

电子束焊接能量对焊缝力学性能的影响研究

Effect of Electron Beam Welding Energy for Weld Mechanical Property

上海空间推进研究所 于康 周俊 顾利峰

[摘要] 电子束焊接能量对 TC4 钛合金焊缝力学性能具有一定的影响。随着电子束焊接次数的增加,焊缝能量输入增加,焊接残余拉应力逐渐增大,焊缝拉伸性能和断裂延伸率降低;当焊接次数达到 6 次时,拉伸强度为 927MPa,低于母材强度的 90%,无法满足 GJB1718A-2005 I 级标准要求;当焊接次数达到 4 次时,焊缝断裂伸长率低于 10%。

关键词: 钛合金 电子束 力学性能 应力

[ABSTRACT] Electron beam welding energy influences the TC4 titanium alloy welds mechanical properties. With the increase of the number of electron beam welding, welding energy input increases, weld residual stress increases, tensile strength and fracture elongation reduces. When the welding number reaches 6 times, the strength is 927MPa, less than 90% of the base material strength, could not meet the GJB1718A-2005 I grade standards. When the welding number reaches 4 times, weld fracture elongation is less than 10%.

Keywords: Titanium alloy Electron beam welding Mechanical properties Stress

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.090

随着航空、航天、武器装备性能要求的不断提高,对于材料性能的要求越来越苛刻,而 TC4 钛合金具有耐腐蚀、比强度高、高温性能良好等一系列优点,在航天、航空、武器领域有很好的应用前景^[1-4]。随着对材料研究的深入和加工技术的发展,TC4 钛合金的综合性能逐步得到更全面的认识和更广泛的应用,因此受到国内外的广泛关注^[5-6]。

表面张力贮箱的壳体材料为 TC4,其赤道圆焊缝采用电子束焊接方法。赤道圆焊缝为重要承压焊缝,焊接检验标准为 GJB1718A-2005 I 级,气孔、未焊透、未熔合等缺陷通过 X 射线检测,焊缝拉伸强度不得低于母材的

90%。赤道圆焊缝结构复杂,焊前表面处理困难,若一次电子束焊接产生缺陷且不满足检验标准要求,则需要进行补焊。电子束焊缝热影响区较小,经过一次电子束焊接的焊缝力学性能与母材接近,但经过多次电子束焊接后,焊缝受到的累积能量输入增大,其焊缝力学性能则无从考证。

本文研究了电子束焊接能量输入对 TC4 钛合金焊缝力学性能的影响,为设计与工艺人员对补焊次数的确定提供理论依据。

1 试验材料及方法

试验所用的材料为钛合金 TC4 板材,厚度为 3mm,其化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。板材尺寸及电子束焊接位置如图 1 所示,焊后板材采用线切割方法加工成图 2 所示的拉伸试板。

表1 TC4钛合金的化学成分 (原子数分数) %

元素	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
含量	6.06	3.92	0.3	0.013	0.014	0.014	0.15	余量

本试验采用的焊接设备为真空电子束设备。焊枪为 CT4 型间热式阴极三级枪,所使用阴极最大功率为

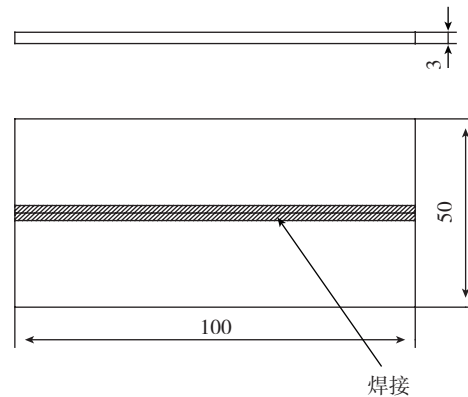


图1 板材试验件示意图

Fig.1 Diagram of plate test piece

表2 TC4钛合金的力学性能

材料	密度 / (g·cm ⁻³)	熔点 /℃	线膨胀系数 / (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	热导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%
TC4	4.45	1677	9.1	8.37	1041	17

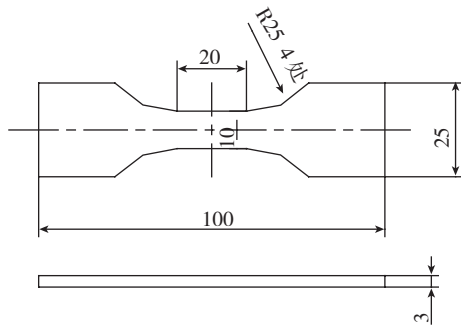


图2 拉伸试板示意图

Fig.2 Diagram of tensile test panels

15kW, 焊接电压最高为 60kV。试验选用的应力测量设备为图 3 所示的 X-350A 型 X 射线衍射残余应力测试设备, 其测量应力为表面应力, 深度约 60~80 μm 。

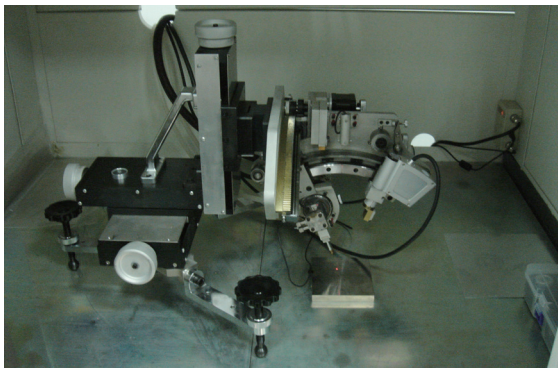


图3 X-350A型X射线衍射残余应力测试设备

Fig.3 X-350A test equipment of X-ray diffraction

2 电子束热输入量理论分析

电子束焊是在真空环境下, 利用汇聚的高速电子流轰击工件接缝处, 电子的动能转变为热能而使被焊金属熔合的一种焊接方法。在高压蒸汽的作用下, 熔化的金属被排开, 电子束能继续撞击深处的固态金属, 在被焊工件上钻出一个锁形小孔, 即“匙孔”, “匙孔”的周围被液态金属包围。随着电子束与工件的相对移动, 液态金属沿“匙孔”周围流向熔池后部, 逐渐冷却、凝固形成焊缝 [7-8]。

电子束焊接参数主要包括电子束电流、加速电压和焊接速度, 而焊接热输入量则是焊接参数综合作用的结果, 其对于材料焊缝的组织 and 力学性能有着直接的影响。电子束焊接时热输入量的计算公式为:

$$Q = N U_b I_b / v \quad (1)$$

式中, Q 为热输入量; U_b 为加速电压; I_b 为电子束电流; v 为焊接速度; N 为作用在同一焊缝位置的次数。

由公式(1)可知, 作用在焊缝处的能量输入与其作用在该位置的次数成正比。电子束焊接的功率密度高,

可达 $10^6 \text{W}/\text{cm}^3$, 能量集中, 焊缝的热影响区较小, 其焊缝的组织与性能一般与母材相近。此时, 假设经单次热输入量作用的焊缝组织与性能与母材性能的关系系数为 K , 即

$$P_1 = KP \quad (2)$$

式中, P_1 为单次热输入量作用的焊缝组织与性能; P 为母材的组织与性能。

由公式(2)可近似推导, 当焊缝同一位置经过 N 次焊接热输入作用下, 焊缝组织与性能与母材的关系如公式(3)。

$$P_N = K^N P \quad (3)$$

式中, P_N 为 N 次热输入量作用下的焊缝组织与性能。

3 电子束热输入量对焊缝拉伸性能的影响

本次试验以表面张力贮箱赤道圆焊缝的热输入量为研究对象, 研究其对材料组织与性能的影响。赤道圆焊缝的熔深要求为 2.5~3.5mm, 其电子束焊接的流程如图 4 所示。电子束焊接及补焊参数如表 3 所示。

钛合金材料经过一次电子束热输入作用后, 焊缝中一些低熔点合金易挥发, 焊缝组织和硬度较本体材料发生改变, 因此, 要达到相同的熔深要求, 补焊的能量输入一般要略大于首次焊接时的能量输入。结合焊缝熔深测量技术, 首次电子束焊接焊接速度确定为 20mA, 补焊电子束焊接焊接速度确定为 21mA, 两者的能量输入比为 1 : 1.05。

图 5 为电子束焊接热输入量对焊缝拉伸强度的影响图。由图 5 可知, 随着焊接次数的增多, 热输入量增大, 焊缝的拉伸强度逐步降低, 当仅经历了单次电子束焊接过程时, 拉伸强度达到 1014MPa, 为母材的 97%, 随着焊接次数的增加, 热输入量增加, 拉伸强度逐步降低, 但下降较缓慢, 当经历 6 次电子束焊接后, 拉伸强度为 927MPa, 低于母材强度的 90%。焊缝拉伸强度的降

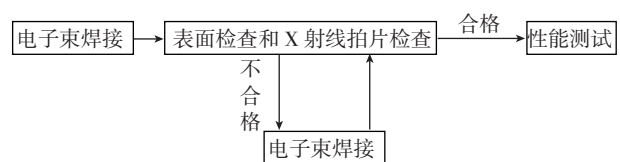


图4 电子束焊接流程图

Fig.4 Flowchart of electron beam welding

表3 电子束焊接参数表

	加速电压 / kV	焊接束流 / mA	焊接速度 / (mm · s ⁻¹)
首次电子束焊接参数	60	20	20s
补焊电子束焊接参数	60	21	20

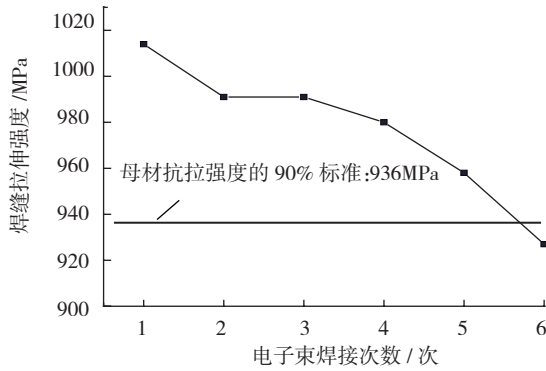


图5 电子束热输入对焊缝拉伸强度的影响

Fig.5 Effect of electron beam welding heat input for tensile strength of weld

低与焊缝部位的残余应力有直接的对应关系。由于焊缝部位受热影响,在冷热循环过程中,在不等温温度场的作用下,焊缝部位的收缩变形易造成其内部存在拉应力,拉应力的存在必然会降低其拉伸断裂强度,随着焊接次数的增加,热输入量逐步增加,焊缝部位的变形增大,残余拉应力也逐步增大,因此拉伸强度逐步下降。

为了更好地研究焊接次数对焊缝拉伸强度的影响,采用 X 射线衍射仪测量焊缝表面部位存在的残余应力, X 射线衍射残余应力测定的参数如表 4 所示,标准试样的零应力测定值为 6MPa,满足测定标准要求。

表4 X射线衍射残余应力测定参数表

靶材	衍射晶面	管电压 /kV	管电流 /mA	扫描步距 / (°)	计数时间 /s	准直管直径 /mm
铜靶	(213)	28	9	0.05	20	2

图 6 为经不同次电子束焊接后的接头表面残余应力的测试结果。由图 6 可知,焊缝部位在电子束焊接过程中的不均匀温度场作用下,发生不均匀的收缩变形,最终产生了残余拉伸力。当接头通过一次焊接时,其表面存在 256MPa 的残余拉应力。随着焊接次数的增加,电子束焊接能量输入增加,接头收缩变形加剧,其残余拉应力也逐步提高。当焊接次数达到 6 次时,残余拉应

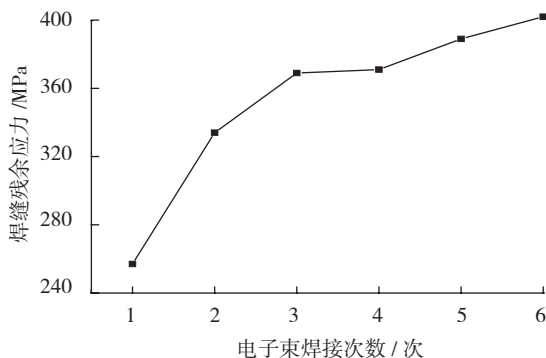


图6 接头表面残余应力的测试结果

Fig.6 Test results of joint surface residual stress

力提高至 396MPa。残余拉应力的提高导致了焊缝拉伸强度的降低。

赤道圆焊缝的检验标准为 GJB1718A-2005 I 级,其要求焊缝拉伸性能不得低于母材的 90%。当电子束焊接次数达到 6 次时,焊缝拉伸强度低于母材的 90%,因此,单一针对焊缝拉伸强度的指标要求,焊缝同一位置的焊接次数不得超过 5 次。

4 结论

(1) 随着电子束焊接能量输入次数的增加,焊缝拉伸性能和断裂延伸率逐步降低,焊接残余拉应力逐渐增大;

(2) 当焊接次数达到 6 次时,拉伸性能低于母材强度的 90%,无法满足 GJB1718A-2005 I 级标准要求。

参考文献

- [1] Casavola C, Pappalettere C, Tattoli F. Experimental and numerical study of static and fatigue properties of titanium alloy welded joints. *Mechanics of Materials*, 2009, 41: 231-243.
- [2] Tsay L W, Tsay C Y. The effect of microstructures on the fatigue crack growth in Ti-6Al-4V laser welds. *International Journal of Fatigue*, 1997, 19(10): 713-720.
- [3] 胡美娟, 刘金合. 12mm 厚钛合金平板电子束焊接的数值模拟. *中国有色金属学报*. 2007, 17(10): 1622-1625.
- [4] Boyer R R. An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 213: 103-114.
- [5] Sun Z C, Yang H. Microstructure and Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy under Multi-step Local Loading Forming. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 523: 184-192.
- [6] 李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 等. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景. *钛工业进展*. 2003, 20(4-5): 90-94.
- [7] 陈芙蓉, 霍立兴, 张玉凤. 电子束焊接技术在工业中的应用与发展. *电子工艺技术*. 2002, 23(2): 56-58.
- [8] 陈志勇, 王清江, 刘建荣, 等. Ti-60 钛合金电子束焊接接头高温下的失效与变形行为. *金属学报*, 2008, 44(3): 263-271.

(责编 早春)

(下转第 89 页)

dimensional fatigue crack growth and life predictions. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010 (77): 2840-2863.

[7] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79: 12-49.

[8] Moes N, Dollow J, Belytschko T. A finite element for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 46(1): 131-150.

[9] Wu E M, Reuter R C. Crack extension in fiberglass reinforced plastics. University of Illinois, 1968.

[10] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册. 北京: 中国标准出版社, 2001.

(责编 亿霖)