

文章编号: 0258-7025(2003)08-0750-05

薄板模具钢脉冲 Nd:YAG 激光熔凝试样 变形量的测量

黄开金^{1,2}, 谢长生¹, 许德胜²

(华中科技大学¹ 国家模具重点实验室,² 国家激光技术重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 在厚度为 0.3~0.8 mm 的 5Cr4Mo3SiMnVAl(012Al) 模具钢和 Cr12MoV 模具钢薄板上, 采用脉冲 Nd:YAG 激光进行了激光熔凝实验, 研究了工艺参数(脉冲宽度和脉冲频率)、材质和材料厚度对激光熔凝后试样厚度方向上最大变形量的影响。结果表明, 激光熔凝薄板模具钢所引起的变形相当严重, 其最大弯曲变形量与材料厚度为同一个数量级; 随着脉冲频率的减少或脉冲宽度的增加或材料厚度的减少, 试样厚度方向上的最大弯曲变形量增大; Cr12MoV 钢试样厚度方向上的最大弯曲变形量比 012Al 钢的大。激光熔凝工艺参数、材料的热扩散情况和材料的热物性参数的不同是造成上述现象的主要原因。

关键词 激光技术; 变形量; 激光熔凝; 模具钢

中图分类号 TN 249; TG 665 **文献标识码** A

Deformation Measurement of Thin Plate Die Steel During Pulsed Nd:YAG Laser Remelting

HUANG Kai-jin^{1,2}, XIE Chang-sheng¹, XU De-sheng²

(Huazhong University of Science and Technology, ¹The State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Mould Technology, ²The State Key Laboratory of Laser Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Laser remelting of thin plate, made of 5Cr4Mo3SiMnVAl(012Al) die steel and Cr12MoV die steel with thickness of 0.3 mm to 0.8 mm, was carried out by the use of pulsed Nd:YAG laser. The effects of technical parameters such as pulsed width and pulsed frequency, materials and materials thickness on the deformation characteristics of thin plate were studied. The results show that the deformation of thin plate die steel during pulsed Nd:YAG laser remelting is quite serious and the value is the same as the amount of materials thickness, and the maximum deformation value of thin plate in the thickness direction increases with the increase of pulsed width or the decrease of pulsed frequency or the decrease of materials thickness, and the maximum deformation value of thin plate in the thickness direction of Cr12MoV die steel is bigger than that of 012Al die steel. The main reasons are the differences of laser remelting technical parameters, the dissipated heat case of materials and the thermophysical properties of materials.

Key words laser technique; deformation; laser remelting; die steel

1 引言

随着脉冲 Nd:YAG 固体激光器平均功率的提高, 利用其聚焦光斑小(可达 0.1 mm 以下)的特点,

尝试用脉冲 Nd:YAG 固体激光对精细零部件特别是仪器、仪表、电子行业中大量使用的异形、薄长精密微细冲裁薄板类零件的模具进行激光硬化处理, 以期达到提高精细零部件表面硬度均匀性、减小热

收稿日期: 2002-05-15; 收到修改稿日期: 2002-07-01

基金项目: 华中科技大学国家模具重点实验室(编号: 0018)和国家激光技术重点实验室开放基金(编号: 0014)联合资助。

作者简介: 黄开金(1968.10—), 男, 湖北省鄂州市人, 副教授, 博士, 主要从事激光技术应用和纳米材料应用方面的研究工作。E-mail: huangkaijin@163.net

变形和避免表面氧化及脱碳的目的,是十分必要的。目前国内外已经有用脉冲 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 固体激光对工具钢、高速钢、不锈钢等材料进行表面局部熔凝处理的实验报道,但仅局限于厚板 ($t \geq 5 \text{ mm}$) 试样,而对于薄板试样的研究报道较少^[1],特别是对于厚度在 1 mm 以下的薄板脉冲激光熔凝所引起的变形问题,国内外有关这方面的报道较少,大量的研究报道则是关于激光快速成形技术方面的^[2,3]。本文则选用 Cr12MoV 和 012Al 两种冷作模具钢作为研究对象进行薄板脉冲激光熔凝变形问题的研究工作。

2 实验过程及变形量测量方法

首先在 5Cr4Mo3SiMnVA1 (012Al) 和 Cr12MoV 两种冷锻凹模上用线切割方法切取长 \times 宽 = 35 mm \times 24 mm,厚度分别为 0.3 mm, 0.5 mm 和 0.8 mm 的试样,然后将上下大表面用磨床磨光,接着将试样放入 130°C 的油槽中保温 4 h,消除加工应力,最后在清洗掉油污的薄平板表面中线位置上进行直线轨迹脉冲 Nd:YAG 激光熔凝处理。脉冲激光熔凝处理时的工艺参数为:脉冲频率 $f = 1 \text{ Hz}$, 3 Hz 和 5 Hz,聚焦透镜焦距 $F = 100 \text{ mm}$,光斑大小 $d \approx 1.1 \text{ mm}$,光斑重叠度 $k = 0.2$,激光器输出电压 $U = 650 \text{ V}$,脉冲宽度 $\tau = 4 \text{ ms}$ (能量 7 J), 6 ms (能量 10 J) 和 8 ms (能量 13 J),用氮气作保护气体,压力为 0.2 MPa。

由于 CO_2 激光熔凝实验表明^[4],试样的最大弯曲变形量发生在试样厚度方向上,因此,本文只研究试样厚度方向上的变形问题。实验完毕后在 12106 型三坐标测量机(其最小分辨率为 $1 \mu\text{m}$)上测量激光熔凝后试样厚度方向上的变形量。测量时每个试样均测量 37 个点,试样间距平分,测量点及其分布图见图 1 所示(以中心点 1 为参考零点,即 1 点的变形为 0.000 mm),每个试样实际测量范围为 32.7

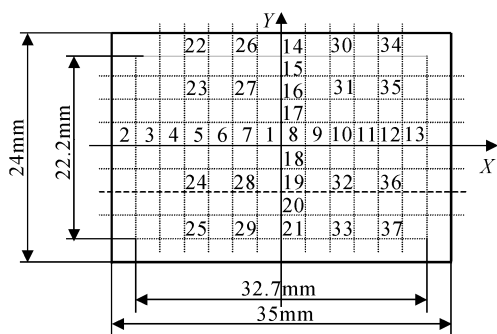


图 1 变形量测量点及其分布图

Fig. 1 Position of deformation measurement

mm \times 22.2 mm。由于试样使用前经过精磨 ($\nabla 6 \sim 7$),因此假定激光熔凝前整个试样的各点变形量均为零。这样一来,所测数值即认为是激光熔凝所引起的变形。

3 测量结果

表 1 是 012Al 和 Cr12MoV 两种模具钢在脉冲频率 $f = 1 \text{ Hz}$,脉冲宽度 $\tau = 8 \text{ ms}$ 和试样厚度 $t = 0.5 \text{ mm}$ 时的变形量测量结果。由表 1 分析可知,激光熔凝薄板时的变形相当严重,其最大弯曲变形量与材料厚度为同一个数量级;Cr12MoV 模具钢的弯曲变形量绝对值比 012Al 模具钢的大,且前者的最大弯曲变形量为 0.207 mm,后者的最大弯曲变形量为 0.138 mm。

3.1 工艺参数对试样厚度方向上最大变形量的影响

图 2(a), (b) 分别是脉冲频率和脉冲宽度对试样厚度方向上最大弯曲变形量的影响。由图可知,

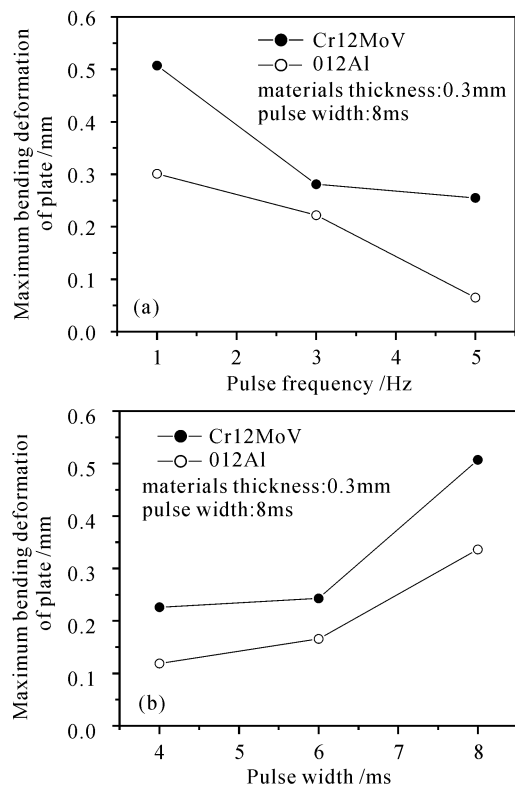


图 2 脉冲激光工艺参数对试样厚度方向上的最大弯曲变形量的影响

(a) 脉冲频率的影响; (b) 脉冲宽度的影响

Fig. 2 Effect of pulsed laser technical parameters on the maximum deformation in specimen thickness direction (a) effect of pulse frequency; (b) effect of pulse width

表 1 012Al 和 Cr12MoV 两种模具钢变形量数值
Table 1 Deformation value of 012Al and Cr12MoV die steel

Number of deformation measurement	X /mm	Y /mm	Z /mm (Cr12MoV)	Z /mm (012Al)
2	-16.155	0.000	-0.007	-0.001
3	-13.463	0.000	-0.007	-0.007
4	-10.77	0.000	-0.005	0.001
5	-8.078	0.000	-0.001	-0.001
6	-5.385	0.000	-0.001	0.001
7	-2.693	0.000	0.001	0.000
1	0.000	0.000	0.000	0.000
8	2.693	0.000	0.001	0.001
9	5.385	0.000	-0.003	0.001
10	8.078	0.000	-0.005	0.000
11	10.77	0.000	-0.008	0.005
12	13.463	0.000	-0.009	0.007
13	16.155	0.000	-0.009	0.008
14	0.000	11.05	0.195	-0.046
15	0.000	8.288	0.149	-0.038
16	0.000	5.525	0.100	-0.026
17	0.000	2.763	0.033	-0.013
18	0.000	-2.763	0.012	0.003
19	0.000	-5.525	0.024	0.018
20	0.000	-8.288	0.025	0.017
21	0.000	-11.05	0.021	0.013
22	-10.77	11.05	0.207	0.138
23	-10.77	5.525	0.102	-0.038
24	-10.77	-5.525	0.022	0.017
25	-10.77	-11.05	0.033	-0.026
26	-5.385	11.05	0.196	-0.055
27	-5.385	5.525	0.099	-0.030
28	-5.385	-5.525	0.024	0.011
29	-5.385	-11.05	0.026	0.014
30	5.385	11.05	0.179	-0.031
31	5.385	5.525	0.090	-0.014
32	5.385	-5.525	0.015	0.004
33	5.385	-11.05	0.016	0.009
34	10.77	11.05	0.177	-0.022
35	10.77	5.525	0.078	-0.005
36	10.77	-5.525	0.006	0.005
37	10.77	-11.05	0.003	0.001

无论何种材质,随着脉冲频率的增加,试样厚度方向上最大弯曲变形量将减少;随着脉冲宽度的增加,试样厚度方向上的最大弯曲变形量将增大。前者是因为在脉冲宽度和激光器输出电压一定的条件下,脉冲频率增加,单脉冲输出能量减小,板材吸收的有效激光能量减少,注入板材的总热量减少,熔凝区尺寸减小,从而使得变形量减小;后者则是因为在脉冲频率和激光器输出电压一定的条件下,脉冲宽度增加,

单脉冲输出能量增加,板材吸收的有效激光能量增加,注入板材的总热量增加,熔凝区尺寸增加,从而使得变形量增大。

3.2 材质对试样厚度方向上最大变形量的影响

图 3 是材质对试样厚度方向上最大弯曲变形量的影响。由图可知,Cr12MoV 钢试样厚度方向上最大弯曲变形量比 012Al 钢的大。这是因为 Cr12MoV 钢的导热系数 $K = 0.197 \text{ W/cm} \cdot ^\circ\text{C}^{[5]}$

比 012Al 钢的导热系数 $K = 0.343 \text{ W/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ ^[6] 小,使得热量不易传走,出现热量聚集现象严重,因此熔凝区尺寸增加,从而使得变形量增大。

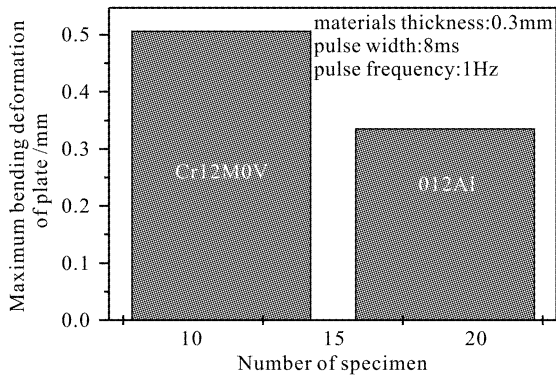


图 3 材质对试样厚度方向上最大弯曲变形量的影响
Fig. 3 Effect of materials on the maximum deformation in specimen thickness direction

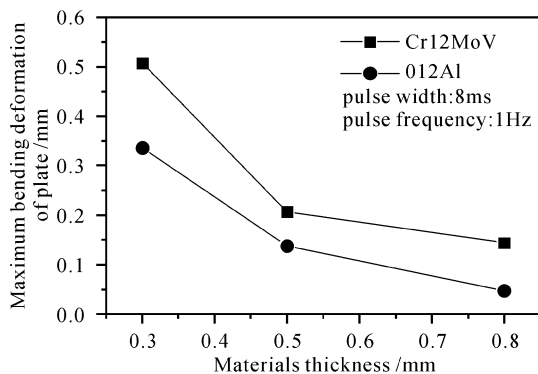


图 4 材料厚度对试样厚度方向上最大弯曲变形量的影响

Fig. 4 Effect of materials thickness on the maximum deformation in specimen thickness direction

3.3 材料厚度对试样厚度方向上最大变形量的影响

图 4 是材料厚度对试样厚度方向上最大弯曲变形量的影响。由图可知,无论何种材质,随着材料厚度的减少,试样厚度方向上最大弯曲变形量增大。这是因为材料厚度减少,材料内部的热传导由三维逐渐过渡到二维,出现热量聚集现象严重,因此熔凝区尺寸增加,从而使得变形量增大。

4 分析与讨论

试样的弯曲变形与其内部的应力状态是密不可分的。一般认为当材料内部的应力超过材料的屈服极限时,材料就发生永久性的塑性变形,其外在表现

形式就是弯曲、翘曲等。对于激光熔凝过程而言,其内应力主要为热应力和相变应力两种,相应的变形就有热应力变形和组织应力变形两种。其中热应力的大小与材料的导热系数 K 及热膨胀系数 α 两个基本因素有关^[5]。一般认为材料的导热系数 K 愈大,材料各部位的温差愈小,产生的热应力愈小;材料的热膨胀系数 α 愈小,材料各部位的热胀缩差愈小,产生的热应力愈小。当材料的热应力超过材料的屈服强度 σ_Y 时就发生热应力变形。而组织应力与相变前后两种组织的比容差及转变时间两个因素有关,且比容差愈大,转变时间的先后差愈大,组织应力愈大。同样,当材料的组织应力超过材料的屈服强度 σ_Y 时就发生组织应力变形。

4.1 激光熔凝过程中应力和变形过程的变化

在激光熔凝加热过程中,激光作用区以远高于其周围区域的速度被急剧加热并局部熔化。激光作用区材料受热而膨胀(因为温度升高,材料的热膨胀系数 α 增大),热膨胀受到周围较冷区域的约束,并造成弹性热应力,受热区温度升高后屈服极限 σ_Y 下降,弹性热应力可部分地超过该屈服极限 σ_Y ,导致激光作用区形成了塑性的热压缩,此时塑性区的热应力一直为 $-\sigma_Y$ (注意 σ_Y 为一变数,且随温度的升高而迅速降低),直至材料发生熔化而降为零为止。这样一来,试样上表面的薄表层因比试样下表面受热膨胀大而使试样发生拱形弯曲变形(图 5(a))。

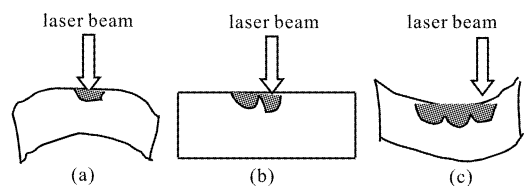


图 5 试样在脉冲激光作用下熔化和冷却过程中的变形示意图

(a) 膨胀效应 > 相变收缩效应 ($\epsilon < 0$); (b) 膨胀效应 = 相变收缩效应 ($\epsilon = 0$); (c) 膨胀效应 < 相变收缩效应 ($\epsilon > 0$)

Fig. 5 Schematic diagram of specimen deformation during the pulsed laser remelting and cooling process

(a) expansion effect > phase transformation contraction effect ($\epsilon < 0$); (b) expansion effect = phase transformation contraction effect ($\epsilon = 0$); (c) expansion effect < phase transformation contraction effect ($\epsilon > 0$)

在激光熔凝冷却过程中,一方面,激光作用区(包括熔化区和未熔化区)收缩(因为温度降低,材料的热膨胀系数 α 减小),比周围区域相对缩小,激光作用区呈现拉应力,而其周围区域则承受压应力。

另一方面,冷却过程中的显微组织转变(包括熔化区和未熔化区)如奥氏体转变为马氏体会引起体积增大(因为在钢的相变组织中,马氏体的相变膨胀系数随着温度的降低而增大^[7]),相变应力增大(因为一方面在钢的相变组织中,奥氏体的比容最小,马氏体的比容最大;另一方面由文献[8]知,随着已经转变为马氏体的体积分数 f 的增大,相变应力的绝对值是增大的)。如果某一区域的相变应力超过收缩热(拉)应力,则该区域变为压缩应力,而其周围区域则承受拉应力。相反,如果某一区域的热应力占优势,则该区域变为仍然呈现拉应力,而其周围区域则仍然承受压应力。

应该指出的是,在激光熔凝冷却过程中,加热期间熔化的表层凝固,加热期间未熔化的固态区一方面也冷却,另一方面发生相变。这样一来,固态区因发生奥氏体—马氏体转变而使固态区的体积增大,而熔化区因凝固而使熔化区的体积减小(当然如果熔化区凝固时也发生部分奥氏体—马氏体转变,那么发生奥氏体—马氏体转变的区域也会出现体积增大的现象,但实际的高合金钢中熔化区凝固时能发生奥氏体—马氏体转变的体积是非常小的。因此,总体来说,熔化区凝固时的体积是减小的。)。因此,一旦熔化区的体积收缩量超过固态区的体积膨胀量,试样改性层中收缩力就占优势,从而使试样发生凹形弯曲变形(图 5(c))。因此试样的最终弯曲变形方向取决于热膨胀效应和相变收缩效应谁占优势。不过,大多数激光熔凝试样的变形方向是向激光辐射面弯曲。

4.2 实验结果的解释

Cr12MoV 钢和 012Al 钢的脉冲激光熔凝实验表明,无论何种材质,随着脉冲频率的减少或脉冲宽度的增加或材料厚度的减少,试样厚度方向上的最大弯曲变形量增大;Cr12MoV 钢试样厚度方向上的最大弯曲变形量比 012Al 钢的大。这是因为,在其他条件不变的情况下,脉冲频率的减少或脉冲宽度的增加或材料厚度的减少,均可起到提高试样激光作用区温度以及试样预热温度的双重作用,因为激光熔凝的轨迹是直线段,并从试样的一端扫描到另一端,而激光加工过程本身就是一个预热过程^[9],因

此当开始注入的热量增加时,即提高起始温度时,必然引起整个激光加工过程预热温度的增加。而温度越高,材料的屈服极限越低,这样使得随后冷却时所产生的相变收缩力效应占优势,导致试样的弯曲变形严重,即最大弯曲变形量增大。

同样,因 Cr12MoV 钢的热传导系数比 012Al 钢的小,热量不易传导到冷基体中区,从而引起热量聚集现象严重,即同样可起到提高试样激光作用区温度以及试样预热温度的双重作用,因此前者试样厚度方向上的最大弯曲变形量比后者的大。

参 考 文 献

- 1 Huang Kaijin. Investigation on pulsed Nd: YAG laser remelting of thin plate die steel [D]. Postdoctoral Research Report of Huazhong University of Science and Technology, 2001. 1~13 (in Chinese)
- 2 Ji Zhong, Wu Shi. Numerical investigation of deformation field during laser forming of sheet metal [J]. *J. Plasticity Engineering* (塑性工程学报), 1998, 5(2):33~40 (in Chinese)
- 3 K. C. Chan, C. L. Yan, W. B. Lee. Laser bending of thin stainless steel sheets [J]. *J. Laser Applications*, 2000, 12(1):34~40
- 4 J. Grum, R. Sturm. Deformation of specimen during laser surface remelting [J]. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2000, 9(2):138~146
- 5 Yao Lunian (Edited). Control of Heat Treatment Deformation of Steel [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. 10~22 (in Chinese)
- 6 Wang Jiemin, Yin Zhixiang (Edited). Some New Die Steel [R]. Shanghai: Editorial Office of Physical and Chemical Test of Shanghai Materials Research Institute, 1983. 55~68 (in Chinese)
- 7 Liu Zhuang, Wu Zhaoji, Wu Jinzhi *et al.*. Numerical Simulation on Heat Treatment [M]. Beijing: Science Press, 1996. 314~330 (in Chinese)
- 8 Guan Yihong, Chen Junruo, Wang Honggang. A study on the process of laser phase transformation hardening and thermal stress [J]. *J. Kunming Institute of Technology* (昆明理工大学学报), 1995, 20(2):70~74 (in Chinese)
- 9 Zeng Dawen. Numerical analysis of fluid flow field, temperature field and concentration field in the laser melting pool [D]. Huazhong University of Science and Technology, 1998. 75~76 (in Chinese)