DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.2008.03.025
复合材料学报 第25卷 第3期 6月 2008年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol.25 No.3 June 2008

文章编号：1000-3851(2008)03-190-07

紧缩场蜂窝夹层反射面板材料参数优化反求

郝长岭，周贤宾*，李志光，刘旭兰
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：紧缩场高精度蜂窝夹层结构反射面板由经特殊工艺处理的铝蜂窝芯和表层铝板胶接而成，解析计算和材料力学性能试验很难准确获得该夹层板的材料性能参数。本文中采用数值-试验混合模型方法对该种夹层板的等效材料性能参数进行了优化反求。正向分析采用有限元方法，逆向分析采用遗传算法和梯度法组合优化算法。正、逆分析过程的无缝集成和组合优化算法策略使反求效率明显提高。试验验证表明，采用反求方法获得的材料性能参数能够精确反应该夹层板的弹性本构关系，建立在该材料参数基础上的有限元模型具有理想的精度。

关键词：反求；数值-试验混合模型方法；遗传算法；夹层面板；等效材料参数；紧缩场
中图分类号：V214.8；TB311 **文献标志码**：A

Material parameter identification of sandwich reflector panels of compact antenna test range by genetic algorithm-based inverse method

HAO Changling，ZHOU Xianbin*，LI Zhiguang，LIU Xulan
(School of Mechanical Engineering and Automation，Beijing University of Aeronautics and Astronautics，Beijing 100083，China)

Abstract：High precision sandwich reflector panels of compact antenna test range are made of aluminum face sheet and honeycomb core treated by a special process. The constitutive parameters of this kind of sandwich panel are difficult to obtain by the traditional analytical methods and mechanical property tests. A mixed numerical-experimental model method was proposed to estimate the panel's equivalent elastic material parameters. In this method，the forward analysis was predicted using the finite element method and the inverse analysis was an algorithm combined genetic algorithm and gradient method. By using the proposed optimization algorithm and seamless integration between forward and inverse analyses，the mixed numerical-experimental model method was more efficient. A comparison between the results of numerical simulation and the experiment shows that material parameters from inverse identification describe the constitutive relations of this kind of sandwich panel faithfully. The numerical simulation model based on the parameters is reliable.

Keywords：inverse identification；mixed numerical-experimental model method；genetic algorithm；sandwich reflector panel；equivalent material parameters；compact antenna test range

蜂窝夹层板作为一种宏观复合材料具有较大的比刚度和比强度以及优越的阻尼振动、隔热、隔音性能，目前已广泛应用于航空航天产品[1]，并且开始迅速进入汽车、船舶及建筑等领域。对其受力及变形情况的分析和预测显得越来越重要，这必然引起人们对夹层板材料性能获取方法的关注[2-3]。传统获取蜂窝夹层板材料性能参数的方法主要有解析计算和夹层板力学性能试验。解析计算总是事先假定蜂窝芯层和表层板的尺寸规格和内部结构是理想的，无法考虑具体工艺因素对材料性能造成的影响；而针对蜂窝板的力学性能试验获取的力学性能参数数据分散性大，通用性差，不但试验量大而且试验成本很高。于是20世纪90年代初出现了一种采用数值仿真-试验混合模型来估算材料的性能参数的方法[4-5]。该方法使用方便、成本低，是一种无损伤方法，因此自出现以来引起人们的极大兴趣，不断得到发展。尤其是近十几年来，随着计算机软硬件技术的发展，数值仿真技术和优化算法不

收稿日期：2007-09-14；**收修改稿日期**：2007-11-13
基金项目：国家自然科学基金(10477001；60673056)；高等学校博士点基金(20040006022)
通讯作者：周贤宾，教授，博士生导师，主要从事飞机制造及金属塑性成型等领域研究 E-mail：zhouxb@buaa.edu.cn
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

断进步，此方法不但用于反求材料的力学性能参数，而且被用来反求材料热性能参数[6-7]；不但用于均质材料，而且在层合板[8]、夹层板[9-10]、功能复合材料[11]的材料性能参数估算方面更显示了巨大的优越性。

本文中针对用于紧缩场(CATR)高精度反射面板制造的特殊铝蜂窝夹层板，在数值仿真-试验混合模型法基础上，引入仿真软件和优化软件之间的无缝集成技术，采用遗传算法和梯度法组合的寻优策略，明显提高了反求效率。

1 夹层结构反射面板

北京航空航天大学周贤宾等人利用铝蜂窝夹层结构比刚度大、密度小等优点，采用经特殊应力释放工艺处理的蜂窝芯和表层板制造出了大型高精度紧缩场反射面板，并成功投入实际应用[12]。图 1 为采用蜂窝夹层结构制造的某大型紧缩场反射面。

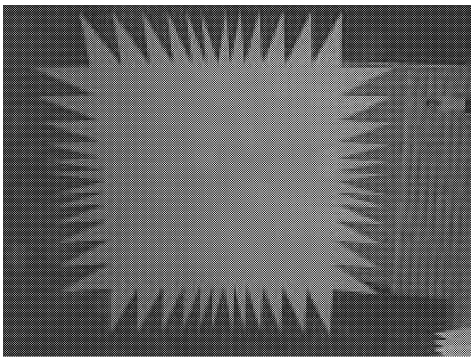

图 1 某大型紧缩场反射面

Fig. 1 Reflector of a huge CATR

1.1 高精度蜂窝夹层结构反射面板成型原理

北京航空航天大学制造的大型紧缩场高精度反射面板采用蜂窝夹层、离散钉模、真空负压、应力释放、回弹补偿柔性成型系统制造。成型的基本原理如图 2。首先调节钉头包络面到一定形面，然后各层板依次叠放于高精度钉模上，施加真空负压力并维持一定时间后得到夹层结构高精度面板。

1.2 高精度反射面板蜂窝夹层结构

高精度反射面板由 3 层铝合金板 2 层蜂窝芯构成，蜂窝芯层和铝板经过特殊应力释放工艺处理以保证贴模和控制回弹。传统解析法无法考虑应力释放工艺对定形后夹层板整体力学性能的影响，因此本文中采用材料性能参数优化反求方法来获取此类夹层板的材料性能参数。

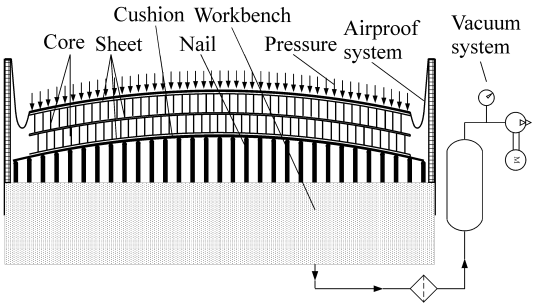

图 2 蜂窝夹层反射面板真空负压成型原理

Fig. 2 Vacuating press principle of sandwich reflector panel

2 夹层板等效材料性能参数优化反求

2.1 反求流程

紧缩场蜂窝夹层反射面板材料性能参数反求流程如下：(1)针对蜂窝夹层板刚度试验建立相应数值模型，并利用解析法估算材料参数初值；(2)进行数值仿真计算，得出给定载荷作用下变形的模拟结果；(3)计算模拟结果和刚度试验结果之间的误差，并且判断是否满足收敛条件，如果满足收敛条件则反求结束，如果不满足收敛条件则由优化算法重新给出新的材料参数，进行新一轮数值模拟计算，直到满足收敛条件，所得到的最优解即为反求的材料参数。上述过程可用图 3 表示。需要指出的是，整个流程可分为正向分析和逆向分析 2 个部分，其中正向分析是指给定材料性能参数计算在一定载荷作用下夹层板的变形量的过程，这一过程由数值模拟来完成；逆向分析是指根据模拟结果与试验结果之间的误差来改变材料参数的过程，这一过程由遗传算法和梯度法来完成。2 个过程之间通过软件接口程序或命令实现无缝集成。

2.2 蜂窝夹层板刚度试验

蜂窝夹层板刚度试验的目的是测试该种结构抵抗弹性变形的能力。在针对紧缩场高精度反射面板的刚度试验中采取了四点水平支撑、中心区域施加压力的方法，此法易操作，重复性好，试验数据易准确提取，具体试验如图 4 所示。试验中的支点位置如图 5 中 $T1$，$T2$，$T3$，$T4$；加载位置为图 5 中的圆形区域，载荷分别为 100、200、300、400 N；网格交点为试验数据测量点，1～4 是反求试验数据取样点，用来构造优化目标函数，其挠度试验数据见表 1。一经反求得到材料参数，即可在其基础上建立新的数值模型，并且取 1～10 点的试验数据对新建模型的可靠性进行验证。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

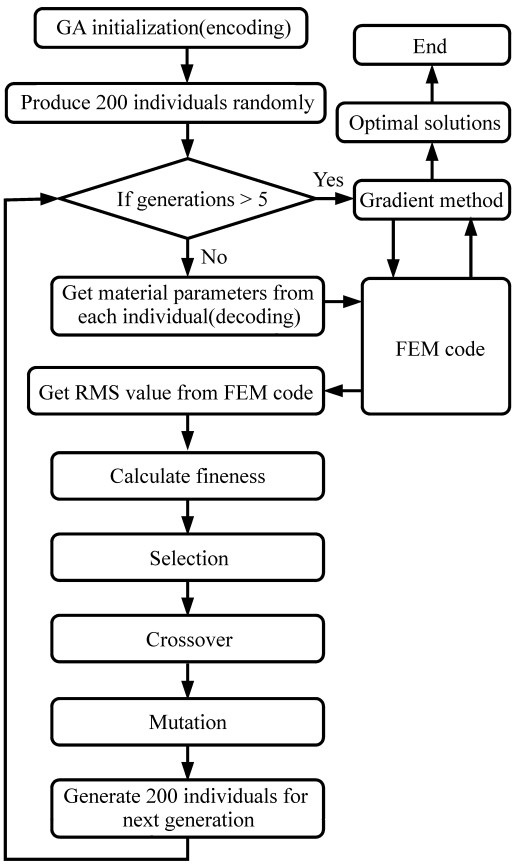

图 3　夹层板等效材料参数反求流程

Fig. 3　Inverse identification flowchart of equivalent material parameters of sandwich panel

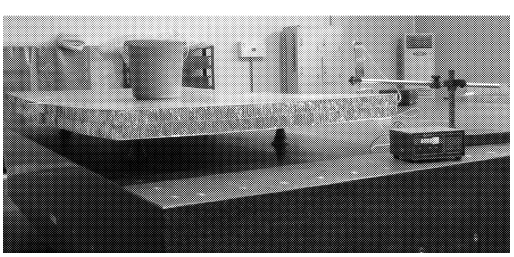

图 4　夹层结构反射面板刚度试验

Fig. 4　Stiffness test of sandwich panel

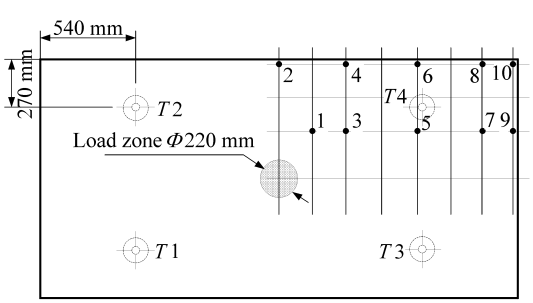

图 5　夹层板刚度实验中的支点、挠度取样点及加载位置

Fig. 5　Load zone support and sample position in stiffness test of sandwich panel

表 1　不同载荷下各取样点变形量试验结果

Table 1　Experimental data of deformation under different loads

Load/N	Deformation/μm			
	1	2	3	4
10	−10.0	−8.0	+4.0	+8.3
20	−21.0	−19.9	+4.2	+10.9
30	−30.9	−30.7	+11.2	+13.4
40	−39.2	−38.5	+18.5	+18.7

2.3　优化算法选择

2.3.1　设计变量的选择

紧缩场所采用的高精度蜂窝夹层板在制造过程中对各层蜂窝芯及表层板采取的特殊应力释放措施，以及蜂窝芯的方向性决定了该复合材料具有正交各向异性。因此选取了正交各向异性材料的弹性模量、剪切模量及泊松比 9 个材料参数作为优化设计变量，即

$$X = [E_x, E_y, E_z, \mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{zx}, G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

2.3.2　目标函数的构造

为了确保模拟结果和试验结果充分接近，特选取了具有代表性的 4 个取样点，如图 5 中的 1～4 点，并且构造了如下函数作为目标函数：

$$\min f(X) = \sum_{i}^{n} (\delta_i - \delta_i')^2 \tag{2}$$

式中，δ_i 和 δ_i' 分别表示变形量的模拟和试验结果。

2.3.3　设计变量的初始化及取值范围

变量初值选取是否合适直接关系到优化算法的收敛，因此采用解析计算方法[13]对 2 层蜂窝芯 3 层硬板的夹层结构的等效材料参数进行计算。将计算结果作为初值并根据初值确定搜索空间，如表 2 所示。

2.3.4　优化策略

研究采用遗传算法结合梯度法的组合优化策略。遗传算法是以编码空间代替参数空间，以适应度函数为评价依据，以编码群体为进化基础，以对群体中个体位串的操作实现遗传和选择机制，建立一个迭代过程。遗传算法是一种全局算法，具有鲁棒性、普适性和易扩充性等诸多优点[14]，但是该方法计算量大，尤其是在后期收敛缓慢。而梯度法虽然是一种局部寻优方法，但是它具有计算量小，收敛快的特点。因此，先采用遗传算法确定最优解的大致范围，然后在此范围内采用梯度法迅速收敛到最优解，这样既可以防止陷入局部最优解又可以提

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　夹层结构反射面板等效弹性参数解析计算结果及其在优化算法中的取值范围

Table 2　Analytical result of equivalent elastic material parameters of sandwich panel and their feasible value range in genetic algorithm

	Modulus/MPa						Poisson ratio		
	G_{xy}	G_{yz}	G_{zx}	E_x	E_y	E_z	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}
Analytical result	2314.2	861.8	839.6	5336.7	5336.7	—	0.373	—	—
Feasible value range	100～5000			100～10000			0.2～0.4		

高计算效率[15]。

针对夹层结构反射面板材料参数反求的遗传算法，遗传策略设计关键环节如下。

(1) 编码形式。考虑到完备性、健全性、非冗余性原则，遗传算法多数采用二进制编码。本文中采用 32 位二进制编码，编码后的个体基因取如图 6(a)形式，图中深色代表 1，浅色代表 0，每组 32 位确定一个材料参数，共 9 组 288 位。

(2) 群体规模及初始化。群体规模 n 越大，遗传算子所处理的模式就越多，生成有意义的建筑模块并逐渐进化为最优解的机会就越高。同时，群体规模越大，群体中个体的多样性就越好，算法陷入局部解的机会就越小[16]。但是，群体规模增大，个体适应值评估计算次数增加，计算量也增加，计算效率降低。对于本文中研究的问题，实际计算表明，群体规模取 200 是合适的。群体的初始化采取随机产生模式。

(3) 适应函数的确立。适应函数是对位串个体适应性做出评价的函数。为了将适应度与个体优劣直接相联系，遗传算法规定适应函数选择为正而且愈大愈好，因此有必要建立适应函数和目标函数的映射关系。本文中建立的适应函数与目标函数之间的映射关系如下：

$$F(X) = c - f(X) \tag{3}$$

式中：$f(X)$为目标函数，见式(2)；c 为某一较大常数。

(4) 遗传操作。遗传算法的基本遗传操作包括选择、交叉和变异。选择操作遵循自然界生物进化过程中的适者生存的原则，适应值大的个体被选中进入下一代的几率较高。本文中选用轮盘赌选择方式，该方式首先计算某代群体中个体位串的适应值，然后计算此适应值在群体总适应值中的比例，即为该个体被选中进入下一代的概率。例如，给定规模为 n 的群体 $P=\{\bar{a}_1, \bar{a}_2, L, \bar{a}_n\}$，$\forall \bar{a}_j \in P$ 个体的适应值为 $f(\bar{a}_j)$，如果用 $P_s(\bar{a}_j)$表示个体 $\bar{a}_j$ 被选中进入下一代的概率，则有

$$P_s(\bar{a}_j) = \frac{f(\bar{a}_j)}{\sum_{i=1}^{n} f(\bar{a}_i)} \tag{4}$$

经过选择的 n 个适应值较高的个体被送入交配池。如果用 P_m、P_c 表示变异概率和交叉概率，那么交配池中 $P_m \times n$ 个个体要按图 6(b)过程进行变异，$P_c \times n$ 个个体要按图 6(c)过程进行交叉。经历选择、交叉和变异后的个体组成新一代群体。

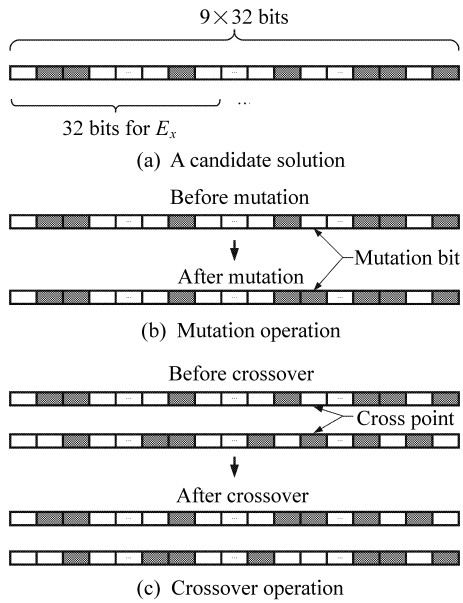

图 6　编码形式和遗传操作

Fig. 6　Encoding form and genetic operations

遗传操作中，选择算子保证适应值高的个体能够存活下来，它降低了个体多样性并促使群体进化。交叉和变异算子增加了个体的多样性，可以有效防止早熟和陷入局部最优解，但交叉和变异概率选择太大会使收敛困难。因此必须选择合适的交叉和变异概率，本文中选变异概率 0.01，交叉概率 1.0。

本文中采用精英保留策略，因为遗传算法不能保证收敛到问题的最优解，但是对于当群体规模比

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较大时，迭代次数趋于无穷大时，群体中包含最优解是一个大概率事件。对于标准遗传算法，如果将当代群体中的最优解保留到下一代群体，则遗传算法是收敛的，这种算法称为精英选择型遗传算法。

2.4　刚度试验有限元模型

将 3 层铝板 2 层蜂窝芯夹层板作等效处理[17]，即将其视为相同尺寸的均质连续材料，密度为蜂窝板总质量比体积，约 1.55×10^{-7} kg/mm^3。利用逆向工程技术建立高精度反射面板试验件的有限元模型，过程如下。

(1) 利用激光跟踪仪测得反射面板实物型面数据，导入 Catia，如图 7(a)所示。

(2) 由于激光跟踪仪无法采集接近边缘处的形面数据，因此必须将现有数据进行拟合并在 Catia 中重构大于实际尺寸的形面，并按实际尺寸截取建模所需形面，如图 7(b)所示。

(3) 将上面得到的曲面导入有限元前处理划分网格并拖拽生成实体单元，如图 7(c)、7(d)所示。

2.5　材料参数反求结果

图 8(a)、8(b)分别是遗传算法和梯度法寻优过程中目标函数的收敛情况，可以看出在遗传算法结果的基础上梯度法很快收敛。表 3 是遗传算法和梯

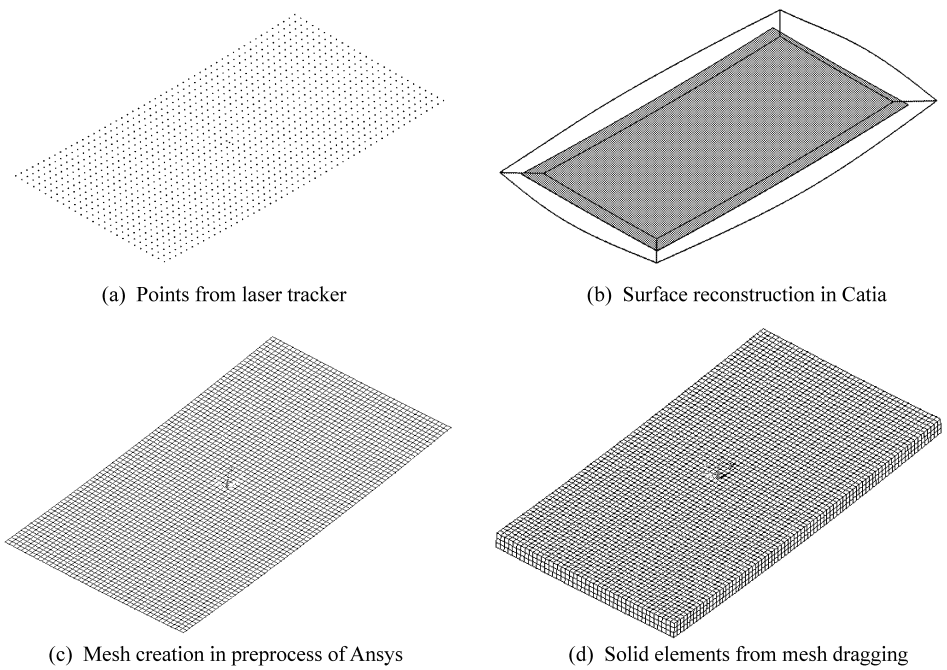

图 7　夹层结构反射面板有限元模型建立过程

Fig. 7　The building process of FEM model of sandwich panel

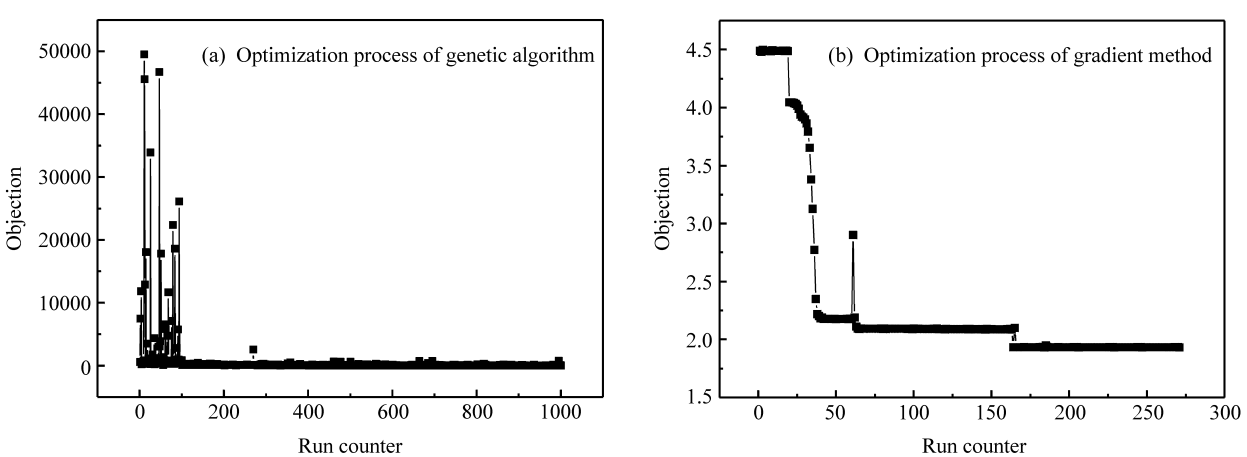

图 8　寻优历程

Fig. 8　Optimization process

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3　夹层结构反射面板等效弹性参数反求结果

Table 3　Equivalent elastic material parameters of sandwich panel by inverse identification

	Modulus/MPa						Poisson ratio		
	G_{xy}	G_{yz}	G_{zx}	E_x	E_y	E_z	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}
Genetic algorithm	4523.53	212.54	203.16	6618.67	6287.72	211.63	0.36	0.32	0.35
Gradient method	4525.47	200.00	200.00	6731.75	6260.60	200.00	0.37	0.39	0.20

度法的优化结果。

反求过程是基于 400 N 载荷的刚度试验。遗传算法迭代 1000 次后目标函数值为 4.5 μm，在此基础上，梯度法迭代了 271 次后收敛于 1.9 μm。

3　材料参数的实验验证

为了检验反求得到的材料参数的精度，利用 100、200、300 N 载荷作用下的面板刚度试验数据对表 3 中的材料参数进行验证。取图 5 中 1～10 点的实验数据和模拟数据进行比较，结果如图 9 所示。可以看出建立在反求得到的材料参数基础上的数值模型得出的模拟结果曲线和实验结果曲线无论在总体趋势还是在局部变化上都非常吻合，尤其是载荷较大时模拟结果和实验结果吻合很好。载荷较小时模拟结果和实验结果差别稍大，分析其原因可能是测量系统误差对变形量的相对扰动较大引起的。在所有取样点上，试验结果和模拟结果的差别不大于 7 μm，因此可以说，优化反求获得的材料参

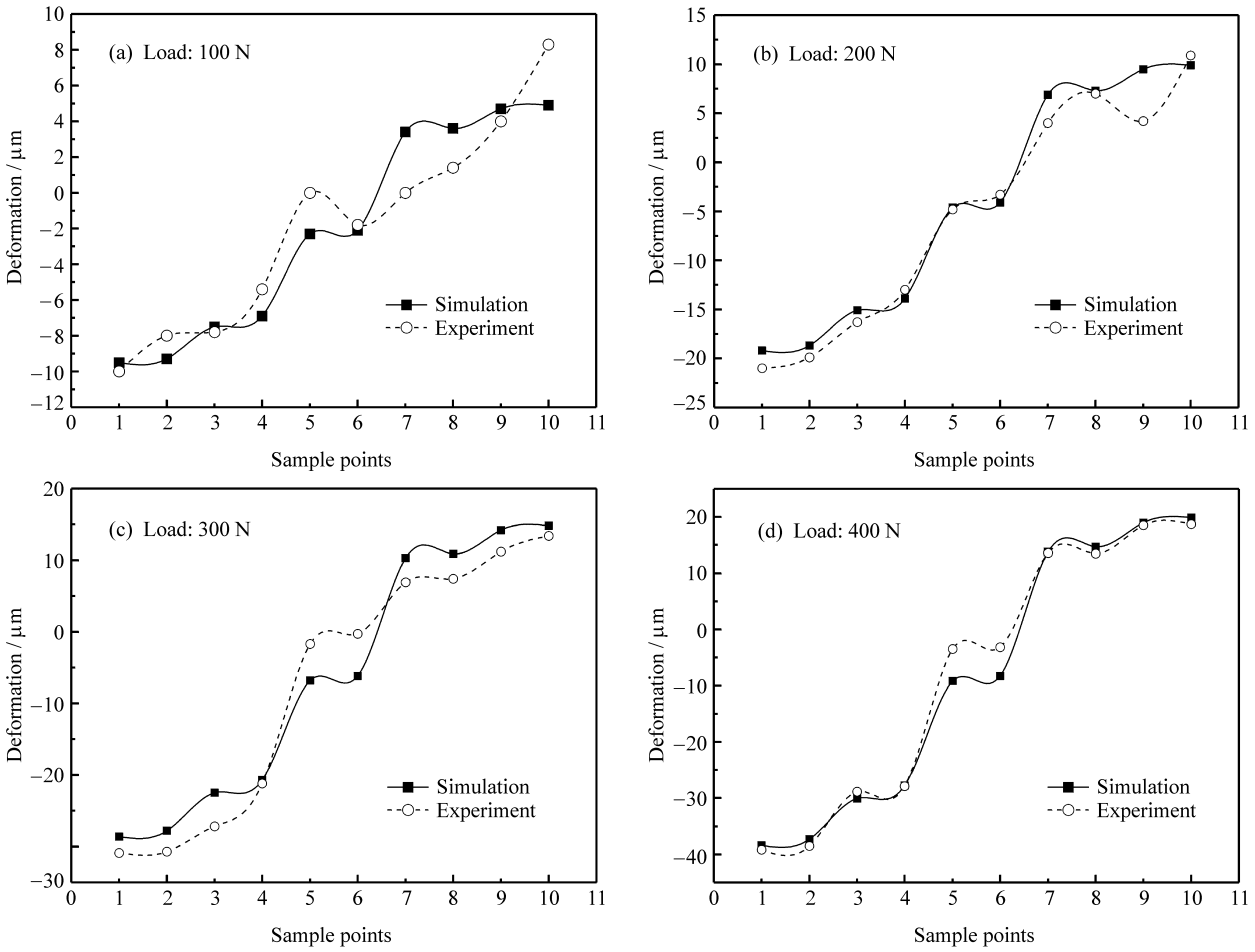

图 9　模拟及试验结果对比

Fig. 9　Results comparison between experiment and simulation

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数能够真实反映此类复合材料的本构关系。

4 结　论

(1) 解析计算得到的蜂窝夹层板的等效参数与反求得到的等效参数有显著差别，造成这一差别的原因是解析法假设蜂窝和面板都是理想的，这显然和实际有出入，所带来的误差对于高精度蜂窝夹层面板的数值模拟来说是不可接受的。

(2) 在材料性能反求方法中引入组合优化策略和软件无缝集成技术能够明显提高反求效率。

参考文献：

[1] 梁　森，陈花玲，梁天锡. 圆柱形胞元蜂窝夹芯板梁理论的研究 [J]. 复合材料学报，2005，22(2)：138-142.
Liang Sen，Chen Hualing，Liang Tianxi. Theory research for a circular cell honeycomb [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，33(2)：138-142.

[2] 邱志平，林　强. 蜂窝夹层复合材料结构非线性传热分析 [J]. 复合材料学报，2005，22(5)：147-154.
Qiu Zhiping，Lin Qiang. Nonlinear heat transfer of honeycomb sandwich composite material structure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(5)：147-154.

[3] 唐羽烨，薛明德. 蜂窝夹芯板的热学与力学特性分析 [J]. 复合材料学报，2005，22(2)：130-136.
Tang Yuye，Xue Mingde. Thermo-mechanical characteristics analysis of sandwich panel with honeycomb core [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(2)：130-136.

[4] Frederiksen P S. Identification of temperature dependence for orthotropic material moduli [J]. Mechanics of Materials，1992，13：79-90.

[5] Grediac M，Vautrin A. Mechanical characterization of anisotropic plates：Experiments and results [J]. Eur J Mech A，1993，12(6)：819-838.

[6] Jean-Yves M. Estimation of thermal conductivity of sandwich bread using an inverse method [J]. Journal of Food Engineering，2008，85：132-140.

[7] Liu G R，Lee J H，Patera A T，et al. Inverse identification of thermal parameters using reduced-basis method [J]. Comput Methods Appl Mech Engrg，2005，194：3090-3107.

[8] Marco M，Thomas G. Improved modal characterization of the constitutive parameters in multilayered plates [J]. Composites Science and Technology，2007，67：1121-1131.

[9] Shi Yinming，Sol Huguo. Material parameter identification of sandwich beams by an inverse method [J]. Journal of Sound and Vibration，2006，290：1234-1255.

[10] Liu G R，Chen S C. Flaw detection in sandwich plates based on time-harmonic response using genetic algorithm [J]. Comput Methods Appl Mech Engrg，2001，190：5505-5514.

[11] Araujo A L，Mota Soares C M，Herskovits J，et al. Development of a finite element model for the identification of mechanical and piezoelectric properties through gradient optimisation and experimental vibration data [J]. Composite Structures，2002，58：307-318.

[12] 周贤宾，陈连峰，李东升. 反射器夹层面板精密成形原理 [J]. 北京航空航天大学学报，2004，30(4)：296-300.
Zhou Xianbin，Chen Lianfeng，Li Dongsheng. Principle of precision forming for sandwich panel of large antenna reflector [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2004，30(4)：296-300.

[13] 夏利娟，金咸定. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算 [J]. 上海交通大学学报，2003，137：999-1001.
Xia Lijuan，Jin Xianding，Equivalent analysis of honeycomb sandwich plates for satellite structure [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2003，137：999-1001.

[14] Lin Ching-Chieh，Lee Ya-Jung. Stacking sequence optimization of laminated composite structures using genetic algorithm with local improvement [J]. Composite Structures，2004，63：339-345.

[15] Liu G R，Zhou J J. Coefficients identification in electronic system cooling simulation through genetic algorithm [J]. Computers and Structures，2002，80：23-30.

[16] Chatterjee S，Laudato M，Lynch A L. Genetic algorithms and their statistical applications：An introduction [J]. Computational Statistics & Data Analysis，1996，22：633-651.

[17] 王　博，王　斌，程耿东. Kagome 蜂窝夹层平板的多功能优化设计 [J]. 复合材料学报，2007，24(3)：109-115.
Wang Bo，Wang Bin，Cheng Gengdong. Multifunctional design of sandwich panels with Kagome-like cores [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(3)：109-115.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net