

# 薄板高强铝合金 LY12CZ 焊接工艺参数的优化

徐文立<sup>1</sup>, 刘雪松<sup>1</sup>, 方洪渊<sup>1</sup>, 田锡唐<sup>1</sup>, 郭绍庆<sup>2</sup>

(1.哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;  
2.北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:**从力学角度出发, 通过调整焊接温度场, 控制焊缝及近缝区的应力应变发展, 实现了高强铝合金 LY12CZ 薄板的低应力少变形无热裂焊接。运用正交试验设计来安排试验、筛选因子, 并用一次回归正交设计调优运算优化因子的匹配, 找到了影响铝合金薄板焊接变形的主要因子和最佳工艺参数匹配, 揭示了主要工艺参数对减小变形效果的影响规律。

**关键词:** 随焊激冷; 温差拉伸; 正交设计; 焊接变形

中图分类号: TG441.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)02-39-04



徐文立

## 0 序 言

高强铝合金薄板-壳结构因具有良好的耐蚀性, 较高的比强度与比刚度, 好的导电性及导热性等优点, 多用作火箭和导弹等飞行器的壳体、贮箱、弹头蒙皮、蜂窝结构等。但由于其壁厚较薄, 并且结构比较复杂, 因而对焊接残余应力及变形的控制提出了很高要求。焊接残余应力的存在, 不仅会影响构件尺寸的准确性和外形美观, 而且会诱发多种焊接裂纹的形成, 影响构件的强度和刚度, 导致结构失效, 甚至引发重大事故<sup>[1]</sup>。文中采用动态低应力焊接技术进行焊接, 最终解决了铝合金薄板焊接变形的问题<sup>[2-4]</sup>。研究采用正交试验设计和一次回归正交设计来安排试验并对结果进行了处理。这不仅减少了试验的次数, 提高了试验的准确性, 而且明确了变形量与各工艺参数的关系, 对试验参数优化也有一定的预测作用<sup>[5-7]</sup>。

## 1 试验方法

研究采用具有高热裂敏感性的高强铝合金 2024 作为试验材料, 焊件尺寸为 540 mm×300 mm×2 mm, 试验装置如图 1 所示。为防止焊接热裂和得到更好的温差拉伸效果, 在焊枪后部紧跟一个与焊枪同步运动的激冷器, 循环激冷液温度保持在-40 °C, 如图 2 所示。焊接时, 油囊加压并通过琴键对试件施

加不同的拘束力, 两侧的电加热带以及中间的通水冷却铜垫块则在焊件上形成一马鞍形温度场从而对焊缝施加不同的静态温差拉伸效果。焊接方法采用钨极脉冲氩弧焊, 具体的焊接参数见表 1。通过预备性试验可知, 影响焊接变形的工艺因子有: 铜垫块的通水速度、预热温度、焊接电流、焊接速度、油压、夹持距离、激冷液流速、激冷距离等。考虑到焊接电流和焊接速度在一定范围内可以互相匹配, 并尽可能使试验简化, 将水冷铜块的通水速度(45.7 L/min)、焊接电流、焊接速度、激冷液流速(139 mL/min)作定值处理。并根据实际情况, 选择预热温度范围为 70~130 °C; 油压范围为 20~120 MPa; 夹持距离范围为 15~30 mm; 激冷距离范围为 20~35 mm。因素及水平分配情况见表 2。

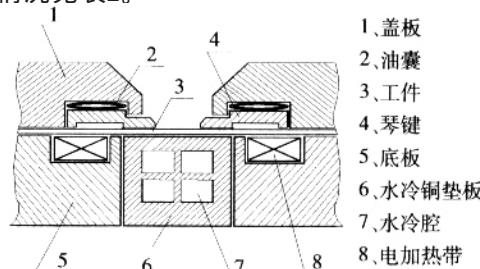


图 1 焊接试验装置

Fig.1 Experimental setup for welding

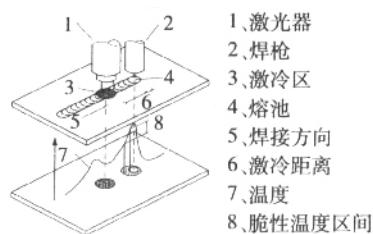


图 2 冷源作用位置示意图

Fig.2 Position of cooling source

收稿日期: 2003-08-27

基金项目: 国防预研项目(18.4②)

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

电弧电压 U/V	峰值电流 $I_1/A$	基值电流 $I_2/A$	脉宽比	脉冲频率 $f/Hz$	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	氩气流量 $q/(L \cdot min^{-1})$
14	200	110	1:1	3	367	8

表 2 试验因素及水平

Table 2 Experimental factors and levels

因素	预热温度 A ) $T/^\circ C$	油压 B ) $p/MPa$	激冷距离 C ) $d_1/mm$	夹持距离 D ) $d_2/mm$
水平 1	70	20	20	15
水平 2	90	40	25	20
水平 3	110	100	30	25
水平 4	130	120	35	30

## 2 试验结果及分析

### 2.1 正交试验设计的直观分析

表 3 给出了根据正交试验设计得到的不同因素及水平搭配下对应的最大焊件纵向变形量结果。其中  $K_n (n = 1 \sim 4)$  分别为因素 A, B, C, D 的第  $n$  水平所在的试验中对应变形量  $f_{\max}$  之和  $k_1 k_2 k_3 k_4$  分别是  $K_1 K_2 K_3 K_4$  这 4 行中的 4 个数除以 4 所得的结果, 也就是各水平所对应的平均值。极差代表  $k_1, k_2, k_3, k_4$  的 4 个数中最大者与最小者之差。通过分析, 可以得出如下结论。

#### 2.1.1 各因素与指标的变化规律

预热温度在  $70 \sim 110$   $^\circ C$  时, 随着温度的提高, 变形量逐渐由 31.92 mm 减小到 12.32 mm。温度再提高, 变形量反而变大, 温度为 130  $^\circ C$  时, 变形量增大为 13.82 mm; 油压这一因素对变形极差的影响是, 当油压由 20 MPa 升至 100 MPa 时, 变形量迅速减小, 由 24.66 mm 减小到 18.98 mm。油压为 120 MPa 时, 变形量也有略微减小的趋势, 变为 17.68 mm; 激冷距离和夹持距离两因素对指标的影响相似, 当两者增大时, 变形量逐渐增大。

#### 2.1.2 因子影响指标的主次顺序

从极差  $D_{\max}$  的大小可以看出, 预热温度的极差为 4.9 mm, 油压的极差为 1.75 mm, 而激冷距离和夹持距离的极差分别为 0.58 mm 和 0.67 mm。由正交表的均匀性可知, 极差的大小标志着影响指标的

主次, 所以该试验中各因子对最大纵向挠曲变形量  $f_{\max}$  的影响主次顺序依次为预热温度、油压、夹持距离、激冷距离。

#### 2.1.3 最优方案的选定

由表 3 的计算可知当预热温度 110  $^\circ C$ 、油压 120 MPa、激冷距离 20 mm、夹持距离 15 mm 时焊件变形量最小, 故为最优方案。

通过做补充试验, 在该规范下的焊件变形量仅为 1.12 mm, 由此可以证明由正交设计确定出的最优方案是合理的。

### 2.2 正交试验设计的方差分析

直观分析法简单直观, 但不能给出误差大小的估计, 因此也就不能知道结果的精确度。而方差分析可以弥补直观分析的不足。

表 4 为通过计算程序得到的方差分析与计算结果。其中  $F$  为各因素的平均离差的平方和  $S_f$  与误差的平均离差平方和  $S_e$  的比值, 它反映了各因素对试验结果影响程度的大小  $f$  为因素的自由度。给出检验水平  $a$ , 从  $F$  分布表中查出临界值  $F_a$  ( $f_{\text{因}}, f_e$ )。这里  $F_{0.01}(3,3) = 29.46$ ,  $F_{0.05}(3,3) = 9.28$ 。从各因子的  $F$  值和临界值比较看出, 因素 A 即预热温度的  $F$  值远大于高度显著的临界值  $F_{0.01}(3,3)$ , 故该因素的影响是高度显著 (用  $^{**}$  表示); B 因素的  $F$  值介于显著临界值  $F_{0.05}(3,3)$  和高度显著临界值  $F_{0.01}(3,3)$  之间, 故该因素的影响为显著 (用  $*$  表示)。其它两因素  $F$  值均小于  $F_{0.05}(3,3)$ , 因此影响均为不显著。

表 3 正交试验设计的直观分析  
Table 3 Auto-visual analysis of orthonormality test design

编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	挠度 $f_{\max}/\text{mm}$
1	1	1	1	1	8.24
2	1	2	2	2	8.20
3	1	3	3	3	7.80
4	1	4	4	4	7.68
5	2	1	2	3	6.90
6	2	2	1	4	6.40
7	2	3	4	1	5.88
8	2	4	3	2	5.40
9	3	1	3	4	4.80
10	3	2	4	3	3.42
11	3	3	1	2	2.10
12	3	4	2	1	2.00
13	4	1	4	2	4.72
14	4	2	3	1	3.30
15	4	3	2	4	3.20
16	4	4	1	3	2.60
$K_1$	31.92	24.66	19.34	19.42	—
$K_2$	24.58	21.32	20.30	20.52	—
$K_3$	12.32	18.98	21.30	20.60	—
$K_4$	13.82	17.68	21.66	22.08	—
$k_1$	7.98	6.17	4.84	4.86	—
$k_2$	6.15	5.81	5.08	5.13	—
$k_3$	3.08	4.75	5.33	5.15	—
$k_4$	3.45	4.42	5.42	5.52	—
$D_{\max}$	4.9	1.75	0.58	0.66	—
最佳方案	A3	B4	C1	D1	—

表 4 方差分析与计算  
Table 4 Analysis and calculation of variance

方差来源	$S_t$	$f$	$S_e$	$F$	临界值	优化方案
A	64.69	3	21.56	127.20		A3
B	7.24	3	2.41	14.24	$F_{0.01}(3,3)=29.46$	B4
C	0.61	3	0.20	1.21		C1
D	0.89	3	0.30	1.76		D1
误差 E	0.51	3	0.17	—	$F_{0.05}(3,3)=9.28$	
总和 T	73.54	15	—	24.64	—	

### 2.3 多元一次回归正交试验设计 试验建立的多元一次线性模型为

$$\begin{cases} y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + \varepsilon, \\ \varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2), \end{cases}$$
  
式中  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  都是未知的参数  $x_1, x_2, x_3, x_4$  分别代表因素 A, B, C, D 的独立试验。利用最小二乘

法估计这些参数，在最小二乘法估计运算中运用矩阵的运算方法解正规方程组，引入矩阵如下

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} \end{pmatrix}.$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}.$$

由此,正规方程组可表示为

$$X^T X B = X^T Y.$$

如果  $X^T X$  的逆存在(在实际问题中一般存在),

$$则 B = (X^T X)^{-1} X^T Y.$$

这就是  $B$  的估计,即

$$(b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4)^T = X^T X^{-1} X^T Y.$$

方程为  $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4$ 。

最后,再对回归方程和回归系数进行  $F$  检验。利用计算机对该试验进行多元一次正交回归计算可得回归方程如下

$y = 12.521 - 32 - 8.320 \ 001 \times 10^{-2} x_1 - 0.154 \ 117 \ 7 x_2 + 4.040 \ 001 \times 10^{-2} x_3 + 4.140 \ 001 \times 10^{-2} x_4$  方程的  $F$  值为 17.069 68。而  $F_{0.05}(4,11) = 5.67$ , 小于方程的  $F$  值, 所以此回归方程为高度显著。四个因素的  $F$  值分别为  $F_1 = 59.534 \ 55$ ;  $F_2 = 6.945 \ 541$ ;  $F_3 = 0.871 \ 334 \ 5$ ;  $F_4 = 0.921 \ 304 \ 7$ 。而  $F_{0.05}(1,11) = 4.84$ ;  $F_{0.05}(1,11) = 3.36$ 。所以, 四个因素中, 因素 A, B 的回归系数是高度显著的, 而因素 C, D 的回归系数不显著。把因素 C, D 去掉后, 再进行两元一次回归分析计算, 其回归方程如下

$$y = 14.563 - 82 - 8.320 \ 001 \times 10^{-2} x_1 - 0.154 \ 117 \ 7 x_2.$$

回归方程的  $F$  值为 33.763 01。而  $F_{0.01}(2,3) = 6.70$ , 小于回归方程的  $F$  值, 所以回归方程为高度显著。因素 A, B 的回归系数的  $F$  分别为 60.4712, 7.054 815。而  $F_{0.01}(1,13) = 9.07$ , 小于因素 A 的  $F$  值, 所以因素 A 的回归系数也是高度显著的, 而因素 B 为显著。

由以上的计算可以看出, 因素 A, B 是该试验中影响焊接变形最大的因素。无论是用直观分析法、方差分析法, 还是一次线性回归法, 都能够说明这一点。利用一次线性回归法能够得到控制焊接变形的

近似数学模型, 由此模型可以进行焊接变形的预测, 也为下一步试验的进行指明了方向。

### 3 结 论

(1) 动态低应力焊接技术能够有效控制 LY12CZ 薄板铝合金焊接变形, 对于 540 mm  $\times$  300 mm  $\times$  2 mm 的焊件, 挠曲变形量可控制在 1 mm 左右。

(2) 用正交试验的直观分析法得出了控制焊接变形的最优方案匹配: 即预热温度 110 °C、油压 120 MPa、激冷距离 20 mm、夹持距离 15 mm。

(3) 通过正交试验的方差分析法可知各因素对控制焊接变形量的影响是: 预热温度为高度显著, 油压为显著, 激冷距离与拘束距离为不显著。并通过多元一次回归分析加以证实。在二者的基础上, 又得出了焊接变形量与各因素之间的数学模型。

### 参考文献:

- [1] 徐文立. 随焊锤击控制铝合金薄板焊接应力变形及接头质量的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [2] 郭绍庆. 高热裂敏感铝合金薄板焊接热裂与变形的控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [3] 郭绍庆, 徐文立. 温差拉伸控制铝合金薄板的焊接变形 [J]. 焊接学报, 1999, 20 (1) 34~41.
- [4] 徐文立, 李世萍, 郭绍庆, 等. 动态低应力小变形无热裂焊接方法的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34 (3) 297~301.
- [5] 王正宏. D6AC(45NiCrMoV)钢次级整流点焊工艺研究 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [6] 俞忠原. 实验设计与数据分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1991.
- [7] 陈魁编. 试验设计与分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 1~178.

作者简介: 徐文立 男, 1973 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为焊接力学及可靠性、焊接应力及变形控制, 发表论文 20 余篇。

Email: xuwenli@hit.edu.cn