

# 电子束扫描控制系统

郭光耀, 刘方军, 韩瑞清

(北京航空工艺研究所 高能束流加工技术国防重点实验室, 北京 100024)

**摘要:** 设计了一个可编程电子束扫描控制系统, 能够使电子束受控的偏摆产生任何图形。该系统的控制软件能够计算、控制电子束偏摆获得所要的波形, 这些波形是由若干独立的数据点构成。使用该系统, 温度梯度可以很精确地调整, 且误差比较小。该系统可以很容易地应用于原有的电子束加工设备上, 适用于电子束硬化、重熔、钎焊和表面改性处理。

**关键词:** 电子束; 焊接; 钎焊; 扫描控制

中图分类号: TG441 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2003)01—91—03

郭光耀



## 0 序 言

电子束加工技术是高能束流加工技术的一种, 因电子束具有极高的能量密度, 是一种十分理想的焊接热源。目前, 电子束焊接已广泛应用于各工业领域, 随着电子束加工技术的进步, 其应用范围不断地拓宽, 在钎焊和表面改性中也得到了应用。但钎焊和表面改性均要求电子束能在一个较大的区域加热。现有的电子束加工设备尽管也具有扫描单元, 但由于扫描范围有限, 波形的种类相对较为固定, 无法扩展。这些扫描单元基本无法用于钎焊和表面改性处理。国外就这方面的研究起步较早, 并建立了若干扫描控制系统<sup>[1~4]</sup>。但均是电子束扫描铺展角度较小, 频率较低, 无法满足大面积加热的要求。针对以上的问题, 进行了电子束扫描控制系统的研究。最终建立了一套适于电子束大面积加热的扫描控制系统, 克服了原有系统扫描区域较小、频率较低的缺点。试验证明, 该系统功能良好。

## 1 扫描控制系统的原理和功能

电子束在二维磁场的作用下, 可以发生任何二维平面图形, 如果能控制电子束加工设备的聚焦电流, 也能扫描出三维图形。

作者所设计的电子束扫描控制系统, 将单片机嵌入外围控制电路中, 从而使系统具有充分的柔性。上位机采用工业控制计算机(IPC), IPC 负责计算波形的数据点、设定各控制数据以及下载数据和监控

系统状态。克服了原有的系统波形不可扩展的缺点, 能产生任意的波形, 且其偏转角度较大, 最大偏转角为  $14^\circ$ , 扫描频率较高, 最高可达 2 000 Hz。由于扫描频率较高, 其所生成的加热源可以认为是一个面热源。

### 1.1 控制电路的设计

该系统根据加工工艺所需要的波形计算出对应位于二维平面内的数据点, 然后再将波形数据送到外围电路的波形数据存储模块电路中。数据下载完毕, 启动扫描过程, 波形数据经数模转换, 转变为模拟信号, 经过功率放大, 将波形信号加在该系统的扫描偏转线圈上, 使电子束产生偏转, 获得所要的扫描图形。

外围电路以 MCS51 单片机为核心控制芯片, 波形数据的范围为 0~255, 对于一般的焊接该精度是十分高的, 对于加热范围为  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$  来说精度也是足够的。图 1 为控制电路的逻辑框图。

### 1.2 扫描线圈的设计

由数值计算得到的结论可知, 系统对正弦信号的频率至少在 500 Hz 以上时, 平面加热才可以认为是面热源, 此时所获得温度场的温度起伏较小, 当扫描的频率达到 1 000 Hz 时几乎可以认为没有温度的波动。为此所设计的扫描线圈的频率特性要比较好, 以便适应大面积加热时能够获得较为均匀的温度场。

所设计的扫描线圈综合了矩形线圈和鞍形线圈的优点并克服了它们的缺点<sup>[3]</sup>, 采用了多极靴结构, 即充分利用了磁场的强度, 又使线圈的体积最大限度地缩小, 便于在电子枪内安装。图 2 是扫描线圈的结构示意图。

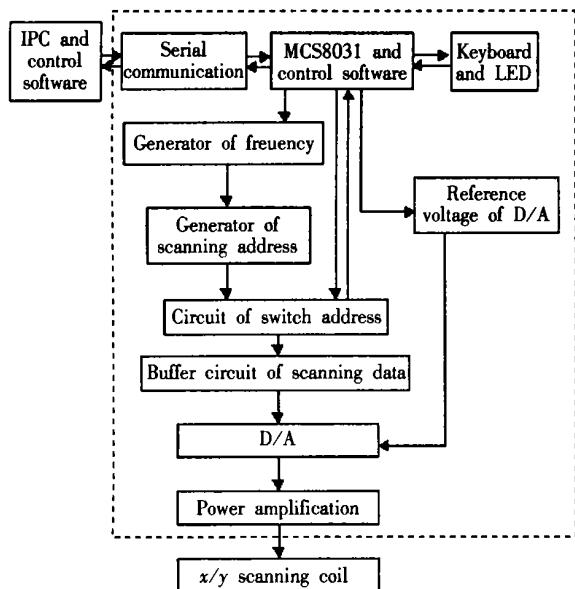


图 1 电子束扫描控制系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of control system of electron beam scan

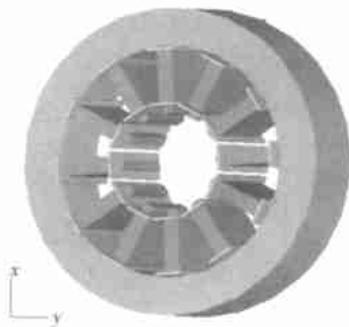


图 2 扫描线圈的结构示意图

Fig. 2 Diagram of structure of scan coil

系统所需磁感应强度的计算公式为

$$B = \frac{\sin \theta \cdot \frac{2m_0}{e} \cdot \sqrt{U^*}}{l}, \quad (1)$$

式中:  $B$  为磁感应强度;  $l$  为线圈的有效厚度;  $U^*$  为当量电压;  $\theta$  为偏转角度;  $m_0$  为电子的静质量;  $e$  为电子的电量。

将电子质量和电量代入式(1), 就得到计算式为

$$B = 3.37 \times 10^{-6} \frac{\sin \theta}{l} \sqrt{U^*}. \quad (2)$$

其中当量电压  $U^*$  可用式(3)进行计算, 即

$$U^* = U^{\circ} (1 + \xi U), \quad (3)$$

式中:  $U$  为加速电压;  $\xi$  为变换因子(对于电子该因子为  $9.77 \times 10^{-7}$  V)。

对于加速电压为 60 kV 的电子束加工过程, 其当量电压  $U_{60}^* = 61733$  V。

由磁感应强度可以推出线圈的安匝数计算公式为

$$IN = \frac{B_x \pi a}{k \mu_0 \sin(\alpha + \beta)}, \quad (4)$$

式中:  $I$  为电流强度;  $N$  为线圈的匝数;  $B_x$  为  $x$  向线圈的磁感应强度;  $k$  为线圈的形状因子;  $\alpha$  为高度方向的半张角;  $\beta$  为水平方向的半张角;  $a$  为线圈的内径;  $\mu_0$  为真空中的磁导率。

确定了线圈的安匝数之后, 可以确定线圈的匝数和额定电流。为了确保线圈的频率特性, 要求电源的电压应大于线圈的自感电动势。而线圈的自感电动势与电流强度成正比, 与线圈匝数的平方呈正比。为降低线圈的自感电动势, 应尽可能采用大的电流强度, 降低线圈的匝数。因此, 该线圈采用了 2 A 的电流为其额定电流, 每绕组线圈的匝数为 65 匝。在加速电压为 60 kV 时, 线圈电流为 2 A 时, 电子束偏角为  $14^{\circ}$ , 即工作距离为 500 mm 时, 偏转距离为 125 mm。

### 1.3 系统的上位机控制软件

该软件采用 Windows 作为操作平台, 用 C++ 语言编制<sup>[6]</sup>, 主要完成波形数据的计算、控制数据的设定、数据的下载、整个系统的监控。该软件能够完成任意波形的数据计算, 能够在十分小的范围内精确调整能量的输入, 从而获得所要求的温度分布。该软件的可调参数较多, 有利于电子束加工过程的调整, 使其应用范围比较宽。为了避免由于参数较多引起的设定困难, 各参数均有推荐使用的参数供选定。图 3 为控制软件的显示界面。

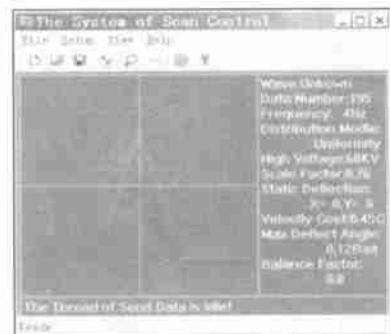


图 3 电子束扫描控制软件

Fig. 3 Software of control system of electron beam scan

### 1.4 扫描控制系统的功能

(1) 该控制系统的上位机计算波形数据, 能够产生任意波形, 电子束的最大偏角为  $14^{\circ}$ , 远远大于通常偏转单元的  $5^{\circ}$ , 这样可以使电子束覆盖较大平面, 进行大范围的加热。

(2) 该系统通过改变数据的间距来调整平面内某一区域的能量输入, 进而改变工件的温度分布, 应用该功能可以对同一工件中工艺要求不同的部位同

时进行局部处理。

(3)由于该系统能使电子束偏转较大的角度,且频率可调范围较宽,可以在工件不移动的情况下进行薄板的焊接。

(4)由于该系统的工作频率和偏转速度较高,可以将电子束分成几束,用来模拟脉冲电子束焊接,也可用来模拟双枪和多枪电子束加工过程。如将电子束沿焊接方向分为三束,前一束来预热工件,中间一束焊接工件,后一束对焊缝实施缓冷,这样就一次完成了三道工序,提高了效率。

## 2 试验验证

该系统经过调试后进行了试验以验证系统是否达到了设计的指标和所要求的功能。

### 2.1 电子束大面积加热试验

试验在中压电子束焊机上进行,工作距离为300 mm,所放置工件的尺寸为100 mm×100 mm×2 mm的不锈钢薄板。采用波形为实心圆形,覆盖整个加热区域,经红外测温加热基本均匀,最大温度起伏不超过20 K。图4为加热过程的示意图。

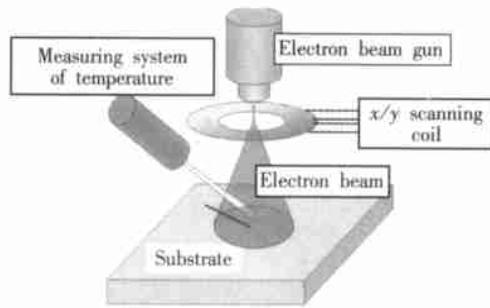


图4 加热过程示意图

Fig. 4 Diagram of heating

### 2.2 双束电子束焊接试验

试验采用2 mm厚的不锈钢板作为工件。将电子束分为两束,试验让两束电子束的停留时间相同,即能量输入相同。此时所获得的焊缝见图5。



图5 双束焊焊缝

Fig. 5 Seams of double electron beam welding

### 2.3 任意波形发生试验

该系统能够发生任意波形,尽管有些波形并不

能由控制软件直接计算获得,但可以利用复杂图形是由简单图形组合而成的原理,先计算简单图形,然后再合并产生复杂图形。图6所示的复杂波形就是由圆、半圆所组成的。



图6 扫描所获的复杂图形

Fig. 6 Complex figure of scan

该功能使焊接具有极高的柔性,可以焊接形状复杂的焊缝而不必借助于数控系统。

## 3 结论

通过对电子束扫描控制系统的研究,建立了一套偏转角度较大(可达14°)、扫描频率较高(可达2 000 Hz)的电子束扫描控制系统。所设计的上位机软件,能够控制该系统发生任意波形,且可实时调整波形以改变能量输入,从而实现对温度场的调整。所有这一切均为电子束加工技术在表面改性、钎焊的应用奠定了坚实的基础。同时,该系统具有较高的通用性,也可用于传统焊接领域。

## 参考文献:

- [1] Bahr M, Hoffmann G, Ludwig R, et al. New scan and control system (ESCOYSF) for high power electron beam techniques [J]. Surface and Coating Technology, 1998, 22(8): 1211~1220.
- [2] Steffen Keitel, Gotz Sobisch, Andreas Hankle, et al. Shaping of deflection figures of electron beam equipment [J]. Schweißen-Schneiden with English Translation, 1998, 50(80): 150~153.
- [3] Sanderson A, Nightingale K. High power EBW equipment and process trends [J]. Welding Journal, 1990, 69(4): 45~57.
- [4] Dilthey U, Bohm St, Mobner M, et al. Comparability reproducibility and protability of the electron beam technology using new tools of the diabeam measurement device [J]. Welding in the World, 1997, 39(3): 124~129.
- [5] 王之康,高永华,徐宾.真空电子束焊接设备及工艺 [M].北京:原子能出版社,1993.
- [6] 红锡军,陈彩贞,李从心. Windows下高精度定时的实现 [J].计算机应用研究,2000, 17(3): 96~97.

**作者简介:** 郭光耀,男,1975年9月出生,工学硕士。从事高能束流加工设备和高能束流加工过程仿真等研究工作。获省部级二等奖1项,发表论文5篇。

**Email:** guoguangyao@yahoo.com