

文章编号: 0258-7025(2004)12-1518-05

激光点热源作用下动态微变形的 数值模拟与校验

王秀凤^{1,2}, 陈光南², 胡世光¹, Janos Takacs³, Gyorgy Krallics³

(¹ 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083; ² 中国科学院力学所, 北京 100080)

³ Budapest University of Technology and Economics, Hungary H-1502

摘要 采用 MSC. Marc 非线性有限元软件, 对试件在激光点热源作用下动态微变形过程进行了数值模拟。通过激光反射放大系统测量了试件在激光点热源作用下的动态微变形过程。模拟值与实测值的结果表明: 热应力和相变应力的共同作用使得试件产生微变形, 最终试件的变形方向取决于热应变和相变共同作用的结果, 朝向激光束或背向激光束。比较实验值和模拟值, 发现变形的最大值相近, 变形过程却略有不同。考虑到激光点热源作用下有限厚度的试件内, 温度场分布出现的反常效应, 即内部的温度大于边界温度, 提出采用波动理论修正经典的热传导计算模型, 可望有效地提高模拟过程的计算精度。结论为进一步研究薄板激光弯曲的变形机理及变形过程奠定了基础。

关键词 激光技术; 动态微变形; 激光点热源; 数值模拟

中图分类号 TN 249; TG 386.3⁺1 **文献标识码** A

Simulation and Verification of the Dynamic Micro-Deformation under Laser Point Source

WANG Xiu-feng^{1,2}, CHEN Guang-nan²,

HU Shi-guang¹, Janos Takacs³, Gyorgy Krallics³

(¹ School of Mechanical Engineering and Automation, BUAA, 100083, China
² Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China
³ Budapest University of Technology and Economics, Hungary H-1502)

Abstract The dynamic micro-deformation of the specimen under laser point source is numerically simulated by MSC. Marc software and measured using laser beam reflex amplifier system. Experimental result and simulation result show that the common action of thermal stress and phase transformation stress makes the specimen deformation. The final deformation direction of the specimen depends on the result of the co-operation of the thermal strain and the phase transformation strain, backwards or towards the laser beam. Compared the experimental with the simulation result, the largest deformation is almost the same and the deformation process is a little different. Considering that there is a kind of un-convention temperature distribution in the limit thickness specimen under laser irradiation, the temperature of inner material is higher than that of the boundary. Wave theory is suggested to modify classical heat transfer model so that simulation precision is improved. The conclusion lays the foundation for further research on mechanism and the process of laser bending.

Key words laser technique; dynamic micro-deformation; laser point source; numerical simulation

收稿日期: 2003-07-03; 收到修改稿日期: 2003-11-26

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

作者简介: 王秀凤(1963—), 女, 浙江省鄞县人, 北京航空航天大学副教授, 博士, 主要从事塑性成形工艺、激光加工及其计算机应用方面的研究。E-mail: wangxiufeng@buaa.edu.cn

1 引言

薄板激光弯曲是激光非熔凝加工中新的应用领域之一,它是利用激光扫描金属薄板,在板面不熔化但板厚方向上出现明显温度梯度的情况下,导致非均匀分布的热应力,使薄板产生塑性变形的工艺方法^[1]。激光弯曲具有将薄板无模成型的特点,不仅适合于单件、小批量工件的折弯成形,而且适合于一些形状特殊或尺度微小、难以采用其他加工方法加工的简单工件的折弯成形及形状复杂、贴模性差的大型工件的精确校形^[2]。因此,它在航空航天、仪器仪表及各种机车车辆的样机生产中,具有很好的应用前景。为了开发应用此项技术,国外和我国的许多学者在激光弯曲的变形机理、工艺过程及数值模拟等方面做了大量的研究工作^[3~16]。但是,由于缺乏对薄板激光弯曲机理的深入研究,变形的大小和方向不能准确控制,限制了该技术的实际应用。考虑到薄板激光弯曲过程是瞬时作用的点热源在照射线方向的移动,最终薄板的变形是在热态积累下形成的,本文通过数值模拟与实验的相互印证,研究在激光点热源作用下动态微变形过程,为揭示薄板激光弯曲变形机理提供了保证。

2 实验方法

实验在匈牙利布达佩斯技术与经济大学机械工程系激光实验室进行,实验装置如图 1 所示。实验设备选用型号为 OERLIKON OPL1800 的连续输出 CO₂ 激光器,激光波长 10.6 μm,光斑直径可调范围 0.2~11 mm;输出功率 0~1800 W 连续可调,功率密度分布服从基模高斯分布。试件选用 St14 和 C45,尺寸为 100 mm×2 mm×2 mm,试件一端被夹持在工作台上成为悬臂梁,激光照射在试件的中点,悬臂梁在激光照射下发生微变形。激光输出

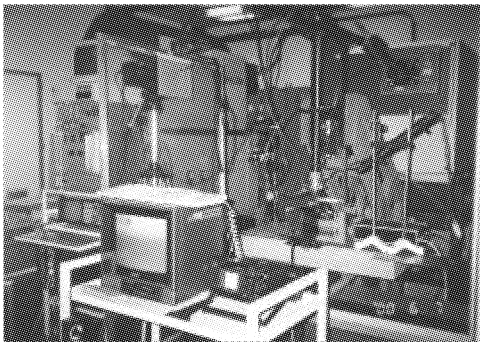


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

功率为 100 W,连续照射时间为 0.782 s,光斑直径为 2 mm。试件被照射表面涂石墨以提高材料对激光的吸收率,试件的自由端上表面粘贴一块 7 mm×7 mm 有机玻璃,用来将 He-Ne 激光器(5 W)出射的激光反射到屏风上的坐标纸上,将微小变形放大后,用高速摄像机记录光点在坐标纸上的运动过程,通过计算机显示其记录的数据。试件微小变形的放大原理如图 2 所示,其中

$$y_1 = L_0 \tan(90^\circ - \alpha')$$

$$y_2 = L_0 \tan(90^\circ - \alpha' + \phi)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\Delta y}{L_0} + \tan(90^\circ - \alpha') \right] - 90^\circ + \alpha'$$

式中, ϕ 为试件的微小变形角度, α' 为 He-Ne 激光器照射的入射角度, $\Delta y = y_2 - y_1$ 。图中 ϕ 角为正值时,说明试件发生朝向激光束的弯曲;而 ϕ 角为负值时,说明试件发生背向激光束的弯曲。

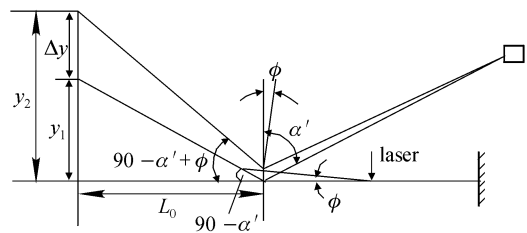


图 2 试件微小变形的放大原理

Fig. 2 Conceptual diagram of amplifying specimen deformation

3 数值模拟

计算时所用的参数取自实验中所用的相关参数,材料的热物性参数是温度的函数,如图 3 所示^[17]。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,对试件在激光点热源作用下动态微变形过程进行数值模拟。

3.1 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×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

$$\frac{\kappa \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (1)$$

式中, κ 为材料的热扩散率, Δt 为时间步长, Δx 为网格尺寸。

有限元网格(FEM)的划分如图 4 所示。

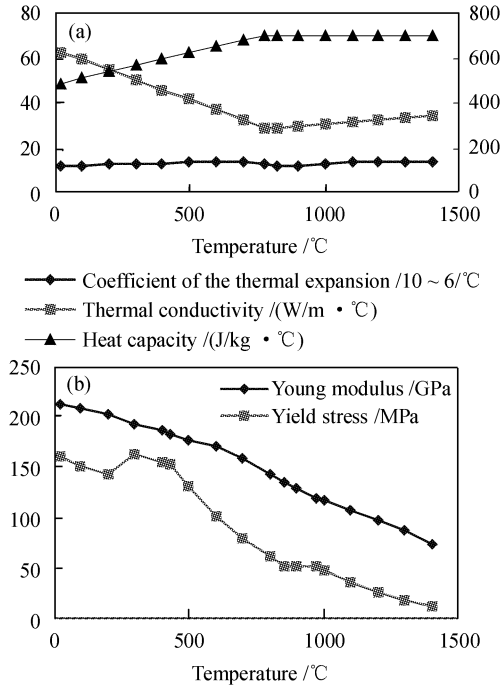


图 3 材料的热物性参数随温度的变化

Fig. 3 Variation of thermal and mechanical properties of material versus temperature

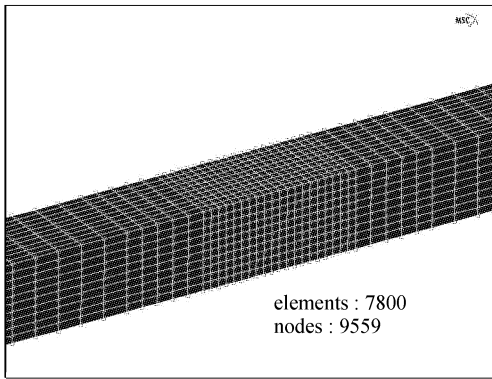


图 4 网格划分的示意图

Fig. 4 FEM model for calculation

3.2 边界条件

激光束能量作为一外加热流矢量输入。在热作用区域,圆形光斑的热流密度分布服从基模高斯分布,高斯热源描述距斑点中心 r 的点的热流密度为

$$q(r) = \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right) \quad (2)$$

式中, $A = 0.45$ (试件表面涂碳黑进行黑化处理); P

为激光束的输出功率; r_b 为激光束在与试件接触处的半径; r 为激光束光斑直径内任意点到其中心的距离。

在时间 t 内,材料表面吸收激光能量

$$Q = t \cdot \int_0^{r_b} 2\pi q(r) r dr \quad (3)$$

在模拟计算中,为了使光斑更接近于圆形,热流密度的分布采取了如图 5 所示的计算模型,即在 5 个不同半径上所加的热流密度近似按高斯分布取值。实践证明这样处理很好地模拟了实际情况,提高了分析精度。

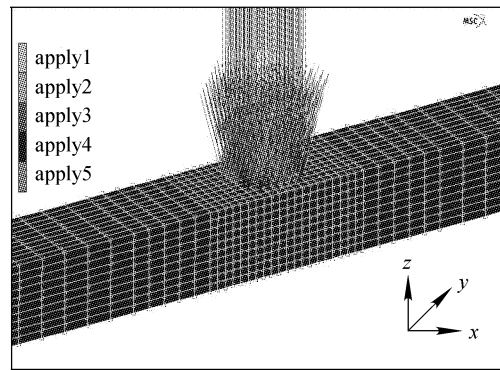


图 5 激光点热源的热流密度分布

Fig. 5 Distribution levels of the thermal source energy flux density

由于试件的边界与周围环境存在着温差,所以其与周围介质存在换热,其中包括对流换热和辐射换热。温度越高则辐射作用越强烈,而对流作用相对较小。由于辐射和对流的计算方法不同,为了计算方便,用类似于计算对流换热的关系式,把辐射换热的热流和试件表面的温度差联系起来。考虑总的换热系数 β , 这样因边界换热而损失的热能可表示为

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

式中, T_0 为初始温度, 取为 27.5 °C (实验时的室温)。

文献[18]给出稳态下 β 随温度变化的值; 文献[19]考虑了激光束照射后在热作用区产生强烈的温度梯度, 将 β 值进行了修正, 取为稳态下 β 值的 80 ~ 100 倍; 然而, β 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, 因此结合实验结果^[20] 将 β 值修正如下, 见表 1 (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)。

表 1 总换热系数 β Table 1 Total heat exchange coefficient β

Temperature /°C	β [18] /[W·(m ² ·K) ⁻¹]	β [19] /[W·(m ² ·K) ⁻¹]	β [20] /[W·(m ² ·K) ⁻¹]
20	6	480~600	90000
300	50	4000~5000	59000
600	120	9600~12000	51000
750	180	14400~18000	49000
900	200	16000~20000	47500
1200	250	20000~25000	42000
1500	378	30240~37800	32500

4 测量结果与计算结果的比较与分析

试件在热循环过程中微变形的实时测量及数值模拟结果如图 6 所示。

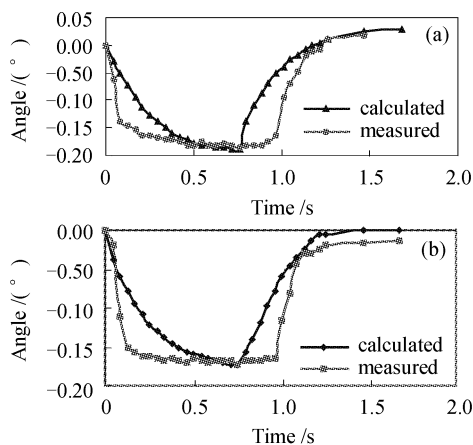


图 6 试件在热循环过程中微变形随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation of the dynamic micro-deformation versus time during heating-cooling circulating process

图 6 表明当激光束照射试件上表面时,试件上表面的温度迅速升高,在试件厚度方向上产生很大的温度梯度,非均匀的热膨胀使得热作用区附近的冷料对其产生非均匀的压应力,使得试件产生与激光束方向相反的变形,随着加热时间的继续,变形越来越大,到加热结束时 ($t = 0.782$ s),变形达最大。当激光束停止照射后,试件上表面温度迅速降低,材料开始收缩,由于热传导,下层的材料会继续膨胀直到上下层温度相等。结果使得试件反向变形的程度逐渐减少。对于不产生相变或相变体积变化比较小的钢(如 St14),最后试件产生朝向激光束的变形,如图 6(a)所示;对于具有相变体积变化比较明显的钢(如 C45),则在冷却过程中,马氏体相变产生的体积膨胀,超过了上层材料的压缩塑性应变,最后试件

产生背向激光束的变形,如图 6(b)所示。由此可见,试件的最终变形是热应变和相变共同作用的结果。

但是图 6 中曲线有较大的差异,尽管变形的最大值相近,变形过程却略有不同,数值模拟的计算有待于进一步改进。参照文献[15]给出温度场分布的反常效应——有限厚度的试件内,其内部温度大于边界温度,这一现象被定义为泛傅里叶效应,认为热量在试件内的传递因反射波的影响,具有与入射波叠加的扩散波动行为。可以猜测若采用波动理论来描述试件在有限厚度下的微变形过程,也许能得到更接近于实际情况的计算结果。

5 结论

实验与计算结果表明,热应力和相变应力的共同作用使得试件产生微变形,最终试件的变形方向取决于热应变和相变共同作用的结果,朝向激光束或背向激光束。同时基于经典热传导定律的计算模型模拟试件在激光点热源作用下的动态微变形过程具有一定的局限性。

参 考 文 献

- 1 Y. Namba. Laser Forming in Space [C]. Wang C. P. ed., Proceedings of the International Conference of Laser and Electro-Optics (ICALEO'85), Boston, MA, Laser Institute of America, Orlando, 1985. 403~407
- 2 M. Geiger, F. Vollertsen. Flexible straightening of car body shells by laser forming [C]. SAE Paper, 1993, No. 930279, 354~361
- 3 F. Vollertsen. Mechanisms and models for laser forming [C]. M. Geiger, F. Vollertsen ed., Proceedings of the LANE'94, Bamberg; Meisenback, 1994. 345~359
- 4 F. Vollertsen, M. Rodle. Model for the temperature gradient mechanism of laser bending [C]. M. Geiger, F. Vollertsen ed., Proceedings of the LANE'94, Bamberg; Meisenback, 1994. 371~378
- 5 Ji Zhong. Laser sheet metal forming and simulation [D]. Xi'an; Northwestern Polytechnical University, Department of Material Science and Engineering, 1997. 26~61
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. 26~61
- 6 Li Weimin, M. Geiger, F. Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets [J]. Chinese J. Lasers, 1998, A25(9):859~864
李伟民, M. Geiger, F. Vollertsen. 金属板料激光弯曲成形规律的研究[J]. 中国激光, 1998, A25(9):859~864
- 7 Wang Xiufeng, Gy. Krallics, Z. Dudas. Application Research on Laser Bending of Sheet Metal [C]. International Scientific-Technical Conference of Young Scientists, Russia, TsAGI Aviation Printing Yard, 2000. 137~138
- 8 Wang Xiufeng, Janos Takacs, Gyorgy Krallics. Research on mechanism of laser bending for sheet metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2001, 26(4):29~30

- 王秀凤, Janos Takacs, Gyorgy Krallics. 薄板激光弯曲机理的研究[J]. 锻压技术, 2001, **26**(4):29~30
- 9 Wang Xiufeng, Janos Takacs, Gyorgy Krallics. Experimental research on the thermo-physical process of laser non-melting processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Supplement): 613~616
- 王秀凤, Janos Takacs, Gyorgy Krallics. 激光非熔凝热物理过程的试验研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(增刊):613~616
- 10 Huang Chenguang, Duan Zhuping. Numerical simulation on the micro-scale bending induced by pulsed laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3):282~285
- 黄晨光, 段祝平. 激光微弯曲成形机理的数值研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(3):281~285
- 11 Liu Shunhong, Wan Pengteng, Yang Jing. Development of numerical simulation in laser bending [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(3):161~164
- 刘顺洪, 万鹏腾, 杨 晶. 激光弯曲成形数值模拟的研究进展[J]. 激光技术, 2002, **26**(3):161~164
- 12 Chen Yanbin, Li Liqun, Lin Shangyang. The FEM simulation of the temperature field in laser forming [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):145~149
- 陈彦宾, 李俐群, 林尚扬. 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
- 13 Guan Yanjin, Sun Sheng, Luan Yiguo. Study on three-dimensional laser forming process of sheet metal [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(4):397~400
- 管延锦, 孙 胜, 栾贻国. 板料三维激光成形研究[J]. 应用激光, 2002, **22**(4):397~400
- 14 X. F. Wang, Janos Takacs, Gyorgy Krallics *et al.*. Research on the thermo-physical process of laser bending [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **127**(3):388~391
- 15 Wang Xiufeng. Application of laser non-melting processing technology in the sheet metal forming [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. 12~40
- 王秀凤. 激光非熔凝加工技术在板料成形中的应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003. 12~40
- 16 Wang Xiufeng, Lu Xiaodong, Hu Shiguang *et al.*. Simulation and verification of the temperature field in laser bending of sheet metal [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(5):377~381
- 王秀凤, 吕晓东, 胡世光 等. 薄板激光弯曲温度场的数值模拟与校验[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, **29**(5):377~381
- 17 Stefan Amon. Beruehrungsfreies biegn mittels thermischer spannungen [D]. Germany: Diplomarbeit am LFT, 1991
- 18 Liu Shunhong, Wan Pengteng, Hu Lianguo *et al.*. Study on numerical of the temperature field in laser welding of steel sheet [J]. *Welding Machine*, 2001, **31**(8):16~19
- 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, **31**(8):16~19
- 19 Jiang Renqiu. Transient Shock Effect of Heat Transfer, Mass Diffuse and Momentum Transfer [M]. Beijing: Science Press, 1997
- 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
- 20 Wang Xiufeng, Chen Guangnan, Hu Shiguang *et al.*. Experimental investigation of heat transfer in the limit thickness samples under laser point source irradiation [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(2):226~229
- 王秀凤, 陈光南, 胡世光 等. 激光点光源作用下试件内部热传导的实验研究[J]. 光电子 • 激光, 2004, **15**(2):226~229

光学期刊发展与合作研讨会在上海举行

2004年11月15~18日,由中国科学院上海光学精密机械研究所《光学学报》、《中国激光》和CHINESE OPTICS LETTERS三刊联合编辑部发起的“光学期刊发展与合作研讨会”在上海举行。

会议本着把我国光学期刊事业做大、做强的目标,提出了联合发展、资源共享的理念。参加研讨的10多家编辑部相互交流了办刊经验,探讨了存在问题与解决方向。会议重点就期刊市场营销和期刊网络化发展进行了认真的讨论,一致同意,共同搭建“中国光学期刊网”这一网络平台,将自行制作期刊网络版,并可实行全文上网,以供检索和查询。并在发行和广告方面进行有益的合作。

与会代表一致认为,办刊同行应该打破地域和门户界限,改变关门办刊的观念,增加交流和合作,这必将有利于提升我国科技期刊的学术质量。

除《光学学报》、《中国激光》和CHINESE OPTICS LETTERS联合编辑部外,《红外与毫米波》、《光子学报》、《红外与激光工程》、《硅酸盐学报》、《光电工程》、《应用光学》、《激光技术》、《激光与红外》、《人工晶体学报》、《激光与光电子学进展》和《应用激光》等11家编辑部的负责人、编辑参加了会议。中国科学院上海光学精密机械研究所副所长李儒新研究员与会并致词。

(光学期刊联合编辑部)