

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.10.005

连续玻璃纤维增强聚丙烯复合板材的制备及性能

周杰¹, 李代文², 杨国刚¹, 姚玉元²

(1. 振石集团华美新材料有限公司, 浙江桐乡 314500; 2. 浙江理工大学材料与纺织学院丝绸学院, 杭州 310018)

摘要:以连续玻璃纤维为聚丙烯树脂的增强材料,通过熔融浸渍法制备了连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带,然后将单向预浸带经热压成型制得连续玻璃纤维增强聚丙烯层合板。采用扫描电子显微镜对单向预浸带进行了表征,考察了玻璃纤维含量、增容剂用量和克重等对连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的外观形貌、力学性能和结合牢度的影响。研究表明:在一定范围内,增加玻璃纤维含量可以提高复合材料的力学性能,当玻璃纤维含量达到65%时,复合材料的力学性能达到最优,继续增加玻璃纤维含量,树脂则难以充分浸渍玻璃纤维,两者结合较差,复合材料的外观变差、力学性能也会明显下降;当增容剂用量从0增加到2.5%时,复合材料的界面结合强度明显改善,力学性能也有较大提高,但进一步提高增容剂用量对复合材料力学性能的改善效果就不明显;随着克重的增大,复合材料的拉伸和弯曲性能下降,但抗冲击性能却有所提高;热氧老化对复合材料的力学性能影响较大,使复合材料的力学性能明显下降。

关键词:聚丙烯;连续玻璃纤维;复合材料;单向预浸带;连续玻璃纤维增强聚丙烯层合板

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)10-0024-06

Preparation and Performance of Continuous Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composite Laminated Plate

Zhou Jie¹, Li Daiwen², Yang Guogang¹, Yao Yuyuan²

(1. Zhenshi Group Huamei New Materials Co., Ltd., Tongxiang 314500, China;

2. Silk Institute, College of Material and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Unidirectional continuous glass fiber reinforced polypropylene prepreg tapes were prepared by melt impregnation method and then laminated plates were made with these unidirectional prepreg tapes by hot-pressing method. The unidirectional prepreg tapes were characterized by scanning electron microscope. Besides, the effects of glass fiber content, grammage and thermo-oxidative aging of composite on morphology, mechanical properties and bonding strength of continuous glass fiber reinforced polypropylene composites were researched. The results show that the mechanical properties of composite could be improved with the increase of glass fiber content within certain limits. When glass fiber content reach 65%, the mechanical properties of composite are optimal. But the appearance would get worse and the mechanical properties also suffer significantly declining for glass fiber impregnation issue when glass fiber content is excessive. When the dosage of compatibilizer increase from 0 to 2.5%, the interface bonding strength of composite is improved distinctly, and thus the mechanical properties of composite are enhanced drastically. However, it almost make no difference to the mechanical properties of composite with further compatibilizer addition. The mechanical properties of composite could be improved to some extent with the addition of compatibilizer. Furthermore, with the increase of grammage of unidirectional prepreg tape, tensile and flexural property of the composite decrease, while impact property increase. Importantly, the various mechanical properties gradually decrease with the thermo-oxidative aging of composite.

Keywords: polypropylene; continuous glass fiber; composite; unidirectional prepreg tape; continuous glass fiber reinforced polypropylene laminated plate

通讯作者: 周杰, 博士, 主要从事纤维复合材料产品的研究开发工作 E-mail: zhoujie@zhenshigroup.com

收稿日期: 2018-08-06

引用格式: 周杰, 李代文, 杨国刚, 等. 连续玻璃纤维增强聚丙烯复合板材的制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10): 24-29.

Zhou Jie, Li Daiwen, Yang Guogang, et al. Preparation and performance of continuous glass fiber reinforced polypropylene composite laminated plate [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):24-29.

相较于热固性复合材料,热塑性复合材料具有更高的韧性和损伤容限,且具有可反复加工、回收再利用等不可比拟的优点,已成为复合材料中的一个及其重要的发展方向^[1-2]。在热塑性复合材料的增强体中,由于玻璃纤维综合性能优异,价格优势明显,已经成为应用最广泛的增强材料^[3]。

通常,玻璃纤维增强热塑性复合材料根据玻璃纤维的类别分为玻璃纤维毡增强热塑性复合材料、短玻璃纤维增强热塑性复合材料、长玻璃纤维增强热塑性复合材料和连续玻璃纤维增强热塑性复合材料^[4]。长期以来,玻璃纤维增强热塑性复合材料以玻璃纤维毡、短玻璃纤维和长玻璃纤维增强为主。连续玻璃纤维增强热塑性复合材料制品中的玻璃纤维以连续形式存在,因此能够完全发挥玻璃纤维优良的力学性能,使复合材料的力学性能提高数倍,甚至可以媲美金属材料^[5-6]。

目前,连续玻璃纤维增强热塑性复合材料的制备以混编法和混纤法为主^[7]。但是,这两种方法生产成本较高,且只适用于那些能够纺丝的热塑性基体树脂。熔融浸渍法是近年来发展起来的一种使用熔融树脂浸渍玻璃纤维制备连续玻璃纤维增强热塑性复合材料的方法^[8]。该方法不仅能够精准控制复合材料中玻璃纤维含量,而且成型周期短,可实现大规模连续化生产^[9]。尽管采用熔融浸渍法理论上可以生产多种类型的热塑性树脂基复合材料,但是这种方法对生产设备、工艺条件和树脂特性的要求较高,目前发展还不成熟,限制了其大规模生产应用。

连续玻璃纤维增强热塑性复合材料的常见基体中,聚丙烯由于综合性能优异、生产成本较低,且复合材料制品应用前景广阔^[10]。因此,笔者以聚丙烯为基体,连续玻璃纤维为增强材料,采用熔融浸渍法制备连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带,再将制得的单向预浸带通过热压成型法制备出连续玻璃纤维增强聚丙烯层合板,并研究了玻璃纤维含量、增容剂用量、克重规格等对复合材料的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚丙烯:中国石化扬子石油化工有限公司;

玻璃纤维:1200tex,中国巨石股份有限公司;

马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH):以色列Polyram公司;

负载有机过氧化物母料聚丙烯(MB-CR PP):市售。

1.2 主要设备及仪器

同向双螺杆挤出机:SHJ-20型,南京杰恩特有限公司;

平板硫化机:XLB-500×500/50型,中国青岛锦九洲橡胶机械有限公司;

万能试验机:Instron3360型,美国Instron公司;

简支梁冲击试验机:RXJ-50B型,深圳市瑞格尔仪器有限公司;

场发射扫描电子显微镜:JSM-5610LV型,日本Jeol公司。

1.3 复合材料制备

连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带的制备:将干燥后的PP, PP-g-MAH和MB-CR PP按一定质量比例在高速混合机中均匀混合,然后通过螺杆挤出机将混合的熔融树脂挤进特制的浸渍模头,同时引入连续玻璃纤维,使玻璃纤维与树脂在模头中完成浸渍,再通过牵引装置以一定的速度引出浸渍后的连续玻璃纤维浸渍料,最后辊压冷却,制得连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带。单向预浸带的玻璃纤维含量和厚度通过纤维用量、螺杆挤出机频率、牵引速率控制。

连续玻璃纤维增强聚丙烯层合板的制备:将上述连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带裁剪到250 mm×250 mm大小,并将裁剪的样品按所需层数根据纤维排布角度使其两两十字交叉铺层,将铺好的样品置于烘箱中220℃加热6 min后,再使用平板硫化机在4 MPa下冷压10 min,制得连续玻璃纤维增强聚丙烯层合板。将成型板材经过机械加工,制得标准试样。

1.4 性能测试

力学性能测试:单片拉伸性能按ASTM D-882-2010测试;板材弯曲性能按GB/T 1449-2005测试;板材缺口冲击强度按GB/T 1451-2005测试;板材层间剪切强度按JC/T 773-2010测试。

玻璃纤维含量测试:单向预浸带的玻璃纤维含量按GB/T 2577-2005测试。

孔隙率测试:单向预浸带的孔隙率采用密度法,按ASTM D2734-2016测试。

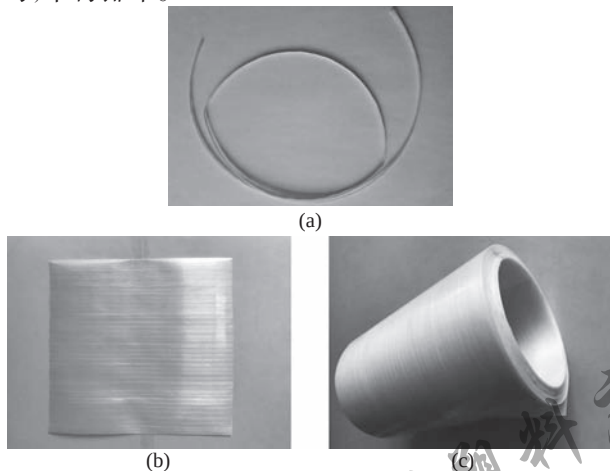
热氧老化性能测试:将单向预浸带和层合板放置于鼓风式恒温烘箱中,设定恒温温度为150℃,分别进行168,336,504 h的老化实验,然后取出样品完成力学性能测试。

外观形貌分析:在单向预浸带试样表面喷金处理后,用扫描电子显微镜观察形貌。

2 结果与讨论

2.1 玻璃纤维和单向预浸带的形貌

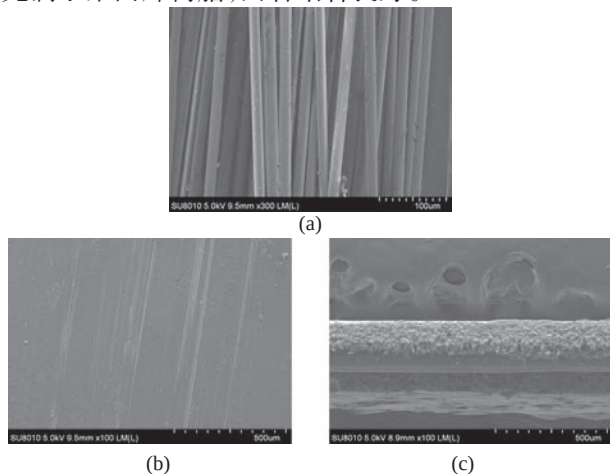
图1为连续玻璃纤维和连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带的样品图。由图1a的玻璃纤维样品图可看出,使用的玻璃纤维是无捻粗砂玻璃纤维。由图1b和图1c的连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带的样品图可看出,制备的单向预浸带表面平整,无玻璃纤维裸露,玻璃纤维在聚丙烯树脂中分散均匀,平行排布。



a—连续玻璃纤维; b, c—连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带

图1 连续玻璃纤维及其增强聚丙烯单向预浸带样品图

图2为连续玻璃纤维和单向预浸带的SEM图。由图2a的连续玻璃纤维的SEM图可看出,玻璃纤维直径约为 $17\mu\text{m}$,表面粗糙,有微小黏附物,这些黏附物可能是涂覆的表面助剂。由图2b的单向预浸带的正面SEM图可看出,树脂完全包覆玻璃纤维,表面没有裸露的玻璃纤维。由图2c的单向预浸带的横截面SEM图可看出,玻璃纤维之间的空隙充满了聚丙烯树脂,两者结合良好。

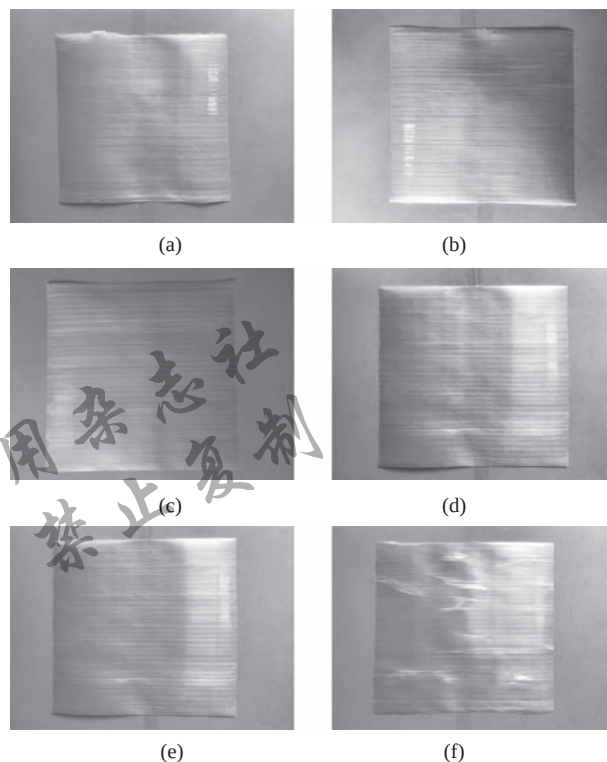


a—连续玻璃纤维; b—单向预浸带的正面, c—单向预浸带的横截面

图2 连续玻璃纤维及其增强聚丙烯单向预浸带 SEM 图

2.2 玻璃纤维含量对复合材料的影响

作为复合材料整体骨架,玻璃纤维的含量对复合材料的外观及性能影响很大,因而研究玻璃纤维含量对连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的影响具有较重要意义。图3为不同玻璃纤维含量的单向预浸带的样品图,对应的单向预浸带的各项力学性能列于表1。



a, b, c, d, e, f—1[#], 2[#], 3[#], 4[#], 5[#], 6[#]

图3 不同玻璃纤维含量的单向预浸带样品图

表1 不同玻纤含量的玻璃纤维增强聚丙烯复合材料力学性能

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
厚度/mm	0.33	0.30	0.24	0.22	0.20	0.18
克重/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	413.63	403.88	349.58	331.76	314.62	302.38
玻璃纤维质量分数/%	45.92	49.20	57.51	60.78	64.87	68.24
单片拉伸强度/MPa	496.43	530.12	736.72	776.35	789.10	651.45
弯曲强度/MPa	312.94	335.11	435.69	527.01	583.79	512.19
弯曲弹性模量/GPa	12.18	12.84	16.80	19.50	21.28	19.82
缺口冲击强度/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	171.19	181.68	233.80	280.00	340.54	303.11

由表1可知,制备的1[#]~6[#]样品的玻璃纤维质量分数分别为45.92%,49.20%,57.51%,60.78%,64.87%,68.24%。由图3中对应的不同玻璃纤维含量的单向预浸带样品图可看出,1[#]~5[#]单向预浸带样品表面平整,树脂与玻璃纤维结合良好,但6[#]样品中却有大量玻璃纤维裸露,玻璃纤维没有与树脂充分浸渍,两者结合较差。为了进一步探究玻璃纤维含量对树脂浸渍玻璃纤维结果的影响,检测了1[#]

~6# 单向预浸带的空隙率,实验结果如图 4 所示。由图 4 可知,当玻璃纤维含量低于 65% 时,单向预浸带的空隙率基本上维持在一个较低的水平,但当玻璃纤维含量高于 65% 时,单向预浸带的空隙率会急剧上升。

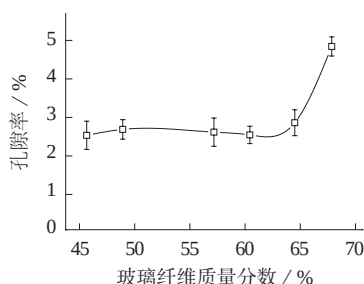


图 4 不同玻璃纤维含量时单向预浸带的孔隙率

在连续玻璃纤维增强复合材料中,作为增强材料的玻璃纤维是复合材料整体中承受应力的主体部分,玻璃纤维的含量对复合材料的力学性能影响巨大^[11]。由表 1 中的不同玻璃纤维含量的连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的力学性能可知,随着玻璃纤维含量的增加,复合材料的单片拉伸强度、板材弯曲强度、板材弯曲弹性模量、板材缺口冲击强度都呈现出先增大后减小的趋势,在玻璃纤维含量约为 65% 时,各项力学性能达到最优。这些结果表明在玻璃纤维和聚丙烯树脂能够充分浸渍结合的情况下,提高玻璃纤维的含量可以增强复合材料的力学性能,但是,当玻璃纤维含量过高时,树脂难以充分浸渍玻璃纤维,两者结合有较多缺陷,力学性能则会出现明显的下降。这是因为在连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料中,树脂基体的作用是固定玻璃纤维,并将承受的应力传递给包覆的玻璃纤维,而玻璃纤维主要是起骨架作用,并吸收外力作用时传递来的大部分能量,增强复合材料整体的力学性能^[12]。当玻璃纤维含量较低时,提高其含量,可使复合材料中的玻璃纤维增强作用得到充分体现,而当玻璃纤维含量过高时,树脂无法充分浸渍玻璃纤维,两者结合较差,应力就无法充分传递给玻璃纤维,复合材料力学性能则会明显降低。

2.3 增容剂用量对复合材料的影响

增容剂是连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料中的一种重要助剂,为了研究增容剂用量对复合材料的影响,制备了在树脂体系中不同质量分数的增容剂的连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料,其力学性能见表 2。由表 2 可知,当增容剂用量从 0 增加到 2.5%,复合材料的单片拉伸强度、板材弯曲强度、

板材弯曲弹性模量和缺口冲击强度都明显上升,再将增容剂用量从 2.5% 增加到 4.5%,复合材料的上述各项力学性能上升较小,说明增容剂质量分数为树脂体系的 2.5% 时,复合材料的力学性能基本达到最优,再增加增容剂用量对提高复合材料力学性能的作用就不明显,反而会提高材料总成本。

表 2 不同增容剂含量的玻璃纤维增强聚丙烯复合材料力学性能

项目	增容剂含量 / %					
	0	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
厚度 / mm	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
克重 / (g · m ⁻²)	331.56	330.06	331.23	331.76	332.38	330.12
玻璃纤维质量分数 / %	60.82	61.09	60.89	60.78	60.67	61.08
单片拉伸强度 / MPa	756.15	761.25	768.62	776.35	777.15	777.46
弯曲强度 / MPa	393.27	437.88	489.45	527.01	533.11	539.14
弯曲弹性模量 / GPa	14.71	16.31	17.53	19.50	19.73	20.20
缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	200.45	224.35	245.67	280.00	286.76	295.67

图 5 为不同增容剂用量时连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的层间剪切强度。由图 5 可知,在一定范围内,增加增容剂用量可以提高复合材料的层间剪切强度,在增容剂用量为 2.5% 时,层间剪切强度基本达到最优。

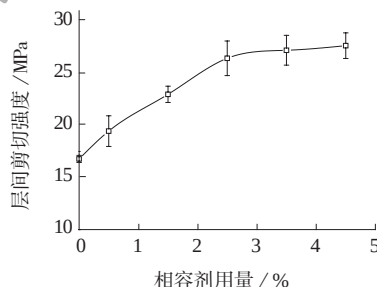


图 5 不同增容剂用量时玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的层间剪切强度

图 6 为不同增容剂用量时单向预浸带的孔隙率。

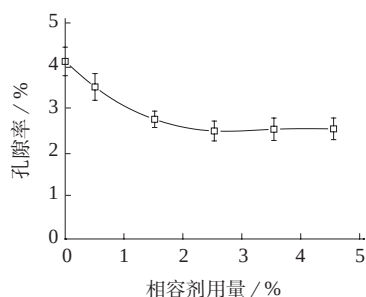


图 6 不同增容剂用量时单向预浸带的孔隙率

由图 6 可知,当增容剂用量从 0 增加到 2.5%,单向预浸带孔隙率明显下降,再提高增容剂用量对其孔隙率的基本没有影响。这是因为增容剂可以增强树脂与玻璃纤维结合,提高两者界面结合强度,并降低复合材料的孔隙率,从而提高复合材料的力学强度。

2.4 克重规格对复合材料的影响

克重是连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带的非常重要的规格要求,因此,制备了不同克重单向预浸带,并研究了它们的力学性能,结果列于表3。

表3 不同克重的玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的力学性能

项目	样品			
	A	B	C	D
厚度/mm	0.15	0.22	0.35	0.45
克重/(g·m ⁻²)	242.11	331.76	505.44	676.24
玻璃纤维质量分数/%	65.61	60.78	61.82	63.12
单片拉伸强度/MPa	978.06	776.35	763.88	724.17
弯曲强度/MPa	550.12	527.01	364.13	262.88
弯曲弹性模量/GPa	21.38	19.50	10.94	6.24
缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	249.90	280.00	297.58	334.21

由表3可知,制备的A、B、C、D四种样品的玻璃纤维含量都在60%~65%之间,克重分别为242.11,331.76,505.44,676.24 g/m²。随着克重增大,复合材料的单片拉伸强度及板材弯曲强度和弯曲弹性模量呈下降趋势,而板材缺口冲击强度却呈上升趋势。这是因为随着克重增大,玻璃纤维的用量增加,玻璃纤维在树脂中的取向也更差,在受到拉伸或弯曲作用时,玻璃纤维取向越差的复合材料越难将承受应力均衡地传递给包覆的玻璃纤维,复合材料单片拉伸强度、板材弯曲强度和弯曲弹性模量才会下降。玻璃纤维取向越差的复合材料却有更好韧性,在受到冲击作用时,能吸收更多能量,缺口冲击强度会上升。

2.5 热氧老化对复合材料的影响

抗热氧老化性能是考察复合材料使用性能的重要指标之一,因此,设计了热氧老化实验探究热氧老化过程对连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的影响。图7和图8分别为不同时间热氧老化处理的单向预浸带的样品图和对应的SEM图。

由图7可看出,未热氧老化处理的单向预浸带样品表面平整。168 h热氧老化处理后,样品表面出现细微褶皱。336 h热氧老化处理后,样品表面出现大量明显褶皱以及部分粉化现象。504 h热氧老化处理后,树脂样品全部粉化,老化严重的部分区域树脂碳化,裸露出玻璃纤维。由图8可知,未热氧老化处理的单向预浸带中树脂完全包覆玻璃纤维,表面没有裸露的玻璃纤维。168 h热氧老化处理后,可看到明显的不平整的凸起结构,说明表面树脂层出现部分氧化分解。336 h热氧老化处理后,通过粉化区域的电镜图片可看出,树脂结构破坏严重,树脂间出现大量裂痕,裂痕间裸露出玻璃纤维。504 h热氧老化处理后,通过碳化区域的电镜图片可看到大量裸

露的玻璃纤维和少量残留的老化聚丙烯。

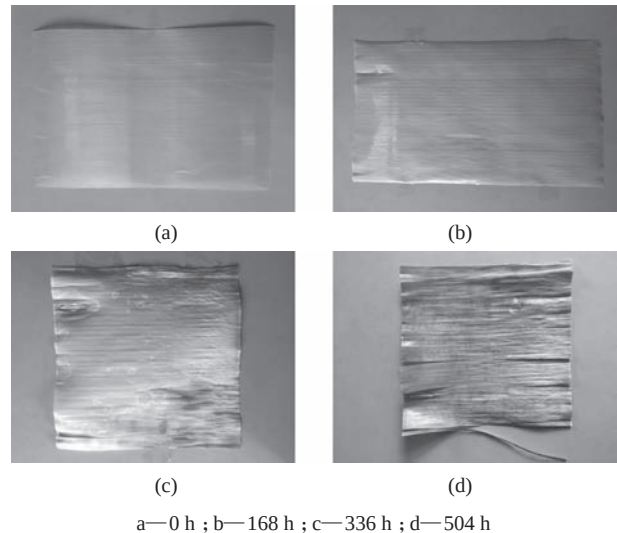


图7 不同时间热氧老化处理的单向预浸带的样品图

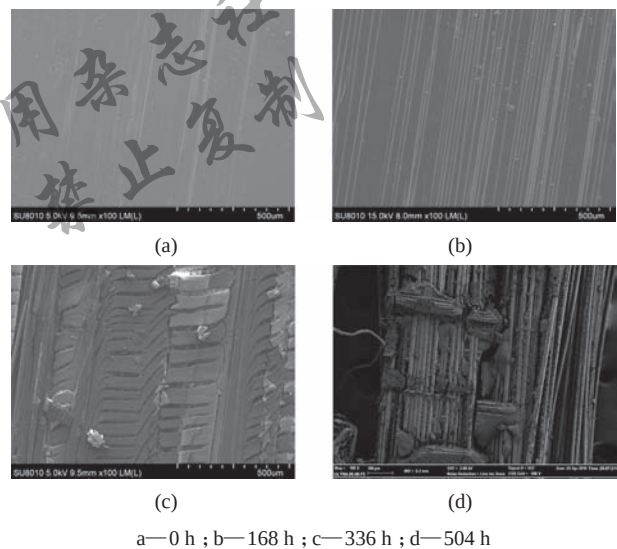


图8 不同时间热氧老化处理的单向预浸带的SEM图

表4为不同时间热氧老化处理的玻璃纤维增强聚丙烯复合材料力学性能。

表4 不同时间热氧老化处理的玻璃纤维增强聚丙烯复合材料力学性能

项目	老化时间/h			
	0	168	336	504
厚度/mm	0.22	0.22	0.22	0.21
克重/(g·m ⁻²)	331.76	319.41	306.50	297.11
玻璃纤维质量分数/%	60.78	63.13	65.79	67.87
单片拉伸强度/MPa	776.35	621.47	415.32	176.32
弯曲强度/MPa	527.01	475.78	205.24	54.13
弯曲弹性模量/GPa	19.50	15.78	7.37	2.67
缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	280.00	231.56	125.17	57.58

由表4可知,热氧老化处理后,单向预浸带的克重降低,玻璃纤维含量增大,表明单向预浸带热氧老化处理后部分聚丙烯出现了氧化分解。此外,随着热氧老化时间的增加,复合材料的单片拉伸强度、弯

曲强度、弯曲弹性模量和缺口冲击强度都呈下降趋势。这是因为随着老化程度的加深,聚丙烯的结构发生变化,分子量下降,导致聚丙烯分子间的作用力下降以及树脂与玻璃纤维之间的结合变弱,引起复合材料整体力学性能下降。

3 结论

采用熔融浸渍法制备了连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带,再将制得的单向预浸带通过热压成型法制备出连续玻璃纤维增强聚丙烯层合板。在一定范围内,提高玻璃纤维含量可以提高复合材料力学性能,当玻璃纤维含量约为 65% 时,各项力学性能达到最优,进一步提高玻璃纤维含量,树脂难以充分浸渍玻璃纤维,复合材料外观会变差、力学性能也会明显下降。提高增容剂用量可以改善复合材料力学性能,当增容剂在树脂体系中的质量分数达到 2.5% 后,增容剂作用变得不明显,增容剂用量优选为 2.5%。在保证玻璃纤维含量为 60%~65%,制备了克重为 242.11,331.76,505.44,676.24 g/m² 的四种单向预浸带。随着克重的增大,玻璃纤维取向变差,复合材料的拉伸和弯曲性能呈下降趋势,但抗冲击性能却有所提高。热氧老化不仅破坏复合材料的外观形貌,而且引起聚丙烯分解,导致复合材料力学性能明显下降。

参考文献

- [1] Donmez C A, Kalaycioglu H, Mengertoglu F. Technological properties of thermoplastic composites filled with fire retardant and tea mill waste fiber[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(12):1 627-1 634.
- [2] 章亚东,段跃新,左璐,等.经编织物法制备连续纤维增强热塑性复合材料的微观形貌和浸润过程分析[J].复合材料学报,2004, 21(6):63-69.
Zhang Yadong, Duan Yuexin, Zuolu, et al. Analyses of microstructure and impregnation process of FRTP composites manufactured from warp-knitting fabric[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6):63-69.
- [3] Zhang Daohai, He Min, Qin Shuhao, et al. Effect of fiber length and dispersion on properties of long glass fiber reinforced thermoplastic composites based on poly(butylene terephthalate)[J]. Rsc Advances, 2017, 7(25):15 439-15 454.
- [4] 周翔,薛平,贾明印,等.连续玻璃纤维增强层合片材制备及力学性能研究[J].塑料工业,2014,42(11):75-79.
Zhou Xiang, Xue Ping, Jia Mingyin, et al. Study on preparation process and mechanical properties of continuous glass fiber reinforce laminated sheet[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(11):75-79.
- [5] 李浩,邵将,张珂珂,等.连续玻璃纤维/丙纶纤维混纺织物增强聚丙烯复合材料模压成型工艺[J].塑料工业,2017,45(11):134-138.
Li Hao, Shao Jiang, Zhang Yake, et al. Molding process of polypropylene composites reinforced by continuous glass fiber / polypropylene fiber blended fabrics[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(11):134-138.
- [6] 明星星,徐定红,张凯舟,等.长玻纤增强聚丙烯复合材料[J].塑料,2012,41(5):37-39.
Ming Xingxing, Xu Dinghong, Zhang Kaizhou, et al. Long glass fiber reinforced PP composite[J]. Plastics, 2012, 41(5):37-39.
- [7] 方立,周晓东,吴忠泉,等.连续玻璃纤维增强聚丙烯复合板材的性能研究[J].工程塑料应用,2012,40(12):12-15.
Fang Li, Zhou Xiaodong, Wu Zhongquan, et al. Properties of continuous glass fiber reinforced polypropylene lamiantes[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(12):12-15.
- [8] 唐可,信春玲,张聪,等.PP-g-MAH 对连续纤维增强聚丙烯复合材料性能影响的研究[J].塑料工业,2015,43(12):83-86.
Tang Ke, Xin Chunling, Zhang Cong, et al. Influence of PP-g-MAH on properties of continuous fiber reinforced polypropylene composite[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(12):83-86.
- [9] 李莹,鑫春玲,曹敏华,等.连续玻璃纤维增强聚丙烯预浸带熔融预浸过程[J].复合材料学报,2018,35(5):1 080-1 086.
Li Ying, Xin Chunling, Cao Minhua, et al. Pre-impregnation of continuous glass fiber reinforced polypropylene prepreg[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(5):1 080-1 086.
- [10] Mazzanti V, Mollica F, Kissi N. Rheological and mechanical characterization of polypropylene-based wood plastic composites. [J]. Polymer Composites, 2016, 37(12):3 460-3 473.
- [11] 连荣炳,徐名智,李强,等.玻纤增强聚丙烯复合材料性能研究[J].塑料科技,2008,36(8):40-44.
Lian Rongbing, Xu Mingzhi, Li Qiang, et al. Study on properties of glass fiber reinforced polypropylene composite[J]. Plastics Science and Technology, 2008, 36(8):40-44.
- [12] 孙立坤.连续/长玻璃纤维增强热塑性复合材料生产工艺的研究[D].北京:北京化工大学,2014:46-50.
Sun Likun. Study on production technology of continuous / long glass fiber reinforced thermoplastic polymer composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014:46-50.
- [13] Di M E, Mensitieri G, Iannace S. Structure optimization of polycaprolactone foams by using mixtures of CO₂ and N₂ as blowing agents[J]. Polymer Engineering and Science, 2005, 45:432-414.
- [14] 翟文涛,余坚,何嘉松.超临界流体制备微发泡聚合物材料的研究进展[J].高分子通报,2009(3):1-10.
Zhai Wentao, Yu Jian, He Jiasong. Research progresses in preparation of microcellular polymers by supercritical fluid technique[J]. Chinese Polymer Bulletin.2009(3):1-10.

(上接第 23 页)

with supercritical CO₂ technology[J]. Scientia Sinica Chimica, 2010, 40(1):1-15.

- [13] Di M E, Mensitieri G, Iannace S. Structure optimization of polycaprolactone foams by using mixtures of CO₂ and N₂ as blowing agents[J]. Polymer Engineering and Science, 2005,