

板料激光弯曲的屈曲机理的研究

管延锦 孙 胜

(山东工业大学, 济南, 250061)

摘要: 介绍了激光弯曲的三种成形机理: 温度梯度机理、增厚机理、屈曲机理。由于不进行预弯曲板料经激光束扫描后, 仍可产生背向激光束的弯曲变形, 针对这一现象, 用有限元方法分析了其成形过程中温度场、应变场的变化, 提出其成形机理仍属于屈曲机理, 并作出了相应解释。通过实验与计算的方法, 研究了反向弯曲角度与光束扫描速度的关系。

关键词: 激光弯曲 板料 热应力 数值仿真

Study on buckling mechanism of laser bending of the sheet metal

Guan Yanjin, Sun Sheng

(Shandong University of Technology, Jinan, 250061)

Abstract: Three laser bending mechanisms, temperature mechanism, buckling mechanism and up-setting mechanism, are introduced. After being scanned, the sheet that isn't pre-bent can still obtain the bending towards the laser beam. Aiming at this phenomenon, temperature fields and strain fields in laser bending are numerically analyzed by finite element method, it is presented that its forming mechanism still belongs to buckling mechanism, and the reason is explained. The relationship between bending angles and scanning velocity of the laser beam is studied numerically and experimentally.

Key words: laser bending sheet metal thermal stress numerical simulation

引 言

激光成形是国外近年来提出的一种新的金属板材柔性成形方法。由于金属材料的热胀冷缩特性, 当其受到不均匀加热时, 将会在材料内部产生热应力。板料激光成形技术就是一种利用高能激光束扫描金属薄板表面, 在热作用区产生强烈的温度梯度, 导致非均匀分布的热应力, 使金属板料发生塑性变形的工艺方法。在无需模具、不需外力的情况下, 仅仅通过优化激光加工工艺参数、精确控制热作用区内的温度分布, 即可获得合理的热应力大小与分布, 使板料最终实现无模成形。

基于激光成形技术, 不仅可快速获得各种简单的弯曲件, 而且通过控制激光束的扫描路径, 可使板料产生复合弯曲变形, 从而得到各种异形件(如球形件、抛物面形件等)。由此可见, 激光弯曲是激光成形的基础与关键, 研究板料的激光成形技术必须深入揭示激光弯曲的机理, 以正确判断不同的扫描轨迹与工艺参数组合所引起的不同成形结果及变形量, 从而达到对激光成形的精确控制。

1 激光弯曲机理

影响激光弯曲的因素很多, 但板料的变形归根结底取决于不同扫描轨迹和工艺参数所引起的温度场形式, 因此, 根据激光弯曲过程中所形成的板料厚向温度场形式及相应的工艺条件

等,其成形机理可概括为:温度梯度机理、增厚机理、屈曲机理^[1~3]。

基于以上三种机理,激光弯曲存在三种基本的变形形式:(1)正向弯曲变形(朝向激光束的弯曲);(2)反向弯曲变形(背向激光束的弯曲);(3)长度方向的收缩变形。第一、三两种形式的变形较易控制和获得。文献[3]对激光束扫描经预弯曲变形的金属薄板所引起的反向弯曲进行了深入研究,并提出了激光变曲的屈曲机理。但在薄板的激光弯曲实验中却发现,即使不进行预弯曲,当激光束扫描后,板料同样可以产生反向弯曲变形,其弯曲方向与变形量取决于加工工艺参数(光束直径、扫描速度等)的选择,即仅仅通过合理调整加工工艺参数,而不必使板料预弯曲,就可使板料产生反向弯曲变形。文献[4]对此种变形机理解释为:由于激光加热使板料表面温度超过相变温度,则在冷却过程中,表层体积会迅速膨胀,当相变产生的膨胀量比温度降低产生的收缩量大时,板料就会产生背向激光束的弯曲。但通过有限元方法对弯曲过程中的温度场及应变场分析后,我们认为相变引起的变形并不是一个主要因素,其变形机理仍然属于屈曲机理。

2 激光弯曲的有限元仿真

2.1 模型处理

在激光弯曲成形过程中,温度场与位移场相互影响,属于复杂的热机耦合问题,为与实际情况相吻合,仿真采用了三维的热机耦合模型。

由于材料的热物理性能(热传导系数、热膨胀系数、比热、密度)、力学性能参数(弹性模量、屈服极限)都与温度相关,分析中必须考虑材料性能与温度的这种函数关系。我们所取材料为08F钢板,其相应的热物理性能及力学性能参数与温度的关系取自文献[5,6]。

热载荷以热流密度的形式,通过一用户子程序施加到相应单元表面,来描述动态的热源,光束为高斯光束,其能量密度分布 I 为:

$$I = 2AP \exp(-2r^2/R^2) / (\pi R^2) \quad (1)$$

于是,在光束直径范围内的平均热流密度 I_m 为:

$$I_m = 1/(\pi R^2) \int_0^R 2r I dr = 0.865 AP / (\pi R^2) \quad (2)$$

式中, A 为板料对激光的吸收系数, P 为激光输出功率, R 为照射到板料表面的光束直径, r 为考察点至光束中心的距离。

板料表面需进行黑化处理,实验时在其受照射面涂一层炭黑,根据板料表面的处理情况,仿真时板料对激光能量的吸收系数取为0.5。板料经激光束扫描后在空气中自然冷却,板料与周围环境存在对流和辐射换热。此两类边界条件在传热学中称为第三类边界条件,可统一写为右式:

$$q = -(\partial t / \partial n) = h(t - t_e) \quad (3)$$

式中, h 为换热系数, t 为板料表面温度, t_e 为环境温度。

换热系数 h 可写成对流换热系数 h_c 与等效辐射换热系数 h_r 之和。根据文献[7]并结合实验现场条件,与环境的对流换热系数取为 30 W/m^2 。根据辐射定律,与环境之间的辐射换热系数转换成(3)式的标准形式,可得等效辐射换热系数为:

$$h_r = \epsilon \sigma (t + t_e)(t^2 + t_e^2) \quad (4)$$

式中, σ 为波尔兹曼常数($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$); ϵ 为材料热辐射率,取 $\epsilon = 0.8$ 。

由(4)式可知,等效辐射换热系数与温度有关,因而辐射边界条件是非线性的。板料的初始温度及环境温度均为 20°C ,板料无初始变形和应力。由于变形及边界条件在长度方向的对

称性,取长度为 20mm、宽度为 10mm、厚度为 0.5mm 的板料的一半进行分析,将其离散为 1400 个八节点六面体单元。仿真采用大型有限元分析软件 MARC 在 SGI Octane 工作站上进行。

2.2 仿真结果与讨论

对于上述板料,当激光设备的输出功率为 550kW、光束直径为 5mm、扫描速度为 50mm/s 时,即可获得背向激光束的反向弯曲(如图 1)。

当光束直径较大、光束功率相对较高、扫描速度较低的激光束扫描热传导率较高的金属薄板

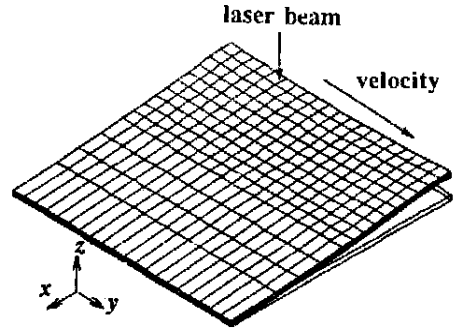


Fig. 1 Simulation result (bending towards the laser beam)

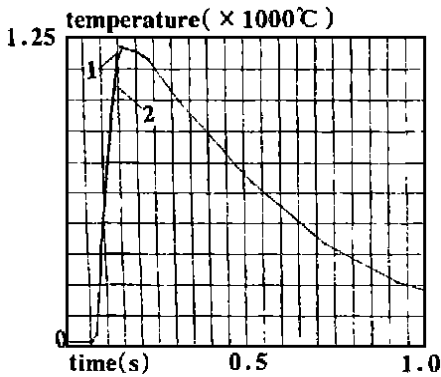


Fig. 2 Temperature variation versus time (scanning velocity 50mm/s)
1—upper side 2—lower side

时,板料正面首先被加热,先于板料背面发生膨胀,使板料产生很小的反向弯曲变形。由于加热速度缓慢,正面的热量慢慢传递到背面,使正、背面温度梯度极小。在相对较大的加热区域内,材料因温度升高,继续发生热膨胀,而邻近区域的冷态材料要限制其膨胀,因此,在整个加热区域内产生很大的压缩应力,同时,由于温度的升高引起材料屈服应力的降低,不仅使加热区材料产生压缩塑性应变,而且使加热区材料产生失稳,即发生屈曲,使反向弯曲变形增大。反向弯曲变形的增大,进一步加大了板料背面的压缩塑性区,因此,这时板料背面材料的压缩塑性应变值远大于正面的压缩塑性应变值,结果使板料

背面的横向收缩量大于正面的横向收缩量,而表现出较大的反向弯曲变形。

另一方面,由图 2 可看出,在加热阶段的末期,加热面的加热温度上升到最大温度后开始冷却,背面的温度却还在上升,由于热传导需要时间的关系,背面达到温度最高值的时间总比加热面滞后一些。这时,由于加热面温度已开始降低,产生了横向收缩,结果加大了背面正在加热部位的塑性压缩区,使背面的横向收缩量进一步增大,此时板料的反向弯曲角度达到了最大。随后,板料背面温度也开始降低,同样要产生横向收缩,由于其塑性变形区及压缩应变值较正面大,因而,随温度的降低,板料背面的横向收缩效应也较正面显著,结果使板料正面的塑性压缩应变值反而随温度的降低增大。当板料温度恢复到室温时,板料正、背两面的塑性应变差值有所减小(如图 3),但板料仍保持了背向激光束的反向弯曲。

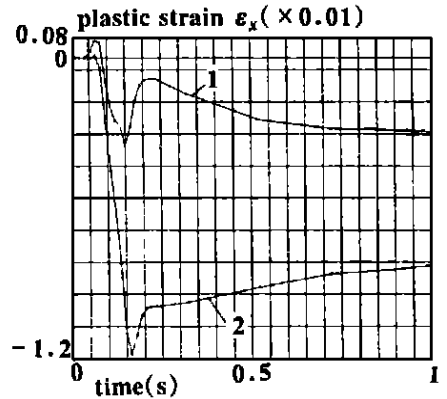


Fig. 3 Plastic strain variation versus time (scanning velocity 50mm/s)
1—upper side 2—lower side

从以上分析看出,在板料成形过程中,主要由于加热阶段加热区域材料压缩应力的增大及其屈服极限的降低,使板料产生屈曲,得到了较大的反向弯曲变形。虽然在冷却阶段,板料正

面的塑性应变值在多种因素的综合作用下增大,而背面的塑性应变值减小,但板料背面总的横向收缩量仍然较正面大,从而使板料最终得到了背向激光束的反向弯曲变形。因此,板料在一定工艺参数下表现出的反向弯曲变形,就是板料在较高的压缩应力下产生屈曲的结果,其机理仍属于屈曲机理。

2.3 扫描速度对反向弯曲变形的影响

光束功率 P 与扫描速度 v 的比值是一个非常重要的综合参数,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。在实际应用中,一般通过改变扫描速度来调节线能量密度。线能量密度随着扫描速度的增加而降低,同时引起加热区温度场的变化。尽管板料加热面与背面的温度仍基本一致,但线能量密度降低后,加热区能够达到的最高温度显著降低,使材料屈服极限的降低幅度减小,整个塑性变形区的塑性应变值减小,从而使板料正面与背面的横向收缩量的差值减小,即板料的反向弯曲角度减小。图4表示出了板料的反向弯曲变形角度随扫描速度的变化规律,显然,较低的扫描速度有助于获得较大的反向弯曲变形。

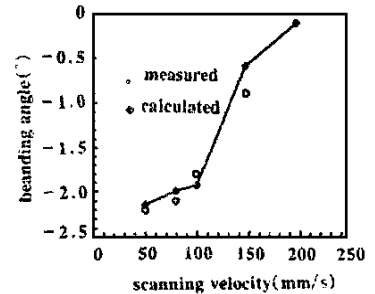


Fig. 4 Influence of scanning velocity on the bending angle

3 结 论

激光束扫描已进行预弯曲变形的金属薄板时,板料可产生背向激光束的反向弯曲变形,其变形机理可解释为屈曲机理。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,即使板料不进行预弯曲变形,由于加热阶段在较大的加热区域内的材料受到周围冷态材料的限制,产生很大的压缩应力。同时,材料屈服极限随温度升高而降低,一方面使加热区材料产生塑性压缩变形,另一方面随温度的继续升高,加热区材料受到更大的压力,结果使板料局部产生失稳而屈曲,发生较大的反向弯曲变形。在冷却阶段,板料正面与背面横向收缩量的差值有所减小,但板料最终仍产生背向激光束的反向弯曲变形。因此,反向弯曲变形主要是加热阶段板料局部屈曲的结果,其变形机理仍属于屈曲机理。

计算与实验结果表明:扫描速度对反向弯曲变形的影响很大,较低的扫描速度有助于获得大的反向弯曲变形。但实验中发现,反向弯曲变形很难控制,扫描工艺参数等稍有变化,弯曲方向即发生改变,如何获得稳定的反向弯曲变形还需进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 Geiger M, Vollertsen F. CIRP Annals, 1994; 42(1): 301 ~ 304
- 2 Geiger M. CIRP Annals, 1994; 43(2): 563 ~ 570
- 3 Arnet H, Vollertsen F. J. Engineering Manufacture, 1995; 209: 433 ~ 442
- 4 王秀风, 王秀彦, 林道盛. 锻压机械, 1999; 34(3): 8 ~ 10
- 5 束得林. 金属力学性能. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 6 马庆芳, 方荣生. 实用热物理性质手册. 北京: 中国农业机械出版社, 1986
- 7 杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1987

作者简介: 管延锦, 男, 1969年12月出生。讲师, 在职博士。现从事成形技术及CAD/CAE/CAM等方面研究与教学。