

钢焊接时裂纹的形成种类和机理（二）

6、热裂纹敏感性评定方法

堆焊试验（单道堆焊用于评定镍基合金，多层堆焊用于评定不锈钢焊条）

Fisco 试验（用于评定低碳钢、铝合金、不锈钢焊条焊缝）

环形镶块裂纹试验（用 TIG 焊法不加填充焊丝熔化母材评定母材）

指形裂纹试验（用 MIG 或 TIG 焊法评定高合金、有色金属）

鱼骨状可变拘束裂纹试验（用于评定铝合金薄板及选用的焊丝材料）

可变拘束裂纹试验（用不加填充焊丝的 TIG 焊评定母材）

横向可变拘束裂纹试验（用不加填充焊丝的 TIG 焊评定母材低碳钢、低合金高强钢、不锈钢等） 递增应变速率热裂纹试验

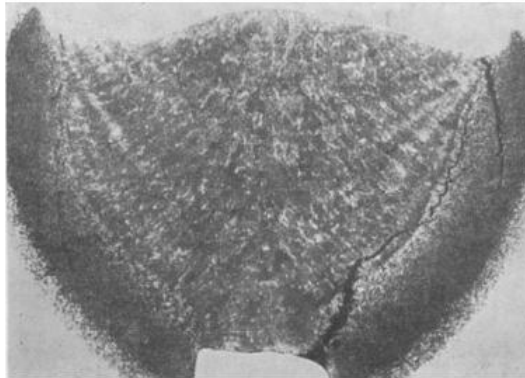
在焊接过程模拟机上试验（刚性拘束试验和强迫应变试验）

7、冷裂纹及其形成

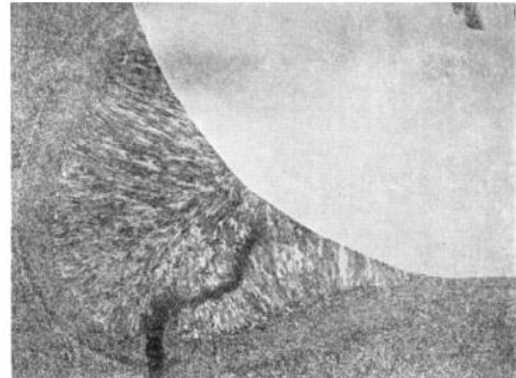
7.1 冷裂纹特征

焊后冷却过程中， M_s 点附近或更低温度区间产生，有时焊后马上产生，这主要是由于接头产生的淬硬组织；也有时延迟产生，焊后几小时，几天，或更长时间产生，这主要是由于氢的作用。

多发生在具有缺口效应的热影响区或物理化学不均匀的氢聚集局部。根部、焊趾裂纹起源于应力集中部位，沿最大应力方向，向热影响区或焊缝发展；焊道下裂纹在粗大的马氏体组织且含氢量较高的热影响区形成，走向与焊缝平行；横向裂纹走向垂直于焊缝边界。具有沿晶和穿晶断裂特点。



根部裂纹和焊趾裂纹，向热影响区扩展



角焊缝根部裂纹，向焊缝扩展

图 12 冷裂纹产生的位置

7.2 延迟裂纹的产生和影响因素

在焊接过程中带入到焊接接头中的氢，焊缝产生的淬硬组织和焊接接头的应力状态，是造成氢致延迟裂纹的三个主要因素。

7.2.1 氢的作用

焊接过程中，在高温下焊缝中溶解了很多氢（如图 13），电弧中氢分解并以原子或离子的形式进入到液态金属中去。氢来自焊接材料中的水分、空气中的湿气、焊件表面的铁锈及油污等。焊缝中氢的吸入主要与氢的局部压力和温度有关，焊缝中氢的溶解能力可达每 100 克焊缝金属 35ml。（如图 14）

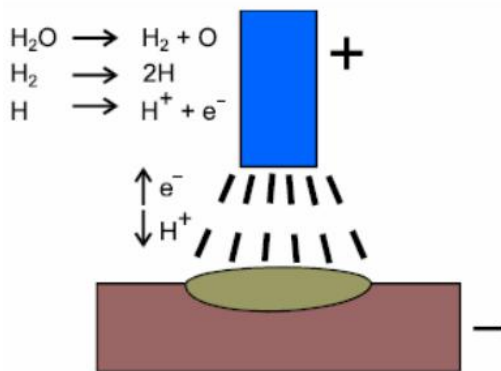


图 13 氢的分解和溶解

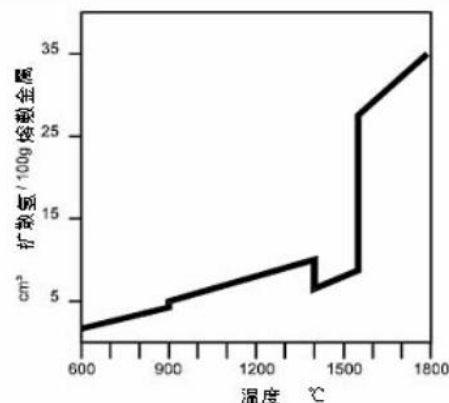


图 14 氢在不同温度下的溶解度

焊接冷却时，由于焊缝金属快速冷却，氢的浓度高于溶解能力图中相应的浓度，大部分氢重新结合成氢气逸出焊缝。部分氢被强制地溶解在晶粒中，集中在晶界的空位和错位中，重新结合成氢气分子并具有较高气体压力，使焊缝金属中的氢处于过饱和状态，因而氢要极力扩散，这种扩散过程（包括氢的再结合）可能在几分钟到几周内完成，因此有延迟特点。

氢在不同金属组织中的溶解度和扩散系数不同，氢在奥氏体中的溶解度比在铁素体中的溶解度大，且随温度升高而增大。而氢的扩散速度刚好相反，在不同组织中扩散系数从大到小的顺序为铁素体和珠光体、索氏体、奥氏体。焊接一般的低合金钢时，由于焊缝的含碳量低于母材，因此焊接冷却时，焊缝首先发生相变，即由奥氏体分解为铁素体、珠光体、贝氏体、及低碳马氏体，氢的溶解度下降，在铁素体、珠光体中快速扩散，越过熔合线到还没发生分解的奥氏体热影响区，由于氢在奥氏体中的扩散速度小，熔合线附近就成了富氢地带，当滞后相变的热影响区发生马氏体转变时，氢便以过饱和状态残留在马氏体中，使马氏体脆化，如果有缺口效应，就可能产生根部裂纹或焊趾裂纹，氢的浓度更高时，也可能产生焊道下裂纹。

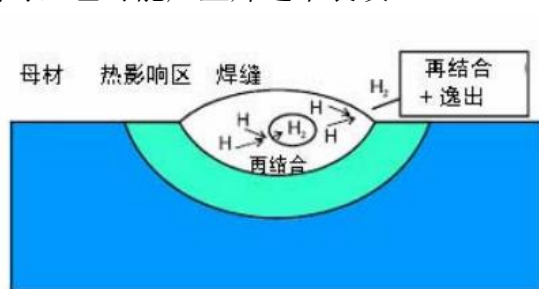


图 15 氢的再结合和逸出

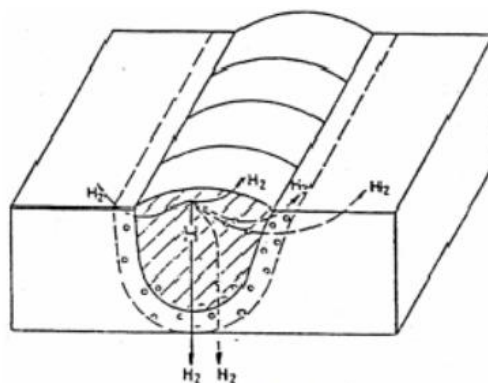


图 16 焊接接头中氢的扩散

焊缝中氢含量过高会使晶格变脆，材料的延伸率降低而屈服强度和抗拉强度保持不变（图 17）。这种脆性行为在进行除氢处理后才消失。鱼眼状白点是材料的一种局部断裂，在微观和宏观显微镜下表现为亮的，近似圆形的中间为脆断面（缺陷点，夹渣，气孔），周围为韧性断裂的区域。白点是含氢的焊缝在焊接后进行塑性变形时产生的。

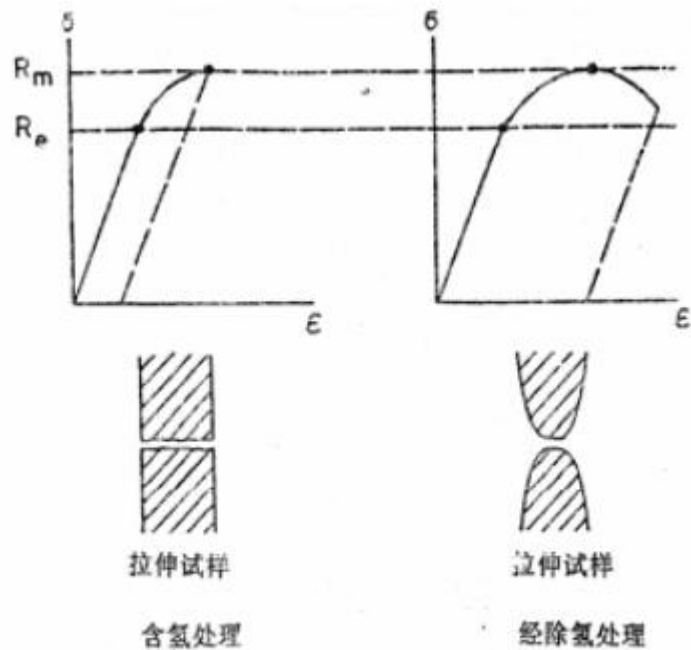


图 17 含氢试样和经消氢处理的试样在进行拉伸试验时的对比

7.2.2 淬硬组织的影响

马氏体是碳在铁素体中的过饱和固溶体，碳原子以间隙原子存在于晶格中，使铁原子偏离平衡位置，晶格发生畸变，组织硬化，特别是焊接条件下，快速冷却时，近缝区粗大的奥氏体转变为粗大的马氏体，这种脆硬组织利于裂纹形成和扩展。不同组织对裂纹敏感性增大顺序为：铁素体或珠光体、下贝氏体、低碳马氏体、上贝氏体、高碳马氏体。

另外淬硬会形成更多的晶格缺陷（主要是空位和位错），在应力和热的作用下，空位和位错会发生移动和聚集，到一定程度会形成裂源。

钢种的淬硬倾向主要取决于化学成分、板厚、焊接工艺和冷却条件等。碳当量越大，淬硬倾向越大，越易产生冷裂纹。

7.2.3 应力状态的影响

焊接条件下存在的应力有：由于受热不均匀产生的热应力，相变时产生的组织应力，结构拘束条件（刚度、焊缝位置、焊接顺序、自重、负载等）造成的应力，这些应力综合作用称为拘束应力，拘束应力大小取决于拘束度，一般来讲，板厚越大，拘束度越大。实际上，产生冷裂纹的力学行为不是平均的拘束应力，而是在某一敏感（缺口、内部缺陷等）部位达到更大的应力。

8、冷裂纹的防止措施

8.1 冶金方面

母材上，一方面，采用低碳多元合金强化方式，达到提高强度，保证韧性的目的；另一方面采用精炼技术降低钢中杂质。

焊材上，选用优质低氢焊接材料和低氢焊接方法，对于重要结构，采用超低氢、高强高韧性焊接材料。在焊接某些淬硬倾向较大的钢时，也有采用低匹配焊缝或采用塑性好的奥氏体焊缝，提高抗裂性。

烘干焊条、焊剂，清理焊丝和焊接区域，都是从控制氢来源上防止冷裂纹的产生。

8.2 工艺方面

工艺上包括焊接线能量、预热温度、焊后后热、焊后热处理等。

线能量过大，会使近缝区晶粒粗大；线能量过小，会使热影响区淬硬，都会增大冷裂倾向。

预热可降低冷却速度，能有效地防止冷裂纹。对于多层焊，还要保持层间温度不低于预热温度。

焊后后热可使扩散氢充分逸出，是防止冷裂纹的有效措施。

对合金元素多、淬硬倾向大、结构拘束度大的构件，需要进行焊后热处理来降低残余应力、改善组织，防止延迟裂纹产生。有些重要结构，还要进行消氢处理。

9、冷裂纹敏感性评定方法

9.1 间接评价方法

- 碳当量法
- 敏感成分和敏感指数法
- 热影响区最高硬度法

9.2 直接试验方法

——自拘束试验（包括巴东对接裂纹试验、受控热流程度裂纹试验、斜 Y 型坡口对接裂纹试验亦即小 铁研式试验、Y 型坡口对接裂纹试验、里海拘束裂纹试验、窗形拘束对接裂纹试验、双 T 型裂纹试验、十 字接头裂纹试验、刚性框架十字接头裂纹试验等）

——外拘束试验（包括插销式试验、拉伸拘束裂纹试验、刚性拘束裂纹试验等）

9.3 焊接过程模拟机上氢致裂纹试验

插销试验是评定冷裂纹敏感性常用的方法，插销上端的缺口处于焊缝的热影响粗晶区位置，下端的螺 纹旋在试验机施加拉力的螺母中，用热电偶测缺口处的焊接热循环。在一定条件下进行焊接（焊道长 100-150mm，焊条直径 4mm，焊接电流 160A，焊接电压 24-16V，焊接速度 cm/min），当温度降到 150℃ 时施加拉力，保持恒载到一定时间，插销在缺口处断裂，记下每一恒载值及断裂时间。施加的拉伸应力越 大，断裂时间越短；减小施加的拉伸应力，则断裂时间延长，当应力降到某一数值时，刚好不断裂，这一 值为临界应力，是衡量氢致裂纹敏感性的定量指标。根据所使用的参数不同，可以有很多评定的准则。这 种试验方法特别适用于不同材料冷裂敏感性的比较，缺点是不能直接估计实际焊接结构中是否出现裂纹。

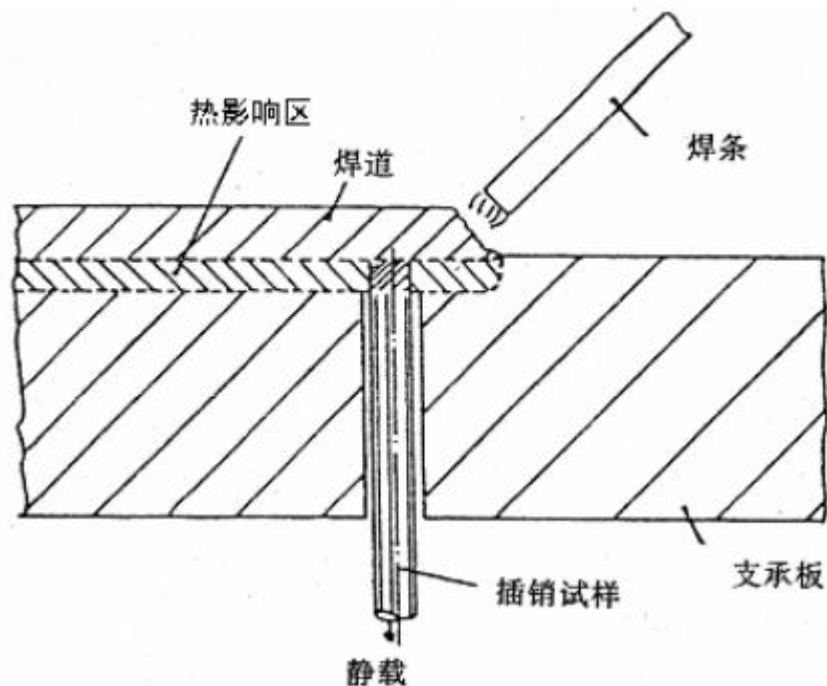


图 18 插销试验示意图

10、层状撕裂

10.1 层状撕裂特征

层状撕裂是一种沿钢板轧制方向的开裂，特征是呈阶梯状，常出现在低碳钢和低合金高强钢厚板的 T 型接头、角接头和十字接头中，对接接头在焊根或焊趾处的冷裂也可诱发层状撕裂（如图）。

10.2 层状撕裂产生原因

造成层状撕裂的根本原因是钢在轧制过程中轧成平行于轧向的带状夹杂物，呈现钢材力学性能的各向异性。厚壁结构焊接时，母材在厚度方向上产生很大的拉伸应力和应变，当应变超过母材金属塑性变形时，夹杂物与金属基体发生分离产生微裂，并沿夹杂所在平面扩展形成平台，相邻两个平台之间由于不在一个平面上而发生剪切断裂，构成了层状撕裂的特有阶梯状。

层状撕裂的产生与钢种的强度级别无关，主要与钢中的夹杂种类（MnS）、量（体积和长度）及分布形态有关。有时由冷裂诱发的层状撕裂氢是重要的影响因素。

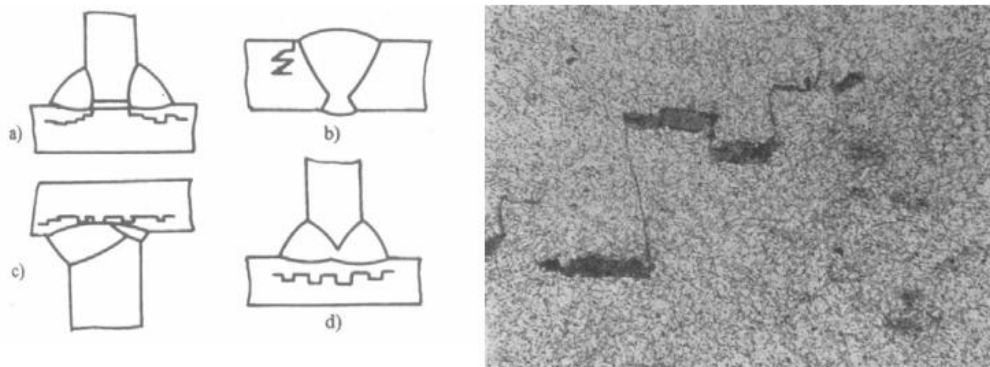


图 18 层状撕裂形态

10.3 层状撕裂影响因素

10.3.1 非金属夹杂物种类、数量、分布形态 种类：常见的有硫化物、硅酸盐、铝酸盐 分布：铝酸盐呈球形分布，硫化物、硅酸盐呈不规则的条形分布，敏感性大； 含量：夹杂物体积比（夹杂物总体积与试样总体积之比），夹杂物累积长度（单位面积夹杂长度总和）

10.3.2 Z 向拘束应力

10.3.3 氢的影响