

玻璃纤维多腔拉挤成型工艺及应用前景

杨文燕¹, 李武洲¹, 高 硕¹, 王志新¹, 武娟娟², 许福军¹

(1. 东华大学 纺织学院, 上海 松江 201620;
2. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 阐述玻璃纤维多腔拉挤成型工艺的研究进展与应用前景, 从原材料、工艺流程和工艺参数 3 个方面系统介绍拉挤成型工艺, 并重点探讨多腔拉挤复合材料的性能优势, 如轻质高强、耐腐蚀、保温性好等。分析不同截面形状和组合方式的多腔拉挤复合材料的性能, 展示其在桥梁、建筑、防护结构及列车部件等领域的应用潜力。最后, 总结当前研究存在的不足, 并对未来研究方向提出建议, 包括优化工艺、拓展纤维选择范围以及开发特殊结构制备技术, 以期推动多腔拉挤复合材料在工程中的广泛应用。

关键词: 玻璃纤维; 拉挤成型; 多腔拉挤; 复合材料; 应用前景

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

Glass fiber multi-cavity pultrusion process and application prospect

Yang Wenyan¹, Li Wuzhou¹, Gao Shuo¹, Wang Zhixin¹, Wu Juanjuan², Xu Fujun¹

(1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063000, Heibei, China)

Abstract: The research progress and application prospect of glass fiber multi-cavity pultrusion process are reviewed. The pultrusion process is systematically introduced from three aspects: raw materials, process flow, and process parameters. It also focuses on discussing the performance advantages of multi-cavity pultruded composites, such as lightweight, high strength, corrosion resistance, and excellent thermal insulation properties. The performance of multi-cavity pultruded composites with different cross-sectional and assembly methods is analyzed, their application potential in fields such as bridge engineering, architectural structures, protective systems, and railway components is demonstrated. Finally, the limitations of current research are summarized, and suggestions for future research directions are put forward focusing on process optimization, expansion of fiber material selection, and development of specialized structural fabrication techniques, to promote broader applications of multi-cavity pultruded composites in engineering.

Key words: glass fiber; pultrusion; multi-cavity pultrusion; composite; application prospect

传统的拉挤成型加工是指连续的纤维束、纱线等增强材料经浸润后, 在牵引力的作用下进入模具固化成型的工艺。拉挤成型工艺中纤维的质量分数可高达 80%。2022 年, 我国拉挤复合材料的产量已

超 190 万 t, 占全球总产量的约 6 成。近年来, 诸多学者致力于拉挤成型工艺条件的研究, 以期实现稳定高效的生产, 获得力学性能优良的复合材料^[1-2]。拉挤成型工艺按照基体类型可分为热固性拉挤成型

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3704500)

收稿日期: 2023-08-09

作者简介: 杨文燕, 女, 1998 年生, 河南汝州人, 硕士, 主要研究方向为纺织复合材料, 19906862329@163.com

通信作者: 许福军, 男, 1981 年生, 上海人, 主要研究方向为纺织复合材料与功能性纺织品, fjsxu@dhu.edu.cn

工艺和热塑性拉挤成型工艺。目前得以应用的拉挤成型复合材料大都采用热固性拉挤成型工艺制备。

复合材料成型过程中,拉挤成型工艺具有很大的优势。传统的拉挤成型工艺一次仅能拉挤出单个板材、棒或管材,而采用多腔拉挤成型技术,可以连续拉挤出大型体、多空腔制品,且制品可设计性强、保温性好、耐腐蚀,同时具有优异的承载能力及防爆能力,在桥梁、道路、建筑、防护、汽车部件等领域具有广阔的应用前景。然而,囿于多腔拉挤成型工艺的技术水平,多腔拉挤成型复合材料的生产及应用仍处于起步阶段,应用潜力有待开发。本文从原材料、工艺流程和工艺参数 3 个方面介绍玻璃纤维拉挤成型工艺,分析玻璃纤维多腔拉挤成型工艺及其制品的应用前景,展望多腔拉挤成型复合材料在工艺优化、纤维选择多样性及特殊结构制备方面的未

来研究方向,以期推动玻璃纤维多腔拉挤成型制品更广泛的工程应用。

1 拉挤成型工艺原材料

1.1 增强材料

玻璃纤维可分为 E-玻璃纤维、C-玻璃纤维、S-玻璃纤维、A-玻璃纤维、D-玻璃纤维、AR-玻璃纤维及 E-CR 玻璃纤维等类型。表 1 汇总了不同类型玻璃纤维的力学性能、热性能及其他特性^[3]。玻璃纤维具有优异的绝缘性、耐热性及抗疲劳性,但其耐磨性差,脆性大,常用作复合材料中的增强材料。生产过程中,需根据性能要求及应用领域选用不同类型的玻璃纤维^[4]。目前,更高性能的玻璃纤维,如欧文斯科宁的 HP 玻璃纤维,正被进一步研究和制备^[5]。

表 1 不同类型玻璃纤维的力学性能、热性能及其他特性
Tab.1 Mechanical, thermal, and other properties of different types of glass fibers

类型	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/GPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	热膨胀因数	其他特性
E-玻璃纤维	2.58	3.445	72.3	4.8	54	良好的电气性能
C-玻璃纤维	2.52	3.310	68.9	4.8	63	耐化学腐蚀
S-玻璃纤维	2.46	4.890	86.9	5.7	16	高力学强度
A-玻璃纤维	2.44	3.310	68.9	4.8	73	高碱含量
D-玻璃纤维	2.12	2.415	51.7	4.6	25	良好的介电性能
AR-玻璃纤维	2.70	3.241	73.1	4.4	65	耐碱
E-CR 玻璃纤维	2.72	3.445	80.3	4.8	59	适用于酸性环境

最常用于拉挤成型工艺的增强材料有 E-玻璃纤维、S-玻璃纤维等单向玻璃纤维。树脂浸润程度、纤维分布与排列方向以及纤维含量等会对最终复合材料的性能产生影响^[6]。刘北军^[7]研究了纤维含量对风电叶片主梁疲劳性能的影响,结果发现,复合材料的疲劳性能在低周疲劳(高应力)下与纤维含量呈正相关,在高周疲劳(低应力)下则与纤维含量呈负相关。

1.2 基体树脂

树脂与纤维的匹配度是拉挤复合材料能否成功制备的一项关键因素。用于拉挤成型工艺的树脂主要分为热固性树脂和热塑性树脂两大类^[8]。常用的树脂及其性能如表 2 所示。热固性树脂基复合材料根据树脂的不同而各具特点,如环氧树脂基复合材料弹性模量高,聚酰亚胺树脂基复合材料耐高温性能优异,而酚醛树脂基复合材料则具有阻燃性。热塑性树脂基复合材料具有较好的柔韧性和抗冲击性

能,且复合材料间可实现焊接连接^[9]。

多数热塑性树脂的黏度较高(500~5 000 Pa·s)^[10],对增强材料的浸润不利,可采用原位聚合的方法确保增强材料的充分浸润^[11]。应用于拉挤成型工艺的树脂应满足下述要求。

(1)树脂黏度低(<2 000 MPa·s),以确保能够使纤维完全浸润,并且树脂在稳定黏度下有 4 h 以上的适用期^[12]。

(2)放热低。拉挤成型过程中,树脂在加热模具的凝胶区发生放热反应,这会对树脂的黏度产生影响,因此要求树脂的放热低。

(3)在高温区具有高反应活性^[13],凝胶时间短。树脂在模具中迅速固化成型,有利于后续的脱模,确保复合材料性能。叔胺基团、多羟基及高邻位结构的存在可增加反应活性^[14],从而提高拉挤速度。凝胶化温度与固化温度相近的树脂体系反应活性高、固化反应放热集中,更适合拉

挤成型工艺^[15]。

(4) 温度稳定性高。如巴斯夫公司推出的 Elastocoat C 树脂,将其应用于拉挤成型工艺,可实现高性能复合材料的制备,并且该树脂的加工温度

高达 200 °C^[16]。

(5) 固化收缩率小。树脂的固化收缩影响热传递性能,以及复合材料的固化度与尺寸^[17],因此要求树脂的固化收缩率小。

表 2 常用的树脂及其性能
Tab. 2 Commonly used resins and their properties

类型	名称	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/°C	T _g /°C	热变形温度/°C	固化收缩率/%
热固性树脂	环氧树脂	1.10~1.12	115~120	50~150	165	1.0~2.0
	酚醛树脂	1.22	85~105	85~110	115~120	8.0~10.0
	不饱和聚酯树脂	1.40~2.20	—	88	50~60	4.0~6.0
	双马来酰亚胺树脂	1.35~1.40	155~159	250~300	170	1.3
热塑性树脂	聚丙烯	0.89~0.91	160~175	-15~-8	100	1.5~3.6
	聚乙烯	0.91~0.97	104~113	-133~-59	70	1.5~3.0
	聚酰胺 6	1.10~1.12	220	49~75	<80	1.0~1.5
	聚醚醚酮	1.29~1.34	334~345	143~158	152~156	1.0~1.3
	聚苯硫醚	1.35~1.43	280~290	74~92	240	0.7

2 拉挤成型工艺流程及参数

2.1 拉挤成型工艺流程

拉挤成型工艺通常包括纤维输送、纤维浸润、预成型、成型与固化、牵引与切割 5 个步骤,具体工艺流程如图 1 所示。

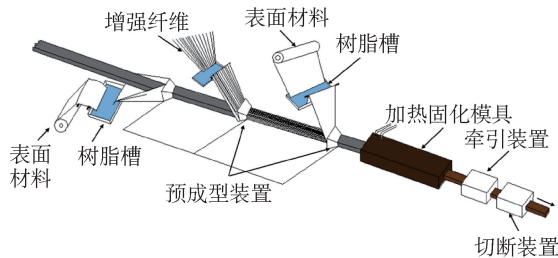


图 1 拉挤成型工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of the pultrusion process

拉挤成型过程中,经树脂充分浸润的增强材料在模具中固化成型,通过牵引装置引出,经切断装置切断后制得所需长度的复合材料。其中,加热固化模具分为预热区、凝胶区和固化区 3 个区域,其示意图如图 2 所示。

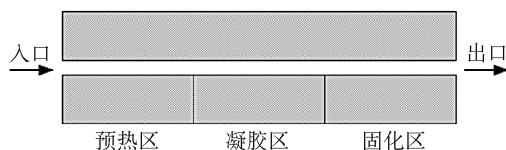


图 2 加热固化模具分区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the heating and curing mold zones

在第一个区域(预热区),树脂的黏度下降,充分浸润增强材料,由于树脂和纤维混合物的温度上升,膜腔内的液压升高;在第二个区域(凝胶区),树脂发生放热反应,其黏度急剧增加,模具内压力增大;第三个区域为固化区,复合材料在该区域固化成型。

2.2 拉挤成型工艺参数

拉挤成型的工艺参数主要包括浸胶时间、温度、树脂黏度、压力和拉挤速度等。

2.2.1 浸胶时间

纤维被树脂浸润的时间即浸胶时间,该时间长短以能确保纤维被树脂完全浸润为宜。纤维浸润不好,会导致复合材料表面出现白斑等缺陷。浸胶时间过短,纤维无法被完全浸润,复合材料内部存在干纤维;浸胶时间过长则影响生产效率。通过超声的方法可使树脂的流动性得以改善,有助于缩短浸胶时间^[18-19]。

2.2.2 温度

拉挤复合材料的固化程度与模具的温度有关^[20],可通过调节模具温度,控制树脂的交联固化。加热固化模具含 3 个加热段,其中,预热区的温度最低,凝胶区温度最高。复合材料空腔内外均需设置加热装置,以实现厚壁腔体的固化^[21]。加热固化模具的 3 个区域需设置合适的温度梯度,通常温度差 ≤ 50 °C,升温速率宜设置为 10~60 °C/h^[22],且模具的最高温度应低于树脂的降解温度。模具温度过低会使材料的凝胶点和放热峰后移,固化不完全,

影响复合材料的性能^[23]。Dias 等^[24]对拉挤过程中的模具温度进行优化,指出将加热器嵌入模具内有利于提高拉挤复合材料的固化度。优化后拉挤成型模具的温度由 182 °C 增至约 200 °C,复合材料的固化度由 70% 增至 89%,拉挤复合材料的性能得以提高。

树脂初始温度对拉挤复合材料固化度的影响并不大,但提高树脂初始温度可降低树脂的黏度,有助于提升其对纤维的浸润程度,进而提高拉挤成型工艺的生产效率,树脂初始温度以 40~60 °C 为宜^[25]。Borges 等^[26]探究了浴温分别为 30、40、50 和 60 °C 条件下制备的拉挤复合材料的性能,发现树脂黏度随着浴温升高而降低,适当升高浴温有利于纤维的浸润,但过高的温度(70 °C)会使树脂黏度过低而无法黏附在纤维上。当浴温从 30 °C 升高到 50 °C 时,拉挤复合材料的拉伸强度、硬度和断裂伸长率分别增加了 34.03%、24.07% 和 39%,弹性模量则降低了 9.38%。

2.2.3 树脂黏度

从对纤维浸润度的角度考虑,通常要求树脂的黏度低于 2 000 MPa·s,但黏度过低(<400 MPa·s)会使纤维表面仅有少量树脂覆盖,从而出现复合材料表面纤维裸露的情况。改变树脂的加热温度或加入填料可改变树脂黏度。Shakya 等^[27]探究了树脂黏度对增强纤维浸润度的影响,发现树脂黏度越低,纤维越容易浸润,且注射过程中低黏度树脂所需的注射压力小,不会使纤维过度压实。此外,Mukherji 等^[28]研究发现,在拉挤过程中,较高的树脂黏度将产生较大的摩擦力,需匹配更大的拉力,进而会增加纤维断裂的可能。

2.2.4 压力

拉挤成型工艺中的压力参数包括树脂注射压力和模腔压力两部分。树脂注射压力是指在封闭式浸润工艺过程中,喷射树脂浸润纤维所需的压力。树脂注射压力越大,需要匹配的拉挤速度越高,可提高生产效率,但注射压力过大,树脂的回流距离难以控制,高速流动的树脂使纤维分散不均匀,且纤维被推离腔室壁,导致纤维横向堆积压实,影响纤维的浸润及最终复合材料的性能。因此,在满足浸润要求的条件下应减小注射压力^[11,29-32]。不同注射压力(P_0)下树脂回流距离与时间的关系如图 3 所示。

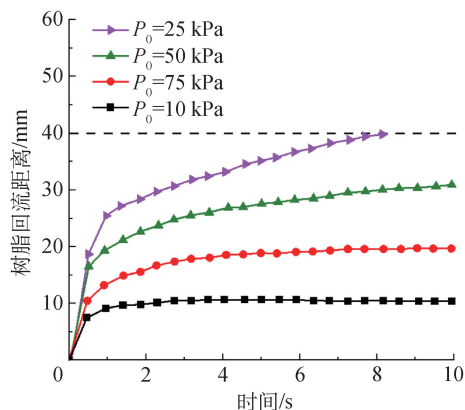


图 3 不同注射压力下树脂回流距离与时间的关系
Fig. 3 Relationship between resin backflow distance and time under different injection pressures

模腔压力受多种因素影响,包括树脂的黏度、拉挤复合材料与模腔之间的摩擦力、材料受热后的膨胀,以及部分树脂或助剂在高温下的气化等。模腔压力对最终复合材料的性能有很大影响,模腔压力过小将导致复合材料表面起皱,过大则会使树脂的流动性增加,复合材料表面出现步进纹等缺陷^[33]。通常模腔压力以 1.7~8.6 MPa 为宜,具体需与纤维的浸润程度和拉挤速度相匹配。

2.2.5 拉挤速度

与温度相比,拉挤速度对复合材料力学性能的影响更大^[34]。拉挤速度通常以 500~1 300 mm/min 为宜。其中,克劳斯玛菲集团的 ipul 拉挤系统,其拉挤速度最大可达 3 000 mm/min。拉挤速度较大时,复合材料在模具出口处的温度高,且提高拉挤速度能够有效减少树脂的回流,使树脂的回流距离在短时间内稳定在可控制的范围内^[29]。不同拉挤速度(u_0)下树脂回流距离与时间的关系如图 4 所示。

拉挤速度对拉挤复合材料固化度的影响如图 5 所示。可以看出:拉挤速度过大时,复合材料固化不均匀、不完全;而拉挤速度过小,则会使复合材料过度固化,且生产效率较低^[35]。

确保拉挤成型复合材料质量的前提下提升拉挤速度是一个难题^[36]。Vedernikov 等^[37]探究了较高拉挤速度对复合材料力学性能和外观的影响,发现随着拉挤速度增大,复合材料表面的气泡、基体裂纹等缺陷增多,密度及截面积也随之增大。通过升高温度改善树脂配方的活性或使用低温高效的引发剂,可有效提高拉挤速度^[38]。

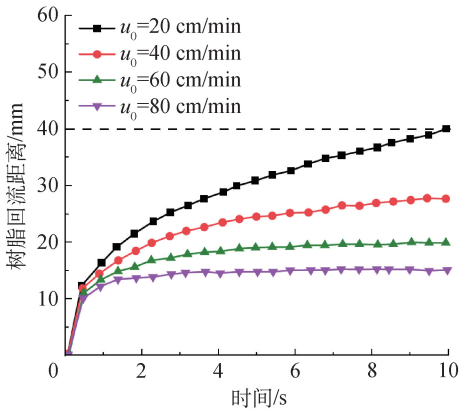


图 4 不同拉挤速度下树脂回流距离与时间的关系
Fig. 4 Relationship between resin backflow distance and time under different pultrusion speeds

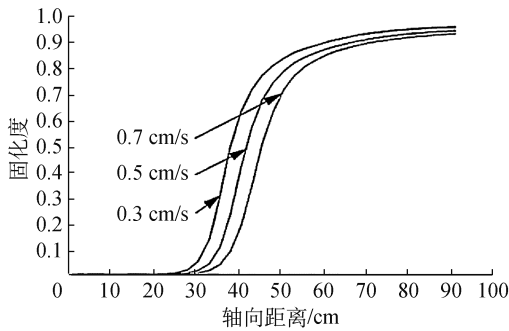


图 5 拉挤速度对拉挤复合材料固化度的影响
Fig. 5 The influence of pultrusion speed on the curing degree of pultruded composites

3 玻璃纤维多腔拉挤成型

多腔拉挤成型工艺可连续拉挤出大型材、多腔复合材料。多腔拉挤复合材料具有良好的整体

性,能够有效减少连接点的数量,且可设计性强^[39]。此外,多空腔的存在能够提高复合材料的保温性,并且还可在空腔内填充保温材料^[40]等,赋予复合材料更好的保温性能。此外,以承载 70 t 重物为例,多腔拉挤玻璃纤维复合材料(GFRP)板的自身质量仅为混凝土板的 20%~40%、钢板的 35.5%,且耐用性优于混凝土板^[41-43]。

3.1 截面形状

多腔拉挤成型工艺可拉挤梯形、三角形、矩形等不同截面形状的复合材料。在工程应用领域,桥面板是一种典型的多腔拉挤复合材料。目前,国际上已形成多个成熟的商业化桥面板产品体系,包括美国的 Superdeck 系统、DurSpan 系统以及丹麦的 Assect 系统等代表性产品^[44],其截面形状各不相同,如图 6 所示。表 3 对比了这 3 种多腔拉挤成型桥面板系统的截面形状、厚度及承载力差异^[45-46]。

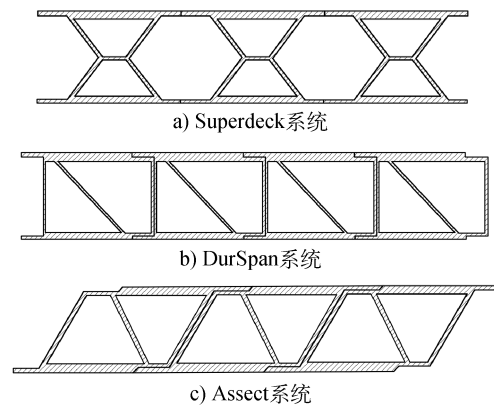


图 6 不同多腔拉挤成型桥面板系统的截面图
Fig. 6 Cross-sections of various multi-cavity pultrusion bridge panel systems

表 3 不同多腔拉挤成型桥面板系统的对比

Tab. 3 Comparison of various multi-cavity pultrusion bridge panel systems

桥面板系统	生产企业	截面形状	厚度/mm	承载力/(kN·m ⁻²)
Superdeck	Creative Pultrusion Inc.(美国)	双梯形	203	1.00
DurSpan	Martin Marirtta Composites(美国)	双梯形	195	1.05
Assect	Fiberline A/S(丹麦)	双三角形	225	0.93

研究者还采用拉挤成型工艺,制备出截面为矩形的三腔拉挤复合材料。制得的型材自身质量小,可实现低成本、大规模生产^[47-49]。图 7 为三腔矩形 GFRP 拉挤型材的截面示意图。

张旭等^[50]通过玻璃纤维增强聚氨酯树脂,拉挤

出腔体截面为长方形的三腔便捷组装的停机坪甲板,该停机坪甲板具有组装快速、涡流降噪、排水防滑等综合优势,显著提高了施工效率和环境适应性。图 8 为组装便捷的停机坪甲板截面示意图。付翰香等^[51]设计了一种空腔为三角形、截面为梯形的拉挤

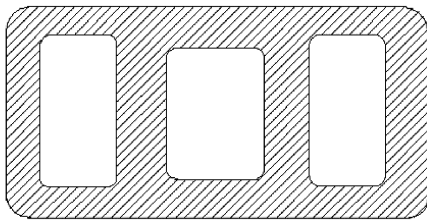


图 7 三腔矩形 GFRP 拉挤型材截面示意图
Fig. 7 Schematic diagram of a three-cavities rectangular GFRP pultruded profile cross-section

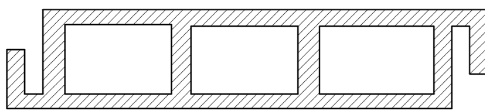


图 8 组装便捷的停机坪甲板截面示意图
Fig. 8 Schematic diagram of an easily assembled helipad deck cross-section

GFRP 桥面板,如图 9 所示。周驰华^[52]开发了一种可用于恶劣环境的,具有防腐、防虫功能和长使用寿命的中空矩形多腔玻璃钢地板,实现了在降低成本的同时减少地板的更换频率。

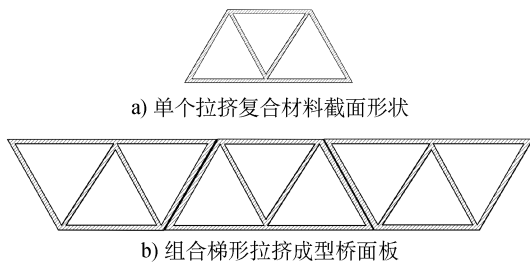


图 9 拉挤 GFRP 桥面板
Fig. 9 Pultruded GFRP bridge panel

3.2 组合方式

目前的多腔拉挤复合材料板多是将两腔或三腔复合材料组合成所需宽度的面板。对拉挤复合材料进行组合的方式通常为咬合连接、铆接、黏接、套管连接、膨胀连接,或在多个空腔外部包缠纤维等^[53]。图 10 为 2 种多腔体拉挤复合材料通过咬合或铆接的方式有序组合,实现宽度方向上的有效拓展^[54]。

两腔或三腔构件运输方便,并可根据需求进行自由组合。然而,由于拉挤复合材料具有各向异性,采用螺栓连接会在节点处发生剪切破坏,并且螺栓连接不适合用于曲面连接^[55],而黏合剂在高温、紫外线等环境下会发生老化,且还需考虑黏合剂与拉挤复合材料的界面性能^[56]。基于此,有研究者提出

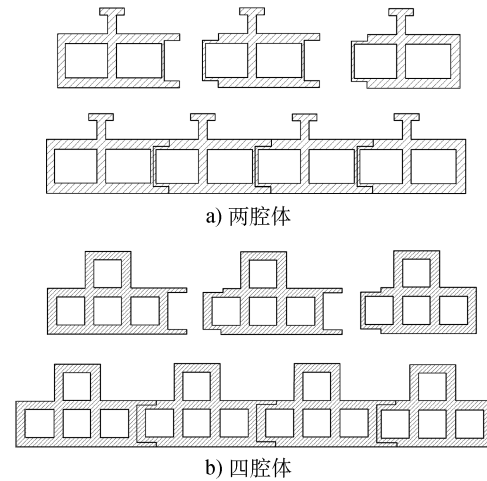


图 10 带肋 FRP 拉挤复合材料
Fig. 10 Ribbed FRP pultruded composites

胶栓混接的连接方法,但因黏合剂与螺栓的刚度存在差异,在实际使用过程中,两者无法协同工作^[57]。总体而言,各种组合方式均存在一定的缺陷。相比而言,一体成型复合材料的抗压强度、极限承载能力、平均面内剪切刚度均更高^[58]。因此,需进一步探究,以实现宽幅多腔复合材料的一次成型。

3.3 性能优化

3.3.1 铺层、编织/缠绕拉挤

传统拉挤成型工艺是将放卷后的纱线直接浸润树脂后固化成型,拉挤复合材料的纵横向力学性能差异大。通过铺层设计或将拉挤成型工艺与编织、缠绕工艺相结合,可显著提高拉挤成型复合材料的横向力学性能,从而更好地应用于承载要求复杂的环境^[59-62]。通过在铺层过程中改变不同角度纤维的占比,对拉挤成型复合材料进行设计,可使其满足不同的力学性能需求。王丛哲等^[63]设计了一种双腔拉挤型材,其 GFRP 拉挤复合材料截面尺寸图及铺层设计如图 11 所示。研究表明,该拉挤成型 GFRP 双腔桥面板纵向弯曲极限承载力高达 347.2 kN。

编织拉挤过程中,放卷后的纤维在拉力的作用下由编织机编织成纤维套,通过改变纤维的编织角度可实现对复合材料力学性能的设计。树脂通过注胶机注入模具浸润纤维,浸润装置通常与固化模具为一体结构,经树脂浸润后的纤维套在固化模具中固化成型^[64]。与编织拉挤不同的是,缠绕拉挤过程中,卷绕装置将放卷后的纤维卷绕在芯模上,纤

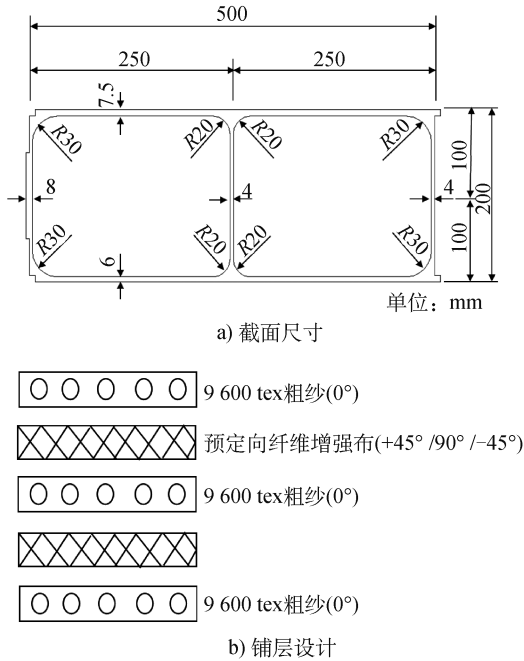


图 11 GFRP 拉挤复合材料截面尺寸及铺层设计
Fig. 11 Cross-sectional dimensions and layup design of pultruded composites

纤维沿横向紧密排列,通过改变纤维缠绕角度对复合材料性能进行设计,能够充分发挥纤维的增强作用^[65]。编织/缠绕拉挤比较适合管状材料的生产。另有学者将编织装置、缠绕装置同时与拉挤成型工艺相结合制备复合材料,如 Liu 等^[66]设计了一种新型编织-缠绕-拉挤成型工艺设备(图 12),成功制备出三维纤维增强树脂基复合材料,所制备的材料在室温环境下具有优异的压缩性能。

3.3.2 优化树脂体系

树脂作为复合材料的重要组成部分,可通过设置不同组分比例的树脂体系制得性能更优的复合材料^[67],并可根据需求赋予拉挤复合材料特定的性能,如分子结构中含有多个环氧基的树脂基体可提高复合材料的耐热性^[68]。张广月等^[69]采用多腔中空板连续成型的方法制备拉挤复合材料,发现合适的树脂体系可使多腔复合材料的弯曲强度、拉伸强度、抗冲击强度和硬度分别提高至 238 MPa、205 MPa、341 MPa 和 45 HBa,且在不同溶液中浸泡 1 a 后,材料的弯曲保留率最高达 98%。

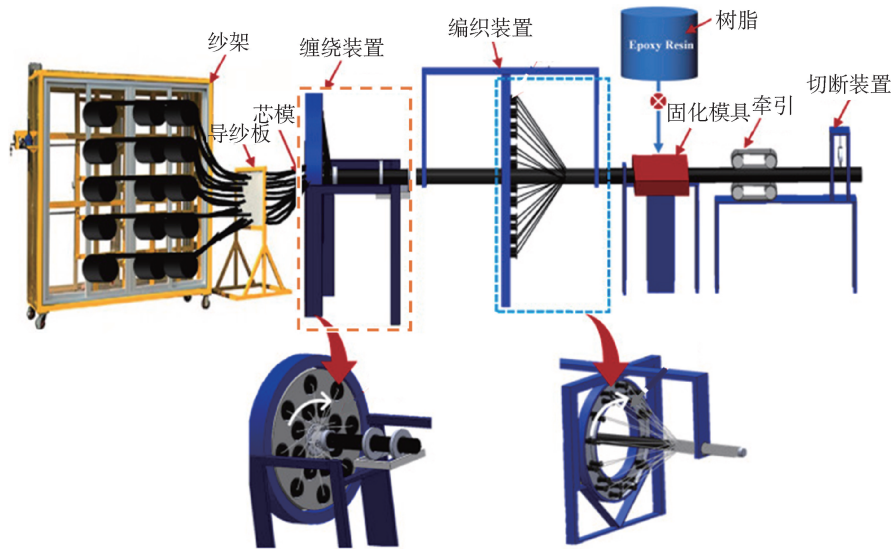


图 12 缠绕-编织-拉挤成型工艺设备
Fig. 12 Weaving-wrapping-pultrusion process equipment

3.3.3 优化型材参数

根据型材的截面增加中间面板、腹板厚度,减小小腹板间的距离,可克服复合材料抗剪切性能差的缺点^[3,70]。试验表明,增大倒角半径,减小拐角中心厚度,可有效减少树脂富集^[71]及应力集中^[72-73]。基于此,可根据型材的应用领域,分析型材应用过程中的

受力特点,优化型材参数,改善复合材料性能。

4 玻璃纤维多腔拉挤复合材料的应用

4.1 桥面板

两腔或三腔拉挤复合材料通过胶接、铆接或其他方式自由组合,可获得所需宽度的桥面板,这类桥

面板的可设计性强,拆卸方便,且可循环使用。由多腔拉挤制件组合而成的桥面板自身质量小,承载能力好,耐腐蚀性强。图 13 为不同截面形状的桥面板组成结构示意图^[74]。

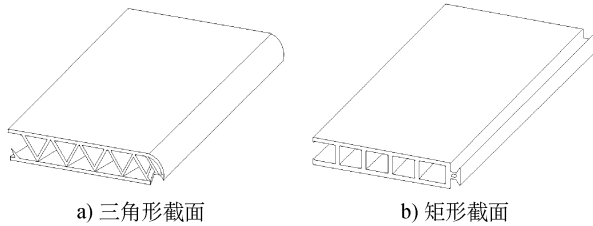


图 13 桥面板组成结构示意图

Fig. 13 Diagram of the composition structure of the bridge panels

Fibrolux 公司开发出一种创新型桥面板,该桥面板由 8 个截面尺寸为 500 mm×150 mm 的大型三腔拉挤复合材料型材组成,目前已被成功应用于波兰大桥的翻新,如图 14 所示。

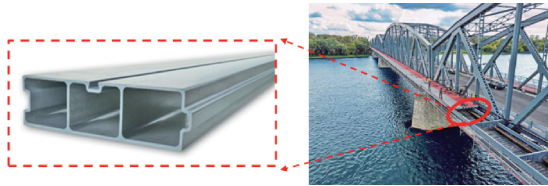


图 14 应用于波兰大桥翻新的拉挤桥面板组成结构(Fibrolux 公司)

Fig. 14 Pultruded bridge panel structure used for the renovation of Polish bridge (Fibrolux)

4.2 地板

目前,地板原材料多为木材或竹子,存在虫蛀、潮湿等问题,且需不定期维护。将多腔拉挤成型复合材料应用于地板^[52],如图 15 所示,能有效解决这些问题。这类地板防潮、防虫,在满足质量要求的同时能够降低成本,且户外使用寿命可达 20~50 a,更换频率低。此外,还可对这类地板进行防滑设计,且由于多腔拉挤成型复合材料间可进行自由组装,地板的拆卸也很便捷,因此相比普通木制夹芯地板更具应用优势。

4.3 构架梁

以玻璃纤维为增强材料的多腔拉挤复合材料的质量仅为钢材的 1/4,其力学性能优异,耐酸碱性好,因此,十分适合在沿海区域等具有碱性侵蚀环境的地区使用,可降低更换频率及维护成本,有望成为钢材的替代品。此外,玻璃纤维拉挤三腔体复合材

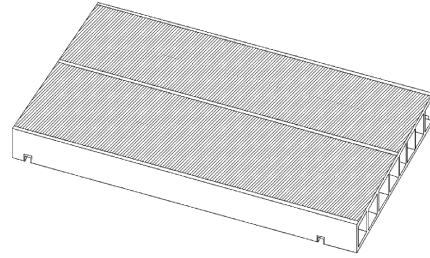


图 15 中空 GFRP 地板

Fig. 15 Hollow GFRP floor panel

料还可应用于高层建筑外挂梁,显著降低传统构架梁的自重,且性能优异。图 16 给出了一种玻璃纤维拉挤三腔体高层外挂构架梁的结构及尺寸^[75]。

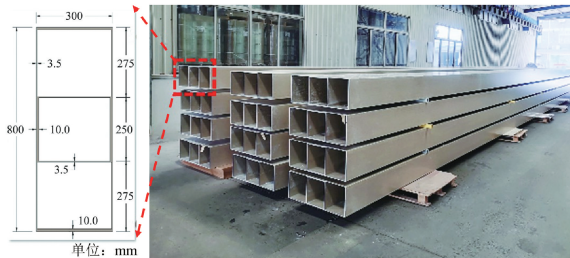


图 16 高层外挂构架梁的结构与尺寸

Fig. 16 Structure and dimensions of high-rise external frame beam

4.4 活动房墙板

随着建筑行业的发展,活动房已成为必不可少的建筑。GFRP 多腔拉挤型材力学性能优异、耐候性好,且可以在多个空腔内填充保温材料以提高保温性能,因此在活动房墙板的应用方面具有很大的潜力。图 17 为活动房墙板构造示意图^[40]。

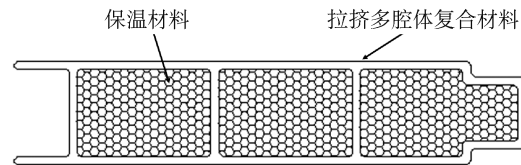


图 17 活动房墙板构造示意图

Fig. 17 Schematic diagram of a prefabricated house wall panel construction

4.5 防护结构

当前已开发应用的防护材料有金属材料、非金属材料及复合材料等,防护结构包括三明治结构、蜂窝结构等^[76]。拉挤 GFRP 多腔夹芯板具有轻质、高强的特点,且一次拉挤成型工艺避免了因连接而产生的缺陷。试验证明,拉挤成型的 GFRP 七腔夹芯

板(图 18)具有极好的防爆性能,该复合材料可用作民防保护结构部件,并可通过增加面板厚度、减小腹板间距离等有效增强其防爆性能^[77]。

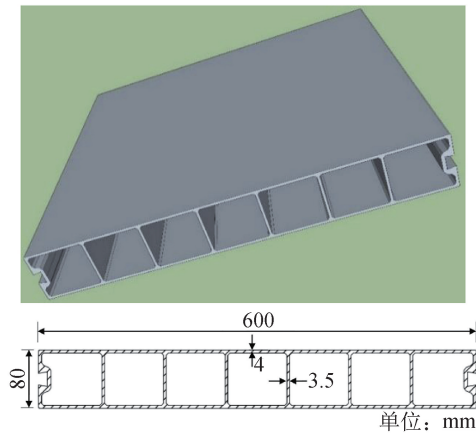


图 18 拉挤 GFRP 七腔夹芯板结构及其尺寸
Fig. 18 The structure and dimensions of a pultruded GFRP seven-cavities sandwich panel

4.6 列车部件

以玻璃纤维为原料的多腔拉挤复合材料应用于列车可实现车体轻质高强的设计目标,进而减少能源消耗,降低碳排放量^[78]。多腔拉挤复合材料可应用于列车底架的空心板(图 19)^[79],以及列车的地板支撑结构^[80]等,其在磁悬浮列车、轨道列车等领域的应用潜力巨大。

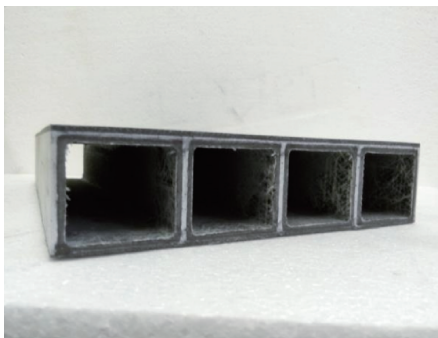


图 19 应用于列车底架的空心板
Fig. 19 Hollow-core slab for train underframe applications

5 结论与展望

本文从原材料、工艺流程、工艺参数等方面介绍了拉挤成型工艺。该工艺的流程简单,生产效率高,适合大规模生产,采用该工艺制备的玻璃纤维多腔拉挤成型复合材料质量小、强度高,整体性能优异。

玻璃纤维多腔拉挤成型复合材料具有多个空

腔,其成本低,保温性能好,制品间可自由组合,通过铺层、编织/缠绕拉挤、优化树脂体系和型材参数,可提高拉挤复合材料的横向力学性能。目前,玻璃纤维多腔拉挤成型复合材料已应用于桥面板、地板、构架梁、活动房墙板、防护结构以及列车底架等方面。

玻璃纤维多腔拉挤成型复合材料的应用领域广泛。然而,现有研究主要集中在单一腔体组合成多腔复合材料的制备工艺优化等方面,对一次成型多腔拉挤复合材料的研究相对匮乏,导致后续加工过程中时间和人力资源的浪费,同时限制了产品的应用范围。

未来的研究可重点从下述几方面展开:深入探究多腔拉挤成型工艺的优化方法,实现更高的生产效率;拓展增强纤维的选择范围,如采用碳纤维、芳纶等高性能纤维或麻类等天然纤维制备多腔体复合材料;根据实际应用需求,开发弯曲复合材料和变截面等特殊结构复合材料的制备工艺。这些方向的研究,有望进一步推动多腔拉挤成型复合材料在更多领域的应用,提升其工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] 陈博. 国内外复合材料工艺设备发展述评之五:拉挤成型[J]. 复合材料科学与工程, 2023(增刊1): 44-63.
- [2] BARKANOV E, AKISHIN P, NAMSONE-SILE E. Effectiveness and productivity improvement of conventional pultrusion processes[J]. *Polymers*, 2022, 14(4): 841.
- [3] 王昊康. 玻璃纤维增强复合材料力学性能研究进展[J]. 合成纤维, 2022, 51(11):40-43.
- [4] 叶轶. 拉挤成型的新亮点[J]. 玻璃纤维, 2021(3):47-48.
- [5] SATHISHKUMAR T P, SATHEESHKUMAR S, NAVEEN J. Glass fiber-reinforced polymer composites: a review[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(13): 1258-1275.
- [6] ZHOU H, WANG H, LUO Z, et al. Research process in composite material wind turbine blade[J]. *Materials Review*, 2012, 26(2A):65-68.
- [7] 刘北军. 复合材料风电叶片主梁疲劳性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2021.
- [8] 崔健, 史珍, 曹亚周, 等. 树脂基复合材料在拉挤成型工艺中的研究现状[J]. 石化技术, 2022, 29(10):33-35.
- [9] MINCHENKOV K, VEDERNIKOV A, SAFONOV A, et al. Thermoplastic pultrusion: a review[J]. *Polymers*, 2021, 13(2):180.
- [10] SVENSSON N, SHISHOO R, GILCHRIST M. Manufacturing of thermoplastic composites from commingled yarns: a review [J]. *Journal of Thermoplastic Composite*

- Materials, 1998, 11(1):22-56.
- [11] THIELEKE P, BONTEN C. Influence of the fiber preheating in *in situ* pultrusion of continuous fiber-reinforced thermoplastic profiles[J]. Fracture and Damage Mechanics: Theory, Simulation and Experiment, 2020, 2309: 020054.
- [12] 廖国峰, 沈伟, 吕飘飘, 等. 适用于拉挤成型工艺环氧树脂及其碳纤维复合材料研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(7): 64-68.
- [13] 冯云龙, 邓双辉, 刘坐镇. 复合材料成型工艺用环氧树脂基体的技术要求与应用探讨[C]// 中国复合材料学会. 第三届中国国际复合材料科技大会论文集. 杭州, 2017:545-551.
- [14] 田谋锋, 谈娟娟, 王雷, 等. 新型拉挤酚醛树脂及其复合材料的性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(9): 77-82.
- [15] 王成忠, 陈伟明, 梁平辉, 等. 耐高温拉挤环氧树脂及其复合材料性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2025(5): 10-12.
- [16] 郭智臣. 巴斯夫推出拉挤成型聚氨酯树脂, 温度稳定性高达 200 °C[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2020, 18(1):33.
- [17] JOSHI S C, LAM Y C. Modelling the effects of resin shrinkage in pultrusion of composites sections[J]. Advanced Composites Letters, 2000, 9(6):385-395.
- [18] 于天淼, 高华兵, 王宝铭, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4):139-144.
- [19] GRIGOR'EV S N, KRASNOVSKII A N, KVACHEV K V. Permeation of glass fibers during pultrusion of polymer composite materials[J]. Glass and Ceramics, 2015, 71(11): 443-445.
- [20] 卞忠义. 拉挤成型固化工艺探索[J]. 热固性树脂, 2002, 17(1):24-26.
- [21] 毛雅赛, 覃兆平, 张为军, 等. 一种桥梁用 FRP 拉挤型材及成型设备与制备方法:CN201310005643.0[P]. 2015-03-04.
- [22] 宋伟. 复合材料构件先进拉挤工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [23] 黄克均, 张建伟. 拉挤成型工艺及应用[J]. 工程塑料应用, 1997, 25(3):54-57.
- [24] DIAS R D C, SANTOS L D, OUZIA H, et al. Improving degree of cure in pultrusion process by optimizing die-temperature[J]. Materials Today Communications, 2018, 17: 362-370.
- [25] 卢少微, 谢怀勤, 陈平. GFRP 拉挤成型工艺模拟优化[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1):46-51.
- [26] BORGES S G, FERREIRA C A, ANDRADE J M, et al. The influence of bath temperature on the properties of pultruded glass fiber reinforced rods[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34(15):1221-1230.
- [27] SHAKYA N, ROUX J A, JESWANI A L. Effect of resin viscosity in fiber reinforcement compaction in resin injection pultrusion process[J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(6):1173-1193.
- [28] MUKHERJI A, NJUGUNA J. An assessment on effect of process parameters on pull force during pultrusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(5/6):3419-3438.
- [29] DING X L, HE Q G, YANG Q, et al. Numerical simulation of impregnation process of reactive injection pultrusion for glass fiber/PA6 composites[J]. Polymers, 2022, 14(4):666.
- [30] SRINIVASAGUPTA D, POTARAJU S, KARDOS J L, et al. Steady state and dynamic analysis of a bench-scale injected pultrusion process[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(9):835-846.
- [31] SHAKYA N, ROUX J A, JESWANI A L. Operational envelope in resin-injection pultrusion with compaction[J]. Journal of Porous Media, 2015, 18(1):15-27.
- [32] RAHATEKAR S S, ROUX J A. Epoxy/glass resin injection pultrusion simulation[J]. Polymers & Polymer Composites, 2004, 12(7):537-550.
- [33] 王宇, 齐俊伟, 王跃全, 等. 多区间热压对拉挤制品成型质量的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(10):10-18.
- [34] 荆蓉, 张锐涛, 孟雨辰, 等. 连续玻璃纤维/聚丙烯热塑性复合材料拉挤成型中的工艺参数[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2782-2788.
- [35] GORTHALA R, ROUX J A, VAUGHAN J G. Resin flow, cure and heat-transfer analysis for pultrusion process[J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(6):486-506.
- [36] 王永伟. 碳纤维复合材料连续拉挤集成技术及工程化应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [37] VEDERNIKOV A, GEMI L, MADENCI E, et al. Effects of high pulling speeds on mechanical properties and morphology of pultruded GFRP composite flat laminates[J]. Composite Structures, 2022, 301:116216.
- [38] 杨澂, 王茂珍. 不饱和聚酯玻璃钢拉挤成型固化工艺初探[C] //中国硅酸盐学会玻璃钢分会. 第十届玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 烟台, 1993: 234-237.
- [39] 薛伟辰, 张蜀泸. FRP 桥面板工程应用进展[C]// 中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会纤维混凝土委员会. 第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集. 大连, 2006: 205-210.
- [40] 王博, 王伟, 屈建, 等. 新型复合拉挤墙板承载性能研究[C]// 2022 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集. 北京, 2022: 638-641.
- [41] 张为军, 田野, 覃兆平, 等. 桥梁用大截面 FRP 拉挤型材的结构设计与试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(增刊 3): 55-60.
- [42] TANG J, ZHOU Z P, CHEN H, et al. Research on the lightweight design of GFRP fabric pultrusion panels for railway vehicle[J]. Composite Structures, 2022, 286:115221.
- [43] FENG P, CHEN C, YE L. Comparison of durable GFRP panel and concrete panel for long term[C]//International Conference on Durability of Concrete Structures. Hangzhou, 2008:837-843.
- [44] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction; state-of-the-art

- review[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(2):73-87.
- [45] 万水, 胡红, 周荣星. FRP桥面板结构特点与实例[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(1):17-21.
- [46] MARA V. Fibre reinforced polymer bridge decks: sustainability and a novel panel-level connection [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
- [47] 陈道斌. 三孔空心板型材的制作工艺:CN201410296084.8 [P]. 2016-05-18.
- [48] SELIER J, JESUS W P D. 实现碳纤维在主要市场领域的应用[J]. 陈晶晶, 译. *国际纺织导报*, 2021, 49(2): 5-6.
- [49] 王时雨, 郎凤超, 刘佳伟, 等. 纳米压痕不同加载速率下碳纤维增强树脂基复合材料力学性能响应[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4):309-317.
- [50] 张旭, 刘强, 张雅民, 等. 一种便捷组装的停机坪甲板: CN201920386254. X[P]. 2019-12-13.
- [51] 付翰香, 薛元德, 李文晓. 拉挤成型FRP桥面板的研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2003(6):45-48.
- [52] 周驰华. 一种中空玻璃钢地板及其制备方法:CN108396935A [P]. 2018-08-14.
- [53] 冯鹏. 新型FRP空心桥面板的设计开发与受力性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [54] 黄海林, 宾智, 曾垂军, 等. 一种带肋FRP构件: CN203795307U[P]. 2014-08-27.
- [55] YANG X, BAI Y, DING F X. Structural performance of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites[J]. *Composite Structures*, 2015, 133:986-996.
- [56] STAZI F, GIAMPAOLI M, ROSSI M, et al. Environmental ageing on GFRP pultruded joints: comparison between different adhesives [J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 404-414.
- [57] 刘路路. FRP桁架构件一节点一体化设计及性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [58] XIN H H, MOSALLAM A, LIU Y Q, et al. Experimental and numerical investigation on in-plane compression and shear performance of a pultruded GFRP composite bridge deck[J]. *Composite Structures*, 2017, 180:914-932.
- [59] VOLK M, YUKSEL O, BARAN I, et al. Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: a review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 246:110135.
- [60] SAITO T, NAKAI A, OHTANI A. Effects of fabrication method of composite yarn intermediate material and resin melt viscosity on the impregnation properties and mechanical properties of PA66 fiber and glass fiber composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2022, 35(12): 2409-2434.
- [61] 孙震, 姜鑫, 高铭泽, 等. 三维角联锁机织与双轴向经编复合材料风力机叶片弯扭耦合特性对比分析[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(2):128-136.
- [62] 赵雄翔, 孙鹏文, 李天泽. 基于疲劳累积损伤的风力机叶片铺层厚度优化[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4):346-350.
- [63] 王丛哲, 刘玉擎, 辛灏辉. 拉挤型GFRP管形桥面板弯曲性能试验[C]//中国硅酸盐学会玻璃钢分会. 第二十一届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 哈尔滨, 2016:43-46.
- [64] 王东宁, 安柳絮. 拉挤编织复合材料压缩性能研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2023, 59(7):57-59.
- [65] 常志远. 连续纤维缠绕成型GFRP箍筋弯曲段受拉性能研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
- [66] LIU X, SHEN W, FU J C, et al. A novel pultrusion method and axial compression behavior of 3-D braiding-winding-pultrusion composite tubes at different temperatures [J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 245:110340.
- [67] 李孟洋, 李炜, 罗永康. 拉挤工艺用耐高温环氧树脂性能研究与开发[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2011(4):55-59.
- [68] 梁平辉, 苏浩, 杜后武. 架空导线用纤维增强复合芯棒拉挤树脂研制[J]. *科技导报*, 2016, 34(8): 71-76.
- [69] 张广月, 陶青, 朱建忠. 一种多腔中空板连续成型方法: CN202011119186. 4[P]. 2021-02-09.
- [70] SIRAJUDEEN R S, SEKAR R. Buckling analysis of pultruded glass fiber reinforced polymer (GFRP) angle sections [J]. *Polymers*, 2020, 12(11):2532.
- [71] XIE D, HU Z J, WANG B X, et al. Axial behavior of basalt FRP-confined reinforced concrete columns with square sections of different corner radii [J]. *Engineering Structures*, 2023, 274:115153.
- [72] 张雅民, 刘强, 陈洪月, 等. 一种耐腐蚀路面板: CN201821164801. 1[P]. 2019-02-01.
- [73] 刘小方, 段昕智, 欧阳利军. 基于倒角处拉应变的玄武岩纤维约束矩形截面混凝土轴压峰值应力计算模型[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11):5650-5663.
- [74] MOSTOFINEJAD D, MOSHIRI N, MORTAZAVI N. Effect of corner radius and aspect ratio on compressive behavior of rectangular concrete columns confined with CFRP [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(1/2):107-122.
- [75] 秦珩, 刘天桥, 于涛峰, 等. 超轻大尺寸复合材料拉挤型材在高层建筑外挂构梁中的应用研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(1):100-106.
- [76] 吴玮栋, 高星, 郗彦辉, 等. 双层复合结构对混凝土墙防护性能的模拟研究[J]. *河北工业大学学报*, 2022, 51(6):25-30.
- [77] ZHANG B, HE H G, ZHOU Q, et al. Blast responses of pultruded GFRP fluted-core sandwich panels: testing and analyzing[J]. *Polymer Testing*, 2019, 79:106047.
- [78] 李龙, 周盛世, 孙瑞鸿. 基于超效率SBM模型的省域建筑业碳排放效率及影响因素分析[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(1):91-96.
- [79] 黎缘. 复合材料空心板结构列车底架的设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.

[80] ITD INST TECH & DESIGN EV EGZ. load-bearing component, for vehicle i. e. car, has multiple chambers arranged in longitudinal direction of vehicle, where floor support is formed as frame profiles partly made of plastic in

pultrusion process;DE202010001076-U1[P/OL]. 2010-01-19.
https://webofscience. clarivate. cn/wos/alldb/full-record/
DIIDW:2010H82167.

欢迎订阅 2026 年《纺织器材》

《纺织器材》是由中国纺织信息中心、中国纺织机械协会和陕西纺织器材研究所有限责任公司共同主办,由全国纺织器材科技信息中心、陕西纺织器材杂志社有限责任公司编辑出版的纺织器材行业唯一的全国性科技综合期刊(ISSN 1001-9634,CN 61-1131/TS),国内外公开发行。主要栏目有技术专论、生产实践、应用研究、革新改造、综合述评、科学管理、标准与检测、新品之窗等。专业性强、信息量大是本刊特色,可供纺织行业的各级领导、科技人员、管理干部参考,也是大专院校师生了解纺织器材发展的重要刊物。

《纺织器材》被“万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群”文献源、“中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)”统计源期刊、“中国期刊全文数据库(CJFD)”文献源、“中国学术期刊(光盘版)”文献源、“中国期刊网”文献源、“中文科技期刊数据库”文献源、“中国纺织文摘”文献源等全文收录,是全国纺织工业优秀期刊。2007 年《纺织器材》成功通过国家新闻出版署启动的全国期刊出版形式规范检查,进入中国新闻出版报刊登的全国期刊出版形式规范合格期刊名单,连年被

陕西省科技期刊编辑学会评为优秀期刊或特色期刊。

《纺织器材》为双月刊,单月底出版发行。邮发代号 52-125,每期定价 15 元,全年订费 90 元。请在当地邮政局/所订阅,或直接通过编辑部办理订阅手续,订单电、函索即寄。

欢迎赐稿,欢迎刊登广告,详情可来电或登录纺织器材信息网。

地址:陕西省西安市浐灞生态区浐灞三路 789 号秦创原科控浐灞创新园 E 座 911 室 陕西纺织器材杂志社有限责任公司(710016)

电话:029-83553518 83553528(投稿与咨询)

029-83553540 83553545(合作与订阅)

Http://www.ctainfo.cn

E-mail: fzqc@vip.163.com

官方微信号:纺织器材在线(fzqc_online)

户名:陕西纺织器材杂志社有限责任公司

账号:614899991013000034795

开户行:交通银行咸阳渭阳路支行



欢迎订阅《国际纺织品流行趋势》

《国际纺织品流行趋势》创刊于 1981 年,双月刊。是一本全方位系统提供从流行色、纱线、面料、辅料、图案到服装等纺织品国际时尚流行资讯,设计趋势,产品开发及相关研究成果的专业期刊。

《国际纺织品流行趋势》自创刊之日起就定位于为服装等纺织品设计领域专业人士提供专业的服务。期刊关注设计趋势,贴近行业需求,将竭诚为读者提供前沿趋势和切实有用的专业内容,以适应纺织品市场的全球化挑战和时尚潮流变换。《国际纺织品流行趋势》设有秀场直击、设计趋势、品牌风尚、服装设计与工程、学院创意、纤维艺术、视觉·模特、专栏·纱线、行业观察等主要栏目。

订阅方式:《国际纺织品流行趋势》编辑部

国内统一刊号:CN12-1266/TS

国际标准刊号:ISSN 1007-8789

邮发代号:6-308

电话: +022 60365475(稿件查询)

+022 60365363(合作与订阅)

+022 60365362(信息中心)

电子邮箱: gjfzplxqsbjbo163.com

订阅方式:全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系

国内定价:60 元/期,360 元/年(港、澳、台邮费另收)

国外定价:60 美元/期,360 美元/年



天津时装官微



购书微店