

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.07.007

SMC 与 PCM 组合模压件的力学性能

贾志欣¹, 刘立君¹, 李继强¹, 王少峰², 彭河²

(1. 浙大宁波理工学院, 浙江宁波 315100; 2. 宁波益普乐模塑有限公司, 浙江宁波 315615)

摘要: 通过采用正交编织的连续玻璃纤维增强环氧树脂基预压料 (PCM) 与短切玻纤增强的片状模塑料 (SMC) 组合使用, 制备了盒子制件, 进行了力学性能测试并分析了原因。结果表明, PCM 料与 SMC 料组合模压制品拉伸强度为各向异性, 弯曲强度较均匀; 与只用 PCM 料和 SMC 料制件相比, 拉伸强度平均值约为单用 SMC 料的 1.5 倍、单用 PCM 料的 1/3; 弯曲强度平均值约为单用 SMC 料的 2 倍、单用 PCM 料的 1/3。玻璃纤维分布取向和聚集程度是导致不同位置试样力学性能差异的主要原因。相比单用 PCM 料, SMC 料与 PCM 料组合使用具有成本低、综合力学性能各方向差异性小的优势, 为实际生产制品时组合用料提供了依据。

关键词: 玻纤增强复合材料; 拉伸; 弯曲; 冲击性能; 模压工艺;

中图分类号: TQ314.263 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)07-0040-04

Mechanical Properties of SMC and PCM Compression Molding Parts

Jia Zhixin¹, Liu Lijun¹, Li Jiqiang¹, Wang Shaofeng², Peng he²

(1. Ningbo Tech University, Ningbo 315100, China; 2. Ningbo City EPL Mould & Plastic Co, Ltd, Ningbo 315615, China)

Abstract : By using combination of prepreg compression molding (PCM) materials with continuous glass fiber orthogonal woven fabric and sheet molding compound (SMC) materials with chopped fiber glass fiber, box cover parts were compressed and the mechanical properties were tested. The tensile properties and bending properties were tested and analyzed for the specimens obtained from the parts on different location and orientation. The results show that the tensile strength of specimens obtained from different location and orientation of the PCM with SMC parts varies over a large range, while the tensile strength vary over a small range. The products of PCM with SMC have better comprehensive mechanical properties than SMC while less than PCM. The average tensile strength for the PCM with SMC products is about 1.5 times that of SMC material, one third of PCM material; The average bending strength for the PCM with SMC products is about 2 times that of SMC material, one third of PCM material. The distribution and aggregation of glass fiber is the main reason for the difference of mechanical properties of samples at different positions for products of SMC and PCM. Compared with single PCM material, combination of SMC and PCM composite material has the advantages of low cost and even comprehensive mechanical properties in all directions. The result of the study can provide a way for combination application of SMC and PCM material for practical production.

Keywords : glass fiber reinforced composite materials; tensile; bending; impact properties; compress molding

复合材料具有密度小、比强度高、比模量大且可设计的优势, 在航空航天、汽车工业、建筑建材和医学等领域得到广泛应用^[1-4]。玻璃纤维增强树脂基复合材料具有较低的制造成本和良好的力学性能, 是广泛应用的复合材料^[5], 许多学者从材料制备

及性能测试角度开展了研究。卫新亮等^[6]研究了玻璃纤维增强树脂基复合材料搭接-缝合后的剪切性能; 李德等^[7]、李益俊等^[8]、张娟等^[9]、李宁等^[10]分析了玻璃纤维添加量对复合材料结构成型与力学性能的影响; 卢军凯等^[11]、刘小祥等^[12]、胡章平^[13]

基金项目: 宁波市“科技创新 2025”重大专项 (2019B10053)

通信作者: 贾志欣, 教授, 研究方向为复合材料模压成型工艺

收稿日期: 2022-03-24

引用格式: 贾志欣, 刘立君, 李继强, 等. SMC 与 PCM 组合模压件的力学性能 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(7):40-43, 70.

Jia Zhixin, Liu Lijun, Li Jiqiang, et al. Mechanical properties of SMC and PCM compression molding parts[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):40-43, 70.

制备了连续玻璃纤维增强的复合材料并分析了其力学性能;刘阔等^[14]采用玻璃纤维增强不饱和聚酯基复合材料,研究了玻纤含量、成型压力对模压件的拉伸、冲击性能的影响,为原料选择及模压成型工艺参数确定提供了参考。

目前,玻璃纤维增强复合材料主要有短切玻纤增强片状模塑料(SMC)和连续玻璃纤维增强环氧树脂基预压料(PCM),吴凤楠等^[15]结合具体模压成型制品进行了力学性能分析,采用环氧树脂基短切玻纤增强SMC料与正交网格编织的连续玻璃纤维增强PCM料模压成型盒子制品,切割了不同部位和取向的试样,对比分析了拉伸、弯曲性能,发现对应部位PCM料成型的盒子力学性能比SMC料的高3~6倍,但PCM料模压成型的制品拉伸、弯曲性能各向异性显著。

由于连续玻纤增强PCM料价格高,笔者从优化制品性能、节省成本角度出发,组合使用环氧树脂基SMC与PCM料,模压相同的盒型件,研究了其拉伸、弯曲和冲击性能并总结了规律,并分析了原因,可为复合材料组合选用进行制品模压生产提供依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SMC:0400 H-14 NAT 01150,玻璃纤维长度25 mm,玻璃纤维质量分数为 $(29 \pm 2)\%$,律通复合材料(上海)有限公司;

PCM:EV101-UL-40%-EWR400-400gsm,连续玻璃纤维,正交编织,玻璃纤维质量分数为 $(29 \pm 2)\%$,江苏恒神股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

液压机:200T型,天津市天锻压力机有限公司;
万能试验机:Zwick/Roell Z030型,德国Zwick公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM):FEI QUANTA 250 FEG型,美国FEI公司;

3D激光激光扫描显微镜:OLS5100型,日本奥林巴斯公司;

超景深显微镜:DSX1000型,日本奥林巴斯公司。

1.3 复合材料试验试样的制备

分别采用短切玻璃纤维增强的环氧树脂基SMC料和连续纤维正交编织的环氧树脂基PCM料组合,通过模压成型方法成型出如图1所示的盒

状模压制品。制件外形总体尺寸为 $520\text{ mm} \times 320\text{ mm} \times 69.5\text{ mm}$,盒子顶部外圆角为 $R6.5$,侧面圆角为 $R11.5$,拔模斜度为 3° ,壁厚 $(1.45 \pm 0.1)\text{ mm}$,边缘处壁薄。盒子A的材料用量为0.3 kg的SMC料与0.33 kg的PCM料,盒子B的材料用量为0.33 kg的SMC料与0.39 kg的PCM料。

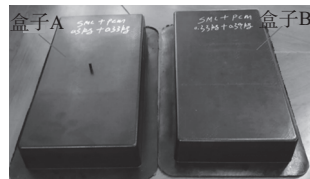


图1 SMC+PCM模压制品外形图

模压时先在凸模上铺好PCM片材,再放置SMC料,按相同的模压工艺参数制备了A、B两个盒子;同时制备纯SMC料盒子C、纯PCM料盒子D用于对比。

针对制备的4个盒型件A、B、C、D,按照GB/T1447-2005、GB/T1449-2005、ISO 179-1-2000的规定,通过数控铣床加工出拉伸、弯曲与冲击试样。试样的切割方案如图2所示。

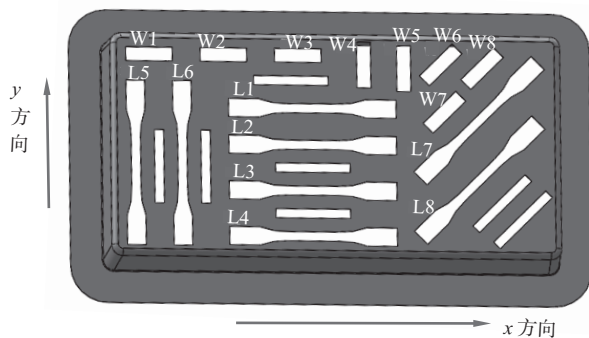


图2 试样切割图

按照预定的实验方案,在如图2所示的指定位置切割下试验所需的试样编号分组,其中8个拉伸试样,8个弯曲试样。

拉伸试样8个,为L1~L8,其中L1~L4平行于盒子长边x方向,L5,L6平行于短边y方向,L7,L8为与x轴成 45° 角方向;弯曲试样8个,为w1~w8,其中w1~w3平行于盒子长边x方向;w4和w5平行于盒子短边y方向,w6,w7和w8为与x轴成 45° 角方向。

1.4 性能测试

拉伸性能按照GB/T 1447-2005,使用气动夹具夹紧试样、引伸计记录延伸率。设置拉伸速度为 2 mm/min ,拉伸标距为 50 mm ;

弯曲性能按照 GB/T1449-2005,跨距采用 16 倍的壁厚,对试样以 2 mm/min 的速度进行连续加载;

形貌采用 SEM、3D 激光扫描显微镜、超景深显微镜进行观察,环境温度为 20℃,环境湿度为 48% RH。

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

盒子 A、B 的复合材料试样的拉伸强度测试结果与纯 SMC 盒子 C、纯 PCM 盒子 D 的测试结果见表 1。

表 1 四个模压成型盒子试样拉伸强度测试结果 MPa					
试样	盒子 A	盒子 B	盒子 C	盒子 D	备注
L1	84.6	117.1	64.1	514.0	x 方向
L2	90.3	110.8	72.3	480.8	x 方向
L3	117.6	111.6	67.9	483.6	x 方向
L4	121.8	110.7	61.9	532.8	x 方向
L5	176.2	130.7	125.3	336.0	y 方向
L6	186.3	178.9	104.2	381.2	y 方向
L7	65.8	101.8	68.2	156.3	45°
L8	72.5	102.3	67.2	138.2	45°
平均值	114.4	120.5	78.9	377.9	

4 个盒子试样的力学性能均存在差异,表现出一定的各向异性。A、B 盒子制件在 x 向上的拉伸强度在 84.6~121.8 MPa,而 y 向取向试样的拉伸强度为 130.7~186.3 MPa,与 x 向成 45° 方向试样的拉伸强度最低,最低值为 65.8 MPa; A、B、C 盒子呈现的规律为 y 方向的试样拉伸强度最大,其次为 x 方向试样,45° 方向最低,与文献 [14] 的结果相一致;单纯使用 PCM 料的盒子试样拉伸强度则是 x 方向的试样拉伸强度最大,其次为 y 方向试样,45° 方向最低。

对比 4 个盒子试样的拉伸强度看,不同位置和方向试样的拉伸强度有差别,与单一采用 PCM 制备试样的拉伸强度 (138.2~532.8Mpa)、单一采用 SMC 制备试样的拉伸强度 (61.9~125.3Mpa) 相比,组合使用 SMC 与 PCM 后,试样的拉伸强度优于 SMC 试样,低于 PCM 试样,拉伸强度值比单一原料在各方向更趋于均匀,特别是在 45° 方向有较大改善。

由于两种料组合进行复合模压, A、B 拉伸强度平均值约为单用 SMC 料的 1.5 倍,单用 PCM 料的 1/3。

从 SMC 和 PCM 不同的配料组合看,盒子 B 试样比盒子 A 试样的拉伸强度更趋于均匀。

2.2 弯曲性能

盒子 A、B 试样的弯曲强度测试结果见表 2。分析可以看出,盒子 A、B 不同位置的试样弯曲强度为 274.7~390.6 MPa,两个盒子的 45° 方向取样的 w7 的弯曲强度最低,其余试样的弯曲强度分布基本一致。盒子 A、B 在 x、y 方向试样比单一用 SMC 料的 C 盒子弯曲强度 (147.4~191.9 MPa) 高,但比 PCM (499.4~632.8 MPa) 稍低。由于两种料组合进行复合模压, A、B 弯曲强度平均值约为单用 SMC 料的 2 倍,单用 PCM 料的 2/3。

表 2 四个模压成型盒子试样弯曲强度测试结果 MPa					
试样	盒子 A	盒子 B	盒子 C	盒子 D	备注
w1	(254.1)	348.4	191.9	557.9	x 方向
w2	(302.2)	284.9	158.1	603.3	x 方向
w3	355.1	(225.7)	158.6	632.8	x 方向
w4	390.6	342.2	157.7	513.9	y 方向
w5	(353.7)	缺失	147.4	499.4	y 方向
w6	300.2	305.0	152.0	357.2	45°
w7	276.8	274.7	145.4	366.3	45°
w8	309.0	382.2	146.4	358.0	45°
平均值	326.35 ^{*1}	322.9 ^{*2}	157.2	486.1	

注: *1 表示 A 盒子弯曲试样 w1 和 w2 测试加载有误, w5 试样加工有误,在平均值计算时去掉; *2 表示 B 盒子弯曲试样 w3 有缺口, w5 试样缺失,在平均值计算时去掉。

2.3 宏观玻璃纤维分布分析

为进一步分析导致力学性能差异的原因,从 C、D 盒子制品上分别截取 4 mm 左右的片材,在三维激光扫描和超景深显微镜下观察宏观玻璃纤维分布,结果如图 3 所示。从图 3a 可看出, SMC 料模压成型后短切玻璃纤维呈簇状无序分布,方向不定,这就造成其拉伸和弯曲性能在不同取样位置和方向的性能有差异;从图 3b 可看出, PCM 料在模压成型后,连续的玻璃纤维保持正交网格分布,因此力学性能在沿纤维分布的方向优异,但在 45° 方向薄弱。

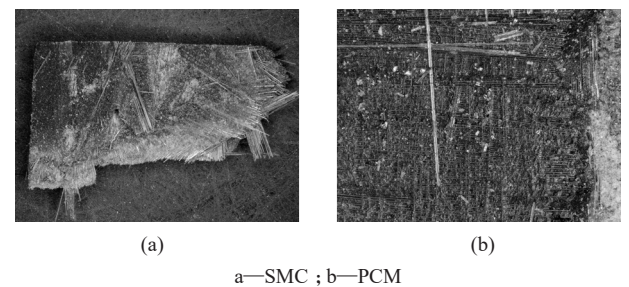
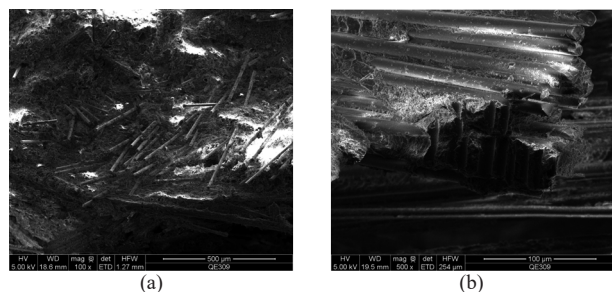


图 3 试样的宏观玻璃纤维分布

2.4 微观断口形貌分析

为进一步分析断裂性质,分别对 SMC 试样和 PCM 试样断口进行了 SEM 分析,结果如图 4 所示。



a—SMC ; b—PCM

图4 试样的SEM断面形貌

由图4a可看出,SMC试样断面既有散乱的玻璃纤维脆性断裂,也有玻璃纤维从基体树脂的剥离。纯SMC盒子试样中的玻璃纤维呈现簇状无序分布,没有明显的方向性,在 45° 和 x 方向的拉伸性能相差不大;但在模压成型流动过程中,位于 y 方向部位的两个试样L5和L6,由于树脂带动纤维要跨越弯曲角部位,导致纤维在该部位聚集并呈现沿 y 向分布^[16],造成SMC试样L5和L6的拉伸强度明显提高。复材试样弯曲强度不仅和纤维分布有关,还和试样表面质量有关,各SMC试样的弯曲强度相差不大。

由图4b可看出,PCM试样由于连续玻璃纤维的正交分布,呈现出断口的同向一致性脆性断裂以及与基体树脂剥离。PCM原料中的玻璃纤维为正交铺放的连续纤维,由于成型后 x 方向纤维密度比 y 方向的纤维密度高,导致 x 方向的拉伸强度和弯曲强度均大于 y 方向的,在 45° 方向为最薄弱,拉伸强度、弯曲强度均低于 x,y 方向。

当两种料组合使用后,由于无序分布的短切簇状玻璃纤维与正交分布的连续玻璃纤维共同作用,拉伸强度与弯曲强度呈现出均匀化的效果,在 45° 方向尤其显著。

3 结论

从PCM料与SMC料组合使用模压盒子制品取样的拉伸、弯曲性能测试结果表明:

(1) PCM与SMC组合料盒子试样取自制品的不同位置,拉伸强度有显著变化,表现出一定的各向异性,呈现的规律为 y 方向的试样拉伸强度最大,其次为 x 方向试样, 45° 方向最低;弯曲强度有变化,但变化不大。

(2) 从PCM与SMC组合料盒子试样的拉伸强度与弯曲强度分析,两种料组合的模压制品力学性能优于SMC试样,但低于PCM试样;与单用PCM与SMC模压制品相比,PCM与SMC组合料混合

后的力学性能不同位置差距减小,即各向异性差距减小,具有较好的综合力学性能和成本优势。

(3) 模压成型后制品中短切玻璃纤维分布、聚集程度和连续正交玻璃纤维分布状态是导致模压制品不同位置试样力学性能差异的主要原因。

参考文献

- [1] 赵渊博,任学勤,李文雅. 纺织复合材料在汽车领域的应用[J]. 轻纺工业与技术,2021,50(5):64-65.
Zhao Yuanbo, Ren Xueqin, Li Wenya. Application of textile composite materials in automobile field[J]. Light and Textile Industry and Technology.2021,50(5):64-65.
- [2] 张鑫玉,高婷,朱坤,等. 复合材料螺旋桨整体模压成型模具设计技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2019(6):111-114.
Zhang Xinyu, Gao Ting, Zhu Kun, et al. Research on design technology of molding mold for composite propeller[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2019(6):111-114.
- [3] 刘海鑫,徐佳,朱坤,等. 碳纤维复合材料导管叶片模压模具设计[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(9):91-95.
Liu Haixin, Xu Jia, Zhu Kun, et al. Mold design of carbon fiber composite propeller blade used for compression molding[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2016(9):91-95.
- [4] 王敬超,乔爱红,周珊,等. 玻璃纤维增强复合材料在口腔医学中的研究进展[J]. 医学综述,2021,27(3):545-549.
Wang Jingchao, Qiao Aihong, Zhou Shan, et al. Research progress of glass fiber reinforced composites in stomatology[J]. Medical Recapitulate.2021,27(3):545-549.
- [5] 韦鑫,沈兰萍. 玻璃纤维的研究现状及发展趋势[J]. 成都纺织高等专科学校学报,2016,33(4):178-181.
Wei Xin, Shen Lanping. Research status and development trend of glass fiber[J]. Journal of Textile Science and Engineering,2016,33(4):178-181.
- [6] 卫新亮,张智敏,温伟,等. 玻璃纤维增强树脂基复合材料搭接-缝合连接后剪切性能研究[J]. 化工新型材料,2021,49(6):171-173.
Wei Xinliang, Zhang Zhimin, Wen Wei, et al. Study on shear property of glass fiber reinforced resin matrix composite with a joint way of lap-stitch[J]. New Chemical Materials.2021,49(6):171-173.
- [7] 李德,黄冬梅,陈晨,等. 玻璃纤维对气凝胶复合材料结构与性能的影响[J]. 化工新型材料,2021,49(7):122-125.
Li De, Huang Dongmei, Chen Chen, et al. Influence of glass fiber on structure and property of reinforced aerogel composite[J]. New Chemical Materials.2021,49(7):122-125.
- [8] 李益俊,辛勇. 玻纤含量对玻纤增强聚碳酸酯微结构成型及力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2019,35(5):27-31.
Li Yijun, Xin Yong. Effect of glass fiber content on microstructure forming and mechanical properties of glass fiber reinforced polycarbonate[J]. Polymer Materials Science & Engineering.2019,

(下转第70页)

- selective laser sintering process conditions using stable sintering region approach[J]. *Express Polymer Letters*, 2021, 15(2):177–192.
- [8] Ha S, Park E & Kim N. Analysis of shape deformation from densification of additive manufacturing parts in selective laser Sintering[J]. *Int J Precis Eng Manuf*, 2020, 21:1 571–1 580.
- [9] Shen F, Zhu W, Zhou K, et al. Modeling the temperature, crystallization, and residual stress for selective laser sintering of polymeric powder[J]. *Acta Mech*, 2021, 232:3 635–3 653.
- [10] 杨来侠, 赵贞慧. PS/CF 复合粉末激光选区烧结工艺研究 [J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(5):43–46.
- Yang Laixia, Zhao Zhenhui. Study on process of PS/CF composite powders based on selective laser sintering[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(5):43–46.
- [11] 杨来侠, 陈梦瑶, 赵贞慧. GF/ 碳酸钙复合改性 PS 选择性激光烧结实验 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(8):44–49.
- Yang Laixia, Chen Mengyao, Zhao Zhenhui. Selective laser sintering experiment of polystyrene modified by vapor deposited CF[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(8):44–49.
- [12] 杨来侠, 陈梦瑶, 赵贞慧. 气相沉积 CF 改性 PS 的选择性激光烧结 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(9):52–56.
- Yang Laixia, Chen Mengyao, Zhao Zhenhui. Selective laser sintering experiment of polystyrene modified by vapor deposited CF[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(9):52–56.
- [13] Mousa A A. Experimental investigation of curling phenomenon in selective sintering process[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22(2):405–415.
- [14] Hsueh C H, Lee S, Lin H Y. Analyses of mode I edge delamination by thermal stresses in multilayer systems[J]. *Composites:(Part B)*, 2006, 37:1–9.
- [15] 闫春泽, 史玉升, 杨劲松, 等. 高分子材料 SLS 中次级烧结实验 [J]. *华中科技大学学报*, 2008, 36(5):86–89.
- Yan C Z Shi Y S, Yang J S, et al. Secondary sintering of selective laser sintering polymeric materials[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2008, 36(5):86–89.
- [16] 童强, 薛凯华, 姚山. 基于次级烧结区域调控的 SLS 制件控形控性研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12):1–8.
- Tong Qiang, Xue Kaihua, Yaoshan. Accuracy and performance controlling of part made by selective laser sintering based on secondary sintering region regulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12):1–8.
- composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(3):617–622.
- [13] 胡章平. 长玻璃纤维增强聚丙烯复合材料模压成型工艺研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- Hu Zhangping. Study on forming process of long glass fiber reinforce polypropylene composites[D]. Changsha:Hunan University, 2015.
- [14] 刘阔, 吴凤楠, 贾志欣, 等. 玻纤增强 UP 基复合材料大巴空调罩力学性能 [J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(10):115–119.
- Liu Kuo, Wu Fengnan, Jia Zhixin, et al. Mechanical properties of glass fiber reinforced UP matrix composite for bus air conditioning cover[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(10):115–119.
- [15] 吴凤楠, 刘阔, 贾志欣, 李继强, 刘立君, 王少峰, 彭河. SMC 与 PCM 复合材料模压件力学性能 [J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(12):118–122.
- Wu Fengnan, Liu Kuo, Jia Zhixin, et al. The mechanical properties of SMC and PCM compression molding parts. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(12):118–122.
- [16] Lisa M, Processing studies in sheet molding compound compression molding [D]. Columbus:The Ohio State University, 2001.
- (上接第 43 页)
- [9] 张娟, 宁莉萍, 杨红军, 等. 玻璃纤维含量对竹粉 / 高密度聚乙烯复合材料性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(3):477–485.
- Li Juan, Ning Liping, Yang Hongjun, et al. Effects of glass fiber content on properties of bamboo flour/high density polyethylene composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(3):477–485.
- [10] 李宁, 周进雄. 玻璃纤维增强铝合金层合板低速冲击响应分析 [J]. *应用力学学报*, 2021, 38(3):1 011–1 015.
- Li Ning, Zhou Jinxiong. Low speed impact response analysis of glass fiber reinforced aluminum alloy laminates[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(3):1 011–1 015.
- [11] 卢军凯, 王之冰. 连续玻璃纤维增强聚氨酯复合材料的力学性能 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(3):31–35.
- Lu Junkai, Wang Zhibing. Mechanical properties of continuous glass fiber reinforced polyurethane composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(3):31–35.
- [12] 刘小祥, 刘翼, 安珈璇, 等. 连续长玻璃纤维 / 聚氨酯复合材料的制备与力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(3):617–622.
- Liu Xiaoxiang, Liu Yi, An Jiakuan, et al. Preparation and mechanical properties of continuous long glass fiber/polyurethane