

基于伺服电机的 PE 管全自动热熔焊机控制系统研制

陶静¹, 栗昌鹏¹, 薛寒¹, 李双良¹, 文华斌¹, 王平^{1,2}

(1. 四川轻化工大学, 四川 自贡 643000;

2. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要: 【目的】传统液压全自动热熔焊机由于液压机的使用存在体积大、重量大、耗能高及环境污染等问题, 需要进行改进研发。随着伺服技术的快速进步, 现代伺服电机能够提供更高的扭矩, 同时具备卓越的控制精度、运行稳定性和过载能力。与传统液压机相比, 伺服电机具有体积小、重量轻及节能环保等显著优势。目前, 在众多应用领域, 伺服电机已经逐渐取代了传统的液压机, 成为新一代的动力来源。因此, 可基于伺服电机对传统液压全自动热熔焊机进行改进研发, 而基于伺服电机研发的 PE 管全自动热熔焊机与原有液压全自动热熔焊机在设备结构、动力转换方式及控制方式上存在显著差异, 需要重新研制控制系统。【方法】根据此需求, 文中所研制系统采用昆仑通态嵌入式工业触摸屏作为主控装置, 并以此为基础搭建了伺服系统、热板升降系统及温度采集与控制系统, 最后根据系统特点进行相应的控制软件设计。【结果】该文提出了一种更适用于该设备的新型焊接工艺。【结论】通过多次焊接测试和拉伸试验验证, 该控制系统能够使基于伺服电机研发的 PE 管全自动热熔焊机按标准工艺和新工艺进行合格的 PE 管焊接, 并且当使用新工艺进行焊接时, 能够降低设备使用低能耗同时延长设备使用寿命。

关键词: 伺服电机; 聚乙烯管; 热熔焊接; 控制系统; 新工艺

中图分类号: TG432 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20230524004](https://doi.org/10.12073/j.hj.20230524004)

Development of control system of PE tube automatic hot melt welding machine based on servo motor

Tao Jing¹, Li Changpeng¹, Xue Han¹, Li Shuangliang¹, Wen Huabin¹, Wang Ping^{1,2}

(1. Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China;

2. Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] Traditional hydraulic automatic hot melt welding machine needs to be improved because of problems such as large volume, large weight, high energy consumption and environmental pollution. With the rapid progress of servo technology, modern servo motors can provide higher torque, while having excellent control accuracy, operating stability and overload capacity. Compared with traditional hydraulic press, servo motor has obvious advantages of small size, light weight, energy saving and environmental protection. At present, in many applications, servo motors have gradually replaced traditional hydraulic press and become a new generation of power sources. Therefore, traditional hydraulic automatic hot melt welding machine can be improved and developed based on servo motor, and PE tube automatic hot melt welding machine based on servo motor have significant differences to original hydraulic automatic hot melt welding machine in the equipment structure, power conversion mode and control mode, which need to re-develop its control system. [Methods] According to this requirement, the system developed in this paper adopted Kunlun on-state embedded industrial touch screen as the main control device, and servo system, hot plate lifting system and temperature acquisition and control system were built on this basis. Finally, the corresponding control software was designed according to characteristics of the system. [Results] A new welding process that was more suitable for the equipment was also proposed in this paper. [Conclusion] Through many welding tests and tensile experiments, the control system could make automatic

收稿日期: 2023-05-24

基金项目: 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金资助项目 (GK202205); 安徽省工程机械智能制造重点实验室开放课题基金资助项目 (IMCM2023KF04)。

hot melt welding machine based on servo motor carry out welding of PE pipe qualified PE pipe according to the standard process and new process, and when the new process was used for welding, it could reduce the use of low energy consumption and extend service life of the equipment.

Key words: servo motor, polyethylene pipe, hot melt welding, control system, new technology

0 前言

在上个世纪 50 年代后期,国外开始将聚乙烯管材应用于输水,60 年代后期开始应用于燃气输送,至今已有近 60 年历史。中国在上个世纪 70 年代开始使用聚乙烯管,80 年代初,在改革开放的形式下,迎来了以聚乙烯管道代替钢管用于燃气输送的新时期^[1]。如今聚乙烯管凭借其使用寿命长、耐腐蚀、高韧性和重量轻等优秀性能,在城市建设中得到了更广泛的应用。在聚乙烯管道的各种连接方法中,热熔焊接是一种广泛使用的连接方式^[2-5]。目前,市面上的全自动化热熔焊机多为液压驱动,这种类型的热熔焊机都存在一些相同的问题如体积庞大、重量沉重、操作复杂、能源消耗较大及存在环境污染等^[6]。这些问题主要源自作为驱动装置的液压机本身具有体积庞大、重量沉重、操作复杂和需要使用液压油的特点。相比之下,现在的伺服电机则具备尺寸小巧、质量轻盈、控制精度高和节能环保的优势,并且随着技术不断发展也逐渐成为取代传统液压机提供驱动力的理想选择之一^[7]。而以伺服电机为主动力研制的热熔焊机在传动结构和控制方式上与液压热熔焊机存在显著差异,使得原有控制系统不再适用,需要重新研制。

1 热熔焊机结构介绍与机构动力转换说明

1.1 热熔焊机结构介绍

基于伺服电机所研制的全自动热熔焊机主体结构如图 1 所示,该设备的关键组件包括热板、夹头、伺服电机、减速器、导轨、控制柜、同步传动装置、丝杆、昆仑通态显示屏及铣刀。该设备所选用减速机传动比为 1 : 10,丝杠导程为 5 mm。设备在减速器、同步带装置和丝杠的作用下,实现动力传递。通过减速器放慢伺服电机转速的同时可放大扭矩,其放大倍数与传动比成反比。同步传动装置由同步带和同步带轮组成,可将减速器输出转速同步传递至丝杠。该设备本身具有一定的自锁性,在伺服电机停止运转后,夹头不会在外力作用下左右移动。夹头

上可以安装不同规格的夹具,以夹装不同管径的聚乙烯管。

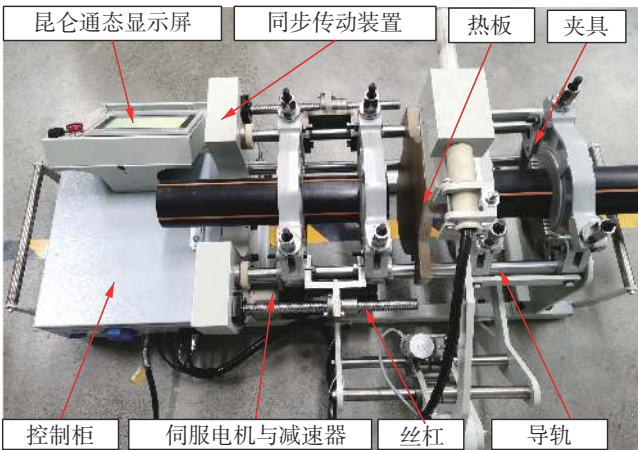


图 1 热熔焊机整体结构

Fig. 1 Overall structure of hot melt welding machine

1.2 机构动力转换说明

传动机构如图 2 所示,伺服电机产生的扭矩经由减速器放大,并通过同步传动装置传递至丝杠,最终转化为推动夹具左右移动的推力。

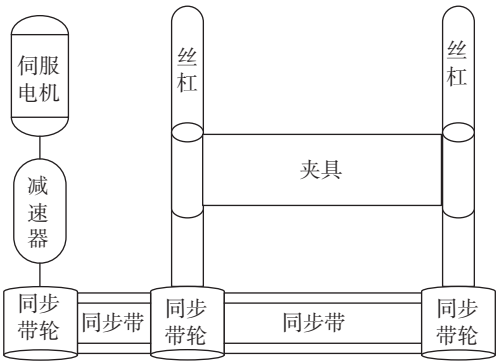


图 2 机构动力传递图

Fig. 2 Mechanism power transmission diagram

根据标准 CJJ 63—2018《聚乙烯燃气管道工程技术标准》,在焊接过程中,卷边力和焊接力的大小根据压强进行评估。为了实现对伺服电机输出扭矩的精确控制,需建立电机输出扭矩与所需焊接压强

之间的转换关系式。电机输出扭矩传递到夹具上所经过的传动机构如图2所示,设传动机构间动能损耗率为 η ,并考虑各传动装置特点,最终可基于能量守恒定律建立如下转换关系式:

$$FSI = 2\pi T\eta \quad (1)$$

$$P_{\text{压}} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中: F 为丝杠推力,N; S 为丝杠导程,m; T 为伺服电机输出扭矩,N·m; I 为减速机传动比; A 为焊接端口有效焊接面积,m²; $P_{\text{压}}$ 为焊接压力,MPa。

2 标准工艺介绍与基于伺服电机的新工艺探究

2.1 标准工艺介绍

在研制以伺服电机为动力基础的全自动热熔焊机控制系统之前,需深入了解聚乙烯管焊接的工艺流程^[8-9]。根据国家现行标准 GB/T 32434—2015《塑料管材和管件 燃气和给水输配系统用聚乙烯(PE)管材及管件对接程序》附录C和附录D可知,标准热熔焊接工艺流程如图3所示。在图3中, t_1 为卷边时间; t_2 为吸热时间; t_3 为切换时间; t_4 为增压时间; t_5 为焊接保压时间; P_{h1} 为总焊接压力; P_{h2} 为初始卷边压力; $P_{\text{拖}}$ 为拖拽压力。

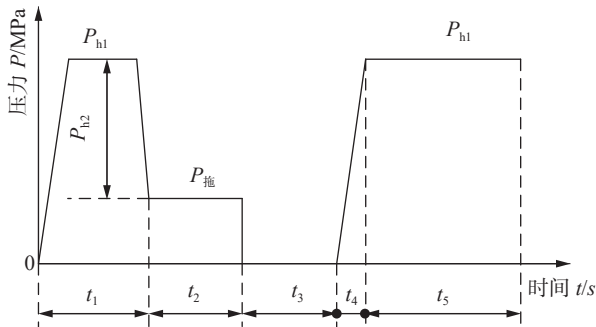


图3 标准焊接工艺流程图

Fig. 3 Standard welding process flow chart

2.2 新工艺探究

参考图3所示标准焊接工艺流程,并结合伺服电机特性与设备自锁特点可制定更适用于此设备的新焊接工艺流程,如图4所示。在图4中, t_1 为卷边时间; t_2 为吸热时间; t_3 为切换时间; t_4 为增压时间; t_5 为保压时间; t_6 为焊接压力施加时间; P_1 为总焊接压力; P_2 为伺服电机失能后吸热阶段设备所能保持压力; P_3 为伺服电机失能后冷却保压阶段设备所保持压力。

新工艺流程的各项要求基本与标准工艺相同,不同之处在于吸热阶段和冷却保压阶段后期,电机失

能不再提供标准工艺对应的压力,所需压力由设备自锁力提供。根据卢涛等学者^[10]的研究可知,新工艺流程中设备在吸热时间段自行泄压,泄压趋势如图4中 t_2 时间段所示。冷却保压阶段后期,管道焊接接头基本定型,文献^[10]可知,此时电机失能后设备也会自行泄压,泄压趋势如图4中 t_5 时间段所示。新工艺中冷却保压时间段后期的长时间失能可大幅度减少能量损耗,同时也能使设备在下次焊接前得到充分休息,从而延长设备使用寿命。

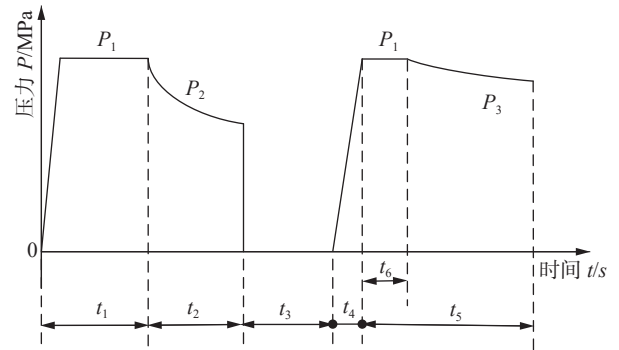


图4 新焊接工艺流程图

Fig. 4 New welding process flow chart

3 控制系统设计

3.1 系统结构设计

3.1.1 伺服系统

伺服系统由伺服电机和伺服驱动器组成,用以控制焊接端面左右移动与提供卷边和焊接所需压力。该PE管焊接设备最大焊接管径为160 mm,在此管径下所需焊接管壁最厚的PE管型号为SDR11,查阅标准CJJ 63—2018《聚乙烯燃气管道工程技术标准》中的管道参数可知,此类型管道壁厚为14.6 mm,所需焊接压强为0.15 MPa。在相同长度下,焊接此类型管道需要伺服电机提供的焊接力和拖动力最大。计算得管径为160 mm的SDR11型聚乙烯管的焊接端面面积为 $S_1 = \pi \times 2122.84 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。在理想情况下,焊接此类型管道所需焊接力为 $F_1 = \pi \times 2122.84 \times 10^{-6} \times 0.15 \times 10^6 \text{ N}$,将焊接力 F_1 代入1.2节中所列公式(1)中计算,在不考虑动能损耗情况下达到此焊接压力所需伺服电机扭矩约为0.079 6 N·m。考虑动能损耗和拖拽管道所需拉力,选定伺服电机额定输出扭矩为2.4 N·m。为保证焊接过程中切换阶段所需时间不超标,在满足额定输出扭矩情况下,伺服电机的额定转速应尽可能快,该系统中所选伺服电机额定转速为3 000 r/min。

而伺服驱动器选型时主要根据所选伺服电机的额定转速、额定扭矩及额定功率匹配选择。

伺服系统中伺服电机通过转轴的旋转运动输出动力,而焊接时夹头的运动形式为左右平移。为精准控制夹头平移运动所需的转速和角度,需要建立伺服电机转速和角度与夹头和速度位移之间的关系式。根据 3.1.1 节中所选伺服电机转速、1.1 节中所选传动装置特性及图 2 所示机构动力传递图可建立如下所示关系式:

$$V = 5\omega/600 \tag{3}$$

$$L = 0.5n \tag{4}$$

式中: V 为夹头位移速度, mm/s; ω 为电机转速, r/min; L 为夹头位移距离, mm; n 为电机旋转圈数。

3.1.2 热板升降系统

热板升降系统由 1 个电动推杆和 1 个四路继电器组成,后者控制前者带动热板进行升降运动。基于伺服电机所研发的该设备,最大可焊接直径 160 mm 的管道,根据此特点热板尺寸参考目前广泛使用的标准尺寸匹配购买。推杆参数见表 1,其中推杆所需的满载速度根据实测结果确定。

表1 电动推杆参数

Tab. 1 Parameters of electric push rod

满载速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	额定电压 U/V	额定推力 F/N
30	24	500

3.1.3 温度采集与控制系统

温度采集与控制系统由温控仪表、红外温度采集装置及热电偶接触式温度采集装置组成。红外温度采集装置实时采集焊接区域温度,热电偶接触式温度采集装置实时采集热板板温度,温控仪表通过后者反馈的温度信息实时控制热板升温 and 降温。经查阅相关标准和文献,不同型号聚乙烯管焊接时端面所需的热板加热温度一般在 200 ~ 240 ℃ 之间,由此可进行温度采集及控制系统中各装置选型。

根据要求,所选温控仪表与红外温度传感装置部分参数见表 2 和表 3。根据调查,目前热电偶接触式

表2 BEM702 温控仪表

Tab. 2 BEM702 temperature control instrument

分辨率 $T_r/^\circ\text{C}$	测温范围 $T/^\circ\text{C}$	测量精度 $\alpha(\%)$
1,0.1(可调)	0 ~ 1 370	±0.5

表3 MLX9061x 温度传感器

Tab. 3 MLX9061x temperature sensor

分辨率 $T_r/^\circ\text{C}$	测温范围 $T/^\circ\text{C}$	测量精度 $T_e/^\circ\text{C}$
0.02	-70 ~ 330	0.5(0 ~ 50) 时候

温度采集装置的可测温度范围一般在 0 ~ 240 ℃ 以上,满足使用需求,无需特别挑选。

3.1.4 主控系统

该设备主控系统中的主控装置是实现运算分析、系统通信、数据处理、人机交互等功能的核心部件。经全面调研多种控制装置后,选用深圳昆仑技创科技开发有限公司生产的 TPC7022Ni 型号嵌入式工业触摸屏作为主控装置,该屏幕的主要参数见表 4。该触摸屏采用四线电阻式设计,支持指尖点击进行功能选择,从而实现人机交互。同时,它具备 COM2 和 COM3 两路 485 通信接口,基于 Modbus 协议可以延伸出 2 条相同的通信线路,可更好满足控制系统的通信需求。

表4 TPC7022Ni 嵌入式工业触摸屏

Tab. 4 TPC7022Ni embedded industrial touch screen

名称	参数
液晶屏	7 英寸 TFT
分辨率	800×480
额定电压	24±20% VDC
额定功率	6 W
串口	COM1(232), COM2(485), COM3(485)
系统存储	128 M
最大数据采样频率	10 Hz
处理器	ARM 800 MHz
外观尺寸	203 mm×149 mm
机柜开孔	192 mm×138 mm

3.1.5 其他硬件

控制系统中其它硬件包括 RD-DH 型热敏微嵌入式打印机、固态继电器、急停开关及空气开关等。

3.2 系统软件设计

控制系统的软件设计主要包含焊接程序编写、建立模块间通信关系和人机交互界面设计。主控装置采用专用的 McgsPro 组态软件直接进行编程、调试、模拟等操作。

3.2.1 热熔焊接程序逻辑框图

热熔焊接程序逻辑框图如图5所示。热熔焊接过程分为前期准备和自动焊接两个阶段,前期准备部分主要通过人工完成管道夹持、端面铣削和铣削质量检查等工作。在确定端面铣削合格后,进入自动焊接阶段。

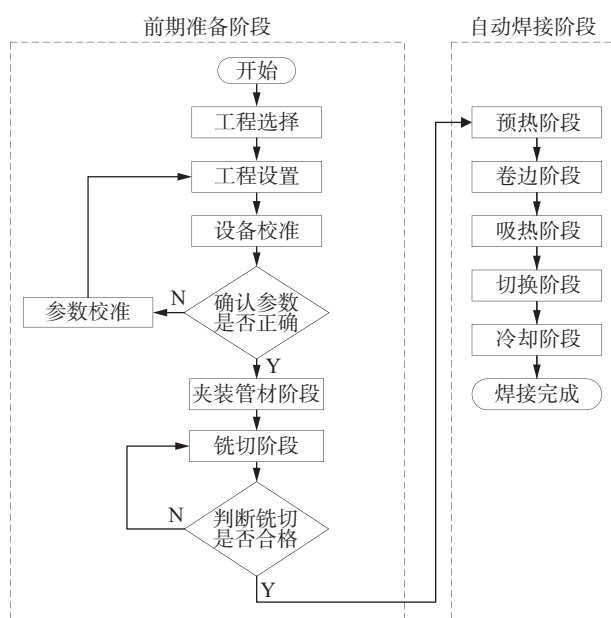


图5 热熔焊接程序逻辑框图

Fig. 5 Hot melt welding program logic block diagram

前期准备阶段,用户先在工程选择界面进行内外工程选择,以便后续信息识别。然后在工程设置界面输入焊接管道信息调用焊接参数。由于该设备没有位置传感器采集位置信息,用户需要在设备校准界面设置零点校准夹头位置。前置信息设置完成后,系统自动切换到参数确认界面,用户确认焊接参数正确再进入下一步。在管材夹装阶段,用户手动将管道装夹在夹具上,接着进入铣切阶段。铣切阶段用户可在界面上控制管材自动铣切,每次铣切完成后需检查铣切质量,确认合格后进入自动焊接阶段。

自动焊接部分完全由控制系统自行控制完成。预热阶段系统控制热板加热到预定温度后下降,之后进入卷边阶段。卷边阶段开始时,系统控制焊接端面快速靠近热板,接近后转为慢速靠近,同时测算管道拖拽压力大小,随后在算得的结果上增加一个卷边压力进行卷边。进入吸热阶段后,如果采用标准焊接工艺,系统将端面与热板间压力降至拖拽压力后开始记录吸热时间;如果采用新工艺,电机立即

失能并开始计时。吸热时间结束后进入切换阶段,此阶段系统先控制焊接端面与热板分离,随后控制热板上升,热板上升到一定高度后控制两焊接端面快速闭合并开始施加焊接压力,达到预定焊接压力后进入冷却阶段,同时开始冷却计时。使用标准工艺焊接时电机在冷却阶段持续施加力,使用新工艺焊接时电机在冷却阶段后期大部分时间失能。冷却时间达到后系统会提示焊接完成,并在结束界面显示焊接关键数据,帮助用户初步判断焊接是否合格。

3.2.2 系统通讯

系统间通信是将主控系统、伺服系统、热板升降系统和温度采集控制系统联系起来的关键桥梁。为提高开发效率,系统间通信全部采用 Modbus 通信协议,其通信关系图如图6所示。

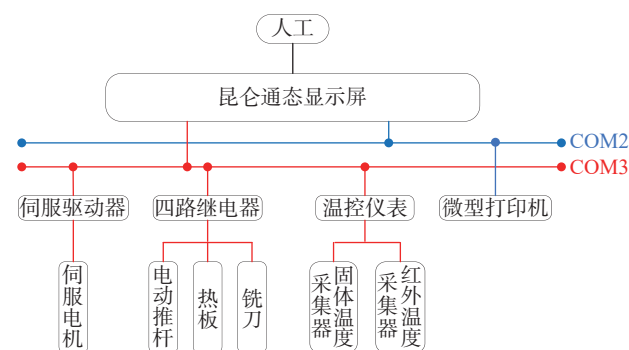


图6 通信关系图

Fig. 6 Communication relationship diagram

伺服驱动器、四路继电器和温控仪表均具有自身的通信地址,可以连接在显示屏延伸出的同一通信线路上。微型打印机没有通信地址,需要单独连接一条通信线路。

3.2.3 人机界面设计

主控装置的人机界面是控制系统的人机交互窗口,需要实时显示焊接过程中的关键参数,并可在非自动焊接阶段修改焊接参数。该主控装置采用 McgsPro 界面设计软件进行界面设计,设计完成后的操作界面总体预览如图7所示。所有操作界面可分为6个模块,如图8所示。

在6个模块中,焊接操作模块是实现焊接流程控制的主要模块,负责焊接过程中的各种信息处理和焊接动作控制,具体设计如图9所示。其它模块为辅助模块,用于操作引导、焊接参数设置、焊接错误提示和焊接数据储存等,以确保焊接操作模块能够顺利运行。

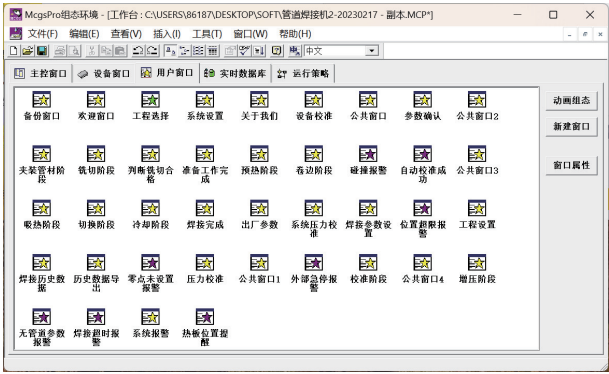


图7 控制系统用户窗口

Fig. 7 Control system user window

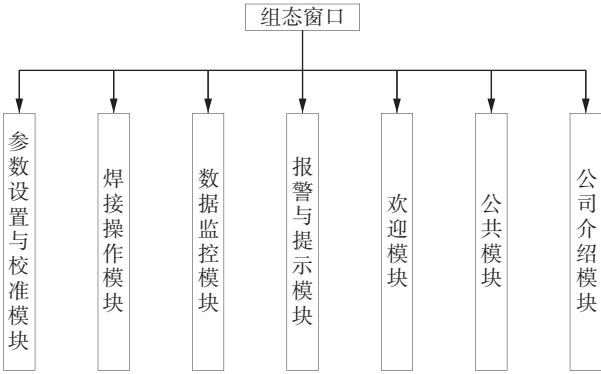


图8 操作界面分类

Fig. 8 Classification of the operation interface

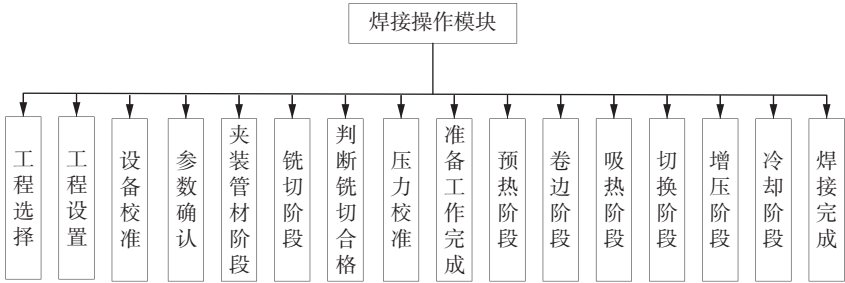


图9 焊接模块的窗口设计

Fig. 9 Window design of the welding module

4 焊接测试与拉伸试验

4.1 焊接测试与拉伸试验所用材料

系统开发完成后需要进行测试和试验以检验是否合格,该系统在测试和试验过程中采用的管道材料为PE100,管道型号为SDR11,管道直径为110 mm。

4.2 焊接测试

4.2.1 测试结果判断方法

采用基于伺服电机所研发设备进行焊接时,电机可实时反馈动力输出数据给上位机,反馈频率为100 ms/次。将上位机所得数据导出并处理后,可以得到自动焊接阶段设备输出压力与时间的关系曲线。通过分析该曲线,可以判断控制系统是否按照规定工艺流程控制设备焊接。

4.2.2 标准工艺焊接测试分析

图10中只展示了自动焊接阶段前200 s的设备输出压力与时间关系曲线,未展示部分的曲线与图10中的150~200 s段基本一致,不重复呈现。图10中, t_0 为拖拽力计算时间; t_1 为卷边时间; t_2 为吸热时间; t_{34} 为切换与增压时间; t_5 为部分保压时间。

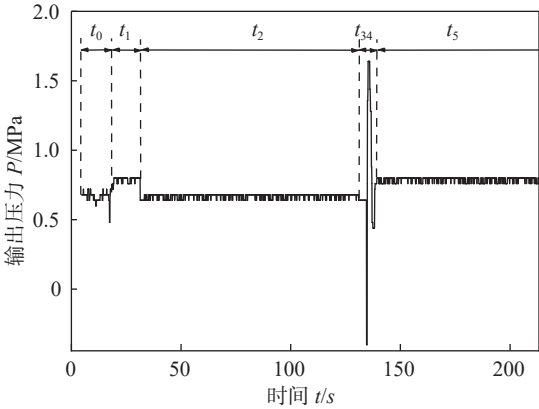


图10 采用标准焊接工艺时设备压强输出与时间关系图

Fig. 10 Relationship between equipment pressure output and time when standard welding process was adopted

表5中的标准工艺焊接参数来自CJJ 63—2018《聚乙烯燃气管道工程技术标准》,实测参数通过分析图10曲线得到。

通过分析图10可以看出,使用标准焊接工艺时,控制系统可以在需要平稳压力的卷边阶段、加热阶段和保压阶段使设备压力输出保持稳定。将表5中的

表5 标准工艺中管材焊接标准参数与实测参数

Tab. 5 Standard parameters and measured parameters of pipe welding in standard process

参数 类型	吸热时间 t_2/s	切换时间 t_3/s	增压时间 t_4/s	保压时间 t_5/s
标准	100	≤ 6	< 7	≥ 840
实测	100	2.7	1.9	840

标准参数与实测参数进行对比,可知控制系统能够控制设备实现标准焊接工艺所要求的各项时间参数。

4.2.3 新工艺焊接测试分析

图 11 中的设备输出压力与时间关系曲线展示情况与图 10 基本一致。使用新工艺焊接时,电机在卷边阶段和保压阶段后期失能,无法向上位机反馈动力输出数据。因此,根据电机反馈数据绘制的压力输出与时间关系曲线中,这 2 个阶段的压力输出显示为零。图 11 中, t_0 为拖拽力计算时间; t_1 为卷边时间; t_2 为吸热时间; t_{34} 为切换与增压时间; t_5 为部分保压时间; t_6 为保压期间压力输出时间。

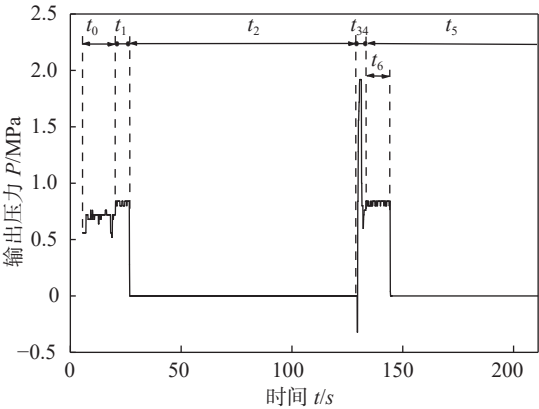


图 11 采用新焊接工艺时设备压强输出与时间关系图
Fig. 11 Relationship between equipment pressure output and time when the new welding process is adopted

新焊接工艺与标准焊接工艺仅在吸热阶段和保压阶段的压力施加情况上有区别,其各阶段的焊接参数要求与标准工艺相同。因此,表 6 中的标准参数与表 5 的标准参数相同,表 6 中的实测参数通过分析图 11 得到。

通过分析图 11 可以看出,使用新工艺焊接时,控制系统可以在需要平稳压力的卷边阶段和保压阶段

表6 新工艺中管材焊接标准参数与实测参数

Tab. 6 Standard parameters and measured parameters of pipe welding in the new process

参数 类型	吸热时间 t_2/s	切换时间 t_3/s	增压时间 t_4/s	保压时间 t_5/s
标准	100	≤ 6	< 7	≥ 840
实测	100	2.5	1.3	840

前期使设备压力输出保持稳定,并及时在需要失能的吸热阶段和保压阶段后期进行失能。将表 6 中的标准参数与实测参数进行对比,可知控制系统能够控制设备实现新焊接工艺所要求的各项时间参数。

4.2.4 焊接测试结论

通过对标准工艺和新工艺焊接的测试和分析可知,该控制系统能够按照 2 种工艺的要求控制设备进行焊接。

4.3 拉伸试验

把选定管材分别按标准焊接工艺和新焊接工艺进行多次重复焊接,将所得焊接管道以及未焊接管道参照 GB/T 8804.3 标准中的试样类型 1 进行试样制备,并在此基础上将焊缝处截面积减小,以便拉伸过程中获取焊缝处的抗拉强度^[11-12]。改进后的试样如图 12 所示,未标注尺寸与所参照标准一致。最后按 GB/T 8804.3 标准中的拉伸要求进行拉伸试验,并依据 GB/T 19810—2005 标准对拉伸结果进行分析。拉伸试验所用设备为美特斯工业系统(中国)有限公司生产的 CMT5504 型微机控制电子万能试验机。

从图 13 的应力-应变曲线可以看出,尽管采用新工艺和标准工艺焊接后的管道拉伸应变较未焊接管道小,但所有焊接管道和未焊接管道的拉伸历程基本一致都包含了弹性变形、材料屈服、变形扩展、材料强化及试样断裂等阶段属于韧性断裂^[13-15]。此外,从表 7 的数据可以看出,使用标准工艺和新工艺焊接出的管道抗拉强度高于未焊接管道。这表明系统能够使用新工艺和标准工艺焊接出合格管道,且新工

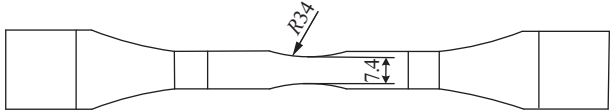


图 12 改进后试样
Fig. 12 Improved sample

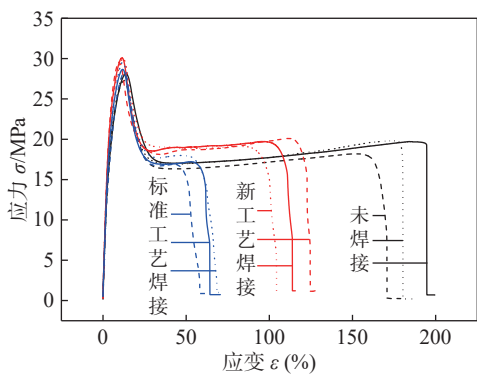


图 13 标准工艺焊接、新工艺焊接及未焊接管道拉伸应力-应变图
Fig. 13 Tensile stress-strain diagram of standard process welding, new process welding and unwelded pipe

表 7 标准工艺焊接、新工艺焊接及未焊接管道抗拉强度
Tab. 7 Tensile strength of standard process welding, new process welding and unwelded pipe

类型	抗拉强度 R_m /MPa	
	测量值	平均值
未焊接	28.12, 27.31, 27.97	27.80
新工艺焊接	30.10, 29.61, 29.98	29.87
标准工艺焊接	28.65, 28.23, 29.56	28.81

艺在加热阶段和冷却保压阶段后期的失能对管道最终焊接结果影响不大。

5 结论

(1)通过分析基于伺服电机研发的 PE 管全自动热熔焊机结构特点和各机构之间的传动关系,设计了一套适用于该类型热熔焊机的控制系统。

(2)根据伺服电机特性和设备自锁性能,提出了一种适用于该类型焊接设备的新焊接工艺。采用新工艺可大幅降低焊接过程中的能量损耗,同时使设备在连续焊接中得到充分休息,从而延长使用寿命。

(3)通过测试和试验证明:该系统能够控制基于伺服电机研发的 PE 管全自动热熔焊机,使用标准工艺和新工艺焊接出合格的管道。

参考文献

[1] 同华, 邢士波, 王相民, 等. 聚乙烯管(PE 管)技术发展与展望 [J]. 中国新技术新产品, 2014(15): 75 - 75.
Tong Hua, Xing Shibao, Wang Xiangmin, et al. Development and prospect of polyethylene pipe (PE pipe) technology [J].

New Technology & New Products of China, 2014(15): 75 - 75.

[2] 宁家成, 柳春琦. 聚乙烯管材发展近况 [J]. 塑料工业, 2002, 30(2): 1 - 3, 7.
Ning Jiacheng, Liu Chunqi, Recent development of polyethylene pipe [J]. China Plastics Industry, 2002, 30(2): 1 - 3, 7.

[3] 李广印, 包文红, 赵晓隆, 等. 焊接缺陷对聚乙烯管道焊接接头强度的影响 [J]. 焊接, 2022(6): 59 - 64.
Li Guangyin, Bao Wenhong, Zhao Xiaolong, et al. Influence of welding defect on strength of welded joint of polyethylene pipeline [J]. Welding & Joining, 2022(6): 59 - 64.

[4] 段颢颀, 赖焕生, 林榕, 等. 中密度聚乙烯管焊接裂纹力学性能试验研究 [J]. 压力容器, 2021, 38(2): 1 - 6, 21.
Duan Jiehang, Lai Huansheng, Lin Rong, et al. Experimental study on mechanical properties of weld crack of medium density polyethylene (MDPE) pipe [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(2): 1 - 6, 21.

[5] Lai H S, Tun N N, Yoon K B, et al. Effects of defects on failure of butt fusion welded polyethylene pipe [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 139/140: 117 - 122.

[6] 胡兵, 黄钊, 豆利军, 等. 全电伺服智能热熔对接焊机、系统及方法: 中国, CN201810995823.0 [P]. 2020-06-09.
Hu Bing, Huang Zhao, Dou Lijun, et al. All-electric servo intelligent hot melt butt welding machine, system and method: China, CN201810995823.0 [P]. 2020-06-09.

[7] 陈俊宇. 机械伺服精冲机设计与优化研究 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2023.
Chen Junyu. Design and optimization of mechanical servo fine blanking machine [D]. Wuhan, China: Wuhan Textile University, 2023.

[8] 边娟娟. 1200 型 PE 管热熔焊机控制系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017(10): 65 - 68.
Bian Guange. The type 1200 PE pipe hot melt welding machine control system design [J]. Automation & Instrumentation, 2017(10): 65 - 68.

[9] Kimel' Blat V N, Volkov I V. Heated tool butt welding of polyethylene pipes [J]. Welding International, 2018, 32(10/12): 738 - 742.

[10] 卢涛, 文华斌, 张欣欣, 等. PE 管道热熔焊接工艺参数的实验 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 69 - 74.
Lu Tao, Wen Huabin, Zhang Xinxin, et al. Experimental on technological parameters of hot melt welding of PE pipe [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 69 - 74.

(下转第 25 页)

- gap GMAW with swing arc system in horizontal position[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74: 297 – 305.
- [9] Mahmood N Y, Alwan A H. Mechanical properties improvement of MIG welding steel sheets using Taguchi method[J]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 20(1): 66 – 73.
- [10] Ogbonna O S, Akinlabi S A, Madushele N, et al. Grey-based taguchi method for multi-weld quality optimization of gas metal arc dissimilar joining of mild steel and 316 stainless steel[J]. *Results in Engineering*, 2023, 17: 100963.
- [11] 徐起, 唐新华, 刘国强, 等. 电弧摆动对窄间隙 GMAW 横焊打底焊道成形的影响 [J]. *焊接*, 2020(1): 13 – 20.
- Xu Qi, Tang Xinhua, Liu Guoqiang, et al. Influence of arc-swing on backing bead formation of narrow-gap GMAW in horizontal position[J]. *Welding & Joining*, 2020(1): 13 – 20.
- [12] 毛志伟, 徐伟, 周少玲, 等. 基于田口方法旋转电弧焊接工艺参数优化 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45(11): 169 – 173.
- Mao Zhiwei, Xu Wei, Zhou Shaoling, et al. Optimization of rotating arc welding parameters using Taguchi method[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(11): 169 – 173.
- [13] 蒋爽, 江国业. 高功率激光焊接 X65 管线钢的接头组织与性能 [J]. *热加工工艺*, 2023, 52(19): 111 – 114.
- Jiang Shuang, Jiang Guoye. Microstructure and properties of X65 pipeline steel joint welded by high power laser[J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(19): 111 – 114.

第一作者: 张明泽, 硕士研究生; 主要从事焊接装备自动化与智能化研究; 1622484257@qq.com。

通信作者: 罗雨, 博士, 副教授; 主要从事特种焊接机器人、焊接装备自动化及智能化的研究; 已发表论文 20 余篇; luoyu@bipt.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

张明泽, 罗雨, 叶朔朔, 等. 基于旋转电弧的窄间隙横焊打底工艺[J]. *焊接*, 2024(6): 17 – 25.

Zhang Mingze, Luo Yu, Ye Shuoshuo, et al. Backing process of narrow gap horizontal welding based on rotary arc[J]. *Welding & Joining*, 2024(6): 17 – 25.

(上接第 16 页)

- [11] 赵兴民, 赵建平, 燕集中. 高密度聚乙烯管热熔焊接接头本构模型研究 [J]. *中国塑料*, 2021, 35(4): 65 – 71.
- Zhao Xingmin, Zhao Jianping, Yan Jizhong. Study on constitutive model for butt fusion welded joint of high-density polyethylene pipe [J]. *China Plastics*, 2021, 35 (4): 65 – 71.
- [12] 杨绪逢, 徐善军. 聚乙烯管道热熔对接焊接工艺研究 [J]. *工程与试验*, 2021, 61(1): 97 – 100.
- Yang Xufeng, Xu Shanjun. Study on butt fusion joining procedure for polyethylene pipe[J]. *Engineering & Test*, 2021, 61(1): 97 – 100.
- [13] 何慧娟. 含缺陷聚乙烯燃气管道热熔接头力学性能研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- He Huijuan. Study on mechanical properties of hot melt joint of gas pipeline containing defective polyethylene [D]. Chengdu, China: Southwest Petroleum University, 2015.
- [14] Leskovics K, Kollár M, Barczy P. A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2006, 419(1/2): 138 – 143.
- [15] 闵文. 含工艺缺陷 PE 管道热熔焊接接头失效机理分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- Min Wen. An analysis on failure mechanism of polyethylene pipe butt fusion joints with process defect [D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2015.

第一作者: 陶静, 博士; 主要从事机械优化设计、控制系统设计与研发; taojing@suse.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

陶静, 栗昌鹏, 薛寒, 等. 基于伺服电机的 PE 管全自动热熔焊机控制系统研制[J]. *焊接*, 2024(6): 9 – 16, 25.

Tao Jing, Li Changpeng, Xue Han, et al. Development of control system of PE tube automatic hot melt welding machine based on servo motor[J]. *Welding & Joining*, 2024(6): 9 – 16, 25.