

激光传感技术在预浸料过程控制中的应用

Laser Sensor Technology Application in Process Control of Carbon Fiber Prepreg

上海晋飞新材料有限公司 王东霞 朱家强 王 滨
上海东华大学纺织学院 李 炜

[摘要] 开发了激光传感控制技术,通过光影像学原理,实现2D检测,将图像处理转换为胶量数据,来动态监测含胶量的分布,再通过信号反馈自动调节滚筒的压力来保证预浸料厚度一致性和胶量的均匀性,此技术保证了纤维克重与胶含量的在幅宽方向和长度方向的一致性,在提高品质的同时也提高了生产效率,保证了预浸料品质的稳定,实现技术革新。

关键词: 预浸料 碳纤维 激光传感 过程控制

[ABSTRACT] The process control method is established and the laser sensor monitor system is developed to control resin ration. Using the laser sensor on time to get the image of prepreg and process the image, the manufacture parameter is adjusted quickly. If the resin ratio is out of the specification, the signal will be transferred to the PC to adjust the pressure of the equipment. With the help of the laser sensor in process control system, the quality of the prepreg can be ensured and the productivity is improved.

Keywords: Prepreg Carbon fiber Laser sensor Process control

随着新能源汽车产业、航空产业的迅猛发展,一方面碳纤维作为新型材料在不断推广与应用,另一方面应用行业对产品的质量要求越来越高。因此,作为中间材料的预浸料生产同样面临成本、质量、技术的压力,为满足其在航空、新能源领域的广泛应用,预浸料行业需要通过技术创新,建立科学的过程控制技术来提升碳纤维在高科技领域的应用。尽管两步法预浸料生产工艺在一定程度上提升了产品的品质,但在高端市场上的应用,其品质还是不能满足后道工序的技术要求,尤其在小克重、低预浸、宽幅、长尺寸预浸料中,其均匀一致性是难以保证的。本文开发了激光传感控制技术,通过对影响预浸料品质的关键因素进行研究分析,确定了预浸料均匀性分布的试验方法。

根据碳纤维预浸料在复合材料行业应用中的质量要求,确定评价碳纤维预浸料的主要技术指标包括以下几个方面。

(1)物理性能:主要包括4个方面的物料性能评价指标,即拉伸强度、压缩强度、弯曲强度和层间剪切强度。

(2)预浸料的树脂含量。

(3)预浸料的表观质量。

以上3个技术性能指标的结果好坏主要取决于产品工艺的过程控制,关键控制的是树脂膜层的均匀性和树脂对纤维的浸润性,而树脂的浸润性主要取决于树脂的化学性能^[1]。

首先需要对树脂的化学性能进行研究,目前常用的测试方法有:(1)动态力学分析;(2)红外光谱;(3)液相色谱;(4)差热计量;(5)流变特性;(6)介质耗损。

其次选定合适的树脂,确保在复合过程中浸润充分,使表观质量得到控制,避免了因为树脂问题导致的最终产品的品质问题。因此,预浸料树脂的均匀性是整个制造过程的重点控制对象。为了能够让整个预浸过程可控,快速得出检测结果,为预浸生产过程中的工艺调整提供数据支持,国内外专家也提出了较为先进的在线快速检测技术:超声波技术、 β 或 γ 射线技术及光学技术^[2]。超声技术的原理是当超声波在预浸料中传播时,在一定的范围内,超声延迟为树脂含量的函数: $S_e = (S_m - S_f) V_m + S_f$,其中 S_e 、 S_m 、 S_f 分别为预浸带、树脂和纤维的超声延迟; V_m 为树脂的体积分数。如已知纤维和树脂的超声延迟,再通过测得预浸带的超声延迟^[3],即可计算出树脂含量。由于超声波是接触性测量,对预浸料有一定的损坏;同时,光学技术对预浸料的要求高,设备的制造成本昂贵,在实际生产过程中可操作性差,没有得到广泛的应用。

目前在国外,射线技术已经在实际生产中得到应用,其主要原理是,当射线通过一定厚度的预浸料时,会发生光电效应,电子效应和康普顿效应,在这3种作用力的影响下,射线强度会发生符合指数定义的衰减,通过研究射线穿过预浸料后的强度、预浸料对该射线的质量吸收系数和预浸料已知的参数可知样品的厚度,从而预测树脂含量^[4]。此种测试方法操作简单,精确度高,是非接触性测试,可实现在线检测。由于 β 射线对人体有伤害,仪器价格昂贵,国外对先进技术的封锁等原

因,因此 β 射线测试技术在中国的生产中没有得到推广与应用。随着半导体技术的发展,激光传感技术也开始应用到碳纤维预浸料行业。本文通过试验方法比分析该技术在预浸料过程控制中的应用情况。

1 试验材料及方法

选取规格为 U2424-200,即碳纤维克重为 $200\text{g}/\text{m}^2$,含胶量为 24% 的预浸料,1# 样品为目前常见采用两步控制方法的预浸料,2# 样品为采用新的激光传感控制技术的预浸料,样品长度均为 500m,评价内容为长度方向(头部与尾部)与幅宽方向,内容包括预浸料克重、碳纤维克重及树脂含量。

1.1 目前使用的过程控制方法: 两步检测法

第一步: 涂胶后,采用切块称重法测出胶膜克重。

第二步: 复合后,再次采用切块称重法进行胶量检测,流程见图 1。

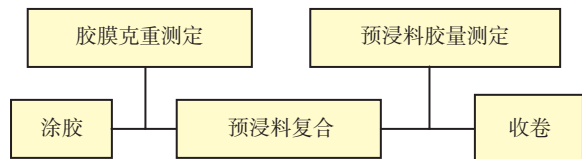


图1 两步检测法工艺流程图
Fig.1 Process flow chart of two steps test

目前在国内碳纤维预浸料的制造行业中,一般采取破坏性检测(也可称为溶媒称重法检测)对树脂含量进行评价。取样方法是在预浸料头部或尾部,沿幅宽方向,均匀间隔地截取 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 大小的预浸料 3~5 块,称出预浸料的重量,再放置在丙酮的溶剂中进行清洗,干燥后称出碳纱重量,再得出树脂含量,其表达式为: $RC = (m_p - m_f) / m_p$,式中 RC 为树脂含量, m_p 为预浸料克重, m_f 为碳纱克重。

1.2 新的过程控制方法: 采用激光传感技术测量含胶量方法

图 2 为测试装置的示意图,采用的是 2D 半导体连续激光器,预浸料样品编号为 2#, 规格为 U2424-200。

预浸料在线检测装置安装在预浸料复合机上,对复合好的预浸料进行 2D 扫描,PC 机显示预浸料相对厚

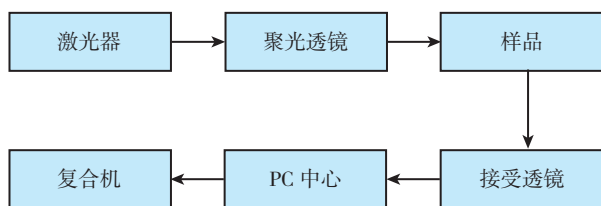


图2 激光传感检测装置示意图
Fig.2 Experimental setup diagram of laser sensor

度的变化,一旦发现超出公差范围,信号及时反馈到 PC 上,对预浸料的滚筒压力进行调节,从而实现在线控制。

该方法含胶量测试的原理解析: 不同规格的预浸料是由不同克重的纤维和不同克重的树脂复合而成,取浸渍良好的预浸料做为研究对象。树脂含量表达式为:

$$RC = m_r / (m_r + m_f) = \rho_r V_r / (\rho_r V_r + \rho_f V_f) = \rho_r (S - 2n\pi d_f / 4) / (\rho_r (S - 2n\pi d_f / 4) + 2\rho_f n\pi d_f / 4)$$

式中, m_r 为预浸料中树脂克重; ρ_r 为树脂密度; V_r 为树脂体积; ρ_f 为碳纱密度; V_f 为碳纱体积; n 为所用的纤维纱的根数; d 为单根纤维的直径, S 为预浸料面积。

2D 图像中,当 d 趋近无穷小时,预浸料体积 V 可用面积 S 表示, S 可以近似认为是预浸料厚度与宽度的乘积: $W \times H$ 。

这种方法只需要测出预浸料的 2D 图像即厚度和宽度,PC 进行图像处理转换成树脂含量,从而实现预浸料长尺寸含胶量的非破坏性动态检测。

2 结果与讨论

1# 样品与 2# 样品均是从每卷预浸料的头部和尾部取样,并分别依据幅宽取样,样本量为 40,分析各自的预浸料克重、碳纤维克重及树脂含量的分布情况,如图 3 与图 4 所示。

表 1 为每个样本各自指标的测试数据分析结果。

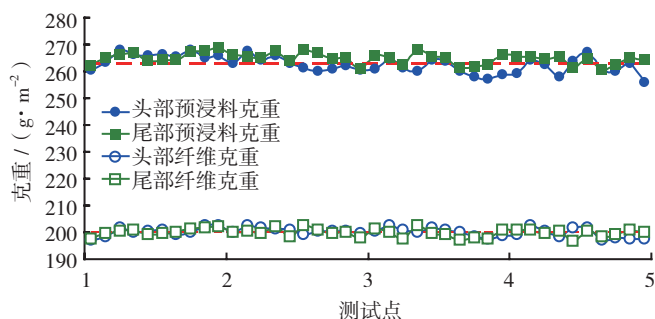


图3 2#样品头、尾部预浸料克重与碳纤维克重的分布图
Fig.3 Prepreg and carbon fiber mass between start and end of Sample 2#

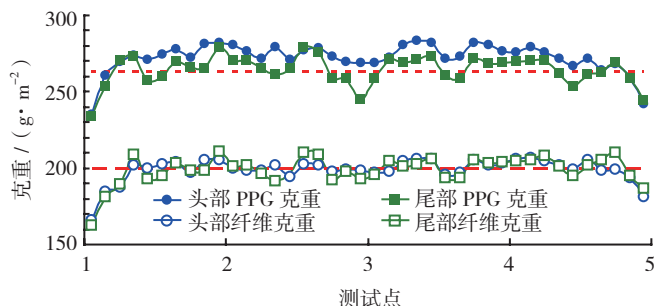


图4 1#样品头、尾部预浸料克重与碳纤维克重的分布图
Fig.4 Prepreg and carbon fiber mass between start and end of Sample 1#

表1 1#与2#样品预浸料克重、碳纤维克重、树脂含量分析

样品	预浸料克重 / (g·m ⁻²)			碳纤维克重 / (g·m ⁻²)			树脂含量 RC/%		
	均值	极差	偏离系数 /%	均值	极差	偏离系数 /%	均值	极差	偏离系数 /%
1#头	272.2	47.8	3.6	198.9	40.6	3.9	26.9	6	4.8
1#尾	264.2	40.6	3.6	198.8	48.8	4.6	24.8	9.6	7.6
2#头	262.7	12.3	1.2	200.1	5.7	0.9	23.9	2.5	2.9
2#尾	264.8	8.6	0.8	199.8	5.6	0.8	24.6	1.2	0.8

根据表1对1#、2#试验样品进行比对分析。

从预浸效果分析:1#试验样品头尾部树脂含量的平均值差为2.1%,在幅宽方向上极差最大值为9.6%;2#试验样品头尾部树脂含量的平均值差为0.7%,幅宽方向树脂含量极差最大值为2.5%,说明1#样品的树脂含量无论在长度方向还是在幅宽方向一致性较差,波动大;从长度方向和幅宽方向,2#样品的均匀性均远远优于1#样品,品质稳定。

从品质的稳定性分析:从预浸料克重、碳纤维克重、树脂含量3项指标的离散系数进行比较分析,1#样品3项指标的离散系数均大于3%,而2#样品3个指标的离散系数均小于3%,说明2#样品较1#样品的过程变异小,过程品质稳定可控。

以上试验样品进行比对分析后,说明激光传感控制技术对预浸料的均匀性分布有明显改善,能够通过改善工艺过程来实现过程控制,从而达到提高产品品质,同时,也通过自动化控制方法应用来减少人员投入、实现一机多品种,提高了生产效率也降低制造成本,说明该过程控制方法是有效,值得应用与推广。

2.1 激光传感控制技术对预浸料过程品质改善的原因分析

从1#样品分析看,虽然两步检测方法也体现了过程控制,但是此方法在应用方面存在局限性:

(1)是一种事后检测方法,只能作为树脂含量的抽样检查,无法判定整体的质量水平。

(2)检测的时间长、效率低,难以实现大规模量产生产。

(3)产品的品质关键取决于第一步胶膜的品质,难以保证预浸料品质的稳定,如要保持较高的良品率,则对设备能力、工艺过程能力要求增加。

2#样品在其他条件均未改变的情况下,只是在复合设备上进行了改进,增加了激光传感控制胶量装置,品质改善明显,其主要原因是激光传感控制技术在预浸料生产过程中其优点得到充分体现。

(1)能够实现在线控制,以准确的数据直观反应了品质状况,并能及时进行工艺参数调整,做到过程可控,

让质量控制从事后发现转变到事前预防,从根本上预防不良品的发生。

(2)快速、非破坏性检测,提升了良品率,减少在线测试人员,降低质量成本。

(3)减少了因等待测试结果导致生产待工时间,降低了涂膜工段的品质要求,提高生产效率。

(4)能实现一机多品种,为量产扩大产能、复合机提速提供了强有力保障。

(5)从另一方面来看,激光检测新技术的应用也为实现小克重,低树脂含量、宽幅的预浸料的技术开发提供了可靠地评价方法。

3 结论

用比对试验方法分析了影响预浸料生产过程中品质问题的主要原因,提出了品质改善的方法,将激光传感检测技术引入碳纤维预浸料过程控制中,实现在线检测,让质量从事后发现转变到事前预防,提升了碳纤维预浸料行业的质量水平,同时,也为碳纤维预浸料在航空航天领域,新能源汽车行业的应用提供了强有力支持。目前激光传感技术是比较先进的技术,整套装置成本费用高,在技术实现上需要在软件系统、硬件系统及工艺制程上进行系统整合优化,让激光传感控制技术能够真正发挥作用,而不只是一台昂贵的检测设备,这一课题还需要在应用方面进行大量的研究工作,让企业真正在保证品质的前提下,做到提高效率、降低成本、让碳纤维这种高端材料能在高端市场得到低成本的应用。

参考文献

[1] 赵渠孙. 预浸料技术与设备预浸料技术与设备. 玻璃钢/复合材料, 1994, 1: 35-36.
 [2] 黄玉东. 复合材料预浸带含量在线监测技术现状. 高技术通讯, 1998, 4: 53-56.
 [3] 黄玉东, 刘丽, 冯征, 等. 复合材料预浸带树脂含量在线监测技术现状. 高科技通讯, 1988, 4: 53-56.
 [4] 梅文. 纤维缠绕含胶量的激光传感器测量系统研究与设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

(责编 良辰)