸粉的吸水过程,降低吸水性,但前文已经表明,过度添加 AKD 会降低复合材料的力学性能,所以不能为了过度追求低吸水性而过量添加 AKD。AKD 的最佳添加量为废纸质量的 2%。

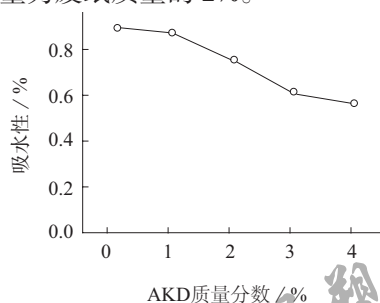


图7 不同 AKD 添加量时 PETG / 废纸粉木塑复合材料的吸水性

(2) 复合材料吸水性随浸泡时间的变化。

固定碱液浓度为 15%, 碱处理温度为 60℃, 碱处理时间为 60 min, 添加 2% AKD, 分析随着浸泡时间的延长, 复合材料吸水性的变化, 如图 8 所示。

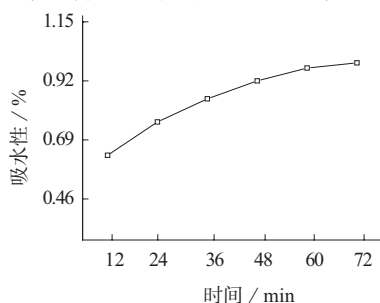
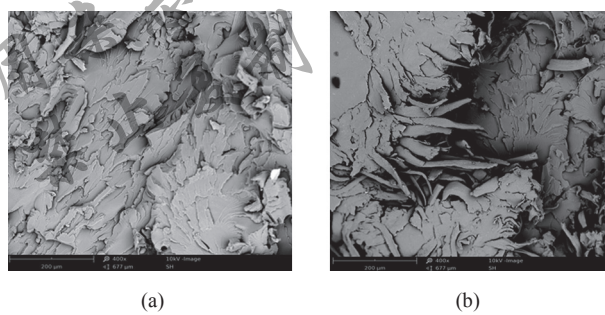


图8 不同浸泡时间时 PETG / 废纸粉木塑复合材料的吸水性

从图 8 可以看出, 添加 AKD 后, 木塑复合材料的吸水性随着浸泡时间的延长, 仍然逐渐增加, 但是增长的幅度已经小于未添加 AKD 的木塑复合材料。废纸粉由于添加了 AKD, 其表面羟基与 AKD 发生反应, 生成不亲水的基团, 吸水性降低, 此外, AKD 呈蜡质, 对水分具有很好的阻隔性能, 添加进复合材料中的 AKD 还会成薄膜状覆盖在废纸纤维表面, 将其与水分隔开, 减少纤维与水的接触机会, 最终木塑复合材料的吸水性得到降低。

2.4 复合材料微观形貌表征

废纸粉与 PETG 塑料之间并不是通过化学键连接在一起, 而是通过物理作用混合在一起, 所以其相互结合程度对复合材料性能有极大影响, 通过对断面分析, 可以从微观角度更直观分析复合材料性能变化的规律。图 9 为添加 AKD 的 PETG / 废纸粉木塑复合材料拉伸断面 (口) 的 SEM 照片, 从图 9 可以看到, 复合材料断面较为平整, 孔洞结构较少, 复合材料呈层叠状, 从断面可以看到, 原本被包覆在 PETG 中的废纸纤维在外力的作用下被从塑料基体中拔出, 裸露在外, 但纤维的团聚现象略为减轻。比起未添加 AKD 的 PETG / 废纸粉木塑复合材料, 添加 AKD 后废纸粉与 PETG 间的分散性得到改善, 但并没有完全消除纤维的团聚和裸露现象, 结合力学性能测试结果来看, 添加 AKD 有助于改善废纸粉和 PETG 的界面相容性, 增加两者间分散均匀度。



a—断面; b—断面

图9 PETG / AKD 改性废纸粉木塑复合材料断面 (口) SEM 图

2.5 复合材料热稳定性分析

固定碱液浓度为 15%, 添加 2% 的 AKD 对废纸粉进行改性, 按照废纸粉含量为 10% 与 PETG 制备复合材料, 对 PETG / 废纸粉复合材料进行热稳定性分析, 如图 10 所示。

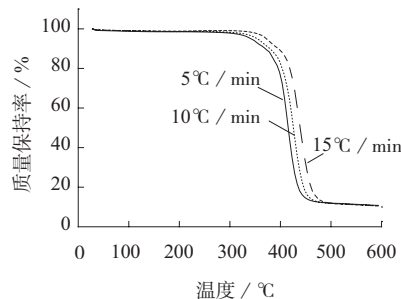


图10 不同升温速率下碱处理 AKD 改性废纸粉复合材料的 TG 曲线

由图 10 可知, 复合材料在 0 ~ 600℃ 之间只有一个大的失重阶段, 随着升温速率的增加, 起始分解温度逐渐升高, 最终的失重比率基本一致, 改变升温速率只会推迟复合材料的分解温度, 不会影响最终

的质量损失^[10-11]。

图 11 为添加 AKD 前后 PETG/ 废纸粉末塑复合材料的 TG 曲线对比,从图 11 中可以发现,添加 AKD 后,复合材料的 TG 曲线出现极小的右移,起始热分解温度略有提高,反应结束后的失重率有小幅减小,但总体来说,复合材料的热稳定性没有明显变化。

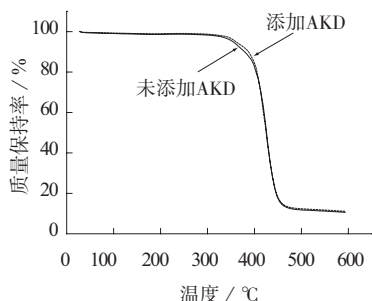


图 11 废纸粉末塑复合材料添加 AKD 前后的 TG 图

3 结论

(1) AKD 可以通过与废纸纤维上的羟基发生反应和包覆在废纸纤维表面来达到降低废纸粉吸水性的目的,增加 AKD 的添加量 (1%~3% 范围内) 可以提高复合材料的弯曲强度和耐水性,是一种成本低廉、使用工艺简单的添加剂。

(2) 使用不同碱液浓度、处理温度、处理时间以及 AKD 添加量制备出的复合材料在力学性能和吸水性上的区别,通过单因素实验确定各工艺参数的最佳条件为:碱处理温度 60℃,处理时间 60 min,碱液浓度 15%,AKD 添加量为废纸粉质量的 2% 时,实现最大程度上保留复合材料力学性能的同时提高耐水性。

(3) 添加 AKD 后,木塑复合材料的热解特性与未添加 AKD 基本相似,热解温度和失重比率没有明显变化,添加 AKD 不会降低 PETG/ 废纸粉末塑复合材料的耐热性能。

参考文献

- [1] 林华. 中外资本“纸上谈兵”[J]. 国际市场, 2004(1):16-17.
Lin Hua. Chinese and foreign capital "on paper"[J]. International Market, 2004(1):16-17.
- [2] 郭萌. 2016 年 1—6 月我国废纸和新闻纸进出口情况简析[J]. 造纸信息, 2016(9):23-27.
Guo Meng. Brief introduction to the import and export of waste paper and newsprint in China from January to June in 2016 [J]. Papermaking Information, 2016(9):23-27.
- [3] 乔引庄,王燕涛,高慧星,等. 废纸造纸过程中产生的废塑料资源化利用的探究[J]. 纸和造纸, 2014, 33(12):43-45.
Qiao Yinzhuang, Wang Yantao, Gao Huixing, et al. Recycling of the waste plastic from waste paper in pulping process[J]. Paper and Paper Making, 2014, 33(12):43-45.
- [4] 周峰. 回收 PETG 扩链增粘改性及其发泡性能的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
Zhou Feng. Study on the viscosity modification and foaming performance of recycled PETG chain extension [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016.
- [5] 陆银秋,吴培龙,陈建国,等. 共聚酯 PETG 生产及性能研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016, 36(20):16-18.
Lu Yinqiu, Wu Peilong, Chen Jianguo, et al. Study on the production and properties of copolyester PETG[J]. China Petroleum and Chemical Industry Standard and Quality, 2016, 36(20):16-18.
- [6] 董淑娟,周根树. 木塑复合材料的研究与展望[J]. 材料导报, 2009, 23(9):61-64.
Dong Shujuan, Zhou Genshu. Study and prospect of wood-plastic composites[J]. Materials Review, 2009, 23(9):61-64.
- [7] Wei Liqing, McDonald A G, Freitag C, et al. Effects of wood fiber esterification on properties, weatherability and biodegradability of wood plastic composites[J]. Polymer Degradation & Stability, 2013, 98(7):1348-1361.
- [8] 杨仲秋,赵孝文,王刚毅,等. 木塑复合材料研究进展[J]. 黑龙江科学, 2013, 4(6):70-72.
Yang Zhongqiu, Zhao Xiaowen, Wang Gangyi, et al. Study on the progress of wood-plastic composites [J]. Heilongjiang Science, 2013, 4 (6):70-72.
- [9] Qiang Tao, Yu Demei, Zhang Anjiang, et al. Life cycle assessment on polylactide-based wood plastic composites toughened with polyhydroxyalkanoates[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66(3):139-145.
- [10] 唐丽荣,黄彪,廖益强,等. 纤维素热解反应研究进展[J]. 广州化工, 2009, 37(9):8-10.
Tang Lirong, Huang Biao, Liao Yiqiang, et al. Progress in pyrolysis of cellulose[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2009, 37(9):8-10.
- [11] 耿中峰. 纤维素热裂解机理的理论和实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Geng Zhongfeng. Theoretical and experimental study on the pyrolysis mechanism of cellulose [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.