

⑫ 58-61, 85

制 造 安 装

关于 CF—62 钢制 2000m³ 液化石油气球罐 焊后热处理问题的分析

TE 972
TG 441.8

PWHT Analysis of 2000m³ LPG Spherical Storage Tank of CF-62 Steel

北京燕山石油化工公司设计院

修淑英

On the basis of the collected PWHT cases and related standards of large spherical storage tank inside and outside of China, Problems regarding to integral PWHT of 2000m³ LPG CF—62 spherical tank in the Refinery of BYPC are analyzed.

关键词: CF—62 钢 球罐 应力腐蚀 焊后整体热处理

液化石油气

盛装石油化工原料的球形储罐（以下简称球罐）的焊后热处理是一个比较复杂的技术问题。各国建造的大型球罐和有关标准规范对热处理有着不同的要求。

本文就燕山石化公司 2000m³CF—62 钢制球罐的焊后热处理问题进行分析。

1 球罐焊后热处理的意义及其费用

液化石油气球罐焊后热处理的主要目的是为了消除组装焊接造成的残余应力并改善材料性能,以避免应力腐蚀及脆性断裂的产生。

应力腐蚀是指金属在应力和腐蚀介质联合作用下发生的一种腐蚀破坏。在拉应力和腐蚀介质的共同作用下,材料表面会形成裂纹,并向内部扩展,这些裂纹可能是沿晶的,也可能是穿晶的,最后在不发生宏观变形的情况下,引起材料断裂。尤为危险的是,在腐蚀进程中,往往测不出材料腐蚀量,也看不出腐蚀产物,所以常常觉察不出腐蚀已经发生。特别是介质含

H₂S 的情况下(如储存液化石油气),应力腐蚀更为严重,因此这是设计者必须慎重考虑的问题。

对应力腐蚀破裂影响最为显著的是拉应力,拉应力越大则越危险。由于球罐焊接残余应力的拉应力可达到材料的屈服极限,所以高水平的拉应力是造成球罐应力腐蚀和脆性破坏的重要因素,因而消除结构焊接残余应力和提高材料抗应力腐蚀能力便成为提高球罐安全性的重要措施。为防止应力腐蚀破坏,进行焊后整体热处理以消除球罐的残余应力是一种有效的方法。

球罐的焊后热处理是将焊制成的球罐整体加热到相变点 AC₁ 以下的某一温度,经过一定时间的保温过程然后均匀冷却的工艺过程。通常,焊后热处理的目的可概括为:(1)消除焊接残余应力;(2)稳定结构形状与尺寸;(3)改善焊接接头性能;(4)提高抗应力腐蚀能力;(5)防止延迟裂纹的产生。

可见,对球罐进行焊后热处理的效果是十分显著的。但是,对焊后热处理(特别是对大型球罐进行焊后热处理)的技术要求很高,如处理不好,非但达不到目的,还会带来不利的影响,甚至危及使用安全;此外,进行焊后热处理还要增大投资,特别是对大型球罐进行焊后整体热处理。以2000m³球罐为例,其焊后整体热处理每台至少要花费15万元。因此,有人主张不进行焊后整体热处理,他们在对焊接残余应力、焊接接头硬化和焊接接头的力学性能进行系统的基础性研究后,从选材、设计、制造、安装及工艺规范等方面采取了免于进行焊后热处理的特定的技术措施。主张免于进行焊后热处理制造球罐的典型代表是日本川崎重工,由此形成了国内外对球罐焊后热处理要求不一致的状况。

2 国内外大型球罐焊后热处理情况

50年代初期,美国CBI公司与美国钢铁公司合作,开发了T-1调质高强度钢,用于制造大型球罐,该钢后来发展为钢号SA517Gr·F,调质状态供货,板厚 $\leq 65\text{mm}$, $\sigma_b = 795 \sim 930\text{MPa}$, $\sigma_s \geq 690\text{MPa}$ 。到80年代,该公司在大型球罐上不再采用SA517Gr·F钢,而采用强度级别较低的SA537C1.2,该钢也是调质状态供货,板厚小于等于65mm, $\sigma_b = 500 \sim 690\text{MPa}$, $\sigma_s \geq 415\text{MPa}$ 。球壳板厚度超过32mm;或焊前预热温度大于95℃,球壳板厚度大于38mm时,球罐焊后进行整体热处理。

法、英和西德等国,在开发和应用球罐整体热处理技术,消除球罐焊缝残余应力方面获得了较好效果。据有关资料报道,英国某桥梁及工程公司曾对直径为21m,容积为5000m³,板厚为76mm的两台球罐进行了整体消除应力热处理,采用长为30m的带状加热元件将球壳升温至600℃,保温后缓冷10天,用400对热电偶测温。英国的考帕加热公司和蒙特工程公司,曾对25台各种工业球罐进行了整体热处理。瑞典史弗纳格联合公司曾对3台容积为

4200m³,直径为20m的球罐,采用一个2000万千焦耳级的高速燃烧器装置,进行整体消除残余应力处理。

70年代,法国为我国辽阳石化化纤总厂承制的设计温度为-20~55℃的两台1000m³丙烯球罐和设计温度为-20℃~55℃的一台1000m³液化石油气球罐,系采用板厚39.5~40.6mm的UNION36Nb钢,该钢是正火状态下供货, $\sigma_b = 490 \sim 590\text{MPa}$, $\sigma_s \geq 335\text{MPa}$;以及设计温度为-40~40℃的三台1350m³乙烯球罐,采用板厚为49.5~50.7mm的CREUSELOS34SS钢,该钢也是在正火状态下供货, $\sigma_b = 490 \sim 590\text{MPa}$, $\sigma_s \geq 335\text{MPa}$ 。这六台球罐焊后均要求整体热处理。日本川崎为我公司化工一厂承制的设计温度为-31℃的四台1912.3m³的乙烯球罐,采用板厚为39~40mm的LT-50(RIVERACE60L)钢,该钢为调质状态供货,屈服强度为490MPa级的低温高强度钢,球罐焊后不要进行整体热处理。

80年代初,日本川崎重工为我国南京扬子石化公司和上海金山石化总厂承制的八台1700m³乙烯球罐,设计温度为-35℃,球壳板采用厚度为42.6~43.6mm的RIVERACE60L调质的低温高强度钢,这八台球罐均在焊后状态下使用,即焊后未进行整体热处理。80年代中期,日本城水铁工所为上海金山石化总厂承制的两台500m³乙烯球罐,球壳板采用厚度41mm的N-TUF50低温高强度钢,焊后进行了整体热处理,热处理温度为575℃±25℃。北京北郊罐站两台10000m³的天然气球罐,设计温度为-18℃~50℃,球壳材质:其中一台是采用日本新日铁(NSC)引进的厚度为34mm的WEL-TEN62CF钢;另一台是采用由日本钢管(NKK)引进的厚度为34mmNK-HI-TEN62U钢,这两种材质均系CF钢,调质状态供货,球罐在焊后状态下使用。北京南郊罐站(焦化厂)的四台5000m³天然气球罐,材质也是由日本不同厂家引进的CF钢,设计温度为-18℃~50℃,球罐焊后均未进行整体热处理。

90 年代以来,我国新建的一些高参数的大型球罐,开始采用国产钢材。如大庆石化总厂的设计温度为 -30℃ 的 1500m³ 乙烯球罐,采用武汉钢铁公司生产的 CF 钢,壁厚 44mm,焊后进行了整体热处理;巴陵石化公司的设计温度为 -15~50℃ 的三台 1000m³ 丙烯球罐;广州石化总厂的设计温度为 -20~40℃ 的 1500m³ 丙烯球罐等等,均系采用武汉钢铁公司生产的 CF 钢。当然在新建的大型球罐中,材质从国外引进的仍然还占有相当大的比例。这些新建的球罐大部分在焊后状态下使用,少部分球罐焊后进行整体热处理。到目前为止,国内进行整体热处理的球罐,容积最大的是中原化工厂两台 4000m³ 的液氨球罐,球壳板钢号为 SA516Gr·70,板厚为 16.5~20.5mm。

总之,国内外已建球罐对焊后热处理问题上的具体做法是不完全一致的。

3 国内外标准对焊后热处理的规定

国内外有关规范标准对焊后热处理要求的规定也是不尽相同的

美国机械工程师协会标准 ASME 第八卷第一篇和第二篇(1992 年版)中,规定对厚度大于 38mm 的调质状态供货的 SA724Gr·C 钢板,焊后要求进行热处理。该钢号钢板最大厚度 50mm, $\sigma_b=620\sim 760\text{MPa}$, $\sigma_s\geq 485\text{MPa}$, 其强度性能指标与 CF-62 钢接近。此外,还规定:对碳素钢和低合金钢制压力容器,若容器内装有致命介质时,任何壁厚的压力容器焊后必须进行热处理。

日本工业标准 JISB8243-1981(1986 年确认)《压力容器构造》中,对属于 P-2 类钢材的 SPV50 钢板有如下规定:如焊接区厚度大于 32mm 时,要求进行焊后热处理;如焊前预热且其温度不低于 95℃,则焊接区厚度大于 38mm 时,要求进行焊后热处理。SPV50 钢板性能指标基本上与 CF-62 钢相当。

我国标准 GB12337-90《钢制球形储罐》中明确规定,符合下列情况之一的球罐应在压

力试验前进行整体热处理:

- (1) 图样要求进行焊后整体热处理者;
- (2) 名义厚度大于 34mm (若焊前预热 100℃ 以上时,名义厚度大于 38mm) 的碳素钢制球壳;
- (3) 名义厚度大于 30mm (若焊前预热 100℃ 以上时,名义厚度大于 34mm) 的 16MnR 钢制球壳;
- (4) 名义厚度大于 28mm (若焊前预热 100℃ 以上时,名义厚度大于 32mm) 的 15MnVR 钢制球壳;
- (5) 任意厚度的其它低合金钢;
- (6) 图样注明有应力腐蚀的球罐;
- (7) 图样注明盛装毒性为极度或高度危害介质的球罐。

关于 H₂S 的应力腐蚀问题,在 HGJ15-89《钢制化工容器材料选用规定》中规定:水中的 H₂S 浓度当大于等于 100ppm 时,对 20R、16MnR、20g 或相类似的材料要焊后整体消除应力热处理;而当水中的 H₂S 浓度小于 100ppm 时,无要求。此外,日本高压气体保安协会《高强度钢使用规范》规定:当 H₂S<50ppm 时,可不热处理;当 H₂S≥50ppm 时,需做热处理。

综上所述可以看出,当球罐壁厚超过 38mm 时一般要求热处理;若介质为剧毒的或有应力腐蚀的都要求进行热处理。

4 对 CF-62 钢制 2000m³ 球罐焊后热处理的要求及技术分析

从各国大型球罐的焊后热处理情况和有关标准的规定来看,对于球罐焊后热处理的具体做法虽有一定差异,但标准规范的要求基本是一致的。从球罐设计的角度出发,为确保球罐的安全性,特别是对于 CF-62 钢制液化石油气球罐来说,重要的是需防止 H₂S 的应力腐蚀和低温脆断,在这一方面各国规范是一致的。第一,要求材料抗 H₂S 应力腐蚀,同时具备良好的低温韧性。第二,应尽量降低结构应力水平,

避免应力集中。为此在设计和建造过程中应重点考虑以下几个方面:

(1) 选用能抵抗 H_2S 应力腐蚀同时具有优良低温韧性的材料;

(2) 控制焊接接头具有良好的低温韧性,以保证有足够的低温断裂韧性水平;

(3) 尽可能降低焊接残余应力,避免应力集中;

(4) 要求 100% 探伤消除原材料及其焊接接头部位的裂纹源。

在燕山石化公司东炼气分原料罐区 $2000m^3$ 液化气球罐的设计中充分考虑了以上各个方面:

a. 壳体材料选用了性能良好的 07MnCrMoVR 钢,此钢属低焊接裂纹敏感性钢。并选用了性能与其相匹配的锻件及焊接材料。

b. 07MnCrMoVR 钢具有优良的抗 H_2S 应力腐蚀性能。北京工业大学按照国内外现行规范要求及有关规定,采用恒负荷拉伸试验、简支梁试验及恒位移 WOL 试验,对该钢的 H_2S 应力腐蚀性能进行了试验。表明 07MnCrMoVR 具有优良的抗应力腐蚀性能,达到了在湿 H_2S 介质中使用的合格要求。

c. 设计中要求钢板的 $-20^\circ C A_{KV}$ 平均值不低于 60J,较 GB150—89 规定的 A_{KV} 平均值 ($\geq 47J$) 为高;球罐所采用的锻件与焊条是与钢板配套的,同样具有优良的低温韧性。

d. 球罐在设计上采用了桔瓣和足球瓣混合式五带结构,12 个支柱,球壳共 86 块板。最大特点是焊缝短且分布均匀,焊缝总长约为 574.7m。球罐设计规定了允许的角变形和错边量,采用全焊透结构并严格限制焊缝余高,要求焊道打磨与母材平滑过渡,这样的结构外形可有效地降低或减少应力集中。

e. 球罐制造、安装技术条件中规定了产品焊接前应进行各项焊接工艺评定并合格。在焊接过程中,焊条要求按规定制度进行烘干和领用,焊前进行不低于 $100^\circ C$ 的预热,焊后对接头

进行 $(180\sim 230^\circ C) \times 1h$ 后热,严格规定了各种焊接位置线能量的上下限,要求采用十分严格的焊接工艺,对每一层焊道的宽度和厚度均有具体规定;同时为了确保此工艺的正确执行,规定了从焊接该球罐的焊工除持有劳动部门颁发的锅炉压力容器焊工资格证外,还应结合 CF—62 钢的焊接特点进行焊接技能培训,在熟悉和掌握焊接要领后方有时可施焊。以上这些措施,可有效的防止焊缝接头产生缺陷,并能改善接头的韧性。

f. 增加无损检测的比例,以提高对焊接缺陷的检出率;如规定了人孔与壳体、接管与壳体对接以及人孔凸缘与人孔法兰对接焊缝除了进行 100% 射线探伤外,还应进行 100% 超声波探伤;规定了所有零部件组焊的焊缝表面均需进行 100% 射线探伤检查外,还规定了对全部环焊缝和距环焊缝 500mm 内的纵焊缝(丁字缝)及射线探伤检查有缺陷或疑问的部位进行超声波探伤检查。

由此可见,球罐设计中对壳体材料与焊材的性能及焊缝的检验都已进行了仔细的考虑。

g. 进行整体热处理,降低结构残余应力,考虑到 $2000m^3$ 液化石油气球罐设计压力为 1.77MPa,球罐的名义厚度达 $\delta_n=38mm$,由于球壳比较厚,不可避免地存在较高的组装应力和焊接残余应力,对球罐的抗应力腐蚀和防止脆断是十分不利的。

资料表明,球罐的焊后热处理对降低结构的残余应力具有明显的作用。根据大庆石油化工公司的 CF—62 钢制 $1500m^3$ 大型乙烯球罐资料分析,热处理前用 X 射线仪对球罐应力集中部位进行了残余应力测试,残余应力最高值位于下极带环焊缝的熔敷金属上,其值为 $\sigma_y=290MPa$, $\sigma_z=476MPa$,达到材料的屈服线标准值的 0.97,为球壳板实际屈服限的 0.8 左右。经整体热处理后又对该部位进行了应力测试,分别降至 $\sigma_y=88MPa$, $\sigma_z=140MPa$,最高残余应力仅为材料屈服强度的 0.23 左右,整体热处

(下转第 86 页)