

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.001

回收碳纤维/剑麻增强聚丙烯复合材料的力学性能

胡黄飞,王凯,江舒,胡侨乐,徐珍珍,杨莉

(安徽工程大学纺织服装学院,安徽芜湖 241000)

摘要:为提高回收碳纤维(RCF)的高值化应用,采用湿法非织造成型工艺制备了碳纤维(CF)复合材料预成型体(CFP)。同时为避免复合成型过程中,湿法预成型体中黏合剂在加热过程中对复合成型产生影响,采用剑麻纤维(SF)与RCF混杂成型,利用SF间氢键作用提高CFP的可成型性,从而获得了CF/SFP预成型体。另外,还制备了SF预成型体(SFP)。以聚丙烯(PP)为基体,湿法非织造织物为预成型体,采用模压成型方式制备了3种PP基复合材料(CFPC, SFPC, CF/SFPC),并对以不同纤维组分形成的预成型体结构性能及PP基复合材料的力学性能进行测试,分析SF与CF混杂对湿法预成型体结构性能及PP基复合材料力学性能的影响。结果表明,在无黏合剂的条件下,RCF可通过与SF混杂,形成具有稳定结构和力学性能的CF/SFP,且混杂工艺可改善预成型体的结构均匀性及湿法成型过程中CF的质量损失率;当以SF与RCF混杂质量比3:1制备CF/SFP时,较制备CFP时的纤维损失率下降了33.63%,厚度不均匀率下降了35.03%。以湿法非织造织物形式存在的CFPC具有较好的力学性能,特别是在改善韧性方面。CFPC的拉伸应变可达到7%左右,弯曲强度达到60.01 MPa,冲击强度可达到10.12 kJ/m²。采用RCF与SF混杂制备的CF/SFPC的力学性能较SFPC的力学性能有较大改善,在增强纤维含量相同的情况下,CF/SFPC较SFPC弯曲强度和冲击强度分别提高了13.09%和18.42%。

关键词:回收碳纤维;湿法非织造;混杂;复合材料;力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0001-07

Mechanical properties of recycled carbon fiber/sisal reinforced polypropylene composites

HU Huangfei, WANG Kai, JIANG Shu, HU Qiaole, XU Zhenzhen, YANG Li

(Department of Textiles and Apparel, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract : To improve the high-value application of recycled carbon fiber (RCF), carbon fiber (CF) preform (CFP) was prepared by wet nonwoven forming process. In order to avoid the influence of the binder in the wet preform on the composite forming during the heating process in the composite forming process, sisal fiber (SF) and RCF were mixed to improve the formability of CFP by hydrogen bonding between SF, then CF/SFP preforms were obtained. In addition, SF preforms (SFP) were prepared. Three kinds of PP-based composites (CFPC, SFPC, CF/SFPC) were prepared by compression molding with polypropylene (PP) as matrix and wet nonwoven fabric as preform. The structural properties of preforms formed by different fiber components and the mechanical properties of the polypropylene composites were tested. The effects of SF hybrid on the structural properties of wet preform and the mechanical properties of polypropylene composites were analyzed. The results show that the RCF can be mixed with SF to form a nonwoven preform with stable structure and mechanical properties under the condition of no binder. The hybrid process can improve the structural uniformity of the preform and the loss rate of CF in the wet forming process. When the SF with a mass ratio of 3:1 is mixed with the RCF to prepare the wet preform, the fiber loss rate can be reduced by 33.63%, and the thickness unevenness is reduced by 35.03%. CFPC in the form of wet-laid nonwoven fabrics have good mechanical properties, especially in terms of toughness improvement. The tensile strain of CFPC can reach about 7%, the bending strength can reach 60.01 MPa, and the impact strength can reach 10.12 kJ/m². The mechanical properties of CFPC can be effectively improved by mixing RCF with SF. The mechanical properties of CF/SFP prepared by mixing RCF and SF are much better than those of SFPC. Compared with SFPC, the flexural strength and impact strength of CF/SFPC increased by 13.09% and 18.42%, respectively.

Keywords : recycled carbon fiber ; wet nonwoven ; hybrid ; composite ; mechanical property

基金项目: 安徽省教育厅项目(2022AH050991), 2023芜湖市科技项目(2023yf072)

通信作者: 杨莉, 教授, 博士, 研究方向为纺织复合材料

收稿日期: 2024-06-01

引用格式: 胡黄飞,王凯,江舒,等.回收碳纤维/剑麻增强聚丙烯复合材料的力学性能[J].工程塑料应用,2024,52(7):1-7.

HU Huangfei, WANG Kai, JIANG Shu, et al. Mechanical properties of recycled carbon fiber/sisal reinforced polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 1-7.

碳纤维(CF)是目前复合材料体系中应用最广泛的增强纤维原料之一,因其具有质轻、高强等优异性能而被用于航空航天、风力发电、汽车产业等领域^[1-4]。随着CF复合材料使用量的增加,废弃CF以及服役达到寿命极限的CF复合材料大量产生,仅2019年就有超过25万t的CF及CF复合材料边角废料产生,预计至2030年废弃CF复合材料将超过1 000万t^[2,5-6]。因此,如何回收CF以及实现回收后CF的高值化应用成为了各国研究人员关注的焦点。

关于回收CF(RCF)再利用技术主要有直接成型、纤维重整后成型、纤维编织成型和非织造布后成型等方式^[8-15]。其中,直接成型技术主要是将RCF经过短切或磨碎后进行应用,难以实现RCF高值化应用的目的。纤维重整后成型及纤维编织成型技术也因其加工及原料局限性而处于发展中。因此,非织造成型技术成为了RCF最常用的加工方式之一。目前用于RCF加工的非织造成型技术主要有衍缝、针刺等方式,但这些加工方式也同样对CF的长度有要求,对于长度小于40 mm,取向性较差的RCF,难以完成梳理工艺,实现以织物形式的RCF再应用。目前对于毫米级短切RCF的应用大多以填料的方式加入混凝土中使用,影响了RCF的应用价值。因此,为了提高短切RCF的高值化应用,拟利用湿法非织造成型技术,制备CF预成型体(CFP)用于复合材料加工,持续发挥CF优异的力学性能。

非织造湿法成型是以水为介质,以长度为5~20 mm的短纤维为原料,通过打浆、成网等工艺制备非织造织物的一种加工方法。但由于CF特殊的表面特性及加工方式,在没有黏合剂参与的情况下难以成网,因此,拟利用纤维素原料在湿法条件下可生成氢键的特性^[16],采用剑麻纤维(SF)与RCF混杂成型。SF是一种多年生草本植物,其性能是麻类纤维中较好的一种,虽然在拉伸性能上不及苧麻、亚麻等麻纤维原料,但其具有密度小、易于获取、价格低廉等优点,是目前麻基增强复合材料最常用原料品种之一^[17-18]。SF的使用可起到节约成本、减轻产品质量的作用。因此,拟在讨论湿法RCF作为预成型体可行性的同时,进一步分析SF作为混杂原料对湿法预成型体以及聚丙烯(PP)复合材料力学性能的影响,为短CF非织造预成型体加工及其高值化RCF产品的开发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

RCF:艾达索高新材料芜湖有限公司;

SF:纤维长度3 mm,广西龙州强力麻业有限公司;

PP母粒:ST868M,长荣化学工业股份有限公司;

聚丙烯酰胺:P875616,上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

打浆机:AT-WL,山东安妮麦特仪器有限公司;

水循环抄片机:AT-CP,济南卓邦试验仪器有限公司;

电热恒温鼓风干燥机:PH-010A,上海一恒科学仪器有限公司;

热压机:YLJ-HP300,合肥科晶智达科技有限公司;

电子万能拉力试验机:WDW-20,天辰试验机制造有限公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM):S-4800,日本日立公司;

织物厚度仪:YG141,常州市双固纺织仪器有限公司;

高清CCD测量显微镜:GP-300C,昆山高品精密仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1)预成型体制备。

对RCF进行简单梳理,再进行切断处理,将其切成长度为3 mm的短纤维。然后按实验方案,将不同配比的纤维原料置于水溶液中进行打浆处理,置于水溶液中的纤维总质量为10 g,纤维原料与水的质量比为1:800。为了获得较好的分散效果,纤维浆中加入聚丙烯酰胺分散剂,其含量为纤维浆总质量的0.01%,打浆时间为5 min。最后将处理好的悬浮浆置于抄片机中排除水分成网,再将形成纤维网置于烘箱中干燥成形,烘箱温度为70℃,烘干时间4 h。为了对比分析SF与CF混杂对湿法预成型体结构及其复合材料力学性能的影响,还制备了SF预成型体(SFP)。具体预成型体中的纤维比例及其预成型体编号见表1。

(2)复合材料的制备。

首先制备PP膜。将PP母粒置于烘箱中,去除

表1 预成型体中各组分质量分数

Tab. 1 Mass fraction of each component in preform

Sample	Fiber mass fraction/%	
	SF	CF
CFP	0	100
SFP	100	0
CF/SFP	75	25

母粒中所含水分,在70℃条件下烘干处理4 h。然后将其放入热压机内进行压膜处理,处理工艺为,在180℃条件下预热1 min,然后在1 MPa压力下热压1 min,自然冷却成型。

采用模压成型方式制备PP基复合材料。将裁剪好的PP膜分别与3种预成型体按交替叠层方式置于模具中热压成型,成型条件为:热压温度190℃,成型压力6 MPa,模压时间30 min,自然冷却成型。具体工艺流程如图1所示。PP基复合材料中的增强纤维与树脂基体的质量比均为2:8。复合材料编号分别为CF/PP基复合材料(CFPC)、SF/PP基复合材料(SFPC)和CF/SF/PP聚丙烯基复合材料(CF/SFPC)。

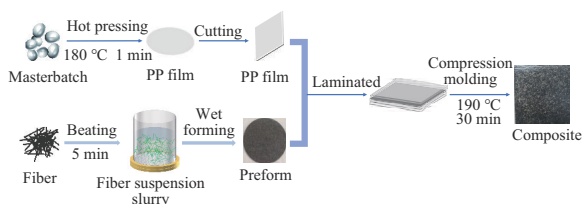


图1 复合材料制备工艺流程

Fig. 1 Composite preparation process

1.4 测试与表征

(1)预成型体结构性能表征。

采用织物厚度仪对预成型体厚度进行测试。压脚面积为2 000 mm²,加压0.5 kPa,加压时间30 s,测定次数10次,取其平均值。并计算相应预成型体变异系数(CV)。

按GB/T3923.1-2013对预成型体织物拉伸性能进行测试,测试样尺寸为120 mm×50 mm,拉伸速度为2 mm/min。取抄片机中悬浮浆冲刷成形方向为纵向,垂直方向为横向,分别取横向和纵向试样各5

块进行测试,取其平均值。

为了进一步分析预成型体的结构形态,利用高清CCD测量显微镜对预成型体表面形态进行表征。

(2) PP基复合材料性能测试。

按ISO 527-4:1997对PP基复合材料的拉伸性能进行测试,测试在电子万能拉力试验机上完成,试样尺寸为120 mm×15 mm,拉伸速度为2 mm/min,取5组有效数据平均值。

按ISO 178:2010对PP基复合材料的弯曲性能进行测试,试样尺寸为80 mm×13 mm,跨距比为32:1,试样长度比跨度长20%,测试速度为5 mm/min,取5组有效数据平均值。

按ISO 179-1:2006采用简支梁冲击试验机对PP基复合材料的冲击性能进行测试。试样尺寸为80 mm×10 mm,摆锤能量为7.5 J,冲击速度为3.8 m/s,摆锤预扬角160°,支撑线之间的距离为40 mm,取5组有效数据平均值。

利用高清CCD测量显微镜对PP基复合材料的损伤后形态进行表征。

2 结果与讨论

2.1 预成型体的结构性能

表2为3种预成型体的结构性能指标。通过测试发现,在湿法成型工艺制备CFP的过程中,有45.2%的CF损失。而通过SF与CF混杂后,CF/SFP预成型体中CF的损失量明显减少,混杂CF/SFP的纤维损失率降到30%,比CFP下降了33.63%。预成型体纤维的损失率影响预成型体织物的面密度和厚度。通过对3种预成型体的面密度和厚度进一步对比,发现CFP的面密度和厚度都是3种预成型体中最小的,面密度仅为171.97 g/m²。SFP的面密度和厚度是3种预成型体中最大的,面密度为264.33 g/m²。CF/SFP的面密度和厚度介于两者之间,与纤维损失率的结果一致。这可能是因为CF单纤维较细、比表面积大,极易吸附在设备内壁及网帘上,并且也易在抄造过程中受水流作用,使CF质量进一步损失,影响最终预成型体的厚度及面密度。但当

表2 3种预成型体织物的结构性能指标

Tab. 2 Structural performance indicators of three preformed fabrics

Sample	Fiber residue/g	Fiber loss rate/%	Areal density/(g·m ⁻²)	Average thickness/mm	CV%/%	Longitudinal tensile strength/MPa	Lateral tensile strength/MPa	Longitudinal tensile strength/Lateral tensile strength
CFP	5.48	45.2	171.97	1.81	12.39	-	-	-
SFP	8.42	15.8	264.33	2.41	9.30	0.30	0.21	1.43
CF/SFP	7.0	30	219.75	2.10	8.05	0.15	0.12	1.25

采用混杂工艺后,由于SF的密度仅为 1.29 g/cm^3 左右,远小于CF的密度,因此,当预成型体中纤维原料以SF为主或混有SF时,预成型体单位面积上的纤维根数增加,对预成型体厚度的增加起到积极作用。且SF的混杂处理,有效缓解了纤维在抄造过程中CF受水流冲刷而产生的质量损失。

厚度不匀率(以CV%表示)是表征非织造材料质量性能的重要指标。通过对3种预成型体的CV%对比发现,CFP织物的厚度不匀率CV%最大,达到12.39%;SFP织物的厚度不匀率CV%次之;CF/SFP织物的厚度不匀率CV%最小,为8.05%,比CFP厚度CV%值下降了35.03%。说明通过混杂工艺处理后,CF/SFP织物的厚度均匀性得到明显改善。

图2为3种预成型体表面形态图。利用SF与CF混杂方式制备的CF/SFP织物的均匀程度增强。CFP(图2a)上有明显的孔隙存在,而经过混杂处理后的CF/SFP表面已没有明显孔隙现象。由于CF直径较细、易团聚,即使在分散剂的作用下也不易形

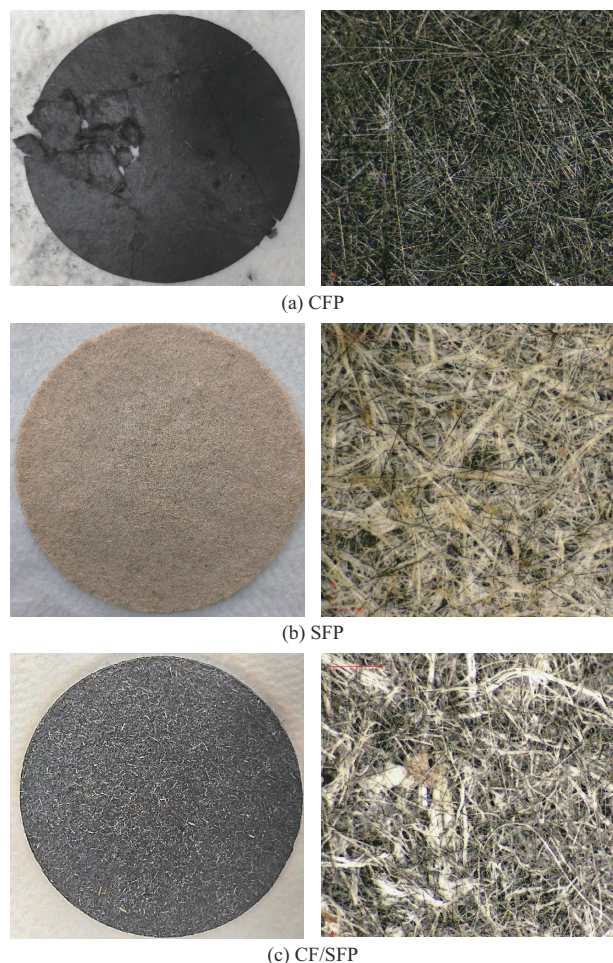


图2 3种预成型体表面形态图

Fig. 2 Surface morphology diagram of three preforms

成较好的分散结构,从而影响CFP结构的均匀程度^[19]。SF属工艺纤维,纤维间线密度有一定差异,因此其成形预成型体织物的均匀性也受到一定程度的影响。当采用CF与SF混杂处理后,SF的存在有效缓解了CF的团聚现象及与抄造网帘的黏附作用,并且CF也对CF/SFP间的孔隙起到了填充作用,对CF/SFP的均匀性起到了积极作用。

由图2a可以看出,在没有施加黏合剂且CF也不与SF混杂的条件下,CF很难形成具有稳定结构和力学性能的预成型体,在极小的外力作用下即发生破坏损伤,表2中的测试数据也证明了这一点。但当采用SF与CF混杂成型后,可形成结构稳定,具有一定力学强度的CF/SFP预成型体,其纵向拉伸强度可达到 0.15 MPa ,横向拉伸强度达到 0.12 MPa 。通过对比还发现,采用混杂工艺制备的CF/SFP的纵/横向拉伸强度比减小,这也进一步说明,其预成型体结构中纤维的排列均匀程度增强。CF由于表面光滑,没有活性基团,在没有黏合剂的条件下,不能形成具有一定力学性能的稳定结构。SF的主要成分是纤维素,打浆时纤维润胀,形成胶状,同时表面产生很多微原纤,在不使用黏合剂的作用下,可通过氢键黏结在一起^[17],形成稳定的结构。采用混杂方式制备的CF/SFP,SF的胶状形态为CF的成型及质量减少提供了积极条件,但同时也影响了SF间的氢键结合,使SFP的力学性能有所下降。SFP成型机理如图3所示。

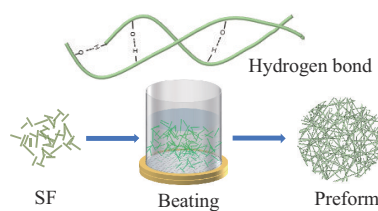


图3 SFP成型机理

Fig. 3 Forming mechanism of SFP

2.2 复合材料力学性能

2.2.1 复合材料的拉伸性能

图4为3种预成型体增强PP复合材料的拉伸性能。对比发现,虽然3种预成型体的拉伸性能有较大差别,但3种预成型体增强PP复合材料的拉伸断裂强度相差并不大。其中CFPC的拉伸强度最大,为 32.98 MPa ,但与SFPC和CF/SFPC相比,拉伸强度仅增加了5.5%和6.15%,与文献报道的注塑方式制备的玻璃纤维增强PP基复合材料拉伸强度相

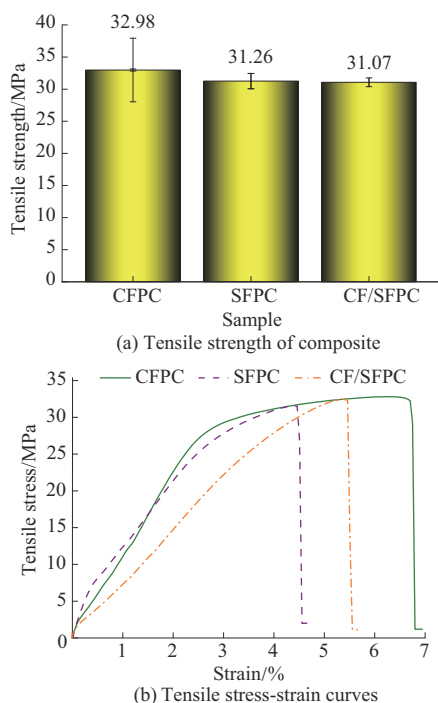


图4 不同复合材料的拉伸性能

Fig. 4 Tensile performances of different composites

当^[20]。没有施加黏合剂的CFP虽然不具备力学性能,但通过复合成型后,树脂基体对CFP的浸润和渗透使其具有了一定结构稳定性,且CF的拉伸强度远大于SF,使最终CFPC的拉伸强度略大于SFPC的拉伸强度。但SFPC拉伸强度略大于CF/SFPC的拉伸强度,说明预成型体织物较高的力学性能对复合材料拉伸强度的增大起积极作用。

图4b为3种PP基复合材料的拉伸应力-应变曲线。采用湿法预成型体制备的CFPC应力-应变曲线与其他织物预成型体结构制备的复合材料的应力-应变曲线有较大差异,CFPC不但具有较大应变,同时还表现出较好的断裂韧性,应变接近7%,拉伸断裂功接近165.29 J/m²。而SFPC的拉伸应变最小,仅为4.6%,但SFPC的初始拉伸弹性模量略大于CFPC的初始拉伸弹性模量。这是因为CFP中纤维间结合较差无法形成稳定结构,因此在拉伸外力作用下易发生滑移,会随着树脂基体的应变一起发生拉伸变形,并且由于CF与树脂基体间的不易形成良好的界面黏结,在拉伸载荷作用下发生抽拔,CFPC会发生断裂破坏。而SFP中的纤维以氢键的方式结合在一起,结构稳定,当受到外力拉伸载荷作用时,预成型体织物不易发生形变,随着拉伸外力的增大,纤维发生逐渐断裂损伤,预成型体解体,SFPC发生断裂破坏。且SFP的结构稳定性也对初

始拉伸弹性模量的改善起到了积极作用。

图5为3种PP基复合材料拉伸断裂损伤形态。由图5可见,CFPC的拉伸断面较整齐,而SFPC在拉伸时,由于出现预成型体逐渐被破坏的现象,因而SFPC和CF/SFPC复合材料的拉伸断面呈锯齿形。

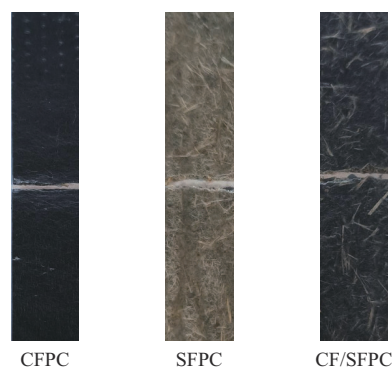


图5 不同复合材料的拉伸断裂损伤形态

Fig. 5 Tensile fracture damage morphology of different composites

2.2.2 复合材料的弯曲性能

图6为3种PP复合材料的弯曲性能。3种PP基复合材料的弯曲强度相差较大,其中CFPC的弯曲强度最大,为60.01 MPa,比SFPC和CF/SFPC的弯曲强度分别大36.26%和20.55%。CF/SFPC的弯曲强度较SFPC的弯曲强度提高了13.09%。通过3种预成型体PP复合材料的弯曲应力-应变曲线(图6b)还发现,CFPC具有较大的弯曲弹性模量,为7.35

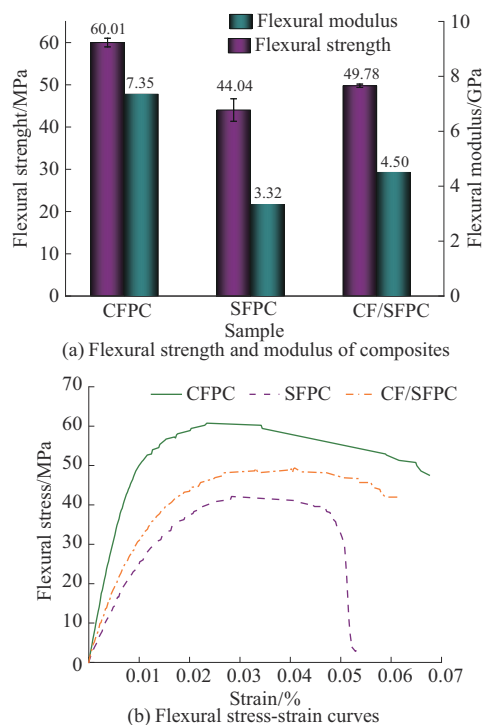


图6 3种复合材料的弯曲性能

Fig. 6 Flexural performances of three composites

GPa,且通过混杂方式制备的CF/SFPC比SFPC的弯曲弹性模量提高了35.54%。通过PP复合材料的弯曲应力-应变曲线还发现,3种预成型体复合材料在受弯曲载荷作用时,并不发生脆性损伤,都发生塑性变形过程。但3种复合材料的弯曲损伤形式有所差别。

图7为3种复合材料的弯曲损伤形态。如图7所示,CFPC受弯曲载荷作用后,其材料表面没有明显裂纹损伤痕迹,只发生弯曲变形。SFPC的弯曲破坏为断裂损伤,而CF/SFPC受弯曲载荷作用后表面有明显的裂纹出现,但没有发生明显的断裂损伤。这也进一步表明,CFPC受外力载荷作用时,CF可随树脂基体一起发生形变,SF与CF混杂制备的CF/SFPC的弯曲性能优于SFPC的弯曲性能。

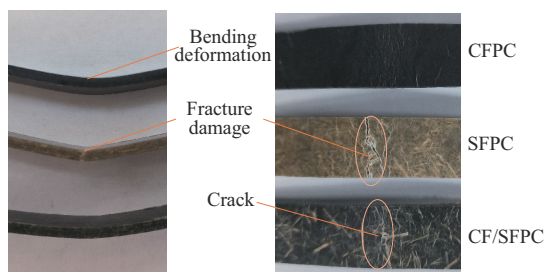


图7 3种复合材料的弯曲损伤形态
Fig. 7 Flexural damage morphology of three composite

复合材料的弯曲过程是拉伸性能和压缩性能的综合体现,当受到弯曲载荷作用时,复合材料在轴向上受到拉伸作用,通过2.2.1对PP复合材料拉伸性能的分析可知,CFPC的拉伸性能略大于SFPC和CF/SFPC。由于PP树脂具有较好的可塑性,且3种预成型体增强PP复合材料中的预成型体与基体存在较大的力学性能差异,因此,在初期弯曲载荷作用下,PP复合材料发生形变,应力传递给预成型体,此时,复合材料受预成型体织物及纤维性能影响,导致CFPC具有较大的弯曲弹性模量。随着弯曲载荷的增加,CFPC中的预成型体随复合材料的弯曲变形一起发生形变,CF发生滑移,以湿法预成型体形式存在的CF复合材料显示了较好的弯曲应变。而SFPC中的预成型体结构稳定,在弯曲载荷作用下,压缩方向上纤维并不能随PP树脂的变形而产生滑移变形,只能在弯曲载荷作用下发生形变,当达到预成型体断裂伸长极限时,发生断裂损伤,SFPC复合材料断裂。

2.2.3 复合材料的冲击性能

图8为3种预成型体增强PP复合材料的冲击强度,其中CFPC的冲击强度最大,比SFPC和CF/

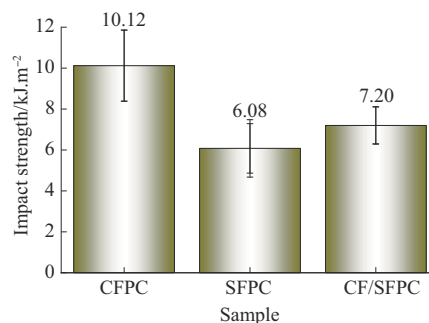


图8 复合材料的冲击强度
Fig. 8 Impact strength of composites

SFPC两种复合材料的冲击强度分别高66.45%和40.56%。但SF经过与RCF混杂后,CF/SFPC的冲击强度也比SFPC的冲击强度增加了18.42%。冲击性能主要体现材料吸收能量的能力,通过2.1对预成型结构性能的分析可知,由于CFP中CF的结合能力较差,导致CFPC中的CF易在外力载荷作用下与PP树脂基体一起发生形变,因此,当受到冲击载荷时,CFPC体现了较好的抗冲击效果。这也可以通过复合材料的冲击损伤断面进一步得到证实(图9)。由图9可见,SFPC的断面基本呈直线形,CFPC的断面呈不规则的锯齿形。说明SFPC的断裂损伤为脆性损伤,进一步说明,预成型体与基体发生断裂破坏的同时性。

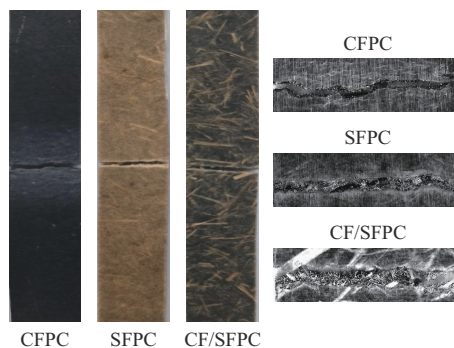


图9 复合材料的冲击损伤形态

Fig. 9 Impact damage morphology of composite

3 结论

(1)在不施加黏合剂的情况下,无法利用湿法非织造成型方式获得具有稳定结构和力学性能的CFP。利用SF与RCF混杂,可在不施加黏合剂的条件下,获得具有稳定结构和力学性能的预成型体织物。当采用湿法非织造方式制备预成型体织物时,通过与SF混杂,不但可以降低悬浮浆中CF的质量损失率,还可以提高CF/SFP织物的结构均匀性。

(2)虽然湿法制备的CFP成型性不佳,但以湿法CFP制备的CFPC具有较好的力学性能,具有传统

短切CF增强PP复合材料所不具备的拉伸断裂韧性,其拉伸应变可达到7%,同时还具有较好的弯曲性能和冲击性能。说明当复合材料中以湿法非织造成型方式制备的织物为预成型体时,可使CF复合材料的断裂韧性得到提高。

(3)利用RCF与SF混杂,可获得力学性能明显改善的CF/SFPC,CF/SFPC的弯曲强度和冲击强度分别比SFPC大13.09%和18.42%。说明当SFPC中混杂一定量CF有利于改善复合材料力学性能。

但通过分析也发现,CF及SF与PP树脂间的较差界面黏结性能影响了PP复合材料综合力学性能的发挥,且通过混杂处理后的CF/SFPC力学性能也并没有达到最优结果。因此,在后续研究中可通过对增强纤维表面改性,以及混杂比例的调节,得到性能更优的CF/SFPC,为超短RCF的应用及轻量化CFPC的制备提供理论基础。

参考文献

- [1] ZHENG Hao, ZHANG Wenjian, LI Bowen, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 233. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109639.
- [2] ZHANG Jin, CHEVALI V S, WANG Hao, et al. Current status of carbon fiber and carbon fiber composites recycling[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 193.
- [3] BARILE C, CASAVOLA C. Mechanical characterization of carbon fiber reinforced plastics specimens for aerospace applications[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40:716–722. DOI:10.1016/B978-0-08-102292-4.00019-9.
- [4] COLLINSON M G, SWAIT T J, BOWER M P, et al. Development and implementation of direct electric cure of plain weave CFRP composites for aerospace[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 172. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107615.
- [5] CHEN Piyu, FENG Ran, XU Ying, et al. Recycling and reutilization of waste carbon fiber reinforced plastics: current status and prospects[J]. *Polymers*, 2023, 15(17). DOI: 10.3390/polym15173508.
- [6] VERMA S, BALASUBRAMANIAM B, GUPTA R K. Recycling, reclamation and re-manufacturing of carbon fibers[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2018, 13:86–90.
- [7] SANKAR K G, TIMO K. A review on the recycling of waste carbon fiber/glass fiber-reinforced composites: Fiber recovery, properties and life-cycle analysis[J]. *SN Applied Science*, 2020, 2. DOI: 10.1007/s42452-020-2195-4.
- [8] BAO Limin, SUN Ye, RUAN Fangtao, et al. Development of a method for recycling factory waste carbon fiber prepregs and increasing the added value of the collected material[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(4):2 071–2 079.
- [9] 胡侨乐, 端玉芳, 刘志, 等. 碳纤维增强聚合物基复合材料回收再利用现状[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(1):64–76.
- [10] HU Qiaole, DUAN Yufang, LIU Zhi, et al. Current status of carbon fiber reinforced polymer composites recycling and re-manufacturing[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(1): 64–76.
- [11] 胡炜杰, 钟明建, 杨营, 等. 碳纤维复合材料的回收与再利用技术[J]. *材料导报*, 2021, 35(S2):627–633.
- [12] HU Weijie, ZHONG Mingjian, YANG Ying, et al. Recycling and reuse technology of carbon fiber composite materials[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(S2):627–633.
- [13] GÉRALDINE O, LUKE O D, GARY A L. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 72:61–99.
- [14] GUO Wenjian, BAI Shuxin, YE Yicong, et al. Recycling carbon fiber-reinforced polymers by pyrolysis and reused to prepare short-cut fiber C/C composite[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(7):340–348.
- [15] ATEEQ M. A state of art review on recycling and remanufacturing of the carbon fiber from carbon fiber polymer composite[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2023, 12. DOI: 10.1016/j.jcomc.2023.100412.
- [16] 刘建叶, 宋金梅, 彭玉刚, 等. 热固性碳纤维复合材料废弃物回收及再利用现状[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(8):216–218.
- [17] LIU Jianye, SONG Jinmei, PENG Yugang, et al. Recycling and reusing of thermosetting carbon fiber reinforced composite wastes [J]. *New Chemical Materials*, 2014, 42(8):216–218.
- [18] 罗益锋. 碳纤维复合材料废弃物的回收与再利用技术发展[J]. *纺织导报*, 2013(12):36–39.
- [19] LUO Yifeng. Technology development of recovery & reuse of carbon fiber composite[J]. *China Textile Leader*, 2013(12):36–39.
- [20] ETALE A, ONYIANTA A J, TURNER S R, et al. Cellulose: A review of water interactions, applications in composites, and water treatment[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(5):2 016–2 048.
- [21] 杨清, 宋欢, 杨宇, 等. 剑麻纤维打浆特性及其成纸性能研究[J]. *中华纸业*, 2023, 44(16):17–21.
- [22] YANG Qing, SONG Huan, YANG Yu, et al. Study on the beating characteristics of sisal fiber and its paper formation properties[J]. *China Paper & Paper Industry*, 2023, 44(16):17–21.
- [23] 张萌, 冯冰涛, 王晓珂, 等. 天然纤维增强热塑性复合材料制备与应用研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(10):179–185.
- [24] ZHANG Meng, FENG Bingtao, WANG Xiaoke, et al. Research progress in preparation and application of natural fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(10):179–185.
- [25] 华飞果, 吴帅, 童树华, 等. 短切碳纤维最佳分散工艺研究[J]. *中国造纸*, 2019, 38(4):41–44.
- [26] HUA Feiguo, WU Shuai, TONG Shuhua, et al. Study on the best dispersing technology of chopped carbon fibers[J]. *China Pulp & Paper*, 2019, 38(4):41–44.
- [27] JUNAEDI H, ALBAHKALI E, BAIG M, et al. Ductile to brittle transition of short carbon fiber-reinforced polypropylene composites[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 19:6714097. DOI: 10.1155/2020/6714097.