

薄壁 TC4 钛合金电子束焊接应用研究

Research on Application of Electron Beam Welding for Sheet TC4 Titanium Alloy

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 常荣辉 苏杭

[摘要] 针对某薄壁 TC4 钛合金零件的电子束焊接,设计了焊接工装夹具,保证了焊接变形要求。通过工艺试验,确定了合理的焊接方案,成功的实现了该零件的电子束焊接。同时,针对其成功应用的研究过程,从焊接工艺及加工方案上总结出经验,为薄壁类钛合金零件的电子束焊接提供了借鉴依据。

关键词: 电子束 焊接 薄壁钛合金

[ABSTRACT] Aimed at electron beam of sheet TC4 titanium alloys, the welding frock is designed according to the welding request. By means of technical tests, the welding methods are gained, the part is welded successfully. Meanwhile, the technical experiences of electron beam on sheet TC4 titanium alloys are gained.

Keywords: Electron beam Welding Sheet titanium alloy

随着对航空器的性能和用途等要求的不断提高,新材料、新技术在航空器上大量应用。焊接方面,传统的弧焊工艺将逐步被快速、优质高效的高能束技术取代。电子束焊接与其他焊接方法相比,具有穿透能力强、焊缝深宽比大、焊接速度快、热影响区小、焊接变形小等诸多优点。TC4 钛合金具有比强度高、耐腐蚀、良好的中高温和低温工作能力,是目前世界范围内应用最为广泛的钛合金之一^[1]。TC4 钛合金在航空航天、石油化工、造船、汽车、医药等行业具有越来越广泛的应用。TC4 钛合金主要的化学成分如表 1 所示。

本文所选取的零件材料为 TC4,材样的厚度为 1.0mm,焊缝相关长度为 900mm。对于薄板件,以前从未开展过电子束焊接的工艺研究,而且也没有找到成功的借鉴依据。因此,有必要针对该零件展开电子束焊接

工艺研究。针对该零件的工艺要求,开展了多项工艺试验进行研究,通过反复试验,最终摸索出了合适的工艺参数,确定了焊接方案,成功实现了该零件的电子束焊接,为薄壁件的电子束焊接提供了借鉴经验。

1 零件焊接结构及焊接质量要求

本文所选取的焊接件采用两块厚度为 1.0mm 的 TC4 钛合金薄板,通过电子束焊接对接后,再经后续热成形、超塑成形、机加和激光拼接而成,焊道长度为 900mm。整个加工过程中,电子束焊接为第一步,为保证后续热成形、超塑成形的进行和质量,要求零件焊接后焊道表面平整光滑,无咬边、凸起、凹坑等缺陷,焊道内部质量符合 GJB 1718A 中 II 级检验标准。

2 总体加工思路

根据该件的结构形式可知,影响加工的主要因素有:(1)由于该件较薄,且焊道较长,焊接时易变形;(2)焊前接头配制时,要求间隙控制在 0.05mm 以内,加工难度大;(3)焊接参数可调裕度小,参数精度要求高。鉴于以上几点,零件焊接加工时必须在工装上夹紧进行;为保证电子束对接接头的间隙要求,零件必须采取激光切割下料,并进行研合配制;零件焊前清理和焊接工艺过程严格遵守钛合金相关熔焊工艺要求进行;焊接参数应在与零件同状态的试板上进行摸索优化。

3 焊接工装的设计制造

考虑到零件壁较薄且焊缝较长的特点,焊接时为控制焊接变形,焊接工装在设计时充分考虑了对焊接部位的均匀压紧,设计了琴键式多点压紧装置,在琴键与工件间装夹一个厚 8mm,宽 50mm,比焊缝长 50mm 的铜板,这样既保证施加在零件上的压力均匀,又有利于零件对接间隙的调整,还可起到散热控制变形的目的。同时,考虑到材料磁性对电子束束流品质的影响,整个工装采用无磁性的奥氏体不锈钢加工制造。

4 零件与焊接试样的制备

由于零件采用无填充材料的电子束焊接,要求焊后

表 1 TC4 钛合金的化学成分 %

合金元素			杂质 不大于					其他元素	
Al	V	Ti	Fe	C	N	H	O	单个	总和
5.5~6.8	3.5~4.5	余量	0.30	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40

焊道表面平整光滑,无咬边、凸起、凹坑等缺陷,焊道内部质量符合 GJB 1718A 中 II 级检验标准的要求,所以焊前接头配制就显得非常重要。在零件和试样的下料环节我们选取了激光切割下料。接头配制时,要求精细研合,保证接头间隙小于 0.05mm,接头错位量控制在小于 0.1mm 的范围。

5 焊接设备的选取

所选取的电子束焊机型号为 GENOVA 98,其主要技术指标:加速电压为 20~60 kV;束流为 0~650 mA;额定功率为 40 kW;真空室尺寸为 4.75m(L) × 2.8m(W) × 3.0m(H)。电子束焊机如图 1 所示。



图1 电子束焊机外观
Fig.1 Electron beam welding machine

6 焊接加工方案的确定及焊接试验过程

试验初期设计了 2 种试验方案,具体的方案流程见方案一、方案二(图 2、图 3)。

方案一试验中进行了 3 组焊接试验,每组 3 件试样。编号分别为 I a、I b、I c, II a、II b、II c, III a、III b、III c,所有试验都在与零件同状态的试件上进行。为了保证每个参数焊接过程的稳定性, I a、I b、I c 这 3 个试件选取表 2 中的序号 1 参数; II a、II b、II c 这 3 个试件选取表 2 中的序号 2 参数; III a、III b、III c 这 3 个试件选取表 2 中的序号 3 参数。

对第 1 组试件焊完后,通过目视检查可知: I a、I b、I c 都存在局部烧穿、未焊透现象。分析原因为:(1) 试件装夹不满足要求,局部间隙过大,压力施加不均匀导致局部错位过大;(2) 焊接参数不合理。

吸取第 1 组试件的教训后,调整了装夹方式和焊接规范,进行了第 2 组试件的焊接,焊后目视检查发现, II a、II b、II c 3 个试件除有咬边缺陷外,其他外观质量都合格。分析缺陷原因为焊接参数不合理。

在第 2 组试件的基础上,对焊接参数进一步调整,

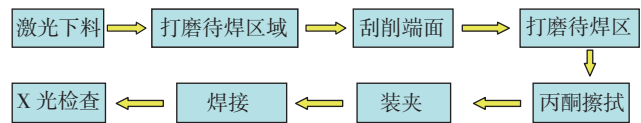


图2 方案一
Fig.2 Scheme I

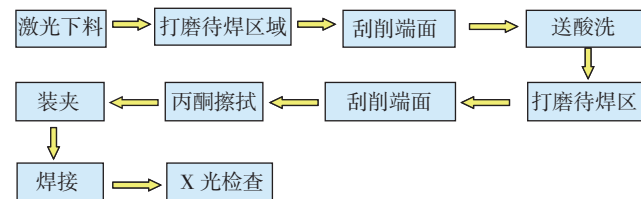


图3 方案二
Fig.3 Scheme II

焊接了第 3 组试件,焊后目视检查发现, III a、III b、III c 三个试件外观成形完全符合焊道表面平整光滑,无咬边、凸起、凹坑等缺陷要求。最后将 2、3 组焊后的试件进行了 X 射线检查,检查结果是: 两组共计 6 件试件的焊缝中心和焊缝边缘区域都存在大量密集的气孔。

在方案一试验的基础上,进行了方案二的试验。试验采取 2 组,每组 3 件试件进行,试件编号分别为 I a、I b、I c, II a、II b、II c。I a、I b、I c 这 3 个试件选取表 2 中的序号 2 参数, II a、II b、II c 这 3 个试件选取表 2 中的序号 3 参数,2 组试件焊接完后,外观质量上与方案一中第 2 组、第 3 组的情况相同,不同的是两组共计 6 件试件的焊缝中心气孔未减少,焊缝边缘区域气孔略有减少。

对方案一、方案二试验中都产生大量密集气孔的现象进行分析,得出主要原因有:(1) 激光切割时采用的是氮气保护,由于激光能量较高,使氮与钛发生反应,从而在切割区产生 TiN,最终导致焊接后在接头中形成氮气孔;(2) 焊接接头焊前未清理干净,导致接头产生氢气孔;(3) 焊接接头清理后,在搬运、装卡过程中发生二次污染,导致焊接后产生氢气孔。

表2 焊接参数

参数序号	加速电压 / kV	聚焦电流 / A	焊接电流 / mA	焊接速度 / (mm·min ⁻¹)	扫描频率 / Hz	X/Y 向扫描
1	55	2.17	6	400	300	2
2	55	2.20	7	450	300	2
3	55	2.19	7	520	120	2

总结了方案一、方案二后,进行了方案调整,制定出了方案三(图 4)。

方案三是在方案二的基础上增加了“铣切端面”、“丙酮擦拭”、“刮削端面”、“打磨待焊区”环节。增加“铣”
(下转第 91 页)

门限为 $10\text{N}\cdot\text{m}$, 给定转速为 $500\text{r}/\text{min}$, 启动时给定负载转矩为 $4\text{N}\cdot\text{m}$, 在 0.16s 时, 给定转矩跃变到 $6\text{N}\cdot\text{m}$ 由图 6 可以看出, 在 0.075s 时速度达到给定转速, 输出转矩开始调整, 而本算法在转矩鲁棒性上明显好于文献 [10] 给出的 DITC。而在 0.16s 时, 负载转矩由 $4\text{N}\cdot\text{m}$ 跃变到 $6\text{N}\cdot\text{m}$ 时, 本算法的转矩波动和响应速度也好于文献 [10] 给出的 DICT 方法。

(2) 空载下的转矩和电流响应速度研究。空载下, 0.15s 时指令转矩由 $4\text{N}\cdot\text{m}$ 跃变到 $2\text{N}\cdot\text{m}$ 时, 本文的控制策略在转矩响应速度上明显好于文献 [10] 的方法。而对应的相电流幅值小于文献 [10] 的电流。

在 2 种 DITC 算法下, 本算法转矩脉动抑制效果明显好于文献提出的滞环控制算法。图 7 是仿真结果。

5 结论

针对 SRM 非线性的特性, 文章详细地分析了不对称半桥结构下的 DITC 滞环控制策略。通过仿真实验证明, 相比于电流优化算法 DITC 算法简单。而且本文提出的指环控制策略有效地提高了转矩脉动抑制能力和系统的响应速度及其鲁棒性。

参考文献

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 夏长亮, 陈自然, 李斌. 基于 RBF 神经网络的开关磁阻电机瞬时转矩控制. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 127-132.
- [4] 李红梅, 张志全, 李忠杰. 减小小功率开关磁阻电机转矩脉动的迭代学习控制. 电工技术学报, 2006, 21(10): 67-70.
- [5] 李珍国, 魏艳君, 阚志忠, 等. 基于四电平功率变换电路的开关磁阻电机瞬时转矩控制. 电工技术学报, 2007, 22(8): 144-149.
- [6] Nicholas J N, Robert D L. Rotating vector methods for smooth torque control of a switched reluctance motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000(2): 540-548.
- [7] Robert B I, De Doncker R W. Direct instantaneous torque control of switched reluctance drives//IEEE 37th IAS Annual Meeting, 2002: 1605-1609.
- [8] Nisai H F, Marcus M, Robert B I. High-dynamic four-quadrant switched reluctance drive based on DITC. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005(5): 1232-1242.
- [9] Parreira B, Rafael S, Pires A J, et al. Obtaining the Magnetic Characteristics of an 8/6 Switched reluctance machine: from FEM analysis to the experimental tests. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005(6): 1635-1643.
- [10] Rodrigues M, Costa B P J, Suemitsu W. Fuzzy logic torque ripple reduction by turn-off angle compensation for switched reluctance motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001(3): 711-715.

(责编 夏宛)

(上接第 87 页)

切端面”的目的是在激光下料后, 增加机加铣切工序, 光滑的去掉 $0.3\sim 0.5\text{mm}$ 材料, 以保证氮气与钛的氧化层被去除。增加“丙酮擦拭”、“刮削端面”、“打磨待焊区”的目的是确保焊前清理的清洁度。

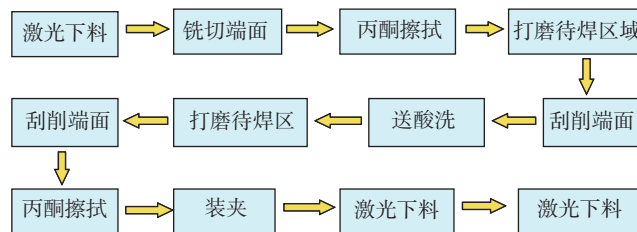


图4 方案三
Fig.4 Scheme III

最后按方案三进行了 1 组共计 6 件试件的试验。试验选取表 2 中的序号 3 参数。试件焊接完后, 外观质量完全符合焊道表面平整光滑, 无咬边、凸起、凹坑等缺陷要求, X 射线检查除有 1 件存在一处气孔外, 其余 5 件都未发现气孔, 焊接质量完全符合 GJB 1718A 中 II 级检验标准的要求。

7 零件的焊接

根据试验结果, 最终确定选取方案三、表 2 中序号 3 的规范进行零件焊接, 焊后零件一次交检合格率达到 100%, 成功实现了零件的电子束焊接。

8 结论

(1) 本文根据零件结构, 结合电子束焊接要求, 设计了合理的焊接工装夹具, 保证了焊接变形的要求。

(2) 在焊接前对零件进行了严格的清理, 保证了清洁度, 同时防止了二次污染, 这对于获得合格的焊缝是至关重要的。

(3) 采用不同的方案对薄壁 TC4 钛合金零件的电子束焊接进行研究。通过试验, 确定了最优的焊接参数, 制定了合理的焊接方案。

(4) 薄壁钛合金焊接件在选用激光切割下料时, 应避免选用氮气保护, 优选氩气保护。

(5) 成功的实现了薄壁 TC4 钛合金零件的电子束焊接, 同时也为薄壁钛合金零件的电子束焊接积累了经验, 对于类似薄壁钛合金零件的电子束焊接具有实际的指导意义。

参考文献

- [1] 李文鹏, 陈永楠, 魏建锋, 等. TC4 合金 800C 热循环组织和力学性能变化. 稀有金属材料与工程, 2010(39): 74-76. (责编 亦非)