

基于先进拉挤工艺的 C 型梁预成形变形分析

Preforming Analysis for C-Type Beam by Advanced Pultrusion Process

南京航空航天大学材料学院 齐俊伟 肖健 邓磊明 程琨 窦冲 肖军

[摘要] 以预浸料为原料的先进拉挤(Advanced Pultrusion)采用预浸料预变形折弯定型-热固化成形,是制造高性能低成本复合材料型材的一种先进自动化工艺。基于预浸料变形特征分析,以 C 型梁为对象建立了预成形分析的理论模型,通过实验验证了模型和方法的正确性;为进一步开展其他复合材料型材的先进拉挤研究与应用奠定了基础。

关键词: 先进拉挤 C 型梁 预成型 变形分析

[ABSTRACT] Advanced pultrusion is an automatic processing for manufacturing high performance and low cost composites section components with prepreg by preforming, hot pressing and curing steps. Based on deformation analysis, a theory model for C-type beam is set up. An experiment is conducted to verify the model and analysis method which will build the foundations for the advanced pultrusion with other section components.

Keywords: Advanced pultrusion C-type beam Preforming Deformation analysis

预浸料拉挤成形也称先进拉挤(Advanced Pultrusion, ADP)成形,即预浸料在牵引力作用下,通过层叠、折弯成需要的产品形状,并在模具中完成预固化,通过步进式连续拉挤可以生产出长度不受模具长度限制的复合材料型材。该技术综合自动铺放成形、热压固化等工艺过程的优势,使拉挤进程实现全程自动控制,可以制备高性能、低成本的各种复合材料型材。由于采用预浸料,其纤维含量及均匀性远优于传统的湿法纤维束拉挤,有效地提高制品的力学性能,已经用于 A300、A350 等飞机。目前开展 ADP 研究与应用的只有日本 JAMCO 公司,国内相关研究刚刚起步,其工艺方法、装备技术、成形机理与质量控制亟待研究。本文立足于南京航空航天大学复合材料工程自动化技术研究中心前期已研制的 C 型梁 ADP 热压原理样机,研究了由平直预浸料变形为 C 型截面型材的变形机理,建立了分析原理和变形路径模型,研制了专用预成形试验装置,实现了由平直预浸料-预成形-热压固化-碳/环氧 C 型梁的制造工艺验证。

1 基于 ADP 工艺的 C 型梁预成形分析与初步的模型计算

预浸料拉挤预成形是根据所需成形截面及铺层设计,将裁切设定宽度的预浸料卷材经过一系列的辊轮相互铺叠、压实(驱除气泡)、折弯的过程。变形的实现与控制是关键技术,变形分析是研究的基础。鉴于 C 型长桁是复合材料加筋壁板中常用的结构之一,制品既存在平面又存在折弯部位,通过平直卷材来制取 C 型截面梁,具有比较典型的意义;同时,预成型的 C 型梁可以再经二次成形制备如 I 型梁、 π 型梁等,是 ADP 预成形的重要基础。为便于分析和实验研究,结合已研制的 ADP 热压原理样机,本文以 30mm × 50mm C 型截面梁(图 1)为具体对象开展研究,而方法具有一般性。

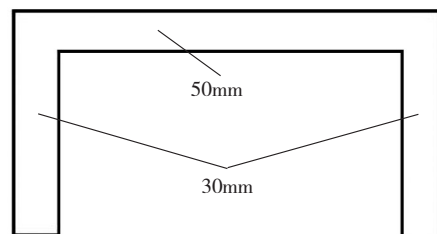


图1 C型梁截面示意图
Fig.1 C-type beam section

ADP 工艺中的预成形段以预浸料卷材展平始,经连续扭转变形形成所需形状截面终。就本文研究的对象而言,图 2(a)较为直观地给出这一过程。从表面上看,这一过程类似于金属冷轧型材的过程,但实际则相差甚大:预浸料在沿纤维方向受拉时呈现较大的刚性、不易变形。反向受压及沿预浸料宽度方向的刚度和强度几乎为零,变形开展不当很容易发生屈皱、拧结和撕裂现象。为了便于分析,假设预浸料沿宽度方向是由若干独立的等宽细分连续纤维束组成。在预浸料由平面连续扭转变形形成所需形状的过程中,连续的纤维束必须从始至终严格保证处于受拉或接近受拉的临界状态才能保障复合材料型材的质量。而对于拉伸刚性极大的纤维(尤其是用于 ADP 的碳纤维)而言,几乎无法通过拉伸

变形来补偿变形过程的线长变化,因此,对于参与变形的纤维束,变形过程中从起点到终点的路径长度一致则成为必须保证的首要条件。其次,为保证预浸料扭转过程中不发生拧结和撕裂现象,每一纤维束在所经过路径中,不得产生对与其相邻纤维束的横向挤压及分离。

通过对图 2 (a) 的进一步分析,可以发现 C 型截面预成形过程中的变形特征,腹板部分 50mm 的预浸料没有发生变形,只是两边 30mm 翼缘预浸料需要有一个 90° 的扭转变形。考虑 C 型梁的对称性,只将其中的一侧翼缘作为研究对象。沿用前面提出的纤维束的概念,如图 2 (b) 所示,将翼缘划分为 1~11 束纤维。为了便于分析将这段扭转的翼缘置于端面为正方形的 $ABCD-A_1B_1C_1D_1$ 长方体中,初步给定长方体长边长度(即变形长度)为 500mm。

分析图 2 (b),可以发现:

- (1) 几何参数, $AD=500\text{mm}$, $A_2B_2=DD_1=30\text{mm}$ 。
- (2) A_2B_2 和 DD_1 为翼缘变形的始边和终边。
- (3) A_2B_2 和 DD_1 各自 10 等分的基准点分别以直线相连得到的 1~11 号线段,取 x 为线段 AA_2 的长度, i 为图 2 (b) 中的纤维基准点的编号,各纤维束路径的长度为:

$$L_i = \sqrt{(30 - x - 3 \times (i - 1))^2 + (30 - 3 \times (i - 1))^2 + 500^2}$$

($i=1, \dots, 11$)。

将终边 DD_1 位置固定,始边 A_2B_2 从 AB 开始向 A_1B_1 平移,即 x 值从 0 至 30 变化分别计算一组不同的 L_i 值。以 x 为设计变量、一组线段长度 L_i 中的最长与最

短线段长之差的最小值为目标函数 $g(x) = \min[L_{\max}(x) - L_{\min}(x)]$, $x > 0$ 为约束条件,采用黄金分割法进行优化设计,计算结果显示,当 $x=30$,即 A_2B_2 与 A_1B_1 重合时结果最优, $L_1 = L_{11}$, 1~11 号纤维束的计算长度 $L_i - 500$ 见表 1。

从优化结果结合图 2 (b) 观察,当 A_2B_2 与 A_1B_1 重合时,1 号线和 11 号线的长度为长方体的两条等长面对角线,无论长方体长边的长度如何变化,总有 $B_1D_1 = A_1D$ 。同时,11 号线 A_1D 与未变形的腹板区相邻,等于未变形区纤维束长度,取 $A_1D = 500.899\text{mm}$ 为基准值,计算 $L_i - 500.899$ 值见表 1,负值表示路径长度小于基准长度,纤维会出现松弛的现象。从数据及图 2 (b) 可以看出,由于 1~11 号基准点是关于 6 号基准点对称的,在下文的计算中,只列出 1~6 号基准点纤维路径长度较基准长度 $A_1D = 500.899$ 的变化。

2 翼缘扭转时宽度变化的分析及改进后的路径长度计算

沿线段 BC 以距离为 50mm 进行截面等分,计算截面上 1 号纤维和 11 号纤维截点之间的相对距离,为在此截面上的预浸料的横向距离。计算结果显示,横向距离从 A_1B_1 (30mm) 逐渐变小至 1/2 平面处达到最小 ($15\sqrt{2}\text{mm}$) 后又逐渐变大直至 DD_1 (30mm) 变宽的过程,图 3 为翼缘横向距离被压缩的变化情况。

从上面分析可见当翼缘发生扭转时, B_1D_1 和 A_1D 两边界线在各个截面上的截点连线长度并不相等。纤维束在没有附加约束时,一方面由前面计算结果处在

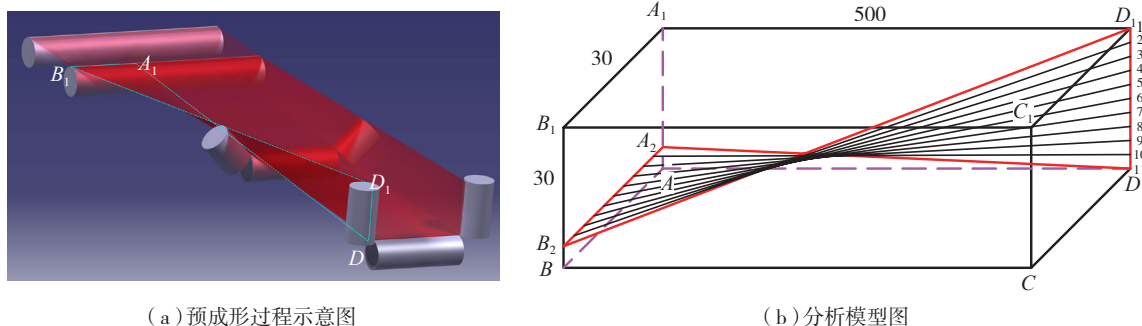


图2 预成形过程示意及分析模型图
Fig.2 Preforming processing and analysis model for C-type beam

表1 始边与终边远点等高时纤维路径长度

基准点编号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
长度变化 $L_i - 500/\text{mm}$	0.899	0.737	0.612	0.522	0.468	0.450	0.468	0.522	0.612	0.737	0.899
长度变化 $L_i - L_{11}/\text{mm}$	0	-0.162	-0.287	-0.377	-0.431	-0.449	-0.431	-0.377	-0.287	-0.162	0

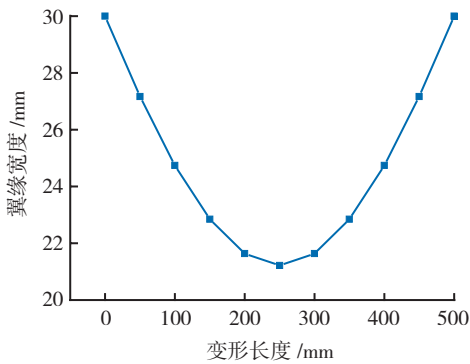


图3 翼缘宽度沿变形长度的关系
Fig.3 Relationship of the width of cross section along the performing distance

2~10 号线位置的纤维束会有松弛现象;另一方面扭转过程中处在中部的纤维束会受到边缘纤维束的挤压并在全长 1/2 处将会发生最大的挤压状态。为此拟采用在长度 1/2 处的平面,设置一个展宽的约束,使其受挤压的状态得到舒展。如图 4 (a) 所示,按照 1~11 号基准点的纤维路径等长的原理,将 6 号线在 1/2 长度处断开并向图中圆弧中点处迁移,使得断开的 6 号线两段之和等于两边缘线的基准长度,以 6 号线的断点和 1、11 号线中点得到的基准圆弧的半径为 $r = 15/\sqrt{2}$ mm,弧长为 $s=33.33$ mm,大于翼缘宽度 30mm,纤维束可能产生分离。

以 1、11 号线中点连线为弦,弦长 $c = 15\sqrt{2}$ mm,弧长 $s=30$ mm,构造设计圆弧。设 θ 为设计圆弧所对应的圆心角, r 为半径,则有关系式 $\sin(\frac{\theta}{2}) = \frac{c}{2r}$, $\theta = \frac{s}{r}$,代入 c, s 值解得设计圆弧参数:(1) 半径 $r=10.77$ mm ;(2) 圆心角 $\theta=2.7906$ rad。

由等长的原理取得的标准圆弧与设计圆弧轮廓线对比如图 4 (b) 所示,其中红色圆弧为设计的 1/2 平面约束的轮廓线。

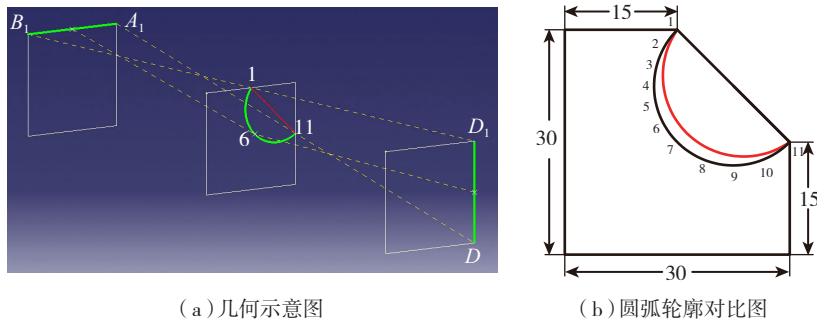


图4 翼缘1/2长度处增加展宽约束的几何示意及圆弧轮廓对比
Fig.4 Section 1/2 constraint for stretch and outline comparison

将 1~6 号路径在与设计圆弧的相应等分点连接后形成的折线路径长度进行计算,结果如表 2 所示。

表2 1/2平面约束轮廓设计后纤维路径长度变化

基准点编号 i	1	2	3	4	5	6
长度变化 L_i-L_{i1}/mm	0.000	-0.124	-0.164	-0.160	-0.143	-0.135

在中间平面的 1/2 平面处增加强制展宽约束后,预浸料的横向挤压得到舒展。同时,计算结果显示,纤维的最大松弛量减小约 60%,路径长度也趋于一致。

3 翼缘扭转变形参数的进一步优化

根据表 2 计算结果,纤维路径的长度差最大值为 0.164mm,2~6 号计算值均为负值,即 2~6 号纤维仍处于少量的松弛状态。继续沿用上节设计圆弧的方法,在 1/4 和 3/4 平面处增加两处弧长为 30mm,弦长为该处 1、11 号线截点距离的约束,约束曲线见图 5 的圆弧曲线 a ,将 2~6 号路径在与设计圆弧 a 的相应等分点连接后重新计算线长,2~6 号线纤维路径长度较基准长度变化量如表 3 所示。

计算结果显示 2、3 号线松弛量进一步减小,4~6 号线路径长超过基准长度,且从 4 至 6 号线纤维路径长度处于递增趋势。实际应用中,在张力作用下,遵循能量最低原理,6 号线处于不稳定平衡,而 4 号线和 5 号线则分别可能会向 3 号线和 4 号线移动,纤维束可能会发生横向挤压。

如图 5 所示,重新设计在 1/4 和 3/4 平面处的约束轮廓线 $b、c、d$,曲线 b 为半圆弧,曲线 c 为两圆弧加中间与之相切的线段,曲线 d 为三段直线段,并且三种方案的总线长均为 30mm。

上述四种方案,由曲线 a 约束轮廓线得出表 3 的结果,曲线 a 和曲线 d 是两种边界情况。为了得到尽可能优化的结果,需要在这两个边界中间寻找优化的轮廓线。通过优化得到 1/4 和 3/4 平面处的约束轮廓线最优方案为曲线 c 。具体参数为:两段半径 $r=5.5$ mm 的 1/4 圆弧加连接两段圆弧的直线。此时,1~6 号纤维路径长度较基准长度变化量如表 4 所示。

从表 4 的数据可以看出,数值较表 2 有了很大改善,同表 3 相比都是负值,即这些纤维的路径长度均短于基准长度,此时中间部分的纤维呈微量的松弛状态。

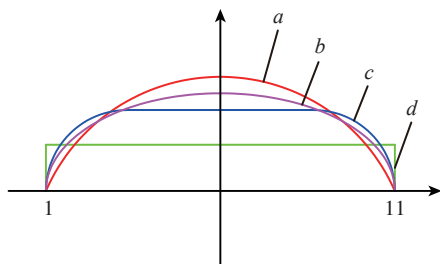


图5 1/4和3/4平面处约束各轮廓线对比示意图
Fig.5 Outline comparison in section 1/4 and 3/4

表3 增加1/4和3/4圆弧 α 约束后纤维路径长度变化

基准点编号 i	1	2	3	4	5	6
长度变化 $L_i - L_{11}/\text{mm}$	0.000	-0.086	-0.045	0.046	0.127	0.159

表4 采用圆弧 c 的1/4和3/4约束后纤维路径长度变化

基准点编号 i	1	2	3	4	5	6
长度变化 $L_i - L_{11}/\text{mm}$	0.000	-0.059	-0.022	-0.028	-0.036	-0.034

按翼缘扭转变形最终优化的参数,可得如图6所示的预浸料变形过程。

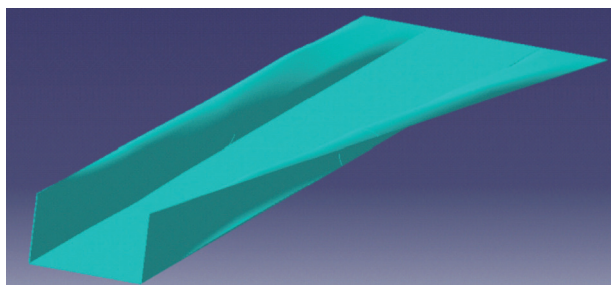


图6 优化设计约束后预浸料变形过程示意图
Fig.6 Deformation procedure after constraint optimization

4 ADP 工艺的 C 型梁预成形工程方案

在预成形的实际工程应用中,需要考虑预浸料的连续输送和尽量减少过程中材料的损伤,通常采用辊轮使预浸料在输送过程中发生扭转等变形以达到所需截面形状,根据上文扭转参数计算结果,提出预成形的工程方案设计如图7所示。

基于一定厚度材料在 90° 折弯时,折角内侧材料受压,外侧材料受拉及预浸料的变形原理,需要控制一次折弯预浸料的厚度,一次折弯过厚预浸料可能引起折角处内侧堆叠,外侧开裂。在不影响成形制品质量的情况下,又需要一次折弯尽可能多的折弯预浸料,以保证设备的效率。图7中给出了三套折弯导向机构的工程方

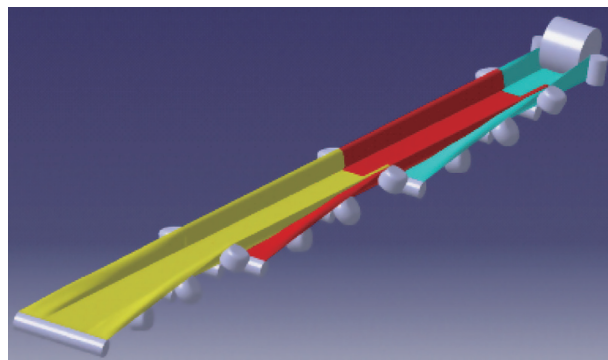


图7 三套折弯导向装置配合三维图
Fig.7 3D simulation with 3 sets of deformation facilities

案模型,在单套折弯辊无法满足制品厚度时,可以通过投入新的折弯辊组实现厚度的增加。

5 预成形试验及 ADP 成形验证

根据前面分析及工程模型,设计了专用预成型折弯试验装置,并在南京航空航天大学复合材料工程自动化技术研究中心 ADP 原理样机进行联合试验,如图8所示,在单套折弯装置上实现了一次6个铺层的试验,经连续成形热压固化所得型材达到设计要求。

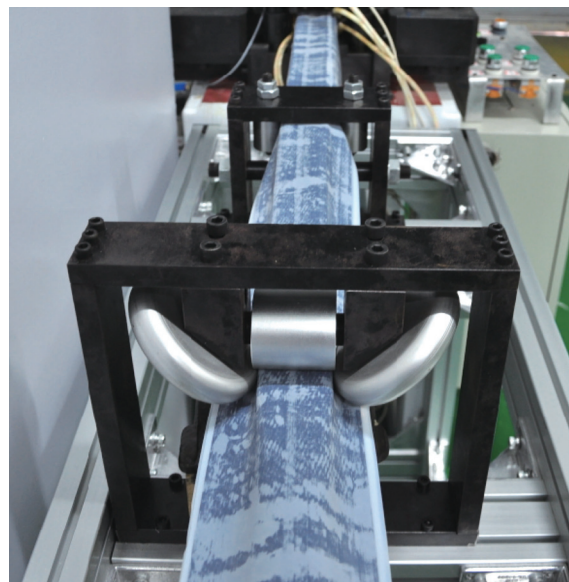


图8 预浸料预成形实物图
Fig.8 Prepreg after preforming

现阶段研制的 C 型梁由双向织物预浸料和单向预浸料叠加而成,从而使型材有较好的综合性能,采用八层 12500 碳纤维 / 环氧单向预浸料、五层 W3021 碳纤维织物预浸料拉挤成形的 C 型梁复合材料型材如图9所示。所制得的 C 型梁表面光滑,纹理均匀(表明没有畸
(下转第 95 页)

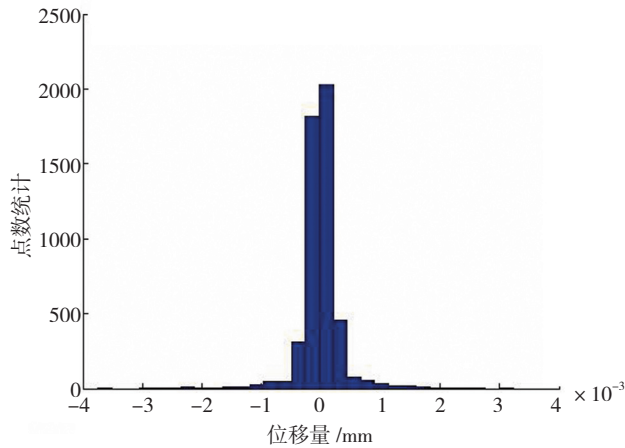


图7 第二次型腔优化注塑仿真位移场分布图

Fig.7 Displacement field distribution of the second cavity optimization injection molding simulation

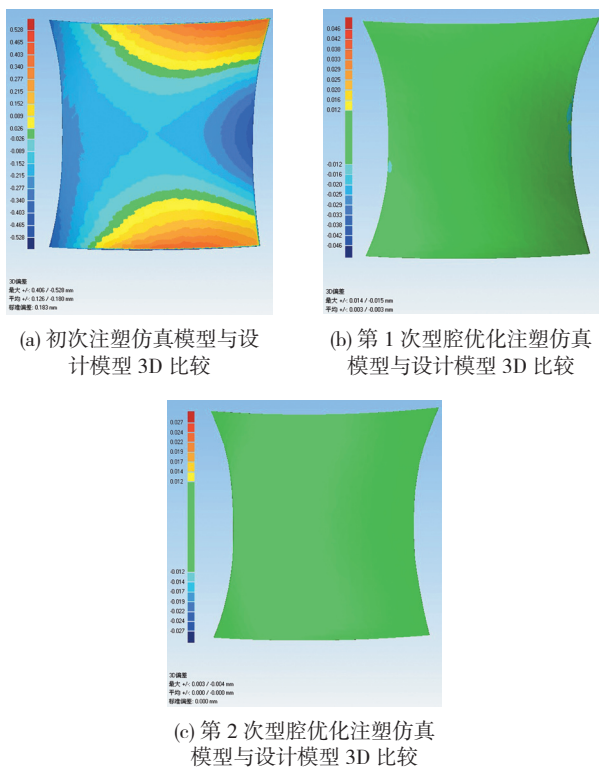


图8 叶片3次注塑仿真模型与设计模型3D比较

Fig.8 3D comparison between three-time injection molding simulation models and theoretical model of blade separately

作为叶片模具的设计造型腔。

5 结论

本论文针对低转速研究用压气机试验台所用树脂叶片注塑成型控型的难题,提出基于位移场的模具型腔反变形优化方法。通过对树脂叶片注塑过程进行数值模拟,得到了叶片注塑仿真位移场,并用反变形方法对叶片注塑模具进行了虚拟修模。通过仿真实验验证,与

优化前的型腔相比,优化后的型腔能够显著提高叶片注塑成型精度。论文研究结果可作为树脂叶片注塑成型高精度控型的理论指导;并可以论文研究结果作为基础,下一步结合注塑工艺优化技术对叶片注塑成型高精度控型开展深入研究。

参考文献

- [1] 陈光. GE公司的低转速研究用压气机与涡轮试验器. 燃气涡轮实验与研究, 1995(4):1-3.
- [2] 邵健, 吕震, 柯映林. 基于特征技术的注塑模具型腔设计制造系统. 浙江大学学报(工业版), 2006, 40(3):438-442.
- [3] 张丹, 张卫红, 万敏, 等. 基于位移场仿真与特征参数提取的精铸模具型面逆向设计方法. 航空学报, 2006, 27(3):509-514.
- [4] 詹春毅, 岑运福. 塑料注射成型中充模阶段熔体流动的研究. 轻工机械, 2006, 24(2):26-29.
- [5] Hiber C A, Shen S F. Flow analysis of the non-isothermal two-dimensional filling process in injection molding. Israel Journal of Technology, 1978(16):248-254.
- [6] Hiber C A, Shen S F. A finite-element/finite-difference simulation of the injection molding filling process. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1980(7):1-32.

(责编 夏宛)

(上接第89页)

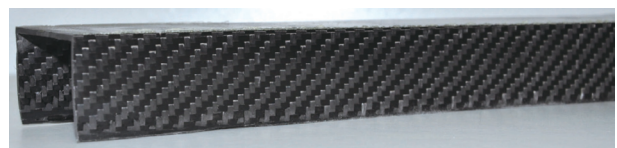


图9 ADP成形的复合材料C型梁

Fig.9 Composites C-type beam by ADP

变变形), 直线度达到 0.5mm/m、C 型梁折角 $90^\circ \pm 0.5^\circ$, 力学性能优良。从而验证了理论分析的正确性和设计装置的可行性。

6 结束语

预浸料拉挤成形是一种低成本复合材料制造新方法, 国内尚属空白、亟待开发研制。本文以 C 型梁为研究对象, 提出预浸料连续变形的纤维束路径设计原理, 分析 C 型梁的预成形过程并建立分析模型, 构建预成形变形的路径并进一步优化得到符合实际要求的数据。通过预成形机构设计和拉挤成形试验, 验证这一方法的工程可行性及应用价值。根据这一原理及分析方法, 在完善 C 型梁 ADP 制造工艺研究的基础上, 进一步开展其他类型截面的预成形研究, 以形成具有自主知识产权的预浸料拉挤复合材料型材制造和应用技术, 填补国内空白, 形成研发和生产能力。

(责编 可岚)