

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.012

成型工艺对玄武岩纤维增强 PPS 夹芯结构材料力学性能影响

刘创新, 马辉煌, 唐云峰, 周晓东

(华东理工大学, 上海 200000)

摘要: 夹芯结构材料具备质量轻、刚性高、功能综合型等优点, 广泛应用于航天航空、交通运输、功能材料等领域。为研究成型工艺对夹芯结构材料性能的影响, 以玄武岩纤维增强聚苯硫醚复合材料、连续玻璃纤维增强聚丙烯单向预浸带为原材料, 探究了模压成型工艺中贴合压力、热压温度、热压时间以及芯层材料密度等因素对夹芯结构材料性能的影响。结果表明, 模压成型工艺中热压温度和热压时间的最优条件为 220 °C, 15 min; 芯层材料的密度减小时, 其弯曲性能、冲击强度呈先增大后下降的趋势, 弯曲强度和弯曲弹性模量最大为 271.53 MPa, 18 672.72 MPa, 冲击强度最大为 119.21 kJ/m²。芯层材料的密度减小时, 其弯曲刚度呈上升趋势, 最大弯曲刚度可达 15 441.16 N·mm。

关键词: 玄武岩纤维; 聚苯硫醚; 模压成型; 夹芯结构; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0078-06

Effect of Forming Technology on Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Polyphenylene

Sulfide Sandwich Structural Materials

Liu Chuangxin, Ma Huihuang, Tang Yunfeng, Zhou Xiaodong

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200000, China)

Abstract: Sandwich structure material has the advantages of light weight, high rigidity and comprehensive function, which is widely used in aerospace, transportation, functional materials and other fields. In order to study the effect of molding process on the properties of sandwich structural materials, the basalt fiber reinforced polyphenylene sulfide composites and continuous glass fiber reinforced polypropylene unidirectional prepreg strip were used as raw materials. The influences of bonding pressure, hot pressing temperature, hot pressing time and core layer material density on the properties of sandwich structure materials were investigated. The results show that the optimal conditions of hot pressing temperature and hot pressing time in the molding process are 220 °C and 15 min. When the density of the core material decreases, the bending property and impact strength increase first and then decrease. The maximum bending strength and modulus are 271.53 MPa and 18 672.72 MPa, and the maximum impact strength is 119.21 kJ/m². When the density of core layer material decreases, its bending stiffness increases, and the maximum bending stiffness can reach 15 441.16 N·mm.

Keywords: basalt fiber; polyphenylene sulfide; compression moulding; sandwich structure; mechanical property

夹芯结构材料又称夹层结构材料, 是由两种及以下的复合材料加工复合而成。夹芯结构材料的概念于 20 世纪 40 年代首次出现, 是指利用低密度的“芯子”材料和高性能的“面皮”材料再加工, 从而达到增强材料刚度, 减轻材料质量的目的^[1]。采用低密度的芯子材料, 在实现减轻夹芯结构材料整体

质量的同时, 还增加了材料截面惯性矩, 从而使材料能有效抵抗弯曲变形和失效, 具备优异的材料刚性; 高强度、高模量的面皮材料保障了夹芯结构材料的整体强度, 且夹芯结构材料的弯曲刚度一般要远大于同种材料、同样规格单一材料的弯曲刚度^[2-4]。典型的夹芯结构示意图如图 1 所示。

通信作者: 周晓东, 研究员, 研究方向为多相多组份聚合物材料界面设计与控制、热塑性聚合物复合材料的制备与成型技术、生物资源高分子材料的高性能化和实用化技术

收稿日期: 2023-02-26

引用格式: 刘创新, 马辉煌, 唐云峰, 等. 成型工艺对玄武岩纤维增强 PPS 夹芯结构材料力学性能影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 78-83.

Liu Chuangxin, Ma Huihuang, Tang Yunfeng, et al. Effect of forming technology on mechanical properties of basalt fiber reinforced polyphenylene sulfide sandwich structural materials[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 78-83.

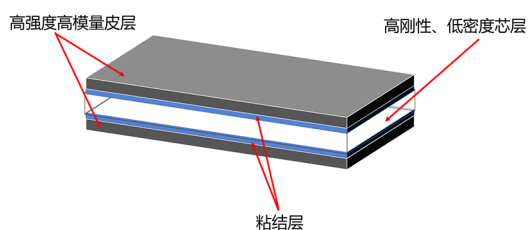


图1 夹芯结构示意图

夹芯结构材料的设计能实现材料的轻量化和多功能化,即一部分材料性能满足对结构强度、刚度等力学性能的要求,另一部分材料性能满足吸音、隔热、电子屏蔽等特殊性能要求。目前夹芯结构材料已在航天航空、交通运输、房屋建筑、功能材料等领域得到了深层次的运用^[5-9],其应用形式主要包括蜂窝夹芯结构^[10]、点阵夹芯结构^[11]、Z-Pin 增强泡沫夹芯结构^[12]等,常见的芯子材料包括泡沫塑料、蜂窝芯子、点阵结构芯子、格栅结构芯子、轻质热塑性复合材料^[13-14]等,其中以塑料泡沫芯子、蜂窝芯子材料制备的夹芯结构材料的应用最为广泛和成熟。目前国内外学者研究了多种复合材料夹芯结构的制备工艺及其力学性能,如何实现夹芯结构材料的轻量化、多功能化以及夹芯结构材料面皮与芯材之间的高效连接,是当前科研工作者们关注的重要研究领域。

由膨化工艺^[15]二次加工制备的轻质热塑性复合材料,不仅具备优异的吸音降噪、隔热等特性,还具备良好的刚性,且能够通过控制材料厚度达到改变材料密度的目的^[16]。以热塑性复合材料为面皮材料,轻质热塑性复合材料为芯层材料制备夹芯结构,能够利用树脂熔融后冷却固化黏结的特性,制备出皮层和芯层连接牢固的夹芯结构。王兵等^[17]对碳纤维增强金字塔点阵夹芯结构的抗压缩性能进行了研究,并提出一种碳纤维增强复合材料点阵夹芯结构一体化成型工艺方法,该方法有效克服了传统夹芯结构面皮和芯子之间界面弱的缺点。汤溢融^[18]等对以膨化的长玻璃纤维增强聚苯硫醚(PPS)复合材料为芯材,碳纤维织物增强聚碳酸酯为面板材料,经热压成型工艺制备的夹芯结构材料展开了研究,结果表明随着芯层材料厚度的增大,夹芯复合材料的弯曲强度、冲击强度、侧压强度减小,当夹芯结构整体厚度为5 mm时,其弯曲刚度和冲击吸收总能量取得极大值。

目前以轻质热塑性复合材料为芯材制备夹芯结构材料成型工艺和性能的研究较少,为了进一步

研究芯层材料密度对夹芯结构材料性能的影响,以及夹芯结构材料成型工艺参数对材料性能的影响,笔者以轻质玄武岩纤维(BF)增强PPS复合材料为芯层材料,连续玻璃纤维(GF)增强聚丙烯(PP)单向预浸带为面皮材料制备了夹芯结构材料,为夹芯结构材料的成型工艺与性能研究提供了实验基础和经验,有利于推动夹芯结构未来在工程领域中的应用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

轻质BF增强PPS复合片材:BF质量分数为50%,长度为9 mm,厚度分别为1,2,3,4 mm,密度对应为1.47,0.74,0.49,0.37 g/cm³,自制;

连续GF增强PP单向预浸带:GF质量分数为60%,厚度为0.4 mm,自制;

PP薄膜:熔体流动速率10 g/min,山东盈翔新材料有限公司。

1.2 仪器及设备

平板硫化机:QLB-25D/Q型,无锡中凯橡塑股份有限公司;

烘箱:101 A-1型,上海仪器实验厂;

分析天平:FA1104型,上海良丰仪器仪表有限公司;

万能试验机:CMT4204型,深圳新三思检测有限公司;

冲击试验机:XJU-22 J型,南京寻磊有限公司。

1.3 样品制备

以轻质BF增强PPS片材为芯层,连续GF增强PP单向预浸带为皮层,在模具中按面皮材料、PP薄膜、芯层材料、PP薄膜、面皮材料的顺序铺放整齐,模具尺寸为120 mm×170 mm,在平板硫化机上将模具加热至210 °C,预热4 min,在一定压力条件下,加热至230 °C,保温一定时间后,将模具转移至另外一台压机上,保压冷却至室温得到夹芯结构材料。

1.4 性能测试

夹芯结构材料的弯曲性能按照GB/T 1456-2005,测试速率2 mm/min;

夹芯结构材料冲击性能按照GB/T 1451-2005, V型缺口。

2 结果与讨论

2.1 贴合压力对夹芯结构力学性能的影响

夹芯结构材料成型过程中,贴合压力主要影响

面皮材料和芯层材料的黏结强度以及芯层材料的结构,从而影响夹芯结构材料的力学性能。表1为模压成型工艺中贴合压力对夹芯结构力学性能的影响。从表1可以看出,贴合压力为3.0 MPa时制备的夹芯结构弯曲强度、弯曲弹性模量优于贴合压力为0.1 MPa制备的夹芯结构材料;当芯层材料密度相同时,贴合压力为0.1 MPa时制备的夹芯结构材料弯曲刚度性能要优于贴合压力为3.0 MPa制备的夹芯结构材料。

表1 模压成型工艺中贴合压力对夹芯结构力学性能的影响

项目	贴合压力/MPa			
	0.1	0.1	3.0	3.0
芯层厚度/mm	1	2	1	2
弯曲强度/MPa	149.18±4.80	98.66±5.19	293.14±4.71	271.53±6.07
弯曲弹性模量/MPa	10 992.50±571.82	8 780.79±427.43	20 341.81±389.46	18 672.72±417.44
弯曲刚度/(N·mm)	8483.46±441.30	14 402.68±300.38	10 312.21±323.29	12 448.48±278.30

模压成型过程中,模具内部形成高温氛围,面皮层和芯层界面处的树脂受热熔融流动,树脂分子链在界面处发生迁移,部分树脂渗透进入芯层材料表层,冷却固化成型之后,得到夹芯结构材料。当贴合压力为0.1 MPa时,成型过程中模具处于刚好闭合的状态,芯层材料保持了原有厚度,皮层与芯层之间熔融的树脂进入芯层材料,冷却后夹芯结构材料固化成型。厚度为2 mm的芯层材料制备的夹芯结构在受到弯曲载荷作用力时,芯层能进一步承担力的作用,其抵抗形变的能力提升,弯曲刚度性能甚至优于贴合压力为3.0 MPa时制备的夹芯结构。

芯层材料内部为多孔状结构,内部存在孔隙,模压成型工艺过程中,贴合压力为3.0 MPa时,在压力的作用下,芯层受到压力的挤压,厚度被压缩,面皮材料和芯层材料之间熔融树脂迁移至芯层材料孔隙之中,填充芯层材料的孔隙,芯层材料性能得到提升,在厚度相同的情况下,夹芯结构材料弯曲强度和弯曲弹性模量优于贴合压力为0.1 MPa制备的夹芯结构材料。

2.2 热压温度对夹芯结构力学性能的影响

夹芯结构材料成型过程中,贴合时热压温度主要影响面皮材料和芯层材料的黏结效果,从而对夹芯结构材料的力学性能产生影响。当热压时间为10 min,芯层材料厚度为2 mm时,在热压温度为

210, 220, 230 °C的条件下,得到贴合时热压温度对夹芯结构弯曲性能的影响,如图2所示;热压温度对夹芯结构弯曲刚度的影响,如图3所示;热压温度对夹芯结构冲击强度的影响如图4所示。

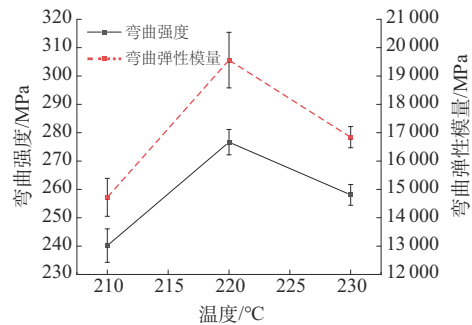


图2 热压温度对夹芯结构弯曲性能的影响

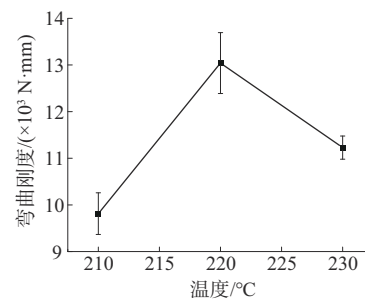


图3 热压温度对夹芯结构弯曲刚度的影响

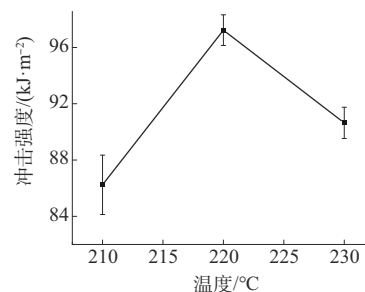


图4 热压温度对夹芯结构冲击强度的影响

从图2、图3和图4可以看出,随着热压温度的上升,夹芯结构的弯曲性能和冲击强度均呈先上升后下降的趋势。随着热压温度的升高,树脂在芯层和皮层之间的流动性增强,迁移至芯层表层的树脂增加,冷却固化成型后芯层与皮层黏结强度更高,因此材料力学性能呈先上升的趋势。然而,随着热压温度的进一步升高,在外部压力的影响下,面皮材料中的部分树脂会溢出模具,造成溢料,树脂的流失会造成皮层与芯层黏结强度的下降,从而导致材料的力学性能下降。

2.3 热压时间对夹芯结构力学性能的影响

夹芯结构材料成型过程中,贴合时热压时间主要影响面皮材料和芯层材料的黏结效果,从而对夹

芯结构材料的力学性能产生影响。热压温度为 220 °C,芯层厚度为 2 mm 时,热压时间对夹芯结构弯曲性能的影响,如图 5 所示;热压时间对夹芯结构弯曲刚度的影响,如图 6 所示;热压时间对夹芯结构冲击强度的影响如图 7 所示。

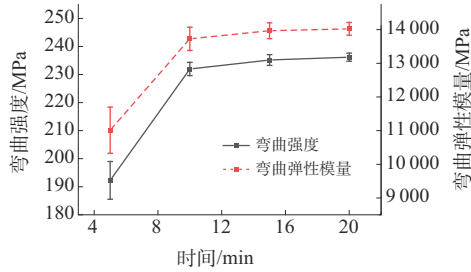


图5 热压时间对夹芯结构性能的影响

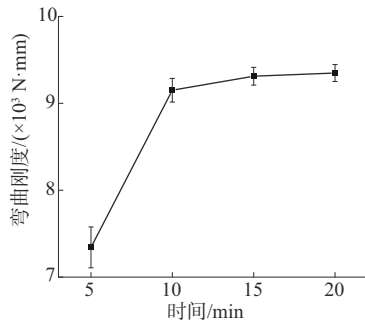


图6 热压时间对夹芯结构弯曲刚度的影响

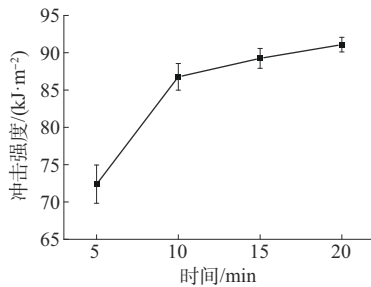


图7 热压时间对夹芯结构冲击强度的影响

数据结果表明,随着热压时间的增加,夹芯结构的弯曲性能和冲击强度呈先上升后趋于平稳的趋势,超过 10 min 之后,上升幅度较小,可认为在 15 min 后,热压时间继续增加,材料的弯曲性能基本稳定。随着热压时间的增加,芯层和面皮材料之间的树脂因熔融流动而渗透进入芯层材料内部孔隙越多,芯层材料孔隙有了树脂的填充,纤维与树脂之间结合更牢固,使芯层材料力学性能提升,夹芯结构在弯曲载荷试验中能承受更大弯曲载荷作用力,抵抗形变能力的提升,其弯曲强度、弯曲弹性模量和弯曲刚度随之增大。超过 15 min 之后,芯层内部被大量的树脂填充,树脂渗透阻力变大,继续延长热压时间对夹芯结构力学性能的提高影响不大。

2.4 芯层密度对夹芯结构力学性能的影响

芯层材料的密度决定了夹芯结构材料中芯层材料的,从而对夹芯结构材料的力学性能产生影响。分别用厚度为 1, 2, 3, 4 mm 的芯层材料,经热压温度 220 °C,热压时间为 15 min 制备夹芯结构,芯层厚度对夹芯结构弯曲性能的影响如图 8 所示;芯层厚度对夹芯结构弯曲刚度的影响如图 9 所示;芯层厚度对夹芯结构冲击性能的影响如图 10 所示。

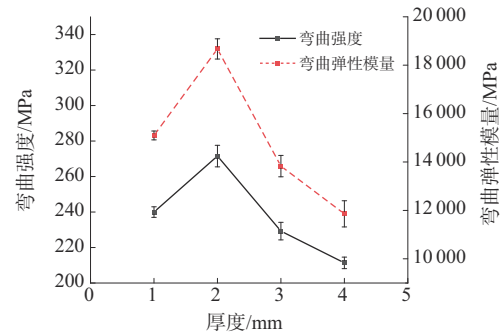


图8 芯层厚度对夹芯结构弯曲性能的影响

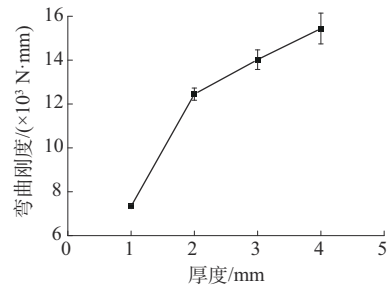


图9 芯层厚度对夹芯结构弯曲刚度的影响

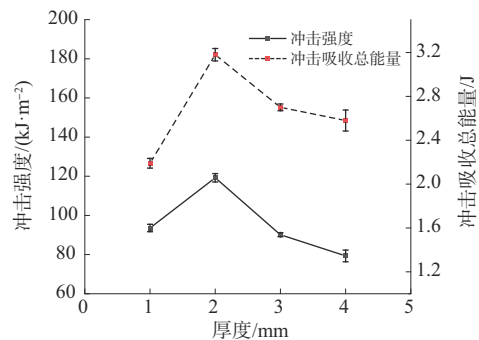


图10 芯层厚度对夹芯结构冲击性能的影响

由图 8 可知,当芯层质量不变时,随着芯层厚度的增大,芯层密度减小,其弯曲强度和弯曲弹性模量呈先上升后下降的趋势。芯层密度较大时,材料内部孔隙多且密实,渗透进入芯层材料内部的聚丙烯树脂受到阻力较大。随着芯层密度减小,芯层材料的孔隙变大,渗透进入芯层材料内部的 PP 树脂增加,树脂与芯层材料的 BF 之间形成新的界面和结

合,故夹芯结构的弯曲强度和弯曲弹性模量上升。随着芯层密度的进一步减小,材料的孔隙变得更大,渗透进入芯层材料内部的PP树脂不能实现对孔隙的完全填充,材料内部有部分孔隙存在,纤维与树脂之间的结合和界面效应下降,导致夹芯结构的弯曲强度和弯曲弹性模量下降。芯层材料厚度为2 mm时制备的夹芯结构弯曲强度和弯曲弹性模量最优,分别为271.53 MPa, 18 672.72 MPa。

由图9可知,随着芯层材料厚度的增加,其弯曲刚度呈上升趋势。夹芯结构材料在受到弯曲载荷力作用时,先由面皮材料承担外部载荷力的作用,然后将力传递给芯层材料,随着芯层厚度的增大,增大了材料截面惯性矩,其抵抗形变的能力提升,所以夹芯结构的弯曲刚度随芯层厚度的增大呈上升趋势,夹芯结构的最大弯曲刚度可达15 441.16 N·mm。

由图10可知,随着芯层厚度的变大,其冲击强度和冲击吸收总能量呈先上升后下降的趋势,冲击强度最大为119.21 kJ/m²,冲击吸收总能量最大为3.18 J。当芯层厚度较小时,材料内部孔隙较多且密实,PP树脂渗透进入芯层材料内部时阻力较大。随着厚度的增大,芯层材料孔隙变大,加工成型时渗透进入芯层材料的PP树脂增加,PP与芯层材料内BF之间存在界面效应,冲击试验中,夹芯结构在受到冲击破坏时,夹芯结构内部纤维和树脂的界面吸收冲击能量增加,其冲击强度和冲击吸收总能量呈上升趋势。随着芯层厚度的进一步增大,材料孔隙变得更大,渗透进入芯层材料内部的聚丙烯树脂不能实现对孔隙的完全填充,导致材料内部存在空隙,纤维与树脂之间的界面效应下降,从而导致夹芯结构的冲击强度和冲击吸收总能量下降。

3 结论

以不同密度BF增强PPS复合材料为芯层,以连续玻璃纤维增强PP单向预浸带为皮层,经模压成型工艺制备了夹芯结构,得到芯层密度不同的夹芯结构材料,研究了模压成型工艺条件和芯层密度对夹芯结构材料力学性能的影响,结论如下:

(1)模压成型过程中,贴合压力为0.1 MPa时能保证夹芯结构芯层材料结构的完整性,同样密度的芯层材料制备的夹芯结构弯曲刚度性能优于贴合压力为3.0 MPa制备的夹芯结构,贴合压力为3.0 MPa制备的夹芯结构的弯曲强度和弯曲弹性模量

优于贴合压力为0.1 MPa制备的夹芯结构。

(2)模压成型工艺中热压温度最优为220 °C、热压时间最优为15 min。

(3)随着芯层材料厚度的增大,芯层密度减小,夹芯结构的弯曲强度和弯曲弹性模量呈先上升后下降的趋势,弯曲强度和弯曲弹性模量最大分别为271.53 MPa, 18 672.72 MPa;冲击强度和冲击吸收总能量呈先上升后下降的趋势;弯曲刚度呈上升趋势,最高可达15 441.16 N·mm。

参考文献

- [1] 吴林志, 泮世东. 夹芯结构的设计及制备现状[J]. 中国材料进展, 2009, 28(4):40-45.
Wu Linzhi, Pan Shidong. Survey of design and manufacturing of sandwich structures[J]. Materials China, 2009, 28(4):40-45.
- [2] Li Tiantian, Wang Lifeng. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials[J]. Composite Structures, 2017, 175(11):46-57.
- [3] Chen Xiaolan, Zhang Yuanyuan, Hu Guitao, et al. Analysis of equivalent parameters for honeycomb sandwich mirror[J]. Advanced Materials Research, 2014, 842:397-400.
- [4] Arbaoui J, Schmitt Y, Pierrot J L, et al. Effect of core thickness and intermediate layers on mechanical properties of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich structures[J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2014, 59(1):11-16.
- [5] 胡培, 陈志东, 薛元德, 等. 泡沫夹层结构的模压共固化成型工艺及参数选定[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(8):4-8.
Hu Pei, Chen Zhidong, Xue Yuande, et al. Press molding co-curing processing method and specification determination of foam-cored sandwich structure[J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(8):4-8.
- [6] 张钟. 热膨胀模压法成型复合材料夹层结构工艺及其性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Zhang Zhong. Study on the technology and properties of sandwich structure of composite materials formed by thermal expansion molding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [7] Berggreen C, Branner K, Jensen J F, et al. Application and analysis of sandwich elements in the primary structure of large wind turbine blades[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2015, 9(6): 525-552.
- [8] 杨益, 李晓君, 郭彦朋. 夹芯材料发展及防护结构应用综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4):91-96.
Yang Yi, Li Xiaojun, Guo Yanpeng. Development of sandwich materials and their application overview in protective structure[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(4):91-96.
- [9] 杨扬. 复合材料蜂窝夹芯管结构设计、制备工艺及性能表征[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.

- Yang Yang. Structure design, preparation technology and characterization of composite honeycomb sandwich tube[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [10] 张延昌,顾金兰,王自力,等. 蜂窝夹层板结构抗冲击正交试验优化设计[J]. 兵工学报, 2010, 31(1):279-283.
Zhang Yanchang, Gu Jinlan, Wang Zili, et al. Optimization design of honeycomb sandwich plate structure by orthogonal test[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(1):279-283.
- [11] 泮世东,冯吉才,吴林志. 金字塔点阵夹芯结构的精细优化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, (1):29-33.
Pan Shidong, Feng Jicai, Wu Linzhi. Refined optimal design of sandwich structures with modified pyramidal lattice cores[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, (1):29-33.
- [12] Masters J, Johnson W, Jeelani S, et al. Low-velocity impact response of cross-ply laminated sandwich composites with hollow and foam-filled Z-pin reinforced core[J]. *Journal of Composites Technology & Research*, 1999, 21(2):84-97.
- [13] 蔡克乾. 复合材料折叠夹芯结构制备及力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
Cai Keqian. Study on structure preparation and mechanical properties of composite folding sandwich[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [14] 温锋,刘辉,王磊,等. PVC泡沫夹芯结构复合材料固化芯材变色对结构性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(6):60-69
Wen Feng, Liu Hui, Wang Lei, et al. Effect of PVC foam discoloration of solidified sandwich structure composite on structural properties[J]. *Development and Application of Materials*, 2020, 35(6):60-69.
- [15] 黄君,孙斌,戴干策. 轻质热塑性复合片材吸声性能[J]. 功能高分子学报, 2008(2):177-181.
Huang Jun, Sun Bin, Dai Gance. Sound absorption properties of lightweight reinforced thermoplastic laminates[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2008(2):177-181.
- [16] 周晓东,汤溢融. 一种可变密度的热塑性复合材料夹芯结构及其制备方法和应用:CN113291011 A[P]. 2021-08-24.
Zhou Xiaodong, Tang Yirong. The invention relates to a variable density thermoplastic composite sandwich structure, preparation method and application thereof:CN113291011 A[P]. 2021-08-24.
- [17] 王兵,吴林志,杜善义,等. 碳纤维增强金字塔点阵夹芯结构的抗压性能[J]. 复合材料学报, 2010(1):133-138.
Wang Bing, Wu Linzhi, Du Shanyi, et al. Compressive behavior of sandwich structures with carbon fiber reinforced pyramidal lattice truss cores[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010(1): 133-138.
- [18] 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.