

移动脉冲激光刻蚀金属/聚酰亚胺数值模拟

闫晓东¹, 任妮², 汤富领¹, 薛红涛¹, 张宏伟¹, 杨建平², 刘孝丽²

¹兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050;

²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

摘要 为了研究移动脉冲激光刻蚀单/双层金属/聚酰亚胺复合材料的规律,利用有限元方法建立了移动纳秒脉冲激光刻蚀的通用模型,讨论了移动速度对激光刻蚀深度的影响,分析了金属铝薄膜和双层金属膜在移动脉冲激光作用下的温度变化规律。结果表明,当激光移动速率一定时,刻蚀深度开始时不断增加,但增加幅度逐渐减小,刻蚀深度逐渐趋于一定值,即达到最大刻蚀深度;金属与基底材料界面处的温度变化相较于金属薄膜靠近光源处的在时间上有一定滞后,基底温度在激光关闭后可继续上升;刻蚀双层金属膜时,下层选用较厚且热导率较大的金属薄膜有利于保护聚酰亚胺基底。

关键词 激光技术; 脉冲激光; 移动速度; 铝薄膜; 聚酰亚胺; 温度场; 刻蚀深度

中图分类号 TN249;O430

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402001

Numerical Simulation of Movable Nanosecond Pulse Laser Etching of Metal/Polyimide

Yan Xiaodong¹, Ren Ni², Tang Fuling¹, Xue Hongtao¹, Zhang Hongwei¹,
Yang Jianping², Liu Xiaoli²

¹School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

²Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract In order to study the laws of single- or double-layer metal/polyimide etched by movable pulse lasers, one general model of movable nanosecond pulse laser etching is built with the finite element method. The influence of laser movement speed on etching depth is discussed, and the law of temperature change of the metal Al thin films and double-layer metal thin films etched by movable pulse laser is analyzed. The results show that, with a certain movement speed, the etching depth increases at the beginning, then the increase rate slows down, and the etching depth approaches to one constant maximum value. The temperature change at the interface between the metal and the substrate material lags behind that of the metal thin film close to laser source, and the substrate temperature rises continually after turning off the laser. As for double-layer metal films, the choice of thicker bottom layer with a high thermal conductivity is helpful to protect the polyimide substrate.

Key words laser technique; pulse laser; movement speed; aluminum thin films; polyimide; temperature field; etching depth

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 160.5470; 350.3390

1 引言

随着激光技术的发展,激光加工技术在航空、航天器部件的加工领域得到了广泛应用^[1-2],如激光刻蚀金

收稿日期: 2016-10-10; 收到修改稿日期: 2016-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51135005)、兰州空间技术物理研究所开放基金[合同 510 审支(2015)X07-005 号]

作者简介: 闫晓东(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光加工仿真模拟方面的研究。E-mail: 1512951065@qq.com

导师简介: 汤富领(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事功能材料计算与设计方面的研究。

E-mail: tfl03@mails.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

属/聚酰亚胺复合膜材料。先进的航天器固面天线反射器通常采用一些不可展开的抛物面、双曲面等三维空间曲面,其表面是根据功能需要按照一定规律排布的高精度金属图形阵列^[3]。这类零部件的制造可通过在塑料基底表面直接涂覆功能化金属图形或整体金属化后再定域去除非功能区金属来实现^[4]。由于两种材料在热学、力学性能方面有很大差异,因此需要进行高精度加工且不损坏基底,这有很大的难度。针对这种形式的复合材料,激光刻蚀是较好的选择,它通过高能脉冲激光使基底材料表面涂覆的金属迅速蒸发气化,并通过控制激光或工件的相对运动轨迹形成所需金属功能图形^[5]。袁根福等^[6]利用激光烧蚀与化学腐蚀复合加工方法对试样进行实验加工,并研究了不同激光参数对金属试样加工表面形貌的影响规律和机理。利用模拟仿真的方法建立激光刻蚀数学模型有助于理解刻蚀机理,且模拟计算周期短,可快速获取刻蚀结果,为实验提供数据参考,减少材料浪费。张朋波等^[7]利用数值模拟的方法研究了单个脉冲时间内烧蚀深度和烧蚀形状与材料热物性参数之间的关系。张宏伟等^[8]利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟了在定点脉冲作用下不同激光参数对金属铝刻蚀温度场的影响。刘孝丽等^[9]采用有限元分析软件进一步验证了在脉冲激光作用下基底材料分解产生的薄膜/基底界面分离机制。刘昊等^[10]基于生死单元法建立了三维数值模型,研究了瞬态温度场及熔池几何形貌。以上工作采用模拟方法初步讨论了激光刻蚀机制,但没有研究激光在移动状态下的刻蚀规律,对采用脉冲作用方式的激光在连续工作状态下的模拟涉及较少,并且大多是对单层金属薄膜进行研究,而实际激光加工多采用运动状态下激光连续作用方式,且不可避免地涉及双层金属的刻蚀。

为此,在以上工作基础上,本文提出应用 COMSOL Multiphysics 软件,建立激光在移动状态下刻蚀金属铝/聚酰亚胺和铝/铜(金)双层金属膜/聚酰亚胺复合材料的二维模型,讨论分析不同移动速度对刻蚀结果的影响以及材料内部温度场的变化规律,以期为实验加工提供参考。

2 激光刻蚀模型的建立

选用二维(2D)模型来模拟移动激光刻蚀过程。模型的下部为聚酰亚胺(PI)基底,厚度为 20 μm;上部铝薄膜厚度为 10 μm,宽度均为 250 μm。激光光斑直径为 50 μm,脉冲宽度为 100 ns,频率为 20 kHz,激光斑点以模型中心左端 50 μm 为初始位置,向右以不同速率移动。激光刻蚀单层或双层金属/聚酰亚胺复合材料模型如图 1 所示,其中 v 为激光移动速度。

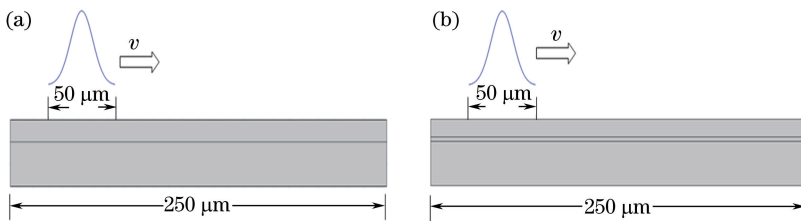


图 1 二维几何模型。(a)单层金属;(b)双层金属

Fig. 1 2D geometric model. (a) Single-layer metal; (b) double-layer metal

所选用金属薄膜/聚酰亚胺组合材料的热物性性质见表 1~4^[11],其中 T 表示热力学温度。

表 1 铝薄膜的热学性能

Table 1 Thermal properties of aluminum film

Parameter	Solid state	Liquid state
Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2700	2700
Specific heat /($[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K}^{-1})^{-1}]$)	$595.66 + 1.51T - 0.0021T^2$	1176.73
Heat conductivity /($[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$)	$39.65 + 1.68T - 0.0054T^2$	$40.94 + 0.073T - 2.28 \times 10^{-5} T^2$
Absorptivity ^[12]	$354.67 \times 10^{-4} \sqrt{-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} T}$	$354.67 \times 10^{-4} \sqrt{10.7 + 1.45 \times 10^{-2} T}$
Melting point /K	933	
Boling point /K	2793	
Latent heat of fusion /($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	10.79	
Latent heat of evaporation /($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	293.4	

表 2 铜薄膜的热学性能

Table 2 Thermal properties of copper film

Parameter	Solid state	Liquid state
Density / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8960	8960
Specific heat / $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K}^{-1})^{-1}]$	$342.76+0.13T+5.54\times 10^{-5}T^2$	516.16
Heat conductivity / $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	$423.74-0.31T+0.001T^2$	$45.33+0.15T-5.70\times 10^{-5}T^2$
Melting point /K	1357.6	
Boling point /K	2836	
Latent heat of fusion / $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	13.050	
Latent heat of evaporation / $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	300.30	

表 3 金薄膜的热学性能

Table 3 Thermal properties of gold film

Parameter	Solid state	Liquid state
Density / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	19300	19300
Specific heat / $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	$399352.2T^{-2}+114.8987+0.03228805T$	169.34
Heat conductivity / $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	$330.64-0.025T-0.00008T^2$	$40.28+0.07T-1.85\times 10^{-5}T^2$
Melting point /K	1338	
Boling point /K	3130	
Latent heat of fusion / $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	12.550	
Latent heat of evaporation / $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	334.4	

表 4 聚酰亚胺的热学性能

Table 4 Thermal properties of polyimide

Material	Density / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Specific heat / $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K}^{-1})^{-1}]$	Heat conductivity / $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	Melting point /K
Polyimide	1420	2000	0.385	443

为了便于计算并保证计算精度,需对模拟过程进行必要的假设^[8],采用与文献[8]一致的边界条件和传热方程。

模拟中所使用的是脉宽只有 100 ns 的脉冲激光。间歇式的工作方式使激光脉冲拥有很大的输出功率,因此工业生产中常用它对试样进行刻蚀。考虑到脉冲激光的工作机理不同于连续激光的,即脉冲激光通过间歇加热的方式获得很高的输出功率,金属薄膜在移动激光作用下经历的是加热—部分气化—冷却的循环过程,因此模拟过程应当分阶段进行。由于加热时间非常短(0.1 μs),而冷却时间相对较长(约为 50 μs),因此,在加热和冷却阶段分别采用不同的计算时间步长(均分成 100 步进行计算)。利用加热阶段结束时的温度场和刻蚀线,建立冷却阶段的温度场和初始模型。激光移动速度为 300 mm/s 时,经历第一个脉冲后,冷却阶段待输入几何模型如图 2 所示,其温度场如图 3 所示。

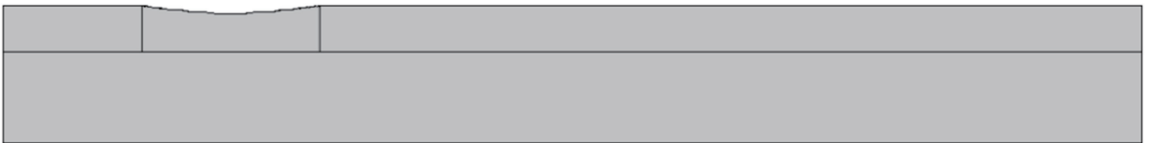


图 2 第一个冷却阶段输入的几何模型

Fig. 2 Geometric model input at the first cooling stage

3 模拟结果

3.1 激光移动速度对刻蚀深度的影响

激光移动速率为 300 mm/s、激光功率为 6 W 时,加载 6 个激光脉冲后的刻蚀轮廓如图 4 所示。

从图 4 容易看出,在加载 1~3 个脉冲后金属薄膜刻蚀深度增加较大,随着激光束向右移动,4~6 个脉冲过后刻蚀深度变化很小,深度趋于某一定值,整个刻蚀轮廓呈现出盆状。图 5 为 $v=300$ mm/s 时刻蚀深度随脉冲个数的变化曲线。

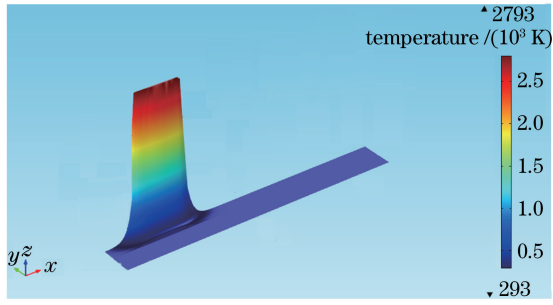


图 3 第一个冷却阶段输入的温度场

Fig. 3 Temperature field input at the first cooling stage

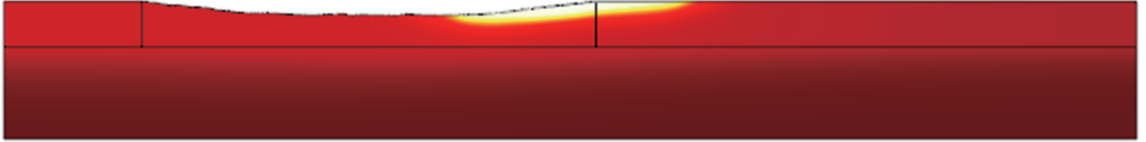


图 4 6 个激光脉冲后的刻蚀线变化

Fig. 4 Change of etching profile after six laser pulses

由图 4、5 可知,当激光功率为 6 W、移动速率为 300 mm/s 时,金属铝薄膜刻蚀深度为 3.03~3.04 μm 。为了达到满意的刻蚀效果,必须根据激光及金属薄膜参数选用合适的激光移动速率。图 6 为不同速率下刻蚀深度随激光脉冲个数的变化情况。

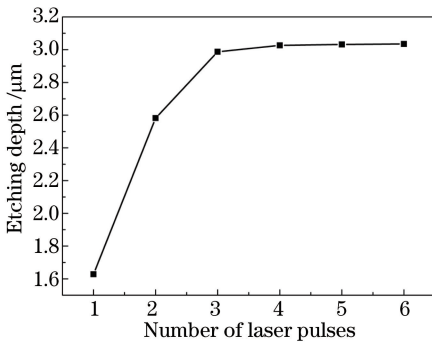


图 5 刻蚀深度随脉冲个数的变化 ($v=300$ mm/s)

Fig. 5 Change of etching depth with number of laser pulses ($v=300$ mm/s)

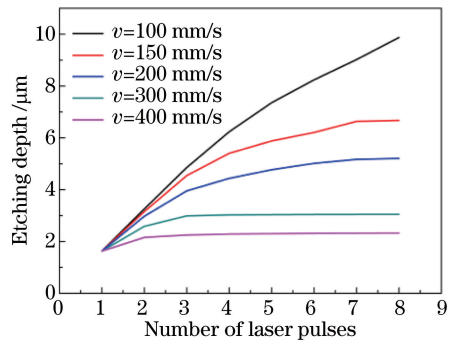


图 6 不同速率下刻蚀深度随激光脉冲个数的变化

Fig. 6 Change of etching depth with number of laser pulses under different etching speeds

从图 6 可以看出,当激光移动速度为 400 mm/s 时,刻蚀深度最小;在第二个脉冲过后,刻蚀深度基本趋于定值。随着激光移动速率的减小,稳定阶段刻蚀深度逐渐增加。当移动速率为 100 mm/s 时,随着脉冲个数的增加,刻蚀深度不断增加,经历 8 个脉冲,刻蚀深度接近 10 μm ,并且还没有达到稳定状态,这说明金属铝薄膜在此移动速率下经历 8 个脉冲后已经被激光刻穿。当 $v=150$ mm/s 时,经历 7 个脉冲后最终刻蚀深度稳定在 6.68 μm 。因此,为了持续施加移动激光,提高激光刻蚀效率,并且不伤害到有机物基底,应当把激光移动速率控制在 100~150 mm/s 范围内。通过分析不同速率下的激光刻蚀深度发现,随着激光移动速率的增加,经历一个脉冲后的刻蚀深度逐渐减小,但是差别不大,这是因为模拟中所采用的激光脉冲宽度非常小,只有 100 ns,速率为 100 mm/s 和 400 mm/s 的激光束在如此短的时间里移动的距离相较于激光半径是极小的,所以在一个脉宽里,不同移动速率对刻蚀深度的影响很小。

按照以上方法,可以模拟出在任意激光参数及金属膜厚度下不同移动速率对应的激光刻蚀深度,从而确定出最佳移动速率,保证得到一定的刻蚀深度。

3.2 激光移动刻蚀过程中温度场分布

脉冲激光刻蚀会在工件中产生温度的骤升和骤降,而金属铝和聚酰亚胺热力学性质相差较大,界面处结合力较小,故很有可能发生材料界面开裂或分层剥落。因此,两种材料临界处的温度变化规律对工程实践具

有重要的参考价值。功率为 6 W 的激光以 150 mm/s 的速率刻蚀复合材料,刻蚀轮廓如图 7 所示,其中激光脉冲宽度为 100 ns,频率为 20 kHz,金属铝薄膜厚度为 10 μm ,聚酰亚胺厚度为 20 μm 。

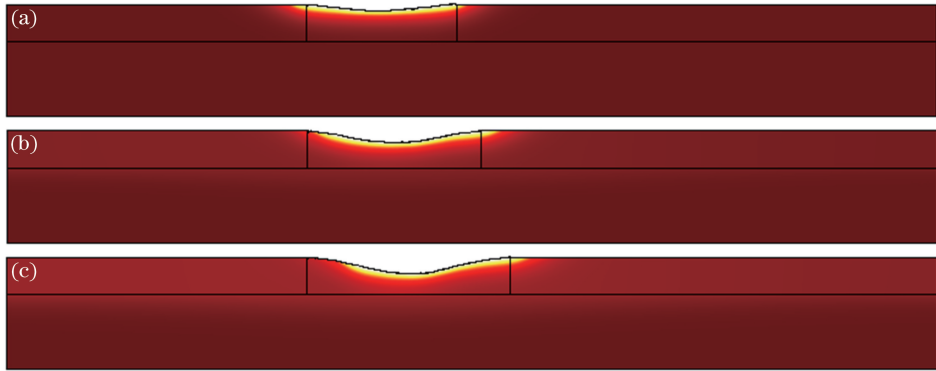


图 7 刻蚀轮廓。(a)经历 1 个激光脉冲后;(b)经历 2 个激光脉冲后;(c)经历 3 个激光脉冲后
Fig. 7 Etching profiles. (a) After 1 laser pulse; (b) after 2 laser pulses; (c) after 3 laser pulses

模拟中选取两点分析其温度变化,如图 8(a)所示。A 点为金属铝与聚酰亚胺界面处一点,B 点为 A 点正上方金属表面上的一点。图 8(b)所示为 A 点经历三个激光脉冲期间的温度变化情况,由于采用的是纳秒级脉冲激光,因此在 100 ns 脉冲宽度内,激光输出极大功率,出现温度的陡增。为了便于分析,A、B 两点在施加第一个脉冲阶段即 0~100 ns 期间的温度变化情况如图 8(c)所示。

从图 8(b)可以看出,界面处 A 点重复经历着温度瞬间升高又缓慢冷却的过程,在每一次加热过后,A 点温度都比上一步加热后的温度高,出现了温度增加的趋势,冷却后温度变化亦是如此;在瞬时升温阶段,将产生 300~500 K 的温差;第一个温升阶段结束时,温度达到 570 K 左右。

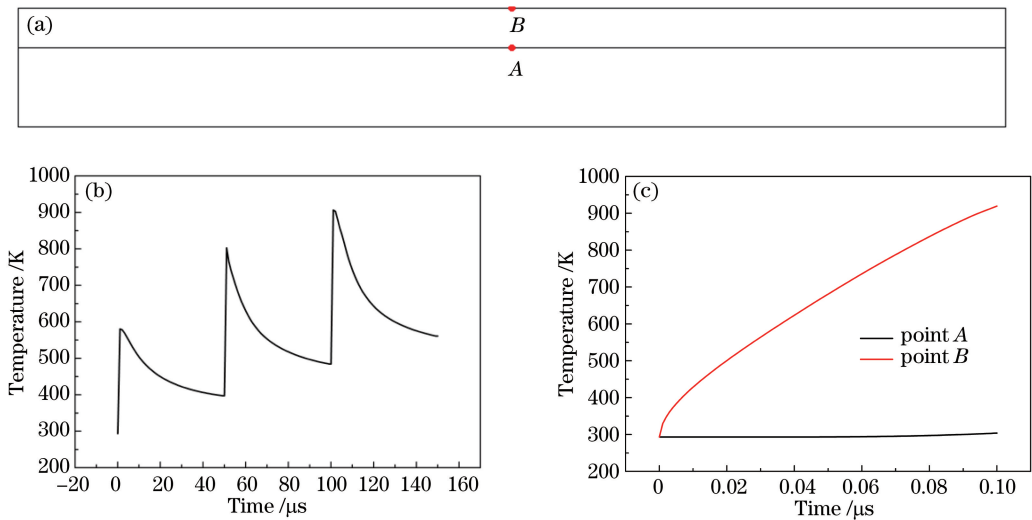


图 8 (a)模拟中 A、B 两点位置示意图;(b)三个激光脉冲期间 A 点的温度变化;
(c) A 点和 B 点在第一个激光脉冲阶段的温度变化

Fig. 8 (a) Schematic diagram of position of points A and B in the simulation; (b) temperature change of point A during 3 laser pulses; (c) temperature change of points A and B at the first laser pulse stage

由图 8(c)可知,在 0~100 ns 的脉冲激光加热阶段,A 点的最大温差仅为 10 K,A 点温度从室温上升到 301 K,而图 8(b)显示此点在经历一个脉冲后,温度前后变化要大得多。这主要是因为施加脉冲激光后,金属内部通过热传导方式进行传热,传热速度相对较慢,进入铝薄膜的激光能量被很浅的表层(10~100 nm)吸收^[13-14],在激光加热结束后,靠近激光光源处薄层金属温度很高,如图 8(c)中 B 点温度变化;而距离激光光源较远处的金属内部温度相对较低,激光光源关闭后,温度较高处的金属继续向下传热,致使 A 点的温度继续上升,由关闭激光时的 303 K 一直上升到 580 K 左右;在整个激光加热阶段 0~40 ns 期间,A 点温度接

近室温,几乎没有变化,在 40 ns 才出现了温度的升高,这也说明界面处温度变化相较于靠近激光光源的金属表层在时间上有一定的滞后,这也是关闭激光后,金属铝和聚酰亚胺结合面处温度继续升高的原因。因此,在使用脉冲激光过程中,即使关闭了激光光源,也很有可能在冷却阶段出现两层材料结合处发生开裂的现象。

3.3 激光刻蚀多层金属薄膜的温度场分布

为了增加金属薄膜与聚酰亚胺之间的结合力,工程中有时需要加入其他金属过渡层^[15],这涉及激光刻蚀两层金属薄膜的情况。因此,对铝、铜复合薄膜进行模拟,研究其刻蚀过程的温度场分布规律。复合薄膜厚度参数分别为上层铝 8 μm 、下层铜 2 μm (称复合薄膜 I)以及上层铝 6 μm 、下层铜 4 μm (称复合薄膜 II)。图 9 为激光刻蚀三种不同金属薄膜时,金属薄膜与聚酰亚胺结合面处某点在经历三个脉冲期间的温度变化情况。

由图 9 可知,每个脉冲过后,结合面处峰值温度在铝铜双层膜情况下比单层铝薄膜的低,且复合薄膜 II 的峰值温度比复合薄膜 I 的峰值温度低。对于每一个激光脉冲,在激光熄灭后,金属与聚酰亚胺结合面处某点因热传导温度急剧上升,然后下降。在温度下降过程中,三次脉冲过后的单层铝薄膜结合面中心点处温度平均比复合薄膜 I 相应位置的温度高 7~55 K,比复合薄膜 II 相应位置的温度高 13~78 K。这主要是因为金属铜比金属铝的热导率高,在热量从铝薄膜表面向下传递过程中,铜薄膜比铝薄膜传热更快,将同等热量传递至更大的区域,这导致铜与聚酰亚胺界面处的局部能量相较于铝与聚酰亚胺界面处的低,从而造成界面处温度较低的现象。金属铜薄膜越厚,同等条件下激光过后界面处温度越低。

为了比较不同材料金属薄膜刻蚀过程中温度场的变化,对激光刻蚀 8 μm 铝、2 μm 铜复合膜和 8 μm 铝、2 μm 金复合膜的温度变化进行模拟。图 10 为激光刻蚀 Al-Cu 和 Al-Au 复合金属薄膜时,金属薄膜与聚酰亚胺界面处某点在经历三个脉冲期间的温度变化情况。

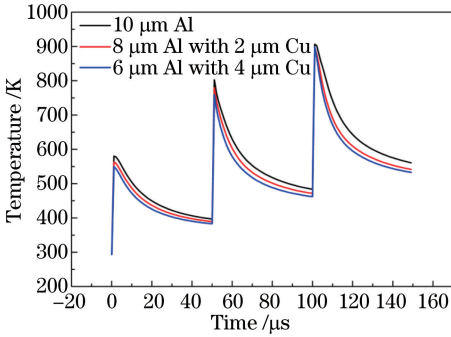


图 9 不同金属薄膜经历三个脉冲后的温度变化

Fig. 9 Temperature change of different metal films after 3 laser pulses

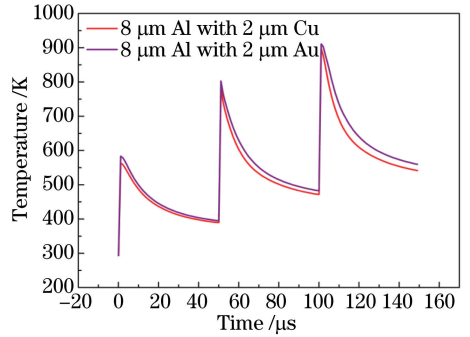


图 10 不同金属薄膜与 PI 界面处某点在经历三个脉冲期间的温度变化

Fig. 10 Temperature change of one point on the interface between different metal films and PI during 3 laser pulses

由图 10 可以看出,刻蚀过程中 Au-PI 界面处温度比 Cu-PI 界面处温度稍高,这也是金属热导率的不同造成的,拥有较高热导率的金属铜可以将金属铝接收到的热量传递到更大的范围,导致界面处温度较低。通过比较不同厚度铜薄膜和不同材质金属薄膜对界面处温度的影响,可以得出,在双层膜刻蚀过程中,下层薄膜使用较厚且热导率较大的金属有利于保护聚酰亚胺基底。

4 结 论

应用 COMSOL Multiphysics 软件建立了移动激光刻蚀金属薄膜/聚酰亚胺复合材料的二维通用模型,利用此模型可以准确计算出激光光源在任意移动速率下对金属铝薄膜的刻蚀厚度,该研究为实际刻蚀参数的选择提供了参考。通过分阶段对输出数据进行筛选处理,准确地模拟出移动刻蚀形貌。金属铝与聚酰亚胺界面处的温度变化较铝薄膜表层有一定的延迟,在激光加热前 40 ns 期间,界面处温度几乎没有变化,停止加热后界面处温度继续上升,这段时间温度变化幅度较大,热应力大,容易发生分层剥落。有金属铜或金中

间层时,中间层的导热性能优于金属铝的,能将一定的热量传递到更大的范围,故金属和聚酰亚胺界面处温度低于单层金属铝加热时界面处的温度。下层使用较厚且热导率较大的金属薄膜有利于保护聚酰亚胺基底。

参 考 文 献

- [1] Dong Peng, Chen Jilun. Current status of selective laser melting for aerospace applications abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(1): 1-5.
董 鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术, 2014(1): 1-5.
- [2] Tian Zongjun, Gu Dongdong, Shen Lida, *et al.* Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(11): 38-42.
田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015(11): 38-42.
- [3] Yang Jianping, Chen Xuekang, Wu Gan, *et al.* Laser ablation and its application in fabrication of spacecraft antennas [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(3): 51-62.
杨建平, 陈学康, 吴 敢, 等. 激光刻蚀技术及其在航天器天线制造中的应用[J]. 航天制造技术, 2011(3): 51-62.
- [4] Jia Zhenyuan, Zhao Kai, Liu Wei, *et al.* Localized and precision removal of metal coating on engineering plastics using NC laser milling[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 94-101.
贾振元, 赵 凯, 刘 巍, 等. 工程塑料表面金属覆层的激光定域精细去除[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1): 94-101.
- [5] Gao Yang, Wang Demiao, Dong Shurong, *et al.* Review on ceramic-loaded quadrifilar helix antennas[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(6): 26-29.
高 阳, 王德苗, 董树荣, 等. 陶瓷介质加载四臂螺旋天线[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(6): 26-29.
- [6] Yuan Genfu, Yao Yansheng, Chen Xuehui, *et al.* Experimental study on the quality of material surface applied laser-chemical combined etching[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 281-283.
袁根福, 姚燕生, 陈雪辉, 等. 激光和化学复合刻蚀加工表面质量的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 281-283.
- [7] Zhang Pengbo, Qin Ying, Zhao Jijun, *et al.* Two-dimensional numerical simulation of laser-ablation of aluminum material by nanosecond laser pulse[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 7120-7128.
张朋波, 秦 颖, 赵纪军, 等. 纳秒激光烧蚀铝材料的二维数值模拟[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7120-7128.
- [8] Zhang Hongwei, Ren Ni, Xue Hongtao, *et al.* Temperature distribution for laser etching of metal thin films on polyimide substrate[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0503009.
张宏伟, 任 妮, 薛红涛, 等. 聚酰亚胺基底金属薄膜激光刻蚀温度场分布[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503009.
- [9] Liu Xiaoli, Xiong Yuqing, Yang Jianping, *et al.* Simulation of temperature field for laser etching of aluminum thin films on polyimide substrate[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0703006.
刘孝丽, 熊玉卿, 杨建平, 等. 激光刻蚀聚酰亚胺基底铝薄膜的温度场模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0703006.
- [10] Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203007.
刘 昊, 虞 钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.
- [11] Du Shaojun, Lu Qisheng, Shu Bohong. Calculation of laser-induced temperature increment and thermal stress of Al-film reflector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(2): 128-130.
杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 激光辐照下铝膜反射镜温升和热应力的计算[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(2): 128-130.
- [12] Xie J, Kar A, Rothenflue J A, *et al.* Temperature-dependent absorptivity and cutting capability of CO₂, Nd:YAG and chemical oxygen-iodine lasers[J]. Journal of Laser Applications, 1997, 9(2): 77-85.
- [13] Wang Jiajin. Laser processing principles and application[M]. Beijing: China Measure Press, 1992: 99-155.
王家金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992: 99-155.
- [14] Sun Yue, Huang Haiming, Gao Suowen. Process of research in laser ablation mechanism[J]. Failure Analysis and Prevention, 2008, 3(2): 58-63.
孙 岳, 黄海明, 高锁文. 激光烧蚀机理研究进展[J]. 失效分析与预防, 2008, 3(2): 58-63.
- [15] Zhu Zhiyuan, Yu Min, Hu Anqi, *et al.* Investigations of aluminum-coated silicon wafer bonding using tin as intermediate layer[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(4): 741-744.
朱智源, 于 民, 胡安琪, 等. 采用 Sn 中介层的覆 Al 薄膜硅片键合技术研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(4): 741-744.