

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.018

嵌入式共固化阻尼复合材料非线性静力学性能

罗皓, 梁森, 孙瑞骏, 刘昭阳

(青岛理工大学, 机械与汽车工程学院, 山东青岛 266520)

摘要: 为研究嵌入式共固化阻尼复合材料(ECDCM)的非线性静力学性能,对铺层角度为 0° 和 45° 的ECDCM试件进行拉伸实验和三点弯曲实验,基于复合材料连续损伤理论,在LS-DYNA中建立了ECDCM非线性有限元分析模型,将仿真结果与实验结果进行比较,验证了有限元模型的适用性;通过实验和仿真结果简单分析了ECDCM非线性静力学性能产生机制;使用有限元方法分别研究了不同铺层角度对ECDCM拉伸性能和弯曲性能的影响,并研究了阻尼层厚度对ECDCM弯曲弹性模量的影响。结果表明,ECDCM的材料非线性力学特性主要来源于拉伸时切应力分量导致基体不断产生剪切损伤,导致材料宏观力学性能发生变化;在 0° 至 45° 范围内随着铺层角度的增大,ECDCM材料非线性特征愈发显著,在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 范围内,拉伸弹性模量和弯曲弹性模量随着铺层角度增大呈下降趋势,拉伸强度与弯曲强度随铺层角度增大也呈下降趋势;阻尼层的加入使得复合材料被隔断分为上下两部分,使得复合材料的弯曲弹性模量下降,并且在 $0\sim 0.3\text{ mm}$ 范围内阻尼层厚度增大会导致弯曲弹性模量进一步减小。

关键词: 嵌入式共固化;复合材料;非线性;静力学;有限元

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0108-07

Nonlinear Statics Properties of Embedded Co-cured Damping Composites Material

Luo Hao, Liang Sen, Sun Ruijun, Liu Zhaoyang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract : In order to study the nonlinear static properties of embedded Co-curing damping composite material (ECDCM), tensile experiments and three-point bending experiments were performed on ECDCM specimens with lay-up angles of 0° and 45° . Based on the continuous damage theory of composite materials, an ECDCM nonlinear finite element analysis model is established in LS-DYNA, and the simulation results are compared with the experimental results, which verifies the applicability of the finite element model. Through experimental and simulation results, the mechanism of nonlinear static properties of ECDCM is briefly analyzed. The effects of different ply angles on the tensile properties and flexural properties of ECDCM were studied by finite element method, and the influence of damping layer thickness on the bending modulus of ECDCM was studied. The results show that the nonlinear mechanical properties of ECDCM materials mainly come from the continuous shear damage of the matrix caused by the shear stress component during tension, resulting in changes in the macroscopic mechanical properties of the material. In the range of 0° to 45° , the nonlinear characteristics of ECDCM materials become more and more pronounced with the increase of ply angle, and in the range of 0° to 45° , the tensile modulus and bending modulus decrease with the increase of ply angle, and the tensile strength and bending strength also show a downward trend with the increase of ply angle. The addition of the damping layer makes the composite material divided into upper and lower parts, so that the bending modulus of the material decreases. And an increase in the thickness of the damping layer in the range of 0 mm to 0.3 mm leads to a further decrease in the bending modulus.

Keywords : embedded co-curing ; composite ; nonlinear ; statics ; finite element

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075280),山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE088)

通信作者: 梁森,教授,高级工程师,博导,主要从事嵌入式共固化阻尼复合材料性能及复合材料表面改性方面的研究

收稿日期: 2023-10-15

引用格式: 罗皓,梁森,孙瑞骏,等.嵌入式共固化阻尼复合材料非线性静力学性能[J].工程塑料应用,2023,51(11):108-114.

Luo Hao, Liang Sen, Sun Ruijun, et al. Nonlinear statics properties of embedded co-cured damping composites material[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 108-114.

嵌入式共固化阻尼复合材料(ECDCM)是一种新型的阻尼复合材料,它将阻尼材料作为一层嵌入在纤维增强树脂预浸料之间。这种结构具有较大的层间结合力和良好的阻尼性能,可以有效地减少复合材料的振动和噪声,可广泛用于航空航天、高速铁路等领域。在实际工程中ECDCM复合材料承受复杂拉力,这使得材料体现出非线性力学性能,如果继续使用线性假设进行分析,会导致材料过早破坏,影响ECDCM的使用效果。

目前,对于ECDCM的力学性能已有丰富的研究,涵盖了理论分析、实验分析和仿真分析等3个方面。理论方面,王绍清等^[1]基于分段折线理论,构建了ECDCM弯曲性能理论模型,并利用重三角级数和Rayleigh-Ritz对方程进行了求解。袁丽华等^[2-3]研究了穿孔阻尼复合材料以及缝合阻尼复合材料的面内力学性能,建立了“树脂钉”嵌入的面内纤维环状变形模型和“复合钉”贯通的面内纤维折线变形模型,推导了穿孔纤维增强阻尼薄膜的面内等效弹性参数表达式和缝合纤维增强阻尼薄膜的面内等效弹性参数表达式。实验方面,李雪等^[4]通过面内和层间拉伸实验研究了ECDCM的面内拉伸性能以及层间拉伸性能,并进行了三点弯曲实验研究了试件几何参数对弯曲性能的影响。米鹏等^[5]对ECDCM进行了低速冲击实验,验证了嵌入阻尼层后的ECDCM在低速冲击性能方面优于同材质的复合材料其峰值拉力提高了一倍,能量的吸收提高18.72%。付小静等^[6]研究环境对ECDCM性能的影响,其搭建了测试温湿环境中复合材料阻尼结构阻尼特性的试验平台,分别探索了其力学性能受温湿环境影响的规律。数值模拟方面,梁森等^[7]探索了基于模态应变能的有限元数值模拟方法,研究ECDCM结构的动力学特性。闫盛宇等^[8]利用ANSYS分析了嵌入式缝合阻尼复合材料中,面内等效参数随行距、针距以及阻尼占比的变化规律。

在复合材料非线性力学性能方面,Matzenmiller等^[9]构建了各向异性材料的连续损伤模型来对标材料的宏观非线性力学行为。奚蔚等^[10]利用有限元软件研究了材料模量退化方式对材料力学性能分析结果的影响。孟宪明等^[11]详细比较了LS-DYNA有限元软件中渐进损伤材料模型与连续损伤模型求解结果的差异。杨冬阳等^[12]探究了如何对LS-DYNA中连续损伤材料模型各参数进行标定,并对

已有模型进行了改进。

综上可知,目前对于复合材料非线性力学性能的研究通常为单向纤维增强材料且不含夹芯层,针对ECDCM这类夹芯复合材料力学性能的研究还未考虑其材料非线性效应。笔者在现有研究成果的基础上,针对ECDCM在偏轴拉伸和三点弯曲过程中出现的非线性现象进行研究,旨在建立针对ECDCM的非线性有限元仿真模型,进一步提高ECDCM性能预报准确性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维织物预浸料:WP-3021/9 A16/38%,环氧树脂(9A16)质量分数为38%,单层厚度0.2 mm,威海光威复合材料股份有限公司;

丁腈橡胶(NBR):N41/N220S,广州市力大橡胶原料有限公司;

四氢呋喃:济南金昊化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

压力成型机:PLHY-1000型,浙江湖州东方机械有限公司;

万能材料试验机:GT-TCS-2000型,东莞高铁检测仪器有限公司。

1.3 试样制备

ECDCM层合板结构如图1所示,其上、下蒙皮为树脂基纤维增强复合材料,阻尼层为自炼丁腈橡胶^[13]。首先分别按照实验所需铺层顺序制作上、下蒙皮待用,单个蒙皮厚度为1 mm,需要预浸料五片;然后,按照质量比1:5的比例,将未硫化的橡胶溶于四氢呋喃溶剂中制成阻尼溶液,使用刷子在预浸料其中一面进行涂刷,单侧阻尼涂刷厚度为0.1 mm,每涂刷一层后使用厚度计进行测量以控制厚度,涂刷阻尼溶液后的照片如图2所示,刷涂法不仅简单可靠,而且能够保证黏弹性阻尼材料中的分子官能团的活性。晾干后将上下蒙皮相贴,得到ECDCM层合板待固化件,阻尼层总厚度为0.2 mm。

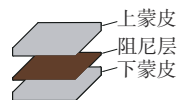


图1 ECDCM层合板结构

使用压力形成机对材料进行加热固化,固化过程中丁腈橡胶与环氧树脂基体发生化学反应,导致环氧树脂基体与黏弹性阻尼材料发生化学交联,形成互穿网络结构,从而提高复合材料的界面力学性



图2 涂刷阻尼溶液

能^[13],固化工艺曲线如图3所示。最后使用切割机将层合板切割成实验规定尺寸。

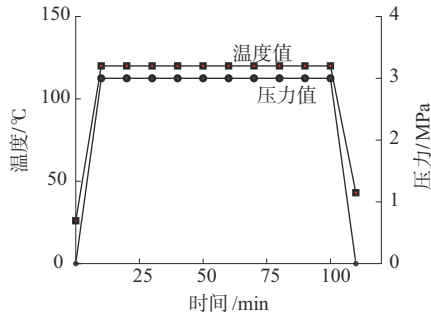


图3 ECDCM固化工艺曲线

1.4 性能测试

拉伸性能按照 ASTM D3039-2005 测试,试件尺寸为 250 mm×25 mm×2.2 mm,试件铺层方式分别为 $[0_5/C_{0.2}]_s$ 和 $[45_5/C_{0.2}]_s$,使用万能材料试验机以 2 mm/min 的速度进行加载。

三点弯曲试验按照 GB/T 3356-2014,使用试样的跨厚比 l/h 为 32:1,加载速率为 2 mm/min,使用万能材料试验机,试件尺寸为 84 mm×12.5 mm×2.2 mm,试件铺层与拉伸实验相同。

2 有限元仿真

2.1 材料模型选择

复合材料的力学非线性是复合材料内部发生的微观损伤的宏观表现。连续损伤模型认为复合材料在发生损伤至完全失效的过程中,其会不断形成微小的裂纹存在于复合材料内部。使得材料实际所受的应力提高,笔者使用 LS-DYNA 中的 MAT_058 材料模型进行仿真,该模型基于 Matzenmiller 连续损伤力学模型^[9],是一种针对二维纤维编织布的典型连续损伤模型。

笔者使用的复合材料预浸料面内参数由厂家提供,T300/QY8911 预浸料基本性能参数列于表1。阻尼材料可以采用二参数 Mooney-Rivlin 不可压缩橡胶模型进行表示^[14],参数列于表2。通过层间拉伸实验^[4]和层间剪切实验^[15]得出在 ECDCM 中树脂-树脂、树脂-阻尼的层间力学参数列于表3。

表1 T300/QY8911 预浸料基本性能参数

性能	1 [#] 材料
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 600
拉伸弹性模量 $E_x, E_y/\text{GPa}$	30.0, 30.2
剪切模量 $G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}/\text{GPa}$	3.0, 3.0, 3.0
泊松比 ν_{xy}	0.15
X方向拉伸强度 C_x/GPa	0.678
X方向压缩强度 T_x/GPa	0.3
Y方向拉伸强度 C_y/GPa	0.678
Y方向压缩强度 T_y/GPa	0.3
剪切强度 S_{xy}/GPa	0.08
X方向拉伸应变峰值 $E11C$	0.024
X方向压缩应变峰值 $E11T$	0.014
Y方向拉伸应变峰值 $E22C$	0.024
Y方向压缩应变峰值 $E22T$	0.014
剪切方向应变峰值 GMS	0.2

表2 自炼丁腈橡胶材料性能参数

性能	2 [#] 材料
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	980
泊松比 ν	0.498
Mooney-Rivlin 常数 C_{01}	0.924
Mooney-Rivlin 常数 C_{10}	0.231

表3 不同材料层间力学性能参数

层间结合类型	参数	数值
树脂-树脂	法向强度/MPa	100
	切向强度/MPa	160
树脂-橡胶	法相强度/MPa	1.08
	切向强度/MPa	8.75

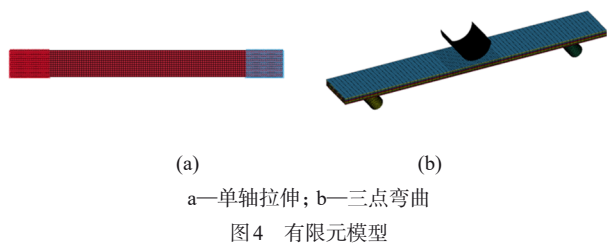
2.2 分层损伤的实现

使用常用的单层壳建模无法对层间失效情况进行分析,因此本文使用多层单元建模,层与层之间采用共节点或设置绑定接触的方法进行力的传递。单层的复合材料可看作为二维平面,因此,笔者采用多层壳单元的建模方式,层与层之间使用关键字 Contact _ Automatic _ Surface _ to _ Surface _ tiebreak 进行绑定。

在关键字卡片中,指定参数 OPTION 为 6,该模式下各层材料之间刚开始属于绑定接触状态,当下式成立时,两个面开始产生相对移动,随着拉力的增加,层间损伤量开始增加,损伤是随初始接触点之间距离变化的线性函数。当距离等于破坏值 CCRIT 时,损坏已完全发展,并发生接触失效,接触变为面面接触。

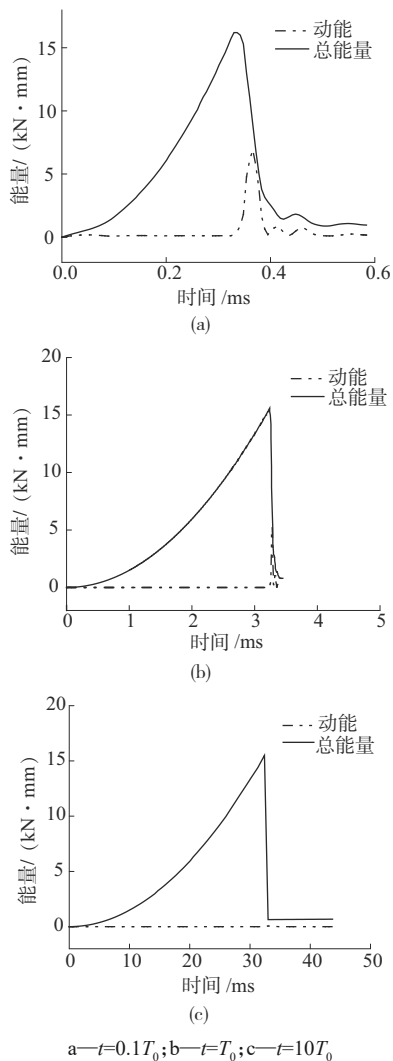
2.3 模型建立

使用多层壳单元进行建模,建立单轴拉伸和三点弯曲有限元模型如图4所示。



2.4 加载时间

材料拉伸及弯曲实验过程仿真是典型的准静态仿真问题,通常要求加载时间应大于模型最低模态周期的10倍,以确保过程为准静态过程^[16]。对单轴拉伸模型进行模态分析后,得到结构一阶固有频率对应周期为 T_0 。分别选取加载时间为 $t=0.1T_0$, $1T_0$, $10T_0$ 绘制能量-位移曲线,见图5。由图5可以看出,加载时间 $t=0.1T_0$ 、 $1T_0$ 时,在加载初期动能所占比例较大;当加载时间 $t=10T_0$ 时,动能始终只占系统



总能量的很小一部分且拉伸过程平稳,符合准静态过程的仿真要求。

2.5 模型验证

对照1.4中实验试件尺寸建立对应有限元模型,使用MAT_58材料模型对铺层角 $\theta=0^\circ$, $\theta=45^\circ$ 的ECDCM静力学性能仿真,应力-应变曲线如图6所示,弯曲力-挠度曲线如图7所示,仿真结果与实验结果有良好的一致性。拉伸试验后裂纹分布如图7所示,有限元模型正确反映了试件破坏情况。最终所得材料强度列于表4,误差均在可接受范围内,模型可用于对ECDCM非线性力学性能的预测。误差产生的主要原因是ECDCM层合板在制作过程中存在树脂分布不均等缺陷,且试件在拉伸过程中存在加强片与试件黏接面的轻微滑动。此外,有限元分析使用的材料模型也是近似的结果,因此和实验结果存在误差。

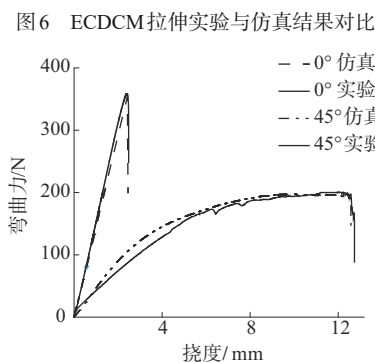
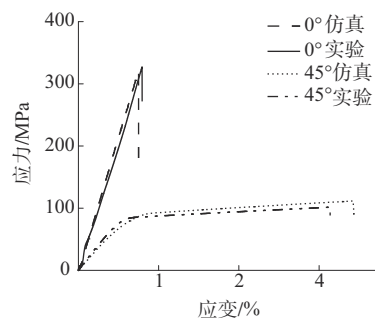


表4 材料拉伸强度和弯曲强度实验值与仿真值对比

项目	铺层角度	实验值	仿真值	误差/%
单轴拉伸强度/MPa	0°	17.90	17.50	2.22
	45°	5.579	6.14	10.05
三点弯曲强度/Pa	0°	560.13	566.48	1.13
	45°	301.74	313.08	3.76

3 结果与讨论

3.1 ECDCM非线性静力学特征产生机制分析

通过拉伸实验与有限元仿真结果可以对

ECDCM 非线性力学特征的产生原因进行分析。观察拉伸后试件裂纹分布情况,如图 8 所示,材料各方向应力云图、材料损伤云图可通过 LS-DYNA 软件获得,如图 9 所示。可以看出,0°铺层试件破坏主要发生在靠近加强片的部位,裂纹为一条与 a 方向纤维垂直的直线;45°铺层试件破坏同样发生在靠近加强片的位置,裂纹为两条相互垂直,并与拉伸方向成 45°的斜线直线。观察应力云图、材料损伤云图,可以看到,在 0°铺层时 a 方向纤维承受绝大部分应力,材料在受载荷过程中呈现与纤维相似的力学性质,纤维几乎不经历损伤过程,而是直接发生脆断,因此材料宏观力学性能呈现线弹性。45°铺层时,复合材料在破坏过程中基体受到剪切力,与纤维不同,基体在完全破坏前会产生裂纹,基体裂纹密度的增加会加速材料的损伤失效进程,使得材料的应力-应变曲线具有显著的非线性特征。

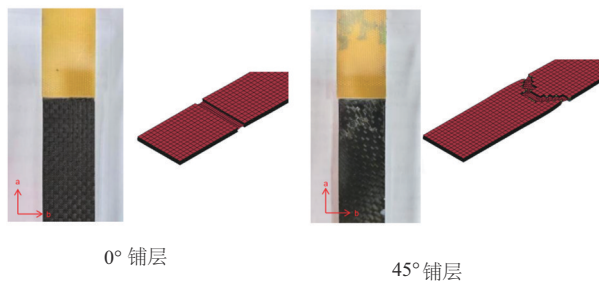


图 8 拉伸试验后裂纹分布

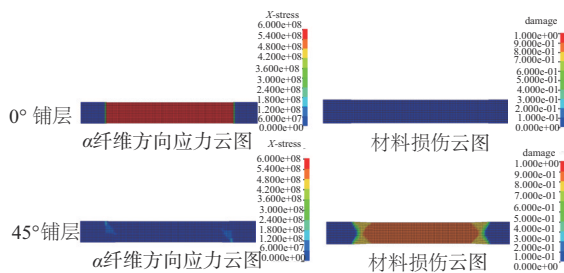


图 9 材料各方向应力云图与材料损伤云图

3.2 线性分析与非线性分析结果比较

研究 LS-DYNA 有限元软件中线弹性各向异性材料模型 MAT_2 和连续损伤材料模型 MAT_58 分析结果差异。分别使用两种材料模型进行 0°, 45° 铺层下的拉伸仿真分析,将其分析结果与实验结果进行比较,列于表 5~表 6。可以看出,在 0° 铺层时,线性材料模型和非线性材料模型都能很好地反映材料的受力变形状态;但在 45° 铺层时,随着应变增大,采用线弹性材料模型进行仿真分析的误差逐渐增大,仿真结果可信度降低,而采用 MAT_58 材料模

型仍能很好地反映材料受力变形状态。

表 5 0°铺层线性材料模型与非线性材料模型分析结果对比

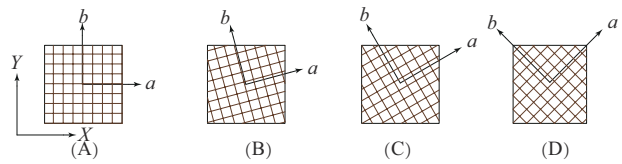
应变	实验应力值/MPa	线性分析应力值/MPa	线性分析误差/%	非线性分析应力值/MPa	非线性分析误差/%
0.002	71.4	70.4	-1.42	70.2	-1.52
0.004	134	138	2.93	136	1.43
0.006	212	221	4.22	224	5.65
0.008	271	283	4.45	285	5.11

表 6 45°铺层线性材料模型与非线性材料模型分析结果对比

应变	实验应力值/MPa	线性分析应力值/MPa	线性分析误差/%	非线性分析应力值/MPa	非线性分析误差/%
0.004	54.5	52.1	-4.43	51.8	4.95
0.008	84.9	99.4	17.1	83.6	1.64
0.012	87.4	148	69.3	92.7	6.06
0.016	95.6	194	102	98.5	3.03

3.3 铺层角度对 ECDCM 拉伸性能的影响

分别对不同铺层角度的阻尼复合材料进行单轴拉伸仿真,材料铺层示意图如图 10 所示,得到不同偏轴角度下 X 方向上的应力-应变曲线图,如图 11 所示。不难看出,在偏轴角度为 0° 时,材料的应力-



A—0°; B—15°; C—30°; D—45°

图 10 铺层角度变化示意图

应变曲线为一条斜直线,拉伸响应表现为线性,材料可以看作线性材料,随着纤维偏转角度出现,材料出现非线性力学特性。这是因为,偏轴拉伸状态下材料 a - b 方向存在更为严重的剪切损伤。在 A-B 段,随着材料 a - b 方向剪切应力逐渐增大,材料发生面内剪切损伤,此时材料宏观力学性能呈现非线性变化;B-C 段,材料 a - b 剪切方向损伤达到饱和,材料宏观力学性能重新变为主要受纤维方向性能变化影响,材料非线性特性减弱,再次呈现出线性特性。

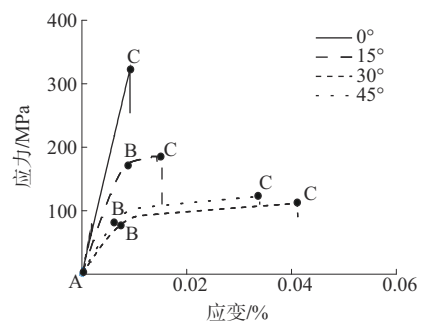


图 11 不同铺层角度下 ECDCM 应力-应变曲线

还可以看到,随着偏轴角度的增大, X 方向拉伸弹性模量逐渐下降,拉伸强度不断下降。这是因为,随着偏轴角度的增大,基体承担拉力比例增加,纤维承担拉力比例减少,材料整体弹性模量降低。

3.4 铺层角度对ECDCM弯曲性能的影响

研究铺层角度对材料弯曲性能的影响,分别对铺层角度为 0° , 15° , 30° , 45° 的阻尼复合材料进行三点弯曲仿真,得到其弯曲力-挠度曲线,如图12所示。由图可以看出, 0° 铺层时,材料弯曲弹性模量最大,弯曲强度最大,材料弯曲力-挠度呈线性关系。随着铺层角度增大,材料弯曲弹性模量和弯曲强度均呈现下降趋势,弯曲力-挠度在O-A段基本呈线性关系,在A-B段呈非线性关系,且材料弯曲弹性模量出现软化趋势。这是因为,在O-A段为初始弯曲阶段,材料面内剪切方向还没有出现损伤,因此材料宏观力学性能呈线性关系;A-B阶段,随着切应力的增大, a - b 剪切方向开始出现损伤,剪切模量逐渐降低,造成材料宏观弯曲性能呈现非线性;在B点处,材料纤维发生断裂,弯曲力发生短时大幅下降。

积分计算曲线下面积可以求得试件吸收能量值,随铺层角增大依次为0.39, 1.23, 1.40, 1.87 J,可以看出,随铺层角增大,虽然材料弯曲强度下降,但吸能效果变好,即韧性增大,因此较大铺层角度的ECDCM更适用于隔振或受冲击等工况下。

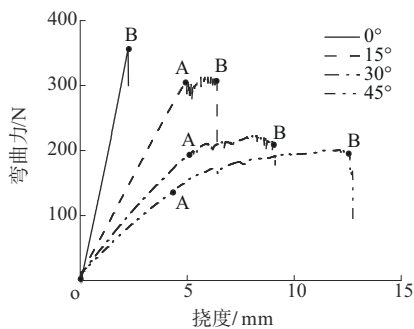


图12 不同铺层角度下ECDCM弯曲力-挠度曲线

3.5 阻尼层厚度对ECDCM弯曲性能的影响

控制ECDCM上、下蒙皮厚度为1 mm不变,分别取阻尼层厚度为0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 mm,研究阻尼层厚度对ECDCM弯曲弹性模量的影响,结果如图13所示。可以看出,对比无阻尼材料,ECDCM的弯曲弹性模量明显降低,这是因为阻尼层的插入使得整个材料形成了上下两个独立的复合材料结构,应力的重新分布导致整个材料结构在相同的载荷条件下产生相对较大的挠度,从而导致整个复合材

料结构的弯曲弹性模量的降低,并且随着阻尼层厚度增加,弯曲弹性模量呈现进一步减小趋势。

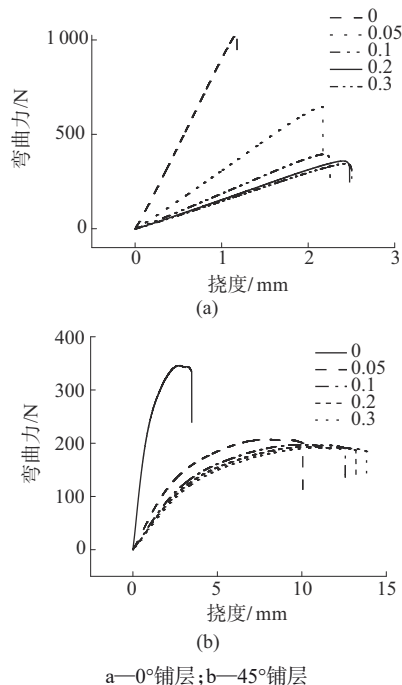


图13 不同阻尼厚度下ECDCM弯曲力-挠度曲线

4 结论

基于复合材料连续损伤模型,利用LS-DYNA有限元分析软件建立了嵌入式共固化阻尼复合材料(ECDCM)非线性静力学分析模型;进行了拉伸实验和三点弯曲实验,将实验结果与有限元仿真结果进行对比,验证了模型的适用性;利用该模型,分析了ECDCM非线性特征产生机制,比较了线性分析与非线性分析的结果差异,研究了ECDCM铺层角度对其拉伸性能和弯曲性能的影响;研究了阻尼层厚度对ECDCM弯曲性能的影响。

(1)在 0° 铺层时,ECDCM材料非线性特征不明显,可以使用线弹性材料模型进行分析;在铺层角度增大后,材料非线性效应愈发明显,不能再使用线弹性材料模型分析ECDCM的静力学性能,使用本仿真方法更为有效;

(2)在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,ECDCM拉伸弹性模量和拉伸强度均随铺层角度的增加而减小;

(3)在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,随铺层角增大,材料弯曲弹性模量与弯曲强度均下降,材料韧性增强。较大铺层角度的ECDCM适用于隔振或受冲击等工况;

(4)相比于无阻尼复合材料,ECDCM弯曲弹性模量下降明显,并随着阻尼层厚度增加而进一步下降。

参考文献

- [1] Wang Shaoqing, Liang Sen, Zhai Yanchun. Bending properties of embedded co-cured damping composite structure simply supported on four edges[J]. *Composite Structures*, 2020, 233. DOI: 10.1016/j.compositestructures.2019.111573.
- [2] Yuan Lihua, Liang Sen. Dynamic properties of composite panel sandwiched by a perforated fiber reinforced damping film[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(2):753–767.
- [3] Yuan Lihua, Liang Sen, Yan Shengyu. In-plane elastic properties of stitched plain weave composite laminate[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2023, 28:220–232.
- [4] 李雪. 嵌入式共固化阻尼复合材料结构力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
Li Xue. Study on the structural mechanical properties of embedded co-cured damped composites[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015.
- [5] 米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构动力学性能的数值模拟与实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
Mi peng. Numerical simulation and experimental study of the damping structure dynamics properties of embedded co-cured composites[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2011.
- [6] 付小静. 特定环境下嵌入式共固化阻尼复合材料力学特性[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
Fu Xiaojing. Mechanical properties of embedded co-curing damping composite under specific environment[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.
- [7] 梁森, 李雪, 王东山, 等. 多层阻尼薄膜嵌入的共固化复合材料结构动力学性能[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5):1 453–1 460.
Liang Sen, Li Xue, Wang Dongshan, et al. Structural dynamics properties of co-cured composites embedded in multilayer damped films[J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 32(5):1 453–1 460.
- [8] 闫盛宇, 梁森, 郑长升, 等. 嵌入式共固化缝合阻尼复合材料的力学性能[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(11):96–100.
Yan Shengyu, Liang Sen, Zheng Changsheng, et al. Mechanical properties of the embedded co-cured suture damping composite[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53 (11):96–100.
- [9] Matzenmiller A, Lubliner J, Taylor R L. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites[J]. *Mechanics of Materials*, 1995, 20(2):125–152.
- [10] 奚蔚, 郑晓玲, 汤家力, 等. 模量退化准则对复合材料强度分析的影响研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2021, 50(10):74–77.
Xi Wei, Zheng Xiaoling, Tang Jiali, et al. Study on the influence of stiffness degradation criterion on strength analysis of composites[J]. *Mechanical Design and Manufacturing Engineering*, 2021, 50(10):74–77.
- [11] 孟宪明, 钟正, 程从前, 等. 基于LS-DYNA软件2种材料模型的碳纤维复合材料层合板面内剪切有限元仿真[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(12):85–90.
Meng Xianming, Zhong Zheng, Cheng Congqian, et al. SFE simulation of laminated sheet of carbon fiber composite based on two material models of LS-DYNA software[J]. *Mechanical Engineering Materials*, 2020, 44 (12):85–90.
- [12] 杨冬阳. 编织纤维增强复合材料在复杂应力状态下的力学行为表征[D]. 北京: 清华大学, 2017.
Yang Dongyang. Characterization of the mechanical behavior of woven fiber-reinforced composites under complex stress states [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [13] 郑长升, 梁森, 陈静等. 低温共固化高阻尼复合材料[J]. *航空学报*, 2019, 40(8):260–267.
Zheng Changsheng, Liang Sen, Chen Jing, et al. Low temperature co curing high damping composite material[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(8):260–267.
- [14] 周越松, 梁森, 王得盼, 等. 陶瓷/UHMWPE层合板/阻尼材料复合靶板防弹性能研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(4):66–74.
Zhou Yuesong, Liang Sen, Wang Depan, et al. Study on bullet-proof performance of ceramic/UHMWPE laminated/damped composite target plates[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2021(4):66–74.
- [15] 郑长升, 梁森. 中温共固化阻尼复合材料制备及层间结合性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(6):63–69.
Zheng Changsheng, Liang Sen. Preparation and interlayer binding properties of medium-temperature cocuring damping composite [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2020, 36(6): 63–69.
- [16] 王青春, 范子杰. 利用LS-DYNA计算结构准静态压溃的改进方法[J]. *力学与实践*, 2003(3):20–23.
Wang Qingchun, Fan Zijie. An proved method to calculate structural quasi-static collapse using LS-DYNA [J]. *Mechanics and Practice*, 2003(3):20–23.