

# 薄板激光弯曲温度场的数值模拟与校验

王秀凤 吕晓东 胡世光 陈光南

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院)

(中国科学院 力学所)

**摘 要:** 采用 MSC. Marc 非线性有限元软件,对薄板激光弯曲过程中的温度场进行了数值模拟,得到了引起薄板激光弯曲变形的温度场的变化规律.通过温度传感器测量与激光扫描线相对应的薄板下表面温度变化的规律来验证数值模拟的结果.模拟值与实测值基本吻合,表明数值模拟结果可作为激光加工工艺参数选择的依据.

**关键词:** 薄板; 激光弯曲; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TN 249; TG 386.3<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2003)05-0377-05

薄板激光弯曲是利用激光作为热源使金属薄板在无模具情况下发生热塑性变形的柔性成形加工方法,通过调整激光加工工艺参数可以控制热作用区域内的变形程度,从而控制弯曲变形的大小和方向.由于不用模具,不存在随之而来的模具制作费、制作周期、磨损、润滑等问题,特别适合于形状简单的单件、小批量工件的弯曲成形,还可以用于加工一些形状特殊或尺度微小、难以采用其它加工方法加工的简单工件的弯曲成形,因此它在航天航空、仪器仪表及各种机车车辆的样机生产中,具有广阔的应用前景.

在激光弯曲机理<sup>[1-3]</sup>、激光弯曲过程的数值模拟<sup>[4-8]</sup>、激光弯曲过程的影响因素及其变化规律<sup>[9-13]</sup>等方面已经做了大量研究工作.现有文献对激光弯曲过程的数值模拟都是采用薄板最终的弯曲角度来修正其计算模型,这显然难以保证模拟的精度.因为激光与材料的相互作用是温度、组织转变及应力-应变 3 方面相互作用的非常复杂的热物理过程,温度场决定组织状态场和应力-应变场.只有用薄板弯曲过程中温度场的变化规律来修正数值模拟的计算模型,才能保证模拟的精度.本文用镍铬-镍硅热电偶作为传感器来测量与激光扫描线相对应的薄板下表面温度变化的规律,并与用 MSC. Marc 非线性有限元软件进行模拟计算的结果进行比较,然后由修正的计算模型得到引起薄板激光弯曲变形的温度场的变化规

律,为进一步研究薄板激光弯曲的变形规律奠定基础,为激光加工工艺参数的选择提供依据.

## 1 试验方法

试验在中科院力学所材料工艺研究中心表面改性实验室进行.试验设备为 2 kW 连续输出式 CO<sub>2</sub> 激光器.试验选用 St14 (50 mm × 20 mm × 1.2 mm) 薄板,薄板一端被夹持在工作台上(夹持端为 10 mm),激光束在中央沿板宽方向连续扫描,移动速度为 8 mm/s,输出功率为 450 W,光斑直径为 4 mm.薄板被照射表面涂石墨以提高材料对激光的吸收率.将镍铬-镍硅热电偶焊接在与激光扫描线相对应的薄板下表面上(见图 1),另一端与放大调理板连接,将热电偶反映出来的 mV 级电压信号放大成 V 级电压信号,以使用柔性检测系统采集测量数据并显示温度随时间的变化曲



图 1 焊接热电偶

收稿日期: 2001-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59836220); 航空基础科学基金资助项目(98H51110)

作者简介: 王秀凤(1963-),女,北京人,副教授,100083,北京.

线,如图2所示.

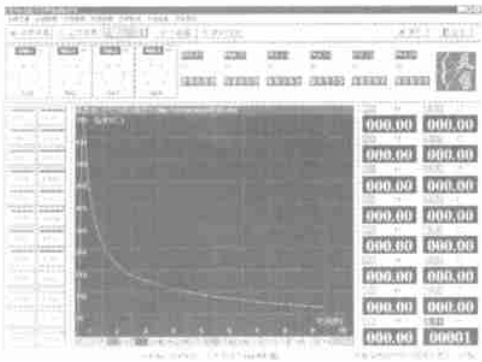
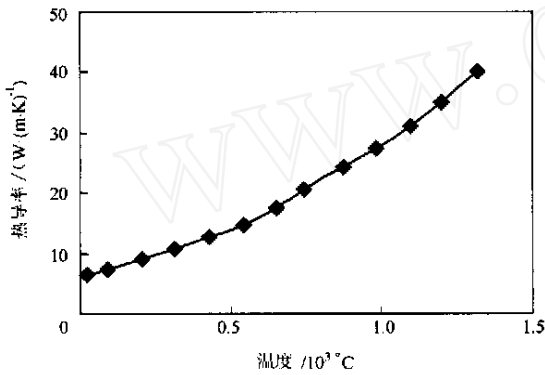


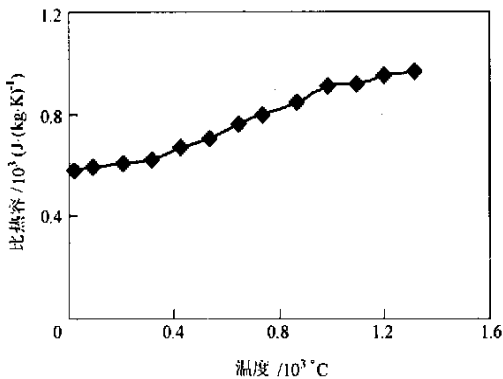
图2 柔性检测系统控制软件的用户界面

## 2 数值模拟

计算时所用的参数取自试验中所用的相关参数,薄板的热物性参数是温度的函数,如图3所示<sup>[8]</sup>.借助大型非线性有限元软件 MSC. Marc,采用加权残差的 Galerkin 方法求解瞬态热传导方程,对薄板激光弯曲过程中的温度场进行数值模拟.



a 热导率



b 比热容

图3 薄板的热物性参数随温度的变化<sup>[8]</sup>

### 2.1 计算模型

考虑到激光束照射后在薄板热作用区产生强烈的温度梯度,故采用三维八节点六面体减缩积

分单元以达到较高的计算精度.为了增加求解效率,减少计算量,单元划分时在加热区及其临近区尽量细分,而远离加热区的区域较为粗大,实际划分时,将加热区划分为 0.2 mm × 0.2 mm 的单元格,邻近区及远离加热区的区域网格划分为逐渐的稀疏,遵循原则为

$$\frac{k \cdot t}{x^2} = \frac{1}{2} \tag{1}$$

式中,  $k$  为材料的热扩散率;  $t$  为时间步长;  $x$  为网格尺寸.

在板料的厚度方向应具有足够的积分点,通过多次模拟证明,在板料厚度方向的单元数不应少于 4 层,选择划分的层数为 5 层.有限元网格的划分如图 4 所示.

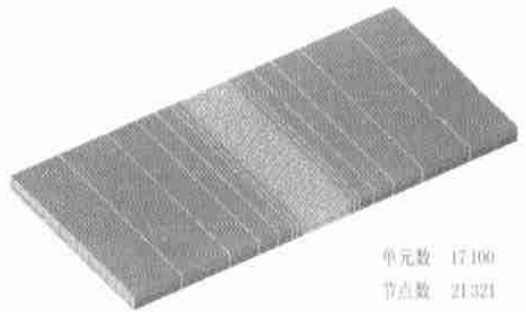


图4 有限元计算模型

### 2.2 边界条件

激光束能量作为一外加热流矢量输入,其作用位置随时间连续变化.采用小步距间歇跳跃式移动光源模拟激光束的连续扫描<sup>[7]</sup>,认为外加热流矢量的作用位置只随时间连续变化,将求解过程简化.具体作法如下:假设直径为  $d$  的光斑沿扫描方向( $x$  方向)的宽度  $x$  与单元在该方向宽度  $x$  呈整数倍关系,在激光连续扫描过程中,认为光斑每次跳跃  $x$  距离并滞留  $t_r$  时间.则

$$t_r = \frac{x}{v} \tag{2}$$

式中,  $v$  为激光束的扫描速度.

经过  $d/x$  次跳跃,激光束便移动一个光斑的距离.当  $x$  取足够小时,就可以模拟激光束的连续扫描.

考虑到激光加热时,升温及高温停留时间都很短,必须采用很小的时间步长才能充分记录温度场的信息,所以在每一滞留  $t_r$  内,圆形光斑的热流密度分布可视为均匀分布,其热流密度为

$$q = \frac{4AP}{d^2} \tag{3}$$

式中,  $A$  为板料对激光束的吸收系数,计算时取

0.55;  $P$  为激光束功率.

采用 MSC.Marc 软件中三维面热流 FLUX 的用户子程序接口,用 Fortran 语言编程模拟激光束沿板料表面的小步距间歇跳跃式移动,实现热载荷的自动加载,有效地提高了数值模拟的工作效率.

板料经激光束照射后在空气中自然冷却,将板料的表面与空气的对流换热及热辐射用总的换热系数  $h$  来表示,因边界换热而损失的热能可表示为

$$q_h = (T - T_0) \quad (4)$$

式中,  $T_0$  为初始温度,取为 25 (试验时的室温).

文献[14]给出稳态下  $h$  随温度变化的值;文献[15]考虑了激光束照射后在热作用区产生强烈的温度梯度,将  $h$  值进行了修正,取为稳态下值的 80~100 倍;然而,  $h$  值不仅随表面温度梯度的增大而增大,而且还是截面尺寸和冷却时间的函数,很难确定,本文结合试验结果将  $h$  值进行了修正(见表 1).

表 1 对比表

温度/ ( $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ )	文献[14] / ( $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ )	文献[15]修正 / ( $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ )	本文修正 / ( $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ )
20	6	480~600	90 000
300	50	4000~5 000	59 000
600	120	9 600~12 000	51 000
750	180	14 400~18 000	49 000
900	200	16 000~20 000	47 500
1 200	250	20 000~25 000	42 000
1 500	378	30 240~37 800	32 500

用 FORTRON 语言编制总换热边界条件子程序,计算时根据不同的温度取相应的值,通过 FILM 的用户子程序接口读入.

### 3 试验测量结果与计算结果

激光扫描线相对应的薄板下表面温度变化的规律如图 5 所示.

图 5 表明计算曲线与试验曲线变化趋势相同,最高点值接近.在加热过程中试验曲线比计算曲线陡,是因为当材料的表面出现一个热扰动时,由于热量传播的速度是有限的,距扰动源不同位置处不能瞬时感受到热扰动的影 响,即热流的输入不能立即引起温度梯度的形成,所以温度梯度的形成与热量传播之间存在延迟时间.而数值计算是采用经典的 Fourier 定律描述热流密度与温

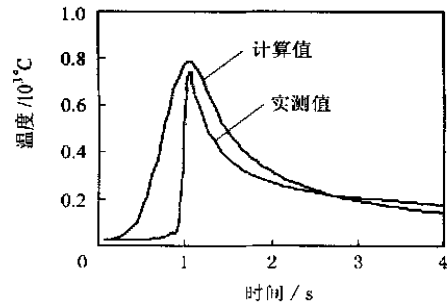
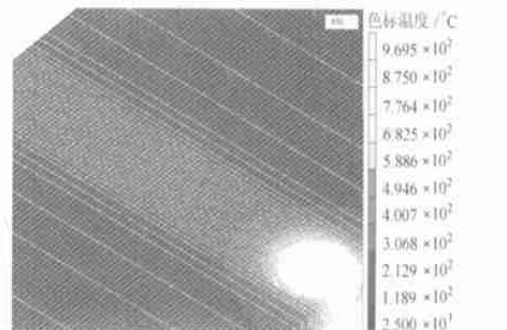
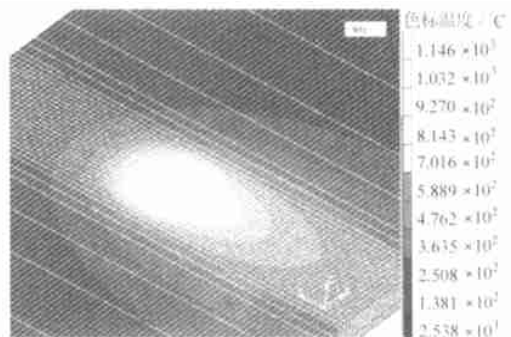


图 5 激光扫描线相对应的薄板下表面温度随时间的变化

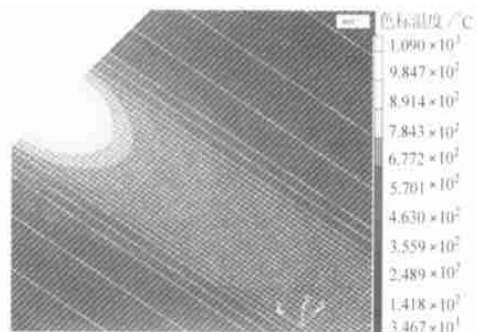
度梯度之间的关系,其中隐含了热量传播速度为无穷大的假设,使得表面升温速度较试验曲线得到的小.由此可见,本文的计算模型和参数是可行的.通过计算可得到薄板激光弯曲过程中温度场的分布规律.图 6 给出了当激光束在薄板表面沿



a 增量步为 10,时间为 0.5 s



b 增量步为 30,时间为 1.5 s



c 增量步为 55,时间为 2.75 s

图 6 激光束扫描时薄板表面温度分布的云图

宽度方向移动时,薄板表面温度分布的云图.图7给出了在激光扫描时,薄板表面温度的变化规律.图8为激光束移动到薄板中点时,薄板上、下表面温度的变化规律.

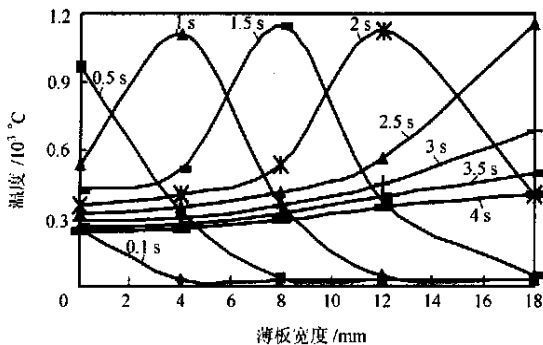


图7 激光束扫描时薄板表面温度的变化规律

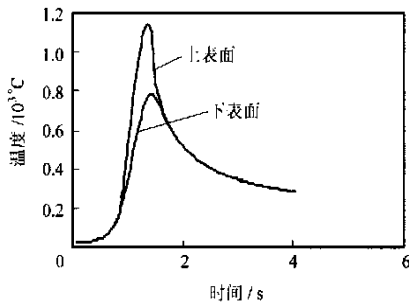


图8 激光束移动到薄板中点时,薄板上、下表面温度的变化规律

图6表明当激光束沿着薄板宽度方向扫描时,由于热过程的效应,在温度峰值的后面总是拖着一个长尾,在光斑作用的前方有预热区.随着扫描过程的继续,激光束从薄板的一侧逐渐向另一侧移动,直至光斑完全移出薄板的表面,加热过程结束,随后是在空气中冷却直至到室温.

从图7可清楚地看到,薄板表面所能达到的最高温度随着激光束移动过一个光斑后基本保持不变,直到加热过程结束.由此可见,该过程可以看成是准静态过程.

图8表明,薄板上、下表面有很大的温度梯度,这个温度梯度在加热过程中越变越大,当上表面达到最高温1143 K时,加热过程结束.随后,上表面快速降温,由于热传导,下表面的温度会继续上升而滞后于上表面的温度变化过程,且温度变化幅度相对较小,经过0.2s的冷却,上、下表面的温度趋于一致.毫无疑问,薄板厚度方向上的温度梯度是产生热应力、热应变的主要根源.

## 4 结论

由上述试验与模拟计算结果可得出以下结

论:

1) 模拟值与试验值基本吻合,说明计算模型及工艺参数的选择合理、可行;通过计算模型得到了薄板激光弯曲过程中温度场的分布规律,弥补了试验的不足.

2) 模拟计算表明:当激光束移动过一个光斑后,薄板激光弯曲过程可以看成是准静态过程.

3) 研究结果为进一步研究薄板激光弯曲的变形规律奠定了基础,为激光加工工艺参数的选择提供依据.

## 参考文献 (References)

- [1] Vollertsen F. Mechanisms and models for laser forming [A]. In: Geiger M, Vollertsen F. Proceedings of the LANE '94[C]. Bamberg: Meisenback, 1994. 345 ~ 359
- [2] Vollertsen F, Rodle M. Model for the temperature gradient mechanism of laser bending [A]. In: Geiger M, Vollertsen F. Proceedings of the LANE '94[C]. Bamberg: Meisenback, 1994. 371 ~ 378
- [3] 王秀凤, Takacs J, Krallics G. 薄板激光弯曲机理的研究[J]. 锻压技术, 2001, (4): 29 ~ 30  
Wang Xiufeng, Takacs J, Krallics G. Research on mechanism of laser bending for sheet metal [J]. Forging and Stamping Technology, 2001, (4): 29 ~ 30 (in Chinese)
- [4] Holzer S, Arnet H, Geiger M. Physical and numerical modelling of the bucking mechanism [A]. In: Geiger M, Vollertsen F. Proceedings of the LANE '94[C]. Bamberg: Meisenback, 1994. 379 ~ 386
- [5] Kraus J. Basic processes in laser bending of extrusions using the upsetting mechanism [A]. In: Geiger M, Vollertsen F. Proceedings of the LANE '97[C]. Bamberg: Meisenback, 1997. 431 ~ 438
- [6] Alberti N, Fratini L, Micari F. Numerical simulation of the laser bending process by a coupled thermal mechanical analysis[A]. In: Geiger M, Vollertsen F. Proceedings of the LANE '94[C]. Bamberg: Meisenback, 1994. 327 ~ 336
- [7] 季忠. 板料激光弯曲成形及其数值模拟[D]. 西安:西北工业大学材料科学与工程系, 1997  
Ji Zhong. Laser sheet metal forming and simulation [D]. Xi'an: Department of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, 1997 (in Chinese)
- [8] Li Weimin, Lu Xiuchun, Liu Zhubai. Numerical simulation for laser bending of sheet metal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, (4): 277 ~ 282
- [9] Namba Y. Laser forming in space[A]. In: Wang C P. Int Conf on Laser '85[C]. 1986. 403 ~ 407
- [10] Geiger M, Vollertsen F, Deinzer G. Flexible straightening of car body shell by laser forming[R]. SAE 930279, 1993. 354 ~ 361
- [11] 李伟民, Geiger M, Vollertsen F. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. 中国激光, 1998, 25(9): 859 ~ 864  
Li Weimin, Geiger M, Vollertsen F. Study on laser bending of metal sheets [J]. Chinese Journal of Laser, 1998, 25(9): 859 ~ 864 (in Chinese)

- [12] 王秀凤,王秀彦,林道盛. 板料激光弯曲的试验研究[J]. 锻压机械,1999,(3):8~10  
Wang Xiufeng, Wang Xiuyan, Ling daosheng. Research on laser bending test of sheet metal [J]. Metalforming Machinery, 1999, (3): 8~10 (in Chinese)
- [13] 王秀凤. 激光加工工艺参数对板料弯曲角度的影响[J]. 航空工程与维修,1999,(4):41~42  
Wang Xiufeng. Effects on the sheet metal bending deformation of laser processing parameters [J]. Aviation Engineering and Maintenance, 1999, (4):41~42 (in Chinese)
- [14] 刘顺洪,万鹏腾,胡良果,等. 薄板激光焊接温度场的数值研究[J]. 电焊机,2001,(8):16~19  
Liu Shunhong, Wan Pengteng, Hu Liangguo, et al. Study on numerical of the temperature field in laser welding of steel sheet [J]. Welding Machine, 2001, (8):16~19 (in Chinese)
- [15] 姜任秋. 热传导、质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应[M]. 北京:科学出版社,1997  
Jiang Renqiu. Transient shock effect of heat transfer, mass diffuse and momentum transfer[M]. Beijing:Science Press, 1997 (in Chinese)

## Simulation and Verification of the Temperature Field in Laser Bending Sheet Metal

Wang Xiufeng L ü Xiaodong Hu Shiguang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Chen Guangnan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science)

Abstract: Temperature field in the laser bending process was numerically simulated by MSC. Marc software. Variations of temperature with time to cause sheet metal bending were calculated. Simulation result was verified by the temperature on the lower surface of the sheet metal, which was measured by the thermocouple temperature transducer measuring under the laser scanning line. Experimental curves of temperature versus time are in agreement with simulation results. The simulation results can be regarded as a basis for choosing laser technological parameters.

Key words: thin plates; laser bending; temperature field; numerical simulation