

文章编号 1004-924X(2008)10-1928-08

基于吸收系数修正的硅片激光弯曲模拟与实验

王续跃, 胡亚峰, 许卫星, 吴东江

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 考虑热吸收系数随温度变化的因素, 以硅为对象进行了激光弯曲模拟和实验。借助 APDL 语言编写了激光弯曲成形的仿真程序, 对单脉冲作用过程进行模拟, 以得到单点脉冲周期内的温度分布; 采用 NiCr/NiSi 合金薄膜热电偶对单脉冲作用过程中的温度分布进行测量, 对比上述的温度模拟与测量结果, 修正硅材料的激光综合吸收系数为 0.82。采用有限元分析软件实现了硅片的脉冲激光弯曲成形的仿真和模拟, 并对硅片多次连续扫描的弯曲模拟与弯曲实验进行对比, 误差仅为 0.1° , 验证了仿真程序的有效性, 为硅片的激光弯曲成形提供了理论与实验依据。

关键词: 激光弯曲; 吸收系数; 脉冲激光; 硅片

中图分类号: TN249; TN305 **文献标识码:** A

Modification of silicon absorbing coefficient in laser bending experiment

WANG Xu-yue, HU Ya-feng, XU Wei-xing, WU Dong-jiang

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: By considering thermal absorption factors changed with temperature, the laser bending experiments and simulations were conducted using a silicon material. The laser bending simulation program was written by APDL to simulate the single point pulse action process to obtain the temperature variation on action point in cycle time. An NiCr/NiSi alloy thin film thermocouple was applied to measure temperature distribution of single-pulse action process. By comparing the temperature field simulation results with thermocouple measurement results, the absorption factor of silicon was modified to 0.82. Finite element analysis was used in the simulation of pulse laser bending of silicon, results show that the error between the result of bending simulation and that of experiment is only 0.1° , which indicates that the simulation program is effective and provides theoretical and experimental foundations for laser bending of silicon.

Key words: laser bending; absorbing coefficient; pulsed laser; silicon wafer

收稿日期: 2008-01-30; **修订日期:** 2008-03-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52090101); 国家 863 高技术计划研究发展计划资助项目 (No. 2002AA421230); 辽宁省自然科学基金资助项目 (No. 20062181)

1 引言

脉冲激光加热是一个复杂的瞬间热物理过程,在这一温度急剧变化的过程中,材料对激光的吸收系数会发生变化,随温度升高而增大,加热区域材料的温度变化和应力、应变的变化呈非线性关系。因此,很难用传统的解析方法求解温度场和应力、应变的变化规律。近年来,有限元数值模拟成为激光成形过程分析和弯曲角度预测的一种应用较为广泛的方法^[1-2],从而减少了大量的实验工作。不过,当前的模型大多针对连续激光建立,而且很少涉及脆性材料,因此模拟脉冲激光硅片弯曲成形的过程显得十分必要。

硅属于典型的脆性材料,在常温下不能像金属那样塑性成形。只有当温度超过 790 K 才开始由脆性向塑性转变,超过 920 K 将更利于塑性成形^[3-5]。激光弯曲成形属无接触弯曲,光束可通过透明介质传播,不需额外的工具或外力,且光斑作用影响区很小^[6-7]。利用激光作用产生的热应力弯曲硅微结构,可以摆脱常规硅片弯曲的环境,实现无模、无接触弯曲。此外,还可以将这项技术应用于微结构梁或微镜面的矫正,微结构的连续弯曲成形等^[3]。

脉冲激光硅片弯曲过程中温度与应力应变的变化十分复杂,当模型涉及到非线性弹塑性分析时,计算就更为复杂,即使是计算简单的弯曲变形也需要很长的时间。本文针对脉冲激光硅片弯曲成形的工艺特点,综合考虑计算机的运行效率和仿真结果的准确性,合理细化了有限元模型网格;借助 APDL 语言编写了脉冲激光硅片弯曲的仿真程序。模拟从单点的单脉冲作用过程开始,得到了单脉冲作用周期内温度变化;同时采用 NiCr / NiSi 合金薄膜热电偶对单脉冲作用过程中的温度进行了测量,对比温度的模拟结果与测量结果,修正了温度场模型,用于最终连续扫描过程模拟。对激光多次连续扫描后脉冲周期内的板材变形情况进行分析,给出了硅片的弹塑性变形的合理解释。对激光多次连续扫描进行弯曲试验,进一步验证模型及仿真过程的正确性。

2 模型建立前的准备

2.1 激光弯曲的模型参数说明

硅片几何尺寸为 2 mm × 10 mm × 100 μm;

激光单脉冲能量 E_p 为 0.04 J,脉宽 t_p 为 2 ms,频率 f 为 30 Hz,光斑半径 r 为 0.4 mm,扫描速度 v 为 100 mm/min。激光弯曲成形示意图如图 1 所示:

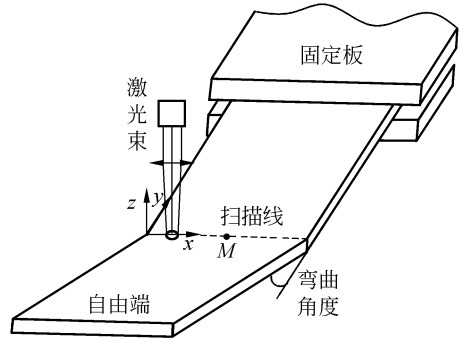


图 1 硅片激光弯曲过程示意图
Fig. 1 Laser bending process for silicon

用适当的激光参数沿 x 方向扫描硅片表面,使板材局部瞬间加热至高温状态,在板厚方向温度梯度的作用下产生弯曲变形。当自由端向激光束方向弯曲,称为正向弯曲;当自由端向背离激光束方向弯曲,称为反向弯曲。

2.2 脉冲激光光束特点与载荷步划分

脉冲激光的特点是激光光束以脉冲的方式,按一定的周期不停地输出光脉冲,且在每一个周期 t 内都伴随着激光的加热过程与冷却过程。模拟加热过程是通过等效热流的形式加载到相应的节点上;加热阶段分 6 个载荷步($t_p/6, t_p/3, t_p/2, 2t_p/3, 5t_p/6, t_p$),保存每个载荷步的运算结果;冷却阶段保存 $t_{c1}, t_{c2}, t_{c3}, t$ 时刻的运算结果(其中 $t=1/f, t_{c1}=t/16, t_{c2}=3t/16, t_{c3}=8t/16$)。载荷步划分如图 2。

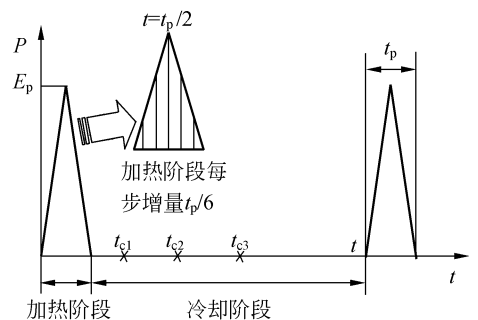


图 2 脉冲激光的输出特性及载荷步划分
Fig. 2 Output characteristics and load-step division of pulsed laser

2.3 脉冲激光光束动态热源的处理

在激光的一个作用脉宽时间内,光束的输出能量可依据脉冲激光光强的时空特性,通过以下计算求得。

对于一个光脉冲,激光输出功率 $P(t)$ 与光束光强 I 存在以下关系:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int I_s(x, y, t) dx dy = P(t) = \begin{cases} E_p \frac{4t}{t_p^2} & 0 < t \leq t_p/2 \\ E_p \frac{4(t_p - t)}{t_p^2} & t_p/2 < t < t_p \end{cases}, \quad (1)$$

式中:

E_p 为一个光脉冲的能量, t_p 为脉宽, $I_s(x, y, t)$ 为光束在焦平面 S 内的光强。求解(1)式可得:

t 时刻光斑中心的光强 $I_0(t)$:

$$I_0(t) = \begin{cases} \frac{8E_p t}{\pi r_0^2 t_p^2} & 0 < t \leq t_p/2 \\ \frac{8E_p (t_p - t)}{\pi r_0^2 t_p^2} & t_p/2 < t < t_p \end{cases}, \quad (2)$$

根据基模光束的光强公式^[8]:

$$I(x, y, z) = I_0(t) \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0(z)^2}\right], \quad (3)$$

式中, r_0 为 z 处光斑半径。同时结合公式(2)可得到激光单个脉冲作用时间内光强分布公式。

$I_0(x, y, t) =$

$$\begin{cases} \frac{8E_p t}{\pi r_0^2 t_p^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right] & 0 < t \leq t_p/2 \\ \frac{8E_p (t_p - t)}{\pi r_0^2 t_p^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right] & t_p/2 < t < t_p \end{cases}, \quad (4)$$

根据公式(4),借助 APDL 语言编写了激光作用区的动态等效热流表 FLUX(x, y, t),用以定义随时间、位置变化的脉冲激光等效。

3 参数化建模与网格划分

为便于分析和对比不同参数(模型几何尺寸,激光参数、硅片的综合吸收系数、扫描次数与起始点位置等)下的温度场与应力应变场,仿真过程的模型建立与网格划分均实现参数化,如图 3。参数设定模块文件(Parameters. mac)主要工作是定义模型几何参数、激光参数、载荷参数。

热分析模块文件(Heat. mac)的主要工作是

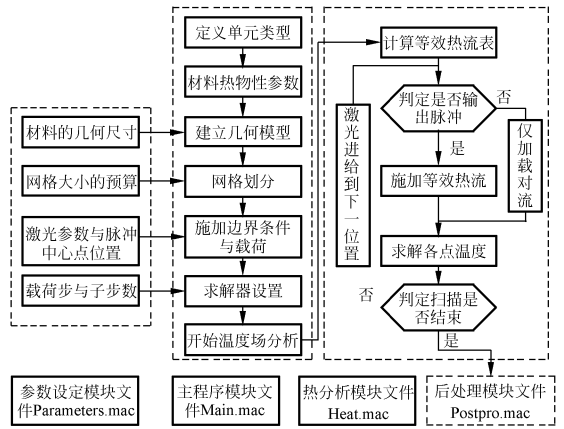


图 3 程序流程图

Fig. 3 Flowchart of program

生成激光等效热流表,在激光作用的位置循环施加热流,保存各载荷步的节点解。

主程序模块文件(Main. mac)主要工作是定义单元类型 Solid70,选定硅片的热物理参数(比热、热导率),预定硅片综合吸收系数 a 为 0.7^[9],调用参数设定模块(Parameters. mac)对硅片进行几何建模、网格划分;生成表面效应单元 Surf152,对各表面施加边界条件;调用热分析模块 Heat. mac 求解。

后处理模块文件(PostPro. mac)主要工作是对运算结果数据提取和汇总。

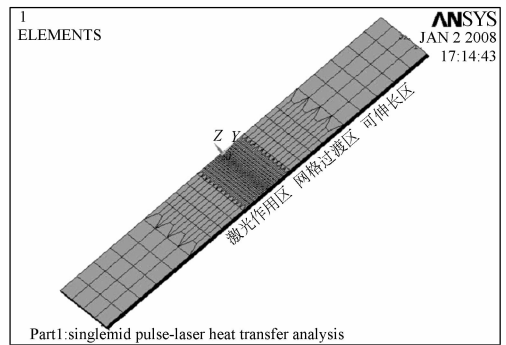


图 4 模型网格分区

Fig. 4 Mesh generation of model

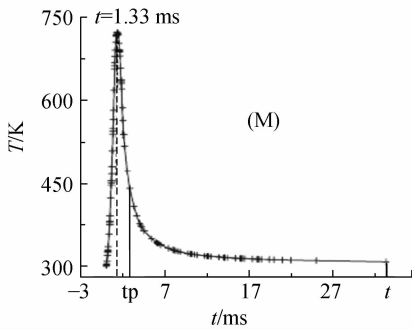
建模过程中将整个模型分为 3 区 6 段:激光作用区、网格过渡区和可伸长区,每区分左右对称的两段。其中,激光作用区主要是承受激光光斑能量,同时也是弯曲成型的主要区域,这个区域要求网格密度较大;为减少计算量,缩短计算时间,网格还应垂直于扫描方向有比例增大;网格过渡

区是将激光作用区的高密度网格过渡到可伸长区的粗大网格;可伸长区的网格较大,而且它的两个左右区域长度均可任意改变,以达到满足不同几何参数情况下的扫描需求。最终的网格划分如图 4 所示。

4 单脉冲温度场的模拟与热电偶测温实验

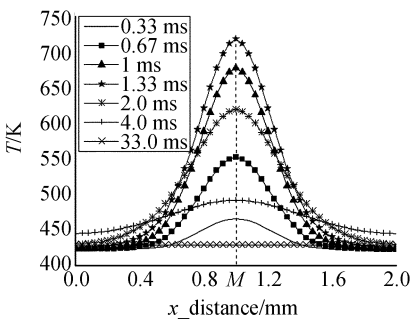
4.1 单脉冲作用过程模拟

脉冲激光弯曲成形是由脉冲点与扫描路径合理搭配的结果,其中研究单个脉冲作用效果是确定弯曲成形工艺参数的基础。为此,对单个脉冲作用在板宽中点 M 处(见图 1)的温度场进行了模拟。



(a) M 点脉冲周期内的温度变化

(a) Temperature variation at point M in a cycle



(b) 扫描线上脉冲周期内的温度分布

(b) Distribution on scanning line in a cycle

图 5 单脉冲作用于 M 点的温度变化与分布

Fig. 5 Temperature variation and distribution at point M in a cycle

图 5(a)显示了单脉冲能量为 0.06 J 时,单个脉冲作用在 M 点时,该点的温度随时间的变化

情况。可见在一个脉冲作用周期内, M 点伴随着一次急剧的升温与降温过程,这与脉冲激光的光束特性有很好的一致性。当脉冲作用时间为 $2t_p/3$ 即 1.33 ms 时,作用点处温度最高,这与脉冲加热阶段的热平衡有关,虽然单脉冲能量在 $t_p/2$ 处达到最大值见图 2 所示,但是此时刻硅片表面吸热的热量大于辐射散热量,温度持续升高,直到 1.33 ms 时刻达到平衡,温度上升到最大值。图 5(b)中还显示了扫描线上板宽度方向不同位置处在单脉冲作用周期内的温度变化情况。可以看出,每一时刻板宽方向的温度都呈对称分布,而且光斑的热影响区很小,基本包含在光斑半径之内。

4.2 薄膜热电偶的制作

从上述单脉冲温度分析可以看出,每一次激光脉冲的作用,都伴随着一次瞬间的升温与降温过程。试验采用实测和定标的方法进行吸收系数修正。把 NiCr/NiSi 合金材料直接镀覆到被测表面上^[10],热电偶因镀层极薄,故响应速度快,可达 μs 级,而且不影响被测表面的温度分布,满足修正材料对激光吸收系数修正的要求。

薄膜热电偶制作流程:安装薄膜靶材,同时清洗硅片,置于载物台上。打开机械泵与分子泵抽真空,并通入 Ar 气。然后打开微波产生装置,设定溅射时间。调节左右线圈功率,在基片上加负偏压,设定靶材上的功率。溅射 1 h 后,随炉冷却 2 h 取出,热电偶的一极制备完毕。以同样的方法制备另一极,制作流程见图 6。

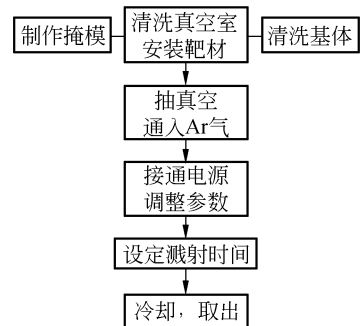


图 6 薄膜热电偶的制作流程

Fig. 6 Process of thin film thermocouple

热电偶参数为:试验基体为单晶硅,尺寸规格 2 mm×10 mm×100 μm ,薄膜 NiCr 和 NiSi 的宽度皆为 1 mm,镀膜厚 1.6 μm ,热电偶为 1 mm

×2 mm×1.6 μm。用 NiCr 丝与 NiSi 丝分别连接对应薄膜，并用导电胶粘固定，作为热电偶的引线。

4.3 薄膜热电偶静态标定

经射频磁控溅射镀膜后，NiCr 与 NiSi 的成分不同于块状材料，导致薄膜热电偶与丝式热电偶的热电特性不同，因此在使用 NiCr/NiSi 薄膜热电偶之前需要对其进行静态标定。

标定采用比较方法，依据温度范围，分别在 HWS-I 型标准水槽(0~100 ℃)，HWY- II 型标准油槽(100~300 ℃)，YG-3 型卧式热电偶检定炉(300~600 ℃)对薄膜热电偶进行标定，一直标定到最大值 600 ℃，其标定结果数据见图 7。

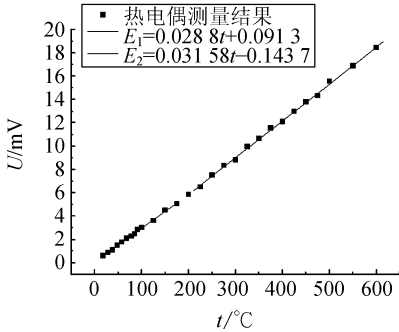


图 7 薄膜热电偶的静态标定数据

Fig. 7 Static calibration of thin-film thermocouple

借助 MATLAB 拟合工具箱，对测得点进行分段拟合，得到薄膜热电偶输出热电势 E 与热电偶热端温度 t 之间的关系式：

$$\begin{cases} E_1 = 0.0288t + 0.0913 & 0 < t \leq 200 \\ E_2 = 0.03158t - 0.1437 & 200 < t \leq 600 \end{cases}, \quad (5)$$

在以 200 为中间点的 3 个分段温度范围内，线性拟合误差均 < 0.41%，从图 7 中可以看出，所制热电偶的线性特性较好。

4.4 温度测量与吸收系数的修正

测温装置采用美国 Datatranslation 公司的数据采集板 DT9800，并结合数据采集分析软件 DEWESOFT，对脉冲作用过程中测温点电压进行信号采集，实时测量。温度测量装置如图 8 所示。

试验选定采样频率为 50 kHz，激光器单脉冲能量为 0.04 J，脉宽为 2 ms，光斑半径为 0.4 mm，这些参数与模拟参数相同。伴随着光脉冲的作用，热量很快传到热电偶，并在 NiCr/NiSi 丝

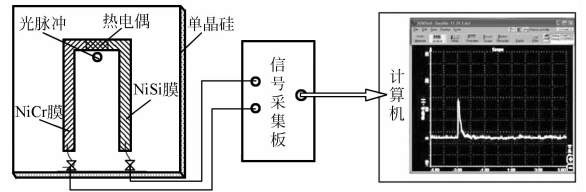


图 8 温度测量装置

Fig. 8 Temperature measurement equipment

两端形成温差，数据采集板把传来的温度转变为相应的电信号，经 DEWESOFT 软件处理，输出电压变化值。

为便于比较，先将热电偶测量结果按照热电偶静态标定的热电势与温度间的关系，转换为对应的温度，然后和单脉冲作用过程的模拟结果进行比较。由图 9 可以看出，模拟结果比实际测得热电偶输出结果偏小。

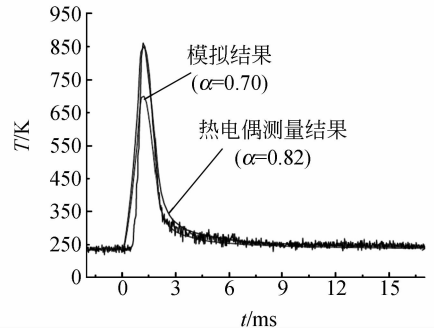


图 9 模拟与测量结果的比较

Fig. 9 Comparison between simulating and measuring results

模拟结果比热电偶测量结果偏小，这是由于硅片表面存在着对流和辐射换热，模拟模型有简化误差，而检测结果更符合实际情况。

表 1 不同测量点对应的综合吸收系数

Tab. 1 Synthetic thermal absorption coefficients at different measurement points

d (mm)	α
0.2	0.82
0.4	0.83
0.6	0.82
0.8	0.83
1.0	0.81

为了较好地确定综合吸收系数 α ，分别测量

了距光斑中心点不同位置 d 处的电势,并提取温度场对应各点的温度,按静态标定的比例系数进行转化,最后进行综合吸收系数的修正。共取 5 组热电偶测量数据进行比较,见表 1。最终取各点综合吸收系数的平均值 0.82,用于应力应变的模拟运算。

5 多次扫描模拟与试验

5.1 多次连续扫描过程模拟与分析

把修正后的综合吸收系数更新到参数设定模块文件(Parameters. mac)中,并修改热分析模块文件(Heat. mac)中的循环次数参数,就可以进行多次连续扫描的温度场模拟。

利用温度场模拟得到的随时间变化的节点温度作为载荷进行应力应变的分析。应力应变分析采用 SOLID45 三维实体结构单元,该单元由 8 个节点结合而成,每个节点有 $xyz3$ 个方向的自由度;具有塑性,蠕变,膨胀,应力强化,大变形和大应变的特征^[11],非常适合激光弯曲变形的模拟。

为准确分析脉冲激光弯曲变形的过程,对激光多次连续扫描过程中脉冲作用周期时间内的变形过程进行分析。图 10 为激光第一次连续扫描后,自由端的位移随时间的变化情况。

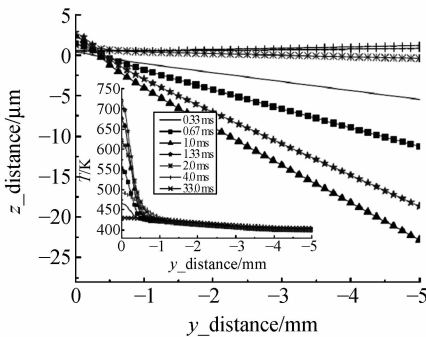


图 10 不同时刻自由端的位移变化

Fig. 10 Displacement variations of free end in cycle time

从图 10 中的不同时刻的温度变化可以看出在光脉冲一次连续扫描作用过程中,扫描线上各点的温度都经历了一次剧烈升高,因而在板厚方向上形成较大的温度梯度,产生的热应力致使激光作用区反向弯曲,自由端产生负方向的位移,当脉冲作用时间为 1 ms 时自由端下降到最低值。随着热量在硅片内的传导与扩散,温度梯度减小,

自由端逐渐反弹到初始位置。可以判断此次激光作用过程产生的变形为弹性变形。图中的温度显示,经过一次连续扫描,硅片基体的温度已经到达了 400 K。但硅片扫描线上各点温度变化的整个过程,都没超过硅片的塑性点温度。

图 11 为激光两次连续扫描后,自由端的位移随时间的变化情况。从图中可以看到当激光两次连续扫描后,自由端同样经历了下降与上升过程,但与第一次作用不同,这次脉冲作用结束时,自由端并没有回弹到原位置,而是向上稍稍偏离了原位置,即发生了塑性变形,硅片产生了正向弯曲。

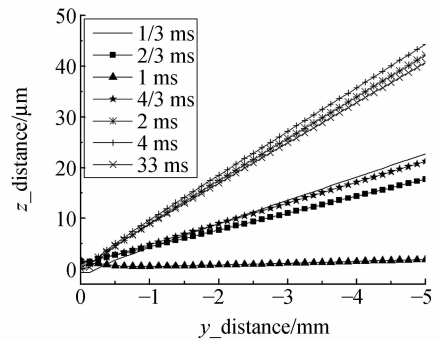


图 11 不同时刻自由端的位移变化

Fig. 11 Displacement variations of free end in cycle time

为了更好地解释产生弹性变形和塑性变形的原因,提取两次连续扫描后的扫描线上 M 点的温度变化情况如图 12。可以看出,经两次连续扫描,硅片基体的温度已经达到了 560 K,并且随着脉冲激光的作用,作用点温度很快就达到了 790 K 的脆塑转变温度,最高点温度可以达到较好塑性变形温度 920 K。

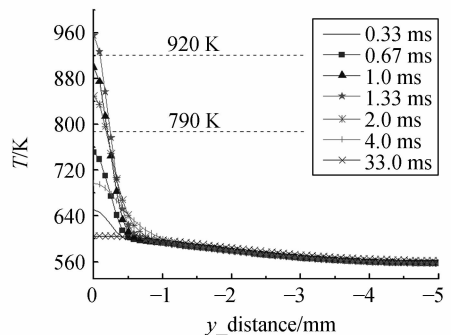


图 12 不同时刻温度变化

Fig. 12 Temperature variations in cycle time

从温差上即温度梯度大小对比,两次连续扫描作用过程在扫描线上产生的温度梯度基本一致,即产生的有效热应力大小等同。不同的是,第二次连续扫描作用过程中硅片基体的温度要比第一次高,而且激光作用点的温度还达到了较好的塑性变形温度 920 K,所以相同热应力情况下,第二次就出现了塑性变形,产生了硅片弯曲。

因此,可以这样描述脉冲激光的硅片弯曲过程:对于激光作用的每一个光脉冲都会引起自由端的上下波动,当扫描区温度低于硅的塑性点温度时,所有的波动都为弹性振动,只有当扫描区温度超过塑性点温度,激光作用才能引起硅片的塑性变形。仿真程序经过 6 次连续扫描后可以明显看出硅片已经发生了弯曲,其变形如图 13 所示,模拟结果的弯曲角度为 6.4° 。

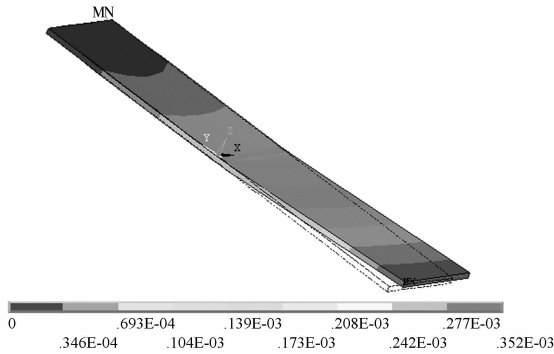


图 13 激光扫描 6 次后的弯曲效果

Fig. 13 Bending results after scanning 6 times

5.2 多次连续扫描试验

试验采用与模拟相同的材料参数、几何参数、激光参数,整个脉冲激光作用硅片过程在 JK701 型 YAG 固体激光器的四轴($x y z c$)联动工作台上进行。

将样件一端固定,激光扫描作用过程如图 1 所示。激光单脉冲能量取 0.04 J,脉宽为 2 ms,频率 30 Hz,离焦量为 16 mm(光斑半径 0.4 mm),扫描速度为 100 mm/min,分别连续扫描 1~6 次,记录每次扫描过后的弯曲角度,然后对比模拟结果和试验结果。

图 14 为每次扫描结束记录的弯曲角度,对于第一次扫描,硅片没有发生任何弯曲现象,从第二次开始硅片出现明显的弯曲现象,此后弯曲角

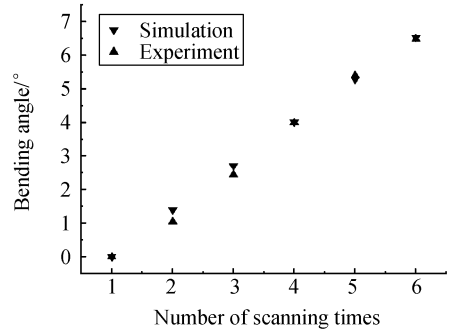


图 14 扫描次数与弯曲角度间的关系

Fig. 14 Relationship between scanning times and bending angles

度也近乎线性增加,这些都与仿真结果一致。而对于仿真过程,除了第二次出现弯曲时的角度比实验结果略高外,其他扫描次数对应的弯曲角度都与实验结果保持一致,所以仿真结果是完全有效的。

6 结 论

(1)针对激光加热过程中,硅片对激光吸收系数随温度变化的特点,通过 ANSYS 分析软件建立模型,利用 APDL 语言编写激光扫描过程的仿真程序,对脉冲激光硅材料的弯曲成形进行了模拟。

(2)通过对比单点温度场的模拟结果和薄膜热电偶的测量结果,提出一种对材料激光吸收系数的修正方法,得到了材料对激光的综合吸收系数,有效降低了硅片的激光弯曲仿真模拟误差。

(3)对多次连续扫描硅片的弹塑性变形原因做了合理的解释。对于脆性材料硅而言,每一个光脉冲的作用都会引起激光作用区的一次上下波动过程,当作用区的温度低于塑性点温度时,这些过程都属于弹性波动,此时硅片不会出现弯曲效果。当作用区的温度超过塑性点温度时,波动过程就会伴随着塑性变形、波动的最终位置偏离原位置,产生弯曲变形。

(4)硅片的脉冲激光弯曲实验进一步验证了热源模型和模拟过程的有效性。经 6 次连续扫描激光弯曲试验得到了 6.5° 的弯曲,试验结果和模拟结果达到了很好的吻合。

参考文献:

- [1] 陈彦宾,李俐群,林高扬. 激光弯曲成形温度场的有限元数值模拟[J]. 应用激光, 2002, 22(2):145-149.
CHEN Y B, LI L Q, LIN SH Y. The FEM simulation of the temperature field in laser forming [J]. *Applied Laser*, 2002, 22 (2):145-149. (in Chinese)
- [2] 孟凡胜,熊仁生,刘朝晖. 高速再入体热辐射模型的分析与修正[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):575-579.
MENG F SH, XIONG R SH, LIU ZH H. Analysis of hypersonic reentry radiation model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):575-579. (in Chinese)
- [3] EXNER H, LÖSCHNERU. Contactless laser bending of silicon microstructures[J]. *SPIE.*, 2003, 5116:383-392.
- [4] 王续跃,王劲松,徐文骥,等. 铝合金板快速加热弯曲的参数预测[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6):915-921.
WANG X Y, WANG J S, XU W J, *et al.*. Parameter prediction of bending of aluminum alloy sheet induced by laser prompt heating[J]. *Opt. Precision Eng.* 2007, 15(6):915-921. (in Chinese)
- [5] 王续跃,许卫星,司马媛,等. 利用图象处理技术评价硅片表面清洗率[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8):1263-1268.
WANG X Y, XU W X, SI M Y, *et al.*. Evaluation of efficiency for silicon wafer cleaning by image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1263-1268. (in Chinese)
- [6] ZHANG X R, CHEN G. Numerical simulation of pulsed laser bending[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2002, 69:254-260.
- [7] HU Z, LABUDOVIĆ M, WANG R. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41:589 - 607.
- [8] 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京:科学出版社, 2003.
LI J CH. *Diffraction and Calculation for Thermal Effect of Laser*[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 陆建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
LU J, NI X W, HE A ZH. *Physics of Interaction Between Laser and Material*[M]. Beijing: China machine Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 贾颖,孙宝元,曾其勇,等. 磁控溅射法制备 NiCr/NiSi 薄膜热电偶温度传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2006(2):1-3
JIA Y, SUN B Y, ZENG Q Y, *et al.*. Development of NiCr/ NiSi Thin-film Thermocouples Temperature Sensor by Magnetron Sputting[J]. *Instrument Technique and Sensor*. 2006(2):1-3. (in Chinese)
- [11] 马文哲. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
MA W ZH. *The Latest Classical ANSYS & Workbench Course*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)

作者简介:王续跃(1960—),男,副教授,博士后,主要从事特种加工和精密加工等方面的研究。E-mail:wbzdz@dlut.edu.cn