

文章编号: 1001-3806(2003)02-0097-04

板料激光弯曲成形的温度场三维数值研究

杨 晶 刘顺洪 万鹏腾 周龙早

(华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 板料激光弯曲成形是一种利用激光成形构件的柔性成形技术, 以平板激光单次扫描成形的过程为研究对象, 应用有限元分析软件 ANSYS 进行二次开发, 对温度梯度机理下弯曲成形过程的温度场进行了系统的研究。建立了温度场的有限元分析模型, 研究了给定技术参数下激光弯曲温度场的动态变化过程和温度场的分布, 以及各技术参数对峰值温度和温度梯度的影响规律。

关键词: 激光弯曲; 温度场; 数据模拟

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

3D numerical study on laser bending of sheet metal

Yang Jing, Liu Shunhong, Wan Pengteng, Zhou Longzao

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

Abstract: Laser bending is a recently developed and highly flexible metal forming technique. In this paper, 3D numerical study on laser bending under temperature gradient mechanism are carried out with ANSYS software. A finite element model of temperature field is built, the dynamic temperature field and temperature distribution under provided conditions are analyzed according to the numerical simulation results, the relationships between the technique parameters and the peak temperature, temperature gradient are investigated.

Key words: laser bending; temperature field; numerical simulation

引 言

激光弯曲成形是利用激光扫描特定路径形成不均匀温度场诱发热应力, 在热应力作用下成形的一种柔性成形技术^[1~3]。该方法源于火焰成形技术^[2,4], 但充分利用了激光能量高度集中且可控的优点, 并易于实现自动化, 可用于一些常规方法难以成形的材料。因而受到人们的广泛关注。

激光弯曲成形的机理有 3 种^[3], 用于板料成形的主要是温度梯度机理。在温度梯度机理下, 成形的效率与温度场分布的规律有关。而温度场的分布是与工艺参数密切相关的。这里人们最关注的是板料上下温差与工艺参数的关系, 以及温度场中形成完全塑性状态的 600℃ 以上区域的大小^[4], 而这个区域是很难用试验方法测得的。利用有限元法, 考虑了材料热物理性能随温度变化的关系, 模拟了在各种工艺参数下温度场的瞬态变化以及板料上下表

面温差的变化规律, 并为后续应力应变分析、组织分析以及成形过程控制提供基础。

1 板料激光弯曲有限元模型

1.1 物理模型

激光弯曲成形的研究中设定板宽方向为 x 方向, 板长方向为 y 方向, 板厚方向为 z 方向。为了确定数学模型, 对激光弯曲物理过程描述如下。

激光弯曲过程的影响因素众多, 过程比较复杂, 要建立完全正确反映实际情况的模型尚有困难, 为了比较准确的表达其过程, 必须进行合理简化, 因此作如下的假设: (1) 板料平放在工作台上, 未加外部约束, 激光束沿 x 方向匀速运动, 垂直照射工件; (2) 被处理材料各向同性, 即材料的物理力学性能值与位置无关, 但随温度变化而变化, 且与温度呈分段线性关系; (3) 系统处于准稳定状态, 扫描过程持续一段时间后, 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间接耦合的, 即应力应变场的载荷条件为温度场; (4) 温度场只受热输入方式和热物性参数的影响, 只考虑与空气的对流换热, 忽略辐射换热损失, 忽略热源引起的对流项及相变潜热;

作者简介: 杨 晶, 男, 1976 年 9 月出生。硕士研究生。从事激光弯曲成形数值模拟的研究。

收稿日期: 2002-05-08; **收到修改稿日期:** 2002-08-26

(5)弯曲是在材料熔点之下进行,压缩塑性变形的热损失与激光热输入相比忽略不计。

平板在实体建模时简化为一个六面体。为了便于光斑区域的选取以及网络密度的控制,将

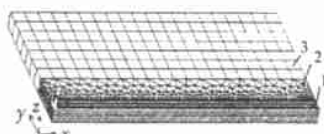


Fig. 1 Physical model and grid illustration

该六面体划分成3个体:体1为 $d/2$ 长(d 为光斑直径),体2为 $1.6d$ 长。如图1所示。

1.2 网络划分

由于激光束扫描线及其附近的区域温度梯度很大,由此引起的应力应变的变化也很大,因此,为了获得高的计算精度,需要在该区域加密网络,而在远离扫描轨迹的区域可以划分较为粗大的网格。由于温度梯度机理下激光弯曲主要关注的是板料厚度方向的温度梯度和应力分布,故在实际的操作中采用板厚来控制网格密度。在体1处网格大小为厚度的 $1/6$ 。体2处网格大小为厚度的 $1/3$ 。体3处网格大小为工件的厚度。温度场计算中,选取3维热单元 SOLID70 划分网格,这种单元有8个节点,每个节点具有单一自由度——温度。为了便于选择激光光斑区域,对体1和体3采用映射网格划分以形成规则的网格,而对体2采用自由划分以便连接体1和体3的网格。网格划分示意图如图1所示。当研究板厚对激光成形的影响规律时,需修改网格控制策略以使网格密度的变化对模拟结果的影响最小。

1.3 激光弯曲温度场的计算模型

激光弯曲成形过程的温度场是一个局部快速加热到高温,并随后快速冷却的过程。随着热源移动,整个工件的温度随时间和空间急剧变化,材料的热物性性能也随温度剧烈变化。故激光弯曲成形的温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题。

1.3.1 移动激光热源的处理 在模拟计算中,激光设备施加的热载荷以热流密度的形式给出,其在光束截面上的能量密度服从高斯分布,即:

$$I = [2AP/(\pi \cdot r_b^2)] \exp[-2r^2/r_b^2] \quad (1)$$

式中, I 为激光的热流密度; A 为板料对激光能量的吸收率; P 为激光设备的输出功率; r_b 为激光束在板料接触处的半径; r 为离开光束中心的距离。

激光光斑尺寸一般较小,考虑实际模型,采用平均热流密度,而不采用高斯分布的激光热源,故板料上在光束直径范围内的平均热流密度 I_m 为^[5]:

$$I_m = \frac{1}{\pi \cdot r_b^2} \int_0^{r_b} I r dr = \frac{1}{\pi \cdot r_b^2} \int_0^{r_b} \frac{2AP}{\pi \cdot r_b^2} r \times$$

$$\exp(-2r^2/r_b^2) dr = 0.865AP/(\pi \cdot r_b^2) \quad (2)$$

把激光热源按恒定热流边界条件引入,由于光源呈运动态,该边界热流的作用位置随时间不同而不断变化,如果把光斑位置表示为坐标与时间的连续函数,势必为方程的求解带来诸多的不便,基于有限元的离散思想,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,光束每次移动半个光斑直径。

同时为了便于移动光斑网格以及计算热流密度,将圆形的光斑照射区域离散为四边形单元,如图2所示。因此,各

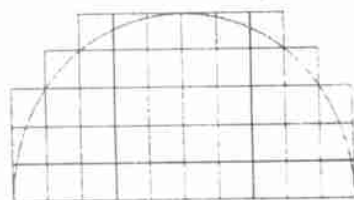


Fig. 2 Illustration for laser facula disperse

质点加热时间 t 是激光束沿弯曲线移动半个光斑直径的距离所需要的时间: $t = d/2v$ (d 为光斑直径, v 为扫描速度)。

1.3.2 边界条件的处理 假设整个工件的初始温度为室温 20°C 。热载荷以热流密度的形式施加于光斑区域,板料对激光辐射能量的吸收系数取 0.6 。因取工件的一半为研究对象,故在对称面上施加绝热边界条件其余各表面均施加对流边界条件,在激光扫描工件时对流系数取 $10\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$,忽略辐射换热损失。当扫描以后,为迅速降温,采用水冷方式,因此取对流系数为 $150\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

1.3.3 材料热物理参数 选取低碳钢 Q235B 作为分析材料,熔点为 1468°C 。温度场计算时需要考虑的材料热物性参数有密度、热传导系数、比热容。其中密度受温度影响较小,取常值 $7680\text{kg}/\text{m}^3$,热传导系数 K 及比热容 C 与温度的关系取自文献[6]。

1.3.4 时间步长的选取 激光加热是一个能量高速注入的过程,在激光扫描中,光斑扫描区域的材料温度急剧升高,而在已扫描过的区域,材料温度却急剧降低,因此,在激光扫描阶段计算时间步长必须划分得足够细小,才能求得精确的结果。在光斑移出板料表面后,板料主要通过热传导方式进行散热,与激光加热时相比,温度变化显著减慢,可采用变步长的方法,逐步增大时间步长,以节省运算时间。ANSYS中,时间步长可以通过载荷步以及载荷子步来实现。激光扫描阶段光斑的每一步跳动作为一个载荷步,每个载荷步取20个子步。冷却阶段,时间步长以2倍的速度递增,每一个时间步取30个子步。实践表明,上述的处理可取得理想的计算结果。

2 温度场数值模拟的结果及分析

2.1 激光弯曲温度场

采用如下参数:几何尺寸为 0.04m (宽) \times 0.04m (长) \times 0.002m (厚);激光功率为 900W ;扫描速度为 30mm/s ;光斑直径为 0.004m 。

2.1.1 温度场的动态变化过程 图3给出了板料在时间 $t = 0.066667\text{s}$, 0.333333s , 0.666667s , 1s , 1.333s , 2.333s , 11.667s , 86.333s 时的温度场分布。各颜色均表示一个温度区间,温度场下的色标显示了各种颜色所对应的温度区间。由图可见,当光斑照射到板材上时,板料的温度迅速上升,作用初期平

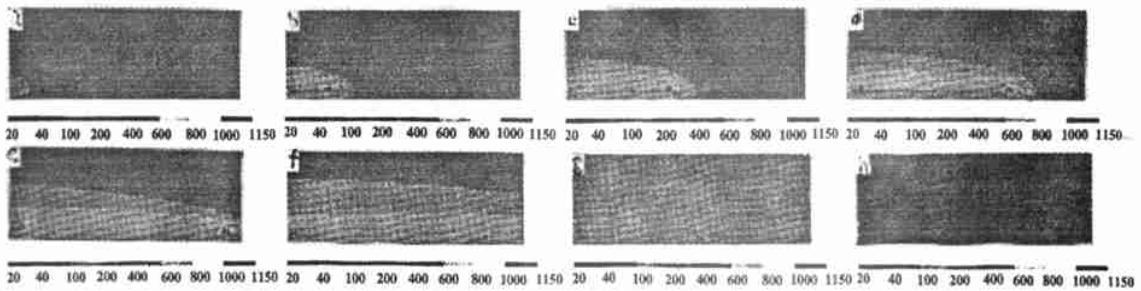


Fig. 3 Dynamic color temperature picture

a- $t=0.066667\text{s}$ b- $t=0.333333\text{s}$ c- $t=0.666667\text{s}$ d- $t=1\text{s}$ e- $t=1.333\text{s}$ f- $t=2.333\text{s}$ g- $t=11.667\text{s}$ h- $t=86.333\text{s}$

2.1.2 z 方向的温度分布 图4所示为 $t = 0.866667\text{s}$ 时激光光斑处 z 方向的温度分布。可见,

在给定的激光工艺参数下, z 方向的温差达到 850°C 左右,故在 z 方向产生很高的温度梯度,正是由于这种温度梯度使得在板材内部诱

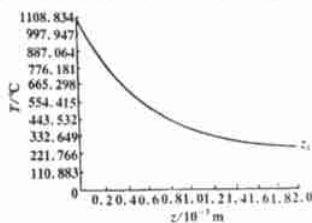


Fig. 4 Temperature gradient along z axis

发形成不均衡的热应力并导致最终的弯曲成形。可见,这符合温度梯度机理下的弯曲过程研究的前提。

2.1.3 热循环曲线 图5所示为加热冷却循环过程中 z 方向上取的上、中、下3点的热循环曲线。可见,当激光束加热到所取点处时,上表面温度迅速上升至 1100°C ,加热结束时在上下表面间形成温度

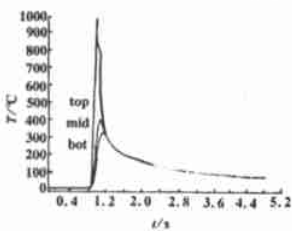


Fig. 5 Heat circulation graphs

差值高达 850°C 。在加热结束后的冷却过程中,上表层附近材料的温度急剧降低,而板厚中下层的材料由于上表层高温区传递的热量,温度继续升高一段时间后,才开始降低。冷却 0.35s 以后,上下表层

均升温速度高达 $1.0 \times 10^5^\circ\text{C/s}$,经过一段时间以后,温度场达到准稳态,峰值温度稳定在 1109°C 左右。激光扫描过后,板料通过热传导方式散热冷却,此外,还通过板料的表面与空气进行对流散热冷却。由图3d,图3e可见,温度场的尾端为一细长的温度分布,这与通过焊接电弧温度场不同,通常的电弧温度场为尾端很宽,这是由激光热源的高的能量注入速度所引起的,板料的热传导速度比激光能量注入速度要慢得多。在冷却阶段,由于对称面为绝热边界条件,热量向板料的边缘扩散,最终整个板料内的温度完全冷却到室温,如图3f~图3h所示。

温度趋于一致。随着激光束与工件间的相互运动,弯曲线各质点的温度依次经历这种变化过程。

2.2 激光工艺参数对温度的影响

激光束的能量因素大致可用材料吸收的能量密度(单位表面积吸收的能量)以及吸收该能量所用的时间来表示。而能量密度又取决于材料对激光的热吸收系数、激光束功率及光斑直径等。板料对激光的热吸收系数取常值 0.6 ,因此,只考虑激光功率和光斑直径对温度场分布的影响。吸热时间决定于光斑与板料的相对移动速度(光束扫描速度)。

2.2.1 激光功率对温度的影响 图6(■为上表面温度,●为下表面温度,▲为温差,下同)反映了不同激光功率对上、下表面的温度及温度差的影响。可见,随着功率 P 增加,峰值温度也随着增大,原因在于功率增加,能量密度也随

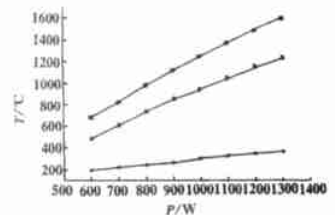


Fig. 6 Effect of laser power on temperature

$v = 30\text{mm/s}$, $d = 4\text{mm}$, sheet metal $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 2\text{mm}$

之增加,使板材在相同时间内上表面加热区温度大幅度增加,而对下表面温度影响不大,由此产生的厚

向温度梯度大大增加。

2.2.2 扫描速度对温度的影响

激光束扫描速度 v 反映的是激光对板材质点的作用时间。由于有限元模型中用小步距间歇跳动模型表示光斑的连续移动,因此,激光对每个板材质点的作用时间为跳动间隔与扫描速度的比值。图7显示了激光束扫描速度对上、下表面温度及温度差的影响。随着速度增加,激光对板材质点的作用时间减少,板材表面吸收的能量相应减少,从而使板材上表面温度和厚向温度差均减小。

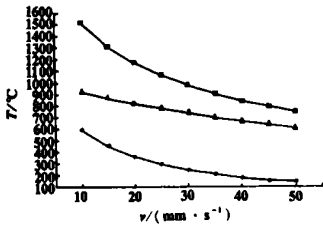


Fig. 7 Effect of scanning speed on temperature

$P = 800W, d = 4mm,$ sheet metal $40mm \times 40mm \times 2mm$

随着速度增加,激光对板材质点的作用时间减少,板材表面吸收的能量相应减少,从而使板材上表面温度和厚向温度差均减小。

2.2.3 恒定线能量下扫描速度对温度的影响

光束功率 P 与扫描速度 v 的比值是一个很重要的综合参数,它反映了光束作用于板料表面的线能量密度。该值过高,板料表面材料将被熔化;过低,板料不能产生变形。在线能量密度一定的情况下,板料弯曲角度与能量注入的持续时间有关。图8是合能量指标 P/v 一定时扫描速度对上、下表面温度及温差的影响。可见,在恒定线能量下,随扫描速度的增加,上表面温度逐渐增加,而下表面的温度变化不大,故总的厚向温度差也逐渐增加。

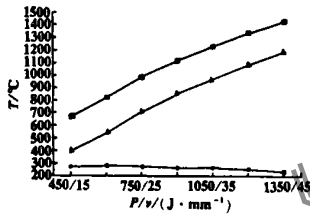


Fig. 8 Effect of scanning speed on temperature under constant linear laser power

constant linear laser power $30J/mm, d = 4mm,$ sheet metal $40mm \times 40mm \times 2mm$

2.2.4 光斑直径对温度的影响

图9为光斑直径对上、下表面温度及温度差的影响。可见,上表面的温度迅速下降,但下表面的温度变化不大,故产生的厚向温度差也随之减小。原因在于随着光斑直径变大,照射在板材表面的能量密度减小。

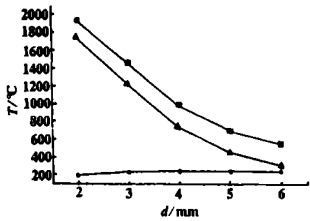


Fig. 9 Effect of laser spot diameter on temperature

$P = 800W, v = 30mm/s,$ sheet metal $40mm \times 40mm \times 2mm$

2.3 板厚对温度的影响

板料的几何参数主要包括板料的长度(垂直于扫描线方向的尺寸)、宽度(沿扫描线方向的尺寸)和厚度。由于小长度板料的弯曲问题在实际操作中并不常见,而当长度尺寸大于10~20倍板厚时,它对弯曲变形的影响不再明显。此外,板宽变化对温度的影响也不明显,因此,仅研究板厚对温度的影响。

图10给出了板厚变化对上、下表面温度及温度差的影响。可见,当板料很薄时,激光的热量可以很快地自上表面传到下表面,质点加热结束后,上下表面的温度值均较高,但相应部位的温度梯度却较低。随着板料厚度的增加(其它参数保持不变),板材上下表面的温度均有所下降,但下表面的温度下降幅度远比上表面大。所以,上下表面的温度梯度随板料厚度的增加而增加。

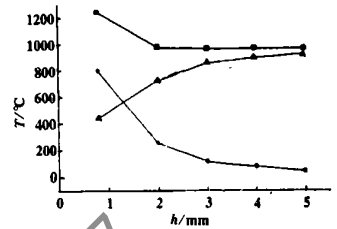


Fig. 10 Effect of sheet thickness on temperature

$P = 800W, v = 30mm/s, d = 4mm,$ sheet metal $40mm \times 40mm$

3 结论

采用有限元分析软件 ANSYS 对平板单次激光扫描弯曲成形建立了温度场计算模型,对温度梯度机理下弯曲成形过程的温度场进行了系统的研究。研究分析结果表明:在给定技术参数下板厚方向形成高达 $850^{\circ}C$ 的温度差,在上表面形成压缩塑性变形,下表面形成相对较小的拉伸塑性变形并在扫描过程中保持不变;提高激光功率,降低扫描速度,以及在恒定线能量下提高扫描速度,均使温度梯度升高,增大光斑直径,温度梯度减小,当板厚增大时,温度梯度逐渐增大并趋于定值。

参考文献

- [1] Thomson G, Pridham M. Opt & Laser Technol, 1998, 30: 141~146.
- [2] Scully K. J Ship Production, 1987, 3: 237~246.
- [3] Magee J, Watkins K G, Steen W M. J Laser Appl, 1998(6): 235~246.
- [4] 刘玉君, 赵洪福. 造船技术, 1993, 3: 23~26.
- [5] 陈敦军, 吴诗婷, 向毅斌 et al. 航空学报, 2001, 22(2): 187~189.
- [6] Michaleris P, Debicari A. Welding Journal, 1997(4): 172~181.

的能量密度减小。