

引文格式: 王凯, 刘寒松, 肇研. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 41-49.

WANG Kai, LIU Hansong, ZHAO Yan. Advance in automated fiber placement technology on continuous fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 41-49.

连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放技术研究进展

王 凯, 刘寒松, 肇 研

(北京航空航天大学, 北京 100191)

[摘要] 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料具有力学性能优异、使用温度区间广、可二次加工等独特性能优势,在航空等领域取得了长足发展。为进一步提高该类材料的生产加工效率,以自动铺放技术为代表的自动化加工技术成为当前研究的热点。本文在介绍了自动铺放技术的相关概念和连续纤维增强热塑性树脂基复合材料相关材料体系的基础上,总结了自动铺放技术国内外研究和应用现状,并重点阐述了当前自动铺放技术的相关研究热点和研究进展。

关键词: 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料; 碳纤维; 聚醚醚酮; 自动铺放技术; 自动铺放后处理技术

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.11.041



王 凯

高级实验师、博士,研究方向为先
进耐高温聚合物及其复合材料、空间用
聚合物及其服役行为、新型液晶材料。

复合材料作为高性能结构材料具有轻质高强的优点,可以用于集成和制造大规模的整体组件。随着

制造和加工技术的发展,该类材料的应用逐渐由航空航天领域扩展到其他行业,如汽车、公共交通、生物医学、海洋、电子和民用基础设施等^[1-3]。传统上,复合材料的成型工艺包括手糊成型、模压成型、缠绕成型、拉挤成型、热压罐成型、树脂传递模塑等。复合材料结构件一直存在的问题是生产效率较低,限制了产量。其原因是成型过程中的手工铺层过程是劳动密集型工作,需要耗费大量时间和人力成本。另外,通常针对普通热固性复合材料的热压罐工艺需要较长固化和后处理时间^[4-7]。在此背景下,研究者们将目光转向了自动化技术,例如自动铺带(Automated tape laying, ATL)技术和自动铺丝(Automated fiber placement, AFP)技术。

自动铺放技术概述

自动铺放技术是实现复合材料原位固结成型的最具前途工艺之一,如今已应用于单向预浸丝束或预浸带的生产。ATL 通常使用最大 304.8mm 的宽预浸带,而 AFP 使用通常在 6.35~25.4mm 之间的窄预浸带。从这个意义上讲,ATL 在提高材料沉积速率方面更有优势。然而,AFP 机器通常与可同时处理多束(8~32束)预浸丝束的机头结合使用,这有效提高了其铺放效率^[8]。AFP 机器能够根据模具表面的形状,实现预浸料连续可变角度的放置。此外,还能对丝束进行切割,以适应制造边界的变化,能够保证复杂结构的加工要求^[9-11]。由此 AFP 机器可生产不同形状的复合材料制件,例如简单的

平面层压板,弯曲度较小的面板和三维表面^[12],实际示例包括飞机机翼蒙皮、框架、纵梁和机翼盒,机身结构和深潜水器等^[13-14]。

典型的 AFP 工艺过程如图 1 所示^[15]。将单向预浸带向下输送到先前放置的铺层(基材)的上表面。然后当预浸带和基材的表面接近咬合点(进入的预浸带与基材接触的位置)时,使用热源对其进行加热,通过压紧装置(通常为压辊)将熔化的表面相互压紧,实现粘结^[16]。尽管自动铺放技术是一种很有前途的技术,但在将其完全商业化之前,仍有许多挑战需要克服。除了需要实现工业要求的沉积速率与热压罐工艺相当的机械性能外^[17],使用半结晶热塑性塑料时,该工艺还必须达到所需的结晶度,消除或减少可能导致分层的残余应力^[18],并解决孔隙度高于 1% 阈值的问题^[19-20]。

自动铺放技术材料体系

对于连续纤维增强热塑性树脂基复合材料,其增强体通常为碳纤维(CF),碳纤维的质量对连续纤维增强热塑性树脂基复合材料的性能有着重要影响。碳纤维是指含碳量大于 90% 的纤维材料,其中石墨纤维含碳量高达 99% 以上。碳纤维的分子结构属于乱层石墨结构。碳纤维具有强度高、重量轻、刚度好、导电性好、热膨胀小、导热系数高、耐腐蚀等优点,是先进复合材料中增强材料的首选。按照前驱体的不同,可将其分

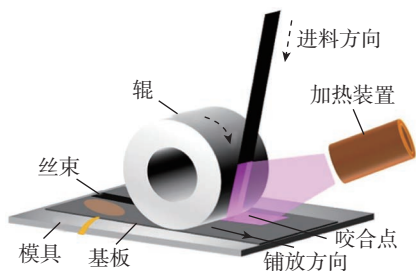


图 1 AFP 工艺过程
Fig.1 AFP process

为聚丙烯腈(PAN)基、沥青基和粘胶基碳纤维。其中 PAN 基碳纤维在目前的生产和应用中占据主要地位。日本东丽公司生产的 PAN 基碳纤维产量和质量处于世界领先水平,其典型产品如 700 级的 T700SC 碳纤维,拉伸强度为 4900MPa,拉伸弹性模量为 230GPa; 800 级的 T800H 碳纤维拉伸强度为 5490MPa,拉伸弹性模量为 294GPa^[21]。国产碳纤维方面,2015 年前后国内已有多家碳纤维企业的 T800H 级碳纤维的力学性能达到了东丽 T800H 碳纤维的水平^[22]。

为满足航空航天、军工产业对先进结构材料日益增长的需要,连续纤维增强热塑性树脂基复合材料得到了研究者和工业界的广泛关注。其优势包括^[23-26]:

- (1) 刚而韧的线性高分子链赋予其优异的抗冲击性能和抗损伤性能。
- (2) 使用温度区间从 -40℃ 到熔点以下 50℃ 左右。
- (3) 复合材料制备过程仅发生物理反应,成型周期短。
- (4) 可以二次加工,多次成型精确控制尺寸及内部结构。
- (5) 常温空气气氛储存即可。
- (6) 绿色环保,可回收再利用。

与传统的热固性树脂基复合材料的区别在于,热塑性树脂基复合材料的基体为热塑性树脂。高性能热塑性树脂的特点是其高玻璃化转变温度(T_g),这赋予了它们在较高温度下仍然具有良好机械性能的特点。聚醚醚酮(Polyether-etherketone, PEEK)是一类常用的高性能热塑性树脂^[27-29],具有许多优点,如非常高的韧性和耐损伤性、优异的耐环境性、良好的抗蠕变和抗疲劳性,以及非常好的耐磨性。因此,碳纤维和聚醚醚酮基体的组合——碳纤维/聚醚醚酮复合材料,被广泛应用于航空航天工业的高温应用。如芳香族聚合物复合材料(APC-2)是 Cytec 公司常用的碳纤维/聚醚醚

酮预浸带的商品名^[18]。AS4/APC-2 被广泛使用,而其他 APC-2 版本的研究较少,如 IM6/APC-2^[30-31]和 IM7/APC-2^[32-33],这些带/丝束的宽度较窄,为 6.35mm。此外,由 TenCate 公司制备的 AS4/PEEK 带也得到了应用^[34]。目前,有关自动铺放的大量工作涉及碳纤维/聚醚醚酮预浸带。

对于连续纤维增强热塑性树脂基复合材料,通常在加工过程中需要高温条件使树脂熔融,这涉及到热和应力在界面上的作用^[35]。这类材料具有在不需热压罐中固化的情况下就地快速处理的潜力。将连续纤维增强热塑性树脂基复合材料的熔融加工与自动铺放工艺相结合,使得复合材料部件具有在现场粘合成型的可能性。然而,与热固性树脂不同的是,热塑性树脂在自动铺放过程中需要进行原位固结。由于以 PEEK 为代表的热塑性树脂在熔融状态下具有高黏度,在制造过程中要求高的加工压力和温度,使得它们的制造非常昂贵,这是该类材料一个主要的缺点^[35-36]。此外,由于加热和冷却速度非常快,压力施加的时间较之热压罐成型非常短,获得具备与热压罐工艺同一水平机械性能的材料是具有挑战性的^[37-38]。

自动铺放技术国内外研究和应用现状

关于自动铺放技术的科学研究方面,对 2017—2021 年国内外连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放技术相关研究进行了分类总结,如表 1 所示。国外方面,相关研究主要集中于德国、英国等,自动铺放材料体系包括碳纤维/尼龙 6、碳纤维/聚醚醚酮等,研究重点不仅包括工艺优化,还包括对温度场等关键工艺参数的模拟计算。国内方面,自动铺放材料体系包括玻璃纤维/聚丙烯、碳纤维/聚苯硫醚、碳纤维/聚

表1 近年来连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放技术相关研究总结

Table 1 Recent studies on automated fiber placement technology on continuous fiber reinforced thermo plastic resin matrix composites

材料体系	研究内容	主要结论	时间	国家	期刊 / 会议	作者
热塑性复合材料	模拟计算	热气体温度对热塑性复合材料的热场和热流密度有重要影响, 此外, 较小的热气体温度有利于获得均匀的热场; 热梯度随着热压温度的升高而增大, 影响热塑性复合材料的最终力学性能	2017	中国	ICCM	Wang 等 ^[39]
		建立了在自动铺放过程中加热模具和热塑性预浸料带的非平稳过程, 模具的温度会影响预浸料的温度, 从而影响基体的结晶程度	2018	俄罗斯	MATEC	Anoshkin 等 ^[43]
		优化层合板设计的计算机辅助工程方法, 提出了一种从任意有限元层合板优化结果导出带程的新方法, 并应用于虚拟演示	2019	德国	International Conference on Engineering Design	Voelkl 等 ^[49]
	设备研究	红外加热动态恒温控制系统能够较好地满足热塑性复合材料自动铺放过程中对加热温度的要求, 实现原位固结过程中预浸料恒温加热	2019	中国	材料工程	宋清华等 ^[50]
		研制了一种用热塑性复合材料带压成型的新型铺带装置。该设备的接触区域、压制区域和冷却区域比只有辊压的设备更大	2021	日本	J MATER ENG PERFORM	Tatsuno 等 ^[59]
工艺优化	对碳纤维复合材料的光学特性、层间接触热阻、LTPP 过程中的光学模型和温度场模型进行研究 研究雷击保护材料与 AFP 技术和氙灯的自动化集成, 研究了交叉铺层设计对电导率的影响	2019	中国	学位论文	朱文凯 ^[51]	
		2020	德国	ITHEC	Nguyen 等 ^[53]	
玻璃纤维 / 聚丙烯	工艺优化	分析了制品性能随各个工艺参数的变化趋势, 并对铺放工艺进行优化, 得到最优参数组合	2017	中国	塑料	咸梦蝶等 ^[40]
		热塑性复合材料 AFP 最优工艺参数组合: 热气温度为 385℃、热压辊压力为 0.3MPa、冷压辊压力为 1.1MPa	2018	中国	复合材料学报	宋清华等 ^[46]
	材料体系	铺层树脂基体的结晶度随冷却速率的增大而依次减小; 自动铺放成型试验件的压缩强度及层间剪切强度随着铺层结晶度的增大基本呈增大趋势, 而冲击强度与铺层结晶度的变化趋势完全相反	2018	中国	材料工程	宋清华等 ^[44]
碳纤维 / 聚醚醚酮	工艺优化	确定碳纤维 / 聚醚醚酮复合材料铺层和原位固结的最佳工艺条件	2018	西班牙	COMPOS PART A	Martin 等 ^[41]
		优化的热塑性预浸纱制备工艺参数: 浸渍温度为 360~370℃, 辊压温度为 330℃, 压辊间隙为 0.1mm, 牵引速率为 15~20mm/s, 张力为 7N; 扫描电镜结果显示树脂与纤维界面结合紧密, 复合材料的孔隙率可降低至 1.8%, 复合材料层间剪切强度为 73.43MPa, 纵向拉伸强度达 1.71GPa	2018	中国	航空学报	陈浩然等 ^[45]
	模拟计算	给出了一个冲压成形角的弹簧入角计算, 该模拟成功地计算了零件和刀具在冷却过程中的温度、变形和结晶度	2018	德国	SAMPE	Fricke 等 ^[42]
		研究热塑性纤维放置过程中温度场的变化; 根据传热理论建立了热塑性纤维放置过程中的二维传热模型, 确定了传热模型的相关边界条件; 当模具初始温度设置为 150℃时, 可以以低速度、高温度快速铺层, 更有利于压辊作用下的层间熔化	2020	中国	Materials	Cao 等 ^[54]
		对机器人铺放装备结构及控制系统进行了设计改进, 对曲率半径与长径比变化的热塑性复合材料圆柱壳构件进行了屈曲与强度分析, 对热塑性复合材料铺放过程中首层及铺层温度场进行了仿真分析	2020	中国	学位论文	赵志远 ^[56]
提出了一种闪光灯加热下 ATP 的预测建模方法, 使研究操作参数对瞬态温度场的作用成为可能	2021	英国	COMPOS PART A	Danezis 等 ^[57]		
设备研究	扩展碳纤维 / 聚醚醚酮预浸带的宽度	2020	爱尔兰	Materials & Design	Clancy 等 ^[52]	
碳纤维 / 聚苯硫醚	工艺优化	总结了不同工艺条件对结晶的影响及控制方法	2020	中国	纤维复合材料	杨洋等 ^[55]
碳纤维 / 尼龙 6	工艺优化	显示了工艺和坯料几何特性之间的依赖关系, 对基于红外光谱的复合材料坯料铺带的空间分辨温度数据进行了评估	2019	德国	Procedia CIRP	Schulz 等 ^[47]

材料体系	研究内容	主要结论	时间	国家	期刊 / 会议	作者
碳纤维 / 尼龙 6	工艺优化	研究了未固结热塑 PA6/CF 复合材料的超声点焊成形工艺	2019	德国	International Journal of Material Forming	Schug 等 ^[48]
碳纤维 / 尼龙 12	材料体系	与热固性复合材料 IM7/8552 相比, ATP 制备的热塑性塑料具有较高的孔洞量; 另一方面, 使用 ATP 制造在基质内的纤维分布和纤维错位方面都有改善	2021	沙特阿拉伯	Polymers	Sebaey 等 ^[58]

醚醚酮等, 研究重点主要为工艺优化和材料体系的研究, 模拟计算的相关研究也在近年来不断出现。目前国内外高度重视自动铺放技术的研究工作, 从该领域的研究论文上看, 国内外形成了各具特色的研究方向。各国研究者都在不断加大自动铺放技术的研究力度, 力图提升相应技术水平, 保持技术领先优势, 这也带动了与该领域有关材料、设备等方面研究的发展。

自动铺放技术的应用领域方面, 国外在热固性复合材料自动铺放技术方面的研究已趋成熟, 目前正致力于研究热塑性复合材料自动铺放技术。美国国防高级研究计划局 (DARPA) 30 年前在先进潜水艇复合材料成型方面率先应用热塑性复合材料自动铺放技术, 并提出该项技术将面临铺放成型所需的高质量、低成本预浸料、加工效率及成型构件性能等多方面挑战。美国 ADC 公司、航空主结构热塑性材料组织 (TAPAS)、欧盟 “Clean Sky” 项目等均开展了针对热塑性复合材料自动

铺放技术在航空领域应用的相关研究。在 2017 年巴黎航展上, 法国 “热塑性弓形盒” 项目展出了一个全尺寸热塑性机身验证件 (图 2), 并针对下一代单通道飞机使用高性能热塑性复合材料进行内部评估。验证件具备主要机身结构的所有典型特性, 如薄蒙皮、闪电防护、桁条和框结构, 因而能够在真实工业环境下对复合材料制造技术进行详细评估。其中, 机身验证件蒙皮通过自动铺放技术制造^[60]。

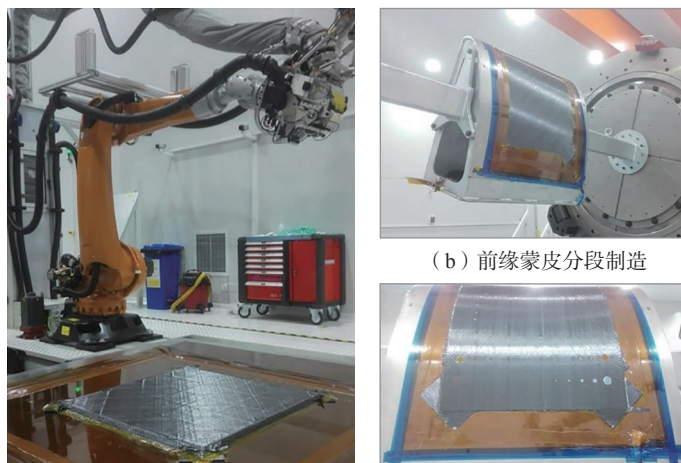
国内在相关制造技术及体系的积累建立方面, 与国外存在一定差距。目前国内在制造工艺方面, 上海飞机制造有限公司选取机翼典型前缘蒙皮结构, 完成了类似金字塔式的工艺关键技术攻关。主要研究内容包括大厚度平板试验件铺放、前缘蒙皮典型结构铺放、缺陷可检性研究 (图 3)。在制造装备方面,

南京航空航天大学在国内率先开展了连续纤维增强热塑性复合材料热气加热自动铺放技术及装备的研究 (图 4 (a)), 但因该设备热气加热温度低, 只能用于成型中低性能热塑性复合材料^[61-62]; 中国科学院海西研究院在国内率先完成单丝窄带激光加热自动铺放平台的搭建与调试 (图 4 (b)), 可开展系列单元技术的模拟与试验验证, 可进行板材和小曲面样品的激光加热自动铺放成型^[63]。

航空工业复合材料技术中心最新引进的法国 Coriolis 公司机器人 AFP 设备配有先进的激光加热系统, 最高加热功率可达 6kW, 采用热成像摄像机温度检测仪对加热温度的测量范围为 0~700℃, 温度测量精度可达 0.1℃, 可应用于热塑性复合材料 AFP 工艺研究、热塑性预浸带 AFP 工艺适应性验证和热塑性复合材料自动铺放成型。



图 2 全尺寸热塑性复合材料机身验证件
Fig.2 Full-size thermoplastic composite body validation piece



(a) 大厚度试验件制造 (b) 前缘蒙皮分段制造 (c) 缺陷评价

图 3 连续纤维增强热塑性复合材料自动铺放工艺
Fig.3 Automatic placement process of continuous fiber reinforced thermoplastic composites

基于连续纤维增强热塑性树脂基复合材料的自动铺放后处理技术

为提高 AFP 加工的 CF/PEEK 复合材料表面质量, Shadmehri 等^[64-65]采用了一种基于 AFP 机器的复合材料表面后处理(Repass)方法,研究了后处理次数对材料表面光洁度的影响,并与热压罐成型的复合材料表面情况进行对比。这种后处理指的是在不添加新材料的情况下,通过 AFP 机器头向层合板施加热量和压力。使用表面粗糙度测试仪测量了不同次数后处理和热压罐处理的样品最上层的表面粗糙度。研究结果表明,采用后处理可显著提高 CF/PEEK 复合材料的表面光洁度。然而,从图 5 (a)中可以看出,与热压

罐处理的样品相比,即使经过两次后处理的样品也有一个更粗糙的表面。此外,从金相照片(图 5 (b))可以明显地看出,后处理有效地改变了纤维的分布,使相邻层的分离线更加清晰可见,更容易区分。

Chanteli 等^[66]研究了激光后处理对 CF/PEEK 复合材料表面质量和力学性能的影响。对于使用自动铺放技术进行单向铺层的 CF/PEEK 复合材料,在铺层完成后,使用激光(500W)对复合材料表面进行后处理,同时对比了采用热压罐工艺制备的复合材料的对应性能。从表面粗糙度来看,如图 6 所示,激光后处理降低了 CF/PEEK 复合材料的表面粗糙度,对其在表面光洁度有一定要求的相关领域的应用起到了积极作用。对于不同的后处理次数,一次激光后

处理明显改善了表面质量,两次处理略微改善了表面质量。另一方面,对不同处理的 CF/PEEK 复合材料层合板的层间剪切强度(ILSS)进行了测试,结果显示,后处理对 ILSS 值的影响不显著。图 6 显示了自动铺放制造的层合板的失效模式。具体来说,无后处理样品显示出分层,以及纤维破坏和变形,相比之下,所有激光后处理过的试样均表现出有微小裂纹和小的分层失效。此外,上述试样的分层破坏主要发生在底层,边缘出现小裂纹。可见,相对于无后处理层板,后处理使层板脆化。无后处理层板在破坏前表现出明显的塑性变形,而在后处理试样中则未出现此类现象。

结论

连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自诞生之初就引起了航空工业的重视,该类材料优异的综合性能是其随后数十年不断发展和应用的巨大动力。复合材料自动铺放技术能够实现机身、机翼等大型结构件的自动铺叠成型,对于制造效率、精度及稳定性的提升起到积极作用。而当连续纤维增强热塑性树脂基复合材料与自动铺放技术相结合时,可以实现构件在加工过程中的原位成型,不需要再使用热压罐,因此缩短了构件的成型周期,提高了生产效率,达到了降本增效的目的。目前国内该

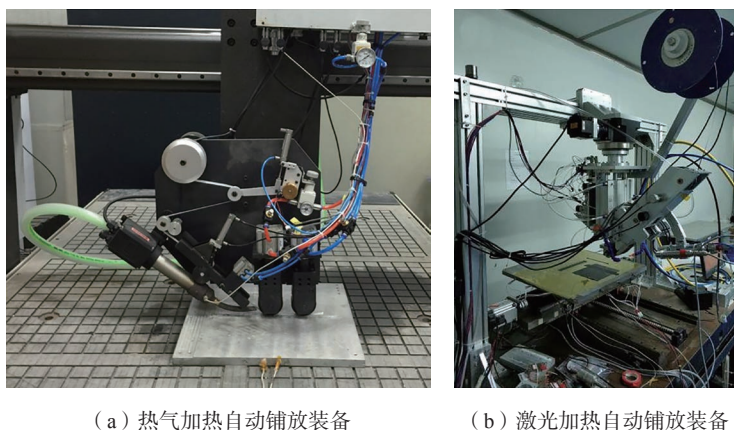


图 4 热塑性复合材料自动铺放装备

Fig.4 Automatic placement equipment for thermoplastic composite materials

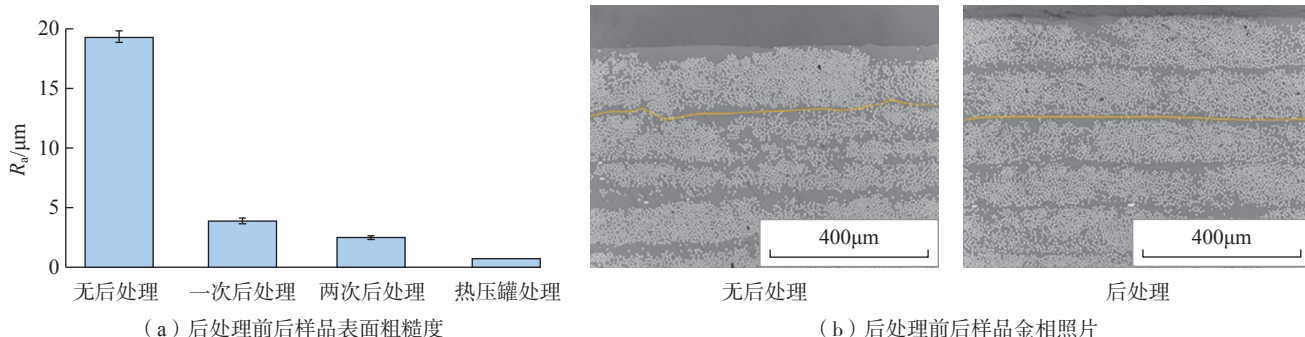


图 5 使用 AFP 机器后处理前后样品的表面粗糙度

Fig.5 Surface roughness of sample before and after treatment with AFP machine

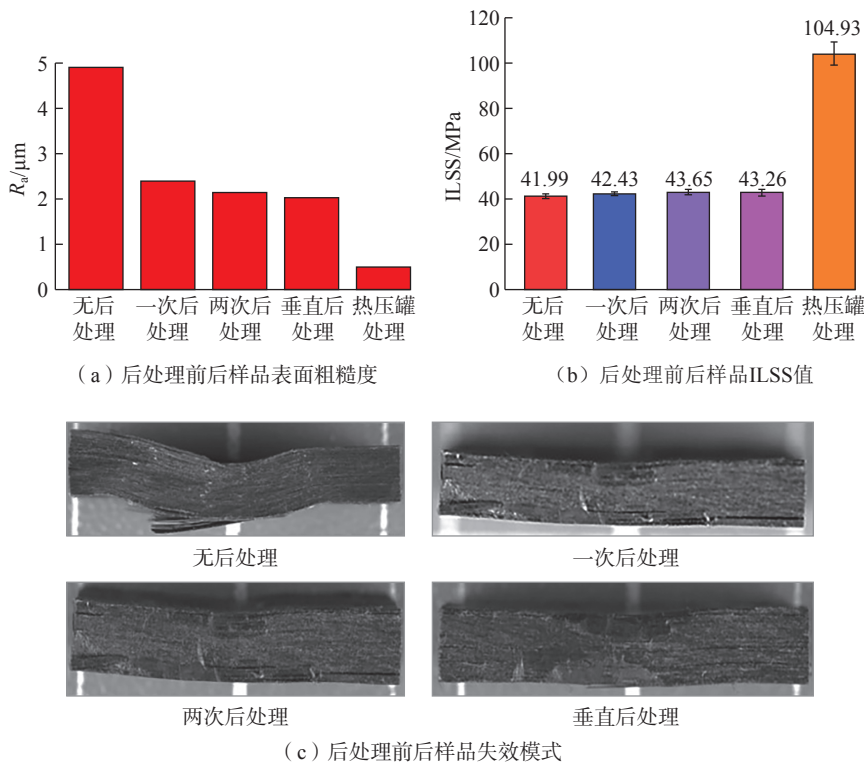


图6 激光后处理前后样品的表面粗糙度

Fig.6 Surface roughness of the sample before and after laser post-treatment

领域的起步较晚,与国外存在一定的技术差距。从未来的发展趋势来看,以自动铺放设备一体化技术和连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放后处理技术为代表的相关研究前沿热点是下一步研究的重要方向。具体来看,在设备方面,当前需要提升设备的可靠性和一体化程度,未来应加强自动铺放设备的模块化设计,提高其对不同种类热塑性树脂基复合材料的适应能力。在材料方面,当前存在的主要问题之一是自动铺放成型的复合材料表面粗糙起伏、质量不稳定,未来该问题的解决方案,一是提高预浸料树脂分布及浸渍程度的均匀性,二是开展自动铺放后处理技术增加材料表面的光洁度。在国内科研团队的不断努力下,相信在不远的将来可以一定程度弥补国内相关领域与国外的差距,满足科研院所及下游企业的需求。

参考文献

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
 DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

[2] YE L, LU M, MAI Y W. Thermal de-consolidation of thermoplastic matrix composites—I. Growth of voids[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(16): 2121-2130.

[3] VAIDYA U K, CHAWLA K K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. International Materials Reviews, 2008, 53(4): 185-218.

[4] 李义, 叶宏军, 翟全胜. 纵横加筋碳纤维复合材料壁板整体成型技术研究[J]. 科技与创新, 2018(4): 46-48.

LI Yi, YE Hongjun, ZHAI Quansheng. Study on integral forming technology of carbon fiber reinforced composite panel with vertical and horizontal stiffener[J]. Science and Technology & Innovation, 2018(4): 46-48.

[5] YASSIN K, HOJJATI M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying

methods: A review[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(12): 1676-1725.

[6] 嵇培军, 王国勇, 赵亮, 等. 树脂基结构复合材料的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(4): 1-5.

JI Peijun, WANG Guoyong, ZHAO Liang, et al. Developments of resin matrix structural composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(4): 1-5.

[7] 汪东, 李丽英, 柯红军, 等. 高性能可回收环氧树脂及其复合材料的制备与性能研究[J]. 高分子学报, 2020, 51(3): 90-97.

WANG Dong, LI Liying, KE Hongjun, et al. Preparation and properties of recyclable high-performance epoxy resins and composites[J]. Acta Polymerica Sinica, 2020, 51(3): 90-97.

[8] RIZZOLO R H, WALCZYK D F. Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2016, 29(11): 1480-1497.

[9] HORMANN P, STELZL D, LICHTINGER R, et al. On the numerical prediction of radiative heat transfer for thermoset automated fiber placement[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 67: 282-288.

[10] HAN Z, SUN S, FU H, et al. Multi-scale low-entropy method for optimizing the processing parameters during automated fiber placement[J]. Materials, 2017, 10(9): 1024-1041.

[11] FRKETIC J, DICKENS T, RAMAKRISHNAN S. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2017, 14: 69-86.

[12] TIERNEY J, GILLESPIE JR J W. Modeling of heat transfer and void dynamics for the thermoplastic composite tow-placement process[J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37(19): 1745-1768.

[13] PITCHUMANI R, RANGANATHAN S, DON R C, et al. Analysis of transport phenomena governing interfacial bonding and void dynamics during thermoplastic tow-placement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(9): 1883-1897.

[14] GHASEMI NEJHAD M N, COPE R D, GUCERI S I. Thermal analysis of in-situ thermoplastic composite tape laying[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1991, 4(1): 20-45.

- [15] SUN S, HAN Z, FU H, et al. Defect characteristics and online detection techniques during manufacturing of FRPs using automated fiber placement: A review[J]. *Polymers*, 2020, 12(6): 1337–1358.
- [16] STOKES G C M, COMPSTON P, MATUSZYK T I, et al. Thermal modelling of the laser-assisted thermoplastic tape placement process[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2015, 28(10): 1445–1462.
- [17] SONMEZ F O, AKBULUT M. Process optimization of tape placement for thermoplastic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(9): 2013–2023.
- [18] SARRAZIN H, SPRINGER G S. Thermochemical and mechanical aspects of composite tape laying[J]. *Journal of Composite Materials*, 1995, 29(14): 1908–1943.
- [19] VAN HOA S, DUC HOANG M, SIMPSON J. Manufacturing procedure to make flat thermoplastic composite laminates by automated fibre placement and their mechanical properties[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2017, 30(12): 1693–1712.
- [20] 徐东明, 李中华, 刘兴宇, 等. 民用飞机复合材料制件孔隙率验收标准及检测实施[J]. *科技信息*, 2013(18): 341–342.
- XU Dongming, LI Zhonghua, LIU Xingyu, et al. Porosity acceptance standard and inspection implementation of composite material parts for civil aircraft[J]. *Science & Technology Information*, 2013(18): 341–342.
- [21] 益小苏, 杜善义, 张立同. 复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- YI Xiaosu, DU Shanyi, ZHANG Litong. *Composite materials handbook*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [22] 李书乡, 马全胜, 张顺. 中国高性能碳纤维产业的创新发展[J]. *科技导报*, 2018, 36(19): 73–80.
- LI Shuxiang, MA Quansheng, ZHANG Shun. Development of high performance carbon fiber industry in China[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(19): 73–80.
- [23] STAVROV D, BERSEE H E N. Resistance welding of thermoplastic composites—an overview[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(1): 39–54.
- [24] TANG H, CHEN K F, LI X N, et al. Environment-friendly, flame retardant thermoplastic elastomer-magnesium hydroxide composites[J]. *Functional Materials Letters*, 2017, 10(4): 1750042.
- [25] LI H, ENGLUND K. Recycling of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite wastes from the aerospace industry[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 51(9): 1265–1273.
- [26] 李学宽, 肇研, 王凯, 等. 热熔法制备连续纤维增强热塑性预浸料的浸渍模型和研究进展[J]. *航空制造技术*, 2018, 58(14): 74–78, 90.
- LI Xuekuan, ZHAO Yan, WANG Kai, et al. Impregnation model and research progress of continuous fiber reinforced thermoplastic prepregs prepared via hot melting method[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 58(14): 74–78, 90.
- [27] CHEN J, WANG K, DONG A, et al. A comprehensive study on controlling the porosity of CCF300/PEEK composites by optimizing the impregnation parameters[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(10): 3765–3779.
- [28] LIU H, ZHAO Y, LI N, et al. Enhanced interfacial strength of carbon fiber/PEEK composites using a facile approach via PEI&ZIF-67 synergistic modification[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(6): 6289–6300.
- [29] 肇研, 刘寒松. 连续纤维增强高性能热塑性树脂基复合材料的制备与应用[J]. *材料工程*, 2020, 48(8): 49–61.
- ZHAO Yan, LIU Hansong. Preparation and application of continuous fiber reinforced high-performance thermoplastic composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(8): 49–61.
- [30] CANTWELL W J, DAVIES P, KAUSCH H H. The effect of cooling rate on deformation and fracture in IM6/PEEK composites[J]. *Composite Structures*, 1990, 14(2): 151–171.
- [31] SEIDENSTICKER D G, KIM K S, HAHN H T, et al. Compressive behavior of a thermoplastic composite (GR/PEEK)[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1990, 3(3): 233–251.
- [32] ROSSELLI F, SANTARE M H. Comparison of the short beam shear(SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(6): 587–594.
- [33] ROSSELLI F, SANTARE M H, GÜCERI S I. Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(12): 1023–1033.
- [34] JENSEN B J, KINNEY M C, CANO R J, et al. Materials for heated head automated thermoplastic tape placement[C]//SAMPE. International SAMPE Symposium: 2012. Baltimore: CRC Press, 2012.
- [35] YOUSEFPOUR A, HOJJATI M, IMMARIGEON J P. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2004, 17(4): 303–341.
- [36] EIMANLOU M, HOJJATI M. Automated fiber placement of thermoplastic composites using fiber laser[C]//Automated Composites Manufacturing-Third International Symposium. Montreal: ACM Press, 2017.
- [37] RAY D, COMER A J, LYONS J, et al. Fracture toughness of carbon fiber/polyether ether ketone composites manufactured by autoclave and laser-assisted automated tape placement[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(11): 41643
- [38] COMER A J, RAY D, OBANDE W O, et al. Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 69: 10–20.
- [39] WANG C, HU Z, YUE G, et al. Hot gas temperature effect on thermoplastic composites thermal using the automated tape laying[C]//The 21st International Conference on Composite Materials. Xi'an: ICCM, 2017.
- [40] 戚梦蝶, 闫宝瑞, 信春玲, 等. 热塑性复合材料自动铺放成型工艺[J]. *塑料*, 2017, 46(5): 66–68, 80.
- XIAN Mengdie, YAN Baorui, XIN Chunling, et al. Processing of automatic placement of thermoplastic composite[J]. *Plastics*, 2017, 46(5): 66–68, 80.
- [41] MARTÍN M I, RODRÍGUEZ-LENCE F, GÜEMES A, et al. On the determination of thermal degradation effects and detection techniques for thermoplastic composites obtained by automatic lamination[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 111: 23–32.
- [42] FRICKE D, DOLL G, NOWOTNY S, et al. Manufacturing simulation of the in-situ tape laying process for thermoplastic carbon fiber reinforced tapes[C]//SAMPE. Long Beach: 2018. Baltimore: CRC Press, 2018.
- [43] ANOSHKIN A N, PISAREV P V, KIROVA Y S. Numerical modeling of automated tape placement process of unidirectional thermoplastic[C]//MATEC Web of Conferences. EDP Science 2018, 224: 01080.

- [44] 宋清华, 肖军, 文立伟, 等. 自动铺放成型热塑性复合材料的非等温结晶动力学研究[J]. 材料工程, 2018, 46(4): 120-126.
- SONG Qinghua, XIAO Jun, WEN Liwei, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of thermoplastic composite for automated fiber placement[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(4): 120-126.
- [45] 陈浩然, 李勇, 还大军, 等. T700/PEEK 热塑性自动铺放预浸纱制备质量控制及性能研究[J]. 航空学报, 2018, 39(6): 228-237.
- CHEN Haoran, LI Yong, HUAN Dajun, et al. Quality control and mechanical properties of T700/PEEK thermoplastic prepreg for AFP[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(6): 228-237.
- [46] 宋清华, 刘卫平, 肖军, 等. 热塑性复合材料自动铺放工艺参数分析与优化[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1149-1157.
- SONG Qinghua, LIU Weiping, XIAO Jun, et al. Analysis and optimization of the processing parameters for automated fiber placement of thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(5): 1149-1157.
- [47] SCHULZ M, JANSSEN H, BRECHER C. A digital shadow for the infrared-based tape laying process of tailored blanks out of thermoplastic unidirectional tape[J]. Procedia CIRP, 2019, 85: 224-229.
- [48] SCHUG A, RINKER D, HINTERHOELZL R, et al. Evaluating the potential of forming spot-welded layouts out of fibre reinforced thermoplastic tape without previous consolidation[J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12(2): 279-293.
- [49] VOELKL H, KIEBKALT A, WARTZACK S. Design for composites: Derivation of manufacturable geometries for unidirectional tape laying[C]//International Conference on Engineering Design. Cambridge: Cambridge University Press, 2019: 2687-2696.
- [50] 宋清华, 刘卫平, 肖军, 等. 热塑性复合材料自动铺放过程中红外加热技术研究[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 77-83.
- SONG Qinghua, LIU Weiping, XIAO Jun, et al. Infrared heating system based on automated fiber placement for thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 77-83.
- [51] 朱文凯. 热塑性复合材料激光辅助加热自动铺放过程中温度场研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- ZHU Wenkai. Study on thermal modelling of the laser assisted thermoplastic tape placement process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [52] CLANCY G, PEETERS D, O'HIGGINS R M, et al. In-line variable spreading of carbon fibre/thermoplastic pre-preg tapes for application in automatic tape placement[J]. Materials & Design, 2020, 194: 108967.
- [53] NGUYEN D C, KOLBE A, BÄNS C. Application of lightning strike protection on thermoplastic structures by automated fiber placement[C]// ITHEC. 2020. Bremen: ITHEC, 2020.
- [54] CAO Z, DONG M, LIU K, et al. Temperature field in the heat transfer process of PEEK thermoplastic composite fiber placement[J]. Materials, 2020, 13(19): 4417-4430.
- [55] 杨洋, 徐捷, 原崇新, 等. 连续纤维增强聚苯硫醚预浸料自动铺丝工艺与热塑性复合材料性能研究[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(1): 3-9.
- YANG Yang, XU Jie, YUAN Chongxin, et al. Study on automatic fiber placement technology with continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide prepreg and characterization of the thermoplastic composites[J]. Fiber Composites, 2020, 37(1): 3-9.
- [56] 赵志远. 基于机器人的热塑性复合材料铺放装备及工艺仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHAO Zhiyuan. Research on robot-based placement equipment and process simulation of thermoplastic composite[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2020.
- [57] DANEZIS A, WILLIAMS D, EDWARDS M, et al. Heat transfer modelling of flashlamp heating for automated tape placement of thermoplastic composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021: 106381.
- [58] SEBAEY T A, BOUHRARA M, O'DOWD N. Fibre alignment and void assessment in thermoplastic carbon fibre reinforced polymers manufactured by automated tape placement[J]. Polymers, 2021, 13(3): 473-484.
- [59] TATSUNO D, YONEYAMA T, SATAKE R, et al. Belt-press tape forming of carbon-fiber-reinforced thermoplastic[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(1): 357-366.
- [60] 热塑性复合材料单通道飞机机身[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(4): 74.
- Thermoplastic composite single-channel aircraft fuselage[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2017, 42(4): 74.
- [61] 宋清华, 肖军, 文立伟, 等. 热塑性复合材料自动纤维铺放装备技术[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1214-1222.
- SONG Qinghua, XIAO Jun, WEN Liwei, et al. Automated fiber placement system technology for thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1214-1222.
- [62] 李丹. 创新复材自动化制造解决方案——走进南航复合材料工程自动化技术研发中心[J]. 航空制造技术, 2020, 60(3): 84-85.
- LI Dan. Innovative automated manufacturing solutions for composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 60(3): 84-85.
- [63] 陈吉平, 李岩, 刘卫平, 等. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放原位成型技术的航空发展现状[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4): 784-794.
- CHEN Jiping, LI Yan, LIU Weiping, et al. Development of AFP in situ consolidation technology on continuous fiber reinforced thermoplastic matrix composites in aviation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(4): 784-794.
- [64] SHADMEHRI F, HOA S V, FORTIN-SIMPSON J, et al. Effect of in situ treatment on the quality of flat thermoplastic composite plates made by automated fiber placement (AFP)[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2018, 4(2): 41-47.
- [65] HOA S V, SHADMEHRI F, SIMPSON J F, et al. Effect of manufacturing parameters on the quality of thermoplastic composites made by automated fiber placement (AFP)[C]//21st International Conference on Composite Materials. Xi'an: ICCM, 2017.
- [66] CHANTELI A, BANDARU A K, PEETERS D, et al. Influence of repass treatment on carbon fibre-reinforced PEEK composites manufactured using laser-assisted automatic tape placement[J]. Composite Structures, 2020, 248: 112539.

通讯作者: 肇研, 教授, 博士, 研究方向为先进树脂基复合材料、碳纤维微观界面、树脂基功能复合材料及纳米复合材料。

Advance in Automated Fiber Placement Technology on Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Resin Matrix Composites

WANG Kai, LIU Hansong, ZHAO Yan
(Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Continuous fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites have unique advantages such as excellent mechanical properties, wide operating temperature range, possible for secondary processing, etc., which have made great development in aviation and other fields. In order to further improve the production and processing efficiency of this kind of material, the automatic processing technology represented by the automated fiber placement technology has become the current research hotspot. Based on the introduction of the concept of automated fiber placement technology and the relevant material systems of continuous fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites, this paper summarized the research and application status of automated fiber placement technology at home and abroad, and focused on the current research hotspots and research progress of automated fiber placement technology.

Keywords: Continuous fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites; Carbon fiber; Poly-ether-ether-ketone; Automated fiber placement technology; Repass treatment of automated fiber placement

(责编 七七)

(上接第 40 页)

Load-Bearing Performance and Structure Optimization for Kagome Grid Satellite Cylinder Made by Filament Winding

SUN Shouzheng¹, SUN Tianfeng², CHEN Weiqiang², FAN Dongxing¹, HAN Zhenyu¹, FU Hongya¹
(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Satellite Manufacturing Factory Co., Ltd., China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] Cylinder is the main bearing component of a satellite, which plays a major role in the load-bearing performance of the whole structure. Due to lightweight and high strength, Kagome grid satellite cylinder made by filament winding is commonly used in satellite cylinder. However, the structural parameters are coupled with each other in the design of the grid structure, and the effect of the parameters on the load-bearing performance of the cylinder is unclear. In this paper, the structure optimization of the Kagome grid satellite cylinder is studied. The finite element method is used to analyze the load-bearing performance of the cylinder under the working conditions for the satellite. Furthermore, the relative independence design conception regarding spiral rib and ring rib is put forward. Combining the parametric modeling strategy, the effect of each structural parameter on the load-bearing performance is obtained. With the load-bearing performance and mass as the main optimization objectives, the structural parameters of the cylinder are optimized using the multi-objective genetic algorithm. Also, the strength and buckling performance of the optimal structure are analyzed. The results show that the mass of the optimal structural is reduced by 21.2%, and the mechanical properties meet the specific working conditions of the satellite. Finally, the self-developed desktop winding machine is used to wind the cylinder.

Keywords: Satellite cylinder; Grid structure; Filament winding; Structural optimization; Load-bearing performance

(责编 七七)