板料激光弯曲试验

蔡友贵 王秀凤 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 100080)

Jurgen Silvanus

(欧洲宇航防务创新集团, 慕尼黑 81663)

摘 要: 针对大飞机壁板用的铝合金板料 AA6056进行激光弯曲过程的试验研究. 试验选用厚度为 1.0mm和 2.5mm的薄板,采用多组不同的工艺参数进行对比分析.采用直径 0.1mm的镍铬-镍硅热电偶作为温度传感器, YOKOGAWA MV200型便携式记录仪测量板料表面的温度;使用 MV-1300UM CCD拍摄板料激光弯曲变形的过程,通过自行开发的实时采集软件记录并进行图像处理,最终得到了板料激光弯曲变形过程的实测曲线.试验结果为该过程的数值模拟提供了更为精确的验证依据,为深入研究板料激光弯曲过程奠定了试验基础.

关 键 词: 激光弯曲; 实时测量; 温度场; 位移场

中图分类号: TN 249; TG 386.3+1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0154-04

Experiment of sheet metal on laser bending

Cai Yougui Wang Xiufeng

(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 100080, China)

Jurgen Silvanus

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

Abstract The process of laser bending for aluminium alloy AA6056 used to produce large airplane panel was studied through experiment. The thickness of specimens was selected 1.0 mm and 2.5 mm separately. The different groups of the technological parameters were used to analyze contrastively in the process of laser bending. The specimen was clamped at one end as a cantilever plate and was irradiated by the laser beam in the width direction. 0.1 mm diameter NiCr/NiSi thermocouple was adopted as temperature sensor in the experiment, and the temperature on the specimen surface was measured by YOKOGAWA MV200 measuring device. A free end point was chosen as a measuring point and a CCD-camera recordsed its displacement during the laser bending process. The video was processed by the measuring software, which was developed by Beijing University of Aeronautics and Astronautics, and the displacement value can be obtained. Experiment result supplies more accurate data for numerical simulation of laser bending process and provides the experimental foundation for research on laser bending process deeply.

Key words: laser bending; real-time measurement; temperature field; deformation field

收稿日期: 2007-11-01

基金项目: 欧洲宇航防务创新集团(德国 EADS Innovation Works)资助项目

作者简介: 蔡友贵(1982-),女,湖北麻城人,硕士生, cygalice@163.com.

板料激光弯曲是一种利用高能激光束扫描金属板料表面时形成的非均匀温度场导致的热应力来实现塑性变形的工艺方法[1]. 它是一种无需模具、无需外力的非接触的热态累积成形技术, 具有生产周期短、柔性大等特点, 并能成形常温下采用其它方法难以成形的材料, 可实现与切割、焊接、刻蚀等激光加工工序的同工位复合化[2], 特别适合于大型工件、小批量或单件产品的成形, 因此引起了国内外学者的广泛关注, 已在航空航天、精密仪器仪表、船舶和汽车制造等多个领域进行了相关的应用研究. 值得关注的是欧洲宇航防务集团(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、德国等以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[2-8]. 从公开发表的文献中可知, 已做的实验研究不多, 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.

本文针对大飞机壁板用的铝合金板料 AA6056进行激光弯曲过程的试验研究. 选用镍铬-镍硅热电偶作为温度传感器测量板料表面不同 3点处的温度, 并获得各测量点温度随时间变化的曲线; 采用 CCD摄像头实时测量板料自由端一点的激光弯曲变形过程, 结合自行研发的实时采集软件记录并处理图像, 最终得到了板料激光弯曲变形过程的实测曲线. 该试验为研究激光弯曲提出了更为科学的测量方法, 试验结果为该过程的数值模拟提供了更为精确的验证依据, 为深入地研究板料激光弯曲过程奠定了试验基础, 推进了激光弯曲技术和实际应用.

1 试　验

试验在德国 EADS Innovation W orks激光实验室进行. 试验装置如图 1所示.

试验设备采用 3500W Nd: YAG激光器, 工业机械手控制其运动. 试验材料为铝合金板料 AA6056(150mm × 100mm), 厚度分别为 1mm 和 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横向中线进行扫描. 试验工艺参数如表 1所示.

将直径 0 1mm的镍铬-镍硅热电偶粘在试件的表面, 粘贴位置如图 2所示, 通过测温仪器

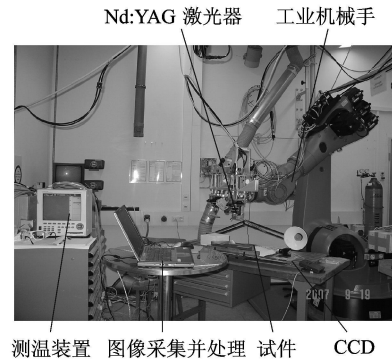
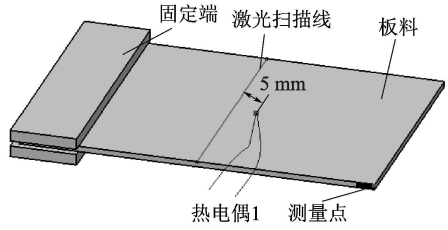


图 1　试验装置

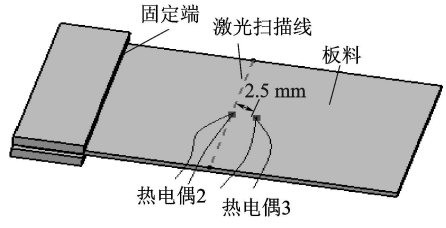
YOKOGAWA MV 200采集数据, 用 Excel得到所需的曲线.

表 **1**　试验工艺参数

编号	试件	功率 P /W	扫描速度 v /(mm·s^{-1})	板料厚度 t/mm	光斑直径 Φ/mm
①	顺铣	2000	10	1. 0	5
②	逆铣	2000	10	1. 0	5
③	轧制	2750	15	2. 5	5
④	轧制	2250	12. 5	2. 5	5
⑤	轧制	2000	10	2. 5	5
⑥	轧制	1750	7. 5	2. 5	5



a　试件上表面



b　试件下表面

图 2　镍铬-镍硅热电偶粘贴位置

将试件自由端部分涂碳黑, 如图 2a所示. 选用 MV-1300UM CCD摄像头采集变形过程中测量点处的位置变化. 镜头为变焦镜头, 焦距为 50mm, 帧率为 15帧/s 数据传输类型为 USB2 0接口. 采用滤光镜滤去激光对视频采集的光照影响, 从而避免采集的图片出现发白发虚、拉丝现象, 如图 3所示.

基于 Microsoft Visual C++ 6 0平台自行开发了实时采集软件, 采集的界面如图 4所示. 通过视频的采集, 图像处理得到测量点在板料激光弯

曲过程中的位移变化曲线.



图 3 CCD摄像装置

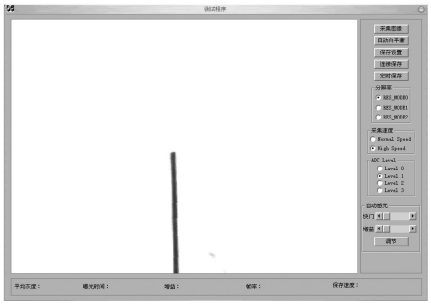


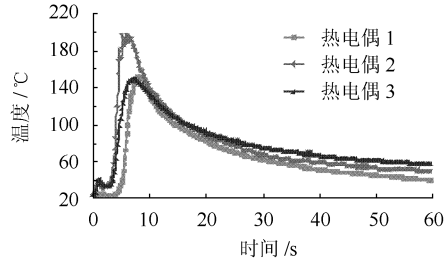
图 4 图像处理软件界面

2 试验结果及分析

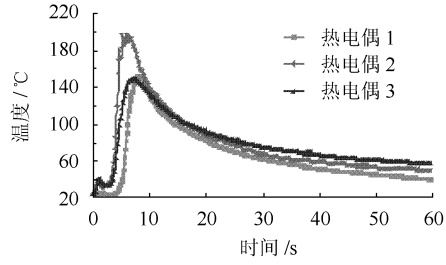
2 1 温度测量结果及分析

测温系统得到的温度数据, 利用 M icrosoft O ffice Excel绘制出测量点温度随时间的变化曲线, 如图 5所示.

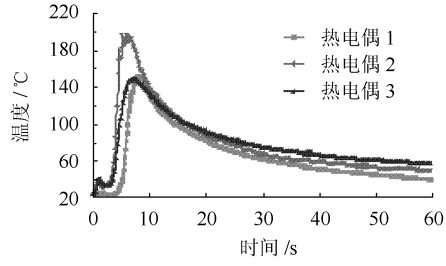
图 5表明, 尽管板料的厚度不同, 但温度随时间的变化趋势相同. 当激光束照射板料的上表面时, 上表面温度迅速升高, 当光斑沿着板宽方向走到末端时, 上表面温度升至最高; 停止扫描后, 板料表面温度逐渐降至室温. 但降温速度与板料的厚度以及工艺参数有关. 如图 5a所示, 厚度为 1. 0mm的薄板试件中, 3个测量点处降温速度基本相同. 而图 5b ~ e表明, 对于厚度均为 2. 5mm 的试件, 由于采用不同的工艺参数, 降温速度产生了较大差异. 图 5b和 c中, 热电偶 2位置点处温度峰值最高, 与周围介质的温差最大; 该测量点位于热源正下方, 热量在板料中的传热距离最短, 降温速度比热电偶 1位置点和热电偶 3位置点更快. 图 5e表明, 热电偶 2位置点降温较热电偶 1位置点快是由于在材料中的传热距离最短, 而热电偶 3位置点的降温速度明显提高是由于激光的扫描速度更进一步的下降导致传热比热电偶 1位置点更多. 图 5d中, 两条曲线趋势相似, 尽管激光扫描的工艺参数相同, 但最高温度相差较大, 这主要是由于试件最终的成形加工方式不同导致试件表面粗糙度变化. 铣切的光亮表面大大地降低了材料的吸收系数, 降低了能量的利用率.



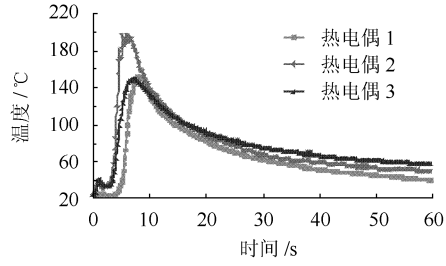
a P = 2 000W, v= 10mm /s, Φ= 5mm, t= 1. 0mm



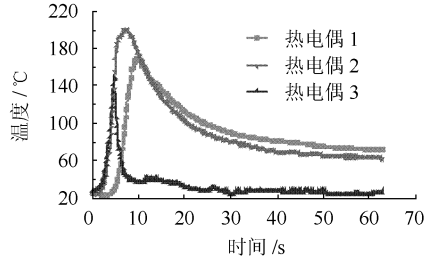
b P = 2 750W, v= 15mm /s, Φ= 5mm, t= 2. 5mm



c P = 2 250W, v= 12. 5mm /s, Φ= 5mm, t= 2. 5mm



d P = 2 000W, v= 10mm /s, Φ= 5mm (热电偶 2)



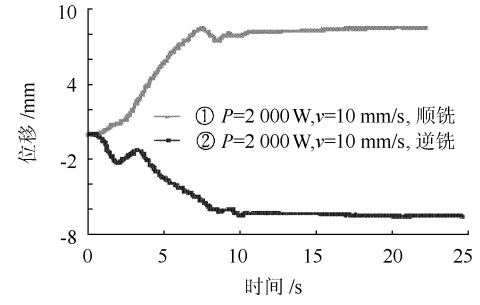
e P = 1 750W, v= 7. 5mm /s, Φ= 5mm, t= 2. 5mm

图 5 测量点温度随时间的变化曲线

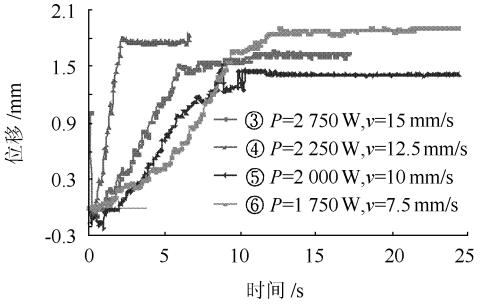
2 2 自由端位移测量结果及分析

CCD 摄像头采集的图像数据, 通过自行开发的实时采集软件得到自由端的位移随时间的变化曲线如图 6所示.

当激光束照射试件上表面时, 在照射区内, 板料厚度方向产生强烈的不均匀温度梯度是试件变



a　厚度 t= 1mm 板料变形



b　厚度 t= 2 5mm 板料变形

图 6　自由端的位移随时间的变化

形的主要原因, 板料上表面的膨胀量远远大于下表面, 从而使板料产生背向激光束的弯曲, 但未被加热区抑制了上表面材料的膨胀, 由于金属材料的屈服极限随温度的升高大大降低, 所以在热应力的作用下, 上表面处的材料产生较大的塑性变形, 导致板料的上表面出现材料的少量堆积. 在冷却阶段, 上表面材料温度降低, 体积开始收缩, 材料的屈服极限升高, 加热受压时产生的材料堆积不能完全复原. 同时, 下表面则因热传导而开始膨胀, 材料屈服应力降低而易于变形, 随着降温过程的进行, 由于热传导, 试件下层升温, 内部热膨胀继续. 因此背离激光方向的变形逐渐减小, 朝向激光束方向的变形越来越大, 直到试件温度梯度逐渐变小, 冷却至室温为止.

图 6表明, 厚度 t= 1. 0mm的板料远比厚度 t= 2 5mm 的板料变形明显. 图 6中曲线 ①和 ②表明, 较薄的试件反向弯曲较小, 因此回复较快, 并在激光扫描完后迅速稳定变形. 值得注意的是, 在完全相同的条件下, 图 6中 ①和 ②变形方向几乎完全相反. 认为由于两个试件照射面的铣切方向相反, 板料较薄、铣切后试件内部的残余应力影响了试件变形的初始条件. 图 6中 ③~ ⑥表明, 较厚的试件初始反向弯曲较明显, 且在激光扫描完直至变形稳定, 不存在回弹.

3　结　论

板料激光弯曲过程中, 其内部及表面温度的变化规律受板料厚度、激光照射速度的影响较大. 板料越薄, 影响相对越小; 速度越低, 影响相对越大. 根据现有激光器条件, 建议照射速度的选择范围为 10~ 15mm /s.

板料激光弯曲过程中, 自由端位移变化规律受板料厚度的影响较大. 板料越薄, 影响相对越大. 特别是内部具有残余应力的薄板在激光照射时, 将使板料的变形方向发生改变. 为了控制薄板变形的稳定性, 根据现有激光器条件, 建议薄板的厚度应大于 1mm.

致谢　感谢课题组郭晓丽、杨清凤在试验进行中所做的工作.

参考文献 (References)

[1] 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
Cheng Lifang. Experimental research on laser bending and forming of aluminum [D]. Dalian: School of Mechanical & Engineering, Dalian University of Technology, 2005(in Chinese)

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

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

[4] 周益军, 张永康, 孔德军, 等. 基于水冷却的不锈钢板料激光热应力成形试验 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 172- 176
Zhou Yijun, Zhang Yongkang, Kong Dejun, et al. Study on laser forming of AISI304-sheet metal by thermal stress based on water-cooling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 172- 176(in Chinese)

[5] 裴继斌, 张立文, 张全忠, 等. 船舶钢板激光弯曲成形的试验研究 [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)

[6] 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)

[7] 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

[8] 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)