

文章编号: 1001-4888(2022)03-0332-09

基于应变场数据的 C/C 材料力学参数辨识^{*}

高博¹, 宫文然², 王龙², 苏蕴荃², 杨强¹

(1. 哈尔滨工业大学 特种环境复合材料技术国家级重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 提出了一种基于复杂构型试样 DIC(Digital Image Correlation, 数字图像相关法)全场应变测试结果, 实现单次试验辨识 C/C 复合材料面内多个力学参数的方法。在该参数辨识方法中, 采用复杂构型试样以使得全场应变数据对不同的材料参数敏感; 建立与试验条件同等的有限元模型, 将待辨识的材料力学参数作为设计变量, 应变场模拟结果与试验结果的偏差视为目标函数, 通过多岛遗传优化方法构建了参数辨识模型。采用奇异值分解对试验获取的应变场进行重构, 实现 DIC 应变场测试结果的降噪。结果表明, 尽管试验获取的应变场由于试验噪声、纤维变形等原因与有限元模拟的分布特征有所差异, 但在加载方向的应变辨识精度偏差依然保持在 4% 以内。采用奇异值分解可提升与加载方向相垂直方向的弹性模量辨识精度, 与标准测试结果相比, 辨识误差从 33.12% 降低到 4.48%。上述研究可为建立复合材料高通量试验方法提供参考。

关键词: C/C 复合材料; 参数辨识; 奇异值分解; 数字图像相关

中图分类号: O34

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-190

0 引言

C/C 复合材料作为一种高性能的防热承载一体化材料, 准确获取其力学性能具有重要意义, 但材料生产周期长, 成本高昂, 传统的力学性能试验单次仅能获取一到两个材料性能参数, 试验效能无法满足需求。近年来利用场测量的手段, 结合理论与数值模型对材料性能参数进行高通量的辨识方法得到了学者的关注^[1], 目前可分为虚场位移法和参数迭代更新法两类^[2]。

虚场位移法由 Grédiac^[3] 提出, 该方法利用虚功互等原理同时反演多个力学参数, 被测试件可以为任意形状, 而且仅需要简单的加载试验。目前该方法已在材料的本构辨识中得到有效应用^[4-6], 但由于该方法要求较高的专业技术水平, 使得其推广受到了一定的限制。参数迭代更新法随有限元模拟水平和优化技术的进步逐渐发展起来, 该方法基于试验条件建立有限元模型, 将待辨识材料参数视作优化变量, 将试验应变场和模拟应变场的差异视作目标函数, 在优化框架下对模型参数进行辨识。在复合材料的力学性能辨识方面, Molimard 等^[7] 对复合材料开孔板进行了单轴拉伸试验, 利用云纹技术获取试样表面应变场, 将其与建立的有限元模型应变场的差异作为目标函数, 利用 Levenverg-Marquardt 优化方法辨识得到材料的面内力学性能参数。Lecompte 等^[8] 对玻璃纤维增强树脂基材料进行双轴加载试验, 采用光测方法获取场应变信息, 基于混合-数值试验方法有效地辨识出了多个材料性能参数。徐德昇^[2] 辨识了带有开孔特征的三维编织复合材料的面内性能, 通过建立与试验相对应的有限元模型, 将试验和

^{*} 收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2022-01-24

基金项目: 一院高校联合创新基金(CALT 基金); 国家自然科学基金青年科学基金(11902101)资助

通信作者: 杨强(1989—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师。主要研究方向为数字孪生、不确定性量化和参数辨识方法。Email: young@hit.edu.cn

模拟的应变场差异作为目标函数,采用优化方法中的单纯型法完成了材料弹性性能参数的辨识。Michopoulos 等^[9-12]利用能量法构建通用的材料本构,利用其自主研发的六自由度加载系统与复杂试样设计,基于 MATLAB 与 ANSYS 的联合使用实现参数辨识,所得辨识结果与试验差异最大不超过 3.5%。

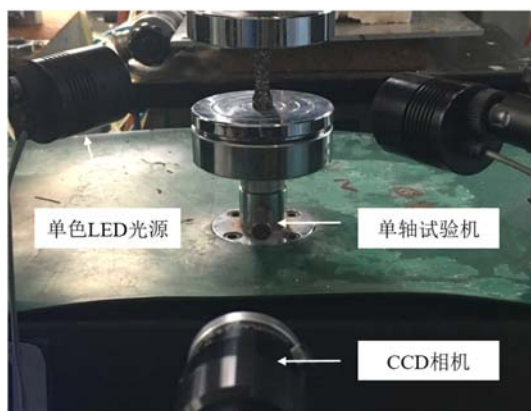
在参数辨识采用的众多场测量手段中,DIC(Digital Image Correlation,数字图像相关法)不需要进行复杂的试样表面处理,对振动敏感性低,因此得到了广泛的应用^[13-15]。Seon 等^[16]采用 DIC 场测量结果结合参数辨识方法,推断了开孔碳环氧压缩式样的层间拉伸强度、疲劳寿命等性能参数。Meuwissen 等^[17]利用 DIC 场测量的结果结合有限元模型更新实现了材料弹塑性力学参数的辨识。Hartmann 等^[18]利用 DIC 场测量数据辨识了复合材料板的 5 个材料参数,研究表明试验的不确定性、有限元模型的有效选取对结果具有重要影响。Robert 等^[19]采用 DIC 获得的场测量结果结合参数辨识的方法对比了 Meuwissen 和 Haddadi 两种构型下参数的辨识效果,结果表明 Haddadi 构型具有更不均匀的应变场分布,所以对参数的辨识敏感性更高。He 等^[13]对 DIC 与有限元模型联合应用下参数辨识的不确定性进行了研究,发现对于面内剪切性能的辨识,场测量结果对噪声具有很好的鲁棒性。Rossi 等^[20]结合虚场法研究了 DIC 的空间求解、噪声和插值误差对参数辨识结果的影响,提出了一种 DIC 边界数据缺失的补充方法,同时讨论了不同网格尺寸下的辨识误差情况。

考虑到发展 C/C 复合材料高通量试验的需求,且目前针对场测量手段辨识 C/C 材料性能的研究依然较少,本文基于 DIC 获取试件受载下的应变场,结合多岛遗传优化算法与有限元模型实现对 C/C 复合材料力学参数的表征。另一方面考虑到测试手段在使用中受到光照均匀性、加载设备振动、电磁干扰等多方面影响,实际测量噪声特征不可忽略,而基于遗传优化的反演方法对噪声较为敏感,本文进一步采用奇异值分解的方法对待辨识区域数据进行重构,来提升辨识精度。

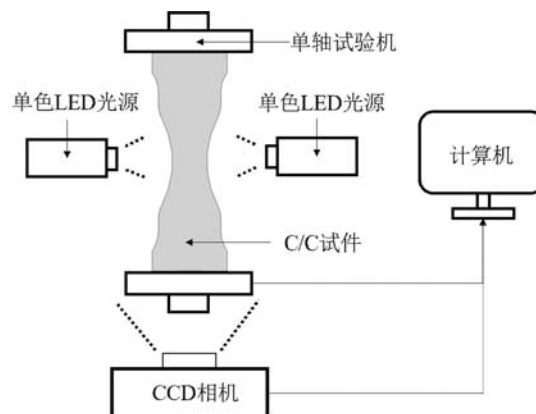
1 试验方法

1.1 试验装置

试验测量装置如图 1 所示,试验的加载方式为单轴压缩,加载设备为衡翼仪器的 HY3080,试验机



(a) C/C 复合材料试件的压缩试验装置图



(b) C/C 复合材料试件的压缩试验装置示意图

图 1 C/C 复合材料试件的压缩试验加载

Fig. 1 C/C composite specimen in compression test

的最大载荷为 20kN。试验中采用的 C/C 材料为三维针刺 C/C 材料,其纤维体积分数约为 25%。试验中使用的试件尺寸是在 Haddadi 构型^[19]的基础上通过尺寸优化得到的。在尺寸优化中,目标函数选取为试件表面应变场不均匀度的最大值,这样设计的目的是使试件在简单加载下产生较为复杂的应变分布特征,从而使得应变场对多个待辨识参数敏感,具体细节详见文献[21],试件优化后的尺寸如图 2 所示。DIC 观测应变场需要预先制作散斑,由于试件本身的黑色底色,散斑通过喷涂白漆的方法实现,带有散斑的试件特征详见图 2。

试验过程中,首先在试验机上装夹试样,随后调整 CCD 相机的高度以及相机镜头到试样的距离,使相机与试样保持水平的同时能够清晰地观测到完整的试样。试验中,力学试验机的加载速度为 1.0mm/min ,CCD 相机拍摄照片的频率设为 20Hz ,试样压缩到破坏则停止试验。考虑到加载设备位移的精度有限,在后续试验数据处理中的位移采用照片的像素点确定。

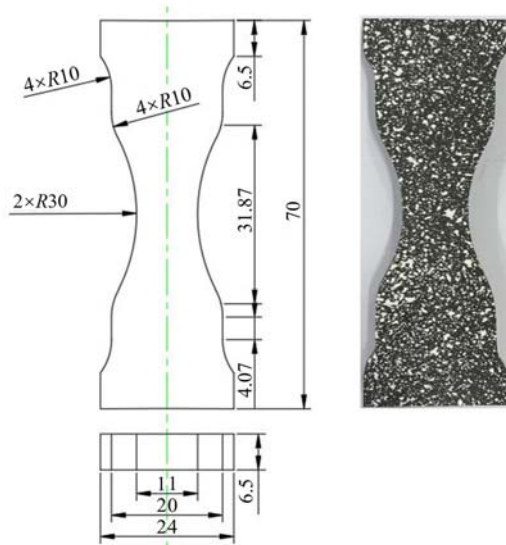


图 2 试件尺寸与散斑形貌图(单位:mm)

Fig. 2 Specimen size and speckle pattern(unit: mm)



图 3 DIC 分析区域

Fig. 3 Analysis region of DIC

1.2 应变场获取

非干涉测量方法包括数字图像相关法(DIC)^[22]、光栅法^[23]等多种手段。本文采用 DIC 进行测量,利用 VIC-2D 软件对 CCD 相机采集到的试样表面图片进行处理获取应变场,选取 DIC 的分析区域如图 3 所示,利用 VIC-2D 软件根据散斑喷涂特征对计算的分区网格密度进行标定。

由于 C/C 材料的脆性特征,试件在加载位移达到 0.27mm 时即发生失效,且在整个加载过程中试件未发生失稳。考虑到应力-位移曲线在位移大于 0.249mm 时由于材料损伤等原因使曲线产生了一定的波动,本文选取应力-位移曲线斜率较为稳定的 0.2009mm 时的应变场用于参数辨识。提取试件在压缩位移达到 0.2009mm 时的应变分布特征,如图 4 所示, x 代表水平方向,即沿试件宽度方向; y 代表竖直方向,即沿试件高度方向。

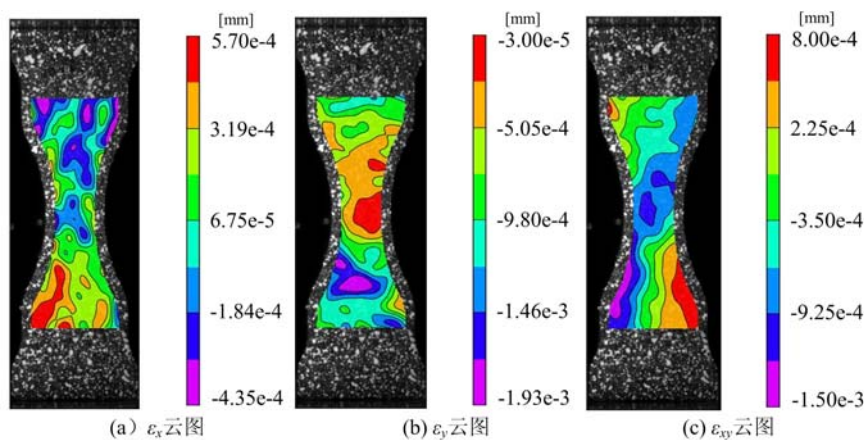


图 4 C/C 试样在压缩载荷作用下的应变场($U_y=0.2009\text{mm}$)

Fig. 4 Strain field of C/C composite specimen under compression load($U_y=0.2009\text{mm}$)

由图 4 可以看到,实际获取的应变场云图分布的尺寸略小于初始选择的分析区域尺寸,这是由 DIC

计算过程中的插值特征导致的。另外,从图4中还可以发现分析区域的各方向应变场分布表现出一定的随机性,应变场中出现了部分应力集中的区域,一方面是由于材料本身具有编织特征,在压缩载荷下表面纤维的变形在不同位置具有一定的差异,使得试件局部会表现出一定程度的应变集中;另一方面,来自于试验噪声如设备振动带来的噪声。尽管应变场的局部分布特征与理想状态具有一定的差异,但待辨识区域的所有应变数据都会用于后续参数辨识的计算,从而降低了局部应力集中带来的影响。

在应变场的数据提取过程中,以图3分析区域的左上角为起始点,在分析区域内横竖每隔15个像素点提取一个应变数据(试件高度为70mm,对应照片中的像素个数为1974,应变数据提取间隔约为0.5mm),0.5mm采样间隔的应变数据足以满足有限元模型对应的辨识的需求,由于应变数据提取较为充足,当后续数值模型网格节点较少或无法完全对应时,采用线性插值的手段将试验数据投射到模型的节点上。为了保证试验和数值模拟坐标的一致性,提取数据点坐标原点将与后文(2.2节)中有限元模型中的原点保持一致。

2 材料参数辨识方法

2.1 参数辨识方法基本框架

参数辨识流程如图5所示。首先,一方面获取轴向压缩力学试验中的真实应变场信息,基于奇异值分解对应应变场进行重构提取其主要特征来降低噪声的影响;另一方面基于试验加载和约束的特征建立有限元模型,给定初始材料参数,经有限元计算获取对应试验反演区域的应变场数据。随后,将试验和模拟得到的应变场数据间的差异作为目标函数进行优化迭代,其中待辨识的材料参数作为优化变量,待辨识的材料分布的上下界与结构支反力作为约束条件(试验中给定位移加载,故而支反力可作为约束条件),直到目标函数取得最小值,得到获得待辨识的参数值。

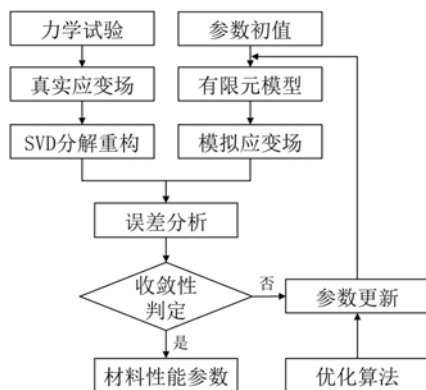


图5 参数辨识流程图

Fig. 5 Parameter identification flow chart

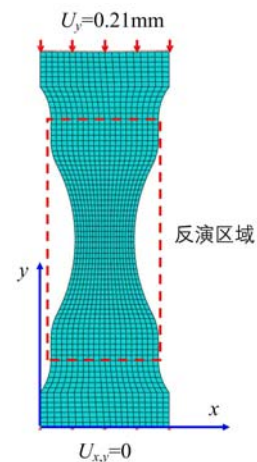


图6 试样的有限元模型及边界条件

Fig. 6 Finite element model and boundary condition of the sample

2.2 有限元模型

有限元建模采用商业软件 ABAQUS,为提高优化迭代的计算效率,有限元模型采用二维模型,网格尺寸为1mm,如图6所示。边界条件的设定需要模拟试验条件,其中试件底端完全固定,即 $U_{x,y}=0$ 。试件顶端采用位移加载,加载位移为0.21mm。模型的计算采用 static 分析步,通过子程序提取反演区域单元积分点坐标与相应的应变分量,并利用线性插值方法将有限元积分点上的应变插值到试验获取的应变场的像素点坐标上,从而可以进行应变场差异的对比计算。待辨识参数的材料的输入参数见表1,C/C材料的各向异性特征待辨识参数为弹性模量 E_x 、 E_y ,剪切模量 G_{xy} ,泊松比 ν_{xy} ,每个参数在取值范围内均呈均匀分布。

表 1 C/C 复合材料力学性能待辨识参数的初值和边界

Tab.1 Initial values and boundaries of parameters to be identified for mechanical properties of C/C composite

力学参数	取值范围
弹性模量 E_x	$U[10\text{GPa}, 40\text{GPa}]$
弹性模量 E_y	$U[10\text{GPa}, 40\text{GPa}]$
剪切模量 G_{xy}	$U[4\text{GPa}, 10\text{GPa}]$
泊松比 ν_{xy}	$U[0.1, 0.3]$

2.3 优化算法

为避免局部最优的优化迭代陷阱,本文采用全局优化方法多岛遗传算法作为参数辨识的优化方法^[24]。多岛遗传算法在传统遗传算法的基础上进一步提出了分组的概念,将每个组视为一个“岛”,个体首先在各自岛上进行传统遗传操作,随后定期迁移部分个体到其他岛上继续进行传统遗传操作。进化过程如图 7 所示,图中 a 为整数, b_i 为迁移间隔。算法在计算过程中由于变异和迁移的作用,尽可能地避免了局部最优解的出现,从而避免了陷入局部最优的优化迭代陷阱。

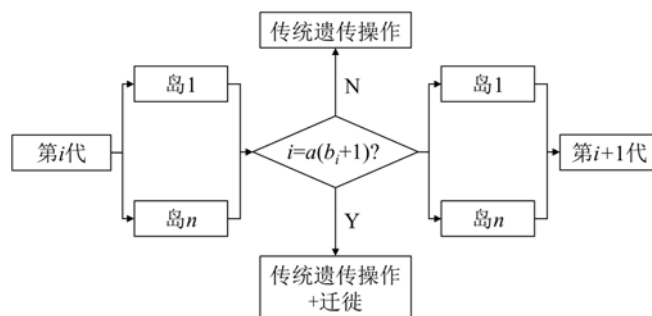


图 7 多岛遗传算法进化过程

Fig.7 Evolution process of multi Island genetic algorithm

目标函数方面选用 DIC 测量得到的两个方向的应变 ϵ_x 、 ϵ_y ,与剪切应变 ϵ_{xy} 作为设计的基础,目标函数 W 的计算公式为

$$W = \frac{1}{3m} \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\epsilon_{x,i}^e - \epsilon_{x,i}^m}{\epsilon_{x,i}^e} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{y,i}^e - \epsilon_{y,i}^m}{\epsilon_{y,i}^e} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{xy,i}^e - \epsilon_{xy,i}^m}{\epsilon_{xy,i}^e} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

式中: m 为试验反演区输出的像素点数目; $\epsilon_{x,i}^e$ 、 $\epsilon_{y,i}^e$ 、 $\epsilon_{xy,i}^e$ 分别为第 i 个节点在 x 方向、 y 方向和面内剪切方向的试验获取的应变值; $\epsilon_{x,i}^m$ 、 $\epsilon_{y,i}^m$ 、 $\epsilon_{xy,i}^m$ 分别为第 i 个节点在 x 方向、 y 方向和面内剪切方向的有限元模拟获取的应变值。

2.4 应变场去噪处理

依据 DIC 测试原理可知,DIC 的应变场测试容易受到光路扰动以及散斑质量的影响,进而会在应变场测试结果中引入噪声和偏差。本文提出采用奇异值分解的方法,对获取的应变场数据进行分解并提取主要数据特征,进而实现数据降噪处理以期提升材料参数辨识精度。

奇异值分解可以获取数据的主要信息^[25],其核心是将矩阵 $\mathbf{A}_{m \times n}$ 分解为如下形式:

$$\mathbf{A}_{m \times n} = \mathbf{U}_{m \times m} \mathbf{\Sigma}_{m \times n} \mathbf{V}_{n \times n}^T \quad (2)$$

式中:矩阵 $\mathbf{U}_{m \times m}$ 、 $\mathbf{V}_{n \times n}$ 是酉矩阵; $\mathbf{\Sigma}_{m \times n}$ 是对角矩阵,其对角线上的元素被称为奇异值且依数值降序排列,可选取前 k 个奇异值和对应的 $\mathbf{U}_{m \times m}$ 、 $\mathbf{V}_{n \times n}$ 矩阵中的向量来近似表征 $\mathbf{A}_{m \times n}$,如式(3)所示,要求前 k 个奇异值的对角线元素求和占总奇异值求和的 95% 以上^[26]。

$$\mathbf{A}_{m \times n} \approx \mathbf{U}_{m \times k} \mathbf{\Sigma}_{k \times k} \mathbf{V}_{k \times n}^T \quad (3)$$

本文在基于 DIC 获取待反演区域的应变场后,分别对 ϵ_x 、 ϵ_y 和 ϵ_{xy} 3 个应变场的数据进行奇异值分

解如式(2)所示,仅保留对角矩阵 Σ 中奇异值求和占总奇异值求和 95% 以上的奇异值,依式(3)对实测应变场进行重构。

3 结果与讨论

经优化方法辨识得到的结果见表 2,表中的“试验值”是指对需要辨识的材料基于 ASTM C1275—00^[27]、ASTM C1358—05^[28] 以及 ASTM C1292—00^[29] 3 个试验标准进行测试得到的材料性能;“采用奇异值分解/误差”是指采用奇异值分解的辨识结果和该辨识结果与试验值的相对误差。将是否使用奇异值分解对观测应变场进行重构的辨识结果与标准测试的结果进行对比得到如下结论:

(1) 由试样设计参数辨识所得的 C/C 复合材料的力学参数在 E_y 上偏差较小,无论是否采用奇异值分解进行重构,整体的参数辨识误差均小于 4%,这主要是由于 y 方向为加载方向,结构应变特征明显,测量噪声等其他干扰因素对其影响较小。虽然 E_y 的参数辨识误差较小,但考虑奇异值分解重构后的辨识精度可以进一步提高。

(2) 不考虑奇异值分解时,参数 E_x 和 G_{xy} 的辨识具有明显的偏差,误差均保持在 30% 左右,这是由于测量噪声与纤维编织材料在压缩载荷下纤维发生了一定的变形,使得本就较小的应变变量级产生了较大的干扰项。

(3) 考虑奇异值分解的参数辨识能够有效提升参数的辨识精度, E_x 的辨识误差从 33.12% 降低为 4.48%, G_{xy} 的辨识误差从 29.18% 降低为 22.58%,这表明采用奇异值分解重构观测应变场可以在一定程度上缓解测量噪声等其他干扰带来的影响,其原因为奇异值分解只保留了应变场的主要特征,降低了观测噪声、纤维变形造成的局部应变集中的影响。

表 2 参数的标准试验结果与辨识的结果对比

Tab. 2 Comparison between standard experimental results and the identification results of parameters

参数	试验值	不采用奇异值分解/误差	采用奇异值分解/误差
E_x/GPa	29.05	38.67/33.12%	30.35/4.48%
E_y/GPa	29.05	30.18/3.89%	29.90/2.93%
G_{xy}/GPa	6.82	8.81/29.18%	8.36/22.58%
ν_{xy}	0.13	0.13/0%	0.14/7.69%

基于标准试验测量获得的材料参数,利用有限元建模得到的 $U_y=0.2009\text{mm}$ 时的应变分布特征如图 8 所示,与图 4 相比可以发现,模拟应变场仅 ϵ_{xy} 的分布与测量应变场具有较为相似的特征,在 ϵ_x 和 ϵ_y 的应变场分布上均因材料在压缩过程中的纤维变形和测量噪声产生了一定的偏差,但整体应变测量量级上相似。

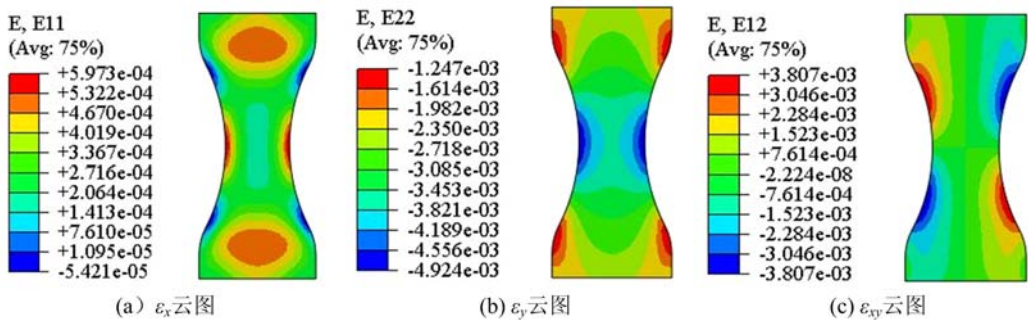


图 8 C/C 复合材料试样在压缩载荷作用下的模拟应变场($U_y=0.2009\text{mm}$)

Fig. 8 Simulated strain field of C/C composite specimen under compression load($U_y=0.2009\text{mm}$)

4 结 论

本文利用有限元模型和多岛遗传算法,基于 DIC 获取的全场应变数据对 C/C 复合材料的力学性能参数进行了辨识。为降低噪声对辨识结果的影响,引入了奇异值分解对实测应变场进行重构,通过与标准试验获取的力学性能参数对比得到如下结论:

(1) 实测应变场与模拟得到的应变场分布特征有所差异,这种差异主要是编织材料在压缩过程中的纤维变形和测量噪声等因素造成的,但试验与模拟获得的应变场在应变量级上具有相似性。

(2) 反演结果在加载方向上模量的辨识误差无论是否考虑奇异值分解均在 4% 以内,这说明在结构应变特征明显的方向,干扰因素对辨识精度影响较小,但考虑了奇异值分解的辨识精度进一步提高了 0.96%。

(3) 通过奇异值分解对实测应变场进行重构能够降低非加载方向的模量辨识误差,如算例中 E_x 的辨识误差从 33.12% 降低为 4.48%,表明奇异值分解能够有效降低观测误差的影响。

参考文献:

- [1] Negges J, Allix O, Hild F, et al. Big data in experimental mechanics and model order reduction: today's challenges and tomorrow's opportunities[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2018, 25(1): 143–164.
- [2] 徐德昇. 三维六向编织复合材料力学性能及其参数反演分析[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2015 (XU Desheng. Investigation of mechanical properties and material parameters identification of 3D six-directional braided composite[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of technology, 2015 (in Chinese))
- [3] Grédiac M. Principe des travaux virtuels et identification[J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1989, 309(1): 1–5.
- [4] Chalal H, Avril S, Pierron F. Characterization of the nolinear shear behavior of UD composite materials using the virtual fields method[J]. Advances in Experimental Mechanics IV, 2005 (3/4): 185–190.
- [5] Avril S, Pierron F, Pannier Y, et al. Stress reconstruction and constitutive parameter identification in plane-stress elasto-plastic problems using surface measurements of deformation fields[J]. Experimental Mechanics, 2008, 48(4): 403–419.
- [6] 郭保桥, 陈鹏万, 谢惠民, 等. 虚位移场方法在石墨材料力学参数测量中的应用[J]. 实验力学, 2011, 26(5): 565–572 (GUO Baoqiao, CHEN Pengwan, XIE Huimin, et al. Application of virtual displacement field for the mechanical property measurement of graphite material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5): 565–572 (in Chinese))
- [7] Molimard J, Riche R L, Vautrin A, et al. Identification of the four orthotropic plate stiffnesses using a single open-hole tensile test[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(5): 404–411.
- [8] Lecompte D, Smits A. Mixed numerical-experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44: 1643–1656.
- [9] Mast P W, Nash G E, Michopoulos J G, et al. Characterization of strain-induced damage in composites based on the dissipated energy density part I. Basic scheme and formulation[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1995, 22(2): 71–96.
- [10] Michopoulos J G, Hermanson J C, Furukawa T. Towards the robotic characterization of the constitutive response of composite materials[J]. Composite Structures, 2008, 86(1-3): 154–164.
- [11] Michopoulos J G, Hermanson J C, Furukawa T, et al. A framework for the automated data-driven constitutive characterization of composites[C]. Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials, ICCM-17, Edinburgh, 2009.
- [12] Michopoulos J G, Hermanson J C, Iliopoulos A, et al. Data-driven design optimization for composite material characterization[J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2011, 11(2): 255–267.
- [13] He T, Liu L, Makeev A. Uncertainty analysis in composite material properties characterization using digital image

- correlation and finite element model updating[J]. *Composite Structures*, 2018, 184:337–351.
- [14] 刘艳, 赵威, 李秋彤, 等. 基于数字图像相关法的扣件弹条模态特征识别试验研究[J]. *实验力学*, 2021, 36(6): 804–816 (LIU Yan, ZHAO Wei, LI Qiutong, et al. Experimental study on the modal characteristics identification for the clip based on the digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(6):804–816 (in Chinese))
- [15] 方江静, 陈巨兵, 孙晨. 基于 DIC 的渐开线直齿轮接触变形实验研究[J]. *实验力学*, 2021, 36(5):571–580 (FANG Jiangjing, CHEN Jubing, SUN Chen. Experimental study on contact deformation of involute spur gear based on DIC[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(5):571–580 (in Chinese))
- [16] Seon G, Makeev A, Schaefer J D, et al. Measurement of interlaminar tensile strength and elastic properties of composites using open-hole compression testing and digital image correlation[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(13): 2647.
- [17] Meuwissen M H H, Oomens C W J, Baaijens F P T, et al. Determination of the elasto-plastic properties of aluminium using a mixed numerical-experimental method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 75(1-3):204–211.
- [18] Hartmann S, Gilbert R R, Marghzar A K, et al. Material parameter identification of unidirectional fiber-reinforced composites[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021(5):1–26.
- [19] Robert L, Velay V. Identification of hardening parameters using finite element models and full field measurements: some case studies[J]. *Journal of Strain Analysis*, 2012, 47(1):3–17.
- [20] Rossi M, Lava P, Pierron F, et al. Effect of DIC spatial resolution, noise and interpolation error on identification results with the VFM[J]. *Strain*, 2015, 51(3):206–222.
- [21] 黄念. 基于数字图像相关技术的 C/C 复合材料高温力学性能参数反演研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2019 (HUANG Nian. Investigation of high temperature mechanical properties of C/C composites based on digital image correlation technology[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese))
- [22] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20:062001.
- [23] Surrel Y, Zhao B. Simultaneous uv displacement field measurement with a phase-shifting grid method[C]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2342(1):66–75.
- [24] 周政. 基于多岛遗传算法的换热管内插波浪片结构优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019 (ZHOU Zheng. Structural optimization of wave-tape inserted into heat transfer tube based on multi-island genetic algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019 (in Chinese))
- [25] 邱亚松. 基于数据降维技术的气动外形设计方法[D]. 西安: 西北工业大学, 2014 (QIU Yasong. Aerodynamic shape design methods based on data dimension reduction approaches[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014 (in Chinese))
- [26] Mainini L, Willcox K E. A surrogate modeling approach to support real-time structural assessment and decision-making[J]. *Aiaa Journal*, 2015, 53(6):1612–1626.
- [27] American Society of Testing Materials. Standard test method for monotonic tensile behavior of continuous fiber-reinforced advanced ceramics with solid rectangular cross-section test specimens at ambient temperature: ASTM C1275–00[S]. Philadelphia: ASTM Internatioanl, 2000.
- [28] American Society of Testing Materials. Standard test method for monotonic compressive strength testing of continuous fiber-reinforced advanced ceramics with solid rectangular cross-section test specimens at ambient temperatures: ASTM C1358–05[S]. Philadelphia: ASTM Internatioanl, 2005.
- [29] American Society of Testing Materials. Standard test method for shear strength of continuous fiber-reinforced advanced ceramics at ambient temperatures: ASTM C1292–00[S]. Philadelphia: ASTM Internatioanl, 2005.

Identification of mechanical parameters of C/C composite based on strain field data

GAO Bo¹, GONG Wenran², WANG Long², SU Yunquan², YANG Qiang¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology for National Defense on Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In this paper, a method to identify multiple mechanical parameters of C/C composite by a single test, based on the results of full-field strain measurement of the specimen with complex configuration by DIC (Digital image correlation), is proposed. The complex configuration specimen is used to make the full-field strain sensitive to different material parameters. The finite element model is built under the same test conditions, the material mechanical parameters to be identified are taken as the design variables, and the deviation between the simulated strain field results and the test results is regarded as the objective function. The parameter identification model is constructed by multi-island genetic algorithm, and the singular value decomposition is used to reconstruct the strain field obtained from the test to reduce the noise. The results show that although the strain field obtained from the test is different from the distribution characteristics of the results of finite element simulation, the error of strain identification accuracy in the loading direction remains within 4%. Singular value decomposition can improve the identification accuracy of elastic modulus perpendicular to the loading direction. Compared with the standard test results, the identification error is reduced from 33.12% to 4.48%. The above research provides a reference for the establishment of high-throughput test methods for composites.

Keywords: C/C composite material; parameter identification; singular value decomposition; digital image correlation