

文章编号: 0258-7025(2008)11-1825-05

金属板材激光热成形非期望变形的数值模拟研究

石永军¹ 杨 民¹ 贲平利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 在激光热成形中工件除了产生期望的弯曲变形外,还会产生非期望变形。尽管在常规热成形中可以不予考虑,但对于成形精度要求较高的工件,这些成形误差不仅会影响工件的装配精度,也会严重影响工件的使用寿命。为了减小成形工件的非期望变形,探讨优化的成形工艺,在分析激光热成形中温度分布与不同位置冷态材料对加热区域约束力变化的基础上,揭示出非期望变形的产生机制,并提出两种新的扫描策略。研究结果表明,选用不同的扫描策略,板材的非期望变形量不同。因此,在实际的工业应用中,需要针对不同的成形要求,选用不同的激光扫描策略,以提高工件的成形精度。

关键词 激光技术;激光热成形;非期望变形;数值模拟;扫描策略;成形精度

中图分类号 TN249;TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1825

Numerical Investigation on Undesirable Deformation of Metal Plate in Laser Forming

Shi Yongjun¹ Yang Min¹ Yun Pingli¹ 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 In laser forming, except for the desirable bending deformation, the undesirable deformation is also produced. The undesirable deformation can be ignored in the conventional laser forming, however, for the high precision workpiece, these inaccuracies influence not only the assembly accuracy, but also the operational life. To reduce the undesirable deformation of the forming workpiece and seek for the optimal process technology, the temperature distribution of laser forming and restraining force variation of the surrounding cold material on the heated area are analyzed, the undesirable deformation mechanism is disclosed, and two new scanning strategies are proposed. The results show that the metal plates have the different undesirable deformation under the different scanning strategies. In real industrial applications, the different scanning strategies should be chosen according to the different forming requirements.

Key words laser technique; laser forming; undesirable deformation; numerical simulation, scanning strategy; forming accuracy

1 引 言

金属板材激光热成形是一种柔性无模局部热成形技术,它利用激光束对工件局部加热诱发不均匀热应力,如果加热的不均匀性足以使其引起的热应力超过材料相应温度下的屈服极限,则会使板材产生塑性变形,当激光相对于板材的运动轨迹为直线

或曲线组合时,便可实现所需要的目标形状。由于具有无模、柔性大和周期短的优点,金属板材激光热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。目前,该技术在船舶制造领域已开始了初步的工业应用,在航空航天、微电子和汽车等行业具有极大的应用潜力^[1~3]。

收稿日期:2008-03-05;收到修改稿日期:2008-06-16

基金项目:山东省自然科学基金(Y2007F76)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,主要从事激光热加工工艺、汽车设计与制造理论等方面的研究。

E-mail: syjgl@126.com

国内外激光热成形技术研究主要集中在期望变形的解析模型、数值模拟以及加工工艺参数等方面,并取得了一定的成果^[1, 4~10]。然而,在研究中发现工件除了产生期望的沿加热线法向横向弯曲变形外,还会产生非期望变形。尽管在常规热成形中可以不予考虑,但对于成形精度要求较高的工件,像航空航天、医疗和微电子领域的零部件等,这些成形误差不仅会影响工件的装配精度,也会严重影响工件的使用寿命,制约激光热成形技术在成形精度要求较高的工件上的应用。

国内对激光热成形中的非期望变形现象还没有相关的报道,而国外学者对非期望变形的研究也还仅仅处于起步阶段^[3],初步分析了非期望变形的产生原因以及扫描速度对非期望变形大小的影响。本文针对激光热成形工件所产生的非期望变形问题,探索非期望变形的产生机制,提出两种新的扫描策略,以实现较高成形精度的激光热成形加工。

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。本文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,以定量分析热成形过程中温度、应力、应变和位移变化,探究不同机制下温度的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,为了便于进行分析计算,作如下假设: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,忽略动热源引起的对流项及相变潜热;忽略塑性变形产生的热量;忽略金属板材重力;工件无预弯曲和初始残余应力。在数值模拟中金属板材选用工程中常用的 st12 钢,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详见文献^[11]。

为了验证有限元模型的有效性,对激光热成形温度场和变形场进行了实验验证。在实验中,选用最大输出功率为 3 kW 的 CO₂ 连续激光器,激光波长为 10.6 μm,利用专用夹具固定工件的一端,另一

端自由,冷却方式采用自然冷却。为了防止金属板材表面油垢影响传热,st12 板材用丙酮进行清洗。此外,由于低碳钢对激光的吸收率很低,为了提高激光的吸收系数,在金属表面均匀涂上一层涂层,进行黑化处理。激光热成形温度测试主要利用热电偶和温度采集模块进行数据采集,由计算机对数据进行预处理、储存,记录下整个加热与冷却过程中温度的变化历史。所采用的热电偶材料为镍铬-镍硅,分度号 EU,标定后其有效测量范围为 -40~1290℃。形状测量采用 KEYENCE 生产的 LK-081CCD 激光位移传感器,通过三维数控平台测量出金属板材多个点的高度变化。试验结果表明温度场和变形场测量结果与有限元计算结果吻合较好,温度测量结果与有限元计算结果最大相对偏差不超过 15%,变形场有限元仿真结果与实验结果最大误差小于 6%^[12]。

3 非期望变形分析

图 1 为激光热应力成形加工过程基本原理示意图,工件置于工作台上,一端被固定,激光束以恒定功率照射在工件表面并以恒定速度 v 沿扫描线移动,通过自然冷却、强制对流空冷或强制对流水冷对加热区域进行冷却。在激光扫描过程中,被扫描部位依次经历加热与冷却两个换热过程,在其内部产生相应的应力及变形。

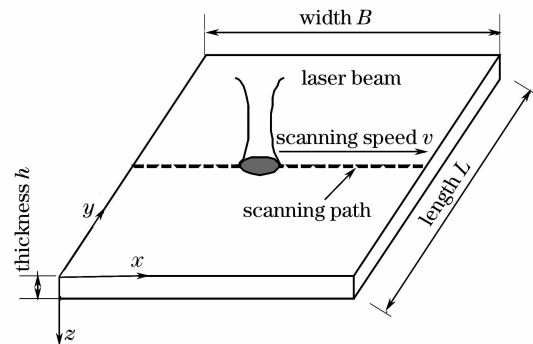


图 1 热应力成形加工过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser forming process

对于激光热成形工艺,成形的目的是获得绕 x 轴的弯曲变形。然而,根据温度梯度机制的分析^[11],在激光热成形中,板材不仅产生绕 x 轴的弯曲,而且也产生绕 y 轴的弯曲,这使得扫描线由加热前的直线变为曲线,进而导致板材翘曲变形使得沿扫描线在不同位置绕 x 轴弯曲角不同,另外,加热冷却后金属板材在加热线附近还会产生局部增厚现

象。绕 y 轴弯曲变形、翘曲变形和加热区域增厚是成形过程中不希望得到的变形,将这些变形称之为非期望变形。尽管非期望变形量相对于绕 x 轴的弯曲变形较小,但对于成形精度要求较高的工件,这些成形误差不仅会影响工件的装配精度,而且也会严重影响工件的使用寿命与外观质量。因而,对于激光热成形工艺本身,希望非期望变形越小越好。为了便于比较分析,激光束均沿板材中心线进行加热。

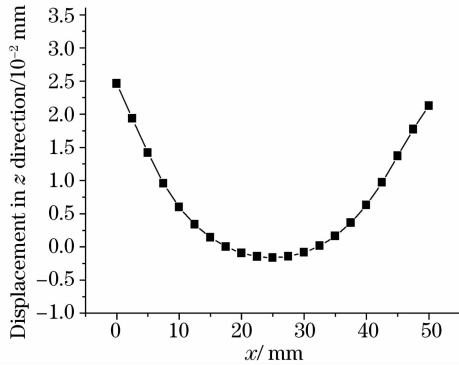


图 2 沿加热路径板材 z 向位移的变化分析

Fig. 2 Displacement in z direction along the scanning path

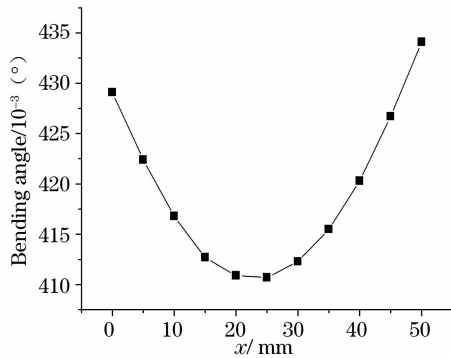


图 3 弯曲角沿 x 轴的变化分析

Fig. 3 Bending angle variation along the x axis

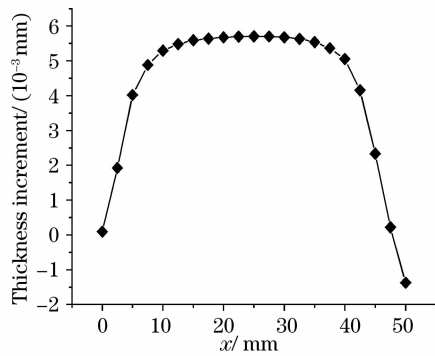


图 4 沿加热路径板材的厚度增量

Fig. 4 Thickness increment along the scanning path

图 2~图 4 分别为沿加热路径 z 向位移变化、绕 x 轴弯曲角变化和板材厚度增量变化,其中,加工

工艺参数为激光功率 $P = 750 \text{ W}$,扫描速度 $v = 30 \text{ mm/s}$,光斑直径 $d = 6 \text{ mm}$,板材尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。从图 2 可以看出,沿扫描线 z 向位移产生较大变化,加热起始端与终止端 z 向位移较大,而在扫描线中点附近 z 向位移最小,最大与最小 z 向位移差约为 0.0246 mm 。从图 3 可以看出,绕 x 轴弯曲角沿 x 方向是不断变化的,在板的两侧弯曲角稍微大一些,而在板的中部弯曲角较小,最大与最小弯曲角相差 0.0234° 。产生绕 x 轴弯曲变形和翘曲变形的主要原因,一是在不同位置金属板的冷态材料对加热区域的约束力不同,在板的两侧约束力小一些,而在板的中部约束力较大,约束力不同导致高温区域的塑性收缩变形不同;二是加热过程中在加热起始端温度比准稳态温度低,而在终止端温度

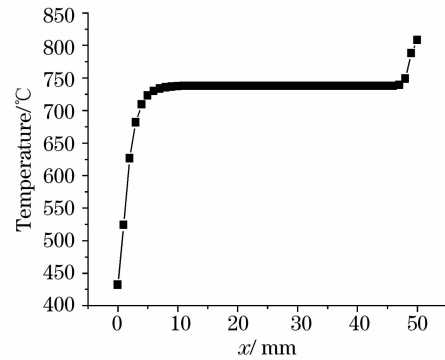


图 5 沿加热线上表面的最高温度

Fig. 5 Peak temperature on the top surface along the heating line

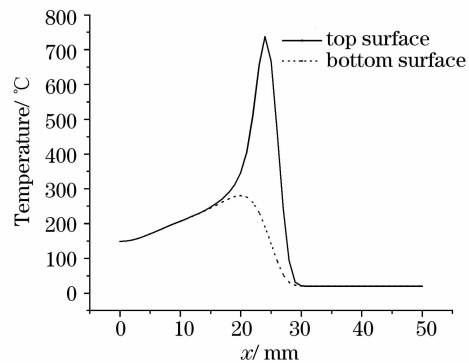


图 6 当光束移动到 $x = 25 \text{ mm}$ 时沿加热线板材上下表面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution on the top and bottom surfaces along the heating line when laser beam moves at $x = 25 \text{ mm}$

比准稳态温度高,如图 5 所示,从图中可以看出,加热起始阶段和终止阶段板材可达到的最高温度与板材中部位置明显不同;三是由于沿加热路径上下表面存在较大的温差(如图 6 所示),温差导致上表面

x 方向塑性变形量大于下表面 x 方向塑性变形量

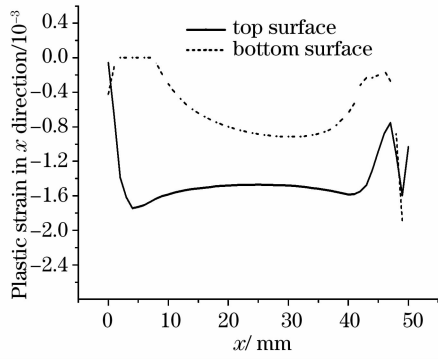


图 7 沿加热线上下表面 x 向塑性应变

Fig. 7 Plastic strain in x direction on the top and bottom surface along the heating line

(如图 7 所示)。从图 4 可以看出,在板材中部厚度增量基本相同,而在加热起始端和终止端厚度增加值变化较大。其原因是加热起始端和终止端冷态材料对加热区域的约束力较小。产生加热区域增厚的主要原因是,由于在激光热成形过程中加热区材料的热膨胀受到周围冷态材料的限制,加热区域产生塑性变形,导致加热区域材料产生堆积而变厚。

4 三种扫描策略非期望变形结果比较

对于常规扫描激光热成形中(如图 8(a)所示),由于在加热起始端温度往往低于准稳态温度而加热

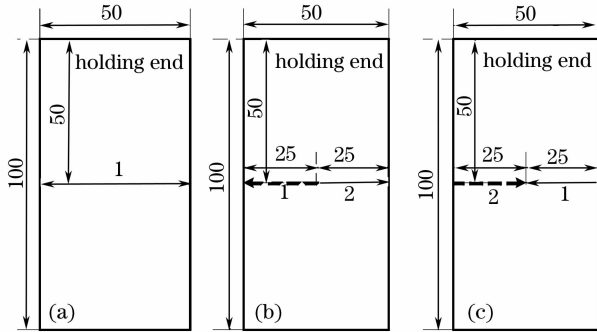


图 8 激光热成形扫描策略

(a) 常规扫描策略;(b)扫描策略 1;(c)扫描策略 2

Fig. 8 Scanning method of laser forming

(a) traditional scanning strategy; (b) scanning strategy 1, and (c) scanning strategy 2

终止温度端高于准稳态温度,且加热起始端和终止端板材冷态材料对加热区域的约束力低于远离加热起始端和终止端位置,进而对成形精度产生影响。考虑温度分布和机械约束力的对称性,提出两种新的扫描策略,该扫描策略将加热线分为两段,采用扫描线中点作为起始点或终止点,分别向左和向右进

行激光扫描,具体的扫描策略如图 8(b)和(c)所示,图中箭头为激光扫描的方向,1 和 2 为扫描的顺序。

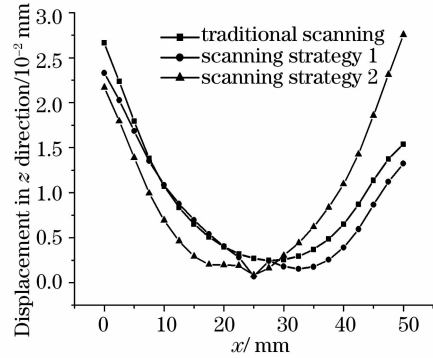


图 9 不同扫描策略加热线弯曲曲率比较

Fig. 9 Comparison of the curvatures of the heating line under the different scanning strategies

行激光扫描,具体的扫描策略如图 8(b)和(c)所示,图中箭头为激光扫描的方向,1 和 2 为扫描的顺序。

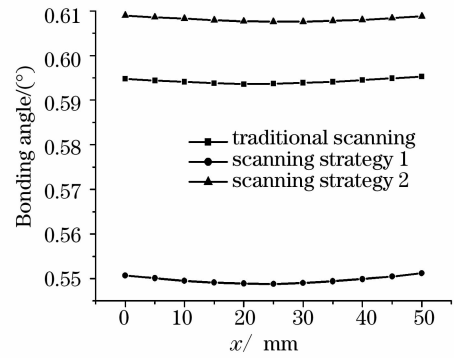


图 10 不同扫描策略弯曲角比较

Fig. 10 Comparison of the bending angles under the different scanning strategies

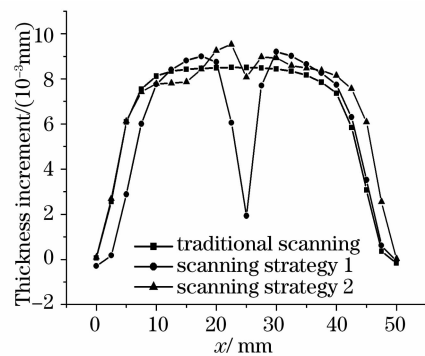


图 11 不同扫描策略厚度增量比较

Fig. 11 Comparison of the thickness increments under the different scanning strategies

图 9~图 11 为三种扫描策略非期望变形数值仿真结果比较,分析中采用的工艺参数为 $P = 650$ W、 $v = 25$ mm/s、 $d = 6$ mm,板材尺寸为 100 mm \times 50 mm \times 2 mm。从图中可以看出,相对于常规扫描策略,扫描策略 1 的加热线弯曲曲率较小,而扫描策略 2 的弯曲曲率则稍大;相对于常规扫描策略,扫

描策略 1 的弯曲角变化幅度稍大, 而扫描策略 2 的弯曲角变化幅度则下降约 15%; 相对于常规扫描策略, 扫描策略 1 的厚度增量有较大变化, 在中点附近板材厚度增量明显减小。其主要原因是在扫描起始点附近金属板材上表面所达到的最高温度较低(如图 5 所示), 从而导致材料堆积量明显减小。扫描策略 2 的厚度增量变化幅度较小, 材料堆积量略有增加。尽管扫描策略 1 和 2 不能使所有三项非期望变形量全部减小, 但可以使部分非期望变形量减小, 在实际的工业应用中, 可针对不同的成形要求, 选用不同的成形策略。对于加热线弯曲曲率要求较高的工件, 可选用扫描策略 1, 对于弯曲角有较高要求的成形件, 可选用扫描策略 2。

5 结 论

在激光热成形过程中, 影响因素众多, 由于板材的非期望变形伴随着期望变形同时产生, 通过对非期望变形机制和新扫描策略的研究, 主要得到以下结论:

1) 非期望变形的产生主要是由于不同位置冷态材料对加热区域的约束力变化、加热起始端温度与终止端温度不同于准稳态温度以及沿加热路径上下表面存在较大的温差引起的。

2) 为了减小非期望变形以提高工件的成形精度, 提出将加热线分为两段, 采用扫描线中点作为起始点或终止点, 分别向左和向右进行加热的新扫描策略。研究表明, 该扫描策略是解决激光热成形中期望变形与非期望变形两者并存矛盾现象的有效方法

参 考 文 献

- G. Yu, K. Masubuchi, T. Maekawa, *et al.*. FEM simulation of laser forming of metal plates [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**: 405~410
- Dunjun Chen, Shichun Wu, Miaoquan Li. Deformation behaviours of laser curve bending of sheet metals[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **148**: 30~34
- J. Bao, Y. L. Yao. Analysis and prediction of edge effects in laser bending [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**: 53~61
- Li Weiming, Lu Xiuchun, Liu Zhubai. Influences of sheet thickness in laser bending [J]. *The Journal of Nonferrous Metals*, 1999, **9**(1): 39~44
李伟民, 卢秀春, 刘助柏. 激光弯曲工艺中板材厚度的影响规律 [J]. *中国有色金属学报*, 1999, **9**(1): 39~44
- Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong *et al.*. Simulation on influence of scanning passes during laser bending of steel plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1721~1725
裴继斌 张立文 张全忠等. 扫描次数对钢板激光弯曲成形影响的模拟 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1721~1725
- 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
- Ji Zhong, Wu Shidun. 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
- Cheng P. J., Lin S. C.. An analytical model to estimate angle formed by laser [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2001, **108**(3): 314~319
- Yongjun Shi, Hong Shen, Zhenqiang Yao *et al.*. An analytical model based on the similarity in temperature distributions in laser forming [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, **45**(1): 83~87
- H. Shen, Z. Yao, Y Shi *et al.*. An analytical formula for estimating the bending angle by laser forming [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2006, **220**(2): 243~247
- Shi Y. J., Yao Z. Q., Shen H. *et al.*. Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**(12~13): 1689~1697
- Shi Yongjun, Research on laser bending mechanism and forming process plan for 3D curved plates [D]. PHD thesis, Shanghai Jiaotong University, 2007
石永军. 激光热变形机理及复杂曲面板材热成形工艺规划研究 [D]. 博士学位论文, 上海: 上海交通大学, 2007