

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.07.007

玻璃纤维增强聚苯硫醚夹芯复合结构力学性能

汤溢融, 周晓东

(华东理工大学化工学院, 上海市多相结构材料化学工程重点实验室, 上海 200237)

摘要:以膨化的长玻璃纤维增强聚苯硫醚复合材料为芯材,双向碳纤维织物增强聚碳酸酯为面板材料,通过热压成型制备夹芯复合结构。研究了不同夹芯复合结构厚度与芯层面密度对夹芯复合结构力学性能的影响,以及夹芯复合结构的弯曲破坏形式和侧压破坏形式。结果表明,随芯层厚度的增加,夹芯复合结构的弯曲强度、弯曲弹性模量、比弯曲强度、冲击强度、侧压强度和比侧压强度减小,而弯曲刚度和冲击总吸能先增大后减小,转折点发生在夹芯复合结构厚度为5 mm时。在夹芯复合结构厚度相同条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的弯曲强度、弯曲弹性模量、弯曲刚度、冲击强度、冲击总吸能和侧压强度增大;在夹芯复合结构厚度为4 mm或5 mm条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的比弯曲强度和比侧压强度减小;在夹芯复合结构厚度为6 mm条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的比弯曲强度先增大后减小,比侧压强度先减小后增大。夹芯复合结构的弯曲破坏形式是面板破坏和芯层分层;侧压破坏形式是压缩/弯曲破坏。

关键词:夹芯复合结构;玻璃纤维;聚苯硫醚;力学性能;破坏形式

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)07-0040-06

Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyphenylene Sulfide Sandwich Composite Structures

Tang Yirong, Zhou Xiaodong

(Shanghai Key Laboratory of Chemical Engineering for Multiphase Structural Materials,
School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : By hot pressing, a new sandwich composite structure was prepared, in which the expanded long glass fiber reinforced polyphenylene sulfide composite was used as core, and the bidirectional carbon fiber fabric reinforced polycarbonate was used as panel. The effects of different sandwich composite structure thickness and core layer area density on the mechanical properties of the sandwich composite structure, as well as the bending failure mode and edgewise compression failure mode of the sandwich composite structure were investigated. Test results show that, as the thickness of the core layer increases, the flexural strength, bending elastic modulus, specific flexural strength, impact strength, edgewise compression strength, and specific edgewise compression strength of the sandwich composite structure decrease, while the flexural stiffness and total impact energy absorption first increase and then decrease, the turning point occurs when the thickness of the sandwich composite structure is 5 mm. Under the condition of the same thickness of the sandwich composite structure, with the increase of the area density of the core layer, the bending strength, bending elastic modulus, bending stiffness, impact strength, total impact energy and edgewise compression strength of the sandwich composite structure increase. When the thickness of the core composite structure is 4 mm or 5 mm, as the core layer area density increases, the specific bending strength and the specific edgewise compressive strength of the sandwich composite structure decrease. When the thickness of the sandwich composite structure is 6 mm, as the area density of the core layer increases, the specific bending strength of the sandwich composite structure first increases and then decreases, and the specific edgewise compressive strength first decreases and then increases. The bending failure mode of sandwich composite structure is panel failure and core layer delamination, the edgewise compression failure mode is compression/bending failure.

Keywords : sandwich composite structure ; glass fiber ; polyphenylene sulfide ; mechanical property ; failure mode

通信作者: 周晓东, 博士生导师, 教授, 主要从事热塑性聚合物复合材料的制备与成型技术、多相多组分聚合物材料界面设计与控制、生物资源高分子材料高性能化和实用化技术等方面的研究

收稿日期: 2021-06-02

引用格式: 汤溢融, 周晓东. 玻璃纤维增强聚苯硫醚夹芯复合结构力学性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(7): 40-45.

Tang Yirong, Zhou Xiaodong. Mechanical properties of glass fiber reinforced polyphenylene sulfide sandwich composite structures[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(7): 40-45.

夹芯复合结构具有质量小、比强度高的性能特点,在航空航天、房屋建筑和轨道交通车辆等众多领域已得到较为广泛的实际应用^[1]。这些领域的发展对夹芯复合结构也提出了更高的要求,在提升力学性能的同时朝着轻量化的方向发展^[2-3]。将玻璃纤维毡增强热塑性复合材料(GMT)加热至基体熔点以上,材料会发生厚度方向的膨胀,在降低材料密度的同时,保留了 GMT 的部分力学性能,还具有不俗的隔音和隔热性能,具有取代传统铝合金、钢材的潜力,能很好地用于夹芯复合结构的芯层,满足夹芯复合结构轻量化的需求^[4-7]。目前,用于 GMT 的常见基材为聚丙烯(PP)和聚酰胺(PA),其使用占据总量的 90% 以上^[8]。以聚苯硫醚(PPS)为 GMT 的基体,保留了材料的膨胀特性,可以通过控制材料膨化后的压缩比以控制制品的厚度与体积密度,还能发挥 PPS 优越的性能,得到比 PP 基 GMT 和 PA 基 GMT 材料力学性能更加优异的 PPS 基 GMT 材料^[9]。目前对 PPS 基 GMT 的研究更多是如何优化与表征这种材料的各种性能^[10-15],鲜见将这种材料应用于夹层结构的制备,以更好地发挥材料低密度、高比强度的特性。

笔者利用热压成型方法,以膨化的 PPS 基 GMT 为芯材,双向碳纤维织物增强聚碳酸酯为面皮,制备夹芯复合结构,研究了夹芯复合结构芯层厚度与芯层面密度对夹芯复合结构力学性能的影响,以及夹芯复合结构的弯曲破坏形式和侧压破坏形式。

1 实验部分

1.1 主要原材料

膨化 PPS 基 GMT 片材:玻璃纤维(GF)含量为 60%, GF 长度为 15 mm,厚度分别为 3.2,4.2,5.2,6.2,7.2 mm,面密度分别为 1 300,1 650,2 000 g/m²,自制;

双向碳纤维(CF)织物增强聚碳酸酯(PC)片材:CF 含量为 57.8%,厚度为 0.4 mm,自制。

1.2 主要仪器与设备

中框模具:自制;

平板硫化机:QLB-25D/Q 型,无锡中凯橡塑机械有限公司;

电子万能材料试验机:CMT4204 型,深圳新三思材料检测有限公司;

冲击试验机:XJU-22 J 型,承德试验机有限责

任公司;

游标卡尺:110-120 型,精度为 0.01 mm,北京沿程科技有限公司。

1.3 样品制备

以厚度分别为 3.2,4.2,5.2,6.2,7.2 mm,面密度分别为 1 300,1 650,2 000 g/m² 的膨化 PPS 基 GMT 片材为芯材,双向 CF 织物增强 PC 片材为面皮,将双向 CF 织物增强 PC 片材和膨化 PPS 基 GMT 片材按照“三明治”形状放入上、下压板和中框模具中并固定,将压机预热至 265℃,在 1.5 MPa 压力下热压 90 s,完成后快速转移至冷压机上,在 1.5 MPa 压力下冷压,冷却至室温,取出,制备出夹芯复合结构厚度分别为 4,5,6,7,8 mm、芯层面密度分别为 3 000,3 350,3 700 g/m² 的夹芯复合结构。

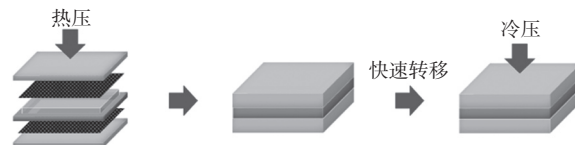


图1 夹芯复合结构热压成型工艺示意图

1.4 性能测试

弯曲性能按照 GB/T 1456-2005 测试;

冲击性能按照 GB/T 1451-2005 测试;

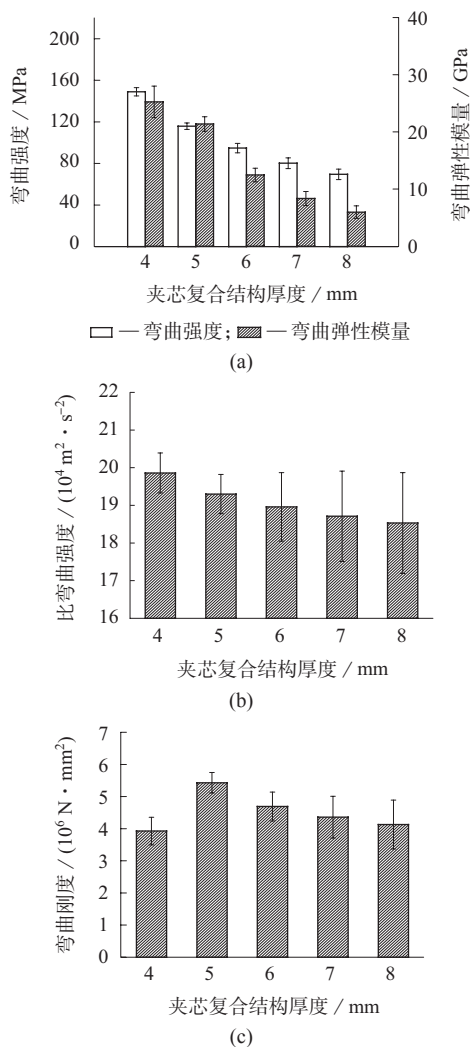
侧压性能按照 GB/T 1454-2005 测试。

2 结果与讨论

2.1 夹芯复合结构厚度对夹芯复合结构性能的影响

以片材面密度为 1 300 g/m² 的膨化 PPS 基 GMT 片材为芯材,制备夹芯复合结构厚度不同、芯层面密度为 3 000 g/m² 的夹芯复合结构。不同厚度夹芯复合结构的弯曲性能如图 2 所示。

由图 2a 和图 2b 可以看出,增加芯层厚度,即增大夹芯复合结构的厚度,夹芯复合结构的弯曲强度、弯曲弹性模量和比弯曲强度减小。这是因为随着芯层厚度的增加,芯层内孔隙率增大^[9],单位体积内 GF 和 PPS 骨架密度降低,力的传递与承载更困难。由图 2c 可以看出,夹芯复合结构的弯曲刚度随着芯层厚度的增加先增大后减小,转折点发生在夹芯复合结构厚度为 5 mm 时。这是因为弯曲刚度由弯曲弹性模量和夹芯复合结构厚度两个因素共同决定^[15],在芯层厚度较小时,夹芯复合结构厚度也较小,此时弯曲弹性模量降幅小,夹芯复合结构厚度对弯曲刚度的影响较大,同时随着芯层厚度的增加,受 PPS 约束的部分 GF 恢复原有取向,恢复了部



a—弯曲强度和弯曲弹性模量; b—比弯曲强度; c—弯曲刚度

图2 不同厚度夹芯复合结构的弯曲性能

分抵御形变能力,所以在夹芯复合结构厚度不大于 5 mm 时,弯曲刚度随着芯层厚度的增加而增大,当夹芯复合结构厚度超过 5 mm 后,夹芯复合结构的弯曲模量降幅变大,同时厚度增幅不变,综合导致弯曲刚度减小。

不同厚度夹芯复合结构的冲击性能如图 3 所示。

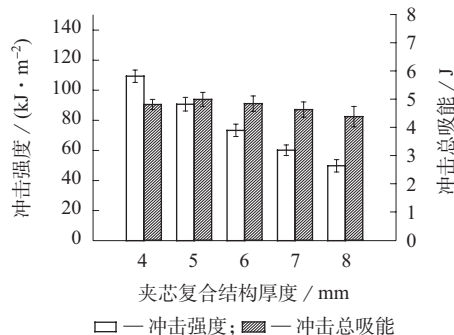


图3 不同厚度夹芯复合结构的冲击性能

由图 3 可以看出,随着芯层厚度的增加,即夹芯复合结构厚度的增加,夹芯复合结构的冲击强度减小,而冲击总吸能量先增大后减小,转折点是夹芯复合结构厚度为 5 mm 时,此时夹芯复合结构的冲击总吸能为 4.99 J。这是因为:(1)随着芯层厚度增加,芯层内的孔隙率增大,夹芯复合结构单位体积内 GF 骨架的密度降低,单位体积吸能的能力减小;(2)膨化后芯层内的 PPS 对 GF 的约束力变小,芯层厚度增加后,芯层内部分 GF 恢复原有的取向,GF 对力的承载能力变强,GF 骨架抵御形变的能力增大;(3)芯层厚度的增加会在芯层内产生更多更大的气孔结构,也能消耗部分能量,有助于冲击总吸能的增大。综合影响下,夹芯复合结构的冲击总吸能随着芯层厚度的增加先增大后减小。冲击强度是单位截面积的冲击吸能,在冲击总吸能没有大幅度上升的情况下,随着芯层厚度的增加,夹芯复合结构的冲击强度减小。

不同厚度夹芯复合结构的侧压性能如图 4 所示。

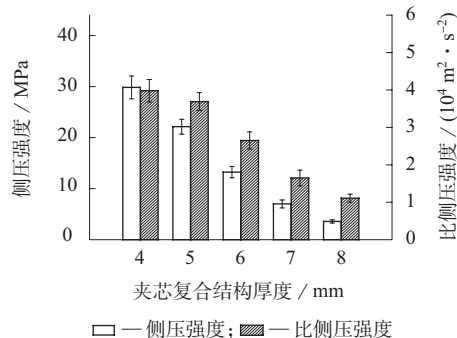


图4 不同厚度夹芯复合结构的侧压性能

由图 4 可以看出,随着芯层厚度的增加,即夹芯复合结构厚度的增加,夹芯复合结构的侧压强度和比侧压强度快速减小。这是由于夹芯复合结构侧压会发生芯层分层破裂,随着芯层厚度的增加,芯层内的孔隙率增大,类似于弯曲性能测试,夹芯复合结构更容易发生破坏。

2.2 芯层面密度对夹芯复合结构性能的影响

不同芯层面密度下夹芯复合结构的弯曲性能如图 5 所示。

由图 5a 和图 5b 可以看出,在夹芯复合结构厚度相同条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的弯曲强度和弯曲弹性模量都增大。这是因为芯层面密度增加,芯材内的孔隙率降低,芯层内堆积更紧密,抵御载荷的 GF 密度增大,更多的 GF 能承担

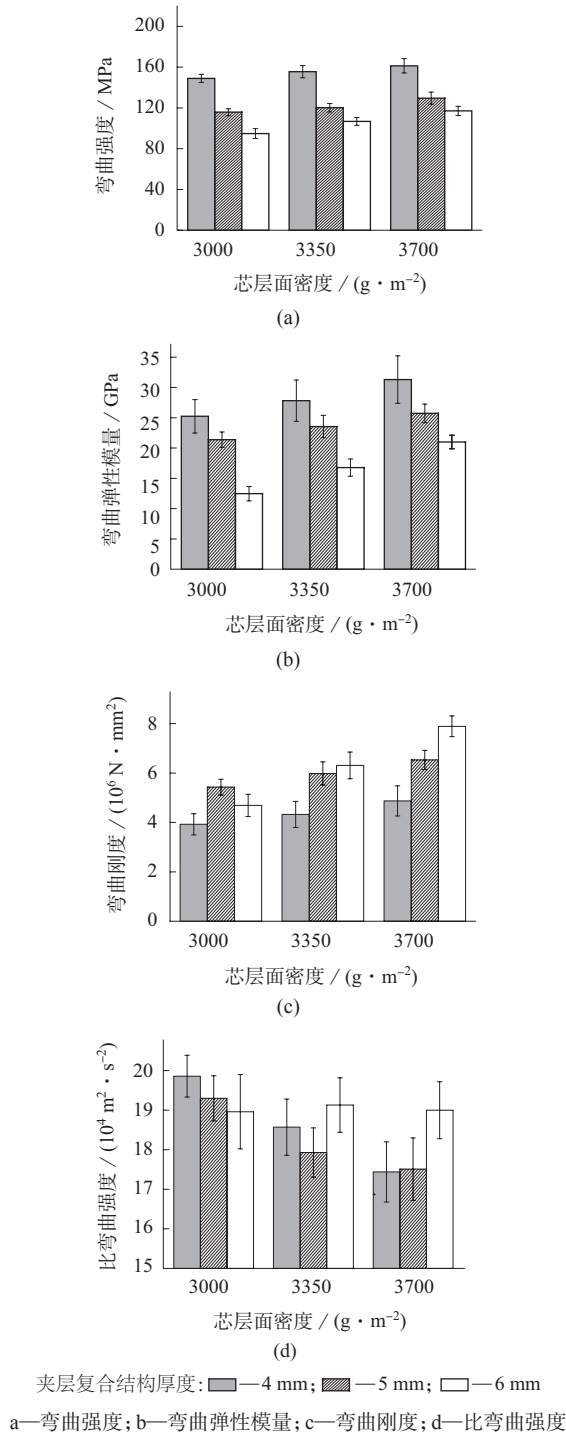


图5 不同芯层面密度下夹芯复合结构的弯曲性能

和分散载荷。在芯层面密度相同条件下,随着夹芯复合结构厚度的增加,夹芯复合结构的弯曲强度和弯曲弹性模量都减小。这是因为夹芯复合结构厚度增加会导致夹芯复合结构单位体积内的 GF 骨架密度降低,骨架对力的承载能力下降。

由图 5c 可以看出,在夹芯复合结构厚度相同条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的弯曲

刚度增大。

由图 5d 可以看出,在夹芯复合结构厚度为 4 mm 或 5 mm 条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的比弯曲强度减小;在夹芯复合结构厚度为 6 mm 条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的比弯曲强度先增大后减小。

不同芯层面密度下夹芯复合结构的冲击性能如图 6 所示。

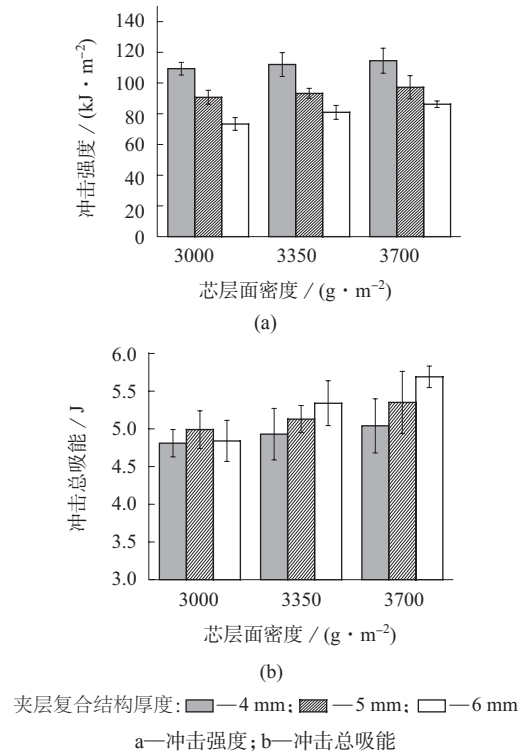


图6 不同芯层面密度下夹芯复合结构的冲击性能

由图 6 可以看出,在夹芯复合结构厚度相同条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的冲击强度和冲击总吸能增大。这是因为芯层面密度增加,芯材内的孔隙率减小,受到冲击作用时有更多的 GF 承担吸能作用^[9]。

不同芯层面密度下夹芯复合结构的侧压性能如图 7 所示。

由图 7a 可以看出,在夹芯复合结构厚度相同条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的侧压强度增大。

由图 7b 可以看出,当夹芯复合结构厚度为 4 mm 和 5 mm 时,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的比侧压强度减小;当夹芯复合结构厚度为 6 mm 时,随着芯层面密度的增加,比侧压强度呈现先降后升的趋势。

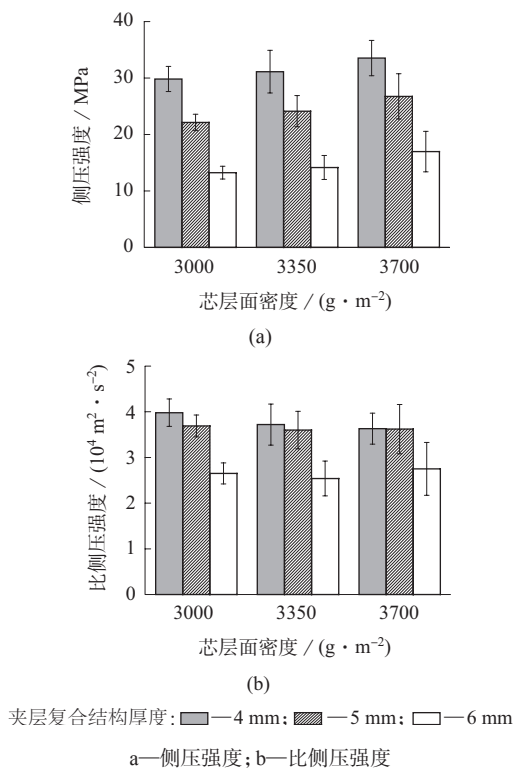


图7 不同芯层面密度下夹层复合结构的侧压性能

2.3 弯曲破坏形式

夹层复合结构的弯曲破坏形式如图8所示,相应的载荷-位移曲线如图9所示。

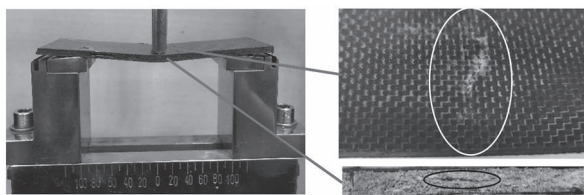


图8 夹层复合结构的弯曲破坏形式

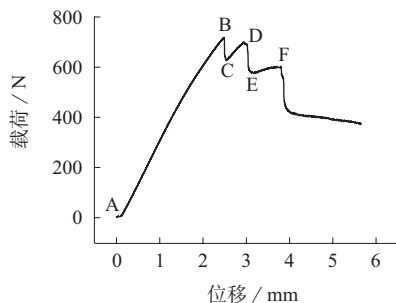


图9 夹层复合结构的弯曲载荷-位移曲线

由图8可以看出,夹层复合结构厚度的破坏形式为面板破坏和芯层分层。由图9可以看出,AB段为弹性变形阶段,载荷随着位移的增加而增大;在BC段,当载荷到达690 N后,增加位移,上面板出现微小裂缝,载荷下降;在CD段,除上面板上出现裂缝外,芯层并未发生破坏,可继续承载载荷,载

荷上升;在DE段,面板的裂痕不断在长度和宽度方向衍生,载荷再次下降;EF段与CD段类似,未发生破坏的结构部分继续承担载荷,载荷上升,但较CD段的载荷下降;在F点后,芯层分层破裂,出现层间裂口,芯层的内部结构破坏并失效。

2.4 侧压破坏形式

夹层复合结构的侧压破坏形式如图10所示,相应的载荷-位移曲线如图11所示。

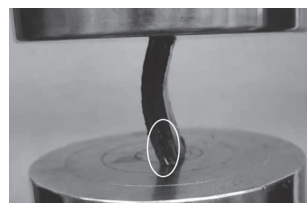


图10 夹层复合结构侧压破坏形式

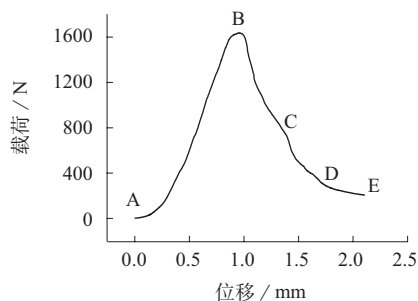


图11 夹层复合结构的侧压载荷-位移曲线

由图10可以看出,夹层复合结构的侧压破坏形式主要是芯层的压缩/弯曲破坏。由图11可以看出,在AB段,夹层复合结构先发生局部结构的失稳后进入弹性形变的阶段,载荷随着位移的增加而快速增大,载荷在B点达到最大,面板材料具有柔韧性,小幅度弯曲不会对其造成破坏;BC段发生芯层局部破坏;在CD段,夹层复合结构在局部破坏基础上,进一步发生更严重的分层破坏;在DE段,分层破坏的结构还可承载一定载荷。

3 结论

(1) 随芯层厚度的增加,夹层复合结构的弯曲强度、弯曲弹性模量、比弯曲强度、冲击强度、侧压强度和比侧压强度减小,而弯曲刚度和冲击总吸能先增大后减小,转折点发生在夹层复合结构厚度为5 mm时。

(2) 在夹层复合结构厚度相同条件下,随着芯层面密度的增加,夹层复合结构的弯曲强度、弯曲弹性模量、弯曲刚度、冲击强度、冲击总吸能和侧压强度增大;在夹层复合结构厚度为4 mm或5 mm条件下,随着芯层面密度的增加,夹层复合结构的比弯

曲强度和比侧压强度减小;在夹芯复合结构厚度为 6 mm 条件下,随着芯层面密度的增加,夹芯复合结构的比弯曲强度先增大后减小,比侧压强度先减小后增大。

(3) 夹芯复合结构的弯曲破坏形式是面板破坏和芯层分层;侧压破坏形式是压缩 / 弯曲破坏。

参考文献

- [1] Rayjide G R, Rao G V R S. Study of composite sandwich structure and bending characteristics—A review[J]. International Journal of Current Engineering and Technology, 2015, 5(2):797–802.
- [2] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2014(1):1–16.
Fan Zijie, Gui Liangjin, Su Ruiyi. Research and development of automotive lightweight technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014(1):1–16.
- [3] 熊健, 杜昉桐, 杨雯, 等. 轻质复合材料夹芯复合结构设计及力学性能最新进展 [J]. 宇航学报, 2020(6):749–760.
Xiong Jian, Du Yuntong, Yang Wen, et al. Research progress on design and mechanical properties of lightweight composite sandwich structures[J]. Journal of Astronautics, 2020(6):749–760.
- [4] 孙立坤. 连续 / 长玻璃纤维增强塑性复合材料生产工艺的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
Sun Likun. Study on production technology of continuous / long glass fiber reinforced thermoplastic polymer composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [5] Jung G, Mitschang P, Park C. New GMT material suitable for various polymers and high glass fibre content[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2015, 44(3):117–122.
- [6] Belingardi G, Beyene A T, Jichuan D. Energy absorbing capability of GMT, GMTex and GMT-UD composite panels for static and dynamic loading-experimental and numerical study[J]. Composite Structures, 2016, 143:371–387.
- [7] 刘拥华, 孙斌, 戴干策. 长纤维增强 PP-GMT 片材膨胀化行为研究 [J]. 中国塑料, 2004(2):44–47.
- [8] Dittmar H, Plaggenborg H. Lightweight vehicle underbody design[J]. Reinforced Plastics, 2019, 63(1):29–32.
- [9] 黄君. 轻质热塑性复合片材微结构及其性能研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2008.
Huang Jun. Microstructure and properties of lightweight reinforced thermoplastic laminates[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2008.
- [10] 潘羽, 丁先锋. 聚苯硫醚 / 玻璃纤维轻质复合材料制备及性能研究 [J]. 产业用纺织品, 2019(4):7–10.
Pan Yu, Ding Xianfeng. Preparation and properties research of polyphenylene sulfide / glass fiber lightweight composites[J]. Technical Textiles, 2019(4):7–10.
- [11] Saad N A, Hamzah M S, Hamzah A F. Study of fatigue behavior of composite materials with the basis of Polyphenylene sulfide (PPS) reinforced with glass fiber and carbon[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2013, 3(4):467–475.
- [12] Yasuda H, Chiba Y, Ishikawa M. Effect of the glass fiber length on the mechanical properties of long glass fiber reinforced polyphenylene sulfide[J]. Journal of polymer engineering, 2011, 31(5):427–434.
- [13] Wang Shiyu, Zhou Zhengong, Zhang Jiazhen, et al. Effect of temperature on bending behavior of woven fabric-reinforced PPS-based composites[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(24):13 966–13 976.
- [14] Solfiti E, Solberg K, Gagani A, et al. Static and fatigue behavior of injection molded short-fiber reinforced PPS composites: Fiber content and high temperature effects[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 126.doi:10.1016 / j.engfailanal.2021.105429.
- [15] 方荀. 新型热塑性复合材料的结构设计及制造过程的数值模拟 [D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
Fang Xun. Structural design of new thermoplastic composites and numerical simulation of manufacturing[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [15] 伍贤友. 电子束辐照对高分子共混物力学性能与三重形状记忆性能的影响 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
Wu Xianyou. Influence of E-B irradiation on the mechanical property and triple-shape memory property of polymer blends[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [16] 张刚刚. 新型绿色交联弹性体的设计、制备与性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
Zhang Ganggang. Design, preparation and performance of novel and green cross-linked elastomer[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.

(上接第 27 页)

Wang Jia, Xu Cui, Zhang Juan, et al. Study on crystallization kinetics of crosslinked poly(ϵ -caprolactone) / styrene-acrylonitrile copolymer blends prepared through irradiation by electron beam[J]. Acta Polymerica Sinica, 2021(2):214–222.

- [14] 李颖, 左龙, 陈宝书. 热塑性聚氨酯 / 聚己内酯共混物的形状记忆和力学性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2017(10):72–75.
Li Ying, Zuo Long, Chen Baoshu. Shape memory and mechanical properties of polyurethane / polycaprolactone blends[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2017(10):72–75.