

钛合金转子叶片系列焊机的研制及应用

Development and Application of Series Welding Machine for Titanium Alloy Rotor Blade

中航工业西安航空动力股份有限公司 李金声 石军 梁养民

[摘要] 针对各种新型航空发动机钛合金转子叶片阻尼台毗邻面耐磨性提高的迫切需求,研制成功JQGP-80型系列真空充氩高频感应钎焊设备,结合国产化材料及焊接工艺的全面突破,解决了钛合金叶片阻尼凸台磨损问题,为多种重点型号研制的顺利进行提供了强有力的硬件保障。

关键词: 钛合金叶片 耐磨层 焊接系统

[ABSTRACT] For the urgent need of increasing wear resistance of surface adjacent to the damping platform of titanium alloy rotor blade of aeroengine, JQGP - 80 series high frequency induction brazing equipment with a vacuum operation room filled with argon gas is successfully developed. Combined with the full breakthrough of localization of related material and welding process, the surface wear problem of the titanium alloy rotor blades is solved thoroughly, which provides a strong hardware guarantee for the development of new types aeroengine.

Keywords: Titanium alloy blade Wear-resisting layer Welding system

钛合金因具有诸多优越性能而在航空零件的制造中得到广泛应用,转子叶片即是典型的应用之一。但钛合金材料抗金属间磨损性能较差,加之实际工况下存在的振动及摩擦,阻尼凸台经常出现磨损和错位;而阻尼凸台磨损和错位,又进一步加剧发动机的振动和摩擦,严重影响发动机的寿命及性能。

为此,美国、英国等国家分别开发了专门的工艺及设备,来解决这一技术瓶颈。如英国采用爆炸喷涂、等离子喷涂;美国采用感应钎焊硬质合金块工艺;巴顿也开发了相关专利技术,并实现工程化应用。

在国内,通过前期引进技术,打通了等离子喷涂工艺,并实现国产化应用。多年来的服役情况表明,喷涂工艺存在致密性差、涂层易剥落、质量不稳定等问题,急需进行工艺升级换代;另一方面,各种新型航空发动机的研制对超大尺寸阻尼台毗邻面的强化也提出迫切需求。为保障重点型号研制顺利进行,自主突破相关焊接设备、材料和工艺便显示出价值和意义。

1 钛合金叶片耐磨层焊接工艺特点及对设备的要求

1.1 钛合金转子叶片的结构特点

典型叶片耐磨层示意图见图1。发动机转子叶片采用钛合金模锻件经数控加工而成,由榫头、叶身、叶盆侧阻尼台、叶背侧阻尼台组成,在叶盆及叶背侧阻尼台毗邻部位设计有一层耐磨层,以提高叶片的耐磨性及寿命。

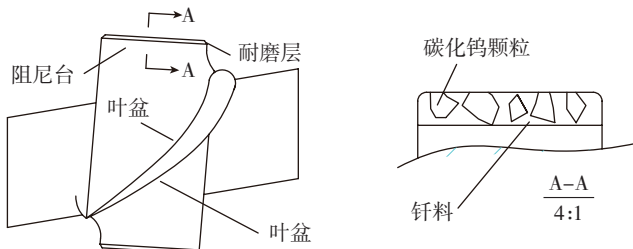


图1 阻尼台耐磨层示意图

Fig.1 Diagram of wear-resisting layer

1.2 叶片材料特点及其焊接性

转子叶片材料通常采用TC4钛合金,其密度为 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$,适用工作温度 $-100\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$,抗拉强度 $\sigma_b \geq 895\text{MPa}$,规定残余伸长应力 $\sigma_{0.2} \geq 825\text{MPa}$,伸长率 $\delta_5 \geq 10\%$,断面收缩率 $\psi \geq 25\%$,其主要化学成分见表1。

表1 TC4的化学成分

成分	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
质量分数	余量	5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.1	0.05	0.015	0.2

TC4钛合金的物理、化学性质决定了其焊接存在特殊困难,这对焊接设备的研制提出新的挑战。

1.3 焊接工艺特点及对焊接设备的特殊要求

经过充分调研论证,拟采用真空充氩高频感应钎焊工艺实现对钛合金转子叶片阻尼台的强化。

1.3.1 焊接工艺特点

钛合金重量轻、抗腐蚀及热稳定性好,但是,其化学活性高,易氧化及吸气,相对其他材料而言,其焊接工艺具有如下特点。

(1) 间隙元素污染引起脆化:钛合金对氧气等气体

的亲合力很大,具有强烈的吸气倾向。常温下,表面氧化物稳定,在加热到 300℃时快速吸氢,600℃时快速吸氧,700℃时快速吸氮,并在表面形成一层氧化膜,使合金塑性、韧性急剧下降。因此,焊接前,必须将这层氧化膜去除干净,焊接过程中也需要提供一定纯度的惰性保护气氛,防止加热区域的氢化、氧化和氮化造成的组织脆化。

(2)焊接相变引起的性能变化:TC4属于 $\alpha+\beta$ 合金,合金元素含量较高,钎焊温度应予以控制,防止因相变引起母材性能的变化。

(3)易产生气孔:焊接气孔形成的主要原因是待焊接区或者辅助材料被水分、油脂等污染。焊接气孔的存在使得接头的承载能力和疲劳强度降低,因此各国对气孔的大小、尺寸及其分布都做了比较详细的规定,制定了相应的标准。钛合金焊接时极易产生气孔缺陷。因此,减少或者消除钛合金焊接气孔缺陷一直是生产中的实际难题,也是各大厂所院校研究的热点。

(4)接头形式特殊,焊接工艺难度大:一般钎焊工艺过程是液态钎料润湿母材,通过毛细作用填充间隙,实现零件的连接。而该焊接则是将硬质合金颗粒通过钎料熔敷、镶嵌在叶片阻尼台表面。因此,与一般钎焊焊接接头形式相比,存在特殊困难。除此之外,由于待焊接叶片阻尼台焊接可达性较差,为了避免熔化的钎料沿着凸台侧面四周流布,工艺参数上只能采用较短的焊接保温时间,这样一来,不利于气体和杂质的排出,容易造成气孔或夹渣缺陷。

该焊接设备的开发涉及到真空技术、电力电子技术、自动控制技术、焊接技术等多个学科,具有相当的难度。同时还必须满足复杂的焊接工艺要求,这对设备提出诸多特殊要求。

1.3.2 焊接工艺对设备研制的要求

(1)焊接设备需要提供一个纯净的惰性气体保护气氛。

叶片基体材料为TC4,该材料对氧气等气体的亲合力很大,具有强烈的吸气倾向。为防止加热区域的氢化、氧化和氮化造成的组织脆化,该系统需要提供一个纯净的惰性气体焊接气氛^[1]。

(2)精确控制钎焊温度,避免超温相变及组织粗大。

TC4属于 $\alpha+\beta$ 合金,合金元素含量较高,且其 β 相稳定元素较多,焊接后有可能产生 ω 相,钎焊温度应予以控制,不超过相变温度,以防止因相变引起的母材性能变化^[2]。因此,焊接温度的控制是设备研制的重点考虑因素之一。

(3)设置气氛动态净化系统,避免气孔产生。

钛合金材料焊接时极易产生气孔缺陷,焊接气孔的存在使得叶片的疲劳强度降低。焊接气孔形成的主要

原因是待焊接区或者辅助材料被水分、油脂等污染。另外,随着焊接过程产生的气体对保护气氛的污染,焊接区域的材料表面颜色也会发灰甚至发蓝,因此,在设备的设计中必须考虑如何保证焊接保护气体的净化问题。

(4)配备辅助工装器具,保证碳化钨颗粒的均匀分布。

通过对焊接参数的优选,结合辅助工装器具的开发,保证叶片阻尼台各区域的同步加热,确保碳化物颗粒分布均匀。

2 JQGP-80型系列真空充氩高频感应钎焊机的研制

JQGP-80型焊接系统的原理见图2。主要由操作室、真空系统、电源系统、温度测量控制系统、控制系统、气体供应系统、搅拌机及辅助工装等组成。

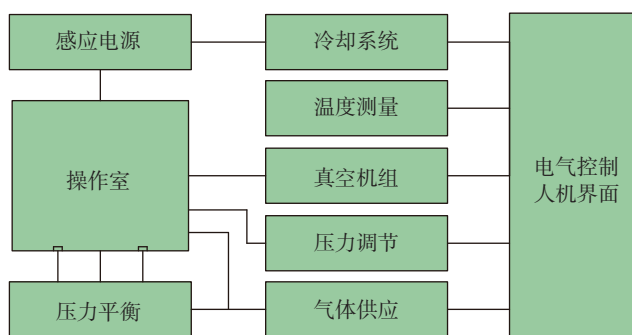


图2 系统原理框图

Fig.2 Principle diagram of system

2.1 真空操作室

真空操作室为全不锈钢结构,可有效预防对钛合金零件污染。专门设计的操作手套压力平衡系统,能有效保证操作时手套内外压力的平衡,同时,避免大气分子的渗入,杜绝污染气体源。大门采用气动啮合式结构,可以通过自动控制开启或锁紧,并能实现正、负压情况下的自适应密封。该操作室抽真空时间短,密封性能好,各项指标达到设计要求,能够满足生产需要。

2.2 真空系统

真空系统原理如图3所示。采用德国莱宝产罗茨泵和旋片式机械泵组成的两级泵组。极限真空度达到 5×10^{-2} Pa,另并联有一路维持泵,用来实现操作室内保护气体的动态循环净化及微负压设定及调节。

2.3 高频感应焊接电源

高频焊接电源利用高频磁场在金属内部产生的热量进行焊接。随着半导体功率器件的发展,出现的晶体管电源具有效率高、可靠性高、输出功率调整方便、响应快及控制精确等优点^[3]。经过对比研究,本项目选择使用TG80-66型晶体管高频感应电源来加热。

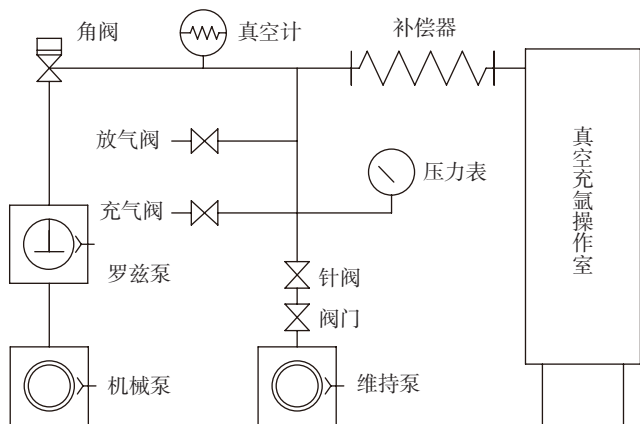


图3 真空系统原理图
Fig.3 Principle diagram of vacuum system

2.4 测温、控温系统

本项目中采用美国泰诺公司的红外测温仪作为测温元件,实现工件的非接触测温。选用英国进口 818 欧陆表作为控温仪,巧妙利用其上、下限温度报警口来控制加热功率峰值和基值,用无触点时间继电器控制加热功率基值和峰值时间,利用系统本身的散热惯性,以 PFM 加热脉冲频率调制方式实现对工件加热温度的均匀控制,可以更好地满足焊接工艺要求,同时可避免高频电源的频繁通断,改善其工作状态,保证焊接质量的一致性。

2.5 控制系统

控制系统采用 DELTA 公司 DVP 系列型号为 DVP60ES00R 的 PLC,结合 PWS-3260-DTN 型 HITECH 工业级人机界面作为协调整个焊接系统动作及工作的核心,它具有价格低、系统稳定及环境适应性强等特点。

DVP 系列还提 WPLSOFT 编程工具,具有指令和阶梯图及顺序功能图(SFC)的程序输入方式,辅助功能强大,可读性强,维护容易。系统控制原理见图 4。

2.6 焊接辅助设备

研制了 JC-6 型专用振动式搅拌机。先将钎料与列立特硬质合金颗粒以一定的比例混合,并将混合物装入钢瓶,然后放到搅拌机上长时间的振动和搅拌,使其充分混合均匀,解决了列立特硬质合金颗粒分布的均匀性问题。

2.7 气体供应及动态循环净化系统

设计了独特的气体供应自动切换装置。主要由双侧式气体汇流排、电磁阀门、压力监测仪表、控制箱、低压报警器等组成。采用主供气瓶组和备用气瓶组双气源供气结构。当主供气瓶组压力降低至设定值时,主供气组阀门关闭,同时自动打开备用气瓶组开始供气。能实现主供气源与备用气源之间的自动切换和不间断供气,提高生产效率。

同时,气体供应系统还设置有露点检测环节保证气氛的纯净。

2.8 JQGP-80 型系列真空充气高频感应钎焊系统的性能特点及应用

针对不同发动机叶片的焊接需要,先后开发了 JQGP-80-1/-2/-3 系列焊接系统。

主要技术指标:功率为 64kW;极限真空度为 5×10^{-3} Pa;充气真空度为 ≤ 1 Pa;工作压力为 103~105 kPa;抽速 ≤ 30 min;压升率 ≤ 10 Pa/h。

JQGP-80-1 型为单工位,主要应用于较小尺寸叶片阻尼台耐磨层手动焊接及试制,叶片种类变化时,需要

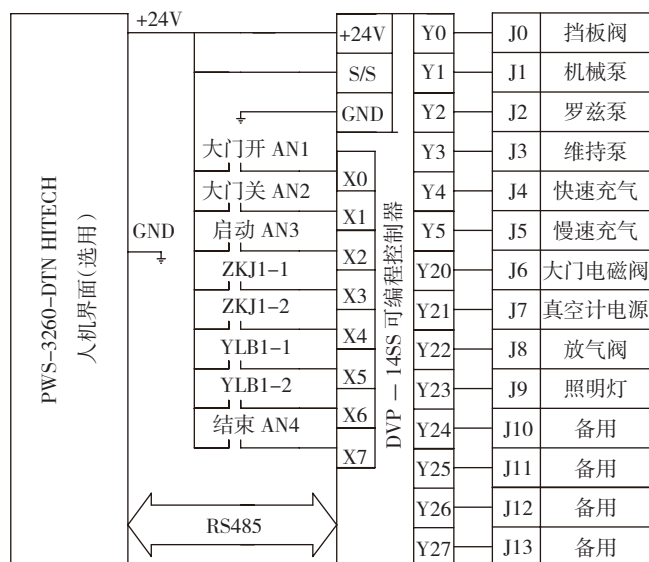
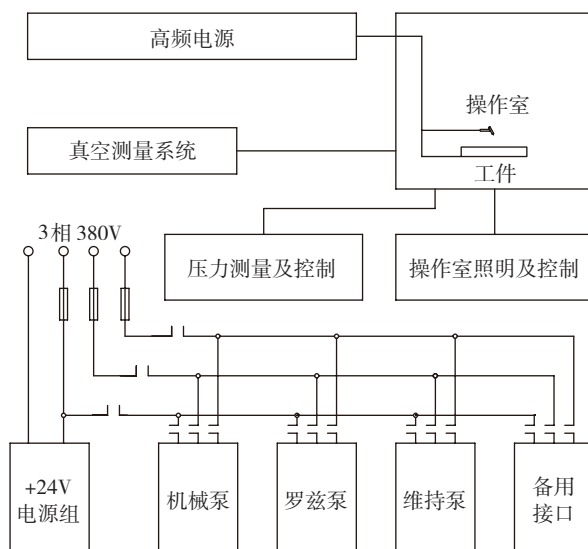
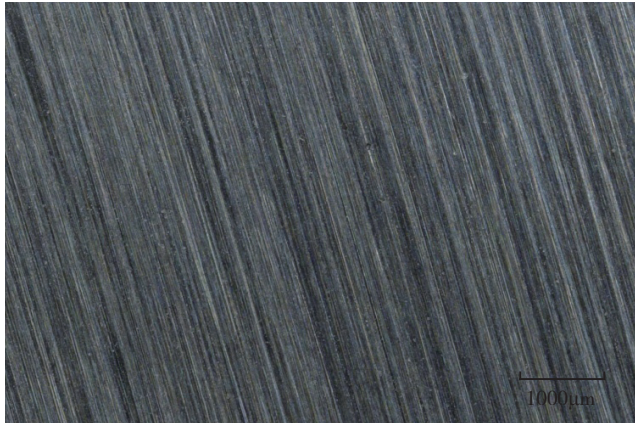


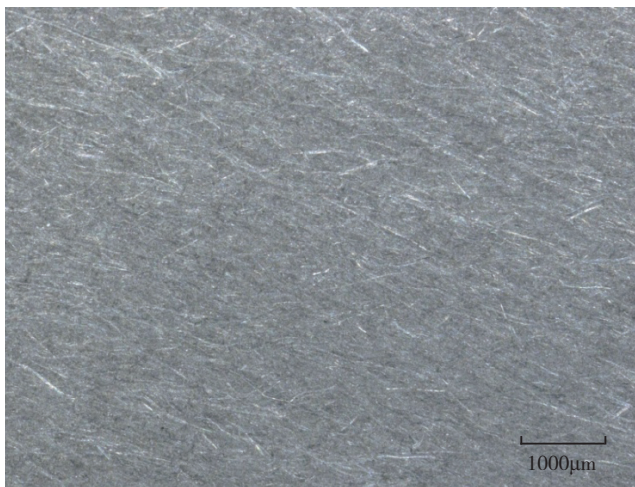
图4 系统控制原理图
Fig.4 Principle diagram of system control



(下转第 172 页)



(a) 振动光饰前辐板表面形貌



(b) 振动光饰后辐板表面形貌

图6 振动光饰前后表面形貌对比

Fig.6 Surface appearance comparison before and after vibration-finishing

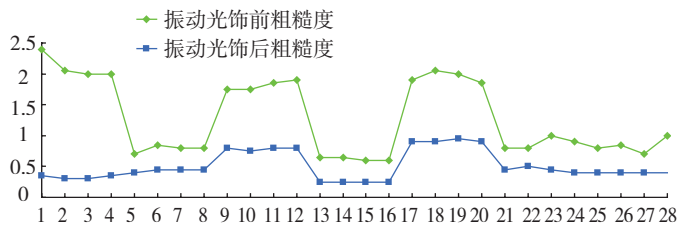


图7 振动光饰前后表面粗糙度对比

Fig.7 Surface roughness comparison before and after vibration-finishing

一致性差、表面质量差问题,工艺和设计一起攻关,设计将边缘倒圆改为倒角,制造过程中采用边缘自动倒角工艺,增加了振动光饰工艺,不仅保证了边缘加工的一致性,而且提高了表面加工质量,可以用于涡轮盘及其他类似零件的加工,具有广阔的应用前景。

(责编 小城)

(上接第 169 页)

同步更换感应圈,生产效率较低。

JQGP-80-2 型为双工位,一次装载可以实现多个种类叶片的手动焊接,主要适用于较大批量生产,加工效率较高。

JQGP-80-3 为自动型,可通过编程联动实现叶片自动、半自动焊接,主要用于某新型发动机超大尺寸钛合金叶片阻尼台耐磨层焊接。

3 推广应用情况

研制的 JQGP-80 型系列焊接设备,稳定可靠、操作简便、性能优异。采用该系统焊接的叶片阻尼台外观成形良好,耐磨层硬质合金颗粒分布均匀,结合良好。精加工后与进口叶片对比发现采用该焊接系统的叶片耐磨层致密,无气孔等缺陷,焊接质量达到并优于进口叶片的焊接质量。

综上所述,采用所研制的 JQGP-80 型真空充氩高频感应钎焊系统焊接的发动机钛合金叶片在外观和微观组织方面,均达到国外样件水平。装机考核表明,叶片的耐磨性及综合性能优异,能够满足发动机的设计和使用要求,已经应用于各型航空发动机的科研和批量生产。

4 结束语

研制的 JQGP-80 型系列真空充氩高频感应钎焊设备克服了同类设备的缺点和不足,采用类 PFM 方式实现对工件加热温度的均匀控制,能自动补偿工件和环境温度的变化,防止钎料的侧流,保证焊接质量的一致性。

通过采用微负压工作气氛调节系统,可实现正、负压自适应密封。结合采用独特设计的气孔排逸电路,解决了钛合金焊接气孔问题,更好地满足了叶片焊接的工艺要求,工件焊接质量优于国外标准及样件水平。

该系统工作可靠,使用方便,性能优异,特别适合航空发动机钛合金转子叶片阻尼台耐磨层的批量科研生产,受到外方专家好评,达到国际先进水平。

该系列焊接设备的开发成功,突破了国外的技术封锁,填补了行业焊接设备制造领域的一项空白。结合国产化材料及焊接技术的突破,大大提高了航空发动机钛合金转子叶片减振凸台的耐磨性,有效保障了国防重点型号的顺利进行,具有重要的经济、军事和社会意义。

参考文献

- [1] 邹僖. 焊接方法及设备. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [2] 庄鸿寿. 航空材料的钎焊. 北京: 国防工业出版社, 1964.
- [3] 郑宜庭. 弧焊电源. 北京: 机械工业出版社, 1991.

(责编 深蓝)