

# 钢焊接时裂纹的形成种类和机理（一）

## 1、焊接时的温度循环图

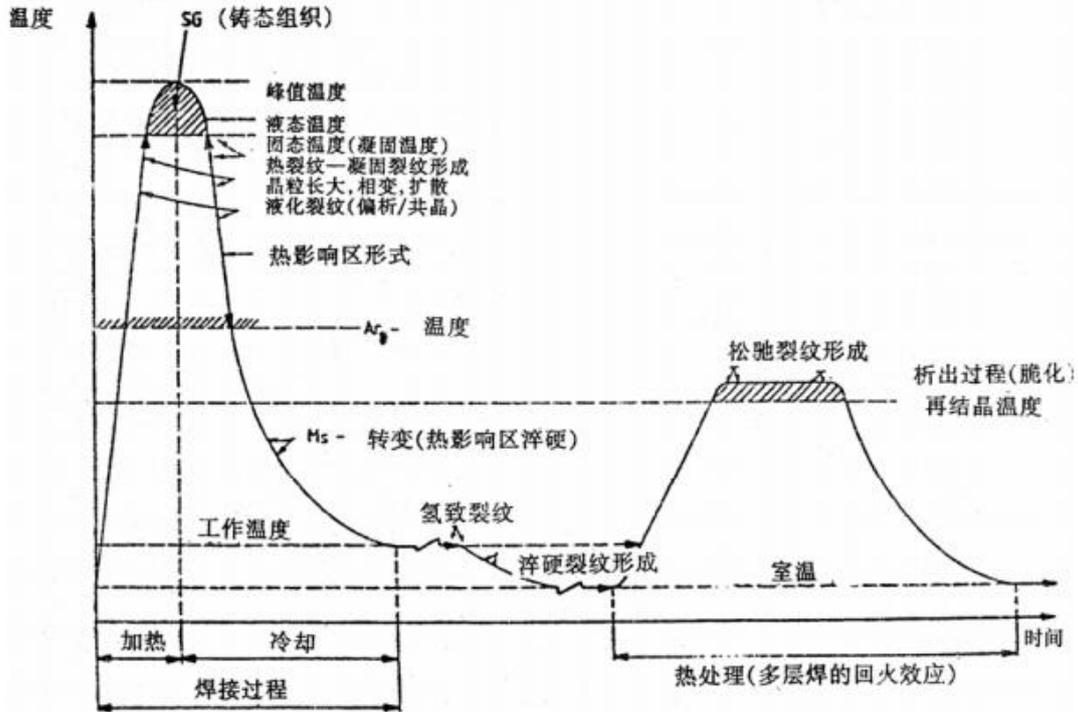
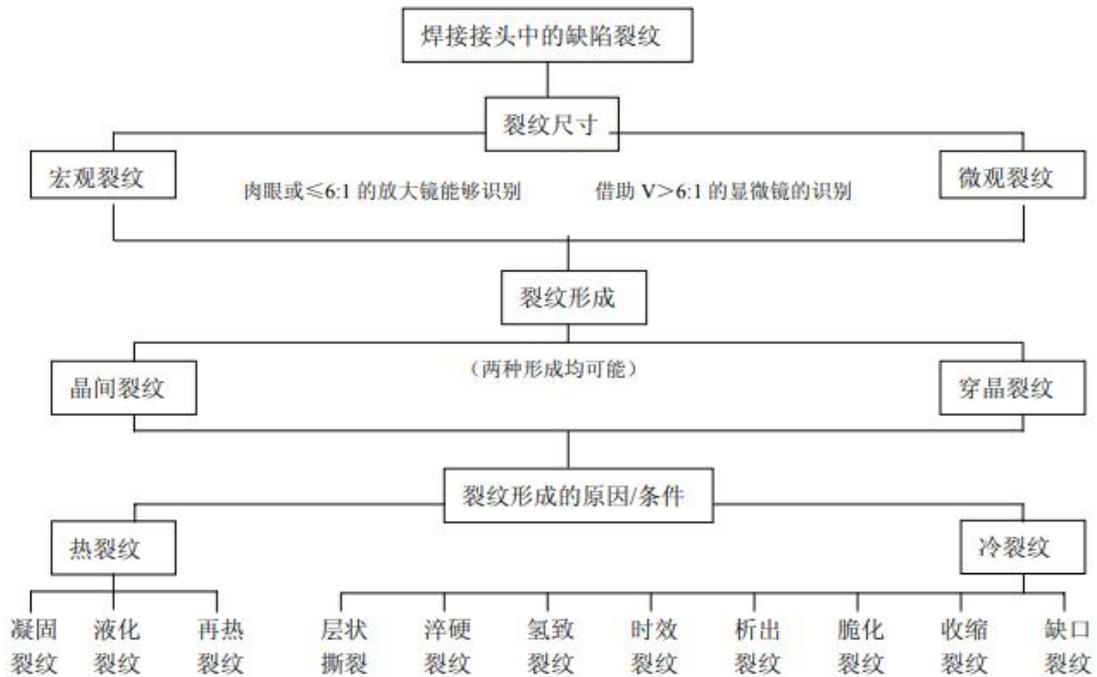


图1 焊接温度循环图

## 2、焊接接头中的裂纹



## 3、接头中裂纹的形态和分布

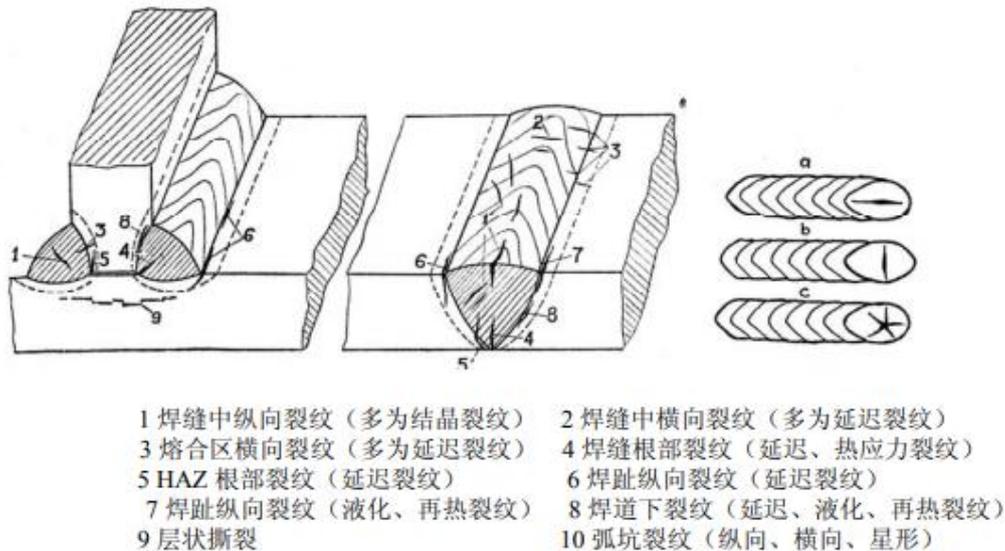


图2 焊接接头中的裂纹

#### 4、热裂纹及形成机理

热裂纹是在焊接时高温下产生的，特征是沿晶界开裂。

\*结晶(凝固)裂纹是在焊缝结晶过程中，在固相线附近温度，由于凝固金属的收缩，残余液体金属不足而产生；主要产生在含杂质较多的碳钢、低合金钢和单相奥氏体钢焊缝中。

\*高温液化裂纹是在焊接热循环峰值温度作用下，在近缝区或多层焊的层间部位低熔共晶被重新熔化，在拉伸应力作用下开裂；主要发生在铬镍高强钢、奥氏体钢中，母材和焊丝中 S、P、Si、C 偏高时液化裂纹倾向严重。

\*多边化裂纹是在焊缝或近缝区，在固相线稍下温度的高温区，刚凝固的金属中存在晶格缺陷(形成多边化边界)，使强度和塑性很差，在很小的拉伸应力下开裂；多发生在纯金属或单相奥氏体合金中。

\*高温低塑性裂纹是冷却到一定高温范围时，应变与冶金元素交互作用引起塑性低落，沿晶开裂。

\*再热裂纹是在消除应力热处理或在服役过程中，在热影响区粗晶部位发生的；多发生在低合金高强钢、奥氏体钢中。

##### 4.1 凝固裂纹(结晶裂纹)

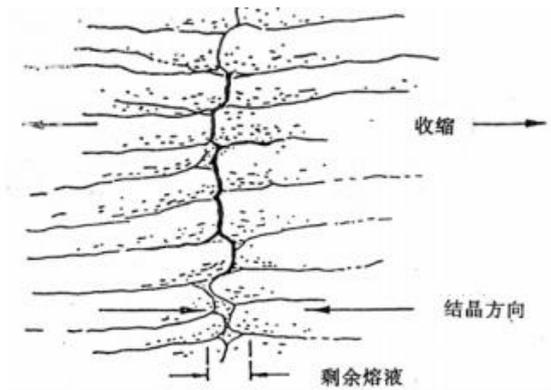
焊缝上凝固裂纹(结晶裂纹)的形成：

在焊缝冷却过程中，先结晶的金属较纯，后结晶的金属含杂质较多，并富集在晶界，所形成的共晶都具有较低熔点，如 FeS 与 Fe 共晶温度 988℃)。在液相线和固相线之间凝固区是一个非常关键的区域，此时在熔池 1 中长大的柱状晶要联接在一起，结晶后期，已经长大的晶粒阻碍了尚存在的液态金属的流动，低熔共晶物被排挤在柱状晶相遇的中心部位，形成“液态薄膜”，同时由于收缩受到了拉伸应力，可能会在这个薄弱地带开裂。

碳钢、低合金高强钢和不锈钢中的 P、S、Si、Ni、B、Zr 都能形成低熔点共晶 熔池结晶的阶段：

- 1) 液固阶段：少量晶核，相邻晶粒之间有液态金属自由流动，不会开裂；
- 2) 固液阶段：固相彼此接触，液态金属少，流动困难，稍有拉伸应力就可能产生裂纹；

3) 完全凝固阶段：有较高的强度和塑性，即使有应力也不易开裂。



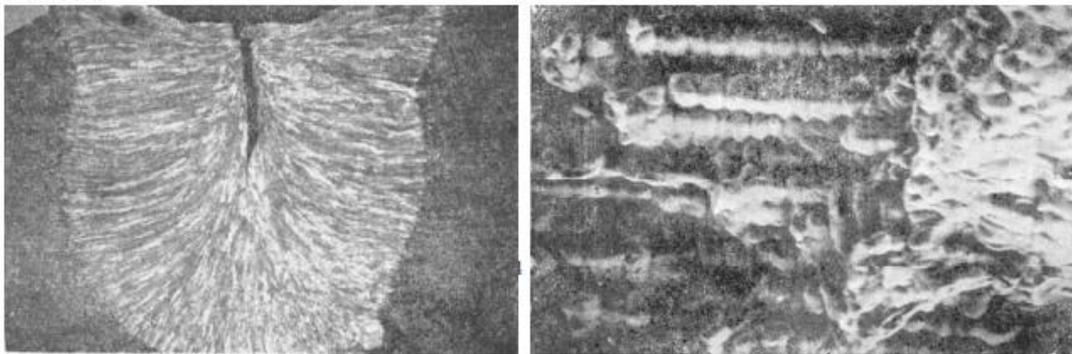
p-塑性 y-流动性 TL-液相线 Ts-固相线 Tb-脆性温度区

图3 热裂纹的形成

#### 结晶裂纹的形态：

结晶裂纹都是沿焊缝树枝状晶的交界处发生和发展，一般产生在焊缝中心位置，最常见的是沿焊缝中心纵向开裂，也有时发生在焊缝内的两个树枝晶之间。裂纹面上可以看到氧化色彩。

断口表面扫描电子图像可以看到完整的、成束排列的树枝晶，表面光滑，是高温下液相结晶形成的自由表面。

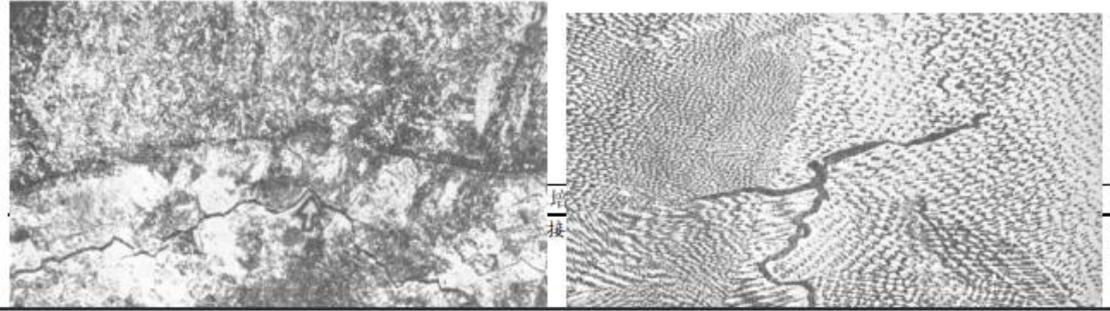


#### 热影响区内液化裂纹的形成：

焊接过程中的受热使近缝区(粗晶区)被加热到接近材料固相线附近的温度。这样会使晶界上的低熔点物质熔化并以薄膜的形式分布在晶粒的表面上。在较高的收缩应力的作用下，会使这种已经削弱了的晶粒之间的连接沿晶界造成开裂。

#### 焊缝上液化裂纹的形成：

多层焊时，先焊的焊道受后焊焊道的热作用(形成粗晶区)，会受到与热影响区的部分区域相同的影响。因此在较高的峰值温度作用下会使晶界上的低熔点共晶物熔化并在收缩应力的作用下造成开裂。



在近缝区产生的液化裂纹，大致与熔合线平行

多层焊缝中产生的液化裂纹，沿柱状晶发展

图 5 液化裂纹走向

液化裂纹的特点和产生部位：

液化裂纹是奥氏体晶界开裂的微裂纹，尺寸很小(0.5mm 以下)，一般只有在金相磨片上作显微观察才能发现，可能成为冷裂纹、再热裂纹脆性破坏和疲劳断裂的发源地。常出现在焊缝熔合线的凹陷区和多层焊的层间过热区。(如图 6)

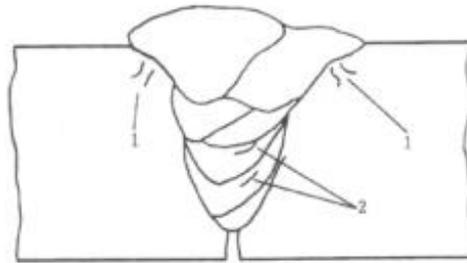
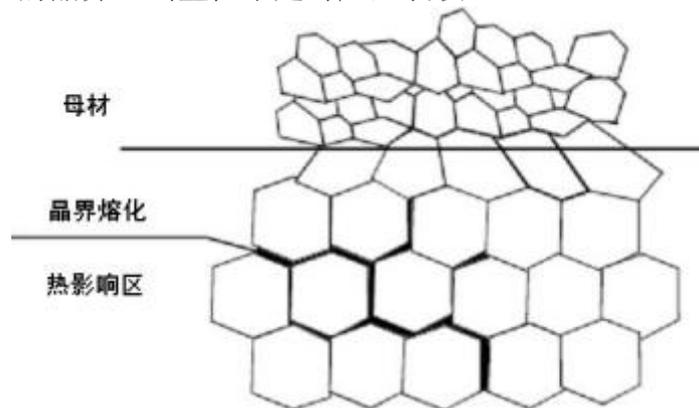


图6 1 凹陷区 2 多层焊层间

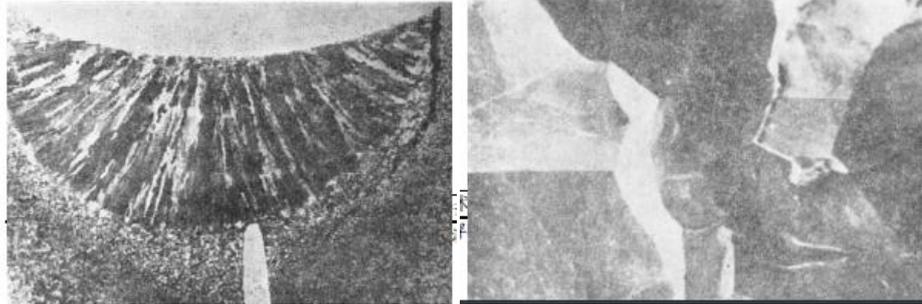
#### 4.3 再热裂纹

有些含有沉淀强化元素的低合金高强钢和高温合金，在焊后热处理时，因为杂质(P、S、Sb、Sn 等)在晶界析集而造成脆化，晶内析出沉淀强化元素(Cr、Mo、V、Ti、Nb)的碳氮化物而使晶内强化，应力松弛过程中，变形产生在粗晶区应力集中部位的晶界，当塑性不足时产生裂纹。



再热裂纹都是发生在热影响区的粗晶区，呈晶间开裂，裂纹沿熔合线母材侧粗晶晶界扩展，遇到细晶就停止扩展。

产生再热裂纹有一个敏感温度区间，奥氏体不锈钢约在 700-900℃，低合金钢约在 500-700℃。热处理前，焊接区存在较大残余应力和应力集中。含有沉淀强化元素的材料才对再热裂纹敏感。



热处理后在焊趾和焊根应力集中部位产生再热裂纹

再热裂纹断口形貌，沿晶断裂特征

图 8 再热裂纹产生部位和形貌特征

## 5、热(结晶)裂纹的影响因素及防治措施

5.1 一般的冶金因素 从金属学的角度看，冷却时的凝固区间（结晶温度区间）以及在固相线温度上固态金属和液态金属的量的比值对热裂纹的倾向起着很大作用，应尽量减小液态金属薄膜存在的区间。随着合金元素的增加，结晶温度区间增大，结晶裂纹倾向增加。

S 和 P 在各类钢中都会增加结晶裂纹倾向；含 C 量增加，结晶裂纹倾向增加；Mn 有脱硫作用，可提高抗裂性；Si 在小于 0.4% 时，有利于消除结晶裂纹；Ti 能形成高熔点硫化物，有利于消除结晶裂纹；Ni 在低合金钢中易于与 S 形成低熔共晶，会引起裂纹，但加入 Mn、Ti 后，可抑制 S 的有害作用。

另外，凝固结晶组织形态也对结晶裂纹有影响，晶粒越粗大，柱状晶方向越强，裂纹倾向越大。

因此，控制焊缝中 S、P、C 的含量，加入细化晶粒元素都是提高抗裂性的办法。

与低合金钢相比，高合金钢的特点根据其化学成份在结晶时既形成一次铁素体也形成奥氏体。铁素体相对奥氏体而言对硫具有较高的溶解能力并且其膨胀系数非常低。因此一次铁素体（ $\delta$  铁素体）相对奥氏体热裂纹倾向非常低。图 9 中合金 2 相对合金 1 具有较高的热裂纹倾向

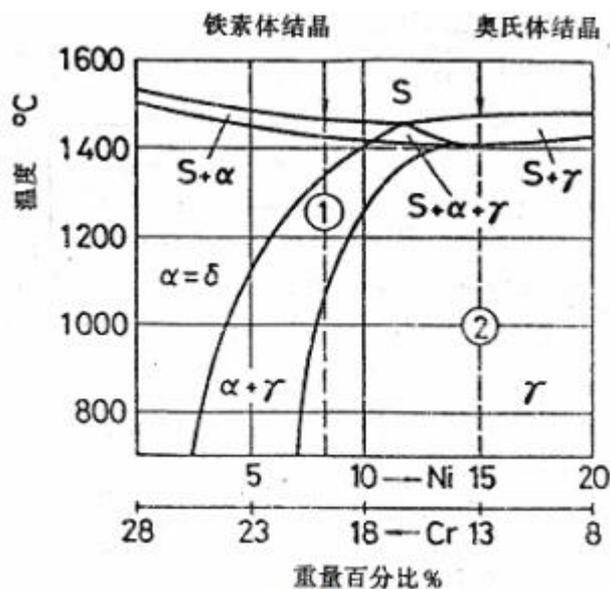


图 9 72%Fe 的 Fe-Cr-Ni 相图

## 5.2 力学因素

产生结晶裂纹的充分条件是力的作用，亦即应力作用。

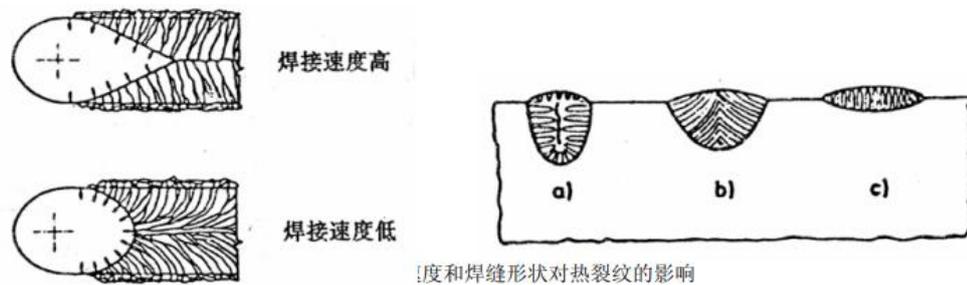
产生结晶裂纹的条件必须是冶金因素和力学因素共同作用。

## 5.3 工艺因素

——通过减小热输入，在焊缝中避免粗大的树枝状的组织，得到具有较小晶粒尺寸的无序的细胞状组织。

——通过降低焊接速度使晶粒的端部并列长大挤压在一起，以避免偏析的集中。降低焊接速度会使晶粒端部成椭圆形结构，因此使晶粒在焊接方向形式较为有利的排列。

——宽的焊缝形状相对窄而深的焊缝能够防止晶粒长大时直接碰撞在一起，从而可以避免偏析而集中。使用细直径焊条和小电流，不摆动和避免熔池过大一般能够防止热裂纹。



## 5.4 结构设计的影响

有一些关于焊接接头设计和施焊的规程和标准可供使用，这些规程和标准中有许多在容器及仪器制造方面的实例，如 DIN8558 等

接头及坡口形式将影响接头的受力状态结晶条件，堆焊和熔深较浅的对接焊缝抗裂性较高（图中 a 和 b），熔深较大的对接和角接、搭接、T 型接头抗裂性差（图中 c、d、e、f）。

