

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.019

连续纤维增强聚合物基复合材料 CAE 仿真材料参数测试方法

卢卓, 李树虎, 徐井利, 王荣惠, 李林, 刘岩, 孙魁远

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 针对复合材料参数, 目前大多数标准测定的性能数据更适合于产品检验和质量控制, 标准适用范围往往未明确适用于设计端使用, 导致计算机辅助工程(CAE)分析设计时难于参考使用。总体而言, 在复合材料 CAE 仿真过程中, 目前依然存在所需材料参数不明确、测试方法不明晰、缺少完整的测试体系等问题。鉴于此, 针对层合板与织物两种形式的连续纤维增强聚合物基复合材料, 介绍了其弹性本构参数以及强度参数原理, 明确了 CAE 动静态仿真分析所需材料参数, 对比分析了拉伸测试、压缩测试、剪切测试的国内与国外测试标准, 指出了目前各种测试标准在设计方面存在的不足。最后, 在美标及国际标准基础上改进并建立了一套完整的连续纤维增强聚合物基复合材料 CAE 仿真分析用材料参数测试方法, 使测定性能数据更适用于 CAE 分析设计使用。

关键词: 连续纤维增强聚合物基复合材料; 材料参数; 测试方法; 复合材料织物; 复合材料层合板

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0133-11

Test method for CAE simulation material parameters of continuous fiber reinforced polymer matrix composites

LU Zhuo, LI Shuhu, XU Jingli, WANG Ronghui, LI Lin, LIU Yan, SUN Kuaiyuan

(Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : At present, according to the composite parameters, the performance data of most standard measurements are more suitable for product inspection and quality control, and the scope of application of standards is often not clearly applicable to the design side, resulting in difficult reference use in Computer Aided Engineering (CAE) analysis and design. In general, in the CAE simulation process of composites, there are still some problems, such as unclear the needed material parameters, unclear test methods, and lack of a complete test system. In view of this, the principles of elastic constitutive parameters and strength parameters of continuous fiber reinforced polymer matrix composites in two forms (laminates and fabric) were introduced, the material parameters required for CAE dynamic and static simulation analysis were defined, and the domestic and foreign test standards for tensile testing, compression testing and shear testing were compared and analyzed, the deficiencies in the design of various test standards were pointed out. Finally, a complete set of material parameter testing method for CAE simulation analysis of continuous fiber reinforced polymer matrix composites was improved and established on the basis of American standard and international standard, so that the measured performance data were more suitable for CAE analysis and design.

Keywords : continuous fiber reinforced polymer matrix composite ; material parameter ; test method ; composite fabric ; composite laminate

连续纤维增强聚合物基复合材料是一种先进的复合材料, 主要包括连续纤维增强体和聚合物基体。连续纤维增强体通常包括碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、芳纶纤维、聚对苯撑苯并二噁唑纤维

(PBO)纤维等^[1], 因其具有高强度和质量轻等特点被广泛使用。聚合物基体可以是热固性树脂(如环氧树脂)或热塑性树脂(如聚酰胺树脂), 用来固定和保护纤维, 并传递载荷到纤维之间^[2-3], 这种复合材料

通信作者: 李树虎, 硕士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为非金属材料数字化设计、仿真计算、力学试验、数据库和软件开发

收稿日期: 2024-08-13

引用格式: 卢卓, 李树虎, 徐井利, 等. 连续纤维增强聚合物基复合材料 CAE 仿真材料参数测试方法[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 133-143.

LU Zhuo, LI Shuhu, XU Jingli, et al. Test method for CAE simulation material parameters of continuous fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 133-143.

还具有很强的可设计性。

连续纤维增强体在复合材料中最常见的两种应用形式是复合材料层合板和编织复合材料,在复合材料层合板中,单向板是组成层合板的基本单元。在复合材料层合板性能设计过程中,其性能参数主要使用复合材料单向板进行测定。由于连续纤维增强复合材料的特殊力学性质及可设计性,越来越多的学者对此类复合材料进行 CAE 动静态仿真计算和性能优化设计以满足工业需求,主要使用的商业软件有 LS-DYNA, ANSYS, AutoDYN, Abaqus 等。然而进行仿真过程中所需的材料参数的确定及获取是一大难点。许多学者针对复合材料的性能测试方法研究了各种测试标准,其中性能测试方法包括拉伸、剪切、压缩等,所使用的标准包括美标、国标、国际标准、行业标准等,并且一些研究人员还对这些测试方法与测试标准进行了研究对比,如张瑾^[4]研究了缠绕成型纤维增强复合材料制品的几种常见力学性能测试方法及相应标准,结合相关理论对纤维缠绕复合材料力学性能测试的各种方法进行分析,确定了通过 NOL 环测试缠绕成型制品的方法。李龙等^[5]从试验研究、机理分析、计算模拟等角度,系统对比并分析了 4 种常用复合材料压缩性能测试方法(GB/T 3856-2005, ASTM D3410-16, SACMA SRM 1R-94, ASTM D6641-14)的优劣与适用性,提出了优化的测试条件。张晓霞等^[6]对纺织复合材料预制体的拉伸、压缩、弯曲、剪切和成型试验等测试方法进行了研究,讨论了不

同测试方法的优缺点及适用条件,对后续的研究工作进行了展望。但是目前对于复合材料进行 CAE 仿真计算所需的材料参数及其获取方式研究甚少,并且依然存在材料参数要求不明确、测试方法不明晰、复合材料参数测试方法所得数据并不完全适用于设计参考等问题。

笔者对连续纤维增强聚合物基复合材料进行 CAE 仿真(以 LS-DYNA 动态计算、ANSYS 静态计算为例),对所需的材料参数进行研究,并明确在试验中需要测定的参数,然后基于美标和国际标准进行研究、改进和整理,形成一套完整的可用于连续纤维增强聚合物基复合材料 CAE 动静态仿真的材料参数测试方法。

1 复合材料力学测试参数基本原理

1.1 复合材料各向异性弹性体本构理论

一般来讲,材料应力应变关系(本构关系)符合广义胡克定律,具体见式(1)。

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

式中: σ 为应力; E 为拉伸弹性模量; ε 为应变。

对于应力应变关系张量,可以采用矩阵形式,具体见式(2)。

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}, \{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \tag{2}$$

式中: $\{\sigma\}$ 和 $\{\varepsilon\}$ 分别为应力列向量和应变列向量; $[C]$ 为刚度矩阵; $[S]$ 为柔度矩阵。

根据材料应力应变关系的复杂情况和复合材料特点,一般包括各向同性、横观各向同性、正交各向异性、各向异性等,具体统计见表 1。

表 1 材料对称性分类与刚度系数个数

Tab. 1 Classification of material symmetry and numbers of stiffness coefficients

Material symmetry type	Symmetry declaration	Numbers of non-zero coefficients of compliance matrix	Numbers of independent coefficients of flexibility matrix (positive axis)
Triclinic shafting	Asymmetry	36	21
Monoclinic shafting	A plane of symmetry	20	13
Anisotropy	Three planes of symmetry	12	9
Transversal	An isotropic plane	12	5
Isotropy	—	12	2

1.2 正交各向异性体的本构弹性参数测试原理

1.2.1 特殊正交各向异性(横观各向同性)

若用工程常数表示,注意到拉伸弹性模量 $E_1 = E_2$,泊松比 $\mu_{12} = \mu_{21}, \mu_{23} = \mu_{13}, \mu_{32} = \mu_{31}$ 。

在复合材料力学中,一般来说,复合材料单向板的纤维纵向方向设为 1 方向,2,3 方向为纤维横向方向。通常将复合材料织物的经向和纬向即 1,2 方向设为纤维纵向方向,3 方向为纤维的法向方向。

$$\text{剪切模量 } G_{12} = \frac{E_1}{2(1 + \mu_{12})}, G_{23} = G_{13}, \text{ 则柔度矩}$$

阵 $[S]$ 可化为式(3)。

其中, G_{12} 可以通过 E_1 与 μ_{12} 表示,且对于正交各向异性来说因为 $S_{ij} = S_{ji}$ (S 为柔度矩阵系数),所以工程弹性常数之间还有如式(4)所示的 3 个关系称为麦克斯韦互等定律^[7]。

所以横观各向同性材料有 5 个独立常数。

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{12}}{E_1} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\mu_{21}}{E_1} = \frac{\mu_{12}}{E_2} \\ \frac{\mu_{31}}{E_1} = \frac{\mu_{13}}{E_3} \\ \frac{\mu_{32}}{E_2} = \frac{\mu_{23}}{E_3} \end{cases} \begin{cases} \mu_{ij} = \mu_{ji} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i, j = 1, 2, 3$, 但 $i \neq j$ 。

1.2.2 常规正交各向异性

对于正交各向异性弹性体的本构关系包含9个独立系数,刚度矩阵见式(5)。独立的刚度系数和柔度系数都增加到9个。

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: C_{ij} 为刚度矩阵系数。

对于正交各向异性材料,用工程常数即3个拉伸弹性模量 E_1, E_2, E_3 , 6个泊松比 $\mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{23}, \mu_{32}, \mu_{31}, \mu_{13}$ 和3个剪切模量 G_{12}, G_{13}, G_{23} 来表示柔度系数,则柔度矩阵展开为式(6)。

由于矩阵的对称性和正定性要求,这些弹性常数还要满足如式(7)所示取值范围的要求。

正交各向异性柔度矩阵中共12个非零系数,9个独立系数,考虑矩阵的对称性、正则化、正定性要求,弹性常数既要有明晰的物理意义、又要必须满足数学约束条件。

因此复合材料性能优化设计预测过程中所需要的9个本构参数包括3个拉伸弹性模量 E_1, E_2, E_3 , 3个泊松比 $\mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{31}(\mu_{13})$ 和3个剪切模量 $G_{12}, G_{23}, G_{31}(G_{13})$ ^[8-9], 复合材料性能测试原理也主要依据上述

理论。

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23} > 0$$

$$\begin{aligned} |\mu_{21}| &< \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^{1/2}, |\mu_{12}| < \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/2} \\ |\mu_{32}| &< \left(\frac{E_3}{E_2}\right)^{1/2}, |\mu_{23}| < \left(\frac{E_2}{E_3}\right)^{1/2} \\ |\mu_{13}| &< \left(\frac{E_1}{E_3}\right)^{1/2}, |\mu_{31}| < \left(\frac{E_3}{E_1}\right)^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mu_{21}\mu_{32}\mu_{13} < \frac{1}{2} \left[1 - \mu_{21}^2 \left(\frac{E_1}{E_2}\right) - \mu_{32}^2 \left(\frac{E_2}{E_3}\right) - \mu_{13}^2 \left(\frac{E_3}{E_1}\right) \right]$$

1.3 复合材料强度参数测试原理

复合材料的强度失效准则主要作为复合材料渐进损伤过程中发生起始破坏的失效判据使用。目前已使用的典型复合材料宏观强度失效准则主要是基于连续介质力学原理采用唯象方法基于大量实验结果得出的。复合材料强度参数测试主要是基于这些失效准则进行,这些强度参数为复合材料起始破坏测定所用参数。经过多年的发展,复合材料强度失效理论虽然取得一些研究进展,但完整、成熟的和适用面广的复合材料强度失效理论尚未完全突破。笔者主要是基于内置于ANSYS和LS-DYNA软件中常用的两个准则进行介绍,重点在于说明复合材料性能预测过程中强度参数获取依据。

1.3.1 Hashin 准则

Hashin在1980年提出了一种三维的复合材料失效判据,该准则后被收录于MIL-HDBK-17,在工程界与学术界应用甚广,目前其简化形式的二维失效判据已被集成在了Abaqus, MSC.Dytran等有限元软件中^[10]。Hashin三维失效判据可以预测4种失效模式:纤维拉伸失效、纤维压缩失效、基体拉伸失效

以及基体压缩失效等^[11]。在纤维拉伸失效中,考虑了剪切效应的影响。

Hashin 三维失效判据简化后的三维表达形式如下。

纤维拉伸($\sigma_{11} \geq 0$)的表达形式见式(8)。

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X_T^2} + \alpha \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \right) = 1 \quad (8)$$

纤维压缩($\sigma_{11} < 0$)的表达形式见式(9)。

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right) = 1 \quad (9)$$

基体拉伸($\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$)的表达形式见式(10)。

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1 \quad (10)$$

基体压缩($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)的表达形式见式(11)。

$$\left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad (11)$$

式中: X_T, X_C 为纤维方向的拉伸和压缩强度; Y_T, Y_C 为基体方向的拉伸和压缩强度; S_{ij} 为剪切强度; σ_{ij} 为不同方向的应力; α 为确定剪切应力对纤维拉伸起始准则的贡献系数($0 \leq \alpha \leq 1$),默认值为0。

1.3.2 MAT_COMPOSITE_FAILURE_MODEL(MAT59)

模型失效准则

59号模型是利用LS DYNA进行复合材料冲击性能优化设计时常用的失效模型之一。Rottner针对复合材料渐进失效模型(MAT59)实体单元提出的失效准则有8个模式,所有失效标准均以基于实体单元的6个应力分量($\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c, \tau_{ab}, \tau_{bc}, \tau_{ca}$)以及相关的拉伸弹性模量和剪切模量($E_a, E_b, E_c, G_{ab}, G_{bc}, G_{ca}$)表示,其中, τ 为剪切应力。对于单向模型, a, b 和 c 分别表示纤维的平面内纵向、横向和平面外方向;而对于织物模型, a, b 和 c 则分别表示织物层合板平面内纤维两种朝向与平面外方向^[12]。具体表达形式如下。

纵向拉伸失效的表达形式见式(12)。

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_4}{S_{ba}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{S_{ca}} \right)^2 = 1 \quad (12)$$

横向拉伸失效的表达形式见式(13)。

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_4}{S_{ba}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{cb}} \right)^2 = 1 \quad (13)$$

层间剪切失效(纵向)的表达形式见式(14)。

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{S_{ca}} \right)^2 = 1 \quad (14)$$

层间剪切失效(横向)的表达形式见式(15)。

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{cb}} \right)^2 = 1 \quad (15)$$

分层损伤失效(厚度方向拉伸)的表达形式见式(16)。

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{cb}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{S_{ca}} \right)^2 = 1 \quad (16)$$

纵向压缩失效的表达形式见式(17)。

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c} \right)^2 + = 1 \quad (17)$$

横向压缩失效的表达形式见式(18)。

$$\left(\frac{\sigma_2}{S_{ba} + S_{cb}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{S_{ba} + S_{cb}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{|Y_c|} \left(\frac{\sigma_4}{S_{ba}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{cb}} \right)^2 = 1 \quad (18)$$

厚度方向压缩失效的表达形式见式(19)。

$$\left(\frac{\sigma_3}{S_{ca} + S_{cb}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Z_c}{S_{ca} + S_{cb}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_3}{|Z_c|} \left(\frac{\sigma_6}{S_{ca}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{cb}} \right)^2 = 1 \quad (19)$$

式中: $\sigma_i(i=1, 2, \dots, 6)$ 为不同方向的应力; X_i, Y_i, Z_i 分别为 a, b, c 方向的拉伸强度; X_c, Y_c, Z_c 分别为 a, b, c 方向的压缩强度。

综上,对于复合材料性能预测与优化设计过程中主要使用的强度参数有9个,包括3个拉伸强度参数、3个压缩强度参数和3个剪切强度参数。

2 复合材料CAE动静态仿真材料参数组成

针对复合材料单向板与复合材料织物进行CAE仿真所需要的材料参数数量一致,但具体参数设置不同。根据复合材料性能优化设计过程中载荷特点,从静态计算与动态计算两个方面对CAE仿真所需要的材料参数进行介绍。

2.1 复合材料CAE静态仿真材料参数

在ANSYS中进行连续纤维增强聚合物基复合材料静态结构仿真计算经常使用的材料模型为工程材料库中的7号Composite Materials(复合材料),表2、表3分别为ANSYS工程材料库中7号材料Composite Materials中的Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet与Carbon Fiber (230 GPa) Wet材料参数

卡片。

表2 Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet (ANSYS参数卡)

Tab. 2 Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet (ANSYS parameter card)

Property	Value
Tensile modulus x direction/Pa	2.3×10^{11}
Tensile modulus y direction/Pa	2.3×10^{10}
Tensile modulus z direction/Pa	2.3×10^{10}
Poisson ratio xy	0.2
Poisson ratio yz	0.4
Poisson ratio xz	0.2
Shear modulus xy/Pa	9.0×10^9
Shear modulus yz/Pa	8.2×10^9
Shear modulus xz/Pa	9.0×10^9

通过表2、表3中可以看出,所需计算的本构参数有9个,其中Tensile modulus x/y/z direction分别为1/2/3方向的拉伸弹性模量,Poisson ratio xy/yz/xz分别为12/23/13方向的泊松比,Shear modulus xy/yz/xz分别为12/23/13方向剪切模量。强度参数有9个,其中Tensile strength x/y/z direction分别代表1/2/3方向的拉伸强度,Compressive strength x/y/z direction分别代表1/2/3方向的压缩强度,Shear strength xy/yz/xz分别为12/23/13方向剪切强度。

2.2 复合材料CAE动态仿真材料参数

CAE动态结构仿真使用的软件为LS-DYNA,在LS-DYNA中进行连续纤维增强聚合物基复合材

表3 Carbon Fiber (230 GPa) Wet (ANSYS参数卡)

Tab. 3 Carbon Fiber (230 GPa) Wet (ANSYS parameter card)

Property	Value
Density/(g·cm ⁻³)	1.451
Tensile modulus x direction/MPa	59 160
Tensile modulus y direction/MPa	59 160
Tensile modulus z direction/MPa	7 500
Poisson ratio xy	0.04
Poisson ratio yz	0.3
Poisson ratio xz	0.3
Shear modulus xy/MPa	17 500
Shear modulus yz/MPa	2 700
Shear modulus xz/MPa	2 700
Tensile strength x direction/MPa	513
Tensile strength y direction/MPa	513
Tensile strength z direction/MPa	50
Compressive strength x direction/MPa	-437
Compressive strength y direction/MPa	-437
Compressive strength z direction/MPa	-150
Shear strength xy/MPa	120
Shear strength yz/MPa	55
Shear strength xz/MPa	55

料动态仿真计算所使用的本构模型主要为59号本构模型——*MAT_59/*MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL(复合材料渐进损伤模型)^[13]。

表4为LS-DYNA中59号本构模型的参数卡片。

表4 *MAT_59/*MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL (LS-DYNA参数卡)

Tab. 4 *MAT_59/*MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL (LS-DYNA parameter card)

Number	Variable	Default	Number	Variable	Default	Number	Variable	Default
1	MID	1	15	A1	1	29	YYC	5.55×10^8
2	RO	1.2×10^3	16	A2	0	30	ZZC	6.5×10^7
3	EA	1.85×10^{10}	17	A3	0	31	XXT	5.55×10^8
4	EB	1.85×10^{10}	18	V1	0	32	YYT	5.55×10^8
5	EC	6.0×10^9	19	V2	0	33	ZZT	3.45×10^7
6	PRBA	0.25	20	V3	0			
7	PRCA	0.33	21	D1	0			
8	PRCB	0.33	22	D2	1			
9	GAB	0.77×10^9	23	D3	0			
10	GBC	2.715×10^9	24	BETA	0			
11	GCA	2.715×10^9	25	SBA	7.7×10^7			
12	XP	0	26	SCA	5.43×10^8			
13	YP	0	27	SCB	5.43×10^8			
14	ZP	0	28	XXC	5.55×10^8			

在表4材料参数卡片中,MID为参数卡的序号,RO为密度,本构参数所对应的分别是EA为1方向的拉伸弹性模量,EB为2方向的拉伸弹性模量,EC为3方向的拉伸弹性模量,PRBA为21方向的泊松比,PRCA为31方向的泊松比,PRCB为32方向的泊松比,GAB为12方向的剪切模量,GBC为23方向的

剪切模量,GCA为31方向的剪切模量,XP/YP/ZP分别为AOPT=1和4时点p的x/y/z坐标,A1/A2/A3为AOPT=2时向量a的分量,V1/V2/V3为AOPT=3和4时向量v的分量,D1/D2/D3为AOPT=2时向量d的分量,BETA为AOPT=3时的材料角度。

强度参数所对应的分别是SBA为21方向的剪

切强度,SCA为31方向的剪切强度,SCB为32方向的剪切强度,XXC为1方向的压缩强度,YYC为2方向的压缩强度,ZZC为3方向的压缩强度,XXT为1方向的拉伸强度,YYT为2方向的拉伸强度,ZZT为3方向的压缩强度。

连续纤维增强聚合物基复合材料的CAE静态与动态仿真所需的材料参数均为18个,包括材料本构参数与强度参数,其中拉伸弹性模量、剪切模量、

拉伸强度、压缩强度是相同的,主要区别在于泊松比与剪切强度的方向不同。对连续纤维增强聚合物基复合材料进行CAE动静态仿真所需的材料参数进行汇总,见表5,表中, S_{Cij} 为各方向的压缩强度。因此结合二者之间的差异性,同时考虑到参数获取过程中的便捷性和经济性,复合材料材料参数获取与测试过程中本构参数可参考其中一种,另一种利用麦克斯韦定理进行换算即可。

表5 连续纤维增强聚合物基复合材料动静态CAE仿真所需材料参数

Tab. 5 Material parameters required for dynamic and static CAE simulation of continuous fiber reinforced polymer matrix composites

CAE Method	Material parameters
ANSYS static CAE material parameters	$E_{11}, E_{22}, E_{33}, \mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{13}, G_{12}, G_{23}, G_{13}, S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{12}, S_{13}, S_{23}, S_{C11}, S_{C22}, S_{C33}$
DYNA dynamic CAE material parameters	$E_{11}, E_{22}, E_{33}, \mu_{21}, \mu_{32}, \mu_{31}, G_{12}, G_{23}, G_{13}, S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{21}, S_{31}, S_{32}, S_{C11}, S_{C22}, S_{C33}$

3 复合材料测试标准及国内外对比分析

在复合材料性能参数测试方面,美标和国际标准对比国外其他测试标准相对比较成熟,性能数据应用方面,美标与国际标准相比于其他测试标准更适用于设计参考,一些标准中已明确可直接用于设计使用。

3.1 复合材料参数常见的测试标准及存在的问题

复合材料的材料参数的测试标准包括拉伸类

试验、剪切类试验、压缩类实验,复合材料拉伸性能测试标准有ASTM D3039/D3039M-17, GB/T 3354-2014等^[14],复合材料剪切试验测试标准有ASTM D5379/D5379M-19, GB/T 3355-2014^[15]等,复合材料压缩性能测试标准有ASTM D6641/D6641M-23, ISO 20975-1:2023等^[16]。

更全面的国内外关于复合材料拉伸、剪切、压缩性能的典型测试方法见表6。

表6 复合材料拉伸、剪切、压缩性能的典型测试方法

Tab. 6 Typical test methods of tensile, shear and compression properties of composites

Test properties	American standard/International standard	National standard
Tensile property	ASTM D3039/D3039M-17, ISO 20975-1:2023	GB/T 3354-2014, GB/T 1447-2005
Shear property	ASTM D5379/D5379M-19	GB/T 3355-2014, GB/T 30970-2014, GB/T 28889-2012, GB/T 1450.1-2005, GB/T 1450.2-2005
Compression property	ASTM D6641/D6641M-23, ISO 20975-1:2023	GB/T 1448-2005

目前国内大多数标准测定的性能数据更适合于产品检验和质量控制,不完全适用于分析设计的要求。比如GB/T 1447-2005和GB/T 3354-2014中并未对测试泊松比做出明确说明和规定;GB/T 4944-2005中只规定了测试复合材料层间拉伸强度,没有规定(试样也不适合于)测试层间拉伸弹性模量;GB/T 3355-2014是测试复合材料面内剪切模量和强度的一种使用比较简便的标准方法;GB/T 1450.1-2005和GB/T 1450.2-2005等标准也只对测试复合材料层间剪切强度作出了规定,缺少层间剪切模量测试方法。ASTM D6641/D6641M-23, ASTM D5379/D5379M-19以及ASTM D3039/D3039M-17在适用范围中并未明确标注适用于分析参考,但相比于国内标准,美标对于数据的测定更全面,适用性更广泛。ISO20975-1:2023中规定的通厚特性及其测量方法适用于工程规范和设计使

用。目前各个标准离散存在,对试样尺寸等的协调统一性规定不完善,比如纵、横向拉伸试样尺寸的协调性、层间拉伸试样与层间剪切试样的尺寸关联性等,因此制定系统性、统一性的纤维增强复合材料参数(用于结构分析和设计)测试方法显得尤为必要。

3.2 测试标准与CAE动静态仿真材料参数对应关系

通过对国内外复合材料参数测试方法的对比分析及不足的阐述,基于美标对连续纤维增强聚合物基复合材料单向板和织物层压板进行CAE静态仿真所需的材料参数以及测试材料参数的试验方式与需参照的测试标准做了归纳整理,具体见表7,并在原有测试标准上进行了一定的修改,具体的测试方法见下文第4节。

通过表7可以看出,对试样进行力学测试得到的参数并不完全,需要通过单向复合材料及复合材

料织物的特殊力学性质得到各个参数之间的关系从而获取所有计算所需要的参数,以此来降低测试的成本与测试的时间。以下将分别从复合材料单

向板的力学特性及复合材料织物的力学特性两个方面对材料测定参数与CAE分析所需参数之间的关系进行推导。

表7 复合材料测试方式、测试标准及对应的材料参数

Tab. 7 Composites testing mode, testing standards and corresponding material parameters

Composite type	Test mode	Test standard	Test parameters	ANSYS static CAE material parameters	DYNA dynamic CAE material parameters
Unidirectional composite	Unidirectional longitudinal stretching	ASTM D3039/D3039M-17	E_{11}, μ_{12}, S_{11}	$E_{11}, \mu_{12}, S_{11},$ $E_{22}, \mu_{23}, S_{22},$ E_{33}, μ_{13}, S_{33}	$E_{11}, \mu_{21}, S_{11},$ $E_{22}, \mu_{32}, S_{22},$ E_{33}, μ_{31}, S_{33}
	Unidirectional transverse stretching	ASTM D3039/D3039M-17	E_{22}, μ_{23}, S_{22}		
Braided composite	Fabric longitudinal stretching	ASTM D3039/D3039M-17	$E_{11}, \mu_{12}, S_{11}, \mu_{13}$	$E_{11}, \mu_{12}, S_{11},$ $E_{22}, \mu_{23}, S_{22},$ E_{33}, μ_{13}, S_{33}	$E_{11}, \mu_{21}, S_{11},$ $E_{22}, \mu_{32}, S_{22},$ E_{33}, μ_{31}, S_{33}
	Fabric normal stretching	ISO 20975-1:2023	E_{33}, S_{33}		
Unidirectional composite	In-plane shear	ASTM D5379/D5379M-19	G_{12}, S_{12}	$G_{12}, S_{12}, G_{13}, S_{13},$ G_{23}, S_{23}	$G_{12}, S_{21}, G_{31}, S_{31}, G_{23},$ S_{32}
	Out of plane shear 23		G_{23}, S_{23}		
Braided composite	In-plane shear	ASTM D5379/D5379M-19	G_{12}, S_{12}	$G_{12}, S_{12}, G_{13}, S_{13},$ G_{23}, S_{23}	$G_{12}, S_{21}, G_{31}, S_{31}, G_{23},$ S_{32}
	Out of plane shear 13		G_{13}, S_{13}		
Unidirectional composite	In-plane compression	ASTM D6641/D6641M-23	S_{C11}	$S_{C11}, S_{C33}, S_{C22}$	$S_{C11}, S_{C33}, S_{C22}$
	Normal compression	ISO 20975-1:2023	S_{C33}		
Braided composite	In-plane compression	ASTM D6641/D6641M-23	S_{C11}	$S_{C11}, S_{C22}, S_{C33}$	$S_{C11}, S_{C22}, S_{C33}$
	Normal compression	ISO 20975-1:2023	S_{C33}		

复合材料层合板由单向板经不同铺层顺序、铺层角度叠合压制而成。因此通过单向板横向拉伸和纵向拉伸试验得到的参数为 $E_{11}, \mu_{12}, S_{11}, E_{22}, \mu_{23}, S_{22}$;在ANSYS结构分析中需要额外用到参数为 E_{33}, μ_{13}, S_{33} ;在LS-DYNA动态分析额外需要用到参数 $\mu_{21}, \mu_{32}, \mu_{31}$ 。通过面内剪切和面外剪切23试验所得到的参数为 $G_{12}, S_{12}, G_{23}, S_{23}$;在ANSYS结构分析中需要额外的参数为 G_{13}, S_{13} ;在LS-DYNA动态分析中所需要的额外参数为 $S_{21}, G_{31}, S_{31}, S_{32}$ 。通过两种压缩测试,所测得的参数为 S_{C11}, S_{C33} ;ANSYS结构分析与LS-DYNA动态分析所需要的额外参数均为 S_{C22} ^[17]。图1与图2分别为复合材料单向板与层合板的示意图。

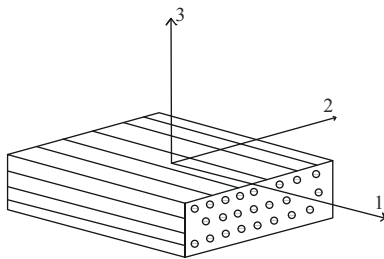


图1 复合材料单向板示意图

Fig. 1 Diagram of composite unidirectional laminate

复合材料单向板的1方向为纤维纵向,根据横观各向同性的弹性力学特性,23面上各个方向的力学特性相同,由此可得式(20)。

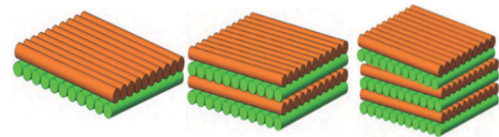


图2 复合材料层合板示意图

Fig. 2 Diagram of composite laminate

$$\begin{aligned}
 E_{22} &= E_{33} \\
 G_{31} &= G_{13} = G_{12} \\
 \mu_{13} &= \mu_{12} \\
 S_{22} &= S_{33}, S_{21} = S_{12}, S_{32} = S_{23}, S_{31} = S_{13} = S_{12} \\
 S_{C22} &= S_{C33}
 \end{aligned} \quad (20)$$

再根据麦克斯韦定理可得式(21)。

$$\begin{aligned}
 \mu_{21} &= \frac{\mu_{12} \times E_{22}}{E_{11}} \\
 \mu_{32} &= \frac{\mu_{23} \times E_{33}}{E_{22}} \\
 \mu_{31} &= \frac{\mu_{13} \times E_{33}}{E_{11}}
 \end{aligned} \quad (21)$$

笔者研究的复合材料织物主要为二维织物,通常具有平纹、斜纹、缎纹3种织物模式,每种结构的形成原理及其性能特点在纺织工程中具有重要意义。3种织物形式如图3所示。

通过纵向拉伸和法向拉伸试验测试可以直接得到的参数为 $E_{11}, \mu_{12}, S_{11}, \mu_{13}, E_{33}, S_{33}$;对于ANSYS结构分析所需要的额外性能参数为 E_{22}, μ_{23}, S_{22} ;对于LS-DYNA动态分析所需要的额外参数为 $\mu_{21}, \mu_{32}, \mu_{31}$ 。复合材料织物两种剪切试验测试可得参数 G_{12} ,

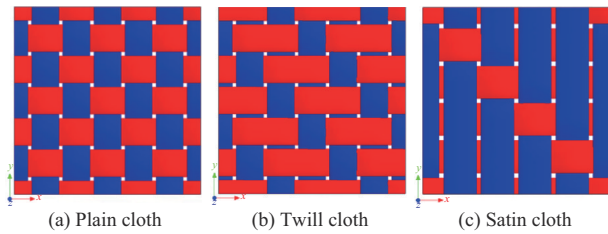


图3 复合材料3种二维织物形式示意图

Fig. 3 Diagram of composite three two-dimensional fabric forms

S_{12}, G_{13}, S_{13} ; 对于 ANSYS 结构分析所需要的额外参数为 G_{23}, S_{23} ; 对于 LS-DYNA 动态分析所需要的额外参数为 $S_{21}, S_{32}, S_{31}, G_{31}$ 。通过两种压缩测试所得参数为 S_{C11}, S_{C33} ; ANSYS 结构分析与 LS-DYNA 动态分析所需要的额外参数均为 S_{C22} 。

结合织物编织形式及特点可知,此处复合材料织物中的经纱与纬纱的纤维材料采用相同丝束,且1,2方向按纤维纵向方向,所以按照物理原理可知1方向和2方向的拉伸弹性模量是相同的,并以其正交各向异性的特殊力学性能可得到式(22),再通过麦克斯韦定理公式(21)可得到所需所有参数。

$$\begin{aligned} E_{22} &= E_{11} \\ G_{23} &= G_{31} = G_{13} \\ \mu_{23} &= \mu_{13} \\ S_{22} &= S_{11}, S_{21} = S_{12}, S_{31} = S_{13}, S_{32} = S_{23} = S_{13} \\ S_{C22} &= S_{C11} \end{aligned} \quad (22)$$

通过复合材料层合板与织物复合材料的力学特性以及基本的物理意义,可以将测定的参数转化为CAE所需的所有参数,从而减少了需要的实验样本,降低了实验测试的时间成本,提升经济性和便捷性。

4 复合材料CAE仿真材料参数测试方法

4.1 复合材料拉伸试验

4.1.1 纵向拉伸试验

连续纤维增强聚合物基复合材料纵向拉伸试验采用 ASTM D3039/D3039M-17, 测 $E_1, \mu_{12}, \mu_{13}, S_{11}$ 。此标准适用于测定高模量纤维增强的聚合物基复合材料的面内拉伸性能。复合材料形式限定于连续或不连续纤维增强的复合材料,且层压板关于试验方向是均衡、对称的。

由于测 μ_{12}, μ_{13} 时是对纤维方向的拉伸,基体方向的压缩相比于测 μ_{21}, μ_{31} 时获取试样更加方便,更易操作。

将具有恒定矩形横截面的材料薄条安装在机械试验机的夹头中,并在记录力的同时单向均匀地加载拉力。材料破坏前承受的最大的力就是极限

强度。如果用应变或位移传感器监测复合材料应变,则可以确定复合材料的应力-应变响应,由此可以推导出极限拉伸应变、拉伸弹性模量、泊松比和过渡应变等。

第一组试样纵向拉伸试样中,试样长度方向与纤维纵向一致,用于测试 E_1, μ_{12} , 测试时在试样长度方向和宽度方向安装应变仪等测量装置;试样尺寸为长 (250.0 ± 2.0) mm、宽 (25.0 ± 0.5) mm、厚 (3.0 ± 0.3) mm, 试样长度方向和纤维纵向(纤维 0° 方向、1 方向)相同。与标准中的试样尺寸有所不同,笔者对试样尺寸的改动体现在厚度尺寸,在 ASTM D3039/D3039M-17 中的试样标准尺寸为 1 mm 厚度,由于拉伸过程中 1 mm 厚度的试样在保证不被破坏的前提下其厚度方向的应变较小,不易检测,所以将厚度方向改为 3 mm 来测得 13, 12 方向的泊松比,但 3 mm 厚度的试样不易破坏,所以使用 1 mm 厚度的试样来测试纤维纵向的拉伸强度。

第二组试样纵向拉伸试样中,试样长度方向与纤维纵向一致,用于测试 S_{11} ; 试样尺寸为长 (250.0 ± 2.0) mm、宽 (25.0 ± 0.5) mm、厚 (1.0 ± 0.3) mm, 试样长度方向和纤维纵向(纤维 0° 方向、1 方向)相同。

第三组试样纵向拉伸试样中,试样长度方向与纤维纵向一致,用于测试 μ_{13} , 测试时在试样长度方向和厚度方向安装应变仪等测量装置;试样尺寸为长 (250.0 ± 2.0) mm、宽 (25.0 ± 0.5) mm、厚 (3.0 ± 0.3) mm, 试样长度方向和纤维纵向(纤维 0° 方向、1 方向)相同。

3 组纵向拉伸试样的示意图如图 4 所示。

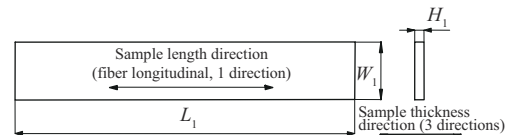


图4 纵向拉伸试样示意图

Fig. 4 Diagram of longitudinal tensile specimen

4.1.2 横向拉伸试验

连续纤维增强聚合物基复合材料横向拉伸试验采用与纵向拉伸试验相同标准 ASTM D3039/D3039M-17, 测 E_2, μ_{23}, S_{22} 。

第一组试样为横向拉伸试样,试样长度方向与纤维横向一致,用于测试 E_2, μ_{23} , 测试时在试样长度方向和厚度方向安装应变仪等测量装置;试样尺寸为长 (250.0 ± 2.0) mm、宽 (25.0 ± 0.5) mm、厚 (3.0 ± 0.3) mm, 试样长度方向和纤维横向(纤维 90° 方向、2 方

向)相同。

第二组试样为横向拉伸试样,试样长度方向与纤维横向一致,用于测试 S_{22} ;试样尺寸为长 (250.0 ± 2.0) mm、宽 (25.0 ± 0.5) mm、厚 (1.0 ± 0.3) mm,试样长度方向和纤维横向(纤维 90° 方向、2方向)相同。

两组横向拉伸试样的示意图如图5所示。

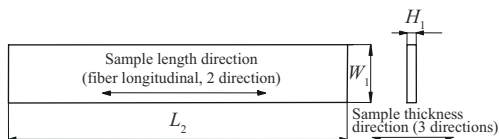


图5 横向拉伸试样示意图

Fig. 5 Diagram of transverse tensile specimen

需要特别说明的是,上述测试方法主要是针对复合材料单向板进行测试。当使用织物复合材料层压板进行上述性能测试时,复合材料织物中的经纱与纬纱的纤维材料采用相同丝束,上述性能测试只需测试一种即可,当复合材料织物中的经纱与纬纱的纤维材料采用不同丝束时应参照上述标准分别测试。

4.1.3 法向拉伸试验

连续纤维增强聚合物基复合材料法向拉伸试验采用ISO 20975-1:2023,测 E_3, S_{33} 。

ISO 20975-1:2023中规定的通厚特性及其测量方法适用于工程规范和设计使用。推荐的测试几何形状适用于测试热固性和热塑性纤维增强复合材料,尽管有些材料在拉伸加载时很难黏合到加载杆上。建议厚度尺寸为40 mm。

对于张力法,考虑了面外弯曲和端部效应对所测拉伸性能的影响。因此,在最小化这些影响的基础上规定了试样的几何形状,促进试样端部(即类型1和类型2)的破坏,以及易于处理(即加工和测试),测拉伸性能的两种类型试样尺寸及试样图见标准ISO 20975-1:2023。

4.2 复合材料剪切试验

4.2.1 面内剪切试验

连续纤维增强聚合物基复合材料面内剪切试验采用ASTM D5379/D5379M-19^[18],测 G_{12}, S_{12} 。

此标准适用于测量高模量纤维增强复合材料的剪切性能。复合材料限定于连续纤维或非连续纤维增强并具有下列材料形式的复合材料:①仅由单向纤维的单层组成的层压板,其纤维方向与加载轴平行或垂直;②仅由机织物长丝层组成的层压板,其经向与加载轴平行或垂直;③仅由单向纤维

层组成,含有相等 0° 层和 90° 层的对称均衡层压板,其 0° 方向与加载轴平行或垂直;④以随机分布纤维为主的短纤维增强复合材料。

带有对称的中心V形缺口的矩形平直条状的材料试样通过专门的夹具在力学试验机上加载,测试中应注意:①按规定制备和加工试样,铺层厚度19 mm;②在试样上按图方式粘贴应变片,为了尽可能减少扭转的潜在影响,在试样的两个侧面粘贴应变片,取平均值作为测量应变;③将试样放入专用剪切试验夹具,使试样的轴线与加载中心线一致。

试样尺寸:宽 d_1 为 (19.0 ± 0.3) mm;缺口深度 d_2 为 (3.8 ± 0.3) mm;厚度 h 为 (3.0 ± 0.3) mm;长度 L 为 (76.0 ± 1.0) mm;倒角半径 r 为 (1.3 ± 0.3) mm;剩余宽度 w 为 (11.4 ± 0.3) mm。

试样及材料坐标系如图6所示,相应试样尺寸见标准ASTM D5379/D5379M-19。

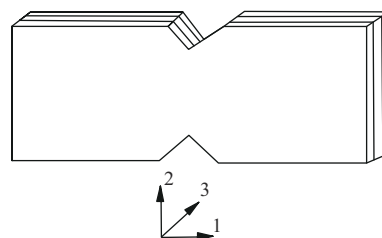


图6 G_{12} 测试用试样及材料坐标系

Fig. 6 Sample used for testing G_{12} and material coordinate system

4.2.2 面外剪切试验

连续纤维增强聚合物基复合材料面外剪切试验采用ASTM D5379/D5379M-19,测 $G_{23}, G_{13}, S_{23}, S_{13}$ 。使用标准与面内剪切试验所用标准相同。试样尺寸与面内剪切试样尺寸一致。

面外剪切试验用试样示意图如图7所示。

当使用织物复合材料层压板进行上述性能测试时,默认织物中的经纱与纬纱的纤维材料采用相同丝束,当复合材料织物中的经纱与纬纱的纤维材料采用不同丝束时应参照复合材料单向板测试标准分别测试。

4.3 复合材料压缩试验

4.3.1 面内压缩试验

连续纤维增强聚合物基复合材料面内压缩试验采用ASTM D6641/D6641M-23,测 S_{C11} 。

该测试方法适用于平衡和对称的一般复合材料。根据需要,试样可以是无加强片试样或有加强片。成功测试的一个要求是样品端部在测试期间不会被压碎。无加强片试样通常适用于低正交各

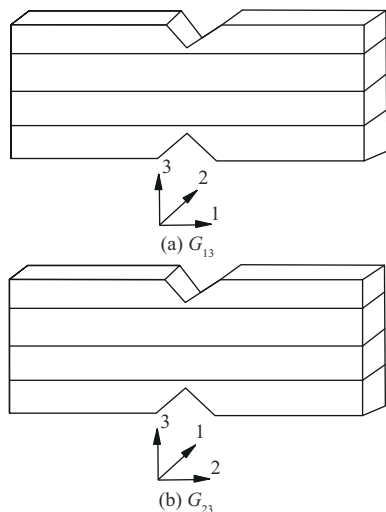


图7 面外剪切试验试样及材料坐标系

Fig. 7 Sample used for out of plane shear test and material coordinate system

向异性材料,例如织物、短切纤维复合材料和最多50% 0°层的层压板或等效材料。高正交各向异性材料,包括单向复合材料,通常需要有加强片。

在万能试验机的两个平台之间施加压缩载荷时,试验夹具可以使试件承受端部载荷和剪切载荷。采集应力-应变数据,直到破坏发生,得到应力-应变曲线。试样尺寸为长140 mm、宽13 mm、厚2 mm。具体试样图及夹具规格图见标准 ASTM D6641/D6641M-23。

4.3.2 法向压缩试验

连续纤维增强聚合物基复合材料法向压缩试验采用 ISO 20975-1:2023,与法相拉伸测试所用标准相同,测 S_{C33} 。此标准针对纤维增强塑料复合材料的层厚方向进行性能测试,旨在测量热固性和热塑性基体的拉伸和压缩性能。对于拉伸测试,试样几何形状的规定旨在最小化平面外弯曲和端部效应对测试结果的影响,促使破坏发生远离试样端部;而对于压缩测试,试样几何形状的规定旨在减少欧拉屈曲和端部效应的影响,以便有效测量压缩性能。

对于压缩方法,考虑了欧拉屈曲和影响所测压缩特性的可能性,因此,在最小化这些影响的基础上指定了试样的几何形状,促进了试样端部(即类型3)的破坏,并使试样易于处理(即加工和测试)。具体试样图见标准 ISO 20975-1:2023。

针对织物复合材料层压板进行上述性能测试时,默认织物中的经纱与纬纱的纤维材料采用相同丝束,当复合材料织物中的经纱与纬纱的纤维材料

采用不同丝束时应参照复合材料单向板测试标准分别测试。

5 结论

(1)从理论层面出发,对复合材料单向板与复合材料织物的弹性本构原理与强度失效原理进行了介绍,并从实际出发,列举了使用 LS-DYNA 与 ANSYS 进行 CAE 动静态分析时的材料卡片,明确了连续纤维增强聚合物基复合材料 CAE 仿真所需18个参数,分析了二者之间的异同点。

(2)结合 CAE 分析所需材料参数确定了在试验测试中需要测定的参数,对比分析了测试参数与分析用参数之间的异同点,再通过本构理论与客观物理意义对试验测定参数与 CAE 仿真所需参数之间的关系进行了推导,从而得到针对常用不同形式复合材料的所有参数,简化了测试的复杂性。

(3)对国内外的复合材料测试标准进行了对比研究,揭示了目前的不足。通过对测试标准的研究,在国外常用标准基础上修改并建立了一套连续纤维增强聚合物基复合材料动/静态仿真分析所需要的参数及测试方法,并综合考虑了测试的便捷性和经济性。

参考文献

- [1] DINITA A, RIPEANU R G, ILINCA C N, et al. Advancements in fiber-reinforced polymer composites: A comprehensive analysis[J]. *Polymers*, 2023, 16(1). DOI:10.3390/polym16010002.
- [2] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料研究进展[J]. *航空工程与维修*, 2001(3):14-16.
CHEN Xiangbao. Development of the advanced polymer matrix composite[J]. *Aeronautical Engineering & Maintenance*, 2001(3): 14-16.
- [3] RAJAK D K, WAGH P H, LINUL E. A review on synthetic fibers for polymer matrix composites: Performance, failure modes and applications[J]. *Materials*, 2022, 15(14). DOI: 10.3390/ma15144790.
- [4] 张瑾. 缠绕成型复合材料制品力学性能测试方法研究[J]. *当代化工研究*, 2023(10):12-14.
ZHANG Jin. Study on mechanical performance testing methods of filament-wound composite products[J]. *Modern Chemical Research*, 2023(10):12-14.
- [5] 李龙, 袁泽帅, 王蕴宝, 等. 碳纤维复合材料轴向压缩性能测试方法对比[J]. *宇航材料工艺*, 2022, 52(2):134-140.
LI Long, YUAN Zeshuai, WANG Yunbao, et al. A comparative research on test methods for the compressive properties of unidirectional carbon fiber reinforced composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2022, 52(2):134-140.
- [6] 张晓霞, 周柏卓. 正交各向异性材料弹性本构关系分析[J]. *航空*

- 发动机,1997(1):20-25.
- ZHANG Xiaoxia, ZHOU Baizhuo. Analysis of elastic constitutive relation of orthotropic materials[J]. Aeroengine, 1997(1):20-25.
- [7] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- WANG Zhenming. Composite mechanics and composite structural mechanics[M]. Beijing:China Machine Press, 1991.
- [8] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- SHEN Guanlin, HU Gengkai. Composite mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [9] 谢波涛. GLARE层板的拉伸失效行为及其温度响应[D]. 长春:长春工业大学,2020.
- XIE Botao. Tensile failure behavior and temperature response of GLARE laminates[D]. Changchun:Changchun University of Technology, 2020.
- [10] HASHIN Z. Cumulative damage theory for composite materials: Residual life and residual strength methods[J]. Composites Science & Technology, 1985, 23(1):1-19.
- [11] Park C K, KAN C D, Hollowell W T, et al. Investigation of opportunities for lightweight vehicles using advanced plastics and composites[R/OL]. (2012-12-01) [2024-11-18]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108249363>.
- [12] HALLQUIST J O. Preliminary user's manuals for DYNA3D and DYNAP (nonlinear dynamic analysis of solids in three dimensions) [R/OL]. (1976-08-01) [2024-11-18]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107653121>.
- [13] 赵洪宝,马丹,马超群,等. 纤维增强树脂基复合材料厚度方向拉伸试验方法研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(6):188-191.
- ZHAO Hongbao, MA Dan, MA Chaoqun, et al. Research on thickness direction tensile test method of fiber reinforced resin matrix composites[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(6): 188-191.
- [14] 张浩. 纤维增强复合材料剪切试验方法综述[J]. 科技创新导报, 2015, 12(21):62-63.
- ZHANG Hao. Review of shear test methods for fiber reinforced composites[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(21):62-63.
- [15] 薛继佳,马少华. 聚合物基复合材料压缩试验方法研究[J]. 价值工程, 2018, 37(24):122-124.
- XUE Jijia, MA Shaohua. Research on compression test method of polymer matrix composites[J]. Value Engineering, 2018, 37(24): 122-124.
- [16] 宋娜. 单向纤维复合材料拉伸破坏机制和强度的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- SONG Na. Study on tensile failure mechanism and strength of unidirectional fiber composites[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [17] 王丽雪,尹志娟,刘海鸥. 玻璃纤维增强环氧树脂单向复合材料力学性能分析[J]. 黑龙江工程学院学报, 2009, 23(3):73-74.
- WANG Lixue, YIN Zhijuan, LIU Haiou. Study on mechanical properties of unidirectional glass fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2009, 23(3):73-74.
- [18] GONALVES V D O, OSSES M, PARDINI L C. New jig adapted for compression fatigue tests on composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 57(2):337-344.
- HUANG Jizhan, FAN Yu. Design of injection mold for automobile side rear view mirror shell[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):110-114.
- [16] 范玉,范佳琦,黄继战,等. 透光窗控制器面板倒装双色热流道注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11):90-95.
- FAN Yu, FAN Jiaqi, HUANG Jizhan, et al. Flip two-color hot runner injection mold design on transparent window controller panel[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):90-95.

(上接第116页)

- [14] 刘祥建,周佳睿,姜劲. 基于Moldflow的按钮开关帽注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(6):97-102.
- LIU Xiangjian, ZHOU Jiarui, JIANG Jin. Design of injection mould for button switch cap based on Moldflow[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6):97-102.
- [15] 黄继战,范玉. 汽车侧后视镜壳体注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):110-114.