

高压球形气瓶焊缝结构设计与焊接工艺

于斌 靳庆臣 何俊 刘志栋 程彬

(兰州空间技术物理研究所,兰州 730000)

文 摘 研究了气瓶赤道焊缝区的结构优化设计和焊接工艺改进措施,焊缝区渐变补强设计提高了焊缝区的应变协调性,改进电子束与焊缝作用方式解决了内部飞溅问题,采用优化的电子束工艺参数进行焊接。结果表明:焊接接头质量达到了 GJB1718A—2005《电子束焊接》标准 I 级焊缝,焊缝及热影响区力学性能与母材相当,气瓶进行鉴定试验,性能指标满足设计要求。气瓶焊缝结构优化设计,降低了焊缝处应力水平,减少应力集中,通过改进焊接工艺提高了电子束焊缝质量。

关键词 电子束焊接,TC4 钛合金,高压气瓶,结构设计,焊接工艺

Welding Line Design and Welding Process of Sphere High-Pressure Vessel

Yu Bin Jin Qingchen He Jun Liu Zhidong Cheng Bin

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract This paper discusses the optimum design and welding process of the welding line. When the thickness of the welding line area increases gradually, the strain in this area is coordinative. The improvement of mutual effect between welding line and EB can solve the problem of splash and the quality of welding line corresponds to the standard of GJB 1718A—2005. The mechanical properties of welding line, heat affect zone and raw material are approximately equivalent, the characteristics of the pressure vessel satisfy the design. The optimum design leads the stress of welding line to decrease, the improvement of welding process increases the quality of welding line, the optimum design of welding line and improvement of welding process is the measure of improvement of welding quality and it is a great significance of enhancement of pressure vessel performance.

Key words Electron beam welding, TC4 alloy, High pressure vessel, Structure design, Welding process

1 前言

近年来航天领域应用金属高压气瓶材料多为钛合金,TC4 钛合金具有比强度高、耐腐蚀性和抗疲劳断裂性能好等优点。全金属球形高压气瓶要求具有较高的可靠性、安全性和疲劳循环寿命,球形气瓶赤道焊缝是影响气瓶质量最主要的因素之一。焊缝区的结构优化设计和焊接工艺改进是解决焊缝性能发挥和焊缝质量控制的有效途径。若焊接区结构合理,与近焊缝区在疲劳循环过程中变形协调,应力水平较低,不会导致应力集中;反之则导致焊缝区成为气瓶失效的临界区。焊接工艺直接影响焊接接头质量和力学性能,焊缝区为铸造组织,强度和硬度较高,而韧

性较差,在气瓶疲劳循环过程中与近焊缝区变形不协调,产生应力集中,焊缝区组织对裂纹形核和扩展的抑制能力较差,导致裂纹产生,气瓶壳体断裂。焊接飞溅是高压气瓶制造工艺中迫切解决的问题之一,由于电子束与材料特殊的作用机制导致壳体穿透焊内侧飞溅较难控制。

为保证球形 TC4 钛合金高压气瓶焊缝区性能的良好发挥,提高球形高压金属气瓶的安全性和可靠性,本文主要研究该气瓶赤道焊缝结构设计与焊接工艺。

2 焊缝区结构设计

高压气瓶为双极孔球形 TC4 钛合金全金属气

瓶,两半球壳体赤道缝组焊采取真空电子束焊接。气瓶结构如图 1 所示,等壁厚球壳壁厚为 5.5 mm,赤道缝为对接 I 型焊缝,利用电子束单面焊双面成型工艺完成半球壳体连接和密封。

壳体组焊造成焊缝处力学性能降低、焊接错配产生的弯曲应力、焊缝与近焊缝区应变协调性降低等负面影响^[1],焊缝区需采取补强设计,补强厚度为 K (补强系数) 倍的原焊缝厚度, K 取值为 1.2-2.0, 补强后焊缝厚度为 5.5 mm。

焊缝渐变区是连接等壁厚球壳和焊缝区的中间区域,焊缝渐变区在承受内压的过程中应变水平与等壁厚球壳相当,高于焊缝区,焊缝渐变区需采取变厚度设计,以提高焊缝渐变区与焊缝的应变协调性,防止该区域应力水平过大,在气瓶承压状态时,对焊缝区产生撕扯,造成应力集中,导致焊缝破坏。焊缝渐变区采取特殊渐变规律,焊缝渐变区母线采取特殊设计的样条曲线连接。

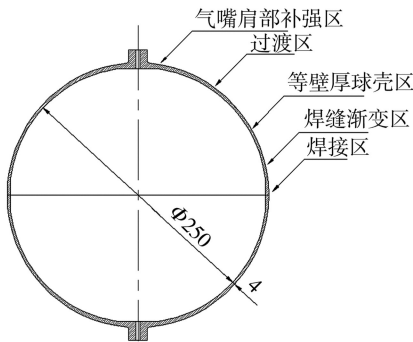


图 1 球形气瓶结构示意图

Fig. 1 Framework of global pressure vessel

3 焊接工艺

试件为高压气瓶赤道对接焊缝,焊缝厚度 5.5 mm,待焊试件为经过热冲压后固溶处理的 TC4 钛合金半球壳体,母材力学性能参数为:抗拉强度 1 080 MPa、屈服强度 1 030 MPa、延伸率 16%。焊接设备采用乌克兰巴顿焊接研究所研制的 KL113 电子束焊机,进行电子束熔透焊接,焊后去应力退火,焊接工艺参数为:工作电压 50 kV、电子束流 75 mA、聚焦电流 2 900 mA、焊接速率 8.8 mm/s、扫描频率 150 Hz,焊后测试了焊接接头的力学性能,通过气瓶赤道焊缝宏观形貌分析焊缝成形,按照 GJB1718A—2005《电子束焊接》标准检验焊缝。

3.1 焊前试件状态

采用两半球体对接焊缝电子束焊接,TC4 钛合金半球由板材经过热冲压成形,后经过固溶处理。TC4 钛合金组织为密排六方点阵结构 α 相和少量体心立方点阵结构 β 相的机械混合物,针状 β 相均匀分布在 α 相基体上。

3.2 壳体焊接工艺

首先对焊缝表面处理,钛合金与氧亲和力较强,常温下即可在表面产生一层氧化膜,焊前对氧化膜进行机械清除,防止在电子束熔化氧化物的过程中,分解产生气孔,然后对焊缝进行清洗,马上进行装配,防止钛合金焊缝表面二次氧化。

气瓶赤道电子束焊接装配结构如图 2 所示,焊接夹具与转台螺接,定位法兰固定焊缝,并实时检查焊缝装配精度,装配完成后,进行电子束点位焊,点位焊固定后,再按工艺参数进行电子束焊接,焊后 X 射线探伤。

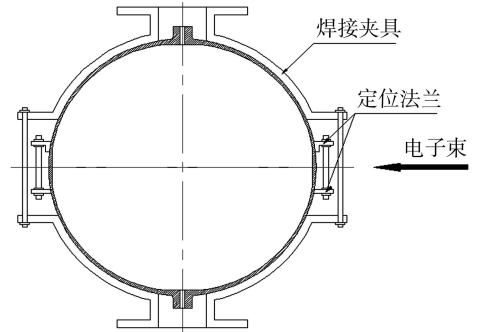


图 2 气瓶赤道缝电子束焊接装配示意图

Fig. 2 Framework of assembling

4 结果与讨论

4.1 焊接接头力学性能

高压气瓶赤道缝电子束焊接接头及热影响区的抗拉强度分别为 1 010 MPa 和 1 030 MPa,电子束焊接的快速冷却作用,在焊缝区和热影响区形成了马氏体组织,TC4 钛合金电子束焊接接头和热影响区的力学性能与母材相当^[2],说明采用该工艺可获得力学性能良好的焊接接头。

4.2 焊缝成形

焊接接头正面熔合较好,无未焊满、咬边缺陷;焊缝背面熔合较好,无未熔合、未焊透等缺陷;焊缝正反面余高及焊缝错边量满足标准要求;气瓶赤道缝整体熔合较好;经 X 射线检测,焊缝无气孔裂纹产生,气瓶赤道电子束焊缝达到 GJB1718A—2005《电子束焊接》标准 I 级焊缝。

4.2.1 电子束入射角度对焊缝成形的影响

气瓶赤道缝采取电子束单面焊双面成形,焊缝成形受熔池内蒸汽反冲压力、熔池液体重力、熔池液态金属表面张力和电子束冲击力的综合作用,当电子束垂直入射焊缝时,极易造成内部飞溅和表面轻微塌陷,壳体组焊时,熔池液体重力对焊缝流动性及焊缝成形有直接的影响,电子束能量密度高,焊缝迅速熔化,向下流动,导致焊缝表面金属减少,轻微塌陷,背面由于电子束与熔池底部的激烈作用,熔池底部液态金属反冲力大于表面张力时,液态金属脱离熔池,造成内部飞溅。

采取水平电子束入射加热焊缝,如图3所示,焊接熔池向下流动自动填补焊缝,熔池内蒸汽反冲压力受到金属液体黏滞作用,抑制飞溅,熔池液体重力由底部的凝固焊缝支撑,在熔池内形成了良好的受力平衡,解决了深穿过程中内部飞溅和正面塌陷的问题,焊缝成形较好。电子束在波形范围内高频扫描,能量分布均匀,该电子束焊机扫描线圈的频率特性较好,在波形范围内能够获取较为均匀的温度场,焊缝受热比非偏摆产生钉尖缺陷时的温度场均匀,进一步改善了焊缝成形。

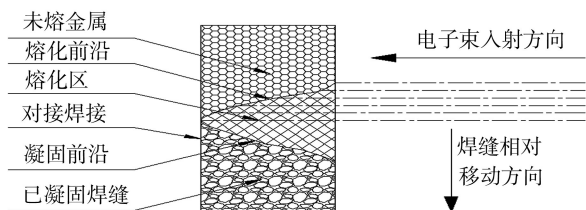


图3 电子束与焊缝相互作用示意图

Fig.3 Mutual effect between EB and welding line

4.2.2 焊接工艺对焊缝成形的影响

电子束焊接能量密度是影响焊缝成形主要的因素之一,在能量密度相同的情况下,功率和焊接速率等比例增加时,焊缝熔化凝固速率过快,焊缝表面成形较差,功率和焊接速率等比例降低时,液态金属流动时间过长,造成背面焊缝余高过大,正面未焊满。优化电子束工艺参数后,通过一系列的焊接工艺试验得到最优化的工艺规范。焊接时采用电子束按指定波形高频扫描^[3],熔池受到搅拌,有利于气体排出^[4]。随着电子束频率增加,气孔尺寸及数量减少,当频率达到某一定值时,气孔尺寸变化不明显。

4.3 焊缝区结构优化设计对气瓶性能的影响

对气瓶鉴定件进行气密性试验、压力验证试验、疲劳循环寿命试验、爆破压力试验,均达到设计要求。

焊缝是影响气瓶疲劳寿命的主要因素之一,气瓶在反复充压卸压的过程中主要考核焊缝与近焊缝区的应变协调性以及焊缝区的应力水平大小,通过焊缝区补强设计,焊缝渐变区的变厚度设计,使两者变形

协调性增强,焊缝疲劳性能提高。在承压状态下球壳处于双向拉伸状态,焊缝区韧性降低对金属气瓶性能产生很大的负面影响,电子束焊缝区抗拉强度通常与母材相当,有时高于母材,通过对 TC4 钛合金焊接试样拉伸试验表明,断裂往往发生在热影响区附近,为防止气瓶承压时由焊缝导致的失效情况,必须对近焊缝区进行补强设计,补强区结构也直接影响该处的应力水平,该处应采取平滑变厚度渐变设计原则,以减少应力集中。

5 结论

对球形高压气瓶赤道焊缝区进行了补强设计,降低了焊缝处应力水平,对近焊缝区进行了平滑变厚度设计,提高了气瓶壳体的应变协调性。

改进电子束与焊缝作用方式,解决了薄壁壳体电子束焊接内壁飞溅问题,采用优化的电子束工艺参数进行焊接,焊接接头质量达到 GJB1718A—2005《电子束焊接》标准 I 级焊缝,焊缝及热影响区力学性能与母材相当。

焊缝结构设计与焊接工艺改进是提高气瓶焊缝质量的主要措施,对于提高气瓶性能具有重要的意义。

参考文献

- [1] Zhang Haiquan, Zhang Yanhua, Li Liuhe, et al. Influence of weld mis-matching on fatigue crack growth behaviors of electron beam welded joints[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A334:141-146
- [2] Wanjara P, Brochu M, Jahazi M. Ti-6Al-4V electron beam weld qualification using laser scanning confocal microscopy [J]. Materials Characterization, 2005, 54:254-262
- [3] Bahr M, Hoffmann G, Ludwig R, et al. New scan and control system for high power electron beam techniques [J]. Surface and Coatings Technique, 1998, 98:1211-1220
- [4] Chi Chaoting, Chao Chuenguang, Liu Tengfeng, et al. Relational analysis between parameters and defects for electron beam welding of AZ-series magnesium alloys [J]. Vacuum, 2008, 82:1177-1182

(编辑 李洪泉)