第六章

6.1 焊接热循环 焊接热循环是在焊接热源的作用下焊件上某点的温度随时间 变化的过程这是一个升温，然后降温的过程。焊接热循环曲线如图6-2 所示的 曲线，可用函数 $T I=$$f(\mathbf{\Phi}t)$表示。焊接热循环与热处理的热过程相比，具有加热速度快、加热的峰值温度高、在某一温度的保温时间又非常短的重要特征。焊接热循环是表征焊接热源对母材金属的热作用和焊接热影响区组织性能的重要数据。

- 6.1.1 焊接热循环的主要参数
  - 1. 加热速度ω_{H}
  - 2. 加热的最高温度T_{m}
  - 3. 高温停留时间t_{H}
  - 4. 冷却速度 $\cdot\omega_{\mathrm{c}}\left(t_{8/5}\setminus us;t_{8/3};\setminus us;t_{100};\right)$
- 6.1.3 多层焊热循环
  - 1. 长段多层焊焊接热循环
  - 2. 短段多层焊焊接热循环

6.2 焊接热循环条件下的金属组织转变特点 在焊接热循环的作用下，热影响区的组织性能将发生变化。其相变的规律与热处理相似，由形核和晶核长大两个过程完成，符合经典的结晶理论。焊接热影响区相变的条件同样取决于系统的热力学条件，即新相与母相间的自由能之差。但由于焊接热过程的特点与热处理相比具有较大的差异，因此，焊接时的相变及组织变化也与热处理不同，这就使焊接时的组织转变具有一些特殊性。

- （1）加热温度高
- （2）加热速度快
- （3）高温停留时间短
- （4）自然条件下连续冷却
- （5）局部加热
- 6.2.1 焊接加热过程中的组织转变 焊接时的加热速度快、高温停留时间短，这对金属的相变温度和高温奥氏体的均质化过程必然带来显著影响
  - 1. 相变温度提高
  - 2. 奥氏体的均质化程度低
  - 3.焊接热影响区奥氏体晶粒的长大
  - 焊接热影响区的晶粒长大与焊接热输入、焊接热循环参数、钢材的化学成分及原始组织状态有关
    - （1）焊接热输入的影响　焊接热输入对热影响区晶粒长大有显著影响，它不仅影响奥氏体晶粒的大小，而且影响晶粒的分布。
  - 焊接热循环的影响
    - 1）加热最高温度
    - 2）高温停留时间（t_{H}）的影响。
    - 3）加热速度和冷却速度的影响。
    - 4）化学成分的影响。
- 6.2.2 焊接冷却过程中的组织转变焊接加热过程中热影响区形成的奥氏体在冷却过程中将发生分解转变转变的结果将最终决定热影响区的组织和性能
- 6.2.3 焊接条件下的连续冷却转变图及其应用

6.4.2 焊接热模拟试验机的原理及应用

- 6.4.3 焊接模拟试验方法的局限性
- 思　考　题
  - 1. 何谓焊接热循环？它有哪些特点？它的主要参数及其意义是什么？
  - 2. 焊接热循环条件下的金属组织转变特点有哪些？
  - 3. 分别叙述焊接加热及冷却过程中组织转变的特点。
  - 4. 焊接热影响区包括哪些区段？各区段的特点如何？
  - 5. 什么是焊接条件下的连续冷却转变图？什么是模拟焊接热影响区连续冷却转变图？它们各有什么用途？
  - 6. 易淬火钢及不易淬火钢的焊接热影响区组织分布各有何特征？
  - 7. 试述低合金钢焊接热影响区脆化及软化现象的产生原因。应当如何防止？
  - 8. 8.H_{max}的影响因素有哪些？
  - 9. 如何提高焊接热影响区的韧性？有哪些途径？
  - 10. 焊接热模拟试验的原理、作用是什么？它的局限性是什么？
- 7.1 焊接裂纹的危害及分类
  - 7.1.1 焊接裂纹的危害
  - 7.1.2 焊接裂纹的分类
    - 1. 按裂纹产生的部位和宏观形态分类
    - 2. 按裂纹产生的机理分类

7.2 焊接热裂纹

- 7.2.1 焊接热裂纹的一般条件
  - （1）结晶裂纹　产生在焊缝中，是在结晶过程中形成的。结晶裂纹主要产生在单相奥氏体钢、镍基合金、铝合金，以及含杂质较多的碳钢和低合金钢中。图7-3 所示为埋弧焊焊缝中的结晶裂纹。
  - （2）高温液化裂纹　产生在近缝区或多层焊的层间，是由于母材含有较多的低熔点共晶，在焊接热源的高温作用下晶间被重新熔化，在拉应力作用下沿奥氏体晶界发生的开裂现象 。图 7-4 所示为因科镍合金大刚度拘束试 板根部产生的高温液化裂纹。
  - （3）多边化裂纹　产生在焊缝或热影响区，是当温度降到固相线稍下的高温区形成的。它是由于在较高的温度和一定的应力条件下，晶格缺陷（位错和空位）迁移和聚集，形成二次边界，即所谓"多边化边界"。因为边界上堆积了大量的晶格缺陷，所以强度和塑性很低，在拉应力的作用下容易沿多边化边界开裂。多边化裂纹多发生在纯金属或单相奥氏体合金中。图7-5 所示为在奥氏体焊缝中的多边化裂纹。
- 7.2.2 结晶裂纹的主要特征
  - 结晶裂纹只产生在焊缝中，大多数呈纵向分布在焊缝中心，也有一些呈弧形分布在焊缝中心线的两侧，并与焊波呈垂直分布。纵向裂纹一般较长、较深，而弧形裂纹较短、较浅。弧坑裂纹一般也属于结晶裂纹，它产生在焊缝的收尾处。这几种裂纹在焊缝上的位置和形态如图7-6 所示。
  - 多数情况下在结晶裂纹的断口上可以看到氧化色彩。在扫描电镜下观察结晶裂纹的断口为典型的沿晶开裂特征。断口晶粒表面圆滑，这是由于晶粒的棱角在高温下局部熔融所致，这与冷裂纹断口有明显的区别。
- 7.2.3 结晶裂纹的形成机理
  - 1. 结晶裂纹产生的原因
    - 结晶裂纹的这种分布， 说明焊缝在结晶过程中晶界是薄弱地带 。 由金属学结晶理论可 知，先结晶的金属比较纯，后结晶的金属含杂质比较多，并富集在晶界。一般来讲，这些杂质所形成的共晶都具有较低的熔点。例如，当碳钢或低合金钢的焊缝含硫量偏高时，能形成FeS，并与铁发生作用而形成熔点仅有$988,\mathrm{^\circC}$的低熔点共晶。
    - 在焊缝金属凝固结晶的后期，低熔点共晶被排挤在柱状晶体交遇的中心部位，形成一种所谓"液态薄膜"，液态薄膜割断了某些晶粒之间的联系。焊缝凝固时，由于温度不均匀、外部拘束以及相变会使液态薄膜承受拉应力，结果就在这些部位形成了结晶裂纹，如图7-8所示。因此，液态薄膜是产生结晶裂纹的内因，而拉应力是产生结晶裂纹的必要条件。
  - 2. 结晶过程中金属塑性的变化
    - （1）液固阶段　如图7-9 所示，在熔池结晶的初始阶段，液相中开始出现晶核，并逐渐长大为晶粒，这时由于晶粒尚小、晶粒游离于液相之中，互不联系。此时液相的流动性很好，如果有一外力试图拉开缝隙，自由流动的液体会立即填满这个拉开的空隙。因此，液固阶段不会产生裂纹。
    - （2）固液阶段　随着结晶的继续进行，固相增多且逐渐长大，以至晶粒之间彼此接触。这时，尚未凝固的液体已经很少，呈薄膜状分布在晶粒之间，其本身既不能承受拉应力，又难以自由流动填补由拉应力所造成的晶粒之间的空隙，所以金属的塑性很小。如图7-9 所示，通常将处于固液阶段的温度区间 $ST_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{(B)}}T_{\mathrm{b}}T_{\mathrm{(L)}}T_{\mathrm{(S)}}T_{\mathrm{(B)}}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{(S)}}S$。在此温度区间内，稍有拉应力就可能出现裂纹。
    - （3）完全凝固阶段　此时金属已完全凝固，塑性已迅速回升，如果受到拉应力时就会表现较好的强度和塑性，很难发生裂纹。
  - 3. 结晶裂纹的形成条件
    - 是否产生结晶裂纹取决于焊缝金属的脆性温度区间$T_{\mathrm{(B)}}p_{\mathrm{min}}S$，以及脆性温度区间内的应变增长率。这三方面既相互联系、相互影响，又相对独立。必然产生裂纹。
    - （1）脆性温度区 $ST_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{(B)}}T_{\mathrm{(B)}}S$ 的大小主要取决于焊缝的化学成分、低熔点共晶的性质及分布、晶粒大小及方向性等。
    - （2）在脆性温度区内金属的塑性　在$ST_{\mathrm{B}}S$内焊缝金属的塑性越小，就越容易产生结晶裂纹。这也与焊缝的化学成分、偏析程度、晶粒大小以及应变相对于时间的变化率（应变速率）等有关。
    - （3）在脆性温度区内的应变增长率　在$ST_{\mathrm{B}}S$内，随着温度的下降，收缩产生的拉应力增大，因而应变的增长率也将增大，这就容易产生结晶裂纹。应变增长率的大小主要取决于金属的热能胀系数、接头的刚度、焊缝的位置、焊接热输入的大小以及温度场的分布等。
- 7.2.4 影响结晶裂纹的因素及防止措施
  - 1. 冶金因素对产生结晶裂纹的影响
    - （1）杂质和合金元素的影响　硫和磷在钢中能形成多种低熔点共晶（见表7-2），在结晶过程中极易形成液态共晶薄膜，使脆性温度区间的塑性大大下降；硫和磷非常容易偏析，大大增加了脆性温度区间的范围。图7-11 所示为各合金元素对铁结晶温度区间的影响，可见硫和磷是钢中最有害的元素。

6.3 焊接热影响区的组织和性能

- 6.3.2 焊接热影响区的性能 焊接热影响区的组织分布是不均匀的，从而导致热影响区性能也不均匀。焊接热影响区与焊缝不同，焊缝可以通过化学成分的调整再配合适当的焊接工艺来保证性能的要求，而热影响区性能不可能进行成分上的调整，它是由焊接热循环作用引起的不均匀性问题。对于一般焊接结构，焊接热影响区的性能主要考虑硬化、脆化、韧化、软化，以及综合的力学性能、耐蚀性和疲劳性能等，这要根据焊接结构的具体使用要求来决定。
- 1. 焊接热影响区的硬化
  - （1）碳当量　碳当量用符号$\mathrm{C_{eq}}$或CE 表示，反映了钢中化学成分对热影响区硬化程度的影响，它是把钢中合金元素（包括碳）的含量，按其作用折算成碳的相当含量（以碳的作用系数为1），作为粗略地评价钢材焊接性的一种参考指标。
  - （2）碳当量及冷却时间 $t_{8/5}H_{\mathrm{max}}H_{\mathrm{max}}\mathrm{P_{cm}}\operatorname{CE}_{\mathrm{(IW)}}$的增加，硬度也随之增加，即冷硬倾向增加。经过对所测数据进行回归分析可得如下关系式：
  - （3）焊接热影响区最高硬度的计算公式　关于钢材化学成分和冷却条件与硬度的关系，国内外都做过许多研究，并且相继建立了许多数学模型。
  - 2. 焊接热影响区的脆化
    - （1）粗晶脆化　粗晶脆化主要出现在过热区，是由于奥氏体晶粒严重长大造成的。一般晶粒越粗，韧脆转变温度越高，如图6-42 所示。晶粒长大受多种因素的影响，其中钢的化学成分、组织状态和加热温度及时间的影响最大。
    - （2）淬硬脆化　淬硬脆化一般出现于碳和合金元素含量较多的易淬火钢（如45 钢、30CrMnSiA 等）的焊接热影响区，其脆化主要是热影响区形成硬脆的孪晶马氏体造成的。
    - （3）析出相脆化　对于某些金属或合金，在焊接冷却、焊后回火或者时效过程中，从过饱和固溶体中析出氮化物、碳化物或金属间化合物时，引起金属或合金脆性增大的现象，称为析出相脆化
    - （4）M-A 组元脆化　研究发现，高强度钢在加热到熔点后缓冷，或承受最高温度位于铁素体和奥氏体两相区的热循环后，其组织中含有岛状的马氏体。该组织最初被认为是局部形成的高碳马氏体，后来经电镜和衍射分析表明，该组织一般情况下含有残留奥氏体。因此目前一般将其称为马氏体-奥氏体组元，简称M-A 组元。
    - （5）组织遗传脆化　调质钢淬火所形成的马氏体和贝氏体等是从奥氏体中按有序方式生成的非平衡组织。这些非平衡组织再次在快速加热条件下，又会按有序转变方式生成新的奥氏体。新生成的奥氏体将与原非平衡组织有一定的位相关系，继承了原奥氏体晶粒的大小、形状和取向，这就是组织遗传现象。
    - （6）热应变时效脆化　钢材因经受塑性变形产生时效过程，而发生脆化的现象叫应变时效脆化。根据近年来的研究，焊接接头中发生的应变时效脆化主要有静应变时效和动应变时效两大类。
- 2. 易淬火钢的组织分布
  - （1）熔合区　紧邻焊缝的母材部位，又叫半熔化区（加热温度在液相线和固相线之间）。此区范围很窄，一般只有几个晶粒宽。由于该区化学成分和组织性能存在严重的不均匀性，对接头的强度、韧性有很大的影响，在许多情况下是产生裂纹和脆性破坏的发源地。因此，引起了人们的普遍重视。
  - （2）过热区　加热温度在固相线以下到晶粒开始急剧长大的温度（一般指$1100\mathrm{^\circ C}20\%\simS30\%$。与熔合区一样，该区也容易产生脆化和裂纹。过热区和熔合区都是焊接接头的薄弱部位。
  - （3）相变重结晶区（正火区）　该区的加热温度范围是$A c_{3}S$至晶粒开始急剧长大的温度
  - （4）不完全重结晶区　该区的加热温度处于$A c_{1}\simA c_{3}S$之间，因此在加热过程中，原来的珠光体全部转变为细小的奥氏体，而铁素体仅部分溶入奥氏体，剩余部分继续长大，成为粗大的铁素体。冷却时奥氏体变为细小的铁素体和珠光体，粗大的铁素体被保留下来。所以，此区的特点是晶粒大小不一组织不均匀力学性能也不均匀
  - （1）完全淬火区　该区的加热温度处于固相线到$A c_{3}S$之间。由于这类钢淬硬倾向大，冷却时将淬火形成马氏体。在焊缝附近的区域（相当于低碳钢过热区的部位），由于晶粒严重长大，会得到粗大的马氏体组织，而相当于正火区的部位则得到细小的马氏体组织。这个区域的组织只是粗细不同，均属于同一组织类型（马氏体），因此统称为完全淬火区。
  - （2）不完全淬火区　该区的加热温度在$A c_{3}\simA c_{1}S$之间。在快速加热条件下，珠光体（或贝氏体、索氏体）转变为奥氏体，铁素体很少溶入奥氏体，未溶入奥氏体的铁素体将得到进一步长大。因此，冷却时奥氏体会转变为马氏体，粗大的铁素体被保留下来，并有不同程度的长大，从而形成了马氏体和铁素体的混合组织，故称为不完全淬火区。当母材含碳量和合金元素含量不高或冷却速度较慢时，也可能出现贝氏体、索氏体或珠光体。
  - （3）回火软化区　出现于调质状态母材的热影响区，回火软化区内的组织性能发生变化的程度取决于焊前调质状态的回火温度 。 例如， 母材在焊前调质时的回火温度为 $5T_{\mathrm{t}}A c_{1}\sim T_{\mathrm{t}}T_{\mathrm{t}}T_{\mathrm{t}}S$的部位，组织性能将不发生变化。
- 3. 焊接热影响区组织的分析
  - （1）母材的化学成分及原始状态　母材的化学成分是决定热影响区组织的主要因素。对（如Q345 等），淬硬倾向较小，其热影响区主要为铁素体、珠光体和魏氏组织，并可能有少量的贝氏体或马氏体。 对于淬硬倾向较大的钢种，其热影响区主要为马氏体，并依冷却速度的不同可能出现贝氏体、索氏体等组织。
  - （2）焊接工艺条件　焊接工艺条件主要指焊接方法、焊接热输入和预热温度等。它们主要影响焊接的加热速度、高温停留时间和冷却速度，从而在一定成分条件下就决定了奥氏体晶粒的长大倾向、均质化程度和冷却时的组织转变。因此，对于一定的钢种，高温停留时间越长、冷却速度越快，得到的淬硬组织所占的比例越大。
  - （3）结合模拟焊接热影响区连续冷却转变图确定热影响区的组织　模拟焊 接热影响区连续冷却转变图把焊接工艺 条件与焊后的组织性能联系起来，是判定热影响区组织的重要依据。只要根据焊接工艺条件获得$t_{8/5}S$后，便可通过相应的模拟焊接热影响区连续冷却转变图求出该条件下热影响区（主要指熔合区）各组织的类型及其所占的比例。
  - （4）借助于其他分析方法　对于同一类组织，尚可分为多种组织类型。如铁素体按形态不同可分为先共析铁素体、侧板条铁素体、针状铁素体和粒状铁素体等。对于不同形态的组织，还应辅以显微硬度测试、电镜分析以及按组织所处的位置及分布状态等加以确认。
- 4. 焊接热影响区的软化
  - 对于焊前经冷作硬化或热处理强化的金属或合金，焊后在热影响区总要发生软化或失强现象。最典型的就是调质高强度钢的过回火软化和沉淀强化合金（如硬铝）的过时效软化。这种软化现象的发生会降低焊接接头的承载能力，对于重要的焊接结构，还必须经过焊后强化处理才能满足要求
- 5. 焊接热影响区的力学性能
  - 在焊接热循环的作用下，焊接热影响区的组织和性能是不均匀的。
- 采用合适的焊接工艺
  - 1）确定最佳的$t_{8/5}t_{8/5}S$的大小将最终决定热影响区的组织和性能。
  - 2）采用多层多道焊。单道焊时，热影响区仅经受一次热循环。但在多层多道焊时，后续焊道对前层焊道的热影响区有正火或高温回火作用，从而使组织性能得到改善。对于表面焊道的热影响区，最好采用附加"回火焊道"（如TIG 重熔焊道）的方法，改善其韧性。
  - 3）采用焊后热处理。

Presented with xmind