

压力容器 焊接与质量控制

天津大学 张金昌

天津市轻工业设计院印 一九八四年六月

前 言

《压力容器焊接与质量控制》讲义是根据作者在轻工业部举办的“压力容器学习班”上讲课笔记与录音整理而成的。

讲义整理的初稿是由天津市轻工业设计院张荃、王树芳、凌定英、许筱明、李鸿钧整理编写的，然后由作者进行补充、修改与编写，最后经审查再修改，编写成这本讲义。

由于作者水平所限，讲义中难免有不妥之处，望同志们提出批评指正。

编者

1984年6月

目 录

前 言		
第一章	绪 论	1
第二章	焊接工艺对压力容器制造质量的影响	3
	1. 必然缺陷的产生	3
	2. 可控缺陷的埋藏	8
	3. 焊接接头微区的脆化	9
	4. 压力容器的事故与焊接接头的关系	10
第三章	装焊工艺失控对压力容器结构质量的影响	12
	1. 焊接接头几何尺寸的影响	12
	2. 缺口效应的影响	30
	3. 焊接接头区组织的变化	34
	4. 焊接接头区硬度的变化	42
	5. 焊接接头区冲击韧性的变化	43
第四章	压力容器的焊接质量控制	46
	1. 焊接质量控制内容	46
	2. 焊接质量控制手段	46
	3. 质量控制水平	69
	4. 质量控制标准	70
第五章	压力容器用钢的焊接	71
	1. 合金结构钢的焊接	71

2. 低碳调质钢的焊接	1 0 5
3. 珠光体耐热钢的焊接	1 2 3
4. 不锈钢及耐热钢的焊接	1 3 4
5. 马氏体类钢的焊接	1 8 3
6. 异种钢焊接时的主要问题及其工艺特点	1 8 6
第六章 压力容器焊接构件的检验与质量评定	1 9 6
1. 检验内容	1 9 6
2. 程序	1 9 6
3. 方法	1 9 7
4. 检验原则	1 9 7
5. 水压试验和焊接接头区的塑性变形	1 9 7
6. 压力容器焊接构件的探伤标准与评定	1 9 7
7. 评定的准则与特点	2 0 0

第一章 绪 论

1. 从事压力容器的工程设计和安技管理人员为什么需要了解焊接学科领域中的知识? 理由有以下三个方面:

(1) 在压力容器结构设计当中, 焊接接头在压力容器整个结构中是做为一个最薄弱的环节而存在, 因此, 要想把压力容器设计好, 必须要处理好焊接接头这个薄弱环节。从安技管理上分析, 焊接接头也是一个薄弱环节。

(2) 焊接接头在压力容器结构中很多情况下是处于不连续部位, 这就对焊接接头的受力状态在工程上提出了比结构本体更加苛刻的要求。基于这一点, 在压力容器结构的工程设计中就更加突出了对焊接接头设计的合理性与可靠性的考虑。从安技管理上分析, 焊接接头区也是最容易发生问题的部位。

(3) 焊接工艺做为压力容器制造手段来说, 它对制造质量的影响是关键性的因素。从生产实践中可看出压力容器所产生的事故往往都是和焊接接头质量好坏密切相关的。因此对影响压力容器制造的质量这样一个关键性因素从设计角度上如何更全面地考虑结构设计、选材、接头布置和坡口型式等等, 所有这些都是和设计人员的设计思路 and 知识储备密切相关的。做为设计人员要想把压力容器设计得非常合理与可靠、持久与耐用, 必须处理好焊接领域里这些具体内容。同样, 从安全管理上分析, 了解焊接质量的好坏对压力容器安全使用的影响, 也是相当重要的一个方面。这就是学习这一课的基础和立足点。

2. 通过什么途径学习焊接学科领域中的内容:

(1) 金属材料焊接学: 它是研究金属材料焊接性能的学科, 通过

这方面知识的学习以便获得金属材料焊接性能和抗裂性能方面的基础知识。

(2)焊接力学：它是指在一定的结构和焊接接头的条件下，在焊接过程中和焊后所产生的力学行为，它直接影响到接头的抗裂性能。概括有三个方面：

①热应力：焊接工艺是属于热加工的范畴，必然会产生热应力。焊后残余应力的存在就是热应力的直接反映。

②拘束应力：材料在一定的厚度和具体接头形式条件下，由于拘束效应所引起的力学行为。这个力也是很可观的，它的应力值往往接近材料的屈服限。

③组织转变应力：这是一种微观的应力，但在金属组织的微区范围内则可以达到相当高的应力值。

统观以上三方面力学行为均属于焊接力学范畴。这个因素如果考虑不当也会直接影响压力容器结构的制造质量与安全使用性能。

(3)断裂力学：它是研究焊接接头在焊接过程中一旦产生裂纹以后焊接接头材质对于裂纹扩展的抵抗能力的一门学科。也就是说它是研究材料的裂断韧性方面的学科。对于焊接接头，严格地说不产生任何缺陷的焊接接头是没有的。在当前焊接技术条件下也是不容易作到的事情。

如果说焊接接头没有缺陷，这是相对于目前检验手段而言的。目前检验的手段总是有一定的精度和灵敏度，对微小的焊接缺陷，微小的裂纹则是难以发现的。因此在所设计的压力容器结构中如果焊接接头区一旦发生裂纹，就要研究接头区的材质抵抗裂纹扩展的能力。抵抗能力越强，就越说明材质的断裂韧性越好，这样就可以

计算压力容器的使用期限与安全性。

在压力容器结构设计当中，通常是把材料作为均质状态处理的，并以此为依据来选取材料的许用应力和安全系数。而焊接接头的实际情况则不然，就需要考虑一个非均质的焊接微区。人们在工程上如果把它认为是一个均质的材料，那只是一个认识上的问题。

3.从压力容器结构设计角度应探讨什么内容：

(1)通过学习金属材料焊接学的知识——就压力容器设计而言，应学会选材，了解材质的焊接性能，了解材质的使用条件、材质的适应范围和热处理性能等方面的内容。

(2)通过学习焊接力学的知识了解压力容器的结构形式、接头的布置、焊缝的分布、坡口型式和间隙大小等内容所诱发的力学性能。这些内容又都影响着压力容器整体结构的质量水平。

(3)通过学习断裂力学了解焊缝产生裂纹之后，压力容器结构的安全裕度如何，进而确定结构的检查期限。从立足于均质材料的压力容器结构的设计到获得非均质焊接接头的压力容器结构的使用，这就需要充分考虑焊接接头的断裂韧性，以便确定压力容器的安全性和使用寿命等问题。

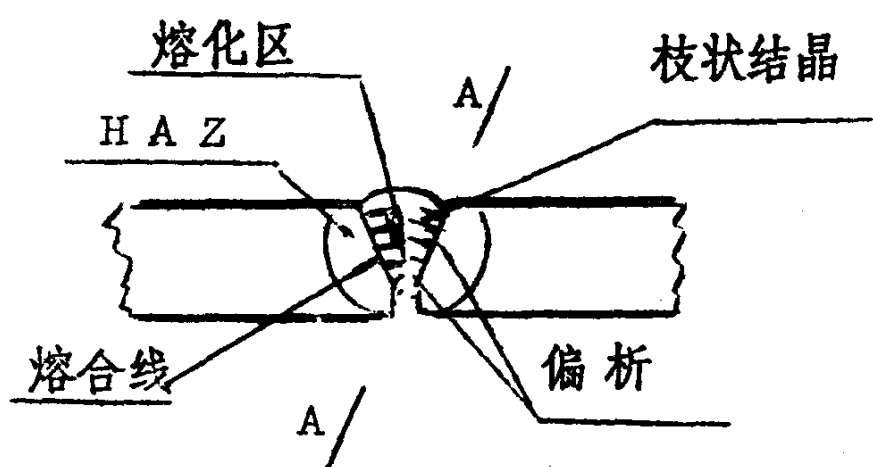
第二章 焊接工艺对压力容器制造质量的影响

焊接工艺作为压力容器制造方法来说具有很多的先进性，如工作效率高、产品质量可靠、生产周期短、适合于任意结构形状的加工等等。但仍不可忽视它那不利的因素。这主要表现在以下几个方面：

1.必然缺陷的产生：所谓焊接缺陷，是由于焊接工艺本身特点的影响，就焊接范畴而言，凡是可以使焊接接头性能变坏的因素就

是焊接缺陷。从焊接本质上分析存在着使焊接接头性能变坏的因素。即使是本质，就无法完全消除，只能适当控制，即限制其缺陷数量的多少和范围的大小而已。必然缺陷有以下几方面：

(1) 焊缝的柱状结晶：凡是熔化焊接，就有柱状结晶和树枝状结晶。枝状结晶的性能很差，最突出反映是冲击韧性值下降。冲击韧性值下降，实际上反映出焊缝区脆性的提高，即焊缝本身的抗裂性能变差。图 1——1 表示枝状结晶生长方向，枝状结晶是垂直于散热面 A—A 生长的晶粒粗大。



(2) 偏析：焊缝是非均质的，其表现是多样化的，偏析的存在就是非均质的一个表现。偏析从

图 1——1

微观上讲它是化学成份的不均匀性。焊缝在结晶过程当中，就伴随着偏析的发生，使得焊缝区化学成份产生不均匀性。例如：

低碳钢含碳量（平均值） $C = 0.19\%$

含锰量（平均值） $Mn = 0.50\%$ 。

偏析后含锰量（平均值）：枝状结晶 $Mn = 0.59\%$ ；

晶界之间 $Mn = 0.57\%$ ；

偏析的结果造成微区强化，硬度提高，韧性下降。按结晶定律是先结晶的结晶纯，后结晶的结晶不纯，杂质多。从冶金学的化学动力学角度上分析是符合冶金化学反应规律的。

(3)夹杂的发生：从微观上分析这些后结晶的夹杂物有氧化硅(SiO)、氧化锰(MnO)、氧化铝(Al_2O_3)等物质共同组成了复合化合物，在焊接过程中它是以硅酸盐的形式存在于焊缝的结晶中间，一般叫做夹杂。它对焊缝微区同样起到了一个强化的作用，使冲击韧性下降，而且还提高了材料的脆性转变温度。

(4)热影响区(HAZ为Heat Affected Zone的英文缩写)：热影响区在压力容器结构中表现最突出，影响最大。低碳钢对HAZ不很敏感，但一介入低合金高强钢和低合金结构钢，“HAZ”就成了主要矛盾。如图1—2所示，表明母材对焊接热影响区的敏感性。

①熔合线或熔合区；

②过热区；

③正火区(不易淬火材料)；

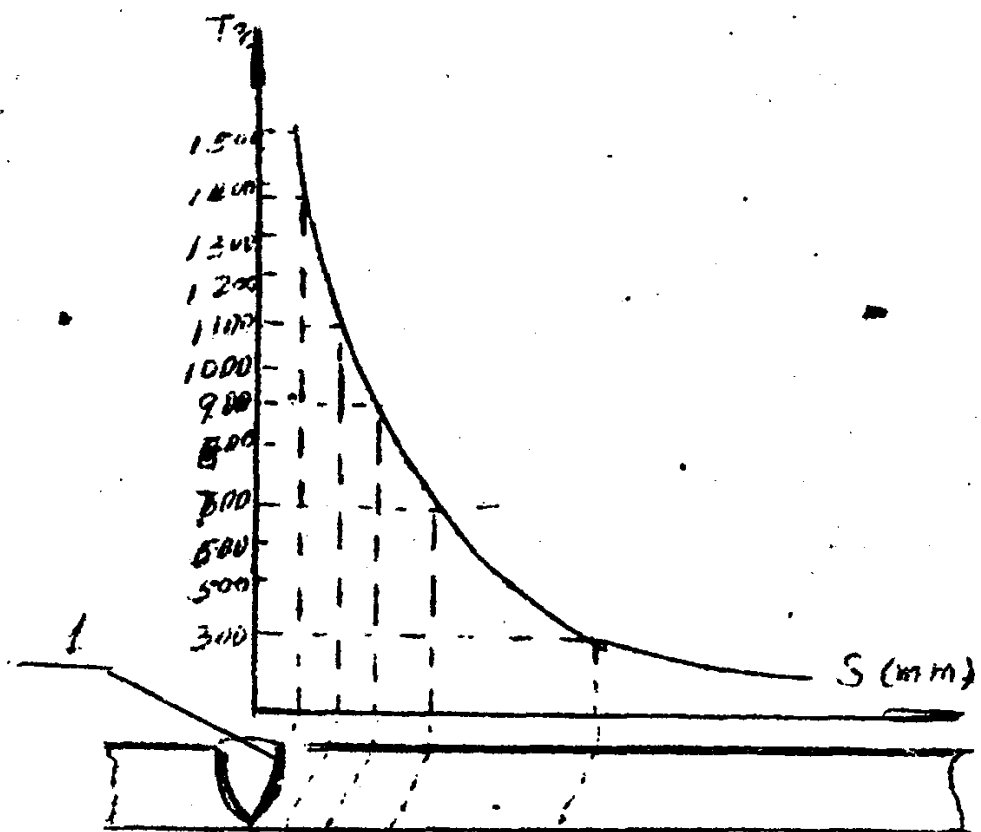
④不完全重结晶区；

⑤母材；

⑥淬火区；

⑦部分淬火区；

⑧回火软化区。



低碳钢	2	3	4	5
16Mn钢	2	3	4	5
易淬钢	2	6	7	5
易淬钢(16)	6	7	8	5

图1—2 焊接热影响区分布特征

对于不易淬火的钢像 $16Mn$ 、 $15MnV$ 、 $15MnVR$ 、 $16MnR$ 等，构成以上的 2、3、4 区为热影响区；对于容易淬火的钢（正火板或退火板）就有：2、6、7 等 4 个区。过热区从金属学角度讲是晶粒粗大区，一般属于粗晶范畴，奥氏体在过热条件下，急剧增长，晶粒长大，冷却下来后转变成铁素体，残余奥氏体转变成珠光体。一般可以达到 3 级、4 级、4·5 级、5 级。总之，属于粗晶范围，使这个区域的冲击韧性值显著下降。这是一个特点。再一个特点是熔合区冲击韧性值也下降所以就构成了压力容器结构设计当中的薄弱环节——焊接接头。而焊接接头又有它的特色，就熔合区讲，不但冲击韧性降低，而它的硬度值急剧升高。这样对均质材料来讲从焊接学角度上看就进入到非均质状态，这就是说焊接接头的缺陷必定要发生，这也是和它的一定的焊接方法密切相关的。调质材料焊接接头区还有回火软化区，该区在正常工作条件其强度会降低。但就结构的拘束条件来说，拘束度越大在焊接中焊接接头区越容易发生开裂；但从压力容器整体结构来说，拘束度越大又给焊接压力容器接头的软化区带来优点即起到强化作用。

这个热影响区的尺寸大小也各不相同，见表 1—1，从以上分析得出，焊接接头本身是个非均质的材质。压力容器结构在那个区域发生开裂，主要决定那个微区的材质脆化程度。

焊接接头区是个非均质的单元，容易出现微区脆化倾向。众所周知，焊接接头区的脆化是产生裂纹的基础，而裂纹又是发展成断裂的必然途径，这就是工程上所说的脆、裂、断三者之间内在联系的含义。

国外的高压容器设备，对在役设备运行达到一定年限以后要求

进行热处理，其目的是消除在役设备焊接接头区在运行当中所发生的表层脆化倾向，以便提高设备材质的韧性，达到安全运行的目的。

表 1—1 不同焊接方法热影响区的平均尺寸

焊接方法	各区平均尺寸 (mm)			总宽度 (mm)
	过热区	相变重结晶区	不完全重结晶区	
手工电弧焊	2.2~3.0	1.5~2.5	2.2~3.0	6.0~8.5
埋弧自动焊	0.8~1.2	0.8~1.7	0.7~1.0	2.3~4.0
电渣焊	18~20	5.0~7.0	2.0~3.0	25~30

(5)高残余内应力：高残余内应力也是必然缺陷的范畴。焊接过程中，必然要出现高残余内应力。国外分为两派，国内也逐渐出现两种观点：一种观点认为高残余内应力的存在对压力容器产生脆性开裂可以起到关键因素的作用。对低应力破坏来讲，除缺口效应、温度影响两个参数之外，就是高残余内应力，因为它可以达到材料的屈服限。所以分析低应力破坏时往往把它看成是主要因素之一。但也有一种观点认为高残余应力不是主要因素，关键因素是材质的脆化程度。作为高残余内应力来讲也是一种必然缺陷，焊接完成之后就会发生。残余应力分布见图 1—3。纵向残余应力

A 为纵向残余应力的峰值， $\sigma_{RA} \approx \sigma_s$

B 为横向残余应力的峰值， $\sigma_{RB} \approx \frac{1}{2} \sigma_s$

纵向残余应力平行焊缝方向。

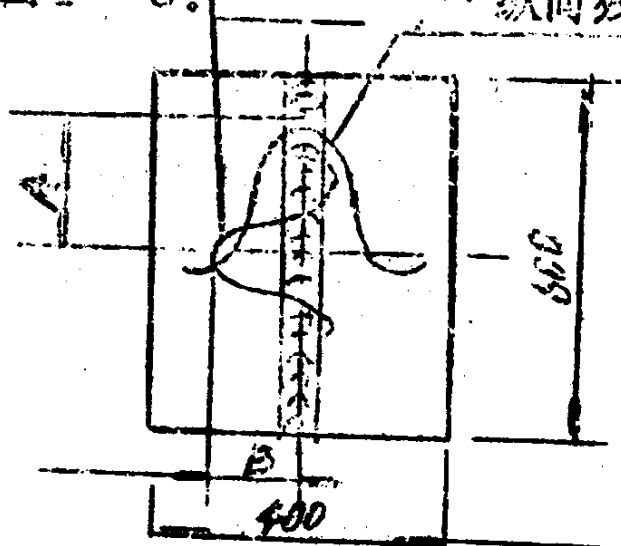


图 1—3 焊接残余应力分布

一个压力容器的结构必然具有一定的尺寸及一定的厚度，焊接后必然具有一定的残余应力峰值。这个残余应力峰值和膜应力值叠加一起在微区可以达到并超过材质的屈服限。这个微区的屈服变形如果再考虑焊缝本身微区脆化，这就要看它屈服所要求提供的塑性贮备，如果能提供足够的塑性贮备在微区就不发生开裂；反之，塑性贮备不够就发生开裂。

综上所述五点，只要焊接就有粗晶、偏析、夹杂，热影响区和高残余应力。这些缺陷不能消除只能控制其大小而已。所以在压力容器结构设计当中，必须考虑好焊接接头这个因素，例如它适用于什么条件、温度高低、耐腐蚀与否等等，这些参数又都直接影响到接头工作的可靠性。

2 可控缺陷的埋藏：可控缺陷区别于必然缺陷，就在于可以控制它的发生与否。对焊接接头来讲，从微观上分析没有一点缺陷的焊缝是不可能的。从金相分析上讲，作为一个焊接接头通过X射线检查、超声波检查和磁粉探伤都没有发现缺陷，但如果将其制成金相试片在金相显微镜下分析还是有微观缺陷存在。所以有没有缺陷只是相对一定手段而言。问题在于这种缺陷危害的大小，在工程上所采用的检查手段都有其灵敏度范围，比如X射线探伤灵敏度一般在2%左右，由于灵敏度不够高，微小的缺陷在底片上显示不出，便以合法的身份存在于焊缝里面。超声波也有其最大范围。所以必然有可控缺陷的埋藏。还有属于检验人员的技术水平和技术漏检以及属于责任漏检问题，这也会造成可控缺陷的埋藏。这些埋藏缺陷其中影响最大的是裂纹。如显微裂纹，目前的检测手段还发现不了。但这些显微裂纹在焊接过程中，因力学性能在微区脆化的条件下很

有可能扩展成为宏观裂纹；也可能在水压试验条件下和在役过程中扩展成宏观裂纹。另外焊缝中的气孔、夹渣、未焊透和未熔合缺陷等等也都可以造成可控缺陷的埋藏。

综合上述，可控缺陷的埋藏对工程上的影响很大，但从设计上要求，加强对焊缝的检查，作为验收构件手段有三个方面：

①无损探伤；

②表面探伤；

③水压试验。

根据以上分析，这就要求压力容器在设计、制造、检验、使用和维护等方面都要严格各自的规程，但就设计而言，应认真研究和分析焊接接头作为压力容器结构中薄弱环节带来的各种问题。

3. 焊接接头微区的脆化：

由前面讲到内容可知，在焊接熔合线上材质最脆和最硬。对应这条熔合线的表面区域叫焊趾区。在这个部位出现的裂纹叫焊

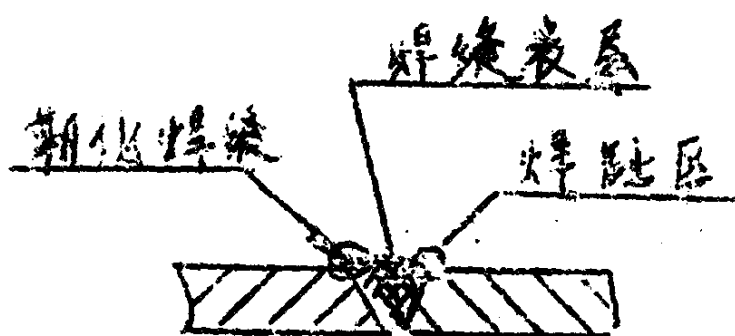


图1-4 焊趾区位置

趾裂纹。焊趾区的应力集中系数可以达到 $2 \cdot 5$ ，因而造成微区的脆化。焊趾区位置见图 1-4 所示。为了降低这个微区脆化倾向，其一，可在焊接熔合线上最后给它堆焊一道韧性高、强度低的调整焊缝性能的一个焊道，也可叫作初化焊缝。这样能将韧性提高，硬度下降，即使还存在 $2 \cdot 5$ 应力集中系数，焊缝脆化程度的也会有很大的改善。其二，微区脆化是因为焊缝表层最后冷却，偏析最严重，产生微裂几率也最大。因为表层的纵向拉伸残余应力最高。从

焊缝内应力三维状态分析，焊缝内部内应力小，表层的内应力大。因此表层本身也是微区脆化严重部位，不同于焊趾区的地方是应力集中系数没有那么大。所以在工程上将表层去掉砂轮打磨，这对改善微区脆化倾向很有力。现在许多石油化工设备内表面焊缝表层被去掉，对于抗介质腐蚀、电化学腐蚀和应力腐蚀也很有好处。因为这些腐蚀本身总是要借助于某些初始

焊缝面层刚好是提供这种初始表面微观裂纹的大本营。腐蚀，氢腐蚀本身就是一个很大的因素，焊缝表层偏析越严重，氢越容易往里扩散，因为氢原子半径远远小于铁原子晶格半径，氢是来去自如，焊缝初始表层的存在也就加速了氢原子往里扩散的能力。所以这也会造成微区脆化。所以去掉表层是减少微区脆化倾向的又一个因素。

压力容器设计时，要综合考虑其使用条件，如压力、温度、介质情况等等。是否去掉表层，当然去掉就比不去掉要好，但还要考虑制造成本问题。去掉焊缝表层磨光后，2~5的应力集中系数可以消除，偏析严重性也下降，微区裂纹几率也下降，残余应力峰值也下降，总之优点很多。越是厚度大强度级别高，拘束条件恶化的构件，应该采取这样处理微区脆化的办法。例如，由日本监造的辽阳整个球罐工程，就要求将所有球罐内表面焊缝统统打磨光，从工程上增加了一定的工时，但从长远的设备运行安全性和使用寿命来看是合算的。一般外表面焊缝的表层不要求去掉。以上是分析了微区脆化，容易发生的问题和处理方法。

4. 压力容器的事故与焊接接头的关系：

压力容器事故多发生在焊接接头，因为焊接接头区是压力容器结构中最薄弱环节。国内外的资料也都表明了这一点。

综合上述焊接接头中存在着的种种缺陷，集中到一点就是焊缝接头微区脆化。从压力容器发生的事故和焊接接头的关系上看，焊接接头也是一个薄弱环节。

英国焊接研究所综合五年之内的英国压力容器事故：

(1) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$ 钢，厚度150 mm，手工电弧焊，经过消除应力热处理，断裂温度为20℃，断口区的冲击韧性值是7—14 焦尔力。

起裂原因：①严重的应力集中；

②焊缝接头微区脆化。

(2) 低碳钢压力容器，厚度25 mm，手工弧焊，焊后未经消除应力热处理。

起裂位置：热影响区(HAZ)出现裂纹深达12 mm。

(3) 管道的环焊缝，碳素钢，厚12 mm，手工电弧焊，没经消除应力热处理，断口冲击韧性值达14 焦尔力。

起裂部位：在焊缝金属上产生6 mm条裂纹。

以上几例表说，事故大部分都集中在焊接接头上。

此外对压力容器发生事故的因素日本有个分析资料：选择材质不当占25%；施工不符合要求占25%；设计不良占50%。

设计不良表现在以下三方面：

①强度计算上的差错；

②结构的考虑不完善；

③选材上的错误。

设计因素上的差错表现在以下六方面：

①载荷确定的误差；

- ②结构形状不连续;
- ③接头型式的误差;
- ④接头位置上的错误;
- ⑤选材上的差错;
- ⑥材料异向性问题。

施工中加工制造上的差错表现在以下六方面:

- ①技术上不够成熟;
- ②焊接条件有错误;
- ③变形过大;
- ④焊接工艺顺序不对;
- ⑤对材质的错用;
- ⑥气割切口不符合要求。

材料因素上的差错表现在以下两方面:

- ①焊条焊药使用不符合要求;
- ②板材有分层、夹层和管理上错误。

从国内情况看也是这样,我国1980年压力容器发生的事故率是日本的13倍。可见问题之多。所以对压力容器的焊缝质量问题应引起足够地重视。

第三章 装焊工艺失控对压力容器结构质量的影响

装焊工艺失控就是指失去控制。如果没有完全按操作规程进行加工制造,当然按验收标准进行验收时会带来很多不符合技术要求的因素,这些因素对压力容器结构的质量肯定会产生影响。

一、焊接接头几何尺寸的影响:

各种焊接接头的焊趾区和根部应力集中系数

表 2—1

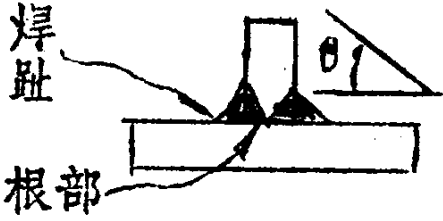
焊接接头模型		应力集中系数	
		焊 趾	根 部
	角焊缝 $\theta = 30^\circ$	2.5	2.5
	角焊缝 $\theta = 45^\circ$	3.5	3.5
	角焊缝凹形	1.5	3.5
	角焊缝凸形	4.5	4.0
	对接焊缝加强高 大些	3.0	—

表 2—1 是各种焊接接头的焊趾区和根部应力集中系数。从这个表中可以看到，作为焊接接头设计的时候，由焊趾区和焊接接头的根部所造成应力集中系数的严重程度。

表 2—1 画了三种焊接接头情况。

表 2—1 中，上图表示丁字接头焊缝模型，当丁字接头的角焊缝焊接完了以后，在双面焊缝中间有一个微小的未焊透的时候，它的根部和焊趾区要产生很高的应力集中系数。这个应力集中系数与角焊缝焊脚角度 θ 值有关， θ 值越大，反映在焊趾区和根部的应力集中系数越大。 θ 角 30° 时，焊趾区和根部都是 2.5，如果 θ 角度到 45° ，焊趾区和根部都上升到 3.5。

因此，在施工过程中，要求丁字接头角焊缝中间一定要焊透。如果施工工艺失控，看上去好像焊透了，实际上没有焊透，在接头区的根部要产生很大的应力集中，故很容易诱发微区开裂。