

2000m³液氨球罐设计要点

赵帅¹, 郑娟², 张璐³

(1.中国石油管道局工程有限公司)

(2.北京永新环保有限公司)

(3.中国石油管道局工程有限公司)

[摘要] 液氨作为重要的化工原料,其储存的安全性至关重要。以2000m³液氨球罐设计为例,从结构、选材、设计计算、材料要求、制造、检验和验收以及安全附件选用等本质安全方面阐述了液氨球罐的设计要点。

[关键词] 液氨;液氨应力腐蚀;球罐;选材;安全附件

引言

氨作为一种重要的化工原料,为了运输及储存便利,通常将气态的氨气通过加压或冷却得到液态氨。液氨,又称为无水氨,是一种无色液体。液氨属乙类,易燃、易爆有毒液体,其危险性表现在两个方面:一是氨属高毒物品,短时间接触容许浓度(15min)为30mg/m³,因此液氨一旦泄露会导致人员中毒、窒息死亡,造成严重后果;二是氨为中度危害介质^[1],在空气中的爆炸极限为15%~28%,遇明火极易燃烧爆炸。液氨具有腐蚀性,且容易挥发,所以其化学事故发生率相当高。液氨主要用于生产硝酸、尿素和其他化学肥料,还可用作医药和农药的原料。液氨在国防工业中,用于制造火箭、导弹的推进剂,可用作有机化工产品的氯化原料,还可用作冷冻剂。本文以2000 m³液氨球罐设计为例,简述液氨球罐设计要点。

1 基本设计参数

该液氨罐的设计条件:公称容积为2000m³储存介质为液氨,介质密度为563kg/m³,工作温度为10~25℃,设计温度为-10/50℃,最高允许工作压力为2.16MPa,安全阀开启压力为2.16MPa,属于液氨应力腐蚀环境,设备主体的腐蚀裕量为3mm,支柱底板的腐蚀裕量为3mm,地脚螺栓的腐蚀裕量为3mm,拉杆的腐蚀裕量为3mm,装量系数为0.85^[2]。焊接接头系数为1。抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度0.2g,场地类别为II类,设计地震分组为第三组,基本雪压值550N/m²,基本风压600N/m²,地面粗糙度为B类。支柱底板与基础间

的型式为钢-混凝土。钢板厚度负偏差为0.3mm。执行法规和设计标准为TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》^[3]、GB/T12337-2014《钢制球形储罐》^[4]、GB/T 150.1~4-2011《压力容器》^[5]和 GB 50094-2010《球形储罐施工规范》^[6]。

2 球罐结构的确定

球罐结构根据GB/T 17261-2011《钢制球形储罐型式与基本参数》选取混合式三带十根支柱球罐^[7],采用这种结构具有总焊缝长度短、总焊接工程量小、焊材用料少、节省工期、降低焊缝过长带来的安全隐患等特点。球壳内径和球罐基础中心圆直径为15700mm,几何容积2026m³,支柱底板地面至球壳赤道平面的距离为9800mm。各带球心角(°)/各带分块数分别为上极112.5°/7块、赤道带67.5°/16块和下极112.5°/7块。支柱与球壳的连接采用赤道正切型式,支柱与球壳连接处采用加U形托板结构型式,可确保支柱与壳体下部焊接容易且可靠,U形托板采用钢板弯制。拉杆采用可调式。拉杆连接型式为相邻支柱间。

3 选材及设计计算

根据HG/T 20581-2020《钢制化工容器材料选用规范》6.8.5中第2款的规定,材料要求及限制应符合6.8.2中第2款第1)~6)项的要求,即:材料标准规定的屈服强度下限值 $ReL \leq 355\text{MPa}$,材料实测的抗拉强度 $R_m \leq 630\text{MPa}$,材料使用状态应至少

作者简介:赵帅,男,工程师,(1986-),硕士毕业于俄罗斯国立石油天然气大学工艺机械与设备专业,现主要从事压力容器和压力管道专业方面的设计研究工作。

为正火、正火+回火或调质等,碳素钢的碳当量限制为 $CE \leq 0.43$ ($CE=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$),低合金钢的碳当量限制为 $CE \leq 0.45$,材料中不得添加Pb、Se等元素,材料为非焊接件或经焊后热处理时,硬度限制应符合表6.8.2的要求[8]。根据GB/T 12337-2014表4及表5,可选材料有Q245R(厚度 ≤ 60 mm)、Q345R(厚度 ≤ 60 mm)、Q370R(厚度应 > 36 mm,且 ≤ 60 mm)。依据GB/T 150.3-2011《压力容器第3部分:设计》,GB/T 12337-2014和GB/T 17261-2011等标准利用国家容标委认可的压力容器强度计算软件-SW6—2011《过程设备强度计算软件包》进行设计计算,计算结果为:采用Q245R,名义厚度为64mm,超过最大允许厚度60mm,不考虑;采用Q345R,名义厚度为54mm;采用Q370R,名义厚度为52mm。资料表明,球罐的球壳板壁厚越厚,焊接残余应力越大,因此应力腐蚀开裂(SCC)的敏感性就越高^[9],同时,Q370R钢强度适中,低温韧性好,冷裂纹敏感性不高,抗应力腐蚀性能较好等优点^[10],因此,球壳板材质选用Q370R。人孔法兰及凸缘材料选用20MnMoD^[9],凸缘结构参考SH/T3138-2003《球形储罐整体补强凸缘》^[11]并根据GB/T 150.3-2011进行补强计算。其余接管采用20MnMoD^{III},开孔补强按GB/T 150.3-2011等面积补强法进行计算。支柱选用焊接钢管,上端支柱选用Q370R,下端支柱选用Q345R^[12],规格为 $\phi 530 \times 14$ mm。为了保证地震时球罐的安全,拉杆和销子要有足够的强度和刚度,计算校核地脚螺栓的拉伸应力,加大支柱与耳板的连接尺寸,减少应力集中系数,防止局部产生塑性变形,适当增加地脚螺栓个数和支柱下端筋板块数^[13]。

4 主要技术要求

1) 材料

所用Q370R钢板应符合GB/T 713-2014《锅炉和压力容器用钢板》的要求^[14],正火状态供货;球壳用Q370R钢板应逐张进行超声检测,按NB/T 47013.3-2015规定^[15],质量等级不低于II级为合格;球壳用Q370R钢板应逐热处理张进行-20℃夏比(V型缺口)冲击试验,试验温度下三个试样冲击功平均值(KV2)不低于47J,允许其中1个试样的冲击功数值低于平均值,但不得低于33J。同时应逐热处理张增加一组在钢板厚度1/2处取样的-20℃夏比(V型缺口)冲击试验,冲击功要求同上。

所用Q345R钢板应符合GB/T 713-2014的要

求,应逐张进行-20℃夏比(V型缺口)冲击试验,试验温度下三个试样冲击功平均值(KV2)不低于41J,允许其中1个试样的冲击功数值低于平均值,但不得低于29J。

所用20MnMoD锻件应符合NB/T 47009-2017《低温承压设备用合金钢锻件》^[16]的III级或IV级锻件进行制造、检验及验收,调质状态供货。锻件应进行-20℃夏比(V型缺口)冲击试验,试验温度下三个试样冲击功平均值(KV2)不低于60J,允许其中1个试样的冲击功数值低于平均值,但不得低于42J。锻件不允许拼接焊制。锻件的材料化学成分中 $S \leq 0.005\%$, $P \leq 0.010\%$ 。

所用S30408管材应符合GB/T 14976-2012《流体输送用不锈钢无缝钢管》的规定^[17]。

人孔用螺柱材料35CrMoA和螺母材料30CrMoA应符合GB/T 3077-2015《合金结构钢》的规定^[18],还应符合GB/T 12337-2014中第4.5条的要求。

用于制造球罐受压元件的焊条应符合NB/T 47018.2-2017的有关规定^[19],用于球壳主体焊缝的焊条熔敷金属的冲击功指标应不低于相应母材标准规定的下限值。球壳的焊缝以及与球壳焊接的焊缝应选用低氢型药皮焊条,并按批号进行熔敷金属扩散氢含量复验。试验方法按GB/T3965-2012的规定进行^[20],其含量要求应符合NB/T47018.2-2017表4的规定。

2) 制造

球壳板不得拼接且表面不允许存在裂纹、气泡、结疤、折叠和夹杂等缺陷。球壳板应采用冷压成形。球壳板的曲率及几何尺寸允许偏差应符合GB/T 12337-2014中7.1.4和7.1.5的要求。球壳板坡口周边100mm的范围内及组焊上支柱的赤道板,距上支柱与赤道板预焊位置周边150mm范围内应按NB/T 47013.3-2015的规定进行100%超声检测,质量等级不低于II级,技术等级为B级。

受压元件间及受压元件与非受压元件间所有焊缝均应按NB/T 47014-2011进行焊接工艺评定^[21],焊接工艺评定试板应进行与球罐相同的焊后热处理。焊接接头夏比(V型缺口)冲击试验温度为-20℃,冲击试样为三组(每组3个试样),缺口分别开在焊缝金属和热影响区(包括Q370R钢板及20MnMoD锻件热影响区)合格指标为三个试样平均冲击功应 ≥ 31 J,允许一个试样低于平均值,

但不低于22J。试样取样方向为横向。

制造单位应逐台制备产品焊接试件，并满足GB/T150.4-2011中第9.1条及GB/T12337-2014中第7.1.10条，第7.3条和第8.9条的规定。

应做立焊和平焊加仰焊2块产品焊接试件，试件的尺寸和试样的截取按NB/T47016-2011《承压设备产品焊接试件的力学性能检验》的规定^[22]。产品焊接试板应与球罐一起进行热处理（将试板对称布置在球壳热处理高温区的外侧并与球壳紧贴）。试板试验应包括焊缝金属及热影响区的-20℃夏比(V型缺口)冲击试验，三个试样平均冲击功KV₂≥34J，单个试样冲击功值≥24J。

焊接工艺评定、焊接试板及每一种焊接工艺施焊的产品焊缝均应进行焊接接头（包括焊缝、热影响区及母材）的硬度测定，产品上的硬度测定在接触介质侧表面，工艺评定及试板上的测定在横截面上距表面1.5mm。要求在消除应力热处理后焊接接头的硬度≤200HBW（单个值）。

现场用的与球壳相焊的工卡具及预焊件材料应与球壳材料相同，工卡具拆除后壁面打磨光滑，工卡具焊迹及缺陷修磨补焊处，应在整体热处理前进行100%磁粉检测，按NB/T47013.4-2015规定I级合格^[23]。

分段支柱上段与赤道板的组焊以及人孔、接管与极板的组焊应在制造厂内进行，施焊时应进行焊前预热，预热温度≥125℃。焊后需立即进行后热消氢处理，后热温度宜为200~250℃，后热时间应为0.5~1h。

球壳板的对接焊缝，施焊时应进行焊前预热，预热温度≥125℃，焊后应立即进行后热消氢处理，后热温度宜为200~250℃，后热时间应为0.5~1h。

球罐组焊前应对基础尺寸进行检查，其允许偏差应符合GB/T 12337-2014中表27的规定，并按GB/T12337-2014中8.1.2的要求对零部件进行复验。底板与基础、拉杆与支柱的固定连接应在耐压试验合格后进行。球壳不得采用机械方法强力组装。组装时应严格控制对口间隙和对接错边量以减少局部应力水平^[24]。可调式拉杆应对称均匀拉紧。连接件（预焊件）应与球壳紧密贴合，并在热处理前与球壳相焊。若采用连续焊是，应在连接板最低部位留出通气缝隙。

所有焊接接头和热影响区表面不得有咬边、

裂纹、气孔、弧坑、夹渣等缺陷，球罐的经纬焊缝不允许出现“十”字焊缝。组焊尺寸检查按GB/T12337-2014中8.4的规定执行，所有接管法兰均需跨中焊接。角焊缝的外形应当凹形圆滑过渡。

3) 检验、检测和验收

现场组焊的球壳对接焊接接头焊后至少36h后（整体热处理前）应进行100%TOFD检测和100%超声检测^[25]。TOFD检测按NB/T 47013.10-2015规定II级合格^[26]；超声检测按NB/T 47013.3-2015规定I级合格，技术等级为B级。

凸缘与极中板、凸缘与法兰以及DN≥250mm厚壁管与法兰的对接焊缝除应进行100%射线检测外，还应进行100%超声检测，射线检测按NB/T 47013.2-2015规定II级合格，技术等级为AB级^[27]；超声检测按NB/T 47013.3-2015规定I级合格，技术等级为B级。

球壳板与接管角接的焊接接头应进行100%超声检测，按NB/T 47013.3-2015规定I级合格，技术等级B级。

公称直径DN<250mm的接管与接管对接接头及接管与带颈对焊法兰的对接接头进行100%射线检测，射线检测按NB/T 47013.2-2015规定II级合格，技术等级为AB级；

所有的对接焊缝，接管与球壳板的角焊缝以及直接与球壳板焊接的附件的焊缝表面均应在球罐整体热处理前进行100%磁粉检测，磁粉检测按NB/T 47013.4-2015规定I级合格。

支柱的纵焊缝、段间环焊缝应全焊透，并进行100%超声检测，按NB/T 47013.3-2015规定I级合格，技术等级为B级。焊缝表面应进行100%磁粉检测，磁粉检测按NB/T 47013.4-2015规定I级合格。

焊接工作全部完毕且无损检测合格后水压试验前，应进行整体热处理，梯子平台、管架等预焊件需在整体热处理前焊接，热处理后不得施焊。经二次热处理后的材料机械性能应满足钢材标准的规定。焊后热处理温度为580℃±20℃，恒温≥2小时，热处理满足GB/T12337-2014中第8.8条的规定。热处理前，应在支柱底板下设置移动装置，热处理过程中应监测柱脚位移，并按计算位移值及时调整柱脚位移，一般温度每变化100℃应调整一次。热处理后，应测量并调整支柱垂直度，其允许偏差应符合GB/T 12337中8.2.2的要求。

热处理完毕并经验收合格后,球罐应进行2.7MPa的水压试验,水温不得低于5℃。水压试验完毕并经检查合格后进行2.16MPa的气密性试验,其余要求满足GB/T12337-2014中第8.10条的规定。

产品部件的油漆、包装及运输应符合NB/T 10558-2021《压力容器涂敷与运输包装》的规定[28],球壳板内外表面除锈,坡口表面及其内外边缘100mm的范围内涂可焊性防锈涂料。外表面其余部分涂防腐漆2遍,每块球壳板上的钢号、炉批号、球罐号应醒目地标出。运输、吊装、组焊过程中应制定合理的施工方案,防止球壳板变形回弹。

球罐成品的涂漆和隔热应符合工程项目统一规定。支柱需要设置耐火保护,耐火极限不低于2小时。

5 安全附件的选用

超压泄放装置的计算与安装应按GB/T 150.1-2011中附录B的要求。容器安全泄放量及泄放装置泄放面积的计算应按B7、B8进行。安全阀相关技术要求应符合GB/T 12241-2015的要求^[29],爆破片安全装置的选用及相关技术要求应符合GB/T 567.1~4-2012的要求^[30]。本球罐应至少设置2个安全阀,任意一个安全阀的泄放量应满足事故状态下球罐最大泄放量的要求。安全阀的排出口应装设导管,将排放介质引至安全地点,并且进行妥善处理,不得直接排入大气。

压力表应与球罐储存的介质与压力相适应,压力表的精度不得低于1.6级,压力表表盘刻度极限值应为设计压力的1.5倍~3.0倍。表盘直径不得小于100mm。

液位计应根据储存介质、设计压力、设计温度和液位高度选用。液位计应进行1.5倍的液位计

公称压力的液压试验,应为防霜液位计,且应为夹套型或保温型结构的液位计,同时应有防止泄露的保护装置。应设就地和远传液位计,并应设高液位报警和高高液位连锁。

温度计宜选用万向型温度计,并可以测量比最低使用温度低10℃的温度,应测量液相介质的温度。

6 结束语

液氨球罐设计要重点从以下几个方面考虑:液氨应力腐蚀环境对材料的选用要求,壁厚对球壳板检验检测的要求,球壳结构对焊接和检验检测工程量以及应力腐蚀概率的影响,组焊过程对整体球罐质量的影响,不同焊缝类型的检验检测要求,热处理实施的动机和目的,水压试验和气密性试验要求以及安全附件选用要求等。

◆参考文献

- [1]吴爱香,张瑞芳,液氨球罐泄露事故后果分析与评价[J]
- [2]刘超锋,刘亚莉等,在役液氨球罐防止内壁应力腐蚀的技术[J]
- [3]房务农,王剑,Q370R钢制3000m³液氨球罐应力腐蚀裂纹成因分析及修复[J]
- [4]SH/T 3138-2003,球形储罐整体补强凸缘[S]
- [5]朱巧家,王文江,仲照毅,4000m³国内最厚液氨球形储罐分析设计[J]
- [6]李永泰,顾永干,郭春光等,1000m³液氨球罐地震失效分析[J]
- [7]刘建杰,张保中,艾志斌,Q370R钢制液氨球罐全面检验及裂纹成因分析[J]
- [8]刘国栋,陈贤洮,王林,3000m³液氨球罐TOFD检测应用[J]

收稿日期:2021-09-14;修回日期:2022-01-09