

钛合金贮箱薄壁壳体电子束焊接

陈志坚, 晏 飞

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

[摘要] 在研制大容积钛合金表面张力贮箱的过程中, 由于受到焊接工装精度的限制, 导致电子束焊缝缺陷, 因此贮箱未达到设计爆破压力而发生破裂。通过对焊缝断面的金相分析, 改进了焊接前焊缝清洁措施, 修改了焊接工艺参数, 最终解决了大直径薄壁钛合金壳体的焊接质量问题。

关键词: 钛合金贮箱; 大直径薄壁壳体; 电子束焊接

Electron Beam Welding of Titanium Alloy Thin-Walled Shell for Propellant Tanks

CHEN Zhijian, YAN Fei

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

[ABSTRACT] In the development process of the large volume titanium alloy surface tension tank, due to welding tooling precision limit, resulting in election beam welding defects, so the tank does not meet the design burst pressure and fails. By means of the weld cross section analysis, the welding seam cleaning measures are improved, the welding process parameters are modified, and the welding quality problem of large diameter and thin-walled titanium alloy shell is finally solved.

Keywords: Titanium alloy tank; Large diameter and thin-walled shell; Election beam welding

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.17.093

某钛合金推进剂贮箱直径达到 1100mm, 球壳的厚度仅为 1.3mm, 焊口加强厚度为 2mm。最后上下两半球壳体合拢焊接是整个研制过程中的关键工序, 贮箱合拢焊接采用真空电子束焊接方法, 焊接设备为 LAR52 真空电子束焊机, 是国产真空系统和法国进口电子枪组合成的电子束焊机, 电子枪是法国 TECHMETA 公司产品, 是 60kW 中压电子束焊机。

焊接前的酸洗及预处理工艺是: 酸洗→烘干(80℃ ± 5℃)→焊口打磨→丙酮擦洗→电吹风吹干。

焊接前的装配精度是保证电子束焊接质量的重要因素, 按照装配工艺的要求, 两半球赤道缝焊口的端面间隙不大于 0.02 毫米, 径向间隙(即上半球壳体的锁底与下半球壳体的配合)不大于 0.03, 装配后测量端跳动不大于 0.10mm, 径向跳动不大于 0.15mm。

在实际操作中, 由于上、下半球直径大壁薄, 整条焊缝长度达 3450mm, 焊接夹持工装精度不够, 由于前工序

下半球与支撑法兰焊接变形等原因, 装配精度无法满足工艺文件的要求。调整的最好精度只能达到端面跳动 0.20mm, 径向跳动 2mm。通过做同等间隙的焊接试件, 分析试件的熔深和焊缝断面形态及金相最后确定焊接参数(见表 1)。

焊接后进行该焊缝 X 射线拍片, 发现 2 处未熔合缺陷。由于补焊位置不易确定, 没有补焊, 通过液压强度试验与声发射试验确认其强度。贮箱合拢焊缝情况如图 1 所示。上、下壳体材料均为 TC4 钛合金, 焊缝为有锁底结构。

1 试验结果与分析

焊后经 750℃ 真空退火热处理消除焊接应力, 进行该贮箱的液压强度试验。试验过程如下: 缓慢增压同时用声发射监测, 过程是升至 1.0MPa, 保压 5min 声发射信号逐渐收敛; 继续增压至 1.5MPa, 保压 5min, 声发

表1 上、下壳焊缝的焊接参数

| 焊接参数 | 电压 /kV | 束流 /mA | 聚集电流 /mA | 焊接速度 / (mm·s ⁻¹) | 真空度 /mbar | 偏置距离 /mm | 偏转函数 | 偏转频率 /Hz | 偏转半径 /mm |
|------|--------|--------|----------|------------------------------|----------------------|----------|------|----------|----------|
| 焊接 | 60 | 19 | 2400 | 20 | 7 × 10 ⁻⁴ | 0 | 正弦 | 200 | 1 |
| 修饰 | 60 | 20 | 2500 | 20 | 7 × 10 ⁻⁴ | 0 | 正弦 | 200 | 1 |

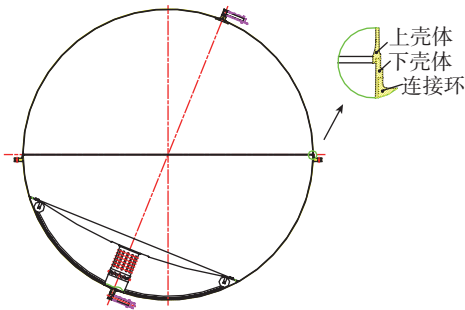


图1 贮箱合拢焊缝示意图

Fig.1 Schematic diagram of tank closure welding

射信号逐渐收敛;继续增压至 2MPa,保压 5min,声发射信号逐渐收敛;继续增压至 2.5MPa,保压 5min 声发射信号逐渐收敛,继续增压;增压至 2.8MPa,保压 5min,声发射信号平静稳定;继续增压至要求压力 3.0MPa,开始保压,约 10s 后,贮箱在上下壳体合拢焊缝处爆裂。爆破压力低于设计压力值 4MPa,焊接质量不合格。

1.1 宏观检验

贮箱爆裂情况见图 2 及图 3,观察到爆裂沿焊缝裂部位,具体位置是耳环 9 至耳环 13。起爆点位于裂纹中心耳环 11 处。

1.2 断口分析



图2 贮箱焊缝爆破图

Fig.2 Tank welding seam failure state



图3 贮箱焊缝爆破源断口

Fig.3 Tank welding seam fracture appearance

取耳环 9 到耳环 13 的焊缝断口位置进行观察,可见在耳环 10~20mm 处到耳环 11+40mm 间存在平断口,其余为 45° 的剪切断口,剪切断口处的焊缝熔深 $\geq 2\text{mm}$ 锁底深度。平断口处应为贮箱爆破的裂源。

用扫描电镜观察上述平断口处,可见断口处呈现 4 种特征区域,见图 4,从焊缝表面到焊根依次是:剪切

区、中间区、气泡叠加平整断口区和不平整断口区。在剪切区的下面分布着大量密集小气泡,气泡尺寸从焊缝根部向上逐渐由小变大,范围在 1~150 μm 。对这 4 个区域作放大观察,剪切区断口形貌为剪切韧窝特征见图 5;中间区断口形貌为气泡+韧窝或气泡+准解理特征(见图 6);气泡叠加平整断口区断口形貌为气泡+极细小的浅韧窝断口特征(见图 7);不平整断口区的断口形貌为韧窝+准解理特征(见图 8),是钛合金母材的断口。

1.3 金相分析

取耳环 11 到耳环 11+50mm 处的断口截面磨制金相,通过高倍金相显微观察可知焊缝的组织为 α' + 针

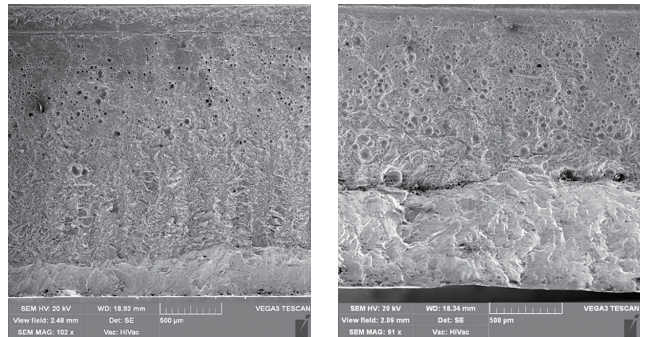


图4 断口低倍形貌

Fig.4 Fracture morphology of low times

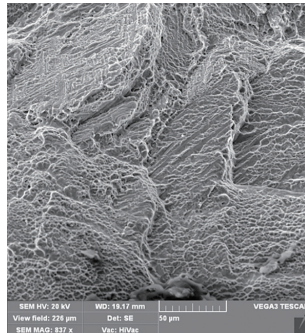


图5 剪切韧窝高倍形貌

Fig.5 Shear dimple morphology of high times

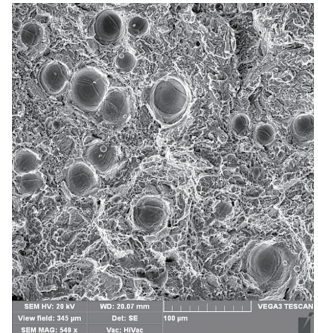


图6 气泡+韧窝和气泡+准解理

Fig.6 Bubble + dimple and bubble + quasi cleavage

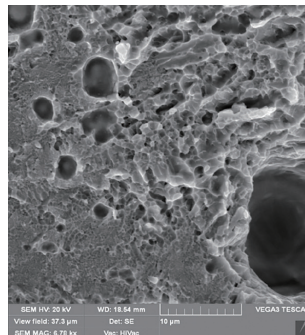


图7 气泡+极细小的浅韧窝

Fig.7 Bubble + tiny shallow dimple

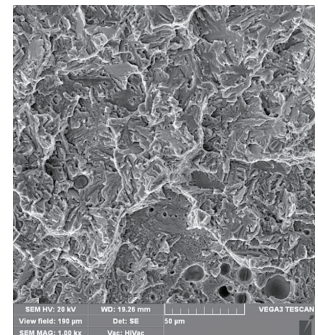


图8 韧窝+准解理

Fig.8 Dimple + quasi cleavage

状 α , 母材基体组织为 $\alpha+\beta$ 。观察到焊缝的热影响区很窄, 沿熔合线分布着较多小气泡, 焊缝在锁底一侧沿焊缝的熔合线开裂。焊缝熔深已过锁底, 未焊透和焊偏现象不明显。为了解整圈焊缝的熔深、焊缝的偏移情况和焊缝的质量, 分别取耳环 2、3、4、16 位置(贮箱爆破后拍 X 片发现存在“未熔合”黑线处)、耳环 19 位置和耳环 22、11、11-25mm、11-50mm 处的焊缝截面磨制金相。测得各焊缝的熔深见表 2。

表2 焊缝各部位的熔深情况

| 焊缝部位 | 耳环 2 | 耳环 3 | 耳环 4 | 耳环 16A | 耳环 19A | 耳环 22 | 耳环 11 |
|---------|------|------|------|--------|--------|-------|-------|
| 焊缝熔深/mm | 2.90 | 3.2 | 2.93 | 3.10 | 2.86 | 3.08 | 2.94 |

金相组织见图 9~14。从断口分析并结合焊缝金相组织判断, 焊缝中不存在未焊透和明显的焊偏现象, 各焊缝熔深深度相差不大。在耳环 3、耳环 4、耳环 16、耳环 22 焊缝的根部发现有钉尖缺陷。

为了确定焊缝疑似未熔合“黑线”缺陷的性质, 对 X 光片上存在“黑线”的耳环 19 焊缝和不存在“黑线”的耳环 22 焊缝进行间隔为 1mm 的连续金相剖面分析, 从分析结果看“黑线”处不存在未焊透或未熔合缺陷, 但焊缝锁底与下半球壳体存在约 0.2~0.3mm 间隙, 母材上有凹陷, 见图 13; 不存在“黑线”的耳环 22 处焊缝锁底间隙窄无类似情况, 见图 14。

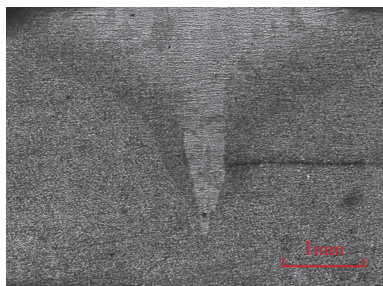


图9 耳环4处的焊缝剖面

Fig.9 Welding seam profile at the fourth earring

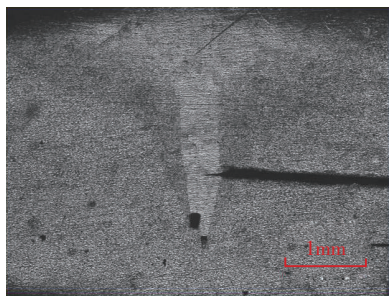


图10 耳环16处的焊缝剖面

Fig.10 Welding seam profile at the sixteenth earring

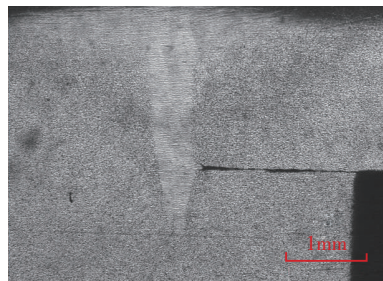


图11 耳环19处的焊缝剖面

Fig.11 Welding seam profile at the nineteenth earring

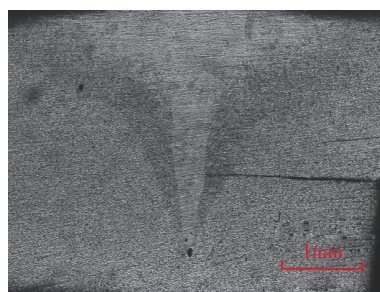


图12 耳环22处的焊缝剖面

Fig.12 Welding seam profile at the twenty-second earring

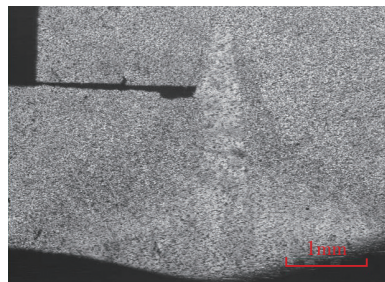


图13 耳环19“黑线”处的焊缝剖面

Fig.13 Welding seam profile at the black line of the nineteenth earring

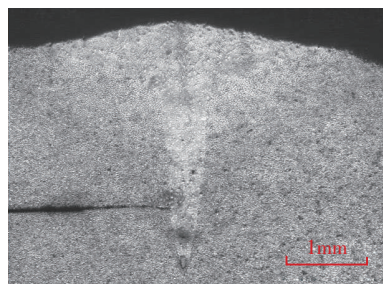


图14 耳环22无“黑线”处的焊缝剖面

Fig.14 Welding seam profile at the black line of the twenty-second earring

2 分析结果讨论

从断口和金相分析试验结果可知, 贮箱在打压的过程中, 首先在耳环 10~20mm 至耳环 11+40mm 处焊缝根

部韧性较差的组织处形成裂源,随后沿着焊缝的熔合线扩展,最后在焊缝表面呈 45° 撕裂。与此同时裂缝向两边扩展,最终撕裂至钛板母材。从焊缝裂纹根部的极细小的浅韧窝断口可知焊缝裂源组织韧性差,而裂源断口的扩展区在焊缝的熔合线上呈面状密集分布着大量的小气泡,从焊缝根部到上部尺寸逐渐由小变大,范围在 1~150 μm ,形成了焊缝的面缺陷,减少了焊缝的有效截面,致使贮箱低压爆破。

通过对贮箱焊缝各部位的金相剖面分析,可知焊缝熔深过锁底,从断口分析并结合焊缝金相组织判断焊缝中不存在未焊透和明显的焊偏现象, X 光片上存在“黑线”的耳环 19 焊缝和不存在“黑线”的耳环 22 焊缝对比金相剖面分析表明:该处连续黑线的产生非焊接缺陷而是锁底间隙的厚度差造成的。经测量此厚度差约为 70~80 μm ,由于 X 射线拍片时是斜照射,投射方向与间隙面呈 30° 角, X 射线在投影方向的实际厚度差为 $h/\sin 30^\circ = 2 \times 70\mu\text{m} = 140\mu\text{m}$ 。此厚度差在 X 射线缺陷评判的灵敏度范围内,这是环 19 焊缝 X 光片上产生黑线的根本原因。钛合金球壳焊缝合拢处母材产生凹陷是焊前局部打磨不当造成的。

钛及钛合金的焊接具有许多的特点,是由钛及钛合金的物理化学性能所决定。在常温下,钛是比较稳定的,但随温度的升高,吸收氢、氧的能力逐渐增加^[1-3],在焊接过程中,液态溶滴和熔池金属具有强烈吸收氢、氧的特点。这些气体被钛吸收后会降低焊接接头的韧性。真空电子束焊接 TC4 钛合金能获得很高的接头质量,是因为它在真空环境熔化凝固,排除吸氢氧等有害气体的机会,同时电子束具有能量密度大,焊缝深宽比大,热影响区窄等优点。虽然真空室中 $3.2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 焊接气氛非常纯净,但是如果钛合金焊前预处理时控制不严,有残留水分或油等其他杂质,电子束焊会产生气孔等焊接缺陷。

钛合金焊接中,气孔的生成主要是钛在固态和液态对氢溶解能力差异较大造成的。焊接钛合金通常采用较大的热输入及较低的焊接速度,使氢有足够的时间从熔池中逸出。如果选择的焊接速度快,热量输入小,存在水分,氢就来不及从熔池逸出。气孔在钛及钛合金焊缝中易产生气孔,分布在熔合线附近,这是钛及钛合金气孔分布的一个特点。

由图 15 可以看出,氢在钛中的溶解度随温度升高而降低,在凝固温度有跃变。熔池中部比熔池边缘温度高,熔池中部的氢易向熔池边缘扩散,而后者比前者对氢有更高的溶解度,故熔池边缘容易为氢过饱和而生成气孔。对有锁底结构的焊缝,气孔往往向锁底一侧焊缝熔合线分布。虽然一般小气孔不会造成严重的应力集中,但聚合形成面状分布,对焊接质量会有很大的影响。依据气孔形成机理,在焊接中尽量消除氢源,控制熔池吸氢量是减少或者消除焊接气孔的关键。

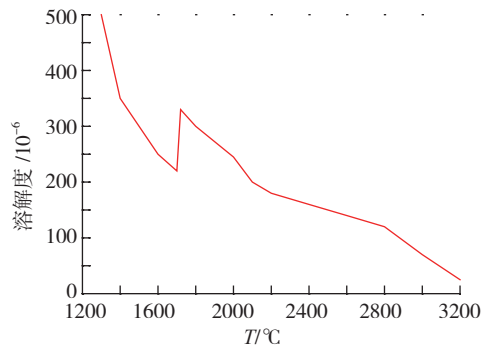


图 15 溶解度随温度变化曲线
Fig.15 Solubility and temperature change curve

通过爆裂贮箱的断口分析、金相分析,综合概括以下结论:

- (1) 焊缝熔深过锁底,从断口分析并结合焊缝金相组织判断焊缝中不存在未焊透和明显的焊偏现象;
- (2) 在耳环 10~20mm 至耳环 11+40mm 焊缝根部为贮箱爆破的裂源,其上存在韧性差的组织,而裂源断口的扩展区(焊缝的熔合线上)密集分布着大量的小气泡形成了焊缝中类似未熔合的面缺陷,减少了焊缝的有效截面,上述原因造成了贮箱的低压爆破;
- (3) 韧性差的组织和气泡的产生应该与局部焊缝预处理不干净存在水分或油及其他污染有关;
- (4) 耳环 19 焊缝 X 光片上产生的黑线非焊接缺陷,它的产生与锁底间隙的增大有关;
- (5) 焊缝断面为标准“图钉形”状电子束焊缝对装夹和配合误差较大的长焊缝不能完全包容覆盖。

3 改进措施

(1) 严格控制钛合金贮箱电子束焊接前的预处理

表3 上、下壳焊缝调整后的焊接参数

| 焊接参数 | 电压 /kV | 束流 /mA | 聚集电流 /mA | 焊接速度 / (mm·s ⁻¹) | 真空度 /mbar | 偏置距离 /mm | 偏转函数 | 偏转频率 /Hz | 偏转半径 /mm |
|------|--------|-----------|----------|------------------------------|--------------------|----------|------|----------|----------|
| 焊接 | 60 | 19.8~21.4 | 2370 | 17 | 7×10^{-4} | 0 | 正弦 | 150 | 2 |
| 修饰 | 60 | 20~22 | 2500 | 17 | 7×10^{-4} | 0 | 正弦 | 150 | 3 |

(下转第 106 页)