

复合材料混合连接结构非线性建模 及参数识别

Nonlinear Modeling and Parameter Identification of Composite Hybrid joint Structures

孙亚川^{1,2,3}, 李冰霏⁵, 李志强⁴, 刘振^{2,3}

SUN Yachuan, LI Bingfei, LIU Zhen, LI Zhiqiang

1. 西安航天动力技术研究所, 陕西 西安 710025
2. 西安交通大学复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 陕西 西安 710049
3. 西安交通大学航天航空学院, 陕西 西安 710049
4. 北京强度环境研究所可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076
5. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100

摘要: C/SiC 复合材料是飞行器防热承载一体化结构广泛使用的一种材料, 其搭接部位在使用同种材料的螺钉连接后还要采用基体相二次沉积, 形成一种机械连接和粘接的混合连接形式。采用改进 Iwan 模型搭建了多自由度连接单元。将多自由度 Iwan 连接单元嵌入搭接梁模型, 采用模态测试结果修正刚度参数, 建立搭接梁衰减响应与阻尼参数间的随机森林回归模型, 采用敲击衰减曲线识别 Iwan 模型阻尼参数, 将识别的参数代回单钉搭接梁模型验证了参数的正确性, 验证结果发现大载荷下模型预测结果优于小载荷。

关键词: C/SiC 复合材料; 连接结构; Iwan 模型; 随机森林

引言

C/SiC 等高温复合材料壁板连接结构在高超声速飞行器中普遍存在, 在振动、噪声环境下, 连接结合面在法向和切向表现出复杂的接触、摩擦、碰撞等非线性行为^[1, 2], 将影响结构的动力学响应特性。针对复合材料连接结构连接部位的建模方法主要包括有限元精细化建模方法^[3]、抽象模型法^[4]和整体模型修正法^[5-7]等方法。有限元精细化建模方法对钉孔划分网格, 建模繁琐、通用性差、计算耗时。抽象模型法将连接部位表现出来的弹性及滑移行为抽象为弹簧摩擦阻尼系统, 成为解决这个问题的重要方法^[4, 8]。Iwan 模型方法是抽象模型法中一种重要方法, 是基于运动硬化和多重屈服面理论, 采用一组弹塑性元件模拟给定的应力-应变曲线, 成功应用于螺栓连接^[9]、铆钉连接^[10]、多钉连接^[11]中, 但文献中尚未见到将其应用于 C/SiC 复合材料机械连接与 CVI “粘接” 相结合的混合连接形式。抽象模型法优点是可降低模型自由度, 提高建模和计算效率, 便于参数化研究。整体模型修正法中常采用连接界面模态、含阻尼和刚度参数的薄层单元、绑定连接及其他连接单元的形式简化连接部位^[12, 13], 将包含连接的装配体作为一个整体去考虑, 连接的特性参数隐含在修正后的模型里。该方法对连接问题进行了简化, 但仅局限于结构线性阶段响应模拟。

连接模型参数的准确识别是连接结构动响应分析的关键。采用机器学习方法可以应对热-噪声环境下复杂连接结构的动力学建模, 宋亚新等^[14-16]采用多层前馈神经网络对 Iwan 模型参数进行识别, 但是并未关注载荷的影响。以决策树为基学习器的随机森林方法也可用于回

归问题，Chiara等^[17]采用多种树形机器学习模型对纤维增强聚合物复合材料的高温力学性能进行训练，实现了可泛化的准确预测。随机森林回归相对于神经网络具有计算轻量化、效率高、参数调整方便等优势，适合于对连接结构的初步建模。

综上所述，需要对 C/SiC 复合材料混合连接形式建立 Iwan 连接模型，识别连接模型参数，开展热-噪声耦合下的复合材料连接结构的非线性响应研究，为热-噪声环境下复合材料连接结构疲劳和失效评估提供依据。

1. 建立连接模型

本文选用基于改进 Iwan 模型的连接建模方法。虽然商用有限元软件提供一些自定义单元，开放节点各自由度，如 COMBIN39^[18]、Bushing^[19]等单元，但是需要提供大量的离散力-位移曲线数据点，不利于理论模型的直接应用。Segalman 等^[8,20]基于 Iwan 模型开展了大量连接建模工作，但都是基于 Sandia 实验室内部的 Sierra 工程力学仿真代码套件。本文将针对 C/SiC 复合材料连接，建立多自由度、多连接参数的 Iwan 连接单元。

将 Iwan 模型应用于连接梁及连接壁板结构，需要综合考虑拉压、弯曲、扭转等内力形式。这里借用 AIBE 模型 (AIBE, Adjusted Iwan Beam Element) 描述多自由度 Iwan 模型的思路^[16]。如图 1 所示，两个参考节点与两个虚拟的方形刚性面固连，在两个刚性面之间两个不同的方向上布置 AIBE，同时为考虑预紧力、热膨胀等对连接部位的影响在两个刚性面之间附加弹簧。为清楚地表示多自由度 Iwan 连接单元各个节点的自由度，刚性面上的参考节点沿轴向朝单元外进行偏置，每个节点有 6 个自由度，偏置增加的几何尺寸不参与单元的计算。

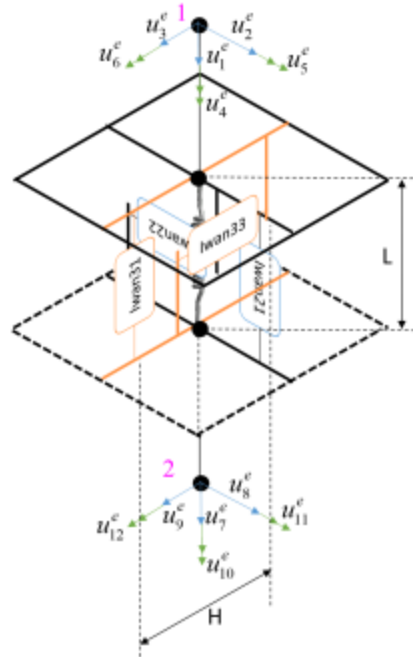


图 1 多自由度 Iwan 模型单元

对照传统三维梁单元，建立多自由度 Iwan 模型的力-位移关系，获得单自由度 Iwan 模型刚度表示的连接单元刚度矩阵。考虑螺钉的倾斜及次弯曲变形状态，获得局部与全局坐标系间的坐标转换矩阵 Λ ，进而获得整体刚度矩阵为

$$\mathbf{K} = \Lambda^T \mathbf{K}^e \Lambda \quad (1)$$

多自由度 Iwan 连接单元子程序在运行时，首先接收主程序的位移增量向量 $d\bar{u}$ ，经单元计算后提供单元刚度矩阵及单元力，动力学计算还需要质量和阻尼矩阵，具体过程如下：
首先坐标变换获得单元坐标系下位移增量向量

$$d\bar{u}^e = Ad\bar{u} \quad (2)$$

经几何关系得到各 Iwan 模型的位移增量 $d\Delta_{ij}$ ，各个 Iwan 模型返回刚度 K_{Iwanij} 和力 f_{Iwanij} ，随后进行坐标转换得到总体刚度矩阵 K ，全局坐标系下的节点力 $F=AF^e$ ，质量矩阵和阻尼矩阵可根据常规梁单元获取。至此，多自由度 Iwan 连接单元子程序完成了一个分析步的迭代，本文基于 Abaqus UEL 子程序^[19,21]建立了多自由度 Iwan 连接单元。

2. 连接参数识别

2.1. 刚度参数识别

基于 C/SiC 搭接梁的模态试验，对 Iwan 连接单元的初始刚度进行修正。采用移动力锤法进行模态测试。搭接梁尺寸及有限元模型分别如图 2、图 3 所示，嵌入的多自由度 Iwan 连接单元在模型中以叉形标记表示。为了简化网格，提高建模和计算效率，将搭接梁两端的光孔简化为负的集中质量，如图中方块符号所示。

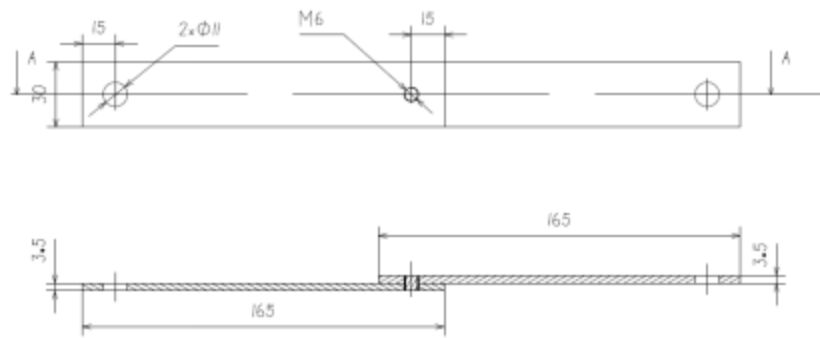


图 2 单钉搭接梁试件尺寸（单位：mm）

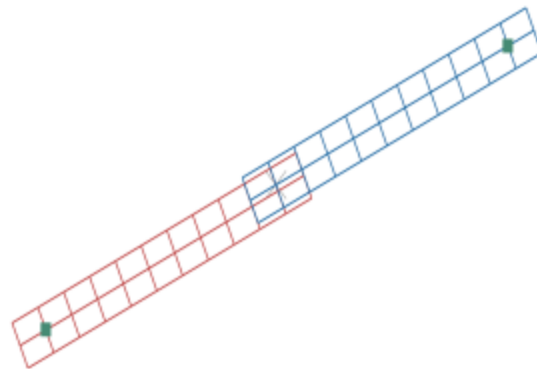


图 3 嵌入多自由度 Iwan 连接单元的搭接梁有限元模型

材料主方向上的杨氏模量 E_{11} 显著影响所有弯曲模态， K_{Iwan12} 显著影响一阶弯曲，面内剪切模量 G_{12} 和 K_{Iwan31} 显著影响扭转模态。修正前后的参数对比如表 1。修正前后的模态频率与

试验值对比如表 2。由于试件材料特殊，尺寸偏小，很难保证测试的模式结果质量，因此对 3、4 阶复杂混合模式不予修正，有限元与试验振型的 MAC 仅在 1 阶达到了 0.836，2 阶为 0.546。注意到修正后的杨氏模量 E_{11} 相对于初始值有较大变动，结合有限元 1 阶振型可知，这是对搭接区域 CVI 沉积“粘接”刚度的补偿，根据 P. Avitabile 对这种材料参数补偿刚度的论述^[22]，在保证结构整体动力学特性与试验一致的前提下，这种材料参数补偿是可接受的。

表 1 单钉搭接梁模型修正前后参数

参数	E_{11}/GPa	G_{12}/GPa	$K_{Iwan21}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$K_{Iwan22}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$K_{Iwan31}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$K_{Iwan33}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
修正前	120	44.4	49e7	49e7	49e7	49e7
修正后	280	76.4	17e3	49e7	8e8	8e8

表 2 修正前后模态频率与试验值对比

试验阶数	试验频率 /Hz	修正前有限元频率 /Hz	修正前频差/%	修正后有限元频率 /Hz	修正后频差/%
1	308.126	331.66	7.64	307.9	-0.07
2	807.699	529.76	-34.41	806.98	-0.09
5	2295.01	1904.3	-17.02	2455.7	7.00
6	2765.84	1944.2	-29.71	2507.1	-9.35

2.2. 阻尼参数识别

本节将对 Iwan 连接单元中的阻尼参数进行识别，即剩余刚度系数 α 和屈服力 f_y ^[16]，采用随机森林回归建立 Iwan 连接单元参数与连接试件响应间的关系，采用拉丁超立方采样生成 Iwan 连接单元参数组合，在这些参数组合下进行脉冲激励下的衰减响应有限元计算。以衰减响应包络线为模型输入，以对应的 Iwan 连接单元参数组合为模型输出构建数据集，在数据集上进行模型的训练和验证。将单钉搭接梁试件实测的衰减曲线包络线输入模型，预测真实试件对应的 Iwan 连接单元参数，再将预测的参数代入单钉搭接梁有限元模型，计算衰减响应并与实测曲线对比，验证方法的正确性。

2.2.1. 锤击衰减曲线测试及有限元模型

模拟锤击试验建立有限元模型，除了试件两端的负集中质量，还要在传感器粘贴处添加传感器集中质量，两端悬挂细线用弹簧模拟，锤击脉冲力以余弦函数模拟，以单钉搭接梁为例所建立的有限元模型如图 4。实测加速度响应及其包络线如图 5。

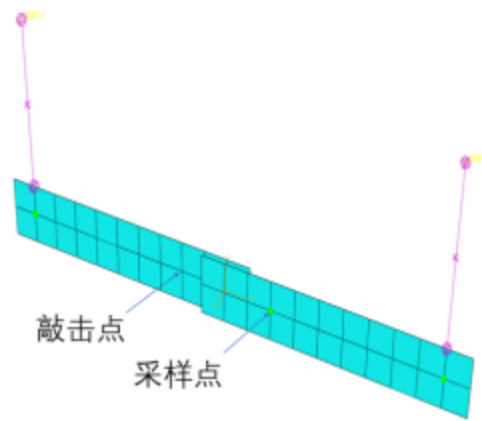


图 4 单钉搭接梁模拟锤击测试有限元模型

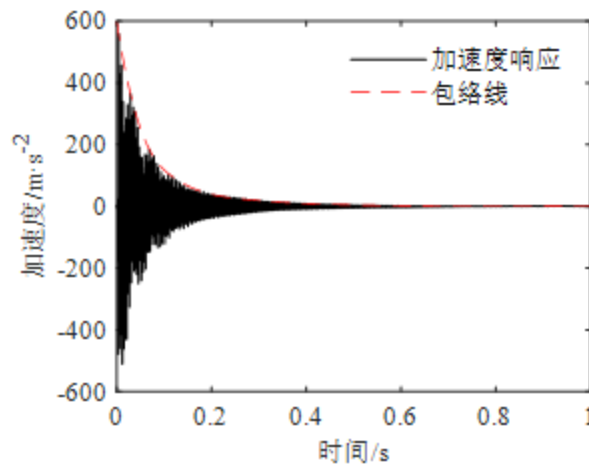


图 5 加速度响应及其包络线

2.2.2. 模型训练及参数识别

采用 Scikit-learn 机器学习库^[23]进行随机森林回归模型的拟合及参数的预测。首先对参数进行灵敏度分析,以选取合适的参数空间,构成数据集 1 并进行训练,训练效果如图 6、图 7。对两个搭接梁试件各敲击 10 次,将衰减曲线包络线输入模型,识别的参数如图 8 中黑色圆圈,其在在 f_{y1} 方向上分布较为集中,但在 a_1 方向上过于分散。宋亚新等^[16]将衰减曲线归一化,忽略了载荷,然而敲击载荷与结构响应强相关,有必要将载荷作为模型的输入参数,以使模型排除响应中载荷的影响,从而更好预测参数,因此在拉丁超立方采样时增加载荷参数,新的参数组合和包络线与数据集 1 合并为数据集 2,据此训练的模型识别出参数如图 8 中蓝色方框,可以看到数据更加集中,从表 3 可知方差大幅下降,说明考虑载荷的影响对模型提升明显。数据集 3 是在数据集 2 的基础上加入参数灵敏度分析的样本,由于参数分析的样本参数量级跨度较大,无法提升模型精度,部分极端样本还会对模型产生干扰,因此不予采用。

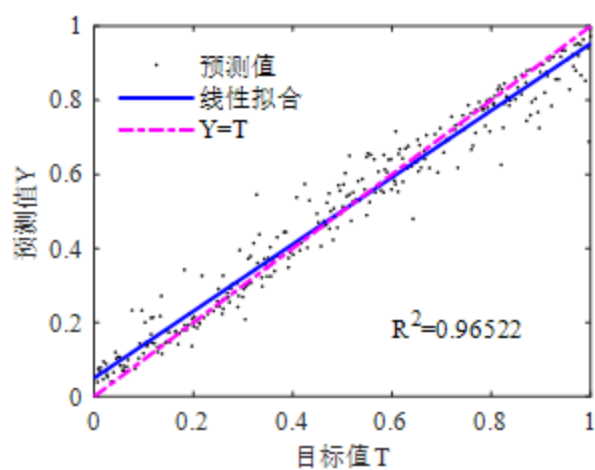


图 6 模型对训练集的预测效果

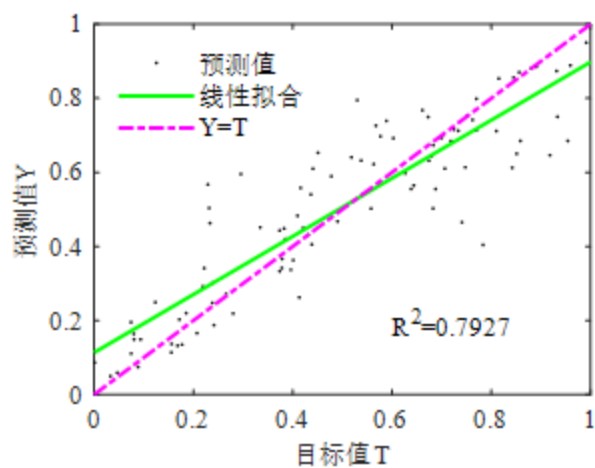


图 7 模型对测试集的预测效果

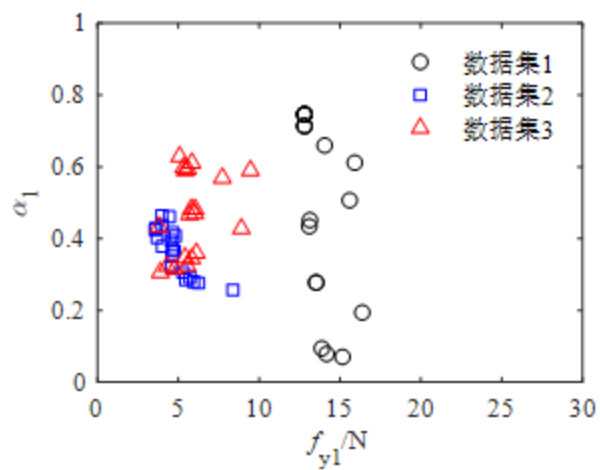


图 8 随机森林模型识别的 Iwan 连接模型参数

表 3 各数据集训练的模型信息及参数识别结果

数据集名称	样本数	随机森林参数		模型 R^2	f_{j1}/N		σ_1	
		决策树个数	最大深度		均值	方差	均值	方差
数据集 1	198	32	15	0.7769	13.68	1.14	0.51	0.25
数据集 2	395	69	42	0.8278	4.85	1.10	0.37	0.06
数据集 3	568	74	58	0.8108	5.83	1.39	0.46	0.11

2.2.3. 参数验证

将识别的参数代入多自由度 Iwan 连接单元，用有限元模型分别计算单钉搭接梁敲击测试中最小（6.06N）和最大载荷（20.83N）下的加速度响应，并与实测结果对比如图 9 和图 10。

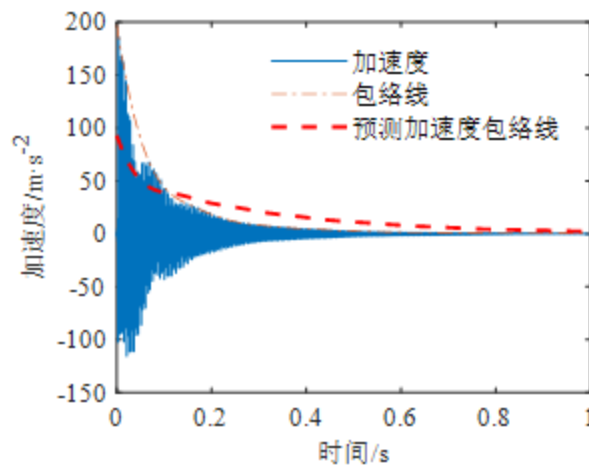


图 9 6.06N 载荷下有限元预测加速度包络线与实测结果对比

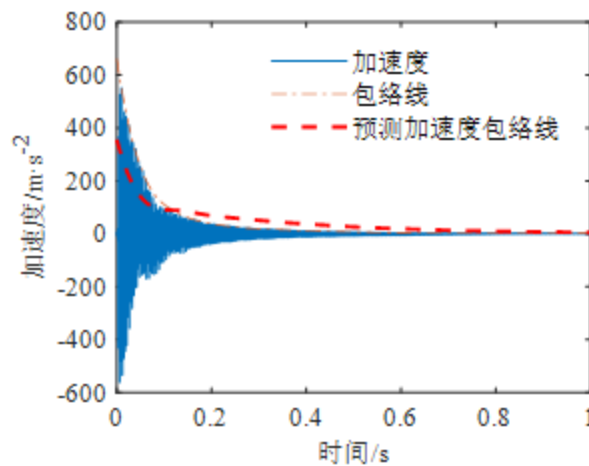


图 10 20.83N 载荷下有限元预测加速度包络线与实测结果对比

这里借用模态置信判据 MAC 值的概念描述预测曲线与实测曲线的形状相似程度，将包络线以 0.05s 为间隔采集 20 个时刻的加速度构成包络线向量，则 MAC 值为实测向量和预测向量的内积平方值与两个向量各自内积乘积的比值，两个验证算例的 MAC 分别为 0.84、0.92，

大载荷预测结果优于小载荷，模型整体预测效果良好。但是需注意的是，在衰减曲线初始段，预测值与实测值有较大偏差，这是由于本文仅将载荷作为输入参数，以使模型能够排除载荷对连接参数的影响，但是并未考虑真实载荷与有限元模型中脉冲激励间的关系，未对载荷进行标定或未对模型针对载荷因素进行修正，这也是本方法未来值得改进的地方。

3. 结束语

本文采用多自由度 Iwan 连接单元建立搭接梁有限元模型，通过搭接梁模态试验对模型的材料参数及 Iwan 连接单元的刚度参数进行修正。采用随机森林回归方法建立多自由度 Iwan 连接单元参数与加速度衰减曲线包络线之间的关系，将实测加速度包络线输入模型，识别 Iwan 连接单元参数，通过增加载荷作为输入变量、缩小参数范围等措施改进数据集，识别的参数方差下降，精度提高。将识别的参数代回单钉搭接梁模型验证了参数的正确性。对搭接梁的参数识别验证结果表明，模型整体预测效果良好，分别以实测中最大载荷和最小载荷样本验证识别参数，发现大载荷下预测结果优于小载荷。

参考文献:

- [1] Sun HT, Chang FK, Qing X. The response of composite joints with bolt-clamping loads, Part I: model development [J]. *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(1): 47-67.
- [2] Ekh J. Multi-fastener single-lap joints in composite structures [D]. Stockholm: KTH, 2006.
- [3] Camanho PP, Matthews FL. Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(6): 529-47.
- [4] Segalman DJ, Paez T, Smallwood D, et al. Status and integrated road-map for joints modeling research [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2003.
- [5] Witteveen W, Pichler F. Efficient model order reduction for the nonlinear dynamics of jointed structures by the use of trial vector derivatives[C]//*Proceedings of the 32nd IMAC*, Cham, 2014. Springer International Publishing.
- [6] Yunus MA, Rani MNA, Sani MSM, et al. Finite element model updating of riveted joints of simplified model aircraft structure[C]//*AIP Conference Proceedings*, 2018.
- [7] Shah MA, Yunus M, Rani MA, et al. Finite element modelling and model updating of riveted joint structure[C]//*Journal of Physics: Conference Series*, 2019. IOP Publishing.
- [8] Ames NM, Lauffer JP, Jew MD, et al. Handbook on dynamics of jointed structures [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2009.
- [9] Song Y, McFarland DM, Bergman LA, et al. Modeling of the dynamics of jointed beam structures[C]//*ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2003.
- [10] Bedair OK, Eastaugh GF. A numerical model for analysis of riveted splice joints accounting for secondary bending and plates/rivet interaction [J]. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(3): 251-8.
- [11] 黄河源, 赵美英, 万小鹏, et al. 一种复合材料螺栓连接结构非线性刚度模型及应用 [J]. *西北工业大学学报*, 2018, 36(01): 66-73.
- [12] Ehrlich C, Schmidt A, Gaul L. Microslip joint damping prediction using thin-layer elements[C]//*Proceedings of the 32nd IMAC*, Cham, 2014. Springer International Publishing.
- [13] Zucco G, Oliveri V, Peeters D, et al. Static test of a thermoplastic composite wingbox under shear and bending moment[C]//*2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2018.

- [14] Song Y, Hartwigsen CJ, Bergman L, et al. Dynamical response analysis of jointed structures by 2-D/3-D adjusted Iwan beam elements [M]. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 2003.
- [15] Song Y, Hartwigsen CJ, Bergman LA, et al. A three-dimensional nonlinear reduced-order predictive joint model [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 2(1): 59-73.
- [16] Song Y, Hartwigsen CJ, McFarland DM, et al. Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(1): 249-76.
- [17] Machello C, Aghabalaei Baghaei K, Bazli M, et al. Tree-based machine learning approach to modelling tensile strength retention of Fibre Reinforced Polymer composites exposed to elevated temperatures [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 270: 111132.
- [18] Ansys. Ansys 16.0 release documentation, theory and modelling guide [M]. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2015.
- [19] Abaqus Analysis User's Guide [M]. Providence, RI: Dassault Systèmes, 2014.
- [20] Segalman DJ. An initial overview of Iwan modeling for mechanical joints [R]: Tech. Rep. SAND2001-0811, Sandia National Laboratories, 2001.
- [21] Boulbes RJ. Mesher and meshing [M]//JACKSON O. Troubleshooting finite-element modeling with Abaqus: with application in structural engineering analysis. Cham: Springer International Publishing. 2020: 171-226.
- [22] Avitabile P. Modal space - in our own little world [J]. Experimental Techniques, 2013, 37(1): 4-6.
- [23] Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al. Scikit-learn: Machine learning in Python [J]. the Journal of machine Learning research, 2011, 12: 2825-30.

作者简介：孙亚川（1992-），男，博士，工程师，河南郑州人。主要从事薄壁结构在热、噪声载荷下的非线性响应研究。E-mail: yachuan8513@163.com