

# 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测

柏久阳, 王计辉, 林三宝, 杨春利\*

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:**文中首先采用同一组焊接参数,在四种厚度基板上进行单道20层铝合金薄壁试样成型,发现不同厚度基板下试样稳定区的焊道宽度相同。基于此结论,利用二次通用旋转组合方法设计试验样本,通过二次回归方程建立工艺参数(焊接电流、焊接速度、送丝速度、层间温度)与成型试样稳定区域焊道宽度尺寸预测模型,经验证发现模型预测效果较好。结果表明,影响焊道宽度的主要因素有焊接电流、焊接速度和层间温度。当电流小于95 A时,参数对焊道宽度的影响顺序为:电流大于焊接速度大于层间温度;当电流大于95 A时,顺序变为:电流大于层间温度大于焊接速度。同时,焊接电流和层间温度间存在交互作用。

**关键词:**增材制造;通用旋转组合;尺寸预测

中图分类号: TG 444+.2 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)09-0087-04

## 0 序 言

随着科技的发展和社会的需求,一些产品领域的生产制造逐渐倾向几何形状复杂、高精度、多元化和小批量的趋势,在此背景下产生了增材制造技术(又称3D打印)。

常见的金属增材制造工艺多以高能束作为热源,如激光和电子束成形工艺,但高能束热源效率低、成本高的特点限制了其在大型零件成型上的应用。电弧增材制造以电弧为热源,具有成本低、效率高等<sup>[1-4]</sup>优点,近些年来受到了广泛的关注。2008年,南昌大学的张光云<sup>[5]</sup>对TIG焊接工艺参数与焊缝尺寸的关系进行了研究,建立了工艺参数预测工件尺寸以及工件尺寸预测工艺参数的两个神经网络模型,工艺参数预测工件尺寸的神经网络模型精度很好,而工件尺寸对工艺参数的预测结果并不理想,误差很大。2012年,哈尔滨工业大学的胡建文<sup>[6]</sup>研究了GMAW快速成形熔焊尺寸神经网络建模和参数预测,结果表明神经网络模型精度更高。尽管大量学者发现适当控制层间时间可以改善成型的稳定性<sup>[7]</sup>,但大多数学者都没有在模型中加入层间策略的因素,因此模型客观上也不够准确。基于以上分析,文中以层间温度作为层间因素的考察对象,建立基于层间温度、焊接电流和焊接速度的稳定区焊道宽度尺寸预测模型。

## 1 结构特征

### 1.1 试验设备

试验采用德国Cloos公司的GLW300型交、直流两用TIG焊机,自行搭建了三维滑台+变位机的组合运动机构,并采用步进电机作为驱动单元、数控面板作为控制单元,实现了电源、运动和送丝的同步协调,从而实现三维结构试样的成型,如图1所示。试验所用焊丝牌号为ER2319,直径为1.2 mm,基板为6061铝合金,板厚为4,6,8和10 mm四种。

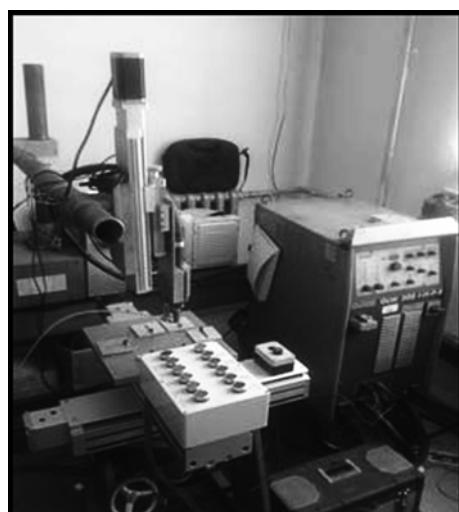


图1 试验设备

Fig. 1 Experimental equipment

### 1.2 试验方案

在不同厚度基板上进行单道20层薄壁铝合金

试样成形。因不同层的散热条件差异大,而第一层的散热条件较好,基层需采用较大的焊接电流方可成

型,在4,6,8和10 mm板厚时第一层焊接电流分别为150,175,190和205 A,其它层的成形试验参数见表1。

表1 成形试验参数

Table 1 Experimental parameters

焊接电流 $I/A$	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	送丝丝速 $v_s/(mm \cdot min^{-1})$	层间温度 $T/^\circ C$	气体流量 $q/(L \cdot min^{-1})$	电弧长度 $L/mm$
120	300	2 000	60	10	3~5

### 1.3 结果分析

图2为四种厚度基板下堆焊成形的单道20层薄壁铝合金试样截面,对比四个薄壁试样的焊道宽度,因基板第一层电流不同,故忽略底层焊道宽度尺寸,考虑其它层焊道宽度尺寸变化,发现其具有相似的特点:随着层数增加焊道宽度逐渐变大,到达一定高度后稳定,同时称这一高度以上至圆弧区域以下的区间为焊道宽度稳定区间。为探究基板厚度对稳定区域焊道宽度尺寸的影响,分别测量四个薄壁试样稳定区域的焊道宽度大小,通过多次测量求平均值以减小测量误差,得到4,6,8和10 mm板厚条件下稳定的焊道宽度为6.63,6.65,6.66和6.63 mm。可知,不同厚度基板下堆焊的薄壁试样稳定区域焊道宽度尺寸最大相差为0.03 mm,因此基板厚度对薄壁试样稳定区域焊道宽度尺寸的影响可忽略不计。

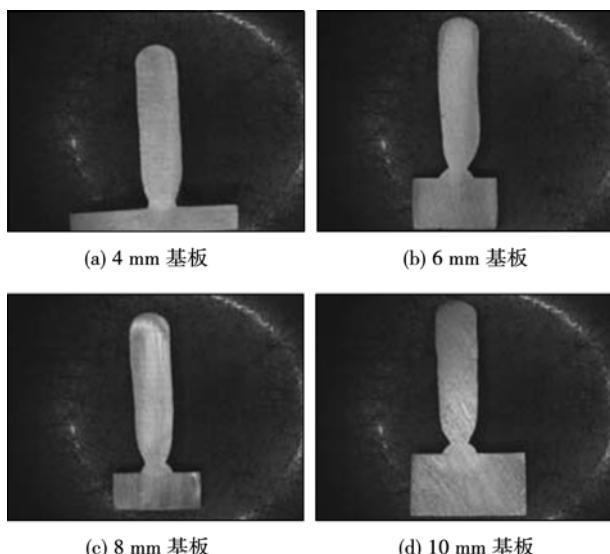


图2 薄壁试样截面图

Fig. 2 Cross-section of components

## 2 稳定区焊道宽度尺寸建模

### 2.1 试验设计方法

为了以较少试验来反映各因素对试验结果的影

响及其交互作用,文中利用二次回归通用旋转组合设计方法设计试验样本,该方法通过将各因素区间规范化到[-2,2]区间,并在一次回归设计的试验点的基础上增加特定的一些试验点,组合起来形成试验方案,它能使回归预测值的方差在规范变量空间中一个球心为原点、半径为 $\rho$ 的球内为一个常数,从而实现各个方向上等精度的估计。如果考虑 $p$ 个因素共进行 $n$ 个试验的旋转组合设计,且采取部分实施,试验点由三个类型组合而成:

$$n = m_c + m_r + m_0 = 2^{p-1} + 2p + m_0 \quad (1)$$

其中 $m_c$ 个试验点分布在规范变量空间中半径为 $\rho_c = \sqrt{p}$ 的球面上, $m_r = 2p$ 个试验点分布在半径为 $\rho_r = r$ 的球面上, $m_0$ 个点集中在 $\rho_0 = 0$ 的球面上(即原点)。文中试验采取四因素四水平设计,由文献[8]中查得 $m_c, m_r, m_0, r$ 的值分别为8,8,1.682,4,故需通过20组试验,考察焊接电流 $I$ 、焊接速度 $v$ 、送丝速度 $v_s$ 和层间温度 $T$ 四个主要因素对稳定区间成型尺寸的影响,并建立精确数学模型。将各因素范围值进行规范化处理, $I, v, v_s, T$ 分别对应于 $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ ,得到的各因素水平如表2所示,二次回归通用旋转组合设计表见文献[8]。

表2 因素水平表

Table 2 Parameters levels

因素	焊接电流	焊接速度	送丝速度	层间温度
水平	$I/A$	$v/(mm \cdot min^{-1})$	$v_s/(mm \cdot min^{-1})$	$T/^\circ C$
-2	70	100	500	60
-1.682	75	124	620	80
-1	85	175	875	120
0	100	250	1250	180
1	115	325	1625	240
1.682	125	376	1880	280
2	130	400	2000	300

### 2.2 模型建立

将每组试验所得薄壁试样的稳定区域焊道宽度和层高多次测量求取平均值,利用spss软件通过传统二次回归模型对焊道宽度 $W$ 进行线性拟合,并进

行回归方程拟合度检验、回归系数检验以及方差计算。经逐步回归,得出方程的常数项为 7.721,  $Z_1$  的系数为 1.085,  $Z_2$  的系数为 -0.927,  $Z_4$  的系数为 0.860,  $Z_1Z_4$  的系数为 0.342, 其余各项由于差异不显著被剔除。用逐步回归法求得焊道宽度的多元回归方程式为

$$W = 7.721 + 1.085Z_1 - 0.927Z_2 + 0.860Z_4 + 0.342Z_1Z_4 \quad (2)$$

将规范化变量变回原始因素变量, 得

$$W = 7.8377 + 0.0723I - 0.0124v - 0.0237T + 0.00038IT \quad (3)$$

对回归方程的拟合度进行检验, 该回归模型的相关系数( $R$ )为 0.975, 相关系数的平方( $R$  Square)为 0.951, 同时计算方差  $F$  值的显著性概率为 0.018 小于 5%, 所以回归达到显著水平, 说明焊道宽度和方程式中因素之间存在显著的回归关系, 试验设计方案是正确的, 回归方程式具有意义。

将四个工艺参数变量带入拟合出来的焊道宽度的回归方程, 求出对应焊道宽度的预测值和误差率  $e$  如图 3 和图 4 所示。可知预测值与实际值相差不大, 其中最大误差率为 9%, 平均误差为 2.90%, 而大部分误差率多在 5% 以内。

### 2.3 预测精确检验

进一步验证模型预测的精度, 进行典型薄壁零件 A 和 B 的成形。A 采取断续成形方式, 每层堆焊后都需要等待试样冷却, 待最上层温度达到设定的层间温度后再进行后续焊道的熔敷, 其目标宽度为 6.9 mm, 实际宽度为 7.1 mm, 误差率为 2.89%。B 为连续成形, 在堆焊后期零件的热输入与散热平衡, 零件进入热量动态平衡状态, 因此无法准确控制层

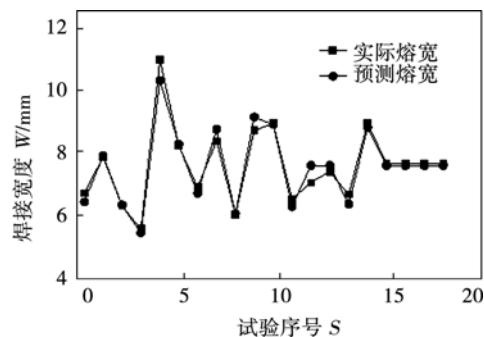


图 3 成形尺寸与拟合尺寸对比

Fig. 3 Real value and prediction

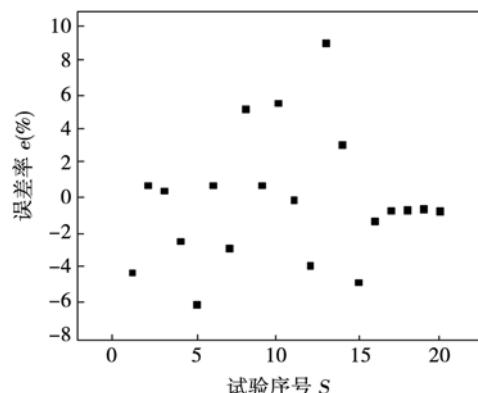


图 4 成形尺寸与拟合尺寸误差率

Fig. 4 Error rate between real value and prediction

间温度, 而是在成形结束后立即对零件最上层焊道的温度进行测量, 作为层间温度值, 预测宽度为 6.3 mm, 实际宽度为 6.5 mm, 误差率为 3.31%; 图 5 所示为成形的零件, 表 3 为模型预测精度验证结果。两个成形零件焊道宽度预测误差率均控制在 5% 以内, 再次验证了该模型预测焊道宽度的精确度较高。

表 3 模型预测精度验证结果

Table 3 Results of weld width prediction model

零件	焊接电流 $I/A$	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_s/(mm \cdot min^{-1})$	层间温度 $T/^\circ C$	目标(预测)值 $W/mm$	实际值 $W_r/mm$	误差率 $e/(\%)$
A	100	200	1 000	80	6.9	7.1	2.89
B	85	375	1 200	320	6.3	6.5	3.31

### 3 焊道宽度影响因素分析

利用传统二次回归模型得到的拟合方程可以综合反映四个工艺参数对薄壁试样焊道宽度尺寸的整体影响, 可知焊道宽度大小与焊接电流  $I$ 、焊接速度  $v$  和层间温度  $T$  有关, 而送丝速度  $v_s$  对其几乎没有影响。为探究单个因素变量对其成形尺寸的影响大

小, 可通过对单个因素求取偏导进行分析, 将拟合方程对各因素求取偏导, 即

$$\frac{\partial W}{\partial v} = -0.0124 \quad (4)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I} = 0.0723 + 0.00038T \quad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial T} = -0.0237 + 0.00038I \quad (6)$$

对偏导结果进行分析, 式(4)中偏导结果为负,

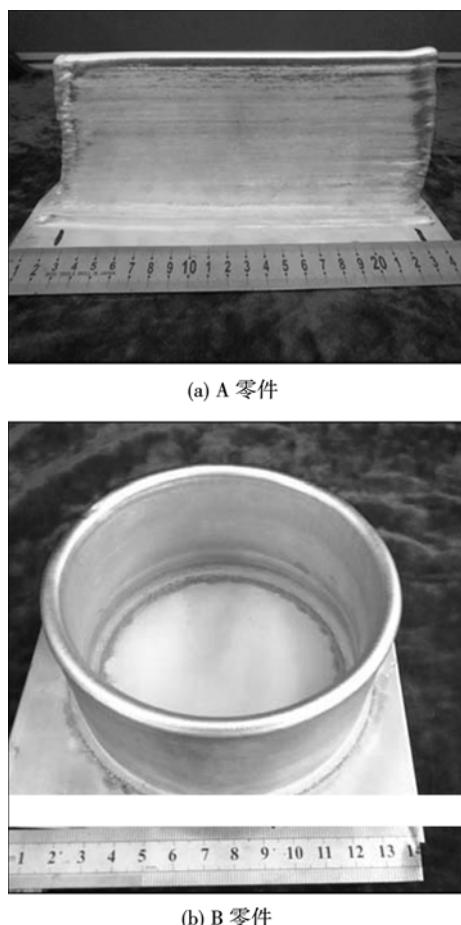


图5 典型零件

Fig. 5 Typical components

说明焊道宽度与焊接速度负相关. 其它条件不变时, 随着焊接速度增大, 焊道宽度减小; 而式(5)和式(6)中偏导结果不是常数, 式(5)为与  $T$  相关的线性函数, 式(6)为与  $I$  相关的线性函数. 说明随着温度的升高, 焊道宽度对电流的偏导量增大, 意味着单位电流引起的焊道宽度变化量增大, 即高温下电流对焊道宽度的影响大于低温下电流对焊道宽度的影响; 同理, 随着电流的增大, 焊道宽度对温度的偏导量也增大, 意味着单位层间温度引起的焊道宽度变化量增大, 即大电流下温度对焊道宽度的影响大于小电流下温度对焊道宽度的影响, 由此得出电流和层间温度间存在交互作用, 并且在大参数条件下焊道宽度的变化更加灵敏.

分析三者在参数区间内的偏导量可知, 对电流的偏导量在  $0.0951 \sim 0.1863$  之间, 对焊接速度的偏导量为绝对值为  $0.0124$ , 对层间温度的偏导量在  $0.0029 \sim 0.0257$  之间. 可知, 对电流的偏导量始终是最大的, 意味着单位电流引起的焊道宽度变化量最大, 电流对焊道宽度的影响始终最大. 对焊接速度和层间温度的偏导量存在一定交叉. 令式(4) =

式(6)得  $I = 95 A$ , 即当电流小于  $95 A$  时, 参数对焊道宽度的影响顺序为: 电流大于焊接速度大于层间温度; 当电流大于  $95 A$  时, 参数对焊道宽度的影响顺序为: 电流大于层间温度大于焊接速度.

## 4 结 论

(1) 采用二次回归模型得到的拟合方程能够准确有效地预测成形试样焊道宽度.

(2) 焊接电流和层间温度对焊道宽度尺寸的影响存在交互作用, 大的焊接参数条件下焊道宽度变化更灵敏.

(3) 当电流小于  $95 A$  时, 参数对焊道宽度的影响顺序为: 电流大于焊接速度大于层间温度; 当电流大于  $95 A$  时, 参数对焊道宽度的影响顺序为: 电流大于层间温度大于焊接速度.

## 参考文献:

- [1] 刘一搏, 孙清洁, 姜云禄, 等. 基于冷金属过渡技术快速成形工艺[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 1-4.  
Liu Yibao, Sun Qingjie, Jiang Yunlu, et al. Rapid prototyping process based on cold metal transfer arc welding technology [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 1-4.
- [2] 李玉龙, 张华, 张光云, 等. 基于TIG堆焊技术的低碳钢零件精密快速成形[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 37-40.  
Li Yulong, Zhang hua, Zhang Guanyun, et al. Precision rapid prototyping of steel parts using TIG deposition technology [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 37-40.
- [3] 刘宇. TC4钛合金TIG填丝堆焊成型技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [4] 陈天佐, 李泽高. 金属堆焊技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [5] 张光云. TIG熔焊成型中焊缝几何尺寸的建模与控制[D]. 南昌大学, 2008.
- [6] 胡建文. GMAW快速成形熔敷焊道尺寸神经网络建模和参数预测[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [7] 申俊琦, 胡绳荪, 刘望兰, 等. 铝合金焊接快速成形层间间隔时间分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 109-112.  
Shen Junqi, Hu Shengsun, Liu Wanglan, et al. Effect of time interval in rapid prototyping of Al-alloy based on welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 109-112.
- [8] 袁志发, 周静萍. 试验设计分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

**作者简介:** 柏久阳, 男, 1987年出生, 博士生. 主要从事电弧增材制造工作. Email: baijiuyang-123@163.com

**通讯作者:** 林三宝, 男, 博士, 教授, 博士生导师. Email: sblin@hit.edu.cn