

TA15 钛合金电子束焊加强框的发展与应用

Development and Application of TA15 Titanium Alloy Main Load-Carrying Frame Welded by Electron Beam

中航工业沈阳飞机设计研究所 许平 张伟宁

[摘要] TA15 钛合金是综合性能优异的国产骨干钛合金材料,将其与大厚度电子束焊接技术相结合,应用于飞机的主承力加强框上,可以大大提高加强框结构的完整性,并减轻结构重量。通过十几年的应用研究,此项技术已日趋成熟,为其在新一代飞机的应用奠定了良好的技术基础。

关键词: TA15 钛合金 大厚度 电子束焊接 加强框

[ABSTRACT] TA15 titanium alloy is one of home-grown central titanium alloys which has excellent comprehensive properties. Big-thickness TA15 titanium alloys combined with electron beam welding are applied to the main load-carrying frames of aircraft which can highly improve their integrality and also reduce their weight. And this technique increasingly matures through more than ten years of application research, which lays the technique foundation of the application on the new generation of aircraft.

Keywords: TA15 titanium alloy Big-thickness Electron beam weld Main load-carrying frames

TA15 钛合金的名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V,主要的强化机制是通过 α 稳定元素 Al 的固溶强化,加入中性元素 Zr 和 β 稳定元素 Mo 和 V,以改善其工艺性。该合金的 Al 当量为 6.58%,属于高 Al 当量的近 α 型钛合金,它既具有 α 型钛合金良好的热强性和可焊性,又具有接近于 $\alpha-\beta$ 型钛合金的工艺塑性^[1]。概括来说,TA15 合金具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性和焊接性能,工艺塑性稍低于 TC4,是强度等级在 $\sigma_b \geq 930\text{MPa}$ 的中等强度钛合金,综合性能优良。

TA15 钛合金的锻件或厚板广泛应用于国内第三代飞机的加强框上,由于加强框的结构尺寸通常都较大,往往需要结合大厚度焊接工艺以小拼大,以提高零件的整体性和结构效率。在当时,钛合金加强框采用多段模锻件潜弧自动氩弧焊连接而成,在飞机的批量生产时,大厚度潜弧自动氩弧焊暴露出容易产生气泡、夹污等焊接缺陷,且反复焊接—热处理工序较多,接头区域疲劳

性能较差等问题,严重制约了其发展应用,结构设计急需一种新型的完整性更好的焊接形式代替潜弧焊。而此时在国际上,大厚度真空电子束焊接技术的发展方兴未艾,美国的 F/A-22 钛合金在后机身用量达到其重量的 67%,其中 25% 由电子束焊接的大型前、后梁组合件组成,有长达 3556cm 周向及纵向焊缝,整个后机身的电子束焊缝长度累加起来可达 87.6m^[2]。

真空电子束焊是一种高能量密度的先进熔焊方法,由于具有焊缝深宽比大、焊接变形小、能量集中、接头晶粒细小等特点,并可以在一个真空循环中实现多个接头的焊接,非常适合于大厚度钛合金构件的焊接。国内对 TA15 钛合金大厚度电子束焊接的研究始于 20 世纪 90 年代,十几年间,我们分别以单环形焊接加强框、多段双环形焊接加强框以及三段双环形焊接加强框为验证考核对象,对电子束焊接进行了工艺研究、结构设计分析及装机应用考核。研究的内容包括电子束焊接的结构设计与评定,电子束焊接工艺参数的调整和控制,焊缝疲劳特性分析方法等。形成了电子束焊接结构的设计原则,提出了 TA15 钛合金复杂结构焊缝疲劳、断裂性能表征方法,为其工程应用奠定了良好的技术基础。

1 大厚度电子束焊接工艺研究与焊缝力学性能

在“九五”至“十一五”期间,针对大厚度 TA15 钛合金电子束焊接,进行了深入的工艺研究,主要包括焊接工艺参数、焊后热处理、是否添加焊丝、焊接工装设计、焊口表面质量等,主要目标是形成质量稳定的焊缝,满足加强框的设计使用要求。

(1) 焊接工艺参数。

大厚度电子束焊接的主要工艺参数包括焊接厚度、工作距离、加速电压、电子束束流、聚焦电流、焊接速度等,焊接工艺参数的大小、焊接时是否填丝、焊接前、后的处理工艺等都直接影响焊缝的外观质量、内部质量和力学性能,所以根据焊缝厚度确定焊接工艺参数至关重要。研究表明,在焊接厚度相同的情况下,随焊接速度的降低,焊缝及热影响区宽度增大,焊缝区硬度降低,焊接横向收缩变形增大,但是焊缝区断裂韧度、冲击韧度均会明显提高。对于加强框的钛合金大厚度电子束焊

接头,设计上要求其抗拉强度、冲击韧性、断裂韧度等各项指标都不低于母材金属技术条件规定的材料下限值的90%。因此,为了得到综合性能满足要求的焊缝,需要反复调整焊接工艺参数,以确定某一厚度的电子束焊主导工艺,得到力学性能满足设计要求的焊缝。

(2) 焊后热处理。

由于焊接是个局部加热的过程,会产生复杂的热应力,如果焊后不进行有效的工艺处理,将会产生残余应力和变形,甚至在外界因素作用下,结构自身也会产生开裂或变形。因此,焊后的热处理制度对焊接变形及焊缝的力学性能有一定的影响。研究表明,TA15 电子束焊接时降低焊速、增大焊缝及热影响区宽度,有利于提高焊缝冲击韧度和断裂韧度。焊后去应力退火(真空 $640^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{h}$,炉冷)不足以使焊缝及近缝区的亚稳相充分分解,接头强度高而冲击韧性、断裂韧度偏低。焊后普通退火($800^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{h}$,空冷)可使 TA15 电子束焊接快速热循环造成的焊缝亚稳态组织充分分解,焊缝过饱和的淬火状态得到有效缓解,因此使焊缝硬度和强度水平降低,而塑性得到显著恢复。但是,空气炉退火会使零件表面形成 α 层, α 层的存在会导致力学性能尤其是疲劳性能的下降^[3],机械加工时必须全部去掉表面 α 层。另外,在焊缝处添加纯钛镶板可以降低焊缝合金化程度,进一步改善 TA15 电子束焊缝韧性。在构件对接头韧度要求较高或 TA15 钛合金供料韧度偏低的情况下,可考虑添加纯钛镶板来保证焊缝韧度,但是会加大焊缝定位和装配的难度,而且疲劳性能波动不易控制,影响焊缝的质量。

(3) 焊接工装。

由于加强框的外廓尺寸相对较大,在进行电子束焊接时,一般需专门设计焊接工装,并对装配间隙和定位严格要求以控制焊接产生的变形。典型加强框的焊接工装见图 1。

(4) 焊接前、后的处理工艺。

焊接前接头表面应平整、光滑,表面粗糙度 R_a 最大允许值为 $3.2\mu\text{m}$; 焊接前用机械或化学方法清理接头表面的锈迹、油污及氧化物等;焊接时采用工艺垫板,为

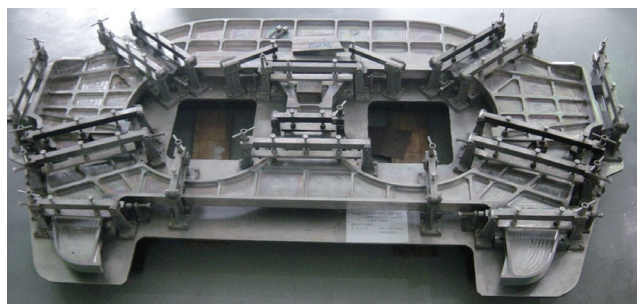


图1 典型加强框的焊接工装

Fig.1 Welding tool of typical main load-carrying frame

了在焊缝的起始端和收尾端获得合格的焊缝,还要在相应位置放置引入板和引出板。

(5) “钉型”缺陷的控制。

在大厚度电子束焊研制初期,为了有效控制变形,一般采用双面焊接(即先一面焊接不焊透,再将零件翻面进行焊接)的方式,焊后发现焊接根部的“钉型”缺陷留在了零件内部,这种缺陷极易造成零件的脆性断裂,影响接头的静力和疲劳性能。其后采用了大功率电子束深穿透单面焊接成形技术,并运用了扫描搅拌焊接方法进行性能调控,形成了稳定的焊接工艺。电子枪扫描搅拌有利于焊缝处气孔的溢出并形成平行焊缝,使大厚度焊缝的上、下层能量更均匀。

2 大厚度电子束焊接结构设计分析

加强框是飞机机身的主承力构件,采用电子束焊接工艺是提高其结构完整性,减轻结构重量的重要措施之一。加强框焊缝的截面一般为工字型,在焊接时采用带有余量的矩形截面对接,焊接后可通过机械加工使之平整光滑,因此焊缝的几何应力集中较小,导致焊缝区性能降低的因素是锻件流线中断、焊接缺陷、焊缝组织性能变化等,在结构设计上需要通过合理布置焊缝、划分焊缝等级、无损检测、表面强化等确保焊缝区域满足设计要求。

(1) 合理布置焊缝。

对焊接钛合金加强框来说,焊缝位置的选取至关重要,需要同时考虑多方面的因素:框的分段应考虑锻压设备的锻造能力;焊缝尽可能布置在应力相对较低的区域;按照降低焊缝应力的原则来布置焊缝方向,如尽量控制受拉焊缝使焊缝沿着载荷方向,或布置成受剪焊缝;控制焊缝的数量和长度,重要焊缝保证连续,次要焊缝允许中断;尽量避免焊缝交叉和密集,焊缝要尽量避开应力集中部位,尽量不在焊缝上和焊缝附近区域开孔;相对于母材来说,焊缝是强度削弱部位,需要时应适当补强;有对称轴的焊接结构应对称布置焊缝,或接近对称轴布置,以降低残余应力和变形;应考虑焊缝的截面厚度,不能超出电子束焊设备最大功率所能焊透的厚度。

(2) 划分焊缝等级。

根据焊接件的重要程度、受力情况、材料和工艺特点等因素,由设计部门会同工艺部门确定焊缝等级。一般分为3个等级:Ⅰ级焊缝:承受很大的静载荷、动载荷和交变载荷,焊缝破坏会危及人员的安全;Ⅱ级焊缝:承受较大的静载荷、动载荷,焊缝破坏会导致系统失效,但不危及人员安全;Ⅲ级焊缝:承受较小的静载荷、动载荷的一般焊缝。

一般来说,加强框的焊缝多为 I 级焊缝,个别应力相对较小的部位也可确定为 II 级焊缝。

(3) 无损检测。

为了消除焊缝的缺陷,焊接后应对焊缝区域进行无损检测,一般用荧光检验检查焊缝表面缺陷,用 X 光和超声波检验检查焊缝内部缺陷。如果检查出缺陷,应该按照焊缝等级进行补焊,以保证焊缝的质量。

(4) 焊后热处理。

焊接是个局部加热的过程,会产生复杂的热应力并导致零件变形,因此焊后需进行有效的热处理,以去除焊接的残余应力和变形,并可以适当提高焊缝韧性,获得综合性能优异的焊接接头,设计上应该根据结构需要制定适合的热处理制度。

(5) 钛合金焊接结构疲劳特性评定方法。

对于钛合金主承力焊接结构,设计人员最关心的是焊缝的疲劳寿命。因此,了解 TA15 钛合金电子束焊接结构的疲劳性能,掌握工程实用的设计和分析方法一直是工程人员关注的重要问题之一。

对焊接结构特别是焊缝区的疲劳试验研究,国内以往均直接采用均质材料标准试样进行,难以对焊缝及热影响区的断裂行为和性能做出准确表征。同时,由于焊接结构的形式、焊缝位置、焊接方法、焊后加工工艺等不同,往往用焊缝标准试样测定的疲劳性能无法准确预测焊接构件的寿命,需要建立焊接结构疲劳性能评定方法。因此,改善 TA15 钛合金焊缝疲劳性能,对其进行表征与评价是重点研究项目。

为适应我国先进飞机研制的迫切需求,我们结合型号和预研项目,开展了 TA15、TC4 等骨干钛合金的焊接结构疲劳特性的大量试验研究和深入的理论分析,创建了适用于钛合金焊接结构的疲劳特性评定新方法——当量 K_f 法,揭示了钛合金的各种焊接工艺、焊缝方向(形状)、焊后表面处理方法对疲劳特性的影响规律^[4]。

通过对电子束焊缝和潜弧焊焊缝当量 K_f 法的分析,电子束焊疲劳特性较潜弧焊好,但相比母材其疲劳特性还有待于进一步提高。

(6) 表面强化。

由于疲劳关键部位的裂纹大多萌生于表面,因此,为了改善疲劳特性,提高疲劳寿命,对金属件的表面进行工艺处理是十分有效的技术途径。对于钛合金焊接结构而言,由于焊缝是疲劳薄弱部位,一般疲劳裂纹先萌生于焊缝及热影响区表面,因而在焊接区实施有效的焊后表面处理工艺,对提高焊接件疲劳特性与寿命能起到重要作用。

我们根据增寿效益系数来评价 TA15 钛合金电子束焊后表面强化工艺对寿命的影响,采用表面处理母板

S-N 曲线为基础的当量 K_f 法,通过试验比较焊缝喷砂、喷丸和抛光强化工艺的疲劳寿命增益。

通过试验可以发现,焊后喷砂明显提高了焊接件的疲劳寿命,使 TA15 电子束焊焊缝的增寿效益超过 10 倍。焊后喷丸同样也可以提高焊接件的疲劳寿命,但是目前试验数据较少,只能给出定性的结论,而抛光的疲劳寿命分散性比较大,目前较难给出是否增益的结论。比较而言,喷砂工艺成熟,所需成本较低,工程上大量应用,是 TA15 钛合金焊接件比较理想的表面强化方法。喷丸工艺也很成熟,但相对成本较高,如果采用喷砂工艺可以达到寿命要求,就不必采用喷丸工艺,对于采用喷砂工艺难以满足寿命要求的局部焊接区域,可以考虑采用喷丸工艺。

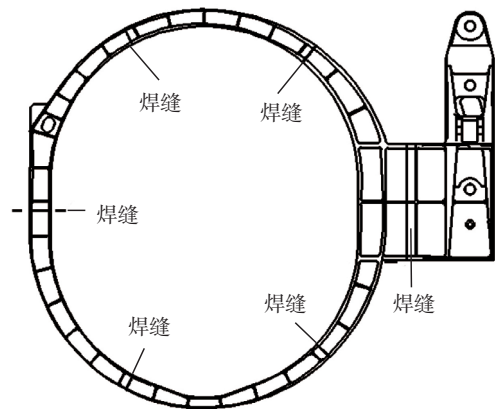


图2 单环形焊接加强框

Fig.2 Welded single-ring mainload-carrying frame

3 大厚度电子束焊接结构的验证与应用

3.1 单环形焊接加强框

图 2 为 TA15 钛合金单环形焊接加强框结构构型,该框为垂尾交点框,由多段钛合金模锻件焊接而成,本设计实例用以探索钛合金电子束焊接代替潜弧焊的益处。

该框外廓尺寸约为 1650mm × 1450mm × 210mm,电子束焊缝最大厚度 64mm,筋条厚度为 2~4mm,间距约为 120~150mm,框的结构参数保持不变,焊缝位置仍按原框分段,将潜弧焊改为电子束焊,焊后进行表面喷砂处理,以提高其疲劳寿命。

为了充分考核、对比焊缝的综合性能,专门设计了 TA15 钛合金 4 点弯曲梁典型试验件,梁中间对焊,试验件分为两组,除焊缝处分别采用潜弧焊和电子束焊工艺外,其余参数保持一致。

4 点弯曲梁的试验结果表明,电子束焊焊接接头的静强度较高,强度系数在 0.9 以上;但其疲劳强度同比潜弧焊未体现出明显优势。另外,在试验过程中,有一件电子束焊静强度较低,通过断口分析,发现其内部存

在“钉型”缺陷,这主要是由于对接头采用了双面焊接,致使焊缝根部的“钉型”缺陷留在了试验件内部。发现这一问题后我们与工艺协商调整了焊接工艺,采用了大功率单面穿透焊接方法替代双面焊接方法,这种方法消除非穿透焊接时无法解决的焊缝内部“钉型”气孔缺陷,在提高了焊缝质量的同时,还减小了电子束接头力学性能结果的分散性。4点弯曲梁破坏试件见图3。

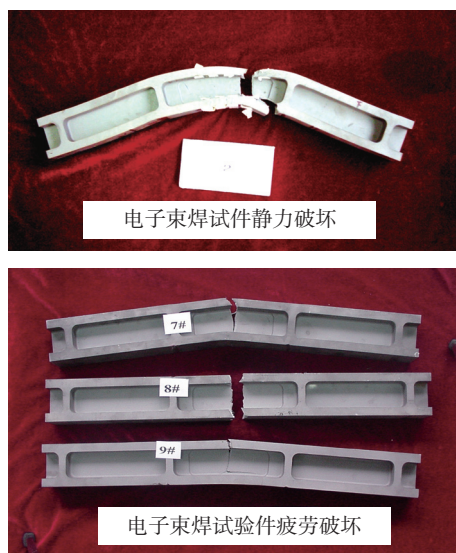


图3 TA15钛合金电子束焊4点弯曲梁静力、疲劳破坏试件

Fig.3 Static and fatigue damage sample of electron beam welded TA15 4 point bending beam

3.2 多段双环形焊接加强框

随着材料和电子束焊接制造技术的发展,设计并制造大型焊接整体加强框已成为可能。图4为多段双环形焊接加强框,是机翼交点框,其外廓尺寸约为3300mm×1715mm×160mm。该框的设计方法与上述单环形加强框基本相同,设计要点在于锻件分块、焊缝布置、80mm厚TA15钛合金厚板电子束焊接的力学性能控制与考核验证。

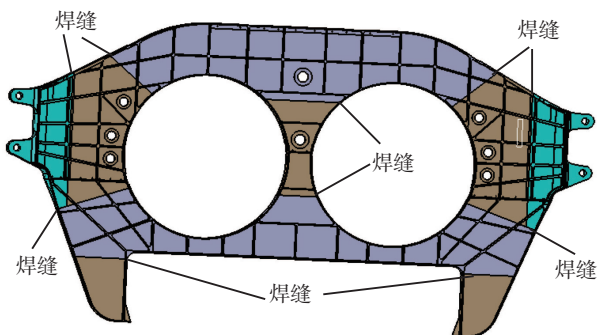


图4 多段双环形焊接加强框

Fig.4 Welding multi-section double-ring main load-carrying frame

综合考虑TA15钛合金锻造能力、电子束焊接技术、结构效率和结构完整性、经济性等方面,最终将框分为9块。

此外,多段双环形焊接加强框的设计参数采用优化计算方法予以确定,其受拉区域的设计许用值按疲劳强度确定,受压和受剪区域按使用载荷下失稳临界应力控制。

3.3 3段双环形焊接加强框

某飞机加强框采用3段双环形电子束焊接,是垂尾交点框,其外廓尺寸约为3550mm×1450mm×140mm。由于锻造能力的提高,使得整体框的分块数量减少,框的整体性进一步提高。该框采用CXC型的分段方法,焊缝布置在应力较低的区域,焊缝厚度为50mm。

在设计方法上,除了传统的设计方法外,首次采用了三维优化设计,即在全机模型下,综合考虑加强框关键受力区域的结构设计许用值,筋条、缘条和腹板的稳定性等因素确定结构设计参数,并对应力偏低区域进行了减重设计,零件的整体性、精准性大幅提高。

3段双环形焊接加强框采用了大功率电子束深穿透单面焊接成形技术,并运用了扫描搅拌焊接方法进行性能调控,形成了稳定的焊接工艺。为了考核电子束焊接的工艺稳定性,并结合3段双环形焊接加强框的结构参数,进行了电子束焊接工艺的全面性能和4点弯曲梁的静力、疲劳试验研究。并且根据电子束焊机的功率选择相应的热处理制度,使其强度、韧性等指标满足了设计要求。

4 结论

通过对TA15钛合金大厚度电子束焊接加强框的研究,基本确定了TA15钛合金大厚度电子束焊接的工艺参数,目前国内最大焊接厚度已达90mm;掌握了电子束焊接加强框的结构设计原则和疲劳特性评定方法。目前,3段双环形焊接加强框已经装机试飞,TA15钛合金大厚度电子束焊接技术已经比较成熟。今后,大厚度电子束焊接技术的关键仍在于提高其焊缝的疲劳性能,设计和工艺部门会共同努力,致力于进一步改善其疲劳特性。

参考文献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2001:74.
- [2] 丁立铭, 饶勤, 陈亚莉. F-22战斗机选材与制造技术. 北京: 航空发展研究中心. 1996:7
- [3] 王向明, 刘文斑. 飞机钛合金结构设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010:6-7, 48-54, 62-74, 208-210.
- [4] 王向明. 钛合金焊接结构疲劳特性评定技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.

(责编 深蓝)