

# 激光焊缝质量控制的试验设计研究

熊腊森 胡伦骥 胡席远 徐钦松

(华中理工大学材料科学与工程系, 武汉, 430074)

**摘要:** 本文采用试验设计方法研究了在一定激光束条件下, 激光工艺参数对激光焊缝形状尺寸、背面温度等质量参数的定量影响, 并建立了相关的数学模型。研究结果对于控制激光焊缝质量, 优化焊接工艺条件具有指导意义。

**关键词:** 激光焊缝 质量控制 试验设计

## Experimental design for weld bead quality control in laser beam welding

Xiong Lasen, Hu Lunji, Hu Xiyuan Xiu Qingsong

(Department of Material Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Experimental design and compatible analysis technique are used to investigate effects of laser beam process parameters on the weld bead geometry and back temperature in laser beam welding under certain laser beam conditions. The established mathematical model and the study results can be used to control laser weld quality, optimize the process parameters.

**Key words:** laser welding bead quality control experimental design

### 一、引言

激光焊接工艺参数对焊缝形状的影响, 国内外已有不少研究报告。文献[1]研究了激光焊接 18CrMnTi 合金钢时, 激光功率对熔深的影响。指出最大熔深与激光功率的 0.7 次方成正比。文献[2]研究了激光功率、焦距等对焊缝熔深的影响趋势。此外, 还有文献研究了激光功率、透镜焦距以及辅助气体等工艺条件对焊缝形状的影响<sup>[3]</sup>。上述研究在一定条件下, 对于探索工艺参数与焊缝成型之间的关系, 寻求获得满意焊缝形状的工艺条件都具有一定的指导意义。但是应该看到, 上述研究一般需要较多试验次数与试验投资, 且多为定性结论。更主要的是, 研究中总是固定诸多因素, 仅仅变化某一工艺参数, 即所谓一次一个工艺参数<sup>[4]</sup>的传统

### 参 考 文 献

- 1 北京医学院口腔医学系编. 口腔病防治学. 北京: 人民卫生出版社, 1974: 139
- 2 四川医学院编. 口腔内科学. 北京: 人民卫生出版社, 1980: 297
- 3 许松林, 马宝章主编. 激光技术与医学应用, 第一版. 北京: 人民卫生出版社, 1982: 312
- 4 徐国祥主编. 应用激光医学, 第一版. 广州: 广东高等教育出版社, 1990: 58
- 5 杨淑邮, 康家琼, 刁友芳 *et al.* 华西口腔医学杂志, 1984; 2(2): 83
- 6 樊明文, 刘寿桃, 何祥旺 *et al.* 中华口腔科杂志, 1983; 18(3): 157

作者简介: 林正德, 男, 1949 年 1 月出生。医师。从事口腔科激光医疗工作。

研究方法。这些研究往往不能反映该工艺参数的实际影响,更不能反映各工艺参数之间的交叉作用,有时还会导致错误的结论。

本文采用因子设计方法<sup>[5]</sup>,研究主要激光工艺参数对焊缝形状尺寸及背面温度的定量影响,寻找获得满意焊缝质量的优化工艺参数。因子设计是一种研究多个工艺参数与试验结果相互关系的试验研究方法,它用较少的试验次数获得较多的试验信息,既能反映出各个工艺参数对试验结果单个的定量影响,也能反映出多个工艺参数对试验结果的共同影响;并且还能通过相关的分析方法,在试验参数与试验结果之间建立数学模型,实现计算机辅助优化设计<sup>[6,7]</sup>。

## 二、研究目标及试验条件

某工程拟采用激光焊接合金钢容器,要求焊缝熔深可控,焊件背面温度必须低于 500 ℃且愈低愈好。委托方提供的试件分别为 100mm × 36mm × 1.5mm, 100mm × 36mm × 2.5mm, 100mm × 36mm × 3.0mm 及 100mm × 36mm × 4.0mm 四种,材料为 1Cr18Ni9Ti。接头为平板对接及带止口对接二种形式。要求熔深控制为 1.0mm, 1.5mm, 2.5mm 以及 3.0mm。

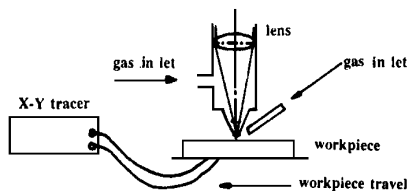


Fig. 1 The experimental setup

本研究采用华中理工大学激光所研制的激光器,光束为非稳腔环形基模。经预试验确定激光功率范围为 1.5~2.0kW,工作台移动速度范围为 1~2m/min,离焦量  $\Delta f$  为 0~-1mm。试验中对轴向及侧吹辅助气流进行了优化,并确定在本研究条件下,轴向辅助气流量为 20L/min,侧吹辅助气流量为 5L/min。为测取焊缝背面温度,在试件背面中心处焊有 0.15mm 的 NiCr-NiAl 热电偶,配用 X-Y 函数记录仪记录温度毫伏数变化曲线。本研究试验装置如图 1 所示。

## 三、试验设计及分析

由预试验发现,激光功率  $P$ ,焊接扫描速度  $v$  以及离焦量  $\Delta f$  是影响焊缝熔深及焊件背面温度的主要工艺参数,因此,本研究选取上述三个工艺参数,安排二水平因子设计,即  $2^3$  因子设计。

Table 1 Variables and their levels

variables	symbols	unit	levels		
			low(-1)	high(+1)	zero(0)
laser power	$P$	kW	1.6	2.0	1.8
welding speed	$v$	m/min	1.5	1.1	1.3
defocused length	$\Delta f$	mm	0	-1	-0.5

所谓二水平因子设计,是指在试验中每个工艺参数各取二个试验值,通常为上限及下限值。若令上限值为高水平(+1),则下限值为低水平(-1),反之亦然,

零水平为中间值。试验参数及水平如表 1 所示。表 2 为  $2^3$  因子设计及测取的焊缝熔深及背面最高温度值。

由表 2 列出的试验设计矩阵以及焊缝熔深、焊件背面最高温度数据,即可计算出激光功率  $P$ 、焊接速度  $v$  以及离焦量  $\Delta f$  分别对熔深  $H$ 、背面最高温度  $T$  的定量影响(称为主效应)和  $P, v, \Delta f$  两两或三个共同对  $H, T$  的定量影响(称为交叉效应)。通过方差分析可以确定哪些效应是显著的,哪些效应是不显著的。然后经过最小二乘法拟合,即可在激光工艺参数与试验结果之间建立统计数学模型。经计算分析,激光功率  $P$ 、焊接速度  $v$ 、离焦量  $\Delta f$  三个主效应,

Table 2 Welding conditions, design matrix and results

No.	welding conditions			design matrix								average value	
	$P(x_1)$	$v(x_2)$	$\Delta f(x_3)$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{23}$	$x_{123}$	$H(\text{mm})$	$T(^\circ\text{C})$
1	1.6	1.5	0	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0.79	207
2	2.0	1.5	0	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	1.13	249
3	1.6	1.1	0	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1.18	350
4	2.0	1.1	0	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	1.21	367
5	1.6	1.5	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	2.23	387
6	2.0	1.5	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	2.35	427
7	1.6	1.1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	2.30	487
8	2.0	1.1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	2.45	507
9	1.8	1.3	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1.74	380

焊接速度  $v$  与离焦量  $\Delta f$  的交叉效应  $v\Delta f$  都是显著的。本研究中焊缝熔深  $H$  和焊件背面最高温度  $T$  与上述效应之间的统计数学模型分别为:

$$H = 0.838 + 0.550P - 0.575v - 0.295\Delta f - 0.650v\Delta f \quad (1)$$

$$T = 586 + 74P - 326v - 27\Delta f - 101v\Delta f \quad (2)$$

经误差检验,上述二个数学表达式误差均在 5% 以内,采用中间工艺参数值,  $P = 1.8\text{kW}$ ,  $v = 1.3\text{m/min}$ ,  $\Delta f = -0.5\text{mm}$ , 即表 2 中 9 号试验参数组合进行试验, 所得结果与用 (1) 式, (2) 式计算的预测结果相比, 焊缝熔深误差为 5%, 焊件背面最高温度误差仅为 1%。可见上述二个表达式有较高的精度。

上述统计数学模型, 可用于选择激光焊接工艺参数, 预测试验结果, 也可在给定目标条件下采用计算机进行优化设计。

## 四、讨 论

1. 由 (1) 式, (2) 式可见, 激光焊接工艺参数  $P$ ,  $v$ ,  $\Delta f$  对焊缝熔深、焊件背面最高温度的影响趋势基本一致。其中, 离焦量  $\Delta f$  对焊缝熔深  $H$  及焊件背面最高温度  $T$  均有最为显著的影响, 焊接速度  $v$  影响次之, 激光功率  $P$  的影响在三者中最小。因此, 要获得满意的焊缝熔深及尽可能低的焊件背面温度, 可以在固定离焦量的条件下, 采用较大的激光功率和较高的焊接速度。因为离焦量对熔深和温度影响最大, 离焦量稍稍变化, 焊缝熔深和焊件背面温度就会有较大的变化。

因此, 如果以离焦量作为控制参数, 则会因控制过于灵敏而造成精度不高。

2. 激光扫描速度  $v$  和离焦量  $\Delta f$  对焊缝熔深及焊件背面最高温度  $T$  存在着交叉影响。为进一步分析起见, 分别对 (1) 式, (2) 式取一阶、二阶偏导, 如表 3, 表 4 所示。

由一阶偏导分析可见, 焊接速度  $v$  对焊缝熔深  $H$  以及对焊件背面最高温度  $T$  的影响, 随

Table 3 The first partial derivative

variables	equation (1)	equation (2)
$P(x_1)$	$\partial H / \partial P = 0.55$	$\partial T / \partial P = 74$
$v(x_2)$	$\partial H / \partial v = -0.575 - 0.65\Delta f$	$\partial T / \partial v = -326 - 101\Delta f$
$f(x_3)$	$\partial H / \Delta f = -0.295 - 0.65v$	$\partial T / \Delta f = -27 - 101v$

Table 4 The second partial derivative

variables	equation (1)	equation (2)
$P(v)$	$\partial^2 H / \partial P \partial v = 0$	$\partial^2 T / \partial P \partial v = 0$
$P\Delta f$	$\partial^2 H / \partial P \partial \Delta f = 0$	$\partial^2 T / \partial P \partial \Delta f = 0$
$v\Delta f$	$\partial^2 H / \partial v \partial \Delta f = -0.65$	$\partial^2 T / \partial v \partial \Delta f = -101$

着离焦量  $\Delta f$  从零到负增大而增大; 离焦量  $\Delta f$  对  $H$  和对  $T$  的影响则随着焊接速度  $v$  的增加而减小。

由表 4 二阶偏导分析可知,  $P$  与  $v$  以及  $P$  与  $\Delta f$  对  $H$  和对  $T$  均无共同影响(交叉效应), 即在改变  $v$  及  $\Delta f$  时,  $P$  对  $H$  和对  $T$  的影响保持恒定, 亦即可以单独改变激光功率  $P$  来调控焊缝熔深  $H$  及焊件背面最高温度  $T$ , 而不必考虑其它因素的影响。

3. 经上述分析讨论, 根据 (1) 式, (2) 式, 采用计算机辅助设计, 即可求解出在给定焊缝熔深及一定的焊件背面最高温度条件下, 最合适的焊接工艺参数。例如, 采用对接接头, 板厚为 3mm, 要求焊缝熔深  $H = 2.5\text{mm}$ , 焊件背面最高温度  $T < 500^\circ\text{C}$ 。由 (1) 式, (2) 式选择的激光焊接工艺参数为:  $P = 2.3\text{kW}$ ,  $v = 1.5\text{m/min}$ ,  $\Delta f = -1\text{mm}$ 。用此工艺参数实际焊接得到的焊缝熔深  $H = 2.51\text{mm}$ , 如图 2 所示。  $T = 445^\circ\text{C}$ , X-Y 函数仪测得的温度毫伏数变化曲线如图 3 所示, 均达到了既定目标。

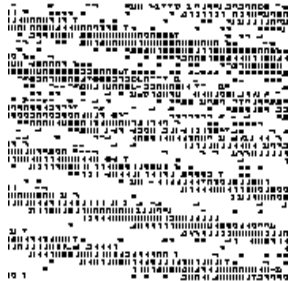


Fig. 2 The cross-section of butt weld  
 $P = 2.3\text{kW}$   
 $v = 1.5\text{m/min}$   
 $\Delta f = -1\text{mm}$

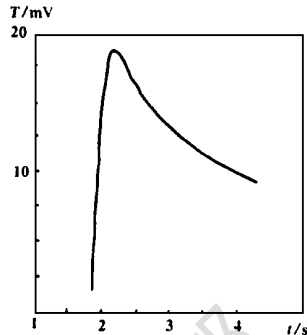


Fig. 3 Millivoltage trace of temperature reading by X-Y tracer

## 五、结 论

1. 试验设计及相关分析方法, 能定量分析焊接工艺参数与焊缝质量之间的关系, 并可建立其间的统计数学模型, 从而实现计算机辅助优化设计, 达到精确控制焊缝质量参数的目的。

2. 本研究中, 对于板厚为 1.5mm, 2.5mm, 3.0mm, 4.0mm 的不锈钢对接接头, 实现了在保证焊缝熔深的同时, 使焊件背面最高温度控制在一定范围内, 满足了工程实际的需要。

## 参 考 文 献

- 1 Banas C M. Opt Engng, 1978; 17(3): 210~ 216
- 2 Jr Holbert R K, Jr Mustaleski T M, Frye L D. Welding Journal, 1987; 66(8): 21~ 25
- 3 Kulsuna M, Suzuki J, Kimara S *et al.* Welding in the World, 1993; 31(3): 126~ 135
- 4 Box G E P, Hunter W G, Hunter J S, Statistics for Experimenters. New York: John Wiley and Sons, 1978: 510~ 513
- 5 Montgomery D C. Design and Analysis of Experiments. New York: Jhon Wiley and Sons, 1984: 261~ 280
- 6 熊腊森, 李绍斌, 布拉顿 N R. 华中工学院学报, 1986; 14(4): 569~ 575
- 7 Metzbow er E A. Welding Journal, 1993; 72(8): 403~ 407

作者简介: 熊腊森(附照片), 男, 1947年2月出生。副教授。主要从事焊接工艺及设备的教学和科研工作。

胡伦骥, 男, 1940年9月出生。教授。近年来主要从事材料激光加工研究。

胡席远, 男, 1953年9月出生。工程师。长期从事激光设备及加工工作。

徐钦松, 男, 1972年出生。硕士研究生。