板料激光弯曲过程的数值模拟

王秀凤 郭晓丽 陈光南

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

Jurgen Silvanus

(欧洲宇航防务创新集团, 慕尼黑 81663)

摘 要: 采用MSC.Marc非线性有限元软件, 对板料激光弯曲过程进行了数值模拟. 试验与数值模拟的相互印证表明: 数值模拟的模型正确, 计算过程可靠, 计算结果可为板料激光弯曲工艺参数的选择提供依据. 通过模拟多道次直线照射的过程可知, 变形效果受照射路径次序的影响很大, 应选择从固定端向自由端方向交替的双向照射路径, 以保证板料在宽度方向上变形的均匀. 模拟结果可为带筋结构壁板激光弯曲成形提供实用方案.

关 键 词: 板料; 激光弯曲; 数值模拟

中图分类号: TN 249; TG 386.3+1

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2009)03-0389-04

Numerical simulation of laser bending process

Wang Xiufeng Guo Xiaoli

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Chen Guangnan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Jurgen Silvanus

(European Aeronautic Defence and Space Innovation Works, Munich 81663, Germany)

Abstract Laser bending process was numerically simulated by the FEM software of MSC.Marc. The experiment results were compared with the simulation ones, and the temperature and displacement curves of experiment and calculation were in good accordance. The comparison indicates that, calculated model is regarded as correct and the calculated process is considered to be credible, and calculated result will lay foundation for chosen laser parameters. More irradiation paths influence on displacement effect was discussed by numerical simulation. Conclusions show that the order and direction of irradiation paths have a huge influence on displacement effect of specimen. The best type is regarded as alternate irradiation path with contrary directions from fixation to the end of free so as to gain uniform displacement along the width direction. At the same time, it provides theoretical basis for the chosen of irradiation paths of laser bending stiffened sheet metal.

Key words: sheet metal; laser bending; numerical simulation

当激光照射板料表面时, 在板料厚度方向产生明显的温度梯度, 导致非均匀分布的热应力, 从而使板料产生塑性变形, 此工艺方法称为激光弯曲[1-3]. 由于激光弯曲不需要模具或外力作用, 对加工板料的要求也较低, 与传统的弯曲方法相比, 激光弯曲成形的回弹很小, 因而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弯曲角度较小、难以采用其

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 欧洲宇航防务集团德国(EADS Innovation Works)资助项目

作者简介: 王秀凤(1963-), 女, 浙江宁波人, 副教授, wangxiufeng@buaa.edu.cn

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, 具有一定的应用前景[1-2]. 目前, 欧洲宇航防务集团 EADS正在开展激光弯曲技术在大飞机制造中的应用, 尤其是用于复杂结构板的成形.

自 80年代后期以来, 日本、波兰、美国、德国及我国的许多学者已在激光弯曲的变形机理、激光弯曲的数值模拟、激光弯曲过程的影响因素及其变化规律等方面做了大量的研究工作[1-16]. 从公开发表的文献中可知, 已做的实验研究不多, 同时测量温度和位移的变化过程更是少见. 特别是采用板料最终的弯曲角度作为数值模拟的验证依据, 显然不能满足模拟激光弯曲复杂热物理过程的精度要求.

本文采用 MSC. Marc非线性有限元软件, 对板料激光弯曲过程进行了数值模拟. 试验与数值模拟的相互印证表明: 数值模拟的模型正确, 计算过程可靠, 计算结果可为板料激光弯曲工艺参数的选择提供依据. 通过模拟多道次直线照射的过程可知, 变形效果受照射路径次序的影响很大, 应选择从固定端向自由端方向交替的双向照射路径, 以保证板料在宽度方向上变形的均匀. 模拟结果可为带筋结构壁板激光弯曲成形提供实用方案.

1 试 验

试验在德国 EADS Innovation Works激光实验室进行. 试验设备采用 3 500W YAG激光器. 测量装置如图 1所示.

试验材料为大飞机壁板用的铝合金板料 AA6056, 试件尺寸为 150mm × 100mm × 2 5mm, 试件一端固定在工作台上, 另一端自由, 激光束沿板料上表面的照射路径进行照射. 试验时激光的输出功率为 2000W, 激光的移动速度为 10mm /s, 光斑直径为 5mm.

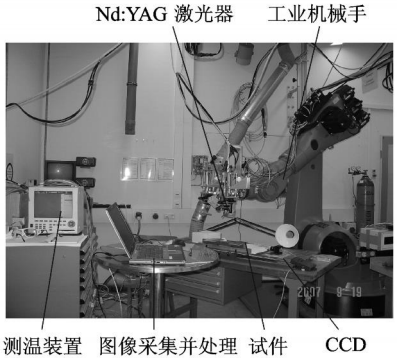
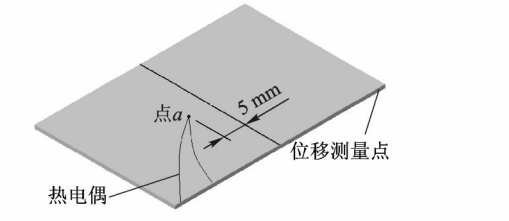
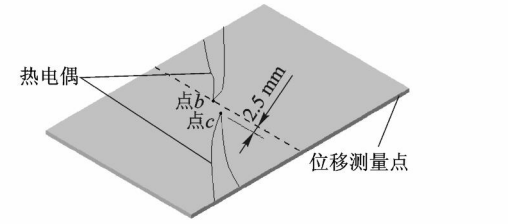


图 1 试验装置图

试验中利用镍铬-镍硅热电偶对激光照射过程中板料的温度数据进行采集, 采集点的位置如图 2所示, 通过测温仪器 YOKOGAWA MV200记录数据, 通过数据处理软件得到温度随时间变化的曲线.



a 上表面



b 下表面

图 2 镍铬-镍硅热电偶粘贴位置

与此同时, 将试件自由端部分涂碳黑作为测量区域, 采用图像处理法, 运用 CCD通过自行开发的实时采集软件和图像处理软件得到测量点在板料激光弯曲过程中的位移变化曲线.

2 数值模拟

采用有限元模拟软件 MSC. Marc热-机耦合场的求解方法, 进行模拟计算. 在模拟计算时采用的材料参数皆与实验中的参数相同.

将激光看作外加点热源, 其能量作为热流矢量输入到试件中. 采用小步距间隙跳跃的方式来模拟激光束的连续移动. 采用 MSC. Marc中的三维面热流 FLUX的用户子程序接口, 通过 FORTRAN 语言编制用户子程序来实现激光热源的移动.

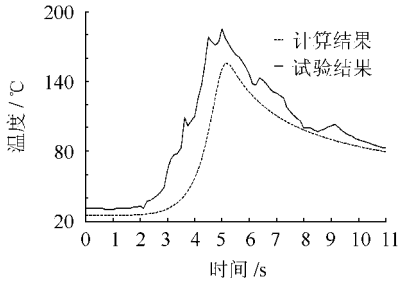
模型的一端设为固定约束, 自由度为零. 环境初始温度设为 25℃.

3 结果与讨论

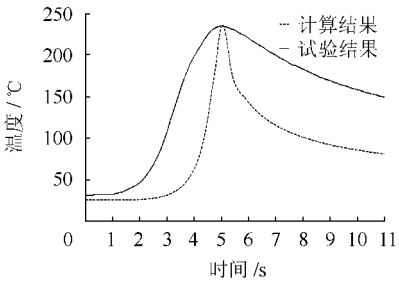
3.1 试验结果与模拟计算结果的对比

将试验采集到的温度与位移随时间变化的曲线与数值模拟结果进行比较, 如图 3所示.

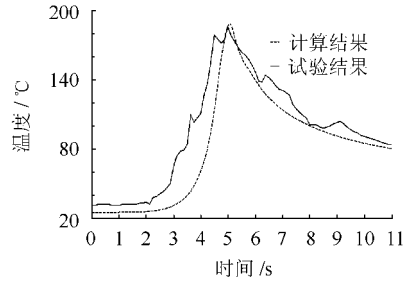
由图 3可知, 从整个过程上来看, 数值模拟能够较好的模拟真实情况, 尤其对于板料的最终变形量, 模拟值与实验值之间差距较小, 表明计算精



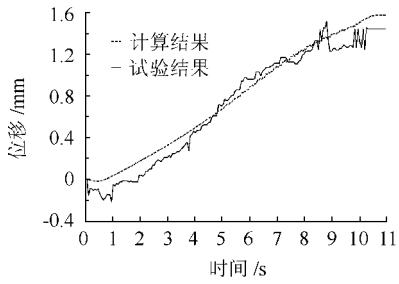
a　点 *a* 温度随时间的变化



b　点 *b* 温度随时间的变化



c　点 *c* 温度随时间的变化



d　测量点位移随时间的变化

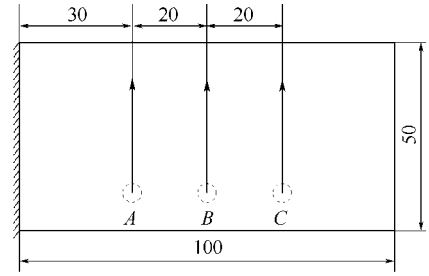
图 3　计算结果与测量结果的比较

度足够. 从温度曲线的变化趋势可以看出, 试件在激光的作用下, 由于激光的能量分布高度集中, 因而在激光照射时, 试件局部的升温很快, 而激光光斑离开后, 板内热传导和与空气的换热, 使得表面降温相对来说较为平缓. 而通过位移曲线的变化趋势则可看出, 当激光开始照射时, 由于上表面的材料受热产生膨胀, 因而板料在开始阶段会产生一定的反向弯曲. 随着温度的继续升高, 上表面材料的屈服应力急剧下降, 下表面温度的升高导致材料产生热膨胀, 从而使板料产生正向弯曲.

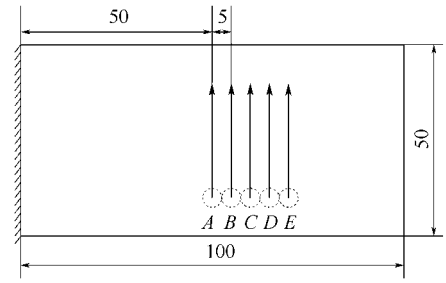
3 2　照射路径对最终变形量的影响

在实际应用中, 由于单次照射的位移相对来说很小, 很难满足变形量的需求, 因而需要进行多次照射以增大板料的变形量. 由于多次重复照射时板料的变形量难以控制, 建议采用多道次照射. 数值模拟多道次照射过程的结果表明, 照射路径的次序将对板料的最终变形量产生影响.

图 4中的 $A \sim C$ 和 $A \sim E$ 分别为 3道次和 5道次照射时的照射路径, 且设图示箭头方向为正向 (表示为 $A\uparrow$), 反之即为负向 (表示为 $A\downarrow$). 根据照射次序和照射方向的不同, 选几组方案进行计算, 得到自由端的最终位移如表 1所示.



a　照射 3道



b　照射 5道

图 4　多道次照射示意图 (mm)

表 **1**　照射路径方案及计算结果

照射次数	编号	照射路径次序及照射方向	自由端位移 /mm 最大值	最小值	位移差
3道次	①	$(A\uparrow)\rightarrow(B\uparrow)\rightarrow(C\uparrow)$	1. 865	1 841	0 024
	②	$(A\uparrow)\rightarrow(C\uparrow)\rightarrow(B\uparrow)$	1. 856	1 827	0 029
	③	$(A\uparrow)\rightarrow(C\uparrow)\rightarrow(B\downarrow)$	1. 814	1 793	0 021
	④	$(C\uparrow)\rightarrow(B\uparrow)\rightarrow(A\uparrow)$	1. 829	1 796	0 033
5道次	⑤	$(A\uparrow)\rightarrow(B\uparrow)\rightarrow(C\uparrow)\rightarrow(D\uparrow)\rightarrow(E\uparrow)$	2 267	2 215	0 052
	⑥	$(A\uparrow)\rightarrow(C\uparrow)\rightarrow(E\uparrow)\rightarrow(B\downarrow)\rightarrow(D\downarrow)$	2 253	2 209	0 044

通过表 1可以看出, 随着照射次数的增加, 自由端的最终位移明显增加. 当照射次数相同, 照射路径的位置相同时, 改变照射的次序, 将导致最终位移量的变化. 同时, 对于多道次照射, 板料自由端在宽度方向上会产生不均匀变形, 如图 5和图 6所示.

激光按表 1中的方案 ③和⑥照射, 即照射的顺序从固定端起向自由端进行, 并选择方向交替

的双向照射路径,可使板料在宽度方向上的变形更加均匀.由此可见,采用不同的照射次序及方向,板料产生的不均匀变形程序存在差异,所以合理安排照射路径可将变形的不均匀度减到最小.

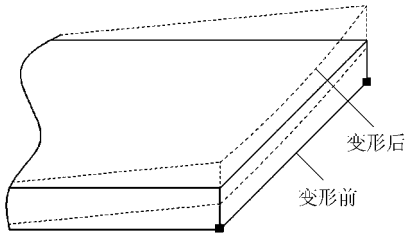


图 5 板料的不均匀变形

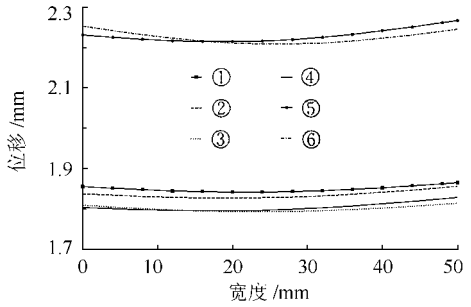


图 6 板料宽度方向上的位移曲线

4 结束语

与试验结果相比较发现,数值模拟的结果与实际结果相差不大,可以表明数值计算模型的建立是正确的.在材料和加工条件相同的条件下,对多道次不同照射路径的情况进行模拟计算,证明多道次照射可以明显增大板料的变形量,并针对实际应用选出了较优的照射路径方案,照射的次序应从固定端起向自由端进行,并应选择方向交替的双向照射路径,从而保证板料在宽度方向上变形的均匀.同时为激光弯曲技术在带筋结构壁板成形中提供实用方案.

参考文献 (References)

[1] Namba Y. Laser forming in space[C]//Int Conf On Lasers'85. New York: Springer-Verlag 1986: 403-407

[2] Geiger M, Vollertsen F. Flexible straightening of car body shells by laser forming[C]//SAE Special Publications. Warrendale, PA: SAE, 1993(944): 37-44

[3] 管延锦, 赵国群, 孙胜, 等. 扫描次数对板料激光弯曲成形影响的有限元仿真研究[J]. 航空制造技术, 2004(1): 55-57, 96
Guan Yanjin, Zhao Guoqun, Sun Sheng, et al. Study on influence of the number of scans on laser bending of sheet metals by FEM simulation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(1): 55-57, 96(in Chinese)

[4] Cheng P J, Lin S C. An analytical model for the temperature field in the laser forming of sheet metal[J]. Journal of Material Processing Technology, 2000, 101(1): 261-267

[5] 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
Chen Yanbin, Li Liqun, Lin Shangyang. Finite element simulation of temperature field of laser bending[J]. Laser Application, 2004, 22(2): 145-149(in Chinese)

[6] Kyrsanidi A K, Kermanidis Th B, Pantelakis Sp G. An analytical model for the prediction of distortions caused by the laser forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104(1): 94-102

[7] Geiger M, Merklein M, Pitz M. Laser and forming technology an idea and the way of implementation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1/2/3): 3-11

[8] Liu F R, Chan K C, Tang C Y. Theoretical analysis of deformation behavior of aluminum matrix composites in laser forming[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 396(1/2): 172-180

[9] Wang X F, Chen G N, Hu Sh G, et al. Research on dynamic micro-deformation under laser point source[J]. Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(12/13): 1515-1522

[10] 程丽芳. 铝合金板激光弯曲成形的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2005
Chen Lifang. Experimental research on laser bending and forming of aluminum[D]. Dalian: School of Mechanical & Engineering, Dalian University of Technology, 2005(in Chinese)

[11] Geiger M. Synergy of laser material processing and metal forming[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1994, 43(2): 563-570

[12] Vollertsen F. Mechanisms and models for laser forming[C]//Laser Assisted Net Shape Engineering 1. Bamberg: Meisenbach GmbH, 1994, 1: 345-359

[13] 裴继斌, 张立文, 张全忠, 等. 船舶钢板激光弯曲成形的实验研究[J]. 锻压技术, 2005, 5: 64-66
Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong, et al. Experimental study on laser bending of shipbuilding sheet plate[J]. Forging & Stamping Technology, 2005, 5: 64-66(in Chinese)

[14] 管延锦, 张建华, 孙胜, 等. 扫描路径规划对激光弯曲成形影响的实验研究[J]. 锻压技术, 2005, 1: 36-39
Guan Yanjin, Zhang Jianhua, Sun Sheng, et al. Experimental study on the influence of planning parameters of scanning paths on laser bending of sheet metals[J]. Forging & Stamping Technology, 2005, 1: 36-39(in Chinese)

[15] Wang X F, Takacs Janos, Krallics Gyorgy, et al. Research on the thermo-physical process of laser bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127: 388-391

[16] 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
Wang Xiufeng, Lü Xiaodong, Hu Shiguang, et al. Research on numerical simulation and verify of laser bending for sheet metal[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(5): 377-381(in Chinese)

(责任编辑: 文丽芳)