

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0613-04

## 激光非熔凝热物理过程的试验研究\*

王秀凤

(北京航空航天大学机械学院, 北京 100083)

Janos Takacs Gyorgy Krallics Andras Szilagyi Tamas Markovits

(Budapest University of Technology and Economics, Hungary H-1502)

**摘要** 通过对试件在激光与材料非熔凝作用下动态变形过程、热作用区侧面温度场的实时测量及激光照射后试件在光斑作用中心处横截面的组织分析,得知试件的最终变形是热应变与相变共同作用的结果,进一步完善了薄板激光弯曲的变形机理;同时揭示了试件在热作用区侧面温度场的分布规律。试验结果为激光非熔凝加工的应用研究提供了指导。

**关键词** 激光非熔凝加工, 温度场, 热应变, 相变

**中图分类号** TG665 **文献标识码** A

## Experimental Research on the Thermo-physical Process of Laser Non-melting Processing

WANG Xiu-feng

(Faculty of Mechanical Engineering and Automation, BUAA, Beijing 100083)

Janos Takacs Gyorgy Krallics Andras Szilagyi Tamas Markovits

(Faculty of Transportation Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Hungary H-1502)

**Abstract** A new method of real-time measuring technology is presented to research on the thermo-physical process of laser-material interaction during laser non-melting processing. The dynamic micro-deformation of the specimen was studied using laser beam reflex amplifier system. The temperature distribution on the heat zone side was measured with the thermovision Infrared System. The microstructure in the cross section of heated region center was analyzed. Experimental results show that the final deformation is identified to be a result of thermal strain and phase transformation strain and at the same time the temperature distribution on the heat zone side is revealed. The conclusion is helpful to application research of laser non-melting processing further.

**Key words** laser non-melting processing, temperature distribution, thermal strain, phase transformation strain

### 1 引言

激光加工技术是先进、高效的制造手段,在航空、机械及国防工业等部门有广阔的应用前景。激光非熔凝加工可以实现薄板无模成形,或者改善模具成形零件的贴模性与定型性;也可以对模具表面进行热处理,改善模具表面硬度、耐磨性等,提高模具的使用寿命。薄板激光弯曲成形是近几年出现的

一种新的柔性成形加工方法,对它的研究始于1985年,迄今为至,来自日本、波兰、美国、德国及我国的许多学者在激光弯曲机理<sup>[1,2]</sup>、激光弯曲机理及激光弯曲过程的数值模拟<sup>[3-5]</sup>、激光弯曲过程的影响因素及其变化规律<sup>[6-9]</sup>等方面做了大量的研究工作。但是,由于缺乏热塑性变形机理的深入研究,变形的大小和方向不能准确控制,限制了该技术的实际应用。国内外已将材料表面激光强化的技术主要应用在易磨损零件上,但是在模具表面上的应用仍不多见。尽管国内外许多学者在不同的假设基础上建立了不少的数学模型,主要模拟温度场、残余应力

\* 航空基础科学基金(98H51110)、国家留学基金管理委员会和匈牙利教育部联合资助课题。

场的分布,建立了组织与性能之间的关系<sup>[10~15]</sup>,但由于缺乏对此过程的机理研究及试验的验证,数值模拟的结果很难指导实际应用。

本文通过试验研究试件在激光照射下的变形机理及热作用区侧面温度场的分布规律,为进一步研究薄板激光弯曲机理及模具表面的强化效果奠定基础,同时为激光非熔凝加工过程的数值模拟提供验证依据。

## 2 试验装置与试验方法

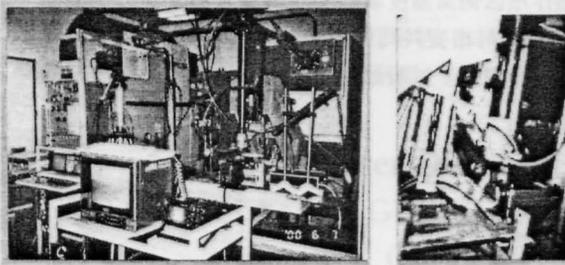


图1 试验装置

Fig.1 The experiment scheme

试验与测量装置如图1所示。试验在匈牙利布达佩斯技术与经济大学机械工程系激光实验室进行。试验设备选用型号为 OERLIKON OPL1800 的连续输出式 CO<sub>2</sub> 激光器,光束波长 10.6 μm,其焦距为 5",功率密度分布服从基模高斯分布。激光工艺参数:光斑直径 2 mm、输出功率 100 W、连续照射时间 0.782 s。试件材料选用 St14 和 45 钢,试件尺寸为 100 mm × 2 mm × 2 mm,一端被夹持在工作台上,自由端上表面粘贴一块 7 mm × 7 mm 有机玻璃,用来将从 He-Ne 激光器(5 W)出来的光束反射到屏风上的坐标纸上,将微小变形放大后,用高精度摄像机记录光点在坐标纸上的运动过程,试件微小变形的放大原理如图2所示。激光照射在试件的中点,试件被照射表面涂石墨以提高材料对激光的吸收率。同时用 THERMOVISION 880 LWB 型热像仪(测量

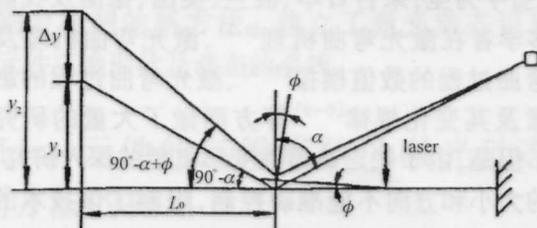


图2 试件微小变形的放大原理

Fig.2 Conceptual diagram of amplifying specimen deformation

温度范围为 -20~1500 °C,图像频率为 6.25 Hz,液氮冷却)记录试件在热作用区侧面(图3中的B面)的温度场随时间的变化图像,通过计算机显示其记录的图像及相关的参数,为激光非熔凝加工过程的数值模拟提供验证依据。

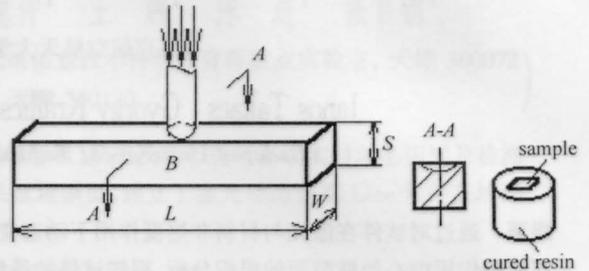


图3 试样的切取与镶嵌

Fig.3 The scheme of microstructure experiments

图2中

$$y_1 = L_0 \tan(90^\circ - \alpha)$$

$$y_2 = L_0 \tan(90^\circ - \alpha + \phi)$$

$$\phi = \text{atan} \left[ \frac{\Delta y}{L_0} + \tan(90^\circ - \alpha) \right] - 90^\circ + \alpha$$

式中,φ为试件的微小变形角度;α为 He-Ne 激光器照射的入射角度;

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

激光照射后,将试件在光斑作用中心处切取 A-A 横截面制作金相试样,如图3所示。将试样用凝固树脂镶嵌在圆管里,经过打磨、抛光后,用 3% 的硝酸酒精腐蚀,在 NEOPHOT21 金相显微镜下观察其金相组织。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试件在热作用区侧面温度场的实时测量结果

图4中的图像与常规热传导方程得出的结果相反,且温度最高点不在试件的表面,是由于热量向试件内部传递会受到有限厚度边界条件的影响,及试件的表面与周围空气进行热量交换所致。它们迭加的结果使得温度最高点的位置逐渐降低,同时最高点的温度也在变化,如图4、图5所示。因此,研究薄板激光弯曲机理及模具刃口处激光强化工艺时,有限边界对温度场的影响不容忽视。

### 3.2 试件动态变形过程实时测量结果

图6表明,当激光束照射试件上表面时,试件上表面的温度迅速升高,在试件厚度方向上形成强烈的温度梯度,从而在此方向上产生非均匀热膨胀,使得试件产生与激光束方向相反的变形。随着加热时

间的继续,试件的上表面与周围空气的热量交换,试件的有限厚度使得热量在试件内部的传导受到阻碍,它们共同作用的效果减少了试件反向变形程度,图6中产生一段近似平坦的曲线。当激光束停止照射后,上表面温度迅速降低,试件上表面产生收缩,

下层的材料会继续膨胀直到上下表面温度相等,使得试件反向变形的程度逐渐减少。最终变形的结果,试件产生朝向激光束的变形[图6(a)],或背向激光束的变形[图6(b)]。

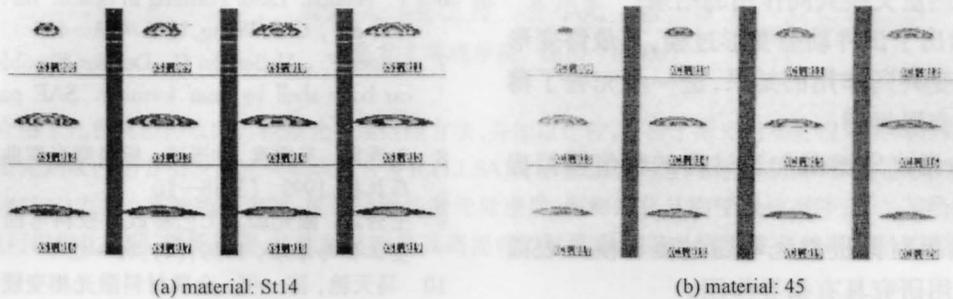


图4 试件在热作用区侧面温度的分布随时间的变化

Fig.4 The variation of temperature distribution versus time in the thickness direction of heat zone side

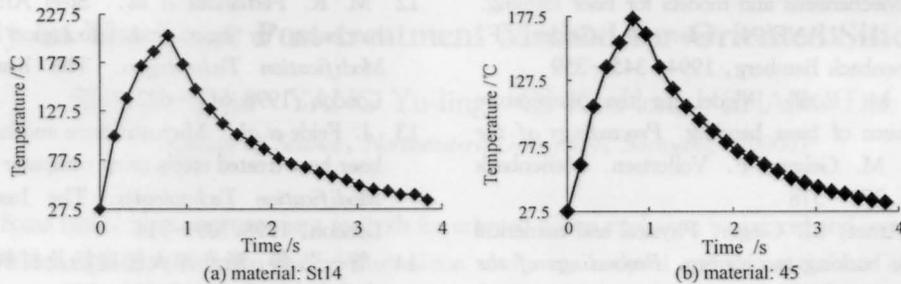


图5 试件在热作用区侧面温度最高点随时间的变化

Fig.5 The variation of the highest temperature versus time in the thickness direction of heat zone side

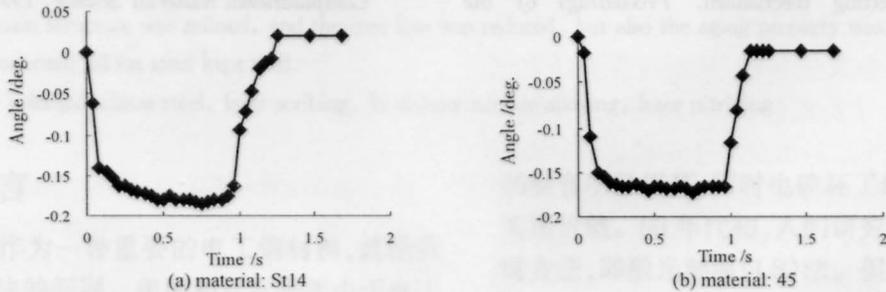


图6 试件的动态变形过程

Fig.6 The dynamic micro-deformation process of the specimen

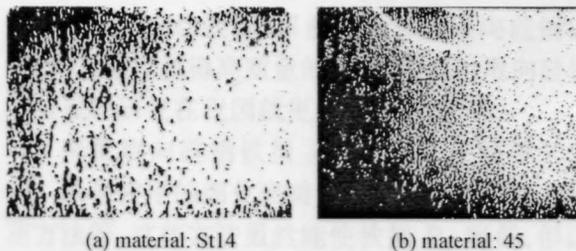


图7 金相组织(×40)

Fig.7 Micrographes of the specimen after laser irradiation

### 3.3 激光照射后,试件在光斑作用中心处横截面的金相组织

激光照射后,St14 试件在加热区内组织基本不变,但是晶粒得到了细化,可使试件表面的机械性能得到一定的改善,如图7(a)所示;而45号钢试件的加热区内,有明显的马氏体相变区,如图7(b)所示。在试件冷却过程中,马氏体相变产生的体积膨胀有可能超过上表面材料的压缩塑性应变,使得试件的变形背向激光束,如图6(b)所示。

## 4 结 论

由上述试验及分析,可得出以下结论:

1) 试验揭示了试件在热作用区侧面温度场的分布规律,它是由试件的有限厚度边界及试件表面与周围空气的热量交换共同作用的结果;

2) 试验给出了试件动态变形过程,其最终变形是热变形和相变共同作用的结果,进一步完善了薄板激光弯曲的变形机理;

3) 试验为激光非熔凝加工过程的数值模拟提供了验证依据;

4) 研究结果对薄板激光弯曲过程和模具表面激光强化的应用研究具有指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 F. Vollertsen. Mechanisms and models for laser forming. *Proceedings of the LANE'94*, eds. M. Geiger, F. Vollertsen. Meisenback Bamberg, 1994. 345~359
- 2 F. Vollertsen, M. Rodle. Model for the temperature gradient mechanism of laser bending. *Proceedings of the LANE'94*, eds. M. Geiger, F. Vollertsen. Meisenback Bamberg, 1994. 371~378
- 3 S. Holzer, H. Arnet, M. Geiger. Physical and numerical modelling of the bucking mechanism. *Proceedings of the LANE'94*, eds. M. Geiger, F. Vollertsen. Meisenback Bamberg, 1994. 3379~3386
- 4 J. Kraus. Basic processes in laser bending of extrusions using the upsetting mechanism. *Proceedings of the LANE'97*, eds. M. Geiger, F. Vollertsen. Meisenback Bamberg, 1997. 431~438
- 5 N. Alberti, L. Fratini, F. Micari. Numerical simulation of the laser bending process by a coupled thermal mechanical analysis. *Proceedings of the LANE'94*, eds. M. Geiger, F. Vollertsen, Meisenback Bamberg 1994. 327~336
- 6 Y. Namba. Laser Forming in Space. *Int. Conf. on Laser '85*, ed. , C. P. Wang, 1986. 403~407
- 7 Geiger F. , Vollertsen G. Deinzer, Flexible straightening of car body shell by laser forming. SAE paper No. 930279, 1993. 354~361
- 8 王秀凤, 王秀彦, 林道盛. 板料激光弯曲的试验研究. *锻压机械*, 1999, (3): 8~10
- 9 王秀凤. 激光加工工艺参数对板料弯曲角度的影响. *航空工程与维修*, 1999, (4): 41~42
- 10 马天驰, 陈 概. 金属材料激光相变硬化的三维数值模拟. *中国激光*, 1996, (12): 1127~1131
- 11 管一弘 等. 激光淬火热致残余应力的数值模拟. *激光技术*, 1998, (10): 313~317
- 12 M. R. Fernandez *et al.*. Steel AISI 1045: superficial hardening by laser and tribological behavior. *Surface Modification Technologies*. The Institute of Material, London, 1998. 617~622
- 13 I. Felde *et al.*. Microstructure and hardness prediction in laser heat treated steels using computer simulation. *Surface Modification Technologies*. The Institute of Material, London, 1998. 709~714
- 14 管一弘 等. 激光淬火温度场及材料性能的数值模拟. *中国激光*, 1999, (3): 264~268
- 15 Tamas *et al.*. Prediction of as-quenched hardness after rapid austenitization and cooling of surface hardened steels. *Computational Material Science*, 1999, 15: 101~112