

多角度自动热熔焊机研制中的几个关键问题

吴作伦,周卫民,吴瑞明,姜文彪
(浙江科技学院 机械与汽车工程学院,杭州 310023)

摘 要:通过对塑料压力管道多角度热熔焊机的基本构成及工作过程的分析研究,介绍了以工业控制计算机为核心的熔接机的自动控制系统,从工程需要出发,重点探讨了基于电液比例阀的控制系统及一些重要参数,完成了基于电液比例阀的多液压缸顺序控制,实现了焊接过程控制的自动化。

关键词:角度焊机;系统设计;电液比例阀;温度控制

中图分类号: TG432;TH137

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2008)04-0244-05

Key technology in development of automatic butt fusion angle welder

WU Zuo-lun, ZHOU Wei-min, WU Rui-ming, JIANG Wen-biao
(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,
Hangzhou 310023, China)

Abstract: According to analysis of structure and process of automatic butt fusion angle welder for plastics pipe, the automatic control system based on IPC is introduced. The control system is related to electro-hydraulic proportional valve. Parameters of butt fusion welding of plastic pressure pipe are different for varying pipe diameters and ambient conditions. The optimized control parameters for engineering need are developed. Through electro-hydraulic proportional valve, the multi-cylinder valve control and automatic butt fusion are realized. Test showed that the design meets the demand of plastics pipe automatic weld.

Key words: butt fusion angle welder; system design; electro-hydraulic proportional valve; temperature control

塑料压力管道多角度热熔焊机(简称角度焊机)主要用于燃气、给排水、石油化工等领域的以 PE、PP 为主要材质的大直径管状零件的焊接,在无需模具的情况下,以实现 2 个管状零件带有角度的连接

(包括角度为零度的对接),角度焊机主要由机械部件、液压和电气控制系统等组成。

根据对塑料焊接过程分析,发现除材料自身性能以外,温度、压力、时间也是影响熔接质量的重要

收稿日期:2008-11-03

基金项目:浙江省重点科研工业项目(2005C21091)

作者简介:吴作伦(1945—),男,浙江宁波人,教授,主要从事机械制造与设计的教学和研究。

因素,而且这三者的配合更成为影响熔接质量的关键问题^[1]。

1 概述

1.1 热熔焊接的工作过程

根据热熔焊接的工作原理^[2],焊机主要通过4个阶段完成管状零件的焊接:准备阶段、切削阶段、熔接阶段、完成阶段。

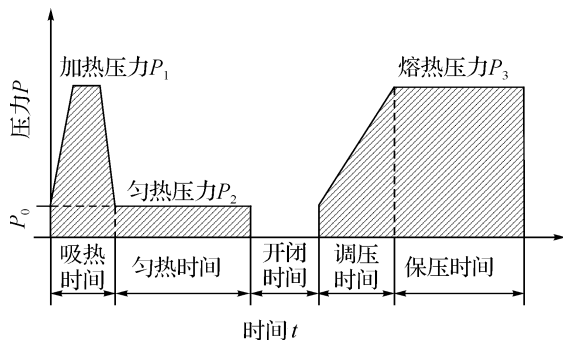
准备阶段:调整机座上的夹具角度,将焊接的管件夹紧,并检查工作台移动的压力 p_0 。

切削阶段:刀盘转动,根据不同材质的零件确定切削的速度。工作台以 $p_{切} = p_0 + (1 \sim 2) \text{ MPa}$ 前进,并切平管件2个端面,使2个端面保持平行且与其轴线垂直。

熔接阶段:刀盘翻转后,在压力 p 作用下使管件2个端面与热板两平面保持良好接触,当融化的塑料向两侧流动时,降低压力至 p_1 ,管件在完成吸热和匀热后,热板快速翻转到初始位置,在一定的压力下,使管件的2个端面融合在一起。

完成阶段:端面冷却后,拆下已熔接的管件,以 p_0 压力后退移动工作台。

在这一系列焊接过程中,熔接阶段最为关键,在这个阶段的压力是变化的,加热、熔接时间需要严格控制,其时序图如图1所示。



p_0 为最小拖动压力; $p_1 = p_0 + \text{接缝压力}$ (接缝压力 \leq 熔接压力); $p_2 = p_0 + \text{吸热压力}$ (吸热压力 ≈ 0); $p_3 = p_0 + \text{保压压力}$

图1 熔接过程图解

Fig.1 The process of butt fusion

1.2 热熔焊接的构成和运动分析

角度焊机机械部件主要是由机座部件1、刀盘部件2、热板部件3、夹具部件4和连接体部件5等组成(如图2所示)。和塑料压力管道热熔对接焊机相比,它主要用于大直径、2个管材间有一定角度要求的连接。为了达到不同的角度,可通过转动夹具来实现;若为了扩大焊接种类(如三通管件),可通过

变换夹具来获得。对于大直径的塑料管件制造用传统的注塑方法,生产设备与模具的费用是相当昂贵的,通过“以焊代注”的方法,可以满足单件或小批量生产需要。

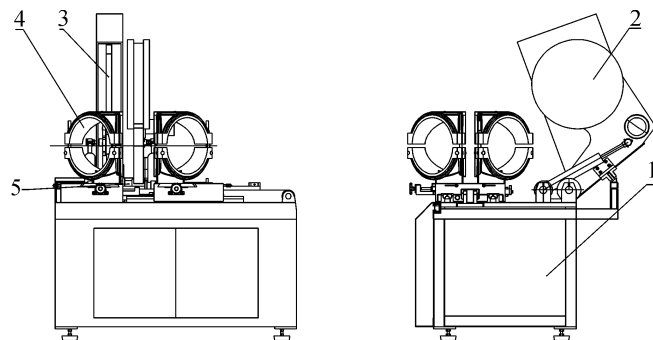


图2 角度焊机主要机械部件构成

Fig.2 The main mechanical structure of angle welder

从运动的角度分析,整个焊接过程需要有刀盘的旋转运动(用双面圆盘铣刀切削管件端面)、工作台的往复移动(用于实现切削、熔接管件)、刀盘部件和热板部件的移动与转动(使之在合适位置进行工作)。

1.3 熔接过程技术要求分析

如前所述,管件在熔接的不同阶段对压力的要求是不同的^[3]。根据相关试验数据表明,PE和PP管焊接接头的强度和熔融端面附近温度密切相关,当温度没有达到熔融温度时,二者不能很好粘接,当温度过高时将会发生降解现象,影响粘接后强度,因此焊接时必须控制好温度,使其达到塑料熔融温度,能够很好地融合,也要避免塑料在温度过高时的降解;而温度又和时间密切相关,譬如当热板加热管材到一定温度后,热板应快速(3~5 s)返回,工作台快速移动使管件二端面迅速接触,在极短的时间内压力快速上升,并作用于管件。这些工作必须准确完成,时间太长会影响管材表面温度的降低,降低了管材的黏合性。显然,采用液压传动完成上述多项运动是十分适宜的。

分析已有的角度焊机可以发现,其操作多以人工控制为主,工作效率低、劳动强度大、管道焊接的质量随机性大;小规格角度焊机的工作台移动虽采用液压传动,但刀盘部件与热板部件在安放位置与工作位置间的翻转靠人力进行。大规格角度焊机运动虽全部采用液压传动,但其运动是相对独立进行的,所用液压元件多、自动化程度低。此外,已有角度焊机的刀盘旋转运动是由电动机通过减速箱减速后再通过链传动给刀盘的,这种设计使刀盘的转速是固定的,不能适应不同管径材料切削速度的要求,

同时这种设计使刀盘部件一侧重量大大增加,易使刀盘产生倾斜现象;且刀盘部件转到工作位置后,必须用手动锁紧机构把刀盘部件与机座部件固定在一起,以防止刀片在切削管道端面时因受力方向变化而引起刀盘部件的转动及振动。

2 控制系统的总体设计

为了提高该机的自动化程度和质量的稳定性,

整个控制系统基于工业控制机,由液压与温度控制系统、数据采集/处理、参数设置、故障警示系统等组成。系统采用隔离变压器、光电耦合器等隔离技术,使整个系统具有电磁干扰屏蔽功能,并具有很强的扩展功能,如需考虑焊接现场环境温度及风速对焊接参数的影响,利用传感器测量出环境温度和风速,并根据这些参数修改储存于计算机的工艺参数等功能,如图 3 所示。

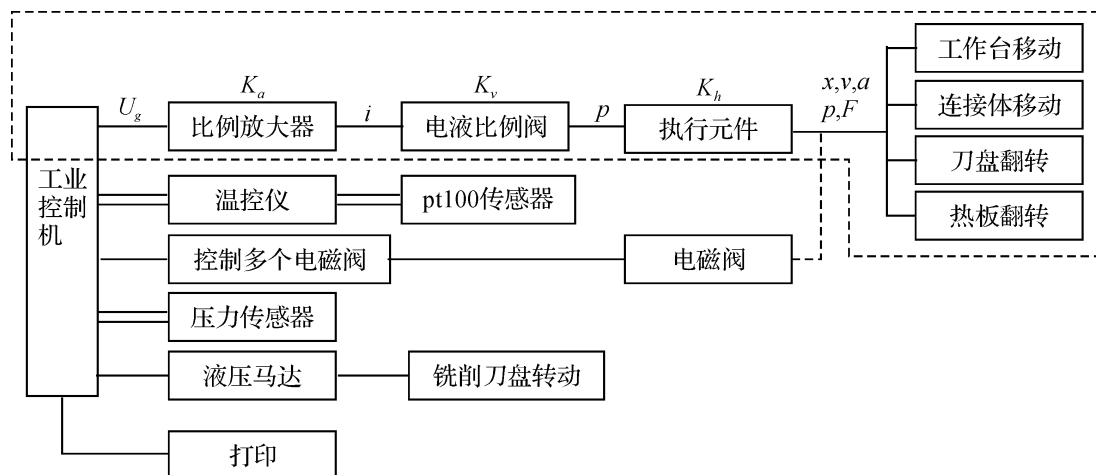


图 3 控制系统框图

Fig.3 The principle of control system

2.1 基于电液比例阀的液压系统设计

针对目前该类角度焊机在液压传动设计方面存在的不足,拟从以下几个方面对液压系统及其相关控制进行设计。

1) 角度焊机的各种运动尽可能地采用液压传动以简化对运动的控制。对刀盘部件与热板部件在安放位置与工作位置间的转动均采用液压控制摆动油缸来实现。对刀盘的旋转运动则采用液压马达直接通过链传动带动刀盘。

2) 为提高焊接过程的自动化程度,把原先相对独立的各运动进行连贯,通过对焊接过程各部件运动分析,整个液压控制系统中执行元件由 4 个油缸组成,而不同阶段 4 个油缸是依次动作的,由于在工作过程中,油缸的压力是变化的,因此在系统中采用电液比例系统控制油缸压力是比较理想的。如图 4 所示。

根据使用要求,系统对稳态精度和响应速度精度要求不是太高,但要满足一定的动作和工作压力要求,同时考虑企业今后的产业化要求,本系统选用基于国产比例溢流阀的开环控制系统。图 3 虚线框内构成比例阀的开环控制系统。开环控制系统不存在反馈控制,因此不存在稳定性问题,但需解决分辨

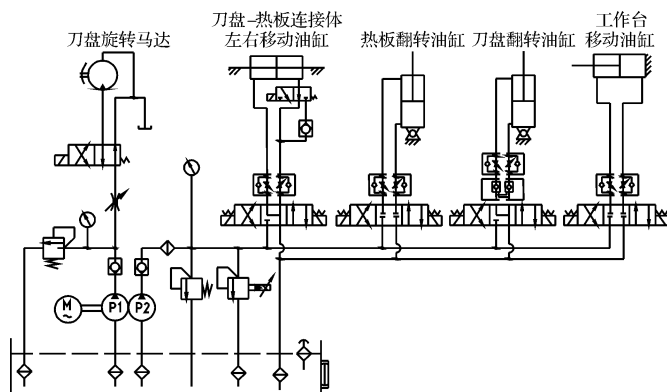


图 4 液压系统原理图

Fig.4 The principle of hydraulic system

率、灵敏度和系统增益问题,而这些参数对角度焊机是极为重要的。

开环控制系统增益是由工业控制计算机根据使用要求发出信号 u_g ,信号通过比例放大器,获得一定的增益,控制比例阀的阀芯的移动,达到控制流量和压力的目的,然后推动执行元件——油缸,使油缸按规定动作工作。组成开环控制系统的各个元件按串连方式连接起来,故开环控制系统的回路的增益是组成的各个元件的增益之积^[4-5]。

$$K_0 = \frac{Y_{\max}(t)}{X_{\max}(t)} = K_a K_v K_h \quad (1)$$

式(1)中: K_0 为开环控制系统总增益; K_a 为比例放大器增益, A/V ; K_v 为比例控制器增益, MPa/A ; K_h 为执行元件增益,对液压缸通常: $K_h = 1/A_h$; A_h 为液压缸的有效面积(m^2)。

根据液压系统的工作压力要求,由于工作台油缸的负载最大,压力变化要求高,以下计算以该油缸为例进行分析计算。系统比例阀选用由上海某企业生产的DBE10-30/20,其放大器输入为0~10 V,在电磁铁中产生100~800 mA电流,根据DBE的相应特性曲线,得到相应的额定压力为0~10 MPa,则:

$$K_0 = \frac{Y_{max}}{X_{max}} = K_a K_v K_h = \frac{800 \times 10}{10 \times 800} \times \frac{1}{19.63 \times 10^{-3}} = 0.51 \times 10^2 (MPa/Vm^2) \quad (2)$$

应该说当选定了比例阀(包括比例放大器)和液压缸的规格以后,其增益也就确定。

2.2 液压负载系统固有频率的估算

液压缸-负载系统可等效为一个弹簧质量系统,其中弹簧作用力是由封闭在液压缸中可压缩性介质产生,它的固有频率是电液比例控制系统极为重要参数,在一般情况下,液压缸-负载系统是电液比例系统动态响应最低环节。因此估算该系统的固有频率是很有必要的。对双出杆油缸系统的固有频率计算公式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/m} \quad (3)$$

式(3)中: f_0 为液压缸-负载质量系统的固有频率,Hz; K 为油液压缩形成的弹簧(称为液压弹簧)刚度, N/m ; m 为液压缸驱动的质量,kg。

其中,液压弹簧刚度主要由“受压缩”的油液体积决定,液压缸单侧液压弹簧刚度为

$$K = E \frac{A^2}{V} \quad (4)$$

式(4)中: V 为液压缸单侧容积; E 为液压油的弹性模量,Pa,取值在 $1 \times 10^9 \sim 1.4 \times 10^9$ 之间,在初步计算时求 f_0 极限值时,设计液压油的弹性模量 E 可先按 1.4×10^9 Pa代入式(4)。

双出杆液压刚度是液压二腔液压弹簧刚度之和,即

$$K = E \left[\frac{A^2}{A_1 \frac{L}{2}} + \frac{A^2}{A_2 \frac{L}{2}} \right] \quad (5)$$

由于 $A_1 = A_2 = A$,故

$$K = \frac{4EA}{L} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以知道,该系统的固有频率是由执行元件的结构尺寸(面积 A 、容积 V)和所驱动的负载质量所决定的。

$$\omega = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{4EA}{mL}} \quad (7)$$

在单出杆液压缸系统采用修正系数获得。

其系数为
$$\beta = \frac{1 + \sqrt{\alpha}}{2}$$

其中 $\alpha = \frac{A_R}{A_K}$, A_R 为环形面积, A_K 为活塞面积。

$$\omega = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{4EA}{mL}} \left(\frac{1 + \sqrt{\alpha}}{2} \right) \quad (8)$$

计算得油缸的活塞直径为50 mm,活塞杆直径为25 mm,属于单出杆液压缸的形式,其工作行程 $L = 240$ mm。

计算得: $\alpha = 0.75$, $f_0 = 50.2$ Hz, $\omega = 315$ rad

从式(8)可以看到,活塞与行程之比对液压缸-负载系统的固有频率有重要影响,从提高 f_{0min} 的角度考虑,应该选择较大的活塞面积和较小的行程,但它们受到结构和使用要求的影响,根据计算结果, f_0 能满足本系统使用要求。

2.3 固有频率对执行元件加减速过程的影响

液压执行元件所能达到的加减速度的极限值是由动力源提供的压力和液压缸-负载系统固有频率共同决定的。

在熔接过程中,根据加减速过程的速度变化量 Δv 为0.5 m/s,最大工作压力8 MPa,根据工程上加减速过程的时间 $t = (3 \sim 5) T_0$,求得时间常数为:

$$T_0 = \frac{1}{50.2} = 0.019 \text{ s}$$

取
$$t = 5 T_0, t = 0.095 \text{ s} \quad (9)$$

则
$$a_{max} = \frac{\Delta v}{t} = 5.26 \text{ m/s}^2$$

$$\text{对应的最小加速距离: } \delta_{min} = \frac{v^2}{2a_{max}} = 23.99 \text{ mm}$$

式中: Δv 为加减速过程的速度变化量,m/s; t 为加减速过程的时间,s。

负载的加、减速时间可调整比例放大器的斜坡发生器得到解决。

3 基于PID控制方式的温控设计

在温控设计上,可以根据被焊管道的不同材质、不同管径,熔接温度自由设定。由于温度控制精确与否直接关系到焊接质量,故加热板温度必须始终保

持在一定范围内。如焊接 PE 燃气管道的加热板温度为 $(210 \pm 10)^\circ\text{C}$, 研究表明, 采用 PID 控制方式可获得满意的效果。通过对输入量 $e(t)$ 采用比例、积分或微分不同策略控来制温度高低。其输出值 $m(t)$ 和输入量 $e(t)$ 可用式 (10) 表示^[4]:

$$m(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (10)$$

式 (10) 中: $K_p e(t)$ 为比例控制项, K_p 称为比例灵敏度; $\frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$ 为积分控制项, T_i 称为积分时间常数; $T_d \frac{de(t)}{dt}$ 为微分控制项, T_d 称为微分时间常数。

图 5 为 PID 控制系统原理图, 图中 r 为温度设定值, y 为实际测量值, e 为误差值, 即 $e = r - y$ 。在 PID 控制中, 初始阶段进行比例 (P) 控制, 达到一定温度后和设定值 e 相比较, 当误差量较大时不进行积分, 只计算比例项和微分项, 使系统较快速地趋向设定值; 当误差达到一定值之后, 采用 PI 控制策略, 加入积分增益项, 使稳态误差下降, 有效防止温度过高和超调。

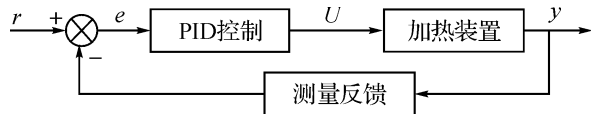


图 5 PID 控制原理图

Fig.5 PID control of angle welder

本研究中, 为了动态、实时获取热板的温度, 笔者采用热电阻 Pt100 传感器实测热板温度, 通过 PID 反馈设计, 控制温度。试验表明, P 值设置也是很重要的 (图 6), 它将有效解决加热温度的惯性问题, 在试验中设定 P 值为 20, 目标温度为 210°C (PE 管熔接温度), 此时于 $210 - 20 = 190^\circ\text{C}$ 之前 (即 $0 \sim 10 \text{ min}$), 输出将以全功率输出的方式执行, 到了 190°C 以后逐步自动减少功率, 防止过超现象。若将 P 值调得太小, 则将会产生温度加热过高的情形, 会造成上下过大的振荡现象。根据加热板实际的情况, 通过试验后予以确定。

由于采用工控机控制, 热板温度能即时、一屏动态显示, 与传统的控制相比, 不但缩小了体积, 增加了系统的可靠性, 而且易于掌握焊接过程, 提高了自动化程度。

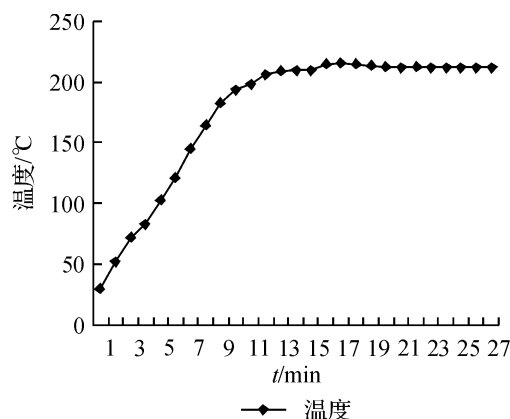


图 6 PID 温控图

Fig.6 Temperature control based on PID

4 结 语

试验表明, 以工业控制机为核心、基于电液比例阀控制系统构成的多角度自动热焊机, 能够解决热熔焊接参数较多、动作过程较复杂的问题, 实现了角度焊机的焊接过程自动化。计算多角度自动焊机开环控制系统的系统增益、固有频率等重要参数, 并进行理论分析, 对今后同类机械的设计有一定的指导意义。同时本控制系统留有较强的扩展功能, 为专家库及进行开发、实现远程在线监控网络等工作创造了条件。

参考文献:

- [1] 阳代军, 霍立兴, 张玉凤. 聚乙烯管道热熔自动对焊接工艺参数对焊接接头性能的影响[J]. 焊管, 2004, 27(1): 17-20.
- [2] 姜文彪, 周卫民, 吴作伦. 塑料管道热熔对接焊机的研制[J]. 机电工程, 2005(6): 4-7.
- [3] BUCKNALL C B, DRINKWATER I C, SMITH G R. Hot plate welding of plastics: factors affecting weld strength [J]. Polymer Engineering and Science, 1980, 20(6): 432-440.
- [4] 许益民. 电液比例控制系统分析与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 张利平. 液压控制系统及设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.