

低 VOC 麻纤维增强复合材料制备技术

刘雪强¹, 李志刚², 潘国立³

(1. 军事科学院 系统工程研究院 军需工程技术研究所, 北京 100010)

(2. 吉林大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

(3. 长春博超汽车零部件股份有限公司, 吉林 长春 130033)

摘 要: 麻纤维增强热塑性复合材料具有轻质、环保、耐冲击等特点, 是极具附加值与潜力的材料。但传统麻纤维复合材料存在纤维分散不均、挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOC) 大量释放等问题, 制约了麻纤维复合材料的规模化应用。介绍了麻纤维固相共混热致复合的材料制备方法、麻纤维表面处理技术、麻纤维复合材料一步法制备技术、麻纤维热塑性复合材料一体化成型等制备工艺, 并对天然麻纤维增强复合材料的规模化应用进行了展望。

关键词: 麻纤维; 固相共混; 脱胶; 界面改性; 挥发性有机化合物 (VOC)

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)05-0448-09

引用格式: 刘雪强, 李志刚, 潘国立. 低 VOC 麻纤维增强复合材料制备技术[J]. 中国材料进展, 2024, 43(5): 448-456.

LIU X Q, LI Z G, PAN G L. Preparation Technology of Low VOC Hemp Fibers Reinforced Composites[J]. Materials China, 2024, 43(5): 448-456.

Preparation Technology of Low VOC Hemp Fibers Reinforced Composites

LIU Xueqiang¹, LI Zhigang², PAN Guoli³

(1. Institute of Quartermaster Engineering Technology, Academy of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100010, China)

(2. School of Material Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

(3. Changchun Bochao Auto Parts Co., Ltd., Changchun 130033, China)

Abstract: Hemp fibers thermoplastic composites have the characteristics of light weight, environmental protection and impact resistance. It is a material with great added value and potential. In the traditional production process of hemp fibers composites, there are problems such as uneven fiber dispersion and large amounts of volatile organic compound (VOC) emitted, which restrict the scale application of hemp fibers composites. The paper in the field of hemp fibers composites was introduced, a material preparation method of fiber solid-phase blending, a hemp fiber surface treatment technology, and an integrated molding process for hemp fiber thermoplastic composite materials. And the prospects for the large-scale application of natural hemp fiber reinforced composite materials were presented.

Key words: hemp fibers; solid-phase blending; degumming; interfacial modification; volatile organic compound (VOC)

1 前 言

天然纤维复合材料具有轻质、高强、环保的显著特

点, 它的轻量化和环保优势引起了汽车、轨道交通等生产制造领域研究人员的广泛关注。麻纤维作为生物质再生资源、绿色天然纤维, 其复合材料具有轻质环保、隔音隔热、耐冲击、低成本等优点, 符合目前我国碳达峰、碳中和的战略目标^[1, 2]。在国际上, 麻纤维复合材料也已成为重点关注的环保型轻量化材料之一^[3]。

21 世纪以来, 麻纤维复合材料在汽车内饰中的应用已越来越广泛^[4-6]。但传统方法制备麻纤维复合材料时, 由于树脂黏度高, 液态树脂难以透过固态纤维间隙渗透所有纤维表面而实现完全浸润; 因而存在纤维分布

收稿日期: 2021-07-15 修回日期: 2022-04-17

基金项目: 吉林省重大科技专项项目 (20210301004GX)

第一作者: 刘雪强, 男, 1976 年生, 正高级工程师

通讯作者: 李志刚, 男, 1977 年生, 教授, 博士生导师,

Email: lzg@jlu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202107023

不匀、纤维与树脂间界面相容性差、麻纤维湿效应强、VOC 大量释放等技术难题，直接影响麻纤维复合材料的产业化应用。同时，在麻纤维复合材料多维度复杂部件加工过程中，还存在成型困难、局部力学性能差等难题^[7]，极大地制约了麻纤维复合材料的应用推广。

针对麻纤维增强复合材料加工制备过程中存在的主要问题，本文系统介绍麻纤维改性、低 VOC 复合材料加工、复合材料制备工艺与关键设备等方面的研究进展，同时展望麻纤维复合材料的发展趋势，为麻纤维复合材料的开发及应用提供参考和借鉴。

2 麻纤维处理

2.1 麻纤维脱胶

麻纤维中，除了有性能稳定的纤维素成分，还包括性能不稳定的果胶、半纤维素、木质素、脂肪蜡质等非纤维物质的胶质，这部分胶质会导致麻纤维受热散发出醛类物质，不利于环保^[8]。传统的脱胶方式主要有传统沤麻、化学脱胶、生物酶脱胶、机械脱胶等。但传统的脱胶工序往往存在脱胶不彻底以及果胶、木质素、半纤

维素等成分残存较多的问题。

低成本、环保、高效率的脱胶工艺成为研究方向。深冷处理工艺作为一种热处理工艺已经广泛应用于各种金属材料领域，用于提高材料的力学性能和使用寿命^[9-11]。李志刚等^[12]从物理方式入手将深冷处理技术应用到麻纤维脱胶领域，发明了低温处理-机械联合脱胶工艺。将麻纤维置于深冷设备中进行深冷处理，再进行机械揉搓，最后进行碱液清洗。利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对处理后的样品进行表征，实验结果如图 1 所示^[13]。图 1a 中，经-196℃深冷处理后，纤维表面的胶质被破坏，胶质不再是一个整体，而是分成了很多小块，纤维束变得疏松。如图 1b，深冷-机械处理后，大部分胶质被从纤维上移除，一些纤维裸露出来。从图 1c 可以看出，深冷-机械-碱洗后，纤维的纵向结构变得更清晰。该研究结果表明，深冷-机械-碱洗脱胶工艺能够较好地去除麻纤维中的胶质。因此，深冷-机械脱胶是一种可行的纯物理的环保型脱胶工艺，具有低成本、高效率、无污染的显著特点。

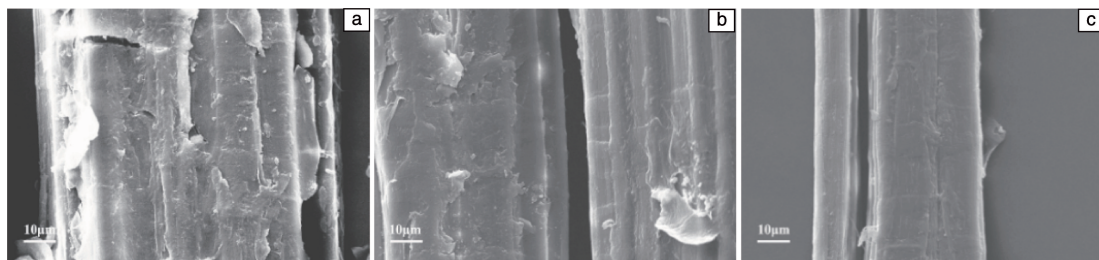


图 1 低温处理-机械联合脱胶前后的麻纤维 SEM 照片^[13]：(a)深冷处理，(b)深冷-机械处理，(c)深冷-机械处理-碱洗

Fig. 1 SEM images of the hemp fibers before and after combined low-temperature and mechanical degumming^[13]：(a) cryogenic treatment, (b) cryogenic treatment and mechanical treatment, (c) cryogenic treatment-mechanical treatment-alkaline liquid cleaning

2.2 麻纤维-树脂界面改性

麻纤维富含羟基，是强极性材料，不易在非极性或低极性树脂中分散，与树脂复合时，纤维-树脂界面间结合强度较弱^[14]。通过树脂改性-纤维处理技术可以改善和提高麻纤维复合材料的界面粘合性能。添加界面改性剂能使树脂与纤维表面产生更强的界面结合能力，同时降低纤维吸水性，提高纤维与树脂相容性及分散性，从而提高复合材料的力学性能^[15, 16]。使用的界面改性剂主要有化学偶联剂、界面相容剂、表面活性剂等^[17]。

刘俊辉^[18]采用疏水改性纤维素的水性溶液对麻纤维进行浸渍，树脂改性采用传统的马来酸酐接枝聚丙烯。将改性麻纤维与改性树脂纤维互混制备成粒料，再利用注塑成型制备出纤维增强复合材料。通过力学性能测试，

发现其拉伸、弯曲和冲击性能都得到了提高。利用 SEM 观察其拉伸断面，结果显示复合材料破坏的主要方式为麻纤维断裂。验证了树脂改性-纤维处理技术提高了复合材料的界面性能。从图 2 可以看出^[18]，表面深冷-机械脱胶后的汉麻纤维比表面积增大，界面结合力提高(图 2a)。图 2b 显示，尿素改性后基体与汉麻纤维形成了较好的粘结，且纤维表面粘附有树脂。从图 2c 偶联剂改性后的复合材料拉伸断面中可以看出，聚丙烯基体较好地包覆在汉麻纤维周围。

3 麻纤维增强复合材料低 VOC 处理工艺

目前，麻纤维增强复合材料汽车内饰件是先将麻纤维和树脂纤维混合制备毡材，再通过热模压制备而成。但该工艺普遍存在 VOC 释放量大的问题。

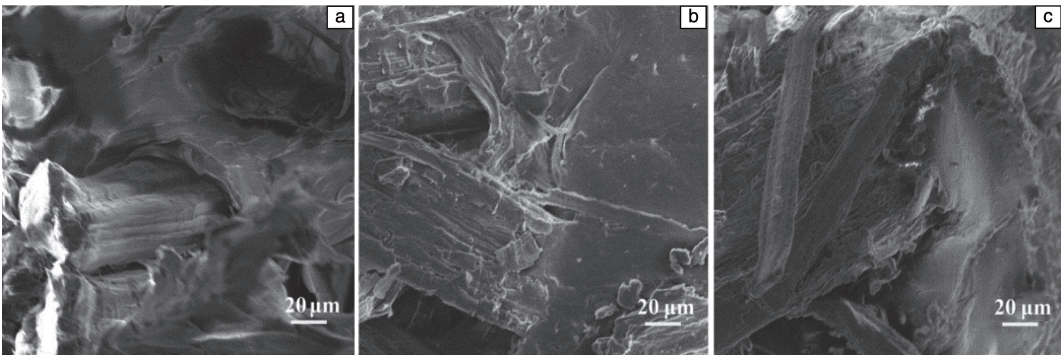


图 2 复合材料的拉伸断口形貌 SEM 照片^[18]: (a) 未改性, (b) 尿素改性, (c) 偶联剂改性

Fig. 2 SEM images of the tensile fracture morphology of composites^[18]: (a) unmodified, (b) urea-modified, (c) coupling modification

通过分析麻纤维增强复合材料制备过程中释放的 VOC 成分可知, VOC 主要来源于天然麻纤维中的胶质、复合材料制备过程中添加的助剂、树脂基体材料。可以通过对原材料进行脱胶、改性处理等方法控制麻纤维增强复合材料制备过程中 VOC 的释放。

3.1 麻纤维和聚丙烯原材料热解行为

热重-质谱联用可以系统分析汉麻和聚丙烯纤维的热解行为, 采用质谱仪可以对热解过程中的 13 种挥发物的释放情况进行追踪。刘俊辉^[18]发现汉麻纤维作为天然纤维, 本身所含的 VOC 成分极低, 但它夹杂的木质素和半纤维素中含有极少量的苯类和醛类物质, 汉麻纤维中 VOC 的释放主要来源于这些苯类和醛类物质转化而成的脂肪族化合物。聚丙烯中的 VOC 释放主要源于其热解产生, 其在复合材料制作温度区间内 VOC 释放较少。因此, 汉麻纤维增强聚丙烯复合材料中的 VOC 主要来源于汉麻纤维的 VOC 释放。

针对原材料中 VOC 的释放来源, 刘俊辉^[18]对麻纤维原材料进行了深冷脱胶处理, 该工艺有效去除了胶质,

从而解决了麻纤维原材料加热时释放 VOC 的源头。

3.2 改性工艺对复合材料 VOC 释放的影响

麻纤维增强复合材料的界面结合性能是影响复合材料 VOC 释放的一个重要因素, 界面结合性能较好的复合材料对应的 VOC 释放量也较低。通过树脂改性-纤维处理技术可以获得良好的界面性能。

刘俊辉^[18]选择了热改性、聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 改性、偶联剂改性和尿素改性以及未改性的麻纤维复合材料进行 VOC 释放实验, 采用热重-质谱仪来评价汉麻纤维增强聚丙烯 (polypropylene, PP) 复合材料的 VOC 释放行为, 结果如表 1 所示。从表 1 的结果可知, 尿素改性对 VOC 释放的降低效果最优。因此, 该项研究选择尿素改性工艺, 并对改性后的复合材料 VOC 释放进行了定量测试^[18]。采用峰面积归一法对质谱 (mass spectrometry, MS) 结果进行定量分析, 结果如表 2^[18]所示。尿素改性后复合材料 VOC 总释放量降低, 其中甲醛和乙醛释放量出现了较为明显的下降。

表 1 不同改性方法对复合材料的挥发性有机化合物 (VOC) 累计释放的影响^[18]

Table 1 Effect of different modification methods on volatile organic compounds (VOC) accumulative release of composites^[18]

	Modifying methods				
	Without modification	Thermal modification	Coupling agent modification	Urea modification	PVA modification
Accumulative release/ ($10^{-11}/(\text{A} \cdot \text{g}^{-1})$)	764.63	756.66	663.04	625.79	732.30

表 2 改性对复合材料 VOC 释放的影响^[18]

Table 2 Effect of modification on VOC release of composites^[18]

Composite material	Accumulative VOC release/ $(10^{-11}/(\text{A} \cdot \text{g}^{-1}))$										
	Formaldehyde	Acetaldehyde	Acrolein	n-butane	Benzene	Toluene	Styrene	Ethylbenzene dimethylbenzene	p-Chlorobenzene	Tetradecane	Summation
Without modification	251.19	1074.98	65.23	59.62	60.05	58.11	58.66	58.12	58.30	58.66	1802.91
Urea modification	208.19	761.68	65.23	64.67	64.71	63.43	64.13	63.73	63.76	64.05	1483.59

通过对汉麻纤维进行深冷脱胶处理以及对麻纤维复合材料进行改性处理,可以改善复合材料的界面性能,减少VOC的释放量,从源头上减轻汽车内饰件对车内环境的影响。其工艺过程如图3所示。

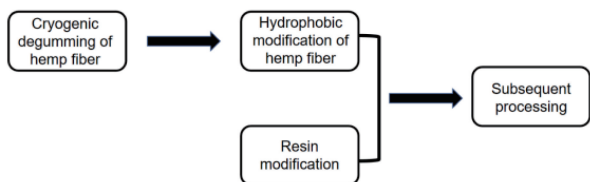


图3 控制麻纤维复合材料VOC释放工艺流程图

Fig. 3 Controlling VOC release process of hemp fiber composites

因此,针对麻纤维复合材料的制备工艺过程,可以通过控制成型温度、提高成型压力、控制成型保压时间,制备出低VOC麻纤维增强复合材料^[19]。

4 预制体制备工艺

随着麻纤维增强复合材料的广泛应用,传统麻纤维复合材料制备工艺存在成型难、成本高、力学性能差、VOC释放量大等缺点,已经不能完全满足市场需求,各国学者都在积极改善和研发新的制备工艺。刘雪强等^[20]提出纤维固相共混/热致复合的复合材料制备方法,通过纺织混纤技术,将麻纤维和树脂纤维进行均匀混合,使之成条或成网,再经热致作用,使树脂纤维熔融为连续相,原位包覆于增强相,制得麻纤维复合材料。固相共混阶段,通过把增强纤维和基体纤维进行均匀混纤,制成

纤维条或纤维毡材;热致复合阶段,通过热致熔融,使增强纤维和基体纤维原位复合,制成纤维粒料或纤维板材。其具体的工艺流程如图4所示。

4.1 短切纤维造粒制备工艺

利用注塑成型制备麻纤维复合材料,首先要制备出纤维增强粒料。现有的传统制备方式,采用螺杆挤出制备粒料,由于纤维间极性的存在,导致纤维分散不均,易团聚,不利于产品的成型质量;另外,因螺杆挤出热作用时间长,易导致麻纤维糊化。

刘雪强等^[20]采用纺织混纤技术,将改性基体树脂加工成不同规格的纤维,与改性处理的麻纤维分别形成连续均匀的、同一宽度的纤维束,然后采用空气变形法按比例将2种纤维紧密、连续、均匀地混合,并沿径向排列分布成条,将混纤条加热,使树脂基体熔化并逐渐浸渍麻纤维后,逐渐固化形成连续的复合材料长条,待冷却后切成颗粒,图5为该造粒方法的流程图,成品粒料如图6所示。

研究表明:加热温度、加热时间和捻度是影响材料复合效果的3个主要因素。加热温度的升高会导致拉伸强度、弯曲强度和冲击强度指标明显下降;加热时间过长会导致拉伸强度和弯曲强度略有降低;增大捻度有利于冲击强度的提高。其中加热温度的变化对性能的影响起主导作用。该造粒方法通过正交实验确定的最佳工艺条件组合为:加热温度165℃,加热时间12min,捻度50。按照该条件安排的验证性实验的结果为:材料拉伸强度42.8MPa,弯曲强度60.2MPa,冲击强度24.0KJ·m⁻²。

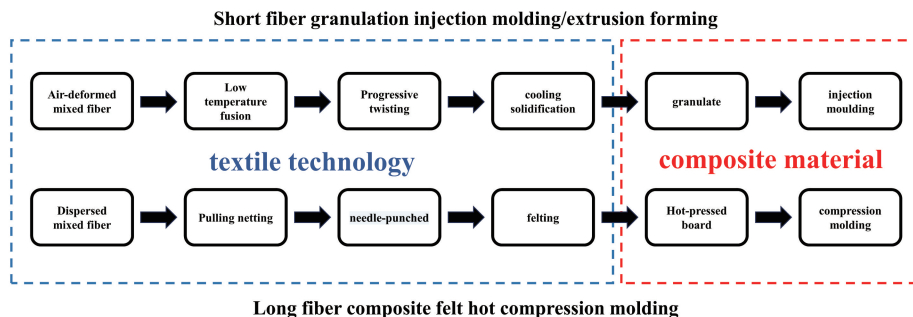


图4 麻纤维复合材料制备工艺

Fig. 4 Preparation technology of hemp fiber composites

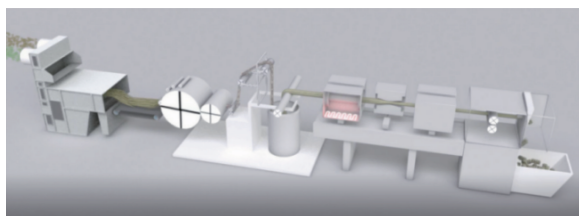


图5 造粒生产流程图

Fig. 5 Schematic diagram of granulation process

该造粒方法可以提高纤维分散性,解决麻纤维在树脂中分散不均匀、易团聚的问题;同时采用低温熔合工艺可以消除麻纤维热损伤。

4.2 复合毡制备工艺

不同应用场合和环境对麻纤维复合材料的性能有不同的要求,针对固相共混技术要求,目前主要有各向异性和各向同性2种麻纤维复合材料制备工艺。



图 6 粒料

Fig. 6 Particulate

4.2.1 梳理成网制备各向异性低压麻纤维复合材料工艺

采用梳理成网的方式将麻纤维和树脂纤维混合制毡再

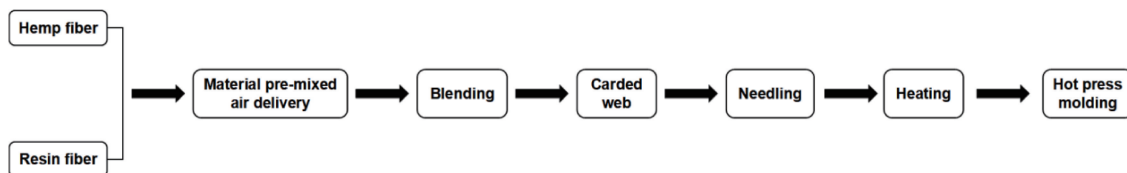


图 7 各向异性共混热致麻纤维复合材料制备工艺

Fig. 7 Preparation technology of anisotropic blended hemp fiber composites



图 8 各向异性共混热致麻纤维复合材料制备生产线

Fig. 8 Production line of anisotropic blended hemp fiber composites

4.2.2 气流铺网制备各向同性低压麻纤维复合材料工艺

采用气流成网的方式将麻纤维和树脂纤维混合制毡再热压成型，可以获取纤维呈三维分布、物理性能基本各向同性的复合毡材。但纤维气流成网过程中常常因为流场参数设置不合理导致产品均匀性差。

刘雪强等^[19]通过气流成网流道内部空气动力学分析，从复杂的流体运动状态中考察影响因素，确定了影响成网质量的 4 个重要参数：流道内的离心风机入口速

热压成型，可以获得各向异性麻纤维增强复合毡材^[21]。传统的梳理成网技术存在产量低、均匀性差、多层纤维毡之间易开裂等问题。通过改进缓冲梳理单元，可以解决这些缺陷。该单元包括一组缓冲工作辊和缓冲剥离辊，用于分流锡林高速回转所产生的表面高速气流，从而有效提高梳理机的分梳性能、改善道夫输出纤维网的均匀性、增加锡林与道夫之间的纤维转移量，实现梳理机整机高效、均匀梳理成网，获得高性能的各向异性麻纤维复合材料。其具体的制备工艺框图如图 7 所示，生产线如图 8 所示。

通过梳理成网制备的纤维毡材，由于纤维方向一致，制备的复合板材在宏观力学性能上表现为各向异性。

率、轴流风机出口压力、挡板和流道之间的板距及锡林嵌入流道内的距离。据此建立了流道三维模型，模拟分析结果显示，当剥离纤维气流速度接近锡林表面线速度、剥离气流的运动方向为锡林的切线方向时，气流有助于纤维伸直，成网效果最佳。

根据流场动力学研究结果，按最优工艺设定参数，通过气流成网的方式可以制备出各向同性的复合毡材。具体制备工艺流程图如图 9 所示。

该毡材在任意方向上都具有抗拉伸强度或抗剪切强度，加工出来的产品纵、横向强度差异小，毡材厚度最高可以达到 80 mm。图 10 为各向同性共混热致麻纤维复合材料制备生产线。

5 麻纤维增强复合材料成型工艺

目前麻纤维复合材料成型工艺过程是将麻纤维原料与树脂混合均匀后，进行热压。麻纤维在热压之前可以预加工成具有一定形状和强度的各种坯料。预加工工艺有针刺法、化学粘合法、针织法和机织法等。影响制品

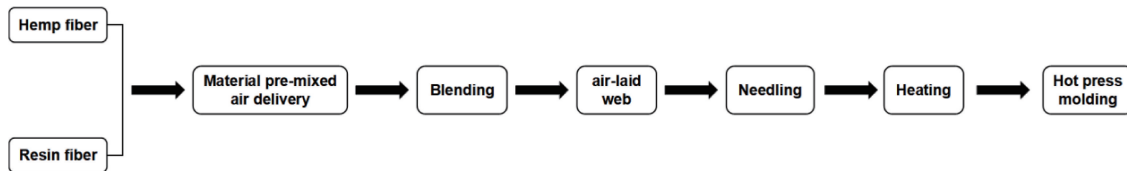


图 9 各向同性共混热致麻纤维复合材料制备工艺

Fig. 9 Preparation technology of isotropic blended hemp fiber composites



图 10 各向同性共混热致麻纤维复合材料的制备

Fig. 10 Production of isotropic blended hemp fiber composites

性能的因素有原料种类、形态、比例、添加剂、热压参数等。该工艺的操作相对简单，生产效率高，产品外观平整，尺寸精准，制品重复性好^[21-22]。

5.1 麻纤维复合材料一步法成型工艺

传统的汽车内饰件模压成型时复合材料毡板与面饰层及嵌件无法一次成型，加工工艺复杂、成本较高且由于黏合剂的使用导致加工过程中存在大量的 VOC 排放。针对传统加工工艺的缺点，刘雪强等^[23]结合生产实际开发了一次性成型的麻纤维复合材料制件模压新工艺，并研制了内饰板件的复合成型装置，其工艺过程简洁环保，图 11 为成形零件照片。

首先，将塑料嵌件置于模具型腔相对应的槽孔内，通过液压缸推动加热系统对嵌件表面进行加热，使其下表面发生融化，并且置于下模型腔中。其次，将针刺成型后的麻纤维复合材料毡板裁剪成一定的尺寸，送入加热机中进行预热，加热温度为聚丙烯熔点以上 10~20℃。然后，把预热的麻纤维复合材料毡置于模具下模与塑料嵌件表面相贴合，同时快速将面饰层置于麻纤维复合毡表面，迅速控制上模具进行合模。模压成型过程是一个低压的短暂过程，此时模具不需要再进行加热。最后，合模后保压一段时间，压机卸载回程。顶出机构将成型的制件脱模。



图 11 一步法成型内饰件

Fig. 11 One-step forming of interior decorations

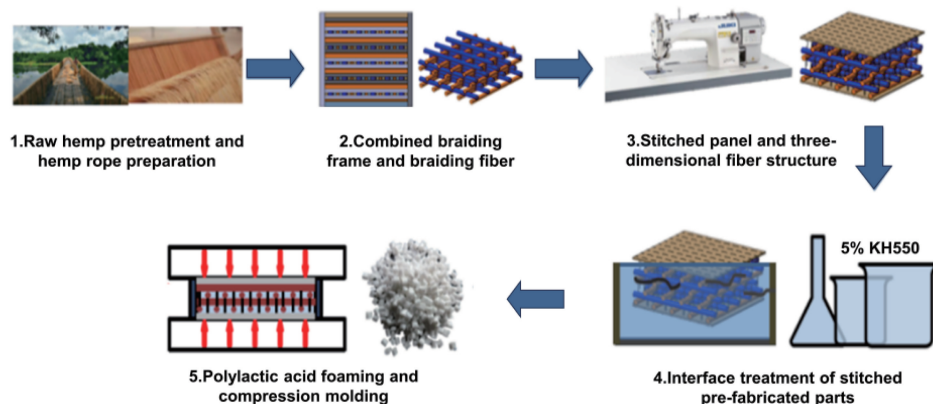
上述的模压成型新工艺将原有的 3 道工序整合为 1 道工序，提高了生产效率，减少了生产周期，有效控制了生产成本。此外，由于面饰层与基板之间依靠 PP 粘结、无胶层，降低了生产过程中的 VOC 排放，提高了产品的环保性。

5.2 编织结构夹芯成型工艺

当复合板处于高强度和高刚度的工作环境时，需要具有质轻、比强度大、比刚度大的特征。李志刚等^[24, 25]对夹芯结构进行了技术设计与改进，开发出新一代的缝纫编织夹芯结构发泡填充复合板，工艺过程如图 12 所示。制备的夹芯结构和复合板如图 13 所示。

使用编织架对处理后的麻绳进行 3D 编织。编织结构如图 13a 所示。该结构相邻两层编织纤维呈 90° 交错排列，间隔层的纤维平行交错排列，使材料具有负泊松比特性，在吸能减震方面具有明显优势。使用缝纫工艺取代传统的编织线方式，简化了结构，提高了生产效率，同时提升了面板抗剥离性、材料承载性。聚乳酸发泡材料作为材料基体，进行超临界发泡并热压成型。超临界 CO₂ 与聚乳酸混合之后注入盛有预制件的模具中，减压一段时间得到发泡产品，铺上顶层面板，在热压机上进行热压成型，得到的复合板如图 13b。

该发泡夹芯结构复合板由于采用芯层加强方式，同样重量情况下，其面外刚度更好。另外聚乳酸发泡材料也具有好的吸能性，在芯层结构上铺设面板层，可以减少涂胶工序，直接压制成型。因此，该结构复合板具

图 12 编织结构夹芯板成型工艺流程图^[25]Fig. 12 Manufacturing process of the sandwich composite (theoretical diagram)^[25]

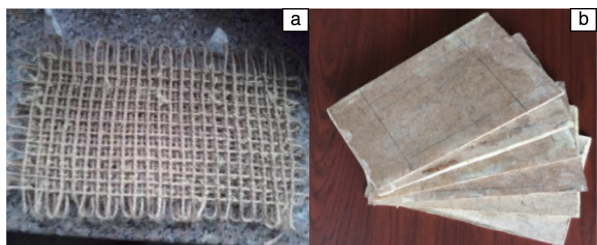


图 13 麻纤维 3D 编织结构(a), 编织夹芯结构复合板(b)^[25]

Fig. 13 3D braided structure of hemp fiber (a), braided sandwich composites (b)^[25]

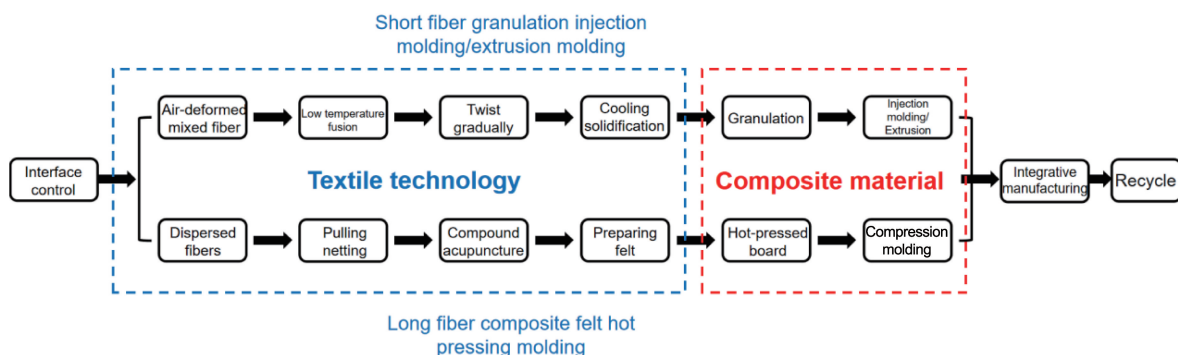


图 14 麻纤维复合材料生产技术体系

Fig. 14 Production technology system of hemp fiber composites

6.2 回收技术体系

麻纤维复合材料及其边角料的回收问题一直制约了行业的发展, 刘雪强等^[26]采用机械揉搓法将复合板毡进行分离, 得到面料和麻毡的回收料。将麻纤维回收料进行酰胺化处理、扩链剂增粘处理后, 熔融造粒, 用于注塑/挤出成型。该工艺提高了麻纤维增强树脂回收料的力学性能, 实现了麻纤维复合材料绿色可循环生产应用。针对生产过程中产生的 3 种不同的回收材料, 采用不同的回收工艺, 形成了完整的回收体系, 实现了边角废料的回收再利用。

(1) 麻纤维增强聚酯回收工艺

首先, 将麻纤维放入饱和的亚硝酸钠溶液中浸泡 48 h, 蒸馏水洗净、烘干, 放入氢氧化钠溶液中浸泡 48 h 后, 用蒸馏水洗净; 其次, 用浓度为 1% 的醋酸浸泡中和过多的碱, 再用蒸馏水清洗、烘干, 加入冰醋酸中浸泡 1 h, 然后加入无水醋酸, 用硫酸作为催化剂, 反应 10 min, 得到酰胺化的麻纤维; 最后, 取聚酯回收料粉碎, 加热熔融, 加入酰胺化的麻纤维, 搅拌均匀, 使用单螺杆挤出机挤出造粒。

(2) 聚酯纤维毛毡回收工艺

将聚酯纤维毛毡粉碎, 洗净去除杂质; 放入密炼机中, 加热至 200 ℃ 熔融, 加入扩链增粘剂对熔融的 PET

有刚度高、强度高、质量轻、吸能性好的特征, 可应用于汽车、轨道交通、建筑装饰材料等领域。

6 生产及回收技术体系

6.1 生产技术体系

刘雪强等^[26]在传统注塑成型工艺和模压成型工艺基础上进行技术研发, 形成了具有独立知识产权的麻纤维复合材料制备及成型技术体系, 如图 14 所示, 形成了界面调控—麻纤维复合材料成型工艺—集成制造—回收利用的完整技术体系。

纤维进行增粘处理; 将反应后的 PET 加入螺杆挤出机中挤出成带, 切割造粒。

(3) 复合板毡回收工艺

天然纤维复合材料在与面料复合成型过程中会裁切下来大量的边角料, 由于部分受热受压, 形成了板毡结合的材料, 回收难度大。为此, 作者团队^[26]采用了一种新型回收方法。首先, 用机械揉搓法将复合板毡材料进行分离, 得到面料和麻毡的回收料; 其次, 将麻毡回收料按照麻纤维增强聚酯的回收工艺进行酰胺化处理, 得到酰胺化麻纤维; 最后, 将聚酯类面料按照聚酯纤维毛毡的回收工艺进行增粘处理。将反应后的 PET 加入螺杆挤出机中, 同时加入已经预处理的酰胺化麻纤维, 之后熔融共混、挤出造粒成型。

此方法增强了边角料基体与麻纤维间的结合性能, 提高了麻纤维增强聚酯回收料的力学性能。所制备的聚酯毛毡纤维增强塑料可利用注塑、热压等方法生产塑料制品。

7 结 语

针对目前我国麻纤维增强复合材料研究中存在的问题, 通过对麻纤维脱胶处理、低 VOC 加工、复合材料制备工艺及回收再利用等技术分析, 目前在麻纤维复合材料

制备方面已形成完整的技术体系。由于麻纤维复合材料轻量化、低成本、环保的优势,将推动麻纤维复合材料规模化应用。该领域目前主要已形成以下5个研究特色。

(1)利用物理方式的环保型深冷-机械联合脱胶工艺,实现了环保、低成本、高效的脱胶工艺。

(2)形成了麻纤维复合材料界面改性技术,从而可以获得良好的界面结合。

(3)形成了各向异性/各向同性固相共混热致麻纤维复合材料制备工艺,实现了低VOC麻纤维增强复合材料产业化。

(4)使用热压成型技术实现了面料和基材的一次成型,解决了传统分段模压成型方法中使用粘接剂引入污染的问题。

(5)实现了麻纤维增强复合材料加工过程产生的边角料与废料的回收利用,形成了完整的麻纤维复合材料生产技术体系。

参考文献 References

- [1] 谢曼,干勇,王慧. 中国工程科学[J], 2020, 22(5): 1-9.
XIE M, GAN Y, WANG H. Chinese Engineering Science[J], 2020, 22(5): 1-9.
- [2] 蒋金华,陈南梁,钱晓明,等. 中国工程科学[J], 2020, 22(5): 51-59.
JIANG J H, CHEN N L, QIAN X M, *et al.* Chinese Engineering Science[J], 2020, 22(5): 51-59.
- [3] 李仲平,冯志海,徐樛华,等. 中国工程科学[J], 2020, 22(5): 28-36.
LI Z P, FENG Z H, XU L H, *et al.* Chinese Engineering Science[J], 2020, 22(5): 28-36.
- [4] INGRAO C, GIUDICE A L, BACENETTI J, *et al.* Renewable and Sustainable Energy Reviews[J], 2015, 51: 29-42.
- [5] 郑科,段盛文,成莉凤,等. 中国麻业科学[J], 2017, 39(6): 312-320.
ZENG K, DUAN S W, CHENG L F, *et al.* China Linen Science[J], 2017, 39(6): 312-320.
- [6] IBRAHIM I D, JAMIRU T, SADIKU E R, *et al.* Composite Interfaces[J], 2016, 23(1): 15-36.
- [7] GENNARO G, LOIOTILE A D, FRACCHIOLLA R, *et al.* Atmospheric Environment[J], 2015, 115: 53-61.
- [8] 顾名淦. 麻纤维开发利用[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1993.
GU M G. Development and Utilization of Hemp Fiber[M]. Beijing: The Textile Industry Press, 1993.
- [9] KAVEH M, ALIREZA T, FARZAD K. Cryogenics[J], 2011, 55(1): 55-61.
- [10] ARUNKUMAR K N, KRISHANPPA G B, KASTHURIRENGAN S, *et al.* Materials Today: Proceedings[J], 2018, 5: 916-921.
- [11] 陈鼎,董建峰,马国芝,等. 材料导报[J], 2010, 24(21): 1-4.
CHEN D, DONG J F, MA G Z, *et al.* Material Reports[J], 2010, 24(21): 1-4.
- [12] 李志刚,韩洪江,刘雪强,等. 一种麻纤维深冷-机械联合脱胶处理方法: ZL201611143590. 9[P]. 2018-09-11.
LI Z G, HAN H J, LIU X Q, *et al.* A Method for Degumming Hemp Fibers with Cryogenic-Mechanical Processing; ZL201611143590. 9 [P]. 2018-09-11.
- [13] LIU J H, GUAN Z P, LI Z G. Biosystems Engineering[J], 2018, 174: 144-152.
- [14] 程伟,孙利明,姚晨光,等. 化工新型材料[J], 2014, 42(1): 13-15.
CHENG W, SUN L M, YAO C G, *et al.* New Chemical Materials[J], 2014, 42(1): 13-15.
- [15] 李伟,黄虹云,吴永庆. 湖南大学学报(自然科学版)[J], 2015, 42(12): 15-20.
LI W, HUANG H Y, WU Y Q. Journal of Hunan University[J], 2015, 42(12): 15-20.
- [16] 雷文. 合成树脂及塑料[J], 2009, 26(3): 67-73.
LIE W. Synthetic Resin and Plastic[J], 2009, 26(3): 67-73.
- [17] 王书睿,段晶湛,陈南梁. 纤维素科学与技术[J], 2008, 16(4): 69-74.
WANG S R, DUAN J Z, CHEN N L. Cellulose Science and Technology[J], 2008, 16(4): 69-74.
- [18] 刘俊辉. 汽车内饰用汉麻纤维增强聚丙烯复合材料的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
LIU J H. Study on the Preparation and Properties of Hemp Fiber Reinforced Polypropylene Composites for Automotive Interiors [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [19] 刘雪强,李志刚,潘国立. 一种无甲醛和乙醛释放的天然麻纤维增强聚合物基复合毡材及其制备方法: ZL2018100123480[P]. 2023-08-01.
LIU X Q, LI Z G, PAN G L. A kind of Natural Hemp Fiber Reinforced Polymer-Based Composite Felt without Formaldehyde and Acetaldehyde Release and Its Preparation Method; ZL2018100123480[P]. 2023-08-01.
- [20] 刘雪强,张建春,张华,等. 一种天然纤维复合材料造粒机: ZL200910235528. 6[P]. 2011-12-21.
LIU X Q, ZHANG J C, ZHANG H, *et al.* A Kind of Natural Fiber Composite Material Granulator; ZL200910235528. 6[P]. 2011-12-21.
- [21] 李志刚,刘雪强,韩洪江,等. 一种天然麻纤维增强的3D打印线材及其制备方法: ZL201611145849. 3[P]. 2018-08-14.
LI Z G, LIU X Q, HAN H J, *et al.* A Kind of Natural Hemp Fiber Reinforced 3D Printing Filament and Its Preparation Method; ZL201611145849. 3[P]. 2018-08-14.
- [22] 李志刚,刘俊辉,刘雪强,等. 一种天然环保型麻纤维增强可降解聚合物基毡材及其复合板材制备方法: CN201710337465X[P]. 2017-05-15.
LI Z G, LIU J H, LIU X Q, *et al.* A Kind of Preparation Method of Natural and Environmentally Friendly Hemp Fiber Reinforced Degrad-

- able Polymer Matrix Felt and Composite Plate Preparation Method; CN201710337465X[P]. 2017-05-15.
- [23] 刘雪强, 李志刚, 潘国立. 制备汽车内饰板件的复合成型装置; ZL2012102714384[P]. 2015-03-25.
- LIU X Q, LI Z G, PAN G L. Composite Molding Device for Preparing Automotive Interior Panels; ZL2012102714384[P]. 2015-03-25.
- [24] 李志刚, 高智鹏, 黄坤, 等. 缝合连接的麻纤维编织增强发泡夹层结构复合材料及其制备方法; CN201710815024.6[P]. 2017-09-12.
- LI Z G, GAO Z P, HUANG K, *et al.* Suture-Connected Hemp Fiber Braided Reinforced Foam Sandwich Structure Composite Material and Its Preparation Method; CN2017108150246[P]. 2017-09-12.
- [25] LI Z G, WEI X P, GAO Z P, *et al.* Materials Today Communications [J], 2020(24): 101046.
- [26] 刘雪强, 潘国立, 李志刚. 一种用于汽车内饰材料的生产系统及其生产方法; ZL201310114532.3[P]. 2015-10-21.
- LIU X Q, PAN G L, LI Z G. A Kind of Production System for Automotive Interior Materials and Its Production Method; ZL201310114532.3[P]. 2015-10-21.

(编辑 张雨明)