

# 机器人堆焊快速成型的实验研究

彭善德,刘顺洪,丁冬平,吴松坪

(华中科技大学 材料学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**分析了堆焊快速成型的基本工艺参数对成型焊缝几何形状的影响,并进行了堆焊单壁墙试验,同时对试样进行了显微组织分析。结果表明,堆焊技术是可以用于快速成型的,并可以得到组织致密的金属零件。

**关键词:**堆焊;快速成型;焊接工艺参数;组织性能

**中图分类号:**TG455,TP242.3      **文献标识码:**A      **文章编号:**1001-2303(2006)03-0033-04

## Study of surfacing-welding shaping based on robot

PENG Shan-de, LIU Shun-hong, DING Dong-ping, WU Song-ping

(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The effect of welding parameters of surfacing welding shaping on geometric appearance of seam has been analyzed, also, the single-track multi-layers surfacing welding experiments have been carried out. Moreover, metallographic analyses of the seam have been conducted. It is found that surfacing welding shaping can be applied in rapid prototyping, and consequently metal components with compact texture can be obtained.

**Key words:** surfacing welding; rapid prototyping; weld parameters; structure property

## 引言

机器人三维堆焊成型技术是目前正在研究开发的一种快速成型技术,它将计算机辅助设计和机器人结合起来,进行堆焊,实现金属零件的直接成型。相比于其他的快速成型技术,它具有成型速度快、成型零件尺寸范围大、能直接成型组织致密的金属零件等特点。目前在国外已进入到汽车、航空航天及雕塑艺术等领域,用于单件、小批量、复杂形状的零件、模具及艺术品的制造<sup>[1-3]</sup>。机器人堆焊实验的目的是研究焊接工艺参数对焊缝成形的影响,为后续的机器人快速成型软件中切片方向、切片厚度、路径宽度的计算提供依据。

## 1 实验条件和实验方法

### 1.1 实验条件

MOTOMAN-UP20 弧焊机器人系统和 MOTO WELD-S350 CO<sub>2</sub> 自动焊机;焊丝为 H08Mn2SiA, 直径  $\phi$  1.2 mm;电极倾角 90°;CO<sub>2</sub> 气流量为 10 L/min。堆积成型的基材为 Q235 钢。

收稿日期:2005-07-15

作者简介:彭善德(1980—),男,湖南娄底人,在读硕士,主要从事激光焊接和机器人焊接的研究工作。

### 1.2 实验方法

在平板上堆焊单道焊缝,测出每道焊缝的高度和宽度,得到不同焊接参数下的基本焊缝形状和几何尺寸的变化规律;然后连续堆焊单壁墙,测量焊缝高度,并作金相分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接工艺参数对单道焊缝几何形状的影响

焊接电流、电弧电压和焊接速度是决定焊缝尺寸的主要参数。在适当的焊接工艺规范下,电弧稳定燃烧,送丝平稳,得到的典型 CO<sub>2</sub> 焊缝如图 1 所示。左侧为起弧端,呈泪滴状;右侧为息弧端,呈下塌扁平状;焊缝截面呈拱形,中高;焊缝光滑均匀、美观。

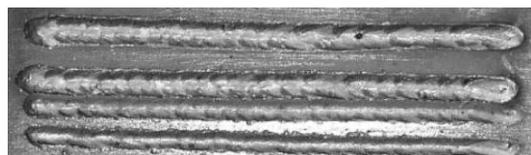


图1 典型的 CO<sub>2</sub> 焊缝外貌

2.1.1 焊接电流对单道焊缝宽度和堆高的影响  
在相同的焊接速度下,随着焊接电流的增大,

焊缝的宽度和高度基本上呈线性增长关系,如图 2 所示。同一焊接速度下,焊接电流对熔宽的影响较大,熔宽增加最大达 4 mm,最少也达到 2 mm;而对堆高的影响较小,增加高度最大仅有 0.5 mm。这是因为熔化极电弧焊中焊接电流增加时,电弧的热功率和电弧力都增加了,焊丝熔化量也增加,因此熔池体积和弧坑深度都随电流而增加,焊缝宽度也随之增加,高度也有所增加<sup>[4]</sup>。

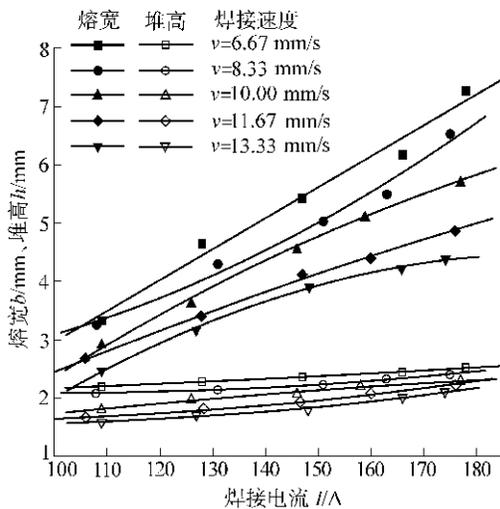


图 2 焊接电流对焊缝形状的影响

### 2.1.2 焊接速度对单道焊缝宽度和堆高的影响

焊接速度对焊缝形状的影响如图 3 所示。由图可知,相同焊接电流下,熔宽随着焊接速度的增大呈线性减少趋势,而堆高稍有减少,变化很小。因为当焊速增加时,单位长度上填充金属的熔敷量与焊速成反比,熔池体积减小。故熔宽与堆高均减小<sup>[4]</sup>。

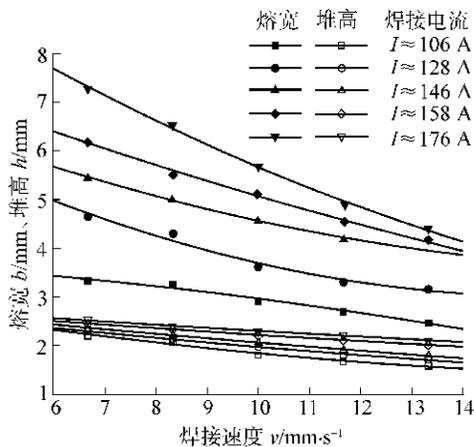


图 3 焊接速度对焊缝形状的影响

### 2.1.3 焊接工艺参数对单道焊缝形状的回归分析

为了获得焊接工艺参数(焊接电流、焊接速度)

与焊缝堆高、熔宽之间准确的数学关系,将对这些数据进行回归分析,为堆焊快速成型软件中切片方向、切片厚度、路径宽度的计算提供依据。从上述分析中可以看出,焊接电流、速度与焊缝的熔宽和堆高成明显的线性关系。由此可分别对熔宽和堆高建立如下的二元线性回归模型

$$Y=b_0+b_1 \cdot I+b_2 \cdot v, \quad (1)$$

式中  $b_0, b_1, b_2$  为回归系数,其中  $b_0$  为常数项,也称为截距,  $b_1, b_2$  分别代表了回归元  $I, v$  的边际效果,也称为斜率参数。

焊接电流  $I$  和焊接速度  $v$  对熔宽的影响关系如表 1 所示。

表 1 焊接电流和焊接速度对熔宽影响的回归系数

回归模型	非标准化系数		回归系数检验的 $t$ 值	回归系数检验的 sig. 值	回归系数 $b$ 的 95% 置信区间	
	回归系数 $b$	标准误差			下界	上界
常数项 $b_0$	1.187	0.421	2.817	0.010	0.313	2.061
焊接电流 $I$	0.041	0.002	17.434	0.000	0.036	0.045
焊接速度 $v$	-0.261	0.024	-10.899	0.000	-0.311	-0.212

在回归参数表 1 中,  $b_0=1.187, b_1=0.041, b_2=-0.261$ , 由此可以建立回归模型

$$W=1.187+0.041 \cdot I-0.261 \cdot v, \quad (2)$$

式中  $W$  为熔宽;  $I$  为焊接电流;  $v$  为焊接速度。

焊接电流和焊接速度对堆高的影响关系如表 2 所示。

表 2 焊接电流和焊接速度对堆高影响的回归系数

回归模型	非标准化系数		回归系数检验的 $t$ 值	回归系数检验的 sig. 值	回归系数 $b$ 的 95% 置信区间	
	回归系数 $b$	标准误差			下界	上界
常数项 $b_0$	1.947	0.078	25.059	0.000	1.786	2.108
焊接电流 $I$	0.006	0.000	15.072	0.000	0.006	0.007
焊接速度 $v$	-0.079	0.004	-17.947	0.000	-0.088	-0.070

在表 2 中,截距  $b_0=1.947, b_1=0.006, b_2=-0.079$ , 由此可以建立回归模型

$$H=1.947+0.006 \cdot I-0.079 \cdot v, \quad (3)$$

式中  $H$  为堆高;  $I$  为焊接电流;  $v$  为焊接速度。

表 1、表 2 中的 Sig. 值都小于 0.05, 表明焊接工艺参数 ( $I, v$ ) 对熔宽和堆高的影响都具有显著的线性相关关系。

## 2.2 连续堆焊时焊接工艺参数对焊缝形状的影响

预设焊接电流为 170 A, 焊接速度 8.33 mm/s。用上述工艺参数在平板上堆 3 道焊缝, 层数为 20 层, 最后堆积成型的单壁墙如图 4 所示。

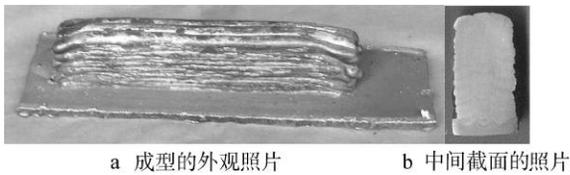


图4 堆积成型的单壁墙

单壁墙起弧、熄弧部分比中间部分高度要低,因此熔焊成形时起弧部分和熄弧部分要采取措施进行补偿。中间部分的高度较为均衡,其平均高度为32.01 mm、平均宽度18.61 mm,每层的平均高度为1.50 mm、平均宽度为6.20 mm;随着层数的增加,每层焊缝的高度并不会发生较大的变化,而是趋于某一稳定值。从图5可以看出,焊缝高度和层数呈良好的线性关系。

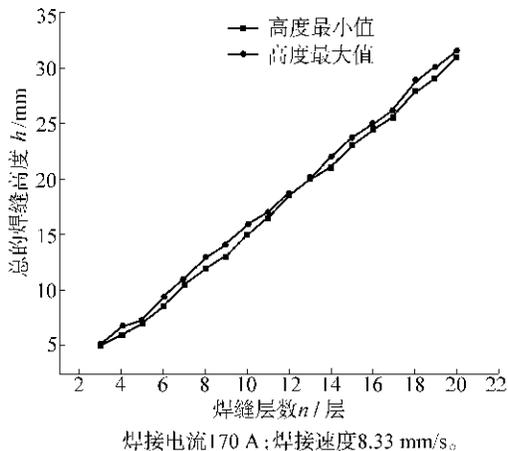


图5 焊接多层堆积层数与堆积高度之间的关系

综合其他的连续堆焊实验结果,在相同的焊接电流  $I$  和焊接速度  $v$  条件下,与平板上堆单道焊缝相比,连续堆焊时焊缝的平均宽度和高度分别存在一个宽度收缩系数  $k_w=0.65$  和高度收缩系数  $k_h=0.91$ 。根据堆单道焊缝回归分析得到的公式,可得到如下经验公式

$$W_c = 1.074 + 0.0417 \cdot I - 0.236 \cdot v, \quad (4)$$

$$H_c = 1.266 + 0.0039 \cdot I - 0.0514 \cdot v, \quad (5)$$

式中  $W_c$  为连续堆焊时每道焊缝平均宽度; $H_c$  为连续堆焊时每道焊缝平均高度。

### 2.3 堆焊成型的焊缝组织和性能

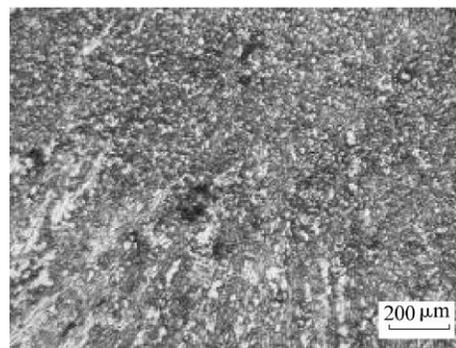
基于焊接的快速成型是一个金属不断重熔、凝固的过程,在此期间,基材和已成型的零件部分将经历不断被加热、冷却的过程,为分析焊接成型零件的力学性能,了解成型零件的内部组织结构,有必要对其进行显微组织分析。零件成型的基材为 Q235 板材,将在 Q235 基板上成型的直线焊壁从中间取

出一段,将其磨平、抛光,用4%的硝酸酒精溶液侵蚀,制成试件如图4b所示的试件进行实验分析。

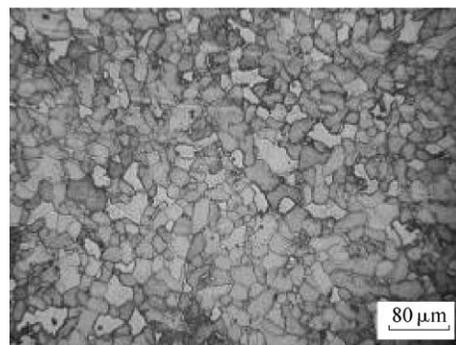
#### 2.3.1 显微组织分析

一般的焊接热影响区包括:过热区、重结晶区、不完全重结晶区、再结晶区和母材。在此所说的正火区就是焊接热影响区中的重结晶区。

基材和熔覆区显微组织如图6所示。由图可知,基材的显微组织是均匀细小的等轴晶;熔覆层正火区和非正火区的组织结构是截然不同的,但它们是同一层,正火区是细小的等轴晶,而非正火区则是粗大的柱状晶。图中白色的是铁素体,深色的是珠光体。正火部分在未正火之前也是柱状晶,在它上面继续堆焊时,它受到了后续熔覆过程加热,温度达到了  $Ac_3$ (临界温度)以上,即达到了正火温度,粗大的柱状晶经过重结晶,晶粒变成了细小的等轴晶。



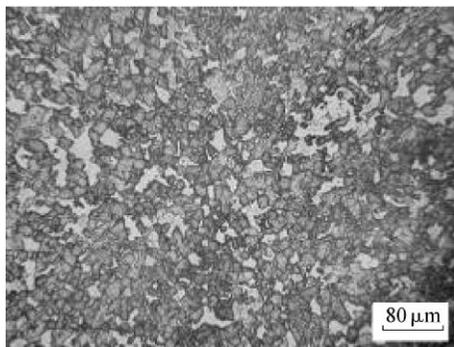
a 基材



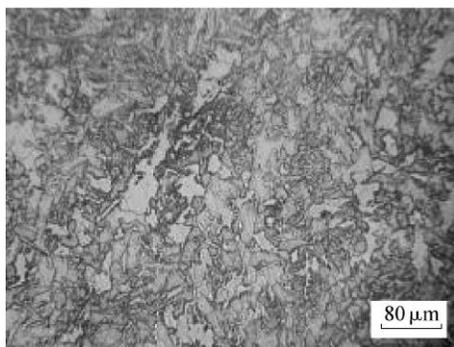
b 熔覆层

图6 正火区与非正火区交界处显微组织

熔覆层显微组织如图7所示。从图7可以看出,熔覆层非正火区的组织结构是粗大的柱状晶,组织成分也以铁素体为主,有少量的珠光体。产生柱状晶的原因有两个:其一是温度分布呈负温度梯度,即液相中的温度随至界面距离的增加而降低的温度分布状态;其二是界面前方出现了较大范围的成



a 非正火区



b 正火区

图 7 熔覆层显微组织

分过冷。

正火区的组织结构是均匀细小的等轴晶,其中的组织成分以铁素体为主(图中的白色),有少量的珠光体(图中的深色)。

### 2.3.2 显微硬度分析

在试样的顶部(图 4b 中试样上部),从上往下每隔 0.5 mm 测量一次显微维氏硬度,所得数值如图 8 所示。

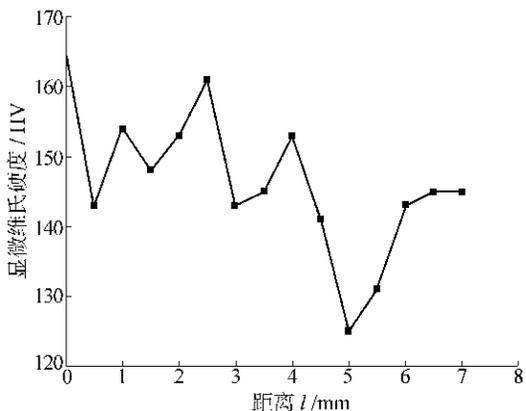


图 8 试样顶部从上往下的维氏硬度图

试样顶部的硬度分布比较均匀,维氏硬度值主要分布在 140~160 HV 之间。根据试样的显微组织结构分析,硬度较高的点应该是在熔覆层正火区,

因为正火区的组织经过正火以后晶粒变得均匀而细小;而硬度较低的点应该在非正火区,因为它的晶粒比较粗大。

在试样的中部(图 4b 中试样的中部),从左往右每隔 0.5 mm 测量一次显微维氏硬度,所得数值如图 9 所示。从图中可以看出,试样中部的硬度分布也比较均匀。

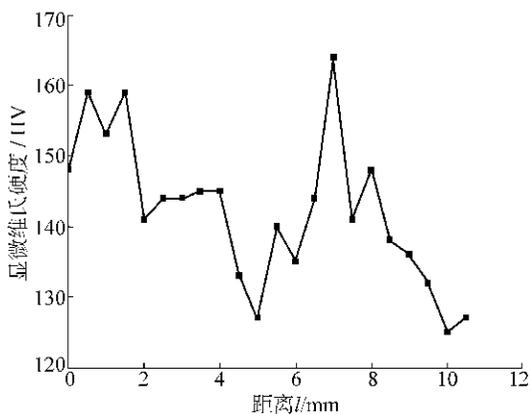


图 9 试样中部从左往右的维氏硬度图

## 3 结论

a. CO<sub>2</sub> 气体保护焊条件下,熔焊技术是可以用于快速成型的。

b. 得到了在平板上堆单道焊缝时,焊接工艺参数(焊接电流、焊接速度)与焊缝堆高、熔宽之间基本的数学关系式。

c. 得到了连续堆焊时焊接工艺参数与焊缝形状的基本关系式,由此可以根据预设的工艺参数来预测每道焊缝的平均宽度和平均高度,为后续的快速成型软件中的切片与路径算法等提供依据。

d. 堆焊成型能够得到组织致密的金属零件,但因为其过程属于金属的重熔、凝固的过程,每次成型的金属量比其他快速成型方式得多,故成型的速度方面具有明显的优势,但零件的成型精度、表面粗糙度这方面的效果相对较差。

### 参考文献:

- [1] 丁冬平,刘顺洪,周龙早.基于焊接的快速成形技术[J].电焊机,2004,34(6):30-35.
- [2] 百培康,史育红,程军,等.三维成型焊接快速制造技术[J].Weld Technology,1998(6):39-40.
- [3] 胡晓冬,赵万华,李涤尘,等.金属直接成型的发展与展望[J].工具技术,2001(10):3-6.
- [4] 姜焕中.电弧焊及电渣焊[M].北京:机械工业出版社,1988:81-82.