

## 聚丙烯/亚麻复合材料的制备及其冲击性能的研究

魏有堂<sup>1</sup>, 张璐<sup>1,2\*</sup>, 刘丽妍<sup>1,2</sup>, 查刘根<sup>1</sup>

(1. 天津工业大学纺织学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学复合材料研究所, 天津市和教育部共建先进纺织复合材料重点实验室, 天津 300387)

**摘 要:** 以亚麻纱线作为增强体与聚丙烯(PP)纤维按不同质量比进行混合, 制备出 PP 长丝包覆的包覆纱, 利用机织工艺织成二维机织布作为复合材料的预制铺层, 采用热压法进行层合热压, 制备出亚麻增强 PP 复合材料板材。通过对板材冲击性能的测试及分析, 研究了制备工艺、纱线结构及纤维含量等因素对复合材料冲击性能的影响。结果表明, 当亚麻纱线质量分数为 68 % 时板材的冲击性能最好; “三明治”(纯亚麻织物与聚丙烯纤维毡交替铺层)法制备的板材表现出较好的冲击性能; 0°/0° 板材在受到冲击时比 0°/90° 板材吸收的冲击能更多, 表现出较好的耐冲击性。

**关 键 词:** 聚丙烯; 亚麻纱线; 层合热压; 增强; 冲击性能

中图分类号: TQ325.1<sup>+</sup>4

文献标识码: B

文章编号: 1001-9278(2016)04-0045-05

## Preparation and Impact Property of PP/Flax Composite

WEI Youtang<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>1,2\*</sup>, LIU Liyan<sup>1,2</sup>, ZHA Liugen<sup>1</sup>

(1. School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Flax fiber was commingled with polypropylene (PP) fiber to produce composite yarn, which was woven into 2-D fabric, which was hot pressed into laminates. Effects of manufacturing technology, yarn structure, and fiber weight fraction on impact properties of the laminates were investigated. When the content of flax fiber was 68 wt%, the impact strength reached the maximum. The laminate made by “sandwich” method showed better impact properties than that of “mixing” method. The impact properties of 0°/0° laminates were better than those of 0°/90° laminates.

**Key words:** polypropylene; flax yarn; hot press; reinforcement; impact property

## 0 前言

随着天然纤维尤其是麻纤维复合材料被广泛地应用在生产与生活的各个领域, 其物理性能的特点逐渐引起人们的重视, 其原因在于天然纤维复合材料在使用中经常要承受冲击载荷, 如汽车相撞时车体某些部位的受撞变形, 游艇甲板、地面受到落物撞击等。

复合材料在使用过程中受到低能冲击时, 大部分情况并没有明显的目视损伤, 但却在层合表面生成不

可视的浅表面分层, 从而形成潜在的危險, 可造成复合材料在强度和刚度上的很大损失。Faris<sup>[1]</sup>与杨长龙等<sup>[2]</sup>已经对复合材料层合板的低能量冲击损伤机理及特点作了广泛深入地研究。与此同时, 牛雪娟等<sup>[3]</sup>利用计算机模拟对低速冲击下复合材料板材的损伤进行了研究; 焦亚男等<sup>[4]</sup>对复合材料层合板低速冲击进行了研究; 刘丽妍等<sup>[5]</sup>对亚麻纤维增强复合材料层合板制备及冲击性能进行了研究。其中, 对复合材料铺层优化设计方面的研究比较多, 但就铺层方式对复合材料耐冲击性能的影响方面的研究却寥寥无几。为设计生产出更加安全稳定的 PP/亚麻产品, 本文对采用不同的加工工艺、纤维含量制备的 PP/亚麻复合材料进行

收稿日期: 2015-12-10

\* 联系人, luzhanganny@aliyun.com

了低能量冲击性能的比较分析,以期测试分析结果能够指导实际生产。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

亚麻纤维,未脱胶漂白,平均直径 23.19  $\mu\text{m}$ ,黑龙江佳木斯佳鹏亚麻有限责任公司;

PP 纤维,0.67 tex,平均长度 110 mm,山东陵县华龙化纤有限公司;

PP 长丝,33.2 tex,北京涤纶实验厂;

PP 树脂,Z30S,河北利恒塑胶公司。

### 1.2 主要设备及仪器

花式捻线机,ON100030,日本 Ozeki Noboru 公司;

织机,FAST-190,意大利 SMIT 公司;

万能强力仪,5567,美国英斯特朗公司;

热压机,YTD71-45A,天津锻压机床厂;

扫描电子显微镜(SEM),KYKY-2800,北京科学仪器厂。

### 1.3 样品制备

包覆纱的制备:将 PP 纤维梳理成束,根据试验要求将 PP 纤维与亚麻纤维束混合并束(亚麻质量分数别为 18%、33%、46%、50%、60%、68%、100%),同时引入 PP 长丝,在花式捻线机上制备包覆纱,如图 1 所示包覆纱结构;

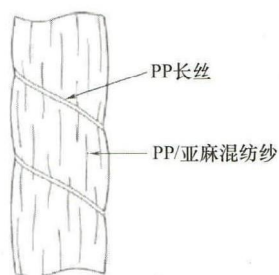


图 1 包覆纱结构示意图

Fig. 1 Wrap yarn structure

机织布的制备:以所纺纱线为纬纱,PP 长丝为经纱,织造平纹织物;织造参数为:经密 46/10 cm,纬密 70/10 cm,幅宽为 1.5 m,织物中的亚麻纤维具有高度同向性;

板材试样的制备:根据热压机中热压板的尺寸,将织物剪切成 280 mm $\times$ 280 mm 并进行热压;热压工艺为:先将热压板的上下板面预热到 60  $^{\circ}\text{C}$ ,将织物放入热压机,闭合上下热压板并施加压力至 15 MPa,平稳升温至 190  $^{\circ}\text{C}$ ,并保持 20 min,关闭电源使其在室温下

保压降至室温,脱模后进行板材修整并裁制成 90 mm $\times$ 90 mm $\times$ 3 mm 试样。

### 1.4 性能测试与结构表征

冲击性能测试按 ASTM D3763-02 进行,板材铺设方式分别为 0 $^{\circ}$ /0 $^{\circ}$ 和 0 $^{\circ}$ /90 $^{\circ}$ ,冲击过程中,试样被夹持在中间开孔(直径 70 mm)的两钢板之间;冲头形状为子弹头状,直径为 8 mm,冲头与钢板表面呈垂直角度,摆锤质量为 5.7806 kg;冲击试验在常温条件下进行,采用的是定能量式冲击方法,控制基本冲击速度为 2.5 m/s;每组 10 个试样,试验数据取 10 个试样测试结果的平均值;

SEM 分析:在与增强纤维垂直的方向上使用切割机对复合板材进行切割,并对切面进行打磨抛光处理,用 SEM 进行观察。

## 2 结果与分析

### 2.1 亚麻纤维含量对冲击性能的影响

6 组试样 0 $^{\circ}$ /0 $^{\circ}$ 铺设条件下的冲击测试结果如表 1 所示。可以看出,载荷峰值随着纤维含量的增加而增大,在最大载荷处的能量值也随之增大,6# 板材的亚麻纤维含量最多,冲击性能也最强;此外,载荷峰值处的位移表示试样在最大载荷时的变形量,变形大则说明材料韧性较好,由此可知 6# 板材的材料弹性性能最好。

表 1 不同亚麻纤维含量板材的冲击性能

Tab. 1 Impact properties of the composite laminates with different fiber ratios

样品编号	纤维含量 /%	载荷峰值 /kN	载荷峰值处 位移/mm	载荷峰值处 能量/J
1#	18	0.555	2.050	1.990
2#	33	0.675	2.112	2.418
3#	46	0.884	2.130	2.861
4#	50	0.900	2.331	2.870
5#	60	0.901	2.387	3.081
6#	68	1.066	2.914	4.928

在诸多因素中,增强纤维是影响复合材料板材抗碰撞性能的主要因素。在冲击能量小于初始破坏值时,纤维损伤小,主要存储应变能,复合材料主要通过分层和树脂基体损伤吸收能量;在冲击能量较高时,纤维剪出和拉伸断裂是复合材料进一步吸收能量的主要因素,因此随着纤维含量的增加,复合材料板材的冲击性能也有所提高<sup>[6]</sup>。

2.2 板材加工方式对冲击性能的影响

复合材料的加工、铺层方式会对材料的力学性能产生很大的影响,已知的很多试验工作都是围绕着纤维、纱线或织物的铺层角度进行测试,本试验将对由不同加工方式所制造的板材进行冲击测试,具体加工方式有:“三明治”法和“混纤法”。从生产成本角度比较,这 2 种铺层方法各有优点。由于“三明治”铺层方法中引入了 PP 纤维毡,省去了大量的纺纱与织造的工作,生产成本相对降低。然而,对于“混纤法”,由于在操作过程中只需要将同一种织物进行铺层,因此操作方便、快捷。这里我们将比较 2 种不同铺层方式对复合材料性能的影响(0°/0°铺设)。图 3、图 4 为 2 种不同方式铺设板材的加工方法示意图。

从表 2 可以看出,采用“三明治”法制备的板材的

表 2 不同加工方式板材冲击性能测试结果的影响

Tab. 2 Impact properties of the composite laminates made by different laminate methods

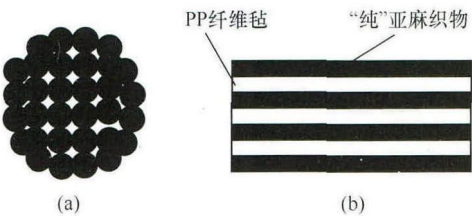
铺层方法	纤维含量 /%	载荷峰值 /kN	载荷峰值处 位移/mm	载荷峰值处 能量/J
“三明治”	33	0.773	2.836	3.142
“混纤法”	33	0.675	2.579	2.418

载荷峰值及载荷峰值处能量分别比“混纤法”制备的板材高出约 14.4 %和 29.9 %。

分析其原因,应当与纤维在复合材料中的存在方式有关。图 5 为 2 种不同铺层方法制备的板材截面形态的 SEM 照片,从图中可以清楚地看到,在“混纤法”结构复合材料中,亚麻纤维以单纤维为单位,较均匀地分布在树脂基体中。而“三明治”结构板材中,尽管纤维之间没有捻度使之抱合在一起,但亚麻纤维仍以纱线束为单位,以纱线中心为轴心,均匀地分布在树脂基体中,测试结果表明这种纤维分布状态使纤维对基体的增强比较充足。分析原因,当板材受到外力时,“混纤法”中的单纤维自由度大,更容易向三维方向移动或伸缩,这降低了纤维作为增强体分担载荷的能力,进而使复合材料板材的性能降低<sup>[7-9]</sup>,而“三明治”结构中的纤维彼此之间存在着较大摩擦力或缠结在一起,这使它们能够作为一个整体共同分担来自外界的作用力,提高复合材料的力学性能。

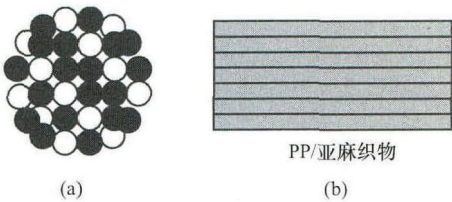
由此可以得出,当采用相同纱线结构作为增强体时,用“三明治”铺层方法制备的板材较“混纤法”制备的板材体现出更优良的冲击性能。

此外,笔者在以往的实验中也曾研究比较过“三明治”铺层法制备的板材与“混纤法”板材的弯曲性能,相关测试证明“三明治”法制备的板材的最大弯曲模量(11.00 GPa)和最大弯曲强力(122.5 MPa)分别比“混纤法”制备的板材高出约 3.8 %和 5.4 %。可见,使用



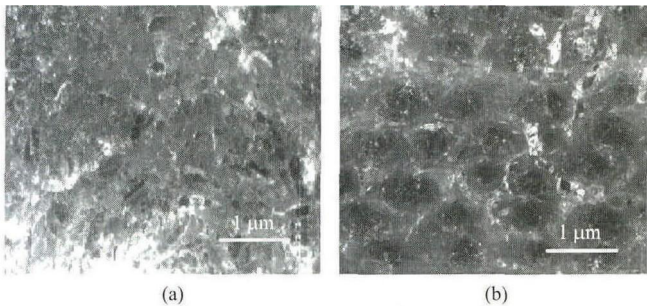
(a)“三明治”法纱线横截面 (b)复合材料铺层方式  
图 3 “三明治”铺层方法示意图

Fig. 3 Schematic of “sandwich” laminate method



(a)“混纤法”纱线横截面 (b)复合材料铺层方式  
图 4 “混纤法”铺层方法示意图

Fig. 4 Schematic of “mixing” laminate method



铺层方法:(a)“三明治”法 (b)混纤法

图 5 2 种不同铺层方法制备的板材截面形态的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photographs of the composite cross sections made by “mixing” and “sandwich” method, respectively

笔者现有的实验材料及加工方法下制备的“三明治”法板材较“混纤法”板材具备更优良的力学性能。

3.3 铺设角度对板材冲击性能的影响

在本次试验中,还对比了不同铺设角度对复合材料冲击性能的影响。由于“混纤法”更便于在现有试验条件下大量制备加工,因此本测试中所使用的板材均为“混纤法”板材,测试结果见表 3。

表 3 不同铺设角板材冲击测试结果

Tab. 3 Impact properties of the composite laminates with different yarn angles

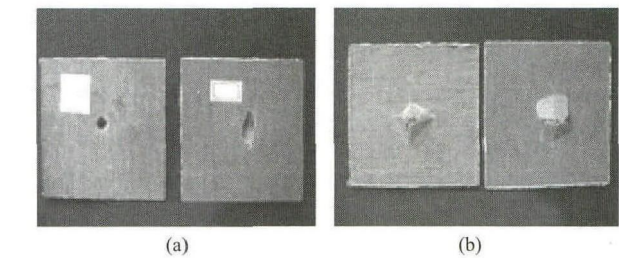
铺设角度	纤维含量 /%	载荷峰值 /kN	载荷峰值处 位移/mm	载荷峰值处 能量/J
0°/0°	46	0.884	2.130	2.861
0°/90°	46	0.913	2.366	4.218

从表 3 中可以看出,0°/90°试样在损伤时对能量的吸收最好,当织物铺层角度不同时,由于织物经纬向密度和经纬向拉伸强度的不同,织物抵抗应力破坏的水平也不同。当织物铺层角度为 0°/0°时,织物抵抗应力破坏主要由单向的纤维承受,造成应力失衡;当织物呈正交铺设时,0°/90°织物层达到平衡,织物抵抗应力破坏由经向与纬向的纤维共同承受<sup>[10-11]</sup>。另外,就单向板而言,正交板的起裂韧性比单向板的起裂韧性强,从表 3 中可以看出,0°/90°试样载荷峰值处的位移大于 0°/0°试样,说明 0°/90°试样的韧性和强度都比较高,这便出现了 0°/90°试样对冲击能量吸收的能力好于 0°/0°试样的现象。

3.4 板材冲击损伤容貌

由于本测试中的板材厚度较薄,在冲击测试中复合材料的冲击损伤主要为板材的穿透性破坏,形成永久变形,如图 6 所示。

图 6(a)为板材正面,左边为正交铺设角板材,由于其经纬向纤维同时承受冲击力,因此形成了比较接近圆形的孔洞。右边 0°/0°铺设角的板材,在冲击过程



(a) 正面 (b) 背面  
图 6 板材冲击破坏形貌

Fig. 6 Fracture photography of the impact surfaces

中只有单向纤维受力,因此,不均衡的受力使板材形成沿纤维方向的长形凹陷。图 6(b)为背面冲击容貌。冲击过程中正面受压力作用,冲击背面受拉力作用,复合材料产生变形弯曲。

在冲击损伤的初期,树脂基体受压破裂;树脂破裂造成压力集中,分层起始于树脂破裂临界点,随着分层的增长会产生大量的微观裂纹,复合材料的变形量增大,部分纤维受剪切作用,从树脂基体中脱出。当复合材料的变形量超过纤维的拉伸断裂极限,纤维出现断裂。分层、纤维剪出、纤维拉伸断裂是冲击破坏的主要形式,并随冲击能量的增加按顺序发生<sup>[12]</sup>。在冲击质量不变的前提下,随着冲击速度的增加,冲击能量也就越大,试样的破坏程度也越大。

3 结论

(1)随着纤维含量的增加,复合材料板材的冲击性能也有所提高,当亚麻纤维含量为 68 %时,板材的冲击性能最好;

(2)当采用相同纱线结构作为增强体时,用“三明治”铺层方法制备的板材较“混纤法”制备的板材体现出更优良的冲击性能;

(3)当织物呈正交铺设时,其对冲击能量吸收的能力要好于同向角度铺设的复合材料板材。

参考文献:

[1] Faris M AL-Oqla, S M Sapuan, T Anuer, et al. Natural Fiber Reinforced Conductive Polymer Composites as Functional Materials: A Review[J]. Synthetic Metals, 2015, (206):42-54.

[2] 杨长龙,杨栋磊,杨强,等.天然纤维用于生物基复合材料界面改性研究进展[J]. 塑料科技, 2014, 42(3): 84-88. Yang Changlong, Yang Donglei, Yang Qiang, et al. Research Progress on Application of Natural Fiber in Interface Modification of Biocomposites[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(3): 84-88.

[3] 牛雪娟,杨涛,杜宇,等.变刚度纤维曲线铺放复合材料层合板的有限元建模和拉伸特性分析[J],宇航材料科技, 2014, 44(4):19-24. Niu Xuejuan, Yang Tao, Du Yu, et al. Finite Element Modeling and Tensile Properties Analysis of Curve Linear Fiber-placed Variable-Stiffness Composite Laminates[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(4): 19-24.

[4] 焦亚男,仇普霞,纪高宁,等.经纬向纤维体积比例对 2.5D 机织复合材料力学性能的影响[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(3):1-5. Jiao Yanan, Qiu Puxia, Ji Gaoning, et al. Mechanical Pro-



- erties of 2.5D Woven Composites with Different Volume Rates in Warp and Weft Directions[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2015, 34(3): 1-5.
- [5] 刘丽妍, 黄 故. 亚麻增强聚丙烯复合材料薄板的抗冲击性能[J]. 纺织学报, 2009, 28(3): 38-41.  
Liu Liyan, Huang Gu. Impact Resistance of Flax Reinforced Polypropylene Laminates[J]. Journal of Textile Research, 2009, 28(3): 38-41.
- [6] Qu Lijun. Application for Bast Fiber in Automobile Upholstery Materials [J]. Technical Textiles, 2002, (8): 36-38.
- [7] Xiao Jiayu, Zeng Jingcheng, Wang Qichun, et al. Status of Research and Development for the Natural High Performance Fiber Reinforced Composite and Its Product[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2000, (3): 38.
- [8] 陈县辉, 张彦飞, 杜瑞奎, 等. 冲击方向对层合板低速冲击响应的模拟研究[J], 工程塑料应用, 2014, 42(5): 89-92.  
Chen Xianhui, Zhang Yanfei, Du Ruikui, et al. Simulation of Effects of Impact Orientations on Low Velocity Impact Responses of Composite Laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(5): 89-92.
- [9] 兰红艳, 靳向煜. 天然纤维非织造物增强复合材料概述[J]. 中国麻业科学, 2007, 29(1): 45-48.  
Lan Hongyan, Jin Xiangyu. The Study of Natural Fiber Nonwovens Reinforcing Composite [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2007, 29(1): 45-48.
- [10] Awa S, Doumbia, Mickal Castro, Denis Jouannet, et al. Flax/Polypropylene Composites for Lightened Structures: Multiscale Analysis of Process and Fibre Parameters[J]. Materials and Design, 2015(87): 331-341.
- [11] Hamdy Ibrahim, Mahmoud Farag, Hassan Megahed, et al. Characteristics of Starch-based Biodegradable Composites Reinforced with Date Palm and Flax Fibers[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, (101): 11-19.
- [12] Shaoxiong Liang, Laurent Guillaumat, Papa-Birano Gning. Impact Behaviour of Flax/Epoxy Composite Plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, (80): 56-64.

## 改变航空航天复合材料技术领域的格局

预计在未来 20 年中,全球飞机的需求量将超过 35000 架。因此,为了加快生产速度并降低飞机制造成本和质量,制造商之间的竞争日趋激烈,尤其是在复合材料的使用方面。现在,新开发的 VICTREX® AE250 复合材料(PAEEK® 产品系列),更加激发了他们对于这类解决方案的浓厚兴趣。单向带(UDT)和层压板,在部件生产和安装速度方面具有明显优势。威格斯这一新产品系列,将于 3 月在巴黎举办的 JEC 世界复合材料展上首次在欧洲展出。在此次展会上,新的 VICTREX AE250 复合材料为航空航天业打开了一个全新的发展空间。

### 节约时间和成本

专为航空航天业设计开发的 VICTREX AE250 复合材料,可用于生产在载荷条件下使用、并具有超强表现的连续增强型部件。以此类方式生产的部件包括支架、卡箍、角片和外壳,可用于从客舱(包括座椅)、直至发动机和油箱的整个飞机主结构和二级结构中。与金属相比除了能减重 60%,该新一代高强度连续增强型复合材料的主要优势是:可减少制造时间和系统成本。这得益于在采用新型混合成型技术后,具有更为合理的设计并能进行半自动或全自动批量生产。此类新型 PAEK 复合材料能够将复合材料与注射成型技术相结合,可生产出以前无法生产出的复杂的复合材料部件。

### 更轻、更优、更经济:VICTREX PAEK 具有突出的比较优势

混合成型工艺能够将 VICTREX AE250 复合材料加工成类似于金属形式的嵌入件,然后在其外部用短纤维增强型 VICTREX PEEK 聚合物进行包覆成型。因此,工程师能够将复合材料的力学性能与设计的灵活性和注射成型工艺的快速生产时间相结合。在嵌入注塑机之前,无需将 VICTREX AE250 有机片材预热至接近熔融温度。使用威格斯复合材料的优势包括:加快周期时间、减少能源消耗、避免二次工艺步骤、大幅减少废料、并节省安装成本,综合所有这些因素可大幅降低总的系统成本。

与广泛应用于航空领域的硬质铬镍钼合金 AISI 4130 钢相比,由威格斯高性能热塑性塑料生产的复合材料减重高达 60%。与轻质金属(包括 TA6V 钛、7075-T6 铝或 ZK60A-T5 镁)相比,它们在质量上也同样具有显著优势。此类高性能复合材料不仅比这些金属轻,而且在性能上也占据优势。例如,此类复合材料的比强度是 AISI 4130 钢的 5 倍。

### 为飞机结构解决方案提供既定高性能热塑性塑料产品

由总部位于英国的这家公司提供的 PAEK 解决方案,已应用于航空航天业超过 25 年,并通过了众多知名飞机制造商的认证。例如,空客公司在其空客 A350XWB 的舱门上,采用了首个由 VICTREX PAEK 生产的主结构件。中国飞机制造商中国商用飞机有限责任公司(COMAC)在其率先推出的首架商用飞机上,正在采用 VICTREX Pipes™ 替代金属管道,用以保护高压电缆。