

文章编号: 1001-3806(2010)04-0506-04

## 超薄铜片激光点焊工艺研究

罗子艺, 杨永强\*, 卢建斌

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

**摘要:** 为了能用波长为  $1.064\mu\text{m}$  的 Nd: YAG 激光器对高反射率的超薄 T2 紫铜进行激光焊接, 通过设计激光脉冲波形中的各个参量, 并在纯氮保护、离焦量为  $+2\text{mm}$ 、焊接速率为  $1.5\text{mm/s}$  的条件下, 应用正交试验方法研究了脉冲峰值电流、脉冲峰值时间、脉冲频率的变化对焊接试件可承受的最大剪切应力的影响。通过实验研究, 得出了脉冲峰值电流、脉冲峰值时间、脉冲频率对最大剪切应力的影响规律; 并观察了焊缝表面及其显微组织。结果表明, 通过设计激光脉冲波形等工艺参量, 采用波长为  $1.064\mu\text{m}$  的 Nd: YAG 激光器可以对高反射率的超薄紫铜进行很好的点焊。

**关键词:** 激光技术; 激光点焊; 正交试验方法; T2 紫铜

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.020

### Study on process of laser spot welding for ultra-thin copper

LUO Zi-yi, YANG Yong-qiang, LU Jian-bin

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to weld ultra-thin T2 copper with high reflectivity by means of Nd: YAG laser at  $1.064\mu\text{m}$ , based on orthogonal test method, effects of pulse peak current, its duration and frequency on maximum shear stress were studied under the conditions of nitrogen protection,  $+2\text{mm}$  defocusing amount and  $1.5\text{mm/s}$  welding speed. The relationships between maximum shear stress and pulse peak current, its duration and frequency were obtained in the experiments; the welding surface and its microstructure were observed. The results show that the ultra-thin copper with high reflectivity can be well spot-welded by means of Nd: YAG laser at  $1.064\mu\text{m}$ , based on design of processing parameters such as the laser pulse shape.

**Key words:** laser technique; laser spot welding; orthogonal test method; copper T2

## 引言

铜具有美丽的紫红颜色, 优良的导电、导热、耐腐蚀性能, 危害人类健康的许多病菌在铜的表面都不能存活<sup>[1]</sup>。随着铜材料需求的增大, 铜资源的紧张局势也越来越严重, 节省重量和减小体积是目前铜应用的发展趋势<sup>[2]</sup>, 因此薄板铜材的应用将会增大。而在使用过程中又不可能全部采用整材, 为了发挥其最佳性能, 很多情况下需要将其各个部位组合连接在一起。受环境和条件的约束, 大多数情况下必须采用焊接来实现<sup>[3]</sup>。但用传统的焊接方法很难对这类薄件进行焊接, 薄壁件的焊接问题成为制约铜器件进一步减小厚度的重要因素之一<sup>[4]</sup>。

激光焊接是一种先进的焊接技术, 其具有快的加热和冷却速度以及窄的热影响区<sup>[5]</sup>; 伴随着电子产品的小型化, Nd: YAG 激光精密焊接加工技术也得到了广泛的应用<sup>[6]</sup>。但用激光束作为热源来焊接铜合金

时, 由于铜合金在室温下对激光的反射率很高, 而且薄板材料在焊接过程中容易烧穿, 因此, 铜合金的激光焊接尚存在一定困难。本实验中采用小功率 Nd: YAG 脉冲激光, 实现了对  $0.1\text{mm}$  超薄紫铜 T2 的点缝焊, 并研究了各工艺参量下试件的力学性能。

## 1 试验条件

### 1.1 实验设备及试验材料

本实验中采用广州瑞通千里激光设备有限公司生产的 LWS-400 型 Nd: YAG 激光焊接机(如图 1 所示),

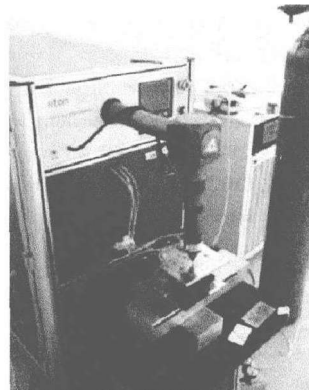


Fig. 1 LWS-400 welding machine

作者简介: 罗子艺(1986-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光先进加工技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: meiyqiang@scut.edu.cn

收稿日期: 2009-07-01; 收到修改稿日期: 2009-08-24

工作台可以在  $x, y$  方向移动, 其各项指标如表 1 所示。采用 T2 紫铜为试验材料, 焊接试件规格为  $50\text{mm} \times$

$30\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ , 试验前用丙酮和酒精清洗表面去除油污。

Table 1 Technology index of LWS-400 laser welding machine

| parameters  | laser                            | average            | single pulse       | pulse                   | pulse              | power       | working                | working              |
|-------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------|------------------------|----------------------|
|             | wavelength $\lambda/\mu\text{m}$ | power $P/\text{W}$ | energy/ $\text{J}$ | frequency $f/\text{Hz}$ | width/ $\text{ms}$ | instability | precision/ $\text{mm}$ | range/ $\text{mm}^2$ |
| index value | 1.064                            | $\geq 400$         | 0 ~ 90             | 1 ~ 100                 | 1 ~ 10             | $\leq 3\%$  | 0.02                   | $200 \times 80$      |

1.2 试验参量

用夹具将铜片搭接固定住, 见图 2。采用纯氮气

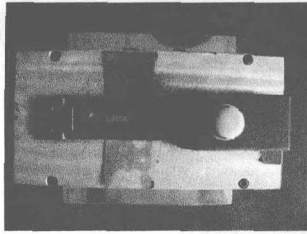


Fig. 2 Welding fixture

同轴保护, 焊接速度固定为  $1.5\text{mm/s}$ , 离焦量为  $+2\text{mm}$ 。由于紫铜具有高的反射率, 因此焊接过程中采用尖峰激光脉冲, 设计快速上升、缓慢下降的激光脉冲波形见图 3。当波形为快速上升的激光束照射到材料表面时,

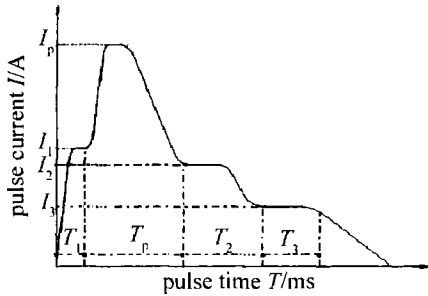


Fig. 3 Peak laser pulses oscillogram

输入能量的速度很快, 输入到材料得能量还来不及散失, 就会使其表面的温度迅速上升<sup>[7]</sup>, 温度升高后的材料对激光能量的吸收率大大提高, 有利于焊接。

2 正交试验

本实验中选择脉冲峰值电流  $I_p$ 、脉冲峰值时间  $T_p$ 、脉冲频率  $f$  3 个因素, 选用三因素五水平正交表, 共需 25 次试验, 水平安排如表 2 所示。脉冲波形中,  $I_1 =$

Table 2 Each factor level

| level                                   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| pulse peak current $I_p/\text{A}$       | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 |
| pulse peak current time $T_p/\text{ms}$ | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 |
| pulse frequency $f/\text{Hz}$           | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |

$135\text{A}$ ,  $I_2 = 110\text{A}$ ,  $I_3 = 60\text{A}$ ,  $T_1 = 0.2\text{ms}$ ,  $T_2 = 0.6\text{ms}$ ,  $T_3 = 0.5\text{ms}$ 。实验完成后, 采用光学显微镜观察各个试件的焊接情况, 并在 RGL-20A 规格为  $20\text{kN}$  的电子万能试验机上进行拉伸试验, 测各个试件所能承受的最大剪切应力  $F$ 。图 4 为焊接后的试件, 焊缝及热影响区很小。

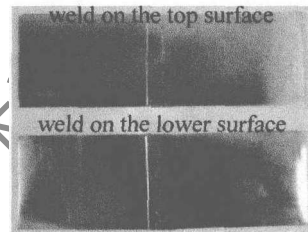


Fig. 4 Welded specimen

3 试验结果与分析

3.1 焊接结果

实验完成后, 采用光学显微镜观察各个试件的焊接情况, 并测各个试件所能承受的最大剪切应力。测试中采用 RGL-20A 规格为  $20\text{kN}$  的电子万能试验机; 测试时, 拉力机的一端固定, 另一端以  $2\text{mm/min}$  的速率向上拉伸, 其试验结果如表 3 所示。

根据实验结果计算极差, I, II, III, IV, V 分别表示因素所在的水平 1, 2, 3, 4, 5 所对应的指标平均值, 直观分析见表 4。根据极差  $R$  的大小, 可得到影响  $F$  大小的各因素主次顺序为:  $I_p > f > T_p$ 。

Table 3 Experiment results

| test number | $I_p/\text{A}$ | $T_p/\text{ms}$ | $f/\text{Hz}$ | $F/\text{N}$ | test number | $I_p/\text{A}$ | $T_p/\text{ms}$ | $f/\text{Hz}$ | $F/\text{N}$ |
|-------------|----------------|-----------------|---------------|--------------|-------------|----------------|-----------------|---------------|--------------|
| 1           | 180            | 0.6             | 3             | 188.57       | 14          | 200            | 1.2             | 3             | 442.39       |
| 2           | 180            | 0.8             | 4             | 137.60       | 15          | 200            | 1.4             | 4             | 549.44       |
| 3           | 180            | 1.0             | 5             | 167.89       | 16          | 210            | 0.6             | 6             | 432.45       |
| 4           | 180            | 1.2             | 6             | 138.97       | 17          | 210            | 0.8             | 7             | 440.12       |
| 5           | 180            | 1.4             | 7             | 32.97        | 18          | 210            | 1.0             | 3             | 489.81       |
| 6           | 190            | 0.6             | 4             | 417.12       | 19          | 210            | 1.2             | 4             | 530.13       |
| 7           | 190            | 0.8             | 5             | 508.84       | 20          | 210            | 1.4             | 5             | 451.19       |
| 8           | 190            | 1.0             | 6             | 97.31        | 21          | 220            | 0.6             | 7             | 478.45       |
| 9           | 190            | 1.2             | 7             | 273.83       | 22          | 220            | 0.8             | 3             | 421.66       |
| 10          | 190            | 1.4             | 3             | 521.96       | 23          | 220            | 1.0             | 4             | 472.49       |
| 11          | 200            | 0.6             | 5             | 475.90       | 24          | 220            | 1.2             | 5             | 480.73       |
| 12          | 200            | 0.8             | 6             | 430.18       | 25          | 220            | 1.4             | 6             | 389.58       |
| 13          | 200            | 1.0             | 7             | 313.60       |             |                |                 |               |              |

Table 4 Table of visual analysis results

| factor  | $I_p$   | $T_p$   | $f$     |
|---------|---------|---------|---------|
| I       | 133.200 | 398.498 | 412.878 |
| II      | 363.812 | 387.680 | 421.356 |
| III     | 442.302 | 308.220 | 416.910 |
| IV      | 468.740 | 373.210 | 297.698 |
| V       | 448.582 | 389.028 | 307.794 |
| range R | 335.540 | 90.278  | 123.658 |

### 3.2 影响焊接结果因素分析

在激光加工中,激光输出功率与电流电压有如下关系<sup>[8]</sup>:

$$P \propto UI\eta \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为光电转换效率,在本实验中电压 $U = 380V$ , $\eta \approx 3\%$ , $I$ 为注入激励腔的电流,随着 $I_p$ 的增大而增大,继而可以改变激光输出功率。

脉冲激光在焊接过程中输出功率 $P$ 即为平均输出功率 $P_{ave}$ <sup>[9]</sup>,即 $P_{ave} = P$ 。激光器功率波动很小,趋于不变,单位脉冲能量 $E_p$ 与激光平均功率 $P_{ave}$ 及脉冲频率 $f$ 有如下关系<sup>[10]</sup>:

$$E_p = P_{ave}/f \quad (2)$$

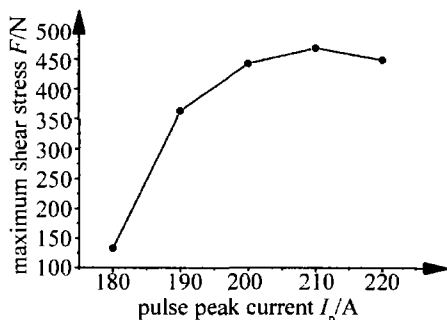
单位峰值功率 $P_p$ 是单位脉冲能量 $E_p$ 与脉冲宽度 $T$ 之比:

$$P_p = E_p/T \quad (3)$$

在本实验中通过改变脉冲峰值时间来改变脉冲宽度。

由以上描述可知,通过改变脉冲峰值电流、脉冲峰值时间、脉冲频率,可以得到不同的单位脉冲能量和单位峰值功率。

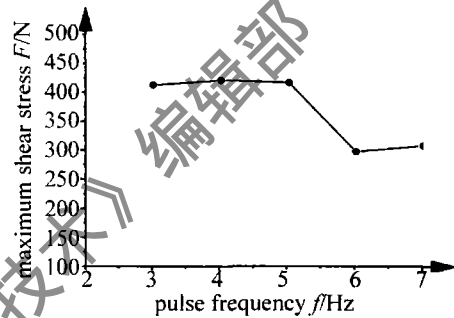
3.2.1 脉冲峰值电流的影响 当其它工艺参量保持不变时,根据(1)式以及 $I$ 和 $I_p$ 的关系,随着脉冲峰值电流的增大,激光功率逐渐增大。比较脉冲峰值电流5个水平的实验结果,随着 $I_p$ 的增大,试件可承受的最大剪切应力 $F$ 逐渐增大,当 $I_p$ 增大到一定程度时, $F$ 又减小,如图5所示。

Fig. 5 Effect curves of  $I_p$ 

将试件拉开后,在 $I_p$ 第1个水平180A时,可以看出5块试件上下表面之间熔合很少或没有熔合,说明此时激光能量不足,只有热积累的作用使得有若干焊点上下表面熔合;在 $I_p$ 第2个~第4个水平时,两

铜片之间的熔合度逐渐变好,这是由于当激光功率增大时,蒸发产生的蒸气压力增大,容易克服熔化金属的表面张力以及液体金属静压力<sup>[11]</sup>而形成小孔,小孔有助于对光束能量的吸收,增大熔深,增强熔合。但当激光功率过大时,很容易将试件氧化,甚至击穿试件,在实验中当脉冲峰值电流 $I_p = 220A$ 时,有几组试件下表面氧化严重,使得 $F$ 减小。因此, $I_p$ 较好的取值为210A。

3.2.2 脉冲频率的影响 本实验中,脉冲频率在3Hz,4Hz,5Hz时, $F$ 的值较为接近;在6Hz时, $F$ 下降较大,在7Hz时, $F$ 又有所回升,如图6所示。

Fig. 6 Effect curves of  $f$ 

在激光平均功率一定时,根据(2)式,脉冲频率的大小改变着脉冲能量的大小。随着脉冲频率的减小,单位脉冲能量逐渐增大,两片铜片之间的熔合度变大,然而脉冲能量太大,在热积累的作用下,容易将一些焊点击穿,在第18组和第22组试件中,出现了穿孔现象。而随着脉冲频率的增大,脉冲能量逐渐降低,热输入降低,铜片之间的熔合逐渐变差, $F$ 也随着降低;在7Hz有所回升的现象,分析认为,此时频率较高,热积累作用较强,对熔合起了一定的作用,但影响不大。由此可知,激光能量即脉冲电流与脉冲频率之间的相互配合很重要,当脉冲电流较大且能够保证铜片之间的熔合时,脉冲频率的选择就可以调节多余的热输入;当脉冲频率一定的时候,也可以调节脉冲电流的大小来调节热输入的大小。本实验中,取频率 $f = 4Hz$ 时,剪切应力 $F$ 最大。

3.2.3 脉冲峰值时间的影响 在脉冲能量一定时,根据(3)式,通过改变脉冲峰值时间可以调节脉冲宽度,继而可以调节单位峰值功率。本实验中所用紫铜具有高的反射率,常温下铜对YAG激光的反射率为95%,当材料处于熔融状态的情况下,铜对YAG激光的反射率为19%<sup>[12]</sup>,因此,在脉冲的时间内若无法将铜表面熔化,则大部分激光都被反射掉,无法作用于铜表面,若峰值功率达到可以将铜表面瞬间熔化,则激光的吸收率可以大大提高,有利于焊接的进行。

本实验中,  $F$  随  $T_p$  的变化趋势可分为两个阶段, 在第1阶段  $T_p = 0.6\text{ms} \sim 1.0\text{ms}$  之间,  $F$  随  $T_p$  的增大逐渐减小, 在第2阶段  $T_p = 1.0\text{ms} \sim 1.4\text{ms}$  之间,  $F$  随  $T_p$  的增大而增大, 如图7所示。分析认为在第1阶段

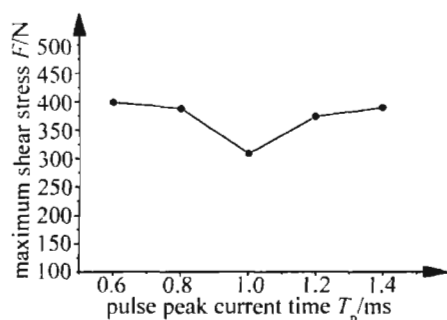


Fig. 7 Effect curves of  $T_p$

时, 脉宽较窄, 单位峰值功率较大, 输入的能量较为集中, 紫铜表面升温速度较快, 形成的焊点熔深也就越大; 同时, 由于紫铜导热能力很强, 能量越集中, 因热传导引起的能量耗散越少, 能量利用率提高, 也有利于熔深的增加。在第2阶段, 脉宽较大, 对应的峰值功率减小, 但此时若峰值功率达到可以将铜表面瞬间熔化, 则两片铜片的熔合时间增大, 使得铜片的熔合度较好, 但是较低的峰值功率密度会导致多余的热量输入, 而且容易将下表面氧化。为使  $F$  取得较为理想的值, 应尽量避开  $T_p = 1.0\text{ms}$ 。

#### 4 焊缝表面及金相检验

选择第19组试件进行研究。在显微镜下观察焊接试件焊缝表面形状, 图8为焊缝的表面, 如图所示,

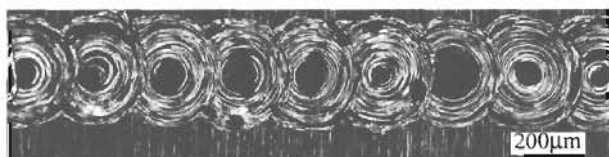


Fig. 8 Weld surface 150 $\times$

焊点大小均匀, 焊缝表面光滑美观。将试件沿垂直于焊缝的方向切开, 用镶嵌机做成标准试样, 抛光后用  $\text{FeCl}_3 + \text{HCl}$  的酒精溶液进行腐蚀并在金相显微镜进行观察, 如图9、图10所示, 从图中可以看出, 焊缝区的晶粒明显比母材有明显的长大, 为柱状晶。

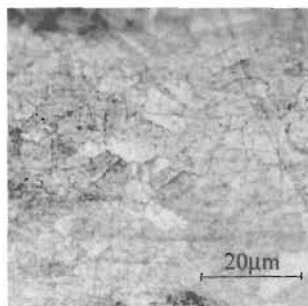


Fig. 9 Metallographic structure of base metal 1000 $\times$

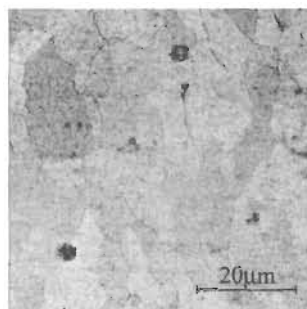


Fig. 10 Metallographic structure of weld 1000 $\times$

#### 5 结论

(1) 所设计的激光脉冲波形可较好地焊接薄板紫铜, 并得出影响焊接试件最大剪切应力的大小的各因素主次顺序为: 脉冲峰值电流  $I_p >$  脉冲频率  $f >$  脉冲峰值时间  $T_p$ 。

(2) 随着脉冲峰值电流的增大, 剪切应力呈先增大后减小的趋势, 在  $I_p = 220\text{A}$  时取得最大值; 脉冲频率与脉冲电流相互作用影响剪切应力的大小, 同时对焊缝穿孔现象也有一定的影响, 在  $f = 4\text{Hz}$  时  $F$  取得最大值; 脉冲峰值时间对剪切应力的大小存在一个谷值, 在焊接过程中, 应尽量避免。

(3) 焊缝表面光滑美观, 焊缝区晶粒较母材有明显长大, 为柱状晶。

#### 参考文献

- [1] WANG B W, WANG T, WANG Zh T. Copper alloy and its processing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:1-2(in Chinese).
- [2] YANG Zh J, GAO H, HAO Q B. Modeling and simulation of laser welding for ultra-thin copper sheet[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(19):5254-5257(in Chinese).
- [3] HAO Q B. Study on the welding of thin copper plate with YAG laser[D]. Changchun: Jilin University, 2007:2-3(in Chinese).
- [4] GUO Zh D. Cupro braze radiator rise again[J]. Cars and Parts, 2002(14):34(in Chinese).
- [5] ZHAO L, CHEN W Zh, ZHANG X D. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of NULCB steel[J]. Laser Technology, 2006, 30(4):344-347(in Chinese).
- [6] NIU Z Q, PENG W D, NIU H B. Design of YAG laser welders controlled with pulse wave shaping and laser power feedback[J]. Laser Technology, 2008, 32(4):406-409(in Chinese).
- [7] ZHANG J, SHAN J G, LEI X, et al. Effects of pulsing parameters on weld shape parameters during pulsed Nd: YAG laser welding of aluminum alloys[J]. Welding Institution, 2008, 29(3):21-24(in Chinese).
- [8] GUANG Zh Zh. Laser processing process manual[M]. Beijing: China Metrology Press, 2007:55-57(in Chinese).
- [9] JIN G Y. Laser processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2005:12-13(in Chinese).
- [10] CHEN Y B. Modern laser welding technology[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2005:71-72(in Chinese).
- [11] WANG J L, ZHOU Ch L, TAN Zh Y. Analysis of the impulse laser welding technology in vacuum environment[J]. Applied Science and Technology, 2004, 31(5):4-6(in Chinese).
- [12] CHEN J M, XU X Y, XIAO R Sh. Laser modern manufacturing technology[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2007:85-86(in Chinese).