

第一篇 球罐的设计和材料

第一章 球罐概论

第一节 球罐的特点和分类

随着我国石油、化工、轻纺、冶金及城市燃气工业的发展，作为储存容器的球罐，得到了广泛的应用和迅速的发展，在石化企业、国防工业、冶金工业及城市燃气中，用于储存液态丙烷、丁烷、丙烯、丁烯及其混合物（LPG）、液化天然气（LNG）、液氨、液氧、液氮、液氢等物料。例如在城市燃气中，球罐供气系统常用于储存液化石油气和天然气以及煤气，在钢厂中利用球罐储存氧气或氮气等，这都说明球罐作为储存容器而言，不仅应用广泛，而且具有很大的优越性。

一、球罐的特点

储存容器一般有圆筒形和球形两种，球形储罐一般由球壳板、支柱、拉杆、人孔、接管、梯子、平台等部件组成（见图 1-1）。作为球罐来说具有如下优点：

1) 与同等体积的圆筒形容器相比，球罐的表面积最小。

2) 球罐受力均匀，且在相同的直径和工作压力下，其薄膜应力为圆筒形容器的 $1/2$ ，故板厚仅为圆筒形容器的 $1/2$ 。

3) 由于球罐的风力系数为 0.3，而圆筒形容器约为 0.7 左右，因此对于风载荷来说，球罐比圆筒形容器安全得多。

因此，球罐具有占地面积少、壁厚薄、质量轻、用材少、造价低等优点。

此外圆筒形容器，由于其受内压后，内部的薄膜应力相对较大，故此，对于大型的圆筒形储罐其设计压力较低，如湿式或干式燃气的储罐，一般在几万立方米到几十万立方米之间，但其设计压力则为几千帕左右。如要求储存的压力较高，则圆筒的直径不能太大，因此，作为圆筒形容器对储存高压的介质的能力是有限的，国内一般的中、高压的卧式储罐最大也就做到 150m^3 左右。国外最近几年出现了枕形罐，即大直径的高压的卧式储罐，采用掩埋式的方式，但最大也就几千立方米。球罐因在受内压时薄膜应力分布均匀且相对较小，因此，能做到储罐单体

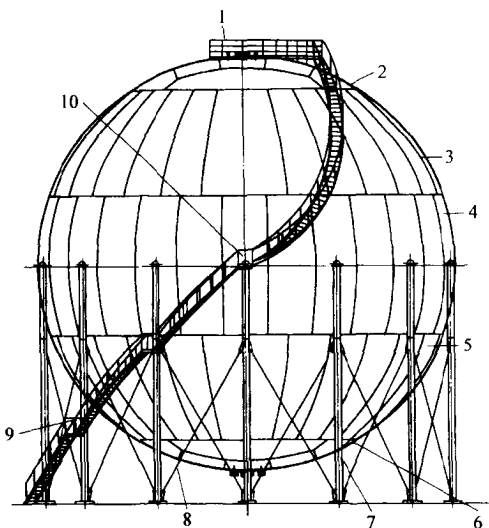


图 1-1 球罐

- 1—顶部操作平台 2—上部极带板 3—上温带板
4—赤道带 5—下部温带板 6—下部极带板
7—支柱 8—拉杆 9—盘梯 10—中间休息台

既有一定的压力，又有较大体积。例如国外最大的球罐已做到压力为 $6\sim 7\text{MPa}$ ，体积为 300000m^3 左右的大型球罐。由此可以看来采用球罐储存气态介质的能力比采用其他形式的储罐储存气态介质的能力都更大一些；同时又能保持较高的压力，从经济上看要采用球罐储存介质也是较经济的方式。随着科学技术的发展，材料、制造、安装等技术水平的提高，这一优势将进一步明显。

二、球罐的分类

球罐可根据其充装的介质，支柱形式以及从壳体排板形式进行分类。

(一) 按储存介质的性质分类

可分为储存液相介质的球罐和储存气相介质的球罐两大类，其中储存液相介质的球罐又可根据其工作的温度分为常温球罐和低温球罐。低温球罐又可分为单壳球罐、双壳球罐及多壳球罐。因为使用的温度是极低温，为了防止与大气温度接触以保冷，多数为双层式或多层式球罐。通常，将储存 -20°C 以下的液化气体为目的的球罐称为低温球罐。

(二) 按支柱形式分类

可分为支柱式、裙座式、锥底支承式以及安装在混凝土基础上的半埋式，其中支柱式又可分为赤道正切式、V形支柱式、三柱合一式等，图 1-2 所示为支柱支撑式球罐。

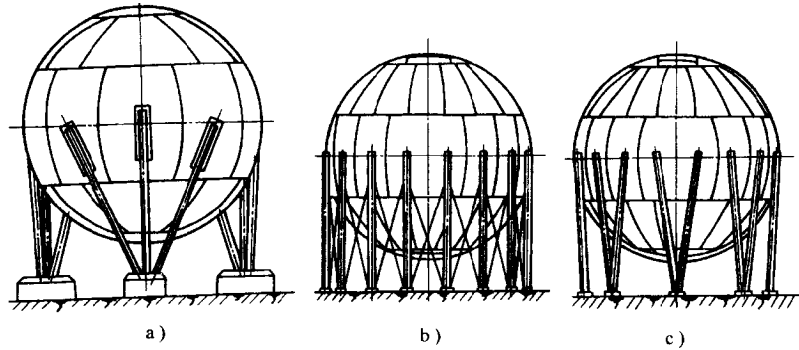


图 1-2 支柱支撑式球罐

a) 三柱合一式 b) 赤道正切式 c) V形支柱式

(三) 按球壳板排板形式分类

可分为足球式、桔瓣式和足球桔瓣混合式，球罐分瓣形式如图 1-3 所示。

(四) 按壳体层数分类

可分为单层球罐、多层球罐、双金属层球罐和双重壳球罐。

目前国内外较常用的是单层的赤道正切式球罐，这种球罐无论从设计、制造和安装均有了较为成熟的经验，我国球罐设计的国家标准 GB12337—1998《钢制球形储罐》也规定采用这种形式。

从球壳板的排板形式来看，足球瓣式球壳板结构，其板材利用率较高，但焊接组对较为困难，且部分支柱在球壳的环焊缝上，对运行之后的开罐检查不利。纯桔

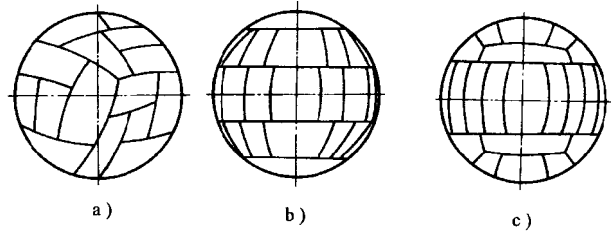


图 1-3 球罐分瓣形式

a) 足球式 b) 桔瓣式 c) 足球桔瓣混合式

瓣式结构是最通用的形式,优点是焊接接头布置简单、组装容易、球壳板制造简单,但球壳板的数量较多、焊缝长度较长,对于 5000m^3 以下的球罐,板材利用率较低;混合式分瓣形式集中了足球式分瓣法和桔瓣式分瓣法的优点,板材利用率高、分块较少焊缝短,因此焊接及检验的工作量也相应减少,所以目前国内外广泛采用桔瓣式和足球桔瓣混合式的排板形式。

第二节 球罐的历史及发展

一、球罐发展的历史

球形储罐最早出现在 19 世纪末到 20 世纪初,开始时只是储存低压气态介质,早期的球罐为铆接结构。这种结构形式制造较为困难,材料的浪费也较大,例如,在 1936 年做了一台直径为 21.3m、工作压力为 0.49MPa、壁厚为 19mm、材质为 st52⁽¹⁾ 的铆接球罐,壳质量为 816.5t。其中铆接搭接部分所需的板材就为 36.6t,占壳体总质量的 17%,铆钉质量为 12t,占总质量的 5.5%,而且一旦其中有一部分铆接不合格,只得拆除重新铆接。因此,早期的球罐发展速度是缓慢的。

第二次世界大战以后,随着焊接技术的发展,人们已能找到合适的焊接材料,球罐的制造也从铆接改为焊接的方法,球罐的制造得到飞速发展。1956 年,日本用美国钢铁公司的 T-L80 钢制成了直径 33.68m、容量为 20000m^3 城市煤气贮罐,这是当时世界上最大的球罐。1958 年,德国 M.A.H 公司用 FB50 高强度钢生产了一台直径为 47.3m、容积为 55500m^3 、壁厚为 30mm 的大型球罐,这时期的球罐虽然体积可以做的很大,但压力较低,总的储气能力也很低,而对于液化的气体储罐,还不能做得很大。从 60 年代开始至今,球罐的制造技术得到了进一步的发展,在这段时期内日本的球罐发展较为突出,日本在 1962 年以前液化石油气球罐的几何容积都在 2000m^3 以下,1962 年制成了容积为 3000m^3 液化石油气球罐,1965 年达到 5000m^3 。此外,对于大型的储气球罐的压力也进一步提高。1968 年时制成了容量为 20000m^3 的大型球罐,1985 年日本新日铁制铁公司为日本西部瓦斯用本公司生产的 WEL-TEN80C 型高强度钢制造一台大型球罐,设计压力为 0.75MPa、直径为 37.07m、容积为 26700m^3 。

双重壳低温、深冷球罐于 1962 年,由美国芝加哥桥梁钢铁公司用 5803-0 铝镁合金制成,其内球直径 12m、壁厚 38mm、容积为 900m^3 ,它是一台液态氢(-252°C)双重壳球罐,外球壁为碳钢。日本从 1966 年开始制造双重壳球罐,1967 年在德山市建造的双重球罐容积达 2000m^3 ,1968 年石川岛播磨重工业公司用 5803-0 铝合金制造液态乙烯(-100°C)双重壳球罐,其内球直径达 20.117m,铝板厚度 10~25mm,内球容积达 4000m^3 ,外球直径为 21.946m。自称这是当时最大的低温球罐。

由以上历史发展概况可以看出,球罐的建造虽然较早,但发展较慢,其进程先为低压、常温、气体,其后逐渐过渡到中、高压,低温液化气体和大型化的方向发展。

近期国外部分球罐制造状况见表 1-1。

二、我国球罐发展的现状

我国制造球罐始于 50 年代末。1958 年开始制造第一台 50m^3 的球罐,1966 年北京金属结

⁽¹⁾ 为前苏联普通碳素结构钢。

表 1-1 国外部分球罐制造状况

建造地区	容积 /m ³	内径 /mm	数量 /个	储存 介质	球壳 材料	设计压力 /MPa	球壳板厚 /mm	建造时间 及进展情况
西部瓦斯	26700	37070	1	城市煤气	WEL-TEN780C	0.74	30.3	1985
日本大阪	19420	33350	1	城市煤气	WEL-TEN780C	0.83	32.5	1994
西部瓦斯	5000	21220	1	城市煤气	WEL-TEN62CF	0.83	25.7	1988
日本千叶	10300	27000	1	天然气	HW490	0.88	33.2	1996
日本北海道	14151	30010	1	城市煤气	HW70	0.88	31.3	1994
荷兰	3534	18900	2	天然气				
加拿大	7606	24400	1	工业煤气				
摩洛哥	6000	22500	2	丁烷	A537 CL1Mod		31-36	1989
日本三菱重工	5575	22000	2	LPG	N-TNF33N	0.59	26-30.5	1983
日本昭和石油	3000	17900	1	LPG	SPV50Q	0.69	19.5-21.5	1979
法国	4300	20200	3	MgL	SA738-GrB		44	1992
南非	1500	14200	1		A537CL		50	1989

构厂制造了直径为 9.2m、几何容积为 400m³、壁厚为 20mm，质量为 45t 的球罐。随着我国科学技术进一步发展，特别是改革开放以来，为了满足我国的国防、科研、石油化工、冶金、市政等工业对储存容器的要求，我国的球罐工业得到发展。目前我国已能自行设计制造安装 2000m³ 以下的液化石油气球罐和 4000m³ 以下的低压球罐。在 1986 年北京引进了国外的球壳板由自己安装了 5000m³ 的球罐，1988 年又以同样的方式引进了 10000m³ 的球罐，1998 在大连我国又成功地利用引进日本的钢板，自行设计并压制成功了 8000m³ 的、储存介质为 C4 的球罐。

目前我国部分球罐制造状况见表 1-2。

表 1-2 国内部分球罐制造状况

建造地区	容积 /m ³	内径 /mm	数量 /个	储存 介质	球壳 材料	设计压力 /MPa	球壳板厚 /mm	建造时间 及进展情况
北京	5000	21290	4	天然气	WEL-TEN62CF NK-HITEN62U	0.86	30	1986 年
	10000	26740	2	天然气	WEL-TEN62CF NK-HITEN62U	0.86	34	1988 年
	10000	26740	10	天然气		1.03		制造阶段
上海	3500	18850	10	天然气	WEL-TEN62CF	1.53	38	施工阶段
成都	5000	21220	3	天然气	A537CL1Mod	1.2	29~30	1996 年
西安	10000	21730	4	天然气	A537CL1Mod	1.05	35.1~35.3	工厂加工阶段
咸阳	5000	21200	3	天然气		1.03		招标阶段
宝鸡	4000	19700	4	天然气		1.05		招标阶段
重庆	3300	18480	3	天然气	18G2AN6	1.3		1993 年

(续)

建造地区	容积 /m ³	内径 /mm	数量 /个	储存 介质	球壳 材料	设计压力 /MPa	球壳板厚 /mm	建造时间 及进展情况
大连	8000	24800	2	C4	SPV490Q	0.8	30~32	施工阶段
连云港	2000	15700	2	LPG	16MnR	1.72	46	1997年
太仓	2000	15700	2	LPG	16MnR	1.7	46	1998年
天津	1500	14200	8	LPG	16MnR	1.72	42	1997年
镇江	4000	19700	1	石脑油	20R		24	1995年

三、球罐发展的方向

随着材料、焊接、制造、施工安装技术的不断提高,球罐也正向着高参数和多品种方向发展。设计压力从 0.093MPa 的真空度到上百个大气压力,工作温度从 -250 到 850℃,球罐结构从单层到多层,品种非常广泛。其中,最主要的是向大型化方向发展。

(一) 大型化的经济性

表 1-3 为主要受压元件的材料为 16MnR 设计压力为 1.72MPa 设计温度为 -19~50℃。

表 1-3 几种 LPG 球罐技术经济指标的比较

技 术 指 标	200m ³	400m ³	1000m ³	2000m ³
储罐几何尺寸 (直径×壁厚)/mm×mm	φ7100×22	φ9200×30	φ12300×38	φ15700×48
储罐总质量/t	33.3	73	163.5	325
储罐投资/万元	50	110	245	500
占地面积/m ²	202	340	625	1024
投资指标/(元/m ³)	2500	2750	2450	2440
占地面积指标/(m ² /m ³)	1.01	0.85	0.625	0.512

由表 1-3 中可以看出,从投资指标和占地面积指标来看,球罐越大储存每立方米液化石油气所用的投资和占地面积就越少;此外,小型罐随着罐数量的增加,罐的附件在球罐总吨位数中所占的比率也将增加,同时,随着台数的增多,罐表面积的增加,维护保养的工作量及有些球罐所要求的消防喷淋用水量也将增加。这些,都增加了投资。

所以球罐大型化是比较经济的,也是今后球罐发展的方向。

(二) 大型化球罐的结构特点

1. 支柱 大型气相球罐直径虽然很大,但是质量不大,故支柱尺寸较小,显得非常轻巧。与此相反,液相球罐大型化后,由于储液量较多,单根支柱的生产载荷很大。因此,对于液相球罐来说支柱非常粗大。

2. 球罐内部设有回转梯 为了检查方便,大型球罐内部一般设置回转梯,这是一种沿球顶部经赤道到球下部做成圆弧状的梯子,它以球顶为中心沿赤道部的导轨作周向回转。

(三) 大型化需要解决的问题

1. 球罐壳体用钢 由于大型球罐不进行现场整体热处理以消除应力,故对板厚有一定的

限制,所以大型化必须使用高强度钢材。若以板厚 38mm 为限,设计压力为 0.49MPa 时,用 800MPa 级的高强度钢材则可制成直径为 67m、体积为 15.7 万 m^3 的球罐,其储存燃气的能力为 942000 m^3 ;若用 16MnR 来制造球罐,只能制成直径为 30.9m、体积为 1.55 万 m^3 的球罐,其储存燃气的能力仅为 93000 m^3 。由此可见球罐要大型化,首先要解决的是球罐壳体用钢问题,而高强度钢的研制、开发和应用为首选。

2. 高强度钢的焊接性能和焊接技术 由于高强度钢的焊接性能较普通低合金钢差,裂纹敏感性高,焊接接头容易产生硬化、氢脆和裂纹(主要是冷裂纹和延迟裂纹)以及角变形。裂纹的影响因素与焊条及涂药成分、坡口形状、焊接热量输入大小、气候环境影响、焊道走向等等都有密切关系,所以对焊接技术要求很高,需要有严格的焊接规程和相当高的焊接技能。

3. 现场施工的科学组织和焊接技术严格管理要求 由于大型球罐直径大,不能运输,所以总是在制造厂制出球片、支柱、旋梯等零部件,然后运到使用厂地现场组装焊接。而高强度钢的焊接质量受环境的影响很大,因此要求较严格的现场管理和施工技术问题。

4. 球壳板的大型化及其焊缝的自动化 大型球罐的焊缝很长,往往长达数千米,所以需要的作业时间长,投资费用也大。目前,现场焊接大部分是焊条电弧焊,效率低,很有实行自动化焊接的必要。近 20 多年来,也有不少人在研究球罐的埋弧自动焊、熔化极惰性气体保护焊,以提高焊接效率和质量,但一般还停留在球片的拼焊上。或者让球体转动,但只适合于小型球罐的焊接。而大型球罐的安装又不能转动,所以近年来有人研究球体不转、焊机转动的自动焊。有文献报道,地面上用含有 w_{Ni} 为 9% 的钢制 LNG 贮槽立缝和环缝的自动 TIG、脉冲 MIG 和埋弧焊等。此外,通过改进球壳瓣片的划分形式以减少焊缝长度及减少焊接工作量。

球内面的焊接施工条件极为恶劣,由于大型球罐的焊缝很长,焊接工作量大,往往需要几个人同时施焊,但球内空气不流通,而且球体又需预热到 100℃ 以上,因此,对球内施工条件的改善和焊工的特殊防护必须进行研究。

5. 支柱和基础的安全可靠性 大型球罐的支柱较多,每根支柱受载荷较大(尤其液化气储罐),而大型球罐的直径又大,各支柱不易安装在同一水平上。此外,在地基有局部下陷的时候,将会引起支柱载荷不均匀。

在 1mm 不均匀下沉的情况下,一根支柱就要产生比其他支柱高 10% 左右的应力。假如在设计支柱时,安全系数是 1.7,则在 7mm 不均匀下沉的情况下,支柱的承载能力就会耗尽,因而会产生轴向弯曲。为此,应有各种结构和措施的考虑。譬如把支柱基座设计成可调的,或者为了尽可能达到均匀下沉,把基础设计成耐扭曲的环形基础,因而又产生环形基础的应力分析等问题。

四、国内与国外的差距

我国的球罐的发展虽然开始建造较晚,发展比较快,但是,目前同国际先进水平还有不少差距。我国目前建造的 5000 m^3 以上的大型球罐多数还是进口国外的球壳板,由国内组装完成的,即使国产压制的最大的 8000 m^3 充装介质为 C_4 的球罐,其板材也是从日本进口的。

我国球罐制造、安装与国际先进水平差距主要体现在如下几个方面。

(一) 球罐的设计

我国球罐设计的标准为常规的设计方法,即为建立在第一强度理论(最大主应力理论)之上的设计方法。只考虑了单一的最大载荷工况,按一次加载处理。不考虑交变载荷,不计算

球罐的疲劳寿命。因此，所采用的安全系数较大。而国外，已开始采用分析设计方法，对球罐上所受的应力加以分类，并按不同的许用值来加以评定，同时考虑到由于球罐内部介质的压力波动等因素而引起的疲劳寿命问题，从而使设计用的安全系数较低。一般来说，采用分析设计方法可以节约材料 20%~30%，壁厚、焊接材料和焊接工作量也因此相对减少。

随着球罐向大型化方面发展，采用分析设计法的设计球罐的优越性将越来越明显。例如，在北京引进的 10000m³ 天然气球罐的国际招标中，法国采用较为先进的 CODAP 标准设计的球罐（其安全系数为 2.4），击败了日本采用与我国常规设计方法相似的安全系数为 3.0 的设计方案。

（二）球罐用的钢板

由于球罐的大型化的发展，高强度钢材将成为能否制造球罐所需解决的首要问题，我国目前最常用的也是最成熟的用于制造球罐的钢材为 16MnR，其力学性能为 $\sigma_b=510\text{MPa}$ ， $\sigma_s=345\text{MPa}$ ，而国外制造大型球罐大都采用 $\sigma_b=610\text{MPa}$ 级别以上的调质钢进行制造，有的还用 780MPa 以上的钢进行制造，我国从 80 年代开始试制和生产 $\sigma_b=610\text{MPa}$ 级别的钢材，但是由于板宽较窄，因此目前还无法满足大型球罐要求板宽较大的要求。

（三）现场施工组装和焊接方面

由于大型球壳不进行焊后整体热处理，因此国外为了减少球壳板组对应力，而采用低应力或无应力的夹具，这就对球壳板压片的曲率、球壳板的几何尺寸及坡口，还包括运输、装卸起吊等都提出了较高的要求，这些方面国内还很难做到，我国球罐的组对应力还相对较大。

（四）自动化方面

国内目前有个别的单位，球罐的焊接采用自动焊接，但大部分均为焊条电弧焊接。球罐内的焊接施工条件是十分恶劣的，随着球罐的大型化发展，球壳板尺寸的加大，焊道将增加很长，所需作业时间就较长，如果采用焊条电弧焊接效率则较低。国外大都采用自动焊接，能降低工人的劳动强度，提高生产效率。

第二章 球罐的设计

设计是一种富有创造性的劳动。根据设计任务的特定要求，收集相关的现有数据资料，使设计既要符合政府行政法规的要求，又要满足技术标准规范的条件；既要考虑技术先进，又要考虑经济上的可行。从而提出可行的设计方案，以便进行分析、评价和选择。

压力容器的设计也不例外，要求设计者既通晓有关现行国家法令、法规、设计标准、规范及应力分析方法，又要具有丰富的设计、制造、使用和维护的工程实践经验。

根据我国《压力容器安全技术规程》规定，球罐的设计单位必须持有省级以上主管部门的批准，同级劳动部门备案的压力定点设计单位批准书，否则不得进行设计。

第一节 设计应遵守的设计标准规范

在所有的工业国家中，压力容器的设计和制造都是遵照某一实用的标准和规范，这些标准和规范，有些在法律上是要求强制性执行的，有些则是推荐性的。

我国压力容器的标准规范是由在容器科研设计和制造工艺方面有经验的工程技术人员所组成委员会（全国压力容器标准化技术委员会）制定的，是一个理论、试验和经济的综合产物，为适应设计、制造和试验等各方面的发展，要对标准定期审查和修订，因此着手设计压力容器时，都应该参照有关国家最新标准及规范。

按我国标准化法的规定，标准可分为国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。

国家标准就要在全国范围内统一基本技术要求，由国家技术监督局批准发布，其他各种同类标准必须遵守的共同准则和最低要求，并在结构和设计方面给出一个通用导则。

行业标准是在没有国家标准而又需要在全国压力容器行业范围内统一规定的技术要求。压力容器行业标准由机电、化工、劳动和石化总公司等部门发布，并报国家技术监督局备案。

压力容器的设计应遵循国家标准和行业标准，这两级标准又分为强制性标准和推荐性标准两类。

一、国内球罐的设计标准

目前球罐的主要设计标准及相关标准有

GB12337—1998《钢制球形储罐》；

GB150—1998《钢制压力容器》；

GB/T17261—1998《钢制球形储罐形式与基本参数》；

GB6654—1996《压力容器用钢板》；

JB4726—1994《压力容器用碳素钢和低合金钢锻件》；

《压力容器安全技术监察规程》；

GB50094—1998《球形储罐施工及验收规范》。

二、国外球罐的设计标准

在主要工业化国家中，除日本以外均没有球罐的专门设计规范，一般均为压力容器方面

的行业性规范。

如美国的 ASME VIII div2 压力容器 1995、法国 CODAP 非直接火压力容器规范、英国 BS 5500 非直接受火压力容器、德国 AD 压力容器规范。

日本球罐的系列标准有：《球形煤气罐指南》JGA 指-104—89、日本工业规范《压力容器》JIS B8270—1993、《锅炉及压力容器安全规则》、《压力容器构造规则》、《高压气体取缔法》、《高压气体球形储罐技术规范》等，较为全面。

三、设计基础资料

球罐的设计者在设计中需考虑的因素是多方面的，除了上述标准规范之外，还要求设计的基础资料，这些设计的基础资料是设计计算参数确定的依据，包括以下内容

- 1) 设计委托书(规模、使用介质、建设地点)
- 2) 工艺条件(最高工作压力、工作温度、压力波动范围、循环次数等)。
- 3) 气象资料(高低温、主导风向及风速、风载等)
- 4) 地质资料(水文及地震等)。
- 5) 附件的选型情况(仪表的选择要求，消防、喷淋的要求，防雷、防静电等的要求)。

第二节 球罐的结构设计

一、球罐本体

球罐的形式有多种，但最常用的为赤道正切型的支柱支承式球罐，我国国家标准 GB12337—1998《钢制球形储罐》也采用这种设计的方法，我国目前所建造的球罐绝大部分也为这种形式。本节也以这种形式为基础，论述球罐的设计。

球罐一般体积、直径较大，不能整体运输，所以必须在制造厂压制球片，加工制造支柱、分瓣接管等部件，然后运到使用现场进行组装焊接。球罐的两种形式为桔瓣式和足球桔瓣混合式。设计者应根据所充装介质的特性、所要求的总的充装量、以及各专业特别是工艺专业及总图布置的要求，确定单台球罐的容积，以此确定球罐的分瓣形式。

球壳板开片时考虑到焊接的要求，故应尽量对称布置。支柱数目应尽量采用偶数，支柱应对称布置，且位于赤道板中心，一般不宜采用支柱与赤道板偏心布置的结构。

球壳板在设计时应根据球壳板的开片的角度计算出各个球壳板几何尺寸。由于球壳板是一个曲面，必须注出弧长和弦长的尺寸，尺寸的注法及允许偏差，GB12337—1998 有详细的规定。球罐设计图中，所应注出的球壳板尺寸及公差如图 2-1 所示。

球壳板应尽量采用大板，以减少现场焊接的工作量，这对保证球罐最终的质量有好处，球壳板的最小宽度应不小于 500mm，球壳上焊缝的边缘距离应大于 3 倍的球壳板的名义厚度，且不得小于 100mm。

二、人孔与接管

球罐一般有物料进、出口接管，人孔，装在最低点处的排污接管，以及各种仪表接管等，其中人孔一般设有 2 个，分别布置在球罐上、下的极极带板中心。

接管管口是应力集中很大的部分，在设计、制造时都必须加以注意，对于压力较低壁厚较薄的球罐，可采用较为经济的补强板式；但由于钢板厚度变化大、应力集中大，其焊接部位只能采用表面探伤检查，内部缺陷很难发现，因此现在一般已很少采用。

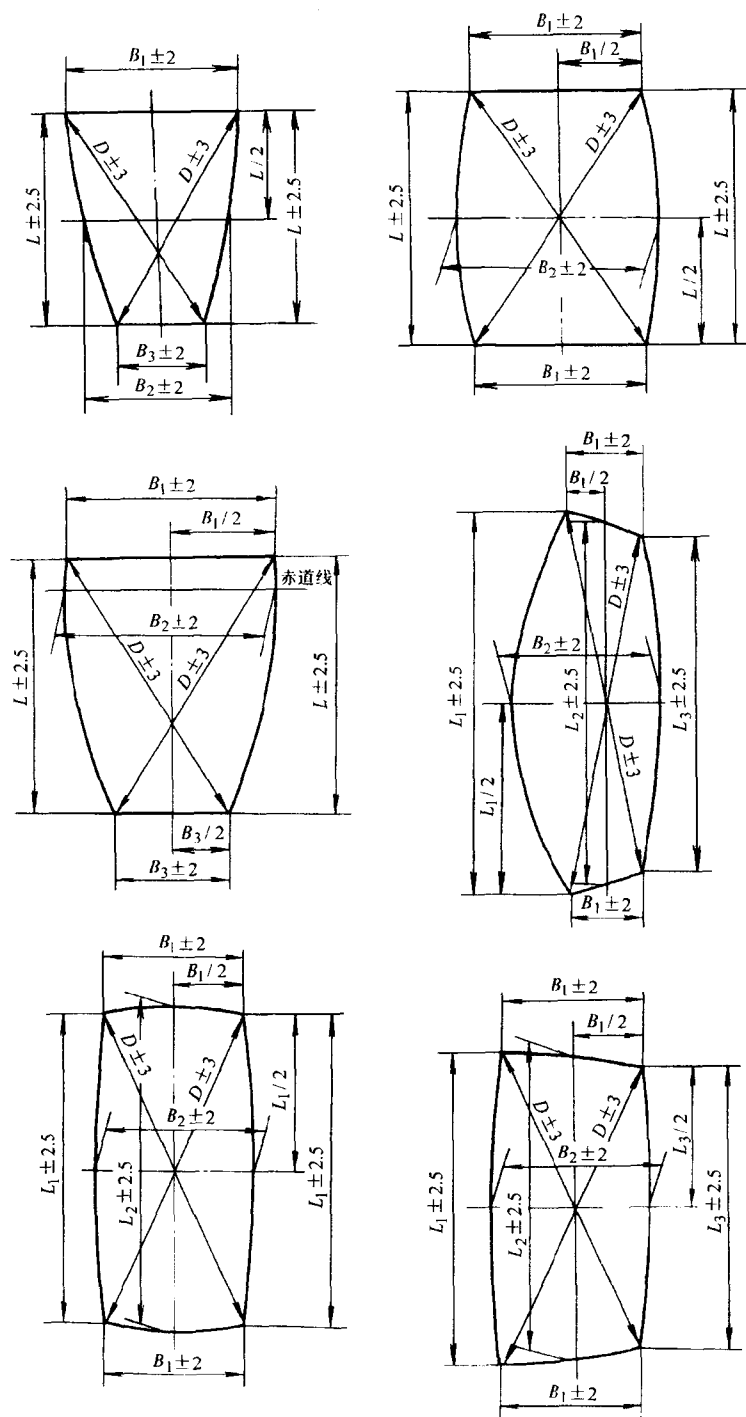


图 2-1 球罐设计图中所应注出的球壳板尺寸及公差

对于压力较高、罐壁较厚或采用强度级别较高的钢材时，为了避免钢板厚度急剧变化所带来的应力分布不均，以及为了焊接部位易于检查，多采用锻件形式，如图 2-2 所示。

对于大型球罐所设口径较大的接管，以及人孔接管，一般采用如图 2-3 的补强方式。

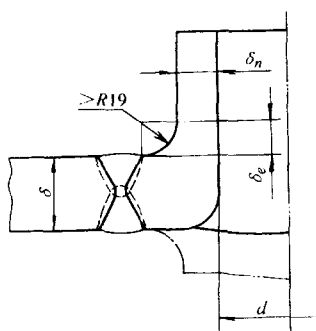


图 2-2 接管锻件焊接部位详图

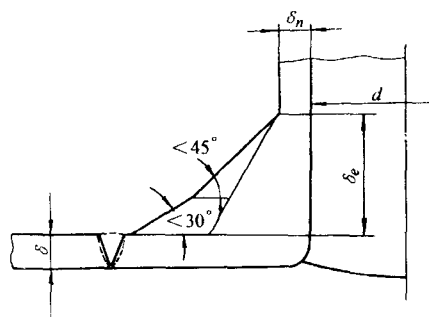


图 2-3 人孔接管的焊接详图

这种锻制人孔式接管的应力分布良好，焊接部位容易检查，是最好的结构形式，这种结构管口可以圆滑过渡，从而减少管内壁拐角处的应力集中和有效地提高抗低循环疲劳的能力。

接管的方向除小口径接管以外，大口径接管和人孔接管均应使它与球壳垂直（即径向）。

三、支承结构

常用的支承结构是赤道正切式支柱支承结构。这种支承结构是由与赤道板连接的支柱、连接支柱的拉杆、支柱底板、地脚螺栓和加强肋等部件组成，支柱主要是用来支承球罐总质量，对于内径较大的球罐，以及用高强钢制成的球罐，支柱一般分为两段或多段制成。其中最上段与球壳板相连的支柱，采用与球壳材料相同的或相近的材料制成，支柱直径较大的也可采用钢板卷制的方法制造，支柱间相连的拉杆，主要为承受地震力及风载荷等的水平力，支柱正切于赤道圈，故赤道圈上的支承力与壳体相切，受力情况较好。这种结构本身也考虑了热膨胀，承载变形的可能性。这种结构便于现场组装、焊接及操作、维修等。

四、梯子、平台

为了便于日常的操作、检修以及安全阀的定期校验，球罐一般设有顶平台及直达顶平台的梯子。

顶平台一般设在球罐顶部是一个圆形平台，平台内圆中应包括人孔及安全阀、放散管以及仪表等，以便于操作。平台的宽度不得低于 800mm。

连接顶平台的梯子一般有两种。对于直径较小的球罐，常采用联合梯，即在球罐之间共用一个斜梯或环形梯子，然后通过平走台或斜梯与罐顶平台相连；对于大型球罐，由于其直径较大，顶平台高度很高，如还采用上述两种梯子，则梯子的用钢量很大，费用也上升较多，因此大部分采用盘梯。

此外，由于球罐相对较高，应在适当的位置设计中间休息平台（梯子及中间休息平台的宽度不应小于 700mm）。对于大型球罐，为了便于内部的检修，缩短检修的周期，在罐的内部设置可以旋转的内梯（见图 2-4）。

内梯一般在上人孔处设置回转轴，在球罐赤道附近的内环上焊出支架以支承一个环赤道的一圆钢轨，在梯子的底部设置支撑轮，梯子旋转的动力是设置在梯子中部的一个电动的驱动轮，电机在检修完毕后取出。

此外，对于液相球，由于要采用就地的玻璃板式的液位计，为了便于操作及对液位计的检修，应设置 90° 的直梯（笼梯），在笼梯的顶部设置走台与顶平台相连。

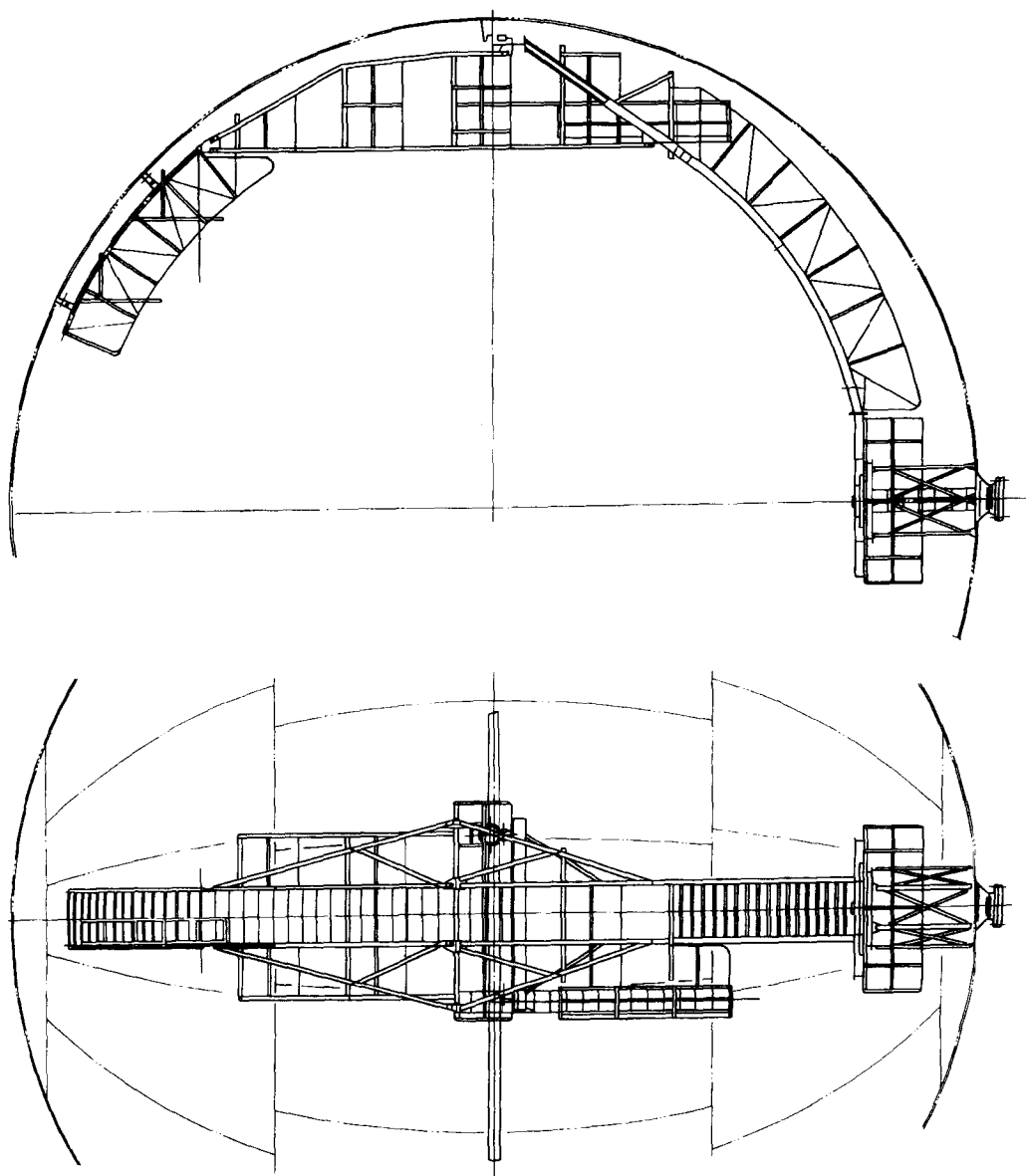


图 2-4 大型球罐内部旋转梯详图

第三节 球罐的设计步骤

球罐设计，首先应接到正式的设计委托书，掌握设计的基础资料，如介质特性、储量及工艺、水文、气象、地质资料等。有了这些基础资料，确定设计参数（如设计压力、设计温度等），进行初步的计算，一般应进行两个以上的方案比较。从技术上、经济上加以分析，从中选出最佳的设计方案，进行初步设计。

在初步设计中，应给出球罐总装图，图中标出设计压力、设计温度、试验压力、试验温度、主要受压元件用材、球罐分瓣形式、球罐壁厚、球罐总重等参数，同时给出接管、梯子

平台、仪表和消防给水方位。

初步设计审查通过之后，就可进行详细的施工图设计，在施工图设计时，除了上述所提的设计基础资料之外，还应确定如下参数。

一、储存能力的确定

$$\text{对于液球：} \quad Q = V\Phi\rho_1 \quad (2-1)$$

$$\text{对于气球：} \quad Q = (P_0 + 0.1)V \quad (2-2)$$

式中 Q ——储气能力 (m^3)；

V ——球罐的内容积 (m^3)；

Φ ——充装系数；

p_0 ——球罐的最高操作压力 (MPa)。

ρ_1 ——饱和液体密度 (t/m^3)

二、设计压力的确定

设计压力指在相应设计温度下用以确定容器壳壁计算厚度及其元件尺寸的压力。

当容器的某些部位或受压元件所承受的液柱静压力达到 5% 的设计压力时，应取设计压力与液柱静压力之和进行计算。

对于液化气体和混合液化石油气的球罐，其设计压力应符合《压力容器安全技术规程》第 25~27 条规定的要求。

一般情况下，球罐的设计压力，应为最高工作压力加上若干余量压力值，这是因为在确定设计压力时，还应考虑如下因素：

- 1) 安全阀的设定压力数值精度及停止排放压力数值精度。
- 2) 压力计指标的数值精度。

三、设计温度的确定

设计温度是指容器在正常工作情况下，设定元件的金属温度（沿元件金属截面的温度平均值）。对于储存液化气体用压力容器，当其基本温度仅由大气环境条件确定时，其最高设计温度应由介质和气温情况而定。其最低设计温度可按该地区历年来月平均最低气温的最低值确定。

大气环境条件下容器内介质温度主要受下列因素影响：

- 1) 阳光曝晒投影面积及最热月平均日辐射强度。
- 2) 容器表面状况及颜色。
- 3) 介质热容量和比热容。
- 4) 容器所处环境因反射而产生的辐射强度。
- 5) 场所最热月，月平均气温、风速。
- 6) 容器全容积及装填量。
- 7) 是否设隔热层等。

对于气相球罐，我国规范没有对其作出规定，这方面日本规范较为详细。规范中考虑了当气体从球罐排出时，气体膨胀温度下降，以及由于要由外部吸收热量，使球壳温度下降等因素。若有实测数据时，则可直接选用，如没有实测数据，日本规范规定：几何容积在 5000m^3 以下时，最低设计温度为日最低气温月平均值减去 4°C ，几何容积超过 5000m^3 时，应为日最低气温月平均值减去 8°C 。

对于液化气体球罐的最低设计温度，应根据液化气体的特性，及该地区日最低气温的月平均值而定。如在最低温度时，液化气体的饱和蒸汽压较低，从而使球罐在该温度下球壳薄膜应力较小。当薄膜应力小于或等于钢材标准常温屈服点的 $1/6$ ，且不大于 50MPa 时如液化石油气球罐，可按常温考虑。

四、主要受压元件用钢的确定

选用球罐钢材时，必须考虑球罐的操作条件（如设计压力、设计温度、介质的特性）、材料的焊接性能、球罐的制造工艺和组装要求、热处理性能等。并在满足上述原则的前提下，考虑经济的合理性问题，此外钢材应符合国家的有关行业标准的规定，我国国家标准 GB6654-1996《压力容器用钢板》中对用于压力容器的钢板尺寸、外形、技术要求、试验方法、检验规则、包装、标志和质量证明书等，均作了详细的规定。此外，我国的球罐设计规范 GB12337-1998《钢制球形储罐》对球罐用材的选择也做了明确规定（如钢板的交货使用状态，钢的冶炼方法等）

五、厚度附加量的确定

钢板的厚度附加量，包括钢板的腐蚀裕量和钢板的厚度负偏差之和。

1. 钢板腐蚀裕量 金属的腐蚀现象是很复杂的，同一种材料在不同的介质中，不同材料在同一种介质中，或同一种材料，同一种介质在不同的内部条件或外部条件下，都会表现出不同的腐蚀规律，腐蚀的过程可分为化学腐蚀和电化学腐蚀。

钢板腐蚀安全量，就是根据钢板在介质中的腐蚀情况，以及设计的使用寿命而确定的一个厚度。各国规范大多依据介质的腐蚀性，给出不同的腐蚀裕量。

2. 钢板厚度负偏差 钢板的厚度负偏差，应按相应的钢板标准选取。当钢板的厚度负偏差小于 0.25mm 或小于名义厚度 0.6% 两者之中的较小值时，负偏差可以取 0 。我国新编制的容器钢板标准中规定，负偏差均不超过 0.25mm 。

六、焊缝系数

焊缝是容器上比较薄弱的环节，较多事故的发生是由于焊缝金属和焊接热影响区的破裂。一般情况下，焊缝金属的强度和基本金属强度相等甚至超过，但由于在焊缝中残余应力的存在，焊缝金属晶粒粗大，以及焊缝中出现气孔和未焊透等缺陷，仍会影响焊缝的强度，因此必须采用焊缝系数，以补偿因焊接而可能产生的强度削弱。

焊缝系数的大小取决于焊缝形式，焊接工艺以及焊缝探伤检验的严格程度等，各国压力容器规范选取焊缝系数的方法各不相同，大致有下列 4 种

- 1) 依据焊接方法和焊缝形式确定焊缝系数，焊缝系数与检查长度无关。
- 2) 按焊缝形式与无损探伤检查长度来确定焊缝系数。
- 3) 仅按焊缝无损检查长度确定焊缝系数。
- 4) 根据钢种、壁厚、焊接形式、焊缝的长度、检验项目、是否进行焊后热处理、以及无损探伤检查长度等选定焊缝系数。

上述 4 种方法中，第 4 种考虑较为全面但过于繁琐，不便于工程应用，第 3 种方法不考虑焊缝形式，不甚合理但相对而定。第 2 种方法既考虑了焊缝形式，也考虑到了无损探伤的长度。

我国规范采用的是第 2 种焊缝系数的取值方法。

七、安全系数的确定

设计压力容器时，首先应确定容器的失效准则，然后按失效准则选择强度理论和计算公式，并确定安全系数，安全系数的选定对容器的安全性、先进性和经济性有着直接的关系。

失效准则实际是一种设计准则，即设计者将容器的应力水平限制在一定的水平上，从而保证容器在准则要求的限度内安全运行。

安全系数与许多因素有关，一般而言，影响安全系数值的因素大致有：

- 1) 材料性能的稳定性可能存在的偏差。
- 2) 估算载荷状态及数值的偏差。
- 3) 计算方法的精确程度。
- 4) 制造工艺及其允许偏差。
- 5) 检验手段及其要求严格程度。
- 6) 使用操作经验。

此外，还有一些尚未被人们认识的因素。

安全系数的确定，就可以得出该种材料的许用应力。

我国球罐标准 GB12337—1998 中规定的安全系数值为 $n_b=3$ ， $n_s=1.6$ 。

第四节 球壳计算

球壳的设计计算有两种方法，即常规设计方法与分析设计方法。我国球罐设计标准 GB12337—1998 是常规设计方法的标准，目前，大部分球罐均按这个标准进行设计、制造、安装。我国分析设计法的标准有 JB4732—94《钢制压力容器应力分析法设计标准》，这是个通用性的标准，目前我国尚无球罐设计专用的分析设计标准，但采用 JB4732—94《钢制压力容器应力分析法设计标准》也能解决大型球罐设计的问题。随着球罐的大型化方向发展，外国已开始采用分析设计法设计球罐，国内对引进的大型球罐也开始利用分析设计法进行复核，如：北京、天津等城市天然气工程所采用的天然气大型球罐，这些球罐是引进国外的产品，由国外设计，我们利用应力分析法对国外的设计进行了复核，从复核结果上看，大型球罐采用分析设计法设计更为科学、经济合理，因此，利用分析设计法设计大型球罐有着广阔的前景。

一、球罐的设计方法

(一) 常规设计方法

常规设计方法是基于弹性失效原则，即认为容器内，某最大应力点一旦进入塑性，丧失了纯弹性状态即为失效。常规设计只考虑单一的“最大载荷”工况，按一次施加的静载荷处理，不考虑交变载荷，不涉及容器的疲劳寿命问题。常规设计一般是以材料力学及板壳薄膜理论的简化公式为基础，再加上一些经验系数，未对容器重要区域的实际应力进行严格而详细的计算。因此，在给出计算公式的同时，又往往对结构尺寸、形状、工作条件等有明确的限制。

(二) 分析设计方法

分析设计方法，就是放弃了传统的“弹性失效”准则，而采用以极限载荷、安定荷载和疲劳寿命为界限的“塑性失效”与“弹性失效”准则，允许结构出现可控制的局部塑性区，允许对峰值应力部位作有限寿命的设计。分析设计方法根据导致结构破坏的危险性不同而对应力进行分类，对各类应力取不同的许用值进行应力评定，取较低的安全系数，但不降低设备

的安全可靠性。采用分析设计法得到采用常规设计方法无法得到的合理的设计结果。搞清了应力分布情况，对症下药，该薄处薄，该厚处厚。采用分析设计一般要比采用常规设计可以节省材料 20%~30%，但分析设计法的设计和加工费用较高。

(三) 常规设计方法与分析设计方法的区别

分析设计与常规设计方法不同，它是以详尽的应力分析报告为依据，需要近代的分析计算工具和实验技术为手段，常规设计法与分析设计法的主要区别详见表 2-1：

表 2-1 常规设计法与分析设计法的主要区别

	常 规 设 计 法	分 析 设 计 法
1. 设计原则	弹性失效 $\sigma_{\max} \leq \sigma_s / n_s = [\sigma]$ 不允许出现塑性变形，一但出现塑性变形，就认为容器已经失效	塑性失效，弹塑性失效 允许出现塑性变形，但必须是局部的，可控制。对于一次加载要计算极限载荷。对于交变载荷，要计算安定载荷如计算出的载荷<极限载荷 F_s ，认为是局部的控制 安定性载荷主要针对疲劳和棘轮现象
2. 载荷	非交变(静载荷)	可以考虑交变载荷(疲劳失效)
3. 分析方法	材料力学方法，薄膜理论 简化公式+经验系数	弹性式塑性力学分析 理论方法(即解析法) 数值方法(即有限方法) 实验方法(即电测法,实测法)
4. 应力评定	应力不分类 许用应力一样 第一强度理论 安全系数较大	应力分类 用应力强度来评定 第三强度理论 安全系数较小
5. 材料	一般要求	优质、延性好、性能稳定 ① 必须是压力容器用钢 ② 钢材应是国标规定并列入 JB4732 的,同时取消推荐材料代用 ③ 钢材使用温度下限为 0℃,如低于 0℃应作缓冲 ④ 扩大超探范围 ⑤ 增加了夏比(V 形缺口)冲击试验(包括对螺栓用材)
6. 制造	全焊透, 100%探伤	塑性性、连续性、相贯性、光滑过渡 全焊透, 100%探伤

(四) 分析设计方法选用的原则

(1) 国际上通常选用分析设计法的原则

- 1) 设计压力约为 20MPa 或更高。
- 2) 容器直径大于 1500mm，且设计压力约为 7MPa 或更高。
- 3) 容器直径、壁厚值较小，或因壁厚较大，而难于制作时。
- 4) 容器的质量约为 18000kg 以上，或同时制造若干相同容器总质量大于该值。
- 5) 容器为多层结构或为较为复杂的结构。
- 6) 容器尺寸较大，而需要在现场建造时。

- 7) 交变载荷。
- 8) 使用条件苛刻的容器, 如装有剧毒介质, 压力冲击。

(2) 我国采用分析设计法的基本原则

- 1) 设计压力大于 10MPa, 且壁厚大于 25mm。
- 2) $p_0 D_i > 10000$, p_0 为设计压力 (MPa), D_i 为球壳内径 (mm)。
- 3) 球罐容积 $> 650\text{m}^3$, 且 $p > 1.6\text{MPa}$ 。
- 4) GB150—1998 《钢制压力容器》难于确定结构尺寸的容器和受压元件。
- 5) 须专门申报, 审批的容器或受压元件。

二、载荷的种类

作用于储罐上的常见的载荷有以下几种:

- 1) 由储存介质的压力产生的应力。
- 2) 由壳体自重和保温层等产生的应力。
- 3) 由于风、雪及地震水平载荷产生的应力。
- 4) 由于内、外温度产生的温差应力。
- 5) 由于局部外载荷产生的应力。

对于一般储存球罐主要为 1)、2)、3)项应力。

三、强度计算

(一) 国内球壳最小壁厚计算公式

我国球罐规范 GB12337—1998《钢制球形储罐》以及 GB150—1998《钢制压力容器》对球形壳体的应力采用薄膜理论, 其强度校核采用第一强度理论, 由上述两个理论得出球壳计算的公式为:

(1) 球壳壁厚计算

$$\delta = \frac{p D_{cp}}{4[\sigma]^t}$$

式中 δ ——球壳实际壁厚;

D_{cp} ——球壳平均直径;

p ——设计压力;

$[\sigma]^t$ ——球壳板的许用应力。

将球壳平均直径转换成球壳内径 即 $D_i = D - \delta$, 并引入焊缝系数及厚度附加量的概念。得出

$$\delta = \frac{p D_i}{4[\sigma]^t \phi - p} + C \quad (2-3)$$

在液相球时, p 应为设计压力, 加上该球壳板最低点处的液柱静压力。

(2) 球壳允许承受内压力

$$p = \frac{4[\sigma]^t \phi (\delta - C)}{D_i (\delta - C)} \quad (2-4)$$

(3) 球壳的应力按下式计算

$$\sigma = \frac{p [D_i + (\delta - C)]}{4(\delta - C) \phi} \quad (2-5)$$

(二) 国外球壳最小壁厚的计算公式

(1) 日本计算公式