

包装箱用混杂纤维复合材料的设计

林洁, 覃霞玲

(广西民族大学相思湖学院, 南宁 530008)

摘要: **目的** 研究混杂纤维复合材料在静载荷作用和拉-拉疲劳载荷条件下的力学性能及其在包装箱等领域的应用。**方法** 采用树脂转移模塑成型工艺制备5种包装箱用混杂纤维复合材料, 并对试样进行拉伸性能和拉-拉疲劳性能测试。**结果** 纯C试样的拉伸强度高于C/G层内和C/G层间试样; 在相同的铺层和织布方式下, C/G层内试样的拉伸强度高于C/G层间试样; 纯G试样的塑性明显优于C/G层内和C/G层间试样, C/G层内试样的断裂伸长率高于C/G层间试样; C/G层内试样具有混杂正效应, 可保证在具有较高强度的同时具备良好塑性。玻璃纤维在提高复合材料料板疲劳寿命上的作用要高于芳纶纤维, 前者的刚度退化会低于后者, 且碳纤维和玻璃纤维的层内混杂方式要优于层间混杂, 层间混杂在复合材料抵抗疲劳损伤时具有正混杂效应。

关键词: 碳纤维; 包装箱; 混杂方式; 拉伸性能; 疲劳寿命

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)17-0103-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.014

Design and Performance of Hybrid Fiber Composite for Packaging Box

LIN Jie, QIN Xia-ling

(Xiangsihu College of Guangxi University for Nationalities, Nanning 530008, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the mechanical properties of materials under static load and tensile-tension fatigue loading conditions, and the application of hybrid fiber composites in packaging boxes and other fields. Five types of hybrid fiber composites for packaging boxes prepared by resin transfer molding were tested for tensile properties and tensile-tension fatigue properties. The tensile strength of the pure C sample was higher than that of the C/G layer and the C/G interlayer. Under the same layup and weaving method, the tensile strength of the sample in the C/G layer was higher than of the C/G interlayer sample; the plasticity of the pure G sample was significantly higher than that of the C/G layer and C/G interlayer samples, and the elongation of the C/G layer samples after breaking was higher. In the C/G interlayer sample; the C/G layer sample had a hybrid positive effect, which can ensure good plasticity while having high strength. The role of glass fiber in improving the fatigue life of composite materials was higher than that of aramid fiber. The former had lower stiffness degradation than the latter, and the inter-layer hybrid method of carbon fiber and glass fiber was better than inter-layer hybrid. The composite had a positive hybrid effect when resisting fatigue damage.

KEY WORDS: carbon fiber; packaging box; hybrid mode; tensile property; fatigue life

碳纤维与其他基体材料复合制作而成的碳纤维复合材料具有强度高、质量轻、高档美观、造型灵活

等特点^[1], 可适用于各类高档产品的外型包装, 也可用于其他产品的防护, 且可根据特定的实际用途设计

收稿日期: 2019-12-16

基金项目: 2019年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2019KY1010)

作者简介: 林洁(1983—), 女, 硕士, 广西民族大学相思湖学院讲师, 主要研究方向为包装材料。

制作。在使用过程中可减少故障和缺陷,达到高的卷装密度且不易发生包装件坍塌等现象^[2],目前混杂纤维复合材料以价格低、设计性强等特性成为碳纤维复合材料领域重要的发展方向^[3]。目前的复合材料纤维增强体种类较多,如碳纤维、玻璃纤维、芳纶、亚麻等,各自都有优点。增强纤维复合材料的研究多集中在单向纤维上,对二维机织结构混杂纤维复合材料的研究较少^[4],因此对于材料在静载荷作用和拉-拉疲劳载荷条件下的力学性能特征仍不清楚。在此基础上,文中拟制备5种包装箱用混杂纤维复合材料,并对试样进行拉伸性能和拉-拉疲劳性能测试,结果将有助于混杂纤维复合材料在包装箱等领域应用。

1 实验

以纯玻纤方格布(G)、纯碳纤方格布(C)、碳/玻

混杂方格布(C/G)和碳/芳纶混杂方格布(C/F)制备混杂纤维编织材料,方格布种类见图1,G,C,C/G和C/F的排列密度都为4.6束/cm,面密度分别为332,222,277和197 g/cm²。

采用树脂转移模塑成型工艺制备了包装箱用板料,具体工艺过程为模具准备(模具表面擦拭3遍脱模剂)、铺层(将织物整齐平铺在模具中,铺放顺序见表1)、合模(上模和下模合拢并将周边紧固)、树脂注射(按照环氧树脂与固化剂的质量比为1:0.06混合均匀,随后注入模具中,使编织物充分浸润)、固化(置于加热炉中固化1.6 h)、脱模(分离上下模并检测有无缺陷)和后处理(清理模具和注胶设备),纤维复合材料的三维示意图见图2。

参照GBT 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》和GB/T 16779—1997《纤维增强塑料层合板拉-拉疲劳性能试验方法》,采用美国MTS809电

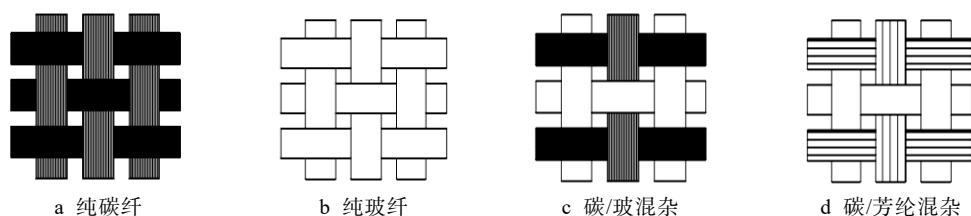


图1 平面双向编织材料种类
Fig.1 Types of planar bidirectional braided materials

表1 织物铺层顺序
Tab.1 Fabric laying sequence

层数	G	C	C/G 层内混杂	C/G 层间混杂	C/F 层内混杂
8	G ₈	C ₈	[C/G] ₈	[C,G] ₈	[C/F] ₈
12	G ₁₂	C ₁₂	[C/G] ₈	[C,G] ₈	[C/F] ₈

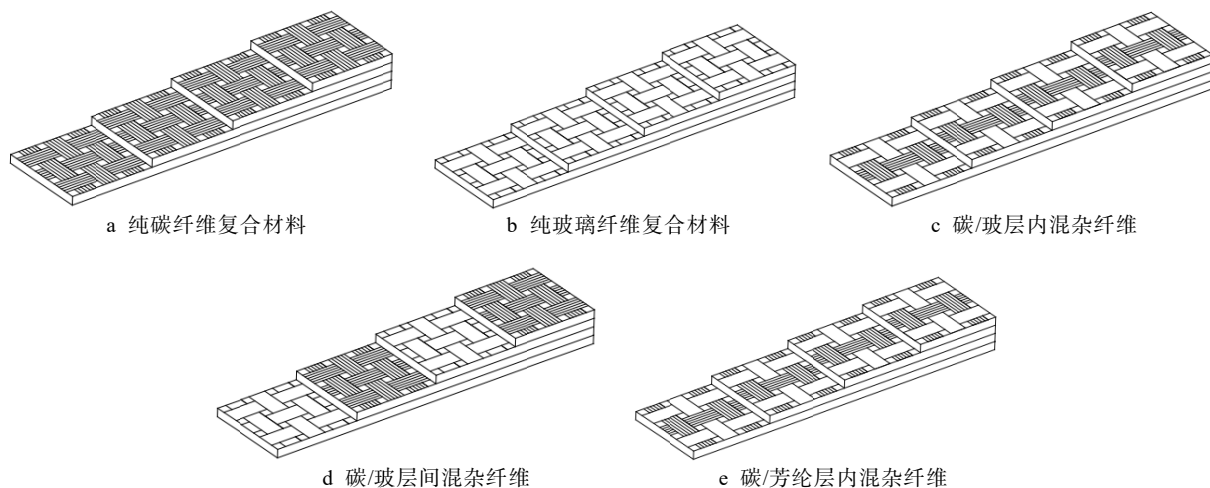


图2 纤维复合材料的三维示意
Fig.2 Three dimensional schematic diagram of fiber composites

液伺服低频疲劳试验机（见图 3）对包装箱用板料进行拉伸性能和拉-拉疲劳性能测试。测试温度为室温，相对湿度为 50%，拉伸速率为 2 mm/min、加载频率为 10 Hz，引伸计标距为 20 mm，最小应力/最大应力为 0.1，最大应力设置为抗拉强度的 70%。疲劳试验结束后进行疲劳寿命曲线拟合，如果最终循环次数高于 10^6 ，则视为永久寿命并停止试验。



图 3 疲劳试验机
Fig.3 Fatigue testing machine

2 结果及讨论

对纯 C、C/G 层内、C/G 层间、C/F 层内和纯 G 板料进行室温拉伸性能测试，结果见表 2，同时列出了混杂纤维复合材料的价格参数。对比分析可见，从弹性模量上看，混杂纤维复合材料中纯 C 板料的弹性模量最高，纯 G 板料的弹性模量最小；从抗拉强度上看，C/G 层内板料的抗拉强度最大，C/G 层间板料的抗拉强度最小；从价格上看，纯 C 板料的价格最高，纯 G 板料的价格最低。

表 2 混杂纤维复合材料的性能和价格参数
Tab.2 Properties and price parameters of hybrid fiber composites

试样	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	价格/ (元·kg ⁻¹)
C	56.00	574	500
C/G 层内	50.49	632	275
C/G 层间	43.95	458	275
C/F 层内	48.46	578	400
G	33.08	507	20

纯 C、C/G 层内和 C/G 层间试样的力-位移曲线见图 4，其中，这 3 种试样都为 8 层二维机织布。可见，纯 C 试样的拉伸强度高于 C/G 层内和 C/G 层间试样，这主要是因为碳纤维的强度高于玻璃纤维，因此在相同的铺层和织布方式下，C/G 层内和 C/G 层间试样的拉伸强度要低于纯 C 试样。C/G 层内试样的拉伸强度高于 C/G 层间试样，这主要是因为 C/G 层内试样中的碳纤维与玻璃纤维交替编制可以发挥二者的协同作用，C/G 层间试样中的碳纤维与玻璃纤维都各自分布在一层，无法实现协同用，进而使得拉伸强度较低^[5-7]。

C/G 层内、C/G 层间和纯 G 试样的力-位移曲线见图 5。这 3 种试样都为 8 层二维机织布，可见，C/G 层内和 C/G 层间试样的拉伸强度高于纯 G 试样，这主要是因为碳纤维的强度高于玻璃纤维所致，且在受拉断裂过程中，C/G 层内试样的碳纤维和玻璃纤维为交替变质状态，会使得碳纤维素断裂后出现玻璃纤维，造成力-位移曲线并不平滑。从断口伸长率测试结果来看，纯 G 试样的塑性明显要高于 C/G 层内和 C/G 层间试样，这主要是因为碳纤维的塑性低于玻璃

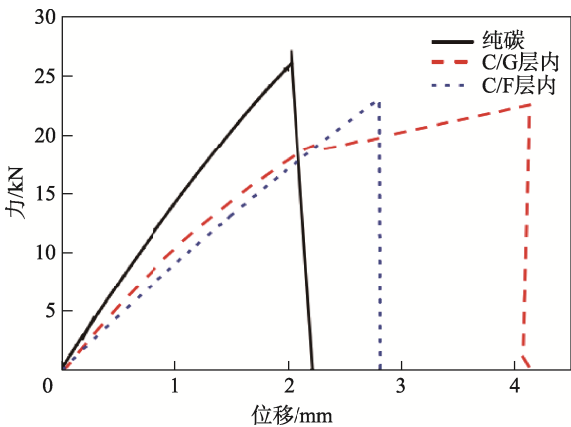


图 4 混杂纤维复合材料的力-位移曲线
Fig.4 Force-displacement curves of hybrid fiber composites

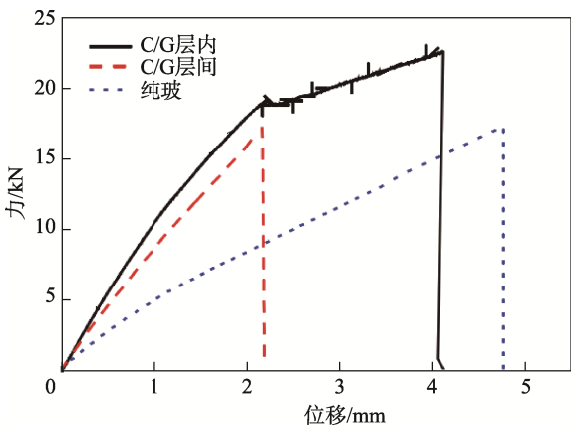


图 5 混杂纤维复合材料的力-位移曲线
Fig.5 Force-displacement curves of hybrid fiber composites

纤维。此外, C/G 层内试样的断裂伸长率要高于 C/G 层间试样, 这与碳纤维和玻璃纤维的存在形式有关, 因为会影响二者的协同作用^[8-10]。整体而言, C/G 层内试样具有混杂正效应, 可保证在具有较高强度的同时具备良好塑性。

对比分析纯 C、C/G 层内和 C/F 层内试样的力-位移曲线, 结果见图 6。由图 6 可知, C/G 层内和 C/F 层内试样的拉伸强度明显高于纯 C 试样, C/G 层内和 C/F 层内试样的拉伸强度相当。纯 C、C/G 层内与 C/F 层内试样的断裂伸长率从大至小顺序为 C/G 层内、C/F 层内、纯 C, 这主要是因为玻璃纤维和芳纶纤维的强度较为接近^[11]。此外, 后者的断裂伸长率要低于前者, 且都高于碳纤维。再综合表 2 的纯 C、C/G 层内和 C/G 层间试样的价格参数可知, C/G 层内混杂纤维复合材料具有最佳的性价比。

混杂纤维复合材料的正则化疲劳寿命曲线见图 7, 图中 N 为疲劳寿命, 应力水平是指对试件循环加载时的最小载荷与最大载荷之比。可见, 纯 C、C/G 层内、C/G 层间、C/F 层内、纯 G 板料间的正则化疲

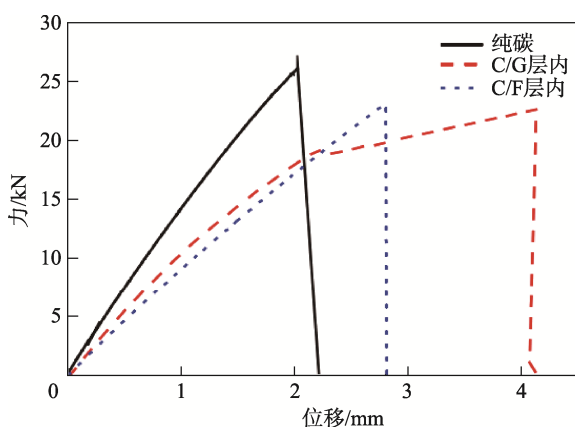


图 6 混杂纤维复合材料的力-位移曲线

Fig.6 Force-displacement curves of hybrid fiber composites

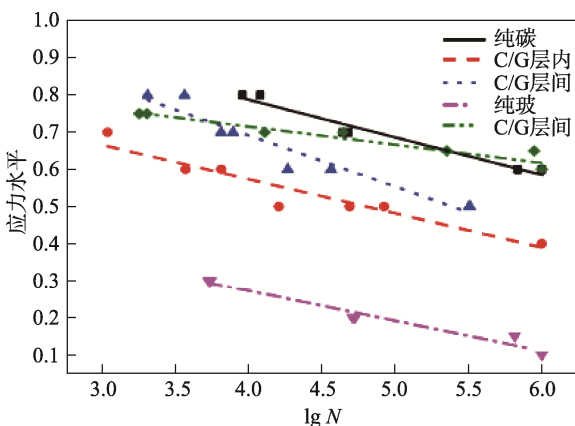


图 7 混杂纤维复合材料的正则化疲劳寿命曲线

Fig.7 Regularized fatigue life curve of hybrid fiber composites

劳寿命存在一定差异, 其中, 纯 G 板料的线条在最下方, 疲劳性能最差, 纯 C 板料的线条在最上方, 疲劳性能最好; C/F 试样的疲劳性能优于 C/G 层间试样和 C/G 层内试样, 且 C/G 层间试样抵抗疲劳的性能高于 C/G 层内试样。

混杂纤维复合材料的最大应力疲劳寿命曲线见图 8。对比分析可见, 纯 C、C/G 层内、C/G 层间、C/F 层内和纯 G 试样的疲劳寿命都随着应力的增大而增加; 在最大应力相同时, 疲劳寿命从高至低顺序为纯 C、C/F 层内、C/G 层内、C/G 层间、纯 G 试样, 这与图 5 所示混杂纤维复合材料的正则化疲劳寿命曲线的结果有所差异, 这主要是因为 C/G 层内试样的拉伸强度远高于 C/G 层间试样, 反应在最大应力疲劳寿命曲线上则表现为同一寿命下 C/G 层内试样承受的最大应力高于 C/G 层间试样。

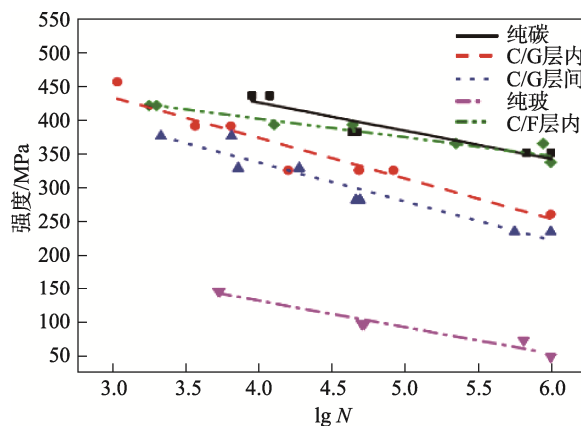


图 8 混杂纤维复合材料的最大应力疲劳寿命曲线

Fig.8 Maximum stress fatigue life curve of hybrid fiber composites

混杂纤维复合材料的疲劳刚度退化曲线见图 9。对比分析可知, 纯 C、C/G 层内、C/G 层间、C/F 层内和纯 G 试样的刚度在开始阶段均有明显下降, 随后趋于稳定直至最终疲劳断裂。这表明混杂纤维复合材料在疲劳试验开始阶段, 损伤会急剧增加, 从而造成刚度明显下降^[12-13], 经过一段时间后, 损伤逐渐平稳, 刚度缓慢下降。在应力水平为 0.6 时, 纯 C 试样的刚度最大、其次为 C/G 层内, 都高于 C/G 层间试样, 这主要是因为碳纤维的疲劳性能优于玻璃纤维, 且在 C/G 层内方式下, 可发挥碳纤维和玻璃纤维的协同作用。由于 C/G 层间试样的每层均为单独作用模式, 无法实现二者的协同作用, 因此在复合材料出现断裂时, 裂纹在 C/G 层间试样中的扩展速度较快^[14], 刚度性能会低于 C/G 层内试样。综合而言, 玻璃纤维在提高复合材料板疲劳寿命上的作用大于芳纶纤维, 前者的刚度退化会低于后者; 碳纤维和玻璃纤维的层内混杂方式优于层间混杂, 层间混杂在复合材料抵抗疲劳损伤时具有正混杂效应^[15]。

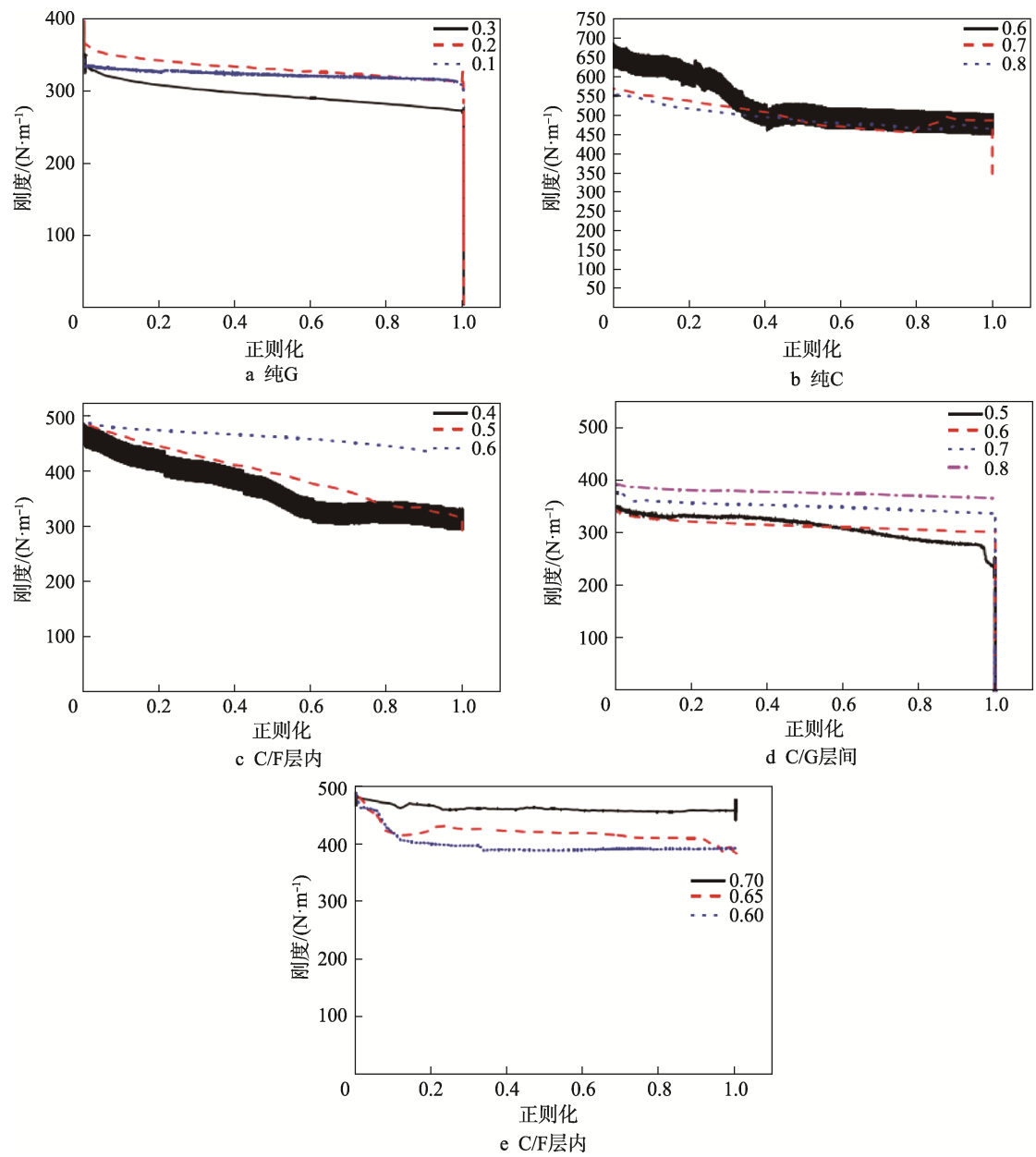


图 9 混杂纤维复合材料的疲劳刚度-正则化曲线
Fig.9 Fatigue stiffness regularization curve of hybrid fiber composites

3 结语

从弹性模量上看,混杂纤维复合材料中纯 C 板料的弹性模量最高,纯 G 板料的弹性模量最小;从抗拉强度上看,C/G 层内板料的抗拉强度最大,C/G 层间板料的抗拉强度最小;从价格上看,纯 C 板料的价格最高,纯 G 板料的价格最低。

纯 C 试样的拉伸强度高于 C/G 层内和 C/G 层间试样,在相同的铺层和织布方式下,C/G 层内试样的拉伸强度高于 C/G 层间试样;纯 G 试样的塑性明显高于 C/G 层内和 C/G 层间试样,C/G 层内试样的断裂伸长率高于 C/G 层间试样;C/G 层内试样具有

混杂正效应,可保证在具有较高强度的同时具备有良好塑性。

C/F 试样的疲劳性能优于 C/G 层间试样和 C/G 层内试样,且 C/G 层间试样的抗疲劳性能高于 C/G 层内试样;在最大应力相同时,疲劳寿命从高至低顺序为纯 C、C/F 层内、C/G 层内、C/G 层间、纯 G 试样。

参考文献:

[1] 樊萍,晏雄. 混杂纤维复合材料的研究进展[J]. 纺织科技进展,2008(1): 20—22.
FAN Ping, YAN Xiong. Research Progress of Hybrid Fiber Composite[J]. Textile Technology Progress,

- 2008(1): 20—22.
- [2] LIU J, TANG J, WANG X, et al. Synthesis, Characterization and Curing Properties of a Novel Cyclolinear Phosphazene-based Epoxy Resin for Halogen-free Flame Retardancy and High Performance[J]. RSC Advances, 2012, 2(13): 5789.
- [3] CHEN G X, SHIMIZU H. Multiwalled Carbon Nanotubes Grafted With Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane and Its Dispersion in Poly(l-lactide) Matrix[J]. Polymer, 2008, 49(4): 943—951.
- [4] CZIGNY T. Special Manufacturing and Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polypropylene Composites: Mechanical Properties and Acoustic Emission Study[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(16): 3210—3220.
- [5] WANG Q, XIONG L, LIANG H, et al. Synergistic Effect of Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane and Multiwalled Carbon Nanotubes on the Flame Retardancy and the Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2016, 55(12): 1146—1158.
- [6] MALLAKPOUR S, MADANI M. Effects of Glucose-functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes on the Structural, Mechanical, and Thermal Properties of Chitosan Nanocomposite Films[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(23): 67—70.
- [7] YAN X, SHEN H, YU L, et al. Polypropylene-glass Fiber/Basalt Fiber Hybrid Composites Fabricated by Direct Fiber Feeding Injection Molding Process[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(44): 672—675.
- [8] CHEN D, EL-HACHA R. Behaviour of Hybrid FRP-UHPC Beams in Flexure Under Fatigue Loading[J]. Composite Structures, 2012, 94(1): 253—266.
- [9] WU Z, WANG X, IWASHITA K, et al. Tensile Fatigue Behaviour of FRP and Hybrid FRP Sheets[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(5): 396—402.
- [10] YAN X, CAO S. Structure and Interfacial Shear Strength of Polypropylene-glass Fiber/Carbon Fiber Hybrid Composites Fabricated by Direct Fiber Feeding Injection Molding[J]. Composite Structures, 2018, 185: 362—372.
- [11] SAMAL S K, MOHANTY S, NAYAK S K. Polypropylene-bamboo/Glass Fiber Hybrid Composites: Fabrication and Analysis of Mechanical, Morphological, Thermal, and Dynamic Mechanical Behavior[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2009, 28(22): 2729—2747.
- [12] SAMAL S K, MOHANTY S, NAYAK S K. Banana/Glass Fiber-reinforced Polypropylene Hybrid Composites: Fabrication and Performance Evaluation[J]. Polymer-plastics Technology and Engineering, 2009, 48(4): 397—414.
- [13] ZHANG Z F, XIN Y. Mechanical Properties of Basalt-fiber-reinforced Polyamide-6/Polypropylene Composites[J]. Mechanics of Composite Materials, 2014, 50(4): 509—514.
- [14] HUU-DUC N T, VAN-THO H, VAN-TA D, et al. Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Polyamide-6/Polypropylene Composites for Lightweight Automotive Parts[J]. Materials, 2018, 11(3): 429—432.
- [15] MARTEL A, OLIVAS-ARMENDARIZ I. The Effect of Radiation on the Thermal Properties of Chitosan/Mimosa Tenuiflora and Chitosan/Mimosa Tenuiflora/Multiwalled Carbon Nanotubes (MWCNT) Composites for Bone Tissue[J]. Journal of Clinical & Experimental Investigations, 2014, 1607(1): 55—64.