

大丝束碳纤维展纱技术研究进展

高心玥^{a,b} 蒋金华^{a,b} 陈南梁^{a,b}

东华大学 a. 产业用纺织品教育部工程研究中心;

b. 纺织学院, 上海 201620

摘要: 介绍了几种常见展纱方法的研究进展及大丝束碳纤维展纱设备, 总结了机械多辊组、气流、超声波、静电等展纱方法及原理, 分析了不同展纱工艺的特点及影响因素, 对比了不同展纱设备的优缺点及发展方向。从理论上对展纱宽度预测模型进行归纳总结, 讨论了展纱模型的影响因素, 分析了模型存在的不足与局限性。对大丝束碳纤维的展纱技术发展方向进行展望, 为大丝束碳纤维展纱技术和理论模型的进一步发展提供支撑。

关键词: 大丝束碳纤维; 展纱方法; 展纱宽度; 预测模型

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)08-0017-11

Research progress of large tow carbon fiber spreading technology

Gao Xinyue^{a,b}, Jiang Jinhua^{a,b}, Chen Nanliang^{a,b}

a. Engineering Research Center of Technical Textiles, Ministry of Education,

b. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The research progress of several common tow spreading methods and large tow carbon fiber spreading equipment were introduced. The methods and principles of mechanical multi-roll set, airflow, ultrasonic, electrostatic and other spreading methods were summarized. The characteristics and influencing factors of different spreading processes were analyzed, and the advantages and disadvantages of different spreading equipments and their development trends were compared. The spreading width prediction models were summarized theoretically, the influencing factors of the spreading model were discussed, and the deficiencies and limitations of the model were analyzed. The development directions of the spreading technology of large tow carbon fiber were prospected, and it was expected to provide support for the further development of technology and theoretical model of large tow carbon fiber spreading.

Keywords: large tow carbon fiber; spreading method; spreading width; prediction model

碳纤维因具有比强度高、比模量高和化学性质稳定等优点而被广泛应用于航空航天^[1-3]、轨道交通^[4-6]、体育休闲^[7-9]、土木工程^[10-12]及能源^[13-15]等领域。根据碳纤维丝束横截面中所含单丝根数,可

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3704500); 中央高校基本科研业务项目(2232023G-06)

收稿日期: 2024-05-01

作者简介: 高心玥, 女, 2001 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为纺织复合材料, gaixin Yue0922@163.com

通信作者: 陈南梁, 教授, 研究方向为针织技术、产业用纺织品、纺织复合材料, nlch@dhu.edu.cn

以将碳纤维分为小丝束碳纤维和大丝束碳纤维。其中,GB/T 40724—2021《碳纤维及其复合材料术语》中将丝束横截面内单丝根数不大于 24 000 根(24 K)的碳纤维称为小丝束碳纤维,将丝束横截面内单丝根数大于 24 K 根的碳纤维称为大丝束碳纤维。日本东丽公司生产的不同种类碳纤维纱线的拉伸弹性模量和拉伸强度对比如图 1 所示。可以发现,大丝束碳纤维 PX35 的拉伸弹性模量大于小丝束碳纤维 T300、T700S、T700G 和 T400H,拉伸强度大于小丝束碳纤维 T300 和 M60J,拉伸弹性模量和拉伸强度均大于小丝束碳纤维 T300,而大丝束碳纤维 PX35 的价格则远低于小丝束碳纤维的。因此,采用大丝束碳纤维取代部分小丝束碳纤维的应用,能够有效降低碳纤维的使用成本,打破价格高昂对碳纤维应用范围的限制,扩大碳纤维复合材料的应用领域^[16]。

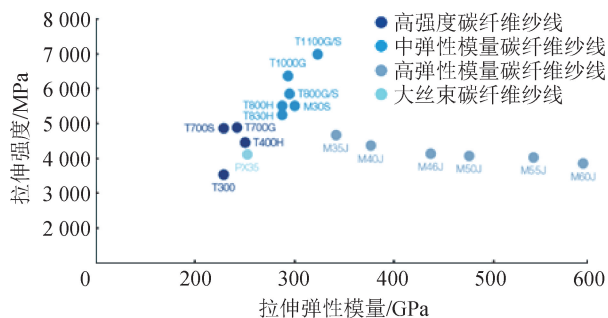


图1 日本东丽公司生产的不同种类碳纤维纱线的性能对比
Fig. 1 Performance comparison of different types of carbon fiber yarns produced by Toray, Japan

然而,大丝束碳纤维中丝束横截面内单丝多,单丝间容易聚集、扭结和屈曲,用其制备复合材料时难以被树脂均匀浸润,易产生树脂富集区和贫胶区^[17],从而极大地影响复合材料的性能。展纱(或展纤)能够将丝束沿宽度方向展宽展薄,提高单丝取向度,减小丝束单位面积质量和纤维层数,从而提高树脂的渗透率和分布均匀性,减少复合材料内部孔隙、树脂富集区等缺陷的产生^[18],增强纤维与树脂之间的黏结力,使复合材料内部力的传导更通畅,载荷分布更均匀。采用展纱后的丝束制备薄层碳纤维复合材料,能够有效抑制疲劳裂纹的产生及纤维与树脂间的分层,减少纤维断裂损伤^[19-20],使复合材料具有更好的力学性能。

已有学者对不同的展纱方法进行了研究探讨,

分析了相关因素对于展纱效果的影响,促进了纤维束展开程度和均匀度的提高,并研发出相应的展纱设备。同时,针对展纱宽度建立预测模型,为实际生产提供理论依据。然而,目前关于碳纤维展纱的相关研究仍大多集中于小丝束碳纤维方面,针对大丝束碳纤维特性而研发的展纱设备较少,并且缺乏对大丝束碳纤维和小丝束碳纤维之间展纱差异性的分析,对纤维在展纱过程中的运动情况和展纱宽度预测理论分析也略显不足。基于此,本文针对大丝束碳纤维单丝大量聚集、扭曲、偏转,以及树脂浸渍不均匀的难题,归纳总结不同展纱方法和展纱设备的原理及研究现状,探讨现有展纱宽度预测模型的优缺点,以期为大丝束碳纤维的均匀高效连续展纱提供参考,进而促进大丝束碳纤维的广泛应用。

1 展纱方法

除碳纤维外,展纱技术也可应用于其他连续长丝丝束,如玻璃纤维等。小丝束、大丝束碳纤维及其他连续长丝丝束的展纱原理一致。目前主要的展纱方法有机械多辊组展纱法、气流展纱法、超声波展纱法和静电展纱法等^[21]。不同展纱方法的原理、成本、效率、纤维损伤情况及优缺点的对比如表 1 所示。大丝束碳纤维多采用机械多辊组展纱法和气流展纱法。

1.1 机械多辊组展纱法

机械多辊组展纱法通过高温融化纤维束表面的上浆剂,再利用一系列展纱辊对张紧纤维束的挤压、摩擦等作用,使纤维束在横向分压力的作用下展开。该方法的相关参数调节方便,操作简单,成本低,是目前连续生产大丝束碳纤维的主要展纱方法。

最初的机械多辊组展纱法较为简单,仅利用少数固定杆展开纤维束。Wilson^[22]将纤维束一端固定,使固定端和第一展纱杆(杆 1)之间的纤维束,以及杆 1 和第二展纱杆(杆 2)之间的纤维束呈对称结构,并使用砝码在丝束非固定端施加一定的张力,使丝束展开。Wilson 的试验装置示意如图 2 所示。Irfan 等^[23]在 Wilson 的研究基础上发现,通过重物多次上下往复运动使纤维束展开并达到平衡状态,使展开后玻璃纤维丝束的宽度增加 200%~250%。他们还从微观力学角度解释了纤维束在展纱杆

表 1 不同展纱方法的对比

Tab. 1 Comparison of different yarn spreading methods

展纱方法	原理	成本	效率	纤维损伤	优点	缺点
机械多辊组展纱	高温融化纤维束表面的上浆剂,展纱辊对张紧纤维束的挤压、摩擦等作用使纤维束在横向分压力的作用下展开	低	低	大	原理简单,成本低,参数易调节	对纤维损伤大;效率低;纤维断裂形成的毛丝会附着在机械辊上,影响展纱效果
气流展纱	利用气流在纤维束不同位置产生的压差作用展开纤维束	较高	高	小	纤维损伤小	需要对气流进行稳定控制;漂浮毛丝会造成一定危害
超声波展纱	超声池展纱法:超声波在液体中传播时形成大量微小气泡,利用气泡破裂的冲击力使纤维束展开	高	较高	小	纤维损伤小	噪声大;需要对展纱后的纤维束进行烘干与表面液体清理;展开宽度受化学溶液成分和浓度影响;需要根据不同上浆剂种类配制不同的化学溶液
	超声杆展纱法:利用超声波使超声杆振动,促使纤维束展开	高	较低	较大	原理简单	噪声大;展宽幅度小
静电展纱	纤维束通过高压电场时带上同种电荷,利用同种电荷之间的排斥作用使纤维束展开	较高	较高	较小	纤维损伤较小	需要对展纱后的纤维束进行消除静电处理

上展开的原理。其试验装置如图 3 所示。

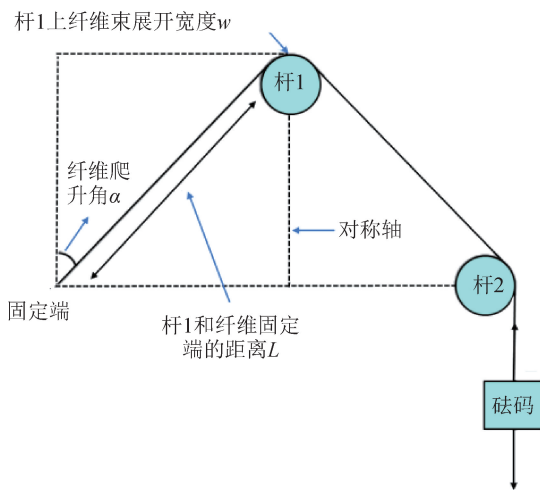


图 2 Wilson 的试验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of Wilson's experimental setup

为增大展纱辊与纤维束之间的作用力,更程度地展开纤维束,轴向振动和上下振动的展纱辊逐渐取得应用。Akase 等^[24]将轴向振动的展纱辊设置在 2 个非振动辊中间,以增大展纱辊与丝束之间的摩擦力,带动纤维横向运动,实现了将 3 K 碳纤维丝

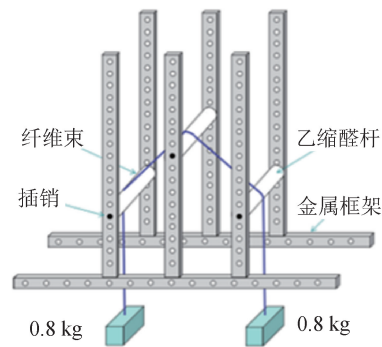


图 3 Irfan 的试验装置示意^[23]

Fig. 3 Schematic diagram of Irfan's experimental setup^[23]

束展开至原始宽度的 2~4 倍。Moradi 等^[17]对展纱辊振动频率和振幅,以及固定杆和可旋转辊对纤维铺展程度的影响进行了研究。结果发现,增大展纱辊的振动频率和振幅可使纤维束的展开宽度增加,但振动频率和振幅过大,会导致纤维扭曲和断裂。当振动频率为 5 Hz、振幅为 6 mm 时,展纱效果最好,其能将纤维束展开至原始宽度的 5 倍。同时他们还发现,相比于可旋转辊,固定杆能够有效增加纤维束宽度,最多可将纤维束展开至原始宽度的

10倍,而可旋转辊最多可将纤维束展开至原始宽度的7倍。但固定杆会导致纤维张力过大,纤维断裂增多,对纤维束的损伤较大。藏旭辉等^[25]将上下振动的展纱辊和轴向振动的展纱辊结合,利用2种不同振动方向展纱辊的共同作用均匀展开纤维束。针对不同形状的展纱辊,罗云烽等^[26]采用自制机械辊薄层化装置,分析了纤维束在图4所示的非等径异型辊和等径异型辊上的受力状态,研究了不同曲率异型辊和不同纤维张力对纤维束展纱效果的影响。研究表明,在相同展开宽度条件下,非等径异型辊会增加纤维束中间部分的纤维张力,造成大量纤维损伤,且会造成纤维束展宽后出现边缘厚中间薄的不均匀现象。等径异型辊能够大幅降低额外的应力,改善纤维束厚度不均匀的问题。此外,等径异型辊曲率为330 mm、纤维张力为46.6 N时,其对50 K大丝束碳纤维的展纱效果最好。

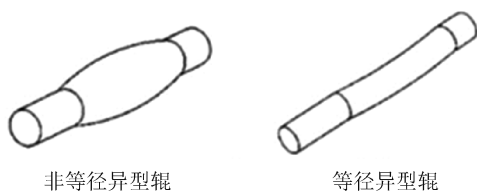


图4 2种形状的异型辊^[26]
Fig. 4 Two shapes of special-shaped rolls^[26]

大量研究表明,机械多辊组展纱法能够有效展开纤维束,达到一定的展纱宽度,且展纱辊的振动形式、振动频率、排列和旋转方式、直径和曲率等因素会影响展纱效果。展纱辊与纤维束之间的挤压力和摩擦力一方面能够促进纤维束的展开,另一方面又容易导致纤维束中单丝的断裂。为减少纤维在展纱过程中的损伤,实现更好的展纱效果,需要对展纱过程中的纤维张力进行合理控制,对振动辊与非振动辊、轴向振动辊与上下振动辊、直辊与异型辊之间的有效结合运用进行探讨。

1.2 气流展纱法

气流展纱法利用展纱装置内的气流在纤维束不同位置产生的压差作用,将纤维束展开。气流展纱法属于非接触式展纱,对纤维的损伤较小。

El-Dessouky等^[27]设计了一种配备空气管道和真空环境的气流展纱系统,如图5所示。振动展纱辊下方的空气管道将展纱区的空气沿垂直方向吸出

并在展纱区形成真空环境,纤维束向空气吸出方向下垂并暂时处于无张力状态。振动展纱辊上配备有热空气喷吹装置,纤维束在热空气与振动展纱辊的共同作用下均匀展开。12 K碳纤维丝束通过展纱区1和2后,由原先的5 mm宽展宽至约25 mm,展宽率约为500%,厚度减小了约25%,纤维层数从24减少至6。

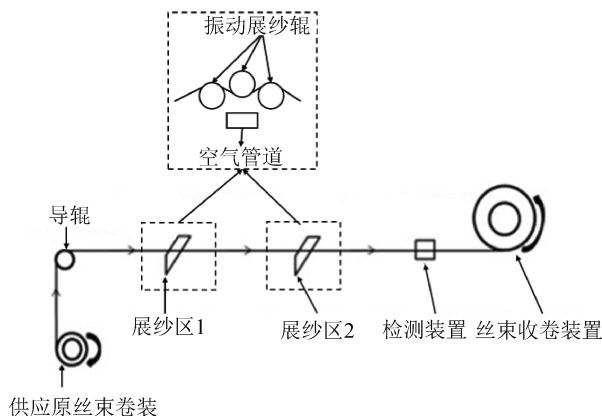


图5 El-Dessouky的气流展纱装置示意^[27]
Fig. 5 Schematic diagram of El-Dessouky's airflow fiber spreading device^[27]

Sihn等^[28]分析了气流展纱的原理:当气流在丝束两侧流动时,丝束中心部分和两侧部分气流速度的差异,导致丝束的不同位置具有不同的压力(压力差),进而形成空气动力使纤维获得向外的力,使纤维束展开。气流展纱过程分析如图6所示。他们还提出了一种使连续气流通过悬垂纤维束,制备薄层复合材料的方法,能将24 K碳纤维束由初始的6 mm展宽至12 mm和20 mm。

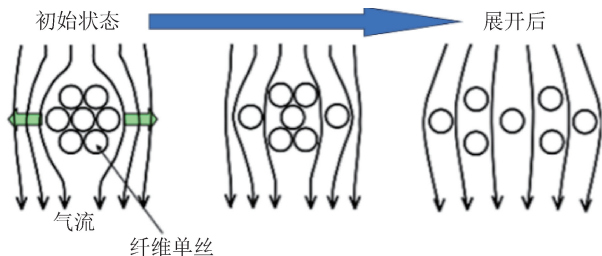


图6 气流展纱过程分析^[28]
Fig. 6 Analysis of airflow fiber spreading process^[28]

陈金良等^[29]搭建了如图7所示的高温射流试验平台,设计高温射流冲击试验,探讨大丝束碳纤维在射流冲击作用下的展纱机理,并参数化分析了热气流喷距 H 、纤维丝束跨距 D 和纤维丝束张力(用

砝码质量 m 表征)对展纱效果的影响。试验结果表明,热气流喷距是影响大丝束碳纤维展宽的主要因素,当 H 为 80 mm、 D 为 100 mm、 m 为 15 g 时,能够将 48 K 大丝束碳纤维均匀展开,宽度由初始的 20 mm 展宽至 50 mm,展宽率为 250%。

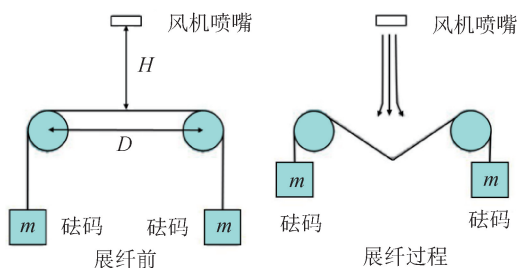


图 7 高温射流试验平台^[29]

Fig. 7 High temperature jet test platform^[29]

牛雪娟等^[30]分析了不同气流出口压差和送纱速度对展纱效果的影响,并对碳纤维图像进行灰度化、归一化和二值化处理,利用像素点占比的计算值反映展宽均匀度。研究结果显示,当送纱速度为 80 cm/min、气流出口压差为 100 Pa 时,能够将 48 K 碳纤维束由 16 mm 展宽至约 55 mm,展宽率达 343.75%,展宽均匀度稳定在 95.5% 左右。

上述研究表明,气流展纱法能够实现较好的展纱效果,但该方法中影响展纱效果的参数较多,需对流体力学原理与气流展纱技术的结合进行深入研究,对相关影响因素进行系统的分析和调整,以优化展纱效果。气流展纱法中纤维束展开均匀度易受气流扰动的影响,需对气流的稳定性进行控制,避免出现纤维束分叉等现象。展纱过程中,碳纤维单丝断裂形成的毛丝在气流的作用下易漂浮在环境中造成危害。此外,由于碳纤维束表面上浆剂对纤维束的展开有一定的阻碍作用,因此气流展纱法大多需采用热空气熔融碳纤维表面的上浆剂来降低这一影响,或直接对经脱胶处理的碳纤维束进行展开,但目前有关热空气熔融处理和脱胶处理对纤维束展开均匀度及纤维损伤情况影响的研究较少。

1.3 超声波展纱法

超声波展纱法有 2 种形式,一种是利用超声波使超声杆振动,促使纤维束展开;另一种是将纤维束浸入超声池的液体中,超声波在液体介质中传播时会形成大量微小的气泡,利用气泡破裂的冲击力促使纤维束展开。

徐挺等^[31]比较了超声杆和超声池 2 种不同形式的超声波展纱法的展纱效果,结果显示,2 种方法能够将 12 K 碳纤维束分别展宽到初始宽度的 1.65 倍和 1.52 倍。马丕波等^[32]采用导纱辊将纤维束引入装有氢氧化钠、次氯酸钠、过氧化氢、硅氧烷偶联剂和乙醇中的一种或几种混合溶液的容器中,利用功率为 100~5 000 W、频率为 10~200 kHz 的高强度大功率超声波作用使纤维束展开。汪训国等^[33]利用超声波传动辊将超声波能量直接传送到碳纤维丝束中,以减少超声波能量在介质中传播的损耗,同时消除容器壁反弹的超声波对纤维展纱效果的影响。

相比于机械多辊组展纱法,超声波展纱法对纤维的损伤较小,但传导过程中影响因素多、噪声大、能耗高。超声池展纱是较为常用的超声波展纱形式,经超声池壁反弹的超声波重复作用于纤维束,能够提高纤维束的展纱宽度,但也使纤维束的展开宽度具有较高的不确定性。此外,超声池中的化学溶液需要根据碳纤维束使用的上浆剂的种类进行配制,增加了成本。经超声池法展纱后的纤维束在离开超声池时,由于液体表面张力的作用,纤维束会再次收缩,因此,需对保持纤维束展纱宽度稳定性进行相关研究,并解决纤维束表面液体的烘干和去除等问题。

1.4 静电展纱法

静电展纱法利用静电发生装置使通过高压电场的纤维束带上同种电荷,并利用同种电荷之间的排斥作用使纤维束展开。

刘雪强等^[34]利用静电发生装置对半导体导辊放电,使纤维束经过半导体导辊时,电荷由半导体导辊转移至纤维束,纤维束中的单丝带上同种电荷,并因同种电荷的排斥作用实现纤维束的无损伤均匀展开。

静电展纱法需要对展纱后的纤维束进行静电消除处理,会产生额外成本,且会影响展宽均匀度和稳定性。目前,关于静电展纱法的研究较少。有必要对其展纱效果和影响因素进行系统的探讨,发掘其在大丝束碳纤维展纱中的应用潜力。

1.5 复合展纱法

实际应用中,可以将 2 种或 2 种以上方法结合,综合利用不同方法的优势高效展纱。

Ren 等^[35]将机械多辊组展纱法与气流展纱法相结合,在展纱辊上开设窄槽喷射出一定压力的压缩空气,使纤维束与机械辊表面的摩擦力降低,纤维断裂减少。同时,纤维受到的横向分力增大,展纱均匀度提高,纤维单丝间隙减小。气压过大时,纤维束单丝间隙大,展纱均匀性降低,单丝在强气压下易出现缠结和断裂。试验结果表明,当气压为 0.2 MPa 时,展纱试样的层间剪切强度最高,纤维断裂最少。

王明欢等^[36]将振动展纱与气流喷吹展纱相结合,利用上下振动辊和气流共同作用展开丝束。他们搭建了如图 8 所示的振动喷吹展纱装置,探讨了振动频率、振动幅度和气流速度对展纱效果的影响,并根据纤维束图像灰度图分析纤维束的单丝分布均匀性,通过测量展纱后固定长度纤维束在海绵块上残余的断纤质量,评价展纱过程对纤维束的损伤情况。试验结果显示,在振动频率为 7 Hz、振动幅度为 20 mm、气流速度为 10 m/s 条件下,可将 12 K 碳纤维束由 5.5 mm 展宽至 17.6 mm,展宽率为 320%,展纱均匀度达 93.2%,纤维断裂率仅为 0.036%。

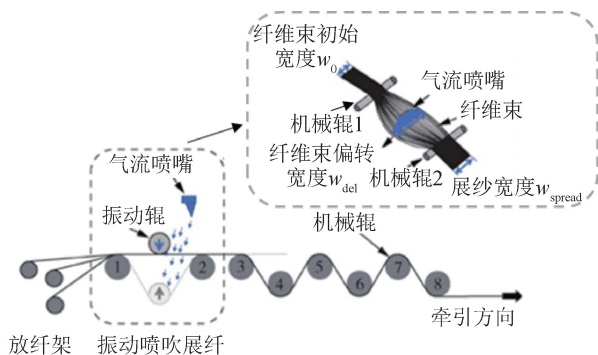


图 8 振动喷吹展纱工艺流程示意^[36]

Fig. 8 Vibratory blowing spreading fiber process diagram^[36]

将气流展纱和机械多辊组展纱方法结合,能够有效减小展纱辊对纤维的损伤,提高展纱均匀度。然而,结合不同展纱方法的复合展纱,会增加影响展纱效果的因素,且各因素间的耦合作用导致参数调节复杂,展纱可控性降低。因此,需进一步探讨不同方法间的协同作用,以实现优势互补;明确各参数对展纱效果的影响,实现展纱宽度的良好可控。

2 大丝束碳纤维用展纱设备

大丝束碳纤维内部纤维单丝之间状态复杂,对

展纱设备的展纱效果、参数的可调节性以及运行稳定性提出了更高要求。已有研究者根据不同展纱方法的优缺点,设计研发了更适合大丝束碳纤维的展纱设备。

李春惠等^[37]设计了一种“错位集纱+分层展纱+叠加展纱”的大丝束碳纤维机械多辊组展纱装置,如图 9 所示。错位集纱装置中的若干分纱单元与分层展纱装置中的若干展纱单元一一对应,经同一分纱单元分纱后的 2 股纤维束经由第一过渡辊和第一叠加单元进入分层展纱装置,并通过机械辊的加热振动分层展纱。分层展纱后的纤维束经由第二叠加单元进入叠加展纱装置,进行叠加展纱。该装置分层展纱部分的上下层纤维束互不干扰,展纱更均匀,叠加展纱部分能够实现上下层纤维束叠加互补,填补纤维之间的排列间隙,使展纱后的纱片厚度更均匀。该设备适用于生产展纱片。多根碳纤维束进入展纱区,高温作用使碳纤维表面的上浆剂融化;随着展纱过程的进行,碳纤维束变宽,彼此搭接;离开加热区域后,上浆剂冷却,纤维束被粘连在一起形成展纱片,并在收卷后供下道工序使用。采用该展纱装置能够将初始宽度为 15.5 mm 的 50 K 大丝束碳纤维稳定展宽至 45 mm,展宽率约为 290%,并且纤维基本无损伤。

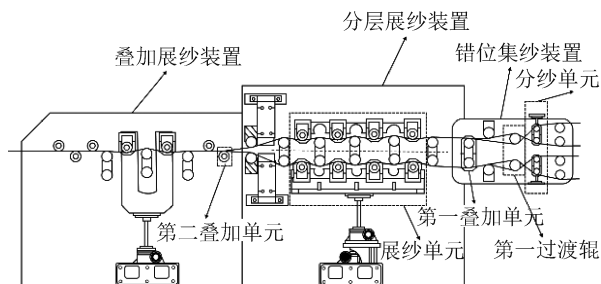


图 9 “错位集纱+分层展纱+叠加展纱”装置^[37]

Fig. 9 ‘Staggered yarn collection, layered and stacked yarn spreading’ device^[37]

李炜等^[38]利用超声波展纱法设计了一种高性能大丝束碳纤维展纱装置,如图 10 所示。放纱装置引出纤维束进入预展纱装置,预展纱装置利用超声波发射器发射超声波,超声波在液槽内的有机溶液中传播,实现对纤维束的预展纱;预展纱后的纤维束受橡胶罗拉和金属罗拉的挤压而去除表面液体,进入主展纱装置;主展纱装置利用低频发电机将机械能转化为电能,扬声器将功率放大器放大的电信号

转化为声波并释放,声波引起的空气振动进一步将纤维束展开,从而实现大丝束碳纤维的充分有效展开。

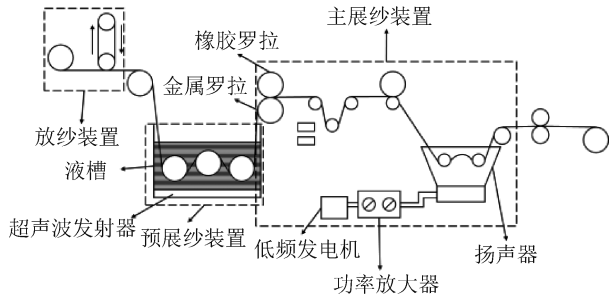


图 10 高性能大丝束碳纤维展纱装置^[38]
Fig. 10 High performance spreading device for large tow carbon fibers^[38]

段跃新等^[39]将异型辊机械式展纱方法与气流展纱方法相结合,设计了一种大丝束碳纤维薄层化装置,如图 11 所示。纤维束自纱架引入薄层化主体装置,使用分散设置的 3 个张力控制装置控制纤维束的张力。纤维束先经过 3 个异型辊进行预展纱,然后进入气流薄层化区域,通过 2 个展纱辊中下侧的可控流量抽风机抽气实现气流展纱。展纱后的纤维束进入浸胶装置进行树脂浸渍处理,供后续使用。该展纱装置通过机械辊与气流的双重作用进行展纱,能够大幅提高大丝束碳纤维的展纱效果,减少纤维损伤。

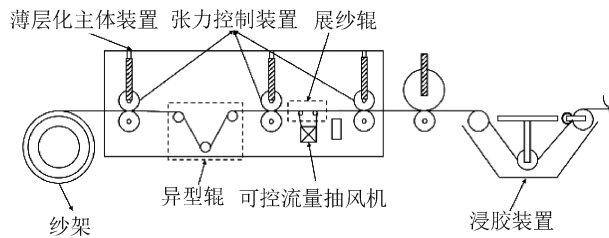


图 11 大丝束碳纤维薄层化装置^[39]
Fig. 11 Large tow carbon fiber spreading device^[39]

Nestler 等^[40]将至少含 2 个间隔电极的加热装置安装在机械多辊组展纱装置前,利用加热装置熔融碳纤维丝束的表面上浆剂,以利于碳纤维丝束展开,如图 12 所示。碳纤维丝束经过加热装置时,以一定机械张力贴靠在 3 个电极表面,电极间的电位差使电流流过纤维束,引起纤维束温度升高。同时,机械张力促使纤维束展开,以更大的面积贴靠在电极表面,有利于电流流动与温度的继续升高。经加

热去除表面上浆剂后的纤维束进入展纱装置,进行后续的机械多辊组展纱。

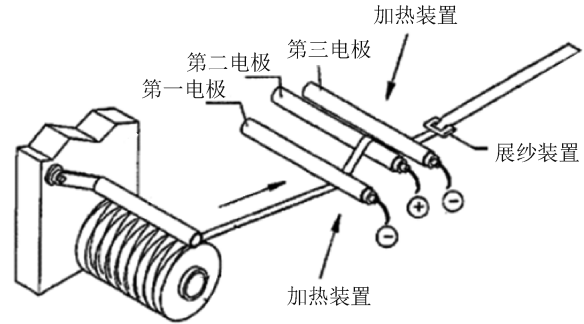


图 12 电极加热展纱装置^[40]
Fig. 12 Electrode-heated yarn spreading device^[40]

上述大丝束碳纤维展纱设备针对大丝束碳纤维单丝数量多、状态复杂等特点,利用不同展纱原理,合理设计机器结构与参数,在减少纤维束力学性能损伤的同时实现了纤维束的均匀展开。各展纱设备均需通过机械辊传送纤维束,实际生产中,需要考虑纤维断裂产生的毛丝在展纱系统中聚集对设备运行的影响,以及温度、湿度等环境因素对展纱效果的影响,同时应合理控制纤维张力,根据不同的纤维束类型和上浆剂种类调节温度、牵引速度等展纱参数。

实际生产中的大丝束碳纤维展纱设备应能实现连续均匀、低损伤、低成本,以及宽度和面密度可控的展纱效果,以满足后续生产需求。

3 展纱宽度预测模型

目前,关于展纱理论的研究主要集中在对展纱宽度的分析和预测方面。如 Wilson^[22]以聚酰胺纤维和棉纱为原料,使用如图 2 所示的试验装置,建立了 2 个坐标系 $OXYZ$ 与 $O'xyz$,如图 13 所示,并做出如下假设:纤维的数量非常多,且平面 $O'xy$ 中的纤维集合可以建模为连续体;每根纤维具有相同的张力;忽略纤维之间以及纤维与机械辊之间的摩擦力。该研究通过数学运算得到纤维束在第一根展纱辊上的展开宽度 w 与纤维束横截面积 A 、纤维爬升角 α 、第一展纱杆和纤维固定端的距离 L 之间的关系式 $w = (12AL\cos\alpha)^{1/3}$,以及纤维束达到平衡展开宽度后,第一根展纱辊上纤维束横截面沿 x 轴方向的横截面轮廓曲线方程。Wilson 通过试验验证发现,展

纱宽度预测模型的测试值与实测值间存在 10% ~ 15% 的误差,并将此误差归结为纤维束与辊、纤维与纤维之间摩擦作用,以及纤维束内部单丝缠结的影响。该模型的不足在于忽略了摩擦力对展纱宽度的影响,认为纤维束的横向展开宽度主要受纤维束横截面积(A)及纤维束爬升高度($L \cos \alpha$)的影响,而与纤维束的张力及其他因素无关。

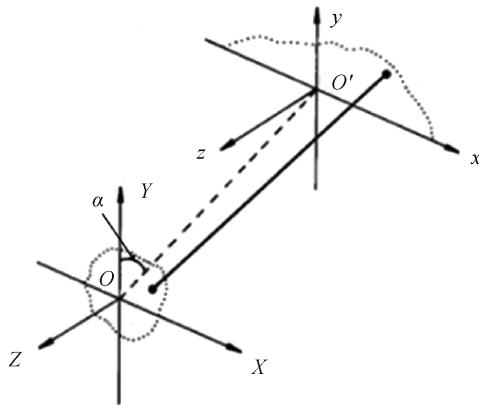


图 13 OXYZ 和 $O'xyz$ 坐标系示意^[22]
Fig. 13 Schematic of OXYZ and $O'xyz$ coordinate systems^[22]

Irfan 等^[23]对 Wilson 展纱模型进行了验证,并利用图 14 所示的四连杆对称装置扩展了 Wilson 提出的原始模型,利用类似的计算方法推导出纤维束在第二根展纱辊上达到平衡展开宽度时的纤维束宽度 w_2 与纤维束横截面积 A 、第一展纱杆和第二展纱杆之间的距离 L_1 的关系式 $w_2 = 2(AL_1)^{1/3}\lambda$,其中 λ 满足式(1)。

$$\lambda^3 - \lambda^2 - \frac{3}{2}\cos \beta = 0 \quad (1)$$

式中: β 为纤维束在第一展纱杆和第二展纱杆之间的爬升角。

他们还推导出纤维束在第二展纱辊上达到平衡展开宽度后,纤维束横截面沿 x 轴方向的横截面轮廓曲线方程。

冯一川等^[41]针对 Wilson 展纱模型只适用于直型辊的不足,在 Wilson 模型的基础上建立了适用于曲型辊的展纱模型,模拟纤维束在曲型辊上的展开。利用该模型模拟计算纤维束在直型辊上的展开宽度,与 Wilson 模型模拟出的数值非常接近,并且该模型模拟计算的纤维束在曲型辊上的展开宽度预测值,与罗云烽^[26]的试验数据非常吻合。模拟结果还发现,纤维束在曲型辊上的展纱效果优于直型辊。

上述展纱宽度模型均没有考虑摩擦力和牵伸张力对纤维束展宽的影响,其应用场景有限。

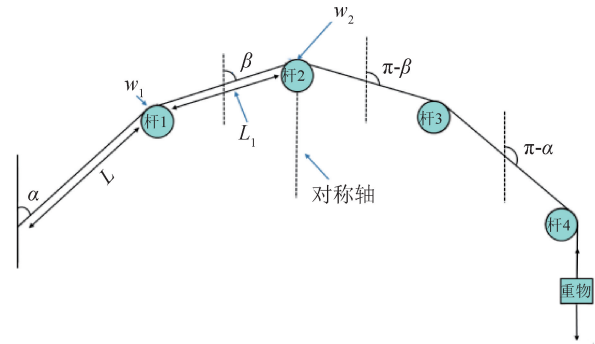


图 14 四连杆对称装置示意^[23]
Fig. 14 Schematic illustration of the configuration of the four-rod symmetric setup^[23]

假设展纱前纤维初始张力为 T_0 ,在牵引张力 T_1 作用下,长度为 L_f 的纤维束被机械辊组展宽。徐然等^[42]将长度为 L_f 的纤维束的展宽过程视为展宽模型研究的运动系统(图 15),对该运动系统进行受力分析,并根据能量守恒原理,针对纤维束在机械辊上受牵引张力展开的过程,得到式(2)。

$$W_T = W_{fx} + W_{fy} \quad (2)$$

式中: W_T 为牵引张力输入功; W_{fx} 为纤维束在轴向(即纤维束牵引方向)的摩擦消耗功; W_{fy} 为纤维束在横向(即纤维束宽度方向)的摩擦消耗功。

他们还就 W_T 、 W_{fx} 、 W_{fy} 与纤维初始张力 T_0 、牵引张力 T_1 、纤维束长度 L_f 等参数分别建立了关系方程,并根据式(2)推导出纤维束展开宽度表达式,即能量平衡展宽模型。试验结果显示,该模型理论值与试验值的误差在 10% 以内,相比于 Wilson 模型,能够更好地预测纤维束的展开宽度。同时,该模型能够模拟不同类型和初始宽度的纤维束在不同数量的机械辊上的展开,并充分考虑摩擦和牵引张力对纤维束展宽的影响,其应用范围更广。但该模型假设相邻的机械辊呈点对称分布,不适用于非对称机械辊系统和可振动辊展纱系统。

Zhou 等^[43]基于灰色预测理论,对超声波展纱纤维束宽度模型进行了研究。在不考虑展纱纤维多张力相关性的情况下,建立了单因素灰度预测模型 GM(1,1),分析展纱纤维单张力对碳纤维束展纱宽度的影响。但单因素灰度预测模型对具有内在相关性的多组数据的适应性较差,因此,他们进一步建立了考虑多张力内在相关性的多因素灰度预测模型

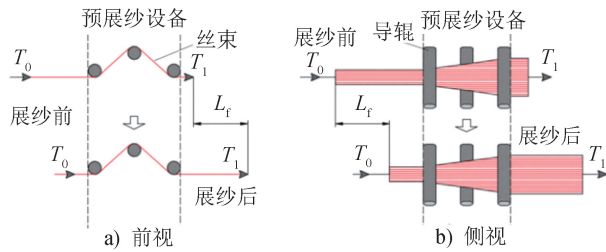


图 15 运动系统前后状态图^[42]

Fig. 15 Front and rear state diagram of motion system^[42]

MGM(1,3),以提高对展纱纤维束宽度的预测精度。但该模型只能用于超声波频率和振幅固定的情况,无法预测不同超声波频率和振幅动态调节时的展纱宽度。

Chen 等^[44]通过求解雷诺平均方程,对纤维束气流展纱装置内部流场进行了数值模拟,分析了不同风速、牵引速度及风槽数量对展纱效果的影响,对纤维的展纱过程进行了详细描述。他们还定义了展纱均匀度,用以描述纤维单丝在纤维束中的分散程度,通过展纱均匀度值对展纱效果进行定量评价。

目前,机械多辊组展纱宽度模型能够应用于动态展纱过程,但其没有充分考虑纤维单丝之间的摩擦作用。针对大丝束碳纤维中单丝数量多、关系复杂的情况,应充分考虑单丝之间的摩擦作用对展纱宽度的影响,提高展纱宽度模型的准确度。同时,增加对振动机械辊展纱系统展宽模型的研究,建立针对不同振动形式的展宽模型,扩大机械辊展宽模型的应用。气流展纱大多通过模型内部气流场对展纱宽度进行模拟计算,能够模拟纤维束在气流场中的铺展过程,但对参数选择有一定范围限制,模拟范围小。研究超声波展纱宽度模型时,不能充分考虑每个因素对展纱效果的影响,使用场景和准确度有限。此外,缺乏对静电展纱宽度模型的研究,且多数展宽模型仅针对单一展纱形式,对复合展纱的模型研究不足。当前的展纱模型大多是针对丝束展开宽度的模拟预测,对展纱过程中纤维运动规律、铺展过程及演化等相关模型的研究较少,未来可以对纤维单丝在展纱过程中的分散演化情况进行探究,建立相关的展纱运动学理论模型。

4 总结与展望

展纱是大丝束碳纤维用于制备复合材料的关键

工艺,展纱后纤维单丝的聚集和扭曲减少,纤维取向度增加,能够被树脂充分浸润,提高复合材料中纤维与基体之间的结合力,抑制纤维与树脂之间的分层,减少复合材料中的纤维断裂和树脂富集,极大地改善复合材料的性能。本文总结了不同展纱方法、展纱设备及展纱宽度预测模型的研究现状及进展,主要结论如下:

(1)机械多辊组展纱法由于操作简单,成本低,是企业最常用的展纱方法,但是机械多辊组展纱法会对纤维造成较大损伤,且纤维断裂残留在展纱辊上的毛丝会给展纱宽度带来较高的不稳定性。气流展纱法对纤维的损伤较小,但需要对气流进行稳定控制,且气流会导致大量断裂毛丝漂浮在空气中,造成一定的危害。超声波展纱法同样对纤维的损伤较小,但噪声大、成本高,流程复杂,宽度稳定性不高。静电展纱法需要对展纱后的纤维束进行静电消除处理,且静电会对生产环境造成一定的危害。对大丝束碳纤维进行展纱时,可以将不同展纱方法结合,在满足后道工艺生产需求的基础上,选择最适合的展纱工艺。或利用相关领域的先进技术对展纱工艺进行优化,减少对纤维束的损伤,解决大丝束碳纤维在展纱过程中展纱宽度波动、缝隙大,厚度不均匀,收卷时宽度减小等问题,实现大丝束碳纤维的连续均匀展纱。

(2)机械多辊组展纱设备能够通过参数调节灵活控制展纱宽度和面密度,根据后道生产需求连续生产不同宽度和面密度的碳纤维带或纱片,满足工业生产需要。气流、超声波和静电展纱设备流程复杂,成本相对较高,应用较少,大多需根据后道产品的特殊需求进行选择。未来展纱设备的发展需提高其针对不同规格碳纤维的工艺适应性,兼容不同浸渍方式,根据不同市场需求生产不同种类的预浸纱。可以将展纱工序与表面改性工序联合,减少纤维在展纱过程中的损伤,生产功能性预浸料,应用新兴技术对展纱设备进行改进,优化展纱效果,提高效率,降低成本。

(3)已有的展纱宽度预测模型大多针对一种展纱方法建立,适用于特定场景下的展纱宽度模拟,具有一定的局限性,可以根据不同的展纱设备和展纱方法,建立更具针对性的展纱宽度模型,实现展纱片的面密度可控,指导实际生产。

目前,针对大丝束碳纤维展纱的相关研究仍较少,对于展纱过程中纤维运动规律、铺展过程及演化等相关模型的研究仍然缺乏。缺少对大丝束碳纤维展纱效果的评价标准,展纱宽度波动和展纱片厚度均匀性的评价也缺乏相应指标,纤维束在展纱过程中的损伤没有相应的测试标准与评价方法,故无法定量分析具体损伤程度。各科研单位和生产企业应重视基础研究,制定大丝束碳纤维展纱效果和损伤等方面的评价标准,促进我国大丝束碳纤维的发展。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] ZHANG C, LIN Y Q, ZHANG X Q, et al. Ultra-thin carbon fiber reinforced carbon nanotubes modified epoxy composites with superior mechanical and electrical properties for the aerospace field[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022,163:107197.
- [2] 徐悦. 碳纤维复合材料的性能分析及其在航空领域的应用[J]. *化学工程与装备*, 2023(5):200-202.
- [3] 高硕,周邦泽,何梦瑶,等. 碳纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺[J]. *产业用纺织品*, 2023,41(12):6-19.
- [4] 孙华,史耀君,周华杉,等. 碳纤维复合材料在轨道交通车辆上的应用与发展趋势[J]. *轨道交通材料*, 2023,2(2):29-32.
- [5] HIREMATH N, YOUNG S, GHOSSEIN H, et al. Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020,198:108156.
- [6] 张磊,许帅康,陈洁,等. 列车车体轻量化设计研究进展[J]. *机械工程学报*, 2023,59(24):177-196.
- [7] 蒋米雪. 体育器材应用碳纤维复合材料对竞技体育发展的影响[J]. *造纸装备及材料*, 2023,52(7):90-92.
- [8] TANG D Z. The application of carbon fiber materials in sports equipment [J]. *Applied Mechanics Materials*, 2013,443:613-616.
- [9] SUN L N, DENG Z. The carbon fiber composite materials application in sports equipment[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 341/342: 173-176.
- [10] ZHAO J T, LIEBSCHER M, KÖBERLE T, et al. Mineral-impregnated carbon-fiber (MCF) composites made with differently sized fly-ash geopolymers for durable light weight and high temperature applications[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023,138:104950.
- [11] 杨金纯,陈利. 纤维增强复合材料在桥梁工程中的应用[J]. *产业用纺织品*, 2006,24(4):20-23.
- [12] MUTHUKUMARANA T V, ARACHCHI M A V H M, SOMARATHNA H M C C, et al. A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366:130173.
- [13] 沈海娟,王臣辉. 碳纤维在风电领域的应用现状及发展趋势[J]. *石油化工技术与经济*, 2023,39(3):58-62.
- [14] TENG H W, LI S J, CAO Z, et al. Carbon fiber composites for large-scale wind turbine blades: applicability study and comprehensive evaluation in China [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023,11(3):624.
- [15] 杨小平,隋刚. 碳纤维复合材料在新能源产业中的应用进展[J]. *新材料产业*, 2012(2):20-24.
- [16] 徐爱武,梁燕,蒋玲玲. 大丝束碳纤维发展现状及我国技术瓶颈和发展建议[J]. *合成纤维*, 2020,49(6):19-23.
- [17] MORADI A, SUN C Z, GUAN Z W, et al. Technology for lateral spreading of fibre bundles for applications in manufacturing thermoplastic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 167:107422.
- [18] 罗云烽,孙永春,段跃新,等. 薄层化大丝束碳纤维复合材料性能研究[J]. *航空制造技术*, 2010,53(20):75-78.
- [19] 邱超,马心旗,王亚震,等. 薄层碳纤维增强树脂基复合材料研究与应用进展[J]. *航空制造技术*, 2021,64(14):22-31.
- [20] LI X Y, YUAN Y N. Hybrid and gradient design of ultra-thin-ply composite laminates for synergistic suppression of delamination and fiber fracture damage modes [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 295:109822.
- [21] 华泽天,薛平,陈轲,等. 连续纤维展纱工艺研究进展[J]. *塑料工业*, 2023,51(10):1-6.
- [22] WILSON S D R. Lateral spreading of fibre tows [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 1997, 32(1):19-26.
- [23] IRFAN S M, MACHAVARMA R V, MAHENDRAN S R,

- et al. Lateral spreading of a fiber bundle via mechanical means[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(3): 311-330.
- [24] AKASE D, MATSUMAE H, HANANO T, et al. Method and apparatus for opening reinforcing fiber bundle and method of manufacturing prepreg: US19980202011 [P]. 2000-08-01.
- [25] 藏旭辉,段长兵,王勇. 震动展纱设备: CN202122772789.0 [P]. 2022-04-19.
- [26] 罗云烽,孙永春,段跃新,等. 大丝束碳纤维薄层化技术[J]. 复合材料学报, 2010, 27(1): 123-128.
- [27] EL-DESSOUKY M H, LAWRENCE A C. Ultra-lightweight carbon fibre/thermoplastic composite material using spread tow technology [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 50B: 91-97.
- [28] SIHN S, KIM Y R, KAWABE K, et al. Experimental studies of thin-ply laminated composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(6): 996-1008.
- [29] 陈金良,牛雪娟,张准. 高温射流冲击大丝束碳纤维实验与仿真分析[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(6): 758-764.
- [30] 牛雪娟,徐妍慧. 气流展纤工艺中不同压差和送丝速度对碳纤维展宽的影响[J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(4): 97-102.
- [31] 徐挺,肖军,闫西涛,等. 超声辅助纤维束展纱效果研究[J]. 玻璃纤维, 2015(5): 10-14.
- [32] 马丕波,蒋高明,高哲,等. 一种碳纤维的超声波展纤方法: CN201310187189. 5 [P]. 2013-10-09.
- [33] 汪训国,刘君,江旭,等. 一种大丝束碳纤维扩展装置: CN202321344023. 5 [P]. 2024-01-16.
- [34] 刘雪强,张长琦,杨涵,等. 一种大丝束连续碳纤维的展丝设备: CN115787167A [P]. 2023-03-14.
- [35] REN F, YU Y, CAO M, et al. Effect of pneumatic spreading on impregnation and fiber fracture of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36(21): 1554-1563.
- [36] 王明欢,刘袁媛,徐然,等. 振动喷吹展纤工艺参数对碳纤维展纤效果影响的研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(12): 47-53.
- [37] 李春惠,谈源,陈香伟,等. 一种大丝束碳纤维展纤装置: CN110904554B [P]. 2022-07-01.
- [38] 李炜,李蓓蓓,朱家强,等. 低成本高性能大丝束碳纤维展开装置: CN203729003U [P]. 2014-07-23.
- [39] 段跃新,肇研,刘汝斌,等. 一种大丝束碳纤维薄层化装置: CN201420178 [P]. 2010-03-10.
- [40] NESTLER J, VETTERMANN F, REUCHSEL D. Device and method for spreading a carbon fiber hank: US20060550593 [P]. 2009-05-26.
- [41] 冯一川,傅增祥,曹兵妥,等. 纤维束展开宽度的理论计算[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(7): 1489-1491.
- [42] 徐然,许文翀,王明欢,等. 机械辊子上纤维束展宽模型的建立 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2704-2712.
- [43] ZHOU Q H, WU G Z, WANG Z X, et al. Analysis and prediction of the width of spreading carbon fiber tow based on gray system theory [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 138(12): e50069.
- [44] CHEN J C, CHAO C G. Numerical simulation and experimental investigation for design of a carbon fiber tow pneumatic spreading system [J]. Carbon, 2005, 43(12): 2514-2529.

惟创新者进

惟创新者强

惟创新者胜