

三维五向编织复合材料强度的有限元分析

李金超¹ 陈利¹ 邢静忠²

(1 天津工业大学复合材料研究所,天津市和教育部共建先进纺织复合材料重点实验室,天津 300160)

(2 天津工业大学机械电子学院,天津 300160)

文 摘 在已有三维五向编织复合材料单胞实体模型的基础上,基于等应变假设和最大应力失效准则,采用3D有限元法建立了三维五向编织复合材料的拉伸强度有限元分析模型。利用该模型计算了试件的拉伸强度,与现有实验数据进行对比,吻合较好。数值模拟表明:三维五向编织复合材料主要的拉伸失效形式为轴纱的正应力破坏,与已有文献的观测结果一致。

关键词 三维五向,编织复合材料,有限元分析,强度

Finite Element Analysis for Strength of Three-Dimensional Five-Directional Braided Composites

Li Jinchao¹ Chen Li¹ Xing Jingzhong²

(1 Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials Tianjin and Ministry of Education, Institute of Textile Composite, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

(2 School of Mechanical and Electronic Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

Abstract On the basis of the established 3D unit cell model of 3-dimensional (3D) five-directional braided composites, a tensile strength numerical model was proposed via 3D finite element analysis (FEA) compared with Iso-strain assumption and maximum stress failure criteria. The predictive strength was in good agreement with available experimental data, which demonstrated the applicability of the presented model. The numerical results show that the main failure modes of 3D five-directional braided composites are tension of the axial yarn, which are consistent relevant with experimental results.

Key words Three-dimensional five-directional, Braided composites, Finite element analysis (FEA), Strength

0 引言

三维五向编织复合材料是在四向编织的基础上沿编织方向增加一组不参与编织的轴纱,经复合固化后形成的一种新的结构材料。在保持三维四向编织复合材料良好力学性能的同时,有效增强了轴纱方向的刚度、强度等力学性能,因而满足了部分航空、航天等特定领域的需要。由于三维五向编织体结构更为复杂,以往研究大多集中于弹性性能分析^[1-5],对其强度分析甚少,深入理解其强度等性能对进一步促进三维五向编织复合材料发展具有重要意义。

以往关于三维编织复合材料强度方面的研究大都集中于三维四向编织结构。Sun^[6]基于层板理论建立了三维四向编织复合材料的拉伸强度模型;

Tang^[7]建立了整体试件的有限元模型并考虑了材料的非线性特征;庞宝君^[8]采用多相有限元法,建立了该类材料的损伤非线性模型;卢子兴^[9]基于一种经验性强度失效准则,预测了三维四向编织复合材料的拉伸强度;徐锬^[10]基于3D实体有限元法建立了三维四向编织复合材料的渐进损伤拉伸强度模型;Li^[11]分析了三维五向编织复合材料的细观结构,采用细观力学方法预测其弹性性能及强度。

本文基于文献[12-13]建立的三维五向编织复合材料的内部单胞模型,采用等应变假设和最大应力失效准则,建立了三维五向编织复合材料的拉伸强度有限元预报模型,通过有限元方法计算试件的拉伸强度,与现有实验数据进行对比。

收稿日期:2010-06-02

基金项目:天津市应用基础及前沿技术研究计划(08JCZDJC24400);新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0254)

作者简介:李金超,1980年出生,博士研究生,主要从事三维编织复合材料力学性能分析及数值模拟。E-mail:jinchao@126.com

1 细观结构模型

由于三维五向编织复合材料细观结构较为复杂,通常忽略表面及棱角区域对其力学性能的影响,以占结构主体的内部单胞来表征其整体力学性能。根据文献[12],选用图1所示的内部单胞示意图进行实体建模,其中 γ 为内部编织角。通过实验观察(图2),将编织纱线横截面理想化为六边形,由纱线间的空间分布及相互接触关系,建立了三维五向编织复合材料的内部单胞实体模型,如图3(a)所示。图3(b)为轴纱形状模拟图。可以看到,轴纱截面沿轴向并非恒定不变,而呈周期性变化,这主要是由于在不同的轴向截面位置,轴纱受相邻编织纱的横向挤压方向呈周期性变化,与实验观察较为一致^[14]。

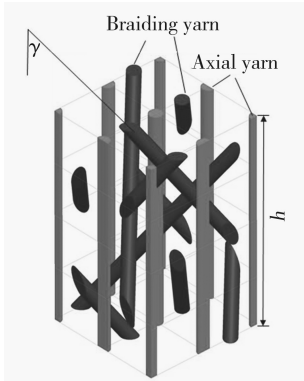


图1 内部单胞示意图

Fig.1 Topological structure of preform

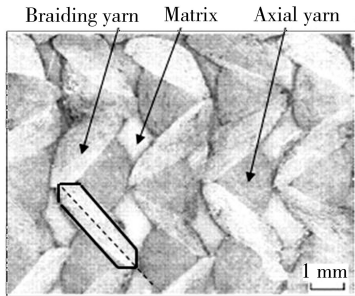


图2 试件截面图

Fig.2 Micrograph of cross-section

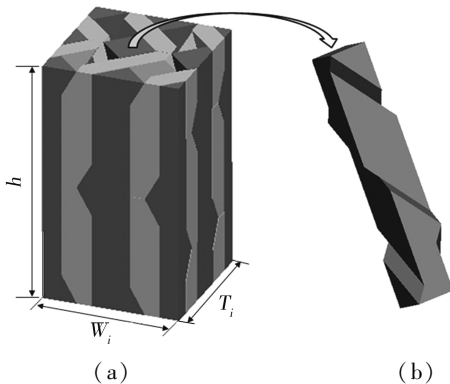


图3 单胞实体图

Fig.3 Solid model of interior unit cell

2 三维五向编织复合材料拉伸强度准则

三维五向编织复合材料可以看作由两种材料组成,一种为树脂基体,另一种为单向纤维增强复合材料。由于两种组分材料力学性能差异很大,直接用宏观的均匀正交各向异性的强度理论进行分析是不可行的,需要采用细观力学方法对组分材料分别进行失效判定。

单向增强复合材料的基本拉伸强度可由下式计算:

$$\sigma_{cl} = \sigma_f V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (1)$$

式中, σ_{cl} 为单向复合材料的拉伸强度; σ_f 为纤维的拉伸强度; σ_m^* 为对应纤维断裂应变时基体的拉伸应力,取70.6 MPa^[9], V_f 为纤维体积含量。纤维增强复合材料中所用碳纤维为高强脆性纤维,纤维强度有较大的离散性,因此用此公式计算得到的拉伸强度值往往大于实验值,故采用下式^[15]进行修正:

$$\sigma_{cl} = k \sigma_f V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (2)$$

式中, k 为小于1的折减系数,本文取0.9。

另外,实验研究表明^[16-17]:对于三维五向编织复合材料,在拉伸载荷作用下,轴纱承载最大,破坏形式主要为轴纱的正应力拉断,因此本文采用最大应力失效准则^[18]对单向纤维增强复合材料进行失效判断:

$$\begin{cases} S_{11c} < \sigma_{11} < S_{11t} \\ S_{22c} < \sigma_{22} < S_{22t} \\ S_{33c} < \sigma_{33} < S_{33t} \end{cases} \quad (3)$$

式中, S_{11t} 为单向纤维复合材料的轴向拉伸强度, S_{11c} 为其轴向压缩强度, S_{22t} 、 S_{33t} 为垂直于纤维方向的拉伸强度, S_{22c} 、 S_{33c} 为垂直于纤维方向的压缩强度。由于轴纱的加入,材料的应力应变基本为线性关系,即材料失效模式为脆性断裂^[16],因此,本文假定单胞内任一点应力值达到极限强度值时,即判定材料失效。

由于单向纤维增强复合材料为宏观各向同性材料,因此需要将各个节点及单元应力值从整体坐标系(x, y, z)转换到各自的局部坐标系(1, 2, 3),其中,1为沿纤维轴线方向,123坐标系服从右手准则。

模拟拉伸实验载荷的施加方式,约束单胞下表面的 y 向位移,上表面施加 y 向位移约束 δ ,而四周面不施加约束;同时,对单胞的角点施加适当的约束以阻止单胞平动及转动。

图4为各组分材料在各自局部坐标系下1方向的应力云图。由于编织纱与轴向的夹角相同,只是方向不同,其内部应力大小从理论上应该是相同的,因此,只对其中一根纱线[图4(b)]进行分析。可以看到,单胞内轴纱应力值远远大于编织纱和基体的应力值,表明在拉伸过程中轴纱首先发生拉伸断裂,与实验观察一致,证明本文模型比较合理。

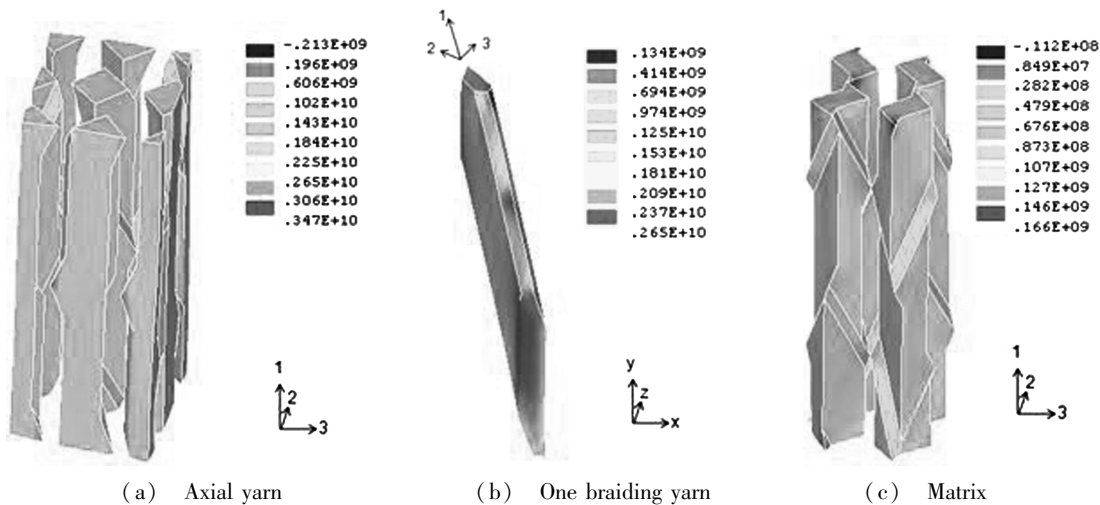


图4 单胞各组分最大主应力云图

Fig. 4 Maximal principal stress in different material subjected to z-direction loading

3 模型验证

为了精确计算出单胞内各点的应力值,选取二阶四面体单元进行网格划分。同时,为了尽可能获得真实的应力数据,取单元内各积分点处的平均值作为单胞内节点的准确解^[19]。

失效准则中单元主应力取单元各积分点在其局部坐标系主方向的平均应力值,施加一定载荷,如没有产生失效点,则继续增加位移载荷,直至单胞内某一单元应力值达到其极限强度,则认为试件失效。通过 ANSYS 后处理过程,求得单胞上表面或下表面所有节点约束反力沿载荷方向的和,再除以单胞沿轴向的横截面积即为其强度值。

为验证本模型的有效性,选取文献[16]的实验数据进行对比。其中碳纤维牌号为 T700SC,其单根纤维的拉伸强度为 4.9 GPa;基体材料为 TDE-86 环氧树脂,其拉伸强度为 80 MPa。

表 1 给出了强度预测值与实验值的比较,可以看到:数值计算结果与实验结果吻合较好,基本在工程误差可接受的范围之内。

表 1 三维五向编织复合材料强度预测值与实验值的比较

Tab.1 Comparison of predicted and experimental strengths

No.	γ /($^{\circ}$)	V_f /%	ϵ	Measured /MPa	Predicted /MPa	Error /%
1	17	56.7	0.844	753.2	727.1	-3.4
2	27	55.3	0.813	720.8	697.6	-3.2
3	39.5	57.3	0.823	510.6	568.9	11.4

图 5 给出了三维五向编织复合材料轴向拉伸强度随编织角的变化情况。随着编织角的增大,其拉伸强度逐渐减小。特别是内部编织角大于 50° 时,强度值下降更快,这可能是因为随着编织角的增大,拉伸过程的非线性趋势越来越明显,而本文模型是建立在线弹性变化

的基础上的,从而造成编织角较大时,预测误差偏大;而在实际的编织工艺中,内部编织角一般均在 50° 以内。

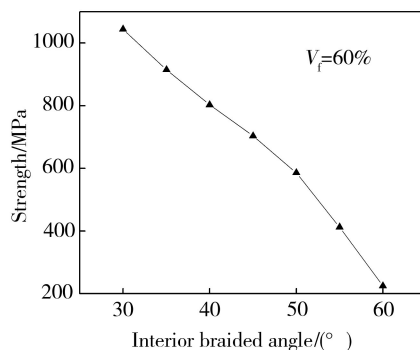


图 5 预测强度值随内部编织角的变化情况

Fig. 5 Predicted strength versus interior braiding angle

4 结论

采用 3D 实体有限元方法,较为精确地模拟了三维五向编织复合材料在轴向拉伸时的细观应力分布状况。基于等应变假设和最大应力失效准则,建立了三维五向编织复合材料的数值预报模型,预测结果与实验值基本吻合。强度模型的准确性随着编织角的增加,误差变大,这主要是由于随着编织角的增加,三维五向编织复合材料的失效形式逐渐由线性断裂转化为非线性破坏,这也正是本文模型的局限性,有待于进一步改进和深入研究。

参考文献

- [1] 卢子兴,杨振宇,李仲平. 三维编织复合材料力学行为研究进展[J]. 复合材料学报,2004, 21(2): 1-7
- [2] Wu D L. Three-cell model and 5D braided structural composites [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(3): 225-233
- [3] 卢子兴,刘子仙. 三维五向编织复合材料的弹性性能[J]. 复合材料学报,2006, 32(4): 455-460

(下转第 46 页)