

Tedlar 复合材料表面飞秒激光刻蚀铝薄膜技术研究

尚凯文¹, 吴敢^{1*}, 刘孝丽², 杨建平¹, 王瑞¹¹兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000;²榆林学院能源工程学院, 陕西 榆林 719000

摘要 研究不同的工艺参数对 Tedlar 复合材料-铝薄膜(厚度为 2 μm)表面形貌的影响,理论优化得到合理的工艺参数。研究表明,单位时间内极多数量飞秒激光脉冲的积累作用,使得铝膜表面的作用区域温度在极短时间内快速升高并超过铝的熔点和气化温度,表面铝膜最终被刻蚀去除;当激光功率增大到 5.5 W 时,界面处温度达到了 513.19 K,超过了基底 Tedlar 材料的最高使用温度,并在基底材料表面烧蚀产生点坑;当扫描速度从 350 mm/s 增大至 600 mm/s 时,出现的间断点尺寸从 1.2 μm 增大到 2.7 μm ,造成激光刻蚀加工尺寸误差高于 10 μm ;在激光输出功率为 4.0 W、光斑直径为 40 μm 和扫描速率为 500 mm/s 的工艺条件下,铝膜图形激光刻蚀后尺寸精度及相对位置精度均优于 10 μm ,满足技术要求。

关键词 激光光学; Tedlar 复合材料; 飞秒激光刻蚀; 工艺参数; 铝膜; 仿真分析

中图分类号 TG178

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1002117

1 引言

频率选择面(Frequency Selecting Surfaces, FSS)是由基底上相同的贴片或孔径单元按照二维周期性排列构成的无限大平面结构,其对不同工作频率、极化方式和入射角度的电磁波具有频率选择性。与电磁波相互作用的过程中,FSS 可表现出明显的带通或带阻滤波的特性^[1],广泛应用在空间滤波器、雷达天线罩、天线阵雷达散射截面以及传输和反射不同频段电磁波的反射器等领域^[2-3]。开展 FSS 方面的研究有助于提高我国军事装备的技术水平,而且具有重要的理论意义和应用价值。

频率选择面的基底材料为复合材料,其具有高比强度、高比模量、高稳定性以及轻质量等优点,目前已经广泛应用在天线等基底的制备^[4-6]。通常用于制备天线基底的材料为 Tedlar 复合材料,其外层为 Tedlar 材料,内层为 Kevlar 或 Vectran 纤维材料,中间使用聚亚胺酯胶粘接^[7-8]。Tedlar 材料是一种聚氟乙烯高分子材料,在所有的氟树脂种类中,其密度最小,含氟量最低,具有耐温变性能佳、耐候

性优异和耐磨损性能好的特点。Kevlar 或 Vectran 纤维织物具有很高的强度,是复合材料的一种主承力结构材料。聚亚胺酯胶有粘接外层 Tedlar 材料与主承力结构材料,以及阻氦两个方面的作用^[9]。频率选择面还要求对太阳光具有较高的反射率,单独的 Tedlar 复合材料对光的反射率较低,为此需要选择合适的且可以满足要求的反射薄膜。铝膜从紫外到红外都具有较高的反射率,同时铝膜表面在大气中可以生成一层薄的,而且很稳定的氧化物保护膜^[10],所以选择铝膜作为 Tedlar 复合材料表面的高反射膜层。

随着空间技术和材料制备技术的不断发展,科研人员对相应的材料体系加工技术提出了更高的精度要求^[11-12]。对于 Tedlar 复合材料-铝膜体系的频率选择面而言,三维曲面激光刻蚀加工技术是目前常用的也最有效的制造技术之一,其精度要求小于 20 μm ^[13-14]。目前,国内关于大面积三维激光精密刻蚀技术的研究单位较少,主要有兰州空间技术物理研究所和华中科技大学等单位,而且主要研究集中在纳秒级激光器对复合材料表面金属薄膜的激光

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-25; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(51905471)

*E-mail: wugan72@yahoo.com.cn

刻蚀工艺^[15-17]。随着卫星天线不断向高频段发展,要求天线反射器的频率选择表面的单元图形尺寸越小,即对图形尺寸精度的要求越来越高。目前,市场对图形尺寸小于 10 μm 的加工精度有了迫切需求,但纳秒激光刻蚀技术已经无法满足要求^[18-20]。飞秒脉冲激光具有脉冲宽度窄和峰值功率高等特点,对金属铝膜/复合材料的刻蚀加工热效应较小,而且刻蚀单元图形边界的整体效果也优于纳秒激光^[21-22],因此研究金属铝膜/复合材料的飞秒激光高性能刻蚀加工工艺具有重要意义。

本文针对 Tedlar 复合材料-铝膜体系开展飞秒激光刻蚀加工工艺的研究,讨论不同的工艺参数(激光光斑的直径和重叠率、激光功率和激光扫描速率)对飞秒激光刻蚀效果的影响规律。使用 ANSYS 14.0 有限元软件模拟 Tedlar 复合材料-铝膜(厚度为 2 μm)的飞秒激光刻蚀过程,总结刻蚀过程中热学性能及刻蚀效果的变化规律,并对工艺参数进行

优化。开展相关验证实验,实现对复合材料表面金属薄膜高精度和高效率的刻蚀加工,得到最佳的飞秒激光刻蚀工艺参数。

2 研究方法

2.1 模拟建模及方法

模拟所用的薄膜体系如图 1 所示。最上层为镀制的铝薄膜层,第二层为 Tedlar 膜层,第 3~5 层为纤维铺层及蜂窝夹心层。使用 ANSYS 软件对复合材料-铝薄膜的激光刻蚀加工过程进行模拟,由于复合材料是多层结构,并且厚度比 2 μm 厚的铝膜要厚很多,所以计算结果的准确度不能保证^[23-24]。因此,在模拟 Tedlar 复合材料基底的表面上飞秒激光刻蚀铝薄膜的过程中,当铝膜厚度在微米量级时,模型可作适当简化。在最大可能接近真实实验环境的条件下,复合材料只用 Tedlar 材料来替代,只考虑金属膜层与基底 Tedlar 层。

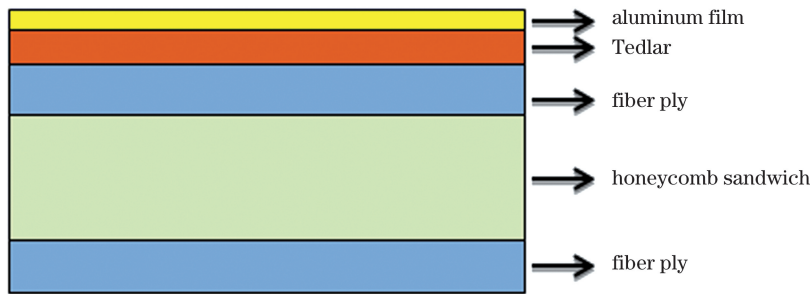


图 1 Tedlar 复合材料-铝膜体系

Fig. 1 Tedlar composite-aluminum film system

由于使用的飞秒激光脉冲的脉宽只有 290 fs,因此在亚皮秒时间量级内,电子和晶格没有达到热平衡状态,所以在热力学计算过程中引入了双温模

型,可以分别考虑电子体系和晶格体系的热力学过程,建立的电子和晶格方程^[25]分别为

$$\gamma \frac{\partial T_e}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial r} (R^{\alpha-1} F_e) - T_e \left(\frac{\partial p_e}{\partial T_e} \right)_n \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{1}{n} \right) + G(T_i - T_e) + S_e \gamma \frac{\partial S_e}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial r} (R), \quad (1)$$

$$\gamma \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial r} (R^{\alpha-1} F_i) - \left[T_i \left(\frac{\partial p_i}{\partial T_i} \right)_n + q \right] \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{1}{n} \right) - G(T_i - T_e) + S_i, \quad (2)$$

式中: F_e 和 F_i 分别为电子和离子的能流; n 为电子密度; p_e 和 p_i 分别为电子和离子的压强; γ 为比热容; q 为离子黏度(电子黏度忽略不计); G 为电子与晶格之间的耦合参数; R 为 Euler 坐标; τ 为 Lagrange 坐标系下的驰豫时间; α 为靶型对称性指标; S_e 和 S_i 为相互作用中可能产生其他形式的源项; T_e 和 T_i 分别为电子温度和晶格温度; r 为粒子与中心原点的距离。

建立使用波长为 1028 nm 的激光刻蚀铝薄膜/Tedlar 材料体系的物理模型,选用基底为 25 μm 厚的 Tedlar 材料,铝薄膜的厚度为 2 μm,单脉冲模拟的模型长度为 100 μm,移动脉冲模拟的模型长度为 250 μm,上层网格的尺寸为 0.1 μm,下层网格的尺寸为 2.0 μm。

脉冲激光加热前,金属铝、Tedlar 材料及周围环境温度为常温,初始的温度条件为

$$T(x, y, z) |_{t=0} = 293 \text{ K}. \quad (3)$$

当冷却阶段开始时,初始的温度条件为加热结束后的温度,冷却时间设为 50 ns。脉冲激光加热阶段,上层金属薄膜表面周围的空气存在热对流,为此忽略热辐射。

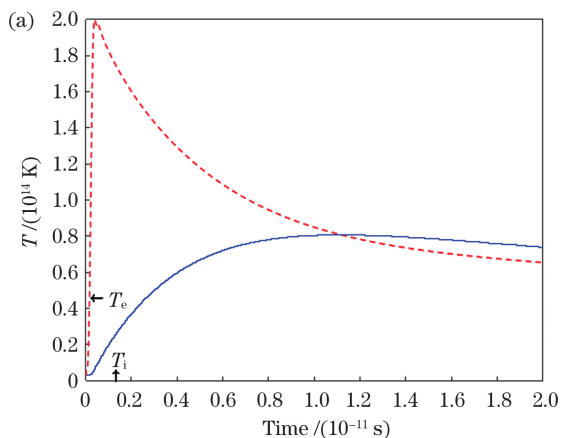
金属薄膜与 Tedlar 基底交界面的热流和温度呈连续分布,可表示为

$$\mathbf{n} \cdot (k_{\text{Al}} \cdot \nabla T) = \mathbf{n} \cdot (k_{\text{Ted}} \cdot \nabla T) = 0, \quad (4)$$

式中: \mathbf{n} 为边界的法向矢量; k_{Al} 和 k_{Ted} 分别为铝膜和 Tedlar 材料的热导率。

2.2 实验方法

Tedlar 复合材料基底上的铝薄膜采用电弧离子镀膜技术进行制备,设备为俄罗斯引进的 VACF 型电弧离子镀膜机。飞秒激光刻蚀实验使用 Light Conversion 公司生产的 Pharos 系列工业级飞秒激光器,激光器的性能如下:激光波长为 1028 nm,最大平均输出功率为 15 W,最大输出触发频率为 1 MHz,脉冲宽度为 290 fs,单脉冲能量大于 0.2 mJ。在 Tedlar 复合材料试板的表面上镀制 2 μm 厚的铝薄膜,并作为实验样品。在不同激光的输出功率、激光光斑直径和扫描速度的条件下,观察飞秒激光刻蚀铝薄膜的表面形貌变化,从而确定最佳的飞秒激光刻蚀工艺参数。飞秒激光刻蚀后的样品面型及图形测量借助奥智品光学仪器(上海)公司生产的 CNC 670 型三维曲面图形测量分析设备。



3 结果与讨论

3.1 模拟仿真结果分析

3.1.1 激光刻蚀过程的热力学仿真分析

采用时域有限差分法对飞秒激光与铝膜作用初期表面的电子体系和晶格体系的热学过程进行理论模拟,飞秒激光脉冲的脉宽设为 290 fs,模拟结果如图 2 所示。

从图 2(a)可以看到,在飞秒激光入射到铝薄膜表面的瞬间,在极短的时间内(小于 0.1×10^{-11} s)电子的温度达到了 2×10^{14} K,随后通过电子间和电子与晶格间的相互作用达到热平衡状态。因此,只要入射激光的能量足够大,在极短的时间内由热传导的作用导致铝的晶格温度可以快速超过铝的熔点,使复材基底表面的金属铝膜被精确刻蚀去除。在 1 ps 的时间间隔内,复合材料表面刻蚀的铝膜厚度与入射激光电子和材料表面温度的关系如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看到,随着材料刻蚀深度的增加,电子的温度是快速降低的,当刻蚀深度为 125 nm 时,电子的温度基本保持恒定,与被刻蚀材料温度相等,约为 1×10^{13} K。这说明在飞秒激光刻蚀的过程中,飞秒激光的刻蚀区域都集中在复合材料表面上的铝膜深度作用范围,其能量都作用于铝膜深度约为 125 nm 的薄层内。另外,在飞秒激光入射点处,铝膜的晶格温度快速升高,而入射点附近的晶格温度仍处于低温状态。

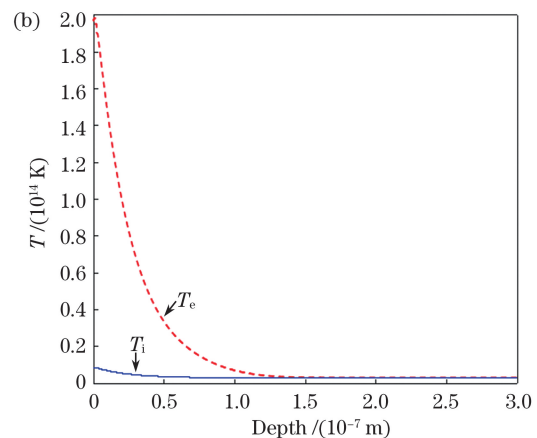


图 2 电子晶格温度随时间和深度的变化曲线。(a)电子晶格温度与时间;(b)电子晶格温度与深度

Fig. 2 Electron lattice temperature curves with time and depth. (a) Electronic lattice temperature and time; (b) electronic lattice temperature and depth

3.1.2 飞秒激光功率对刻蚀效果影响的仿真分析

飞秒激光刻蚀 Tedlar 复合材料基底表面上铝膜的整个过程可以分为如下阶段。首先,入射激光电子与材料表面的金属铝膜相互作用,由能量的热

传导作用引起材料表面刻蚀区域的表面温度快速升高;然后,随着能量的传导,在铝膜表面作用区域开始纵向刻蚀,随着刻蚀深度的增加,激光电子的温度快速降低,当电子温度与刻蚀材料的熔点相等时,说

明刻蚀过程处于平衡状态,此时深度为飞秒激光最大的刻蚀深度。因此,本节关于飞秒激光刻蚀功率对刻蚀效果影响的仿真模拟是基于以上两个阶段进行研究的。首先分析激光功率对金属薄膜体系温度的影响,激光功率大小依次设为 3.0,3.5,4.0,4.5,5.0,5.5 W,扫描速度为 500 mm/s,激光光斑直径为 40 μm ,不同功率下基底材料表面温度变化的仿真结果如图 3 所示。从图 3 可以看到,随着单脉冲辐射激光功率的增加,Tedlar 复合材料表面上金属铝膜的最高瞬时温度逐渐升高;当激光功率由

3.0 W 提高到 5.5 W 时,铝膜表层的温度由 6000 K 升高到 11000 K;金属铝的熔点为 933 K,气化温度为 2600 K,当激光功率在 3.0~5.5 W 之间任意取值时,铝膜表面温度均远高于金属铝的熔化温度和气化温度,说明表面铝薄膜在很短的时间内可以被快速刻蚀去除。

第二个阶段研究铝膜的纵向刻蚀过程,随着刻蚀深度的增加,电子温度快速下降至刻蚀区域的铝膜温度,说明此时刻蚀过程达到了稳定状态。激光功率的变化会对基底 Tedlar 材料的性能产生影响,平衡状态下传导的热量有可能损伤基底材料。因此,模拟仿真了不同的激光刻蚀功率下 Tedlar 复合材料与铝膜界面处温度的变化规律,模拟结果如图 4 所示。从图 4 可以看到,界面处的温度随着飞秒激光刻蚀功率的增大而升高,随着激光功率从 3.0 W 增加到 5.5 W 时,Tedlar 复合材料与铝膜界面温度从 417.68 K 升高到 513.19 K。由于热传导的作用,当激光功率为 5.0 W 时,界面处的温度达到了 504.35 K,而 Tedlar 材料的最高使用温度为 497 K,此时基底温度超过了 Tedlar 材料的临界使用温度,所以对基底 Tedlar 材料造成了损伤,影响了本征材料的使用性能。因此,当对 Tedlar 复合材料-铝膜材料体系进行飞秒激光刻蚀时,功率不得高于 4.9 W。

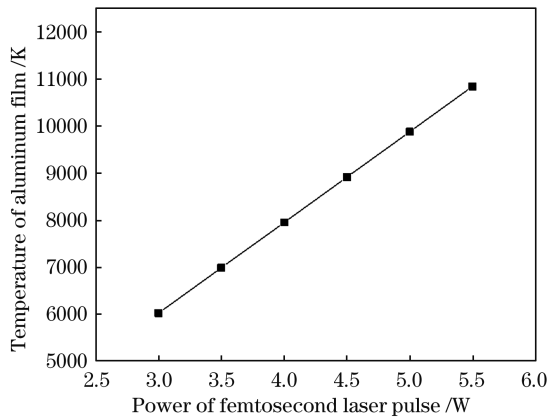


图 3 不同激光功率下基底材料表面温度变化的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of surface temperature change of substrate material under different laser power

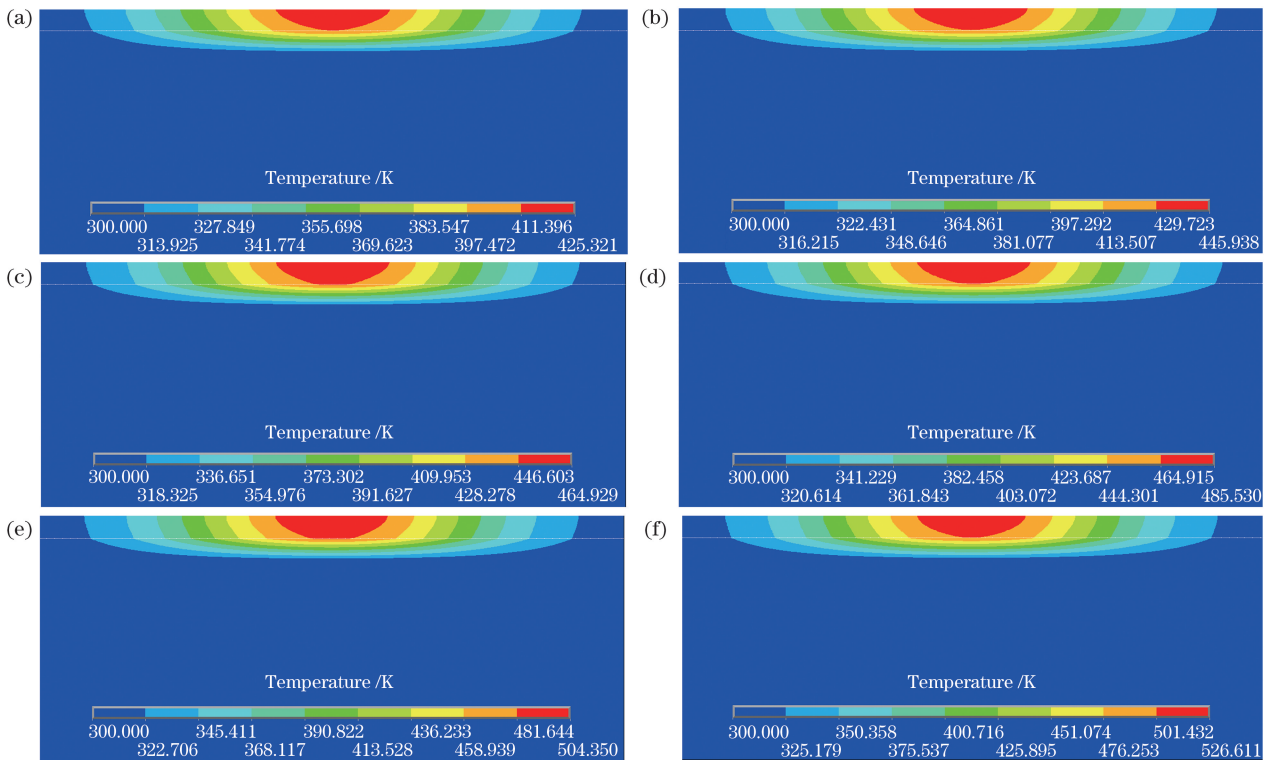


图 4 不同激光功率下界面温度变化的仿真结果。(a) 3.0 W;(b) 3.5 W;(c) 4.0 W;(d) 4.5 W;(e) 5.0 W;(f) 5.5 W
Fig. 4 Simulation results of interface temperature change under different laser powers. (a) 3.0 W; (b) 3.5 W; (c) 4.0 W; (d) 4.5 W; (e) 5.0 W; (f) 5.5 W

3.1.3 飞秒激光扫描速率对刻蚀效果影响的仿真分析

根据不同的飞秒激光功率对刻蚀过程的仿真分析结果可知,最大激光功率为 4.9 W,在扫描速率对刻蚀效果的仿真模拟中,设定激光功率为 4.5 W,激光的光斑直径为 40 μm ,激光频率为 20 kHz,激光扫描速率依次设为 350, 450, 500, 550, 600, 650 mm/s,不同激光扫描速率下材料表面变化的仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看到,在 20 kHz 的重复频率下,扫描速率越大,相邻刻蚀圆环之间的中心间距越大,造成间断点的尺寸越大;当扫描速度从 350 mm/s 增大至 600 mm/s 时,飞秒激光刻蚀过程中出现的间断点尺寸从 1.2 μm 增大到 2.7 μm ,当间断点的尺寸为 2.7 μm 时,造成激光刻蚀加工的尺寸误差高于 10 μm ;当激光扫描速率增大至 650 mm/s 时,对应的间断点尺寸增大至 3.2 μm ,这已经超出了加工误差范围。在另外一方面,对大面积三维曲面的表面进行飞秒激光刻蚀加工,但扫描速率过低会极大地降低加工效率。因此,在满足加工精度要求(小于 10 μm)的前提下尽可能地增大激光扫描速率,综合考虑激光扫描速率应小于 600 mm/s。

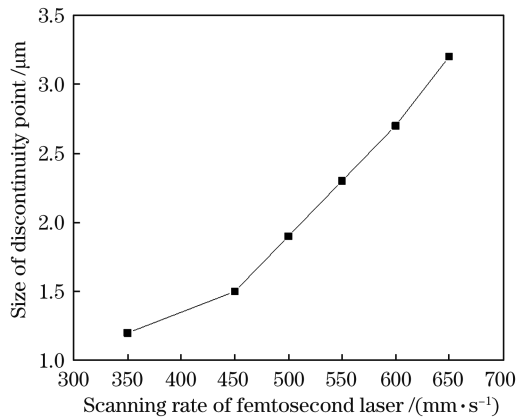


图 5 激光刻蚀间断点尺寸与扫描速率的变化曲线

Fig. 5 Change curve of size of discontinuity point and scanning rate of laser etching

3.2 飞秒激光刻蚀实验的结果分析

3.2.1 激光光斑直径及重叠率对刻蚀效果影响的实验分析

飞秒激光扫描刻蚀加工的过程中,相邻的激光光斑之间会存在重叠,并且在搭接处存在刻蚀盲区,这会造成激光刻蚀存在误差,从而影响激光刻蚀加工图形的尺寸精度。实验过程中选择的激光光斑为圆形光斑,圆形光斑重叠后会产生高度为 d 的加工盲区,这个区域未能进行激光刻蚀加工。相关项目

中定义的刻蚀加工误差就是 d 的数值大小。本节研究不同的光斑直径和重叠率对刻蚀效果的影响规律,实验结果如图 6 所示,每个图中左边和右边的标注表示光斑重叠率分别为 50% 和 25% 的误差。从图 6 可以看到,当光斑直径分别为 10, 20, 40, 60 μm 以及重叠率分别为 25% 和 50% 时,对应的加工误差分别为 1.69 μm /0.67 μm 、3.39 μm /1.34 μm 、6.77 μm /2.68 μm 和 10.16 μm /4.02 μm ;当光斑的直径越大和重叠率越小时,引入的激光刻蚀加工误差越大,当激光的光斑尺寸越小时,重叠率越大,激光刻蚀精度就越高。但对于大面积三维曲面飞秒激光刻蚀加工技术而言,在确保刻蚀加工精度满足要求的同时,还必须考虑激光刻蚀加工效率。过小的光斑直径和过大的光斑重叠率必然会引起刻蚀效率的下降,从而延长加工周期。技术要求刻蚀铝膜的尺寸精度小于 10 μm ,实验中当光斑直径为 40 μm 和重叠率为 25% 时,刻蚀加工误差为 6.77 μm ,这已经完全满足技术要求。因此,选择飞秒激光的光斑尺寸为 40 μm ,重叠率为 25%。

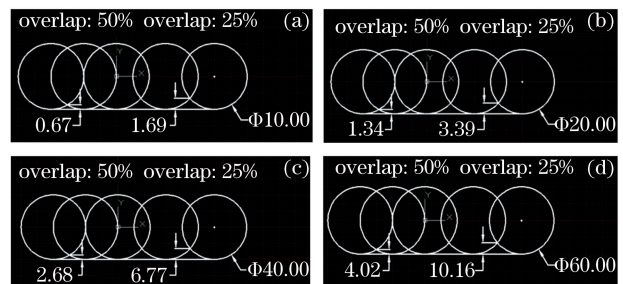


图 6 光斑直径和光斑重叠率对刻蚀加工精度的影响。

(a) 10 μm ; (b) 20 μm ; (c) 40 μm ; (d) 60 μm

Fig. 6 Influence of spot diameter and spot overlap rate on etching precision. (a) 10 μm ; (b) 20 μm ; (c) 40 μm ; (d) 60 μm

3.2.2 激光功率对刻蚀效果影响的实验分析

不同的激光功率下, Tedlar 复合材料-铝膜刻蚀后的表面微观形貌如图 7 所示。从图 7 可以看到,当激光功率为 2.5 W 时,金属铝薄膜未被刻蚀干净,在相邻激光脉冲光斑的搭接区域中存在大量的残留金属铝,原因在于光斑搭接区域中就存在几微米的激光刻蚀盲区,当激光功率偏低且激光扫描间距设置偏大时,这个区域中的铝薄膜将会很难完全去除,随着功率升高至 3.0 W,表面残留的铝含量减少;当激光功率增大至 3.5 W 时,复合材料表面的金属铝薄膜基本刻蚀干净,残留的铝含量较少,该部分金属铝的残留量非常少,原因在于由镀铝膜层表面状态的不均匀导致微量铝的残留;当激光功率为

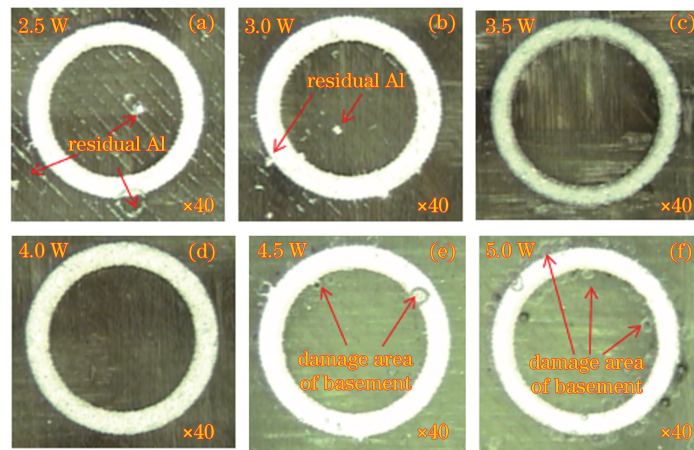


图 7 不同激光功率下复合材料表面刻蚀的微观形貌。(a) 2.5 W;(b) 3.0 W;(c) 3.5 W;(d) 4.0 W;(e) 4.5 W;(f) 5.0 W

Fig. 7 Micromorphology of surface etching of composite materials under different laser powers. (a) 2.5 W; (b) 3.0 W; (c) 3.5 W; (d) 4.0 W; (e) 4.5 W; (f) 5.0 W

4.0 W 时,基底表层金属铝薄膜被完全去除,且未对基底 Tedlar 材料造成损伤;当激光功率为 4.5 W 时,刻蚀区域附近出现基底损伤的情况,在刻蚀区域边界处尤其明显,这种损伤具体表现为烧蚀的点坑,主要是因为激光扫描刻蚀采用勾边加填充的加工方式以保证金属铝膜刻蚀完全,因此在刻蚀区域边界处会产生二次重叠刻蚀,如果激光功率偏大,由于热积累效应的存在会在刻蚀边界处易出现基底损伤的现象;当激光功率为 5.0 W 时,刻蚀区域的基底会受到大面积损伤,并且损伤区域扩展至刻蚀边界区域的铝膜处,过高的激光功率使得基底与薄膜界面处所产生的温度高于 Tedlar 的最高使用温度,从而激光刻蚀过程会对基底材料造成损伤。因此,当使用飞秒激光刻蚀金属 Tedlar 复合材料-铝膜时,最佳的刻蚀激光功率为 4.0 W。

仿真结果表明,刻蚀过程中激光的功率应小于 4.9 W,但实验研究结果表明使用 4.0 W 的激光功率进行刻蚀,完整性最好,因为当激光功率为 4.5 W 时,Tedlar 复合材料的基底已有损伤迹象,主要原因是仿真分析过程中只考虑了界面处的热传导效应,对热积累效应所引起的能量传导并未考虑,因此造成实验过程确定的最佳激光功率小于仿真模拟得到的激光功率的极限值(4.9 W)。

3.2.3 激光扫描速率对刻蚀效果影响的实验分析

激光扫描速率的选择应在兼顾加工效率的同时确保一定的光斑搭接率,以保证在激光扫描刻蚀的过程中不会出现扫描间断点。实验过程中其他工艺参数不变(激光功率为 4.0 W,光斑直径为 40 μm),调整激光扫描速率以观察复材试板表面的金属薄膜

振子图形,结果如图 8 所示。

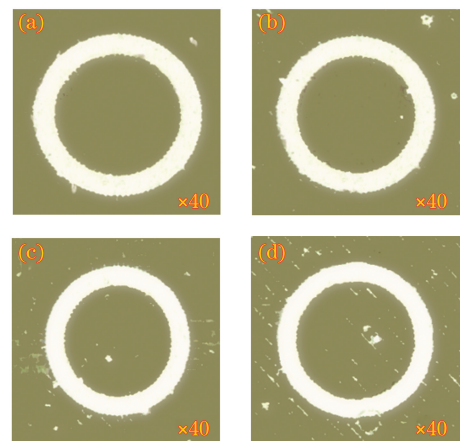


图 8 不同激光扫描速率下复合材料的表面微观形貌。(a) 500 mm/s; (b) 550 mm/s; (c) 600 mm/s; (d) 650 mm/s

Fig. 8 Surface morphology of composites at different laser scanning rates. (a) 500 mm/s; (b) 550 mm/s; (c) 600 mm/s; (d) 650 mm/s

从图 8 可以看到,当激光扫描速率为 500 mm/s 时,此时光斑重叠率为 37.5%,金属铝膜被完全刻蚀去除;当激光扫描速率为 550 mm/s 时,光斑重叠率为 25%,此时金属铝薄膜基本刻蚀干净,只存在极少量的金属铝残留;当扫描速率增大至 600 mm/s 时,光斑重叠率为 0,但是出现了较多含量的刻蚀金属铝残留;当扫描速率增大至 650 mm/s,残留的铝呈现连续的条状形态。实验结果与前述模拟仿真结论一致。过低的扫描速率会导致光斑重叠率较高,相同区域接受过高的激光能量会对 Tedlar 复合材料的基底造成热损伤,影响复合材料的使役性能。

综合考虑加工性能及加工效率方面,确定最佳的飞秒激光刻蚀的扫描速率为 500 mm/s。

3.2.4 优化飞秒激光刻蚀工艺条件下的刻蚀结果分析

通过对飞秒激光刻蚀 Tedlar 复合材料-铝膜进行仿真分析及相关实验验证,可以确定飞秒激光刻蚀最佳的工艺参数。设定光斑直径为 40 μm ,激光功率为 4.0 W,刻蚀速率为 500 mm/s,对金属铝膜/复合材料组合体系进行飞秒激光刻蚀,刻蚀图形阵列单元的显微照片如图 9 所示,刻蚀后的整体效果如图 10 所示。从图 9 和图 10 可以看到,刻蚀图形阵列整齐规整,表面铝膜刻蚀区域干净,残留的金属铝含量极少。使用非接触三维曲面图形测量分析设备(CNC670)分别对刻蚀图形的尺寸及相对位置进行测量,测试精度均优于 10 μm ,满足技术要求。



图 9 优化工艺条件下刻蚀图形阵列单元的显微照片
Fig. 9 Micrograph of etched pattern array elements under optimized process conditions

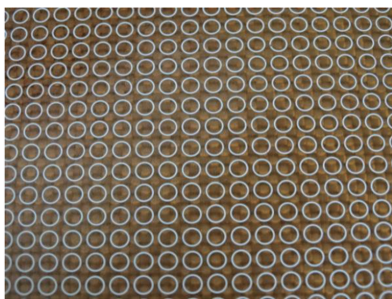


图 10 优化工艺条件下 Tedlar 复合材料-铝膜飞秒激光刻蚀后的整体效果
Fig. 10 Overall effect of Tedlar composite and aluminum film after femtosecond laser etching under optimized process conditions

4 结 论

通过仿真模拟与实验验证的方法对飞秒激光刻蚀 Tedlar 复合材料-铝膜的过程进行研究。模拟仿真结果表明,激光作用在铝膜表面后极短的时间内,温度快速升高并超过铝的熔点,刻蚀区域内铝膜被

快速刻蚀去除;界面处的温度随着飞秒激光刻蚀功率的增大而升高,当激光功率从 3.0 W 增加到 5.5 W 时, Tedlar 复合材料与铝膜界面温度从 417.68 K 升高到 513.19 K;当温度超过 Tedlar 材料临界的使用温度(497 K)时,会对基底造成损伤,影响本征材料的使用性能;当扫描速度从 350 mm/s 增大至 600 mm/s 时,飞秒激光刻蚀过程中出现的间断点尺寸从 1.2 μm 增大到 2.7 μm ,造成激光刻蚀加工尺寸误差高于 10 μm ,所以选择的扫描速率应当小于 600 mm/s。飞秒激光刻蚀的实验结果表明,当激光光斑的直径为 40 μm 、激光功率为 4.0 W 和扫描速率为 500 mm/s 时,激光刻蚀后的材料表面干净,残留的铝含量极少,刻蚀图阵列整齐排列,刻蚀图形尺寸精度及相对位置精度均优于 10 μm ,满足技术要求。

参 考 文 献

- [1] Yang X, Xu L, Yang C H, et al. High-quality ghost imaging based on joint bilateral filter[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411002.
杨旭, 徐璐, 杨成华, 等. 基于联合双边滤波的高质量关联成像[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411002.
- [2] Zhang L H, Chen P. Application of advanced resin matrix composite in satellite antenna system [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(4): 1-5.
章令晖, 陈萍. 先进树脂基复合材料在卫星天线系统中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(4): 1-5.
- [3] Zhang D C, Zhang Y P, Huang F Q, et al. Application of carbon fiber composite materials in satellite antenna structure [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2018, 34(3): 52-55.
张登材, 张义萍, 黄福清, 等. 碳纤维复合材料在星载天线结构中的应用[J]. 电子机械工程, 2018, 34(3): 52-55.
- [4] Zhang B M, Liu S. Investigation on status and prospective application of composite multifunctional structures technology [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 493-497.
张博明, 刘双. 航天器多功能结构的研究现状及其应用前景[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 493-497.
- [5] Yang J P, Chen X K, Wu G, et al. Mechanism of nano-second laser ablation of metallic thin film on composite material [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603031.
杨建平, 陈学康, 吴敢, 等. 纳秒激光刻蚀复合材料金属薄膜机制研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603031.
- [6] Zhang F, Zeng X Y, Li X Y, et al. Laser etching and

- cutting printed circuit board by 355 nm and 1064 nm diode pumped solid state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(10): 1637-1643.
- 张菲, 曾晓雁, 李祥友, 等. 355 nm 和 1064 nm 全固态激光器刻蚀印刷电路板[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1637-1643.
- [7] Ni C, Wang M D, Shi K M, et al. Forming micro lines by etching of FR-4 copper clad laminate with femtosecond laser[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(4): 410-418.
- 倪超, 王明娣, 施克明, 等. 飞秒激光刻蚀 FR-4 覆铜板成形微细线路研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(4): 410-418.
- [8] Shi F, Zhu Z W, Cheng X A, et al. The evolution of coating threshold damage to peeling off under femtosecond laser irradiation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(3): 361-366.
- 石峰, 朱志武, 程湘爱, 等. 飞秒激光作用下薄膜的阈值损伤到膜层剥落[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(3): 361-366.
- [9] Xiao R S, Zhang H Z, Huang T. Recent progress in femtosecond pulsed laser processing research [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 176-186.
- 肖荣诗, 张寰臻, 黄婷. 飞秒激光加工最新研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 176-186.
- [10] Li M, Zhang L, Luo F, et al. Experimental research on the ablation of lamination composite films [J]. Applied Laser, 2010, 30(1): 10-14.
- 李牧, 张黎, 罗飞, 等. 局域外热源下层合材料烧蚀特性研究[J]. 应用激光, 2010, 30(1): 10-14.
- [11] Chung C K, Tan T K, Lin S L, et al. Fabrication of sub-spot-size microchannel of microfluidic chip using CO₂ laser processing with metal-film protection [J]. Micro & Nano Letters, 2012, 7(8): 736.
- [12] Ren Q H, Xie F Z. Research on simulation and design of doubly-fed motor speed control system [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2011, 12(1): 55-57, 65.
- 任启宏, 谢发忠. 异步机双馈调速系统的设计与实现[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2011, 12(1): 55-57, 65.
- [13] Guo H F, Li J L, Sun T. On the research progress of laser cutting technology [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 30(4): 71-78.
- 郭华锋, 李菊丽, 孙涛. 激光切割技术的研究进展[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2015, 30(4): 71-78.
- [14] Qiao L L, Chu W, Wang Z, et al. Three-dimensional microfabrication by shaped femtosecond laser pulses [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126012.
- 乔玲玲, 储蔚, 王哲, 等. 基于整形飞秒激光脉冲的三维微纳制备 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126012.
- [15] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
- [16] Chen L, Liu X D, Liu J, et al. Microgroove etching with femtosecond laser on quartz glass surface [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2314001.
- 陈亮, 刘晓东, 刘静, 等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2314001.
- [17] Maekawa S, Shibasaki K, Kurose T, et al. Tear propagation of a high-performance airship envelope material [J]. Journal of Aircraft, 2008, 45(5): 1546-1553.
- [18] Suslova A. Multi-dimensional simulation and experimental benchmarking of ultrashort pulsed laser interactions with metallic targets [D]. West Lafayette: Purdue University, 2018.
- [19] Li T, Zhou C L, Liu Z G, et al. Simulation of laser ablation of crystalline silicon solar cells by ANSYS [C]//2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), April 16-18, 2011, Xianning, China. New York: IEEE Press, 2011: 5228-5231.
- [20] Guo Z N, Liu X H, Zhang Z H. Simulation and verification of three-dimensional shape measurement method for composite surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 191202.
- 郭志南, 刘小红, 张宗华. 复合表面三维形貌测量方法的仿真与验证 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 191202.
- [21] Li M, Zhang Q, Yang D, et al. Femtosecond laser writing of depressed cladding waveguide and its applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111427.
- 李萌, 张茜, 杨栋, 等. 飞秒激光加工凹陷包层波导及其应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111427.
- [22] Cui Y, Zhang H Y, Zhao Y A, et al. Microscopic properties changes of Au film under action of femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0203001.
- 崔云, 张晗宇, 赵元安, 等. 飞秒激光作用下金膜的微观特性变化 [J]. 中国激光, 2019, 46(2):

- 0203001.
- [23] Zang Y N, Ni X W, Chen Y B. Simulation of long pulsed laser drilling on metal based on birth and death method of ANSYS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0603005.
臧彦楠, 倪晓武, 陈彦北. 基于 ANSYS 生死单元法的长脉冲激光金属打孔仿真 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603005.
- [24] Qian D H, Wei L, Xie H Y. Numerical simulation of temperature field pulse laser marking hard brittle material based on ANSYS [J]. Optical Technique, 2013, 39(6): 530-534.
钱丹浩, 魏龙, 谢海银. 基于 ANSYS 的硬脆性材料脉冲激光打标温度场数值模拟 [J]. 光学技术, 2013, 39(6): 530-534.
- [25] Liu Y X, Liu S B, Chen T. Mechanism of ablation in short-pulse laser-copper target interaction [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1271-1274.
刘院省, 刘世炳, 陈涛. 短脉冲激光刻蚀加工铜材料的机制 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8): 1271-1274.

Femtosecond Laser Etching of Aluminum Film on Tedlar Composite Surfaces

Shang Kaiwen¹, Wu Gan^{1*}, Liu Xiaoli², Yang Jianping¹, Wang Rui¹

¹ Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China;

² College of Energy Engineering, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China

Abstract

Objective The materials system of Tedlar composite-aluminum film, which has the advantages of high specific strength and modulus, light weight, good stability, and high reflectivity, can be used for frequency choice (Frequency Selecting Surfaces, FSS) preparation. FSS are widely used in the field of spatial filters, radar antenna masks, antenna array radar scattering cross sections, reflectors for transmitted and reflected electromagnetic waves in different spectra, and so on. With the development of satellite antennas to high-frequency bands, the graphics size of the FSS unit is required to be smaller and smaller, and the dimensional accuracy is required to be higher. At present, the market has an urgent processing precision demand of less than 10 μm , the traditional microprocessing technology being unable to meet the technical requirements. The technology of a femtosecond pulse laser has the characteristics of short pulse width and high peak power. It has little thermal effect on the etching process of composite-aluminum film, and the overall effect of etching the boundary of graphic unit is better than with a nanosecond laser. Therefore, there are important theoretical significance and application value to carrying out relevant studies on femtosecond laser etching of aluminum film on a Tedlar composite substrate.

Methods In this paper, the effects of laser power, laser spot diameter, and scanning rate on the properties of Tedlar composite substrate - 2 μm aluminum film using femtosecond laser etching technology are studied by the method of combining theoretical simulations and experiments. The optimal technological parameters are obtained by theoretical optimization using ANSYS 14.0 software. The femtosecond laser etching composite technology under different process parameters is verified using Pharos-type equipment, and the surface morphology and sample size of the etched-processed samples are tested using noncontact three-dimensional surface graphic analysis equipment.

Results and Discussions The simulation results show that the femtosecond laser etching pulse laser beam has enough energy to make the crystal lattice temperature exceed the melting point of aluminum in a very short time so that the aluminum film material on the composite substrate surface expands and is etched away rapidly (Fig. 2). The interface temperature increased as the power of the femtosecond laser etching increased. When the laser power increased from 3.0 W to 5.5 W, the interface temperature between the Tedlar composite and aluminum film increased from 417.68 K to 513.19 K, causing damage to the Tedlar substrate and affecting the performance of the intrinsic material (Figs. 3 and 4). When the laser scanning speed increased from 350 mm/s to 600 mm/s, the discontinuous point size increased from 1.2 μm to 2.7 μm in the femtosecond laser etching process, resulting in the size error of the laser etching process becoming greater than 10 μm (Fig. 5). The experimental result shows that the larger the laser spot diameter and the smaller the laser spot overlap ratio are, the higher the scanning etching error

is, while a smaller laser spot size and higher laser overlap ratio are conducive to the improvement of laser etching accuracy. When the spot diameter is $40\ \mu\text{m}$, the overlap ratio is 25%, and the etching error is $6.77\ \mu\text{m}$ so that the technical accuracy requirements of less than $10\ \mu\text{m}$ are fully met (Fig. 6). When the laser power is less than 4.0 W, there is a large amount of residual aluminum. When the laser power is greater than 4.0 W, the substrate is damaged around the etched area. When the laser power is 4.0 W, the aluminum film on the substrate is completely removed and Tedlar composite substrate is not damaged (Fig. 7). When the laser scanning rate is 500 mm/s, the spot overlap rate is 37.5% and metal-aluminum film is completely etched and removed. However, when the laser scanning rate is 550 mm/s, the spot overlap rate is 25%. At this time, the metal-aluminum film is etched clean and only a very small amount of metal aluminum remained. When the scanning rate continued to increase to 600 mm/s and 650 mm/s, the spot overlap rate is 0, but there is a large amount of etched metal-aluminum residue. With the increase of scanning rate, the residual aluminum content increased (Fig. 8). The simulation results are consistent with the experimental results.

Conclusions Under the conditions of laser output power is 4.0 W, spot diameter is $40\ \mu\text{m}$, and scanning rate is 500 mm/s, the surface of the material is clean, the residual aluminum content is very small, the etching diagram is arranged in a neat array, and the size accuracy and relative position accuracy of aluminum film graphics after laser etching are better than $10\ \mu\text{m}$. Femtosecond laser etching technology can meet the high precision requirement of aluminum film micromachining on a Tedlar composite surface.

Key words laser optics; Tedlar composite; femtosecond laser etching; process parameters; aluminum film; simulation analysis

OCIS codes 140.3390; 110.6895; 180.6900