

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.12.029

PLA/麻纤维复合材料研究进展

陈春晖, 吉强, 许多, 李治江
(塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要: 简述了麻纤维的基本组成及性能;其次,对麻纤维/聚乳酸(PLA)复合材料中麻纤维界面处理方法和复合材料的主要成型加工方法进行了概述。对 PLA/麻纤维复合材料的力学性能、热学性能、阻燃性能、抗菌性能等主要应用性能研究进行了综述;对 PLA/麻纤维复合材料的研究进展进行了总结和展望,指出罗布麻纤维应用与 PLA/罗布麻纤维复合材料研究的广阔前景。

关键词: 麻纤维;罗布麻纤维;聚乳酸;复合材料;天然纤维

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)12-0151-06

Research Progress of PLA/Hemp Fiber Composites

Chen Chunhui, Ji Qiang, Xu Duo, Li Zhijiang
(College of Mechanical Electrification Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: The basic composition and properties of hemp fiber were briefly described. The interface treatment methods of hemp fiber and the main molding methods of PLA/hemp fiber composite were summarized. The mechanical properties, thermal properties, flame retardant properties and antibacterial properties of PLA/hemp composites were reviewed. The research progress of PLA/hemp composites was summarized and prospected, and the application of apocinarum fiber and the research prospect of PLA/apocinarum fiber composites were pointed out.

Keywords: hemp fiber; apocinarum fiber; PLA; composite; natural fiber

麻纤维是天然植物纤维素中的一类,具有可生物降解、价廉质轻、来源广泛、可再生等优点,且力学性能优良^[1]。随着“五位一体化”生态文明建设的全面推进,麻纤维逐渐成为用于绿色生物基复合材料研究的最广泛的天然植物纤维之一^[2]。

聚乳酸(PLA)是由玉米、小麦等农作物产品提取出的淀粉,经发酵、聚合而制得,具有良好的透明度、较好的力学性能和生物可降解性,但其具有质地硬脆、耐冲击性及热性能差且降解速率不易控制等不足,使其产业化应用范围受到限制^[3]。

PLA/麻纤维复合材料具有双组分均绿色、可降解、可再生的性能,且麻纤维优良的力学性能作为增强基质弥补了 PLA 脆、硬、耐冲击性能等不足,对环境十分友好,符合环保生态可持续发展的绿色发展理念^[4]。基于麻纤维基本组成和性

能,针对麻纤维应用于 PLA/麻纤维复合材料的界面改性及其复合材料制备的主要成型方法以及 PLA/麻纤维复合材料的主要性能研究进行了概述,并主要从界面改性、成型方法和性能研究方面对 PLA/麻纤维复合材料的研究发展进行总结和展望,同时指出罗布麻纤维应用于 PLA/麻纤维复合材料研究发展的可能性及前景。

1 麻纤维基本组成及性能

麻纤维以纤维所在的植物部位进行分类,如韧皮纤维和叶纤维,主要由纤维素、半纤维素、木质素、果胶和其它成分构成,纤维素含量较高,对纤维的强度、断裂伸长率、模量等主要性能起决定作用,与强度、模量成正相关,各成分含量因种类不同而差异^[5-6]。麻纤维结构组成及形态直接关系到其与 PLA 基质界面的相容性及其复合材料制备成型方法,进而影响 PLA/麻纤维复合材料的力学等具体性能。

基金项目: 塔里木大学校长基金项目(TDZKQN201806, TDZKQN201812)

通信作者: 李治江,讲师,硕士,研究方向为麻纤维脱胶工艺及其性能研究 E-mail: 451594487@qq.com

收稿日期: 2020-10-18

引用格式: 陈春晖,吉强,许多,等. PLA/麻纤维复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(12): 151-156.

Chen Chunhui, Ji Qiang, Xu Duo, et al. Research progress of PLA/hemp fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12): 151-156.

麻纤维自身特性直接决定 PLA/麻纤维复合材料的制备及其性能^[7],不同种类麻纤维基本性能存在差异,麻纤维一般具有断裂强度高、耐化学腐蚀及耐摩擦性能优良、质轻、比强度高特点。常用于绿色复合材料制备的麻纤维有苧麻、亚麻、黄麻、红麻、大麻、罗布麻纤维等,与常用于复合材料增强体的玻纤相比较,罗布麻纤维的拉伸强度、断裂伸长率和玻纤相当(其它麻类纤维的断裂强度约是玻纤四分之一,断裂伸长率除大麻纤维外优于玻纤),弹性相对较好,密度却只有玻纤的 0.5~0.6 倍,质地轻盈。与玻纤相比,麻纤维满足复合材料所需力学基本性能的同时,其材料价格却远远低于玻纤,绿色可降解,其较好的断裂伸长率同时亦可弥补 PLA 质地硬、耐冲击性能差的不足^[8]。另外,苧麻、亚麻、大麻、罗布麻纤维自身具有优良的抗菌性,罗布麻纤维还具有远红外抗紫外等性能,可用于相应的功能性复合材料的研发。

2 PLA/麻纤维复合材料

2.1 界面处理

麻纤维和 PLA 界面相容粘结性直接影响 PLA/麻纤维复合材料内部应力传递、转移能力,对 PLA/麻纤维复合材料的力学性能起到了决定性的作用^[9]。麻纤维属于纤维素纤维,羟基含量较高且其之间形成氢键,具有亲水性,为提高麻纤维与 PLA 的界面相容性,增强麻纤维和 PLA 机械粘结性,需要对麻纤维进行界面改性处理,主要有物理、化学等处理方法^[10],不同的处理方法采用的手段及达到的目的也有差异。近年来,常用于 PLA/麻纤维界面性能处理的方式列于表 1。

表 1 麻纤维常用界面处理方法及目的

方式	界面处理方法	目的
物理	碱处理、拉伸、压延、热处理、酸处理、蒸汽爆破处理、表面原纤化及放电处理,如低温等离子放电、溅射放电、电晕放电	使麻纤维的某些主要性能指标发生改变,如浸润性、吸湿性等,以此增加与 PLA 的界面相容
	偶联剂法、接枝共聚法、酯化改性等	减少麻纤维羟基数量,改变麻纤维化学结构,提高其在 PLA 中的均匀分散度,增加两者直接的界面黏结力

物理方法主要是针对性地改变麻纤维的表面结构和性能来提高麻纤维与 PLA 的物理粘附性。化学方法则是通过使麻纤维基本化学组成及结构发生改变,使麻纤维和 PLA 界面粘附力发生不同程度的变化,改善麻纤维在其中分散程度^[11]。由于麻纤维种类不同,其基本组成成分及含量不同,则常用的界面处理也不尽相同,表 2 是 PLA/麻纤维复合材料的界面处理方法。

表 2 PLA/麻纤维复合材料的界面处理方法

麻纤维	界面处理
罗布麻	碱、果胶酶、过氧化物、离子体、超声波、微波等
苧麻	碱处理、马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)、硅油
亚麻	碱、偶联剂、玉米蛋白、丙烯酸、乙酰、硬脂酸、PP-g-MAH, 马来酸酐接枝聚己内酯
黄麻	碱、偶联剂、甲基丙烯酸羟乙酯、PP-g-MAH, PP-g-MAH, γ 射线、氧等离子体
红麻	碱、硅烷偶联剂、苯甲酰氯、甲基丙烯酸甲酯等
大麻	碱、偶联剂、乙酰化、异氰酸酯、高锰酸、过氧化物等

P. Maichin 等^[12]研究了大麻纤维在碱性复合材料基体中的自身界面性能以及与复合材料基体的界面粘结性能,为其它麻类纤维及天然纤维素纤维应用于绿色复合材料的研发提供理论依据,优化了传统的复合材料制备过程中纤维界面碱处理工艺。O. Shubhashini 等^[13]分别用 NaOH、硅烷溶液、乙酰酐溶液对大麻纤维进行界面改性,结果表明,硅烷和乙酰酐改性所需能量要高于 NaOH 碱处理,三种方式皆达到改善大麻纤维和 PLA 的界面相容性的目的。Pan Liai 等^[14]采用 NaOH 溶液、硅烷偶联剂对大麻纤维进行界面改性处理,使大麻纤维和 PLA 基体的界面相容粘结性能得到改善,同时有效改善 PLA/麻纤维复合材料的力学性能和热学性能。刘璇等^[15]对苧麻纤维表面采用冷等离子体进行处理,有效去除了其表面杂质及胶质,提高了其与复合材料基体粘结力。皮超雄^[16]采用环氧硅油成功实现对苧麻纤维的表面改性处理,有效改善了苧麻纤维表面浸润性及与复合材料基体的界面相容粘结力。杨明等^[17]用硅烷偶联剂对剑麻纤维进行表面改性。A. F. M. Fahad Halim 等^[18]采用一种新的化学方法对罗布麻纤维进行表面处理改性。

由麻纤维界面改性处理文献的研究发现,有关 PLA/麻纤维复合材料制备及应用的麻纤维表面改性处理的方法很多,但在一定程度上并没有克服环境污染等问题。碱处理方法历史悠久且价格低廉,效率高而被广泛采用。硅烷偶联剂在改善麻纤维表面特性的同时对提高其 PLA 复合材料的力学、热学等方面效果良好,应用越来越多。另外,关于罗布麻纤维的表面改性多用于纺纱、织造等方面应用^[19],应用于绿色复合材料的制备研究较少,而 PLA/麻类纤维复合材料界面改性的研究为罗布麻纤维在 PLA/罗布麻纤维绿色复合材料的制备研究方面提供了扎实的理论基础研究支撑。

2.2 PLA/麻纤维复合材料成型加工方法

复合材料的成型技术有:喷射成型、片状模塑料成型、层压成型、树脂传递模塑成型、缠绕成型、熔融浸渍成型、模压成型、注射成型和拉挤成型等^[20]。PLA/复合材料成型加工制备方式与麻纤维和 PLA 形态以及复合材料的研发性能要求息息相关。不同的成型工艺对麻纤维和 PLA 基体的界面粘结性有直接影响,进而影响复合材料内部应力的传递及

转移,最终影响复合材料的性能和质量^[21]。

(1) 挤出、注射成型。

挤出成型多应用于粉粒状 PLA 与粉状或长短天然纤维混合时的场合^[22]。注射成型则是将原料混合塑化,通过气流和压力注入模具腔,冷却成型^[23]。姜爱菊等^[24]采用挤出共混、注射成型方式制备了 PLA/黄麻纤维复合材料,并通过对碱处理黄麻纤维与 PLA 间界面形态及其复合材料力学性能进行了研究,该工艺有效提高了碱处理黄麻纤维和 PLA 界面粘结性以及复合材料的冲击性能。

孙旭鹏^[25]将黄麻纤维和 PLA 熔融共混通过挤出注射成型法制备 PLA/黄麻纤维复合材料,研究了黄麻纤维表面改性对复合材料的界面性能的影响。结果表明,挤出注射成型法有效实现了界面改性后的黄麻纤维和 PLA 基体的界面粘结性。宋亚男^[26]采用螺杆挤出机以大麻纤维和 PLA 纤维混纺纤维球为对象,采用挤出注射成型法制备 PLA/麻纤维复合材料,提高了大麻纤维在 PLA 基体中的均匀分散程度,改善了复合材料的力学性能。

挤压、注射成型具有批量生产的特点,适用于产业化大量生产,但材料易受到成型过程中温度及剪切作用的影响而发生性能损失。

(2) 模压成型。

模压成型^[27]是在结构相对简单的模具中放入用于模压制备的原料,再施加一定的温度和压力,使模压原料发生固化而成型。该工艺适用于流动性能较差的天然纤维复合材料的制备,且操作简单,是麻纤维复合材料制备中应用最广泛的成型工艺,具体流程如图 1 所示。

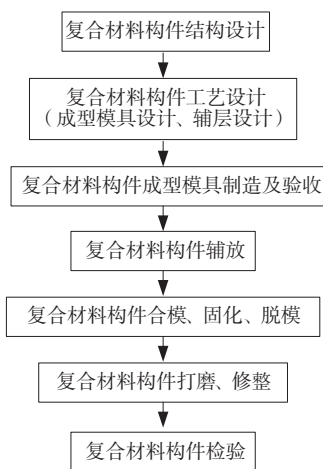


图 1 复合材料模压成型工艺

根据麻纤维和 PLA 的状态分为预混、层叠、缠绕等模压成型^[28]。其中层叠模压成型技术因可调节纤维和复合材料基体的结构参数和层叠参数,而更多适应于片材、薄膜、无纺布型 PLA/麻纤维复合材料制备。

刘常衡^[29]通过层叠热压模塑工艺制备了 PLA/亚麻复合材料,通过亚微观形貌分析,亚麻纤维和 PLA 界面粘结性得到改善,复合材料具有良好的弯曲及冲击性能。M. S. Huda 等^[30]采用每两层 PLA 膜之间夹一层红麻纤维的层叠结构,通过热压成型制备 PLA/红麻纤维复合材料,增强了红麻纤维和 PLA 的界面相容性,提高了 PLA/红麻纤维复合材料的力学和热学性能。具体层叠热压工艺如图 2 所示。杜思琦等^[31]采用机织黄麻布和 PLA 利用层叠热模压成型制备了 PLA/黄麻纤维复合材料。梅小雪^[32]以罗布麻纤维无纺布和 PLA 膜间隔叠层,通过层压成型技术,制备了 PLA/罗布麻纤维复合材料,图 3 为 PLA/罗布麻纤维复合材料层压工艺示意图。

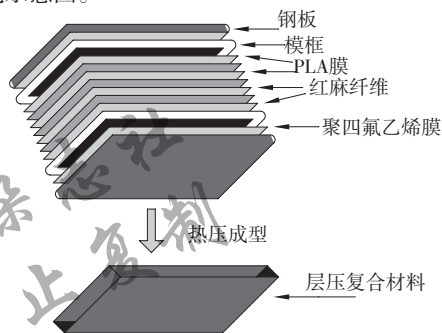


图 2 PLA/红麻纤维复合材料层叠热压工艺

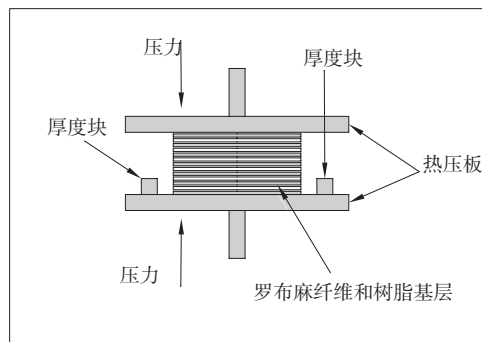


图 3 PLA/罗布麻纤维复合材料层压工艺

层叠热压工艺制备的复合材料纤维含量高,力学性能优良,在 PLA/麻纤维复合材料的制备中应用较为普遍,但是其综合力学性能还不够高。模压成型方便灵活,但不适合成型结构复杂的复合材料。随着人们对 PLA/麻纤维复合材料领域的深入研究,结合高新技术发展应用,PLA/麻纤维复合材料制备成型工艺也在不断改善。李志刚等^[33]为扩展 PLA/麻纤维复合材料的应用领域,研发适用于制备力学性能优良,结构相对复杂的复合材料,提出了 3 种 PLA/汉麻纤维复合材料的制备成型工艺,图 4 为 PLA/汉麻纤维复合材料制备工艺流程。

另外,研究发现 PLA/麻纤维复合材料的制备成型工艺不再是采取单一的成型方式,而是向多种方式及因素相结

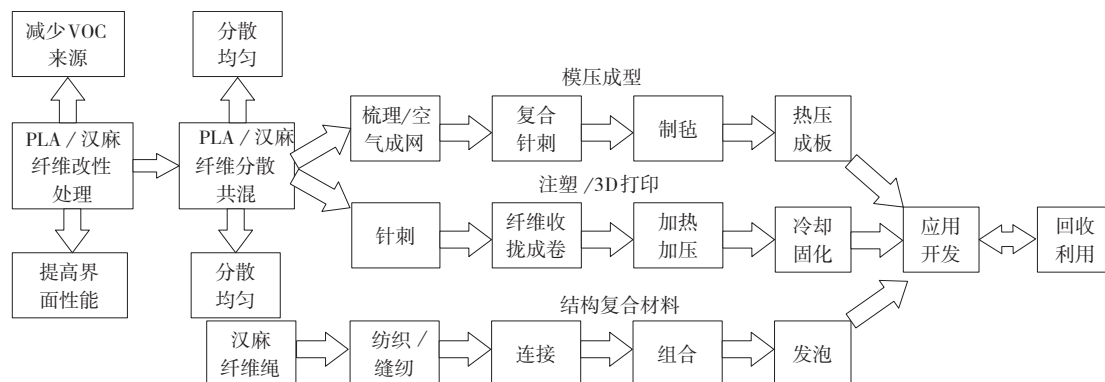


图4 PLA/汉麻纤维复合材料制备工艺流程

合的复合型、新型高新技术融合型发展,而针对 PLA/ 罗布麻纤维绿色复合材料的制备却鲜有报道。

3 PLA/ 麻纤维复合材料的性能研究

PLA/ 麻纤维复合材料集麻纤维、PLA 自身性能于一体,麻纤维的融入对 PLA/ 麻纤维复合材料的力学、热学、阻燃、抗菌等均有影响。

3.1 力学性能

在 PLA/ 麻纤维复合材料中,所采用的麻纤维种类、复合结构形态、界面性质以及复合材料成型工艺等对复合材料力学性能均有巨大影响。一种复合材料的制备首先要具有相应的良好力学性能才能保证该复合材料的应用,而复合材料应用领域不同所需力学性能不同,基于此,研究者普遍对 PLA/ 麻纤维复合材料力学特性进行研究。

王春红等^[34]研究了经过碱氧-浴法处理的洋麻纤维-棉纤维混纺织物的不同混纺比对 PLA/ 混纺织物复合材料的力学性能的影响。李鑫等^[35]利用碱处理、硅烷偶联剂处理以及碱+硅烷偶联剂联合处理分别对苧麻织物表面进行化学改性,通过对不同铺层角度的不饱和聚酯树脂/苧麻织物 (UPR/苧麻) 复合材料力学性能进行研究,提升复合材料的力学性能以及界面粘合。Luo Honglin 等^[36]制备了 PLA/ 剑麻纤维复合材料,并对其动、静态力学特性进行了实验测试与分析,表明纤维含量对其复合材料的力学性能影响显著,通过纤维混杂比的进一步优化制备了动静态力学性能优良的复合材料。

3.2 热学性能

对于 PLA/ 麻纤维复合材料,PLA 自身耐热性能较差,因此麻纤维和 PLA 相互融合而制备的复合材料呈现的热学特性被人们关注,热学性能与 PLA/ 麻纤维复合材料的力学、耐热性、耐老化等性能息息相关^[37]。

杜思琦^[38]对黄麻纤维采用碱处理界面改性后,制备了 PLA/ 黄麻纤维复合材料,并对其热学、力学特性进行了测

试分析,表明碱处理弱化了纤维耐热性,但对 PLA/ 黄麻纤维复合材料的热学性能影响不大。李明^[39]采用硅烷偶联剂对黄麻纤维进行表面处理制备 PLA/ 黄麻纤维复合材料,并对其热学性能进行分析,黄麻纤维的界面处理使复合材料结晶度提高,起到了成核剂的作用,当含量较高时,有两个熔融吸热峰出现。

3.3 阻燃性能

麻纤维属于纤维素纤维,本身易燃,而 PLA 属于聚酯类,极限氧指数只有 20%,阻燃性能差,为扩大 PLA/ 麻纤维复合材料的应用范围,其阻燃性研究则必不可少。

庞锦英等^[40]采用剑麻纤维、PLA 为原料,添加绿色膨胀型阻燃剂 (TFR),制备阻燃 PLA/ 剑麻纤维复合材料,并测试分析了该复合材料土埋前后的阻燃性,表明随土埋时间的增加复合材料的阻燃性能增加。左敏等^[41]以 PLA、废弃麻纤维为原料通过添加阻燃剂制备具有阻燃性能的 PLA/ 废弃麻纤维复合材料,并通过实验分析发现 PLA、阻燃剂的含量分别为 60%,30% 时复合材料的阻燃性能最优。王春红^[42]通过对苧麻纤维织物采用碱、阻燃剂、硅烷偶联剂相互结合的方式进行表面改性处理,制备出无熔滴现象的 PLA/ 苧麻纤维织物复合材料。王蛟等^[43]采用 9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物 (DOPO) 对 PLA 进行阻燃改性,并与苧麻纤维复合制备阻燃型纤维复合材料,表明 DOPO 的改性处理提高了 PLA/ 苧麻纤维织物复合材料的极限氧指数及阻燃性能。

PLA/ 麻纤维复合材料阻燃性能研究主要集中于针对苧麻纤维、黄麻纤维及剑麻纤维改性 PLA 复合材料的阻燃性能研究,研究内容包括阻燃剂含量及工艺条件、麻纤维阻燃改性及 PLA 阻燃改性机理。阻燃改性在一定程度上影响麻纤维、PLA 的绿色可降解性能,另外阻燃改性时使用的化学试剂还会带来一定程度的环境污染。随时间的延长添加的阻燃剂会有小分子迁移到复合材料表面进而影响复合材

料的外观和相关性能。因此,研发高度交联型及原位反应型绿色阻燃剂、利于阻燃的 PLA/麻纤维复合结构将是 PLA/麻纤维复合材料阻燃性能研究的趋势。

3.4 抗菌等性能

苧麻、亚麻、大麻、罗布麻纤维自身具有一定的抗菌性,对其绿色复合材料抗菌性的研究也逐渐被人们所重视。梅小雪^[32]研究制备了 PLA/罗布麻纤维复合材料、PLA/苧麻纤维复合材料的抗菌性。试验结果表明,PLA/罗布麻纤维复合材料优于 PLA/苧麻纤维复合材料,这对罗布麻纤维复合材料在抑菌方面的应用提供了有力支持。

综上,PLA/麻纤维复合材料的性能应用研究大多集中在力学、热学、阻燃等性能,而对抗菌性、声学、远红外、抗紫外等性能研究甚少,而部分麻纤维却具备该性能,因此充分发挥麻纤维自身性能制备功能性 PLA/麻纤维复合材料是研究趋势,如苧麻、亚麻、大麻、罗布麻纤维的抗菌性、罗布麻纤维的远红外、抗紫外等性能。

4 展望

PLA/麻纤维复合材料作为一种绿色复合材料,对环境保护、资源有效利用具有十分重要意义,其广泛应用于汽车、航空航天、建筑业等领域,具有十分良好的发展前景。由于麻纤维是天然植物纤维,并不具有合成纤维的标准形态,因此需进一步探究如何提高 PLA/麻纤维复合材料的制备工艺性及性能。主要从界面粘结性、成型方式、性能研究等方面改善:(1)设计开发简洁绿色、高效、低成本麻纤维界面处理方法,提高麻纤维与 PLA 的界面粘结性及均匀分散性;(2)开发简单高效、低成本的复合材料成型工艺,实现麻纤维资源的高效循环利用;(3)充分发挥麻纤维自身性能,设计合理复合材料结构,制备功能性 PLA/麻纤维复合材料;(4)结合 PLA/麻纤维复合材料的研究现状,开发 PLA/罗布麻纤维复合材料,拓宽罗布麻纤维的应用范围,充分发挥罗布麻纤维自身价值。

参考文献

- [1] 韩露. 面向生态车辆的聚乳酸复合材料性能与优化设计方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
Han Lu. Research on the performance and optimization design method of polylactic acid composite material for ecological vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [2] Patel N, et al. Materials Today: Proceedings, 2020. DOI:10.1016/j.matpr.2020.05.452.
- [3] 包玉衡,等. 塑料科技, 2017, 45(5): 64–68.
Bao Yuheng, et al. Plastic Science and Technology, 2017, 45(5): 64–68.
- [4] 陈颢,等. 工程塑料应用, 2014, 42(8): 101–104.
Chen Xie, et al. Engineering Plastics Applications, 2014, 42(8): 101–104.
- [5] 于伟东. 纺织材料学 [M]. 中国纺织出版社, 2018.
Yu Weidong. Textile Material Science [M]. Beijing: China Textile Publishing House, 2018.
- [6] Ferran S-P, Polymers, 2020, 12(6). DOI:10.3390/polym12061428.
- [7] 许瑞. 麻纤维复合材料高性能化的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2002.
Xu Rui. Research on high performance of hemp fiber composite materials [D]. Chengdu: Sichuan University, 2002.
- [8] 何莉萍,等. 湖南大学学报: 自然科学版, 2018, 45(12): 66–72.
He Liping, et al. Journal of Hunan University: Natural Science, 2018, 45(12): 66–72.
- [9] Chen D L, et al. Chem Phys Lett, 2005, 405: 159–164.
- [10] Huda M S, et al. Composites Science and Technology, 2008, 68(2): 424–432.
- [11] 周颖,等. 工程塑料应用, 2018, 46(7): 142–145.
Zhou Ying, et al. Engineering Plastics Applications, 2018, 46(7): 142–145.
- [12] Maichin P, et al. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35(10). DOI:10.1080/10426914.2020.1767294.
- [13] Shubhashini O, et al. Composites: Part B, 2014, 67: 227–232.
- [14] Pan Liai, et al. Agricultural Machinery, 2011(35): 162–165.
- [15] 刘璇,等. 化工新型材料, 2018, 46(1): 140–143, 149.
Liu Xuan, et al. New Chemical Material, 2018, 46(1): 140–143, 149.
- [16] 皮超雄. 车用苧麻纤维增强聚丙烯复合材料力学与阻尼性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Pi Chaoxiong. Research on the mechanical and damping properties of ramie fiber reinforced polypropylene composites for vehicles [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [17] 杨明,等. 现代塑料加工应用, 2018, 30(5): 9–12.
Yang Ming, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2018, 30(5): 9–12.
- [18] Fahad Halim A F M, et al. Textile Research Journal, 2020, 90(11–12): 1342–1353.
- [19] 李传贺. 山东纺织科技, 2019, 60(4): 42–44.
Li Chuanhe. Shandong Textile Science & Technology, 2019, 60(4): 42–44.
- [20] 陈颢,等. 工程塑料应用, 2014, 42(9): 102–105.
Chen Xie, et al. Engineering Plastics Applications, 2014, 42(9): 102–105.
- [21] 胡建鹏,等. 西南林业大学学报: 自然科学, 2020, 40(3): 180–188.
Hu Jianpeng, et al. Journal of Southwest Forestry University: Natural Science, 2020, 40(3): 180–188.
- [22] 李增光,等. 黑龙江造纸, 2017, 45(2): 22–24.
Li Zengguang, et al. Heilongjiang Pulp & Paper, 2017, 45(2): 22–

- 24.
- [23] 陈良鹏. 绿色复合材料汽车 A 柱部件的注射成型工艺优化研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
Chen Liangpeng. Research on injection molding process optimization of green composite automotive A-pillar parts [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [24] 姜爱菊, 等. 现代塑料加工应用, 2020, 32(1): 20–23.
Jiang Aiju, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(1): 20–23.
- [25] 孙旭鹏. 汽车内饰用黄麻纤维 / 聚乳酸复合板的制备及性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
Sun Xupeng. Preparation and performance study of jute fiber / polylactic acid composite board for automobile interior decoration [D]. Shanghai: Donghua university, 2019.
- [26] 宋亚男. 聚乳酸基复合材料的性能与结构研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Song Yanan. Research on the properties and structure of polylactic acid-based composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [27] 王英男, 等. 航空制造技术, 2018, 61(14): 56–60.
Wang Yingnan, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 56–60.
- [28] 朱楠, 等. 纤维复合材料, 2020, 37(2): 33–35.
Zhu Nan, et al. Fiber Composite, 2020, 37(2): 33–35.
- [29] 刘常衡. 植物纤维增强聚乳酸复合材料的性能研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
Liu Changheng. Study on the performance of plant fiber reinforced polylactic acid composite material [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019.
- [30] Huda M S, et al. Composites Science and Technology, 2008, 68(2): 424–432.
- [31] 杜思琦, 等. 上海交通大学学报, 2019, 53(11): 1 335–1 341.
Du Siqi, et al. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(11): 1 335–1 341.
- [32] 梅小雪. 罗布麻和苧麻纤维增强聚乳酸复合材料的制备与性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
Mei Xiaoxue. Study on the preparation and properties of apocynum and ramie fiber reinforced polylactic acid composites [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [33] 李志刚, 等. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49(2): 536–543.
Li Zhigang, et al. Journal of Jilin University: Engineering Science, 2019, 49(2): 536–543.
- [34] 王春红, 等. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1 581–1 589.
Wang Chunhong, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1 581–1 589.
- [35] 李鑫, 等. 工程塑料应用, 2020, 48(7): 61–67, 79.
Li Xin, et al. Engineering Plastics Applications, 2020, 48(7): 61–67, 79.
- [36] Luo Honglin, et al. Polymers & Polymer Composites, 2017, 25(6). DOI: 10.1177/096739111702500605.
- [37] Chang Shaokun, et al. Polymer International, 2012, 61(10): 1 492–1 502.
- [38] 杜思琦. 编织型黄麻 / 聚乳酸复合材料的制备及热冲压实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
Du Siqi. Preparation and hot stamping experimental research of woven jute / polylactic acid composite material [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [39] 李明. PLA / PBS / 黄麻纤维复合材料的制备及其性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Li Ming. Study on the preparation and performance of PLA / PBS / jute fiber composite materials [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [40] 庞锦英, 等. 广西师范学院学报: 自然科学版, 2017, 34(2): 77–81, 96.
Pang Jinying, et al. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2017, 34(2): 77–81, 96.
- [41] 左敏, 等. 上海纺织科技, 2012, 40(9): 35–36, 51.
Zuo Min, et al. Shanghai Textile Science & Technology, 2012, 40(9): 35–36, 51.
- [42] 王春红, 等. 复合材料学报, 2015, 32(2): 444–450.
Wang Chunhong, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 444–450.
- [43] 王蛟, 等. 塑料, 2018, 47(4): 1–4.
Wang Jiao, et al. Plastics, 2018, 47(4): 1–4.