



舱外航天服躯干壳体焊接装配工艺技术

李文光 王 漫 黄 健

(首都航天机械公司, 北京 100076)



摘要: 针对舱外航天服躯干壳体薄壁铝合金的焊接装配技术特点, 从减小焊接应力和控制焊接变形入手, 选择合理的焊接方法和工艺流程, 通过一系列工装的应用, 增加过程控制, 达到减小焊接后变形的目的, 保证了产品的精度要求, 为舱外航天服的研制奠定了基础。

关键词: 舱外航天服; 薄壁结构; 焊接工艺; 焊接应力; 焊接变形

Research on Welding Assembly Technics for Aluminum Alloy Trunk of Spaceflight Garb

Li Wenguang Wang Man Huang Jian

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract: This paper analyzes the welding assembly characteristics of thin shell of aluminum alloy trunk for spaceflight garb. By reducing the welding stress and controlling welding distortion, the optimal weld method and technics programming are selected. The welding distortion is decreased through a series of tools and more process control. Finally, it satisfies the precision request of product and provides a base for spaceflight garb design and manufacture.

Key words: spaceflight garb; thin shell frame; welding technics; welding stress; welding distortion

1 引言

随着中国国防科技实力的逐步增强, 为了实现中华民族的飞天之梦, 神州七号实现我国航天员太空行走。在太空极为复杂的环境中, 舱外航天服是保证航天员生存与工作的重要装备, 舱外航天服由北京航天医学研究所设计, 其中, 躯干壳体部分由首都航天机械公司研制。

舱外航天服躯干壳体结构是由完全符合人体流线的曲面钣金件和机械加工的法兰件焊接而成的, 形状复杂, 接口协调关系多。法兰盘和钣金壳体采用焊接连接, 其中的曲面是利用仿生学原理来模拟人体的流线, 所有法兰盘均为机加件, 焊接后法兰接口处精度要求高, 有密封要求, 且焊接后无加工余量。整个航天服躯干壳体共有 33 个连接法兰和支架, 焊缝 70

条, 总长约 10m, 材料为 5A06, 厚度 1.5mm。主要组件有: 壳体、起吊组件、销座、头盔、肩法兰、胸部加强板、气液控制台法兰、气液组合插座、前销钉、腰法兰、门法兰等。

2 关键技术难点分析及解决方案

舱外航天服躯干壳体不规则的外形以及薄壁钣金件和机械加工的法兰盘焊接结构, 决定了在焊接过程中势必会产生大量的焊接变形和焊接应力。为了实现舱外航天服躯干壳体的焊接, 保证航天服的顺利研制, 必须解决以下关键技术难点:

- a. 制定合理的焊接工艺方案;
- b. 选用合适的焊接方法和焊接参数;
- c. 对焊接应力和变形的控制。

作者简介: 李文光 (1978-), 工程师, 机械设计及制造专业; 研究方向: 工艺装备及非标设备的设计及研究。

收稿日期: 2010-03-26

2.1 制定合理的焊接工艺方案

结合产品特点，先期制定了两套工艺方案：

方案一：先完成零件加工，再进行装配焊接，通过控制焊接变形满足产品精度要求。

方案二：零件预留加工余量，再焊接成整体，通过焊后机械加工满足产品精度要求。

由于产品结构限制，无论采取哪种方案，均只能以门法兰为整体基准，对两种方案进行论证和比较：

方案一：对零件精度进行严格控制，为装配焊接创造有利条件。以主承力结构门法兰为基准，焊接过程中采取一系列措施控制焊接变形，焊接成整体后再局部校形，并通过时效处理消除产品应力，最终满足产品尺寸公差要求。同时对各法兰的特点进行了分析，门法兰为膨胀管密封，形位公差要求高，利用真空电子束对其焊接，能很好地控制焊接变形，完全能满足设计要求。

方案二：在保证各法兰间相互位置尺寸前提下，如先加工门法兰后加工其它法兰，门法兰尺寸可以保证，但其它法兰的尺寸无法保证；如先加工其它法兰后加工门法兰，其它法兰尺寸可以保证，但门法兰的尺寸无法保证。各法兰的独立尺寸和相互形位尺寸无法同时满足。

两种方案对比可以看出，方案一先整体焊接、再焊后校形的整体不加工方案可以实现产品的研制。

2.2 选用合适的焊接方法和焊接参数

2.2.1 焊接方法的确定

金属焊接是采用适当的手段，使两个金属物体产生原子或分子间结合，从而连接成一体的加工方法。适用于铝及铝合金的焊接方法很多，常用的焊接方法有钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、变极性等离子焊、局部真空电子束焊、搅拌摩擦焊等。不同的焊接方法对焊接质量和产生变形的影响也不一样。根据我厂实际情况以及该项目的特点，通过对各种焊接方法的分析和试验，最终采用手工变极性 TIG 悬空焊焊接舱外航天服躯干壳体，其特点是焊接热输入小，焊接缺陷少，焊缝无拘束收缩，焊接变形容易控制。

2.2.2 焊接参数的选取

焊接工艺参数见表 1。

表 1 焊接工艺参数

板厚 /mm	钨极直径 /mm	焊接电流 /A	焊丝直径 /mm	氩气流量 /L·min ⁻¹
1.5	2	80~95	1.5	12~14

2.3 对焊接应力和变形的控制

焊接过程中，焊缝及其相邻区域金属被加热到很

高温度，成为液态，然后再快速冷却。在这个过程中，焊件各部分的温度不同，随后的冷却速度也各不相同，因而焊件各部分在热胀冷缩和塑性变形的影响下，必然产生内应力、变形或裂纹。焊接应力的存在将影响焊接构件的使用，导致其承载能力大大降低，甚至在外载荷改变时出现脆断的危险后果。对于接触腐蚀性介质的焊件，由于应力的腐蚀现象加剧，使得焊件使用期限减少，甚至产生应力腐蚀裂纹而报废。

焊接应力和变形是由诸多因素同时作用造成的。其中最主要的因素有焊件上温度分布不均匀；熔敷金属的收缩；焊接接头金属组织转变及工件的刚性约束等。另外，焊接变形和应力还与焊接方法及焊接工艺参数有关。

舱外航天服躯干壳体采用材料为 5A06，厚度 1.5mm，属于薄壁焊接结构。这类结构重量轻、强度高，可以提高产品的有效载荷系数，但焊接残余应力和失稳变形问题突出。焊接残余应力与变形是直接影响焊接结构性能、安全可靠性和制造工艺性的重要因素，它会导致在焊接接头中产生冷、热、裂纹等缺陷，在一定的条件下还会对产品的断裂特性、疲劳强度和形状尺寸精度有不利影响，焊接变形常常导致产品的质量隐患。针对该技术难点，着重从控制焊接变形和减小焊接应力入手，采取以下措施，来控制焊接变形。

2.3.1 合理的安排焊接顺序

合理地焊接顺序对提高焊缝质量和减小焊接变形非常重要，根据逐步形成刚性的理念，制定了舱外航天服躯干壳体的焊接顺序原则如下：

- a. 增加刚性的零件先焊；
- b. 基准零件先焊；
- c. 其它零件焊后与其焊接焊枪焊道有干涉的零件先焊；
- d. 对其它零件尺寸精度影响比较大的零件先焊；
- e. 焊接截面较大的零件先焊；
- f. 开口法兰先焊，角焊支架后焊；
- g. 对接焊缝先焊，角焊缝后焊。

针对以上原则确定了舱外航天服躯干壳体零件的焊接顺序：门法兰→腰法兰→气液控制台法兰及前销钉座→气液组合插座法兰→安装侧销座→左、右肩法兰→头盔→其它法兰及各种支架。

2.3.2 采用刚性固定法减小焊接变形

结合舱外航天服躯干壳体的结构特点和焊接顺序，在焊接过程中，针对焊缝区域和焊接法兰盘采取刚性固定法来抵消产品的焊接变形和焊接应力，焊接后利用校形工装进行刚性紧固，等产品冷却到室温时再分解紧固工装。通过刚性工装的使用，增加焊接过

程控制,严格按照图纸要求进行,提高焊接质量,把焊接变形控制在允许范围内,最大程度地消除焊接应力。在舱外航天服躯干壳体所有的法兰焊接过程中,均采用了先利用整体定位工装定位点焊,然后再利用局部刚性工装固定连续焊的方法,这样既保证了躯干壳体整体形位尺寸精度要求,又保证了法兰的局部形状尺寸精度的要求。

2.3.3 采用预热和去应力回火消除焊接应力

产品焊接过程中会在焊缝周围产生大量的热量,这些热量如不能及时传导出去,会造成产品的局部受热不均,从而产生焊接变形和焊接应力。针对这一情况,在舱外航天服躯干壳体的焊接过程,采用了预热和去应力回火的办法来消除焊接变形和焊接应力,在焊接前把被焊接产品放到恒温室里进行烘干、加温,使被焊接产品的温度均衡,焊接后,用刚性好、精度高的工装对整个工件的所有部位进行紧固,整体加热到一定温度且保温一定时间,然后缓慢冷却到室温,从而达到减小焊接变形和焊接应力的目的。

3 工艺装备的实施

3.1 舱外航天服躯干壳体的焊接工装设计思路

a. 设计一个总体协调所有以门法兰和安装侧销座为基准的整体定位工装,保证所有零件的相对位置关系;

b. 焊前,必须有工装保证所有协调关系的零件的

位置精度;

c. 大的法兰及精度要求高的零件,焊接过程中一定要有专用工装进行约束,抵消焊接应力,使其变形控制在允许范围内;

d. 对于精度要求高的重要、关键部件,在躯干壳体的焊接全过程中,均采用专用工装对其进行保护。

基于以上设计思路,在躯干壳体的焊接过程中共设计了30多套工装,按照使用用途可分为焊接工装、校形工装、装配工装和检验工装;按照结构形式可分为整体工装和分体工装。通过这些工装的合理使用,对焊接过程进行有效的控制,减小了焊接应力,控制了焊接变形,使焊接工艺方案得到实施。

3.2 主要工艺装备的应用

3.2.1 躯干壳体整体定位焊接工装的使用

躯干壳体整体定位焊接工装用于舱外航天服躯干壳体法兰的定位点焊和部分满焊,躯干壳体上面共有八种法兰,这些法兰盘的空间位置复杂,定位困难,焊接时很容易变形,测量的时候非常困难,由于躯干壳体的蒙皮外壳是厚度为1.5mm的钣金件,焊接时极易变形,加上操作空间有限,操作难度非常大。在设计过程中,通过使用工艺孔和基准平面转移等方法,使空间尺寸变成了可以测量和准确加工的尺寸,保证了产品的精度和位置要求。为躯干壳体的焊接精确定位提供了保证,同时也克服了定位精度高,配合尺寸要求严,操作空间有限等困难,合理地优化了工装的定位机构。详细结构见图1。

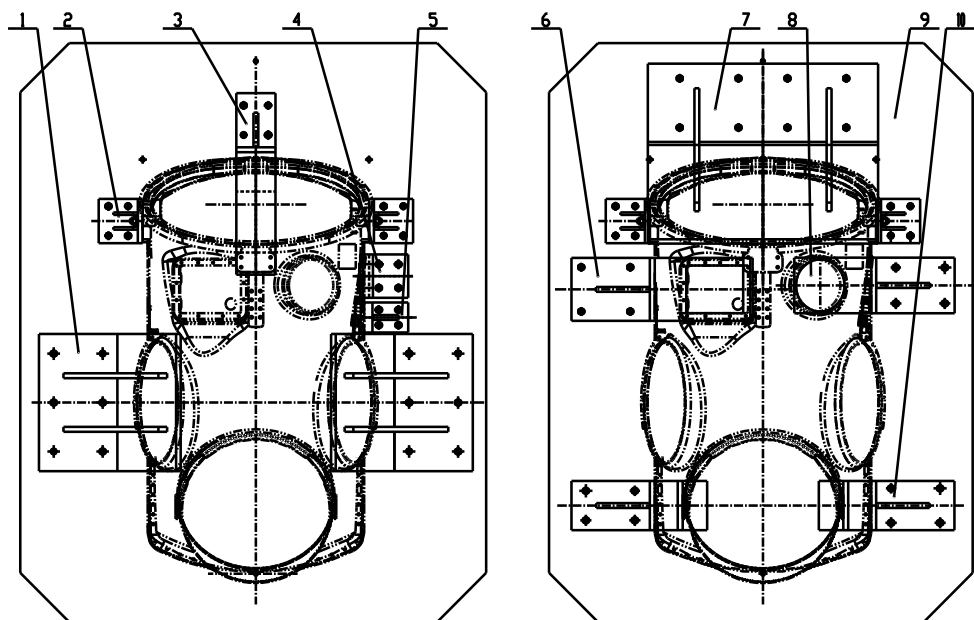


图1 躯干壳体整体定位焊接工装

1—肩法兰定位座; 2—安装侧销座定位座; 3—前销钉座定位座; 4—锁闭手柄座定位座; 5—安全阀法兰定位座;

6—气液控制台法兰定位座; 7—腰法兰定位座; 8—气液组合插座法兰定位座; 9—工作平台; 10—压力头盔焊接组件定位座

3.2.2 各法兰刚性定位及校形工装的使用

在利用躯干壳体整体定位焊接工装对各个法兰进行定位点焊后，再利用各个法兰刚性定位及校形工装，对焊缝区域和焊接法兰盘采取刚性固定法来抵消产品的焊接变形和焊接应力，连续焊接后利用校形工装进行刚性紧固，等产品冷却到室温时再分解紧固工装。这样既保证了躯干壳体整体形位尺寸精度要求，又保证了法兰的局部形状尺寸精度的要求。详细结构见图 2。



图 2 各法兰刚性定位及校形工装

4 研制结果及分析

该工艺方案的实施，逐步加大了对焊接过程的控制。充分利用工装保证，先后共焊接舱外航天服躯干壳体 10 件，产品合格率从最早初样阶段的 39.6%到正样阶段的 95.55%，稳定提高，见表 2。关键尺寸合格率大幅提高，最终达到 100%，见表 3。各接口装配尺寸满足安装要求，经过气密试验考核，满足气密性要求。经受住了环境力学试验等各种力学试验的考核，完成了电性服、低压服、常压服试验的考核。

表 2 产品合格率统计表

序号	合格率	序号	合格率
1	39.6%	6	71.4%
2	68%	7	81.6%
3	67.8%	8	81.6%
4	67.8%	9	95.55%
5	77.5%	10	95.55%

从表 2 可以看出，产品总的性能指标第 1 件合格率低，第 2 件合格率有大幅提升，第 2 件至第 8 件，工艺方法不断改进，产品性能指标合格率缓慢提升；第 9 件及第 10 件，克服了焊接难关，产品指标大幅提升并且趋于稳定，所有关键技术难点均已克服。

表 3 关键尺寸合格率一览表

序号	合格率	序号	合格率
1	28.6%	6	33.3%
2	57.1%	7	55.5%
3	50%	8	77.7%
4	60%	9	100%
5	55.5%	10	100%

从表 3 可以看出，关键尺寸第 1 件合格率比较低，而且极不稳定，前 7 件不是呈现上升趋势，而是锯齿状，关键技术点没有找到解决方法。在后期经过不断改进工艺方法，完善工艺装备，寻找突破点，第 8 件开始呈现上升趋势，第 9 件开始达到质的飞跃，从根本上解决了技术难题，使设计要求的 key 尺寸达到 100%合格。

5 结束语

在舱外航天服躯干壳体研制过程中，通过对该工艺控制技术的运用，大量使用工装，采用了合理的焊接顺序和对焊接变形的控制等手段对焊接过程进行有效控制，满足了舱外航天服躯干壳体的焊接装配技术性能指标，最终实现了舱外航天服的顺利研制。实现了航天员的太空漫步，圆了中华民族的飞天梦。

参考文献

1 关桥,郭德伦,张崇显,等. 航宇薄壳结构的低应力无变形焊接技术[J]. 航空制造技术, 1996(4): 4~15

2 徐青. 浅析焊接应力与焊接变形的控制措施[J]. 科技资讯, 2009(26): 99

3 胡顺桂. 焊接变形的产生和防止[J]. 大众科学(科学研究与实践), 2007(14)

4 刘志平,王立夫. 铝合金部件焊接变形的产生及控制[J]. 焊接技术, 2007(5): 52~53

5 李敬勇,王虎,刘志鹏,等. 预拉伸条件下铝合金筒体焊接残余应力和变形的数值模拟[J]. 材料开发与应用, 2008(5): 52~55

6 张建强,张海泉,岳红杰,等. 铝合金薄壁圆锥体结构的焊接变形[J]. 焊接学报, 2005(1): 21~24

7 杭争翔,殷树言,宋政. 交流脉冲 MIG 焊接铝合金薄板的工艺特性[J]. 焊接学报, 2004(2): 99~102