

# 飞机起落架机器人焊接工艺研究

## Study of Welding Undercarriage With Arc Welding Robot

中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 张兵宪 庄明祥

**[摘要]** 针对飞机起落架组件的制造,研究了全自动弧焊机器人在飞机起落架组件上的焊接工艺,主要从3个方面进行了试验研究:首先采用板料对接试验摸索出较为合理的规范参数;其次按照摸索出的焊接规范参数进行零件模拟件的焊接;再次对接头进行了拉伸和冲击韧性试验,对接头组织进行了金相分析,最后得出试验工艺过程满足起落架组件焊接工艺的要求,并生产出合格的起落架组件。

**关键词:** 弧焊机器人 焊接 起落架

**[ABSTRACT]** About manufacturing of undercarriage, welding undercarriage with arc welding robot is studied. Three methods in the test studying mainly includ: firstly, with sheet docking experiments to explore a more reasonable specification parameter; secondly, in accordance with the former welding parameters to weld the parts simulate; lastly, about the welded joints carrying out tensile and impact toughness tests and metallographic analysis. The conclusion is that the test process meets the welding process of undercarriage components and producing undercarriage components eligibly.

**Keywords:** Arc welding robot Welding Undercarriage

世界航空业已走过一个多世纪的光辉历程,新中国航空业也已有60多年的发展历史,对于飞机而言,起落架是飞机上重要而特别的部件,是飞机安全飞行的关键部件,其受力严重、工作环境恶劣、故障率高<sup>[1-2]</sup>。因此,实现起落架的长寿命、高可靠性是现代飞机起落架设计

制造的核心问题<sup>[2]</sup>。为了解决该问题,先进合理的制造技术是其必须的途径。目前,起落架的制造技术有冷工艺和热工艺两种,冷工艺制造技术通过整体锻件机加的方法;热工艺制造技术主要通过焊接的方法,焊接方法主要有:(1)真空电子束焊接技术,其突出的特点是减重、精度高、强度好、成本高等;(2)手工电弧焊接技术,该工艺方法劳动强度高,焊缝缺陷率高;(3)半自动熔化极混合气体保护焊接技术,该工艺方法劳动强度高,生产效率高;(4)全自动弧焊机器人焊接技术,该工艺方法极大地降低了劳动强度,提高了生产效率。

目前,国内采用全自动弧焊机器人焊接飞机起落架零部件的研究较少,本文主要进行了全自动弧焊机器人焊接飞机起落架零部件的研究。试验过程主要分3步:板料对接试验摸索出较为合理的规范参数;其次按照摸索出的焊接规范参数进行零件模拟件的焊接;再对接头进行拉伸和冲击韧性试验,对接头组织进行金相分析,分析力学性能与微观组织的内在联系。

### 1 试验材料与设备

#### 1.1 试验材料

##### 1.1.1 基体材料

试验用材料 30CrMnSiNi2A,材料合金成分如表1所示。

##### 1.1.2 焊接材料

焊丝选用 HG-1 (H10Mn2SiCrMoVA),材料合金成分如表2所示。

#### 1.2 试验设备

本次试验的机器人系统主要有3个部分:弧焊机

表1 试验材料30CrMnSiNi2A合金成分(质量分数)

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	S和P	Cu
30CrMnSiNi2A	0.27~0.34	0.90~1.20	1.00~1.30	0.90~1.20	1.40~1.80	≤ 0.025	≤ 0.20

表2 焊丝HG-1(H10Mn2SiCrMoVA)合金成分(质量分数)

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S和P	Cu
HG-1	0.07~0.12	0.7~1.00	1.6~1.9	0.9~1.2	0.45~0.65	0.10	≤ 0.025	≤ 0.20

器人、焊接电源、变位机。其中机器人使用的是日本汉川 MOTOMAN-UP6,它主要由 YASNAC XRC 控制柜、YASNAC XRC 再现操作盒、YASNAC XRC 示教编程器 3 部分组成,为六轴关节坐标系,其功能是用机器手代替人手进行操作。焊接电源为美国的飞马特公司的 ARC-MASTER 501,焊接变位器主要是带动零件回转,其回转速度通过电流大小进行调节,焊接层数由焊接变位器上的传感器给出信号,控制每层的起弧点和收弧点,如图 1 所示。

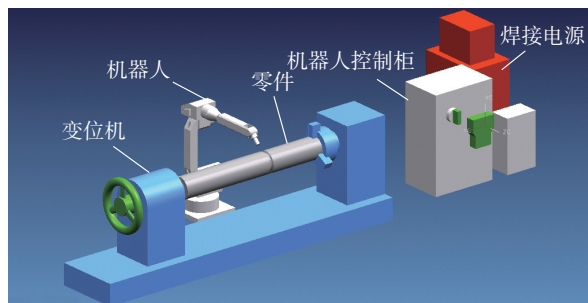


图1 弧焊机器人系统模型图  
Fig.1 System model of arc welding robot

## 2 试验过程与讨论

### 2.1 焊接性分析

30CrMnSiNi2A 钢的特点是碳及合金元素含量较高,根据美国焊接学会推荐的碳当量公式<sup>[3]</sup>:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{15} + \frac{Mo}{4} + \left( \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \right),$$

可得出 30CrMnSiNi2A 钢试验材料的碳当量  $C_{eq}=0.72\%$ 。

碳当量是以钢材的化学成分判断钢材冷裂敏感性的一种指标。该钢的碳当量为 0.72%,表明该钢的焊接性较差,淬硬倾向大,严重降低了焊接接头的韧性和塑性,具有较高的冷裂纹敏感性。熔焊是不均衡的加热与冷却过程,由于体积的膨胀与收缩会产生局部的应力,容易造成焊缝的开裂。采用热量较为集中、焊速较快,熔池小熔渣极气体保护焊,有利于缩小热影响区的宽度,获得细晶组织,从而提高接头的力学性能和抗裂性能。

### 2.2 焊缝坡口的选择

对熔焊来说,大厚度对接焊缝一般采用 U 型坡口。为了获得高质量的焊接接头,尽量降低焊缝金属的熔敷量,采用窄间隙型的 U 型坡口,此种型式的焊接坡口焊接过程中焊丝填充量小,即熔敷量减少。熔敷量减少相应的热输入就减少,热输入减少相应的焊缝热影响区 (HAZ) 就减小以及焊缝金属合金元素的烧损就会降低。另外,熔敷量的减少使得焊缝熔合比升高。使得焊缝的综合性能得到进一步改善。坡口型式如图 2 所示。焊

缝金属熔敷量与焊缝性能关系如图 3 所示。

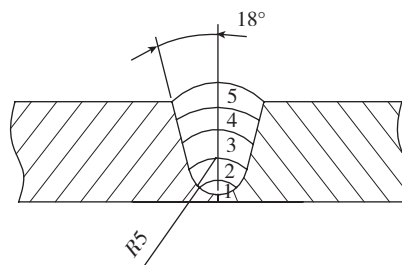


图2 U型坡口示意图  
Fig.2 Diagram of U-shaped slope

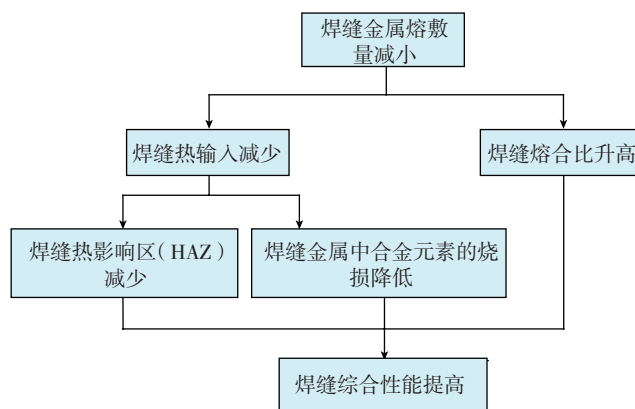


图3 焊缝金属熔敷量与焊缝性能关系  
Fig.3 Relationship of weld metal deposited between weld properties

### 2.3 焊接过程与参数的制定

起落架零件的焊接结合厚度从 2~30mm 不等,对于厚度小于 10mm、管径小于 100mm 的管形零件,焊缝总长小,采用弧焊机器人进行焊接必要性小。所以本次试验首先选用了厚度为 12mm (某型机起落架试验接头)、15mm (某型机起落架试验接头)、25mm (某型机起落架试验接头)、30mm (某型机起落架试验接头) 4 种规格。

焊接过程中的工艺措施包括:焊前预热、焊接层数的控制、层间温度的控制、摆焊参数的设置、送丝稳定性问题以及焊后回火消除应力等。通过大量的工艺试验,确定了下列规范参数,如表 3 所示。

### 2.4 机械性能试验

本次试验选择了典型厚度零件进行了机械性能试验,选择零件的焊接结合厚度为 15mm 和 25mm 2 种,共进行了抗拉强度试验和冲击韧性试验。每组试样 5 件。焊后进行热处理,热处理要求的强度值为  $\sigma_b=1670 \pm 100\text{MPa}$ ,母材机械性能的试验结果如表 4 所示,焊缝机械性能的试验结果如表 5 所示。

### 2.5 试验分析

从以上试验结果来看:本次试验 2 种厚度的焊缝抗拉强度和冲击韧性均符合生产图纸要求,生产图纸

表3 不同厚度焊缝的焊接工艺试验参数

厚度/mm	坡口型式	焊丝直径/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接层数/层	焊接速度/(cm·min <sup>-1</sup> )	保护气体/(L·min <sup>-1</sup> )		喷嘴高度/mm
							Ar	CO2	
12	U型	1.2	180~190	26~29	4~5	90~220	20	3	23±3
15	U型	1.2	180~190	26~29	5~6	90~220	20	3	23±3
25	U型	1.2	180~190	26~29	8~9	90~220	20	3	23±3
30	U型	1.2	180~190	26~29	10~12	90~220	20	3	23±3

表4 母材机械性能试验数据

零件号	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%
1	1630	12.3	48.6
2	1620	11.0	43.8
最小值	1620	11.65	46.2

表5 焊缝机械性能试验数据

试验厚度/mm	试验项目	试验数据					最小值
15	抗拉强度/MPa	1447	1426	1402	1481	1430	1402
	冲击韧性/(kJ·m <sup>-2</sup> )	614	599	605	595	644	599
26	抗拉强度/MPa	1180	1184	1179	1232	1189	1179
	冲击韧性/(kJ·m <sup>-2</sup> )	1139	926	1066	1137	936	926

要求的焊缝抗拉强度最小为 880MPa, 冲击韧性最小为 490kJ/m, 说明选用的焊接参数、焊丝、焊接方法能够满足产品机械性能要求。

另外从化学成分、熔合比 2 个方面对本次试验的结果从理论上可以分析出来。

从图 4 可以看出: 在坡口加工的角度 18° 不变的情况下, 随着零件厚度 B 的增加, 焊缝宽度 H 也随着增大, 熔入的焊丝越多即熔合比越小, 由于母材和焊丝两者的成分不同, 母材 30CrMnSiNi2A 含碳量 0.27%~0.34%, 焊丝 HG-1 (H10Mn2SiCrMoVA) 的含碳量 0.07%~0.12%, 母材的含碳量高于焊丝的含碳量, 零件厚度愈大, 焊缝中熔入的填充金属比例也愈大, 焊缝的含碳量较母材会愈低, 热处理后焊缝的强度也越低。因此 15mm 厚试件焊缝的强度降低数值为母材理论热处理强度的 (1670-1402)/1670 × 100% = 16%, 对于 26mm 厚的试件, 焊缝强度最大降低了 491MPa, 为母材理论热处理强度的 29.4%。经过对 26mm 母材试件的抗拉强度进行试验,

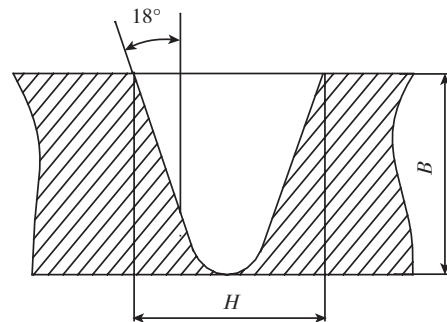


图4 焊接坡口  
Fig.4 Welding slope

其实际值为 1625MPa, 降低为母材实际热处理强度的 27.4%。所做结果与理论分析是吻合的。

另外, 热处理强度也影响焊缝的机械性能。从上面表 3 对厚度为 26mm 的母材机械性能数据来看: 该厚度试验件的热处理强度值偏下限, 热处理后焊缝抗拉强度值也会偏低, 从而冲击韧性值会偏高, 试验结果正是如此。

### 2.6 金相组织分析

为了进一步验证焊缝机械性能试验数据, 我们对拉断的试样进行了金相组织分析。焊接试样焊后热处理规范为: 加热到 900℃ 保温奥氏体化, 然后在 180~230℃ 等温淬火, 最后的回火温度为 250~300℃。

15mm 厚试件的焊缝区组织 (200×) 的主要组织为回火马氏体和残余奥氏体。一次结晶组织为灰白色条状组织, 柱状晶晶界分布残余奥氏体组织。热影响区的主要组织亦为回火马氏体和残余奥氏体, 残余奥氏体的量稍多于焊缝区。

26mm 厚试件的焊缝区和热影响区 (200×) 的主要组织为回火马氏体和残余奥氏体, 同 15mm 厚试件相比, 残余奥氏体量要多一些。由于残余奥氏体的强度低, 韧性高, 所以 26mm 厚试件的抗拉强度低而冲击韧性强。

图 5 和图 6 为 15mm 厚和 26mm 厚试件拉伸式样, 由于 2 种厚度试件在断裂前产生宏观大范围的塑性变

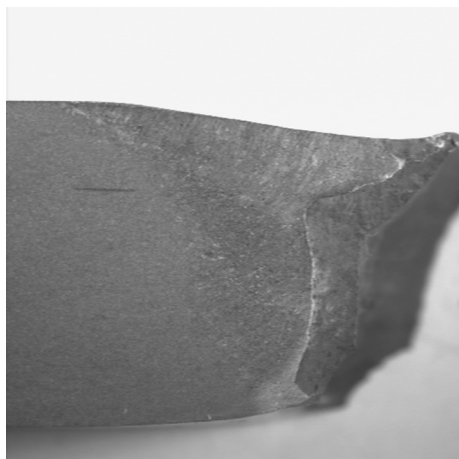


图5 15mm厚试件低倍形貌(7×)

Fig.5 Low magnification morphology of 15mm thick specimen (7×)

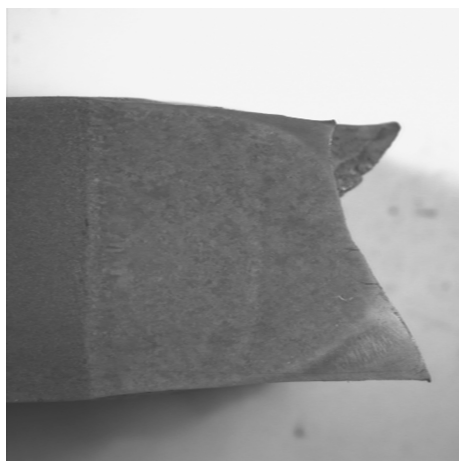


图6 26mm厚试件低倍形貌(5×)

Fig.6 Low magnification morphology of 26mm thick specimen (5×)

形, 所以其断裂为宏观塑性断裂。这符合该钢热处理后的调制组织要求, 即在保持高强度的情况下具有一定的塑韧性, 符合起落架零件对钢的性能要求。

经上述试验总结得出的焊接规范参数, 工艺过程都完全满足生产要求, 图7为按试验结果焊接成形的某型

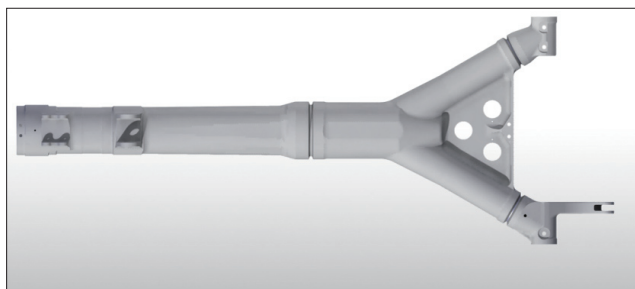


图7 某型机起落架左外筒组件

Fig.7 Left outer tube components of certain aircraft undercarriage

机起落架左外筒组件。

### 3 结论

(1) 通过弧焊机器人的使用操作和工艺试验, 摸索出了合理的焊接规范参数, 得出的焊接电流、焊接电压、焊接速度等规范参数可完全满足各厚度焊缝的无损检测要求。

(2) 通过对 15mm、26mm 厚焊缝的机械性能试验, 得出了焊缝的拉伸强度和冲击韧性值。其中 15mm 厚试样抗拉强度 1437.2MPa, 冲击韧性值 611.4kJ/m<sup>2</sup>; 26mm 厚试样抗拉强度 1192.8MPa, 冲击韧性值 1040.8kJ/m<sup>2</sup>, 满足图纸要求的强度最小极限值 880MPa, 冲击韧性最小极限值 490kJ/m<sup>2</sup>。

(3) 全自动弧焊机器人可用于起落架组件(材料 30CrMnSiNi2A) 的焊接。

### 参考文献

[1] 王旭亮, 聂宏, 薛彩军, 等. 飞机起落架疲劳与可靠性技术研究综述 // 中国航空学会. 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 北京: 中国航空学会, 2007.

[2] 刘天琦. 飞机起落架用材发展 // 中国航空学会. 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 北京: 中国航空学会, 2007.

[3] 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性. 北京: 机械工业出版社, 1987.

(责编 小城)

(上接第 147 页)

### 5 结论

(1) 要获得良好的钎焊效果(高的钎透率), 必须严格控制焊缝的间隙, 应小于 0.10mm, 以增大毛细作用效果, 使钎料能填满整个缝隙。

(2) 必须严格清洁钎焊表面, 必须使用超声波清洗, 才能对狭缝获得良好的清洗效果。采用加温清洗效果更佳。

(3) 要严格控制钎焊时的加热温度和保温时间, 防止发生溶蚀和材料力学性能的降低, 以焊缝处的跟踪热电偶指示温度为准, 严格按工艺控制保温时间。

### 参考文献

[1] 张学军. 航空钎焊技术. 北京: 航空工业出版社, 2008.

[2] 邓建. 钎焊. 北京: 机械工业出版社, 1979.

[3] 邹禧. 钎焊. 北京: 机械工业出版社, 1989.

[4] 庄鸿寿, 罗格夏特. 高温钎焊. 北京: 国防工业出版社, 1989.

[5] 方洪渊. 简明钎焊工手册. 北京: 机械工业出版社, 1999.

(责编 小城)