

文章编号: 1001-3806(2006)04-0425-04

激光诱发板材热应力成形技术及其研究现状

周益军^{1,2}, 张永康^{1*}, 周建忠¹, 史建国¹

(1. 江苏大学 激光技术研究所, 镇江 212013; 2 扬州职业大学, 扬州 225500)

摘要: 概述了板材激光热应力成形技术的发展现状, 分析了板材激光热应力形成的主要影响因素, 综述了激光束参数、材料的性能及工件几何尺寸对激光热应力弯曲成形的影响, 概括了激光热应力成形工艺的一些规律。为了使板材激光热应力成形技术应用于生产, 在总结前人研究成果的基础上, 指出了板材激光热应力成形工艺存在的关键问题, 并提出了目前板材热应力成形技术应用于生产所需要研究的内容。

关键词: 激光技术; 激光成形; 热应力; 板材弯曲

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

Development of sheet metal forming with thermal stress induced by laser

ZHOU Yi-jun^{1,2}, ZHANG Yong-kang¹, ZHOU Jian-zhong¹, SHI Jian-guo¹

(1. School of Mechanical Engineering Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2 Yangzhou Polytechnical College, Yangzhou 225500, China)

Abstract The laser induced thermal stress forming technique and its development is summarized and its main influencing factors are analyzed. Laser parameters, material properties and workpiece geometry to laser induced thermal stress bending is summed up, its some relations are summarized. In order to make it apply to manufacture, some pivotal existent problems of laser forming technology is put forward based on investigative work of predecessors. Some investigative tasks is pointed out.

Key words laser technique; laser forming; thermal stress; bending of sheet metal

引 言

激光热应力成形是国外近年来提出的一种新的金属构件成形方法, 它利用激光扫描金属薄板时, 在热作用区域内产生的强烈温度梯度而诱发的热应力, 使板料实现塑性变形。它与通过对板材施加外力使板料实现塑性变形有本质的区别。激光诱发板材成形具有如下特点: 激光热应力成形为无模成形, 且无需任何形式的外力, 因而生产周期短、柔性大, 特别适合批量小的大型零件生产; 因不受模具限制, 可容易地复合成形和制作各类异形件; 激光热应力成形属热态成形, 总的变形由多次扫描累积而成, 而且是在热态下进行, 因此能够使难变形或脆性材料的板料在常温下成形; 因每次变形量小, 曲线弯边时不易产生皱曲; 工艺参数可进行控制, 从而既保持零件质量, 又可改善生产环境; 对激光束模式无特殊要求, 易于实现成形、切割、焊接等激

光加工工序的复合化。成形过程无噪声、无污染, 被加工材料少, 属于清洁、绿色制造的范畴^[1,2]。此外, 这种方法特别适用板件产品的现场维修, 而不需要对机器进行拆卸^[3]。正因为热应力成形工艺如此奇特, 国内外很多学者都在研究它。

1 板材激光热应力成形的发展及现状

在 1986 年, 日本学者 NAMBA 以 S45C 碳钢激光硬化处理为例研究了板料的温度分布和热变形, 提出了一种在不加外力的条件下利用激光诱发的热应力来实现板料塑性变形的新工艺——激光成形, 并用简单的弯曲试验证实了板料激光成形的可能性。美国学者 SCULLY 利用激光作为热源进行船体钢板的弯曲, 并用它取代传统的火焰成形工艺。研究结果表明, 这种方法对板材的成形是有效的, 特别适合于 6.25mm ~ 12.5mm 厚钢板的弯曲。美国一个研究小组将该技术用于海军舰船的制造。随后, 波兰基础技术研究所的 FRACKIEWICZ 教授利用激光成形先后制造出筒形件、球形件、波纹管及金属管的扩口、缩口和弯曲成形等。在德国, VOLLERTSEN 教授领导的激光成形研究小组对板料激光成形技术作了大量的研究工作, 并提出了一种通过激光切割和激光弯曲生产灯座的快速成

基金项目: 国家高技术研究发展计划(八六三计划)课题资助项目(2002AA421120)

作者简介: 周益军(1966-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事机械 CAD/CAM 及激光冲击方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@uj.edu.cn

收稿日期: 2005-04-24 收到修改稿日期: 2005-05-18

形方法和三维激光成形匙形部件的工艺; GEIGER 等提出激光成形与其它加工工序的复合化的思想, 并将该技术用于汽车制造业, 进行了汽车覆盖件的柔性校正和其它异形件的成形。并且在激光弯曲成形机理、工艺、成形后材料的组织性能、数值模拟、激光成形与其它加工工序复合化作了一系列的工作^[1]。国内也有相关内容的研究, 燕山大学学者首先在国内介绍了板料激光新工艺^[4]。随后, 又有学者^[5-6]对板料激光成形时的温度场进行了数值模拟。有人以纯铝板 and 低碳钢板为主要研究对象, 对温度梯度机理下激光输入功率、扫描速度、离焦量以及扫描次数等参数与成形弯曲角之间的关系进行了试验研究, 深入分析了温度梯度机理下影响成形的主要因素^[7]。已有的实验研究表明, 激光热应力成形的材料非常广泛, 包括各种碳钢、不锈钢、合金、有色金属及金属基复合材料等, 利用激光成形还可加工常规工艺不能加工或很难加工的材料。通过对板材激光热应力成形相关理论的研究, 目前公认的机理有: 温度梯度机理、墩粗机理、翘曲机理和弹性机理。其中温度梯度机理报导最多, 而且最容易让人接受。有学者认为, 薄板在激光照射下所引起最终变形的方向取决于材料的性质, 可能是朝向激光束或背向激光束。研究结果进一步完善了薄板激光弯曲的变形机理, 并为研究薄板激光弯曲过程奠定了基础^[8]。为了控制热应力成形, WANG 等把人工神经网络技术应用于激光加工工艺参数的优化, 为实际生产和加工提供有效的依据^[9]。

2 激光热应力成型的主要影响因素

2.1 激光束参数的影响

激光束对板材弯曲大小的主要影响因素有入射功率、扫描速度、扫描次数、扫描轨迹、光斑直径、离焦量、和激光与材料的热复合系数等。通过单因素试验法, 已发现: 当其它各参数不变时, 增加光束功率后, 能量密度(入射到单位表面积上的能量)随之加大, 导致板料的弯曲角度显著增大。而在激光输出功率一定的情况下, 增加扫描速度, 则引起能量密度降低, 使板料弯曲角减小^[10]。上述两个规律都不是线性的, 有一个最佳的工艺参数。当其它各参数不变时, 随着扫描次数的增大, 弯曲角度呈近似线性增大^[11]。

扫描路径曲率 $1/R$ 对板料弯曲角度也有较大影响, 如图 1 所示^[12], 通过试验发现, 和直线弯曲 ($1/R=0$) 相比, 在同样的变形条件下, 曲线弯曲所获得的角度要大幅度下降, 且随着路径曲率的增大而减小, 这是因为在曲线弯曲过程中, 由温度梯度导致的内部热应力除部分转化为弯曲应力外, 还有部分应力要转化为使板料产生曲面变形的剪切应力, 且随着路径曲率的

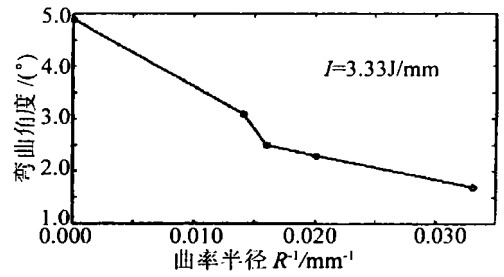


图 1 路径曲率对弯曲角度的影响

增大, 热应力转化为剪切应力的趋势加大, 从而转变为弯曲应力的比例减小, 导致了最终的弯曲角度减小, 但曲面变形程度增大^[12]。光斑直径和离焦量是相互影响的。光斑直径大小和离焦量大小成反比。光斑直径对板材弯曲的影响规律是: 随着光斑直径的增大, 板材一次扫描后所得到的弯曲角总体上呈现减小趋势。因光斑直径越大, 照射在板材表面的能量密度就越小, 产生的温度梯度也就越小, 从而使板材弯曲变形随之减小。

激光与材料的热复合系数会影响板材的弯曲, 但目前国内外尚没有很好的手段来研究它的影响规律。

在激光束的参数中, 有些参数对板材弯曲的影响是综合作用。如入射功率、扫描速度和光斑直径等参数, 为了评估它们对激光热应力成形的综合影响, 可以用线能量 (P/v , P 是入射功率, v 是扫描速度) 和面能量 (P/vd , d 为直径) 来衡量。

线能量与弯曲角的关系曲线表明, 线能量在较低范围, 弯曲角随线能量的增大几乎呈线性增长, 随着线能量的继续增大, 温度越来越高, 应变速率的影响逐渐增大, 使材料的屈服强度增大, 弯曲角的增长变得缓慢, 当线能量达到一定程度时, 弯曲角几乎不变, 并逐渐减小。恒定线能量下, 随扫描速度增加, 板料温度和温度梯度升高, 弯曲角增大, 受屈服强度的影响, 弯曲增量减小。

恒定面能量条件下, 随光斑直径增大, 注入板料的能量增大, 温度升高, 厚向温度梯度降低, 但参与塑变的金属量增多, 最终弯曲角呈上升趋势。当加热区单位面积的输入能量相同, 不同线能量和光斑直径下获得的弯曲角变化趋势是一致的^[13]。

激光能量密度(面能量) $I=P/vd_b$ (其中, P 是激光束功率, v 是激光束移动速度, d_b 是激光束与板料接触处的直径) 的大小对弯曲角度的影响规律如图 2 所示^[14]。图中的曲线峰值表明: 对于一种材料, 存在一

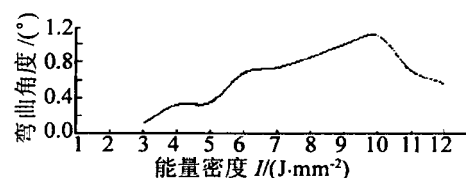


图 2 弯曲角度随能量密度的变化

组特定的工艺参数使板料产生的弯曲变形最大^[14]。

2.2 工件材料的性能的影响

材料对板材弯曲大小的主要影响因素有: 密度、杨氏模量、热膨胀系数、屈服极限、热传导率、热容量、初始应力等。单纯通过实验的方法无法获得材料性能参数对板料激光弯曲成形影响的一致性规律, 而通过有限元数值仿真可方便地研究某一材料性能参数对成形的影响。有人^[15]通过有限元程序模拟仿真研究, 获得下列结论: 相同工艺条件下, 随着弹性模量、屈服强度的增大, 板料的弯曲角度减小, 即小弹性模量、低屈服强度的材料容易产生大的弯曲变形。其中弯曲变形对屈服强度的变化比较敏感, 随着屈服强度的增大, 材料抵抗变形的能力提高, 使弯曲角度急剧减小。如图 3 所示^[15]。

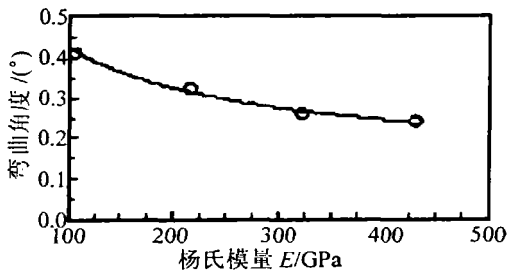


图 3 弹性模量与弯曲角度的关系

热膨胀系数与弯曲角度之间成正比关系, 当热膨胀系数趋于 0 时, 弯曲角度也趋于 0。热膨胀系数越大, 产生的弯曲变形越大。在相同工艺参数下, 热膨胀系数的大小对板料的激光弯曲成形影响很大。小的热传导系数有利于形成大的温度梯度, 从而使板料产生大的弯曲变形; 比热容越小, 加热区内材料的温升越大, 使板料容易弯曲变形。在确定具体的激光弯曲成形工艺参数时, 应根据材料性能参数成形的不同影响, 进行综合考虑, 以优化成形工艺参数。

2.3 工件几何尺寸的影响

工件对板材弯曲大小的主要影响因素是板厚和板宽。试验数据表明, 板料宽度越大, 弯曲角度越大。这是因为激光加热是沿着板料宽度方向连续进行, 没加热到的材料阻碍加热区材料的变形, 起到了一个刚端作用, 板料越宽, 刚端作用越明显, 所以弯曲角度越大。但是当板料宽度达到某一值后, 刚端作用不再加强, 曲线则趋于平缓。板料越厚, 所获得的弯曲角度越小。但当达到一定值后, 厚向材料的相互约束使板料不会再发生弯曲变形^[14]。

3 激光热应力成形工艺存在的关键问题

激光热应力弯曲成形的基础研究在过去近 20 年中已积累了许多, 但仍然有许多问题亟待解决。

(1) 工件原始的几何形状和加工过程中的几何形

状对最后成形的影响还了解不多。通常薄板件成形加工前都有一种微小的弯曲。进行激光弯曲成形时, 即使是直线弯曲, 这种微小的弯曲也会以一种很复杂的方式影响加载和塑性变形的发展。此外, 前道工序 (如轧制板料) 产生的残余应力的松弛将影响热应力成形。

(2) 与其它的激光材料加工工艺一样, 激光诱发热应力弯曲成形给材料的微观组织及力学性能带来一些影响。激光成形过程中, 随着材料温度的升高, 与温度相关的力学性能将发生变化。材料性能的这种温度依赖关系对数值模拟的计算结果影响很大。在材料微观组织方面, 成形时合金的特性不应做有害的改变, 这就要求使用特定的激光加工工艺参数。

(3) 研究材料对激光的吸收现象有一定的难度。这种吸收取决于工件表面的条件、激光的波长、使用强化吸收的涂层和材料的温度等。如果成形是逐步累积的, 则前次扫描所产生的热量将改变与温度有关的材料热物理性质, 包括热吸收效率等。随着激光束扫描的不断进行, 将导致在工件上产生热量集中, 因此被吸收的激光能量增加, 将给激光成形的结果带来副作用。这就要求逐步累积成形的每一步都要进行冷却, 使得工件在塑性变形充分发生后, 且在进行下一步激光扫描之前回到初始温度。这势必影响其加工效率。

(4) 关于激光成形三维加工自动化的要求也很复杂。必须保证调整激光加工工艺参数获得部件几何尺寸的精度而不影响材料的性能, 这种协调往往不容易达到。如何实现板料三维成形的自动化过程, 涉及到在线测量和控制以及激光加工参数的优化。这是一个系统工程。

(5) 工件成形精度和热应力成形的不确定因数太多是一对矛盾。热应力成形工艺的最大难点在于要制作出满足预定形状及尺寸要求的工件。换言之, 能否通过预先制定的工艺制作出预定形状的工件, 已经成为能否将该技术大规模应用于实际的瓶颈。

(6) 激光弯曲成形工艺参数较多, 而且参数之间是相互作用的。因而效率高、耗能少、工艺稳定的最佳工艺参数组合及其获取方法很有意义, 这就是本领域的难点之一。

4 结束语

与其它激光加工技术相比较, 板料激光热应力成形的研究尚处于起步阶段, 加之激光加工成本高, 国内还没有大量使用该技术的应用报道。但板料激光热应力弯曲成形是在热态下累积成形, 所以, 对常温下难变形的材料 (比如钛合金、陶瓷、铸铁等) 具有独特优势。为了将板材热应力成形技术应用于生产, 目前所需要

做的工作有很多。

首先要通过实验研究板材成形精度的决定性因素,确定哪些热应力工艺参数是关键。其次运用 ANSYS 等分析软件模拟板材的变形,对其变化取得规律性的认识,进一步修正经验公式、完善成形理论;开发成形过程模拟的专用软件,通过物理模拟获得材料的性能参数;优化板材激光热应力成形的工艺参数和扫描路,通过在线测量及统计分析,获得效率高、耗能少、工艺稳定的最佳工艺参数组合。在控制等方面下功夫,开发能实现板料三维成形的自动化系统,实现金属材料的激光直接自由实体成形(激光直接制造功能零部件)。此外,研究新材料如多层复合材料、形状记忆合金、微系统器件等的 2-D、3-D 成形也具有很大的发展前途。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y K, ZHOU J Zh, YE Y X. Technology of laser processing [M]. Beijing Chemical Industry Press 2004. 235 ~ 238 (in Chinese).
- [2] WANG Y, LIU H, TAN J G. A study on laser bending of sheet metal [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 175~ 178 (in Chinese).
- [3] MARYA M, EDWARDS G R. A study on the laser forming of near alpha and metastable beta titanium alloy sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology 2001, 108: 376~ 383.
- [4] LI W M. Study on laser bending of metal sheets [J]. Chinese Journal of Lasers 1998, 25(9): 860~ 864 (in Chinese).
- [5] JIZH JIAO X J, WU Sh Ch. Dynamic explicit FEM simulation on laser bending of sheet metal [J]. Journal of Basic Science and Engineering

ing 2001, 9(23): 208~ 214 (in Chinese).

- [6] YANG J LU Sh H, WAN P T *et al*. 3D numerical study on laser bending of sheet metal [J]. Laser Technology 2003, 27(2): 97~ 100 (in Chinese).
- [7] LI L Q, WANG W, LIN Sh Y *et al*. The influence of laser parameters on laser forming under the temperature gradient mechanism [J]. Hot Working Technology, 2002(3): 25~ 27 (in Chinese).
- [8] WANG X F, TAKACS J KRALL S G. Research on mechanism of laser bending for sheet metal [J]. Forging Technology 2001(4): 29~ 33 (in Chinese).
- [9] WANG X F, LÜ X D, CHENG L *et al*. Application of artificial neural network in laser sheet metal bending [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 244~ 247 (in Chinese).
- [10] GUAN Y J, SUN Sh, JIZH Experimental study on laser forming technology of sheet metal [J]. Optical Technique 2000 26(3): 260~ 262 (in Chinese).
- [11] ZHOU L Z, LU Sh H, LIN W *et al*. A study on laser induced thermal stress forming technology [J]. Electric Machining and Mould 2000(6): 20~ 23 (in Chinese).
- [12] CHEN D J, XING Y B, WU Sh D *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 (in Chinese).
- [13] LI L Q, WANG X Y, LIN Sh Y *et al*. Experimental and numerical study of energy effects in laser forming [J]. Applied Laser 2002, 22(2): 155~ 159 (in Chinese).
- [14] WANG X F, WANG X Y, LIN D Sh. Research on laser bending test of sheet metal [J]. Forging Machine 1999(3): 8~ 10 (in Chinese).
- [15] GUAN Y J, JIZH HAO B H *et al*. Influence of material properties on laser bending process of sheet metal [J]. Journal of Optoelectronics • Laser 2001, 12(1): 87~ 90 (in Chinese).

(上接第 424 页)

3 结 论

通过 CCD 光束分析仪测量输出光束的 M^2 因子和束腰宽度,从而得到 LD 端面抽运 Nd:GdVO₄ 固体激光器的热透镜焦距,实验结果与理论预测相符。

参 考 文 献

- [1] NEUENSCHWANDER B, WEBER R, WEBER H P. Determination of the thermal lens in solid state lasers with stable cavities [J]. IEEE J Q E, 1995 31(6): 1082~ 1087.
- [2] BROWN D C. Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1998 34(12): 2383~ 2392.
- [3] YU J, TAN H M, QIAN L Sh *et al*. Theoretical study on thermal beam focusing in longitudinally pumped solid-state laser rods [J]. High Power Laser & Particle Beams 2000 12(1): 27~ 31 (in Chinese).
- [4] WANG D Sh, LI G, CHEN M *et al*. Measurement of thermal focal length of LD end-pumped crystal under stable cavity condition [J].

Laser Technology 2003 27(6): 534~ 537 (in Chinese).

- [5] ZHAO H M, ZHAO Sh Zh, CHEN L. Thermal focal length and optimal pumping position of Nd:NaY(WO₄)₂ crystal [J]. Infrared and Laser Engineering 2004 33(1): 18~ 20 (in Chinese).
- [6] LÜ B D. Laser optics [M]. 3rd ed, Beijing Higher Education Press 2003. 75~ 83 (in Chinese).
- [7] LÜ B D. Laser optics [M]. 3rd ed, Beijing Higher Education Press 2003. 343~ 345 (in Chinese).
- [8] ZHENG J A, ZHAO Sh Zh, WANG Q P *et al*. Influence of thermal effect on the optimized design of LD end-pumped solid-state laser [J]. Acta Photonica Sinica 2000 29(12): 1121~ 1126 (in Chinese).
- [9] RIMINGTON N W, SCHIEFFER S L, SCHROEDER W A. Thermal lens shaping in Brewster gain media a high power diode-pumped Nd:GdVO₄ laser [J]. Optical Express 2004, 12(7): 1426~ 1436.
- [10] NNOCENZIM E, YURAH T, FINCHER C L *et al*. Thermal mode locking of continuous wave end-pumped solid-state laser [J]. A P L, 1990 56(19): 1831~ 1833.