

Nomex 蜂窝夹层复合材料的自动铺丝成型工艺研究*

孙华凯¹, 王显峰¹, 齐俊伟¹, 徐福泉², 程健男², 肖军¹

(1. 南京航空航天大学复合材料工程自动化研究中心, 南京 210016;

2. 航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 哈尔滨 150066)

[摘要] 采用自动铺丝技术成型蜂窝夹层结构复合材料, 其可能产生的缺陷为蜂窝芯侧压变形和预浸丝架桥, 分析了二者的形成机理和影响因素。为验证两种成型工艺, 设计了阴模成型工装, 提出了胶膜预黏接工艺和局部零张力铺放作为缺陷解决方案, 对平板蜂窝夹层进行实际铺放验证。对比固化后的制件: 对于斜削角度较大的蜂窝, 阳模成型不能消除架桥; 丝束架桥导致最终制件相应位置出现分层、缺胶缺陷; 阴模工装有效避免了蜂窝侧压变形和丝束架桥, 更适合自动铺丝成型。可为复杂型面蜂窝夹层构件的自动铺丝成型提供参考。

关键词: 自动铺丝; 蜂窝夹层复合材料; 丝束架桥; 工装; 丝束张力

Research of Automated Fiber Placement Applied in Nomex Honeycomb Sandwich Composite Material Manufacturing

SUN Huakai¹, WANG Xianfeng¹, QI Junwei¹, XU Fuquan², CHENG Jiannan², XIAO Jun¹

(1. R & D Center for Composites Industry Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China;

2. AVIC Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China)

[ABSTRACT] The honeycomb sandwich structure composite material is formed by automated fiber placement technology, lateral pressure deformation of honeycomb core and prepreg fiber bridging are defects, the formation mechanism and influencing factors of them are analyzed. Design concave molding tooling for two kinds of molding process, adhesive film pre-bonding process and taws zero-tension technique have been proposed to avoid defects. Completing the laying of the flatbed honeycomb sandwich, comparing the parts after curing: its cannot avoid the prepreg fiber bridging use concave module, and bridging position appears stratified, lack of resin defect; convex module is more suitable. The results can provide the reference for forming complex honeycomb sandwich structure composite material.

Keywords: Automated fiber placement; Honeycomb sandwich structure composite material; Prepreg fiber bridging; Module tooling; Taw tension

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.094

蜂窝夹层结构复合材料具有质量轻、比刚度高等优点, 是飞机结构效率最高的结构之一^[1-4]。尤其斜边蜂窝夹层结构复合材料在航空领域应用更为广泛, 如客机机身、机翼、襟翼整流罩, 直升机机身板件、地板、尾梁等。但目前对于 Nomex 蜂窝夹层复合材料的成型多采用手糊成型工艺, 手糊成型生产效率低、人为质量稳定性差、产生较多废料等, 不适合成批大型构件的制造。

国产飞机复合材料的应用比例逐渐提高, 对复合材

料的成型技术也提出了更高的要求。自动铺丝技术是集纤维缠绕和自动铺带技术的优点于一身的先进复合材料制造技术, 适合复杂曲面的自动成型且能有效地提高成型效率和质量, 更适合批量制造大型复材构件。国外的自动铺丝技术已有 30 多年的研究历史, 对蜂窝夹层自动铺丝成型技术的研究有: 雷神公司对 Premier I 机身采用了整体成型蜂窝夹层结构^[5-6]; 庞巴迪宇航公司等完成了自动铺丝成型蜂窝夹层复合试验件并进行了力学试验测试^[7-9]; 欧洲直升机公司采用了 CORIOLIS 公司生产的机器人自动铺丝系统研究了直升机构件的自动铺丝成型方案, 如图 1 所示。CORIOLIS 公司宣传

* 基金项目: “高档数控机床与基础制造装备” 科技重大专项 (2016ZX04002-001-07); “复合材料工程技术中心” 中央引导地方科技发展专项 (ZY16A05); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

视频中介绍了两种蜂窝夹层自动铺丝的方案,即阳模方案如图 1 (a)和阴模方案图如 1 (b),本文以此两种工艺为基础对 Nomex 蜂窝夹层复合材料自动铺丝成型工艺展开研究。国内未见开展自动铺放成型蜂窝夹层复合材料相关研究的报道,本文的研究对蜂窝夹层结构自动铺丝工艺的研究具有重要的工程意义^[10-11]。

采用自动铺丝技术成型 Nomex 蜂窝夹层复合材料时可能带来的缺陷是蜂窝芯侧压变形和蜂窝斜削边缘的丝束架桥。分别分析了这两种缺陷的影响因素并探索了缺陷的解决方案。

1 蜂窝夹层结构自动铺丝成型难点及影响因素

1.1 蜂窝侧压变形及影响因素

(1) 蜂窝芯的各向异性导致侧压变形。

蜂窝芯是典型的各向异性材料,如图 2 所示,规定蜂窝芯材胶条带方向为 L 方向、蜂窝新材拉伸方向为 W 方向、与 L 、 W 平面垂直的蜂窝芯材的高度方向为 T 方向。蜂窝芯在 L 、 W 方向几乎没有抗压能力,这是蜂窝芯的弱点^[12],而 T 方向却有较强的抗压能力,能承受常规的铺放压力。

蜂窝芯边缘斜削外形是极为常见的结构形式,其作用是将蜂窝夹层结构的内、外蒙皮和相邻的结构过渡连接起来^[13],手工成型斜削蜂窝夹层结构复合材料时,为了追求良好的外蒙皮型面质量,采用阳模成型工装,即蜂窝芯和外蒙皮向外凸起,内蒙皮靠模,如图 3 所示。

(2) 铺放压力对侧压变形的影响。

自动铺放过程中,压辊运动到斜削区域时铺放压力的分力作用在蜂窝侧向(L 或 W 方向),可能引起蜂窝侧向压缩变形或是滑移的机理参见图 4 (a),如果铺放压力沿蜂窝侧向的分力大于摩擦力和蜂窝抗侧压强度之和,则蜂窝芯就会产生蜂窝空格变形甚至大面积滑移,如图 4 (b)所示。

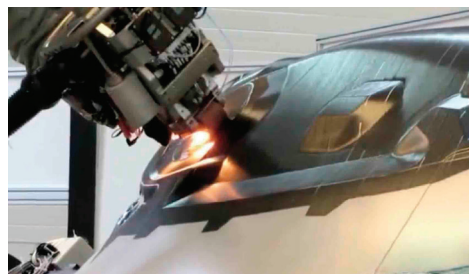
(3) 工装工艺对侧压变形的影响。

阴模成型(图 5)不同于阳模成型,蜂窝芯反置在阴模工装的凹槽内,内蒙皮铺放在硬质模具表面完成,外蒙皮的铺放压力作用在蜂窝芯 T 方向,避免了蜂窝芯的侧压变形。

1.2 丝束架桥的产生机理及影响因素

另一个关键问题是斜削蜂窝芯区域与铺放压辊之间的丝束架桥,发生在蜂窝斜削边缘与蒙皮的负曲率夹角过渡位置,如图 6 所示,其形成原因有:

(1) 几何原因。蜂窝芯斜削区与模具形成负曲率夹角过渡,铺放压辊与该尖角形成架空区域,是导致阳模工艺预浸丝束架桥的根本原因。



(a) CORIOLIS 阳模铺放成型



(b) CORIOLIS 阴模铺放成型

图1 国外Nomex蜂窝夹层复合材料的自动铺丝成型
Fig.1 AFP applied in Nomex honeycomb composite in foreign countries

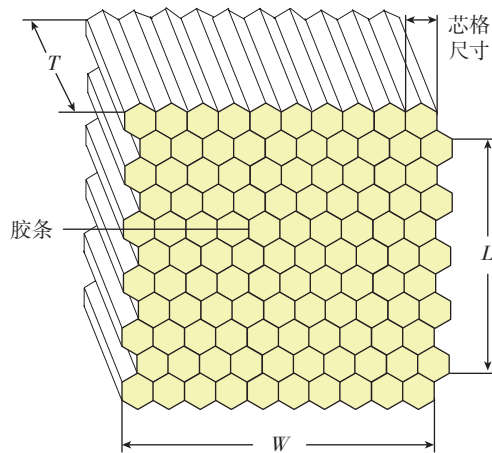


图2 蜂窝材料的各向异性

Fig.2 Anisotropy of honeycomb materials

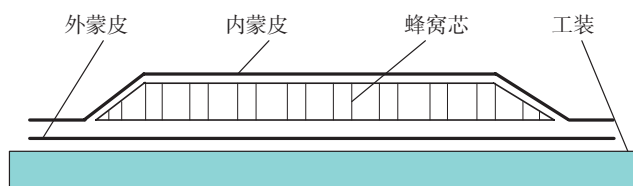
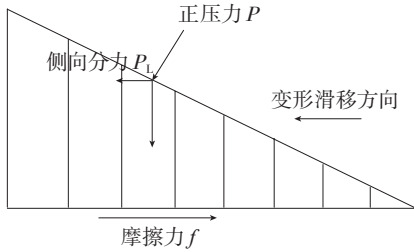


图3 阳模成型示意图

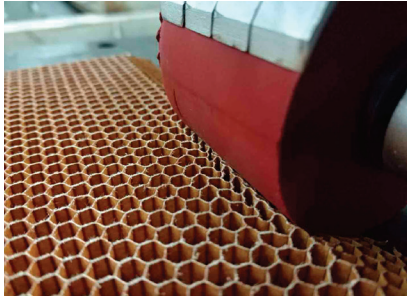
Fig.3 Schematic of convex module tooling

架桥尺寸和铺放压力、压辊变形度以及蜂窝坡度角有关。考虑压辊在铺放压力下的变形与蜂窝斜面相切瞬间形成的架桥尺寸:压辊的变形参考赫兹接触理论,圆柱压辊与底基平面弹性接触时,其接触区域是长度为 L 、宽度为 $2a$ 的矩形,如图 7 所示。

接触应力 P 呈半圆柱体形分布,计算公式为:



(a) 斜削区侧压变形机理



(b) 斜削区侧压蜂窝空格变形

图4 侧压变形机理

Fig.4 Mechanism of lateral pressure deformation

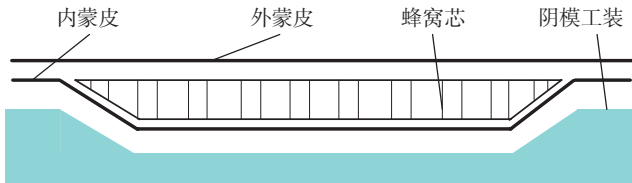


图5 阴模成型示意图

Fig.5 Schematic of concave module tooling

$$p(x) = \frac{2F}{\pi a^2 L} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (1)$$

式中, x 为接触点距接触中心的径向距离; F 为外部载荷, 即铺放压力在压辊中轴的压力。当 $x=0$ 时, 即接触区域截面的中心线处所受的接触应力最大, 计算公式为:

$$p_0 = \frac{2F}{\pi a L} = \sqrt{\frac{FE^*}{\pi RL}} \quad (2)$$

式中, E^* 为等效弹性模量, $E^* = E/(1 - \nu^2)$; E 为压辊材料的弹性模量; ν 为压辊材料的泊松比; R 为压辊圆柱体半径。

由接触应力和接触载荷之间的关系, 接触半宽 a 应为:

$$a = \sqrt{\frac{4FR}{\pi E^* L}} \quad (3)$$

为简化计算, 将压辊未与下蒙皮接触的部分继续视为局部圆形, 实际的架桥区域是由两直边 L_1 、 L_2 和一条圆弧 L_3 构成的区域, 如图 6 所示, L_1 、 L_2 和 L_3 有如下结果:

$$L_1 = R \tan \frac{\theta}{2} + \frac{R(\pi E^* L - 4F)}{\pi E^* L \tan \theta} - a \quad (4)$$

$$L_2 = R \tan \frac{\theta}{2} - \frac{R(\pi E^* L - 4F)}{\pi E^* L \sin \theta} \quad (5)$$

预浸丝与下蒙皮和蜂窝芯切点之间的弧长定为 L_3 , 可得:

$$L_3 = \frac{\pi R \left(\theta - \arcsin \sqrt{\frac{4F}{\pi E^* RL}} \right)}{180} \quad (6)$$

可以看出: 阳模成型工艺铺放过程中形成的架桥尺寸为该区域的预浸丝铺放线长 L_3 与所需铺放线长 L_1+L_2 之间的差值。该架桥区域最后可能形成制件的空隙、分层或其他缺陷。架桥尺寸的大小和铺放压力有关, 铺放压力越大, 架桥尺寸越小, 然而针对阳模成型蜂窝芯易产生侧压变形, 铺放压力不能过大, 因此架桥难以避免。

(2) 铺放张力的影响。

不同阶段张力的作用范围也不同: 在送丝过程中, 丝束张力作用在送丝辊和预浸丝筒之间, 称之为送丝张力; 在铺放过程中, 送丝辊抬起, 丝束张力作用在铺放压辊末端和预浸料筒之间, 称之为铺放张力^[14]; 铺放张力是预浸丝束经过传纱机构的阻力和机器自带张力控制器所输出张力的总和, 如图 8 所示。铺放张力过大会使预浸丝束在铺放过程中脱黏导致架桥或是使架桥扩展。

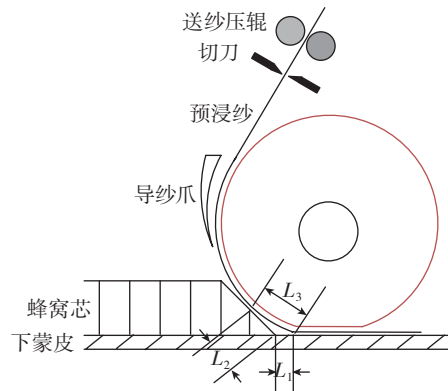


图6 丝束架桥示意图

Fig.6 Prepreg fiber bridging

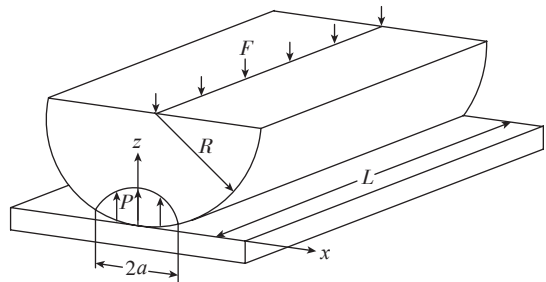


图7 硅橡胶压辊的赫兹接触

Fig.7 Hertz contact of silicone rubber roller

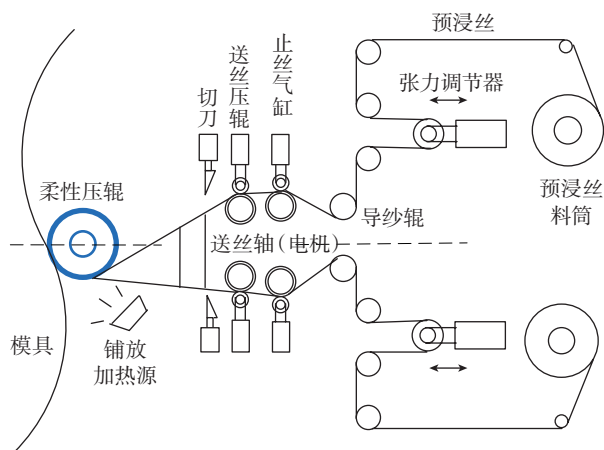


图8 自动铺丝机结构

Fig.8 Main components of AFP machine

因此铺放张力也是影响架桥尺寸的关键因素。

2 针对侧压变形和丝束架桥的解决方案

阳模成型工艺中可采用胶膜预黏接工艺以提高蜂窝芯的侧向承压能力,但阳模成型工艺难以避免丝束架桥;阴模成型可以将铺放压力转移至蜂窝 T 方向,且通过倒角处理可以避免丝束架桥;铺放张力对于阴模和阳模成型工艺都有影响,两种工艺都存在负曲率的夹角过渡,因此探索了零张力铺放技术。

2.1 阳模成型胶膜预黏接

胶膜是蜂窝夹层制造中常用的工艺材料,针对阳模自动铺丝成型采用胶膜预黏接工艺可提高蜂窝芯的抗侧压强度。胶膜预黏接工艺是按照外蒙皮-胶膜-蜂窝芯-胶膜的顺序铺叠好后在低于胶膜固化温度下某一温度保温并真空处理。真空可排除蒙皮-胶膜之间的气体,增加蜂窝芯底端的摩擦力 f ,蜂窝芯表面胶膜的存在使得压辊与蜂窝空格之间的线接触转变为面接触,提高了蜂窝芯的抗侧压强度。选用黑龙江石化所生产的J99胶膜,根据使用经验确定胶膜的预黏接工艺温度为 80°C ^[15],预黏接工艺后的夹层体如图9所示,经实际铺放测试该预黏接方案使得蜂窝侧边可承受240N以内的铺放压力。

2.2 阴模工装的设计制造

对于阴模成型工艺,蜂窝芯反扣在工装“凹坑”内,此后外蒙皮的铺放是在蜂窝芯的 T 方向,避免了 L 、 W 方向的变形,且对阴模工装适当的倒角改进可从几何角度避免架桥。根据所需铺层厚度精确设计了阴模工装进行验证铺放,为了防止架桥在工装易架桥位置倒角处理,倒角应大于铺放压辊的半径32.5mm,因此取为 $R35$ 。蜂窝芯也需在相应的位置倒 $R35$ 圆角,出于制造需要的有圆倒角的蜂窝是工程上常见的^[16]。相应的工

装三维模型与实物如图10所示。

2.3 局部零张力铺放的实现

零张力铺放实现的硬件基础是铺丝头的送丝压辊与送丝轴之间啮合,送丝轴受电机控制可实现指定长度送纱、送丝长度与铺放长度的匹配,是保证零张力铺放效果的关键。

零张力铺放还需要软件的算法,自动铺丝的轨迹规划(CAD)生成的轨迹点信息包括点的序号、位置坐标、法向量和特征信息,特征信息将点标记为普通点和特征点,特征点带有的特征信息包括送丝压辊压下、送丝压辊抬起、切刀切下、切刀抬起4类。后置处理(CAM)过程按照点的序号读入轨迹数据,根据点的位置坐标和法向量计算机器人的位置和姿态,根据点的信息完成相应特征动作,如切刀、送纱辊的动作等,之后以机床语言输出程序。

工装的凹面铺放轨迹点如图11所示,点1是普通曲面过渡为凹曲面的最后一点,点2是凹面的第一个点,点3、4是底角 $R35$ 倒角处的两个相邻轨迹点;其法向量分别为 \vec{n}_1 、 \vec{n}_2 、 \vec{n}_3 、 \vec{n}_4 ,因数模表面由普通曲面过渡为凹曲面时,普通曲面最后一个轨迹点与下一点之间有法向量突变,因此轨迹规划结束后可增加一次计算与判定,求普通点1的法向量 \vec{n}_1 与下一点2的法向量 \vec{n}_2



图9 预黏接夹层体

Fig.9 Pre-bonding sandwich structure



图10 阴模工装

Fig.10 Concave module tooling

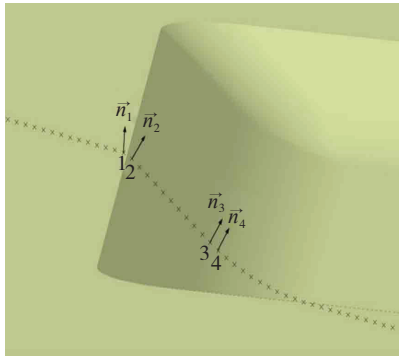


图11 凹面处的特征轨迹点

Fig.11 Characteristic trajectory points on the concave surface

的夹角,当夹角超过一定范围,判定点2为特征点,记为奇次序号,并附以送纱压辊压下的指令代码,同样当下一次再次有点被判定为特征点,即凹曲面向普通曲面过渡的第1个点,将其记为偶次序号,附以送纱压辊抬起的代码。需要指出的是凹面R35倒角处的相邻两点间的法向量变化不大,此处的点不会被认定为特征点,这正是所需要的。在凹面零张力铺放区域内,通过确定轨迹点之间的位置距离确定送纱长度,保证压辊运动轨迹长度与送纱长度一致并同步运动。

3 铺放验证与对比

3.1 铺放验证

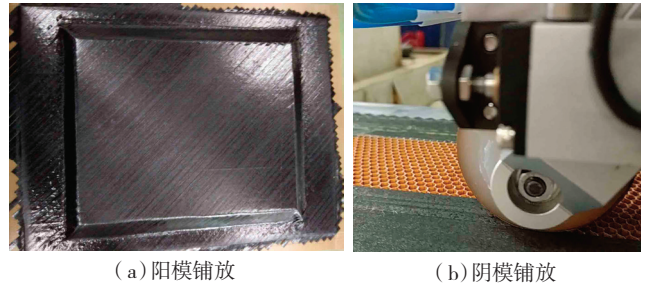
为研究架桥缺陷对最终制件质量的影响和验证解决方案的效果,使用南京航空航天大学自主研发的七轴8丝束铺丝机,分别完成了基于阳模成型和阴模成型的夹层板件自动铺放验证并在固化后予以分析,铺放过程如图12所示。

3.2 固化后对比

真空环境,180℃保温2h,完成固化^[17]。固化后两种工装成型的制件外蒙皮质量对比如图13所示,阳模成型因为架桥不可避免,导致固化后制件蜂窝边缘出现面板凹陷、缺胶等缺陷,与阳模成型为了获得良好的外蒙皮型面质量的初衷相违背;阴模成型固化过程中外蒙皮表面使用均压板工艺获得了良好的表面质量。

使用莱卡成像仪观察夹层构架剖面形貌,阳模成型件架桥位置出现了严重的分层,外蒙皮的相应位置的铺层向内弯曲凹陷。

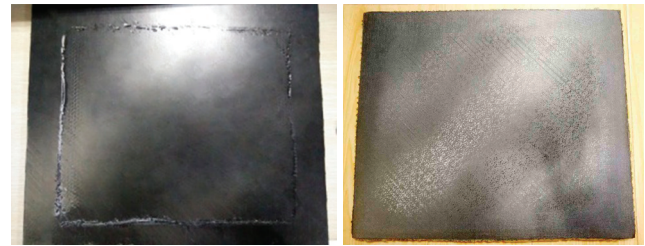
架桥位置形成的架空区域在真空环境下形成负压空室可影响树脂的均匀流动造成外蒙皮局部缺胶,且斜削区的实铺丝束线长 L_3 与所需铺放线长 L_1+L_2 之间有较大差值,造成外蒙皮相应位置铺层向内凹陷;阴模成型工艺有效地避免了架桥,因此阴模成型工装更适合自动铺丝成型有斜削的蜂窝夹层结构复合材料,图14为



(a) 阳模铺放 (b) 阴模铺放

图12 实际铺放验证

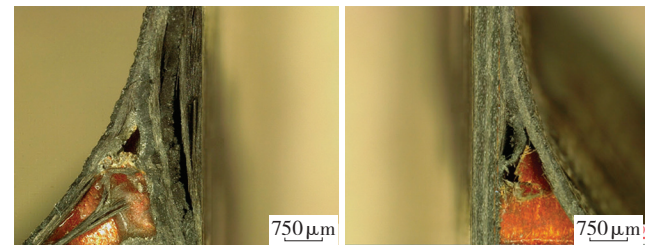
Fig.12 Laying validation



(a) 阴模成型外蒙皮 (b) 阳模成型外蒙皮

图13 外蒙皮型面质量

Fig.13 Surface quality of external skin



(a) 阳模成型斜削位置缺陷 (b) 阴模成型斜削区

图14 斜削区的截面形貌

Fig.14 Section shape of the oblique section

斜削区的截面形貌。

4 结论

(1)分析了蜂窝夹层结构自动铺丝成型过程中侧压变形和丝束架桥缺陷的形成机理和影响因素。

(2)为避免蜂窝侧压变形和丝束架桥,设计制造了阴模平板工装,探索了胶膜预黏接工艺和局部零张力自动铺放技术。

(3)完成了两种工艺的实际铺放验证,并对比了固化后制件表面和截面质量,得出结论:对于斜削角度较大的蜂窝夹层结构,现有设备阳模成型工艺中架桥难以消除,对制件质量影响严重;阴模成型工装的适当改进可有效地避免侧压变形和斜削区的丝束架桥,使用工艺盖板能获得良好的外蒙皮质量。针对现有设备,阴模成型工艺更适合自动铺丝成型有斜削的蜂窝夹层结构复合材料。

参考文献

- [1] 蒲永伟, 宋扬, 齐芳, 等. U型多区域蜂窝夹层复合材料构件制造工艺探究 [C]// 第十届沈阳科学学术年会论文集 (信息科学与工程分册). 沈阳, 2013.
- PU Yongwei, SONG Yang, QI Fang, et al. Research on manufacturing process of U-shaped honeycomb sandwich composite materials[C]// Proceedings of the 10th Annual Meeting of the Shenyang Scientific Academic Conference (Information Science And Engineering Technology Branch). Shenyang, 2013.
- [2] 李勇. 直九机用 Nomex 蜂窝研究 [J]. 航空材料学报, 1996(1): 47-54.
- LI Yong. Research on Nomex honeycomb applied in the Helicopter 9[J]. Journal of Aviation Materials, 1996(1): 47-54.
- [3] PARIS I L, HOJJATI M, CHEN J. Characterization of composites sandwich ramp failure under tensile loading[EB/OL].[2018-05-07]. <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Themes/Applications/SANDWICH%20STRUCTURES/B6.19%20Paris.pdf>
- [4] 柳敏静, 武湛君. 复合材料蜂窝夹层结构在飞机中的应用 [J]. 科技导报, 2016, 34(8): 21-25.
- LIU Minjing, WU Zhanjun. The application of composite honeycomb sandwich structure in aircraft[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(8): 21-25.
- [5] 肖军, 李勇, 文立伟, 等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展 [J]. 中国材料进展, 2009, 28(6): 28-32.
- XIAO Jun, LI Yong, WEN Liwei, et al. Progress in automatic laying of resin matrix composite materials[J]. Progress of Chinese Materials, 2009, 28(6): 28-32.
- [6] 李勇, 肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用 [J]. 纤维复合材料, 2002(3): 39-41.
- LI Yong, XIAO Jun. The technology and application of composite fiber laying technology[J]. Fiber Composite, 2002(3): 39-41.
- [7] LICHTINGER R, LACALLE J, HINTERHÖLZL R. Simulation and experimental validation of gaps and bridging in the automated fiber placement process[J]. Science & Engineering of Composite Materials, 2015, 22(2): 131-148.
- [8] SCHLEDJEWSKI. In first international symposium automated composites manufacturing[C]. Keynote Lecture: Montreal, 2013.
- [9] PARIS I L, HOJJATI M, CHEN J, et al. In proceedings of the 17th international conference on composite materials ICCM-17 2009, Edinburgh, 2009.
- [10] 台元月, 卞航. 复杂曲面夹层结构复合材料制件成型工艺研究 [J]. 科技创新与应用, 2016(28): 15-16.
- TAI Yuanyue, BIAN Hang. Study on the forming process of complex surface sandwich structure compositematerials[J]. Technological Innovation and Application, 2016(28): 15-16.
- [11] 毕红艳, 段友社, 谢凯文. 共固化成型蜂窝夹层结构缺陷分析及工艺改进 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(15): 106-109.
- BI Hongyan, DUAN Youshe, XIE Kaiwen. Study on process improvement and production defects of co-cured sandwich composite structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(15): 106-109.
- [12] 赵渠森, 郭恩明. 先进复合材料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- ZHAO Qusen, GUO Enming. Advanced composite material manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [13] 吴鑫. NOMEX 蜂窝材料超声切割直刃刀具设计与性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- WU Xin. Study on the design and performance of ultrasonic cutting edge tool of NOMEX cellular material[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [14] 赵聪, 肖军, 王显峰, 等. 丝束张力对自动铺丝成型工艺的影响 [J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1384-1392.
- ZHAO Cong, XIAO Jun, WANG Xianfeng, et al. The effect of tow tension on the forming process of automatic wire laying[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(4): 1384-1392.
- [15] 梁滨, 刘清方, 陶树宇, 等. 蜂窝夹层结构面板胶粘剂的研究 [J]. 中国胶粘剂, 2001, 10(5): 11-13.
- LIANG Bin, LIU Qingfang, TAO Shuyu, et al. Research on the adhesive of honeycomb sandwich panel[J]. China Adhesives, 2001, 10(5): 11-13.
- [16] 汪海, 沈真. 复合材料手册: 复合材料夹层结构 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- WANG Hai, SHEN Zhen. Composite material handbook: structural sandwich composites [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016.
- [17] 朱攀星, 杨绍昌. X850 树脂预浸料材料工艺性研究 [J]. 科技展望, 2016(24): 70-72.
- ZHU Panxing, YANG Shaochang. Study on the technology of X850 resin preimpregnated materials[J]. Technology Outlook, 2016(24): 70-72.
- 通讯作者: 王显峰, 博士、副教授, 研究方向为复合材料自动化成型软件技术, E-mail: wangxf@nuaa.edu.cn. (责编 铃兰)
- (上接第89页)
- nanoparticles in PC/SAN blends[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(2): 656-669.
- [44] LI N, HUANG Y, DU F, et al. Electromagnetic interference (EMI) shielding of single-walled carbon nanotube epoxy composites[J]. Nano Letters, 2006, 6(6): 1141-1145.
- [45] ZHANG H B, YAN Q, ZHENG W G, et al. Tough graphene-polymer microcellular foams for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2011, 3(3): 918-924.
- [46] HANG H B, ZHENG W G, YAN Q, et al. The effect of surface chemistry of graphene on rheological and electrical properties of polymethylmethacrylate composites[J]. Carbon, 2012, 50(14): 5117-5125.
- [47] YAN D X, PANG H, LI B, et al. Structured reduced graphene oxide/polymer composites for ultra-efficient electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(4): 559-566.
- [48] GAO X Y, LI J, GAO Y, et al. Microwave absorbing properties of alternating multilayer composites consisting of poly (vinyl chloride) and multi-walled carbon nanotube filled poly (vinyl chloride) layers[J]. Composites Science and Technology, 2016, 130(1): 10-19.
- 通讯作者: 李进松, 博士、讲师, 研究方向为碳基复合材料、吸波材料和储能材料, E-mail: lijinsong@buaa.edu.cn. (责编 铃兰)