

三维编织技术的发展及展望

苏传丽 程亚男 张联合 张靖

中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

摘要: 三维编织技术是将纤维/纱线按照设计要求进行精确定位和分布, 编织出一体成形的整体空间网状结构的一种加工方法。介绍三维编织技术的概念, 然后重点概述行列式三维编织、旋转式(角轮式)三维编织和六角式三维编织的技术原理及相关设备, 最后展望三维编织技术未来发展方向, 以期对相关领域的研究者和工程技术人员提供参考和借鉴。

关键词: 三维编织技术; 三维编织机; 预制件; 携纱器; 行列式; 旋转式(角轮式); 六角式

中图分类号: TS 105.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)03-0027-08

Development and prospect of three-dimensional braiding technology

Su Chuanli, Cheng Yanan, Zhang Lianhe, Zhang Jing

CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China

Abstract: Three-dimensional braiding technology is a kind of process method that accurately locates and distributes fibers/yarns according to the design requirements, and braids them into an integrated spatial network structure. The concept of three-dimensional braiding technology was introduced. Then, the technical principles and related equipments of track-and-column three-dimensional braiding, rotary (horn-gear) three-dimensional braiding and hexagonal three-dimensional braiding were mainly summarized. And finally, the future development directions of three-dimensional braiding technology were prospected, aiming to provide references and guidances for researchers and engineers in relevant fields.

Keywords: three-dimensional braiding technology; three-dimensional braider; preform; yarn carrier; track-and-column type; rotary (horn-gear) type; hexagonal type

随着三维纺织技术的快速发展, 多种相关技术如三维机织、三维针织、三维缝合、三维针刺及三维编织等应运而生^[1-2]。其中, 三维机织技术基于多层经纱织造的方法将若干层经纱和纬纱接结在一起, 但织造的预制件形状有限^[3]。三维针织技术通

过经编工艺对不同方向的纤维/纱线进行捆绑, 自由定制每层纤维/纱线的方向, 但织造的预制件厚度有限^[4]。三维缝合技术采用缝合线对 2 层或多层织物进行整体缝合, 但织造的预制件面内强度可能有所降低^[5]。三维针刺技术基于针刺工艺在铺层的二

收稿日期: 2024-12-24

作者简介: 苏传丽, 女, 1994 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为纺织复合材料, 1185049@mail.dhu.edu.cn

维纤网织物中引入厚度方向的纤维,构建三维形式的增强结构预制件,其制备效率高,但所得预制件层间性能相对较差^[6]。三维编织技术按照设计要求将定位分布的纤维/纱线编织成一体成形的空间网状结构。

5种三维纺织技术中,三维编织技术具备原材料适应性强(几乎涵盖所有类型的纤维/纱线)、结构可设计性强、近净尺寸一体编织成形和整体性好等优点,在制备高性能复合材料方面具有显著的优势^[7]。

本文将从三维编织技术和三维编织机的角度出发,详细介绍三维编织技术的发展状况,展望其未来需进一步突破的方向,以期对相关领域的研究者和工程技术人员提供参考和借鉴。

1 三维编织技术的概念

三维编织技术是编织纱按照设定的运动程序,在携纱器的带动下不断变换位置,于平面内和厚度方向连续交织,进而得到具有特定形状且呈整体性结构的预制件的一种编织技术^[7]。这种预制件在结构方面呈现整体性好、连续性强和一体成形的特点,在性能方面表现出高比强度、高比模量等的特性。根据编织纱运动方式的不同,三维编织技术可分为3类:行列式三维编织、旋转式(角轮式)三维编织和六角式三维编织^[8]。其中,根据完成1个编织循环中携纱器运动步数的不同,行列式三维编织技术又可以分为四步法三维编织技术、二步法三维编织技术和多步法三维编织技术。基于此,现已开发出一系列三维编织机。

2 行列式三维编织技术

2.1 四步法三维编织技术

早在20世纪60年代,Douglass就对编织技术及其机制进行了详细讨论,并提出将编织物作为复合材料增强体降低异形构件制造成本的观点。此观点随后即引起了人们的高度关注。1982年,Floretine发明了一种名为“Magnaweave”的设备并申请了专利^[9]。该设备为气动式方形四步法三维编织机,其携纱器排布为21行×21列,可通过开关系统控制行与列的驱动,灵活编织出多种截面结构,包括板状、管状、半柱状及柱状等,显著拓宽了行列式三维编织技术的应用。在其四步法三维编织过程中,携纱器的运动遵循由4个步骤组成的循环模式,涉及4个不同的运动方向:第一步,相邻行的携纱器交替地向左或向右移动1个位置;第二步,相邻列的携纱器交替地向上或向下移动1个位置;第三步,相邻行的携纱器反向移动,与第一步相反;第四步,相邻列的携纱器反向移动,与第二步相反^[10]。

行列式三维编织机的轨道排列方式一般有2种:一种是间距相同的纵列轨道和行列轨道;另一种是半径成比例的同圆心圆环轨道和以圆心为端点的放射状轨道。四步法三维编织技术根据轨道排列方式分为四步法矩形三维编织技术(图1)和四步法圆形三维编织技术(图2)。此外,在四步法三维编织过程中,通过向长度、宽度及厚度这3个维度上添加纱线,可以构建出三维五向、三维六向和三维七向等复杂编织结构^[11],这不仅能丰富编织物的结构层次,还能满足不同方向对编织物的性能要求^[12-13]。

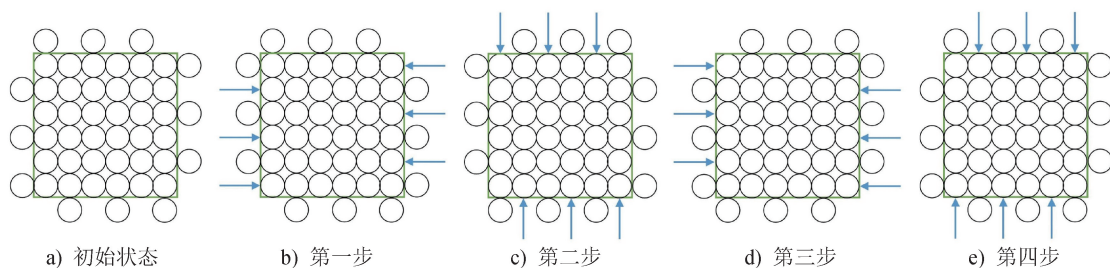


图1 四步法矩形三维编织步骤示意

Fig. 1 Schematic diagram of four-step rectangular three-dimensional braiding steps

同样在1982年,美国大西洋研究公司制备了携

纱器排布为64行×194列的大型四步法三维编织

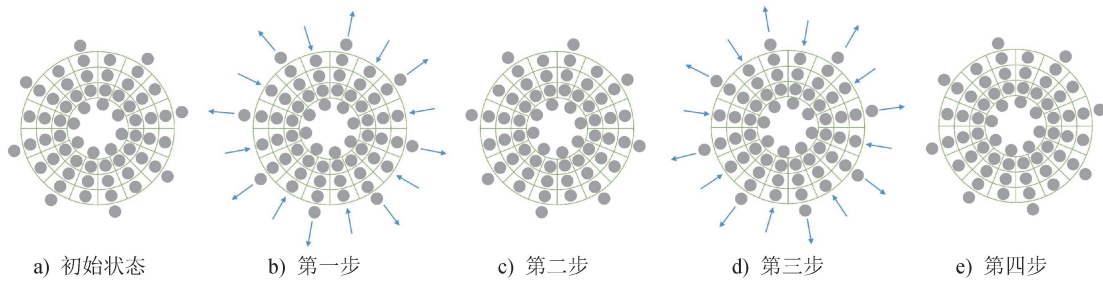


图 2 四步法圆形三维编织步骤示意
Fig. 2 Schematic diagram of four-step circular three-dimensional braiding steps

机,进一步增加了编织纱的数量。1989年,美国北卡罗莱纳州立大学成功研制出一种全自动连续喂纱的四步法三维编织机,极大地提高了编织效率^[14]。这一时期,国内高校通过与国外研究机构及企业合作,学习并引进了三维编织技术中的先进技术。1989年,天津工业大学复合材料研究所率先在国内开展了三维编织技术的研究和试验工作,在短短的1年内自主成功研制出我国首台机械式三维编织机,并利用该设备编织出首件国产立体织物,标志着我国在该领域取得了重要突破。如今,通用技术中国纺织科学研究院有限公司(中纺院)研制的三维编织圆机携纱量达1500根。在该编织圆机上,中纺院开展了四步法三维编织一体化成形技术的研发工作,且相关产品已通过航天科工集团的测试与验证。四步法三维编织一体化成形预制件已实现在产品中的应用,这进一步巩固了国产三维编织装备在航空航天用复合材料领域的优势地位。

2.2 二步法三维编织技术

二步法三维编织技术是在四步法三维编织技术之后,由杜邦公司的研究人员 Popper 和 Connel 于 1987 年发明的^[15]。二步法三维编织过程中,编织纱分为 2 类——固定不动的轴纱(图 3 和图 4 中的灰色部分)和参与交织运动的编织纱(图 3 和图 4 中的绿色部分)。其编织纱的运动分为 2 个步骤:第一步,编织纱按照图 3a) 或图 4a) 中的箭头方向移动;第二步,编织纱按照图 3b) 或图 4b) 中的箭头方向移动。2 个步骤形成一个完整的循环单元。因此,与四步法三维编织技术相比,二步法三维编织技术中携纱器的运动规律相对简单,适用于板状、管状及较厚结构编织物的编织。Du 等^[16]详细介绍了二步法方形三维编织预制件中编织纱和轴纱的交织状况,并根据其细观结构推导出编织工艺参数和结构参数之间的关系,用于后续根据预制件中纱线的紧密状态确定编织工艺参数的范围。

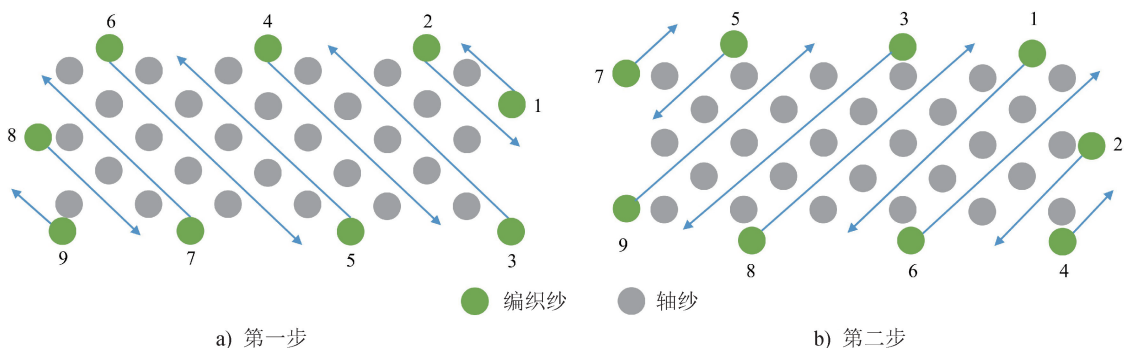


图 3 二步法矩形三维编织步骤示意
Fig. 3 Schematic diagram of two-step rectangular three-dimensional braiding steps

2.3 多步法三维编织技术

1992年,Kostar和Chou在四步法和二步法的基础上发明了多步法三维编织技术^[17]。在该技术的编织过程中,编织构件被拆分成若干个相连的小矩

形编织区。携纱器穿行在相互连接的小矩形编织区之间,经过多个步骤后完成1个编织循环,回到初始位置。预制件的横截面复杂程度越高,则完成1个编织循环所需的步骤越多。在矩形编织机上,四步法

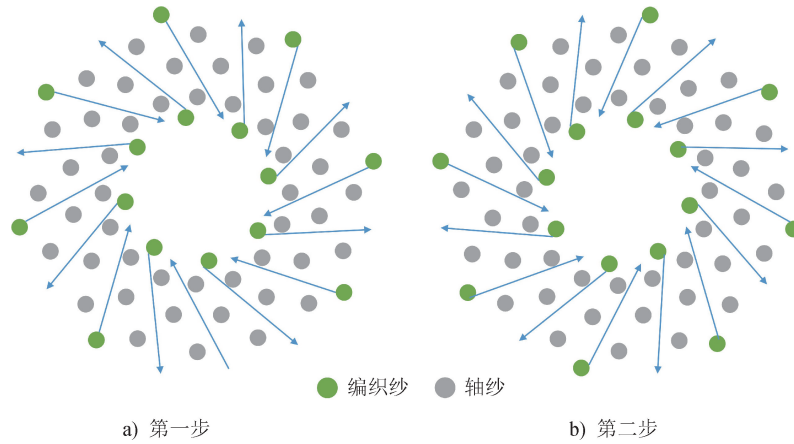


图4 二步法圆形三维编织步骤示意

Fig. 4 Schematic diagram of two-step circular three-dimensional braiding steps

三维编织技术无法制备出异形截面的构件,而多步法三维编织技术则可以成功制备出包括C形、S形、L形、T形、十字形、工字形及回形等复杂的异形截面构件,用于飞机尾翼工字梁、起落架、地板梁、导弹壳体及传动轴等关键部件。陈和春等^[18]采用六步法三维编织技术制备出C形截面的预制件,其携纱器排布

为15行×28列,如图5所示。矩形编织机上的编织区被划分为3个相连的小编织区A、B和C。采用六步编织循环,在每个小编织区内完成一个完整的四步法编织。同时,携纱器在相连的2个编织区之间穿行,最终将3个小编织区完整地编织在一起,形成外表结构平整且没有缝隙的C形截面预制件。

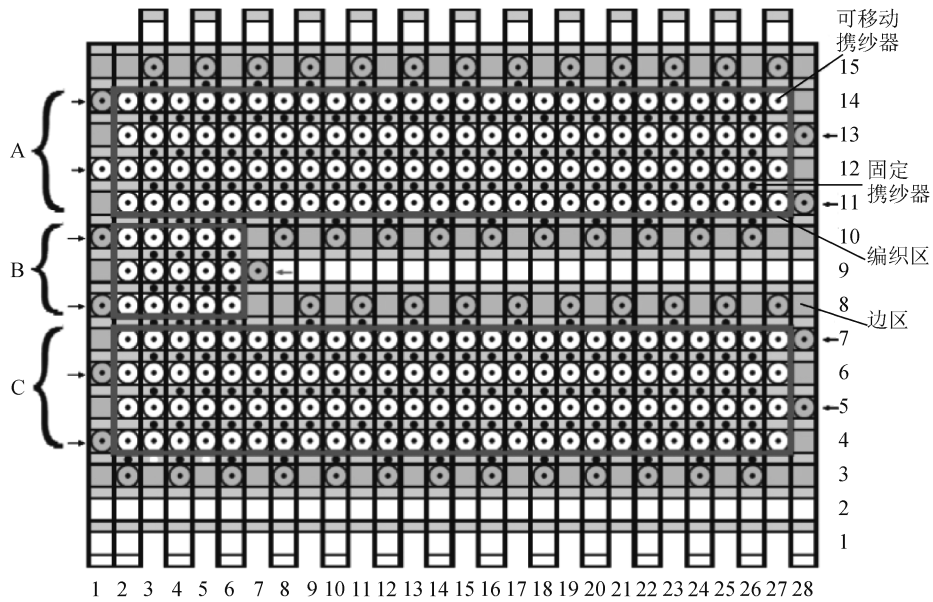


图5 C形预制件编织分区示意

Fig. 5 Braiding partition schematic diagram of C-shape preform

3 旋转式(角轮式)三维编织技术

旋转式三维编织机源于传统的二维 Maypole 编织机,如五月柱编织机和编带机等,因其中引入了角轮机构驱动携纱器,故也称为角轮式三维编织

机^[8]。在这种编织机中,携纱器按照特定的规律安装在角轮缺口处。随着角轮的转动,携纱器在机器底盘上有规律地从一个角轮处转移到相邻的角轮处,并带动纱线交织,最终得到完整的三维结构预制件^[19-21]。在旋转式三维编织机中,角轮阵列可以根据编织需求灵活排布,如排成带状或其他任意平面

形状。相较于行列式三维编织机,旋转式三维编织机在预制件编织成形方面具有更高的效率和更优的质量,其具备编织高精度复杂空心结构预制件的能力^[22]。

根据携纱器排布方向的不同,旋转式三维编织机可分为轴向式三维编织机(图 6)和径向式三维编织机(图 7)。轴向式三维编织机发展较早,携纱器沿轴向方向移动,编织纱的运动方向与其重力方向垂直,且编织过程中编织纱的长度不断变化,编织纱的张力波动较大,易导致预制件编织密度不匀。径向式三维编织机的携纱器安装在球形轨道盘内,携纱器沿径向方向移动,编织纱的张力波动显著减小^[23]。此外,径向式三维编织机还具备轴向式三维编织机所没有的往复编织能力。凭借该能力,径向式三维编织机可以一次性完成多层结构件的编织成形,编织效率大幅提升。

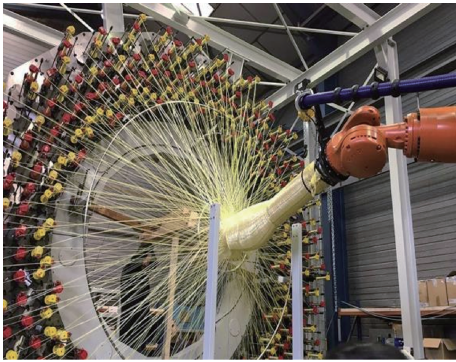


图 6 轴向式三维编织机
Fig. 6 Axial three-dimensional braider



图 7 径向式三维编织机
Fig. 7 Radial three-dimensional braider

2000 年,Laourine 等研制出配有特制离合装置的 Herzog 旋转式三维编织机,其携纱器的停止和旋转易于控制^[24]。美国 3Tex 公司也推出了组合角轮式三维编织机,用于连续编织截面为 T 形等的预制件。2017 年,东华大学联合徐州恒辉编织机械有限公司研制出端面锭子轨道三维立体编织机、内环锭子轨道立体编织机及七轴联动机器人芯模牵引系统,实现了连续自动编织,可编织变截面、变密度、三维非正交结构的大尺寸碳纤维/玻璃纤维等复合材料预制件,最大编织截面尺寸和最大编织半径分别达 450 mm×450 mm 和 1 000 mm^[25]。2023 年,由东华大学联合江苏高倍智能装备有限公司研制的内环系列和满锭子系列三维编织机已实现规模化应用,其中直径为 8 m 的环形径向三维编织机,配置有 576 个编织锭子,最大编织截面尺寸达 500 mm×500 mm,支持预制件厚度、纤维取向及形状的定制,可编织变截面、变曲率及大壁厚的复杂结构承力件。在工程应用方面,该装备已成功实现地铁转向架构架侧梁主承力结构件的一体化编织成形,突破了传统分体式制造工艺的局限。这项技术的创新不仅验证了大型复杂承力构件整体成形的可行性,更为轨道交通装备轻量化提供了先进的制造解决方案,标志着我国在高性能纤维复合材料结构件制造领域取得技术突破。

总之,相较于行列式三维编织机,旋转式三维编织机实现了高精度、高速度的自动化编织,整个编织过程无需人工参与,制造成本低,缺点是安装的携纱器数量有限,这制约了其大尺寸异形件的加工能力。

4 六角式三维编织技术

六角式三维编织技术和设备出现相对较晚,目前仍处于研发探索阶段,已取得的初步研究成果主要涉及六角式三维编织的成形原理、编织工艺的优化,以及编织物的可织造性和力学性能等。

加拿大英属哥伦比亚大学联合德国亚琛工业大学纺织技术学院研发出第一代六角式三维编织机,其在不缩减纱锭数量的基础上,实现了编织机的小型化。该编织机的核心在于其六角形角轮设计,如图 8 所示^[26-28],每个角轮上最多可安装 6 个携纱器,显著提高了纱锭密度。第二代六角式三维编织机引

入了类似蕾丝编织机的转换装置^[29],使得每 2 个携纱器能够在角轮之间灵活交换位置,确保了每个角轮都能充分发挥其 6 个携纱器的作用,如图 9 所示^[26]。六角式三维编织机的基础构建单元是六角形角轮。角轮的间隙区域用于安置携纱器。在六角形角轮的驱动下,携纱器沿六角形角轮翼缘传递,带动纱线按特定轨迹在空间交织,形成三维编织物。相较于传统的旋转式三维编织机,六角式三维编织机不仅实现了体积的缩减,还打破了编织物尺寸和形状受机器体积和编织底盘的束缚,可编织常规等截面(如圆形、方形、三角形、六角形和星形等)结构、变截面复杂结构及多通道结构预制件,且编织过程中编织纱张力波动极小,这一特性使得该技术非常适用于编织对纱线张力均匀性有极高要求的高精密织物,如医疗领域用缝合线、人工血管及人工支架等^[30]。所编织的预制件直径都相对较小,这与步进电机额定功率、电机群控制及生产成本等因素制约着机器编织底盘上的携纱器数量有关。

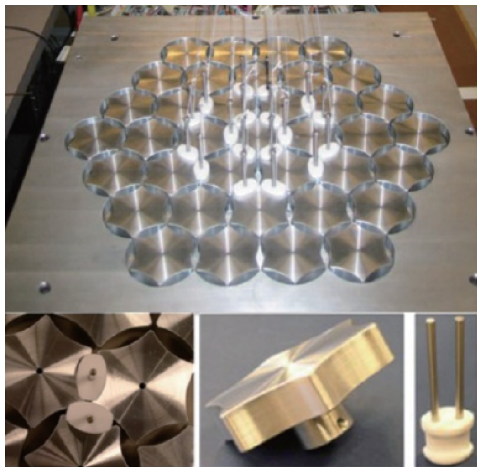


图 8 第一代六角形角轮设计
Fig. 8 Design of the first generation hexagonal corner wheel

为提高携纱能力并防止编织纱碰撞, Yang 等^[31]提出了一种优化的六角式三维编织机,其角轮系统如图 10 所示。与第二代六角式三维编织机相比,优化的六角式三维编织机采用了具有 3 个切口的齿轮作为新的开关机构,而非传统的开关机构。这种改进不仅提高了携纱能力,还使得齿轮之间的载体传递更加灵活,可编织更复杂的结构。其开发的带有补偿算法的程序可控制每台电机,能有效消除电机误差积累。所组装的编织机能够利用控制系



图 9 第二代六角形角轮设计
Fig. 9 Design of the second generation hexagonal corner wheel

统自动编织不同的织物,具备制造复杂复合材料预制件的能力。

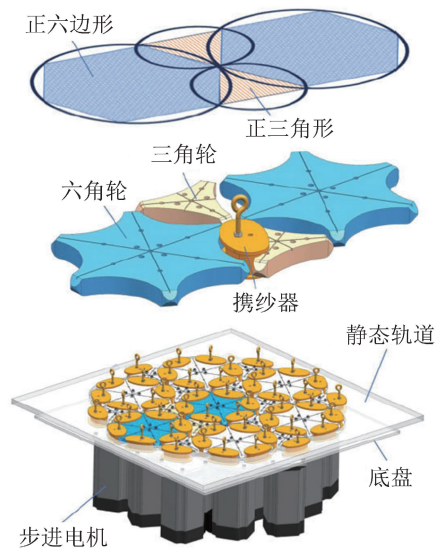


图 10 优化的六角形角轮系统设计
Fig. 10 Design of the optimized hexagonal corner wheel system

5 总结与展望

三维编织技术对于推动三维编织复合材料的发展起着决定性的作用。尽管目前三维编织技术已取得显著成就,但未来仍需在多个方面努力,以推动三维编织技术及三维编织复合材料的完善与发展。

5.1 加速编织设备升级

目前,国内三维编织机的产品适应性较差,一种编织机通常仅能编织特定形状和特定尺寸范围的预制件,且编织过程中人工干预较多。因此,加强编织

设备的升级至关重要,这将涉及编织底盘上携纱器的排布方式和分布密度、驱动装置的结构以及纱线的张力控制等多个方面。此外,面向未来,三维编织机还需向自动化、智能化及高效化方向发展,确保产品质量稳定和尺寸高精度可控,实现预制件生产的多样化、规模化和商业化,同时缩短产品制造周期,降低生产成本。

5.2 加强三维编织技术的创新与产品性能研究

当前,在新型三维编织技术的创新,以及各种复杂结构(如大尺寸、超厚、高密度、曲面结构等)三维编织预制件的研发方面,国内技术仍存在不足。未来,应聚焦三维编织技术的创新与优化,不断完善三维编织理论体系,加强三维编织技术研究;同时,开发三维编织预制件相关的设计软件,建立数据库,精准预测并优化产品力学性能和使用性能。

5.3 建立三维编织预制件检测标准

对于三维编织预制件,尤其是复杂结构预制件,检测方法和检测标准仍存在空白,因此,亟待建立完善的、系统的、规范的三维编织预制件质量评估体系。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

- [1] 陈利,赵世博,王心森. 三维纺织增强材料及其在航空航天领域的应用[J]. 纺织导报, 2018(增刊1): 80-87.
- [2] 代彦彦,张国利. 现代纺织复合材料概述[J]. 纺织科技进展, 2020(4): 1-8.
- [3] CHEN X G, TAYLOR L W, TSAI L J. An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites[J]. Textile Research Journal, 2011, 81(9): 932-944.
- [4] 李磊,容治军,李鉴,等. 典型三维织物产品成型概述[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(11): 1-9.
- [5] SONG C Y, FAN W, LIU T, et al. A review on three-dimensional stitched composites and their research perspectives[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 153: 106730.
- [6] 陈小明,李晨阳,李皎,等. 三维针刺技术研究进展[J]. 纺织学报, 2021, 42(5): 185-192.
- [7] 汪昭君. 新型三维编织体结构的开发研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [8] 李政宁,陈革, KO F. 三维编织工艺及机械的研究现状与趋势[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(5): 109-115.
- [9] 李毓陵,丁辛. 纵横步进法编织三维预成型件[J]. 国际纺织导报, 2000, 28(1): 62-65.
- [10] 万振凯,郭建民. 大型自动化三维编织复合材料编织机的开发[J]. 纺织导报, 2013(9): 64-66.
- [11] 董经经,荆云娟,张艺会,等. 三维编织异型碳纤维预制体的研究[J]. 合成纤维, 2024, 53(6): 35-38.
- [12] 梅海洋. 三维预制体旋转编织结构设计及其复合材料压缩性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [13] 王一博,刘振国,胡龙,等. 三维编织复合材料研究现状及在航空航天中应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(19): 78-85.
- [14] 赵大鹏. RTM:三维编织技术的发展及应用[J]. 纤维复合材料, 2005, 22(4): 50-52.
- [15] 汪星明,邢誉峰. 三维编织复合材料研究进展[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 914-927.
- [16] DU G W, CHOU T W, POPPER P. Analysis of three-dimensional textile preforms for multidirectional reinforcement of composites[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(13): 3438-3448.
- [17] 赵展, IKBAL M H, 李炜. 编织机及编织工艺的发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(10): 90-95.
- [18] 陈和春, KO F. 六步法三维编织 C 型预制件实践[J]. 上海纺织科技, 2020, 48(12): 57-60.
- [19] 徐海亮. 角轮式三维编织机机构及其运动轨迹优化设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [20] 迟进佳,周强,吴震宇. 环形编织纱线间接触作用对编织增强体结构参数影响研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2017, 42(5): 621-627.
- [21] 卢光宇. 旋转式三维编织机及其编织工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [22] 张一博. 碳纤维复合材料成型件三维编织仿真模拟和力学性能分析[D]. 盐城: 盐城工学院, 2024.
- [23] 朱昊文. 环形编织机纱线轨迹预测及控制优化研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- [24] 陈利,孙颖,马明. 高性能纤维预成型体的研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(10): 21-29.
- [25] 荆云娟,韦鑫,张元,等. 三维编织复合材料的发展及应用现状[J]. 棉纺织技术, 2019, 47(11):

- 79-84.
- [26] 韩振宇, 梅海洋, 付云忠, 等. 三维编织预成型体的织造及三维编织复合材料细观结构研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(11): 25-36.
- [27] 李静. 三维编织机的研究现状与发展趋势[J]. 纺织科学研究, 2020, 31(2): 78-80.
- [28] 李晋宇, 张涛, 袁林, 等. 数字化多轴向三维编织原理样机及其工艺研究[J]. 材料科学与工艺, 2021, 29(6): 1-9.
- [29] MEI H Y, HAN Z Y, LIANG S Q, et al. Process modelling of 3D hexagonal braids [J]. Composite Structures, 2020, 252: 112679.
- [30] 高彦涛, KO F, YANG H, 等. 一种新型六角形编织机器的构建与应用[J]. 纺织导报, 2013(4): 80-84.
- [31] YANG X, ZHANG C L, SHAO H Q, et al. Design optimization of a three-dimensional hexagonal braiding technique[J]. Textile Research Journal, 2025, 95: 688-704.

《产业用纺织品》征稿启事

《产业用纺织品》创刊于1983年,由教育部主管,东华大学、全国产业用纺织品科技情报站主办,中国产业用纺织品行业协会协办,东华大学期刊中心编辑出版;是全国产业用纺织品领域具有权威性的期刊之一;为《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊,已入编中国学术期刊(网络版)、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、长江文库数据库、超星期刊域出版平台等;多次入选北大版中文核心期刊。

《产业用纺织品》秉承“创新、严谨、求实”的办刊作风,致力于建设成为高质量高水平国际一流学术期刊。期刊以“产业用纺织品”为特色,主要刊登国内外有关产业用纺织品的综述文章,科研、生产技术报告,报道纺织领域的新产品、新材料、新技术及新设备,介绍相关的专利、标准、测试方法,以及相关领域的行业动态、市场信息等。

热忱欢迎国内外产业用纺织品领域相关高等院校师生、科研人员及企业工程技术人员等将优秀研究论文首发在《产业用纺织品》上。

投稿须知

一、学术要求

投稿内容须为纺织领域的综合述评、研究性或技术性文章,可读性强,学术参考及引用价值高,技

术方法实用,研究思路及内容能给读者启迪和借鉴。

二、重点选题方向——产业用纺织品

电子织物与智能服饰;医疗健康用纺织品;高品质非织造材料;纤维改性与防护功能纺织品;安全防护与应急救援用纺织品;航空航天用高性能纺织品;海洋产业与渔业用纺织品;交通运输用纺织品;土工建筑用纺织品;过滤用纺织品;等等。

三、投稿注意事项

1)本刊只刊登首发稿,请勿一稿多投;来稿须符合期刊定位,文责自负。

2)本刊全部采用线上投稿方式,投稿网址为<https://cyyf.cbpt.cnki.net>(谨防虚假网站),注册后点击“作者投稿系统”。投稿二维码:



3)本刊联系邮箱 techtex@dhu.edu.cn。

4)本刊暂不收取审稿费和版面费,切勿向任何冒用本刊名义的单位及个人汇款。稿件刊发后,编辑部向作者支付稿酬,且优稿优酬,并赠送当期期刊。