

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.012

PET 泡沫芯材表面多级网络开槽结构设计及优化

李金林¹, 曹敏华², 陈小伟¹, 林高建¹

(1.北京理工大学,北京 100080; 2.安徽东远新材料有限公司,安徽黄山 245000)

摘要: 聚对苯二甲酸乙二酯(PET)泡沫芯材广泛应用于制造三明治夹芯结构。针对风力发电机叶片领域PET泡沫芯材力学性能不足,导致其无法替代进口轻木芯材的现象,提出基于两种次级槽(十字交叉槽和对角线斜交叉槽)的主次槽多级网络开槽结构的优化设计方法。使用Abaqus软件建立包含主槽形态特征的PET泡沫芯材三维有限元模型,通过剪切加载模拟分析,结合实验数据验证了仿真模型的可靠性(相对误差为0.47%)。在确保总注胶量恒定的约束条件下,以芯材的剪切模量为优化目标,采用多岛遗传算法对十字交叉槽与对角线斜交叉槽结构的几何参数进行优化,重点考察槽宽(0.9~2 mm)和槽深(12.357~23.5 mm)对芯材力学性能的影响规律。结果表明,采用十字交叉槽,槽宽为1 mm、主次槽深度均为23.5 mm的结构剪切性能最优,其剪切模量达到了137.14 MPa,相比原始设计提升了9.2%。进一步对优化后的结构进行压缩和拉伸测试,模拟结果显示比压缩模量提升了10.2%,比拉伸弹性模量提升了10.3%。上述结果表明,通过多级网络开槽结构优化设计的PET泡沫芯材承载能力得到显著提升,为该类芯材在航空航天、能源和军事领域的更广泛应用提供了支持。

关键词: 聚对苯二甲酸乙二酯泡沫芯材;表面开槽;优化设计;多岛遗传算法;剪切模量

中图分类号: TB33, V214.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0087-09

Design and optimization of surface hierarchical network grooving structures of PET foam core materials

LI Jinlin¹, CAO Minhua², CHEN Xiaowei¹, LIN Gaojian¹

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100080, China; 2. Anhui Poly core Advanced Materials Co., Ltd., Huangshan 245000, China)

Abstract: Polyethylene terephthalate (PET) foam core materials are widely applied in the manufacture of sandwich structures. Addressing the mechanical properties limitations that hinder PET foam core materials from fully replacing imported balsa wood in wind turbine blade applications, an optimized design methodology of the hierarchical network grooving structure with primary groove and secondary groove was proposed based on two secondary grooves incorporating the cross-groove and the diagonal cross-groove configurations. A three-dimensional finite element model of the PET core material, incorporating the morphological characteristics of primary grooves, was developed by using Abaqus software. Through shear loading simulation analysis, the reliability of the simulation model was validated against experimental data, yielding relative error of 0.47%. Under the constraint of constant total resin injection volume, the multi-island genetic algorithm was employed to optimize the geometric parameters of the cross-groove and diagonal cross-groove structures, with the shear modulus of the core material as the optimization objective. The influences of groove width (ranging from 0.9 mm to 2 mm) and groove depth (ranging from 12.357 mm to 23.5 mm) on mechanical properties were systematically investigated. The results demonstrate that by using the cross-groove design with the groove width of 1 mm and the groove depth of 23.5 mm for both primary and secondary grooves, the structure has the best shear performance and its shear modulus reaches 137.14 MPa, which is 9.2% higher than that of the original design. Furthermore, compression and tensile simulation testing of the optimized structure reveals increases in specific compression modulus by 10.2% and specific tensile modulus by 10.3%. The above results indicate that the optimization design of hierarchical network grooving structure highlights the significant enhancement in the load-bearing capacity of the PET foam core material, providing support for broader applications of the core material in aerospace, energy, and military fields.

Keywords: polyethylene terephthalate foam core material; surface grooving; optimization design; multi-island genetic algorithm; shear modulus

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4202902)

通信作者: 林高建, 博士, 研究方向为结构优化

收稿日期: 2025-03-27

引用格式: 李金林, 曹敏华, 陈小伟, 等. PET 泡沫芯材表面多级网络开槽结构设计及优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 87-95.

LI Jinlin, CAO Minhua, CHEN Xiaowei, et al. Design and optimization of surface hierarchical network grooving structures of PET foam core materials[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 87-95.

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)泡沫因具有优异的力学性能,常用于三明治夹芯结构的芯材,在风电叶片、航空航天、军事、船舶、汽车以及轨道交通等领域广泛应用^[1]。例如在风力发电机叶片中,风电叶片的结构属于三明治夹芯结构,使用密度较小的PET泡沫作为抗剪切填充芯材^[2-5],能够有效减重^[6],而三明治夹芯结构表面的玻璃纤维复合材料板主要承受弯曲应力,两者结合显著增强了叶片的整体刚性和抗剪切性能。

通常采用真空灌注工艺生产具有三明治夹芯结构的叶片,芯材与面板结合主要依赖于环氧树脂等黏合剂。为了增强界面的结合性能,工程中常对芯材表面进行开槽、打孔等预处理措施。由于黏合剂的弹性模量远高于芯材,在开槽、打孔过程中黏合剂的渗透会对结构性能产生显著影响。灌注以环氧树脂为代表的黏合剂,能够对芯材进行强化,提升其力学性能,但是考虑到黏合剂的密度远大于芯材,过量使用黏合剂不利于结构的轻量化。因此,针对PET泡沫芯材表面开槽结构进行设计和优化,研究开槽的设计方法、优化策略及其对芯材性能的影响,这对提高PET泡沫芯材力学性能和降低成本具有重要的实际意义^[7-9]。

芯材表面预处理的方法多样^[10-15],目前普遍采用的处理方式方式为表面开槽和打孔。开槽方式包括单向开槽、双向开槽、斜开槽等,其中单、双向开槽和垂直打孔的方式因加工方便在业界得到大量应用。肖雪瑞等^[16-17]在不考虑芯材自身质量的前提下,研究了芯材表面切缝深度、间距、宽度和切缝组合对夹芯板整体力学性能的影响,发现切缝深度较芯材厚度小2 mm最佳,切缝宽度对夹芯板的刚度影响较小,较小的切缝间距可显著提高夹芯板的刚度。Mostafa等^[18]通过仿真研究了5种开槽间距对三明治结构剪切性能的影响,得到一种45 mm的最佳开槽间距。王顺吉等^[19]通过实验研究了正交开槽和斜开槽这两种开槽方式对芯材力学性能以及吸胶量的影响。王锴等^[20]采用熵权法-优劣解距离法分析了16种开槽工况对夹芯结构的强度、峰值载荷以及比吸能的影响,确定了一种最优开槽方案。吉祥等^[21]通过实验和数值模拟的方式研究了槽宽、孔径及槽间距对芯材力学性能的影响。可见,目前对PET泡沫芯材表面开槽工艺的研究大多局限于有限的设计方案内,仅得出局部最优解,而未全面探索开

槽参数在全局范围内的最优加工方式和加工参数。

当前,轻木材料因其优异的力学性能和轻质特点,广泛应用于风电叶片的制造中。轻木材料的剪切模量通常大于150 MPa^[22],这使其在结构轻量化设计中具有明显优势。但是轻木材料依赖进口,成本较高。当前增强型PET泡沫芯材的剪切模量与轻木材料相比仍存在一定的差距。

笔者通过有限元仿真结合优化算法^[23],构建了PET泡沫芯材参数化模型,对其在多级网络开槽下的力学性能进行优化分析。将芯材的开槽宽度和深度作为设计变量,以芯材的剪切模量作为优化目标,在保持芯材总质量不变的前提下,确定了最优的开槽加工参数,获得最优开槽结构。对最优结构进行拉压测试,将最优结构芯材与原始芯材的剪切、拉压性能进行对比分析,以验证多级网络开槽结构优化方法的可行性。

1 增强型PET泡沫芯材数值计算模型

使用Abaqus软件建立现有槽孔结构的增强型PET泡沫芯材有限元模型。现有增强型PET泡沫芯材的开槽间距为30 mm,开槽深度为23.5 mm,开槽宽度为2 mm;打孔间距为30 mm,开孔半径 R 为1 mm,垂直贯通开孔。根据ISO 1922:2018,建立总体尺寸为250 mm×50 mm×25 mm的剪切试样模型,如图1所示。

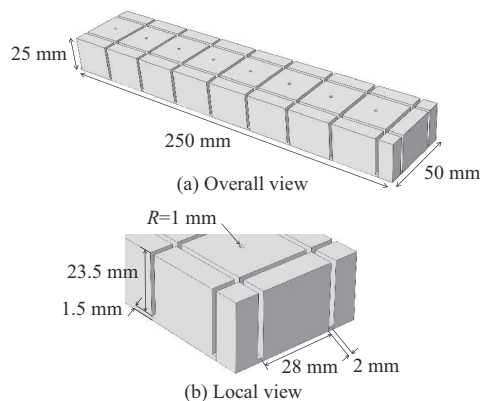


图1 增强型PET泡沫芯材有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic of finite element model of reinforced PET foam core material

在本研究中,所使用的模型材料本构参数列于表1。模型整体采用六面体网格,单元总数为71 168。模型的上表面沿长度方向施加了恒定的位移载荷,速率为1 mm/min。同时,为了便于后续结果的提取和处理,模型下表面与参考点耦合,施加必要的约束固定。

表1 模型材料本构参数

Tab. 1 Parameters of material ontological modeling

Materials	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	Poisson's ratio
PET foam	150	159	0.325
Epoxy resin	1 200	4 000	0.310

Notes: ρ is density; E is Young modulus.

依据 ISO 1922:2018 的要求,对现有的增强型 PET 泡沫芯材进行了剪切加载模拟分析,结果如图 2 所示。图 2 显示,当横向剪切位移达到 1 mm 时,参考点处的剪切支反力为 7 234.2 N,剪切应力为 0.50 MPa。计算所得芯材剪切模量为 125.59 MPa,与供应商提供的实验数据 125 MPa 的相对误差为 0.47%,表明有限元模型结果与实测数据高度吻合,表明所建立的有限元模型具有一定的可靠性。

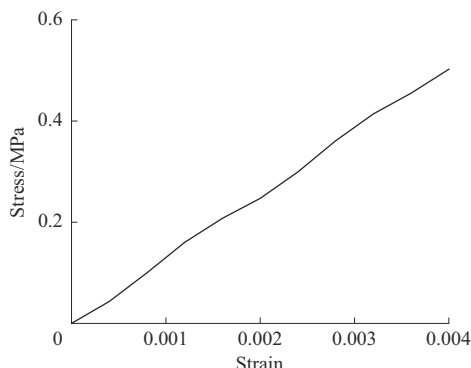


图2 原始芯材剪切应力-应变曲线

Fig. 2 Shear stress-strain curves of original core material

2 增强型 PET 泡沫芯材多级网络开槽设计

2.1 多级网络开槽方案设计

在原有开槽结构的基础上,本研究引入了多级网络开槽设计理念,旨在对原有结构进行精细化改良,以进一步提升 PET 泡沫芯材的力学性能和优化结构的使用效果。具体而言,保持原有的打孔结构不变,在原有开槽的内部增设一级网络开槽,并将前者定义为主槽,新增的开槽则作为次级槽。

次级槽的设计有两种形式:十字交叉排列和对角线斜交叉排列。在建模过程中,针对多级网络开槽芯材进行了详细的几何建模,模型如图 3 所示。主槽深度为 h_1 ,宽度为 w_1 ;而次级槽深度为 h_2 ,宽度为 w_2 。通过这种二级开槽结构的设计,期望能够在保证材料强度的同时,最大化地提升芯材的剪切模量与抗压能力。

为了确保优化设计过程中总注胶量不变,避免增加整体结构的质量,本研究提出了两种结构优化设计方案,分别针对槽宽和槽深进行优化。通过合理的设计与优化,力求在不增加整体材料使用量的

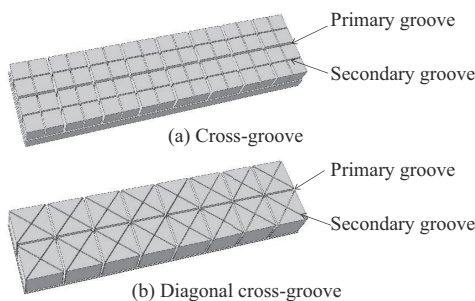


图3 多级开槽芯材有限元模型

Fig. 3 Finite element model of hierarchical grooved core material

情况下,提升 PET 泡沫芯材的整体性能。

方案一是变槽宽优化方案。在该方案中,通过优化多级槽的槽宽来提升结构的力学性能。具体操作为通过减小主槽宽度,将节省下来的树脂量用于增加次级槽的尺寸。

方案二是变槽深优化方案。在该方案中,通过减小主槽的深度,节省出部分树脂,用于增加次级槽的深度。具体操作为将次级槽宽度设置为特定值,次级槽的深度将随着主槽深度的减小而增加。

在实际应用中,还需要考虑生产工艺条件和生产成本的影响。由于生产中存在加工刀具的限制,本研究设定了最小开槽宽度为 0.9 mm。通过对不同参数组合的模拟分析和验证,最终确定最优的开槽设计方案,以此提升增强型 PET 泡沫芯材的力学性能,尤其是在剪切和拉伸性能方面。

本研究将在这两种方案的基础上,对 PET 泡沫芯材结构进行剪切模拟优化,并通过数值计算和仿真分析对比不同优化结果,最终得出最优开槽结构设计。通过模拟优化,能够直观地评估不同设计方案下 PET 泡沫芯材的力学性能,从而为实际应用提供理论依据。

2.2 测试标准及参数

仿真计算所依照的测试标准及关键参数见表 2。

表2 测试标准及关键参数

Tab. 2 Test Standards and key parameters

Items	Compression test	Tensile test	Shear test
Test standard	ISO 844: 2021	ASTM C297/ C297M-16	ISO 1922: 2018
Sample size/mm	100×100×50	100×100×50	250×50×25
Loading rate/(mm·min ⁻¹)	1	1	1

2.3 增强型 PET 泡沫芯材网络开槽优化方法

2.3.1 优化约束条件

将芯材模型的剪切模量作为优化目标,针对多级槽的槽宽和槽深进行参数化优化。具体而言,分

别将槽宽和槽深作为优化设计参数,并在Abaqus软件中进行参数化建模,以便通过仿真分析获取不同设计方案下的力学性能数据。

(1)变槽宽优化。

取30 mm×30 mm开槽单元的1/4单胞模型,如图4所示,在原始开槽条件下($w_1=2$ mm, $w_2=0$ mm, $h_1=23.5$ mm, $h_2=0$ mm),其原始注胶量即原始开槽体积 $V_0=(15+14) \times 1 \times 23.5=681.5$ mm³。

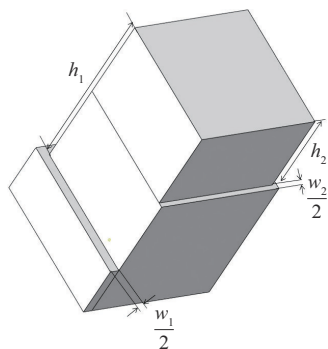


图4 单胞模型图

Fig. 4 Diagram of single-cell model

对于十字交叉槽,设定主槽深度 $h_1=23.5$ mm,设定两级槽宽度 $w_1=w_2=w$,次级槽深度 h_2 随宽度 w 进行关联变化,以此对两级槽宽度进行优化,在此方案下的开槽体积 V_1 计算公式见式(1)。

$$V_1 = 23.5 \frac{w}{2} (30 - \frac{w}{2}) + \frac{w}{2} h_2 (30 - \frac{3w}{2}) \quad (1)$$

保持注胶量不变,令 $V_1=V_0$,计算得到开槽深度 h_2 和宽度 w 之间的关系式,见式(2)。

$$h_2 = \frac{2726 - 23.5w(60 - w)}{w(60 - 3w)} \quad (2)$$

又有 $0 \leq h_2 \leq 23.5$,结合式(2)可得 $1 \leq w \leq 2$ 。

因此,开槽宽度的可行域为1~2 mm,在此范围内进行宽度参数的优化,得到最优开槽宽度。

对于对角线斜交叉槽,设定主槽深度 $h_1=23.5$ mm,次级槽宽度 $w_2=1$ mm,次级槽深度 h_2 随主槽宽度 w_1 进行关联变化,在此方案下开槽体积 V_3 计算公式见式(3)。

$$V_3 = 23.5 \frac{w_1}{2} (30 - \frac{w_1}{2}) + h_2 (15\sqrt{2} - \sqrt{2} \frac{w_1}{2} - \frac{1}{2}) \quad (3)$$

保持注胶量不变,令 $V_3=V_0$,计算得到次级槽深度 h_2 和主槽宽度 w_1 之间的关系式,见式(4)。

$$h_2 = \frac{2726 - 23.5w_1(60 - w_1)}{60\sqrt{2} - 2\sqrt{2}w_1 - 2} \quad (4)$$

又有 $0 \leq h_2 \leq 23.5$,考虑到加工刀具的精度限制,故得 $0.9 \leq w_1 \leq 2$ 。

因此,主槽宽度的可行域为0.9~2 mm,在此范围内进行主槽宽度的优化,得到最优主槽宽度。

(2)变槽深优化。

设定主槽宽度 $w_1=2$ mm,次级槽宽度 $w_2=1$ mm,两级槽宽保持不变,进行两级槽深度的优化。初始设定主槽深度 $h_1=23.5$ mm,次级槽深度 $h_2=0$ mm,逐步增加次级槽深度,并降低主槽深度,以此保证注胶量不变。

当 $w_1=2$ mm, $w_2=1$ mm时,开槽体积 V_2 计算公式见式(5)。

$$V_2 = 13.75h_2 + 29h_1 \quad (5)$$

令 $V_2=V_0$,则得到两级槽深之间的关系式,见式(6)。

$$h_2 = (681.5 - 29h_1)/13.75 \quad (6)$$

又有 $0 \leq h_1 \leq 23.5$, $0 \leq h_2 \leq 23.5$,结合式(6)可得 $12.357 \leq h_1 \leq 23.5$, $0 \leq h_2 \leq 23.5$ 。

因此,主槽深度的可行域为12.357~23.5 mm,在此范围内进行主槽深度的优化,得到最优主槽深度。

2.3.2 优化算法

采用多岛遗传算法(MIGA)进行优化^[24],算法流程图如图5所示。相较于传统的优化算法,遗传算法(GA)基于生物进化原理,具有全局搜索能力强、鲁棒性高、适用于非线性问题的特点。而多岛遗传算法在传统遗传算法的基础上,进一步引入了“岛

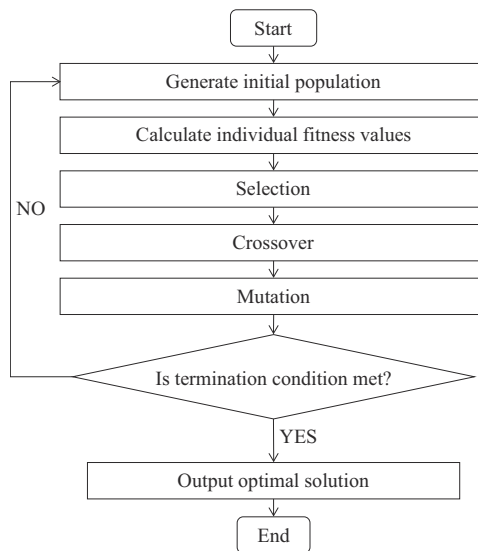


图5 多岛遗传算法优化流程

Fig. 5 Optimization process of multi-island genetic algorithm

岛”概念,通过将种群划分为多个子群(岛屿),并在岛屿间定期迁移个体,有效避免了算法过早收敛于局部最优解的问题,显著提升了全局搜索能力^[25]。优化过程使用的参数见表3,其中,多岛遗传算法设置5个岛屿,每个岛屿独立运行遗传算法,岛屿间的个体迁移增加了种群的多样性。每隔5代,岛屿间进行一次个体迁移。每个岛屿的子群规模为10个个体。采用高交叉率以确保种群中优秀个体的基因能够充分传递。变异率设置为0.01,较低的变异率保证了算法的稳定性,同时避免种群过早收敛。经过10代的迭代,算法能够收敛到一个较优的解。

表3 多岛遗传算法参数

Tab. 3 Parameters of multi-island genetic algorithm

Keys	Values
Interval of migration	5
Number of generations	10
Number of islands	5
Penalty base	0.0
Penalty exponent	2
Penalty multiplier	1 000.0
Random seed value	-1
Rate of crossover	1.0
Rate of migration	0.01
Rate of mutation	0.01
Rel tournament size	0.5
Sub-population size	10

图6展示了多岛遗传算法在剪切模量优化中的收敛过程。可以看到,在大约500次迭代后,剪切模量迅速达到全局最优解,算法表现出极高的效率和优化能力。随着迭代的进行,剪切模量逐步提升,且在收敛时迅速趋向最大值,表明该算法能够在相对较少的迭代次数内找到最优解。此结果展示了多岛遗传算法在复杂优化问题中的强大优势,表明该算法能快速获得全局最优解。

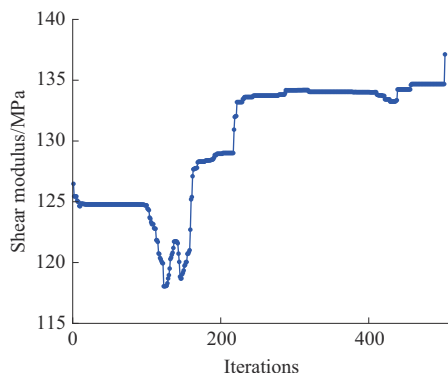


图6 多岛遗传算法收敛过程(十字交叉槽宽优化)

Fig. 6 Convergence process of multi-island genetic algorithm (cross-groove width optimization)

3 优化结果

3.1 变槽宽优化结果

图7为十字交叉槽和对角线斜交叉槽的变槽宽优化结果。对于十字交叉槽,优化结果表明(图7a),当开槽宽度为1 mm且主次槽深度相同[根据式(2),槽宽为1 mm时,次级槽深度也为23.5 mm]时,芯材的剪切性能最优,其剪切模量达到137.14 MPa,相较于原始2 mm开槽芯材,性能提升了约9.2%。

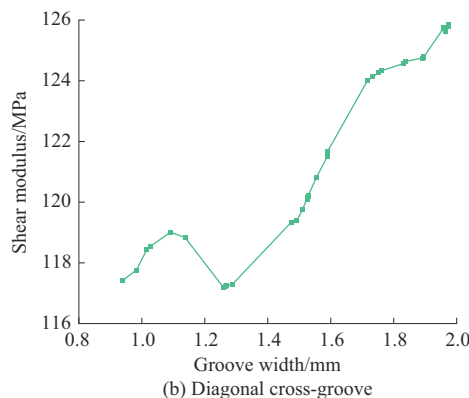
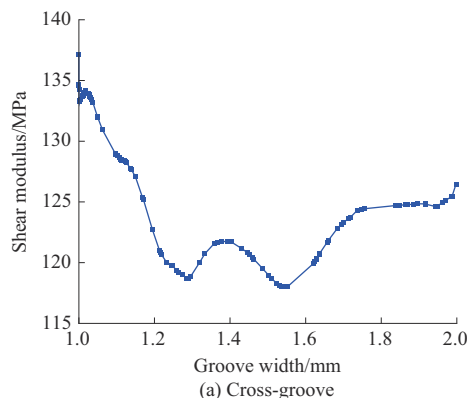


图7 变槽宽优化结果

Fig. 7 Variable groove width optimization results

对于对角线斜交叉槽,优化结果表明(图7b),其优化过程中的所有计算结果均不如初始十字交叉槽的最优结果,因此采用十字交叉槽的方案更有利于提升芯材剪切模量。

3.2 变槽深优化结果

变槽深优化结果如图8所示。由图8可以观察到,剪切模量随着槽深的变化呈现出明显的非线性趋势,即芯材的剪切模量随着主槽深度的增加,呈现出先减小后增大的趋势,在 h_1 约为16 mm附近时,剪切模量达到最小值100 MPa。而随着槽深的进一步增大,剪切模量表现出上升趋势,一直到23.5 mm的初始深度才接近初始剪切模量125 MPa。因此当减小主槽深度时,芯材的剪切模量整体均不

如初始结构,说明在槽宽不变的情况下,减小主槽深度的方式并不能用于提升芯材的剪切模量。

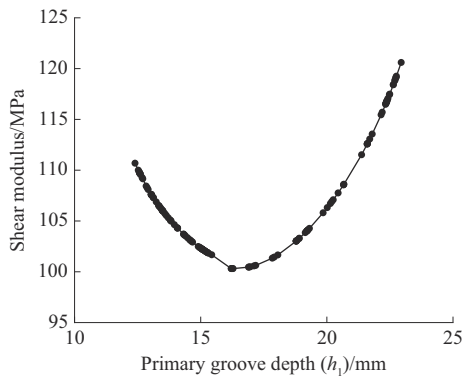


图8 变槽深优化结果

Fig. 8 Variable groove depth optimization results

3.3 优化结果对比

根据模拟结果,采用十字交叉槽,槽宽为1 mm、主次槽深度均为23.5 mm的结构剪切性能最优。优化前和优化后的剪切应力-应变曲线对比如图9所示,可以看出,优化后的结构在整个加载过程中表现出更高的剪切承载能力。提取原始结构、槽宽为1.6 mm的中间结构以及最优结构的应力分布云图,如图10所示。从云图中可以看出,由于向芯材灌注的树脂弹性模量远高于PET泡沫,3种开槽方式的剪切应力最大值集中在树脂部分。三者对应的树脂总体积相同,差异主要体现在树脂在槽中的分布不同,即槽宽和槽深不同。随着次级槽宽度的减小即次级槽深度的增加,次级槽的承载能力也逐渐提高。

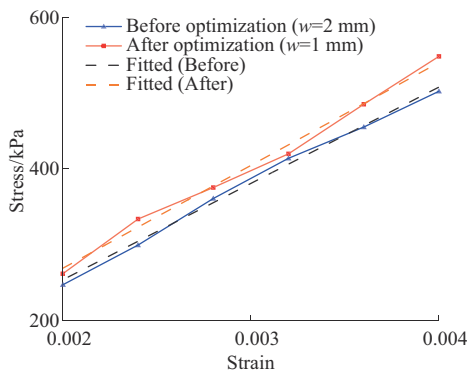


图9 优化前后剪切应力-应变曲线对比

Fig. 9 Comparison of shear stress-strain curves before and after optimization

开槽的深度是剪切应力分布的主要影响因素之一。由于主槽的深度始终为23.5 mm,因此最大剪切应力主要集中在深度较大的主槽部分。尽管原始2 mm开槽模型的槽宽大于1 mm开槽模型,

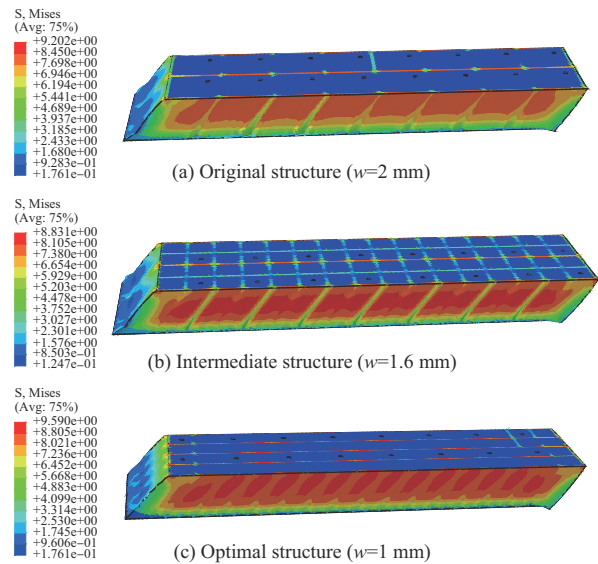


图10 不同槽宽芯材的剪切加载Mises应力云图

Fig. 10 Mises stress contour for shear loading of core material with different groove widths

1 mm开槽模型由于拥有更多的深槽来承担剪切载荷,因此其最大应力高于原始2 mm开槽模型。这表明,多个较窄的槽在灌注树脂后能够更有效地分布剪切载荷,并强化更大面积的PET泡沫,从而提升结构总体剪切性能,优于单个更宽的槽结构。通过对比初始结构和最优结构,次级槽的加入显著提高了树脂的利用效率,进而提升了整体的力学性能。

通过引入剪切滞后模型(Shear-Lag Model),可以定量分析多级开槽对树脂与PET界面应力传递效率的提升。根据Jones等^[26]的研究,界面剪切应力($\tau_{\text{interface}}$)与树脂弹性模量(E_{resin})、芯材弹性模量(E_{core})及槽几何参数的关系可表述为式(7)。

$$\tau_{\text{interface}} = \frac{E_{\text{resin}} \cdot E_{\text{core}}}{E_{\text{resin}} + E_{\text{core}}} \cdot \frac{w}{h} \cdot \varepsilon_{\text{applied}} \quad (7)$$

式中: w 为槽宽; h 为槽深; $\varepsilon_{\text{applied}}$ 为外加载荷应变。

优化后槽宽 w 从2 mm减小至1 mm,在总注胶量不变条件下,次级槽的引入使截面(Z方向)有效界面接触面积增加1倍(图11),从而显著提升 $\tau_{\text{interface}}$ 。根据复合材料力学理论,树脂作为高模量材料,其分布对芯材的应力分散和承载能力具有决定性影响。优化后的多级开槽设计通过增加树脂的分布路径,显著改善了应力传递效率。具体而言,次级槽的引入使得树脂在芯材中的分布更加均匀,减少了局部应力集中现象,从而增加了整体的承载能力。通过图10所示的有限元模拟的Mises应力云图可以看出,优化后的结构在剪切加载下,应力分布

更加均匀,最大应力值增加了约4.2%,验证了理论模型的预测。

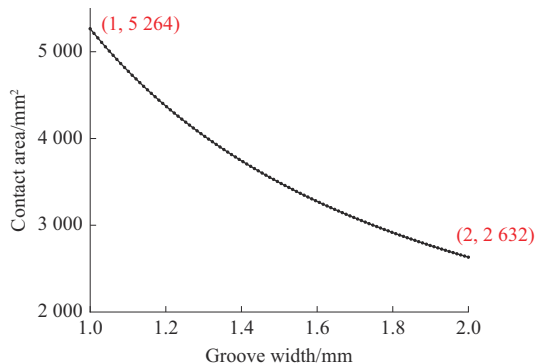


图 11 槽宽对环氧树脂-PET 泡沫接触面积的影响(Z方向)

Fig. 11 Effect of groove width on epoxy-PET foam contact area (Z-direction)

4 最优结构拉压性能

为了进一步验证优化设计对芯材力学性能的影响,对优化前后的芯材模型进行了拉压模拟试验,通过计算优化前后芯材的拉压比模量,比较了两者在拉压性能方面的差异。

比模量反映了材料在单位质量下的力学性能。在航空航天、风能、汽车等需要轻量化和高刚度的工程领域,材料的比模量是选择材料的关键参数之一。它不仅能够反映芯材的刚度和抗变形能力,还与轻量化、疲劳性能及结构稳定性密切相关。

通过模拟得到的在拉伸/压缩加载下的支反力 F 、初始高度 L 、加载位移 ΔL 和加载面积 A ,可以计算模量 E ,其表达式见式(8)。

$$E = \frac{F \cdot L}{\Delta L \cdot A} \quad (8)$$

样品密度 ρ 根据芯材质量和体积计算得到,则拉伸和比压缩模量由 E 与 ρ 的比值得到。

根据 ISO 844:2021 规定,在压缩模拟测试中采用推荐的样品尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,样品质量为 0.205 kg ,测试速度设定为 1 mm/min ,加载位移为 0.1 mm ,模拟结果如图 12 所示。在压缩模拟测试中,原始 2 mm 开槽模型压缩支反力为 $10\,380 \text{ N}$,计算得到原始结构的比压缩模量为 $0.127 \text{ MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$ 。与此相比,在开槽宽度减小至 1 mm 且主次槽深度均为 23.5 mm 的最优化模型中,比压缩模量达到了 $0.140 \text{ MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$,较优化前提升了约 10.2% 。

对优化前后的芯材模型进行拉伸模拟试验,并比较了两者在拉伸性能方面的差异。根据 ASTM

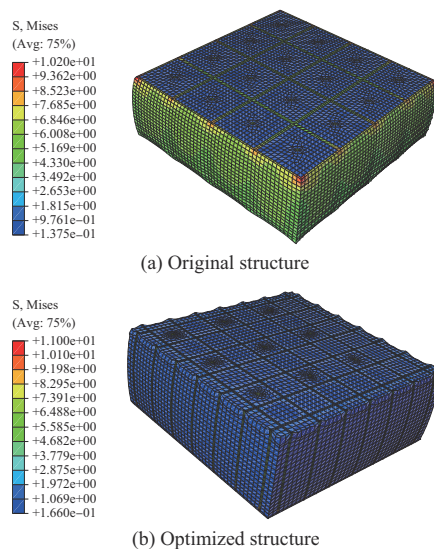


图 12 压缩加载 Mises 应力云图

Fig. 12 Mises stress contour for compression loading

C297/C297M-16 规定,拉伸模拟测试采用推荐的样品尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,样品质量为 0.205 kg ,测试加载速度设定为 1 mm/min ,加载位移为 0.1 mm 。拉伸性能测试模拟结果显示,原始 2 mm 开槽模型的拉伸支反力为 $10\,310 \text{ N}$,计算得到比拉伸弹性模量为 $0.126 \text{ MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$ 。在开槽宽度减小至 1 mm 且主次槽深度均为 23.5 mm 的最优模型中,比拉伸弹性模量达到了 $0.139 \text{ MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$,较优化前提升了约 10.3% 。

压缩和拉伸模拟测试结果表明,通过优化槽宽和槽深,材料的压缩和拉伸性能得到了显著提升。这主要归因于最优结构中树脂更加合理的分布和次级槽的加入,提升了整体结构的力学性能,增强了材料在受压和受拉情况下的承载能力。通过对比优化前后的压缩及拉伸性能,可以得出结论:精细化的槽宽设计不仅提高了 PET 泡沫芯材的剪切性能,还增强了其在压缩和拉伸荷载下的承载能力,从而实现了多维度的力学性能提升。

表 4 列出最优结构和原始结构的剪切、拉伸、压缩性能。由表 4 可见,优化结构后的 PET 泡沫芯材在各项力学性能上得到了显著提升。具体而言,剪切模量提升了 9.2% ,比压缩模量提升了 10.2% ,比拉伸弹性模量提升了 10.3% 。这些力学性能的改善反映了优化后的芯材结构通过多级开槽改善了树脂分布和结构配置,显著提高了 PET 泡沫芯材的剪切、压缩和拉伸性能,同时兼顾了加工适应性,为未来 PET 泡沫芯材性能优化和应用提供了借鉴。

表4 原始和最优结构PET泡沫芯材的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of PET foam core materials with original and optimal structures

Structure	w_1/mm	w_2/mm	h_1/mm	h_2/mm	G/MPa	$E_c/(\text{MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3)$	$E_t/(\text{MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3)$
Original structure	2	0	23.5	0	125.59	0.127	0.126
Optimal structure	1	1	23.5	23.5	137.14	0.140	0.139

Notes: w_1 is primary groove width; w_2 is secondary groove width; h_1 is primary groove depth; h_2 is secondary groove depth; G is shear modulus; E_c is specific compressive modulus; E_t is specific tensile modulus.

5 结论

通过优化PET泡沫芯材的表面开槽设计,显著提升了其力学性能。采用Abaqus软件构建了PET泡沫芯材的参数化有限元模型,并通过多岛遗传算法优化了表面开槽的几何参数。在总注胶量保持不变的约束条件下,确定了十字交叉槽结构为最优设计,其槽宽为1 mm,主次槽深度均为23.5 mm。优化后的结构相较于原始设计,其剪切模量提升了9.2%,比压缩模量增加了10.2%,比拉伸弹性模量提升了10.3%。这些改进使PET泡沫结构芯材的承载能力得到了显著提升,为其在航空航天、能源和军事领域的应用提供了技术支持。

参考文献

- [1] 任昌义. 碳纤维增强复合材料在汽车副车架中的应用[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(1):69-71.
REN Changyi. Application of carbon fiber reinforced composites on automotive auxiliary frame[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):69-71.
- [2] 梁小杰, 杨文涛, 游慧鹏, 等. 风电叶片用芯材应用进展[J]. 农业工程, 2023, 13(10):56-59.
LIANG Xiaojie, YANG Wentao, YOU Huipeng, et al. Progress on application of core materials for wind turbine blades[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(10):56-59.
- [3] 李沛欣, 周高飞, 周文明, 等. 泡沫芯材在风电叶片中的研究及应用进展[J]. 中国胶粘剂, 2022, 31(12):58-64.
LI Peixin, ZHOU Gaofei, ZHOU Wenming, et al. Research and application progress of foam core materials in wind turbine blade[J]. China Adhesives, 2022, 31(12):58-64.
- [4] 刘艳霞, 仇艳龙, 杨忠, 等. 风电叶片用芯材PET的性能研究[J]. 天津科技, 2020, 47(7):27-29.
LIU Yanxia, QIU Yanlong, YANG Zhong, et al. Study on properties of PET core material for wind turbine blades[J]. Tianjin Science & Technology, 2020, 47(7):27-29.
- [5] 刘卫兵, 刘艳霞, 杨忠, 等. PET芯材在风电叶片上的应用及推广前景[J]. 天津科技, 2021, 48(10):66-67.
LIU Weibing, LIU Yanxia, YANG Zhong, et al. Application and popularization prospect of PET core material in wind turbine blades[J]. Tianjin Science & Technology, 2021, 48(10):66-67.
- [6] 王冬生. PET 泡沫材料在风电叶片中的应用[J]. 上海建材, 2020(1):28-29.
WANG Dongsheng. Application of PET foam material in wind turbine blades[J]. Shanghai Building Materials, 2020(1):28-29.
- [7] 周文华, 周百能. 夹芯泡沫材料性能及其在风电叶片上的应用[J]. 天津科技, 2023, 50(1):75-78.
ZHOU Wenhua, ZHOU Baineng. Applied research of sandwich foam in wind turbine blades[J]. Tianjin Science & Technology, 2023, 50(1):75-78.
- [8] 聂义, 熊杰, 王建东, 等. 风电叶片腹板芯材加工方式对设计和制造的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2021(6):102-105.
NIE Yi, XIONG Jie, WANG Jiandong, et al. The influence of the processing method of wind turbine blades shear webs on the design and manufacture[J]. Composites Science and Engineering, 2021(6):102-105.
- [9] 羊森林, 贾德壮, 李磊, 等. 风电叶片夹芯复合材料的结构设计与性能关系[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(11):119-126.
YANG Senlin, JIA Dezhuang, LI Lei, et al. Relationship between structural design and performance of sandwich composite materials for wind turbine blades[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(11):119-126.
- [10] 张振聪, 黄辉秀, 陈礼贵, 等. 基于ANSYS的PVC芯材剪切性能仿真分析与应用研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(9):68-73.
ZHANG Zhencong, HUANG Huixiu, CHEN Ligui, et al. Simulation analysis and application research on shear performance of PVC core material based on ANSYS[J]. Composites Science and Engineering, 2020(9):68-73.
- [11] MAY-PAT A, AVILES F, AGUILAR J O. Mechanical properties of sandwich panels with perforated foam cores[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2011, 13(4):427-444.
- [12] QIN Z W, WEI L L, ZHANG M M, et al. The effects of core machining configurations on the mechanical properties of cores and sandwich structures[J]. Materials, 2022, 15(2). DOI: 10.3390/ma15020521.
- [13] STOLL F C. Optimal design of sandwich core for wind turbine blade buckling resistance[C]//32nd ASME Wind Energy Symposium. [S.l.]:[s.n.], 2014. DOI: 10.2514/6.2014-0175.
- [14] ZHANG J X, LIU Y, CHENG L L, et al. Design and performance study of carbon fiber-reinforced polymer connection structures with surface treatment on aluminum alloy (6061)[J]. Coatings, 2024, 14(7). DOI: 10.3390/coatings14070785.
- [15] CHEON S, YU S, KIM K Y, et al. Improvement of interfacial bonding force between PMI foam and FRP in PMI foam-cored CFRP sandwich composites[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22(8): 2 281-2 284.
- [16] 肖雪瑞, 祖磊, 王继辉. 复合材料开槽夹芯板弯曲性能研究[C]//

- 第二十届全国玻璃钢/复合材料学术交流会暨中国玻璃钢/复合材料学科建设、学术发展40年回顾与展望活动论文集.北京:《玻璃钢/复合材料》编辑部,2014:80-83.
- XIAO Xuerui, ZU Lei, WANG Jihui. Inquiry of flexural properties of composite sandwich panels with slotted cores[C]//Proceedings of the 20th National FRP/Composite Symposium and the Review and Prospect of the Discipline Construction and Academic Development of FRP/Composites in China in the past 40 years. Beijing: Editorial Department of Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014:80-83.
- [17] 肖雪瑞. 芯材的表面处理对复合材料夹芯板力学性能的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- XIAO Xuerui. The influence of preprocessed core on mechanical properties of composite sandwich[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [18] MOSTAFA A. Numerical analysis on the effect of shear keys pitch on the shear performance of foamed sandwich panels[J]. Engineering Structures, 2015, 101:216-232.
- [19] 王顺吉, 王艳丽, 李文斌, 等. 芯材泡沫不同加工形式对力学性能的影响[J]. 橡塑技术与装备, 2022, 48(9):61-65.
- WANG Shunji, WANG Yanli, LI Wenbin, et al. Effects of different processing forms of core foam on mechanical properties[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2022, 48(9): 61-65.
- [20] 王锴, 余磊, 金希红, 等. 芯材双向开槽工艺对PET泡沫三明治结构弯曲性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(7):140-151.
- WANG Kai, YU Lei, JIN Xihong, et al. Influence of two-way grooving process of core material on bending performance of PET foam sandwich structure[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(7):140-151.
- [21] 吉祥, 秦志文, 冯威, 等. 槽孔尺寸对芯材力学性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2022(9):62-68.
- JI Xiang, QIN Zhiwen, FENG Wei, et al. Effect of perforated hole and groove size on mechanical properties of core material[J]. Composites Science and Engineering, 2022(9):62-68.
- [22] SAYAHLATIFI S, RAHIMI G, BOKAEI A. Experimental and numerical investigation of sandwich structures with balsa core and hybrid corrugated composite/balsa core under three-point bending using digital image correlation[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2021, 23(1):94-131.
- [23] 刘锋, 庞建军, 陈宇轩, 等. 基于Taguchi与BPNN-PSO的薄壁注塑件翘曲变形优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2):74-79.
- LIU Feng, PANG Jianjun, CHEN Yuxuan, et al. Optimization of warpage deformation of thin-wall injection molded part based on Taguchi test and BPNN-PSO[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2):74-79.
- [24] 贾慧芳, 黄晖, 邱祖峰. 汽车前保险杠随机振动疲劳分析与优化设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9):63-68.
- JIA Huifang, HUANG Hui, QIU Zufeng. Random vibration fatigue analysis and optimization design of automobile front bumper[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9):63-68.
- [25] 许琛, 张庆凯, 秦俊飞, 等. 基于多目标遗传算法的复合材料轨枕试验工装优化设计[J/OL]. 复合材料科学与工程, 2025:1-8 [2025-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.tu.20250303.1557.004.html>.
- XU Chen, ZHANG Qingkai, QIN Junfei, et al. Optimization design of test tooling for composite sleeper based on multi-objective genetic algorithm[J/OL]. Composites Science and Engineering, 2025: 1-8 [2025-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.tu.20250303.1557.004.html>.
- [26] JONES R M. Mechanics of composite materials[M]. 2nd ed. London: Taylor & Francis Group, 1999:123-130.