

高性能纤维的可织性研究进展*

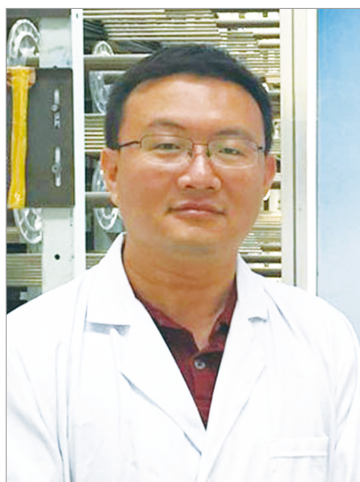
吴 宁, 韩美月, 焦亚男, 陈 利

(天津工业大学复合材料研究院, 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

[摘要] 高性能纤维的可织性反映了高性能纤维在织造成形加工中的抗损伤能力, 其优劣直接影响织造效率和最终复合材料性能和品质。本文内容涉及碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维和多种无机陶瓷纤维的可织性研究。主要介绍了高性能纤维的三维机织损伤表征与优化技术, 阐述了其可织性评价方法的研究现状与进展, 归纳了不同类型高性能纤维织造适应性的改善方法, 最后提出了本领域亟待解决的问题和主攻方向。

关键词: 高性能纤维; 碳纤维; 三维机织; 织造损伤; 可织性; 上浆

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.15.081



吴 宁

副研究员、博士生导师, 研究方向为高性能纤维可织性、大尺寸纺织结构复合材料预制体成形技术, 承担或参与多项国防民口配套项目、国家自然科学基金项目等省部级重点科研项目, 发表 SCI、EI 收录高水平论文 40 余篇, 参编英文著作 1 部, 授权国家发明专利 2 项。

* 基金项目: 天津市教委科研计划项目 (2019ZD03); 天津市高等学校创新团队培养计划 (TD13-5043); 山西省重大科技项目 (20181102022)。

高性能纤维由于高强度、高模量等特点通常以连续纤维束交织的方式在复合材料中充当增强体, 增强体的结构形式以二维和三维机织物为主。其中三维机织物的纱线交织结构中包含全部或部分贯穿织物厚度方向的捆绑纱线, 对比二维机织物可显著提高复合材料的抗分层能力以及冲击损伤容限。三维机织的优势在于可以使用多种高性能纤维材料 (如碳、芳纶、陶瓷等) 快速制成复杂形状构件的近净形织物, 如天线罩、火箭喉衬和多管支架等。

三维机织物作为复合材料的增强体虽然具有诸多优势和巨大的应用潜力, 但其面内机械性能通常较同体积含量二维织物铺层结构降低 10%~20%^[1-2]。这一方面是由于在三维机织过程中, 厚度方向捆绑纱线的使用引起了承载纱线的弯曲和取向变化; 另一方面, 三维机织过程导致的纱线损伤也是引起性能下降的重要因素。在机织物成形过程中, 纱线会反复地经受摩擦、弯曲、剪切等应力作用, 对比于二维机织, 三维机织由于多层经纬纱以及高设计厚度的

特点, 在织机开口及打纬运动过程中纱线会经受更大的摩擦力, 更多的摩擦次数以及形成更高的弯曲曲率而产生更加严重的损伤。

高性能纤维的可织性通常是指高性能纤维束在承受织机复合应力作用下, 所表现出的织造适应性即抗织造损伤能力。然而, 高性能纤维的可织性无法从国内外生产厂家公开的少量性能指标 (丝束拉伸强度、弹性模量、断裂延伸率等) 中得到判定依据。因此, 认识高性能纤维的可织性是低损伤三维织造工艺设计的基础, 也是三维机织复合材料性能优化的重要途径。本文围绕高性能纤维三维机织过程损伤表征与优化、可织性评价方法及其织造适应性改善 3 个方面进行综述, 介绍了目前高性能纤维可织性领域的关注热点及主要研究工作, 并对其发展趋势进行了展望。

高性能纤维的三维机织过程损伤表征与优化

随着高性能复合材料市场的快速发展, 三维织物的高效自动化制备是必然趋势。为了在不降低织物

质量的同时提高生产效率,了解高性能纤维在三维机织过程中的损伤行为是必要前提(部分损伤状况见图1^[3-5])。Lee等^[6]发现在开口运动过程中,E型玻璃丝束由于彼此产生粘着作用而加剧损伤,而且严重的纤维损伤不仅出现在开口区域,还由于大量断丝的聚集,使箱齿附近的纤维束也产生了非常严重的损伤,拉伸性能测试结果表明,织造后干纤维束的拉伸强度降低了30%。Lee等^[7]对碳纤维丝束进行了类似的研究,他们观察到在织造过程中丝束似乎会对单根长丝造成很大的损害,经纱表面逐渐出现毛羽,并测得干纤维束的拉伸强度降低了12%。Rudov-Clark等^[8]的试验结果表明,玻璃纤维束在张力施加和送经阶段受到的损伤作用最大,断裂的纤维和碎屑在织机的上方和周围堆积,碎屑由于长度很小而不会导致严重的纤维损伤,只会一定程度上影响纤维束的模量值。Lefebvre等^[3]研究了对位芳纶经纱和纬纱机械性能的损失。研究表明,经纱间由于摩擦和相互纠缠作用比纬纱的损伤更为显著,并且织物结构也影响经纬纱的性能损失率。结果表明,织造后芳纶纤维的平均弹性模量损失20%,断裂延伸率损失12%,断裂韧性损失10%。根据Decrette^[4]的试验观察,玻璃纤维织造过程中会在织机、地面甚至空气中发现长度从小于1mm到最大10~20cm的断纤,而且断裂的纤维束或束内长丝通常会随着重复的梭

口运动而与相邻的纱线缠结在一起,造成更为严重的损伤。

高性能纤维束在织造过程中的损伤不仅影响了生产效率,还会降低织物预制体乃至最终复合材料制品的性能。因此,优化织机构件,优化织造过程监测与控制是改善该问题的重要途径。Rudov-Clark^[8]和Lee^[6]等提出将织机机械表面镀上耐磨涂层,通过降低表面摩擦系数而减少织机构件对束丝的磨损。Archer等^[5]也特别提出减少织机构件对纤维束的摩擦是降低纤维束、织物和复合材料性能损失的主要方法。Decrette等^[9-10]集中研究了开口运动阶段纤维束损伤产生的机理。在该阶段,当经纱密度较高时,观察到丝束表面被“原纤化”的频率更高。原纤化会增加纤维的损坏,因此需要优化工艺以减少原纤化的产生。文章提出了通过调整Jacquard UNIVAL 100开口机构参数来减少丝束损伤的方法。Lee等^[11-12]提出了使用MEMS进行经纱断裂检测的机织过程监测方法,该方法是通过安装在束丝上的MEMS加速度计自动检测翘曲断裂,以便于及时调整织机运动。Boussu等^[13]在不同织造区域使用带压阻涂层的玻璃基纱线测量其伸长率,结果表明,由于较高的丝束间摩擦力作用,开口和打纬运动是束丝产生磨损的主要原因。周其洪等^[14]研制了一套碳纤维织造经纱损伤监测系统和评价标准。制定的评价指标主要包

括单根经纱的轮廓粗糙度、单根经纱的束内割伤程度和单根经纱的起毛程度等,可根据反映出的碳纤维经纱损伤程度进行织机转速和经纱张力的实时调整,以减小损伤提高织造效率。Bessette等^[15]在经轴附近的纤维区域设置了张力传感器,在开口区域设置了应力信号采集装置,如图2所示,由于丝束损伤会引起张力信号的频谱变化,可通过频谱分析预判丝束断裂状况,通过调节开口运动的振幅、速度和丝束位移加速度等参数可实时优化织造工艺。

综上所述,高性能纤维的三维机织损伤主要集中于经纱,导致经纱损伤的因素包括开口和打纬运动区域中经纱之间的摩擦、经纱与钢筘、经纱与综眼之间的摩擦,在导纱过程中经纱与导纱配件的摩擦等;通过降低织机构件表面摩擦系数、优化织造工艺可有效减小织造过程中的经纱损伤;在经纱易损区域设置在线监测装置,根据丝束损伤和张力变化及时调整织造工艺,有利于减少停机次数,提高生产效率。

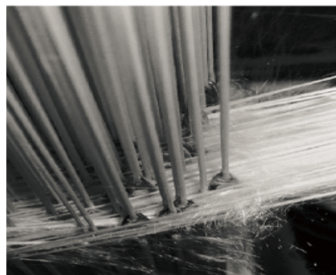
高性能纤维的可织性评价

1 高性能纤维束可织性参考指标的测试方法

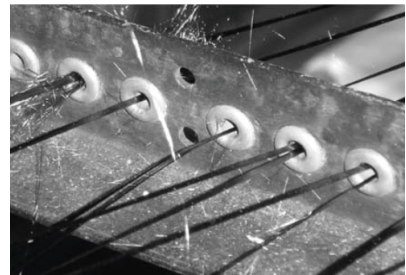
高性能纤维的可织性优劣取决于其丝束质量和部分物理性能指标,主要包含集束性、毛羽量、耐磨性和弯曲刚度等,目前还没有针对高性能纤维的相关测试标准,仅在国外的几



(a) 开口区域的芳纶纤维



(b) 综丝区域的玻璃纤维



(c) 导纱瓷眼区域的碳纤维

图1 高性能纤维束织造过程损伤状况

Fig.1 Weaving damage of high-performance fibers

个碳纤维大型生产企业如东丽、东邦、赫氏等内部有严格保密的测试方法,由于高性能纤维成形加工中损伤问题的普遍性,也使得众多科研人员将目光转向高性能纤维测试方法的研发。

高性能纤维束通常由成千上万根连续长丝组成,由于表面上浆剂的黏结作用才具有了集束性。集束性不佳,织造中束内单丝易产生损伤,而集束性太强又可导致织造中纤维束不易变形、铺展,还不利于后续复材成型中基体材料的渗入,影响最终制品性能。张雅璐^[16]采用对钩法,使用一对金属钩从一段长度的碳纤维束的中间部位沿径向拉开,通过观察纤维束中单丝之间的连接情况和撤去外力后纤维束的恢复状态来评价纤维束的集束性。杭传伟等^[17]提出了一种碳纤维集束性的测试方法,该方法是将纤维束从退绕装置牵出依次穿过瓷眼、传动机构,最后缠绕

到卷绕装置上,采用刻度尺测量纤维束展纱前后在传动辊上的宽度变化计算出集束性。

毛羽量主要反映高性能纤维的成纱质量。焦亚男等^[18]使用聚氨酯软泡法对比了织造前后碳纤维的毛羽量,该方法是使碳纤维通过具有一定负载压力的聚氨酯软泡夹层,根据穿过聚氨酯软泡前后的碳纤维的质量差来评价碳纤维表面的毛羽量,测试方法如图3所示。此外,也有部分厂家将纺织纱线毛羽仪改装后用于测试高性能纤维毛羽。

耐磨性是指纤维束抵抗磨损的能力。研究者们通常借鉴纺织行业标准《纱线耐磨试验方法 往复式磨辊法》^[19]进行高性能纤维耐磨性的测试,该方法是将包覆标准砂纸的磨辊沿负有一定载荷的试样作匀速直线往复运动直至试样受磨断裂,以断裂时磨辊往复次数体现试样的耐磨性能。此外,魏慧卿等^[20]将碳纤维

以一定张力和弯曲角度固定在振荡往复装置中,检测时,处于往复运动状态的试样与耐磨材料产生摩擦,直至试样断裂,通过记录摩擦经历的时间体现试样的耐磨性能。

弯曲刚度主要反映纤维束抵抗弯曲变形的能力,其测试方法可分为依靠纤维束自身重量和通过外力作用促使纤维产生弯曲变形两类。Cornelissen等^[21]基于Peirce悬臂梁法^[22]设计了用于高性能纤维束弯曲刚度测试的试验装置,通过测量得到纤维束在自重下的悬垂轨迹点参数并拟合出曲线方程,进而计算了碳纤维和氮化硅纤维的弯曲刚度值;Koncherry等^[23]分别使用悬臂梁法、自制的两点弯曲、三点弯曲试验装置和Kawabata弯曲试验仪测试了T700碳纤维的弯曲刚度,结果表明,使用不同方法获得的弯曲刚度值差异较大,纤维束的弯曲刚度受弯曲方向影响显著且被测纤维束长度也对测试结果的波动性影响显著。王震等^[24]使用KES织物风格仪测试了碳纤维、玻璃纤维、芳纶和高强聚乙烯纤维的弯曲刚度,结果表明,无机高性能纤维的弯曲刚度要显著大于有机纤维,纤维束的弯曲刚度与束内单丝的排列、聚集状态有关,且单丝的滑移会导致弯曲刚度的下降。

2 纤维束织造过程损伤的试验模拟

通过上述指标的测试结果可对高性能纤维束可织性的优劣作出粗略的量化评价,然而,由于高性能纤维束具有高度形变的软物质特征,使其在不同的接触和受力工况下展现出特殊的性能变化规律。因此,通过

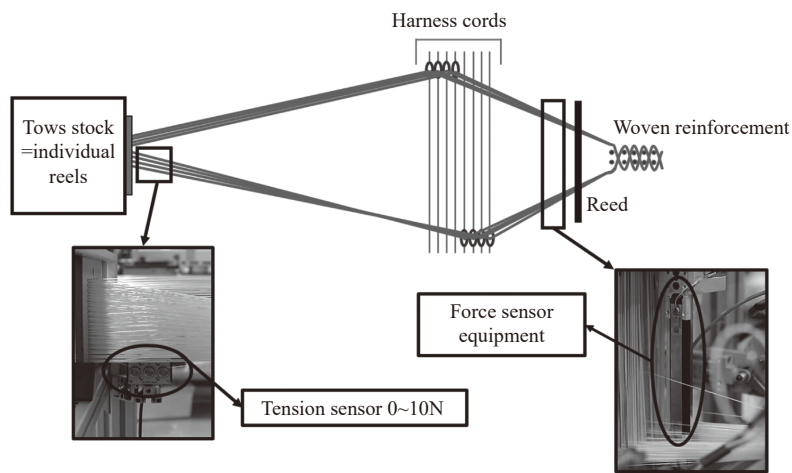


图2 在线测量传感器位置
Fig.2 In-situ measurement sensor positioning

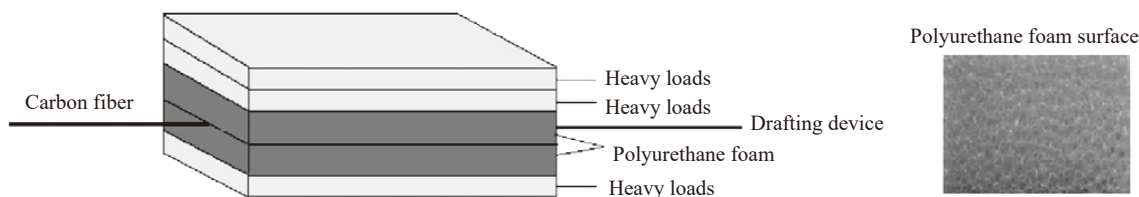


图3 聚氨酯泡沫测试示意图
Fig.3 Schematic of polyurethane foam test

建立试验模拟方法,研究纤维束在特定织造工况下产生的结构及性能的损伤,可更准确地得到高性能纤维束的可织性,并有助于指导具体的上机织造工艺设计。近年来,国内外学者也进行了一些方法的摸索和尝试。

法国上阿尔萨斯大学的 Tourlonias 等^[25]为了探索三维织机开口运动中碳纤维经纱之间的摩擦磨损行为,在销盘式往复运动摩擦试验机上安装了纤维固定装置。模拟研究了经纱密度,开口运动频率及开口幅度对碳纤维所受摩擦力和摩擦系数的影响;通过图像分析方法,统计了不同接触力作用下纤维束磨损后产生毛羽量的变化规律,结果表明,在所考察的 200~800mN 范围内,碳纤维束的毛羽量随着接触力的增大而显著增多。

在国内,天津工业大学复合材料研究院在该领域进行了一系列的探索工作^[26-32],先后建立了多种工况下纤维束与纤维束之间以及纤维束与织机构件之间的摩擦磨损试验模拟方法,并采用实际上机织造后纤维束的损伤评价结果验证了试验模拟方法的可靠性。

在模拟导纱机构中碳纤维束之间摩擦特性的研究中^[26],提出采用印痕法提取纤维束间实际接触面积,表征了不同接触力下碳纤维束间的接触面积变化,图 4 分别为 0.49N、0.98N 和 1.47N 接触力作用下纤维束间实际接触区域示意图。以实际接触面积统计值为依据,分析了不同参数下碳纤维束间摩擦损伤程度变化的产生原因。

在模拟三维织机中经纬向纤维束之间的摩擦磨损行为研究中^[27],根据实际机织工况下纤维束相对位置和形态,使用 3D 打印技术制备了如图 5 所示的样品固定夹具,并借助摩擦磨损试验机的往复运动模块进行摩擦试验,研究发现随着接触力的增大,碳纤维束的摩擦系数减小但磨

损程度加剧,这表明对于高性能纤维束来说,接触过程中纤维束的摩擦系数与其磨损程度不直接相关,这也体现出高性能纤维束磨损机理的复杂性。此外,在使用该装置对陶瓷纤维束进行摩擦测试时,纤维束与瓷眼接触区域产生了弯曲断裂损伤现象,因此,在随后的设计中将该夹具改装为弧形支撑臂^[28]并成功地表征了陶瓷纤维束的摩擦磨损性能。

打纬运动中箱齿与纤维束之间的反复摩擦也是造成纤维损伤的主要因素之一。吴宁等^[29]将薄片嵌入到 3D 打印塑料夹具中,制备了箱齿/纤维束摩擦试验装置,通过提取纤维束的横截面形貌,研究了接触应力变化对实际接触面积的影响,使用赫兹接触理论建立了摩擦力计算模型

并进行了试验验证,结果表明,计算和测试结果高度相符^[30];另一方面,随着接触应力的增大,摩擦过程产生的毛羽量增多,同时聚集在摩擦区域两侧的断纤取向分布更加无序(图 6),这一现象与实际三维机织中箱齿处断纤聚集状况极为相似。

为了建立纤维束/纤维束,纤维束/钢筘试验模拟中接触应力值与实际三维机织工艺中经纬纱密度间的对应关系,杨洁^[30]将摩擦试验模拟测试后和实际上机织造后的碳纤维束样品进行了拉伸断裂强力测试。测试结果如图 7 所示,试验模拟和上机织造导致的纤维束性能下降趋势非常相似。在此基础上,建立了摩擦模拟试验中碳纤维束摩擦接触应力与拉伸断裂强力的线性拟

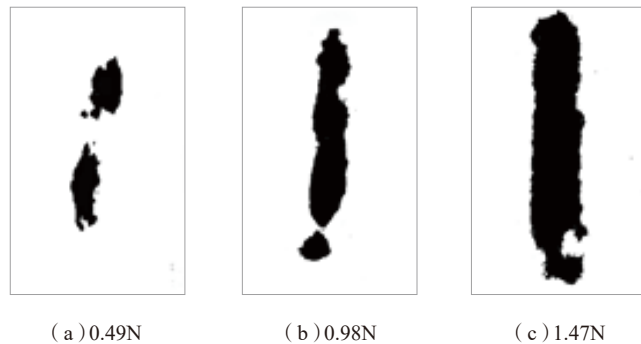


图4 接触力对碳纤维束间实际接触面积的影响
Fig.4 Effect of contact force on real contact area between carbon fiber tows

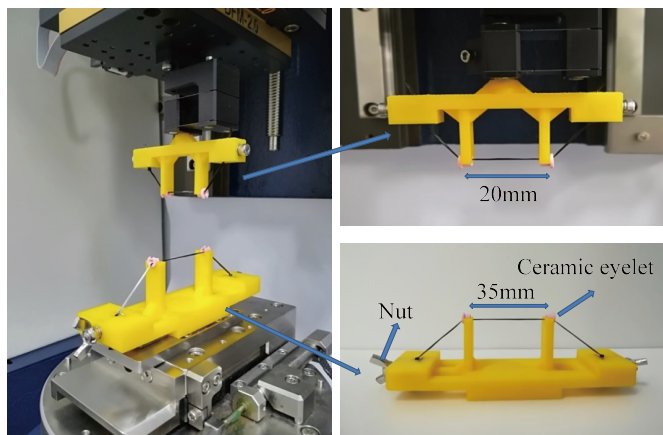


图5 模拟织造中经纬纱之间的摩擦试验夹具
Fig.5 Experimental fixture of friction between warp and weft yarns in simulated weaving

合方程(表1),该方程可用于预测实际上机织造经纬纱密度参数对应的纤维性能损伤状况,进而指导织造工艺的优化设计。

在高性能无机纤维,尤其是高模量碳纤维和陶瓷纤维的上机织造中,发现弯曲损伤也是不容忽视的因素。为了探索三维机织物结构参数对纤维束弯曲损伤的影响规律,选取三向正交结构中的氮化物纤维法向纱为研究对象,通过提取多种厚度和经纱密度下织物中法向纱的弯曲曲率和弯曲角度值,设计并组装了如图8所示的纤维束弯曲试验模拟装置^[32]。试验模拟原理为:根据实际织物中纤维束的弯曲曲率安装相应尺寸的下压头,垂直运动下压头使纤维束由水平下压至设定的弯曲深度以完成织物厚度的模拟,控制两支撑头同时向中间移动,直至达到设定的跨距值以对应织物纬纱密度的模拟,此时纤维束的弯曲状态即为模拟三维织物中法向纱的弯曲状态。采用图9中图像分析方法,量化统计毛羽覆盖面积及毛羽长度分布值来表征高性能纤维束在不同织物结构参数下的弯曲损伤程度。

高性能纤维织造适应性改善

上浆是高性能纤维生产工艺流程中的一个关键步骤,高性能纤维的上浆剂除了可改善纤维束的浸润性,提高纤维束与树脂之间的界面结合强度,还可以减小单丝表面的摩擦系数,改善纤维束的集束性^[33-36]。然而,三维织物的织造过程对高性能纤维的可织性提出了更高的要求,普通的上浆效果还不能完全满足实际生产的要求,尤其是对于一些高模量的碳纤维、陶瓷纤维产品通常在织造开始时就产生了大范围的断纱,无法控制产品质量。因此,研究人员尝试通过表面处理的方法改善高性能纤维的可织性。

Luo等^[37]对上浆前后碳纤维表

面性能进行了分析,结果发现碳纤维的表面粗糙度、表面活性官能团以及表面能均略微下降,上浆剂主要充当了润滑剂的作用,可有效防止碳纤维在预制件织造过程中的损伤。

张如良等^[38]研究了上浆剂的分子量对碳纤维集束性、柔软性和柔韧性等的影响。研究结果表明分子量过大会使碳纤维的柔韧性、柔软性降低,而上浆剂的分子量过小又会引起

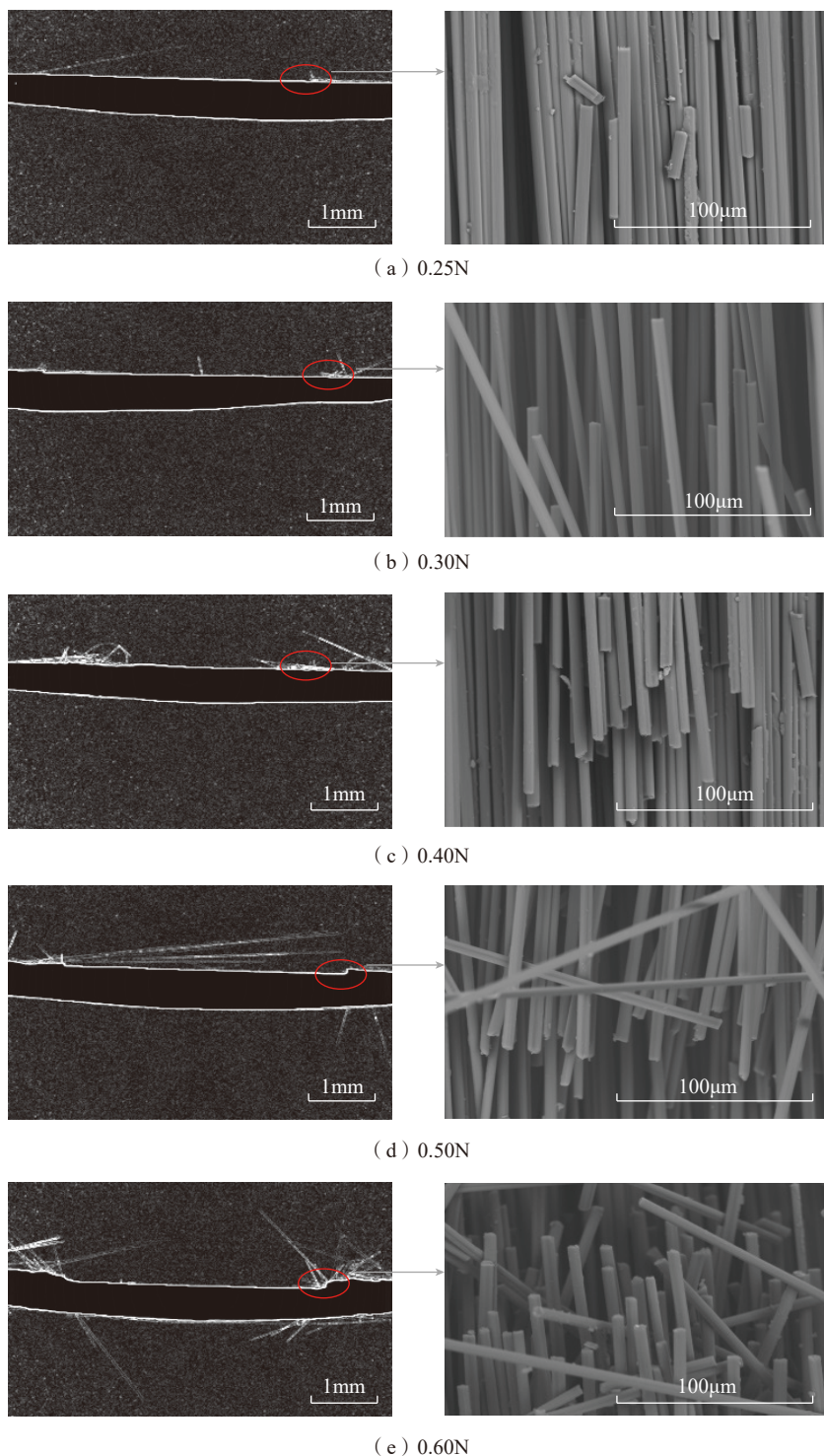


图6 接触力对碳纤维束摩擦损伤的影响

Fig.6 Effect of contact force on friction damage of carbon fiber tows

单个纤维间的粘着力不足,进而导致其集束性不佳。因此,只有选择中等分子量的上浆剂才能有效改善碳纤维的可织性。

陈利等^[39]采用双酚 A 型水性环氧树脂为主体的上浆剂对国产 T300 碳纤维进行了二次上浆改性,可织性分析结果表明:上浆剂改善了碳纤维的耐磨性和集束性,表现为摩擦后纤维束的表面毛羽减少和拉伸强度损失率降低。

焦亚男等^[18]研究了在 2.5D 经向增强结构织物织造中,上浆量对国产 T700 碳纤维可织性的影响。测试结果表明,当上浆量为 2.0% 时,碳纤维的拉伸强度损失率最小;且织造过程造成的纬纱损伤最为严重。

赵玉芬等^[40]研究了二次上浆对国产碳化硅纤维可织性的影响,结果表明,经浓度为 9% 的 E-15 水性环氧上浆剂上浆后 SiC 纤维束表面浆膜最为完整光滑, SiC 纤维束的耐磨性能最好,纤维柔软度高并且浆膜对纤维束的补强作用明显。

钟智丽等^[41]用部分醇解 PVA 制备了上浆剂并对玄武岩纤维进行了表面处理,结果表明,处理后玄武岩长丝在织造过程中杜绝了单丝分散、相邻丝缠绕现象,且单丝断头明显减少。

吴宁等^[42]合成了一系列聚乙烯醇-环氧混合乳液型上浆剂并对国产氮化硅纤维进行了表面处理。结果表明,上浆处理显著降低了氮化硅

纤维的表面摩擦系数,在三维平板织物织造中的经纱开口更为清晰,织造损伤得到明显改善,毛羽量显著减少(图 10)。为使氮化硅纤维适应复杂结构三维预制织物的织造需求,吴宁和李帅等^[43-44]提出了一种连续氮化硅复合线材的制备方法,该法采用改性聚氨酯处理剂对氮化硅纤维进行了浸润处理,其效果不仅可使氮化硅纤维束表面形成一层保护膜,而且使其内部长丝之间产生一定的柔性黏结,在小幅提高纤维束硬挺度的条件下,显著改善了氮化硅纤维的耐磨性和抗弯性能。

综上所述,高性能纤维的可织性改善多使用二次上浆方法。因此,在选用二次上浆剂品种时首先需考虑

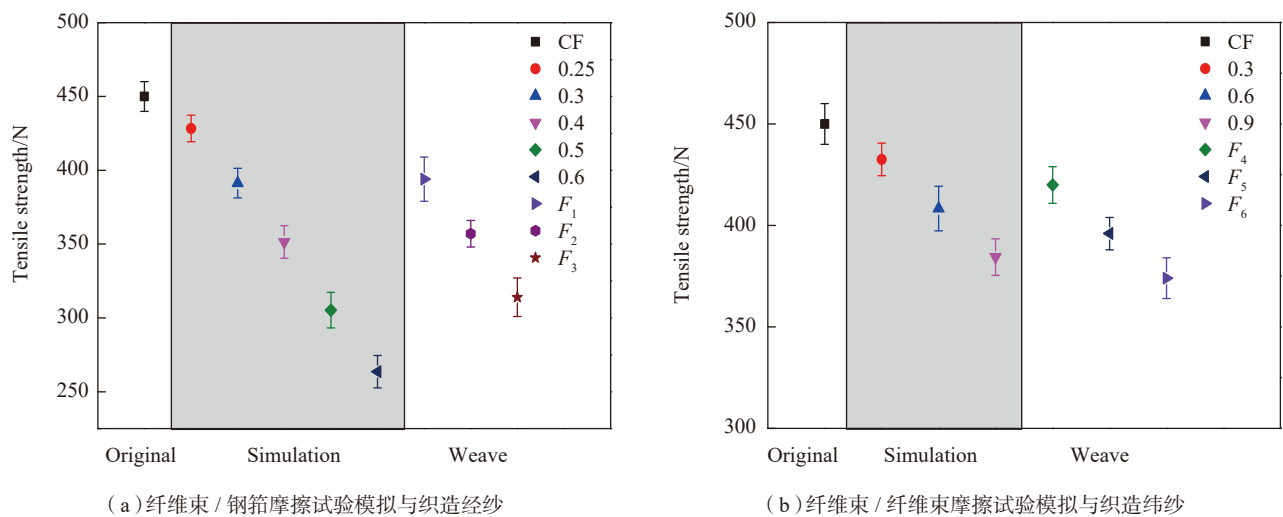


图7 试验模拟测试和上机织造后碳纤维束的拉伸断裂强力分布图

Fig.7 Tensile breaking strength distribution of carbon tows after experimental simulated and actual weaving

表1 试验模拟和实际织造对应参数

Table 1 Experimental simulation and actual weaving corresponding parameters

试验模拟方式	碳纤维束摩擦接触应力与拉伸断裂强力线性拟合方程	试样	实际织造		对应相似纤维损伤情况的试验模拟接触力/N
			经密 / (根·cm ⁻¹)	纬密 / (根·cm ⁻¹)	
纤维束/箱齿	Y= -457.693X+535.645	F ₁	6	3	0.31
		F ₂	8	3	0.39
		F ₃	10	3	0.48
纤维束/纤维束	Y= -73.611X+451.938	F ₄	3	5	0.43
		F ₅	3	6	0.76
		F ₆	3	7	1.06

与纤维束表面上浆剂的相容性。碳纤维多采用含环氧类上浆剂进行表面改性;无机陶瓷纤维多与陶瓷基体进行复合使用,在与陶瓷基体复合前通过煅烧处理可去除纤维束的上浆剂成分,因此上浆剂种类的选择空间较大,根据目前的研究可知,PVA类、环氧类和聚氨酯类上浆剂

的使用均获得了较好的织造适应性改善效果。

结论

随着以碳纤维为代表的高性能纤维领域的快速发展,三维机织复合材料已经渗透到了各个应用领域并发挥着日益显著的作用。然而,近

年来在高性能纤维可织性方面的研究成果较少,严重缺乏系统的理论来描述高性能纤维织造过程损伤的产生行为及机理,而对其可织性的评价与改善方法的研究也明显滞后于工程实践。目前高性能纤维可织性的研究主要在于模拟三维机织中纤维束的真实运动及受力状况,通过损伤分析结果评价纤维束的可织性优劣。研究者们多采用试验模拟方法评价纤维束的单因素损伤,尽管已有学者对纤维束在织造中的接触与损伤机理进行了探索性研究,已有研究工作建立了高性能纤维损伤试验模拟与实际机织造之间的关系,但距离指导工程实践还需要进行大量的研究。建议今后高性能纤维可织性的研究工作可围绕以下4个方面。

(1) 织造过程损伤行为的研究。高性能纤维束为成千上万根单丝组成的集合体,织造损伤可能产生于运动的纤维束之间,纤维束与其他接触介质之间,纤维束内单丝之间以及纤维束的自身形变。因此,揭示三维机织工况下高性能纤维束的损伤行为是改善其织造损伤的必要前提。

(2) 织造损伤在线监测技术的开发。三维机织物的高效自动化制备是技术发展的必然趋势,而通过在线监测技术可实时了解纤维损伤状况以调整织造工艺,避免反复断纱停机,提高织造效率。该技术的研发可为自动化三维机织效率的提高提供必要保障。

(3) 可织性评价体系的建立。在全面了解高性能纤维可织性的基础上进行织物结构和织造工艺的合理设计,就可有效地减少三维机织过程损伤。当前可织性的评价研究主要集中于高性能纤维部分物理性能指标的测试方法或者模拟特定工况下单因素的影响,还没有建立起能够全面反映高性能纤维可织性的评价体系。这项工作虽然困难,但对于指导工程实践,节约成本,提高织物产

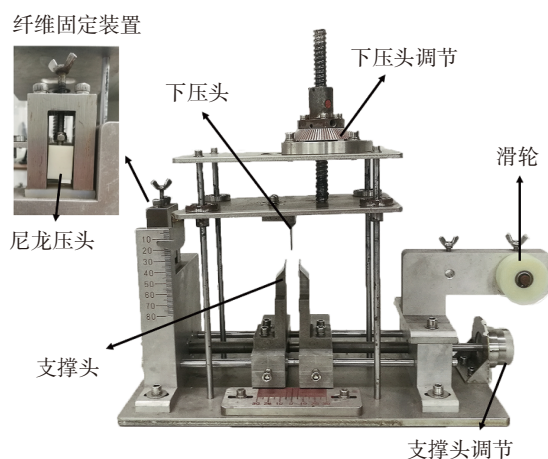


图8 纤维束弯曲试验模拟装置

Fig.8 Fiber tows bending experiment simulation device

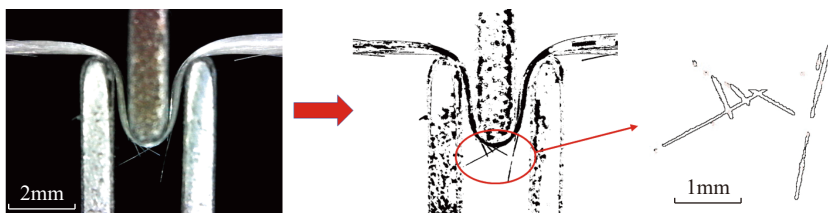
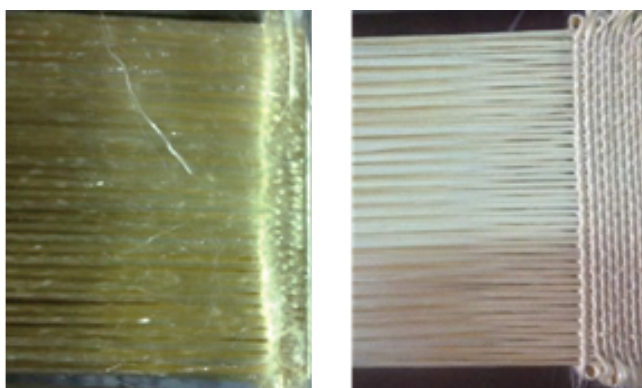


图9 纤维束弯曲损伤毛羽分析示意图

Fig.9 Schematic of hairiness analysis of fiber tow bending damage



(a) 处理前

(b) 处理后

图10 上浆处理前后氮化硅纤维三维机织过程对比

Fig.10 Comparison of 3D weaving process of silicon nitride fiber before and after sizing

品质量的意义重大。

(4) 高性能纤维上浆剂的研发。三维机织物成形过程要求纤维束既要有良好的集束性,又需具备较高的柔软度和变形能力。目前的高性能纤维上浆剂主要根据基体种类或复材加工工艺过程进行研发,相信随着三维机织自动化程度的提高,用于改善高性能纤维织造适应性的上浆剂也将成为研究热点。

参考文献

- [1] REIFSNIDER K L, SENDECKYJ G P, WANG S S, et al. Comparison of interlocked fabric and laminated fabric kevlar 49/epoxy composites[J]. *Journal of Composites Technology and Research*, 1985, 7(4): 136.
- [2] BRANDT J, DRECHSLER K, ARENDTS F J. Mechanical performance of composites based on various three-dimensional woven-fibre preforms[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(3): 381–386.
- [3] LEFEBVRE M, FRANCOIS B, DANIEL C. Influence of high-performance yarns degradation inside three-dimensional warp interlock fabric[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2013, 42(4): 475–488.
- [4] DECRETTE M. Jacquard technology: study of shedding parameters and high density technical textile weaving optimization[D]. Mulhouse: Haute Alsace University, 2014.
- [5] ARCHER E, BUCHANAN S, MCILHAGGER A T, et al. The effect of 3D weaving and consolidation on carbon fiber tows, fabrics, and composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29(20): 3162–3170.
- [6] LEE L, RUDOV-CLARK S, MOURITZ A P, et al. Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites[J]. *Composite Structures*, 2002, 57(1–4): 405–413.
- [7] LEE B, LEONG K H, HERSZBERG I. Effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2001, 20(8): 652–670.
- [8] RUDOV-CLARK S, MOURITZ A P, LEE L, et al. Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(10): 963–970.
- [9] MATHIEU D, SABRI M, JEAN-FRANÇOIS O, et al. Jacquard UNIVAL 100 parameters study for high-density weaving optimization[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2016, 45(6): 1603–1618.
- [10] DECRETTE M, OSSELIN J F, DREAN J Y. Motorized Jacquard technology for multilayer weaving damages study and reduction: Shed profile and close shed profile[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2019, 14: 155892501983302.
- [11] LEE J H, SEYAM A M, HODGE G, et al. Warp breaks detection in Jacquard weaving using MEMS: System development[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2007, 98(3): 275–280.
- [12] LEE J H, MOHAMED SEYAM A, HODGE G, et al. Warp breaks detection in jacquard weaving using MEMS: Effect of weave on break signals[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2008, 3(1): 155892500800300.
- [13] BOUSSU F, TRIFIGNY C, COCHRANE C, et al. Fibrous sensors to help the monitoring of weaving process[M]//*Smart textiles and their applications*. Woodhead Publishing Series Textiles, 2016: 375–400.
- [14] 周其洪, 张佳南, 裴泽光, 等. 碳纤维经纱织造损伤状态评价标准及实现方法[J]. *纺织学报*, 2016, 37(9): 134–139.
- ZHOU Qihong, ZHANG Jianan, PEI Zeguang, et al. Evaluation standards and program implementation on damage status of carbon fiber warp weaving[J]. *Journal of Textile Research*, 2016, 37(9): 134–139.
- [15] BESSETTE C, DECRETTE M, TOURLONIAS M, et al. In-situ measurement of tension and contact forces for weaving process monitoring: Application to 3D interlock[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 126: 105604.
- [16] 张雅璐. 国产碳纤维二次上浆工艺及性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- ZHANG Yalu. Secondary sizing process and performance of domestic carbon fiber [D]. Tianjin: Tiangong University, 2016.
- [17] 杭传伟, 夏忠林, 徐牛牛, 等. 一种碳纤维集束性的测试装置及其测试方法: CN104535490A [P]. 2015–04–22.
- HANG Chuanwei, XIA Zhonglin, XU Niuniu, et al. A test device and test method for carbon fiber bunching property: CN104535490A [P]. 2015–04–22.
- [18] 焦亚男, 祁小芬, 吴宁, 等. 上浆量对碳纤维的立体织造损伤及其复合材料拉伸性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5): 1496–1502.
- JIAO Yanan, QI Xiaofen, WU Ning, et al. Effects of sizing amount on carbon fiber three-dimensional weaving damage and tensile properties of its composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(5): 1496–1502.
- [19] 纱线耐磨试验方法 往复式磨辊法: FZ/T 01058—1999[S].
- Test method for abrasion resistance of yarns, reciprocating roller method: FZ/T 01058—1999[S].
- [20] 魏慧卿, 张黎明, 赵建国, 等. 碳纤维耐磨性能检测方法: CN103604714A [P]. 2014–02–26.
- WEI Huiqing, ZHANG Liming, ZHAO Jianguo, et al. Testing methods for carbon fiber abrasion resistance: CN103604714A [P]. 2014–02–26.
- [21] CORNELISSEN B, AKKERMAN R. Analysis of yarn bending behaviour[C]//17th International Conference on Composite Materials (ICCM 17). Scotland, 2009.
- [22] PEIRCE F T. 26—the “handle” of cloth as a measurable quantity[J]. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 1930, 21(9): T377–T416.
- [23] KONCHERRY V, POTLURI P, FERNANDO A. Multifunctional carbon fibre tapes for automotive composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(2): 477–493.
- [24] 王震, 姜亚明, 刘良森, 等. 常用高性能纱线弯曲刚度的测量和表征[J]. *纺织学报*, 2014, 35(5): 30–33.
- WANG Zhen, JIANG Yaming, LIU Liangsen, et al. Measurement and characterization of bending rigidity of common high-performance yarns[J]. *Journal of Textile Research*, 2014, 35(5): 30–33.
- [25] TOURLONIAS M, BUENO M A. Experimental simulation of friction and wear of carbon yarns during the weaving process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 228–236.
- [26] 潘月秀, 解锡明, 吴宁, 等. 碳纤维束间的摩擦磨损特性[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1838–1846.
- PAN Yuexiu, XIE Ximing, WU Ning, et al. Frictional and worn behavior of inter-carbon fiber tows[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1838–1846.
- [27] 杨洁, 吴宁, 李帅, 等. 织造中碳纤维束间的摩擦磨损试验模拟[J]. *摩擦学学*

报, 2019, 39(1): 90-98.

YANG Jie, WU Ning, LI Shuai, et al. Experimental simulation of friction and wear of carbon fibre tows in the weaving process[J]. Tribology, 2019, 39(1): 90-98.

[28] 吴宁, 王玉, 李帅, 等. 一种纤维束间摩擦性能测试方法: CN110261298A[P]. 2019-09-20.

WU Ning, WANG Yu, LI Shuai, et al. A test method for friction properties between fiber bundles: CN110261298A[P]. 2019-09-20.

[29] 吴宁, 王玉, 李帅, 等. 一种模拟织造中纤维束/钢筘间摩擦的实验方法: CN110286084A[P]. 2019-09-27.

WU Ning, WANG Yu, LI Shuai, et al. An experimental method for simulating friction between fiber bundle / steel reed in weaving: CN110286084A[P]. 2019-09-27.

[30] 杨洁. 织造中碳纤维的摩擦磨损行为研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.

YANG Jie. Friction and wear behavior of carbon fiber in weaving [D]. Tianjin: Tiangong University, 2019.

[31] 焦亚男, 杨志, 张世浩. 实验参数对高性能石英纤维摩擦性能的影响[J]. 纺织学报, 2019, 40(7): 38-43, 50.

JIAO Yanan, YANG Zhi, ZHANG Shihao. Influence of experimental parameters on friction properties of high performance quartz fibers[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(7): 38-43, 50.

[32] 李帅. 改性氮化硅纤维织造损伤模式的实验研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2020.

LI Shuai. Experimental study on weaving damage modes of modified Silicon Nitride fibers [D]. Tianjin: Tiangong University, 2020.

[33] WEITZSACKER C L, BELLAMY M, SHERWOOD P M A. Studies of the effect

of size on carbon fiber surfaces[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1994, 12(4): 2392-2397.

[34] DILSIZ N, WIGHTMAN J P. Surface analysis of unsized and sized carbon fibers[J]. Carbon, 1999, 37(7): 1105-1114.

[35] TOURLONIAS M, BUENO M A, JORDAN C, et al. Influence of wear on the sizing layer and desizing of single carbon fibre-to-fibre friction[J]. Wear, 2018, 402/403: 64-70.

[36] 代志双, 李敏, 张佐光, 等. 碳纤维上浆剂的研究进展 [J]. 航空制造技术, 2012, 55(20): 95-99.

DAI Zhishuang, LI Min, ZHANG Zuoguang, et al. Development of carbon fiber sizing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(20): 95-99.

[37] LUO Y F, ZHAO Y, DUAN Y X, et al. Surface and wettability property analysis of CCF300 carbon fibers with different sizing or without sizing[J]. Materials & Design, 2011, 32(2): 941-946.

[38] 张如良, 黄玉东, 刘丽, 等. 上浆剂分子量对碳纤维表面性能及其界面性能影响研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(3): 137-143.

ZHANG Ruliang, HUANG Yudong, LIU Li, et al. Effect of the molecular weight of sizing agent on the carbon fiber surface and interface properties[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(3): 137-143.

[39] 陈利, 张雅璐, 付成龙, 等. 二次上浆处理对国产碳纤维可织性的影响 [J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(2): 24-28.

CHEN Li, ZHANG Yalu, FU Chenglong, et al. Effect of secondary sizing on weavability of domestic carbon fiber[J]. Journal of Tiangong University, 2016, 35(2): 24-28.

[40] 赵玉芬, 李嘉禄, 宋磊磊, 等. 上浆剂对国产碳化硅纤维表面及其织造性能的影响[J]. 纺织学报, 2017, 38(3): 78-84.

ZHAO Yufen, LI Jialu, SONG Leilei, et al. Influence of sizing agent on surface and weaving performance of SiC fibers[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(3): 78-84.

[41] 钟智丽, 刘华武. 提高玄武岩长丝可织性的研究[J]. 产业用纺织品, 2008, 26(2): 33-36.

ZHONG Zhili, LIU Huawu. Study on modification of basalt filaments weavability[J]. Technical Textiles, 2008, 26(2): 33-36.

[42] 吴宁, 李帅, 焦亚男, 等. 一种氮化硅纤维表面处理剂及其制备方法: CN108755123A[P]. 2018-11-06.

WU Ning, LI Shuai, JIAO Ya'nan, et al. A silicon nitride fiber surface treatment agent and its preparation method: CN108755123A[P]. 2018-11-06.

[43] 吴宁, 李帅, 王玉, 等. 一种连续氮化硅纤维增强树脂基复合线材及其制备方法: CN110305464A[P]. 2019-10-08.

WU Ning, LI Shuai, WANG Yu, et al. Continuous silicon nitride fiber reinforced resin-based composite wire and its preparation method: CN110305464A[P]. 2019-10-08.

[44] 李帅, 吴宁, 解锡明, 等. 上浆剂含固量对氮化硅纤维织造适应性的影响[J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37(2): 5-10.

LI Shuai, WU Ning, JIE Ximing, et al. Effect of solid content of sizing agent on weaving adaptability of silicon nitride fiber [J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2020, 37(2): 5-10.

通讯作者: 吴宁, E-mail: wuning@tiangong.edu.cn.

Research Progress on Weavability of High-Performance Fibers

WU Ning, HAN Meiyue, JIAO Ya'nan, CHEN Li

(Laboratory of Advanced Textile Composites (Ministry of Education), Institute of Composite Material, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

[ABSTRACT] The weavability of high-performance fibers reflects the damage resistance of high-performance fibers in the weaving forming process. Its performance directly affects the weaving efficiency and the performance and quality of the final composite product. The three-dimensional woven damage characterization and optimization technology were introduced, the research status and progress of the evaluation methods of high-performance fiber weavability were elaborated. Methods of improving the weaving adaptability of different high-performance fibers were summarized. Finally, the problems and main directions to be solved in this field are proposed.

Keywords: High-performance fibers; Carbon fibers; 3D woven; Weaving damage; Weavability; Sizing (责编 大漠)