

# 蜂窝夹层结构自动铺丝工艺试验研究与优化<sup>\*</sup>

原崇新,汲生成,赵新福,刘亚男,李妍

(中国商飞北京民用飞机技术研究中心,北京 102219)

**[摘要]** 夹层结构的自动铺丝存在蜂窝塌陷、倒角处架桥、铺丝头与蜂窝干涉碰撞等问题。为了解决以上问题,对蜂窝夹层结构的自动铺丝工艺进行了研究,包括材料加热参数、压实力的选择,铺放路径的仿真规划,蜂窝芯材的台阶设计,以及蜂窝极限边角等。对蜂窝夹层结构的铺丝路径进行了设计并实际铺放,对铺放过程的缺陷及其产生原因进行了分析,并得到优化验证。研究发现加热参数会影响预浸料的铺贴性,温度过高会使预浸料灼伤。为保证铺贴质量,蜂窝倒角不宜超过 $30^{\circ}$ ,并且蜂窝与底面需平滑过渡,最后蜂窝的位置需与设计严格一致。

**关键词:** 夹层结构;自动铺丝;蜂窝;加热参数;压实力

## Experimental Study and Optimization of Automated Fiber Placement for Honeycomb Sandwich Structures

YUAN Chongxin, JI Shengcheng, ZHAO Xinfu, LIU Ya'nan, LI Yan

(Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute of COMAC, Beijing 102219, China)

**[ABSTRACT]** There are some phenomena happen for automated fiber placement of sandwich structures, such as the honeycomb is prone to crush due to the compression of head, the bridge at the interface between the honeycomb and the bottom, the head contact with the honeycomb, etc. To solve the above problems, the automated fiber placement for honeycomb structures were investigated, which included the heating parameters and the compression force, the simulation of the placement, the stage of the honeycomb core, and the limit angle of the honeycomb, etc. The fiber placement path of sandwich structures were designed and the sandwich structures were manufactured, meanwhile the defects during the process were classified and analyzed, and solved experimentally. The investigation shows that the heating parameter would affect the layup ability of the prepreg, overheating can burn the prepreg. To assure the layup quality, the angle of the honeycomb is better to be less than  $30^{\circ}$ , and the honeycomb has a smooth connection with the bottom, the last but not the least, the size and the position of the honeycomb is crucial for the process quality.

**Keywords:** Sandwich structure; Automated fiber placement; Honeycomb; Heating parameter; Compression

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.074

夹层结构在民用航空结构上得到了广泛的应用,比如发动机的整流罩、进气道、地板梁等。这种结构具备抗弯曲刚度强,轻质等特点。但对于此类结构的成型工艺在公开文献中还是手工铺放居多。NASA在复合材料机身的先进技术项目中提到了用自动铺丝的方法制作了夹层结构机身下段的缩比<sup>[1]</sup>。面板材料选用了AS4/8552和T300/F584,芯材选用了酚醛芳纶蜂窝和聚酰胺蜂窝,为了防止蜂窝塌陷还用了泡沫填充的蜂窝作为备选。蜂窝的倒角分别为 $20^{\circ}$ 和 $3^{\circ}$ 。不过文中没有提及铺丝过程中是否发生缺陷等。

自动铺丝工艺影响着最终制件的力学性能,Croft等研究了自动铺丝工艺4种常见的制造缺陷对力学性能的影响,包括间隙、交叠、半间隙半交叠、纤维扭曲等<sup>[2]</sup>。结果发现单一的缺陷可使结构纤维拉伸、压缩和面内剪切等力学性能至少下降5%,而对开口压缩和开口拉伸等力学性能可下降13%。由于在丢层区会出现三角形的富树脂区,可能会导致结构力学性能的下落。Blom<sup>[3]</sup>等通过有限元模拟方法研究了丢层区对变刚度复合材料力学性能的影响,模拟结果表明,较宽的丝带会导致较低的强度,丢层区的厚度与强度无关,而通过交错铺放可提高结构的强度。Shirinzadeh<sup>[4]</sup>等研究了一种新的算法即表面曲线算法,旨在用于复

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(11402307)。

杂形面的自动铺丝路径规划,此算法可产生较均一的铺层而避免纤维间隙或交叠。Sonmez 等<sup>[5]</sup>研究了热塑性复合材料自动铺放的工艺参数优化,其目标是降低工艺过程的残余应力并提高制造效率。

自动铺丝技术已经成功应用到了大型民机主承力结构件的制造上,比如空客 A350 的机身采用 4 段分块的铺丝设计,波音 787 的机身采用整段铺丝,因此对铺丝技术的研究方兴未艾。Lukaszewicz 等<sup>[6]</sup>对自动铺放技术进行了综述性分析,回顾了自动铺放技术的发展历程,并对未来的发展趋势和研究热点作了详细归纳。Lamontia 等<sup>[7]</sup>研究了 PEEK 和 PEKK 热塑性复合材料原位成型,并制造了环向加筋的圆筒结构以及蜂窝夹层结构,研究发现原位成型的热塑性复材结构件有些力学性能超越了热固性复合材料。我国相关学者对于自动铺丝技术也做了大量的研究。还大军等<sup>[8]</sup>对自动铺放工艺 CAD/CAM 技术进行了综述分析。安鲁陵等<sup>[9]</sup>研究了基于实体布尔运算的复合材料纤维自动铺放过程中碰撞干涉预测。王天玉等<sup>[10]</sup>对国外自动铺丝设备及其应用进行了对比分析,并对国内自动铺丝现状进行了探讨。

与传统的层合板结构相比,蜂窝夹层结构的铺放难度更大,因为夹层结构一般存在夹角过渡区,夹角一般小于  $30^\circ$ 。此夹角区的铺丝过程中会有铺丝头与蜂窝干涉碰撞的风险。另外由于蜂窝的抗侧压强度较低,在铺丝过程中压实力的合理选择也是非常重要的,否则会有蜂窝塌陷的风险。因此对于夹层结构的自动铺丝,除了研究材料的工艺参数外,还需要考虑以上两个问题。本文从平板夹层结构的铺放入手,首先在铺丝软件中对蜂窝区的铺放轨迹进行了优化,使纤维的角度偏离和纤维变形满足设计要求,并且铺放过程中避免铺丝头与工装或蜂窝发生相撞,然后对蜂窝夹层结构进行了实际铺放试验,发现了铺放过程中存在的一些制造缺陷,并分析了可能性原因,最终实现了质量较好的铺放。这些工艺缺陷的产生原因分析及解决办法将指导后续更复杂蜂窝夹层结构的铺放。

## 1 蜂窝的模拟分析

如图 1 所示,在铺丝过程中,当铺丝头临近夹角区时,铺丝头可整体旋转以避免其结构元件触碰到蜂窝,但受限于铺丝头本身的相对庞大结构,蜂窝夹角存在极限值。本试验中所用的铺丝头自身夹角为  $122^\circ$ ,如图 2 所示,蜂窝的理论极限夹角为  $58^\circ$ 。但在现实铺放中,一般会预留安全角度(至少  $5^\circ$ ),这种安全角度可防止碰撞发生。本研究中蜂窝设计的夹角为  $20^\circ$ 。另外在模拟过程中需考虑到压实辊的直径和最大变形

量,它也是衡量在夹角区纤维能否良好铺贴的重要参数,本试验中,压实辊的直径为 68.5mm,最大的变形量为 5mm。

对于蜂窝夹层结构,以防止纤维变形严重并且压实辊出现架空等现象,铺放  $\pm 45^\circ$  时分成 5 个区,分别为非夹层区、斜坡区、蜂窝区、斜坡区和非夹层区,如图 2 所示;在铺放  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时分成 3 个区,分别为非夹层区、夹层区和非夹层区,如图 3 所示。

## 2 纤维变形分析

角度偏差分析与纤维变形分析是自动铺丝仿真过程中两个重要的检验步骤。角度偏差分析主要检查每一根纤维束的铺放角度是否在设计偏差范围内,由于本试验中是平板夹层结构,在角度偏差分析中,最大的偏差为  $2.5^\circ$ ,设计认为可以接受。

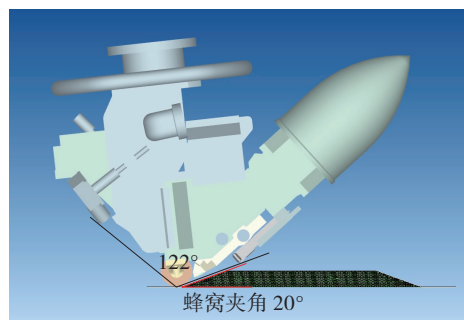
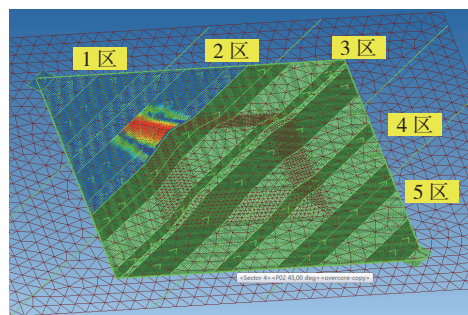
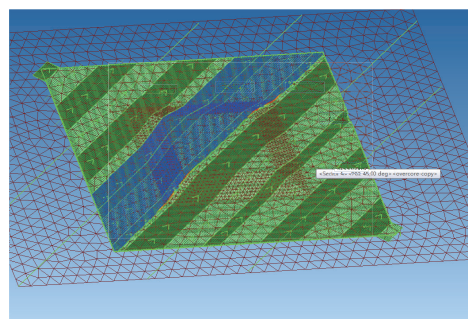


图1 铺丝头自身结构的夹角  
Fig.1 Angle of the placement head

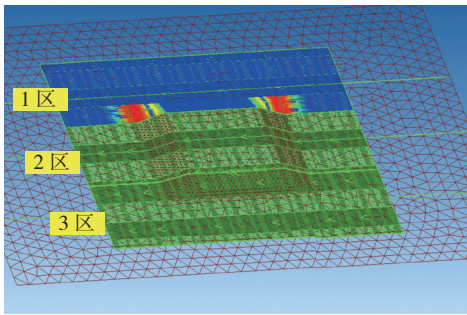


(a) 1区和2区变形分析

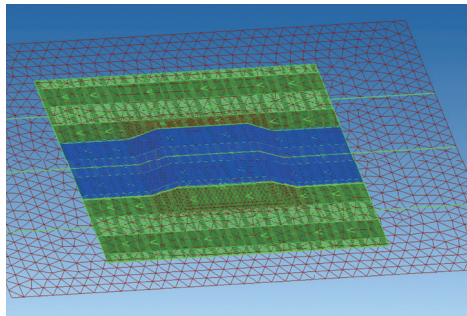


(b) 3区变形分析

图2 铺放 $45^\circ$ 时纤维的变形分析结果  
Fig.3 Deformation of fiber for  $45^\circ$  placement



(a) 1区变形分析



(b) 2区变形分析

图3 铺放0°时纤维的变形分析结果

Fig.3 Deformation of fiber for 0° placement

纤维变形分析关乎到纤维是否能够有效地铺放,如果纤维变形程度大于其材料的允许变形范围,则纤维在实际铺放过程中会发生折皱、架桥、扭曲等缺陷。对于模拟生成的每个丝束,可以计算出任意点的曲率半径,如果该处的曲率半径超出了纤维材料的允许值,则会显示较红的颜色。每个纤维材料的极限值不同,可以通过在平板上进行转变半径试验测得,这里输入的极限曲率半径为1000mm。图2和图3分析显示了45°铺层和0°铺层的变形分析(由于此试验中的结构为四方形,-45°和90°的变形分析与45°和0°的分析结果类似,这里不再分析)。结果显示,对于45°铺放,纤维在蜂窝的转角处变形较大(红色显示部分),这是由于在此区域纤维的曲率半径超过了纤维材料本身的允许范围,与此对应的,在图2(b)中,由于纤维从底面上升到蜂窝上表面时存在一个平坦区,使纤维的变形没有超过材料本身的允许极限,没有出现红色超差的现象。0°铺层时变形严重的区域同样也是蜂窝转角处。

### 3 试验部分

#### 3.1 试验介绍

蜂窝夹层结构的铺放净边界为830mm×830mm,蜂窝尺寸为530mm×530mm,蜂窝高度为35mm,坡度为20°。铺层方式为[0/45/90/135/Core]<sub>n</sub>,共计8层。铺丝过程中的材料体系见表1,实物如图4所示。

整个铺丝过程在中国商飞北京民用飞机技术

研究中心进行。铺丝程序采用Coriolis公司开发的CADfiber进行模拟生成。

试验步骤如下:

(1)将平板工装放置在合适的位置,底脚处用螺栓进行固定;

(2)施加脱模剂,采用喷干净的擦布擦涂,共涂3层;

(3)将靶标放置于模具的靶标位置上,对模具的位置进行校验。校验完成后将校验结果导入CADfiber中。

(4)在CADfiber中按照新的校验文件将模具放置于正确位置,并开始模拟。模拟中定义的丝束间隙为0.5mm,压实力为800N。

(5)将模拟的数控代码导出至铺丝机的人机交互界面,进行程序空走。

(6)空走无误后,进行正式的纤维铺贴。先铺放蜂窝夹层结构的底面,底面完成铺放后,放置胶膜,然后在激光投影协助下放置加工好的蜂窝,再在蜂窝上方放置一层胶膜,打真空袋,在一个负压下保持10min,以保证蜂窝与底面粘结稳固,如图5所示。

(7)进行蜂窝上表面的纤维铺放。

(8)铺放完毕后,打真空袋进行预压实,准备下一步固化。

#### 3.2 铺放缺陷及影响因素分析

通过试验观察,发现蜂窝夹层结构铺放会产生多种类型的缺陷,归纳如下:

(1)蜂窝拐角处有纤维折皱。

如图6所示,纤维在蜂窝拐角处有纤维折皱发生,这可能是由于压实辊在拐角处有个角度突变,压实辊由一个侧面转向另一个侧面时不能全部压实纤维而导

表1 铺放试验所用材料

材料	型号	供应商
Carbon UD tape	M21E	Hexcel
Nomex honeycomb	NH-1-1.8-48	AVIC Composite
Adhesive film	1515-4	Solvay 公司

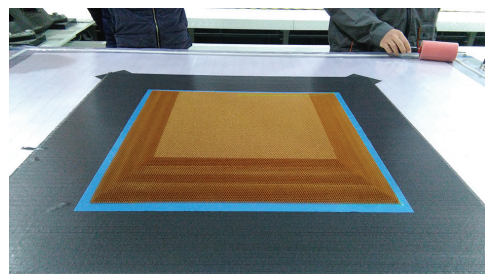


图4 预浸料、胶膜和蜂窝

Fig.4 Prepreg, adhesive film and the honeycomb

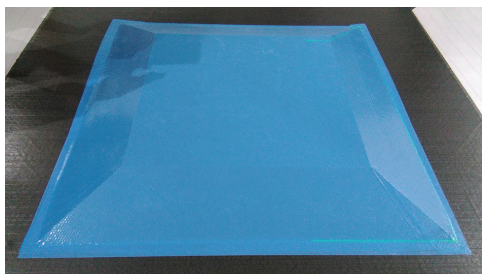


图5 铺放好胶膜并真空压实后的状况

Fig.5 Vacuum debulk after layout of the adhesive film on top of the honeycomb

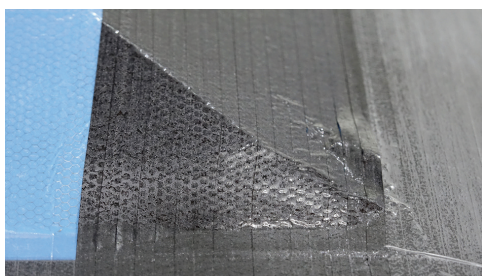


图6 蜂窝拐角处有纤维折皱

Fig.6 Fiber crimp happens at the honeycomb corner

致未压实的纤维起皱。另外为了防止在蜂窝加工时蜂窝发生撕裂,底边会预留 1~2mm 的预留高度,这也会使部分纤维无法与底面充分接触而架空,从而发生扭曲或折皱。

#### (2) 纤维夹角处的架桥。

在铺放时发现的另一个典型缺陷是纤维在上坡的夹角区容易出现架桥,初步分析原因有:

纤维的黏性可能偏低,导致已经铺放压实的纤维会在张力作用下再次与铺贴面分开,如图 7 所示;

在上坡阶段,当压实辊向前运动时会给纤维一个拉伸力,这种拉伸力会随着铺放速度的增加而更加显著,因此降低此处架桥的有效办法之一即适当放慢在此处的铺放速度;

蜂窝的实际铺放位置与数模中并不完全一致,此试验中数模尺寸为 530mm × 530mm,而实际尺寸为 530mm × 521mm,导致在蜂窝坡度的位置处纤维压实效果不理想;

纤维本身的变形能力限制,如前面图 4 (a) 所示,此位置纤维的变形程度超出了纤维的变形能力。以上原因的试验分析发现,蜂窝的实际铺放位置或蜂窝的实际尺寸是引起架桥的主要原因,即蜂窝实际尺寸太小导致纤维过早的爬坡,从而引起架桥发生。

#### (3) 胶膜起泡。

铺丝过程中加热曲线的选择至关重要,加热曲线是铺丝头的加热功率与铺放速度的关系曲线。一般来讲,铺放速度越大加热功率越大,但两者的关系可以在

加热参数里人为定义。如果预浸料加热不足可能会导致纤维的黏性不够,不能良好地贴合在铺贴面上,出现起皱、卷曲等现象。而如果加热功率过大,在铺放中铺丝头可能会启动过热保护而停止加热,这种情况下,预浸料仍然是加热不足而黏性不够。需要说明的是,铺丝头加热过度可能会引起其他缺陷,比如在夹层结构中用到的胶膜容易因温度过高而起泡,造成铺贴表面不平整,图 8 显示了因受热过大而导致的胶膜起皱和起泡。

### 3.3 铺放试验

本研究对蜂窝夹层结构的实际铺放进行了两次试验,在第一次试验中压力力设为 800N,实际铺放速度为 200mm/s,发现了一些典型的缺陷。图 9 显示了在第(1)次铺放试验中蜂窝上方纤维的整体铺放效果,可以看出,在上坡区纤维的架桥严重。另外纤维有多处折皱,这种折皱尤其在纤维带与纤维带之间。根据上节分析原因改进了工艺参数并进行了第 2 次试验。

在第 2 次铺放中,对蜂窝进行了重新加工使其实际

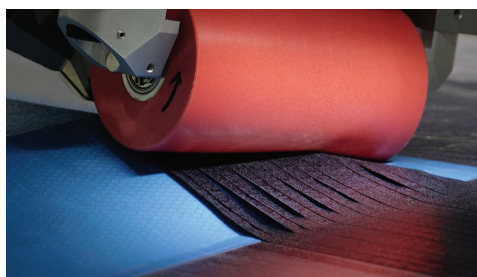


图7 纤维在夹角处的架桥

Fig.7 Fiber bridge at the honeycomb edge

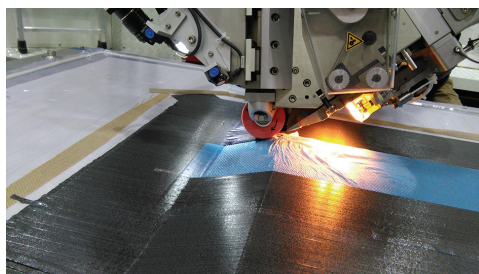


图8 蜂窝表面的胶膜出现气泡现象

Fig.8 Bubble happens on the adhesive film

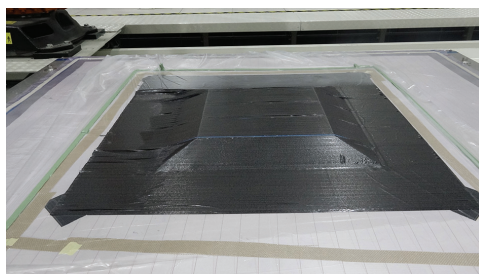


图9 第一次试验中蜂窝表面第一层的整体铺放效果

Fig.9 The first layer layout quality in the first experiment

尺寸与数模尺寸保持一致(尺寸误差在 0.5mm 之内),同时利用纤维定位法保证了蜂窝的放置位置与其在数模中的相对位置一致。另外优化了加热参数,使纤维在铺放时保持合适的黏性。第 3 在拐角处和上坡处增加了压实力,压实力为 1000N,使压实辊在不破坏蜂窝的情况下能够更好地保证纤维与铺贴面的贴合。图 10 显示了在第 2 次铺放试验中纤维在拐角处的铺放效果以及整体的铺放效果。可以发现,通过采取以上工艺改进极大地改善了铺放效果。

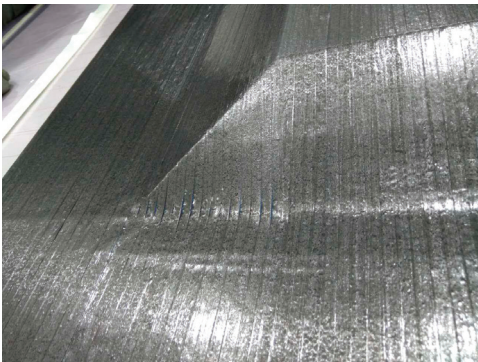


图10 第二次铺放试验中拐角的铺放效果  
Fig.10 Layup quality at honeycomb corner in the second experiment

#### 4 结论

通过对平板蜂窝夹层结构自动铺丝的仿真及实际铺放试验,发现蜂窝夹层制作过程中容易出现的缺陷,并针对这些缺陷进行了模拟分析及工艺改进,最终得到质量较好的夹层结构。在此过程中得出以下经验:

(1)对于蜂窝夹层结构的自动铺丝工艺,对蜂窝的尺寸精度和位置精度要求较高,蜂窝加工后的尺寸需检验,蜂窝的位置可借助激光投影仪进行定位,建议尺寸误差和位置误差都控制在 0.5mm 之内。

(2)在蜂窝上层纤维铺放时,编程中需注意纤维压紧力的设置,既要保证纤维的压实,也要防止蜂窝的塌陷或损伤。

(3)纤维在蜂窝底边处易出现压实不紧、架桥的状况,编程中应注意底边处的铺放速度。此外,蜂窝加工时底边会预留 1~2mm 的预留高度,也会影响底边处纤维的压实,后期试验中需解决蜂窝底边和下壁板的台阶或蜂窝加工时预留高度尽可能小,或采用发泡胶的方式使蜂窝与底面平缓过渡。

自动铺丝技术在国内发展起步较晚,对于工艺性研究还有大量的工作要做,比如材料自身的加热参数、铺放轨迹的优化、压实力等铺放参数的选择、工装改进等。对于强度设计专业来说,需要确认什么样的缺

陷或工艺偏差、多大的缺陷或工艺偏差可以接受。这必须从工艺缺陷对力学性能的影响入手,研究不同缺陷对夹层结构的平拉强度、压缩强度、开口拉伸强度等力学性能的影响,建立一套基于试验数据的评价体系。

#### 参考文献

- [1] FLYNN B W, GESSEL M G, SCHOLZ D B. Advanced technology composite fuselage—manufacturing[R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 1997.
- [2] CROFT K, LESSARD L, PASINI D, et al. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2011, 42(5): 484–491.
- [3] BLOM A W, LOPES C S, KROMWIJK P J, et al. A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(5): 403–425.
- [4] SHIRINZADEH B. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(4): 380–394.
- [5] 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.
- [6] LUKASZEWICZ H J A, WARD C, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup: history, present and future[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 997–1009.
- [7] LAMONTIA M A, FUNCK S B. Manufacturing flat and cylindrical laminates and built up structure using automated thermoplastic tape laying, fiber placement, and filament winding[J]. Sampe Journal, 2003, 39(2): 30–38.
- [8] 还大军, 肖军, 李勇. 复合材料自动铺放 CAD/CAM 软件技术 [J]. 航空制造技术, 2010, 53(17): 42–45.
- [9] HUAN Dajun, XIAO Jun, LI Yong. CAD/CAM software technology for composites automated placement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 42–45.
- [10] 安鲁陵, 杨玉岭, 肖军, 等. 复合材料纤维自动铺放过程碰撞干涉检测 [J]. 宇航材料工艺, 2007(2): 51–54.
- [11] AN Luling, YANG Yuling, XIAO Jun, et al. Study of collision and interference inspection algorithm in automatic composite fiber placement[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007(2): 51–54.
- [12] 王天玉, 梁宪珠, 杨进军. 飞机复合材料构件自动铺带/丝束铺放典型设备 [J]. 航空制造技术, 2008, 51(4): 42–44.
- [13] WANG Tianyu, LIANG Xianzhu, YANG Jinjun. Typical equipments of auomated tape/fiber layup for aircraft composite structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(4): 42–44.

通讯作者: 原崇新, 博士、高级工程师, 研究方向为复合材料制造技术, E-mail: yuanchong2012@163.com。

(责编 大漠)