安装位置导管感应钎焊

张 伟 齐铂金 金玉兰 张 瑾

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 在某型号飞机的总装现场,部分导管的连接是在飞机上装配焊接而成的,传统固定式感应钎焊设备已经不能满足现场安装焊接工艺的要求. 针对安装位置导管感应钎焊的特点,研究开发了专用的低损耗功率延伸电缆、钎焊温度的光纤实时测量与控制系统,以及大功率超音频感应加热逆变电源等相关技术,在此基础上研制出了一套安装位置导管感应钎焊设备,并且完成了飞机装配现场的工艺研究. 结果表明:该设备及其成套技术完全能够满足导管接头焊接质量的要求,已经成功应用到了该型号飞机安装位置导管钎焊生产线上.

关 键 词: 感应钎焊; 导管连接; 逆变电源; 温度控制; 功率延伸电缆

中图分类号: TG 439. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)02-0242-05

On-site induction brazing of tubes

Zhang Wei Qi Bojin Jin Yulan Zhang Jin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In a plane factory, some tubes connection is in the plane by welding. Traditional induction brazing device with a fixed coil could not adapt this new process. Considering the characteristic of on-site induction brazing of tubes, a set of equipment and related technologies were developed, including a special low loss connecting power cable, a precise measurement and control system of brazing temperature with a fiber, and an ultrasonic induction heating inverter, and necessary experiments were done. The results show that this device and related technologies can satisfy the welding quality and is successfully applied in the factory.

Key words: induction brazing; tubes connection; inverters; temperature control; connecting power cable

1 安装位置导管感应钎焊简介

安装位置导管感应钎焊技术是为了适应航空、航天飞行器中导管的现场安装而提出的一种特殊的工艺技术,它采用夹具固定导管,并通过夹具和导管输送惰性气体保护钎焊接头的内外表面,软式电缆在夹具上绕制成感应圈,内部通水并与功率延伸电缆相连进行感应钎焊(如图 1 所示). 该技术适用于空间位置狭窄的导管钎焊,是一种先进的导管连接技术.

收稿日期: 2004-06-20

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3022007)

作者简介: 张 伟(1977-),男,四川自贡人,博士生, zhangwei@ me. buaa. edu. cn.

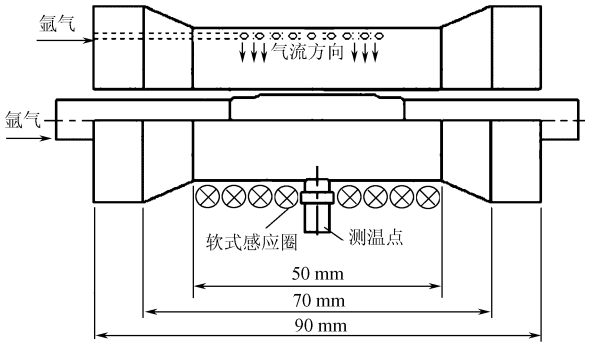


图 1　安装位置导管感应钎焊示意图

由于该项技术研发于 20 世纪 70 年代,受当时加热电源及其控制技术、温度检测及控制技术以及高频大电流传输技术等技术水平的局限,系统传输电缆损耗大,整机工作效率低,温度测量信号易受干扰,温度控制的波动较大,并且设备的体积庞大,不易移动,在焊接前需开机预热,实际使用中操作不方便,维护困难[1].

目前,国内尚未针对这一技术研制出配套的钎焊设备及相关控制技术. 传统的感应钎焊工艺及配套设备主要存在以下不足:

1) 感应钎焊大都为固定钎焊,而导管钎焊现场有一部分导管的安装位置空间十分狭小,可达性差,固定钎焊感应圈不易安装. 在实施焊接的过程中难以对导管进行保护,并且焊后难于拆卸,不能满足现场安装焊接工艺的要求;

2) 高频大电流传输技术落后,目前尚没有专用的低损耗功率延伸传输电缆;

3) 温度测量和信号传输技术落后,温度控制精度难以保证,焊接质量不稳定.

本文采用绝缘栅双极晶体管(IGBT)逆变技术,研制了一套先进的安装位置导管感应钎焊技术,配合专门设计的功率延伸电缆和相关的控制技术,成功的应用到了某型号飞机导管装配现场,填补了国内在该领域的空白. 该设备不仅具有体积小,重量轻,可移动性好,效率高等特点,而且设备在控制精度、重复精度、可靠性和焊接质量等方面明显优于我国从俄方引进的同类型设备.

2　感应钎焊设备的系统组成

该设备采用双闭环控制,其系统结构如图 2 所示. 在图 2 中 U_f 为电源输出端的反馈电压;I_f 为加热回路中的反馈电流; U_{g1} 为加热曲线给定信号;U_{g2} 为保温温度设定信号;H_t 为加热时间设定信号;K_t 为保温时间设定信号;U_{out} 为频率跟踪控制电压;T_{f1},T_{f2} 均为工件的温度反馈信号,T_{f1} 用于加热过程的控制,T_{f2} 用于加热温度的采样显示.

2.1　主电路结构

主电路逆变部分为全桥式结构,采用 IGBT 作为逆变的功率器件. 变压器磁芯采用铁基超微晶合金环形铁芯作为变压器的磁性材料. 为了扩大加热电源的容量和提高电源的输出电压,采用 2 台独立电源串联,并用同一个脉宽调制(PWM)脉冲信号来控制 2 套全桥逆变回路,很好地解决了逆变回路串并联需要均流和 PWM 信号需要同步的问题,扩大了电源的输出功率容量[2].

2.2　加热回路

在安装位置导管钎焊现场,感应线圈与逆变电源、谐振电容的距离较远,为了减小远距离能量传输损耗的影响,感应加热电源加热回路的拓扑结构采用电压源串联谐振回路.

加热回路包括谐振电容,功率延伸电缆和软式感应圈等.

2.2.1　功率延伸电缆

通过对并行实心圆导体往返回路、同轴空心导体往返回路和多束细漆包线混布往返回路等 3 种电缆结构的计算和比较分析,功率延伸电缆选取了同轴空心导体往返回路的结构,其内、外导体

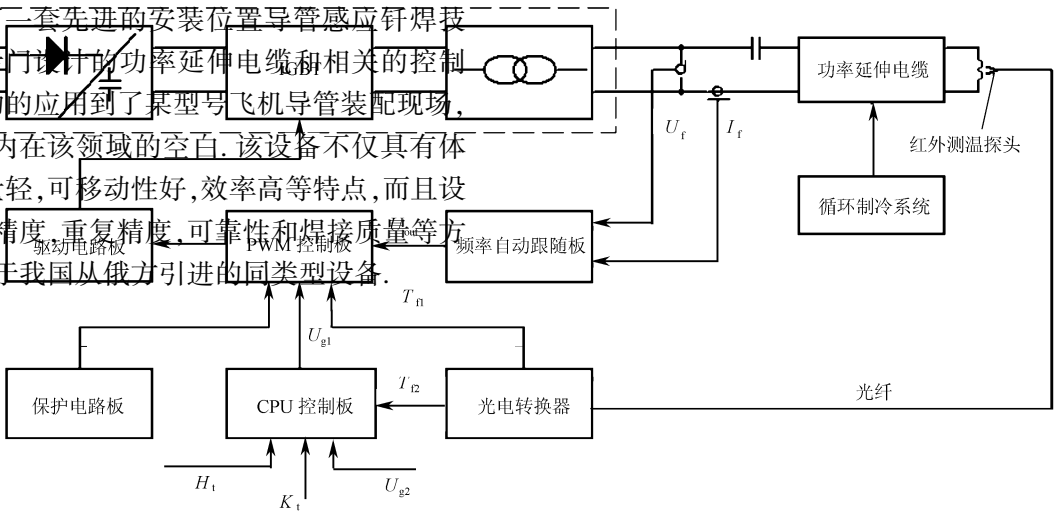


图 2　超音频感应钎焊设备系统结构图

采用多束细漆包线均匀密布而成,并同时对内外导体通水冷却[3]. 这种结构的功率延伸电缆具有回路交流阻抗小、损耗低的优点,为实现超音频低电压大电流的远距离传输提供了条件.

2.2.2 软式感应圈

采用软式感应圈替代传统的固定感应圈解决了安装位置导管感应钎焊操作空间狭小,不易安装感应圈以及焊后难于拆除等问题.

受钎焊导管接头套管长度的限制,以及感应加热电源阻抗匹配的需要,软式感应圈采用外径为6 mm的聚乙烯胶管作为套管,在其内部密布多束细漆包线而成. 缠绕感应圈时根据导管的直径大小分别缠绕6匝(<Φ10 mm)和8匝(>Φ10 mm),可以有效的减小导管接头的热影响区.

2.3 红外测温系统

红外测温系统采用光纤传光与红外测温相结合的技术,避免了焊接现场强烈的电磁场干扰,从而实现了远距离温度信号的高抗干扰传输和精确测量.

红外测温系统的测温点选择在导管接头的中间部位[1],前端采用透镜测温探头获取钎焊部位的光信号,并成像于由多束光导纤维构成的端面上,然后经光纤传送到主机进行温度信号的提取、实时显示,以及实现整个焊接过程的温度控制.

3 控制方案

3.1 频率自动跟踪技术

感应加热过程中,工件的电阻率和磁导率等物理常数与温度密切相关,随着导管接头温度的变化,加热回路的感抗将发生变化,从而导致加热回路的谐振频率不断变化. 采用以SG3525A为核心的控制电路,检测电源输出电压与输出电流之间的相位差大小,并以此信号作为PI调节器的输入,通过该调节器控制感应加热电源的工作频率,实现了系统谐振频率的自动跟踪[4]. 同时通过电压信号相位滞后处理的方法,使谐振回路工作在略偏感性的准谐振状态,确保了IGBT逆变器工作的安全可靠. 该方法具有跟踪速度快、频率跟踪准确、电路设计简单、工作可靠等优点.

3.2 钎焊温度控制

加热时间、保温时间和保温温度是导管安装钎焊的3个重要工艺参数. 将钎焊过程分成加热过程和保温过程2个阶段,并分别控制,可以提高上述参数的控制精度,从而有效的提高焊接质量.

3.2.1 加热过程控制

安装位置导管感应钎焊加热过程的控制方法主要有2种:恒功率控制和变功率控制. 恒功率控制在加热过程中电源输出的功率保持不变,整个加热过程不受控制,导管接头按照自由的加热曲线升温. 变功率控制利用光纤传感器测得的实时钎焊温度信号闭环负反馈调节感应加热电源的输出功率,使钎焊加热过程按预设的加热曲线升温,如按图3所示的预设闭环控制升温曲线升温,其温度上升速率可调,可控性好.

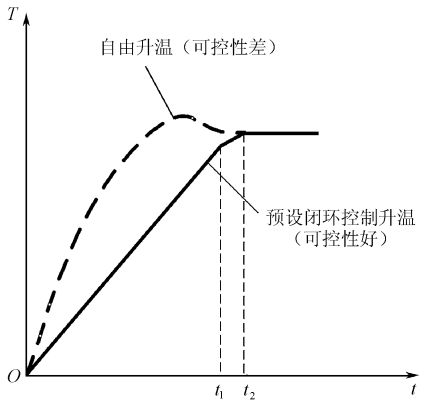


图3 2种控制方式下的升温曲线

恒功率控制方式下采用相同的加热功率进行加热,受感应圈缠绕状态、匝数,导管接头的材料和规格,以及其它工艺参数的影响,导管接头达到同一保温温度的加热时间有可能不一样,从而会对钎焊接头的质量造成影响. 另外,在恒功率控制方式下,加热过程末期仍然维持较大的功率输入,由于热惯性的作用容易导致保温阶段初期导管接头的温度控制具有较大的超调量,很可能使导管接头出现过热、过烧等缺陷.

而变功率控制方式下,采用预设的加热曲线作为调节电源输出功率的给定值,只要电源的输出功率足够大,实际的加热曲线通过闭环负反馈的调节作用就会按照预设的曲线升温,从而能够精确控制加热时间. 并且在加热过程末期(t_1 ~ t_2)适当减小加热曲线的上升速率,进一步调整电源的输出功率,可以有效的减小保温初期温度控制的超调量.

本文预设的加热曲线是通过CPU控制板给定. 加热时间和保温温度设定后输入CPU控制板,经CPU运算处理,然后通过D/A转换器输出,使加热曲线给定电压 U_{g1} 在设定的加热时间里按照某种特定的曲线上升到保温温度的设定值 U_{g2}. 采用CPU给定预设的加热曲线,可以提高加热时间的控制精度,并且根据焊接工艺的要求可

以快速灵活的对加热曲线作调整,能够最大程度的满足焊接工艺的需要.

3.2.2　保温过程控制

保温阶段精确控制导管接头的保温温度和保温时间可以提高焊接区域温度场的均匀性和稳定性,从而更加有利于钎料流动并与母材充分反应,同时还能防止焊接接头出现未焊透、钎焊瘤和过烧等缺陷.

在实际运用中,感应加热电源常用的保温控制方法有开关控制方法和 PID 控制方法. 开关控制方法的工作原理是检测到工件的温度超过保温温度设定值时,关断感应加热电源的输出,让工件冷却降温;当检测到工件的温度低于设定温度时,开通感应加热电源对工件进行加热. 这种控制方法电路简单、调试容易,但是由于热惯性的作用,温度控制误差较大. 因此,开关控制方法只适用于那些对温度控制精度要求不高的场合.

为了满足导管安装位置感应钎焊精确控温的要求,本文在保温阶段采用 PID 控制方法进行温度控制,其控制框图如图 4 所示.

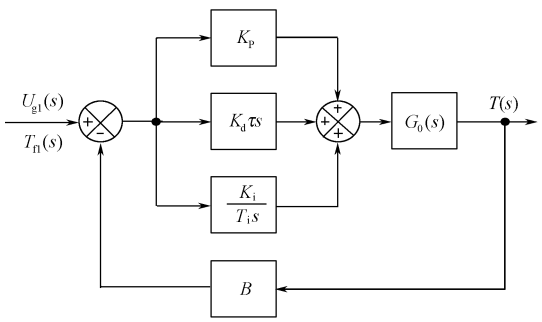


图 4　保温过程加热电源的控制结构框图

图 4 中,B 为温度信号反馈放大倍数;τ 为微分环节时间常数;T_i 为积分环节时间常数;为比例环节放大倍数;K_p 为积分环节放大倍数;K_d 为微分环节放大倍数;$T_{fl}(s)$ 为温度反馈信号;$G_0(s)$为功率控制信号与导管接头的温度 $T(s)$之间的传递函数.

根据上面传递函数的框图可得:

$$\frac{T(s)}{U_{gl}(s)}=\frac{\frac{1}{B}}{1+\frac{1}{\left(K_p+K_d\tau s+\frac{K_i}{T_i s}\right)G_0(s)B}} \tag{1}$$

该 PID 控制方法的比例、积分和微分环节的比例系数独立可调,PID 控制系统参数的整合方便. 在保证系统稳定性的条件下,可以最大限度的提高系统的响应特性,并且微分环节的预测调节功能非常适用于具有热惯性的温度控制场合.

试验表明,采用 PID 控制方法的控制效果优于传统的开关控制方法.

4　试验结果及应用

4.1　温度控制精度对比试验

该系统研制成功后在某型号飞机的安装位置导管钎焊现场与俄方同类型的设备进行了温度控制精度对比试验. 试验中,采用相同的焊接规范对同一个 Φ25 mm 钛合金导管试样进行钎焊加热,同一台测温仪器测得 2 套设备对导管外表面的温控情况如表 1 所示.

表 1　温度控制精度对比试验结果

使用设备	温度波动范围
俄方设备	≥±15℃
本文研制的设备	≤±2℃

上面的数据表明,本文研制的设备比俄方同类型的设备控温更精确,能够更好的满足安装位置导管钎焊工艺的要求.

4.2　钎焊接头质量评定

采用该安装位置导管感应钎焊设备焊接的钛合金导管接头的 X 射线探伤照片如图 5 所示,图 6 为导管的外观图.

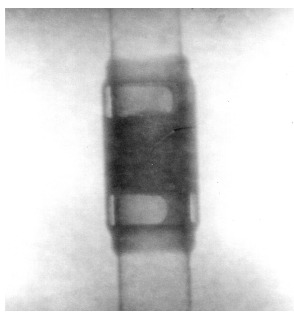


图 5　Φ14 mm 钛合金导管钎焊后的 X 射线探伤照片

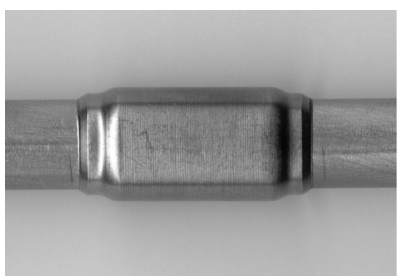


图 6　Φ14 mm 钛合金导管钎焊后接头的外观

钎焊接头无氧化色,钎脚均匀透出,无裂纹、针孔、气孔、下陷及砂眼等缺陷,导管上无镀镍层熔化现象;同时经 X 射线探伤和低倍率的显微观

察表明钎焊质量优良.

4.3 安装位置导管感应钎焊的应用

基于以上温度传感和控制技术、电缆传输技术、以及逆变电源技术,研制成功了一套先进的安装位置导管感应钎焊设备. 目前,该设备已经完成了安装位置导管感应钎焊的工艺试验,各项指标均达到或超过了导管焊接质量的要求,已经成功的应用到了某型号飞机总装和部装现场的安装位置导管感应钎焊生产线上.

5 结 论

1) 研制了一种新型的超音频功率延伸电缆,该电缆具有回路阻抗小、损耗低的优点.

2) 在感应钎焊工艺中成功地采用了光纤传光与红外测温相结合的温度测量技术,实现了钎焊温度信号的远距离高抗干扰传输和精确测量.

3) 根据感应加热的特点,将整个钎焊过程分为加热阶段和保温阶段并分别控制,提高了导管焊接加热时间、保温时间和保温温度的控制精度,从而提高了焊接质量.

4) 基于以上控制技术和电缆传输技术,采用IGBT全桥式逆变主电路,研制成功了一套先进的安装位置导管感应钎焊设备.

参考文献 (**References**)

[1] 赵 晶. 导管安装位置感应钎焊控制技术的研究[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2002
Zhao Jing. A study on the control technology for on-site induction brazing of tubing[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002(in Chinese)

[2] 赵 晶,齐铂金,张 伟,等. 串联式IGBT串联谐振感应钎焊电源及其控制[J]. 焊接,2003,28(3):22~25
Zhao Jing, Qi Bojin, Zhang Wei, *et al*. Serial induction brazing power source of IGBT series resonance and its control[J]. Welding, 2003, 28(3):22~25(in Chinese)

[3] 赵 晶,齐铂金,陈景武,等. 感应加热中功率延伸电缆结构形式的优选设计[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(6):629~632
Zhao Jing, Qi Bojin, Chen Jingwu, *et al*. Optimization design of connecting power cable in induction heating[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(6):629~632(in Chinese)

[4] 赵 晶,齐铂金,张 伟,等. PI调节逆变式IGBT感应加热电源频率自动跟踪技术[J]. 电力电子技术,2003,37(2):12~14
Zhao Jing, Qi Bojin, Zhang Wei, *et al*. Resonance frequency auto-tracing technology based on PI control for IGBT induction heating power source[J]. Journal of Power Electronics, 2003, 37(2):12~14(in Chinese)