

三维浅交弯联机织复合材料弯曲性能的有限元分析

冯古雨¹ 曹海建^{1,2} 钱 坤¹

(1 生态纺织教育部重点实验室,江南大学纺织服装学院,无锡 214122)

(2 南通大学纺织服装学院,南通 226019)

文 摘 借助 Pro/Engineer 绘图软件,建立三维浅交弯联机织复合材料及弯曲压头的结构模型,进行弯曲性能研究。借助 ANSYS Workbench 有限元软件,探究复合材料在 5 mm 弯曲位移载荷作用下纤维、树脂和复合材料的应力、应变分布,并对复合材料的破坏模式进行预测。结果表明:三维浅交弯联机织复合材料在弯曲载荷的作用下,试样与上、下压头接触处最容易发生弯曲破坏;三维浅交弯联机织复合材料在承载弯曲载荷时,增强体纤维起到主要承载作用,树脂基体起次要承载作用;在 5 mm 的弯曲载荷作用下,复合材料的破坏模式主要是树脂的破碎。

关键词 有限元分析,三维机织复合材料,浅交弯联,弯曲载荷

中图分类号:TB33

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.06.005

Finite Element Analysis of 3D Curved Shallow-Crossing Linking Woven Composites on Bending Property

FENG Guyu¹ CAO Haijian^{1,2} QIAN Kun¹

(1 Key Laboratory of Eco-Textile of Ministry of Education, Jiangnan university, Wuxi 214122)

(2 College of textile and clothing, Nantong university, Nantong 226019)

Abstract A new structural model was built to study the bending properties of three-dimensional curved shallow-crossing linking woven composites (3D composites) using mapping software Pro/Engineer. The distribution of stress & strain on fibers, resin and 3D composites, as well as the failure mode, was discussed and predicted, respectively, under bending loads of 5 mm displacement using finite element software ANSYS workbench. The results show that under the bending loads the most easily damaging parts of the 3D composites occurred on the point-surface contacts, where the samples contacted with the up and down pressure heads, the main loads were supported by reinforced fibers and the minor loads are supported by matrix resin. The main failure mode of the 3D composites is resin fracture under bending loads of 5 mm displacement.

Key words Finite element analysis, 3D woven composites, Curved shallow-crossing linking, Bending loads

0 引言

三维浅交弯联机织复合材料是一种新型三维纤维增强复合材料,三维浅交弯联机织物预制体由 6 层伸直的纬纱,呈现屈曲状态的经纱组成^[1-2]。屈曲的经纱不仅将同一个平面的纬纱连接在一起,而且贯穿

纵向纬纱,使织物在厚度方向上相较于二维织物表现出更强的力学性能^[3-5]。对于复合材料来说,三维浅交弯联机织复合材料在层间结合性上好于层合板结构,表现出更强的剪切强度,并且具有耐冲击、不易分层等优点,在建筑、交通、国防、航天航空等领域具有

收稿日期:2015-07-09

基金项目:国家自然科学基金(51302110);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013015-31)

作者简介:冯古雨,1992 年出生,硕士研究生,主要从事纺织复合材料的制备及性能研究。E-mail:fengguyu890@163.com

通讯作者:曹海建,1979 年出生,博士,副教授,主要从事轻量化复合材料的制备及应用。E-mail:caohaijian20010@163.com

越来越广泛的应用^[6-7]。

通过调查得知,三维浅交弯联机织复合材料在使用过程中主要用于承受拉伸、弯曲和冲击载荷作用,在研究中三维浅交弯联机织复合材料上述三种力学性能格外受到关注^[8-11]。借助有限元软件 ANSYS 可以通过模拟的方式对三维浅交弯联机织复合材料的力学性能及破坏机理进行分析,相较于传统的设计实验的方法具有更强的可设计性和简便性。可以更加方便的对材料结构进行改进,提高复合材料的性能^[12]。

本文借助有限元 ANSYS 软件对 PRO/E 建立的三维浅交弯联机织复合材料弯曲试样件进行弯曲测试模拟,通过对比复合材料增强体和树脂基体在承受弯曲载荷作用时的区别,对复合材料弯曲破坏过程和机理进行细观分析。

1 建立模型

1.1 结构参数假设

三维浅交弯联机织复合材料在发生弯曲形变时,由纤维增强体和树脂基体共同承受弯曲载荷作用,其中的作用机理较为复杂。故本文在使用有限元 ANSYS 对三维浅交弯联机织复合材料进行模拟分析时,

作以下假设简化模型设置^[13-14]:

(1)在纤维间存在挤压的状态下假设经纬纱横截面为跑道型,纵向为连续的单纤维长丝,且纤维长丝为各向同性。

(2)假设纬纱在织物及复合材料中始终处于直线的状态,经纱有规律的屈曲缠绕在纬纱之间,在织物的上下表面呈现与纬纱跑道型轨迹相同的曲线,在织物内部呈现直线状态,且在发生弯曲破坏时,截面不发生形变。

(3)在发生弯曲形变时,复合材料的侧面并不发生垂直方向以外的其他方向的变形;与压头接触的复合材料上的点不发生任何滑移。

1.2 建立模型

使用 PRO/E5.0 作为模型建立工具,跑道型经纬纱截面尺寸为:直线部分长度为 0.5 mm,两侧半圆形轨迹半径为 0.187 5 mm。通过扫描功能构建出三维经纱和纬纱,使用装配功能分别建立经纱、纬纱系统,分别如图 1(a)、(b)所示;利用切除功能构建树脂基体,如图 1(c)所示;根据 GB/T1449—2005^[15] 建立弯曲测试压头模型,如图 1(d)所示。

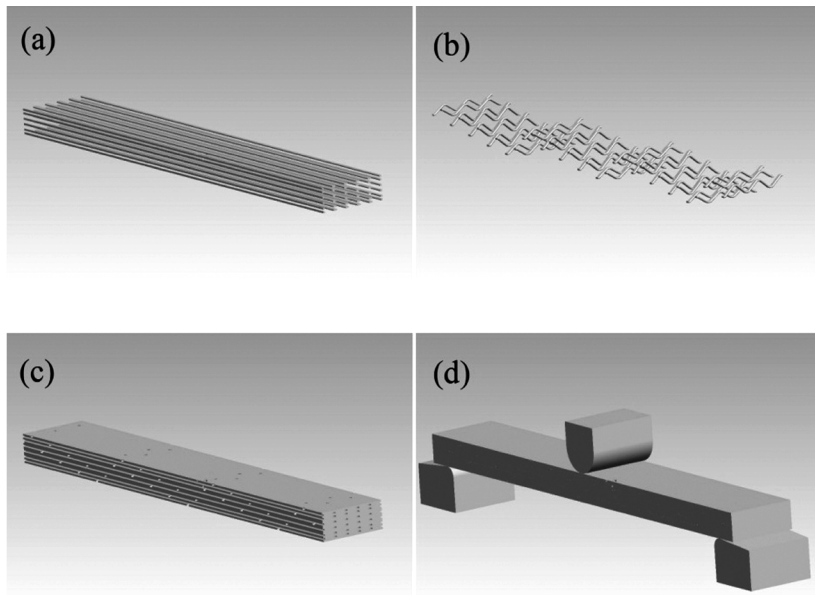


图 1 三维浅交弯联机织复合材料细观模型

Fig. 1 Micro-structural model of 3D curved shallow-crossing linking composites

模型尺寸根据 GB/T1449—2005^[15] 设置,两列纬纱之间的间距为 3 mm,经纱间距为 3.33 mm;复合材料纬向长度 $a=120$ mm,经向宽度 $b=15$ mm,高度 $h=6$ mm;下压头间跨距为 96 mm。

2 模拟计算

2.1 材料参数

三维浅交弯联机织复合材料弯曲试样主要由以下几种材料组成:玻璃纤维制成的纤维增强预制体,由环氧树脂 E51 和固化剂聚醚胺 WHR-H023 以质宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 6 期

量比为 3 : 1 的比例制成的树脂基体。在 ANSYS Workbench 中定义上述材料的参数(表 1)。

表 1 弯曲试样材料参数

Tab. 1 Parameter of material in bending sample

材料	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量/ GPa	泊松比	拉伸强度/ MPa
结构钢	7.85	200	0.3	460000
玻璃纤维	2.50	70	0.25	1000
树脂基体	1.20	1	0.38	70

2.2 网格划分和施加载荷

将通过 PRO/E 建立三维浅交弯联机织复合材料弯曲试样模型导入 ANSYS Workbench 中,通过布尔运算将经纬纱系统粘接为一个整体;定义纤维增强体、树脂基体和测试压头分别为相应的材料。

网格划分:为保证模拟结果精确性,在划分网格时,使用三面体进行网格划分,划分网格后的复合材料弯曲试样件如图 2 所示;其中纤维增强体由 73 514 个元件组成,树脂基体由 158 024 个元件组成。

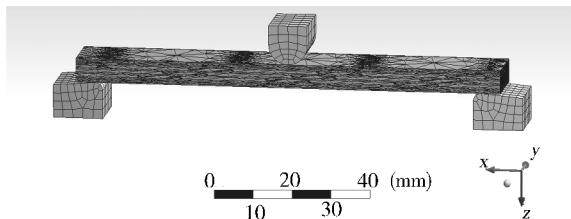
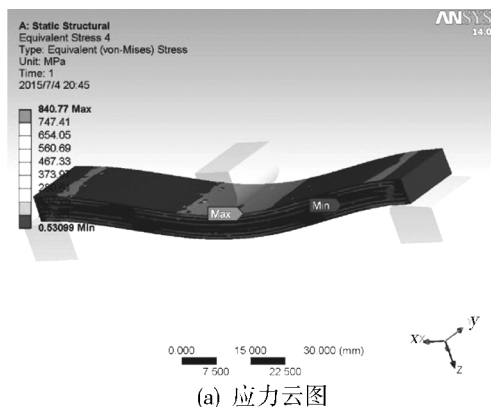
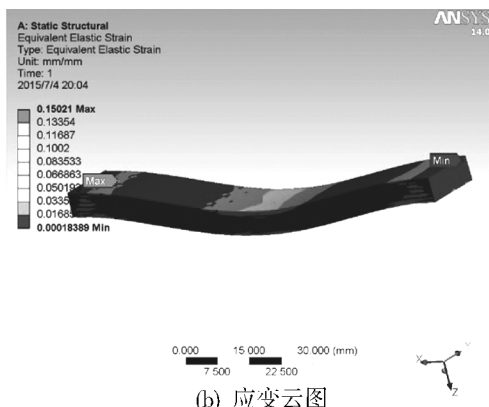


图 2 复合材料模型的网格划分情况

Fig. 2 Micro-structural model of 3D composites after meshing



(a) 应力云图



(b) 应变云图

图 3 三维浅交弯联机织复合材料弯曲应力、应变云图

Fig. 3 Cloud picture of stress & strain distribution of 3D composites

由图 3(a)可知,三维浅交弯联机织复合材料在承受弯曲载荷作用时,位于上压头垂直下方的复合材料弯曲应力最大,最大值为 840.77 MPa;弯曲应力最小处位于上下压头之间的复合材料表面,最小弯曲应力为 530.99 kPa。如图 3(b)所示,复合材料的弯曲应变情况与弯曲应力相似,弯曲应变较大的位置位于上下压头处,而压头之间的区域及复合材料试样件两端的区域较小。弯曲应变最大值位于下压头处的复合材料上,最大弯曲应变值为 150.2 $\mu\text{m}/\text{mm}$;弯曲应变最小的位置位于复合材料两段,数值为 0.18 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 。综上所述,三维浅交弯联机织复合材料在承受弯曲载荷作用时,三个压头的位置是承受弯曲载荷的主要位置,也是最容易发生破坏的位置;而三个压头之间的区域和复合材料弯曲试样两端的位置是承受弯曲载荷较小的位置不易发生破坏。

3.2 各组分的力学性能

3.2.1 弯曲应力

约束条件:按照实际测试情况对复合材料弯曲试样件及弯曲测试压头进行约束,对对称的两个下压头进行 Fixed Support 完全固定约束。弯曲试样件设置 Displacement 强迫位移约束;复合材料的侧面对 x 、 y 方向设为“0 mm”, z 方向设为“free”。

施加位移载荷:三维浅交弯联机织复合材料的弯曲测试属于准静态测试分析,在本实验中进行位移载荷分析。对上压头与复合材料接触的弧面设置 Displacement 强迫位移约束,其中 x 、 y 方向设为“0 mm”, z 方向设为“5 mm”。

3 结果与分析

3.1 复合材料弯曲性能

三维浅交弯联机织复合材料弯曲应力云图及弯曲应变云图如图 3 所示。

将复合材料中的预制体和树脂基体分离开,分别进行弯曲应力和弯曲应变的模拟,结果如图 4、图 5 所示。由图 4 分析可知,复合材料在承受弯曲载荷作用时纤维增强体承受载荷的主要作用,而树脂基体承受相对较小的载荷。

在图 4(a)中可以看出,纤维增强体在承受弯曲载荷时,最大应力点位于与上压头接触的位置,最大应力为 840.77 MPa;最小应力点位于纤维增强体两端下压头外侧,最小应力值为 2.5137 MPa。而玻璃纤维的最大强度为 1 GPa,纤维增强体的最大应力并没有达到玻璃纤维的最大强度,所以可以认为三维浅交弯联机织复合材料在弯曲形变为 5 mm 时玻璃纤维增强体并没有发生破坏。

在图 4(b)中可以看出,树脂基体在承受弯曲载荷时承受相对较小的弯曲载荷,其中最大应力点位于下压头附近,最大应力值为 751.06 MPa;最小应力点位于上下压头之间的区域,最小应力值为 0.531 MPa。

图4(b)中只显示了弯曲应力小于70 MPa的树脂基体应力云图,因为应力大于70 MPa超过了树脂基体的最大强度,所以认为这部分树脂基体遭到了破坏。可以看出树脂基体破坏最严重的位置在复合材料上表面与上压头的接触处、下表面与上压头垂直的位置

以及与下压头接触的位置。综上所述,三维浅交弯联机织复合材料在弯曲形变为5 mm时,主要的破坏形式是部分树脂基体的破碎,而纤维增强体并没有发生明显损坏。

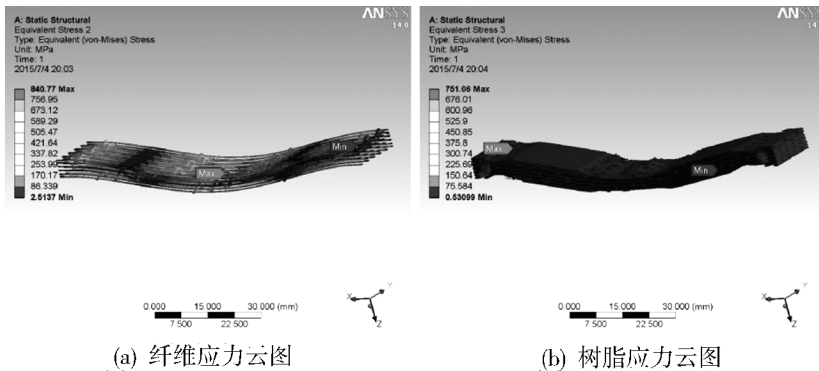


图4 复合材料纤维和树脂弯曲应力云图

Fig. 4 Cloud picture of stress distribution of fabric & resin of composites

3.2.2 弯曲应变

树脂基体的弯曲应变模拟结果如图5所示。

三维浅交弯联机织复合材料中纤维预制体和树

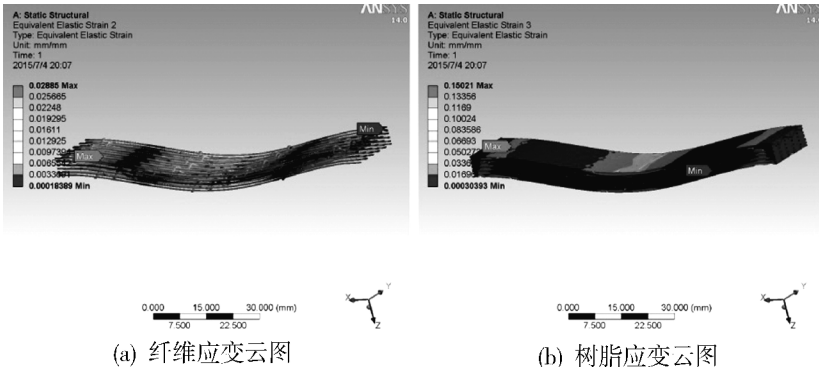


图5 复合材料纤维和树脂弯曲应变云图

Fig. 5 Cloud picture of strain distribution of fabric & resin of composites

比较图5(a)、(b)可以看出,三维浅交弯联机织复合材料在承受弯曲载荷作用时,纤维增强体的弯曲应变明显小于树脂基体的弯曲应变。

纤维体的形变,说明树脂与纤维体之间已经发生了较为严重的脱粘现象,复合材料中的纤维体由树脂中被抽拔出来。

由图5(a)中可以看出,纤维增强体较大的弯曲应变主要分布在上下压头位置,而三个压头之间的区域及预制体两端位置的纤维增强体弯曲应变较小。应变最大值位于下压头附近的纤维增强体上,最大弯曲应变为28.85 $\mu\text{m}/\text{mm}$;弯曲应变最小的区域位于纤维增强体两端的位置,最小弯曲应变为0.18 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 。

4 结论

由图5(b)可知,树脂基体的弯曲应变分布与纤维预制体相似,上下压头位置弯曲应变较大,压头之间的区域及预制体两端位置的树脂基体弯曲应变较小。应变最大处位于下压头附近的树脂基体上,最大弯曲应变为150.2 $\mu\text{m}/\text{mm}$;弯曲应变最小的区域位于上下压头之间,最小弯曲应变为0.30 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 。结合图5与数据分析,复合材料中树脂基体的形变大于

(1) 三维浅交弯联机织复合材料在承受弯曲载荷作用时,与上下压头接触的位置弯曲应力与弯曲应变最大,承受的弯曲载荷、发生的弯曲形变最大,最容易发生弯曲破坏;压头之间的区域及试样件两端的位置弯曲应力与应变较小,不容易发生破坏。

(2) 三维浅交弯联机织复合材料在承受位移为5 mm的弯曲载荷作用时,破坏形式主要为树脂基体的破裂和纤维的抽拔;承载过程中,纤维增强体起主要承载作用,树脂基体起次要承载作用。

参考文献

[1] 朱梦蝶,张立泉,郭洪伟,等. 2.5D 织物结构与拉伸性能的研究[J]. 玻璃纤维,2014(5):46-52

[2] 郑君,温卫东,崔海涛,等. 2.5 维机织结构复合材料

