

时效不锈钢舱体的电子束焊与电阻点焊

樊兆宝¹, 梁养民²

(1. 中国一航空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 中国一航航空发动机集团有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 时效不锈钢以其强度高、韧性好、焊接性能优良的优异综合性能成为空空导弹舱体制造中最主要的结构材料。分析了某型号空空导弹舱体的结构特点和时效不锈钢的焊接性, 介绍了舱体制造时所采用的焊接、旋压、热处理这三大关键技术, 着重阐述了电子束焊和电阻点焊技术在舱体制造中的应用, 详细说明了焊接参数的调试原则和控制焊接缺陷及焊接变形的方法与措施。检验与探伤、拉伸结果表明: 首批试制的时效不锈钢舱体的尺寸精度和焊缝与焊点的焊接质量、力学性能符合设计要求, 工艺方案完全适合于舱体的加工。

关键词: 时效不锈钢; 工艺方案; 电子束焊; 电阻点焊

中图分类号: TG457.1

文献标识码: B

文章编号: 1001-2303(2007)03-0023-05

Electron beam welding and resistance spot welding of time effect stainless steel cabin

FAN Zhao-bao¹, LIANG Yang-min²

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China; 2. China Aeroengine Group Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: Time effect stainless steel is the primary structural material for X airborne missile's cabin because of its excellent synthetical performance such as high strength, good toughness and fine weldability. The structural characteristics of X airborne missile's cabin and weldability of time effect stainless steel are analyzed in this paper. Also in this paper, the three pivotal types of technology including welding, rotating pressure and heat treatment with cabin manufacture are introduced, and the application of the electron beam welding and resistance spot welding technology of cabin manufacture are emphasized, while the adjustable rule of welding parameter and the controlling method for weld defects and weld distortion are detailedly illuminated. The results in verify, inspection and tension indicate that the dimensional precision, quality of seam welding and spot welding and mechanical capability of first batch of time effect stainless steel cabin accorded with the design demand, and the technology project fit cabin machining nicely.

Key words: time effect stainless steel; technology project; electron beam welding (EBW); resistance spot welding

0 前言

时效不锈钢舱体是某型号空空导弹中的重要受力焊接件, 由于空空导弹在飞行过程中不但要承受很大的纵向和横向过载, 而且要承受高速气流的冲击和火药燃烧时高温高压的恶劣环境, 这就对舱体的焊缝质量、焊接接头的力学性能、舱体的尺寸

精度和所用材料的性能等技术指标提出了更高的要求。

1 舱体结构、时效不锈钢的可焊性和相关工艺性能分析

1.1 时效不锈钢舱体结构和技术要求

时效不锈钢舱体由壳体、端环和圆筒共三种三个零件, 通过一条电子束圆周焊缝和两排共 15 个电阻点焊点连接而成, 如图 1 所示。

收稿日期: 2006-12-21

作者简介: 樊兆宝(1954—), 男, 山东鄄城人, 研究员, 国际焊接工程师, 学士, 主要从事焊接工艺技术工作。



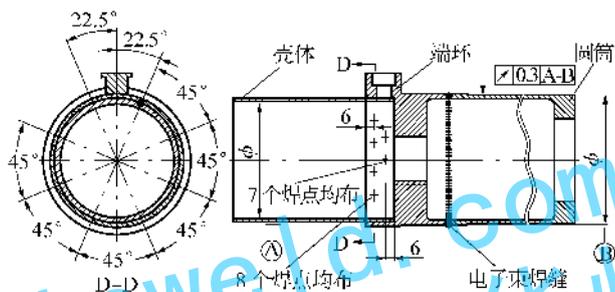


图 1 时效不锈钢舱体结构示意图

所有零件均由时效不锈钢棒材或管材制成,其中端环由棒材车削加工而成,壳体和圆筒则由管材通过强力旋压制成。时效不锈钢舱体的技术要求如表 1 所示。

表 1 时效不锈钢舱体的技术要求

项目	技术要求	
材料	时效不锈钢 (焊前为固溶状态)	
基体试样强度 σ_b /MPa	≥ 1000	
焊后最大跳动量 S/mm	0.3	
焊接要求	质量要求	行业标准 I 级
	电子束焊缝	
	焊接接头强度 σ_j /MPa	≥ 900
	正面余高+错位 h/mm	\leq 标准规定
	背面余高+错位 h/mm	\leq 标准规定
	质量要求	行业标准 II 级
	点焊	
	剪切力 F/N·点 ⁻¹	时效前 3 440 时效后 4 650
	熔核直径 φ /mm	\geq 标准规定
	压痕深度 h/mm	\leq 标准规定
焊透率/%	30~80	
爆破试验	设计要求	

1.2 材料的可焊性和相关工艺性能分析

时效不锈钢在固溶状态下得到马氏体组织,由于是一种超低碳的马氏体,故表现为硬度低,塑性

好,这就降低了材料在快速冷却时所产生的硬度和应力,避免了焊缝、焊点和热影响区内裂纹的形成,因此固溶状态下的焊接性能良好。但该钢在焊接时,其热影响区中会出现一个软化区域,其温度范围大约在 600 °C~750 °C,组织结构为马氏体和逆转奥氏体,即在马氏体基本上分布有弥散的奥氏体组织,而且奥氏体的数量会随焊接线能量的增大而增加,由于这些奥氏体组织不能经过随后的时效而硬化,故表现为强度低、硬度低,因此时效不锈钢在采用熔焊焊接时必须严格限制线能量的输入,在采用电阻点焊焊接时必须采用硬规范。

由于该材料在固溶状态下具有较高的塑性,较大的断面收缩率,延展性能良好,因此旋压时能够获得较大的减薄率。根据壳体和圆筒的形状特点,采用强力旋压成形技术最适宜。

时效不锈钢经过时效热处理后,在超低碳的马氏体中析出弥散分布的高合金强化相,表现为强度高、韧性好,具有较高的综合机械性能。由于壳体和圆筒在强力旋压时产生有较大的内应力,高温热处理将会使其产生椭圆变形,而该类钢提高强度的时效温度仅为 500 °C 左右,几乎没有变形发生,故该钢热处理时的尺寸稳定性良好。

2 工艺流程和关键技术

2.1 加工工艺流程

根据时效不锈钢舱体的结构特点、技术要求和时效不锈钢的性能,制定了加工工艺流程,如图 2 所示。

2.2 关键技术

2.2.1 焊接工艺

从上述分析可知,焊接时效不锈钢舱体时必须



图 2 时效不锈钢舱体的加工工艺流程

解决三大技术难点。一是避免焊缝热影响区的软化;二是保证焊后全长最大跳动量不超过 0.3 mm 和焊缝的内加强高+错位量不大于 0.3 mm 的尺寸精度;三是焊缝与焊点的质量必须达到设计要求。为此,制定了焊接工艺,选定了焊接方法和设备,设计了多套焊接夹具和点焊机的专用下电极臂。以上措施基本可以保证时效不锈钢舱体的尺寸精度和焊接要求。

2.2.2 旋压工艺

时效不锈钢舱体中的壳体和圆筒均为回转体零件,筒壁薄、刚性差、易变形,车削加工困难,而采用旋压技术则比较容易加工。为了保证它们的尺寸精度,有关人员进行了毛坯设计和毛坯尺寸的计算以及旋压芯模的设计,选定了旋压进给参数,采用了正旋加工方式,保证了零件的技术要求。

2.2.3 热处理工艺

(1)固熔热处理。加热到规定温度后保温一定时间,然后油冷至室温。

(2)时效热处理。加热到规定温度后保温一定时间,然后随炉冷至室温,400℃以下可以充氮冷却,要求充氮前的整个过程真空度不小于 0.013 Pa。

以上热处理工艺可以满足时效不锈钢舱体的强度和延伸率要求。

3 焊接工艺措施和焊接过程中的质量控制

3.1 焊接工艺

3.1.1 焊接方法与设备

(1)端环和圆筒之间采用真空电子束焊,所用设备为德国兰宝公司制造的 KS55-G150 型高压真空电子束焊机。电子束焊能量密度高,穿透能力强,线能量小,焊接变形小,热影响区和软化区狭窄,焊接接头的强度一般不会受到太大的影响。故采用了真空电子束焊。

(2)壳体和端环之间采用电阻点焊,所用设备为上海焊接设备厂的 NA-200-3 型交流点焊机。壳体和端环之间的连接属于搭接结构,这对于保证舱体的跳动量比较有利,采用电阻点焊方法较为适宜。问题是焊机下电极臂和下电极无法深入到壳体内部,必须设计制作专用的下电极臂。

3.1.2 焊接规范参数

(1)电子束焊焊接参数如表 2 所示。

束流对中的目的是验证束斑在舱体旋转时始

表 2 电子束焊焊接参数

规范	加速电压 U/kV	电子束流 I/mA	焊接速度 v/mm·s ⁻¹	聚焦电流 I/mA
束流对中	120	0.2	25.0	1 965
定位焊	120	4.0	25.0	1 965
封焊	120	5.0	25.0	1 965
焊接	120	14.0	25.0	1 965
修饰焊	120	6.0	25.0	1 965

终于接缝处。

定位焊圆周接缝时,以圆周接缝的直径决定定位焊点的数量。一般情况下,当直径 $\varphi \leq 500$ mm 时,定位 8 点;当直径 $\varphi > 500$ mm 时,定位 16 点,每一点的长度为:起弧 2.5°,焊接 2°,收弧 2.5°。束流的大小可根据筒体的厚度和装配间隙灵活掌握,一般为焊接束流的 25%~35%,间隙大时采用散焦,间隙小或无间隙时采用表面聚焦。时效不锈钢舱体采用的是 8 点定位。

为了保证焊接质量,避免气孔和未熔合等缺陷的产生,必须进行封焊。封焊时电子束流的大小视接缝间隙而定,以能够封住接缝为准,一般为焊接束流的 30%左右,根据间隙的大小决定是否采用散焦。

焊接时电子束流的大小以焊缝正面不出现凹陷、背面保证焊透,外观成形良好为依据进行调节。对于时效不锈钢舱体而言,尽量将背面余高控制在 0.3 mm 之内。一般情况下,当焊件厚度 $\delta \leq 2$ mm 时,采用散焦焊接;当焊件厚度 $2 \text{ mm} < \delta \leq 10$ mm 时,采用表面聚焦焊接;当焊件厚度 $10 \text{ mm} < \delta \leq 20$ mm 时,采用中聚焦焊接;当焊件厚度 $\delta > 20$ mm 时,采用下聚焦焊接。时效不锈钢舱体采用的是散焦焊接,其表面聚焦束流为 1 960 mA,为实现散焦将其提高到 1 965 mA,但不能增加太多,以免出现热影响区的软化。

当焊缝表面成形不好或出现咬边、凹陷等缺陷时,可进行修饰焊。修饰焊的束流一般采用散焦,其大小与封焊时基本相同。

(2)电阻点焊焊接参数如表 3 所示。

3.1.3 焊接夹具

为了保证时效不锈钢舱体全长跳动量和焊缝对接边错位量的精度要求,特设计制作了简易的焊接夹具,以便对装配精度和焊接变形进行控制。

(1)电子束焊焊接夹具。

该夹具的装夹原理如图 3 所示,其主要作用和目的是:保证圆筒和端环对接边的错位量要求;保证圆筒和端环两个回转体部分焊后两轴线的直线度



表 3 电阻点焊焊接参数

参数	规范	
电极直径(上、下电极相同) φ /mm	5.0	
焊接时间 T /周	预压	35.0
	焊接	10.0
	维持	20.0
	休止	35.0
电极压力 F /N	5 096.0	
焊接电流(热量)/%	62.0	
电源电压 U /V	385.0	
低倍检验	焊透率/(30%~80%)	56.0
	熔核直径 φ /mm($\geq \varphi$ 3.7)	φ 4.3
撕破试验(凸台直径大于等于 φ 3.7)	凸台直径 φ 4.2	

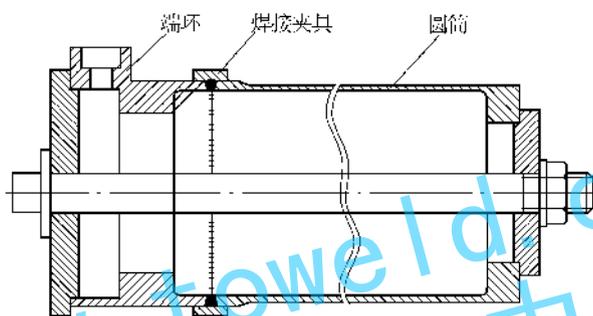


图 3 电子束焊接夹具装夹示意

要求;保证焊接过程的稳定性和连续性。

由图可知,该夹具只能对焊前的对接边错位量加以限制,也可保证焊接过程的稳定性和连续性,但对焊接过程中所产生的错位量和两零件的轴线直线度却无法控制。

(2)电阻点焊焊接夹具。

电阻点焊焊接夹具的装夹原理如图 4 所示。它是利用端环的螺纹及壳体的内圆面和端面将壳体与端环固定在一起,调整位置,合格后用手工氩弧焊方法进行定位,然后卸夹。它实际上是一个定位焊夹具,由于结构上的原因,无法带夹焊接。

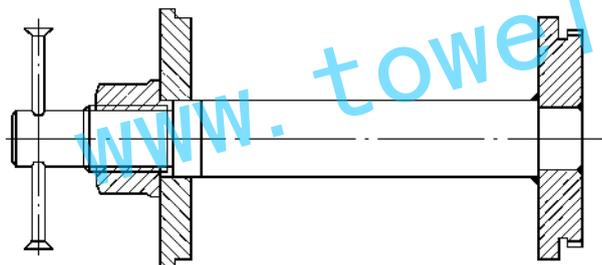


图 4 电阻点焊焊接夹具装夹示意

3.1.4 下电极臂

由于 NA-200-3 型交流点焊机的下电极臂无

法深入壳体内部,为此专门设计制作了专用的下电极臂。由于直径减小,臂长增加,刚性不够,焊接时在电极压力的作用下可能会产生挠曲变形而使上、下电极滑移,从而影响焊点质量。试验表明:该电极臂可以满足时效不锈钢舱体的焊接要求,且下电极内部还可通水冷却。由于焊机的机头位置无法改变,又设计制作了与下电极臂配套使用的上电极臂。

3.2 质量控制

3.2.1 打磨和清理

真空电子束焊在焊接时熔池区域不会受到空气的污染和侵蚀,但对于熔池区域内部所出现的氢、氧等有害元素,却毫无去除能力,因为它不像电焊条药皮那样含有脱氧除氢剂。如果清洗不净,残存的氧化皮、油脂和水分就会进入到熔池中去,它们在电子束流的高温作用下,迅速分解为氢气和氧气,这不但会烧损有益的合金元素,而且还会出现气孔、夹渣等缺陷。因此,焊前应认真清理焊件,严防氢、氧等有害杂质进入焊接区域。打磨清理方法为:

- (1)用汽油清洗零件表面的防锈油和其他污物等;
- (2)用高速钢丝轮打磨零件焊接区内外表面和接缝端面的锈蚀等,所有被打磨的表面必须见金属光泽;
- (3)把零件内外表面用丙酮或无水酒精彻底清洗干净,同时清洗焊接夹具。

3.2.2 退磁

所有被焊零件和焊接夹具的磁通密度不许超过 2×10^{-4} T,否则必须进行退磁处理。

3.2.3 装配和检验

按要求将端环和圆筒装配到位,并用夹具固定牢固,检查对接边错位量不许超过 0.1 mm,接缝间隙不大于 0.05 mm,合格后装配到焊机的焊接转台上,最后用无水酒精将接缝擦洗干净。注意带细纱手套操作。

3.2.4 电子束焊

焊前首先抽真空,真空室为 1.1×10^{-7} Pa,电子枪室为 8.3×10^{-10} Pa;然后按要求进行定位焊、封焊和正式焊接,必要时还需进行修饰焊。

4 检测结果

4.1 焊缝与焊点的内部质量

X 光探伤结果表明:所有时效不锈钢舱体电子束焊的焊缝符合行业标准 I 级的质量要求,电阻点

焊焊点符合行业标准 II 级的质量要求。

4.2 焊接接头与焊点的机械性能

电子束焊接接头的力学性能符合接头强度不小于基体强度 90% 的设计要求,具体试验数据如表 4 所示。

表 4 电子束焊接接头力学性能

试样号	基体		电子束焊接接头
	σ_b /MPa(≥ 1000)	δ /%(25%)	σ_b /MPa(≥ 900)
1#	1 065	11.00	1 119
2#	1 067	10.00	1 343
3#	1 053	11.00	1 375
4#	1 048	9.30	1 400
5#	1 054	断标处	1 398
6#	1 085	9.60	1 382
均值	1 062	10.18	1 336.2
	1 048~1 085	9.30~11.00	1 119~1 400

备注:所有试样均合格。

电阻点焊焊点的力学性能符合设计要求,具体试验数据如表 5 所示。

表 5 电阻点焊焊点的力学性能

时间	时效前(≥ 3440)	时效后(≥ 4650)
单点剪切力 F/N·点 ⁻¹	11 180 10 800~11 700	18 100 17 100~18 700

4.3 尺寸精度

尺寸精度基本符合设计要求,背面余高+错位和跳动量略有超差,具体数据如表 6 所示。

4.4 爆破试验

抽取了一件时效不锈钢舱体进行了爆破试验,

表 6 尺寸精度

零件编号	∇ 0.3 A-B	背面余高+错位	备注
		(不大于 0.3 mm) b/mm	
1#	0.37	0.33	背面轻微咬边
2#	0.36	0.36	背面轻微咬边
3#	0.23	0.35	背面轻微咬边
4#	0.43	0.55	背面咬边两段,各长约 30 mm

爆破压力符合设计要求。所有时效不锈钢舱体符合使用要求。

从以上可以看出:焊缝和焊点的内部质量与机械性能均符合设计要求,但焊缝背面存在轻微咬边,这是由于担心背面余高+错位超标,电子束流偏小造成的,今后要以消除咬边为目的重新调试参数,背面余高+错位超标的问题可用机械加工的办法消除。由于时效不锈钢舱体是一个细长的薄壁圆筒型零件,变形很难控制,这还有待完善设计。

5 结论

首批试制的时效不锈钢舱体的焊接质量符合设计要求,说明所确定的焊接方案和工艺流程是合理的,关键工艺、焊接工装和质量控制措施基本满足时效不锈钢舱体的尺寸精度和性能要求,该方案经完善后完全适合于舱体的批量加工。同时还给设计部门完善舱体设计,使之更加符合工艺性要求提供了依据。

电焊机常用术语的中英文对照(三)

交流弧焊电源	AC arc welding power source
直流弧焊电源	DC arc welding power source
交/直流两用弧焊电源	AC & DC arc welding power source
脉冲弧焊电源	Pulsed arc welding power source
交流弧焊发电机	Arc welding alternator
直流弧焊发电机	DC arc welding power generator
电渣焊机	Electro-slag welding machine
钢筋电渣压力焊机	Reinforcement electro-slag pressure welding machine
电阻焊机	Resistance welding machine
点焊机	Spot welding machine; spot welder
凸焊机	Projection welding machine
缝焊机	Seam welding machine; seam welder
电阻对焊机	Resistance butt welding machine; butt resistance welder; upset welding machine

