

王宽福 编著

压力容器 焊接结构工程分析

化学工业出版社

压力容器焊接结构工程分析

王宽福 编 著

化学工业出版社

·北 京·

-91

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

压力容器焊接结构工程分析/王宽福编著. —北京:
化学工业出版社, 1998. 4
ISBN 7-5025-2090-2

I. 压… II. 王… III. 压力容器-焊接结构-分析
IV. TG457.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 00629 号

压力容器焊接结构工程分析

王宽福 编著

责任编辑: 周国庆

责任校对: 马燕珠

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16³/₄ 字数 419 千字

1998 年 5 月第 1 版 1998 年 5 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—5 000

ISBN 7-5025-2090-2/TQ · 1030

定 价: 27.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

目 录

第一章 绪论	1
第一节 焊接结构的发展趋势及对焊接技术的要求.....	1
第二节 焊接结构的分类和特点.....	1
第二章 焊接结构的冶金分析	3
第一节 焊接过程分析和焊接接头组成.....	3
第二节 焊接热循环对组织的影响和控制途径.....	5
第三节 焊缝的组织 and 性能.....	8
第四节 熔合区、热影响区和热应变脆化区的组织和性能	14
第五节 热影响区的硬化、软化和脆化	17
第三章 焊接结构的应力与变形分析	20
第一节 焊接变形与应力的产生	20
第二节 焊接应力与变形的分类及危害	23
第三节 焊接残余变形的估算和影响因素	26
第四节 焊接残余应力的分布及对工程结构失效的影响	34
第五节 焊接残余应力的测定	44
第六节 焊接残余应力和变形的控制和消除	50
第四章 焊接结构的力学分析	61
第一节 常用接头的工作应力分布	61
第二节 焊接接头的基本力学性能	68
第三节 焊接接头的力学性能匹配	71
第四节 焊接接头的强度设计与计算	72
第五章 焊接结构的缺陷分析	84
第一节 焊接缺陷的分类	84
第二节 焊接缺陷产生原因的分析及防治	86
第三节 焊接裂纹分析	90
第四节 焊接缺陷的危害性分析	97
第五节 焊接缺陷的断裂力学分析.....	104
第六节 焊接缺陷的返修.....	106
第六章 焊接结构的检验技术分析	109
第一节 焊接检验的过程和分类.....	109
第二节 压力容器的无损检验.....	117
第三节 焊接质量检验要求.....	127
第四节 探伤新技术简介.....	135
第七章 焊接结构的合理性分析	139
第一节 结构强度的合理性分析.....	139

第二节	制造工艺性和经济性的结构合理性分析	140
第三节	焊接容器的结构分析	142
第四节	多层式压力容器焊接接头的设计	161
第五节	薄板结构的合理性分析	167
第六节	焊接机身结构的合理性分析	172
第八章	焊接结构的制造分析	176
第一节	焊接制造工艺过程分析和设计	176
第二节	焊接结构的焊接工艺评定	182
第三节	焊接结构制造的材料加工	190
第四节	焊接结构制造的装配工艺	199
第五节	焊接结构制造的焊接工艺	200
第九章	焊接结构的失效分析	210
第一节	失效分析的基本方法	210
第二节	裂纹源、断裂源的识别方法	212
第三节	焊接结构的脆性断裂失效与防治	218
第四节	焊接结构的塑性断裂失效与防治	223
第五节	焊接结构的疲劳失效与防治	226
第六节	焊接结构的应力腐蚀断裂失效与防治	232
第七节	焊接结构的蠕变断裂失效与防治	236
第八节	不锈钢焊接结构的失效与防治	241
第九节	异种钢焊接结构的失效和防治	245
第十章	焊接技术的进展分析	250
第一节	焊接技术的发展和选择依据	250
第二节	窄间隙焊接技术	252
第三节	电子束焊接技术	254
第四节	激光焊接技术	256
第五节	爆炸焊接技术	258
参考文献		261

第一章 绪 论

第一节 焊接结构的发展趋势及对焊接技术的要求

焊接技术自 20 世纪初兴起后,几十年来获得迅猛发展。目前焊接结构已经基本上取代铆接结构,并部分代替铸造和锻造结构。焊接结构的用材占钢产量的近 50%,已广泛地应用于航空、航天、原子能、化工、造船、海洋工程、电子技术、建筑、交通运输、电力、机械制造等工业部门。

随着社会的进步和经济的发展,人们一方面要推出新技术和新的焊接结构形式来满足生产发展的需要,另一方面焊接结构也向着大型化、高参数和高寿命的方向发展。如 500kt 级油轮的长度达 382m,宽 68m,高 27m。100km³ 的储油罐,10km³ 的球形容器,5080m³ 的巨型高炉炉体,1.2×10⁶kW 原子能发电站的反应堆,运载火箭,核潜艇等均是焊接结构。许多焊接结构不仅尺寸大,而且工作条件苛刻,常处于高压、高温、低温、深冷、高速、腐蚀、易燃、易爆、有毒的环境中,有的是几种情况共存,又都要求长期运行,一旦出现故障和事故,后果是不堪设想的,这就对焊接技术提出了更高的要求:

①为满足低温、深冷、高温、高压、腐蚀的环境和大型化的要求,必须采用某些特殊性能的材料,如高强度、耐热钢、抗氢钢、低温钢等,这给焊接增加了困难,也促使一些新的焊接材料、焊接工艺方法产生和发展。等离子焊、电子束焊、窄间隙气体保护电弧焊等就是这样发展起来的。

②为确保焊接结构运行的安全可靠,要求在制造过程中,特别是对焊接的质量要全面严格控制。焊接机械化、自动化和机器人的应用,也正是在确保焊接质量要求下形成的发展趋势。

焊接结构的发展也进一步促进了焊接技术的进步,而焊接材料、焊接工艺方法、焊接基础理论和焊接设备的发展,反过来为满足焊接结构质量起到了保证作用。

第二节 焊接结构的分类和特点

焊接结构很难用单一的方法将其分类,不同的出发点可以有不同的分类方法。如按结构的板厚可以分为薄板、中厚板和厚板结构。按结构所采用材料的种类可分为钢焊结构、铝及合金、钛及合金结构等。按结构的毛坯或原材料加工工艺可分为板焊结构、冲焊结构、锻焊和铸焊结构。有时也可按最终产品来分类,分为飞机结构、油罐车、船体结构和客车结构等。最为常见的是按结构承载、工作条件和结构特征来进行分类,可分为:

(1)梁、柱和桁架结构 工作在横向变曲载荷下的结构称梁,而在纵向弯曲或压力下工作的结构称柱,拉杆是承受拉力的构件,各种杆件经节点相联可承担梁或柱的载荷,而把主要工作在拉伸或压缩载荷下各种杆件的组合结构称为桁架、塔桅结构。梁、柱和桁架结构是组成各类建筑钢结构的基础,如高耸的钻井塔、电视塔、火箭发射塔,以及屋架、栈桥等都属这一类。

(2)板壳结构 板壳结构大多用钢板成型加工后拼焊而成,主要制造能承受内压或外压、

要求密闭的各种焊接容器,包括各种压力容器、锅炉、储罐、塔、运输槽车及管道等。

(3) 机器结构 机器结构是机器的一个组成部分,要满足机器冲击、承受交变载荷、耐磨、耐蚀、耐高温等工作要求,常构成铸—压—焊、铸—焊及锻—焊等复合结构,机体、机座、床身和滚筒、轴、齿轮就是这类典型结构。汽轮机、发电机、柴油机、水轮机等动力机械,以及减速箱、机床、压力机中都包含有这类焊接结构。

焊接结构之所以有巨大的发展,是它与铆接、铸造、锻造结构相比,具有更明显的优点:构造合理,易简化结构,减轻自重,板厚限制小,制造周期短,成本低,还可焊接不同金属材料等。作为焊接结构本身还具有以下特点:

①整体性强。一方面焊接结构具有很好的气和水的密封性,另一方面刚度大,对应力集中因素和缺陷较为敏感,选材时应注意。

②设计灵活性大。几何形状几乎不受限制,壁厚不受影响,也可进行异种金属焊接,实现物尽其用。

③适用于制作大型或重型机器、设备。单件、小批量、越大的产品采用焊接结构越优越。

④成品率高。一旦出现焊接缺陷,修复容易,很少产生废品。

⑤焊接过程会局部改变材料的性能,使结构中的性能不均匀,甚至部分材料性能会有所下降,对整体结构的强度和断裂行为产生一定影响。

⑥焊接结构中必然存在焊接残余应力和变形,易产生裂纹,不仅影响结构的外形和尺寸,还会影响结构的承载能力,对焊后加工也影响其尺寸的稳定性和加工精度。

⑦不同的制造工艺,如冷加工、切削、焊后热处理等都会对结构性能产生不同影响。

⑧必须经过严格的无损检测技术,以保证产品质量和提高安全使用的可靠性。

只有正确地认识和切实地掌握这些焊接结构的特点,才能设计、制造出性能优良、结构合理的焊接结构,才能保证结构运行的安全可靠。

第二章 焊接结构的冶金分析

第一节 焊接过程分析和焊接接头组成

一、焊接过程的分析

焊接是两种或两种以上的材料（同种或异种），在加热或加压（或并用）的状态下，通过原子或分子之间的结合和扩散，造成永久性联接的工艺过程。由于焊接时所采用的能源和方式不同，所以形成了各种类型的焊接工艺方法，它们都是为适应生产的需要而发展起来的。随着科学技术的发展，将不断出现新的焊接工艺方法，现有的方法也将得到新的改进和应用。

熔化焊是最基本的焊接工艺方法，在焊接生产中占主导地位，本书以熔化焊为基础加以叙述。

钢铁材料的熔化焊，一般经历以下过程：加热—熔化—冶金反应—结晶—固态相变—形成接头。图 2-1 示出焊接过程各局部过程间的联系及所处情况，一般地说，焊接过程可以归结为三个互相交错进行而又彼此联系着的局部过程。

1. 焊接的热过程

熔化焊时，被焊金属在热源作用下被加热和局部熔化，此时在被焊金属中存在热量的传递和分布，通常称此为焊接的热过程。

焊接的热过程将贯穿整个焊接过程的始终，一切焊接的物理化学过程都是在热过程中发生和发展的。焊接的温度场决定了焊接的应力场和应变场；它与冶金、结晶、相变过程有着密切的联系，使其成为影响焊接质量和生产率的主要因素之一。

2. 焊接的化学冶金过程

熔化焊时，熔化金属、熔渣、气相之间进行着一系列化学冶金反应，如金属的氧化、还原、脱硫、脱磷、焊接金属氮化、渗合金、与氢的作用等。这些冶金反应将直接影响焊缝金属的成分、组织和性能，因此控制化学冶金过程是提高焊接质量的主要措施之一。

3. 焊接时金属的结晶和相变过程

随着热源的离开，熔化金属就开始结晶，金属原子由近程有序排列转变为远程有序排列，即由液态转变为固态。对于具有同素异构转变的金属，随着温度的下降还将发生固态相变。例如，钢将发生 $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ 相的转变。由于焊接件是快速连续冷却，使焊缝金属的结晶和相变都具有各自的特点，并且有可能在这些过程中产生诸如偏析、夹杂、气孔、热裂纹、淬硬脆化、冷裂纹等缺陷。因此，控制和调整焊缝金属的结晶和相变过程是保证焊接质量的又一关键。

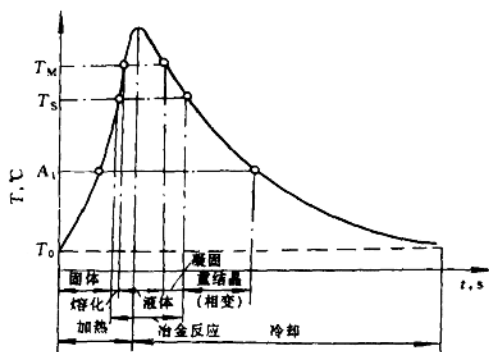


图 2-1 焊接过程示意图

T_M —金属熔化温度（液相线）； T_S —金属凝固温度（固相线）；

A_1 —钢的 A_1 变温点； T_0 —初始温度

二、焊接冶金过程的特点

焊接冶金过程是焊接区金属熔化及在高温下各种物质间相互作用的过程，实质上是金属在焊接条件下的再熔炼过程，其中不仅包括化学变化，而且包括物质在作用相之间的迁移和分布过程。通常焊接冶金过程具有以下特点：

(1) 电弧反应区温度高 电弧焊时，弧柱温度可达 6000K 以上，熔滴温度可达 1800~2400℃，由于焊接电弧的温度很高，能使液体金属强烈地蒸发，使气体分子 (N_2 、 H_2 、 O_2 等) 分解。分解后的气体原子或离子，其化学活性显著增加，很容易溶解到液体金属中，增加了焊缝金属凝固后产生气孔的可能性，从而降低其机械性能。

(2) 熔池与母材温差大，柱状晶得到发展 焊接是局部加热，焊缝金属加热熔化后熔池的平均温度在 2000℃ 以上，而它被冷态的母材金属所包围，两者温差巨大，常常使接头产生很大的内应力和变形，甚至可能产生裂缝和断裂，同时大的温度梯度使柱状晶得到发展。

(3) 冷却速度快，偏析现象严重 焊接熔池体积小，手工电弧焊时熔池约为 3~10cm³ 自动焊也不过 9~30cm³，焊缝金属从熔化到凝固只有几秒钟时间，而温度又在不断地变化，熔池周围被冷金属包围，冷却速度很快，平均可达 4~100℃/s，在这样短的时间内，冶金反应是不平衡的，也是不完善的，使焊缝金属成分分布不均匀，有时区域偏析很大。液态时金属吸收的气体有时来不及逸出而形成气孔。一些非金属夹杂物也可能来不及浮出而留在焊缝金属内造成缺陷。

(4) 熔池金属不断更新 熔焊时，在焊接热源作用下，焊件上形成的具有一定几何形状的液态金属部分叫熔池。随着焊接熔池的移动，新的钢水和熔渣加入到熔池中参加冶金反应，熔池金属不断更新。

(5) 金属液体以细滴状进入熔池 焊条熔化形成熔滴，由焊条顶端滴入熔池，而且熔化金属基本上暴露在空气中，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。接触面加大可以加速冶金反应进行，但同时，气体侵入液体金属的机会也增多，因而使焊缝金属更易发生氧化、氮化以及产生气孔。

三、焊接接头的组成和基本特点

一般所指的焊接接头区，应包括焊缝金属及母体金属靠近焊缝而组织和性能发生变化的区域。它在整个焊接结构中是一个关键性部位，其性能之优劣直接影响到整个焊接结构的制造质量和使用安全性。

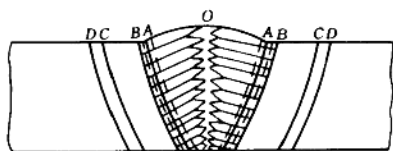


图 2-2 焊接接头组成示意图

根据加热时金属所处的状态以及成分、组织和性能的变化情况，可将焊接接头分为四个区域：焊缝金属 (OA)、熔合区 (AB)、热影响区 (BC) 和热应变脆化区 (CD)，如图 2-2 所示。

总的来说焊接接头是一个不连续体，产生了几何形状、化学成分、金相组织和力学的不连续，使焊接接头具有以下基本特点：

① 冶金反应的不平衡、不完善，使化学成分不均匀；

② 受不同焊接热循环的影响，近缝区的金属组织和性能发生变化，使焊接接头区的组织和性能产生不均匀性，并有所下降；

③ 由于截面的变化和几何形状不连续会产生应力集中，加之焊接残余应力，使焊接接头区的应力有较大提高；

④由于多种原因,在焊接过程中往往难免会在焊接接头区域产生各种焊接缺陷,这对焊接结构是一个潜在的隐患。

由上可见,通过合理的设计,在制造中提高焊接技术、加强质量管理和检查来提高焊接接头的质量具有重要意义。

第二节 焊接热循环对组织的影响和控制途径

一、焊接热循环及其特征参数

当焊接中热源沿焊件移动时,焊件上某点温度随时间而变化的过程(由低而高,达到最大值后,又由高而低),称为焊接热循环。在焊缝两侧不同距离的各点,所经历的热循环是不同的,它描述了焊接过程中热源对焊件不同部位的热作用,如图 2-3 所示。离焊缝越近的各点,其加热速度越大,峰值温度越高,同时冷却速度也越大,但加热速度远大于冷却速度。另外根据所采用的焊接方法不同,热循环曲线的形状也有较大的变化。

由此可见,焊接是一个不均匀加热和冷却的过程,也是一种特殊的热处理,这一过程必然会造成不均匀的组织 and 性能,同时也将产生复杂的应力与应变。

决定焊接热循环特征的主要参数有:加热速度 ω_H , 峰值温度 T_m , 高温持续时间 t_H 和冷却速度 ω_c , 如图 2-4 所示。

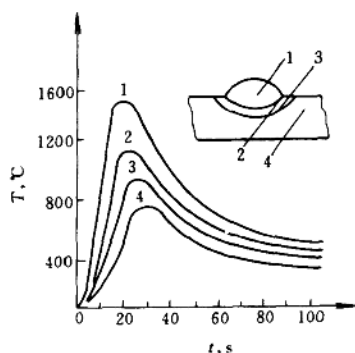


图 2-3 焊缝及热影响区各点的热循环

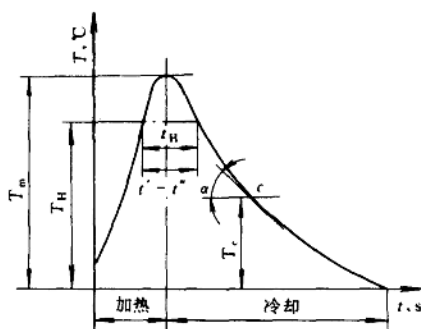


图 2-4 焊接热循环的特征

1. 加热速度 (ω_H)

在焊接条件下的加热速度远比热处理条件下要快得多,随着加热速度的提高,相变温度也会随之提高,并使奥氏体的均质化和碳化物的溶解过程更不充分,这些都必然影响到在冷却过程中的热影响区的组织和性能。

影响加热速度的主要因素是:焊接方法、不同的焊接线能量、板厚、几何尺寸及被焊金属的热物理性能。

2. 加热的最高温度 (T_m)

金属组织和性能的变化除受化学成分影响外,主要与加热的最高温度和冷却速度有关。焊缝两侧加热的最高温度不同、冷却速度不同,就会有不同的组织和性能。一般对低碳钢和低合金钢来讲,在熔合线附近温度可高达 $1300 \sim 1350^\circ\text{C}$,会使母材晶粒严重长大,塑性降低。

另外,研究加热的最高温度还可以间接判断焊件上产生内应力的情况和塑性变形区的范围。

对厚大焊件堆焊（点热源）及薄板对接焊接（线热源）两种情况，其加热的最高温度可以通过以下公式计算：

厚大焊件堆焊，

$$T_m = \frac{0.234E}{c\rho r_0} \quad (2-1)$$

薄板对接焊，

$$T_m = \frac{0.242E/h}{c\rho y_0} \quad (2-2)$$

式中 E ——焊接线能量，J/cm；

c ——比热容，J/(g·℃)；

ρ ——材料密度，g/cm³；

h ——板厚，cm；

r_0 ——厚焊件上某点距热源运行轴线的垂直距离， $r_0 = \sqrt{y_0^2 + z^2}$ ，cm；

y_0 ——薄板上某点距热源运行轴线的垂直距离，cm；

z ——厚焊件上某点距热源表面的板厚方向的垂直距离，cm。

3. 高温持续时间 (t_H)

高温的持续时间是指在相变温度以上的停留时间，虽然停留时间越长会有利于奥氏体的均质化过程，然而当温度很高时（如 1100℃ 以上），即使停留时间不长，也会产生严重的晶粒长大。在研究中常把这个高温停留时间 t_H 分为加热过程的停留时间 t' 和冷却过程的停留时间 t'' ，即 $t_H = t' + t''$ 。

厚板和薄板的焊接中在高温停留的时间 t_H 可通过以下公式估算：

厚板

$$t_H = \frac{E}{2\pi\lambda (T_H - T_0)} \quad \text{s} \quad (2-3)$$

薄板

$$t_H = \frac{E}{4\pi\lambda c\rho (T_H - T_0)^2} \quad \text{s} \quad (2-4)$$

式中 λ ——导热系数，J/(cm·s·℃)；

T_H, T_0 ——相变温度和预热温度，℃

4. 冷却速度（或冷却时间）(ω_c)

冷却速度是决定热影响区组织性能最重要参数之一，也是研究热过程的主要内容。应当指出，焊接时冷却过程在不同阶段的冷却速度是不同的，这里所指的是一定温度范围内的平均冷却速度，或者是指某一瞬时温度的冷却速度。对于低碳钢和低合金钢来讲，重要的是熔合线附近冷却过程中 540℃ 左右的瞬时冷却速度，或者是 800℃ 降到 500℃ 的冷却时间 ($t_{8/5}$)。这是相变最激烈的温度范围，奥氏体将按不同冷却速度转变为不同类型的组织。对于淬硬倾向大的钢，较多考虑的是 300℃ 时的瞬时冷却速度。

厚板和薄板焊接冷却时，从 800℃ 冷至 500℃ 的冷却时间 $t_{8/5}$ ，可通过以下公式估算：

厚板

$$t_{8/5} = \frac{E}{2\pi\lambda} \left[\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right] \quad (2-5)$$

薄板

$$t_{8/5} = \frac{(E/h)^2}{4\pi\lambda c\rho} \left[\frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(800-T_0)^2} \right] \quad (2-6)$$

除环境外，主要有以下一些影响冷却速度的因素：

(1) 焊接方法 气焊由于加热效率不高，热循环平缓，冷却速度为 $0.5 \sim 2^\circ\text{C/s}$ ，电弧焊的冷却速度为 $2 \sim 100^\circ\text{C/s}$ ，而点焊的冷却速度最大为 $50 \sim 800^\circ\text{C/s}$ 。

(2) 板厚 在使用相同线能量下，板越厚则冷却速度越快，但当板厚增大到临界板厚值后， $t_{8/5}$ 及冷却速度 ω_c 就不再变化，而基本保持恒定。临界板厚：

$$h_c = 0.39 \sqrt{\frac{E}{(600-T_0)}} \quad (2-7)$$

(3) 预热温度 提高预热温度 T_0 会使热影响区的宽度增大，但可以显著降低冷却速度，而不会明显影响在峰值温度附近的停留时间。

(4) 线能量 线能量与冷却速度成反比关系，提高线能量不仅会增加峰值温度和在高温的持续时间 t_H ，也会使 $t_{8/5}$ 时间延长和降低冷却速度 ω_c 。其中 I/U 与冷却速度的相关性更好，而电压 U 的影响不大。

(5) 母材导热系数 λ 大的导热系数也会使冷却速度增加，碳钢和低合金钢的导热系数基本相同，而不锈钢的导热系数只有它们的 $2/3$ ，而铜、铝合金却是它们的 $3 \sim 7$ 倍，使得它们和碳钢有着不同的热循环。

(6) 接头形状 T 型或角接接头与同样板厚的对接接头相比较，前者的冷却速度约为后者的 1.5 倍左右，V 形坡口比平板堆焊的冷却速度低 $20\% \sim 30\%$ 。

(7) 焊道长度 通常长焊缝的冷却速度比短焊缝的冷却速度慢，特别在短焊缝的末端冷却速度较大，大约是长焊缝中部冷却速度的两倍。

(8) 层数影响 在实际焊接生产中，较厚的钢板多数采用多层焊接，其中第一层的冷却速度最大，其次是最后一层焊缝，其余各层都有依次热处理作用，通常进行长段多层焊时，如果第一层和最后一层不产生淬火组织，则其他各层将不会产生淬火组织。这表明，估算第一层和最后一层的冷却速度具有重要意义。

二、焊接热循环对组织的影响和控制途径

焊接热循环可分为加热段、高温停留段和冷却段，各段的参数特性都会对组织产生不同的影响。

在加热段加热速度愈快，峰值温度愈高，就会使热影响区的晶粒愈粗大。而在高温 (1100°C 以上) 停留时间越长，热影响区的宽度和晶粒尺寸就愈大。冷却段的冷却速度对热影响区组织转变和最终性能起着决定作用，特别是 800°C 到 500°C 温度区间的冷却时间，当冷却速度 ω_c 提高到一定程度后，即会出现非平衡组织，如贝氏体、马氏体，冷却速度愈快也易使组织硬化和产生裂纹。

对热循环的控制通常从焊接线能量及预热和层间温度选择两方面着手，对焊接线能量的大小应控制适当，不能偏高或偏低。过高的线能量虽能避免快速冷却，但会增加在高温的停留时间，而造成低塑性粗大的结晶组织。当线能量过低时，虽能缩短在高温的停留时间，但会使冷却速度过快而产生硬又脆的马氏体组织，甚至出现裂纹。为此线能量应有上、下限。

对有淬火倾向的低合金高强度钢，预热可降低焊缝和热影响区的冷却速度，而不会延长在高温的停留时间，不会使晶粒变粗。

焊接中的层间温度,是指焊后一道焊缝前,上一条焊道的最低温度。控制层间温度的作用与预热相同,但过高会使在高温区停留的时间过长。因此一般控制层间温度不低于预热温度,但不宜过高。如低合金钢焊接,层间温度一般控制在 200°C 以下;对高强钢,若钢种易于过热而不易淬硬时,层间温度应尽量降低,若钢种不易过热而有一定淬硬倾向时,层间温度应控制得适当高一些。对于多数低碳、低合金高强钢,层间温度一般与预热温度相同。

关于降低冷却速度,提高预热温度比提高线能量更有利,不致明显增大高温持续时间。

第三节 焊缝的组织 and 性能

焊缝金属是由熔池的液态金属凝固而成,在熔焊条件下;通常由填充金属和部分母材组合而成,其组成比例(熔合比)取决于焊接工艺条件。熔池从高温冷却到常温,要经过两次组织变化,第一次是从液态开始凝固的结晶过程,第二次是当焊缝金属温度低于相变时发生的组织转变,称为焊缝的二次结晶。常温下的焊缝组织是固态相变后的二次结晶组织。焊缝组织除与化学成分有关外,在很大程度上取决于焊缝金属的两次结晶,而焊缝金属的性能又与焊缝金属的组织有着密切的联系。

一、焊缝的一次结晶与组织

1. 一次结晶的特点

当焊接热源离开后,熔池的热量逐渐减少,而传出的热量越来越多,熔池金属就由熔合线向导热相反的方向开始凝固结晶,焊缝结晶过程和一般的金属结晶一样,也遵循晶核形成和晶粒长大的规律,然而它也有自己的特殊之处。

(1) 熔池冷却速度大 焊接熔池体积小,除电渣焊外,一般熔池金属重量不超过 100g ,周围被冷却金属和环境介质所包围,故熔池的冷却速度很大,这使含碳高、合金元素较多的钢种和铸铁等,容易产生硬化组织及焊道上的裂纹。

(2) 金属处于过热状态 熔池中液态金属的温度比一般铸锭的温度要高,对于低碳合金钢,熔池的平均温度约为 $(1770 \pm 100)^{\circ}\text{C}$,熔滴的温度可达 2300°C 。而一般铸锭的浇铸温度很少超过 1550°C 。由于液体金属的过热程度大,合金元素的烧损比较严重,使熔池中作为非自发晶核的质点大为减少,这也是促使焊缝中柱状晶得到发展的原因之一。

(3) 熔池中心和边缘的温度梯度大 熔池中心液体金属的温度高,而熔池边缘凝固界面散热快,冷却速度大,因而使熔池结晶一般都处于很大的温度梯度下进行,熔池中的液体金属在凝固时,先在熔池边缘熔合区母材晶粒上,沿着与散热相反的方向以柱状形态向焊接熔池中心生长,直到相互阻碍时停止,使焊缝不易得到等轴晶,因而致使焊缝中的柱状晶得到很大的发展。

(4) 熔池是在运动状态下结晶,带有周期性

一般熔化焊时,熔池是以等速随热源而移动。在熔池中金属的熔化和结晶过程是同时进行的,如图 2-5 所示,在熔池的前半部 abc 进行熔化过程,而熔池的后半部 cda 进行结晶过程。通常靠近已冷金属处先行结晶,形成沿金属熔池轮廓的一层结晶层,并放出大量的凝固热,使以后的散热条件变坏,结晶过程暂时停顿,只是在液态金属进一步冷却后,才有下一层结晶出现,整

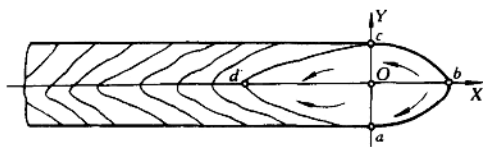


图 2-5 熔池运动状态结晶

个焊缝金属的结晶过程是有顺序地、间断地进行的。

2. 焊缝的凝固偏析

焊缝凝固过程是一个不平衡的过程。由于焊缝的结晶冷却速度很快，在每一温度下固相内的化学成分来不及趋于一致，而在相当大的程度上保持着由于结晶先后而产生的成分不均匀性。此外，一些非金属夹杂物在结晶过程中来不及浮出而残存在焊缝的内部。所有这些，对焊缝金属的性能都有很大的影响。

低碳钢和低合金钢焊接熔池中，除溶有碳外，还溶有锰、硅、铝、铜、钛、钒、铌、铬、镍等合金元素，以及硫、磷等杂质元素，这些元素称为溶质元素。在不平衡的冷却条件下结晶时，先结晶的中心部分含溶质元素较低，后结晶的固相表面含溶质元素较高，这就产生了偏析现象——合金中化学成分的不均匀性。一般焊缝中的偏析主要有微观偏析、宏观偏析和层状偏析三种。

(1) 微观偏析 焊缝结晶时，在一个晶粒的外部 and 中心部位成分也不同，这种化学成分不均匀现象叫微观偏析，又称晶内偏析。

先结晶的固相（晶粒中心）含溶质浓度较低，是熔点较高的较纯金属，而后结晶的晶粒表面含溶质的浓度较高，并富集了较多熔点较低的合金元素和杂质。由于这种微观偏析的存在，而使晶粒之间的联系在结晶过程中显得比较脆弱，当存在焊接拉伸应变时，就成为热裂纹之源。液、固相线之间距离越大，微观偏析就越严重。低碳钢的微观偏析不很明显，而高碳钢、高合金钢的液、固相线距离很大，微观偏析就很严重。

(2) 宏观偏析 在整个焊缝内化学成分不均匀的现象，叫做宏观偏析，又称区域偏析。

焊接时，由于熔池中存在激烈的搅拌作用，同时焊接熔池不断向前移动，不断加入新的液体金属，因此焊缝结晶后的宏观偏析不会像铸锭那样有大面积的区域偏析。但是，由于各部分的温度不均匀，散热条件不一样，在焊缝结晶时，随柱状晶体继续长大和推移，会把溶质或杂质“赶”向熔池中心，使中心的溶质浓度增加。继续不断凝固，中心部分浓度不断增加，从而在最后凝固时产生很高程度的偏析。在不同形状焊缝中的宏观偏析见图 2-6。

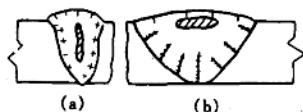


图 2-6 不同形状焊缝中的宏观偏析

当焊缝的形状系数 ϕ 较小时，如 $\phi \leq 1$ ，则杂质将集中于焊缝中间，见图 2-6 (a)；当 ϕ 较大时，焊缝有足够的宽度，则杂质将集中在焊缝上部，见图 2-6 (b)。

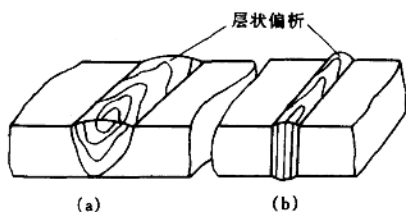


图 2-7 焊缝上的层状偏析

(a) 手弧焊；(b) 电子束焊

(3) 层状偏析 焊缝断面经浸蚀之后，可以发现颜色深浅不同的分层组织，这是由于凝固过程中，晶粒成长速度发生周期性变化而引起的化学成分不均匀性，称为层状偏析（见图 2-7）。

从微观方面分析，柱状晶的长大过程可分为两个阶段：第一阶段是晶粒主干伸向过冷的液体，这个阶段的成长速度是较大的；第二阶段是一方面主干继续伸向液体，同时还向上、下、左、右方向横向生长，这时整个晶体向前推进的速度就会缓慢下来。此外，由于快速长大时所释放出的结晶潜热，也会使晶体长大的速度下降。

当晶体快速长大时,在结晶前沿的液体金属中,溶质浓度较高。在随后的慢速长大阶段,结晶前沿液体金属因来不及向熔池扩散,其溶质浓度就较低。这样周期性地起伏,凝固界面前沿的液体金属成分,也发生周期性变化。分层组织中一层的成分较纯,含溶质浓度较低,而另一层则含溶质浓度较高。

层状偏析常集中了一些有害元素,缺陷也往往出现在偏析层中,它使焊缝的机械性能不均匀,抗腐蚀性能也不一致。

3. 改善焊缝金属一次结晶的途径

焊缝金属的一次结晶存在粗大的柱状结晶组织和化学成分不均匀等问题,对焊缝的性能是有害的,不但会降低焊缝强度,更主要的会降低焊缝的冲击韧性,因此必须设法改善焊缝金属的结晶状态,尽可能保证一次结晶后得到良好的焊缝组织。

(1) 通过焊接工艺条件来改善焊缝结晶 主要是通过熔池的冷却速度和形状尺寸来影响、控制结晶过程。影响较大的因素是焊接电流、焊接速度、工件预热以及散热条件。

在其他条件不变时,降低焊接电流可缩小熔池体积,减小熔合线附近过热程度,加快冷却速度并细化晶粒。随着电流的降低,熔池深度也将减小,易形成浅而宽的焊缝,从而减小了偏析的危害,这也正是当工件厚度很大时,用多层焊比大电流的单层焊质量好的原因之一。

焊接速度增大时,晶粒成长平均线速度也增加,会加快结晶,以致使焊缝的一次结晶组织显著细化。

(2) 进行变质处理 向熔池中加入微量的钛、钒、钼、铌、铝、氮等元素,进行变质处理,是改善焊缝金属一次结晶的有效方法之一。这些变质剂可在熔池中形成大量难溶且具有弥散强化的质点,相当于增加了大量晶核,从而使晶粒细化,既保证了塑性,又提高了强度。有一些变质剂,则能吸附到已经形成的结晶表面,阻碍它长大,也会起到细化晶粒的作用。当然随着合金元素的增加和互相影响,也会导致焊缝合金元素分布的不均匀和偏析。通常变质处理在奥氏体钢和铝合金等焊接时应用较多。

(3) 振动结晶 在熔池结晶过程中引入振动(机械振动、高频超声振动或电磁振动),一方面可使熔池金属中成长的晶粒遭到振动而破碎,也增加了结晶中心细化了晶粒;另一方面也起到了搅拌作用,使成分均匀,气泡和夹杂物快速浮出,效果显著。但因需要复杂设备,成本高,效率低,给生产应用带来许多困难。然而从发展前途看,仍是改善焊缝一次结晶组织的有效方法。

二、焊缝金属的二次结晶与组织

焊缝金属凝固一次结晶后,通常生成奥氏体柱状晶组织,随后继续冷却转变,进一步相变后形成最终组织,也是室温下的组织形态,称为焊缝金属的二次结晶组织。它不仅与焊缝金属的化学成分有关,冷却条件和热处理规范都对它有直接与重要的影响。因此,不同钢材在不同焊接工艺条件下,最后所得的焊缝组织是不同的。

1. 各种材料的焊缝金属二次结晶组织

(1) 低碳钢的焊缝组织 低碳钢的焊缝金属含碳量很低,其二次结晶组织为粗大的柱状铁素体加少量珠光体,高温停留时间过长时,铁素体还具有魏氏组织特征。

多层多道焊缝,由于后一焊道对前一焊道的再加热作用,部分柱状晶消失,形成细小的等轴晶粒,其组织为细小的铁素体加少量珠光体。

(2) 低合金高强度钢的焊缝组织 合金元素含量较少的低合金钢,其焊缝组织与低碳钢焊缝相近。一般冷却条件下为铁素体加少量珠光体;冷却速度增大时,也会产生粒状贝氏体。

合金元素含量较多的、淬透性较好的低合金高强度钢，其焊缝组织在焊态下为贝氏体或低碳马氏体，高温回火后为回火索氏体。

(3) 钼和铬钼耐热钢的焊缝组织 合金元素较少（铬 $<5\%$ ）的耐热钢，在焊前预热、焊后缓冷的焊接条件下，得到珠光体和部分淬硬组织，高温回火后可得到完全的珠光体组织。

含合金元素较多（含铬 $5\% \sim 9\%$ ）的耐热钢，当焊接材料成分与母材相近时，在焊前预热、焊后缓冷的焊接条件下，由于合金元素含量高，其焊缝组织为贝氏体组织，也可能出现马氏体组织。高温回火后可得到回火索氏体组织。当采用奥氏体不锈钢焊接材料时，则焊缝组织主要为奥氏体。

(4) 不锈钢的焊缝组织 奥氏体型不锈钢的焊缝组织，一般为奥氏体加少量铁素体（ $2\% \sim 6\%$ ）。

铁素体型不锈钢的焊缝组织，当焊接材料成分与母材相近时为铁素体；当采用铬镍奥氏体焊接材料时为奥氏体。

马氏体型不锈钢的焊缝组织，当焊接材料成分与母材相近时，焊态及回火后的组织分别为马氏体和回火马氏体；当采用铬镍奥氏体焊接材料时为奥氏体。

(5) 低温钢的焊缝组织 含合金元素较少的无镍铬或含镍的铁素体型低温钢，其焊缝组织为铁素体加少量珠光体。当焊接材料中含合金元素高时，焊缝组织主要为粒状贝氏体。

含 9% 镍的低碳马氏体型低温钢，当焊接材料成分与母材相近时，焊缝组织在回火以后为含镍铁素体和富碳奥氏体；当采用镍基合金焊接材料时，焊缝组织主要为奥氏体。

高合金无镍铬或铬镍奥氏体型低温钢，其焊缝组织主要是奥氏体，有时也含有少量铁素体。

2. 改善二次结晶组织

当采用改善一次组织还不能满足焊接接头的性能要求时，可以考虑采用改善二次组织的方法。

(1) 焊后热处理 合金结构钢焊件，一般需经热处理之后才能发挥材料的潜力，可使马氏体分解，将过饱和部分析出，从而提高焊缝金属的性能。对较大、较长的工件进行整体热处理有困难时，可用局部热处理代替。

(2) 多层焊接 焊接相同厚度的工件时，采用多层焊接可以提高焊缝金属的质量。一方面由于每层焊缝断面的变小，改善了一次结晶的条件；另一方面更主要的原因是每层焊缝之间具有附加热处理的作用，因而改善了二次组织。

(3) 锤击焊道表面 锤击可不同程度地使前一层焊道（或坡口表面）晶粒破碎，使后一层焊缝晶粒细化。同时，逐层锤击，可以使焊缝产生塑性变形，而降低残余应力。因此，锤击焊道表面会提高焊缝的机械性能（特别是冲击韧性）。

(4) 跟踪回火 所谓跟踪回火，就是每焊完一层立即用气焊火焰加热焊道表面，温度控制在 $900 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，这样，在焊道表层下 $3 \sim 10\text{mm}$ 范围内，不同程度地起了回火的作用。

如果手弧焊道的平均厚度约 3mm ，则跟踪回火对前三层焊道有不同的热处理效果：对最上层焊道（ $0 \sim 3\text{mm}$ ）进行了相当于正火处理；对中层焊道（ $3 \sim 6\text{mm}$ ）进行了约 750°C 左右的高温回火处理；对下层焊道（ $6 \sim 9\text{mm}$ ）进行了 600°C 左右的回火处理。在考虑多层焊的热处理效果后，则每条焊道在焊接过程中将经受两次正火处理和若干次回火热处理，焊接质量将会显著提高。

跟踪回火用中性焰，将焰心对准焊道成“之”字形缓慢向前移动（见图2-8）。火焰横向

范围应比焊道宽约 2~3mm。

三、焊缝金属组织与性能的关系

1. 一次结晶组织与性能的关系

焊缝金属的一次结晶过程及其组织特征, 不仅影响焊缝金属的抗裂性能, 而且对焊缝金属的强度、塑性、韧性和抗腐蚀能力等都有一定的影响。

当焊缝一次结晶组织为细的柱状晶时, 其性能要比粗大的柱状晶好, 粗大的柱状晶不仅降低焊缝的强度, 而且降低其塑性和韧性。柱状晶的粗细对采用碱性焊条焊接的低碳钢焊缝的冲击韧性影响见图2-9。

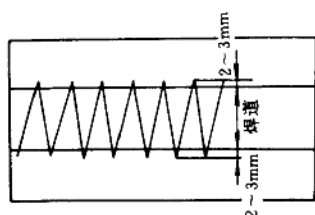


图 2-8 跟踪回火的运行轨迹

从焊缝中的偏析来看, 偏析越严重, 化学成分越不均匀, 焊缝的抗裂性能越差, 机械性能和耐腐蚀性能的不均匀程度也越大。当硫、磷等杂质元素偏析严重, 且集中在焊缝中心线处, 则很容易产生热裂纹。弧坑处的凝固组织, 由于断弧时熔池中心处于没有热源的条件下凝固, 往往是粗大的树枝晶, 且又是最后凝固, 偏析严重, 很容易出现弧坑裂纹。层状偏析则使焊缝内机械性能不均匀, 化学腐蚀性能也不一致。

2. 二次结晶组织与性能的关系

由于焊缝的化学成分、焊接工艺条件和热处理规范的不同, 焊缝金属的二次结晶组织也各不相同。二次结晶组织的类型、特征和形态, 都直接影响着焊缝金属的性能。

从强度来看, 马氏体强度最高, 贝氏体次之, 然后是铁素体加珠光体, 铁素体和奥氏体强度较低。

从塑性和韧性来看, 奥氏体在温度下降时无明显的脆性转变现象, 塑性和韧性较其他组织为好, 铁素体加珠光体组织次之。粒状贝氏体强度较低, 但具有较好的韧性, 下贝氏体具有较高的强度, 又有良好的韧性, 而低碳马氏体则具有相当高的强度和良好的塑性和韧性相结合的特点。

从抗裂性来看, 铁素体加珠光体组织和奥氏体抗裂性较好, 奥氏体加少量铁素体双相组织比单相奥氏体具有更好的抗热裂性能, 贝氏体、贝氏体加马氏体对冷裂纹的敏感性最大。

此外, 细而均匀的焊缝组织, 其性能要比粗大而不均匀的好, 低碳钢焊缝过热形成的粗大的魏氏体组织使塑性和韧性降低。图 2-10 所示为不锈钢焊件中不同晶粒大小对延伸率的影响, 晶粒越细, 延伸率越高。

四、焊缝金属中的气体及其影响

焊接过程中, 焊接区内充满大量气体, 这些气体不断地与熔化金属发生冶金反应, 从而影响焊缝金属的成分和性能。

焊接区内气相的成分随着焊接方法、工艺参数、药皮或焊剂的种类不同而变化, 各种反应产生的气相成分主要有一氧化碳、二氧化碳、氢气、水蒸气、氮气和氧气, 其中对焊缝金属产生不利影响的气体, 主要是氢气、氧气和氮气。

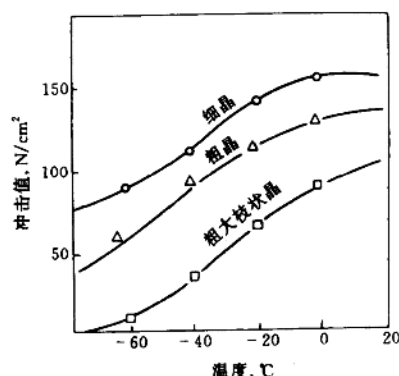


图 2-9 焊缝晶粒对性能的影响