

TC4-DT 材料高压电子束焊接框工艺研究*

高峰,倪家强,关峰

(中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司,沈阳 110850)

[摘要] 对 TC4-DT 材料高压电子束框工艺进行了研究。采用高压电子束焊接技术来实现复杂结构、大厚度难熔金属的热工艺成形,并对工艺、微观形貌、力学性能及微观组织进行系统性的分析。试验结果表明:电子束所形成的焊缝较为平整,成形较窄,拉伸、冲击强度较高,抗拉性能强于母材,但冲击韧性有所下降;焊缝接头网篮组织结构中,焊缝组织不见明显晶界,保证了焊缝组织的连续,且晶粒交错细化。

关键词: 高压电子束焊;力学性能;微观组织;钛合金

Study on High Voltage Electron Beam Welding Frame of TC4-DT

GAO Feng, NI Jiaqiang, GUAN Feng

(AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] High voltage electron beam frame process of TC4-DT material is studied. High voltage electron beam welding technology is used to realize the hot forming process of refractory metal with complex structure and large thickness, and the process, microstructure, mechanical properties and microstructure are analyzed systematically. The experimental results show that the formation of the electron beam is relatively flat, the shape is narrow, the tensile and impact strength are higher, and the tensile strength is stronger than that of the base metal, but the impact toughness is decreased. Meanwhile, the weld joint microstructure of lamellar structure has no obvious boundaries, which ensure the continuity of weld microstructure, and grain refinement, staggered.

Keywords: High voltage electron beam welding; Mechanical property; Microstructure; Titanium alloy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.04.079

电子束焊接是利用高压加速装置形成的高功率电子束流,通过磁汇聚得到很小的焦点(其功率密度可达 $10^3\sim 10^4\text{ W/cm}^2$),形成“匙孔效应”^[1-4],当轰击置于真空中的焊件时,电子的动能迅速转变为热能,从而使金属熔化,实现焊接过程。该技术自 20 世纪就受到国际的广泛关注^[5-6],并大量应用于工业制造当中^[7],是一种优质高效的加工方法。真空电子束焊虽已在国际上获得广泛应用但国内还处于初级阶段^[8]。近年来随着航空工业的飞速发展,以及新机型的研发,许多大型结构件迫切需要一种可靠的、变形量小的、经济的连接技术进行加工,而电子束焊作为一种先进的焊接技术具有很大的发展潜力。特别是飞机后机身大型钛合金承力框类零件,由于整体外廓尺寸大、端面厚度大、承力载荷要求高,若采用整体锻件的方式不但给机加带来加工难度大、周期长、切削率低等问题,而且目前国内的锻造设备也很难满足飞机设计的锻件尺寸需求,加之造价昂贵、维护及

其他费用大大提高了零件原料成本。所以,综合来看,电子束焊接框工艺是一种相对廉价、可靠的先进连接技术,可以应用到航空制造领域中来。

1 工艺参数摸索及结果分析

1.1 TC4-DT 锻件选取

选取 42mm 和 64mm 试件分别作为 1 号、2 号,经机械加工后制得 42mm×75mm×150mm 和 64mm×75mm×150mm 各两对作为焊接鉴定试件。

1 号和 2 号试件母材性能如表 1 所示。

1.2 焊接工艺参数的确定

焊接工艺参数试验分别选取 64mm 和 42mm 厚试验料,分别用于确定 64mm 和 42mm 厚接头工艺参数,确保焊缝钉尖嵌入工艺垫板,保证焊缝接头质量。

(1) 焊枪距试验件表面距离: 选取 400mm 为工作距离。

(2) 聚焦电流: 根据确定的表面焦点,调整并确定合适的焦点位置,此时的焦点电流为试件的聚焦电流。最

* 基金项目: 飞机钛合金尾段制造关键成套装备研制及示范应用(2013ZX0410041)。

表1 TC4-DT锻件力学性能

代号	$\sigma_b \geq 840$ MPa	$\sigma_{0.2} \geq 745$ MPa	$\delta_5 \geq 8\%$	$\psi \geq 15\%$	$K_{IC} \geq 90$ MPa·m ^{1/2}	备注
1号	894	833	12.7	27.3	107.2	纵向拉伸
	916	850	10.0	27.3		纵向拉伸
	920	869	11.7	27.7	104.6	横向拉伸
	909	854	11.0	30.1		横向拉伸
2号	899	849	9.7	36.2	105	纵向拉伸
	892	839	9.7	36.2		纵向拉伸
	917	861	9.3	21.4	108.7 (K_Q)	横向拉伸
	899	845	8.7	21.4		横向拉伸

注： K_Q 为断裂韧性。

终确定 64mm 和 42mm 的聚焦电流为 2184mA；

(3) 电子束流：根据多次试验，经过系统分析、修正参数，最终确定 64mm 和 42mm 试件的焊接电流分别为 165mA 和 110mA；

(4) 焊接速度：选用确定的聚焦电流和电子束流，调整焊接速度，确定 64mm 和 42mm 试件的焊接速度为 5mm/s。

64mm 和 42mm 厚 TC4-DT 试件的高压电子束焊接参数见表 2。

表2 TC4-DT钛合金高压电子束焊接工艺参数

接头厚度/mm	方式	焊接速度 / (mm·s ⁻¹)	加速电压 /kV	电子束流 /mA	聚焦电流 /mA	扫描频率 /Hz	扫描波形	V_x 方向扫描	V_y 方向扫描
42	封焊	12	150	50	2184	-	-	-	-
	焊接	5	150	110	2184	300	E1	0.37	0.37
64	封焊	12	150	30	2184	-	-	-	-
	焊接	5	150	165	2184	300	E1	0.3	0.3

1.3 组织形貌

按照确定的工艺参数对试件进行焊接，焊接过程中熔池成形稳定，无明显飞溅，焊接工艺性优良，焊后零件如图 1 所示。焊后机械加工去掉引入板、引出板及焊接垫板。对试件进行编号，64mm 鉴定试件编号为 64-1、64-2，42mm 鉴定试件编号为 42-1、42-2。经外观检查，试件焊缝全部焊透，焊缝成形良好，外观检查符合要求。焊后对零件进行 X 光检查均符合一级接头要求，同时对加工后的试件进行 X 光检验，均满足要求。

对试件进行低倍腐蚀可见，焊缝呈平行型，在试块



图1 64mm和42mm焊后零件

Fig.1 64mm and 42mm parts after welding

区间焊缝平行，形态良好。平行型焊缝其特征在于焊缝两侧熔合线几乎平行分布，焊缝在顶部和底部宽度接近。这种类型焊缝几何尺寸规则，因此性能分布也较均匀，是焊接过程中较理想的焊缝形状，如图 2 所示。



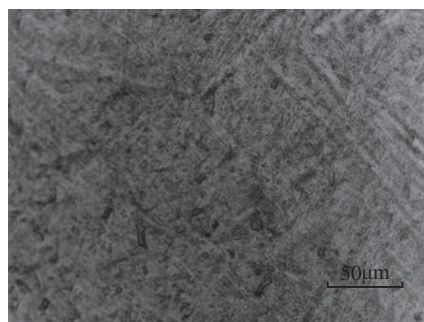
图2 焊后试块低倍形貌

Fig.2 Low times morphology of specimens after welding

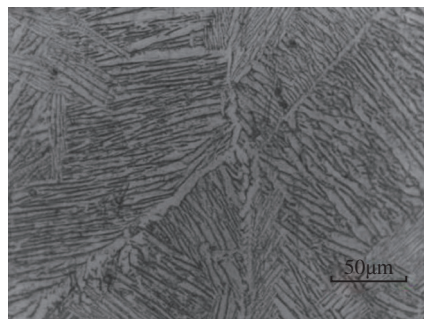
2 试样微观形貌及分析

图 3 为焊接接头金相显微组织，TC4-DT 电子束焊缝基体为 α 片层组织，在 750℃ 保温 1.5h 去应力退火时， α 片层和 α 晶界有所长大(见图 3 (a))， α' 相马氏体与 α 相晶体的结构极其相近，同方向的成团地聚在一起，与不同方向的马氏体交叉；在结晶温度以上，原始 β 晶粒再结晶析出针状 α' 组织。由于温度达到 β 相变温度以上， α 相开始完全 β 化或不完全 β 化， β 得到了进一步细化， α 相与 β 相的晶界进一步模糊。热影响区为原始 α 组织，原始 β 组织和细小的 α' 马氏体组织组成，由于热影响区的温度较焊接接头温度低， α 相不能完全转变，少量已转变的 α 相由于经历的高温时间较短，形成少量细小的针状 α' 马氏体(见图 3 (b))；TC4-DT 焊缝在电子束流高温作用下，快速冷却形成大量的长针状 α' 马氏体，针状马氏体交错排列，

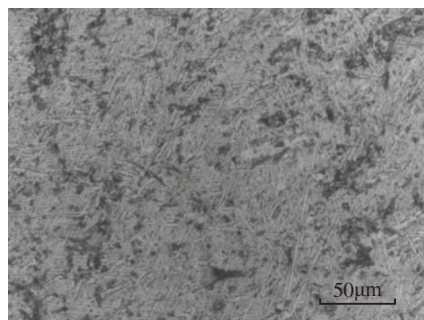
由图中我们可以看出 α - β 相钛合金标志性的网篮组织结构,焊缝组织不见明显晶界(见图 3(c))。



(a) 母材



(b) 热影响区



(c) 焊缝

图3 750℃, 1.5h条件下42mm焊接接头显微组织
Fig.3 42mm weld microstructure with 750℃, 1.5 hours

3 力学性能检测

去应力退火后送理化测试中心进行性能检测, 64mm 鉴定试块分上、中、下选取 3 件拉伸试件, 3 件冲击试件。42mm 鉴定试块分上、下选取两件拉伸试件, 两件冲击试件。

拉伸试验依据文件 GB/T 228, 试验采用直径为 $\phi 5$ 的 M12 螺纹试棒, 冲击试验依据文件 GB/T 2650, 试样采用标准 U 型缺口试样, 试样尺寸为 10mm × 10mm × 55mm。64mm 试块选取两个断裂韧度试件, 断裂韧度试验依据试验方法 GB/T 4161, 试样采用标准 CT 试样, 试样厚度 B 取 50mm, 试验环境温度为室温, 取样尺寸 50mm × 125mm × 120mm, 开口位于试样焊缝

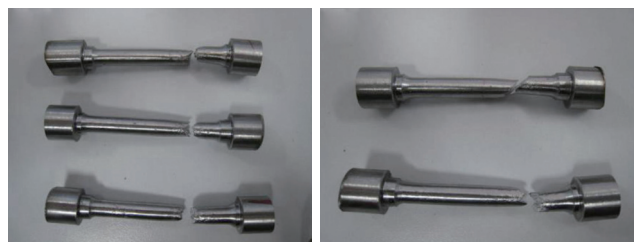
中心。

试验在纳克 N1150 冲击试验机和日本岛津 AG-X 拉伸试验机进行, 断裂韧性试验在中科院金属所 INSTRON 8850 疲劳试验机上进行。

试验发现, 64mm 和 42mm 电子束焊接接头的拉伸试件断裂均断裂在母材处, 断口呈锯齿状(42mm 有一件拉伸试验断后呈近 45° 斜面断裂)。试件的检测结果均大于标准要求的数值, 且断在母材处, 由表 1 可以看出 TC4-DT 材料母材的抗拉强度, 屈服强度分别在 892~920 MPa、833~869 MPa 之间, 而焊缝的抗拉强度, 屈服强度如表 3 所示, 分别在 848~902 MPa、830~862 MPa 之间, 说明焊接接头的抗拉强度, 屈服强度基本相当低于母材, 即电子束焊缝强度与母材相当, 塑性却低于母材。电子束焊缝属于焊缝强度高组配^[9]于母材, 我们可以从表 1、3 中看到母材的延展性多集中在 10%~12%, 而焊缝则在 7%~9%。电子束焊缝拉伸试样断裂位置出现在远离焊缝的母材位置上, 如图 4 所示。这一结果与数据所表现相一致。由图 2 我们已经可以看出电子束焊缝由于其高速焊接, 快速冷却焊缝位置形成了柱状晶, 长大析出细小针状马氏体成网篮结构, 强化了焊缝强度。由于电子束焊缝的热影响区形成得既快又窄, 同时又出现了钛马氏体这种脆硬相结构^[10], 这大大加大了热影响区的强度, 但降低其塑性。这就是焊缝表现高强度低塑性的力学性能, 从组织上看母材的片层结构成为轻度最弱的位置, 这也与电子束焊缝拉伸试样断裂位置出现在远离焊缝的母材位置上相吻合, 所以总体上电子束焊缝抗拉性能上表现为强于母材。

表3 TC4-DT钛合金电子束焊接拉伸性能

厚度/mm	$\sigma_b \geq 780\text{MPa}$	$\sigma_{0.2} \geq 690\text{MPa}$	$\delta_5 \geq 5\%$	$\psi \geq 12\%$	断裂位置
64	877 MPa	847MPa	9.3%	31.0%	母材
	902 MPa	862MPa	9.7%	27.1%	母材
	891 MPa	850 MPa	8.0%	26.6%	母材
42	894.0 MPa	841.4 MPa	8.0%	20.0%	母材
	848.9 MPa	830.6 MPa	7.0%	18.5%	母材



(a) 64mm 拉伸试件断裂形貌 (b) 42mm 拉伸试件断裂形貌

图4 拉伸试样断裂形貌

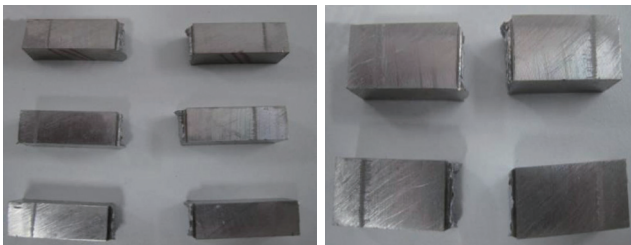
Fig.4 Fracture morphology of tensile specimens

64mm 和 42mm 电子束焊接接头的冲击性能检测发现,64mm 和 42mm 试件的测试结果均大于标准中要求的数值。具体数值如表 4 所示。

表4 TC4-DT钛合金电子束焊接冲击性能

厚度 /mm	$a_{KU} \geq 350kJ/m^2$
64	641 kJ/m ²
	547 kJ/m ²
	507 kJ/m ²
42	528 kJ/m ²
	610 kJ/m ²

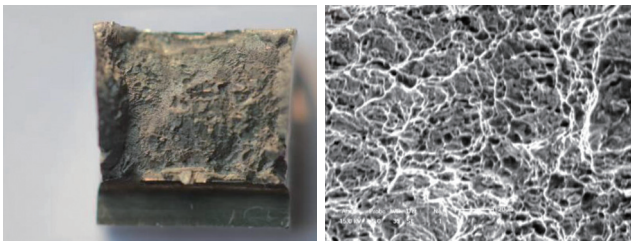
冲击韧性试件如图 5 所示,从图 6 (a)可以发现,冲击断口有明显的晶状区和纤维区。从图 6 (b)可以发现,是典型的韧性断裂。



(a) 64mm 冲击试件断裂形貌 (b) 42mm 冲击试件断裂形貌

图5 冲击试样断裂形貌

Fig.5 Fracture morphology of impact specimen

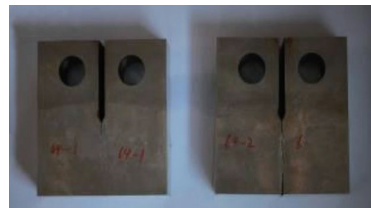


(a) 冲击断口宏观形貌 (b) 冲击断口微观形貌

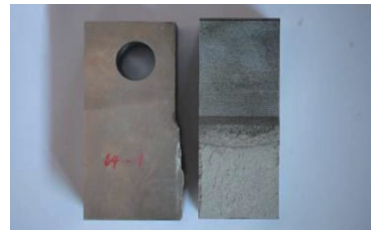
图6 焊接接头冲击断口形貌

Fig.6 Impact fracture morphology of welded joints

图 7 冲击断裂出现的位置,该区域在焊缝区与热影响区之间,热影响区的长大的等轴晶与焊缝区的柱状晶联生,保证焊缝与母材的紧密连接。我们对 64mm 焊接试件进行断裂韧性试验,断裂韧性值分别为试件 1: $K_{IC}=80.53MPa \cdot m^{1/2}$,试件 2: $K_{IC}=81.61MPa \cdot m^{1/2}$,满足标准中要求 $K_{IC} \geq 80MPa \cdot m^{1/2}$ 的要求值,焊接接头的最大力 P_{max} 在 130kN 左右。尽管没有做断口 SEM 图,但断口形貌照片可以观察发现,试件 1 断口起伏较大,而试件 2 的断口较为平整。因此,TC4-DT 材料在断裂韧性上有一定波动,呈现不同的断口形貌,但焊接接头的 K_{IC} 试验数值均满足标准中规定的要求。



(a) 断裂韧性试件整体相貌



(b) 试件 1 断口形貌



(c) 试件 2 断口形貌

图7 断裂韧性试件

Fig.7 Fracture toughness specimen

4 结论

通过本次试验对 TC4-DT 钛合金材料的高压电子束焊缝的工艺、性能、微观组织进行研究,为钛合金大厚度电子束焊接技术在航空领域的进一步应用积累了经验,并得出以下结论:

(1) TC4-DT 焊缝在电子束流高温作用下,快速冷却形成大量的长针状 α' 马氏体,针状马氏体交错排列,焊缝接头呈 $\alpha - \beta$ 相钛合金标志性的网篮组织结构,焊缝组织不见明显晶界,保证焊缝组织连续,且晶粒交错细化,快速成型晶粒长大,但相对其他传统焊接方式较小。

(2) TC4-DT 焊缝电子束所形成的焊缝较为平整,成型较窄,拉伸、冲击强度都较高,抗拉强度、屈服强度数据与母材相当,但抗拉性能表现高于母材,冲击韧性有所下降,且对设备和试样的选取要求较高。

参考文献

[1] 王利发, 刘建中, 胡本润. TA15 钛合金电子束焊接接头力学性能[J]. 焊接学报, 2007, 27(1): 97-100.

WANG Lifa, LIU Jianzhong, HU Benrun. Mechanical properties of electron beam welded joint of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Welding, 2007, 27(1): 97-100.

[2] SARASH N, G PILAI M, MATHEW J. Investigations into the (下转第86页)