

文章编号: 0258-7025(2007)12-1721-05

扫描次数对钢板激光弯曲成形影响的模拟

裴继斌, 张立文, 张全忠, 王存山, 董 闯

(三束材料改性国家重点实验室, 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116085)

摘要 研究了 6 mm 和 9 mm 两种厚度的钢板在不同激光工艺参数下扫描次数对激光弯曲成形过程的影响。利用三维热力耦合有限元(FEM)模型模拟计算了激光多次扫描弯曲成形过程的温度场、应力场和弯曲角度的变化。测量了成形过程中温度和弯曲角度的变化, 模拟结果与实验结果符合较好。模拟结果表明, 每次扫描过程中温度场变化基本相同, 残余应力和钢板弯曲角度随激光扫描次数的增加而增大。随着扫描次数的增加, 6 mm 厚钢板的弯曲角度增量减小, 而 9 mm 厚钢板的弯曲角度呈线性增大。激光工艺参数影响钢板下表面的应变强化程度, 在不同的激光工艺参数下不同厚度钢板的弯曲角度随扫描次数的增加变化规律不同。

关键词 激光技术; 激光弯曲成形; 数值模拟; 扫描次数

中图分类号 TG 356.25; TG 665 **文献标识码** A

Simulation on Influence of Scanning Passes during Laser Bending of Steel Plate

PEI Ji-bin, ZHANG Li-wen, ZHANG Quan-zhong, WANG Cun-shan, DONG Chuang

(State Key Laboratory of Materials Medification by Laser, Ion and Electron Beams,

School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116085, China)

Abstract The influence of scanning passes on laser bending process was studied for the plates with 6 mm and 9 mm thickness at different laser parameters. A three-dimensional coupled thermo-mechanical finite element method (FEM) model was developed to calculate the variation of temperature field, stress field and bending angle during multiple-irradiation laser bending process. Real-time temperature and bending angle were measured. The simulation results were in agreement with the experimental results well. The simulation results showed that the temperature distribution was similar between each irradiation. Residual stresses and bending angle were increasing with the increase of laser scanning passes. The bending angle of 6 mm thickness plate decreased as the irradiation number increasing, while that of 9 mm thickness plate increased linearly. Laser parameters affected the extent of strain hardening on the underside of the steel plate. Under different laser parameters, the bending angle of various thickness plates has dissimilar relationship with the laser scanning passes.

Key words laser technique; laser bending; numerical simulation; scanning passes

1 引 言

板材激光弯曲成形过程中激光束每次扫描只能产生一个小的弯曲角度, 因此只有通过多次重复扫描才能得到比较大的弯曲角度, 满足工程需要。一些学者采用实验和数值模拟的方法研究了扫描次数对板材激光弯曲成形的影响^[1~7], 发现不同的板材多次扫描的成形规律不同。K. C. Chan 及管延锦等^[8,9]研究薄板激光弯曲成形, 得出弯曲角度随激光扫描次数的增加呈线性增大。J. Lawrence 等^[10]

用二极管激光弯曲成形低碳钢板, 发现只有在激光扫描次数较少时, 板材弯曲角度才随扫描次数增加线性增大。M. Marya 等^[11]研究钛合金板激光弯曲成形时发现弯曲角度的增大随扫描次数的增加而减小。A. Sprenger 等^[12]研究认为弯曲角度的增加随扫描次数增加而减小的原因是吸收系数变化、激光扫描区域增厚和板材下表面应变强化三个因素影响的结果。

之前的研究是针对薄板(6 mm 以下)进行的, 得出的扫描次数对板材激光弯曲成形的影响规律差

收稿日期: 2006-12-15; 收到修改稿日期: 2007-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(50075013)资助项目。

作者简介: 裴继斌(1976—), 男, 讲师, 博士生, 主要从事材料固态加工过程数值模拟研究。E-mail: peijb@sina.com.cn

别很大。本文研究了6 mm和9 mm两种厚度的钢板在不同激光工艺参数下扫描次数对激光弯曲成形过程的影响。建立了三维有限元(FEM)模型对不同厚度钢板在不同激光工艺参数下多次扫描弯曲成形过程进行了模拟计算,并对扫描过程的温度和弯曲角度进行了实时测量。

2 钢板激光弯曲成形的有限元模型

2.1 基本方程

三维直角坐标系内,传热分析的热平衡方程可描述为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (1)$$

式中 ρ 和 C_p 分别表示材料的密度和比热, λ 为导热系数, q 为热源强度, 这里为激光束扫描所产生的热流密度。

温度计算的有限元基本方程为

$$[K_T]\{T\} + [n]\{\dot{T}\} = \{P\}, \quad (2)$$

式中 $[K_T]$ 为热传导阵, $[n]$ 为热容阵, $\{T\}$ 和 $\{\dot{T}\}$ 为节点温度和节点温度对时间的导数, $\{P\}$ 为热流矢量。

有限变形弹塑性有限元方程的矩阵形式可描述为

$$[k]\Delta\{\delta\} = \Delta\{Q\}, \quad (3)$$

式中 $[k]$ 为切线刚度矩阵, $\Delta\{\delta\}$ 为节点位移增量, $\Delta\{Q\}$ 为力矢量, 包括节点力矢量和热应变引起的力矢量。

基于有限元软件 MSC. Marc 建立了钢板激光弯曲成形过程三维弹塑性热力耦合计算模型。

2.2 有限元模型的建立

钢板尺寸分别为 300 mm × 150 mm × 6 mm 和 300 mm × 150 mm × 9 mm, 材料为 15# 钢, 材料的热物性和力学性能参数随温度变化。采用八节点六面体单元对模型进行划分。为提高计算的精度和效率, 在热影响区附近将网格加密, 并向周围区域过渡, 距热影响区较远的区域保持稀疏网格。9 mm 板有限元网格划分如图 1 所示, 最小的网格为 1 mm × 1.125 mm × 1.125 mm, 单元总数为 16192, 时间步长为 0.1 s。6 mm 板网格划分方法与 9 mm 板相同, 但厚度小, 单元数少。

激光束作为外加表面热流载荷输入, 沿钢板宽度方向中线匀速扫描。通过用户子程序描述激光束

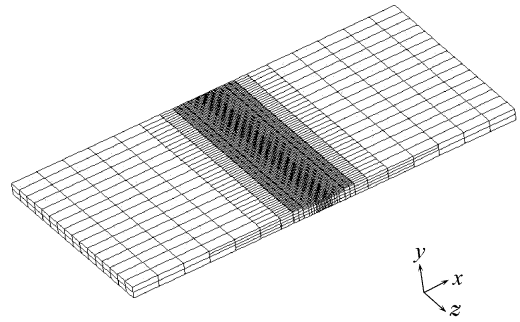


图 1 9 mm 板有限元网格划分

Fig. 1 Model of FEM simulation for 9mm thickness

的连续扫描, 使激光热载荷以热流密度的形式施加到相应单元上, 采用热流均匀分布的方形光斑, 其能量密度分布 I 为

$$I = \frac{AP}{d^2}, \quad (4)$$

式中 A 为材料对激光的吸收系数, P 为激光束的输出功率, d 为激光光斑的宽度。为增加对激光能量的吸收, 在钢板表面涂吸收涂料, 吸收系数范围为 0.6~0.8, 根据实验结果修正, 吸收系数取为 0.7。

激光源固定, 钢板匀速移动, 约束钢板夹持端除扫描方向外的自由度, 这与钢板激光弯曲成形过程的实际情况一致。钢板经激光束扫描后在空气中自然冷却。换热边界条件为

$$q_h = h(T - T_a), \quad (5)$$

式中 q_h 为表面法线方向单位面积的热流率, h 为换热系数, 包括对流换热系数和辐射换热系数, T_a 为环境温度, 钢板的初始温度和环境温度均为 20 °C。

3 模拟结果与分析

计算了 6 mm 和 9 mm 厚钢板在不同激光工艺参数下经激光多次扫描的弯曲成形过程。对于 6 mm 厚的钢板, 激光功率为 1.0 kW, 扫描速度为 7.5 mm/s, 激光光斑为 8 mm × 8 mm, 重复扫描 5 次, 时间间隔为 300 s。对于 9 mm 厚的钢板, 激光功率为 1.2 kW, 扫描速度为 2 mm/s, 激光光斑为 12 mm × 12 mm, 重复扫描 5 次, 时间间隔为 600 s。

对多次扫描弯曲成形过程的温度和弯曲角度进行了实时测量, 如图 2 所示。用热电偶测温系统实时测量下表面扫描中线中点温度的变化。热电偶采用直径 1.0 mm 的镍铬-镍硅铠装热电偶, 测量误差为 ±2.5 °C, 测温频率为 110 Hz。用 L-GAGE 激光位移传感器测量钢板边缘一点位移的变化以衡量钢

板弯曲角度的变化。测量分辨率小于10 μm。实验所采用的激光光斑大小与相应的计算模型中相同，

好,可知在扫描次数较少的条件下,钢板对激光的吸收变化很小。

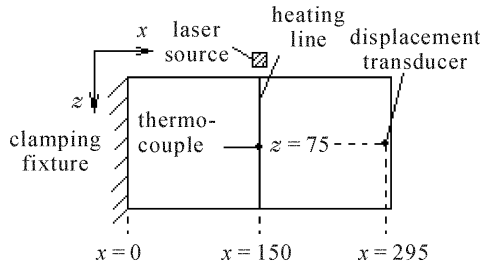


图 2 实验装置图

Fig. 2 Configuration of experimental setup

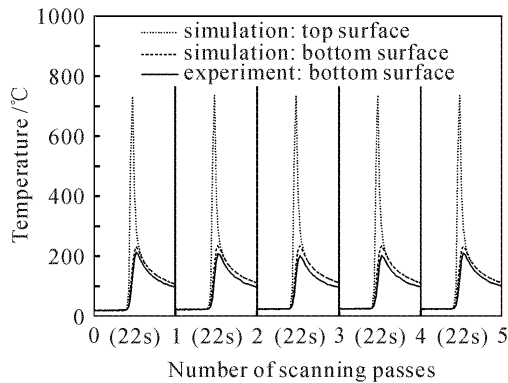


图 3 6 mm 板多次扫描过程的温度变化

Fig. 3 Temperature variation for the plate of 6 mm thickness

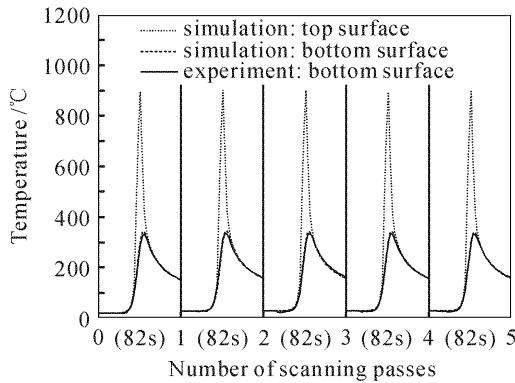


图 4 9 mm 板多次扫描过程的温度变化

Fig. 4 Temperature variation for the plate of 9 mm thickness

通过实测确定。

图 3 和图 4 是激光多次扫描弯曲成形过程中温度的变化。钢板上、下表面温度迅速升高,上表面温度较高,上、下表面之间产生了强烈的温度梯度。对于9 mm厚钢板,激光弯曲成形过程中上、下表面的温度梯度所产生的热应力是弯曲成形的主要原因^[13]。由于重复扫描时间间隔较长,多次扫描过程中温度分布基本相同,模拟结果与实验结果符合较

好,可知在扫描次数较少的条件下,钢板对激光的吸收变化很小。

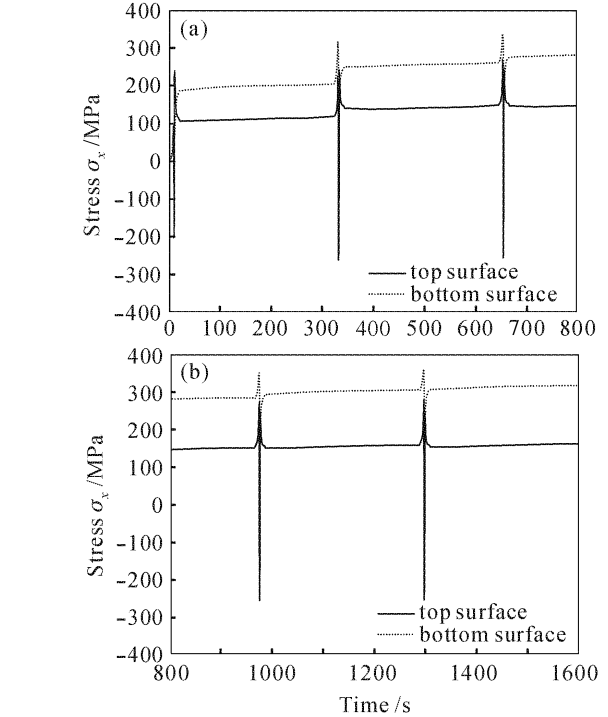


图 5 6 mm 板多次扫描过程的应力变化

Fig. 5 Variation of stress σ_x for the plate of 6 mm thickness

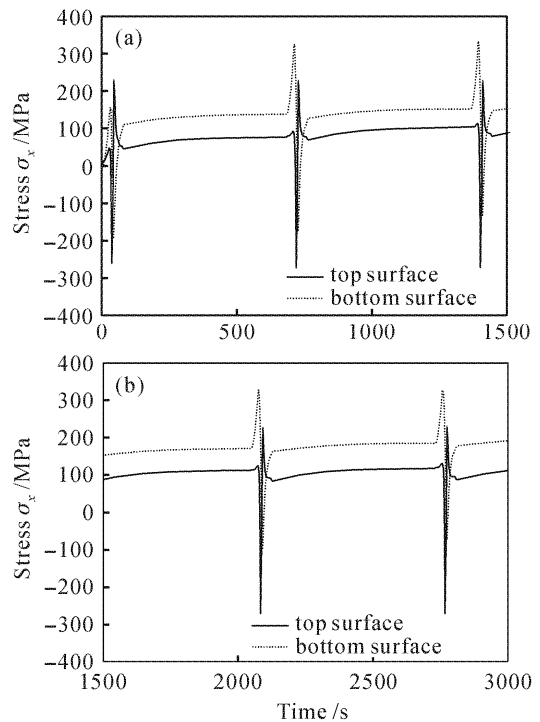


图 6 9 mm 板多次扫描过程的应力变化

Fig. 6 Variation of stress σ_x for the plate of 9 mm thickness

中可以看出,在扫描开始时,两点受较小的拉应力。当激光束移近时,两点受热膨胀,受周围材料的约束产生很大的压应力,激光束扫过后,最大压应力开始下降。上表面点受邻近材料冷却收缩的影响,形成拉应力,随着变形的继续,应力逐渐下降,趋于稳定。而下表面点产生逐渐变大后趋于稳定的拉应力。每次扫描结束后,上、下表面的残余应力均为拉应力,且下表面的残余拉应力比上表面大。多次扫描过程中应力变化具有相同的趋势,但残余应力随扫描次数的增加而增大。对于9 mm厚的钢板,由于钢板的下表面温度较高,在重复扫描时,释放了一部分残余应力,使残余应力的增加较小。

图7是6 mm厚钢板的弯曲角度随扫描次数的变化关系。弯曲角度随扫描次数的增加而增加,但弯曲角度的增量逐渐减小。图8为9 mm厚钢板的弯曲角度随扫描次数的增加近似呈线性增加,激光扫描区域钢板增厚和下表面的应变强化对成形的影响较小。对于厚钢板,当扫描次数较少时,钢板下表面的应变强化对成形过程的影响就已比较明显^[14]。对于9 mm厚的钢板,由于钢板下表面的温度较高。

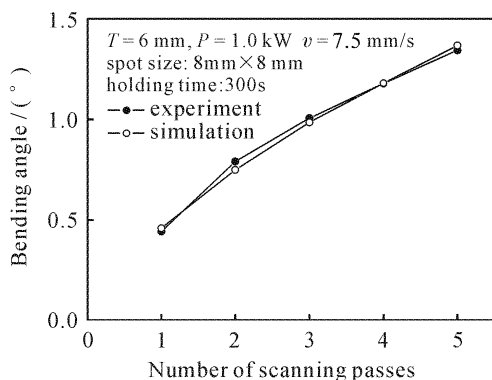


图7 6 mm板弯曲角度与扫描次数的关系

Fig. 7 Relationship between scanning passes and bending angle for the plate of 6 mm thickness

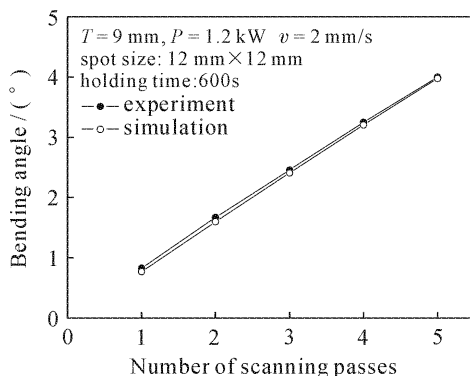


图8 9 mm板弯曲角度与扫描次数的关系

Fig. 8 Relationship between scanning passes and bending angle for the plate of 9 mm thickness

随温度升高,材料的屈服强度降低,减小了应变强化对成形过程的影响,所以随扫描次数的增加,弯曲角度近似呈线性增大。而对于6 mm厚的钢板,下表面的温度较低,应变强化对成形过程影响较为明显。所以随扫描次数增加,弯曲角度增量减小。

4 结 论

1) 在钢板激光多次扫描弯曲成形过程中,激光扫描次数较少时,钢板对激光能量的吸收没有发生明显的变化。

2) 模拟结果与实验结果符合较好。在扫描次数较少的情况下,时间间隔较长,多次扫描的温度分布基本相同,应力变化趋势相同,残余应力随扫描次数增加而增大。弯曲角度随扫描次数的增加而增大。

3) 对于不同厚度的钢板,不同的激光工艺参数下,弯曲角度随激光扫描次数增加的变化规律不同。激光工艺参数影响钢板下表面的应变强化程度,进而影响弯曲角度随扫描次数的变化规律。

参 考 文 献

- An, K. Kyrasani, Th. B. Kermanidis, Sp. G. Pantelakis. Numerical and experimental investigation of the laser forming process [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1999, **87**(1):281~290
- Z. Hu, M. Labudovic, H. Wang *et al.*. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, **41**:589~607
- Pei Jibin, Zhang Liwen, Lü Bo *et al.*. Numerical simulation of multiple-irradiation laser bending process of steel plate [J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2005, **37**(6):782~785
裴继斌, 张立文, 吕波等. 钢板激光多次扫描弯曲成形的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(6):782~785
- 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
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
- Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun *et al.*. Study on relationship between material properties and bending angles in laser forming process of sheet metals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):499~504
管延锦, 孙胜, 赵国群等. 材料性能参数与板料激光弯曲成形角度的相关性研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(4):499~504
- Liu Shunhong, Hu Qianwu, Zhou Longzao *et al.*. Investigation on microstructure and property of laser bent Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1049~1053
刘顺洪, 胡乾午, 周龙早等. 激光弯曲成形 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 的组织及性能研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(11):1049~1053
- Ji Zhong, Wu Shichun. FEM simulation on laser bending of sheet metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10):953~956
季忠, 吴诗惇. 板料激光弯曲成形数值模拟[J]. 中国激光,

- 2001, **A28**(10):953~956
- 8 K. C. Chan, Y. Harada, J. Liang *et al.*. Deformation behaviour of chromium sheets in mechanical and laser bending [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2002, **122**(2-3):272~277
- 9 Guan Yanjin, Sun Sheng, Luan Yiguo *et al.*. Experimental study on influence of scan times on laser forming of sheet metals [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(11):1163~1166
管延锦, 孙 胜, 栾贻国 等. 扫描次数对板料激光弯曲成形影响的实验研究[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(11):1163~1166
- 10 J. Lawrence, M. J. J. Schmidt, L. Li. The forming of mild steel plates with a 2.5 kW high power diode laser [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, **41**(7):967~977
- 11 M. Marya, G. R. Edwards. A study on the laser forming of near-alpha and metastable beta titanium alloy sheets [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2001, **108**(3):376~383
- 12 A. Sprenger, F. Vollertse, W. M. Steen *et al.*. Influence of strain hardening on laser bending [C]. Proc. LANE'94, Bamberg, 1994, **1**:361~370
- 13 . Geiger, F. Vollertsen. The mechanisms of laser forming [J]. *Annals of the CIRP*, 1993, **42**(1):301~304
- 14 J. Magee, K. G. Watkins, W. M. Steen *et al.*. Laser bending of high strength alloys [J]. *J. Laser Application*, 1998, **10**(4):149~155



《激光技术及其应用》汇编介绍

为了更好地服务科研工作者、工程技术人员以及其他激光行业的从业人员,总结研究开发经验,中国科学院上海光学精密机械研究所光学期刊联合编辑部从近年来《中国激光》和《光学学报》上发表的论文中精选了激光实验技术与应用方向的优秀论文,结集出版。

论文集共收录论文 39 篇,主要反映了激光器技术、传感器技术、微细加工技术、光学测量与计量等方面的研究进展。

感兴趣的读者请与本刊发行部的高先生联系。

电 话:021-69918253 E-mail:gfhai@siom.ac.cn

《中国激光》编辑部