

文章编号: 1001-3806(2002)03-0161-04

激光弯曲成形数值模拟的研究进展

刘顺洪 万鹏腾 杨 晶

(华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 激光弯曲成形相对于传统成形工艺的优势已逐渐被人们所认识,但目前应用该技术的最大障碍是如何将工艺参数与最终成形相联系。数值模拟技术为解决该问题提供了有效手段。概要介绍了最近几年来有关激光弯曲成形的数学物理模型最新进展。指出了未来应重点研究的几个方向。

关键词: 激光弯曲;数值模拟;温度场;应力应变场

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

Development of numerical simulation in laser bending

Liu Shunhong, Wan Pengteng, Yang Jing

(School of Materials Science and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The advantages of laser bending over traditional forming processes are being recognized. However, the biggest problem in current application is lack of information of process parameters to form predefined final shapes. Numerical simulation is a useful way in this field. Several recent mathematical models of laser bending are examined and key areas for the future are suggested in the paper.

Key words: laser bending; numerical simulation; temperature field; stress-strain field

引 言

激光弯曲技术是最近十几年迅速发展起来的新成形技术。它是利用高能激光束扫描工件时产生的非均匀温度场所诱发的热应力来成形工件的。由于该技术具有高效、精确、柔性、低成本等诸多优点,因此,在汽车业、轮船制造、航空工业以及微电子等行业有着广阔的应用前景。在国外激光成形技术已得到了初步的工业应用^[1]。

研究激光弯曲过程的目标是通过简单的调整激光工艺参数组合及扫描轨迹来方便并精确的控制激光成形过程。然而激光弯曲过程是激光工艺参数、板材几何尺寸、材料的物理参数以及扫描次数和路径等多因素综合作用的结果,用实验测定或是通过回归分析方法形成一定的经验公式来确定激光工艺参数是非常困难的。随着对该技术研究的日益深入,尤其是在三维复杂曲面成形方面,如何将工艺参数与最终成形相联系成为发展的最大障碍。数值模

拟技术为快速、可靠、科学地研究各影响因素对板料的最终成形提供了有效手段。下面综述了近几年来各国学者在板料激光弯曲成形数值模拟方面所做的研究。

1 温度场和应力应变场数值模拟的研究现状

板料激光弯曲成形的基本原理可以归纳为:激光束的扫描在板料加热区域形成对空间和时间梯度都很大的不均匀温度场,由于周围冷态材料的约束,使得该温度场所诱发的热应力超过了随温度变化的屈服极限,从而产生了压缩塑性变形,在板料冷却以后形成残余应力和弯曲变形。因此,激光弯曲过程的数值分析就是对成形过程中所形成的温度场和应力应变场的模拟。

1.1 数学物理模型

激光弯曲成形机理可归结为温度梯度机理、压曲机理、墩粗机理。不同的机理有各自的适用条件。目前研究最多的是温度梯度机理。笔者论述的模型均为温度梯度机理下的模型。

通常进行热应力数值模拟一般都采用热弹塑性有限元分析方法。激光弯曲成形模拟中采用的有限元列式为:

作者简介:刘顺洪,男,1954年8月出生。工学硕士,教授。主要从事焊接力学行为、激光加工等科研与教学工作。

收稿日期:2001-06-05;收到修改稿日期:2001-10-18

$$\begin{cases} [C(T)]\{\dot{T}(t)\} + [K_T(T)]\{T(t)\} = \{Q(t)\} \\ [K(T)]\{u(t)\} = \{F^{th}(t)\} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $C(T)$ 为比热容矩阵; $K_T(T)$ 为热传导率矩阵; $Q(T)$ 为热流密度向量; $\dot{T}(t)$ 和 $T(t)$ 为节点温度对时间倒数向量和节点温度向量; $K(T)$ 为刚度矩阵; $F^{th}(t)$ 为温度载荷向量; $u(t)$ 为位移向量。

温度变化只产生正应变 $\epsilon_{th} = \alpha \cdot T$ (α 为材料的线膨胀系数, T 为当前温度与初始参考温度之差), 该正应变对应的温度载荷对各向同性材料相当的节点力为:

$$\{F^{th}\} = \int_V [B]^T E \cdot \alpha \cdot T \{ \} dV \quad (2)$$

式中, $\{ \} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, E 为弹性模量, α 为泊松比, V 是体积域, $[B]$ 为应变位移关系阵。

实际的成形过程很复杂, 因此必须作一些合理的假设。在众多建立的数学物理模型中所作的假设存在如下共同点: 系统处于准稳定状态, 扫描过程持续一段时间, 空间温度场及应力应变场相对稳定;

温度场与应力应变场是非耦合或是间接耦合的;

压缩塑性变形的热损失与激光热输入相比可忽略不计; 不考虑相变因素的影响。

应用上述比较符合实际的数学物理模型, 季忠等人^[2~4]开发了相应的三维有限元程序, 对简单的单次直线扫描进行了初步的分析, 对编程时所涉及的弹塑性过渡区的过渡系数, 非线性方程组的求解等关键问题采取了独特的处理措施。随着有限元理论的成熟, 一些通用有限元分析软件(如 ABAQUS, SYSWELD, ANSYS, MARC)相继出现, 众多研究者均运用这些软件来模拟激光弯曲过程。

Chen 等人^[5,6]深入研究了脉冲激光在微电子部件精密校正领域的应用, 基于二维平面应变假设模拟了不锈钢试样的弯曲过程, 结果论证了温度梯度机理的正确性。在 Odumodu 的模型^[7]中, 同样基于平面应变假设, 进行了平板弯曲 90° 的成形过程模拟, 所不同的是作者考虑了移动热源和外加移动冷却源的双重作用。结果表明, 经过 49 次加热和冷却循环可获得 90° 的弯曲角。这与实验所需的 42 次循环吻合较好。

Hu 等人^[8]对激光直线扫描平板进行了三维有限元分析, 模拟得到了不锈钢 AISI304 和铝在多道扫描时的温度场变化(见图 1)。不锈钢导热性较差, 因此加热时温度迅速上升达到最高, 冷却过程相对平缓。铝是热的良导体, 热循环过程与不锈钢相反, 故在板厚方向上铝的温度梯度比不锈钢的要小

一些。同时还获得了不锈钢第一次扫描时的塑性应变 ϵ_y^p 及应力 σ_y 循环曲线(如图 2 和图 3 所示), 图 2 表明, 在考察点被加热的 0.1s 时间内会出现拉伸塑性变形。此外, 作者还对不同板厚以及激光功率下扫描次数与弯曲角度的关系进行了模拟。

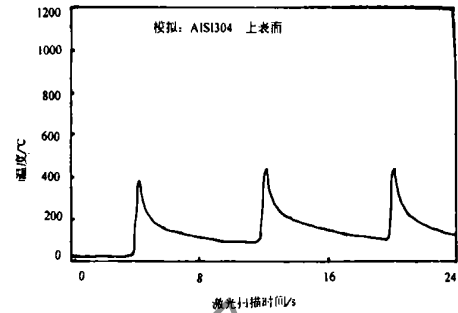


图 1 不锈钢连续扫描温度变化曲线

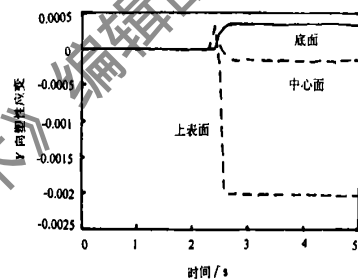


图 2 不锈钢单次扫描 Y 向塑性应变变化曲线

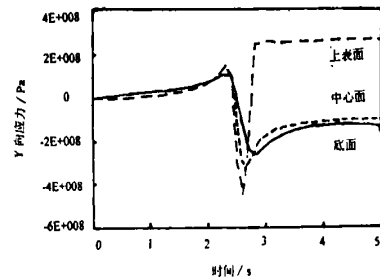


图 3 不锈钢单次扫描应力 σ_y 变化曲线

Herrige 在研究^[9]扫描策略的同时, 对圆心角为 20° 的环形试件(扫描线绕圆周方向)建立了有限元模型, 计算了 5 次连续扫描冷却后的场分布, 表明温度场以及冷却后平行于扫描线的应力状态与温度梯度机理下直线扫描结果极其相似。而扫描区域垂直于扫描线的塑性应变分布不对称, 这是由于板料部分所处的加热条件不同, 激光束对未扫描区域有预热作用。

Kyrzanidi 发展^[10]了一个更一般的模型, 可以模拟复杂形状的成形(如正弦形状)。

当在板的正反两面沿板宽方向分别扫描 6 次时, 通过数值模拟得到中心点处弯曲角随时间变化情况如图 4 所示。模拟的最终成形为正弦状。笔者对造船用钢(D36)进行单次弯曲成形模拟时得到了

与 Hu^[8]相近的结果。

Li 等人^[11]研究了激光成形中应变率对成形效率、残余应力以及已成形部分硬度的影响,提出常量峰值温度法(消除温度对应变率的影响)

对成形过程进行了模拟,结果表明,应变率对流动应力以至最终成形有显著影响。当应变率增加约一倍时,弯曲角降低 30%,残余应力增加 15%,而扫描区域表面的硬度降低了 7%左右。

Bao 等人^[12]对边界效应(单轴激光弯曲中,沿激光扫描线弯曲角变化的现象)进行了数值研究。考虑了随应变率变化的流动应力的影响,结果在表面温度梯度机理下,弯曲角具有凸的特征,弯曲边界向激光束方向变形。

管延锦等人^[13]对未预弯板材激光扫描后出现反向弯曲现象进行了有限元分析。分析表明,当光束直径较大、光束功率相对较高、扫描速度比较低的激光束扫描热传导率较高的金属薄板时,加热阶段由于压缩塑性变形的增大导致压缩应力的增大,使板料局部产生失稳变形而屈曲,发生较大的反向弯曲变形,在冷却后板料背面总的横向收缩仍然较正面的大,从而使板料最终得到了反向弯曲变形。其变形机理仍属于屈曲机理。

李纬民等人^[14]用大变形弹塑性有限元法动态模拟了板厚对弯曲角度的影响,提出了最小相对光束半径的概念。也就是能够实现激光弯曲工艺的最小光束半径与板厚之比值 r_{bmin}/h ,当光束直径 r_b 与待弯板厚 h 之比大于最小相对光束半径时,选择合适的工艺参数可实现弯曲工艺,而当 $r_b/h < r_{bmin}/h$,光束不能覆盖弯曲变形区,因此不能使板料弯曲。

1.2 激光热源模型

激光弯曲过程中,不均匀加热所形成的局部高温使得局部热应力超过屈服应力,由此导致的压缩塑性变形是板料弯曲变形的根源。因此光斑及其邻近区域是研究的重点区域。热源模型的选取对该区域温度场以及应力应变场的模拟尤为重要。

在热源热输入的分析中,高斯分布热源模型和双椭圆功率密度模型是应用最广的两种模型。大多数情况下均采用了高斯分布模型^[8,13],输入的热流密度 I 呈高斯函数分布,即 $I = 2A P \exp(-2r^2/$

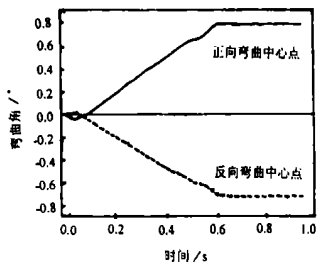


图 4 正弦状成形弯曲角的变化曲线

$R^2)/R^2$,在光束直径范围内的平均热流密度 I_m 为 $I_m = 0.865 A P / R^2$ 其中, A 为板料对激光的吸收系数, P 为激光输出功率, R 为光束直径, r 为考察点至光束中心的距离。不过 Kyrsanidi 考虑^[10]了不同激光器所产生的激光束间的差异,建立了待定系数的热源模型,激光束的能量分布为 $Q(x) = B [(a_1 + a_2 \exp(-bx^2/d^2)]/F$, 通过用选定激光束在树脂玻璃板上做一简单实验以确定未知数 a_1, a_2, b 。然后将 a_1, a_2, b 代入公式 $P \cdot d^2 = \int_0^d Q(x) \cdot d \cdot dx$ 求得常数 B 。总的说来,高斯热源模型需要在空间上将光斑及附近区域的网格划分得很细,在时间上也要很多时间步进行叠代计算。因此计算量比较大。Odumodu 认为^[14]对高能束如激光和电子束流来说,双椭圆模型更合适。激光热源和冷却源均采用了双椭圆模型。以上模型是将激光能量作为边界条件施加于工件表面。Chen 等人^[15]则将激光热源视为以恒定速度移动的体积热源。工件吸收的激光能量的体积分布可以表示为 $Q_{ab} = (1 - R_f) I(x, y, t) e^{-z}$, 式中, R_f 为工件反射率, $I(x, y, t)$ 为材料吸收系数, $I(x, y, t)$ 为高斯分布的热流密度。

热源模型均通过数学表达式来描述热源的分布,改变模型中各自由参数就可以相应地调整热源分布区域和密度。

1.3 移动热源的处理

激光弯曲过程中激光束扫描是不间断的,光斑位置表示为时间及坐标的连续函数,这势必对求解过程产生不便。基于有限元的离散思想,通常采用小步距间歇跳跃式移动热源来模拟激光束的连续扫描。同时,为了便于移动光斑网格以及计算热流密度,假设光斑照射区域为矩形。Kyrsanidi 等人^[10]假设光斑在 $F = d^2$ 区域作用一段时间 $t = d/v$ (d 为光斑直径, v 为扫描速度),然后光斑向前移动 d 距离。Ji Z 等人^[16]则将光斑沿扫描线方向划分为单元网格的整数倍,每次认为光斑仅跳动一个网格,因此每个网格处停留时间为 $t = x/v$ (x 为网格宽度),这样计算更精确一些。

移动热源是焊接过程数值模拟中同样面临的问题。蔡志鹏等人在高斯热源的基础上,根据输入热功率相当提出段热源模型^[17]。将焊缝分成若干段,对每一段上的点同时作用高斯热源,从而形成热输入密度沿焊缝方向均匀分布,垂直焊缝方向为高斯函数的分布状态。此外,笔者结合点热源,提出了更加灵活实用的串热源模型,串热源模型的作用用一

组点热源模型来取代,只要在指定节点输入热功率的大小和加热时间。这些处理方法可以应用到激光弯曲的模拟中。

1.4 边界条件的处理

热传导方程只有加上合适的边界条件和初始条件才是一个定解方程。因此,如何准确的描述工件的边界条件和初始状态,处理的好坏直接关系到解的准确性甚至是合理性。

对初始条件一般假设整个工件处于室温。

边界条件的处理有所差异。除了 Odumodu 在^[7]模型中加了移动冷却源外,一般工件经激光束扫描后都是在空气中自然冷却的。在 Chen 的模型中^[5,15],将激光热源作为体积热源来处理,因此激光照射表面认为是绝热的,同时也忽略了其它各表面的对流和辐射损失。

在大多数模型中边界条件的处理方法是将热载荷以热流密度的形式施加于光斑区域,同时考虑工件各面与周围环境的对流和辐射换热损失,并将此两类边界条件统一为一个表达式: $q = - (\partial T / \partial n) = (t - t_e)$,其中 h 为换热系数,是对流换热系数 h_c 与等效辐射换热系数 h_r 之和, t 为板料表面温度, t_e 为环境温度。此外,为加快分析速度,一般都关于扫描线取工件的一半为研究对象,在对称面上为绝热边界条件。

对于应力应变场的模拟中边界条件的一般处理方法是,将对称截面中相邻两点固定以防止刚性移动,而对称面中其余各点仅在该截面内移动。

1.5 材料性能参数的处理

数值模拟方法的一个显著优点是可以考虑随温度变化的材料物理性能参数。温度场的模拟需要考虑密度、比热、热传导系数、热膨胀系数等的温度相关性,应力应变场中则要考虑弹性模量和屈服极限等的温度相关性。由于高温区域热物性参数的匮乏,在实际应用中高温区的参数都是通过线性外插方法得到的。Chen 等人研究了未知高温热物性参数的数值敏感性,发现吸收率和热膨胀系数对弯曲角的影响最大^[5]。其它用线性插值方法得到的高温物性参数对数值模拟结果的影响在可接受范围内。

2 结束语

建立在激光弯曲温度场、应力应变场数学物理模型基础之上的数值模拟,在一定程度上揭示了激光弯曲过程的成形机理,解释了工艺参数、几何尺寸、热物理参数以及扫描次数和轨迹对最终成形的复杂影响。因此,数值模拟技术为优化激光加工工艺参数,精确控制热作用区内的温度分布,获得合理的热应力大小和分布,从而使板料可控成形以取得最佳加工效果提供了有效手段。但目前所做的工作还很不完善,仍然需要在以下几个方面做更进一步的研究:建立更一般的三维有限元模型,考虑相变等影响因素;对曲线扫描以及曲面成形模型的建立与过程模拟;对多道组合扫描成形的模型的建立与过程模拟;材料高温物理性能参数数据库的丰富;模拟结果与智能过程控制技术的结合。

参考文献

- [1] Magee J, Watkins K G, Steen W M. *J Laser Appl*, 1998, 6: 235 ~ 246.
- [2] 季忠, 吴诗. 金属成形工艺, 1998, 16(1): 24 ~ 27.
- [3] 季忠, 吴诗. 塑性工程学报, 1998, 5(2): 33 ~ 38.
- [4] 季忠, 吴诗, 李森泉. 塑性工程学报, 1997, 4(2): 14 ~ 18.
- [5] Chen G F, Xu X F, Poon C C *et al.* *J Appl Mech*, 1999, 9: 772 ~ 779.
- [6] Chen G F, Xu X F, Poon C C *et al.* *Opt Engng*, 1998, 10: 2837 ~ 2842.
- [7] Kennedy O, Shuvra O. *Computer Modeling & Simulation in Engng*, 1997, 8: 243 ~ 254.
- [8] Hu Z, Labudovic M, Wang H *et al.* *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41: 589 ~ 607.
- [9] Hennige T. *J Mater Processing Technol*, 2000, 103: 102 ~ 108.
- [10] Kyrsanidi A K, Kermanidis T B, Pantelakis S G. *J Mater Processing Technol*, 1999, 87: 281 ~ 290.
- [11] Li W C, Yao Y L. *J Manufacturing Science & Engng*, 2000, 122: 445 ~ 451.
- [12] Bao J C, Yao Y L. *J Manufacturing Science & Engng*, 2001, 123: 53 ~ 61.
- [13] 管延锦, 孙胜. 激光技术, 2001, 25(1): 11 ~ 14.
- [14] 李纬民, 卢秀春, 刘助柏. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 39 ~ 44.
- [15] Chen G F, Xu X F. *J Manufacturing Science & Engng*, 2001, 123: 66 ~ 73.
- [16] Ji Z, Wu S C. *J Mater Processing Technol*, 1998, 74: 89 ~ 95.
- [17] 蔡志鹏, 赵海燕, 鹿安理 *et al.* *机械工程学报*, 2001, 37(4): 25 ~ 28.