

球形容器的装焊与质量控制

(讲义试用本)

国家劳动总局 ~~锅炉压力容器安全~~ 监察局

北京 · 1981

目 录

前言	1
第一章 绪论	2
第一节 球形容器的现状	2
第二节 球形容器的焊接问题	4
第三节 球形容器的质量控制问题	5
第四节 球形容器的发展趋势	7
第二章 球形容器的装焊工艺	8
第一节 球形容器的散装法	9
第二节 球形容器的分带组合法	12
第三节 球形容器的半球组合法	15
第四节 球形容器装焊工艺可能带来的问题	17
第五节 球形容器装焊工艺实例	20
第三章 球形容器的裂纹分析	24
第一节 球形容器的裂纹现状	24
第二节 对球形容器产生裂纹因素的分析	28
第三节 球形容器的裂纹种类	38
第四章 球形容器的质量控制	50
第一节 何谓球形容器的质量控制	50
第二节 球形容器为什么需要考虑质量控制	51
第三节 球形容器质量控制的准则	52
第四节 球形容器产生脆性开裂的种类	53
第五节 对球形容器开罐后存在裂纹的分析	54
第六节 产生在用脆性裂纹的原因	61
第七节 球形容器质量控制	64
第八节 球形容器热处理问题	71

前 言

国家劳动总局举办这期学习班，主要是提高压力容器方面的技术管理水平，为压力容器的安全使用提供技术知识和培训技术力量。

从我们这些同志们的具体工作出发，对于这次学习班的内容，要密切结合实际，解决一些工作中经常碰到的问题。因此对于学习的目的及要求可以有下述几点：

首先是立足于安全。这是我们压力容器学习班的基础。所学习的一切技术措施，工程标准，集中到一句话，压力容器结构必须符合安全的准则，我们考虑使用中的问题，分析技术上的可靠性，也必须从安全角度出发，这就叫做立足于安全。这是我们研究问题的基础。也就是说压力容器结构存在着不安全的一些隐患，这些隐患有可能导致事故的发生，正因为如此，我们必须立足于安全。在我们学习过程中应抓住这一点。

其次是着眼于监督。这是条件，没有这个条件，立足于安全也是一句空话。也就是说，对于运行中的压力容器，必须通过监督，才能保证其安全。换句话说，一个没有被监督的压力容器就不可能有充分的安全使用。因为就压力容器中的裂纹而言，它是不稳定的，只有通过监督才能把握住裂纹发展的动向，才能为安全使用提供科学依据。

最后是加强于管理。这是手段，没有这个手段，着眼于监督也是一句空话。可以设想，没有一个科学的压力容器的管理制度，又如何能对压力容器作到心中有数，这是不可能的事情。因此，只有对压力容器实现科学的技术质量方面的管理，才能发现压力容器存在什么样的问题，进而才能去监督，有了这种科学的监督，才能保证压力容器的安全使用。

可是，这三个方面构成了压力容器质量控制的一个整体，它们是相互制约的，也是相互促进的。为了搞好这三方面的工作，必要的基础知识是必须要掌握的，这就是我们的目的。

第一章 绪 论

第一节 球形容器的现状

随着我国石油化学工业的发展，又基于工业建设的需要，球形容器在我国也得到了迅速地发展，尤其是最近十年以来，发展更为突出。

为了满足我国工业发展的需要，运用国内的钢材，制造了各种规格和不同用途的球形容器，这些容器均已广泛地使用在各个部门。在这些容器中，最大直径达到15700mm，最大壁厚达到48mm，最大球壳重量达到158吨，工作压力范围为4.5~30kg/cm²，使用材料有A₃、20G、16M_nR、16M_nAl、16M_nCu、15M_nV、15M_nVN等。经三部标准审订已将A3R、20G、16M_nR、15M_nVR纳入到“JB741-80”标准中。最近几年，又引进了一些较为大型的球形容器，最大的直径达25.1m，公称容积达8000m³。

从我国自60年代初开始建造球形容器以来，已在石油化工、冶金工业、国防工业、城市煤气等各部门中拥有各种球形容器达1000台左右，对于制造这些球形容器的材质来说，除去上述国产钢板之外，还大量的采用了进口钢板，例如日本的N-TUF50、WEL-TEN62、RIVER ACE60L、SPV50、SM53，西德的EG36、EG43，法国的A52P、Dillinal 52/36M、UN10N、36N_D、CREUSE-LSO 34SS、9%Ni(x8Ni9)等材料。对于这些球形容器，由于采用了多种牌号的钢板，如果在焊接生产球形容器之前，又没有进行完善的工艺评定时，那么不可避免的就会发生质量水平变差的可能性，一旦在使用中产生破裂就可能造成灾难性事故，尤其是各类球罐群，如果在使用中发生爆炸事故，其后果更为严重。

在“国内球形容器事故与裂纹”文献中指出：我国球罐在使用中爆炸、破裂以及在水压时破裂的事故率约为2%左右。至于球罐的焊缝表面均存在着表面缺陷及裂纹更是十分普遍，这些将会成为球罐破

裂、爆炸事故的隐患。”以1979年为例，就发生了三次球罐在使用中的爆炸破裂事故，被破坏球罐达八台之多。可见，球形容器的焊接与质量控制是多么重要，这是制造球形容器整个生产中的关键。

为了确保球罐的安全使用，根据国务院〔1980〕99号文件精神，要求各有关部门开展球形受压容器的检查和修复工作。目前，已经全面地展开了这项工作并取得了一定的效果。

通过对球形容器的开罐检查，确实证明了球形容器存在着大量的裂纹，这些裂纹也正是导致球形容器发生破裂的主要根源。因而对这些缺陷需要进行认真的检查和切实地修复，从而才能保证球形容器的安全使用。

也正是由于开罐检查，提供了我们认识问题的依据，那就是说，这些裂纹是如何产生的，这些裂纹是在什么时候产生的，这些裂纹是什么性质的，产生这些裂纹的原因是什么，焊接工艺因素对产生裂纹具有那些作用，焊接工艺过程对产生裂纹起到了那些影响，焊接生产又对球形容器的质量问题带来什么后果，以及如何去消除这些影响；为此，还要进一步研究球形容器的质量如何取得保证，并分析质量控制的要素，从焊接工艺及焊接接头角度出发，找到质量控制的条件及措施。

总之，在本讲义中，主要是以焊接为基础，以球形容器的质量控制为目标，通过对球形容器的焊接分析、论述，达到工艺评定的准则，进而加以控制，达到球形容器的安全使用，这就是我们分析一切问题的基准点。

虽然我国在制造球型容器方面已有较长的历史，但是目前还缺少专门的规范和具体的规程进行监控，随着球形容器原有质量的不稳定性及缺少必要的检查措施，是造成球形容器事故逐年上升的主要原因。结合我国目前情况，一方面要提高球形容器的制造水平，提高球形容器的焊接质量，这是根本的办法；另一方面要提高球形容器的管理技术，使其达到合理的使用，对于安全使用球型容器是必不可少的条件。

就整个球形容器的现状分析，问题已经受到重视，措施正在加强，手段逐渐完善，质量相应的提高，这就为新制造球形容器打下有利的

基础，为修复旧的球罐创造了条件。

第二节 球形容器的焊接问题

由于球形容器直径大，不能整体运输，因此只能在工厂中压制或球片，加工成支柱以及旋梯等零件，然后运输到现场进行组装焊接。正是基于这种具体条件，使焊接质量受到环境的影响。这些影响因素则导致球形容器在焊接中产生一些技术问题，而这些技术问题往往又是进行工艺评定时所不能完全考虑周到的问题。

随着石油化学工业的发展，球形容器的结构也朝着大型化、厚板化及高强度方面过渡。这些方面的变化也带来了现场施工质量上的技术问题更为复杂化，也就是说表现在焊接生产中的技术要求更高，施焊条件更为严格。

高强度钢的焊接性能较普通低碳钢差，裂纹敏感性高，焊接接头容易产生淬硬组织，产生冷裂纹和延迟裂纹的倾向大；从装焊工艺上容易发生错边及角变形，它会导致接头区的应力集中提高，从而降低了接头区的稳定性，大型球形容器的焊缝长达数百米到千米，现场作业时间又相当长，且施焊条件又极其恶劣，不可避免的对施焊质量的稳定性带来影响。

众所周知，欲达到球形容器具备制造中的高质量水平，焊接技术的高低，焊接工艺的合理性，这些都是关键因素。但是有些影响更是不容忽视的，例如：环境温度、环境湿度、天气情况、风力大小以及季节条件等因素，对焊接质量都存在影响。

这也就充分表明一个球形容器的焊接质量高低，决定于许多的因素。当然，这些因素所起的作用是各不相同的，而我们正是要分析这些因素造成的影响，从而找出质量控制的措施。

从球形容器的焊接问题上分析，有以几个方面值得注意：

- 第一、工艺过程存在着不稳定性；
- 第二、工艺参数存在着波动性；
- 第三、工艺评定存在着完善性；
- 第四、组装就位存在着偏差性；
- 第五、焊接接头区存在着淬硬性；

第六、焊后残余应力具有峰值性；

第七、焊缝中存在着缺陷性；

第八、焊接接头组织中存在着不均匀性；

第九、焊接接头区存在着应力集中性；

第十、焊接热影响区存在着应变时效性。

以上这十个方面就构成了球形容器焊接中的主要问题，这些问题又是相互影响和相互制约的一个整体，最终就必然会反映到球形容器的质量水平这个准绳上来。

谁也不会怀疑焊接技术的先进性，更不会去怀疑焊接工艺的可靠性，因为这已经被生产实践所证明，金属材料的加工制造运用焊接技术具有各方面的优点。但是，就一项具体工程而言，要达到高水平的焊接质量，还需要解决一系列的生产技术问题，才能使得焊接技术得到充分地发挥，否则就会带来许多的问题，这就是我们在上面所谈到十个方面的问题。因此在本讲义中，其重点之一就是从事形容器的安全使用角度出发来分析焊接质量问题、讨论生产技术中的问题以及如何制定相应的措施，这些就是我们考虑球形容器焊接中的关键，也是论述的重点。

第三节 球形容器的质量控制问题

所谓球形容器的质量控制是指影响球形容器质量的参量与产生脆性破坏的因素综合考虑的结果，对于这种结果的运用就是质量控制。

在这里应该明确，什么是影响球形容器质量的参量，它是指：

第一·在结构设计方面：

(1) 球形容器结构的可靠性；

(2) 焊接设计的合理性；

(3) 应力集中水平的峰值性；

第二·在选择材质方面：

(1) 材质的稳定性；

(2) 材质的抗开裂性；

(3) 焊接接头的断裂韧性;

第三、在制造工艺方面:

(1) 工艺评定的完善性;

(2) 装焊工艺的科学性;

(3) 保证工艺措施的准确性。

以上这三个方面是影响球形容器的主要参量, 当这些参量能够得到控制时, 就是保证了球形容器结构本体的质量要求。但是, 这还不能说球形容器的质量就完全得到了控制, 因为还存在着脆性破坏的因素。这里也应该明确, 什么是产生脆性破坏的因素, 它是指:

第一、球形容器内表面层的脆化, 特别是焊接接头区的脆化;

第二、焊接接头区不可避免的存在焊接缺陷, 特别是裂纹缺陷;

第三、在一定的介质条件下存在着应力腐蚀, 特别是应力腐蚀裂纹的出现;

第四、焊态的球形容器在焊接接头区残留着很高的内应力, 特别是峰值应力;

第五、温度效应的影响, 特别是当焊接接头区存在着脆性的组织状态时尤为突出。

以上五项因素都是导致产生脆性破坏的条件, 这些因素在球形容器的质量控制中是不能轻视的。

基于上述分析, 可以清楚地看到, 球形容器的质量控制必须综合这两个方面, 同时还应考虑使用条件才能达到安全使用的效果。

当我们已经了解到什么是球形容器的质量控制的实质之后, 那么我们就可以问一问, 为什么球形容器需要考虑质量控制, 不考虑行不行? 我们说必须要考虑质量控制, 其理由有以下几点:

第一、由于材质存在着不均匀性及不连续性, 会造成材质的抗开裂性能下降;

第二、焊接缺陷是无法完全避免的, 其严重性一般超过钢板。特别是焊接裂纹的产生, 对于焊接接头的安全使用影响更大;

第三、球形容器在使用中裂纹在不断地产生和不断地扩展, 就使得球形容器存在着破裂的危险, 从而影响到安全使用。

上述三方面的理由是从三个不同的角度上（原材料质量、制造工艺及使用条件）说明球形容容器结构中存在裂纹的观点。也正是由于裂纹的存在，才造成球形容容器质量控制中最大的问题，这个问题如果得不到妥善解决，那么也就无法谈球型容器的安全使用问题，而焊接因素在这些问题上是极其重要的，不容忽视。

第四节 球形容容器的发展趋势

由于球形容容器具有节省材料、重量轻、造价低等优点，因此得到了较快的发展。随着石油化学工业的发展，可以肯定球形容容器的发展趋势将更加迅速。但也应该指出，随着球形容容器的大型化，无论是在设计上还是在装配焊接上，都会出现许多的技术问题。

从我国球形容容器制造与使用的过程来看，可以分为三个阶段：

第一阶段：1958年～1972年为初建阶段；

第二阶段：1972年～1979年为发展阶段；

第三阶段：1979年以后为质量控制阶段。

根据1980年国家劳动总局锅炉压力容器安全监察局的初步统计，全国25省市已建成运行的球罐总数为930台（容积在 50m^3 以上的计入）。

据不完全估计，全国在用球形容容器总数为1000台左右。其中：化工系统有289台，城建系统有219台，石油工业系统有178台，冶金工业系统有100台，纺织工业系统有70台，一机系统有100台左右，其它系统有100台左右。

从球形容容器的容量上看，有小有大，最大容量为 8250m^3 ；从材质上看，有一般的碳素钢，也有普通低合金结构钢。还有高强度钢。由于这些具体情况的存在，就使得球形容容器的规格品种多样化，当然反映出的问题也就各有不同。

不过就我国的球形容容器发展趋势来分析，综合各方面的条件，应该走那条路呢？也就是说，是建大型化、高强度、厚度化的道路呢？还是走中型化、中强化、中板化的道路呢？这取决于许多的条件，也决定于许多的基础，不是想怎样发展就可以去发展。

要具备必要的条件才行。例如：高强度钢性能的稳定性、可焊性、断裂韧性；超低氢焊条的供应条件、焊条性能的稳定性；大型球罐施工的可能性、现场作业的稳定性等等，都对球形容器的质量起到重要的影响。所以，根据上述条件，在我国球形容器的质量上不宜走大型化、高强化的道路，宜走中型化（ 1000m^3 以下的容量，包括 1000m^3 ）、中强化的道路，这就叫做从实际出发。

国外球形容器的经验可以参考，但是不宜完全照搬，这也是我们总结了过去的教训才得到的。从国外球形容器的质量发展史上看，远在1910年美国就开始制造了球形容器，而西德在1930年也制造了第一台球形容器，不过这些球形容器当时均为铆接结构。直到1950年西德才利用焊接技术完成了球形容器的加工制造，因为这时已经具有适合焊接的钢材。

球形容器的初步发展，还是本世纪五十年代的事情。日本正式制造球形容器，是从1955年开始。苏联在1951年用自动焊工艺开始了球形容器的生产，自动化程度达到60%。

球形容器的进一步发展，要追溯到六十年代直到现在。在该期间，日本的球形容器发展最为突出。据日本机械统计月报，从1965年到1970年期间，日本生产的化工装置用球形容器就达4135台之多。

我国球形容器的制造，开始于六十年代初，直到现在已经具有制造容量为 8000m^3 的生产实践经验。虽然制造球罐历史较短，但发展较快。

第二章 球形容器的装焊工艺

球形容器的现场组装与焊接，是球形容器制造工艺中的关键工序，组装与焊接质量的好坏，直接影响到球形容器的质量水平。尤其是近年来，随着石油化学工业的发展，球形容器也在向大型化、高强度方面发展，对于装焊质量的要求更加严格。

现场组装与焊接球形容器主要是生产周期长，施焊条件差以及焊

接质量控制比较困难。

针对这些问题在生产中有各种不同的装焊工艺以解决某些方面的实际困难，就球形容器制造中的装焊工艺有以下几种：

第一节 球形容器的散装法

一、直接散装法

直接散装法就是直接在球形容器的基础上，将单块球片一块一块的组装成球形容器，然后再进行焊接。

二、拼块散装法

这样方法与直接散装法有所不同，就是将单块球片先在基础上之外的现场，预先拼焊成较大的球片板（通常为三块或四块，视现场起重设备能力而定），最后在基础上以拼成的大块球片进行散装成为球形容器。

以拼块散法为例，分析其装焊工艺过程，具体结构示意图见图 2-1

球形容器直径为 9.2m ；

壁厚为 40mm ；

材质为 16MnR ；

焊接接头为偏 X 型坡口，大口朝外。

(图见下页)

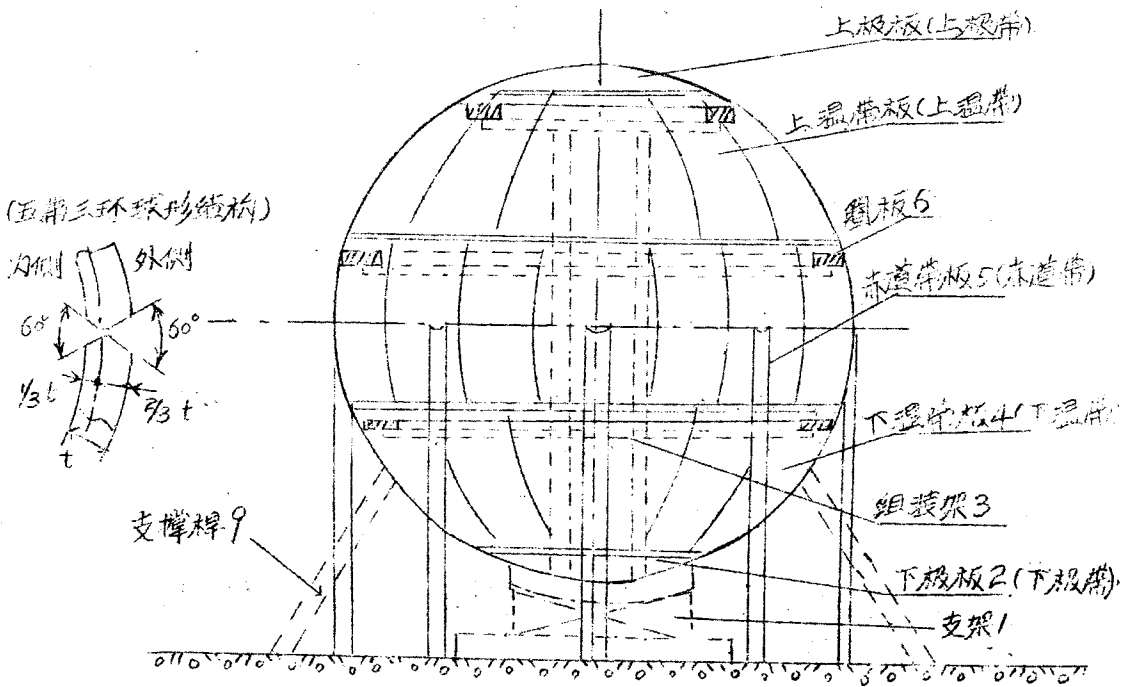


图 2-1 散装法的装焊工艺

装焊工艺过程:

- 1、预组装——按各分带接口找好圆周尺寸;
- 2、各分带(温带、赤道带)相邻球片在平台上或平地上以手弧焊或自动焊拼焊成大球片板;
- 3、在基础上立支架;
- 4、将内外焊缝焊完的下极板2装在支架1上,找正下极板位置并以此为基准;
- 5、在下极板2上逐块组装下温带球片并用支撑杆9将其固定;
- 6、逐条焊接下温带的纵缝——先由四名或六名焊工同时进行对称焊,焊接纵缝的外侧(半仰焊位置)然后从内部清根(碳弧气刨),再焊接下温带板2的纵缝内侧;

7、利用组装架3散装赤道带板5，定位尺寸可以利用组装架5上的圆板6（注：圆板6是由普通低碳钢板焊制而成的整圆形圆板，其直径由它在球罐中的所在位置而定）；

8、焊接赤道带板的纵缝（先焊外侧，从内部清根，然后再焊纵缝的内侧）；

9、组装上温带并焊接（焊接工艺同前）；

10、用对称及分段退焊法（逐步退焊法）焊接下极板与下温带板之间的环焊缝外侧（横焊），用碳弧气刨从内侧清根，然后焊接下极板与下温带板环焊缝的内侧；

11、焊接下温带板与赤道带板之间的环焊缝（先焊外侧，从内部清根，再焊内侧）；

12、焊接赤道带板与上温带板之间的环焊缝（焊接工艺同前）；

13、组装上极板（此时上极板本身的内外焊缝均已焊完），并找正与上温带板之间的位置；

14、焊接上极板与上温带板之间的环焊缝，先从内侧焊接，然后从外部清根（用此时已组焊成球体，从内部清根条件恶劣），再焊接环焊缝的外侧（为平焊位置，条件较好）；

15、组装与焊接球罐的根立柱（可在整个球罐焊好后进行，也可在赤道带与下温带环焊缝焊完之后进行），焊完立柱（立柱为低碳钢材质）取走支架1及组装架3，整个球罐的装焊工艺即告结束。

以上的装焊工艺过程在国内制造球形容器的工艺中经常采用，与国外介绍的工艺过程大同小异。在国外如英国、日本等国都是从立柱开始安装，这是由于他们都是在事先已将立柱在制造厂内焊在球罐的赤道带的球片上，并进行了该部件的焊后热处理以消除内应力，如果在现场焊接立柱则热处理难于实现，故这些国家从立柱安装开始，并以立柱基础为基准，装焊极板与带板。

三、散装法的优缺点

1、优点

(1) 不需大型起重设备

(2) 不用转胎及抱杆等大型工具设施；

(8) 准备工作量较小。

2、缺点

(1) 体力劳动量大；

(2) 施工周期长；

(3) 高空作业多、仰焊位置多、施焊条件差。

第二节 球形容器的分带组装法

一、分带组装法的工艺过程

就是将上极带板、下极带板、赤道带板、上温带板及下温带板等五个带板分别组对和焊接成五个带，然后装配各个带成为一个整体球的方法。

1、先组装下温带板，然后再装下极带板，翻转 180° 就位，测量下温带板周长尺寸为 L_1 ，并以 L_1 作基本周长，见图2-2所示。

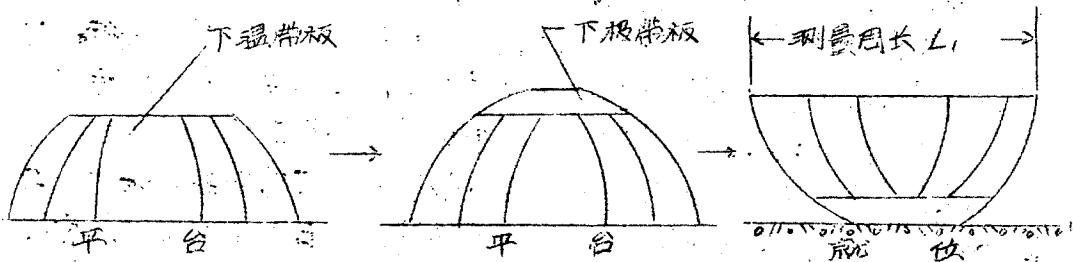


图2-2 下温带板组装示意图

2、组装赤道带板，下口以 L_1 为基准，测出赤道带板上口周长为 L_2 ，使 L_1 与 L_2 差值小于 10mm ，见图2-3所示。这样就是赤道带板的下口周长与下温带板的周长一致，从而保证了装配尺寸，同时又控制了 L_1 与 L_2 偏差值。

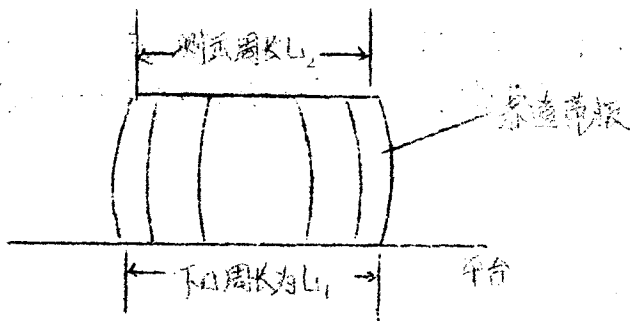


图 2-3 赤道带板组装示意图

3、组装上温带板，以 L_2 周长值为依据，然后再组装上极板，见图 2-4 所示。

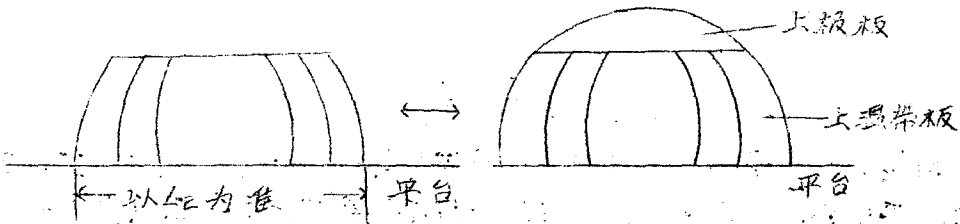


图 2-4 上温带板与上极板组装示意图

由于每个环带的球片数量一样，故纵焊缝的数量一样，因而由于焊接造成的横向收缩应基本一样。

4、各环带板经组装之后，控制规定的周长尺寸，然后各环带可分别进行焊接，焊接时可将仰焊位置变为爬坡焊位置，例如对上下温带板的纵缝就是如此，通过吊装翻转即可。

为了控制角变形，要求设计成偏 \times 型坡口，如大口朝外，则先焊外侧，由内侧清根，然后焊里侧，故可达到内外侧焊缝截面一致（因从内部清根使深度加大，从而调整了偏 \times 型坡口，达到均 \times 型坡口的结果）；如果大口朝里，则先焊里侧，从外部清根，然后再焊外侧纵

缝。

5、各环带焊好后，再行测量各环带的周长尺寸，然后加以修整达到控制尺寸之后，即可进行环带整体组装，如图2-5所示。

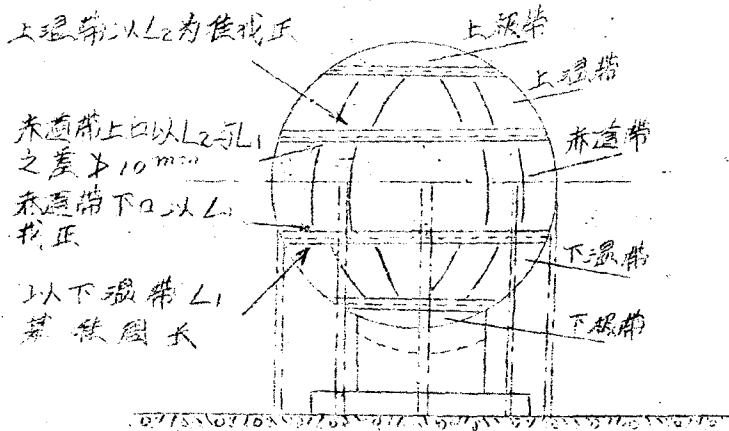


图2-5 环带组装示意图

焊接时，由于环缝大口朝外，故应先焊外侧环缝，八名焊工同时焊接，采用分段退焊法。但封口环缝应采取先里后外，即从外侧清根劳动条件好些。

应指出，如果各分带焊好之焊相邻周长尺寸超过控制偏差（15~18mm），则此时应进行调整。所谓调整是指赤道带经气切割后其周长尺寸变大，而上下温带则经气切割后其周长尺寸变小。这就是调整的补足办法，那个口偏差大可用气切割调整即可。

为保证球罐的焊接质量，应进行如下检验：

- (1) 焊完外侧焊缝（纵缝、环缝），从内侧清根（电弧气刨），砂轮打磨光滑，然后进行100%着色检验；
- (2) 焊完里侧焊缝（纵缝、环缝），将焊缝及近缝两侧打磨光亮，然后进行100%的磁粉探伤，同时进行100%的超声波探伤；
- (3) 对丁字焊缝位置进行100%的X射线检验；
- (4) 对角焊缝区域应进行100%的磁粉探伤；

(5) 水压试验之后，进行20%的磁粉探伤，返修部位进行100%的超声波探伤。

通过上述检验，球罐的制造中的质量能够得到保证。

二、分带组装法的优缺点

1、分带组装法的优点：

- (1) 各带分别组装焊接，故变容易控制，焊接内应力小；
- (2) 温带板与极板之间的环缝可在平台上施焊，减少了空间作业；
- (3) 能使纵缝处于平焊位置，有利于焊缝质量控制；
- (4) 分带组装施焊，有利于施工，使生产周期缩短。

2、分带组装法的缺点：

- (1) 要求较大的起重设备；
- (2) 组装支架的材料消耗量较大；
- (3) 周长尺寸控制较困难，特别是横向收缩的不均匀性影响较大；
- (4) 作业面积要求大。

第三节 球形容器的半球组装法

一、半球组装法的工艺过程

半球组装法实质上就是将球片组装成两个半球，然后在基础上将两个半球合成为整球。具体的工艺过程：

1、组装半球的赤道带板，控制好尺寸，焊外侧纵焊缝，内部清根，然后再焊内侧纵焊缝；

2、组装并焊接下极板与赤道带板之间的环焊缝（极板本身的焊缝均已焊完），先焊外侧环焊缝，然后翻转，吊运到基础中心的支架上，找正，从内部清根，最后焊接内侧环焊缝；

3、在平台上组装另一个半环的赤道带板，焊接，然后再组装上极板，留下环缝外侧未焊；

4、将上半球吊装到下半球上，找正并定位组装妥当后，再焊