

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.019

PET 基覆铜箔层压板的热拉伸变形行为及在频率选择表面上的应用

赵勇^{1,2}, 胡兵^{1,2}, 田俊霞^{1,2}

(1. 中国航空工业集团公司济南特种结构研究所, 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023;

2. 电磁功能结构技术创新中心, 济南 250023)

摘要: 通过“拉伸-卸载”与“拉伸-应变保持”试验,研究了聚对苯二甲酸乙二酯(PET)基覆铜箔层压板的热拉伸变形行为及其机理,并验证了频率选择表面(FSS)柔性膜“平转曲”成形工艺的可行性。结果表明,层压板在拉伸过程中同时产生塑性和弹性应变,其中塑性应变占比(或塑性变形能力)随温度的升高而显著增加,但两相材料的变形失配会诱发界面剪切应力从而导致试样卷曲,且该剪切应力符合“剪切滞后模型”。层压板的塑性变形表现出显著的时间依赖性,“拉伸-应变保持”过程的应力松弛时间随温度升高而显著缩短,但在同温度条件下该松弛时间还具有应变依赖性,当应变 $\leq 3\%$ 时,松弛时间随应变的增大而延长;当应变 $> 3\%$ 时,应变的影响趋于稳定。FSS 柔性膜的“平转曲”过程主要依赖 PET 基膜的变形,单元阵子的特征尺寸在 PET 基膜变形方向具有明显变化,而“金属孤岛”特征尺寸基本保持不变;当单元阵子发生约 2% 的几何畸变时, X 波段横电波和横磁波的平均反射系数分别上升 2.23%、下降 3.75%,显示出稳定的电磁响应特性与工程应用价值。

关键词: 聚对苯二甲酸乙二酯;覆铜箔层压板;热拉伸变形;频率选择表面;平转曲;反射系数

中图分类号: TQ327.1, TM215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0143-08

Thermal tensile deformation behavior of PET-based copper-clad laminates and its application to frequency selective surfaces

ZHAO Yong^{1,2}, HU Bing^{1,2}, TIAN Junxia^{1,2}

(1. Aviation Key Lab of Science and Technology on High Performance Electromagnetic Windows, AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite, Jinan 250023, China; 2. Innovation Center for Electromagnetic Functional Structure, Jinan 250023, China)

Abstract : The thermal tensile deformation behavior and mechanisms of copper-clad laminates with a polyethylene terephthalate (PET) substrate were investigated using tension-unloading test and tension-strain holding test. Based on these mechanisms, the flat-to-curved forming process for frequency selective surface (FSS) flexible films was validated. The results indicate that during tensile deformation, the laminate undergoes both elastic and plastic deformation. The proportion of plastic strains or plastic deformation capacity increases significantly with rising temperature, but deformation mismatch between the two constituent materials induces interfacial shear stress, leading to specimen curling deformation. This shear stress conforms to the shear-lag model. The deformation of the laminate exhibits time-dependency. The stress relaxation time during the tension-strain holding process significantly decreases with increasing temperature, but exhibits strain dependence under the same temperature conditions. When the strain is not more than 3%, the stress relaxation time increases with increasing strain. However, when the strain exceeds 3%, the effect on relaxation time becomes insignificant. The flat-to-curved forming of the FSS flexible film primarily relies on the deformation of the PET substrate. While the characteristic dimensions of the unit resonators change noticeably along PET substrate, the dimensions of the metal island dipole elements remain essentially unchanged. When the unit resonators undergo approximately 2% geometric distortion, the average reflection coefficient for transverse electric and transverse magnetic polarizations in the X-band

通信作者: 赵勇, 高级工程师, 主要从事复合材料工艺技术研究

收稿日期: 2025-11-09

引用格式: 赵勇, 胡兵, 田俊霞. PET 基覆铜箔层压板的热拉伸变形行为及在频率选择表面上的应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 143-150.

ZHAO Yong, HU Bing, TIAN Junxia. Thermal tensile deformation behavior of PET-based copper-clad laminates and its application to frequency selective surfaces[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 143-150.

increases by 2.23% and decreases by 3.75%, respectively, demonstrating stable electromagnetic response characteristics and significant value for engineering applications.

Keywords : polyethylene terephthalate ; copper-clad laminate ; thermal tensile deformation ; frequency selective surface ; flat-to-curved forming ; reflection coefficient

频率选择表面(FSS)是由周期性排布的金属贴片或金属屏开孔单元构成的一种阵列结构,本质上是一种空间电磁滤波器^[1],已被广泛应用于飞机雷达罩^[2-4]等电磁功能结构领域,对实现产品的带内透波、带外截止,降低目标雷达散射截面,提高隐身性能具有重要作用^[4-6]。

在工程应用中,FSS一般为曲面结构。近年来,针对大尺寸复杂曲面FSS的加工,国内外开展了大量研究,如多轴数控加工技术^[7]、激光三维刻蚀技术^[8-9]等,这类技术通常为在线加工,对设备的软硬件能力、加工精度等要求较高,制造工艺复杂。考虑特定FSS的设计特性、工艺性及经济性等要求,基于传统的FSS制作方法,如印刷电路板蚀刻^[10-11]、掩模光刻^[6,12,13]、喷墨打印^[14]等,在二维平面上进行三维曲面近似展开或分区平面组合的曲面FSS柔性膜成形研究依然是一个重要的课题方向。

尽管已有大量研究报道了以覆铜箔层压板(CCL)为基材,采用印制板电路蚀刻工艺制作平面FSS的方法及其应用^[10-11],但将其拓展应用于复杂不可展曲面的FSS柔性膜成形加工的研究却鲜有报道。本文以一种聚对苯二甲酸乙二酯(PET)基CCL为研究对象,通过“拉伸-卸载”和“拉伸-应变保持”试验方法,分析了CCL的热拉伸变形特性和卷曲变形机理,验证了FSS柔性膜“平转曲”成形工艺的可行性,并通过工艺试验获得了不可展曲面FSS柔性膜。该研究提供了一种不可展曲面FSS加工方法,为其他学者开发类似工艺制作曲面FSS提供参考,对推动曲面FSS在电磁功能结构(如高性能雷达罩)中的应用具有指导意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CCL:名义厚度为89 μm ,基底为PET聚酯薄膜,单侧表面为厚度18 μm 的高延展电解铜箔,断裂伸长率>5%,九江福莱克斯有限公司。

1.2 主要仪器及设备

电子式万能试验机:CMT-10,济南联工测试技术有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 204 F1,德国耐驰

公司;

三维视频显微镜:Hirox KH-7700,日本浩视公司;

鼓风干燥箱:DHG-9245AD,北京中科环试仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1) CCL拉伸试样的制备。使用壁纸刀将CCL剪裁为条状试样。尺寸为160 mm×20 mm(长度×宽度),长度方向沿板材机械方向,标距(有效拉伸长度)为100 mm。

(2) 二维FSS柔性膜的制备。以CCL为基材,采用印制板图形化蚀刻方法,经过清洗、涂胶、紫外曝光与显影,完成FSS图形向光刻胶掩膜的转移;随后,采用三氯化铁溶液进行化学蚀刻,精准去除未保护的铜层;最终,经去膜清理后,在柔性基板上获得高精度的周期性FSS结构,其单元阵子的特征尺寸加工公差 ≤ 0.02 mm。

1.4 测试与表征

1.4.1 拉伸性能测试

(1) 开展“拉伸-卸载”试验,研究层压板试样在不同温度[室温(RT)、80, 120, 150, 180 $^{\circ}\text{C}$]条件下的拉伸变形及断裂特性,拉伸速率为10 mm/min,预设拉伸应变水平分别为0.5%, 1.0%……5.0%。在试验中,先将试样加载至预设应变,保持30 s后卸载,当载荷降至20 N(接近初始夹持力)以下时,通过电子式万能试验机的测控软件记录试样最终应变(即塑性应变),则弹性应变为预设拉伸应变与最终记录的塑性应变之差。为保证数据的一致性和可靠性,在每种试验条件下进行3次重复测试。

(2) 开展“拉伸-应变保持”试验,研究不同温度下应力松弛的时间与预设应变的关系,设定试验温度为120, 150, 180 $^{\circ}\text{C}$,拉伸应变为1.0%, 2.0%……5.0%,加载至预设应变后,保持拉伸应变和温度不变,此时会出现应力持续松弛,当载荷降至20 N以下时,记录此过程所需的时间(即应力松弛时间)。

1.4.2 DSC测试

对“拉伸-应变保持”前、后状态的试样进行测试,分析其热行为。样品质量约为8 mg,氮气氛围,

流速为 50 mL/min,升温范围为 25~300 °C,升温速率为 10 °C/min。

1.4.3 曲面 FSS 热变形工艺试验

以二维 FSS 柔性膜为基材,使用专门设计的热变形工装(如图 1 所示),开展不可展曲面 FSS 柔性膜的热变形工艺验证,其工艺流程为:首先,将热变形工装整体加热至 150 °C,保温 20 min;其次,将工装从加热环境中取出,将 FSS 柔性膜与夹持模块连接进行装膜,并固定在导向驱动装置上;然后,将导向驱动装置下压,使柔性膜逐渐与工装模体的目标型面贴合,此过程控制工装模体温度不低于 110 °C;最后,在保持柔性膜拉伸变形形态和夹持固定的条件下,将整个系统以 0.5~1.0 °C/min 的速率缓慢冷却至室温,使 PET 基膜变形定形,最终获得曲面 FSS 柔性膜。

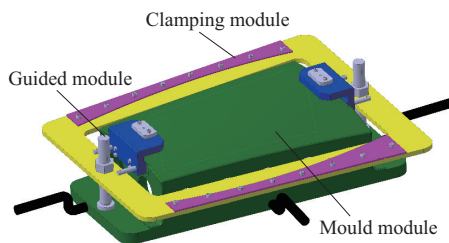


图 1 热变形工装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal deformation tooling

1.4.4 阵子特征尺寸测试

对 FSS 柔性膜有效单元区域进行 4×3 网格划分,使用三维视频显微镜测量试验前、后网格中心单元阵子的特征尺寸,并计算各特征尺寸相对于原始平面状态的变化率。

1.4.5 电磁响应特性仿真

采用电磁仿真软件 ANSYS HFSS,对 FSS 结构变形前后的周期性单元进行建模仿真。通过提取理想结构与发生几何畸变阵子的 S 参数,计算对比其反射系数($|S_{11}|$),从而定量分析变形对其谐振频率与带内抑制特性的影响。

2 结果与讨论

2.1 温度对拉伸变形的影响

为了探究热变形工艺的可行性,首先需要明确温度对 CCL 力学行为的关键影响。图 2 为 CCL 试样在不同温度下的典型拉伸应力-应变曲线。分析可知,材料的屈服强度与拉伸强度均随温度升高而显著降低,这表明高温环境有利于降低材料变形抗力,为后续的热成形工艺提供了基本依据。

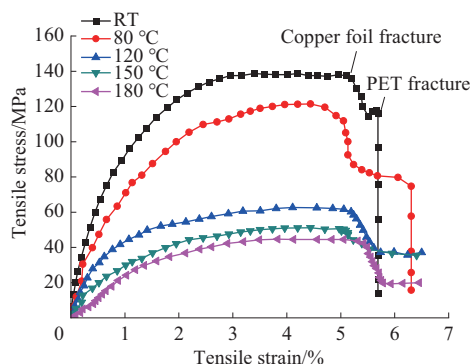


图 2 不同温度条件下 CCL 试样的拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of CCL samples at different temperatures

然而,一个关键现象在于,尽管高温下铜箔断裂后 PET 基膜的断裂伸长率极大(>100%),但层压板作为一个整体,其“工程断裂伸长率”(即对应于应力-应变曲线首次峰值应力点的应变)在不同温度下变化却不显著。这揭示了层压板的断裂行为并非由单一材料控制,而是由铜箔与 PET 基膜之间的界面协同效应所主导。观察曲线形态可以发现:当应变低于约 3% 时,应力随应变增加而非线性升高,但其增长率($d\sigma/d\varepsilon$)逐渐减小;当应变超过 3% 后,应力进入一个明显的平台区,随应变增加而基本保持不变,直至断裂。这一应力平台的出现,表明材料在宏观上达到了一个动态平衡状态:一方面,铜箔的应变硬化效应使其流变应力有升高趋势;另一方面,试样横截面积的持续减小(几何软化)以及 PET 基膜潜在的应力松弛行为,则促使整体应力下降。两者相互抵消,从而形成了近似恒定的流动应力。这一平衡机制对于热成形工艺至关重要,它意味着在平台区进行变形,可以获得大且稳定的塑性应变,同时避免应力过高导致早期破坏。

通过对比室温与高温下的拉伸曲线及其对应的断裂形貌(图 3),可以进一步理解其失效机理。室温下 CCL 试样的断裂形貌(图 3a)显示,铜箔与 PET 基膜的断口不在同一截面上, PET 基膜在铜箔断裂后发生了二次断裂。这对应了拉伸曲线上的两个断裂点:首先,在达到最大应力时,金属铜箔发生断裂;随后, PET 基膜在尚存的界面约束下继续承载并断裂。然而,在 120 °C 的试验温度下,情况发生明显转变。此时, PET 基膜发生显著软化,其拉伸弹性模量急剧下降,导致其无法作为有效的应力传递介质。这直接引发了铜箔-PET 界面的结合力急剧减弱,在远未达到 PET 自身断裂极限时,便发生了界

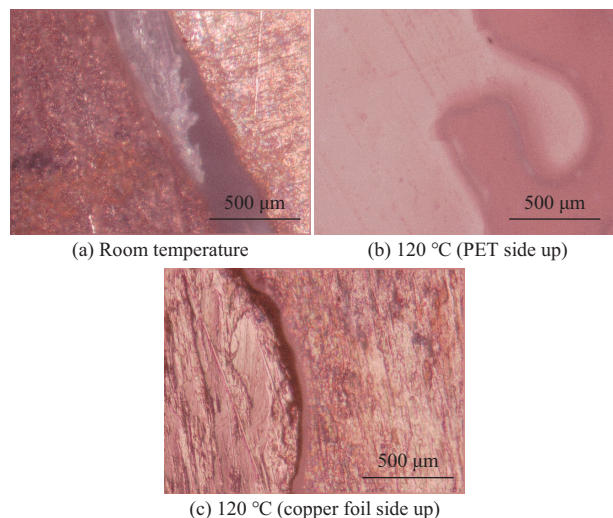


图3 室温与120 °C下CCL试样的拉伸断裂形貌

Fig. 3 Tensile fracture morphology of CCL samples at room temperature and 120 °C

面脱黏分层。如图3b所示,120 °C一次断裂后的形貌中,PET一侧出现的“白斑”即是界面分层的直观证据;而从铜箔一侧观察(图3c),可见铜箔断口处存在明显的裂纹宽度。这充分证明界面失效后,局部应力状态变得复杂,已软化的PET基膜在无有效约束下发生大的塑性流动,导致铜箔断口被撕开,两相变形严重失配。界面失效后,载荷无法有效传递,铜箔因应力集中而提前断裂。断裂后,PET基膜的有效标距长度因分层区域扩展而增加,其在无约束状态下表现出的“二次断裂伸长率”因此远高于层压板整体的工程断裂伸长率。

对所有温度下的应力-应变曲线分析可知,其初始阶段均未表现出显著的线性弹性变形区。这主要归因于CCL的双层结构特性^[15]:其一,作为主导初始变形的铜箔(本试验采用的电解铜箔),其弹性应变极限本身非常有限^[16-17],通常为0.2%~0.5%,超过此极限即迅速进入塑性变形阶段;其二,PET薄膜在界面约束和有限的试验应变速率下,可能在加载伊始就表现出非线性黏弹性响应^[18],而非理想的虎克弹性行为。这两种机制的耦合作用,导致层压板整体在宏观上呈现出较差的弹性变形能力,而在断裂前则表现出宽应变范围内的永久变形能力。

图4为弹性应变与拉伸应变的对应曲线,样件经“拉伸-卸载”试验后产生回弹,可以看出,弹性应变随温度的增加而减小,随预设拉伸应变的增加而增大,但增加的幅度随温度的升高而降低。在本试验中,预设拉伸应变为弹性应变和塑性应变之和,

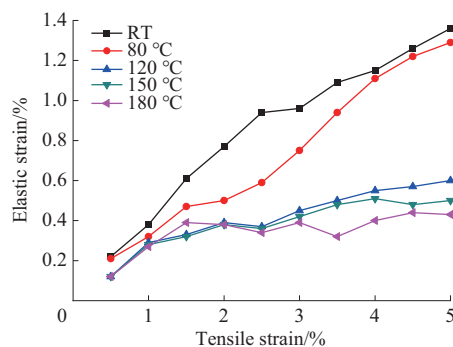


图4 弹性应变与拉伸应变的关系

Fig. 4 Relationship between elastic strain and tensile strain

弹性应变的大小表征试样被拉伸后的回复能力,分析认为,在室温和80 °C时,PET薄膜处于玻璃态,其变形以弹性变形为主,试样整体表现为较高的弹性变形能力,其弹性应变可占预设总拉伸应变的约30%;但随着温度升高至120 °C以上时,PET薄膜转化为以黏弹性和塑性变形为主,且铜箔中的铜原子扩散加剧,位错重组导致软化和塑性变形,故试样整体表现出较好的塑性变形能力,其弹性应变能力变差,弹性应变占比降至约10%。

2.2 卷曲变形机理分析

图5为拉伸-卸载试验后试样的卷曲变形形态,从左至右,试样对应的试验温度依次为室温及80、120、150 °C和180 °C,拉伸应变均为4%。可以观察到,所有试样均发生了朝向PET侧的卷曲变形,且变形程度随温度的升高而减弱。该现象源于层压板中铜箔与PET两相材料之间显著的变形能力差异。铜箔的拉伸弹性模量较高,在拉伸过程中主要发生塑性应变;而PET的拉伸弹性模量较低,其变形则以弹性和黏弹性为主。因此,在卸载外力时,两相因不同的回弹行为将产生应变差 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{Cu} - \varepsilon_{PET} > 0$,导致它们倾向于相互分离。然而,在界面结合作用的约束下,铜箔与PET被强制协调变形,从而在黏接界面处产生抵抗分离的剪切应力,最终引发试样卷曲。

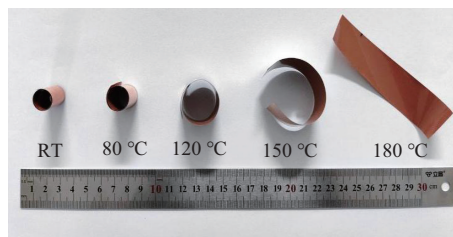


图5 拉伸-卸载试验后CCL试样的卷曲变形形态

Fig. 5 Curling deformation pattern of CCL samples after tensile-unloading test

依据剪切滞后模型(Shear-Lag Model)^[19],界面剪切应力 $\tau_{\text{interface}}$ 见式(1)。

$$\tau_{\text{interface}} = K \cdot E_{\text{PET}} \cdot (\varepsilon_{\text{Cu}} - \varepsilon_{\text{PET}}) \quad (1)$$

式中: K 为几何因子(与厚度比、界面面积相关); E_{PET} 为PET薄膜的拉伸弹性模量; ε_{Cu} 和 ε_{PET} 分别为铜箔和PET薄膜的应变。

剪切应力大小正比于PET的弹性刚度(E_{PET} 主导约束能力)和两相变形失配程度 $\Delta\varepsilon$ 。

基于上述分析,层压板拉应力卸载后,其铜箔的弹性回复量大于PET,从而诱发界面剪切应力,导致双层结构向低模量的PET侧弯曲(铜箔处于凸面)。同时,由于PET弹性应变随温度的增加而减小(见图4),相应的塑性应变 ε_{PET} 增加,这就使得变形逐步适配、界面剪切应力 $\tau_{\text{interface}}$ 减小,故试样的卷曲程度(以变形曲率表征)随着温度的增加而减小。

2.3 应力松弛时间的影响分析

根据式(1),消除两相材料的变形失配 $\Delta\varepsilon$,可消除界面剪应力,从而避免试样在拉伸后发生卷曲变形。为验证这一点,设计了“拉伸-应变保持”试验:在不同温度条件下,将试样加载至预设拉应变后保持应变恒定,并记录其应力松弛的时间,结果如图6所示。

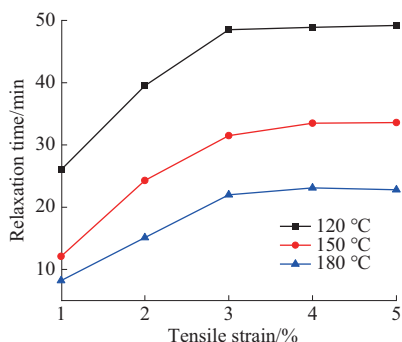


图6 应力松弛时间与拉伸应变的关系

Fig. 6 Relationship between stress relaxation time and tensile strain

从图6可以看出,应力松弛时间随温度升高而显著缩短;同时,该应力弛豫时间具有应变依赖性,在同一温度条件下,当应变小于等于3%时,时间随应变的增加而增加;当应变大于3%时,时间基本保持不变。这表明层压板的变形具有时间效应,PET薄膜在拉应力作用下,通过应力松弛和蠕变,调整自身应变以适配铜箔层变形,从而促使界面剪应力逐步释放,该过程以PET薄膜的变形适配为主。

图7为“拉伸-应变保持”试验前后CCL试样的DSC曲线,可以看出,未处理样品在110.9 °C出现吸

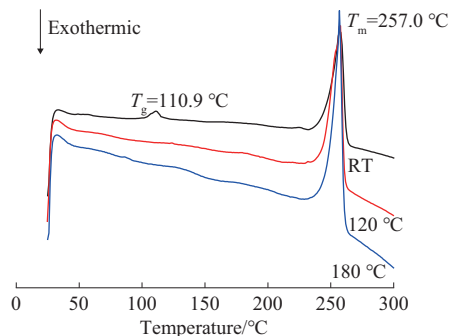


图7 “拉伸-应变保持”试验前后CCL试样的DSC曲线

Fig. 7 DSC curves of CCL samples before and after " tension-strain holding " test

热峰,这是急冷PET基膜冻结内应力释放的特征(结构弛豫);经过120 °C和180 °C处理后CCL样品的应力松弛完成,吸热峰消失。

相关研究^[20-21]表明,铜箔的刚性约束使PET的玻璃化转变温度(T_g)信号宽化并偏移,其台阶跃升被结构弛豫吸热峰掩盖,导致表观 T_g 难以识别。本试验采用的PET基膜,其冻结应力在热变形时会释放,叠加铜箔的约束效应,导致不可控形变。当加热至110.9 °C以上时,可消除其内应力(吸热峰消失),从而可提升后续热拉伸的尺寸稳定性。

2.4 曲面FSS热变形工艺验证

基于应力松弛机制和卷曲控制模型,实现了CCL的曲面成形。以此PET基CCL为基材,制备出一种贴片型平面FSS柔性膜,进而,在该FSS柔性膜基材上开展曲面热变形工艺验证。初步对比显示,相较于未加工的原始CCL,贴片型FSS柔性膜的金属面占比明显减小,且呈非连续状态。鉴于PET基膜的延展性优于铜箔,该FSS柔性膜应表现出更优异的热成形性能。

图8为FSS结构及单元阵子特征尺寸,黑色区域为铜箔覆盖区,其余区域为PET基膜,试验过程 X 为主拉伸方向(单向拉伸), D 和 L 分别为 X 和 Y 方向

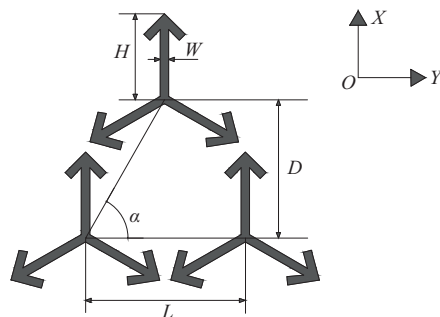


图8 FSS结构及单元阵子特征尺寸

Fig. 8 FSS structure and characteristic dimensions of array elements

的阵子间距, H 为阵子单元长度, W 为线宽度。对试压前后网格中心的单元阵子的特征尺寸进行了测量,计算其变化率见表1。

表1 热拉伸变形后FSS阵子特征尺寸变化率

Tab. 1 Variation rate of FSS array elements characteristic dimensions after thermal tensile deformation

Samples	L	D	H	W	%
1 [#]	-0.68	1.71	0.10	0	
2 [#]	-0.85	2.24	0.16	0	
3 [#]	-0.69	1.83	0.11	0	
4 [#]	-0.66	1.69	0.10	0	
5 [#]	-0.88	2.30	0.16	0	
6 [#]	-0.71	1.87	0.12	0	
7 [#]	-0.64	1.65	0.10	0	
8 [#]	-0.87	2.32	0.20	0	
9 [#]	-0.70	1.86	0.10	0	
10 [#]	-0.65	1.70	0.08	0	
11 [#]	-0.85	2.23	0.18	0	
12 [#]	-0.64	1.80	0.10	0	
Max	-0.64	2.32	0.20	0	
Min	-0.88	1.65	0.10	0	
Mean	-0.74	1.93	0.13	0	

从图8和从表1可知, D 和 L 位于无连续金属的覆盖区, H 和 W 为金属单元的本身尺寸; D 和 H 位于拉伸 X 方向, D 被明显拉长,而 H 虽被拉伸但变化率极小; L 和 W 位于 Y 方向,由于泊松效应,该方向被压缩,故 L 出现明显的负变化率,但 W 无任何变化。分析可知,“金属孤岛”区 W 和 H 尺寸变化率 $\leq 0.2\%$,验证了铜箔层在150℃工艺下无显著塑性变形,而蚀刻区PET基膜主导整体形变(D 平均拉伸1.93%, L 平均压缩0.74%)。

综上所述,PET基膜在热拉伸过程中的适配变形主导FSS柔性膜“平转曲”,通过低温慢速冷却实现定形,获得与模体型面一致的不可展曲面。

采用ANSYS HFSS构建了三维全波电磁仿真模型,以探究FSS结构在热拉伸变形前后的电磁响应变化,该模型核心为一个位于双层介质中的单层FSS阵列,具体构成如下。

(1)结构与材料。

FSS单元:采用等边六边形周期排列的三箭头金属贴片结构(图8),其介质基底为71 μm 厚的PET聚酯薄膜,仿真中设定的相对介电常数 $\epsilon_r=3.0$,损耗角正切 $\tan\delta=0.008$;金属图案部分由18 μm 厚铜箔蚀刻而成,在仿真中视为理想电导体。

封装介质:FSS阵列嵌入于2 mm厚的FR-4介质的正中间,其材料参数设置为 $\epsilon_r=4.4$, $\tan\delta=0.02$ 。

(2)仿真配置与参数。

在仿真模型中,FSS单元结构被设置为主从边界条件,以模拟其在空间中无限周期延拓的物理特性。沿电磁波传播方向的两端端口则设置Floquet端口,用于激励和吸收电磁能。仿真中对比了FSS结构在变形前后两种几何状态下的频响特性,其关键特征尺寸见表2。

表2 FSS结构变形前后的特征尺寸参数

Tab. 2 Geometrical parameters of FSS structure in undeformed and deformed states

States	L	D	H	W	mm
Undeformed	15.000	13.000	6.500	0.500	
Deformed	14.889	13.251	6.508	0.500	

图9为FSS结构在变形前后的反射系数变化,仿真结果表明,在L,S,C,X,Ku全频段范围内,该结构在变形前后频响特性整体保持一致,TE极化的反射系数略有上升,而TM极化反射系数则轻微下降。鉴于该FSS结构主要用于X波段带内抑制,重点分析了该频段的反射系数变化。数据显示,未变形时TE与TM极化在X波段的平均反射系数分别为74.74%与74.66%;变形后,FSS单元阵子出现约2%的几何畸变,对应TE和TM极化的平均反射系数分别为76.97%与70.93%,即TE极化上升2.23%,

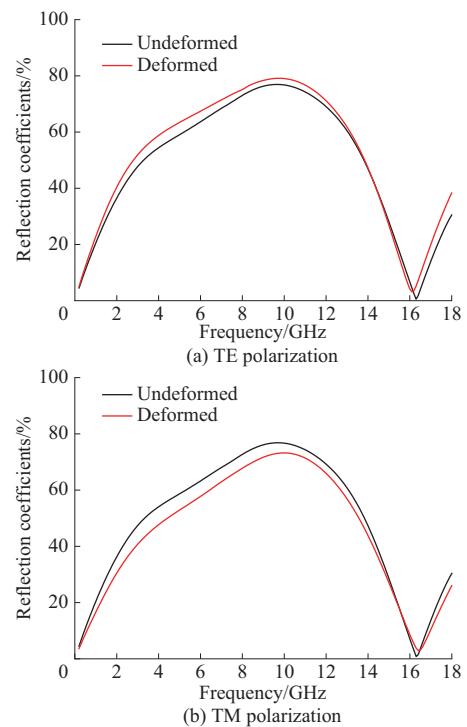


图9 FSS结构在变形前后的反射系数

Fig. 9 Reflection coefficient of FSS structure before and after deformation

TM极化下降3.75%。分析表明,该FSS结构的核心滤波性能可得到有效保持,满足工程应用要求。

3 结论

(1) CCL在拉伸变形过程中同时产生弹性变形和塑性变形,塑性变形能力随温度的升高增强,而弹性应变占比随温度的升高逐渐减小。

(2)拉伸导致试样发生卷曲变形,卷曲程度随温度升高而减小,其机理为两相材料差异引起的界面剪切应力,依据Shear-Lag Model,该剪切应力正比于PET的弹性刚度和两相变形的失配程度。

(3) CCL的应力松弛时间随温度升高而显著缩短,在相同温度条件下,当预设应变 $\leq 3\%$ 时随应变增加而延长,应变 $> 3\%$ 后趋于稳定。

(4)曲面FSS热变形工艺验证表明,柔性膜“平转曲”的过程主要依赖于PET薄膜的变形,而金属“孤岛”区的尺寸基本保持不变。通过低温慢速冷却,可实现覆铜箔FSS柔性膜的无损曲面成形,且当单元阵子发生约2%的几何畸变时,该柔性膜电磁响应特性保持稳定,显示出优异的结构容差与工程应用价值。

参考文献

- [1] LIU Y, ZHANG H, WANG J. A review on metasurfaces: From principle to smart metadevices[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(4). DOI:10.1002/admt.202200755.
- [2] 张明习. 高性能频率选择表面隐身雷达罩性能机理与综合设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
ZHANG Mingxi. Research on mechanism and integrated design method of high-performance FSS stealth radome[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [3] 张建. 有限大频率选择表面及其在雷达罩上的应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
ZHANG Jian. Research on finite periodic frequency selective surfaces and their application in radomes[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [4] SON D S, HYUN J M, CHAKI S, et al. Evaluation of mechanical/ electromagnetic preformation of single-sided active frequency selective surface for stealth radomes[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22(5): 1 235–1 242.
- [5] EDALATI A, SARABANDI K. Wide angle, polarization independent RCS reduction using nonabsorptive miniaturized-element frequency selective surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(2): 747–754.
- [6] TANG Z, ZHAN J, ZHONG B, et al. An ultra-wideband frequency selective surface with high stability for electromagnetic stealth[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2022, 36(1): 141–153.
- [7] 吕明云, 祝明, 王焕青, 等. 复杂曲面FSS加工系统研究[J]. *航空学报*, 2005, 26(4): 524–527.
LYU Mingyun, ZHU Ming, WANG Huanqing, et al. Research on machining system for complex curved surface FSS[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(4): 524–527.
- [8] CHEN L, ZHAO S, WANG X, et al. Patterning of silver-based low-emissivity coating frequency selective surface microstructures: Laser ablation and photolithography opening new horizons for communication[J]. *Applied Surface Science Advances*, 2025, 25. DOI:10.1016/j.apsadv.2025.100426.
- [9] 王曦照. 大型复杂曲面激光精密制作功能性结构的关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
WANG Xizhao. Research on key technologies of laser precision fabrication of functional structures on large-scale complex curved surfaces[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [10] KIM S, LEE J. Mass production of FSS for EMI shielding via industrial PCB process[J]. *Electronics*, 2023, 12(5). DOI:10.3390/electronics12051189.
- [11] 侯新宇, 柳泽林, 陈睿哲, 等. 一种双频带通双曲率FSS雷达罩及其制造方法: CN116604896A[P]. 2023-08-18.
HOU Xinyu, LIU Zelin, CHEN Ruizhe, et al. A dual-bandpass double-curvature FSS radome and manufacturing method thereof: CN116604896A[P]. 2023-08-18.
- [12] KIM J, TANAKA H. Roll-to-plate UV photolithography for mass production of flexible FSS[J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2023, 8(2). DOI:10.1088/2058-8585/acd2a1.
- [13] WANG Y, LI Z, ZHANG C, et al. Conformally overlaid ferromagnetic shadow masks for etching and deposition processes[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2024, 33(2): 215–223.
- [14] SMITH J, GUPTA R. Inkjet-printed metal-dielectric hybrid frequency selective surfaces for 5G applications[J]. *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(6): 2 910–2 920.
- [15] ZHANG K, LI M, CHEN L. Recent advances in flexible copper clad laminates for 5G applications: A review[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2022, 12(3). DOI:10.1109/TCPMT.2022.3148790.
- [16] WANG C, LIU G, ZHANG X. Enhancing the ductility and fatigue life of rolled-electrodeposited copper foil for flexible electronics[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 864. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144568.
- [17] 张明, 李华. 电解铜箔在印制电路板中的关键性能指标分析[J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(5): 12–18.
ZHANG Ming, LI Hua. Analysis of key performance indicators of electrolytic copper foil in printed circuit boards[J]. *Electronic Components and Materials*, 2020, 39(5): 12–18.

- [18] 王振宇,刘颖. 柔性电路板用PET薄膜的力学与热稳定性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(4):32–37.
WANG Zhenyu, LIU Ying. Study on mechanical and thermal stability of PET films for flexible circuit boards[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(4):32–37.
- [19] CHEN X, WU Y, LI S. An improved shear-lag model for interfacial stress transfer in 2D material-polymer composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 215. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108885.
- [20] ZHAO P, YANG F, XU R. Correlating structural relaxation of poly(ethylene terephthalate) to its mechanical performance in flexible electronics substrates[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(18). DOI:10.1002/app.52085.
- [21] MARTINEZ A P, WHITE C C, WU D. Interface-driven constraint effects on the glass transition and structural relaxation of polymer thin films[J]. *Macromolecules*, 2021, 54(9):4 321–4 327.
-
- 上接第128页
- [12] WANG J C, WANG Z G, SONG Z Y, et al. Programming multi-stage shape memory and variable recovery force with 4D printing parameters[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(11). DOI:10.1002/admt.201900535.
- [13] SAPTAJI K, ROCHMAD C O, JUNIASIH O A, et al. Enhancing shape-recovery ratio of 4D printed polylactic acid (PLA) structures through processing parameter optimization[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2024, 9(6):1 869–1 881.
- [14] 刘少岗,李日中,王心悦,等. 4D打印工艺参数对聚乳酸形状记忆特性的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9):51–56.
LIU Shaogang, LI Rizhong, WANG Xinyue, et al. Effect of 4D printing process parameters on shape memory properties of polylactic acid[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(9): 51–56.
- [15] VAN MANEN T, JANBAZ S, ZADPOOR A A. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers[J]. *Materials Horizons*, 2017, 4(6):1 064–1 069.
- [16] LI C C, WU T, ZHANG L B, et al. Temperature-driven controllable deformation in 4D printing through programmable heterogeneous laminated bilayer structure[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(3):1 241–1 253.
- [17] ZHANG J F, JI D B, YANG X, et al. 4D printing of bilayer structures with programmable shape-shifting behavior[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(46):21 309–21 323.
- [18] KAČERGIS L, MITKUS R, SINAPIUS M. Influence of fused deposition modeling process parameters on the transformation of 4D printed morphing structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(10). DOI:10.1088/1361-665X/ab3d18.
- [19] SLAVKOVIĆ V, HANŽELIČ B, PLESEC V, et al. Thermo-mechanical behavior and strain rate sensitivity of 3D-printed polylactic acid (PLA) below glass transition temperature (tg)[J]. *Polymers*, 2024, 16(11). DOI:10.3390/polym16111526.
- [20] NAMATHOTI S, PS R S, VAKKALAGADDA M R K. Characterization of 4D printed shape memory and conventional polymer blends for thermal responsive applications[J]. *Journal of Polymer Research*, 2024, 31(8). DOI:10.1007/s10965-024-04074-5.