

三维浅交弯联机织复合材料准静态冲击性能有限元模拟

冯古雨¹ 曹海建^{1,2} 王新月¹ 钱坤¹ 孙洁¹

(1 江南大学纺织服装学院,生态纺织教育部重点实验室,无锡 214122)

(2 南通大学,纺织服装学院,南通 226019)

文 摘 借助绘图软件 PRO/E 构建出用于研究冲击性能三层三维浅交弯联机织复合材料及冲头的结构模型,并利用有限元软件 ANSYS 对其力学性能进行模拟分析。分别表征复合材料中纤维、树脂基体的应力应变分布情况,并预测复合材料的冲击破坏形式。结果表明,在准静态冲击载荷的作用下,复合材料在冲头冲击的位置形成贯穿性损伤;纤维表现出较大的冲击应力,树脂基体表现出较大的冲击应变;冲击破坏模式主要为复合材料的变形引起的贯穿性破坏,包括纤维的断裂、树脂的破碎及纤维与树脂间的脱粘。

关键词 有限元分析,三维机织复合材料,浅交弯联,准静态冲击

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.03.004

Finite Element Analysis on Quasi-Static Impact Property of 3D Curved Shallow-Crossing Linking Woven Composites

FENG Guyu¹ CAO Haijian^{1,2} WANG Xinyue¹ QIAN Kun¹ SUN Jie¹

(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 impact properties of the three-layer three-dimensional curved shallow-crossing linking woven composites (3D composites), using mapping software Pro/Engineer. Mechanical properties of the 3D composite, under quasi-static impact loads were analyzed using finite element software ANSYS workbench. The distribution of stress & strain on fibers and resin matrix in 3D composites, as well as the failure mode of the 3D composites, were discussed and predicted, respectively. Results show that under the quasi-static impact loads, transfixion damage formed in the place where the punch impact on the 3D composite. The fibers undertake more impact loads and show larger impact stress. The resin matrix show major impact strain. Transfixion damage caused by deformation of 3D composite is the main impact fracture mode, which includes breakage of fibers, fragmentation of resin matrix and debond between fibers and resin matrix.

Key words Finite element analysis, 3D woven composites, Curved shallow-crossing linking, Quasi-static impact

0 引言

三维浅交弯联机织复合材料是一种由三维浅交弯联预制体作为增强体,环氧树脂作为基体的新型三维机织物增强复合材料^[1-2],其预制体中屈曲的经纱以一定的规律上下浮动,包缠在纬纱周围,在厚度方向形成一定的分量,厚度方向上的分量在厚度方向上改善了复合材料的力学性能^[3-5]。相较于传统的层合板结构,三维浅交弯联机织复合材料在厚度方向上

表现出更好的剪切性能,其具有耐冲击、不易分层等优点,在建筑、交通、国防、航天航空等领域具有越来越广泛的应用^[6-7]。

通过对三维机织复合材料应用领域的调查,发现其在使用过程中主要承受拉伸、弯曲及冲击载荷的作用,其失效形式也主要与这三种载荷的作用有关^[8-9]。使用准静态冲击可以将冲击过程细化,便于更好的研究复合材料的冲击破坏行为^[10-12]。

收稿日期:2015-10-19

基金项目:国家自然科学基金(51302110,51203062);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013015-31, BY2014023-15, BY2013015-32, BY2014023-14);中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP41501)

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,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

本文通过 ANSYS 有限元模拟软件对复合材料在冲击载荷作用下的力学行为进行分析,并预测了复合材料的失效形式。

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是由纤维增强体与树脂基体共同构成并相互作用的材料,其复杂的结构导致其在承受载荷时的作用机理十分复杂。为减少工作量,本文在构建模型时对复合材料做出一些理想化的假设^[13-14]。

(1) 复合材料中的纤维束呈长丝状存在,其截面为跑道型;

(2) 复合材料在浸渍过程中纤维与树脂间的结合为理想状态,不考虑其中缺陷、裂痕及空隙的问题;

(3) 在复合材料的成型过程中,纤维预制体的形状和结构并没有发生改变。

1.2 建立模型

借助 PRO/E 构建出复合材料的结构模型,纤维体跑道型截面尺寸如图 1 所示。通过扫描的方式绘制出经纬纱线,并通过装配功能将经纬纱固定在一起 [图 2(a)],通过切除的方式建立出树脂基体的结构模型 [图 2(b)],将纤维增强体与树脂基体装配在一起,形成复合材料,其尺寸为 50 mm×50 mm×2.625 mm [图 2(c)],构建出冲头的结构模型,冲头由一个半径为 5 mm 高度为 5 mm 的圆柱体及一个半径为 5 mm 的半球体组成 [图 2(d)]。

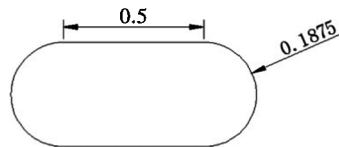


图 1 经纬纱横截面尺寸示意图

Fig.1 Diagram of fibers cross section

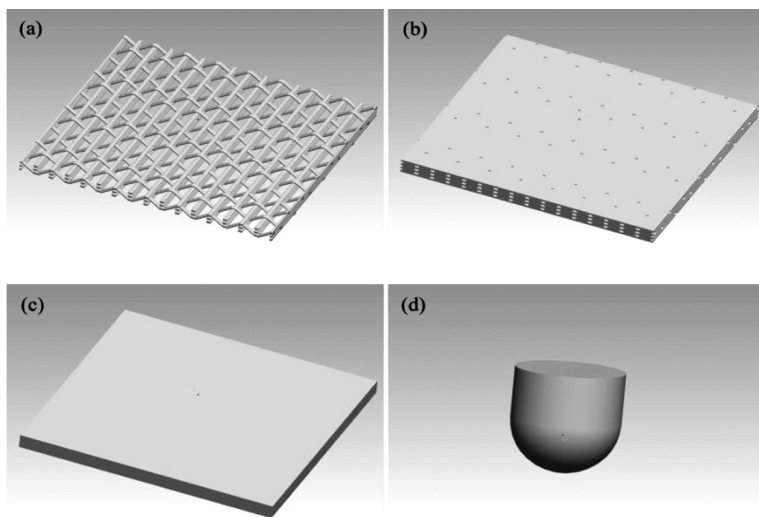


图 2 复合材料微观模型

Fig.2 Micro-structural model of composites

2 模拟计算

2.1 材料参数

三维浅交弯联机织复合材料及冲头的材料定义如下:纤维定义为玻璃纤维,树脂为环氧树脂 E51 与聚醚胺 WHR-H023 以质量比 3:1 的比例混合、在 80℃/3 h 热处理后的树脂,冲头为结构钢,三种材料的主要参数见表 1。

表 1 冲击试样材料参数

Tab.1 Parameter of material in impacting sample

材料	密度/ g·cm ⁻³	弹性模量/ GPa	泊松比	拉伸强度/ MPa
结构钢	7.85	200	0.3	460
玻璃纤维	2.50	70	0.25	1
树脂基体	1.20	1	0.38	0.07

2.2 网格划分和施加载荷

将建立的复合材料结构模型导入分析软件 ANSYS,借助布尔运算将其中的纤维连接为一个整体,并使用三面体网格对模型进行划分(图 3)。

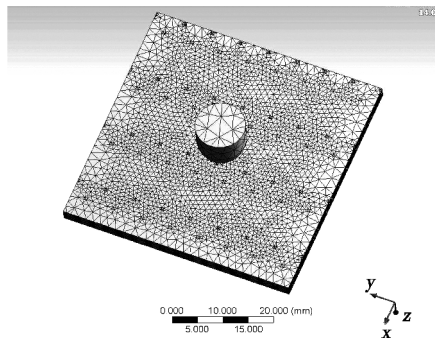


图 3 复合材料冲击模型网格划分情况

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

其中纤维、树脂和冲头分别由 83 261、206 085 和 293 个元件构成。对复合材料添加约束条件,板材的底面和 4 个侧面添加 Fixed Support 完全固定约束;对冲头添加 Velocity 速度约束,其中 x 方向、 y 方向为 0 mm/s, z 方向为 0.6 mm/s,冲头作用时间为 5 s,保证

冲头完全穿过复合材料。

3 结果与分析

3.1 复合材料准静态力学性能

三维浅交弯联机织复合材料冲击应力应变云图如图 4 所示。

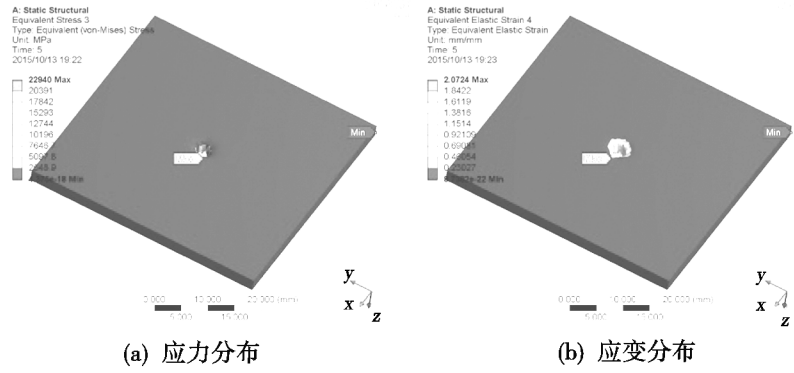


图 4 复合材料冲击应力、应变分布云图

Fig.4 Cloud picture of stress & strain distribution of 3D composites

由图 4 可知,试样在受到 0.6 mm/s、5 s 的冲击时,其最大值为 22.940 GPa,发生在冲头垂直作用的接触面上。以此为中心,向周边扩散的应力逐渐减小,未与冲头接触的部分冲击应力较小;冲击应力的最小值为 4.375×10^{-12} Pa,接近于 0,位于试样的边缘。由冲击应变云图可知,与冲击应力分布云图相似,试样与冲头接触的位置表现出较大的冲击应变,其最大值为 2.072 4;未与冲头接触的部分冲击应变较小,最小应变为 8.738×10^{-22} ,位于试样的边缘。

形,此位置最容易发生冲击破坏。而在其周围不与冲头直接接触的位置,试样表现出很小的冲击应力和应变,几乎不受冲击载荷的影响也不发生变形,不容易发生冲击破坏。

原因分析,在 0.6 mm/s、5 s 的冲击作用下,试样与冲头接触的部分承受较大的载荷,并发生较大的变

由于复合材料复杂的结构,其在承受准静态冲击载荷时发生的力学行为较为复杂,所以将复合材料中的纤维增强体与树脂基体分离,分别进行分析。

3.2 各组分的力学性能

3.2.1 冲击应力

分别对纤维和树脂在冲击载荷下的应力分布进行模拟,结果如图 5 所示。

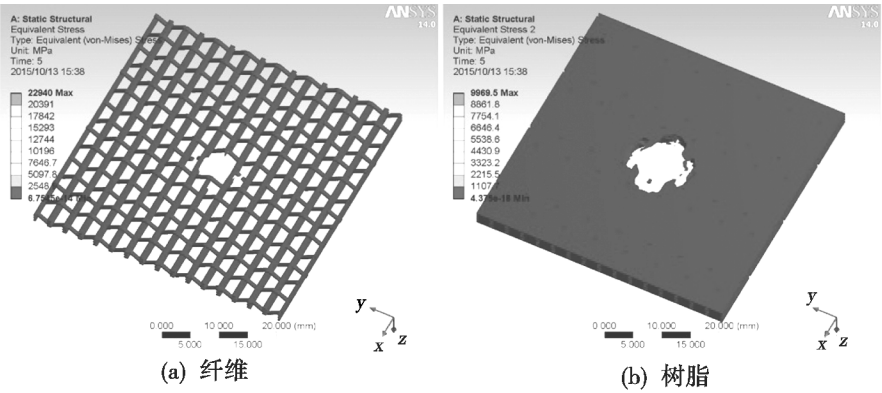


图 5 各组分冲击应力云图

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

假设纤维和树脂的破坏判别标准是应力值大于拉伸破坏强度,分别按照各自的材料参数确定其破坏范围,由图 5 可以看出冲击后的纤维与树脂基体破坏形貌。纤维和树脂基体都在冲头作用的位置发生了贯穿性的破坏。

为 22.940 和 9.969 5 GPa。由此分析可知,在试样承受冲击载荷时,纤维承受较多的载荷,表现出较大的冲击应力;树脂承载较小的冲击载荷,表现出较小的冲击应力。

由图 5 可以看出,纤维和树脂的最大应力值分别

由图 5 可知,试样在冲击载荷下的破坏形式主要是纤维的断裂与树脂的破碎。对比图 5 (a) 和 (b),

树脂中由于冲头作用形成的贯穿孔洞面积大于纤维的贯穿孔洞,这说明在贯穿孔洞的周边区域,树脂发生了破碎而纤维依旧完好,这说明在孔洞的周边还存

在着树脂的开裂以及树脂与纤维之间的脱粘现象。

3.2.2 冲击应变

纤维与树脂的冲击应变分布云图如图 6 所示。

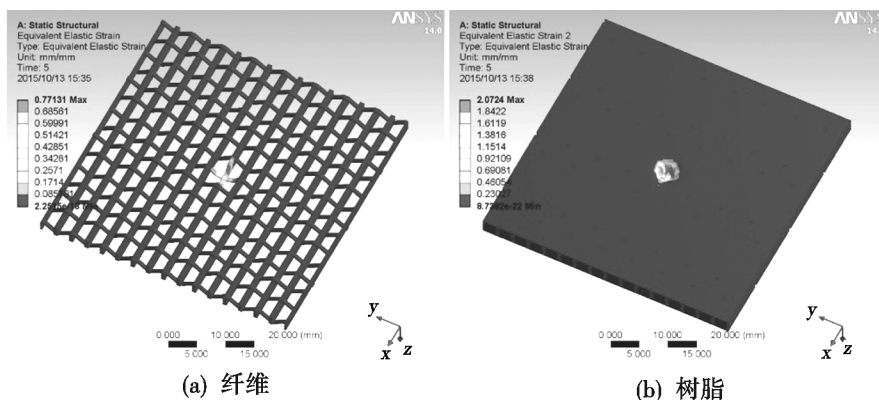


图 6 各组分冲击应变云图

Fig.6 Cloud picture of strain distribution of fabric & resin of composites

由图 6 可知,纤维和树脂基体中与冲头接触的位置均发生了较大的形变,而其他位置则发生较小的形变。

纤维和树脂中冲击应变的最大值分别为 0.77131 和 2.0724。由此分析可知,试样在冲击载荷下,纤维表现出相对较小的形变;而树脂表现出更大的形变。原因分析,在试样承受冲击载荷时,纤维承受更多的载荷,表现出较小的变形;树脂承受较少的载荷,表现出更大的变形。

纤维与树脂间冲击应变数值的差异在另一个方面印证了复合材料在冲击载荷下,存在纤维与树脂间的开裂、脱粘。

4 结论

(1) 三维浅交弯联机织复合材料在冲头的冲击载荷作用下,在与冲头直接接触的位置形成贯穿性孔洞,其破坏模式主要有纤维的断裂、树脂的破碎及纤维与树脂间的脱粘;

(2) 在冲击载荷作用下,三维浅交弯联机织复合材料中的纤维承受较多的载荷但表现出较小的变形,树脂承受较少的载荷但表现出较大的变形。

参考文献

[1] 栾坤. 三维角联锁机织复合材料弹道侵彻破坏细观结构尺度研究[D]. 东华大学, 2014.
 [2] 易洪雷, 丁辛. 三维机织复合材料的弹性性能预报模型[J]. 力学学报, 2003(5): 569-577.
 [3] HA-MINH C, BOUSSU F, KANIT T, et al. Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(8): 2179-2187.
 [4] HUANG G, ZHONG Z. Tensile behavior of 3D woven

composites by using different fabric structures[J]. Materials & Design, 2002, 23(7): 671-674.

[5] BADAWI M S S S, BADAWI M S S S. Development of the weaving machine and 3D woven spacer fabric structures for lightweight composites materials [C]. Vdm Verlag Dr. miller Aktiengesellschaft & Co. kg, 2008: 620-660.

[6] TIEN W S, Yu H P. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interply hybrid laminate[J]. Compo. Struct., 2004, 64: 189-198.

[7] PARK S J, PARK W B, LEE J R. Characterization of the impact properties of three-dimensional glass fabric-reinforced vinyl ester matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(24): 6151-6154.

[8] 董伟锋, 朱建勋, 肖军. 2.5 维机织复合材料的强度特性[J]. 材料科学与工程学报, 2010(6): 818-822.

[9] 郑君, 温卫东, 崔海涛, 等. 2.5 维机织结构复合材料的弹性性能预测[J]. 航空动力学报, 2008(11): 2031-2035.

[10] 李思辉. UHMWPE/LDPE 复合材料准静态侵彻和落锤冲击性能研究[D]. 东华大学, 2008.

[11] 郑晓霞, 郑锡涛, 沈真, 等. 低速冲击与准静态压痕力下复合材料层合板的损伤等效性[J]. 航空学报, 2010(5): 928-933.

[12] 王立朋, 燕瑛, 曾东, 等. 厚度对混合机织复合材料低速冲击和准静态横向压缩性能的影响[J]. 航空学报, 2007(1): 213-216.

[13] 马雷雷. 三维机织正交结构复合材料抗冲击性能及其有限元分析[D]. 浙江理工大学, 2010.

[14] 曹海建, 冯古雨, 俞科静, 等. 碳纤维/环氧树脂基中空夹芯复合材料压缩性能的有限元法研究[J]. 纺织学报, 2015(9): 50-54.