

● 锅炉压力容器焊工培训教材

# ● 锅炉与压力容器焊工

● 李洪波 孙洪武 编

GUOLU YU  
YALIRONGQI  
HANGONG

锅炉压力容器技工培训教材  
锅炉与压力容器焊工  
章燕谋 张天礼 编

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117)

北京市同兴印刷厂印刷

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张5<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·字数113千字  
1990年4月北京第一版·1990年4月北京第一次印刷  
印数00,901—10,000,定价,2.60元

ISBN 7-111-02219-X/TK·59(X)

## 前 言

焊接工作在锅炉与压力容器制造中占有很重要的地位。这一方面是由于在整个锅炉、压力容器制造工作量中，焊接工作量占很大的比例，按统计，约占40%~60%；另一方面是由于焊接质量的优劣直接影响着锅炉、压力容器的制造质量，直接关系到它们的安全工作。生产实践表明，锅炉和压力容器的破裂事故绝大部分发生在焊缝及其周围的热影响区。因此，在锅炉、压力容器的制造中，必须十分重视焊接工作。

加强对锅炉、压力容器焊工的技术培训和考核是保证焊接质量的重要措施之一。本书就是针对锅炉、压力容器焊工必须具备的理论和实际知识编写的。全书共分八章，对焊接过程的冶金特点和基本原理、电焊条和焊丝的正确选择与使用、焊接坡口型式和坡口装配技术、各种手工电弧焊机的结构与工作原理、手工电弧焊的焊接工艺、焊接变形和残余应力的产生原因及消除方法、焊接质量检验方法和焊接缺陷的产生原因与防止措施等方面均作了全面详细的介绍。此外，还对气焊与气割的基本原理、设备和工艺作了一般性介绍。

参加本书编写工作的还有曹群贤、习建修、刘阳岗、刘孚黄、张军强、刘学文、李秉德、武满全同志。

全书由西安交通大学能源与动力工程系主任张永照教授审阅。

作者

1989年2月

# 目 录

第一章	熔化焊接冶金原理 .....	1
第一节	焊接冶金的特点 .....	1
第二节	焊接熔池的形成和结晶 .....	2
第三节	熔化金属与气体的相互作用 .....	4
第四节	熔渣的作用 .....	6
第五节	焊接接头的组织 .....	9
第二章	电焊条及焊丝 .....	13
第一节	电焊条的基本知识 .....	13
第二节	焊条药皮的组成及焊条工艺性能 .....	17
第三节	焊条分类及各类焊条的特点 .....	20
第四节	焊丝成分及其对焊缝金属的影响 .....	24
第五节	选择焊条的原则 .....	27
第三章	手工电弧焊的设备及工具 .....	29
第一节	手工电弧焊对电焊机的要求 .....	29
第二节	电焊机的选择及电焊机的暂载率 .....	33
第三节	交流手弧焊变压器 .....	35
第四节	直流弧焊机 .....	42
第五节	电焊机常见故障产生的原因及排除方法 .....	48
第六节	手工电弧焊工具 .....	51
第四章	对口技术 .....	54
第一节	焊接接头型式及坡口型式 .....	54
第二节	对口的技术要求 .....	58
第五章	手工电弧焊工艺 .....	61
第一节	手工电弧焊的特点 .....	61
第二节	电弧及电源 .....	62

---

第三节	焊缝的空间位置 .....	68
第四节	焊接规范的选择 .....	78
第五节	基本操作工艺 .....	81
第六节	焊缝手弧焊时的操作工艺 .....	89
<b>第六章</b>	<b>气焊与气割</b> .....	<b>99</b>
第一节	气焊与气割用气体、设备及工具 .....	99
第二节	气焊规范选择与工艺 .....	108
第三节	气割工艺 .....	116
<b>第七章</b>	<b>焊接变形与应力</b> .....	<b>120</b>
第一节	焊接变形与应力产生的原因 .....	120
第二节	焊接变形的种类和残余应力分布 .....	123
第三节	防止焊接变形的措施 .....	131
第四节	焊接变形的矫正 .....	137
第五节	焊接应力 .....	140
<b>第八章</b>	<b>焊接缺陷及检验</b> .....	<b>146</b>
第一节	常见的焊接缺陷 .....	146
第二节	焊接缺陷的检验 .....	154

## 第一章 熔化焊接冶金原理

通过本章的学习，了解熔化焊接的冶金特点和过程，弄清熔渣的作用和焊接接头的金相组织，从而掌握焊接冶金的基本原理。

### 第一节 焊接冶金的特点

#### 一、电弧的温度高、温度梯度大

所谓熔化焊，就是利用热源，将两个焊件局部加热到熔化状态，再冷凝成一个整体的工艺过程。既然能熔化金属，可见焊接电弧的温度是很高的，熔池的平均温度为 $(1700 \pm 100)^\circ\text{C}$ 。又因焊接时的加热不是对整个工件，而是直接对局部部位，因而加热极不均匀，形成一个温度梯度很大的温度场，如图1-1所示。

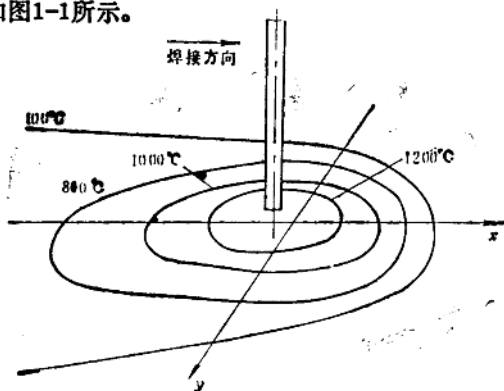


图 1-1 温度场中等温线

由于电弧的温度高，液体金属会被强烈地蒸发和升华，使部分有用的合金元素遭到损失，而一些有害的元素又会熔解在焊缝中。

## 二、熔池体积小，熔池金属不断更新

上面讲过熔化焊是局部加热过程，所形成的熔池体积很小，手弧焊时只有 $2\sim 10\text{cm}^3$ ，同时加热速度和冷却速度都很大，从局部金属熔化形成熔池，到结晶完成的全部过程，一般只有几秒钟时间，又因热源和熔池在不断移动，新的熔化金属和熔渣加入到熔池中参加冶金反应，使整个冶金反应过程达不到平衡，化学成分在很小的金属体积内有比较大的不均匀性，易形成偏析，这就增加了研究焊接冶金过程的困难和复杂性。

## 三、金属液体以雾滴进入熔池

焊条熔化形成熔滴，由焊条下端滴入熔池，这使得金属熔滴与气体、熔渣的接触面大大超过一般的炼钢过程。接触面大可以加速冶金反应的进行，但同时，气体侵入液体金属的机会也会增加，因而为焊缝金属发生氧化、氮化、氢脆以及产生气孔构成了有利条件。

熔化焊接，在熔化金属、熔渣、气相之间进行着一系列化学冶金反应，如金属氧化、还原、脱硫、脱磷、渗合金等。这些冶金反应直接影响着焊缝金属的成分、组织和性能，因此，了解和控制冶金过程是提高焊接质量的措施之一。

# 第二节 焊接熔池的形成和结晶

## 一、熔池的形成

进行熔化焊时，在热源的作用下，与焊条熔化的同时，

焊件——母材也发生局部熔化。在两焊件的连接部位由熔化的焊条金属和母材组成的具有一定几何形状的液体金属称为熔池。如焊接时不添加金属，则熔池仅由熔化的母材组成。

焊条熔化形成熔滴在受到其自身的重力、电弧吹力以及电磁力等的作用下，向焊接熔池过渡。金属熔滴的大小与焊条的种类、电流的大小等因素有关，通常增大焊接电流，会使熔滴变细。

金属熔滴从焊条末端向熔池过渡的途中，有小部分变为金属蒸气或被氧化形成烟尘，另有一小部分飞溅出熔池，而大部分则落入熔池，冷却后形成焊缝。

焊缝的几何形状可用熔池长度（ $L$ ）熔深（ $H$ ）、熔宽（ $B$ ）和加强高（ $C$ ）等参数来表示，如图1-2所示。

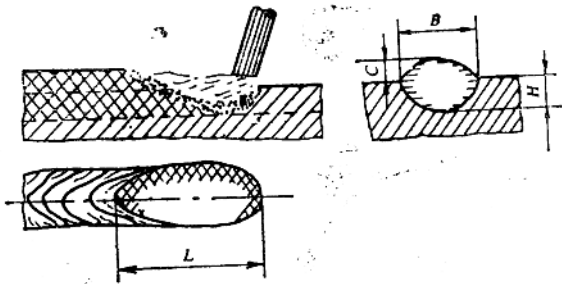


图 1-2 焊缝的几何尺寸

熔池的形状和大小与焊接规范、母材的性质、坡口形状等因素有关。在一般情况下，随着电流的增加，熔池深度 $H$ 增加、熔池宽度 $B$ 减小，而随着电压的升高， $H$ 减小， $B$ 增大，熔池长度 $L$ 则与电弧功率成正比、与焊接方法等有关。

## 二、熔池的结晶

熔池的结晶是生成晶核和晶核长大的过程。它的特点



是：熔池的体积小、冷却速度大，熔池中的金属处于过热状态，熔池在运动状态下结晶。

当熔池冷却时，熔合区附近加热到熔化温度而还没有完全熔化的基本金属的晶粒成为熔池金属的结晶核心，逐渐向焊缝中生长。一般情况下，焊缝为柱状晶粒，参见图1-3。等轴晶粒很少出现，只有在焊缝中心或火口处，才会出现等轴晶粒。焊缝中的杂质也最易聚集到这些地方，故在焊缝中心容易出现热裂纹，特别在火口处更易生成裂纹称为火口裂纹，它们的形成与焊缝晶粒形式有密切的关系。

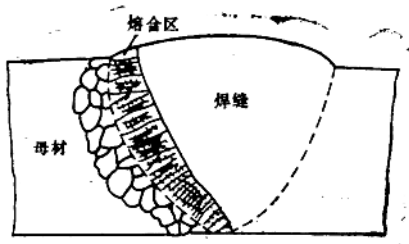
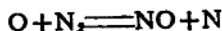
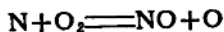


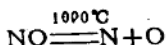
图 1-3 熔合区母材晶粒表面上成长的柱状晶粒

### 第三节 熔化金属与气体的相互作用

焊接过程中，熔池周围充满了大量气体，气体的数量、种类随焊接方法、焊条种类及焊接规范的不同而不同。这些气体的主要成分是 $N_2$ 、 $H_2$ 、 $O_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$ 和金属蒸气。下面简述几种气体对焊缝质量的影响。

#### 一、金属的氮化及其影响





氮通过氧化氮 (NO)、氮原子及氮离子三种形式溶入焊缝。原子状态的氮可与很多金属化合生成氮化物，存在于金属之中，如 $\text{MnN}$ 、 $\text{SiN}$ 、 $\text{AlN}$ ，且都比较稳定，使焊缝金属被氮化物饱和。有一部分氮则以针状氮化物 ( $\text{Fe}_3\text{N}$ ) 形式存在于焊缝中。

氮的饱和与氮化物的存在，使焊缝硬度提高、塑性和韧性下降。氮还是促使产生气孔的主要原因之一。目前尚无有效的脱氮方法，所以在施焊时要采取措施对焊缝加以保护，如气体保护、熔渣保护、抽真空保护等方法。

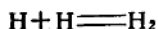
## 二、氢对焊缝金属的影响

焊接时，氢的主要来源是焊条药皮、焊剂、焊丝锈皮中的水分、空气中的水分以及焊件焊丝表面的油污等杂质。

在高温下，氢分子将发生分解：



即以原子状态存在，而在冷却过程中则以分子状态存在，



分子氢不溶于金属，在焊缝冷却过程中来不及逸出的氢就会形成气孔。

在焊接条件下，焊缝中氢的溶解量是常温的100倍以上，这样在焊缝中就会残留大量的氢。氢的主要危害是：

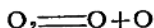
- (1) 氢脆性引起钢的塑性严重下降。
- (2) 白点是由氢引起的发纹群，导致钢的塑性下降。
- (3) 产生气孔和裂纹。

## 三、金属的氧化及其影响

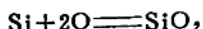
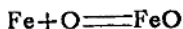
氧的主要来源是焊条药皮、焊剂、保护气体、水分、工

件和焊丝表面上的铁锈、油污和氧化膜等。

氧在高温下，将发生分解：



由于原子状态的氧很活泼，能使铁剧烈氧化。钢中含有的对氧的化合力大于铁的元素也要发生氧化：



由于氧化，使焊缝中有益元素大量被烧损。氧的存在，使焊缝的硬度、强度、塑性明显下降，还使钢的耐腐蚀性下降，此外还会引起红脆、冷脆和时效硬化。为了得到可靠的焊缝质量，必须纯化焊接材料、控制焊接规范、采取冶金脱氧等方法以减少焊缝含氧量。

#### 第四节 熔渣的作用

手弧焊时，焊缝表面会覆盖一层熔渣。熔渣在焊接过程中的主要作用是：机械保护作用、改善焊接工艺性能及能起冶金处理作用。

##### 一、熔渣的机械保护作用

焊接时形成的熔渣覆盖在熔滴和熔池的表面上，把液态金属与空气隔离开，保护液态金属不被氧化和氮化。液态熔渣凝固后形成的渣壳覆盖在焊缝上，可以防止处于高温的焊缝金属受空气的有害作用，还可以减慢焊缝冷却速度，改善焊缝的成形和结晶条件。

熔渣的保护作用与熔渣数量有关，太少时保护效果差；太多时，又会给操作带来不便，甚至产生夹渣。

## 二、改善工艺性能的作用

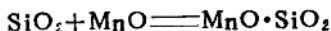
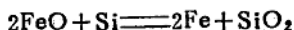
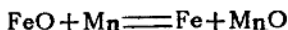
良好的工艺性能是保证焊缝质量的前提。由于在药皮中加有稳弧剂，能使电弧稳定燃烧，减少飞溅，保证焊缝具有良好的成型等。

一般稳弧剂多采用碱金属及碱土金属钾、钠、钙的化合物，如石灰石、碳酸钠、钾硝石、水玻璃、花岗石等。

焊条药皮里含有钾、钠、钙等低电离势的物质，能改善电弧空间气体电离的条件，使焊接电流易于通过电弧空间，因而可大大增加电弧燃烧的稳定性。在碱性焊条中，由于有萤石CaF存在，而氟F的电离势很高，并具有消离作用，恶化了气体的电离条件，而使电弧燃烧的稳定性有所降低，所以碱性低的氢型焊条，因其电弧燃烧不稳定，故限用直流电源施焊。

## 三、冶金处理作用

1. 熔渣脱氧 将脱氧剂加在焊条药皮中，焊接时脱氧剂熔化在熔渣里，通过熔渣和熔化金属发生一系列脱氧冶金反应，从而使焊缝金属脱氧。目前常用的脱氧剂是Mn、Si、Ti、Al。

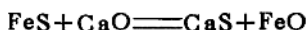


$\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ 密度小，浮到熔池表面形成溶渣，减少了焊缝中的含氧量。其它元素的脱氧方法与此类似。

2. 熔渣脱硫 硫是焊缝金属中有害杂质之一，它通常以两种形式存在于钢中，即MnS和FeS。MnS几乎不溶于钢水中，在冶金过程中它可以浮到熔渣中，使焊缝脱硫。当硫以FeS的形式存在时是最有害的，因为它与铁在液态时可以

无限溶解，而在固态时其溶解度急剧下降，因此，在熔池结晶时它容易发生偏析，以低熔点共晶体 $\text{Fe}+\text{FeS}$ 或 $\text{Fe}+\text{FeO}$ 的形式呈片状或链状分布晶界。这样就增加了焊缝金属产生裂纹的倾向，同时还会降低冲击韧性和抗蚀性。

在焊接冶金中常用的脱硫剂是 $\text{Mn}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{CaO}$ 。其化学反应过程是：



生成的 $\text{MnS}$ 、 $\text{CaS}$ 不溶于金属而进入熔渣。增加了渣中 $\text{MnO}$ 和 $\text{CaO}$ 的含量，有利于脱硫。由于 $\text{MnO}$ 和 $\text{CaO}$ 都是碱性金属氧化物，所以碱性渣的脱硫能力比酸性渣好。

#### 四、焊缝金属的合金化

所谓合金化——渗合金就是把所需要的合金元素通过焊接材料过渡到焊缝金属中去的过程。它的目的首先在于补充焊接过程中由于蒸发、氧化等原因造成的合金元素的损失。其次是消除工艺缺陷，改善焊缝金属的组织性能。例如，为了消除硫而向焊缝中加入锰；在焊接某些结构钢时，常向焊缝加入钛、铝等，以细化晶粒，提高焊缝的韧性。第二是获得具有特殊性能的堆焊金属，如电厂中使用的阀门很多，常需在阀门端面堆焊耐磨合金，以提高耐磨性。

手弧焊时，主要通过焊药和焊条药皮使焊缝金属产生合金化。

为了评价合金剂利用的程度，即合金元素的过渡数量，常用过渡系数这一概念：

$$n = C_1 / C_2 \quad (\%)$$

式中  $n$ ——合金元素过渡系数；

$C_1$ ——焊缝中某合金元素的含量；

$C_2$ ——焊条中某合金元素的含量。

影响合金元素过渡系数的因素很多，其中主要有焊接熔渣的酸碱度和合金元素与氧的化合力。利用药皮渗合金时，一般均采用氧化性极低的碱性渣药皮，这样有利于合金元素过渡到焊缝中去。合金元素与氧的化合力影响也很大，常用的合金剂按与氧的化合力大小递减次序如下：

Al, Zr, Ti, Si, V, Mn, Cr, Mo, W, Fe, Ni, Cu, …。钛、铝与氧的化合力最大，最易被烧损，其过渡系数最小；而钼、镍则过渡系数较大。

为了使焊缝具有一定成分的合金元素，首先要加入足量的合金剂，此外还要设法减少氧化及陷留在渣中的合金量。

## 第五节 焊接接头的组织

焊接条件下，焊缝两侧的母材相当于进行了一次热处理。由于母材金属上各点距离焊缝的远近不同，所以各点所经历的热循环也不同，因此各点的组织也不一样。这部分组织发生变化的母材被称为焊接热影响区。

### 一、低碳钢热影响区的显微组织

对于一般常用的低碳钢和某些不易淬硬的钢的热影响区可分为以下四个小区（如图1-4所示）。

#### 1. 熔化区

即焊缝与母材相邻的熔合线附近，又称半熔合区，温度处于固、液相线之间。此区在化学成分和组织性能上都有较大的不均匀性。在靠近母材一侧的金属组织往往是过热或过烧组织，塑性很差。在各种熔化焊的条件下，这个区的范围

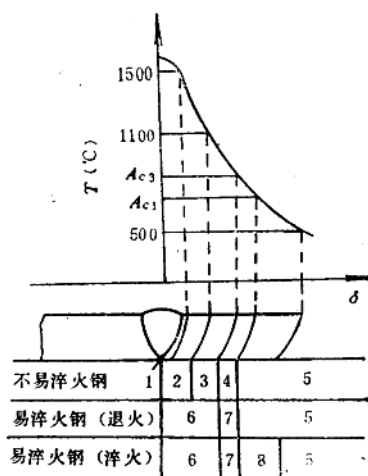


图 1-4 钢焊接时的热影响区

虽然很窄，甚至在显微镜下也很难分辨出来，但对焊接接头的强度、塑性都有很大的影响。在许多情况下熔化区是产生裂纹、局部脆性破坏的发源地，因此引起了普遍重视。

## 2. 过热区

此区的金属处于过热状态，过热区的温度是在固相线以下到 $1100^{\circ}\text{C}$ 左右，奥氏体晶粒发生严重长大现象，冷却之后获得晶粒粗大的具有过热特征的组织。此区的塑性很差，尤其是冲击韧性通常降低 $20\% \sim 30\%$ ，是焊接接头中的薄弱区域，因此，焊接刚性较大的结构件时，常在此区出现裂纹。

## 3. 相变重结晶区 (正火区)

金属加热到 $A_3 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 之间，金属将发生重结晶（即铁素体和珠光体全部转变为奥氏体），然后在空气中冷却，使

金属形成均匀而细小的铁素体和珠光体组织，相当于热处理时的正火组织，故又称正火区或细晶区。

#### 4. 不完全重结晶区

焊接时处于 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 之间的温度，首先珠光体转变为奥氏体，只有一部分铁素体转变成奥氏体，冷却时奥氏体转变成细晶的珠光体和部分铁素体，而未相变的铁素体则成为粗大的铁素体组织。所以，这个区的金属组织是不均匀的，机械性能也不均匀。

以上四个区是焊接热影响区的主要组织特征。前两个区统称为粗晶区，是焊接接头中机械性能最差的区域，最易产生裂纹等缺陷。

焊接热影响区的大小受到许多因素的影响，不同的焊接方法、焊接板厚、线能量以及施工条件等都会使热影响区的尺寸发生变化。用不同的焊接方法，焊接低碳钢时热影响区的平均尺寸可参见下表。

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 (mm)
	过热	相变重结晶	不完全重结晶	
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
氧乙炔气焊	21	4.0	2.0	27
真空电子束焊	—	—	—	0.05~0.75



## 二、焊接淬硬倾向较大的钢材其热影响区的显微组织

焊接时易淬硬钢，包括中碳钢（40、45、50号钢等）和易淬硬的合金钢等，其热影响区的组织分布与母材焊前的热处理状态有关。如果母材焊前处于正火或退火状态，则热影响区的组织可分为完全淬火区、不完全淬火区（见图1-4中6、7两区所示）。如果焊前处于调质状态，那么热影响区还会有回火区（见图1-4中8区所示）。

### 1. 完全淬火区

加热温度超过 $A_{c3}$ 以上的区域、由于钢种的淬硬倾向较大，焊后冷却时得到淬火组织（马氏体），性脆而硬，容易产生裂纹。

### 2. 不完全淬火区

母材被加热到 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 温度范围之内，冷却后的组织为马氏体和铁素体，故称为不完全淬火区。

### 3. 回火区

此区加热温度在 $A_{c1}$ 以下，为回火索氏体或回火屈氏体组织。

易淬硬钢焊后在焊缝和热影响区易出现淬硬组织，影响焊接接头的质量，通常均采取焊前预热和焊后热处理等工艺措施。