

适用自动铺丝工艺的中模高强碳纤维预浸料研究

李国明* 单瑞俊 岳伟 罗盛宇

(江苏恒神股份有限公司, 江苏丹阳 212310)

摘要:

目前,自动铺丝技术是航天航空大型结构件制备工艺的发展方向,而中模高强碳纤维预浸料适用于航天航空主承力结构件的制备,达到减重的需求,因此,自动铺丝工艺用中模高强碳纤维预浸料的研究至关重要。采用 HF40A 中模高强碳纤维匹配 EH918 树脂体系,开展了预浸料的自动铺丝工艺适用性研究。通过与满足自动铺丝工艺的某预浸料对比分析,确定了满足自动铺丝工艺要求的 EH918/HF40A;对比手工铺放与自动铺丝制备的板材的力学性能,数据表明,自动铺丝板材的力学性能与手工铺放板材性能相当,无明显差异;采用该材料和自动铺丝工艺制备了典型部件,并进行了无损测试,其质量满足指标要求。

关键词: 航天航空; 自动铺丝工艺; 中模高强预浸料; 力学性能

中图分类号: V258

文献标识码: A

OSID:



0 引言

自动铺丝工艺的主要特点是实现制件的自动化和数字化制造,高速高效,质量稳定可控,适用于大型复杂结构复合材料结构件的制造,在航空航天飞行器、运载火箭和空间结构等产品的结构件制造中所占比重越来越大。航空方面:波音 787 的机身及 A380 的机身尾段等;航天方面:美国 ATK 公司研制出复合材料仪器舱段及导弹发射筒,此外还有 Minotaur 火箭整流罩、航天飞机的低温贮箱和 Atlas5 型运载火箭发动机短舱、防护罩等^[1-4]。

中模高强碳纤维预浸料适用于航天航空主承力结构件的制备,满足减重的需求,在航天航空领域发挥着不可替代的作用。其配套的中模高强预浸料的自动铺丝研究至关重要。

自动铺丝预浸料相比于传统的手工铺放预浸料,其主要区别体现在黏性、黏性寿命、含浸程度和

预浸料尺寸控制四个方面。

随着复合材料研究和开发的不断进步,使用领域日渐扩大,复合材料构件的不同制造工艺、不同工作条件对预浸料也提出了不同要求。目前,国内自动铺丝技术用中模高强预浸料的公开研究报导较少。

本文采用 HF40A 中模高强碳纤维,匹配 EH918 树脂体系开展了预浸料自动铺丝工艺适用性研究,通过与满足自动铺丝工艺的某预浸料对比分析,确定了满足自动铺丝工艺要求的 EH918/HF40A 铺丝预浸料。使用自动铺丝设备与手工铺放对比分析了自动铺丝工艺对板材力学性能的影响,最后,使用自动铺丝制备了不同的制件。

1 试验部分

1.1 材料

碳纤维:HF40A,江苏恒神;

树脂体系:EH918,江苏恒神。

* 通信作者. E-mail: guoming.li@hscarbonfibre.com

引用格式: 李国明,单瑞俊,岳伟,等. 适用自动铺丝工艺的中模高强碳纤维预浸料研究[J]. 民用飞机设计与研究,2020(1): 91-95. LI G M, SHAN R J, YUE W, et al. Research of intermediate modulus carbon fiber prepreg used for automatic fiber placement[J]. Civil Aircraft Design and Research,2020(1):91-95(in Chinese).

1.2 设备

1.2.1 制备设备

预浸设备,如图 1(a)所示,进口;

自动铺丝设备,如图 1(b)所示,进口。



(a) 预浸机



(b) 自动铺丝设备

图 1 预浸机和自动铺丝设备

1.2.2 检测设备

电子扫描电镜:测试预浸料含浸程度;

万能试验机(INSTRON):测试板材力学性能。

1.3 样品制备

通过调整预浸料生产工艺参数,制备出不同黏性的预浸料,通过测试评价预浸料的黏性、黏性寿命及含浸程度,用各方面与国外对比样接近的预浸料进行自动铺丝工艺的验证。

试验对比不同的铺放工艺(手工铺放和自动铺丝)下预浸料的力学性能,分析自动铺丝工艺对力学性能的影响。

2 自动铺丝工艺适用性研究

自动铺丝预浸料相比于传统的手工铺放预浸

料,其区别表现在以下几方面:

1) 黏性:自动铺丝工艺要求预浸料在铺丝条件下具有一定的黏性,以使预浸料与模具;预浸料不同层之间粘贴,最佳的预浸料黏性为在低温下黏性低,而升温后具有较高的黏性,即预浸料黏性应有一定的温度敏感性。

2) 黏性寿命:自动铺丝工艺一般用于制备大型结构件,铺放成型一个制件往往需要较长的时间,这就要求预浸料具有足够的黏性寿命。

3) 含浸程度:通过分切法制备自动铺丝用预浸料,要求预浸料具有较高的含浸程度,在分切时不会产生毛丝等缺陷,影响产品质量。

4) 预浸料尺寸控制:自动铺丝预浸料为小幅宽预浸料,使用自动铺丝机在程序控制下进行制件制造,若预浸料幅宽偏大或偏小,将会在铺放过程中产生搭接或空隙等缺陷,影响产品质量。

本文通过调整预浸料的制备工艺,开发出不同黏性的预浸料,分别命名为恒神 1#~恒神 5#。从黏性、黏性寿命和含浸程度三方面来评价,从中筛选出满足自动铺丝工艺要求的预浸料。

2.1 预浸料黏性及黏性寿命评价

自动铺丝工艺对预浸料的黏性要求主要包括两个方面:预浸料与模具的黏性和预浸料与预浸料之间的黏性。预浸料的黏性要适中,过大则在自动铺丝时容易产生丝束间或丝束与设备相互粘连;过小则丝束难以粘贴在模具上。黏性是自动铺丝工艺的关键。本文通过对比测试的形式评价恒神 1#~恒神 5#预浸料的黏性(对比样为满足自动铺丝工艺的 M21E/IMA 预浸料),选择黏性接近 M21E/IMA 预浸料的材料用于后续验证。

预浸料黏性测试的基本原理^[5]为:

通过小型设备模拟预浸料的铺放过程,如图 2 所示,试验测试预浸料在压辊压力下剥离所需的力来表征预浸料的黏性。

其基本步骤为:

第一步,预浸料表面覆有 PE 膜,如图 2 所示,此时剥离预浸料测得的值为空白值,即综合了压辊压力下预浸料运动时的摩擦力等外力;

第二步,预浸料表面去除了 PE 膜,此时剥离预浸料测得的值为黏性值和空白值的和;

第二步的值减去第一步的值,即为预浸料的黏性值,通过测得的预浸料剥离力用来表征预浸料之

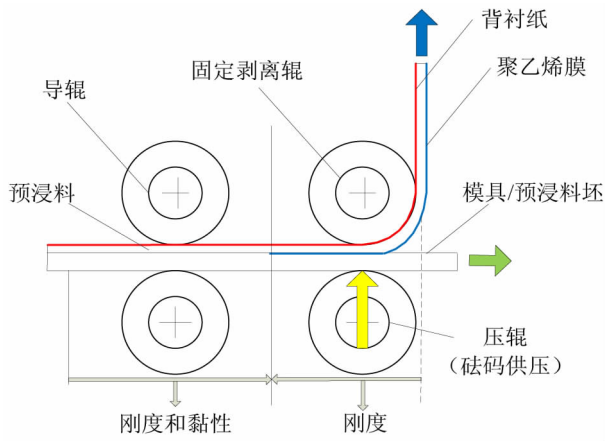


图2 黏性测试原理图

间和预浸料与不锈钢模具之间的黏性。

2.1.1 预浸料与模具的黏性

预浸料铺放时,要求第一层预浸料在室温(或加热)下能与模具之间具有较好的黏性,试验验证了不同的预浸料与模具之间的黏性。

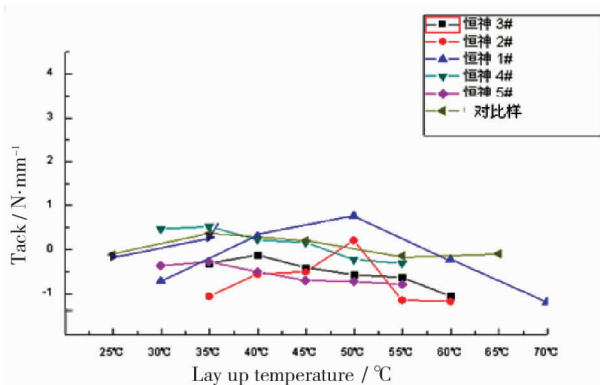


图3 预浸料与模具黏性

从图3可看出,恒神2#、恒神3#和恒神5#的黏性偏低,明显小于对比样;恒神1#黏性对温度较敏感,但黏性峰值出现温度较高,不利于实际应用;而恒神4#的预浸料与模具黏性值与温度的变化趋势与对比样基本一致。

2.1.2 预浸料与预浸料间的黏性

预浸料铺放时,要求预浸料之间在室温(或加热)下能与模具具有较好的黏性,但预浸料黏性过高会导致在铺层出现错误时,无法有效地将错误的铺层分离,从而导致制件中存在缺陷,甚至制件报废,图4为试验评价的不同预浸料本身之间的黏性。

从图4可看出,恒神1#和恒神2#预浸料之间的

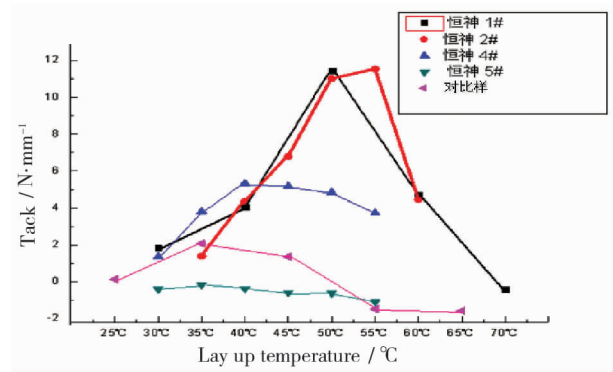


图4 预浸料与预浸料间的黏性

黏性随温度升高,黏性增大大幅度过大;恒神5#随温度的上升,黏性基本不变,甚至有一定幅度的降低;而恒神4#预浸料之间的黏性随温度升高有小幅度的增大,高于对比样。

根据预浸料黏性的评价结果,初步确定恒神4#预浸料可以满足自动铺丝工艺黏性的要求。后续对恒神4#相关自动铺丝工艺性进行评价。

2.1.3 预浸料黏性寿命

大型制件的自动铺放,往往需要多个工作日才能完成,这就要求预浸料具有较长的黏性寿命。

黏性寿命测试方法:在室温下,使用自动铺放设备进行试铺放,以预浸料无法在室温下满足自动铺放工艺的时间为室温黏性寿命。

经过实际测试评价,恒神4#的室温黏性寿命超过10天,满足大型制件的自动铺放制备要求。在实际铺放过程中,自动铺放设备还带有加热功能,可以一定程度上提高预浸料的黏性。

2.2 预浸料含浸程度评价

自动铺丝工艺对预浸料的含浸程度要求较高,以便于减少预浸料分切时产生的毛丝。含浸程度同样与国外自动铺丝预浸料 M21E/IMA 进行对比分析,主要从通过吸水法测试和 SEM 电镜进行分析。

2.2.1 吸水法测试

原理:预浸料中未被树脂包裹的干纤维与水接触时会发生毛细管吸水现象,水顺着纤维束间的毛细管上升并浸润纤维直至达到饱和吸水量。饱和后被树脂浸润的纤维间毛细管通道封闭,不再发生毛细管作用而吸水,故而可以利用吸水量的多少来判断含浸后预浸料中干纤维的含量,从而测试预浸料的含浸程度。

表 1 列出的是两款材料利用吸水法测得的含浸程度对比。

表 1 预浸料含浸程度测试数据

| 试样 | 含浸程度 |
|----------|-------|
| M21E/IMA | 98.5% |
| 恒神 4# | 99.4% |

从表 1 中测试数据看出,恒神 4#的含浸程度超过 M21E/IMA 预浸料,满足自动铺丝工艺对于预浸料含浸程度的要求。

2.2.2 SEM 对比分析

如图 5、图 6 所示,SEM 电镜图中 M21E/IMA 预浸料含浸程度高,碳纤维被树脂包裹,无可见的干碳纤维;恒神 4#与 M21E/IMA 预浸料相当,含浸程度高,无未浸透树脂的干碳纤维。

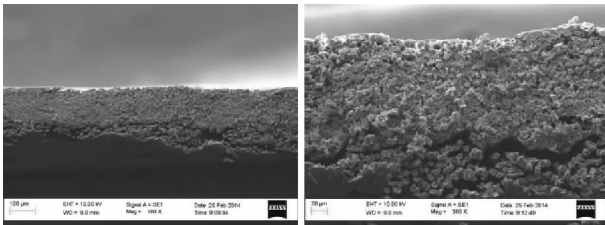


图 5 M21E/IMA 预浸料 SEM 图片

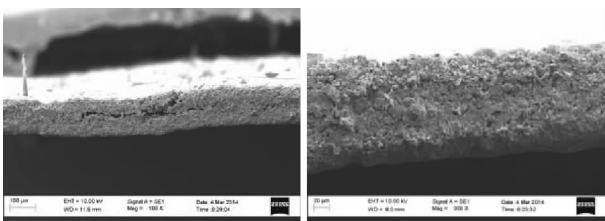


图 6 恒神 4# SEM 图片

通过对恒神 1#~恒神 5#的黏性、黏性寿命及含浸程度的评价,筛选出了一款满足自动铺丝工艺要求的预浸料:恒神 4#,该款预浸料的黏性与国外对比产品相当,黏性寿命超过 10 天,含浸程度优于国外产品。从而确定了预浸料制备工艺。

2.3 自动铺丝工艺的力学性能验证

预浸料工艺改进以及自动铺丝工艺不应影响预浸料的力学性能,为了研究工艺改进以及自动铺丝对材料力学性能的影响,使用 EH918/HF40A 预浸料分别采用自动铺丝工艺和手工铺放工艺进行预浸料铺放,并通过热压罐制备复合材料层压板,测试相关性能。数据为 6 个试样平均值,表 2 为两种铺放工艺的力学性能对比。

表 2 自动铺丝工艺和手工铺放工艺的力学性能对比

| 性能项目 | 基本性能 | 手工铺放 | 自动铺丝 | 差比/% |
|----------|-------------|-----------------|-----------------|------|
| | | EH918 /HF40A | EH918 /HF40A | |
| 0°拉伸 | 强度/MPa | 2 857 | 2 764 | -3.3 |
| | 模量/GPa | 168 | 169 | +0.6 |
| 90°拉伸 | 强度/MPa | 81 | 78 | -3.7 |
| | 模量/GPa | 8.8 | 8.9 | +1.1 |
| 0°压缩 | 强度/MPa | 1 389 | 1 422 | +2.4 |
| | 模量/GPa | 155 | 154 | -0.6 |
| 90°压缩 | 强度/MPa | 224 | 219 | -2.2 |
| | 模量/GPa | 9.7 | 9.4 | -3.1 |
| 弯曲 | 强度/MPa | 1 312 | 1 283 | -2.2 |
| | 模量/GPa | 140 | 140 | 0 |
| 面内 剪切 | Smax 强度/MPa | 156 | 154 | -1.3 |
| | 模量/GPa | 4.8 | 4.8 | 0 |
| 短梁 | S5% 强度/MPa | 89 | 88 | -1.1 |
| | 强度/MPa | 112 | 112 | 0 |

从表 2 中可以看出,自动铺丝工艺的各项力学性能与手工铺放相比,波动均在 4% 以内,两者的性能差距较小。通过该试验证明,预浸料制备工艺改进和自动铺丝工艺对材料的力学性能无影响。

3 自动铺丝工艺典型部件研究

使用 EH918/HF40A 预浸料在自动铺丝机进行 X 型号无人机的加筋壁板制备,如图 7 所示。

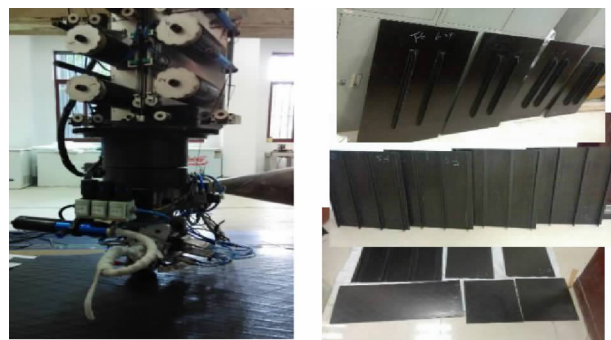


图 7 自动铺丝加筋壁板

通过以上制件制备,验证了预浸料的自动铺丝工艺性,表明 EH918/HF40A 预浸料满足自动铺丝工艺的要求。

4 结论

1) 采用 HF40A 中模高强碳纤维,匹配 EH918 树脂体系开展了预浸料自动铺丝工艺适用性研究,筛选出满足自动铺丝工艺要求的预浸料制备工艺;

2) 测试了自动铺丝工艺和传统手工铺放工艺下层压板的性能,结果表明,自动铺丝工艺制备的层压板性能与手工铺放层压板性能数据差距波动在4%以内,两个工艺的性能数据相当;

3) 采用 EH918/HF40A 预浸料通过自动铺丝工艺制备了 X 型号无人机加筋壁板,其性能满足设计要求,验证了其自动铺丝工艺可行性。

参考文献:

- [1] 肖军,李勇,李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2008(1): 50-53.
- [2] CARROLL G. Automated tape layer processing for composite components[C/OL]. 5th Annual SPE Automotive Composites Conference, [S.l. :s. n.], 2005[2020-01-09]. http://www.temp.speautomotive.com/SPEA_CD/SPEA2005/pdf/g/g1.pdf.
- [3] MICHAEL N G. Automated tape laying[M]//MIRACLE D B, DONALDON S L. ASM Handbook. ASM International, [S.l. :s. n.], 2001: 480-485.
- [4] 赵云峰,孙宏杰,李仲平. 航天先进树脂基复合材料制造技术及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(4): 1-7.
- [5] 还大军,肖军,李勇. 基于弧长的复合材料自动铺带统一边界处理方法[J]. 南京航空航天大学学报,

2010, 42(5): 645-649.

- [6] 张旭坡. 自动铺丝预浸纱制备技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2007.
- [7] 张建宝. 复合材料自动铺带控制及工艺关键技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2010.
- [8] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 11.
- [9] 文琼华,王显峰,何思敏,等. 温度对预浸料铺放效果的影响[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1740-1745.
- [10] 李勇,王敏,肖军,等. NY9200GA 树脂体系预浸料自动铺放粘结性工艺研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(4): 571-578.
- [11] 陆楠楠,肖军,齐俊伟,等. 面向自动铺放的预浸料动态黏性实验研究[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 279-286.

作者简介

李国明 男,硕士,工程师。主要研究方向:树脂基复合材料研究。E-mail: guoming.li@hscarbonfibre.com

单瑞俊 男,本科,工程师。主要研究方向:树脂基复合材料研究。E-mail: ruijun.shan@hscarbonfibre.com

岳伟 男,硕士,工程师。主要从事各种树脂基复合材料的研究。E-mail: wei.yue@hscarbonfibre.com

罗盛宇 男,本科,工程师。主要从事各种树脂基复合材料的成型工艺研究。E-mail: shengyu.luo@hscarbonfibre.com

Research of intermediate modulus carbon fiber prepreg used for automatic fiber placement

LI Guoming* SHAN Ruijun YUE Wei LUO Shengyu

(Jiangsu Hengshen Co., Ltd., Danyang 210016, China)

Abstract: Automated fiber placement (AFP), as the production molding process for large-scale aerospace structures, is the future direction. Intermediate modulus carbon fiber prepreg is suitable for the production of aerospace structures to meet the demand of weight reduction, so it is significant to study intermediate modulus carbon fiber prepreg for AFP. This paper uses HF40A, an intermediate modulus carbon fiber and EH918 resin system, to produce prepreg, and the applicability of its AFP process was studied. The EH918/HF40A meeting the requirements of the AFP process was determined by comparison with a prepreg that satisfies the process. After comparing AFP with the mechanical properties of laminates using the hand lay-up process, it can be found that their mechanical properties are equivalent. Additionally, Typical parts were prepared with the material through AFP process, and non-destructive testing was performed which proved that the quality met the requirements of the index.

Keywords: aerospace; automated fiber placement; intermediate modulus carbon fiber prepreg; mechanical property

* Corresponding author. E-mail: guoming.li@hscarbonfibre.com