

激光弯曲机理的评述

苏余鹏¹, 王秀凤^{1,2}, 陈光南², 胡世光¹, Janos Takacs³, Gyorgy Krallics³

(1.北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100083;2.中国科学院力学所材料工艺研究中心,北京 100080;
3. Budapest University of Technology and Economics, 匈牙利 H-1502)

摘要:对激光弯曲变形机理问题进行了探讨,提出了激光弯曲的变形机理本质上是温度梯度机理,反向弯曲机理和增厚机理是当材料厚度方向的温度梯度很小时,针对不同厚度的材料而出现的现象.实验发现有限厚度材料在激光辐照作用下,其内部产生了用经典傅里叶定律无法解释的非常规温度分布,将其定义为泛傅里叶效应,用于进一步揭示激光弯曲机理的实质.

关键词:激光弯曲机理;温度梯度机理;泛傅里叶效应

中图分类号: TG14.

文献标识码: A

文章编号: 1005-0299(2004)05-0543-03

Remark on laser bending mechanisms

Su Yu-peng¹, Wang Xiu-feng^{1,2}, Chen Guang-nan², Hu Shi-guang¹, Janos Takacs³, Gyorgy Krallics³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, BUAA, Beijing 100083 China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080, China;
3. Budapest University of Technology and Economics, Hungary, H-1502)

Abstract: Laser bending mechanism is remarked and its essence is the temperature gradient mechanism. The reverse bending and the thickened mechanisms are included in the temperature gradient mechanism. We think that the reverse bending and the thickened of the material are only different phenomena based on different thickness of the material. Experimental result shows that there is a kind of un-convention temperature distribution in the limit thickness specimen under laser irradiation. This phenomenon cannot be explained by the classical Fourier Law and defined as Pan-Fourier effect in order to explain laser bending mechanism further.

Key words: laser bending mechanism; temperature gradient mechanism; Pan-Fourier effect

激光弯曲是近几年出现的一种新的柔性成形加工方法,该方法是利用激光作为热源使金属薄板在无模具下发生塑性变形.它可以不受加工环境的限制,通过优化激光加工工艺参数控制热作用区域内变形的程度,从而控制薄板变形的大小和方向,实现薄板无模具的成形,或改善模具成形零件的贴模性与定型性.国内外很多学者在激光弯曲的变形机理、激光弯曲机理及激光弯曲过程的数值模拟、激光弯曲过程的影响因素及其变化规律等方面做了大量的研究工作^[1-8].在这些研究中,激光弯曲

的变形机理是其它研究和应用方向的基础,只有明确激光弯曲的变形机理及其影响因素的变化规律,才能为其他研究提供坚实的理论基础,最终控制弯曲变形的大小和方向,从而将该技术应用于实际工业生产中.目前已发表的文献主要集中在激光弯曲过程的数值模拟和工艺参数的分析上,较少的涉及到激光弯曲机理的研究.

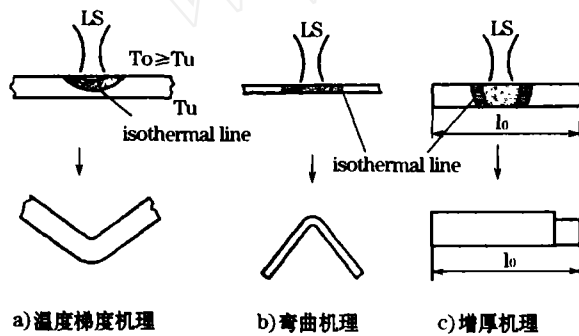
1 研究现状及分析

板料激光成形技术的研究工作,在国外最早起始于1985年, Y. Namba以S45C碳钢激光硬化处理为例研究了材料温度分布和热变形,最先提

收稿日期: 2004-02-18.

作者简介: 苏余鹏(1977-)男,硕士研究生.

出了一种在不加外力的条件下仅利用热应力使板料塑性变形的新的加工法-激光成形法,并用简单的弯曲试验证实了板料激光成形的可能性^[9].随后,德国埃尔兰根大学 M. Geiger 和 F. Vollertsen 领导的激光成形研究组对板料激光成形技术做了较多的研究.最新提出将激光弯曲的机理分为温度梯度机理、弯曲机理和增厚机理,如图 1 所示^[1].在激光辐照下,高能激光束垂直照射在板料上表面,此处的温度迅速上升.同时,板料的下表面没有受到照射,温度在这一瞬时没有发生明显的变化,在板料的厚度方向会产生温度梯度.材料温度升高的过程中要受热膨胀,使得热作用区附近的冷料对其产生非均匀的压应力,由于材料的屈服应力随着温度的升高而降低,这时板料会有背向激光束弯曲的变形产生.激光束关闭以后,上表面失去热源,由于板料是热的良导体,导致它的能量迅速向各方向扩散,温度降低.在这个冷却和热量传递的过程中,板料厚度方向上的温度梯度逐渐减小.上表面降温,开始收缩,屈服应力增加;下表面升温,开始膨胀,屈服应力降低.最终板料产生朝向激光束的弯曲变形.



a) 温度梯度机理 b) 弯曲机理 c) 增厚机理

图 1 激光弯曲机理示意图^[1]

经过实验研究发现,试件变形的大小和方向取决于试件吸收的能量、试件材料的特性和试件厚度等主要因素.并且对于相变比较明显的材料(如 45 号钢),冷却阶段中马氏体相变的作用会增加背向激光束变形的程度,材料最终的变形是热应力和相变应力共同作用的结果,变形的方向是朝向激光束或背向激光束^[10].

弯曲机理是当板料减少到一定的厚度时,板料在大光斑激光的照射下,使得板厚方向产生较小的温度梯度,造成板料产生弯曲变形.实质上是很薄的板料在压应力作用下产生失稳而造成的弯曲,如图 1b)所示.增厚机理是当板料达到一定厚度时,板料在大光斑激光的照射下,使得板厚方向仍产生较小的温度梯度时,造成加热区域内材料

的堆积,如图 1c)所示.

激光弯曲机理的实质应该是温度梯度机理.弯曲机理和增厚机理是材料厚度方向上的温度梯度很小时,针对板料厚度的不同而出现的现象,只是温度梯度机理的特例.

通常认为温度的扰动是以纯扩散的形式从表面向材料内部进行传播,因此依据经典傅里叶定律建立抛物线传热模型,来描述热流密度与温度梯度之间的关系,运用解析算法或数值模拟得到激光加工过程中材料内部温度场的分布规律,为激光加工工艺的制定提供依据^[11-14].但是,随着薄膜技术、纳米技术的应用发展,微尺度热传导理论越来越被人们所关注.当强激光脉冲辐照微尺度材料表面时,其内部温度场分布会出现内部温度高于被加热表面温度的非常规现象,认为温度的扰动是以波动的形式向材料内部进行传播,考虑了温度梯度的形成与热流传播之间的延迟时间,将经典的傅里叶定律进行了修正,建立双曲型传热模型,用非傅里叶效应来描述该条件下出现的非常规温度场分布^[15-20].然而,非傅里叶效应的产生是有条件的,只有当热作用时间极短,小于或等于热松弛时间时才会发生的现象,显然产生非傅里叶效应的定义域非常狭窄.从热传导本身的连续性来讲,理论推断在傅里叶效应与非傅里叶效应之间应该存在渐变的过程.

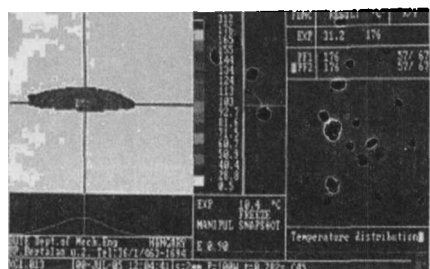
通过试验,发现了有限厚度材料在激光辐照作用下,其内部产生非常规温度场的现象,认为热量在材料内部传递因反射波的影响,具有与入射波叠加的扩散波动行为,并将此现象定义为用泛傅里叶效应来描述,以此来探讨其渐变规律.

试验发现^[8],对于大厚度的试件,如图 2a)所示,材料内部温度场分布图像与用傅里叶定律得到的结果相符合,即沿着材料厚度方向上的温度分布由表及里逐步降低;随着厚度的减小,在薄试件内出现了非常规现象,材料内部的温度高于边界温度,且温度场分布图像与用傅里叶定律得到的结果完全相反,如图 2b)所示;图 2c)所示为介于上述两种条件之间的情况.

文献^[21]从光子与声子相互作用的机理出发,解析计算得到了金属板料在激光辐照作用下其内部呈现的这种非常规温度场分布,证实了泛傅里叶效应的存在.通过泛傅里叶效应的研究,可以进一步揭示激光弯曲机理的实质.因此有必要对泛傅里叶效应进行进一步充实完善,如材料参数、工艺参数及几何参数的影响;效应产生条件的明确界定;热传导数学模型的建立与试验验证等等.



a) 厚度: 10mm



b) 厚度: 2mm



c) 厚度: 5mm

试件长 100mm, 宽 2mm, 激光输出功率为 100W,
连续照射时间为 0.782s, 光斑直径为 2mm,
热作用区侧面为温度场测量面

图2 激光加热终了时的温度场图像(45钢)^[8]

2 结 语

1) 激光弯曲机理的实质应该是温度梯度机理. 弯曲机理和增厚机理是材料厚度方向温度梯度很小时针对板料厚度不同而出现的现象, 只是温度梯度机理的特例.

2) 温度梯度机理的研究, 取决于热量在材料内部的分布. 基于实验现象提出的泛傅里叶效应可以揭示激光弯曲机理的实质.

参 考 文 献:

- [1] Vollertsen F. Mechanisms and models for laser forming [A]. In: Geiger M, Vollertsen F, eds. Proceedings of the LANE'94[C]. Banberg: Meisenback, 1994, 345-359.
- [2] An K Kyrsanidi. An analytical model for the prediction of distortions caused by the laser forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104:94-102.
- [3] P J Cheng, S C Lin. An analytical model for the temperature field in the laser forming of sheet meta[J]. Journal of Material Processing Technology, 2000, 101: 261—267.

- [4] Wu Shichun, Zheng Jinsong. An experimental study of laser bending for sheet metal[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 110: 160-1 63.
- [5] Chen Yanbin, Li liqun, Lin Shangyang. The FEM simulation of the temperature field in laser forming [J]. Applied Laser, 2001, (2): 18-40.
- [6] X F Wang, Janos Takacs, Gyorgy Krallics, et al. Research on the thermo-physical process of laser bending[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127: 388—391.
- [7] 王秀凤, 胡世光, 陈光南, 等. 激光点热源作用下试件内部热传导的实验研究[J]. 光电子激光. 2004, 15(2):226-229.
- [8] 王秀凤, 胡世光, 陈光南, 等. 激光点热源作用下试件内部热传导的实验研究[J]. 光电子激光. 2004, 15(2):226-229.
- [9] Y. Namba, Laser Forming in Space [A]. In: Conf. on Laser'85, ed., C.P.Wang (1986) :403-407.
- [10] 王秀凤, Janos Takacs, Gyorgy Krallics. 激光弯曲机理的试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(4):473 ~ 476.
- [11] 闫长春, 顾济华, 吴茂成. 单脉冲激光加热下材料的温度场研究[J]. 激光杂志. 2003(2):50-52.
- [12] 张立文. 连续 YAG 激光相变硬化三维瞬态温度场数值模拟[J]. 大连理工大学学报. 2003(3):191-195.
- [13] 马 琨, 伏云昌, 李俊昌. 激光热处理温度场的实验和理论研究[J]. 激光杂志. 2003(3):9-11.
- [14] 张建宇. 激光强化带钢轧辊的实验研究与温度模拟 [J]. 北京科技大学学报. 2003(6): 258-261.
- [15] 崔晓鸣, 刘登瀛. 在脉冲激光作用下物体表面非傅里叶效应的实验研究[A]. 中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集. 1999.
- [16] 崔晓鸣, 刘登瀛, 淮秀兰. 有限厚度材料内不同导热模型一维温度场的计算[J]. 哈尔滨工程大学学报. 2000(10): 37-41.
- [17] X. Wang, X. Xu. Thermoelastic wave induced by pulsed laser heating[J]. Appl. Phys. A 73 (2001): 107-114.
- [18] Al-NIMR, KIWAN S. Effect of thermal losses on the microscopic two-step heat conduction model. International Journal of heat and mass transfer[J]. 44(2001): 1013-1018.
- [19] 王秋军, 徐红玉, 宋亚勤, 等. 微尺度热传导理论及金属薄膜的短脉冲激光加热[J]. 纳米电子技术. 2003(11): 18-23.
- [20] Eiji Hoashi, ect. Numerical analysis of wave-type heat transfer propagating in a thin foil irradiated by short-pulsed laser[J]. International Journal of heat and mass transfer. 46(2003):4083-4095.
- [21] 郑瑞伦, 陈 洪, 刘 俊. 矩形激光脉冲辐照下金属板材料温度分布研究. 物理学报[J]. 2002(3): 554-558

(编辑: 张积宾)