

复合材料T型桁条的VARTM成型工艺研究

申儒林 刘和华 邹湘伏 龚艳玲

(中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

文 摘 采用真空辅助树脂转移成型(VARTM)方法制备机翼T型桁条具有很高的性价比,但是桁条节点处截面特征不利于成型过程树脂的均衡流动。本文针对T型桁条三角区树脂富集而边缘区浸润不足的问题,采用模具拐角三角区纤维填充方法,优化VARTM工艺参数,提高桁条的力学性能。研究了工艺方案对T型桁条各部位厚度均匀性的影响;采用光学显微镜观测桁条微观形貌;采用灼烧法定量分析孔隙率和纤维体积分数;采用万能材料试验机测试桁条力学性能。结果表明,本文纤维填充VARTM工艺成型的T型桁条具备良好的厚度均匀性、较高的纤维体积分数和较低的孔隙率以及良好力学性能,桁条的抗弯能力提高了15.72%,孔隙率低于1%(0.9%)。

关键词 VARTM, T型桁条, 复合材料, 玻璃纤维, 孔隙率, 纤维体积分数

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.008

Study on VARTM Forming Process of Composite T-shaped Stringer

SHEN Rulin LIU Hehua ZOU Xiangfu GONG Yanling

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) was a cost-effective method for fabricating wing T-shaped stringer, but the cross-section characteristics of the stringer were not conducive to the balanced resin flow during the molding process. Aiming at the problem of resin enrichment in triangle area of T-shaped stringer but insufficient wetting in edge area, the fiber filling method of corner triangle area of mold was adopted in this paper to optimize VARTM process parameters and improve the mechanical properties of T-shaped stringer. The influence of process scheme on the thickness uniformity of each part of stringer was studied. Optical microscope was used to observe the microstructure of the stringer. Moreover, the void content and fiber volume fractions were quantitatively analyzed by burning method. Besides, the mechanical properties of the stringer were tested by universal material testing machine. The results show that the T-shaped stringer formed by VARTM process has good thickness uniformity, high fiber volume fractions, low void content and good mechanical properties, the bending resistance of the stringer is increased by 15.72% and the void content is less than 1% (0.9%).

Key words VARTM, T-shaped stringer, Composite, Glass fiber, Void content, Fiber volume fractions

0 引言

复合材料因其比强度和比模量高,耐疲劳性和耐腐蚀性好,抗断裂性能强等特点,被广泛应用于航空航天,海洋船舶,军事,能源,体育等领域,在航空制造方面,商用飞机的复合材料占比越来越大,复合材料成型工艺也越来越多样化,目前大中型商用飞机主要采用预浸料/热压罐成型工艺制造,该工艺相对成熟,产品质量安全可靠,但其制造成本较高,原

始投资大,无论是材料本身,还是配套设备都价格不菲。为降低制造成本,轻型飞机和无人机通常采用手糊成型工艺,而手糊工艺劳动强度大,效率低,产品力学性能相对较低。VARTM工艺不但有较高的生产效率和产品质量,原材料和工艺设备价格也都较低,因此在航空航天领域潜力巨大,尤其是轻型飞机和无人机零部件成型。

日本宇宙航空研究开发机构^[1](JAXA)采用

收稿日期:2024-07-18

基金项目:湖南省科技创新重大项目“通航国产复合材料工艺与验证技术研究(2021GK1024)

第一作者简介:申儒林,1968年生,副教授,博士研究生,从事复合材料VARTM工艺成型与材料自修复研究工作。Email:2325679852@qq.com

通信作者:邹湘伏,1975年生,高级工程师,硕士,从事复合材料成型与轻型飞机研发工作。Email:xfzou32@126.com

VARTM工艺,研究了平板件,复杂零部件,组件以及小型乘用车机翼壁板的成型工艺;KUNDAN等^[2]采用VARTM工艺制造T型拉力试件,梁式拼接接头,翼盒等机翼零部件,并在室温干燥,高温湿润和低温干燥三种情况下测试了它们的孔隙率和力学性能。上述研究中,均存在树脂流动不均匀,浸润效果不理想等问题,特别是在制造大型异形件时,在边缘处容易出现干斑,贫胶等缺陷,而在拐角处则会出现树脂富集等问题。王长春等^[3]研究了VARTM工艺注模方式对航空复合材料管道的浸润效果和注模时间的影响,结果表明线注射方式可得到更高的充模效率和更均匀的树脂流动前锋;崔敏等^[4]采用主体阳模的VARTM工艺,制备了复合材料贮运发射箱箱体试验件并测量其相关参数,验证了VARTM工艺制造箱体的有效性及可行性;ROBERT等^[5]详细介绍了采用VARTM工艺制造全复合材料结构小型无人机(UAV)的过程并对无人机进行了风洞实验,结果表明该工艺极大降低了无人机的结构复杂性,提高了鲁棒性和坠毁生存能力;RODNEY等^[6]采用VARTM工艺设计制造了垂直起降无人机的中心机身部件,保证产品质量安全可靠的同时降低了其生产成本。

机翼是一种典型的飞机零部件,机翼桁条是连接翼肋和蒙皮的重要部件,它的主要作用是支持蒙皮,并与蒙皮一起把局部空气动力传递给翼肋,提高蒙皮的抗剪和抗压稳定性,同时能更好地承受机翼的扭转和弯矩。T型桁条是最常见的桁条形式之一,其制造也容易产生工艺缺陷^[7]。T型桁条的腹板和缘板的拐角处,在铺贴纤维时会出现截面类似三角形的无纤维区,该区域在VARTM工艺充模过程中将会形成树脂流通的真空通道,致使树脂从注入口,优先通过该通道快速流到抽气口,而没有完全浸润边缘处的纤维。当制件较大时,缘板部分区域就会因为浸润不足而出现干斑,贫胶等缺陷。预浸料/热压罐工艺制造T型桁条常采用硬模/硬模或硬模/软模的组合模具方案^[8-10],不但工艺成本高,而且还会因为硬模传力不均和软模刚度不足而产生空腔和尺寸精度差等问题^[11-13]。采用VARTM工艺制造T型桁条则不存在上述问题。

为此,本文综合预浸料/热压罐工艺特点,研究T型桁条的VARTM成型工艺,采用硬模/硬模的模具组合方案,提高桁条的尺寸精度,简化桁条的成型工艺,降低制造成本。针对VARTM工艺制造异形件时存在的树脂流动不均匀,边缘浸润不到位的问题,本文在模具拐角处填充纤维,防止出现真空通道,改善树脂的流动效果。通过T型桁条三角区域的微观结构观测,弯曲强度测试,以及孔隙率和纤维体积分数

的检测,验证T型桁条的VARTM工艺成型方法。

1 实验

1.1 材料和设备

试样制备用E-LT无捻粗纱玻璃纤维复合毡,0°/90°双向编织加短切原丝层,来自深圳博业工程技术有限公司,密度2.50 g/cm³,弹性模量18 GPa,拉伸强度4 800 MPa;2511-1A/2511-1 BM环氧树脂/固化剂组合,由上纬(天津)风电材料有限公司生产,室温下混合后黏度为0.25 Pa·s,固化后密度为1.14 g/cm³;桁条抗弯强度试验采用电子万能试验机测试,长春试验机研究有限公司;桁条三角区域微观结构观测采用Leica DM ILM倒置金相显微镜,来自德国徕卡(Leica)仪器有限公司;测量孔隙率和纤维体积分数采用KSL-1400X-A3箱式马弗炉灼烧桁条样品,由合肥科晶材料科技有限公司生产。

制备试样的模具根据试样尺寸及形状设计加工而成,采用两块长方体玻璃半模组合而成,以便透过模具观察充模过程中T型桁条腹板和缘板内的树脂流动情况,半模的宽、高、长为30 mm×40 mm×200 mm。

1.2 试样制备

T型桁条结构如图1所示,整体上的结构包括中间的腹板和两侧的缘板。模具由两根L型筋条和一块底板组成,两根L型筋条“背靠背”安装,为保证T型桁条结构强度和厚度均匀性,在L型筋条下再放置一层底板。

桁条的三角区域填充从E-LT玻璃纤维布上抽取丝束,裁剪成合适的长度,沿模具长度方向紧靠模具放置在纤维布的拐角处,按压左右半模使纤维布尽可能紧密贴合,同时保证三角区域的填充纤维丝束不移位。

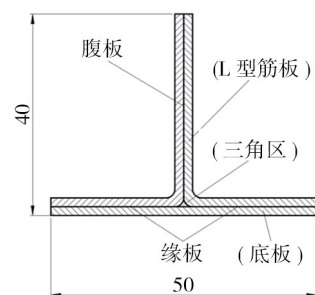


图1 T型桁条尺寸结构示意图

Fig. 1 Dimension and structure diagram of T-shaped stringer

采用VARTM工艺制造T型桁条时,在左右半模的L形表面各铺设一层干燥的玻璃纤维布,然后将左右半模“背靠背”放置,再铺设一层纤维布在底模上,纤维布的长宽应留有余量延伸超出半模边缘,如图2所示,防止两半模之间或半模与底模之间形成空隙,

进而形成树脂流动通道,同时也保证了T型桁条的尺寸和形状精度。在底模工作区域外粘贴密封胶条,放置注胶座,铺贴真空袋,将模具及纤维整体包覆其中,插入注胶管道,树脂注入口垂直于纸面向内,相应的抽气口在模具另一端(图中未显示)。

T型桁条试样的制备,均在-0.92 bar的相对真空下注入树脂,充模完成后,关闭树脂注入口和抽气口管道,将桁条在18℃下自然固化12 h后送入电热鼓风干燥箱中,80℃加热固化8 h,完成后取出脱模,切割,修边,得到桁条试样。

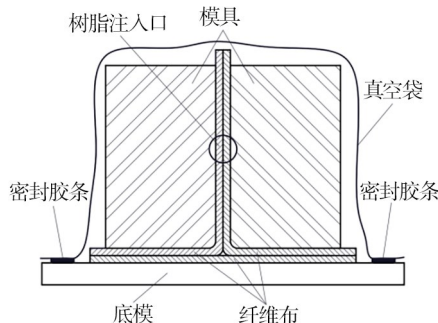


图2 VARTM工艺制造T型桁条实验布局

Fig. 2 Experimental layout of T-shaped stringer manufactured by VARTM process

桁条试样长度均为200 mm,截面尺寸如图1所示。分别制备了填充纤维和不填充纤维两种试样,以便观测分析T型桁条三角区域填充前后树脂的流动特性,研究其力学性能特点。

1.3 试验方法

1.3.1 厚度均匀性测试

测量T型桁条厚度均匀性时,将桁条在长度方向上分为6份,如图3所示,以图示左端面为基准,距离左端面1 mm为起始测量点,每间隔33 mm测一组厚度值,分别测量腹板和缘板上各两点的厚度^[14]。

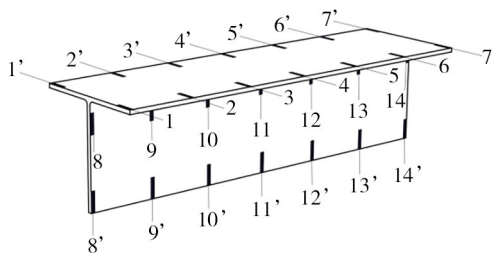


图3 T型桁条各测厚点标号

Fig. 3 Marks of thickness measuring points of T-shaped stringer

1.3.2 微观结构观察

观察桁条的微观结构时,将三角区域填充前后的T型桁条,切成厚度约2 mm的样品,依次使用61、44、38、23、18、13和10 μm的砂纸对每个样品的三角区域进行打磨,打磨完成后,将样品三角区域置于Leica DM ILM倒置金相显微镜下观察其微观形貌,

放大倍数50倍。

1.3.3 抗弯性能测试

桁条的抗弯性能采用非标准试验方法测量,对填充纤维和未填充纤维的T型桁条进行三点弯试验^[15],桁条两端用环氧树脂砌块^[16],便于放置在试验台上,桁条中间跨度为140 mm,如图4所示。为尽可能减小局部压溃现象给实验带来的影响,采用直径20 mm的压头,以1.25 mm/min的速度匀速加载。

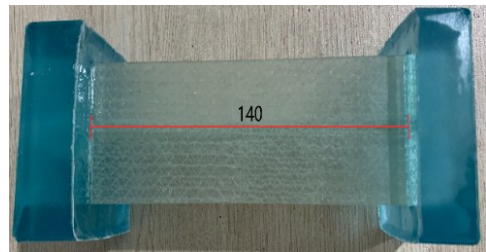


图4 T型桁条弯曲试样

Fig. 4 Specimen for bending test of T-stringer

1.3.4 孔隙率和纤维体积分数测试

孔隙率和纤维体积分数是影响复合材料力学性能的重要参数,本文按照ASTM D2734—16实验标准测量VARTM工艺下T型桁条的孔隙率^[17]。

$$V = 100 - M_d \left(\frac{R}{D} + \frac{r}{d} \right) \quad (1)$$

式中, V 表示复合材料孔隙率; M_d 为复合材料测量密度; R 为复合材料中树脂质量百分比; D 为树脂密度; r 为复合材料中纤维质量百分比; d 为纤维密度。

上述参数中 R 和 r 需要通过试验获取,采用灼烧分解树脂基体的方法测量复合材料各组分含量,按照ASTM D2584—18标准进行试验。由于对桁条三角区域的填充并不影响其他区域的孔隙率和纤维体积分数,因此本试验随机在填充纤维和未填充纤维的T型桁条的腹板上切下4块25 mm×25 mm的样品,另以一块Φ10 mm×20 mm的纯树脂样品作为对照测树脂碳化率,将样品送入马弗炉中以565℃的温度加热0.5 h,直至树脂完全碳化,称量样品灼烧前后的质量变化,去掉一个偏差最大的样品的值,取其余3个样品的平均值。按照ASTM D3171—15试验标准计算样品中树脂和纤维的质量百分比。

$$R = \frac{M_i - M_f}{M_i \times (1 - m_d/m_i)} \times 100 \quad (2)$$

$$r = \frac{M_f - M_i \times m_d/m_i}{M_i \times (1 - m_d/m_i)} \times 100 \quad (3)$$

式中, M_i 为样品的初始质量; M_f 为样品灼烧后的残留质量; m_d 为纯树脂样品灼烧后残留质量; m_i 为纯树脂

样品的初始质量。

纯树脂灼烧后的碳化率为 m_d/m_i , 如果树脂灼烧后分解为挥发性物质, 则 $m_d = 0$, M_i 即为样品中纤维的质量, 上式(2)(3)简化为:

$$R = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (4)$$

$$r = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 树脂流动性分析

未填充三角区域时, T型桁条的充模过程如图5所示。透过T型桁条的透明模具可以清楚看到树脂优先通过真空通道并浸润其周围纤维, 从树脂注入端到抽气端呈现出锥形的浸润区域。虽然纤维布最终仍然能被树脂完全浸润, 但这一过程需要持续供给树脂, 且花费较长的时间, 由于真空通道的存在, 不断注入的树脂绝大部分都通过真空通道直接从抽气口排出, 这就造成大量的树脂浪费。另外通过实验过程中的观察分析可知, 腹板和缘板处纤维的浸润并非由树脂进出口两端的压力差所驱动, 而是由纤维本身的毛细作用力驱动的, 这也是最终完全浸润纤维需要较长时间的主要原因。



注:中间深色区域表明树脂优先通过三角区域浸润其周围纤维;图片右端为树脂注入端。

图5 未填充三角区域时T型桁条充模过程

Fig. 5 Mold filling process of T-shaped stringer with non-filled triangle area

对T型桁条的三角区域进行填充纤维后, 可明显观察到树脂的流动不再是优先通过三角区域到达抽气口, 而是中间三角区域纤维内的树脂和缘板纤维内的树脂以相同的速率向前流动渗透, 如图6所示。这表明对三角区域进行纤维填充可有效改善树脂流动不均匀的现象。其原因是真空通道被纤维填充, 阻断了树脂与真空环境的直接接触, 此时液态树脂流动方向前后的压差力只与特征长度有关, 因此被浸润区域的压力沿长度方向是梯度变化的, 树脂也在该压力的驱动下均匀向前流动。



注:图片右端为树脂注入端

图6 填充三角区域后T型桁条充模过程

Fig. 6 Mold filling process of T-shaped stringer after filling triangle area

2.2 厚度均匀性

测得T型桁条各标号点的厚度如图7所示, 从图中可以直观看到, T型桁条两侧缘板的厚度非常接近, 且沿长度方向的均匀性良好, 腹板靠近T型节点处的板厚略大于顶端处的板厚, 沿长度方向上厚度先减小后增大, 呈现两端厚中间薄的形态, 且腹板整体厚度要大于缘板, 原因是T型桁条的组合模具没有定位和夹紧装置, 树脂从注入口到抽气口逐渐浸润纤维的过程中, 先被浸润的部分由于充满液态树脂而存在液体压力, 液体压力与外部大气压力平衡, 从而使该部分的纤维处于松弛状态, 而未被浸润部分的纤维仍然处于大气压的作用下, 因此进口处的板厚略大于出口处的板厚。另外在垂直方向依靠的是模具自身重力和大气压, 将纤维层尽可能压薄, 而在水平方向上只作用有大气压, 因此腹板稍厚于缘板。

T型桁条的腹板在树脂流动方向上的受力如图8所示, 纤维浸润区域, 液体压力与大气压平衡, 模具不受力; 纤维未浸润区域, 模具受到均匀的大气压力 P 的作用, 使组合模具在长度方向上受力不平衡而产生相对力矩 M_1 、 M_2 , M_1 和 M_2 大小相等, 方向相反, 因此组合模具在纤维未浸润区域相互挤压, 而纤维浸润区域相对松弛, 最终导致桁条腹板的厚度沿树脂流动方向逐渐减小。

进口处与出口处腹板的厚度差相对于桁条总长度的变化率为:

$$\mu = \frac{h_{in} - h_{out}}{L} \times 100\% \quad (6)$$

式中, h_{in} 和 h_{out} 分别为进口处和出口处桁条腹板的厚度, L 为桁条的总长度。

将所测得的桁条腹板两端的厚度值代入其中, 得 $\mu = 0.07\%$, 相对变化率非常小。实际上, 该变化率并非固定值, 当桁条越长时, 模具的变形也会越大, 由于模具受力不均而造成桁条腹板厚度变化也会越小, 因此桁条尺寸精度也更高。

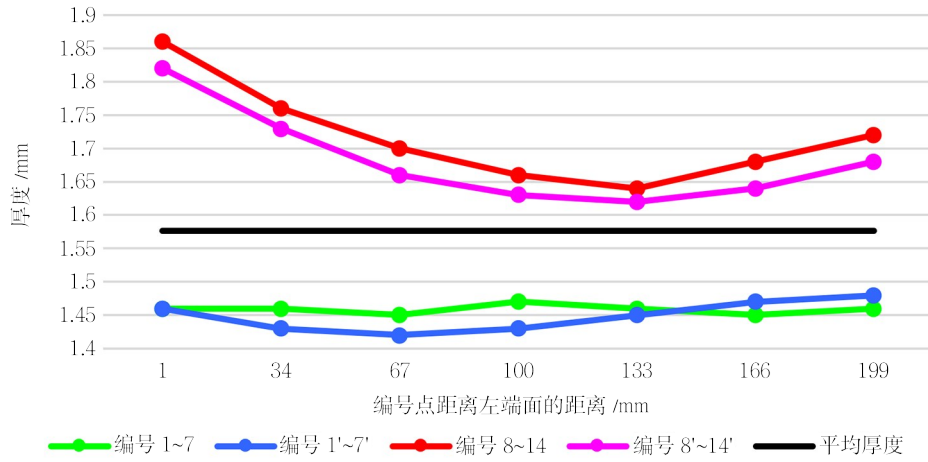


图7 T型桁条各测量点的厚度

Fig. 7 Thickness of each measuring point of T-shaped stringer

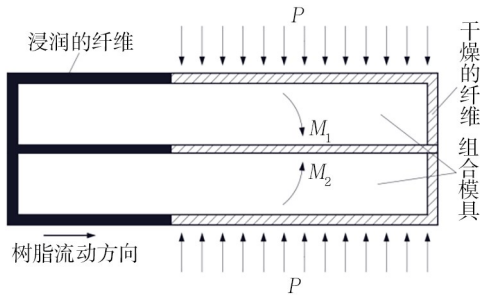


图8 模具沿长度方向的受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the force acting on the mold along the length direction

T型桁条模具截面为长方形,当树脂完全浸润纤维后,模具的内侧面和下表面只有液体压力,外侧面和上表面则受相同的大气压力 P 作用,而外侧面面积大于上表面面积,因此模具外侧面所受的力 F_L 大于上表面所受的力 F_V , F_L 、 F_V 对半模中心的力矩为:

$$M_L = F_L \times \frac{h}{2} \text{ (顺时针方向)} \quad (7)$$

$$M_V = F_V \times \frac{d}{2} \text{ (逆时针方向)} \quad (8)$$

因为 $F_L > F_V$, $h > d$,所以 $M = M_L - M_V > 0$,因此左右半模受到相反方向的扭转力矩的作用,分别有顺时针和逆时针旋转的趋势,造成腹板靠近T型节点处的厚度大于顶端处的厚度^[13],如图9所示。

2.3 微观结构

桁条三角区域填充纤维前后微观结构如图10所示。

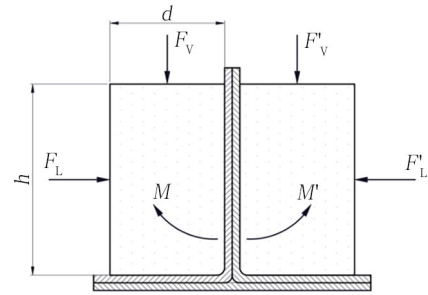
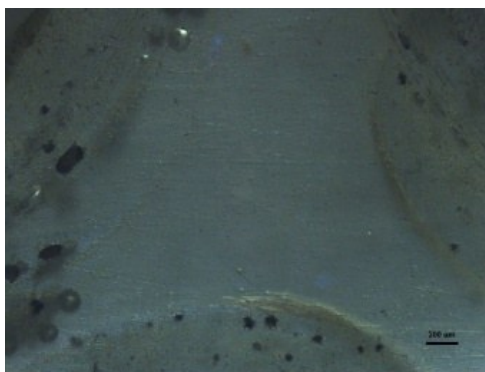


图9 左右半模受力示意图

Fig. 9 Stress diagram of left and right half moulds



(a) T型桁条三角区域填充纤维前



(b) T型桁条三角区域填充纤维后

图10 桁条三角区域填充前后的微观形貌

Fig. 10 Micrograph of the triangular area of the stringer before and after filling

从上图中可以明显看到,T型桁条未填充纤维时,三角区域比较澄清透亮,气泡较多,且大都存在

于纤维与树脂的分界处,原因是树脂浸润纤维的过程存在显著的不饱和流动现象,树脂通过真空通道

时的流动速度非常快,干燥的纤维布浸润不充分,从而在纤维布表面形成大量微小气泡,如图 11 所示。而这些微小气泡与纤维丝束之间的表面张力要大于气泡沿流动方向的液体压差力,因此其无法在后续充模或冲洗过程中排出。

填充纤维后,三角区域浑浊暗淡,气泡明显减少,这是因为填充纤维后,真空通道被封堵,树脂流动速度减慢,纤维的浸润也更加充分,树脂浸润过程变为饱和流动,因此气泡明显减少。

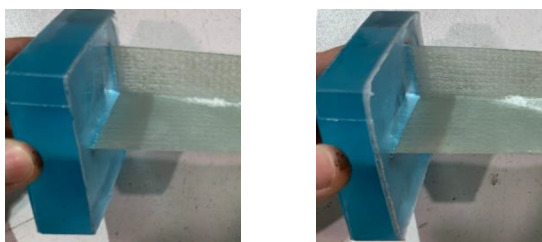


图 11 树脂的不饱和和流动示意图

Fig. 11 Schematic diagram of unsaturated flow of resin

2.4 弯曲强度

T型桁条弯曲受损后的照片如图 12 所示,从桁条的破坏形式上看,未填充三角区域时的 T 型桁条损伤比较分散,中间节点处损伤会沿直角向两端延伸,缘板则完全断裂,腹板的损伤从受力节点开始向下扩展,但损伤并未贯穿腹板;填充三角区域后的 T 型桁条,损伤集中发生在压头正下方的节点处,从垂直腹板方向看,损伤区域呈等腰三角形,从中间向两端梯度减小,缘板也完全断裂,压头正下方的腹板上有较小的裂纹扩展。在实验过程中,桁条腹板受偏载而发生了较大的扭转变形,改变了力的传递方向,因而也改变了损伤破坏的形式和裂纹扩展的方向,这就是两根桁条腹板上的损伤裂纹都没有贯穿腹板的原因。



(a) 未填充三角区域的 T 型桁条的破坏形式 (b) 填充三角区域后的 T 型桁条的破坏形式

图 12 T 型桁条的最终破坏形式

Fig. 12 Final failure modes of T-shaped stringers

从实验结果来看,填充纤维后的 T 型桁条的最大压缩力为 3 357. 16 N,相比未填充纤维的 T 型桁条,最大载荷提高了 15. 72%。从应力应变图可以看出,

微观形貌的观测结果表明,T型桁条三角区域填充纤维能有效改善其成型过程中纤维的浸润效果,提高树脂饱和和流动的效率,减少气泡从而降低孔隙率,提高桁条的质量。

由于所用的纤维为玻璃纤维,且放大倍数较低,加之观察方向平行于纤维丝束填充方向,因此图中桁条的三角区域看不到明显的纤维丝束。图中的黑色斑点是由打磨样品时,砂纸上脱落的微小磨粒嵌入切开的气泡里形成的。

在达到最大载荷,桁条发生破坏后,压缩力并没有极速减小,而是减小一定值后又在某一个值附近出现波动,表现出非脆性材料的损伤特性,这主要是因为实验过程中,T型桁条的腹板发生了较大的扭转变形,分散了压力的直接作用方向,而其本身没有出现明显的损伤破坏,因此在载荷达到最大,受力点处发生破坏后,桁条仍然具有一定的承载能力。由此可知,当较长的桁条受到弯曲载荷时,桁条整体上具有较好的韧性。

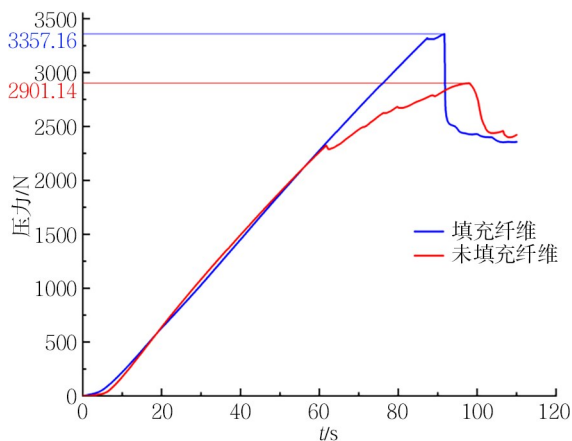


图 13 T 型桁条的压缩力随时间的变化图

Fig. 13 Variation curves of compressive force on T-shaped stringer with time

2.5 孔隙率和纤维体积分数

试验获取的数据和部分已知数据如表 1 所示:

从图 14 中可以看出,样品灼烧后只留下了较为纯净的玻璃纤维,由表 1 中纯树脂灼烧前后的质量比可得,树脂碳化率仅为 2. 1%,树脂基体几乎全部分解挥发。将表 1 中数据代入公式(1),最终测得 T 型

表1 试验材料和试验样品的参数 g/cm^3
Tab. 1 Parameters of test materials and samples g/cm^3

	Resin density D	Fiber density d	Measured density of sample M_d
Pure resin	1.14	/	/
T-shaped stringer	/	2.50	1.671 2
	Initial mass of sample M_i (m_i)	Residual mass of sample after burning $M_f(m_d)$	
Pure resin	1.880 6	0.039 5	
T-shaped stringer	1.648 5	0.995 5	

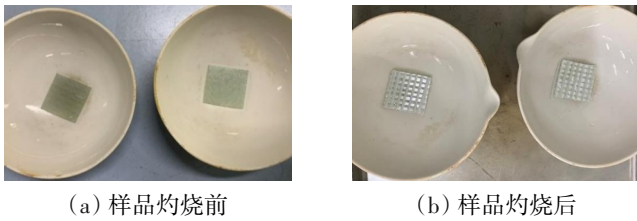


图14 样品灼烧前后对比

Fig. 14 Comparison of sample morphology before and after burning

桁条的孔隙率为: $V_T = 0.90\%$ 。

纤维体积分数计算公式为:

$$V_r = r \times \frac{M_d}{d} = \frac{M_f - M_i \times m_d/m_i}{M_i \times (1 - m_d/m_i)} \times 100 \times \frac{M_d}{d} \quad (9)$$

最终计算得到 $V_{rT} = 39.80\%$ 。

T型桁条的孔隙率为0.90%,满足高性能复合材料零件孔隙率应低于1%的要求^[18],而纤维体积分数39.80%相对来说并不算高,这主要与纤维材料本身有关,本文所用E-LT玻璃纤维为粗纱纤维,丝束较粗且编织松散,丝束间缝隙较大,从图14(b)中可以看出,而组合模具为玻璃硬模,无论是在人为按压还是在大气压力作用下都无法填充纤维丝束间的缝隙,因此这些缝隙最终都被树脂充满,造成样品树脂含量较高。

3 结论

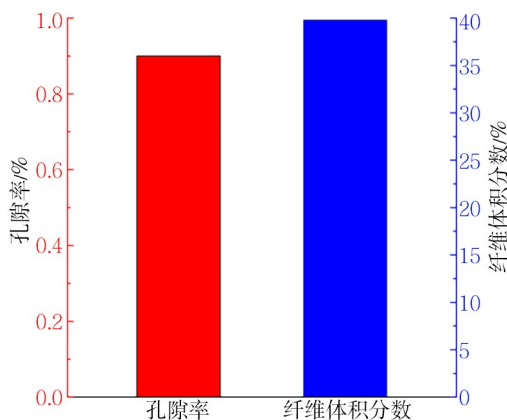


图15 T型桁条的孔隙率和纤维体积分数

Fig. 15 Porosity and fiber volume fractions of T-shaped stringer

本文针对复合材料T型桁条成型的问题,研究了T型的VARTM工艺成型方法。采用对T型桁条的三角区域填充纤维的方式,改善了充模过程中树脂的流动情况,提升了纤维浸润效果。T型桁条各部位厚度均匀性良好,表面质量较高,尺寸精度较好。三角区域填充纤维后的T型桁条的抗弯能力提高了15.72%。桁条整体上均表现出较好的韧性。孔隙率满足高性能复合材料零件孔隙率应低于1%的要求。

参考文献

[1] YOSUKE N, YUTAKA I, YOSHIYASU H. Low cost composite wing structure manufacturing technology development program in JAXA [C]//16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan, 2007:1-6.

[2] KUNDAN V, KOTRESH G, VISWANATH S. Development of vacuum enhanced resin infusion technology (VERITY) process for manufacturing of primary aircraft structures[J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2013, 3(4):621-634.

[3] 王长春,刘建光,岳广全. 复合材料管道连接件真空辅助成型工艺树脂流动研究[J]. 航空制造技术, 2017(16): 53-57.

WANG C C, LIU J G, YUE G Q. Study on resin flow in vacuum assisted forming process of composite pipe connector[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(16):53-57.

[4] 崔敏,程泽林,陈英. 基于VARTM工艺的大型闭合截面复合材料箱体的研制[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(04): 26-30.

CUI M, CHENG Z L, CHEN Y. Development of large closed section composite box based on VARTM process [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(04):26-30.

[5] R VOCKE. T SPIRIDONOV, D PINES. Design and construction of all-composite uavs utilizing a modified vartm process [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2010-01-04:2160-2170.

[6] R JONES, P CHIOU, J ANDREWS, et al. Development of a low-cost UAV fuselage using VARTM technology [C]//59th American Helicopter Society (AHS) International Annual Forum 2003 (1/3), Phoenix, Arizona, USA, 2003-5-06:1187-1194.

[7] 李洪哲. Ω 长桁和T长桁的工艺对比分析研究[J]. 航空工程进展, 2015, 6(01):82-86.

Li H Z. Comparative analysis and research on process of Ω long truss and T long truss [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. 2015, 6(01):82-86.

[8] 王雪明,谢富原,李敏. 热压罐成型加筋板L形筋条纤维密实影响因素研究[J]. 航空材料学报. 2011, 31(04): 64-68.

WANG X M, XIE F Y, LI M. Study on the factors of fiber compaction in hot press curing of L-shaped ribbed plate [J]. Journal of Aeronautical Materials. 2011, 31(04): 64-68.

influencing the fiber density of L-shaped stiffeners in autoclave reinforced plate[J]. *Journal of Aeronautical Materials*. 2011, 31(04):64-68.

[9] 谭邦桔, 冀运东, 李书欣, 等. T桁条设计试样的低成本软膜成型工艺研究[C]//第二十届玻璃钢/复合材料学术交流会, 武汉, 2014-09-19:187-191.

TAN B J, JI Y D, LI S X, et al. Study on low cost soft film forming process of T-stringer design specimen [C]//The 20th Fiberglass/Composite Materials Academic Exchange Conference, Wuhan, 2014-09-19:187-191.

[10] LI S J, PU Y W, ZHAN L H. Effect of mandrel structures on co-curing quality for polymer composite hat-stiffened structures [J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(09): 1898-1907.

[11] 罗刚堂, 李敏, 顾轶卓. 共胶接T型加筋壁板模具设计及成型工艺研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012, (05):58-64.

LUO G T, LI M, GU Y Z. Research on mold design and forming process of T-shaped stiffened wall panel[J]. *Composites Science and Engineering*, 2012(05):58-64.

[12] 许丽丽, 殷永霞, 王晓芸. T型桁条成型工艺过程探究及其质量控制措施[J]. *高科技纤维与应用*. 2016, 41(02): 56-58, 67.

XU L L, YIN Y X, WANG X Y. Research on forming process of T-shaped stringer and its quality control measures [J]. *Hi-Tech Fiber and Application*. 2016, 41(02):56-58, 67.

[13] 陈际伟, 翟全胜, 叶宏军. 5428/T700体系成型“T”型长桁工艺研究[J]. *高科技纤维与应用*, 2010, 35(03):36-40.

CHEN J W, ZHAI Q S, YE H J. Study on forming technology of “T” type long truss with 5428/t700 system[J]. *Hi-Tech Fiber and Application*. 2010, 35(03):36-40.

[14] BEKIR Y, MURAT S, MURAT S. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 69(11): 1710-1719.

[15] TAN R, GUAN Z D, SUN W, et al. Experiment investigation on impact damage and influences on compression behaviors of single T-stiffened composite panels [J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 486-497.

[16] 汤平. 复合材料“T”形长桁压缩性能研究[J]. *材料科学与工艺*, 2020, 28(04):82-89.

TANG P. Study on compressive properties of composite T-shaped truss materials science and technology [J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28(04):82-89.

[17] KUNDAVARAPU V, KOPPARTHI P K. An investigation on the quality of the laminates produced by VARTM process and process parameters [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 04(08):9196-9202.

[18] N KUENTZER, P SIMACEK, S G ADVANI, et al. Correlation of void distribution to VARTM manufacturing techniques[J]. *Composites Part A*, 2006, 38(3): 802-813.