

电子束焊接 TC4 整体叶盘结构的变形控制

Deformation Control of EBW of TC4 Blisk

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心 曲 伸

[摘要] 基于电子束焊接方法,探讨了 TC4 钛合金整体叶盘结构电子束焊接过程中的变形控制方法,提出了综合应用焊接工艺优化、刚性固定、真空热处理和电子束局部加热相结合的变形控制方法,有效地控制了焊接变形,实现了电子束焊接整体叶盘结构的制造。

关键词: 整体叶盘 电子束焊接 变形

[ABSTRACT] The welding deformation of the blisk welded by the electron beam welding (EBW) method is controlled by optimization of welding process, rigid fixture, electron beam local heating and vacuum heat treatment. And the blisk is produced successfully.

Keywords: Blisk EBW Deformation

整体叶盘结构将叶片和轮盘设计成整体结构,从而省去了传统联接中的榫头、榫槽和锁紧装置。整体叶盘的采用使发动机整体结构得到简化,结构重量减轻、零件数减少,并且避免了榫头气流损失,发动机的推重比和可靠性进一步提高。目前整体叶盘的制造主要采用数控加工、电解加工、电子束焊接和线性摩擦焊接等方法^[1]。其中数控及电解加工方法的缺点是加工方法对材料浪费严重、加工周期长,而其叶片的组织性能也有待提高;线性摩擦焊适合制造和修复整体叶盘结构^[2],生产效率高、焊缝质量好,但是目前国内对于整体叶盘线性摩擦焊的研究还仅限于试验室阶段,且研究对象结合面的尺寸还比较小^[3-6]。而电子束焊接方法应用高速电子束流的撞击将动能转化成热能,实现材料的连接,由于该方法相对于普通的 TIG 焊(钨极惰性气体焊)有熔深大、焊缝窄、热输入小等特点而广泛应用于精密焊接领域,英国、德国、意大利和西班牙合作研制的 EJ200 发动机,其 3 级风扇压比为 4.2,在 3 级风扇上采用了电子束焊接整体叶盘结构^[7]。鉴于国内目前的技术水平,通过电子束焊接技术进行整体叶盘的制造具有可行性。目前整体叶盘的设计主要考虑其具体形状参数^[8],而对于具体的焊接加工工艺,尤其是电子束焊接过程中大尺寸整体叶盘的变形情况的研究尚未见相关报道,本课题

以某型号高性能发动机的整体叶盘制造为研究对象,探讨控制电子束焊接变形的的方法。

1 试验材料及设备

试验材料为 TC4 钛合金,TC4 钛合金是 20 世纪 50 年代发展起来的一种中等强度的 $\alpha-\beta$ 两相型钛合金,它含有 6% 的 α 稳定元素 Al 和 4% 的 β 稳定元素 V^[9]。由于其优良的力学性能和良好的焊接性,在航空航天领域得到了广泛的应用。其化学成分如表 1 所示。

所用的电子束焊试验设备为德国 SST 公司电子束焊接设备,主要参数为额定输出功率为 30kW,高压 150kV,真空室容积 12m³。

表 1 TC4 钛合金的化学成分 w/%

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
基	5.82	3.99	<0.05	0.019	0.003 2	0.000 7	0.063

2 电子束焊接工艺参数的确定

由于直接在具有叶片的楔形段上进行工艺试验费用较高,因此工艺研究采用 35mm 的 TC4 钛合金板材为研究对象,分析工艺参数对焊缝形状、变形等方面的影响,在工艺参数确定后再在实际的工件上进行焊接。

具体的电子束焊接工艺参数主要包括高压、电流、焊接速度以及脉冲波型、频率。由于 TC4 电子束焊接技术已经比较成熟,这里判断工艺的标准主要为焊缝

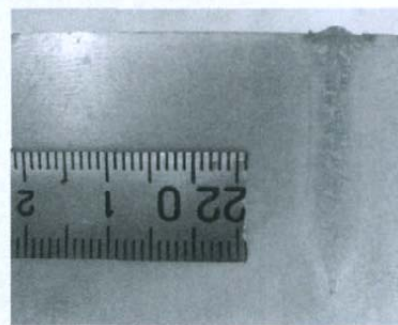


图 1 TC4 电子束焊接焊缝形貌图

Fig.1 Appearance of EBW testing piece of TC4

熔化深度、形状、缺陷的情况。图 1 为焊缝的形貌图,采用的工艺参数为:高压 150kV,焊接速度 10.0mm/s,三角波,焊接电流 68mA。从金相图中可以看出焊缝组织为 $\alpha + \beta$,组织形态为柱状晶 + 等轴晶,有少量的板条马氏体出现,晶粒度与基体接近,热影响区较窄,组织形态和特征较为理想。

3 电子束焊接变形控制方案确定

3.1 整体叶盘结构分析

本课题研究对象为某型号发动机的整体叶盘,如图 2 所示,其装配的基本过程为:先制造出带叶片的楔形段结构(共 41 个),然后对这些结构进行拼焊,焊接出整体叶盘的叶片环(见图 3),最后将轮盘腹板和叶片环电子束焊接为一个整体叶盘结构。

由于叶盘结构焊接过程中涉及的焊缝条数多、结构复杂,以及钛合金焊后变形矫正困难和经济性等因素,对于整体叶盘的焊接必须采用多种变形控制措施。

3.2 整体叶盘焊接变形趋势

整体叶盘结构复杂,在整体工艺安排上,综合考虑加工适宜性,首先将 41 个叶片焊接成一个叶环结构,再与盘件通过环形焊缝连接在一起形成整体叶盘结构。

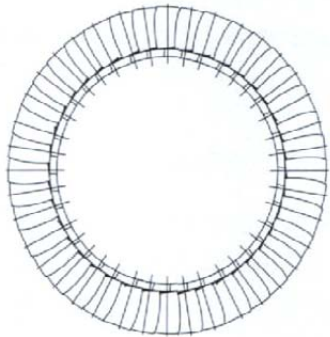


图 2 整体叶盘结构简图
Fig.2 Diagram of blisk structure

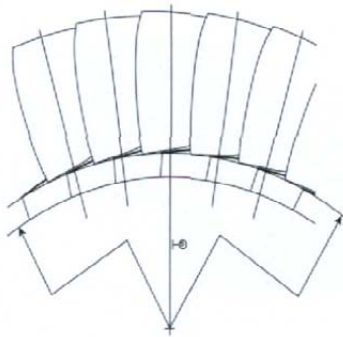


图 3 叶环结构图
Fig.3 Diagram of blade-ring structure

整体叶盘焊接变形的主要因素有:焊接热输入、叶片焊接顺序、夹具等。在叶环焊接时,主要的变形是叶尖定位工艺凸台(反映的是叶片中心线)的跳动值念头,这是由于叶片之间焊接时焊缝受热循环的影响收缩不均匀造成的。在焊接过程中它对扣端焊缝产生预热作用,相当于增加了焊接热输入,在焊接过程中产生了塑性变形。另外,电子束焊缝上下表面宽度不完全一致,也使得收缩不均匀,影响叶尖位置度。考虑到扣期叶片加工余量,设计要求叶尖位置度在 1mm 以内。同样,在叶环与盘的焊接时,封闭环形焊缝产生较大的残余应力,造成塑性变形,由于叶环与盘件相比刚性较差,造成叶环部分上翘、叶尖位置上移。

3.3 焊接顺序优化

不同的焊接顺序对会产生不同的温度热循环,而由此产生的温度应力和变形也会有所不同,而且随着焊接过程的进行,后焊焊缝的初始温度会越来越高,各条焊缝之间温度的相互影响就越来越大。因此,选择整体叶盘的典型焊接顺序时,按温度影响最小原则。按照排列的思想,焊接顺序是有规律可寻的,应采用对称排列法焊接焊缝。

尽管本结构的焊缝比较对称,但由于焊接顺序的原因,每道焊缝焊接所引起的变形实际上并不能相互抵消,而总是先焊的焊缝引起的变形量较大,因此最终的变形方向一般与先焊焊缝的变形方向相一致。虽然还要采用诸如刚性固定等控制变形的措施,但是焊接顺序对于焊接变形的影响依然十分巨大。基于工程实践及数值模拟结果确定了如图 4 所示的焊接顺序。在此对称焊接顺序下,焊接残余变形能够得到有效的控制。

3.4 刚性固定及真空热处理

基于焊接结构中的理论,在焊接时采用刚性固定的方法可以有效地控制焊接变形,这主要是因为刚性固

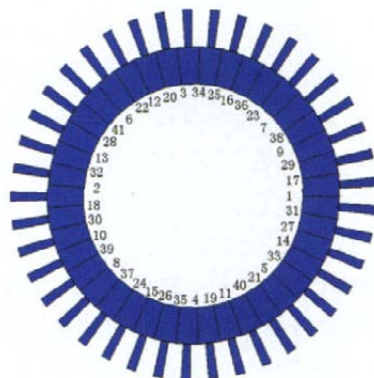


图 4 电子束焊接顺序
Fig.4 Welding order of EBW

定可以避免或者减少结构的外观变形,使得结构的焊接应力异于常规焊接,刚性夹具卸除后,仅会由于应力的重新分布产生一定的弹性变形。如果在卸除夹具之前进行一定的真空时效热处理,则在高温条件下,焊接残余应力将会释放,出炉卸除夹具后期变形量将会大大降低。因而对于整体叶盘的变形控制设计应用了这2种变形控制技术。

对于钛合金焊接结构刚性夹具材料的选择,还应考虑到后续真空热处理较高的温度。由于叶片环结构由41块带叶片的楔形段组成,所以刚性固定时要对其定位问题进行考虑,同时保证固定的刚性。为此,设计了如图5所示的刚性夹具。此夹具包括刚性底座、引弧环、收弧环、叶片定位架各1个,以及41个锁底块等。其中刚性底座的作用是为其他夹具结构提供刚性固定以及实现与焊接工作台的装配;引弧环和收弧环除了用于引弧和收弧外,还起到定位及刚性固定的作用;叶片定位架可以防止电子束焊接过程中叶片发生较大的周向及轴向位移,实现控制变形;锁底块可保障电子束焊接时保障钛合金材料的良好熔透,另外还起到定位叶片轮环的径向位移及防止焊接过程中的径向变形的作用。

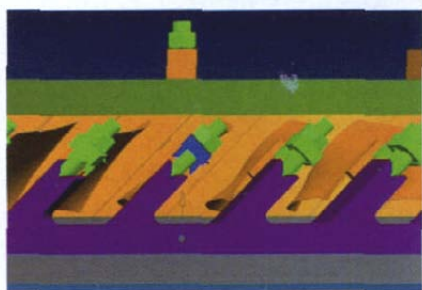


图5 叶片刚性固定焊接夹具
Fig.5 Tooling of blade welding

刚性固定,并按照预定的焊接顺序完成焊接后,带着夹具对结构进行整体的真空消除应力处理^[10],具体参数为550~650℃,2h。

3.5 焊接变形校正

对焊后经真空热处理的整体叶盘结构进行了变形测量,测量结果表明,通过刚性固定的方法,叶片位置变形满足设计要求,但叶环与盘的焊接翘曲变形超出了设计标准(叶片定位凸台到端面高度的理论值为53.7mm,见图6),变形量最大为3mm(见图7)。为此,采用焊后电子束局部加热处理的方法校正焊接残余变形,即在焊缝背面通过电子束局部加热。其基本原理与焊接过程的应力变形相同,在特定的部位进行电子束重

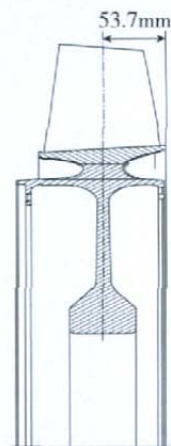


图6 叶盘位置精度要求

Fig.6 Dimension request of blade location

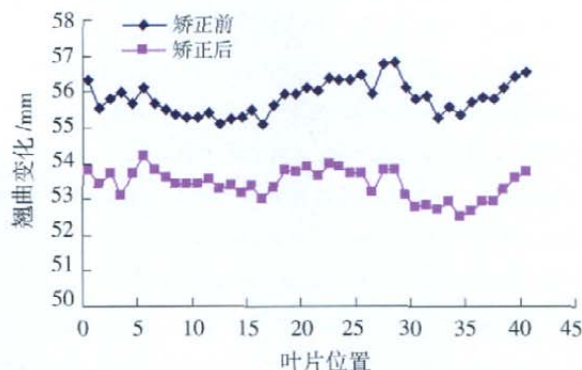


图7 叶环与盘的翘曲变形

Fig.7 Warp distortion of blade to disk

熔,由于加热时产生一定的压缩塑性变形在冷却过程中得以保留,并最终产生相应的收缩残余变形,从而达到控制参与变形的目的。本课题中进行了局部电子束处理,经大量的工艺试验和数值模拟研究,确定了处理位置、顺序和工艺参数。其中工艺参数为:高压150kV,焊接速度8.0mm/s,三角波,焊接电流58mA,校正结果见图7。从结果可以看出,变形量在1mm范围内,经机械加工后可达到设计标准。从而经过以上的综合变形控制措施,实现了整体叶盘的焊接。

4 结论

① 综合采用焊接顺序优化、刚性夹具固定以及真空时效热处理可以使得整体叶盘的焊接变形控制在1mm范围内;

② 局部电子束热处理方法可有效地校正整体叶盘的焊接变形,使变形量由原来的3mm降为1mm以下;

(下转第97页)

状态的撞击接触面撞击力随时间变化的曲线和该状态下各时刻的结构应力,如图6~9所示。

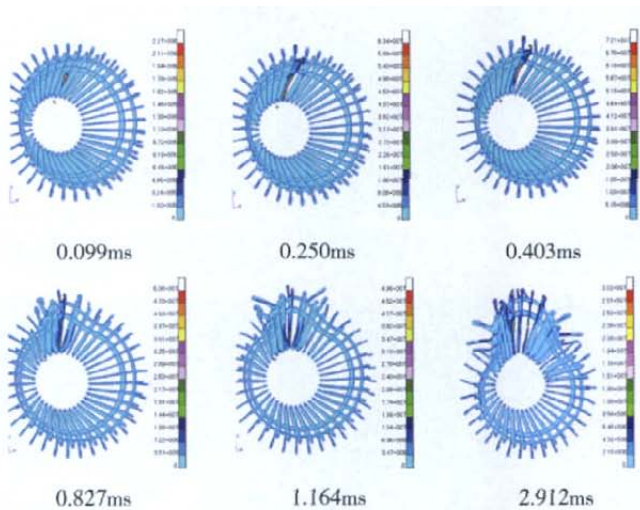


图8 状态3撞击过程结构应力变化
Fig.8 State 3 stress change of structure during collision

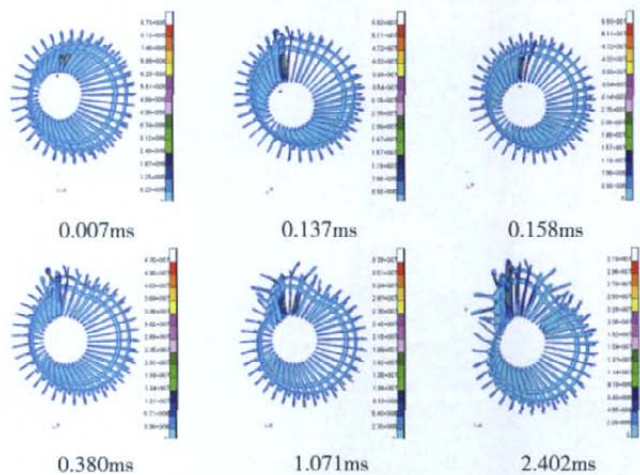


图9 状态4撞击过程结构应力变化
Fig.9 State 4 stress change of structure during collision

7 结果分析与结论

通过以上对加油机伞碰撞动力学数值仿真分析,可以得到如下结论:

① 撞击位置不同,结构响应也不相同。在撞击过程中,加油机伞骨架最大应力为108MPa,远小于材料的屈服极限,撞击力不会造成骨架明显变形或断裂破坏;限位钢丝绳所受的最大拉力为2 557.8N,小于其最小破坏力2.94kN,限位钢丝绳不会破坏,限位钢丝绳强度满足

要求,但其余量较小;

② 撞击力与相撞的部位密切相关,不同的撞击位置,其响应结果亦不相同,撞击接触面最大撞击力为7035N,且发生在受油接头撞击在骨架的正面中部位置;

③ 在受油接头与加油机伞撞击时,将会出现二次撞击现象,撞击位置越靠加油机伞上部,出现二次撞击次数越多;

④ 随着仿真技术的进步和研究的深入,仿真分析可以达到减少试验验证次数,缩短产品开发周期^[4],降低开发费用,优化设计,提高设计质量的目的。

参 考 文 献

- [1] 蒋耘生. 鸟撞冲击动力学的有限元数值仿真研究[D]. 西安:西北工业大学,2002.
- [2] 刘建成,顾永宁. 基于整船整桥模型的船舶碰撞数值仿真. 工程力学,2003,20(5):155-161.
- [3] 王自力,顾永宁. 船舶碰撞动力学过程的数值仿真研究. 爆炸与冲击,2001,21(1):29-34.
- [4] 周昊,黄孝武,韩冰. 弹射座椅冲击性能仿真研究. 中航救生,2007,2:17-20.

(责编 金仰)

(上接第93页)

③ 电子束焊接方法结合适当的变形控制措施能够实现整体叶盘的焊接。

参 考 文 献

- [1] 马建宁,张定华,王增强,等. 大型飞机用发动机的特点及关键制造技术. 航空制造技术,2008(13):56-60.
- [2] 陈光. 一种整体叶盘的加工方法——线性摩擦焊. 航空工程,1999(4):14-15.
- [3] 马铁军,张勇,杨思乾,等. TC4合金线性摩擦焊摩擦时间与变形量的关系. 热加工工艺,2007,36(7):10-11.
- [4] 马铁军,张学军,杨思乾,等. TC4钛合金线性摩擦焊接头的冲击韧性及断口特征. 航空材料学报,2007,27(6):40-44.
- [5] 马铁军,杨思乾,张勇,等. TC4线性摩擦焊接头的力学性能及组织变化特点. 焊接学报,2007,28(10):17-20.
- [6] 刘佳涛,刘金合,杨思乾,等. Ti-6Al-4V线性摩擦焊实验研究. 热加工工艺,2007,26(3):23-24.
- [7] 黄春峰. 整体压盘结构及发展趋势. 航空发动机,2005(4):96-101.
- [8] 范志强,马枚,王荣桥. 航空发动机整体叶盘优化设计. 燃气涡轮试验与研究,2000,13(4):27-30.
- [9] 许鸿吉,尹丽香,李晋炜,等. TC4钛合金电子束焊接接头组织和性能. 焊接学报,2005,26(11):43-46.
- [10] 温戈. 大型Ti-102榫类零件的机械加工及焊接变形控制. 飞机设计,2002(1):53-57.

(责编 小颖)