

文章编号: 0258-7025(2008)07-1087-04

激光热成形工艺中加热位置对板材变形的影响

石永军¹ 刘 峰¹ 綦耀光¹ 姚振强²

(¹ 中国石油大学机电工程学院, 山东 东营 257061; ² 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘要 在复杂型面激光热成形工艺规划中, 激光需要在板材的不同位置进行加热, 加工出所需要的目标形状, 而加热位置不同板材的变形不同。为了实现板材不同加热位置加工工艺参数的选择, 分别探讨了温度梯度机制和屈曲机制条件下加热位置对板材变形的影响规律。研究表明, 在温度梯度机制条件下, 当加热位置远离自由端时, 加热位置对弯曲角的影响不大, 当加热位置距自由端较近时, 加热位置对弯曲角有较大影响; 在屈曲机制条件下, 加热位置不仅影响板材的弯曲角, 而且影响板材的弯曲方向。因此, 在复杂曲面工艺规划中为了更准确地确定加工工艺参数, 建立工艺参数与板材弯曲变形基本关系数据库, 必须考虑激光加热位置对变形的影响。

关键词 激光技术; 激光热成形; 加热位置; 变形规律

中图分类号 TN 249; TG 665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083507.1087

Effect of Heating Position on Deformation of Plate in Laser Forming

Shi Yongjun¹ Liu Feng¹ Qi Yaoguang¹ Yao Zhenqiang²

(¹ College of Mechanical & Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)
² School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract To obtain the desirable shape for the complicated curve surface forming, it is necessary to place the laser scanning lines on different positions of metal plate. However, the deformation of plate is different when the heating position varies. In this paper, effect of the heating position on deformation behavior of the plate is discussed under the temperature gradient mechanism and the buckling mechanism in order to optimize the process parameters in industrial applications. The results suggest that under the temperature gradient mechanism the heating position has a little effect on the bending angle of the plate when the laser scanning line is far away from the fixing edge, while the effect of the heating position on the bending angle is great when the laser scanning line is close to the fixing edge. Under the buckling mechanism, the heating position has an effect not only on the bending angle of the plate, but also on the bending direction of the plate. Therefore, to acquire more precise parameters for the complicated curve surface process planning, the effect of the heating position on the deformation must be considered when building the basic relationship database between process parameters and plate deformation.

Key words laser technique; laser forming; heating position; deformation rule

1 引 言

在航空、航天、舰船、汽车及微电子的零部件中, 成形件所占比重较大, 品种多, 批量小, 成形工艺过程复杂, 尤其是钛镍合金等难成形材料零件。采用常规整体加热后冲压的方法需要制作大量的耐高温模具, 成本高且周期长; 部分零件由于受到加热炉尺寸的限制, 不能使用该方法进行成形加工。激光热成形利用高能激光束对工件局部加热诱发不均匀热

应力, 使板材产生塑性变形, 以获得所需要的目标形状。作为一种基于热态积累的成形方法, 激光热成形无需模具与外力, 是一种柔性成形技术, 特别适合高硬脆性材料的成形与小批量零件的生产^[1,2]。激光热成形是一个非常复杂的瞬态热弹塑性变形过程, 涉及传热学、弹塑性力学和材料科学等多门学科。国内外学者在激光热成形机制、变形主要影响因素、多次扫描、弯曲角解析模型、复杂曲面工艺规

收稿日期: 2007-11-26; 收到修改稿日期: 2007-12-25

基金项目: 上海市科学技术委员会重大攻关基金(04dz11002)和中国石油大学博士科研基金(Y070306)资助项目。

作者简介: 石永军(1973—), 男, 山东人, 讲师, 博士, 主要从事激光加工、汽车设计与制造理论等方面的研究。

E-mail: syjgl@126.com

划和激光热成形对材料性能影响等方面进行了大量的理论、实验和数值仿真研究^[3-10]。另外,周建忠等^[11,12]在激光热成形的基础上与脉冲激光的冲击波作用相结合,提出了一种热效应和力效应复合的成形方法。目前的研究主要针对加热线位于板材中线附近的情况,而加热位置对板材变形影响规律的研究较少。在实际的工业生产中,通常对于复杂型面的单曲率和双曲率金属板材,往往需要选择多条加热路径,每条加热路径需要根据变形要求规划在不同的位置。因此,为了在复杂型面板材工艺规划中确定出每一条加热路径所对应的加工工艺参数,需要对不同激光加热位置条件下板材的变形行为进行深入研究。

激光热成形主要有三种变形机制^[2,3,5,7,13]:温度梯度机制、屈曲机制和增厚机制。由于增厚机制的应用较少,本文只研究温度梯度机制和屈曲机制条件下加热位置对板材变形规律的影响。

2 激光热成形有限元仿真模型

激光热应力成形是一个非常复杂的动态变形过程,要想全面了解加热过程中的温度场分布和变形历史,仅靠实验很难做到。数值模拟作为成形优化的强有力工具,目前在激光成形中的应用已比较成熟,通过数值分析可以对激光加热过程中金属板材的温度、应力和位移等进行定量分析。以大型有限元分析软件 ANSYS 作为分析平台,采用热力间接耦合非线性有限元分析方法,实现激光热成形温度场和变形场的有限元仿真,定量分析热成形过程中温度、应力、应变和位移变化,探究不同机制条件下温度分布规律和变形规律。激光热成形过程比较复杂,影响因素众多,为了便于分析计算,假设忽略板材与环境的耦合,认为环境状态稳定;工件材料各向同性,材料热物理性能和机械性能仅是温度的函数而与位置无关;考虑空气的对流和辐射,忽略热源引起的对流项及相变潜热;忽略塑性变形产生的热量;工件无预弯曲和初始残余应力。关于单元选取、移动热源模拟、材料特性和载荷及边界施加等方面的问题以及有限元模型的有效性实验验证,详见文献^[14]。

3 温度梯度机制下加热位置对变形的影响

当采用直径小、扫描速度快、能量密度高的激光

束进行热成形时,温度梯度机制起支配作用。由于上表面瞬间(通常小于0.1 s)加热至高温状态,而下表面温度较低,此时在加热区的厚度方向上产生很大的温度梯度。加热区域产生塑性变形,且上表面塑性变形量大于下表面塑性变形,导致板材产生面向激光源绕扫描线的正向弯曲,如图 1 所示,其中 α_x 为弯曲角。国内外学者对温度梯度机制下金属板材的变形行为进行了大量的实验与仿真研究,分析了不同激光功率、光斑直径和扫描速度对板材弯曲角的影响,但在激光热成形研究中主要采用激光束沿板材中心线进行扫描。然而,对于复杂曲面的激光热成形加工,激光加热路径需要根据变形场规划在不同的位置。激光扫描线距自由端距离不同,板材的弯曲变形行为不同。为了实现复杂型面工艺规划中加工参数的选择,需要探究激光扫描位置对板材弯曲变形的影响。

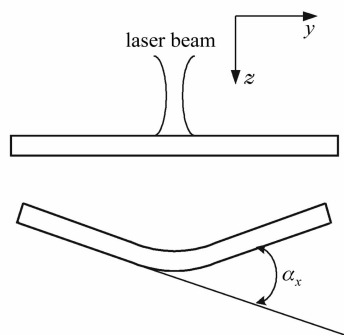


图 1 温度梯度机制

Fig. 1 Temperature gradient mechanism

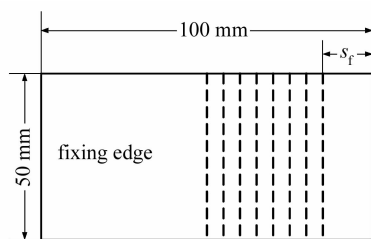


图 2 加热线位置

Fig. 2 Locations of heating lines

为了分析激光扫描线距自由端距离对板材变形场的影响,选择 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 1.92\text{ mm}$ 金属板材进行研究。扫描线距自由端距离 $s_f = 10\sim 50\text{ mm}$,激光功率 $P = 800\text{ W}$,扫描速度 $v = 18\text{ mm/s}$,光斑直径 $d = 6\text{ mm}$,加热线位置如图 2 所示。图 3 反映了激光加热位置对弯曲角的影响,从图中可以看出,当加热线接近于板材边缘时,弯曲角明显减小,但随着 s_f 的进一步增大,弯曲角趋于稳定。弯曲角变化的主要原因是:在激光热成形过程

中,距自由端距离不同,扫描线与自由端之间的材料对加热区域的约束不同,距自由端距离 s_f 越大,加热区域材料的热膨胀受到的约束作用越大,使加热区由热应力引发的塑性变形量增加,导致板材的弯曲角越大;随着 s_f 的进一步增大,约束作用趋于稳定,弯曲变形角不再继续增大。因此,为了复杂曲面工艺规划中更为准确地确定加工工艺参数,在确定工艺参数与弯曲变形基本关系数据库时必须考虑激光加热位置对弯曲角的影响。

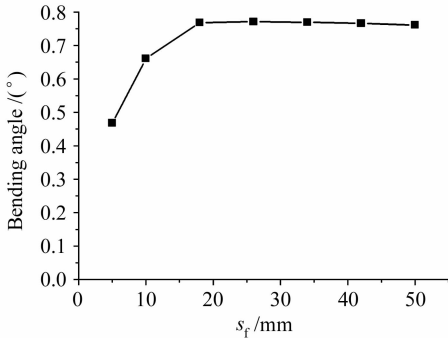


图3 加热线距板材自由端距离对弯曲角的影响

Fig. 3 Effect of heating line distance from free edge on the bending angle

4 屈曲机制下加热位置对变形的影响

当激光束的直径较大、扫描速度较慢、板材较薄、热传导率较高时,屈曲机制起主要作用。在加热区域内厚度方向的温度梯度很小,且加热区域较大,随着温度的升高,加热区材料发生屈曲,屈曲区中心的材料发生塑性变形。一旦屈曲产生,由于屈曲区两侧以及扫描路径上的其他区域依然是弹性变形,使弯曲内侧的变形进一步增大,内侧的残余塑性变形大于外侧的残余塑性变形。冷却时,虽然正反面都产生横向收缩,但板材总的横向收缩量弯曲内侧仍大于弯曲外侧,最终金属板的弯曲方向和屈曲初始方向一致。在屈曲机制下,板材可能产生正向弯曲也可能产生反向弯曲,板材的弯曲方向主要取决于屈曲发生时板材的弯曲方向。

在复杂型面热成形规划中,激光加热路径需要规划在板材的不同位置。加热路径位置不同周围冷态材料对加热区域的约束不同,屈曲机制起主导作用时,微小的扰动就可能改变板材的弯曲方向,有可能出现相同工艺参数情况下,扫描线位于中心线时板材反向弯曲,偏离中心线时板材正向弯曲。因此,为了在工艺规划过程中明确板材的弯曲方向,需要对不同加热位置条件下板材的弯曲方向进行研究。

为了分析加热位置对板材变形方向的影响,选择三组不同的工艺参数,板材尺寸为 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$,以探讨激光不同扫描位置对板材弯曲方向和弯曲角变化规律的影响,结果如图4所示。

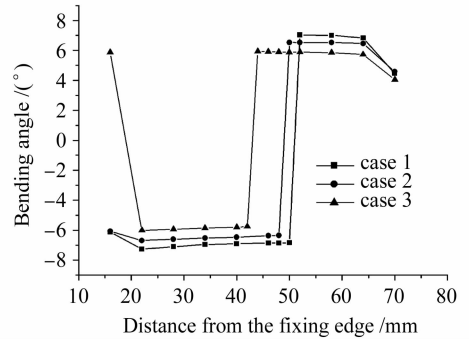


图4 激光加热位置对板材弯曲方向和弯曲角的影响

Fig. 4 Effect of the laser heating position on the bending direction and the bending angle

从图4中可以看出,在相同的工艺参数条件下,扫描线位置不同弯曲方向和弯曲角不同。对于三组不同的工艺参数,当扫描线位于板材中线时,板材均产生反向弯曲,但当扫描线距夹持端距离均大于等于52 mm时,板材则产生正向弯曲,扫描线位置对板材弯曲方向有较大影响。对于第一组工艺参数,当扫描线距夹持端距离小于等于50 mm时,板材产生反向弯曲,而当扫描线距夹持端距离大于等于52 mm时,板材产生正向弯曲;对于第三组工艺参数,当扫描线距夹持端距离在22~42 mm时,板材产生反向弯曲,而当扫描线距夹持端距离大于44 mm或小于16 mm时,板材产生正向弯曲。由此可见,对于不同的加工工艺参数,加热位置对板材弯曲角和弯曲方向的影响不同,在工艺规划选择工艺参数时必须考虑加热位置对板材变形场的影响。

板材弯曲方向产生变化的主要原因是:在屈曲机制起主要作用的激光热成形中,微小的扰动可能改变板材的弯曲方向。当扫描线距自由端距离较近时,激光加热线与自由端之间板材对加热区域的机械约束较小,板材由反向弯曲转变为正向弯曲后,加热区材料才发生热屈曲,从而使板材产生正向弯曲。随着距自由端距离的增加,加热区域的机械约束增大,使板材在尚未转变为正向弯曲之前加热区材料已发生热屈曲,导致板材产生反向弯曲。另一方面,当扫描线接近夹持端时,大的机械约束作用使加热阶段的反向弯曲角减小,板材有利于产生正向弯曲。此外,加热线到自由端之间材料的重力也会对板材的弯曲方向产生影响,由于重力作用使上表面加热

区域的热膨胀增大,下表面材料的热膨胀受到限制而减小,使反向弯曲角增大,这也有利于板材反向弯曲的产生。

在接近自由端和夹持端时板材弯曲角明显减小,而当扫描线距夹持端距离为 22~64 mm 时,弯曲角仅略有变化,最大弯曲角与最小弯曲角相差小于 4%。值得注意的是,从扫描线距夹持端距离为 22 mm 开始,随着逐渐远离夹持端冷态材料对加热区域的约束力越来越小,弯曲角有逐渐减小的趋势,但当板材弯曲方向由反向弯曲变为正向弯曲时,弯曲角突然增大,增幅约为 3%。产生弯曲角突然增大的原因是,在屈曲机制条件下,尽管板材产生弯曲变形主要是由热屈曲引起的,但加热区域上下表面温差对弯曲变形也产生一定的影响,当板材产生反向弯曲时,上下表面温差使热屈曲产生的弯曲角有所减小,而在板材正向弯曲时,上下表面温差使热屈曲产生的弯曲变形角增大。

5 结 论

探讨了温度梯度机制条件下,加热位置对板材变形的影响规律。研究表明,当加热线接近于板材边缘时,弯曲角明显减小,但随着 s_i 的进一步增大,弯曲角趋于稳定。在屈曲机制条件下,在接近自由端和夹持端时板材弯曲角明显减小,而当扫描线距夹持端距离为 22~64 mm 时弯曲角仅略有变化,最大弯曲角与最小弯曲角相差小于 4%。另外,加热位置不仅影响板材的弯曲角大小,而且也影响板材的弯曲方向,并且不同工艺参数对板材弯曲方向的影响也不同。因此为了在复杂曲面工艺规划中更为准确地确定加工工艺参数,在温度梯度机制和屈曲机制条件下,建立工艺参数与板材弯曲变形基本关系数据库时必须考虑激光加热位置对弯曲角的影响。

参 考 文 献

- Jiangcheng Bao, Y. Lawrence Yao. Analysis and prediction of edge effects in laser bending [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**:53~61
- 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 and Manufacture*, 2001, **41**:967~977
- F. Vollertsen, I. Komel, R. Kals. The laser bending of steel foils for microparts by the buckling mechanism—a model [J]. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1995, **3**:107~119
- L. Zhang, E. W. Reutzler, P. Michaleris. Finite element modeling discretization requirements for the laser forming process [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, **46**:623~637
- Li Weimin, Manfred Geiger, Frank Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9):859~864
李纬民, Manfred Geiger, Frank Vollertsen. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(9):859~864
- Ji Zhong, Wu Shichun. FEM simulation on laser bending of sheet metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10):953~956
季 忠, 吴诗焯. 板料激光弯曲成形数值模拟[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10):953~956
- Guan Yanjin, Sun Sheng. Study on buckling mechanism of laser bending of the sheet metal [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(1):11~14
管延锦, 孙 胜. 板料激光弯曲的屈曲机理的研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(1):11~14
- Chen Dunjun, Xiang Yibin, Wu Shidun *et al.*. Curved laser bending of titanium alloy sheets and effects of heat radiation on its microstructure and property [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, **37**(6):643~646
陈敦军, 向毅斌, 吴诗焯 等. 钛合金板料激光曲线弯曲及热辐射对其组织性能的影响[J]. *金属学报*, 2001, **37**(6):643~646
- Wang Yang, Lu Hua, Tan Jianguo. A study on laser bending of sheet metal [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3):175~177
王 扬, 路 华, 谭建国. 板料激光加热弯曲成形的研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3):175~177
- Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun *et al.*. Simulation of the laser bending process of sheet metals with pre-stresses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):755~758
管延锦, 孙 胜, 赵国群 等. 预约束应力作用下的激光弯曲成形仿真工艺研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):755~758
- Zhou Jianzhong, Huang Shu, Du Jianjun *et al.*. Laser pre-stressed compound peen forming of plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):861~865
周建忠, 黄 舒, 杜建钧 等. 金属板料激光预应力复合的喷丸成形[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):861~865
- Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1282~1287
张永康, 高 立, 杨超君. 激光冲击 TA2 板料变形的理论分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1282~1287
- M. Geiger, F. Vollertsen. The mechanisms of laser forming [J]. *CIRP Annals*, 1993, (42):301~304
- Yongjun Shi, Zhenqiang Yao, Hong Shen *et al.*. Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, **46**(12-13):1689~1697