

TC4 钛合金电子束焊接工艺技术研究

Electron Beam Welding Technology of TC4 Titanium Alloy

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 林波 虞文军 李飞 沈剑
中航工业北京航空制造工程研究所高能束流国防科技重点实验室 唐振云

[摘要] 研究了厚板钛合金电子束焊接工艺及变形,分析了不同热处理工艺对焊接接头的拉伸性能和冲击性能的影响。试验结果表明,焊缝的横向变形量比纵向变形量大,横向变形为 0.4~0.6mm,纵向变形为 0.1~0.5mm。不同热处理条件对焊接接头的拉伸性能和冲击性能有一定的影响。采用热处理工艺 2 的焊接接头抗拉强度、屈服强度略高于热处理工艺 1,而其断面收缩率、延伸率和冲击功均低于热处理工艺 1。

关键词: 钛合金 电子束焊接 焊接变形 力学性能

[ABSTRACT] The electron beam welding technology and distortion of thick titanium alloy joints is investigated. The effect of heat treatment on tensile and impact properties of thick titanium alloy joints by electron beam welding is analyzed. The results show that the transverse distortion of thick titanium alloy joints is higher than the longitudinal distortion. The transverse distortion is 0.4~0.6mm, while the longitudinal distortion is 0.1~0.5mm. The tensile and impact property of welded joints is affected by different heat treatment parameter. The tensile strength and yield strength of welded joints by heat treatment parameter 2 are higher than the ones by heat treatment parameter 1, but the percentage reduction of area, percentage extension and impact work of the former are lower than the ones of the later.

Keywords: Titanium alloy Electron beam welding Distortion Mechanical property

航空和宇航的飞速发展和应用需求的增加,促进了钛合金的应用。目前,钛合金在航空领域的应用正处于上升阶段。美国在 20 世纪 80 年代以后设计的各种先进军用战斗机和轰炸机中,钛合金用量已经稳定在 20% 以上。例如,第三代战斗机 F-15 钛合金用量占 27%,而第四代战斗机 F-22 钛合金用量占 41%,其中 86% 以上为 TC4 合金^[1-3]。而真空电子束焊接技术由于具有真空环境下焊接、焊缝纯净、质量高、控制精度高、

生产效率高、深宽比大、变形小等众所周知的诸多优点,成为钛合金焊接的主要技术之一^[4]。

TC4 合金属于一种中等强度的 $\alpha + \beta$ 型两相钛合金,含有 6% α 稳定元素 Al 和 4% β 稳定元素 V。该合金具有优异的综合性能,在航空和航天工业中获得了最广泛的应用。在航空工业中主要用于制造发动机的风扇和压气机盘及叶片,以及飞机结构中的梁、接头和隔框等重要承力构件^[5]。本文对 TC4 合金的电子束焊接工艺技术进行研究,分析了厚板钛合金电子束焊接变形及接头力学性能。

1 试验方法及条件

1.1 试验材料

本试验选用 TC4 合金的主要组成见表 1 所示,材料厚度为 53.5mm。

表1 TC4合金的主要组成 %

Al	V	Fe	C	O	N
5.50~6.75	3.50~4.50	≤ 0.5	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.05

1.2 焊接及热处理

焊接在 ZD150-15B 高压型电子束焊机上进行,最大功率 15kW,最大加速电压 150kV,最大束流 100mA。

热处理试验按照 HB 7750-2004《钛合金真空热处理》标准执行。焊后热处理工艺参见表 2 所示。

表2 热处理工艺

工艺	焊前热处理工艺	焊后热处理工艺
工艺 1	740~760℃, 2h	910~940℃, 2h +520~550℃, 4h +590~610℃, 4h
工艺 2	910~940℃, 2h +520~550℃, 4h	590~610℃, 2h

1.3 力学性能试验

试验样坯的截取按照 GB2649-89《焊接接头机械性能试验取样方法》进行,沿焊缝的横向截取拉伸样

坏,样坯的截取方位如图 1 所示。拉伸试验参照标准 GB/2651-89 《焊接接头拉伸试验方法》执行,拉伸试样如图 2 所示。冲击试验参照标准 GB/T229-1994 《金属夏比缺口冲击试验方法》执行,冲击试验在 JB30A 冲击试验机上进行。

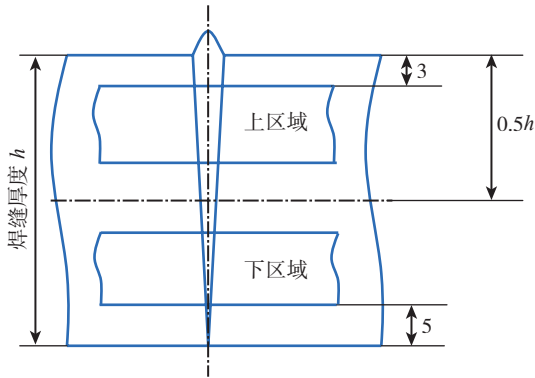


图1 试验样坯截取方位示意图
Fig.1 Diagram of sample position

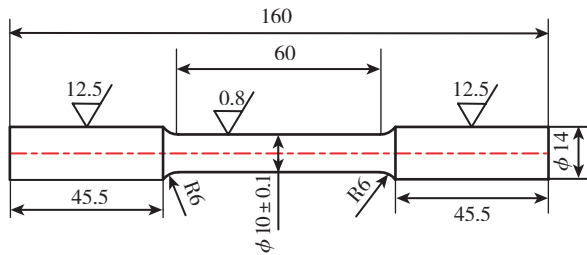


图2 拉伸试样尺寸
Fig.2 Dimensions of tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 电子束焊接

钛合金在一般的焊接过程中易受气体等杂质污染而脆化,焊缝有形成气孔的倾向,焊接接头晶粒易粗化,易形成冷裂纹。采用真空电子束焊接,因为焊接过程在真空中进行,焊缝和近缝区不受空气、水分和粉尘等的沾污,不易受杂质的污染而脆化,同时减少了形成气孔的倾向;能量高度集中、焊接速度快、焊缝窄、深宽比大,很厚的板材也可一道焊成,且焊接角变形小;焊缝和热影响区晶粒细,焊缝中不出现粗大的片状 α 相,焊接接头性能好。

电子束焊接的基本工艺参数是加速电压、电子束流、焊接速度、聚焦电流和工作距离等。这些工艺参数直接影响到熔深和焊缝的几何形状,选择合理的焊接工艺可以改善焊缝成形、细化晶粒和减少气孔,因此确定合理的工艺参数是至关重要的。本试验中的电子束焊接在 ZD150-15B 高压电子束焊机上进行。采用专用焊接夹具对试板及导引块进行装夹定位。经过大量的工

艺试验研究,最终确定的 TC4 电子束焊接工艺参数见表 3 所示。

表3 电子束焊接工艺参数

电压 / V	聚焦电流 / mA	束流 / mA	焊接速度 / (m·min ⁻¹)	工作距离 / mm	扫描形式
150	354~379	90~95	0.3~0.5	134	圆

2.2 焊接变形及测量

焊接变形从开始焊接时便产生,并随着焊接热源的移动和焊件上温度分布的变化而变化。一般情况下一条焊缝正在施焊处受热发生膨胀变形,后面开始凝固和冷却处发生收缩。膨胀和收缩在这条焊缝上不同部位分别产生。人们关心最多的是焊接残余变形,它直接影响焊接结构的使用性能。

虽然电子束焊接具有变形小的特点,但为了更好地掌握 TC4 合金的电子束焊后变形量,为 TC4 合金的结构件设计提供试验依据。本试验将分别测量焊接前后的电子束焊缝横向及纵向尺寸,试板取点位置及间距见图 3 所示。

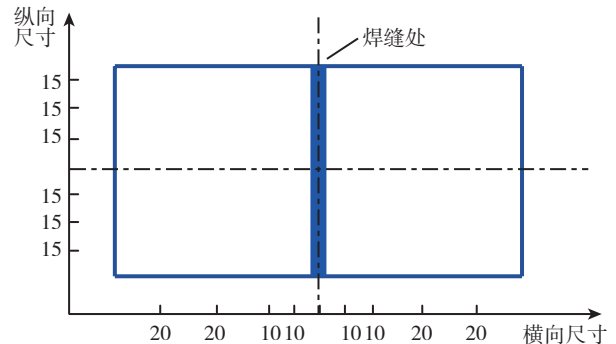


图3 焊接变形测量位置示意
Fig.3 Diagram of of sample position

横向及纵向焊接收缩量取焊接前后横向及纵向尺寸的平均值,其结果如表 4 所示。

根据试验结果可知,对于本试验件而言,焊缝的横向变形量比纵向变形量大,基本上横向变形为 0.4~0.6mm,纵向变形为 0.1~0.5mm。

2.3 拉伸力学性能

根据表 5 的结果,分别对两种热处理工艺下母材及焊接接头的抗拉强度、屈服强度、断面收缩率以及延伸率进行比较分析。表中,焊缝上指试样的截取位置为横向焊缝的上区域;焊缝下指试样的截取位置为横向焊缝的下区域,以下相同。

由表 5 可知,对于母材而言,采用热处理工艺 1 的抗拉强度和屈服强度比热处理工艺 2 略大。在相同热

表4 焊接变形测量结果

试板编号	收缩方向	数值/mm			
		焊前	焊后	变形量	平均变形量
1	横向	20	19.60	0.40	0.5
		40	39.50	0.50	
		80	79.50	0.50	
	纵向	120	119.40	0.60	0.07
		30	30.00	0	
		60	59.90	0.10	
2	横向	90	89.90	0.10	0.56
		20	19.60	0.40	
		40	39.04	0.96	
	纵向	80	79.48	0.52	0.35
		120	119.65	0.35	
		30	29.73	0.27	
3	横向	60	59.89	0.11	0.41
		90	89.33	0.67	
		20	19.40	0.60	
	纵向	40	58.86	0.14	0.51
		100	98.87	0.13	
		140	139.22	0.78	
纵向	30	29.52	0.48	0.51	
	60	59.70	0.30		
	90	89.25	0.75		

处理工艺下,焊接接头的抗拉强度和屈服强度与同工艺母材相当。不论采用热处理工艺1还是热处理工艺2,对于整条焊缝而言,焊缝上区域的抗拉强度和屈服强度均高于焊缝下区域,且热处理工艺1相差较小,热处理工艺2相差略大。

由表5可看出,对于母材而言,热处理工艺1和热处理工艺2断面收缩率和延伸率基本相当。在相同热处理工艺下,焊接接头的断面收缩率均值与母材相当;而延伸率均低于母材,热处理工艺1低于母材

表5 不同热处理工艺下拉伸性能结果

工艺条件		性能指标			
		抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	断面收缩率 / %	延伸率 / %
工艺1	母材	950.9	901.5	41.9	16.9
	焊缝上	957.6	913.4	40.7	13.6
	焊缝下	955.3	914.3	43.1	15.2
工艺2	母材	941.7	892.5	42.3	16.7
	焊缝上	973.7	929.5	40.9	12.9
	焊缝下	961.6	913.9	41.4	13.8

14.795%,热处理工艺2低于母材20.025%。采用不同热处理工艺获得的焊接接头,其整条焊缝厚度上断面收缩率及延伸率均相差较小。

综上所述,不同热处理条件对接头的拉伸性能有一定的影响。与母材相比,焊接接头的抗拉强度和屈服强度与母材相当,而基本上断面收缩率和延伸率均有所下降,特别是延伸率一项有较大幅度下降。对于整条焊缝而言,焊缝上区域的抗拉强度、屈服强度均高于焊缝下区域,而焊缝上区域的断面收缩率和延伸率均低于焊缝下区域。采用热处理工艺2获得的焊接接头抗拉强度、屈服强度略高于热处理工艺1,而其断面收缩率、延伸率均低于热处理工艺1。

2.4 冲击力学性能

不同热处理工艺下母材及焊接接头冲击力学性能比较结果见表6所示。由表6可知,热处理工艺1条件下母材的冲击韧性平均值比热处理工艺2高出12%,显然,热处理工艺1母材的冲击性能优于热处理工艺2。在相同热处理工艺条件下,焊接接头的冲击韧性和冲击吸收功平均值均大于相同热处理工艺下母材的冲击韧性和冲击吸收功平均值。对于整条焊缝而言,热处理工艺1条件下冲击韧性平均值比热处理工艺2高出6.7%。热处理工艺1焊缝上区域的冲击韧性平均值低于焊缝下区域,而热处理工艺2焊缝上区域则高于焊缝下区域。综上所述,不同热处理条件对焊接接头的冲击性能有一定的影响。在同种热处理工艺条件下,焊接接头的冲击韧性和冲击吸收功高于母材。采用热处理工艺1获得的焊接接头冲击性能略优于工艺2。

表6 不同热处理工艺下冲击力学性能比较

试样组	母材	母材	焊缝上	焊缝下	焊缝上	焊缝下
	工艺1	工艺2	工艺1		工艺2	
冲击韧性均值 / (J·cm ²)	41.2	36.8	44.3	48.0	45.4	41.1
冲击吸收功 / J	33.2	29.8	36.0	38.9	36.6	33.3

3 结论

本文研究了厚板TC4钛合金电子束焊接工艺及变形,对不同热处理条件下的母材及焊接接头拉伸和冲击性能进行试验研究,得到结果如下:

(1)焊缝的横向变形量比纵向变形量大,横向变形为0.4~0.6mm,纵向变形为0.1~0.5mm。

(2)不同热处理条件对焊接接头的拉伸性能有一定的影响。采用热处理工艺2的焊接接头抗拉强度、屈

(下转第99页)

长状况和发展能力的重要指标;市场占有率是本企业主导产品在整个行业产品的销售总量中所占的比重,反映了企业在未来一段时间的竞争力;新市场拓展程度,指在原有市场的基础上开拓新市场,扩大产品销售份额。大型民机企业人力资源能力建设不仅要关注当前的状况,还要考虑到企业未来的发展动力,这些指标恰能很好的体现这一要求。

综上所述,形成完整的大型民机企业人力资源能力建设评价指标体系,如图2所示。

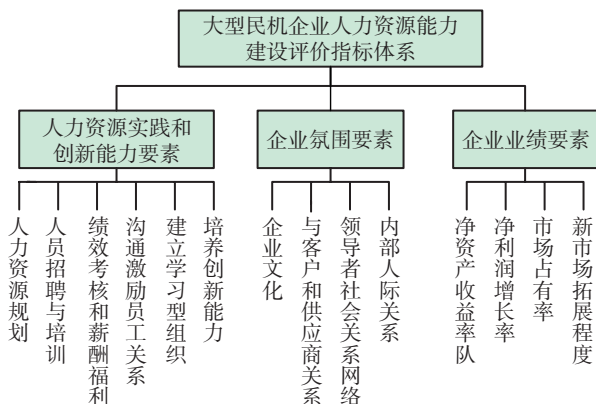


图2 大型民机企业人力资源能力建设评价指标体系

Fig.2 Human resource construction evaluation index system in large aircraft corporation

4 评价理论模型构建

人力资源实践和创新管理属于投入要素,需要资金或者人力成本的投入,企业氛围包含的是状态量,是展示在企业内外的表现形式,企业业绩则是投入与表现之后的产出量。因此本文构建了基于投入—表现—产出的我国大型民机企业人力资源能力建设评价模型,如图3所示。

该模型运用于人力资源能力建设评价,可以体现人力资源部门的存在价值,发现企业在研产销和售后服务过程中存在的问题并及时采取改进措施。

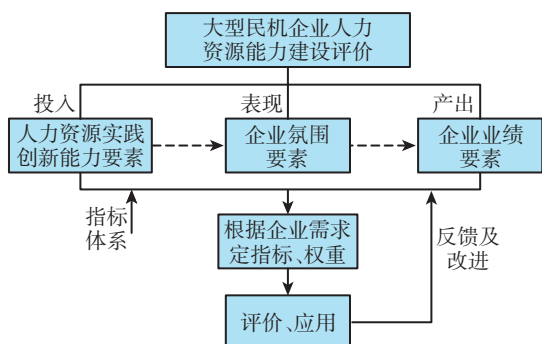


图3 大型民机企业人力资源能力建设评价模型

Fig.3 Human resource construction evaluation model in large aircraft corporation

5 结束语

本文首先介绍了大型民机企业波音和空客成功的人力资源实践经验,并以此为基础对照建立了基于投入、表现和产出3方面的我国大型民机企业人力资源能力建设评价指标体系和评价模型,对国内同类型企业有一定借鉴意义。同时,加强人力资源能力建设迫在眉睫,国内企业应积极借鉴标杆公司的成功经验,为早日实现国人飞机梦提供强有力的智力支持。

参考文献

- [1] 张希明. 浅谈人力资源能力建设评价. 观察与思考, 2003(11):14-15.
- [2] 谢志强. 国外航空研发机构能力建设探索. 民用飞机设计与研究, 2010(2):1-3.
- [3] 彭卫东. 战略性人力资源管理的成功实践—中航工业战略人力资源培训班赴欧学习体会. 中国航空报, 2009-08(3).
- [4] 彼得·贝利. 采购原理与管理. 王增东, 李梦瑶, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [5] 蒋香美. 波音供应商合作关系对大飞机项目的启示. 航空制造技术, 2010(24):102-106.
- [6] Christopher J C, Kevin D C. Strategic human resource practices, top management team social networks, and firm performance: The role of human resource practice in creating organisational competitive advantage. Academy of Management Journal, 2003, 46(6):740-751.
- [7] 黄强. 欧洲民用航空产业发展战略分析及给我们的启示. 航空制造技术, 2008(1):60-63.

(责编 良辰)

(上接第95页)

服强度略高于热处理工艺1,而其断面收缩率、延伸率均低于热处理工艺1。

(3)不同热处理条件对焊接接头的冲击性能有一定的影响。采用热处理工艺1的焊接接头冲击性能略优于热处理工艺2。

参考文献

- [1] 赵树萍,吕双坤. 钛合金在航空航天领域中的应用. 钛工业进展, 2002(6):18-21.
- [2] 睿群. 钛合金研究新进展及应用现状. 钛工业进展, 2008, 25(2):23-27.
- [3] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用. 稀有金属, 2000, 24(3):218-222.
- [4] Liu X, Gong S L, Lei Y P. Investigation on the effect of electron beam weld shape on fatigue performances of thickness titanium alloy. 稀有金属材料与工程(英文版), 2011(40):125-129.
- [5] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第4卷). 北京: 中国标准出版社, 2001.

(责编 亦非)