

TA2 板料激光热应力弯曲成形 及其力学性能研究

周益军^{1,2}, 张永康¹, 游文明², 尹晨², 张承阳²

(1. 江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 扬州职业大学, 江苏扬州 225509)

[摘要] 用 HVS-1000 显微硬度测试仪、X-350A 型 X 射线应力测定仪, 以 2.5 kW SM2000SM 快轴流 CO₂ 激光器对 0.6 mm 厚的 TA2 板料进行扫描, 按照正交试验理论安排成形工艺参数, 研究了 TA2 板料弯曲成形时主要工艺参数对弯曲角度的影响, 以及试样表面残余应力的分布和试样断面上的显微硬度变化。结果表明: 正交试验中的 4 个工艺参数的作用是不同的, 按其变化对弯曲变形量影响的大小排序, 依次是扫描次数、光斑直径、激光束功率、扫描速度; 成形参数对试样表面的残余应力分布也存在一定的影响; 试样变形区断面上的显微硬度变化呈现出一定的规律。

[关键词] 激光技术; 热应力; 板料弯曲成形; 残余应力; 显微硬度

[中图分类号] TN249 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)10-0040-05

激光热应力成形是日本学者 Y. Namba 于 1985 年首次提出的一种新的金属板料柔性成形工艺方法, 是在不加外力的条件下, 利用激光扫描金属薄板时在热作用区域产生强烈温度梯度而诱发的热应力, 使板料实现塑性变形^[1,2]。经过 20 多年的研究, 国内外学者对激光热应力成形技术取得了很大成绩^[3-6], 但国内板料热应力成形技术还远未成熟, 将其应用于生产实际尚需进行更多的基础研究。根据激光热应力成形过程中的工艺条件和所形成的温度场分布的不同, 从成形机理上可分为温度梯度机理、镦粗机理、翘曲机理和弹性膨胀机理^[3]。在激光热应力过程中, 激光诱导的温度场分布决定了热应力的大小及其分布, 从而决定了板料的变形大小以及板料表面、内部的残余应力分布状况。对于各项同性的板料, 其温度场分布可用如下数学模型描述^[7]:

$$T=f(x, y, z, t, P, V, D, \xi, \psi, \zeta)。$$

由该式可见, 在激光热应力过程中, 温度场是三维且随时间变化的; 其影响因素较多。在板料厚度

方向形成非均匀的温度场, 并诱发板厚方向非均匀的应力场, 应力场的变化引起弯曲变形, 变形后的板料存在残余应力。笔者以 TA2 板料为研究对象, 利用正交试验法安排激光束参数^[8], 对 TA2 板料热应力弯曲成形工艺参数进行全面评估, 研究 TA2 板料弯曲成形时扫描次数、激光束能量、光斑直径、扫描速度对弯曲角度的影响规律, 研究典型试样表面残余应力分布规律和试样变形区断面上显微硬度的变化规律。

1 试验条件和试验方案

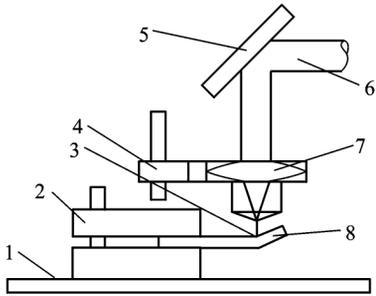
实验采用 TA2 板料, 试件尺寸为 100 mm × 10 mm × 0.6 mm。图 1 为激光热应力成形试验装置示意图。试验用 2.5 kW RS2000SM 快轴流 CO₂ 激光器对 TA2 板料进行扫描, 试样在空气中冷却, 工件平放在工作台上, 水平夹紧试样一端。试验的激光功率为 0.8 ~ 1.5 kW, 扫描光斑直径为 $\phi 2 \sim 5$ mm, 采用正交试验法安排试验参数, 沿扫描路径往复连续扫描; 为了控制两次扫描之间的时间间隔,

[收稿日期] 2006-08-18; 修回日期 2006-12-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50275068), “八六三”高技术研究发展计划资助项目(2002AA421120, 2002AA336030)

[作者简介] 周益军(1966-), 男, 江苏姜堰市人, 江苏大学博士研究生, 扬州职业大学副教授

采用数控程序控制激光束往复连续扫描。



1—数控工作台;2—夹具;3—散焦激光束;4—调焦装置;

5—反射镜;6—激光束;7—凸透镜;8—TA2 板材

图1 RS2000SM 快轴流 CO₂ 激光器热应力成形示意图

Fig. 1 The laser-forming device of 2.5 kW RS2000SM CO₂ laser

试验中,首先确定正交试验的因素水平。研究表明,在外界环境不变时,根据单因素试验的结论,影响钢板激光热应力成形的4个主要因素是激光束功率、光斑直径、扫描次数、扫描速度^[3]。选取的因素水平如表1所示。其次,选择适当的正交试验因素水平表,采用标准的L9(3⁴)选优方案^[8],试验方案如表2所示。为了提高试验数据的可靠性,每组试验均重复3次,以TA2板的弯曲变形量作为考核指标。

表1 正交试验影响因素及其水平位级表

Table 1 Table of orthotropic experimental factor level

水平(j)	影响因素(K)			
	A	B	C	D
	激光束功率 /W	光斑直径 /mm	扫描次数	扫描速度 /mm·min ⁻¹
1	200	0.4	5	2 400
2	400	0.6	10	3 600
3	600	0.8	15	4 800

表2 正交试验计划及结果分析

Table 2 Orthotropic experimental plan and results analysis

试样号	试验计划				试验结果	
	A	B	C	D	弯曲角度(T_i)/(°)	综合评分/%
	激光束功率(P)/W	光斑直径/mm	扫描次数	扫描速度(v)/mm·min ⁻¹		
1	200	0.4	15	3 600	10.00	50.0
2	400	0.4	5	2 400	0.82	4.1
3	600	0.4	10	4 800	8.20	41.0
4	200	0.6	10	2 400	12.40	62.0
5	400	0.6	15	4 800	18.70	93.5
6	600	0.6	5	3 600	2.82	14.1
7	200	0.8	5	4 800	2.30	11.5
8	400	0.8	10	3 600	7.80	39.0
9	600	0.8	15	2 400	1.30	6.5
I	123.5	95.1	29.7	72.6	I + II + III = 321.7	
II	136.6	169.6	142.0	103.1		
III	61.6	57.0	150.0	146.0		
ΔR	75	112.6	120.3	73.4		

2 实验数据处理

2.1 综合评分

所谓综合评分,就是对多指标一一测试之后,按照具体情况确定评分标准进行综合评分。在正交试验中,以激光热应力成形试样的弯曲角度作为综合

评分指标,计算公式为

$$K_i = (T_i/20) \times 100,$$

其中 K_i 为第 i 个试样的综合评分, i 为试样号, T_i 为第 i 个试样的弯曲角度。

2.2 极差分析

极差分析是利用数理统计方法计算出正交表中

每列的极差的 R 值,以判断影响因素的主次关系,寻找较优的水平组合。其计算结果见表 2,计算公式为

$$R_{jk} = K_{i \max} - K_{i \min},$$

式中 $j=1,2,3$ 为正交试验因素的水平, $k=A,B,C,D$ 为正交试验的影响因素。

表 2 中 ΔR 为第 K 列 I, II, III 中的最大值减去最小值。

2.3 因素与指标关系图及结果讨论

1) 从直观分析看,9 个试样中,5 号试样最好,其位级(见表 1)配合是 $A_2B_2C_3D_3$;4 号试样位居第二,其位级配合是 $A_1B_2C_2D_1$;……2 号试样居末位,其位级配合是 $A_2B_1C_1D_1$ 。

2) 4 个因素的主次顺序是 $C \geq B > A \geq D$ 。其中 A, D 的作用相差不大。

3) 由图 2 可知,只考虑变形量,极差计算分析的好条件是 $A_2B_2C_3D_3$,与试验数据相吻合。

4) 从表 2 和图 2 可知,激光束功率对弯曲角度的影响是非线性的,而且有一个最佳值;扫描速度对弯曲角度的影响是近似线性的。扫描次数和光斑直径对弯曲变形的影响较大,光斑直径对弯曲变形的影响是非线性的,扫描次数对弯曲变形的影响是线性的;为了使产生的弯曲变形足够大,在板材激光热应力成形时,可先选定最佳的线能量(P/v 值),再根据板料的厚度优选一个最佳的光斑直径,并尽可能地增加扫描次数。

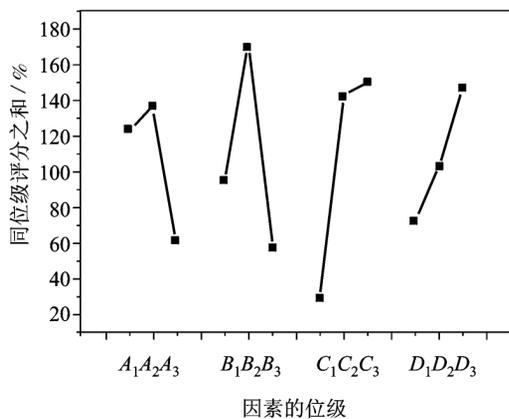


图 2 弯曲角度与四因素的关系

Fig. 2 Relationships between bending angle and four factors

3 典型试样力学性能测定与分析

测量残余应力时,用 X-350A 型 X 射线应力测

定仪,在试样的正反表面分别取一些特征点进行测量。为了能反映变形区的残余应力分布情况,按一定规律在变形区附近取点。

X 射线的波长 λ 、衍射晶面间距 d 和衍射角 2θ 之间遵从布拉格定律:

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

在已知 X 射线波长 λ 的条件下,布拉格定律把宏观上可以测量的衍射角 2θ 与微观的晶面间距 d 建立起确定的关系。当材料中有应力 σ 存在时,其晶面间距 d 必然随晶面与应力相对取向的不同而有所变化;按照布拉格定律,衍射角 2θ 也会相应改变,因此有可能通过测量衍射角 2θ 随晶面取向不同而发生的变化来求得应力 σ 。

实验中,试样成形表面的残余应力测试采用固定 ψ 法,辐射为钴钯 ($CoK\alpha$),交相关法定峰, ψ 角为 $0 \sim 45^\circ$, 2θ 角为 $154 \sim 160^\circ$ (如图 3 所示),准直管直径为 $\phi 2$ mm, X 光管高压为 22 kV, X 光管电流为 6.0 mA。

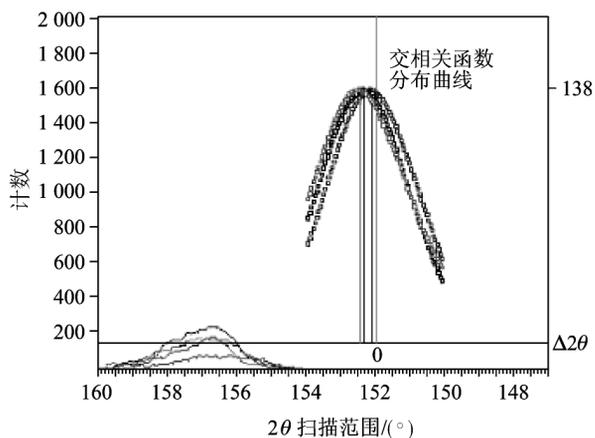


图 3 X 射线衍射残余应力测试的交相关函数分布曲线

Fig. 3 Function distribution curve of correlation with X ray stress analyzer

通过试验,X 射线衍射残余应力测试仪可生成每个测量点的测试结果。由于影响残余应力产生的因素较多,仪器测量的误差较大,只能定性分析试样的表面残余应力分布情况。试样在成形前表面为残余拉应力,应力值在 200 MPa 左右;成形后在变形区的残余应力分布将产生变化,2 号试样表面残余应力分布如图 4 所示。

试验结果表明:对于典型的 2 号试样,在试样表面远离变形区的残余应力基本不产生变化。在变形区内,在试样正面的光斑辐照边缘的残余应力值与

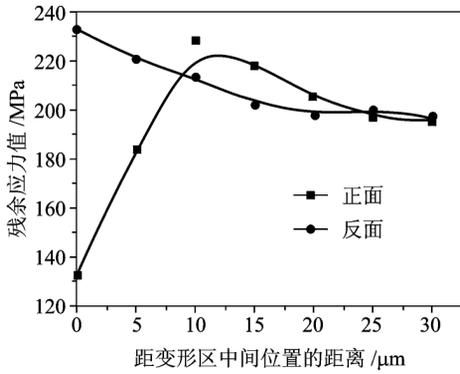


图4 2号试样表面残余应力分布

Fig. 4 Distribution of residual stress on the surface of No. 2 test sample

原始状态的残余应力值相比将略有上升,在变形区中间位置的残余应力值将减小 70 MPa 左右;而在试样反面变形区的中心位置残余应力值与初始残余应力值相比将上升 30 MPa 左右。随着距中间位置距离的增大,残余应力值将逐渐减小,直至与原始应力值相当。

TA2 板料热应力成形后,其变形区的硬度产生明显的变化。为了便于测量试样变形区端面方向的显微硬度,测量前将试样进行镶嵌,端面打磨;测量时使用 HVS - 1000 显微硬度测试仪。测量结果如图 5 所示,在变形区中间位置,试样上表面的显微硬度最高,2 号试样的显微硬度达到 1430 HV;随着测量点到上表面距离的增加,显微硬度值逐渐降低;在热影响区外的显微硬度值基本与原始显微硬度值相同。

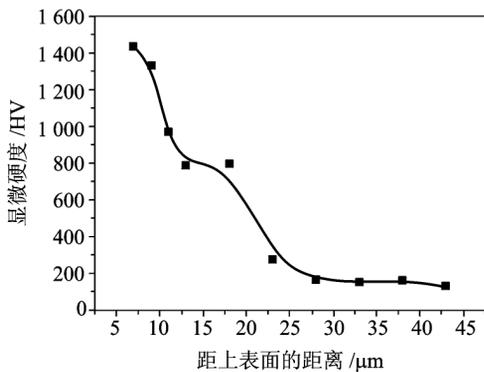


图5 2号试样变形区断面上显微硬度的变化规律

Fig. 5 Regularity of micro-hardness variation on cross section of No. 2 test sample

考虑到试样上表面直接受激光束辐射,温度会

上升得很高,使试样内部产生足够大的温度梯度,这样才能使激光热应力成形有效地开展,并且激光束能量在光斑内符合准高斯分布。因此,在试样上表面成形区内不同点的温度都较高,但各自的温度不同。成形区中间位置的温度最高,在该区域,试样的组织要产生相变,其残余应力的变化原因比较复杂。在温度梯度机理的作用下弯曲时,试样上表面被压缩,材料产生塑性变形,因而产生部分残余压应力。由于材料本身有初始拉应力,与相变产生的应力及因塑性变形产生的部分残余压应力相互作用,初始拉应力占主导位置,最终成形后表面仍为拉应力,拉应力值有所下降。

试样下表面始终与工作台接触,冷却条件相对于上表面要好,在板料进行激光热应力成形时,试样下表面的温度不会上升太高。考虑到板料在温度梯度机理的作用下弯曲时,试样下表面被拉伸,产生塑性变形,因而产生残余拉应力。由于塑性变形也产生残余拉应力,最终使试样反面变形区的中心位置残余应力值与初始残余应力值相比略有上升。

从显微硬度测定结果看,在变形区中间位置,试样上表面的显微硬度最高。这是由于在该处激光热应力成形时,直接受激光束的辐射,温度最高,试样的组织肯定会产生相变;而与该处对应的下表面,尽管温度也会升高,但不足以产生组织转变,故下表面在成形后,硬度基本不变。

4 结论

1) 用正交试验法对 TA2 板料热应力弯曲成形的工艺参数进行综合评估,克服了单因素方法的片面性;形成了对工艺参数之间耦合作用的新认识;得出了激光束成形的关键因素,为认识各参数之间的相互联系,建立多参数对激光热应力成形影响的数学模型提供了参考。

2) 激光热应力成形工艺参数之间存在交互作用,各个参数对成形的影响不同;对于指定板材,存在最佳的工艺参数组合。

3) 板料激光热应力成形后,其表面的残余应力分布在变形区及附近的上下表面将产生不同的变化。

4) 板料激光热应力成形后,成形区断面的显微硬度按一定规律变化;在变形区域热影响区内的显微硬度值明显增大。

参考文献

- [1] Namba Y. Laser forming in space [A]. Int Conf On Lasers' 85 [C]. Japan:Osaka Univ,1986. 403 ~ 407
- [2] Vollertsen F. An analytical model for laser bending [J]. Lasers in Engineering,1994,(2): 261 ~ 276
- [3] 张永康,周建忠,叶云霞. 激光加工技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004. 235 ~ 238
- [4] Chen D J, Xiang Y B, Wu S C, et al. Application of fuzzy-neural network to laser bending process of sheet metal [J]. Mater Sci Technol, 2002, 18 (6): 677 ~ 680
- [5] Chan K C, Harada Y, Liang J, et al. Deformation behaviour of chromium sheets in mechanical and laser bending [J]. Mater Process Technol, 2002, 122 (2,3): 272 ~ 277
- [6] 李纬民. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. 中国激光, 1998,25 (9): 860 ~ 864
- [7] Cheng J G, Yao Y L. Process synthesis of laser forming by genetic algorithm [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004,44:1619 ~ 1628
- [8] 廖永平,严擎宇. 正交试验法在机械工业中的应用[M]. 北京:中国农业机械出版社,1982. 49 ~ 91

Study on TA2 Sheet Metal Bending With Thermal Stress Induced by Laser and Its Mechanical Properties

Zhou Yijun^{1,2}, Zhang Yongkang¹, You Wenming²,
Yin Chen², Zhang Chengyang²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou, Jiangsu 225509, China)

[Abstract] A 2.5 kW CO₂ laser, a HVS - 1000 Micro-hardness measuring instrument and an X - 350A X - ray stress measuring instrument were adopted in the experiment where 0.6mm - thick sheet steel of TA2 was studied to evaluate the process parameters of bending with thermal stress induced by laser. Bending angle was measured as the function of main processing parameters. These processing parameters were arranged according to the theory of orthotropic experiment. Distribution of residual stress on the surface and variation of micro-hardness on the cross section of samples were studied after forming. The results show that these parameters bring different effects. The number of passes ranks first, followed by laser spot in terms of their effect on the bending angle, with power of laser beam and scan speed being the last two factors. Parameters of laser forming also have some influence on the distribution of residual stress on the surface of samples. Certain regularity appears in the variation of micro-hardness on the cross section of samples.

[Key words] laser technology; thermal stress; sheet metal bending; residual stress; micro-hardness