

文章编号: 1001-3806(2003)03-0193-04

## 激光填丝焊接焊缝成形质量控制系统研究\*

杨文广 刘 春 陈武柱 张旭东

(清华大学机械工程系, 北京, 100084)

**摘要:** 研究了激光填丝焊接中相关的工艺参数对焊缝成形质量的影响。比较了对接间隙宽度发生变化时控制送丝速度或焊接速度两种情况下获得焊缝成形的质量。结果表明, 间隙较小时调节送丝速度较好, 间隙宽度较大时则调节焊接速度为佳。针对高精度焊接条件下焊缝成形质量控制要求, 设计了一套以 80c51 单片机为核心的双单片机系统, 该系统在焊接过程中可根据坡口间隙宽度选择性地实时调节送丝速度或焊接速度, 以保证激光填丝焊接全过程获得良好的焊缝成形质量。

**关键词:** 激光填丝焊接; 焊缝成形质量; 双单片机系统

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A

### Study on the control system for the weld appearance quality during laser welding with filler wire

Yang Wenguang, Liu Chun, Chen Wuzhu, Zhang Xudong

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** The effect of the parameters on weld appearance quality during laser welding with filler wire is studied in the article. The appearance quality obtained by controlling the wire feeding speed is compared with that obtained by controlling welding speed during laser welding with variable gap width. The result shows that it is better to control wire feeding speed for narrower gap width, otherwise it is better to control welding speed for wider gap width. To meet the weld appearance quality requirement during high accuracy welding process, the double MCU system based on 80c51 is developed, which can adjust the welding parameters by gap width during welding process to assure benign weld appearance quality during laser welding with filler wire.

**Key words:** laser welding with filler wire; weld appearance quality; double MCU system

### 引 言

激光填丝焊接的研究主要是为了解决普通激光焊接方法中的一些困难和问题。采用填充焊丝具有降低激光焊接对工件预加工和装配的精度要求、改善焊缝组织及成形质量、扩宽激光焊接应用范围等优点。激光填丝焊接多用于较高精度焊接场合, 因此对焊缝的成形质量要求较高。焊丝填充量对焊缝成形有着很大的影响, 填充量过大, 焊缝凸起较大, 反之则会出现填充不足焊缝凹陷的现象。因此, 在高精度焊接过程中要求金属填充量能够根据焊缝坡

口变化而进行实时调整, 保证稳定精确的填充量, 以获得良好的焊缝成形<sup>[1]</sup>。

在激光焊接中, 由于待焊工件的装配精度, 板材的裁边状况不同, 对接坡口间隙会随机变化。因此, 需要设计一套能动态跟随焊缝坡口间隙变化而实时调整金属填充量的控制系统, 以保证焊缝成形质量。金属填充量可通过调节送丝速度和调节焊接速度两种方法来控制。激光填丝焊接对送丝精度和稳定性要求非常高, 现有的送丝系统多为半闭环控制, 只能保证送丝电机转速稳定而不能保证送丝速度稳定, 很难满足激光填丝焊接的要求。针对这种情况, 作者开发了一套基于 80c51 单片机的双闭环控制系统。该系统具有很高的精度和稳定性, 可同时送丝速度和焊接速度实行全闭环控制, 在焊接过程中可根据坡口间隙变化情况实时选择性地调整送丝速度或焊接速度, 改变金属填充量, 同时对焊丝打滑、卡丝等现象进行实时监测, 实现异常情况下对系统

\* 国家自然科学基金及 973 国家重点基础研究规划资助项目。

作者简介: 杨文广, 男, 1977 年 4 月出生。硕士研究生。主要从事激光焊接过程中的焊缝跟踪和焊接质量控制研究工作。

收稿日期: 2002-07-22; 收到修改稿日期: 2002-12-09

的保护。

### 1 系统设计

#### 1.1 设计原理

激光填丝焊接过程中,焊缝的成形质量主要与激光功率、装配间隙、焊接速度、送丝速度、送丝角度等参数相关<sup>[2]</sup>。在一定的激光功率、装配间隙、送丝角度范围内,可以通过调节送丝速度和焊接速度获得最佳的焊缝成形质量。通过工艺实验,实际的金属填充量可根据填充相应坡口间隙所需金属体积上浮 10% 来计算。当焊接速度固定时,送丝速度的计算公式如下:

$$v_f = 4.4 \frac{v_s S d_1}{\pi d_2^2} \quad (1)$$

式中,  $v_f$  为送丝速度(m/min),  $v_s$  为焊接速度(m/min),  $S$  为坡口间隙(mm),  $d_1$  为板厚(mm),  $d_2$  为焊丝直径(mm)。

同理,当送丝速度固定时,焊接速度的计算公式如下:

$$v_s = \frac{v_f \pi d_2^2}{4.4 S d_1} \quad (2)$$

根据(1)式和(2)式,在一定的板材厚度、一定的焊丝直径,只要知道焊接过程中的坡口间隙宽度就可以确定所需的送丝速度和焊接速度,从而控制金属填充量,保证焊缝成形质量。

送丝速度的稳定和准确是高精度焊接中获得良好焊缝成形的前提条件。一般的送丝系统可使送丝电机稳定运转,但由于焊丝与送丝驱动轮之间可能发生的相对滑动,对控制电机转速调节并不能完全实现送丝速度的精确控制,为了实现精确的送丝速度控制,送丝速度应能实现全闭环控制,因此,对送丝机构进行了如图 1 所示的改进设计。图 1 中在第 2 个从动轮上安装一编码盘,由于从动轮是通过摩擦力由焊丝带动旋转的,故编码盘能直接检测出实际的送丝速度并将速度信息反馈回单片机,可完全补偿送丝轮打滑、送丝阻力不均匀引起的送丝速度的波动,满足激光填丝焊对送丝速度高稳定性的要求。并可以监测卡丝等焊丝送进异常状态。

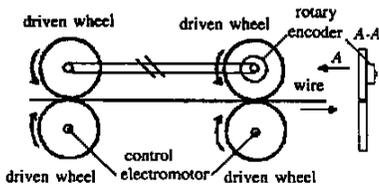


Fig. 1 The diagram of wire feeding system

#### 1.2 系统组成及原理

成形质量控制系统主要有坡口检测系统、送丝

速度闭环系统和焊接速度控制系统组成。其中坡口间隙检测系统由 PSD 光学传感器和 PC 机组成,其工作原理及技术性能可参阅参考文献[3]。填充量控制系统由以 80c51 为核心的双单片机系统组成,一个 80c51(MCU1)系统用于实现送丝速度的闭环控制,另一个 80c51(MCU2)系统用于实现焊接速度的控制。焊接过程进行时,利用串口通讯,填充量控制系统能够根据坡口检测系统检测到的坡口信息,按给定的数学模型调节送丝速度和焊接速度,并利用送丝反馈控制模块保证送丝速度调节的实时和稳定性能。系统原理框图如图 2 所示。

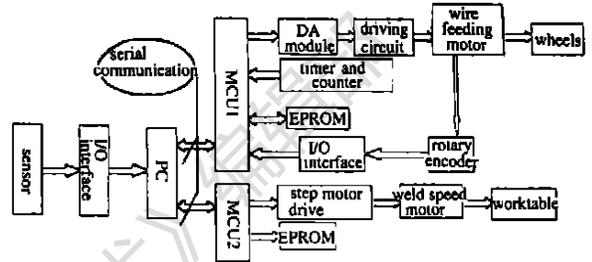


Fig. 2 The principle framework of control system

送丝反馈系统以 80c51 单片机为控制核心,其外围电路包括程序存储器、D/A 转换电路、计数器/定时器电路、译码电路等。D/A 芯片选用 8 位 DAC0832,经外围电路放大处理后对应 0V ~ 6V 的电压输出,计数/定时器采用 16 位计数/定时芯片 8253。I/O 接口主要有电机驱动接口电路和传感器与单片机间的接口电路。传感器采用 OMRON 的 E6A-CS200 系列编码盘,该编码盘每旋转 1 周可输出 200 个脉冲,最高响应转速可达 5000rpm。在激光填丝焊接常用送丝速度范围内该系统可保证送丝误差小于 0.08m/min(相对误差小于 5%),远高于开环送丝系统精度,可满足填丝焊接焊缝成形的精度要求和稳定性要求。

速度控制系统利用 80c51 单片机控制步进电机驱动脉冲频率,实现对焊接速度的控制。

### 2 实验结果及分析

实验采用 2mm 厚的普通低碳钢板,焊丝选用 H08Mn2Si,直径为  $\varnothing.7$ mm,保护气体为氩气,激光器采用 3kW 的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,激光输出模式为 TEM<sub>00</sub>+ TEM<sub>01</sub>,聚焦透镜为焦距  $f = 127$ mm 的 ZnSe 凸透镜。低碳钢板剪切后不对坡口进行其它预处理直接焊接,送丝角度(焊丝与工件表面夹角)基本保持 45°,采用后向送丝进行焊接。

为了验证系统工作的稳定性以及研究坡口间隙

变化时,调整焊接速度或送丝速度控制金属填充量来保证激光填丝焊缝成形质量的效果,进行了两组实验研究:(1)固定焊接速度,坡口间隙发生变化时,通过改变送丝速度控制金属填充量来保证焊缝成形;(2)固定送丝速度,坡口间隙发生变化时,通过改变焊接速度控制金属填充量来保证焊缝成形。

## 2.1 改变送丝速度控制金属填充量

采用 2kW 的激光功率焊接厚度为 2mm 的低碳钢,保持焊接速度  $v_s$  为 0.8m/min,坡口间隙  $S$  从 0mm 变化到 0.5mm。

为了进行对比,首先观察坡口间隙变化,而送丝速度固定不变的焊缝成形情况。送丝速度  $v_f$  为 0.915m/min(对应于  $S = 0.2\text{mm}$  的理论计算值),焊接后分别截取间隙宽度为 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm 处的焊缝截面,如图 3 中各图所示。由图 3 可知,在起始阶段(见图 3a)由于坡口间隙很小,焊丝熔化量大大高于间隙所需金属填充量,故焊缝凸起较大,随着间隙宽度  $S$  的增大,凸起逐渐变小且在后一阶段(见图 3d,图 3e)由于金属填充量不足而变为凹陷。大约在坡口间隙  $S = 0.2\text{mm}$  的截面上焊缝成形最理想,从而印证了作者在上述(1)式中提出的送丝速度  $v_f$  与坡口间隙  $S$  之间数学关系的合理性。由此可见,在一定激光功率、坡口间隙、焊接速度条件下,有一个最佳的送丝速度范围。



Fig. 3 Sections of the weld with variable gap width, fixed wire feeding speed and fixed welding speed

$P = 2\text{kW}$ ,  $v_s = 0.8\text{m/min}$ ,  $v_f = 0.915\text{m/min}$ ,  $d_1 = 2\text{mm}$ ,  $d_2 = 0.7\text{mm}$   
 a— $S = 0.1\text{mm}$  b— $S = 0.2\text{mm}$  c— $S = 0.3\text{mm}$   
 d— $S = 0.4\text{mm}$  e— $S = 0.5\text{mm}$

图 4 所示为根据传感器检测到的坡口间隙宽度值对送丝速度  $v_f$  进行实时调整的焊缝成形情况。从图 4 可以看出,除了间隙过大处( $S = 0.5\text{mm}$ )之外,在整个焊接过程中,焊缝的成形质量保持良好,没有较大的凸起和凹陷,且在焊接过程的后期(见图 4e,图 4d),即使工件对接坡口发生了错位变形,焊接过程仍能顺利进行,并且能保证良好的焊缝成形质量;在间隙宽度为 0.5mm 时,焊缝有一定凹陷,成形不够理想,其原因及解决办法下面再做分析。通过调节送丝速度控制金属填充量焊接变坡口间隙的焊缝全长外观如图 5 所示。

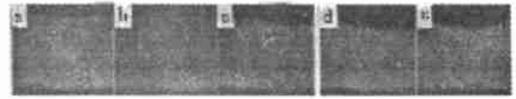


Fig. 4 Sections of the weld with variable gap width, variable wire feeding speed and fixed welding speed

$P = 2\text{kW}$ ,  $v_s = 0.8\text{m/min}$ ,  $d_1 = 2\text{mm}$ ,  $d_2 = 0.7\text{mm}$   
 a— $S = 0.1\text{mm}$  b— $S = 0.2\text{mm}$  c— $S = 0.3\text{mm}$   
 d— $S = 0.4\text{mm}$  e— $S = 0.5\text{mm}$



Fig. 5 Appearance of the full weld obtained by controlling wire feeding speed to adapt for variable gap width

## 2.2 改变焊接速度控制金属填充量

采用 1.8kW 的激光功率焊接厚度为 2mm 的低碳钢,焊接速度  $v_s = 0.5\text{m/min} \sim 1.5\text{m/min}$ ,保持送丝速度  $v_f = 1.5\text{m/min}$  不变。

为了进行对比,首先观察坡口间隙保持  $S = 0.2\text{mm}$  不变,焊接速度由 0.5m/min 增至 1.5m/min 焊缝成形变化情况。焊接后截取 5 段不同焊接速度的焊缝截面,如图 6 中各图所示。从图 6 可以看出,随着焊接速度的增大,焊缝表面由突起(图 6a)逐渐过渡到与母材表面平齐(图 6c)再到凹陷(图 6e),在  $v_s = 1.1\text{m/min}$  和  $1.3\text{m/min}$  时成形较理想,与由(2)式得到的理论计算值基本相符( $v_f = 1.5\text{m/min}$ ,  $S = 0.2\text{mm}$  时,  $v_s = 1.31\text{m/min}$ )。

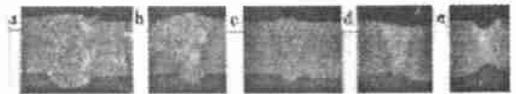


Fig. 6 Sections of the weld with fixed gap width, fixed wire feeding speed and variable welding speed

$P = 1.8\text{kW}$ ,  $S = 0.2\text{mm}$ ,  $v_f = 1.5\text{m/min}$ ,  $d_1 = 2\text{mm}$ ,  $d_2 = 0.7\text{mm}$   
 a— $v_s = 0.7\text{m/min}$  b— $v_s = 0.9\text{m/min}$  c— $v_s = 1.1\text{m/min}$   
 d— $v_s = 1.3\text{m/min}$  e— $v_s = 1.5\text{m/min}$

图 7 所示为根据传感器检测到的坡口间隙宽度值对焊接速度进行实时调整的焊缝成形情况。工艺参数为:1.8kW 的激光功率焊接厚度为 2mm 的低碳钢,坡口间隙  $S$  从 0.1mm 均匀变化到 0.5mm,保持送丝速度  $v_f = 1.5\text{m/min}$  不变,焊接后分别截



Fig. 7 Sections of the weld with variable gap width, fixed wire feeding speed and variable welding speed

$P = 1.8\text{kW}$ ,  $v_f = 1.5\text{m/min}$ ,  $d_1 = 2\text{mm}$ ,  $d_2 = 0.7\text{mm}$   
 a— $S = 0.1\text{mm}$  b— $S = 0.2\text{mm}$  c— $S = 0.3\text{mm}$   
 d— $S = 0.4\text{mm}$  e— $S = 0.5\text{mm}$

取间隙宽度为 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm 处的焊缝截面, 如图 7 中各图所示。从图 7 可看出, 除了间隙宽度很小 ( $S = 0.1\text{mm}, 0.2\text{mm}$ ) 的情况下, 通过控制焊接速度可以获得良好的焊缝成形。通过调节焊接速度控制金属填充量焊接变坡口间隙的焊缝全长外观如图 8 所示。



Fig. 8 Appearance of the full weld obtained by controlling welding speed to adapt for variable gap width

### 2.3 两种方案结果比较及分析

比较图 4 和图 7 可以发现, 当坡口间隙发生变化时, 通过调节送丝速度和焊接速度两种方法均可控制实际的金属填充量, 并在大多数情况下可获得优良的焊缝成形。但坡口间隙过大时 ( $S > 0.5\text{mm}$ ), 调节送丝速度的方法不理想 (见图 4e), 以调节焊接速度控制金属填充量方法相对较好 (见图 7e); 当坡口间隙过小时 ( $S < 0.2\text{mm}$ ), 调节焊接速度不理想 (见图 7a、图 7b), 以调节送丝速度控制金属填充量方法相对较好 (见图 4a、图 4b)。

产生上述现象的原因, 可以做如下分析。

(1) 当坡口间隙较大时, 在焊接速度不变的条件下, 由于填充坡口需要的金属量较大, 因此对应送丝速度较大。国外许多研究都已证明: 填充焊丝对激光束有反射作用, 而且送丝速度越大反射率越高<sup>[1]</sup>。送丝速度太大时焊丝对激光反射过大, 会使焊接过程稳定性下降, 恶化焊缝成形。所以, 此时不宜用提高送丝速度的方法来控制金属填充量, 而应在合适的送丝速度下, 通过调整焊接速度来控制金

属填充量。

(2) 当坡口间隙较小时, 在送丝速度不变的条件下, 对应的焊接速度较大, 造成焊接线能量过分减小, 不利于熔池的稳定建立, 影响了焊缝成形。所以, 此时不宜用提高焊接速度的方法来控制金属填充量, 而应在合适的焊接速度下, 通过调整送丝速度来控制金属填充量。

由上可见, 根据检测到的坡口间隙宽度, 选择性地控制送丝速度或焊接速度, 就可保证在变坡口间隙激光填丝焊接中获得全过程良好的焊缝成形。

### 3 结 论

(1) 设计的以双 80c51 单片机系统为核心的激光填丝焊控制系统具有高精度、高稳定性的特点, 可满足激光填丝焊接中对送丝和焊接速度实时快速、高精度控制的要求。(2) 根据检测到的坡口间隙宽度, 选择性地控制送丝速度或焊接速度, 可保证在变坡口间隙激光填丝焊接中获得全过程良好的焊缝成形: 对接间隙宽度较小时, 调整送丝速度来保证焊缝成形的方法优于调整焊接速度; 对接间隙宽度较大, 所需送丝速度过大时, 调整焊接速度保证焊缝成形的方法优于调整送丝速度。(3) 为了满足焊缝成形的要求, 焊丝填充量应按对接间隙体积再上浮 10% 计算。

### 参 考 文 献

(上接第 192 页)

制, 价格便宜, 有实际应用价值。

### 参 考 文 献

[1] 高峰, 朱建华, 黄奇忠 *et al.* 中国激光, 2001, 28(6): 556~558.

[1] Diltner U, Fuest D, Scheller W. *Opti & Quant Electron*, 1995, 27: 1181~1191.  
 [2] 左铁钊主编. 第 4 届全国激光加工学术会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 18~22.  
 [3] 文晓江, 刘春, 赵琳 *et al.* 传感器技术, 2001, 20(5): 41~43.

[2] 杨国栋, 顾本源. 物理, 1994, 23(4): 200~205.

[3] Jaroszewicz Z, Kolodziejczyk A, Mouriz D *et al.* *J Modern Optics*, 1993, 40(4): 601~612.

[4] Bryngdahl O. *J O S A*, 1974, 64(8): 1092~1099.

[5] 虞祖良, 金国藩. 计算机全息图. 北京: 清华大学出版社, 1984.