

譯文集之三

低合金高强钢焊接裂缝问题

第一机械工业部焊接研究所

低合金高强钢焊接裂缝问题

(译文集)

编译出版者 一机部焊接研究所情报组

(哈尔滨南岗)

1 9 7 2 年 11 月 出 版

(工本费 1.50元)

毛主席语录

古为今用，洋为中用。

学习外国必须同独创精神相结合。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

编 者 的 话

焊接裂缝是低合金高强钢焊接生产中普遍存在的问题。如何防止及消除各种裂缝已成为保证接头质量的重要问题之一。目前，国外已就低合金高强钢的焊接裂缝进行了许多研究，对于造成各种裂缝的原因及消除裂缝的方法提出了若干实际的或实验性的措施。

我们遵照伟大领袖毛主席关于“古为今用，洋为中用”的教导，为了配合我国低合金高强钢焊接生产日益发展的需要，我们从国际焊接学会文献及有关焊接杂志上选译成这本文集，其中包括低合金高强钢焊接中的冷裂缝、热裂缝的文献共20篇，供广大从事低合金高强钢焊接生产与研究的人员参考。

由于我们水平有限，在选题、翻译及编辑上都存在一定的问題，希望读者提出批评指正。对我们继续开展这项工作还有哪些建议及要求，请提出，以便改进今后的工作。

在编译本文集中，得到了全国许多单位的大力支持与协助，在此表示谢意。

编 者

1972.6.

目 录

钢接头中的冷裂缝·····	(1)
高强钢的延迟裂缝·····	(11)
关于氢的含量、分布和影响问题的综述·····	(17)
低合金钢焊接接头中产生热裂缝的冶金因素·····	(22)
HY80 型 HT70 钢多道角焊缝的裂缝行为·····	(27)
焊接80公斤/毫米 ² 高强钢时的氢与根部裂缝·····	(43)
关于焊接结构的“再热裂缝”实例及其试验方法的报告·····	(51)
焊道下裂缝及焊趾裂缝·····	(59)
碳钢及低合金钢消除应力裂缝·····	(71)
拘束力对高强钢焊缝根部开裂的影响·····	(82)
显微组织对高强钢焊缝根部开裂的影响及氢的作用·····	(93)
低合金高强钢多道焊缝中的冷裂缝·····	(113)
焊接厚板时焊缝金属中的裂缝及其防止·····	(123)
日本热裂缝试验方法应用现状·····	(129)
碳钢及低合金钢焊缝金属中氢的测定·····	(133)
合金元素对碱性焊条焊缝金属的机械性能和裂缝敏感性的影响·····	(136)
低合金钢焊件的应力消除裂缝·····	(151)
100 公斤/毫米 ² 级高强钢采用大型拘束试验机的焊接裂缝行为·····	(165)
拘束应力对大厚度80公斤/毫米 ² 高强钢焊缝延迟裂缝的影响·····	(173)
关于大厚度高强钢的可焊性及在建筑工程结构上应用的焊接工艺的一些意见··	(181)

钢接头中的冷裂纹

冷裂纹现象的概述

冷裂纹的形态 冷裂纹或氢引起的裂纹，就宏观范围来看，可以根据其出现的区域，相对于焊道的方向和位置来分类。

实际上，裂纹可以分为两类（图1），即热影响区中的裂纹（A）和焊缝金属中的裂纹（F）；它们相对于焊道方向来说，又可分为纵向裂纹（L或FL）和横向（AT或FT）裂纹。热影响区中的纵向裂纹可以平行于焊缝熔合线扩展，但不一定扩展到焊件的表面（AL1），要不然裂纹就以间断状态停留在横断面的某一局部位置上，因此在焊趾处（AL2“焊趾裂纹”）或在焊缝根部（AL3“根部裂纹”）形成了缺口。AL1表示的裂纹类型，在用非碱性焊条焊接可淬硬钢时，这种裂纹是很普通的，称为“焊道下裂纹”；并且这个名称已被误认为是与氢的影响有关的全部纵向裂纹的结果。事实上，从本文后述可知，“焊趾裂纹”或“根部裂纹”是由于缺口作用而引起的。因此，它们的产生条件不同于“焊道下裂纹”的产生条件。

即使这些裂纹最初为各种“焊趾裂纹”或“根部裂纹”，冷裂纹不一定扩展到表面。这一点特别适于角焊缝中的“根部裂纹”（AL3b），或者适于在焊完一条焊道之后在焊趾上出现的，而又部分地被后一条焊道所覆盖的裂纹（AL2b）。

从探测裂纹和裂纹对部件承受静载和动载性能的影响的观点来看，冷裂纹是否扩展到焊件表面的事实是很重要的。

显微镜检查表明，冷裂纹是无分叉的纯断裂。电子显微镜断口检查发现，冷裂纹是一种晶内型裂纹或晶间型裂纹（相对于奥氏体基体来说）。在淬硬性大的钢中，由于存在对冷裂纹敏感的马氏体，一般为晶间裂纹，而在淬硬性低的钢中，则为晶内裂纹。

当裂纹并未直接地或间接地造成焊件完全破坏时，可以用一定的非破坏性检查方法，如表面裂纹的着色检验、磁粉检验及超声波检验来发现这些裂纹。必须着重指出，X射线检验不是发现冷裂纹的一种可靠的方法。因为冷裂纹的延迟性质，所以一般要求焊件在焊后停留48小时，再进行非破坏性检验。由于在消除应力热处理过程中，裂纹有扩展的危险，因此，在热处理之后必须再进行一次非破坏性检验。

产生冷裂纹的条件 冷裂纹，正如在实际中所看到的，以及在试验室的试验中所重复的那样，是三个主要因素综合作用的结果。至少在目前所焊接的钢种中，没有任何一

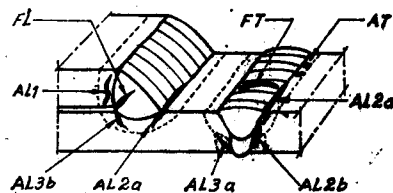


图1

个因素能单独造成冷裂缝。这些因素是：所焊钢材的淬硬、氢、以及在一定的拘束条件下，与焊接有关的应力。另外，可以从焊后出现裂缝的时间来研究裂缝。

首先，在给定的焊接条件下（板厚、能量、工件、温度），只有当钢材被淬硬时，也就是说，在热影响区和（或者）焊缝金属中出现全部或部分马氏体转变时，才观察到冷裂缝。因此，非合金钢只在其含碳量较高时，才可能出现冷裂缝；而低合金钢由于其可淬硬性，对冷裂缝就表现得较为敏感。冷裂缝敏感性随所焊部件厚度的增加而提高，并且也随着焊接能量降低而提高（点固焊缝、间断焊缝、多道焊缝的前几道焊缝等等）。

至于氢的作用，早已弄清，并且是发展碱性焊条的原因。采用金红石和纤维素型焊条所焊的接头对冷裂缝很敏感。采用碱性焊条，特别是经烘干后，减少了冷裂缝的危险，而采用熔化极气体保护焊方法，甚至能进一步扩大可以焊接的钢种范围（指焊接时不产生冷裂缝而言）。从本文后面可知，热影响区中的冷裂缝是溶解于焊缝金属中的氢向热影响区扩散而引起的。

冷裂缝也与应力的存在有关。无拘束的焊缝与有拘束的焊缝比较，前者冷裂缝的敏感性较低。在含氢量高的或者在主要是马氏体组织的钢上熔敷焊道时，所产生的应力就足以引起所谓“焊道下裂缝”，而在用低氢型焊条熔敷金属的情况下，只观察到“焊趾裂缝”或“根部裂缝”，并且只在应力较高时，才有这些裂缝出现。热影响区中的横向裂缝似乎是淬硬性高的钢中所特有的，而焊缝金属中的横向裂缝可能与高应力的存在有关系。

冷裂缝亦称之为“延迟裂缝”，因为这种裂缝在焊后不是立即就出现的（至少是肉眼看不到的）。

本文将对延迟裂缝的条件作进一步讨论，但是，在延迟裂缝中，时间因素的重要作用早已为人们所注意。一般冷裂缝总是在室温下，或接近室温时产生的。

研究冷裂缝的方法 冷裂缝的这种现象在实际上是如此重要，以致为研究导致冷裂缝出现的各种因素和确定可以防止冷裂缝的最佳焊接条件，在可焊性试验方法中已拟制了许多种冷裂缝试验方法。

必须论述的第一组试验方法是那些早已得到推广的拘束试验。拘束力既可通过将试件组合起来，使其相互作用，造成一种自身拘束系统来获得，也可用把试件装进刚性夹具的方法得到。“H”钢板焊缝试验，里海试验、CTS 试验或铁研式Y一型坡口焊缝试验均可作为自身拘束焊缝试验的例子。RD试验为第二类中的典型方法，在这类试验中，用夹具拘束试件。这种类型的拘束焊接试验的主要缺点是只能定性地改变拘束度，但未能给出试验焊缝所承受的应力大小。因此，这些试验方法提供了相互比较，但是，不能定量地评价产生冷裂缝诸因素的影响。所以曾尽力发展一些裂缝试验方法，采用此方法时，作用于引起裂缝的试验焊缝上的力是可调整和测量的。焊接时，焊缝承受横向拉伸载荷的试验方法就属于这一类。

最后，影响冷裂缝的诸因素，即淬硬、氢和应力，也可以用“模拟法”来研究。其特点是对试件进行热处理、充氢，并在模拟焊接条件下承受机械力。

这些各种各样的试验方法，特别是用于评价冷裂缝诸因素的定量方法，对我们了解这种现象大有帮助。

相变组织的影响

热影响区的相变与裂纹 在焊接热循环的影响下，母材的某一部分，称为“热影响区”，被加热到奥氏体化温度，然后，在冷却时，根据奥氏体化的条件和冷却规律发生相变，而后两者都取决于焊接条件，也就是取决于热输入量、板厚和接头区的起焊温度的综合影响。对这种逐段沿焊道发生相变的事实应引起重视。这就是说（图2），相对于焊接电弧的某一个位置的热影响区，包括由没转变的奥氏体组成的部分1和在相当于转变温度的等温线 T_B 后边的部分2，在这部分中相变已完成或正在进行中。同样，焊缝金属包括位置3的焊缝金属区，在奥氏体状态下的已凝固金属4，以及在相变等温线 T_F 后边的已经相变或正在相变的焊缝金属5。现在必须指出， T_F 和 T_B 不一定一致，这在说明氢由焊缝金属进入母材的过程中，我们将再来详细研究它。

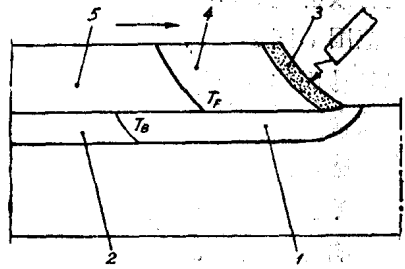


图2

在给定焊接热循环的特定情况下（迅速加热到非常高的温度，暂时地奥氏体化），为说明不同焊接条件下钢的相变形式，必须专门建立连续冷却转变曲线。为了简化这种曲线的测定和使用，可使整个热影响区中钢的相变温度范围内的冷却速度保持不变。因此，在知道与焊接条件有关的冷却速度时，就可能预测热影响区中的相变形式。特别是可以测定可能引起此区域中局部或全部马氏体转变的焊接条件。因此，如果（图3）我们取两个有关温度之间的相变温度/冷却时间关系，可观察到两种临界冷却时间： T_{R1} （低于 T_{R1} 时，出现奥氏体）和 T_{R2} （低于 T_{R2} 时，全部为马氏体）。这也可以看出，马氏体转变区最低，由此可知，当发生马氏体转变时，等温线 T_B 移至最后（图2）。以冷却时间的函数表示的转变曲线便于与最高硬度/冷却时间曲线进行比较。这种比较（图3）表示，最高硬度的有关值可以作为临界冷却时间。实际上，这种表示方法仅是一种近似方法，因为它忽略了奥氏体化温度的影响；冷却时间相同条件下，热影响区周围在较低温度下奥氏体化，因而比邻近熔合线区的可淬硬程度小，因为后者是在接近熔化温度下奥氏体化的。因此，必须承认，对于焊缝来说，冷

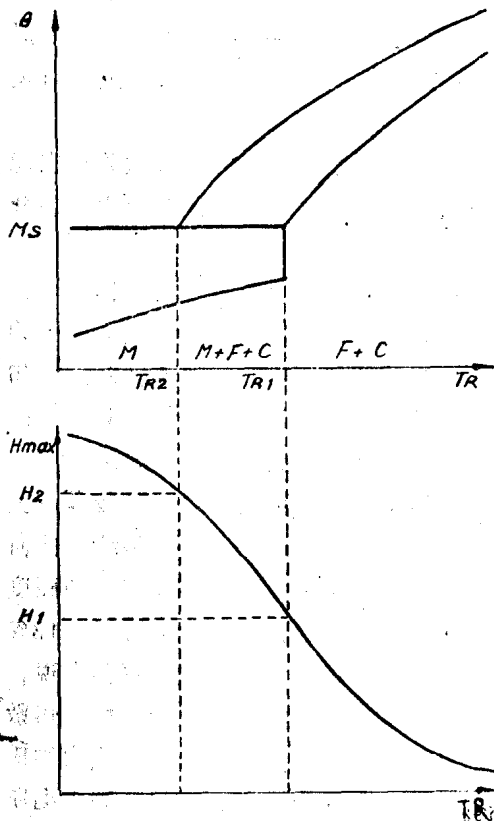


图3

使用，可使整个热影响区中钢的相变温度范围内的冷却速度保持不变。因此，在知道与焊接条件有关的冷却速度时，就可能预测热影响区中的相变形式。特别是可以测定可能引起此区域中局部或全部马氏体转变的焊接条件。因此，如果（图3）我们取两个有关温度之间的相变温度/冷却时间关系，可观察到两种临界冷却时间： T_{R1} （低于 T_{R1} 时，出现奥氏体）和 T_{R2} （低于 T_{R2} 时，全部为马氏体）。这也可以看出，马氏体转变区最低，由此可知，当发生马氏体转变时，等温线 T_B 移至最后（图2）。以冷却时间的函数表示的转变曲线便于与最高硬度/冷却时间曲线进行比较。这种比较（图3）表示，最高硬度的有关值可以作为临界冷却时间。实际上，这种表示方法仅是一种近似方法，因为它忽略了奥氏体化温度的影响；冷却时间相同条件下，热影响区周围在较低温度下奥氏体化，因而比邻近熔合线区的可淬硬程度小，因为后者是在接近熔化温度下奥氏体化的。因此，必须承认，对于焊缝来说，冷

却时,相变是在热影响区周围开始,向焊缝金属区发展。从后述可知,这种相变面是与氢扩散面相反方向发展的。根据力学观点可以推论,接近熔合线的热影响区是在刚性条件下最后发生相变的。

关于钢中的转变,作了上述的一般地回顾之后,现在可以研究钢种对冷裂缝现象的影响。这种影响或可从相变图的中间曲线(临界时间 T_{R1} 和 T_{R2} 的位置)或可以从马氏体对氢脆的敏感性推断出来。

钢的含碳量对可淬硬性,也就是对临界时间 T_{R1} 和 T_{R2} 似乎没有重要影响,但是,它对随着碳含量的增加而降低的 M_s 转变温度有很大的影响,因此,扩大了 T_F 和 T_B 之间的温度范围(图2),从而在焊缝金属相变之后,使氢扩散的可能性增加。但是最明显的影响是马氏体的氢脆,这种氢脆随着碳含量的增加而显著增高,以致含碳量高的钢,例如,碳含量大于或等于0.30%的钢,即使在熔敷金属含氢量很低的情况下,对冷裂缝也具有敏感性。

许多常用的合金元素对可淬硬性有直接影响。因此,当含碳量一样时,这些合金元素会影响冷裂缝敏感性。但是,合金元素对马氏体氢脆也有影响,这一点必须很好地弄清楚。含镍马氏体似乎具有较高的抗氢脆性能。

但是,对可淬硬性影响较小的其它元素也可能影响脆性,例如,硅对脆性的影响就是其中一例。化学成份对钢的可淬硬性和在淬硬条件下硬度的影响,可用碳当量计算公式表示。国际焊接学会第九委员会关于这种概念的意义和可能的应用早已有过论述。应当指出,关于影响冷裂缝的各种因素和相互关系,在上述碳当量论述中,仅仅根据虚拟的碳当量,对这种现象做了某些说明。重要的是,也应该把氢含量和与焊接热循环有关的应力考虑进去。

因为钢在焊接热循环时的行为,可用连续冷却相变图表示,所以可通过试验找出能够避免马氏体转变的条件,或者用控制马氏体转变的方法来研究焊接条件对产生冷裂缝危险的影响。

因为对于薄板,冷却速度与能量/厚度的平方成反比,所以,为了避免马氏体转变,即为了得到较 T_{R1} 更长的冷却时间,就得控制焊接能量。由于在给定温度 θ_0 下,薄板的冷却速度与 $(\theta/\theta_0)^2$, 厚板与 $(\theta/\theta_0)^2$ 成正比,因此,也可控制部件的初始温度 θ_0 。换句话说,在适于预热处理采用预热时,如果预热是局部的,须考虑到在接头任一侧预热区域的范围必须足以保证预期的效果,并且避免冷却时接头区出现大的附加应力。

因此,对某些淬硬倾向较小的钢,采用适当的焊接条件,有可能产生一种较 T_{R1} 更长的冷却时间,也就是说,有可能防止任何马氏体转变,并从而避免产生冷裂缝的任何危险。根据图3所示的冷却时间和焊道下的最高硬度之间的关系,有可能根据这种硬度极限弄清准则的来源,特别是常常引用的350维氏值大致与那些含碳量约为0.16~0.18%的结构钢的临界时间 T_{R1} 相符。焊道下的最高硬度极限小于该数值,对这些钢种来说,相当于能避免产生冷裂缝的一种条件,即淬硬。但是,如下面将要说明的那样,熔敷金属的含氢量起着重要作用,这也就明白为什么较先进的规程确定最高硬度值为维氏400和更高值,这种值是考虑熔敷金属中的含氢量来确定可允许的马氏体量,即根据所采用的焊接方法而确定的。

为了不引起裂缝,事实上,采用冷却时间比 T_{R1} 短,甚至比 T_{R2} 短的焊接条件是可能的。在这些条件下,如果钢的含氢量足够低,和采用预热或焊后加热,以控制马氏体转变(但并不能阻止这种转变),则淬硬钢就是可焊的。即使预热未能阻止马氏体转变,有延长冷却的作用,因此使氢扩散加快,从而减小脆性作用。在低于 M_s 进行焊后加热时,能产生同样的甚至更明显的作用,这可能与回火作用及完全冷却前存在有利的温度平衡有关系。在 M_s 和 $M_{s'}$ 间焊后加热,也能抑制马氏体转变(指尚未发生马氏体转变的那部分奥氏体),同时使奥氏体稳定化。

总之,如果所述及钢的相变图适用时,避免马氏体转变就可以避免产生冷裂。但这并非绝对如此,如果含氢量足够低,即使形成马氏体亦能避免冷裂缝。这时,预热,特别是焊后加热是很有用的。

焊缝金属的相变和裂缝 焊缝金属凝固的瞬间开始,固态的焊缝金属在冷却作用下,可发生两种类型变化,一种是焊缝金属发生珠光体转变,而母材发生马氏体转变;另一种是焊缝象母材一样,也发生马氏体转变。

第一种情况,是由于焊缝金属比母材淬硬倾向小,因为一般填充金属的含碳量很少会象母材那么高。焊缝金属相变等温面 T_F 超前于母材相变等温面 T_B (图2)。从后述可知,这利于氢向热影响区移动。从力学观点看,事实上最后产生马氏体转变的一部分热影响区(位于熔合线附近)夹在两个先转变的,因而是刚性的区域之间,即热影响区在下,焊缝金属区在上,从而对最后转变的热影响区产生了很明显的应力作用。这时,如果氢含量高,就足以引起裂缝。如果焊缝金属较易变形,就可以消除这种类型的应力作用。

第二种情况,也就是焊缝金属与母材具有同样的淬硬倾向(极少数情况下,也可能比母材淬硬倾向更大),裂缝就在焊缝金属本身产生,因为这时氢不会向热影响区扩散。在焊缝根部的缺口作用下,就会出现纵向裂缝,或者在没有缺口时,可能因为缺陷和在足够高的应力下出现横向裂缝。

因此,焊缝金属的相变类型及它们和裂缝之间的关系根据焊缝和母材金属的相对淬硬性,可以得到很好的解释,热影响区中的裂缝,一般是由于母材金属淬硬性更大引起的。

氢的作用

钢焊接时氢的来源 冷裂缝机理中涉及的氢,是焊接操作带入焊缝的。几乎所有情况下都不同意这样的假设:母材中残余的氢起有效作用。

焊接电弧中水蒸气分解而造成氢,水蒸气本身的来源因所用的焊接方法而异:涂药焊条手工焊时,为结晶水;有机物质燃烧造成的水蒸汽;焊条受潮吸收的水分。

埋弧焊时,为焊剂的结晶水,焊剂受潮吸收的水分。

熔化极氩弧焊,用管状焊丝时,与涂药焊条时相同;实芯焊丝时为焊丝表面吸收的水分。在上述两种情况下,都有从保护气体及因冷却系统密封性不好而得到的水分。

钨极氩弧焊时,为填充焊条表面所吸收的水分,由保护气体及因冷却系统密封性不

好而得到的水分。

这些不同的氢来源，当然不是同样重要的。但是，即使焊缝金属中仅含有小于1毫升/100克的氢，当用实芯焊丝进行熔化极或非熔化极气体保护焊时，对于淬硬倾向较大的钢，这些氢的作用就很重要了。

除了由填充材料带入的氢的来源而外，也应注意氢的外部来源，例如空气的相对湿度，接头部位钢材表面上的水分（吸附或凝集的），碳氢化合物等。

氢的分离及在裂纹中的作用 高温时，熔池金属受电弧加热，氢被分解成H原子或者 H^+ 离子而溶入熔池中，并成为过饱和状态，这是因为在液相时冷却，随后在凝固时溶解度的突变而造成的。图4中氢在铁中的溶解度曲线（定性的，因为平衡是不存在的）表示了氢的分离的概念：在固相冷却过程中，由于冷却作用而呈过饱和状态，并在奥氏体向铁素体转变时，出现了溶解度的突变性；而与此同时，扩散系数却发生了相反方向的突变，即在转变温度范围内，铁素体中氢的扩散比在奥氏体中快。这两种特性，氢向热影响区迁移方向起着重要作用。

如果没有上述提到的理由，氢就会留在焊缝金属中，引起脆性，从而引起纵向或横向的冷裂纹。

回顾了氢在焊缝中富集的机理后，也必须说明，哪些措施可降低氢的含量：对于涂药焊条电弧焊，每当母材因材料本身原因或因焊接条件对淬硬敏感时，必须选用碱性焊条，除非是另外一些条件迫使选用其它类型的涂药（例如焊管线时），这时就有相应的危险性，必须注意。碱性焊条必须烘干，或由使用者烘干，这种烘干是一种真正的热处理，烘干温度至少 $350^{\circ}C$ ，并储放在约 $150^{\circ}C$ 的密闭容器中。用将焊条短路的方法进行烘干，效果很差，不能推荐。某些碱性焊条是所谓不吸湿的，因而要求就不那么严了。

术语“碱性”，并不包括“低氢”含义。实际上，即使氢含量低是与涂药的碱性有关（例如ISO的B型），低氢也取决于这种涂药本身的状态。

埋弧焊中冷裂纹问题比较少，因为一方面焊缝金属氢含量低，另一方面一般采用较高的焊接能量。但是，由于某些焊剂要求与碱性焊条一样进行相同的烘干等处理，在低合金钢中焊缝金属裂纹问题仍然存在。

熔化极氩弧焊中，填充材料的制造者必须负责注意填充材料的清理与包装。管状焊丝焊成的焊缝金属的氢含量高于实芯焊丝，但比涂药焊条低。

假如将图4（氢在铁中的溶解度与氢在铁中扩散系数变化图）与图2（焊缝金属和热影响区相变的次序）作比较，当只有母材发生马氏体转变时，就能说明氢从焊缝金属向母材扩散的机理（图5）： T_c 等温面的前面，焊缝金属处于充满氢的奥氏体状态，有一部分氢在很短时间内扩散到下层的也是奥氏体状态的母材金属中。

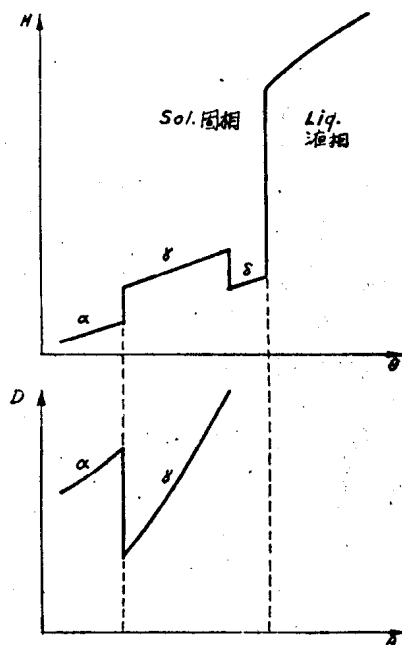


图4

在焊缝金属发生珠光体或贝氏体转变时，氢的溶解度突然降低，同时变得较易扩散。此时，就有这样的趋势，即氢穿过熔合线 AB 进入热影响区尚未转变的奥氏体中。但是因为奥氏体中扩散系数小，氢不能扩散到离熔合线很远，因而在临近熔合线附近造成富氢区。

母材热影响区的马氏体转变从 B 点向前发展，正如前一节中所述，相变面从外向内移动，与氢扩散面相遇，所以，在熔合线附近向马氏体转变的奥氏体早已充满了氢。假如氢足够高，就立即造成脆性。因为焊接和相变造成的应力是很大的。此时，就观察到所谓“焊道下裂缝”（第一节中的 AL1 型）。

如果不是这样，当氢量较低时，仅在有缺口应力时才会产生裂缝（其机理下面将要谈到），它一般出现在焊根或焊趾部位（第一节中的 AL2 和 AL3 型）。

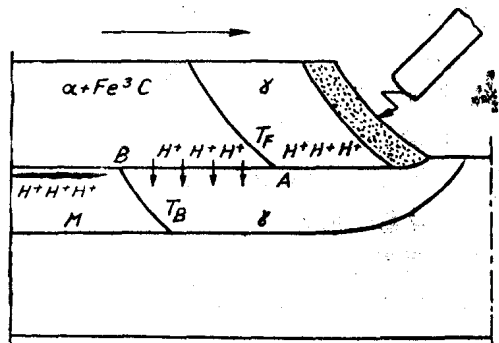


图 5

解决冷裂缝问题时采用 Cr-Ni 奥氏体填充材料的优点是十分明显的，因为它可以减少氢由焊缝金属区向热影响区的扩散。无相变的焊缝金属保留了它的氢而不沿熔合线扩散。然而这并不是仅有的解释，事实上，焊缝金属延伸率较大也起作用。

至于引起冷裂的氢脆机理，不能认为这是焊接中特有的过程。这方面具有的独特性，在于转变成马氏体的奥氏体早已充有氢，但是，正如后面所要讲的那样，这种情况有时有其好处。再之，因为淬硬性最强的钢，在几乎完全没有氢时对冷裂是敏感的，所以，关于脆性的解释，必须考虑与氢无关的解释方法。因此，这样的解释是吸引人的，即对淬硬性很大的钢种，一般产生晶间型裂缝，它是由于奥氏体晶界与长大的马氏体片相接触而发生的。此时，氢受到挤压而引起裂缝。

晶内裂缝常产生在淬硬性倾向较小的钢中，这可能与部分奥氏体转变有关，因此，在转变成马氏体前，随着存在于晶内的晶内组份的出现，影响晶内裂缝的出现。

正如在第 2 节中早已指出的那样，甚至在出现马氏体情况下，也可以通过延长冷却时间（预热），或在冷却前保持等温（焊后加热）来防止裂缝。根据上述解释，就容易理解这些措施的作用，它们是在尚未出现脆性的温度下，通过氢的扩散，使氢的浓度梯度逐渐消失，而起防止裂缝作用的。当湿度下降时，引起脆性的氢已消失，所以就不再产生裂缝。

应力的影响

应力的来源 研究冷裂缝时，应该考虑的应力有三类，即直接应力，间接应力和外部应力。

直接应力存在于接头附近，是由于湿度分布和相变不均匀引起的。这种应力不可避免。

间接应力或拘束应力是由于在外部拘束作用下焊接而引起的，它在设计时可作某些

控制。

外部应力是由各种制造因素引起的，它可以在接头制造时或制造后作用于接头上，例如，部件自重、部件的弹性反作用、冷却过程中其他焊道的收缩，对部件的夹紧等。因此，制造时只有很小拘束的接头，其承受的残余应力小，这种接头，如后面所述，在对氢迁移机构仍然敏感的瞬间，可以承受适当的载荷。

不管作用在焊道上的应力的来源怎样，如果焊缝比母材强度低的话，可以假定其数值约等于母材或焊缝的屈服强度。

缺口影响的作用 当熔敷金属的氢含量足够高和淬硬倾向很大时，仅在直接应力作用下，而不存在缺口时（至少客观上如此），会立即产生焊道下裂缝。对于非合金钢，这种现象起始于 100°C 以下，常在约 50°C 或 30°C 时结束。例如，用纤维素焊条焊接非合金钢管线时，可能就是这样。如果第一层焊道完全冷却，热影响区中就会产生裂缝；如果在第一层焊道的温度降到 100°C 下以前焊第二道，就使第一层焊道重新奥氏体化，而防止了裂缝。

但是，在同样的焊接热规范下，对含氢较少的熔敷金属，在直接应力作用下，就不会立即产生焊道下裂缝，至少在中等强度钢中是这样。例如，用烘干的碱性焊条或用 CO_2 保护焊方法焊接的同一管线没有裂缝。但是，在存在刚性拘束或外部应力时，在焊趾或焊根处就能产生裂缝。这是因为在热影响区中马氏体转变瞬间，扩散氢数量是不足以引起脆性而造成裂缝。但是，由于应力作用造成的位错移动和缺口尖端变形的集中引起了氢向缺口移动，从而使缺口处氢的浓度不断增加，随着连续冷却，当达到临界氢含量时，就会在缺口处产生焊趾或焊根裂缝。总之，因为原始氢量低，这些裂缝只在有缺口时和应力较大时形成。

延迟裂缝 冷裂缝机理的上述解释还未考虑时间上的延迟性质，必须指出，这种延迟性质不是特有的。大多数所谓“冷裂缝”是在冷却完了时出现的，但延迟裂缝必须与焊接结构工作时呈现的重大开裂事故相区别。

冷裂缝是随时间（但有一个极限值）而呈现出扩展的现象。事实上，一旦焊道熔敷完毕，象上述那样由位错引起的供给迁移机构的氢量是有限的，因此，这种现象开始后持续一定时间就结束。这就是为什么在检验某些结构时，发现尺寸有限的裂缝，而这些裂缝一般在冷却终了时就开始，继续扩展数小时后而停止扩展。另一种情况下，当横截面承受载荷时，裂缝能扩展到临界尺寸而使构件产生断裂。这就是为什么有时说成是延迟破坏（而不是延迟裂缝）的原因。

对完成焊缝到焊缝受载荷之间的时间间隔的影响进行试验时，时间因素影响的另一种情况就呈现出来了。一般在焊缝完全冷却前受载荷，这时裂缝是不延迟的。如果应力状态在完全冷却后或焊后稍晚些施加时（例如另一个焊接接头对前一接头作用而产生的收缩，或夹具卸得迟了）在热影响区中存在的氢（如果裂缝在焊缝中，则是焊缝中的氢）就会扩散，从而氢的浓度梯度就会逐渐消失。加外载荷时，引起裂缝的氢的积聚时间越长，外载荷加的越晚，这时如果产生裂缝的话，则这种裂缝是真正的延迟裂缝。例如对某些淬硬钢，可在延迟10~20小时或更长时间后才观察到裂缝。最后，如果应力加得足够晚，就不再产生裂缝。这就说明焊后加热的有效作用（除回火作用外），在于加

速氢的扩散，从而防止了裂缝。但如果焊后加热时间不够长，则还会引起延迟裂缝。

结 论

抗裂试验的最新趋势 从上述可知，冷裂缝是由相转变、氢和应力等因素综合作用而产生的，所以，抗裂试验的设计，应使这三种因素同时出现，而又能单独改变每一种因素。例如，在抗裂试验中，必须有可能在不改变应力的情况下，改变焊接热循环；必须有可能改变和比较焊接方法，一方面可用含氢量来判别焊接方法，另一方面可用具有相同热循环的其他焊接方法焊接的焊缝金属的变形能力等来判别。这些因素影响的评价当然必须是定量的。

在IX-710-70 抗裂试验说明文献中，曾对带有经验性的抗裂试验法提出异议，在这些试验中，焊接接头所承受的应力（未评定其大小）是由在一定拘束度的夹具中施焊引起的，或者接头经受略为严重的缺口影响。这未必是放弃已被长期使用的这些试验方法的充分理由，因为直到目前为止，试验文献常以这些试验的结果为基础。但是，必须“修正”这些试验，即一定要能定量测定应力大小，换句话说，就是能定量评定接头在试验中所承受的“拘束度”。国际焊接学会第IX委员会正在进行此项工作，并且将建立按其拘束度分类的实际抗裂试验一览表。

事实上，不管考虑定量的抗裂试验，还是经验性抗裂试验，都需解决在各种类型的焊接结构中实际出现的拘束度大小的问题。一般说来，选择可能防止冷裂缝的焊接工艺，应把这种拘束度考虑在内，而且这种选择应考虑到在抗裂试验中所采用的应力或拘束度大小的问题。

根据国际焊接学会的最高硬度试验法，至少就热影响区抗裂性来看，焊接工艺可以用焊道下最高硬度值确定。因此，确定焊道下最高硬度可以用来拟定防止裂缝的焊接条件，但是，这种硬度值本身是没有价值的，而不能仅根据它来选择焊接方法。

尽管这样，采用焊道下最高硬度在以下情况下是有意义的：就相同的化学成分来说，在同样的冷却时间下，按给定的厚度获得的抗裂试验结果，有可能换算出其他厚度时的情况。

预防冷裂缝的要点 焊接钢时，防止冷裂缝的要点可归为以下三个方面：

1. 焊接方法的选择和填充材料的情况；
2. 制作条件；
3. 焊接工艺。

关于焊接方法的选择，可以说，冷裂的敏感性与焊缝金属的含氢量有直接关系。然而，对强度高、淬硬性大的材料，即使含氢量非常低，冷裂的危险性仍然存在，并且只有采用一种适当的焊接方法方可减少这种危险性。而且，不管这些填充材料是涂料、焊剂、保护气体，甚至是焊丝，都必须注意排除其中的水份，同样，必须保证防止外部氢源的影响。

制作条件决定着焊接接头在刚完成时，以及在以后若干小时内所承受的应力。需要焊接的钢板对冷裂缝敏感性越大，在装配时越要防止拘束力和限制接头间的相互作用，同时象待装配部件的弹性反作用一样，也不可忽视部件本身重量所可能有的影响。

在简要叙述焊接工艺对冷裂缝的影响时，各有关因素的作用可以分述如下：

焊接热输入量：对等厚度钢板，增加热输入量，就延长了冷却时间，因此，这是一种预防或降低硬化的方法。

开始温度：其作用与热输入量一样，因此，预热有助于减少硬化，同时，它使冷却延长并促使氢扩散。切记局部加热的范围太小是危险的，因为它会引起应力状态的恶化。

焊道间温度：因为冷裂缝是在某一个很低的温度下出现，在多道焊接的情况下，如果保持焊道间温度高于此值，裂缝是可以避免的。这可以通过改变钢板的开始温度（预热）或缩短焊道之间的间隔时间来实现。为此，必须采用分段焊接工艺。

焊后加热：焊后加热（焊后把焊件处在某一温度保持一定的时间）可以防止或中止马氏体转变。同时它可促进氢的扩散，从而在随后冷却过程中不可能出现裂缝。

热处理：焊后立即进行再加热（更正确地说，从高于裂缝敏感温度开始加热）会引起氢扩散加快，并使马氏体回火。因此消除了裂缝危险性。

填充金属的选择：采用Cr—Ni或Cr—Ni—Mo奥氏体填充金属可防止裂缝。一般地说，在焊接接头需要的强度范围之内，为了利用焊缝金属变形的能力，应该选择尽可能最软的填充金属。

待解决的问题 近年来，关于钢接头中冷裂缝的研究有了很大的进展，但还有相当多的问题尚无答案。通过研究技术的发展，如果这些问题得到解决将会进一步改善焊接结构的安全性。把需要进一步研究的问题，按影响冷裂缝的因素（即相变、氢和应力）分类如下：

关于钢和相变问题，它是在焊接过程中发生的，下述问题尚不清楚：与裂缝现象有关的仅仅是马氏体，还是贝氏体也有影响？

连续冷却转变图（焊接用）和最高硬度/冷却时间曲线的知识能预测钢的冷裂缝行为吗？

钢中所含的每一元素（Cr、Ni、Si等）对于马氏体氢脆的敏感性的影响如何？（不考虑对淬硬性影响的问题）。

夹渣（例如，氧化物或硫化物）对冷裂缝敏感性的影响如何？

关于氢的影响，下述问题要解决：

能确定在无氢的情况下可能出现冷裂缝的条件吗？

焊接条件对焊缝金属氢含量的影响如何？

能测定由焊缝金属扩散到热影响区中的含氢量吗？

最后，有关应力的影响提出下列问题：

在能引起裂缝的所有应力中间，由热影响区的相变引起的那些应力起什么作用？

焊缝金属的塑性对开裂过程的影响可以测定吗？一般认为，一种较软的焊缝金属造成大量的氢向母材扩散，然而，造成的应力较小。

随焊缝金属的屈服强度不同，焊趾和焊根的缺口影响是怎样变化的？

母材的原始状态有什么影响？这个问题对淬火和回火钢的可焊性是很重要的问题。

最后一个问题，与冷裂缝机理无关，但与其结果有关。

裂缝对焊件和结构的机械性能的影响怎样？事实上，目前，我们能够测定，甚至解释冷裂缝，但却不能很好地预示裂缝对结构寿命的影响。

一 机 部 焊 接 研 究 所

译自《国际焊接学会文献》IX-748-71

高 强 钢 的 延 迟 裂 缝*

前 言

影响高强钢可焊性的最重要的因素之一是热影响区中的延迟裂缝。焊接接头中由马氏体转变所造成的这些裂缝经常只在使用过程中，并且在应力低于给定淬硬钢的强度时出现。

很多作者谈到，这些裂缝是由于焊接时掺入接头中的氢所造成的。已发表过的文章也表明，即使是在无氢的情况下也有裂缝出现。

对马氏体组织的非焊制材料延迟裂缝问题的研究结果，曾提出了有关延迟裂缝形成原因的两种不同的观点。一种认为，裂缝形成与氢扩展过程有关，并且氢对钢的性能变化有影响。另一种认为，马氏体自身转变的影响为淬硬钢延迟裂缝的原因。

本文研究钢的焊接接头延迟裂缝产生的原因。最初研究了13%Cr钢中的裂缝倾向，在无氢及氢含量增加的（4~10毫升/100克）条件下，评定了各种形状的延迟裂缝的形成。为消除合金元素可能的影响（铬、镍、钼等等），采用优质碳钢 12050 或 12041（捷克标准）进行了试验。

结果和说明

裂缝类型 根据延迟裂缝形成的统计学测定，确定了裂缝产生的性质和类别：

1. 存在于焊接接头热影响区中的延迟裂缝，根据裂缝的位置和形状，可分成各种类型；
2. 每一种类型都保持其同一特性，同时存在两种以上的不同类型裂缝是很少见的；
3. 就各种裂缝的各自的形状来说，可以设想，每一种裂缝是在不同条件下形成的；
4. 由于延迟期主要取决于局部收缩应力的方向和大小，裂缝形成的延迟期未成为一种合适的判别标准；
5. 焊接时形成的延迟裂缝不能一律按晶间或穿晶来分类。焊接时，这种或那种都会出现，在很大程度上受母材的制造冶金学的影响。

观察到的裂缝可以分成四类，如点焊道断面中所示（图1）。这四种类型裂缝的典型例子示于图2、3、4、5。

* 本文原名为“高强钢的可焊性”（译者注）

第1类—焊道下裂缝 是在熔合线下奥氏体化温度达到最高值，因而奥氏体晶粒度最大的区域中形成的裂缝。这种裂缝仅在用一定含氢量的铁素体焊条焊接时出现。

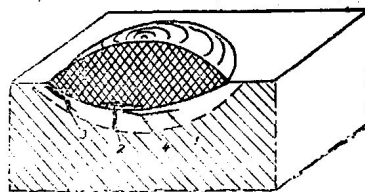
第2类—横向裂缝 这种裂缝垂直等温面方向扩展，已证实是在粗晶粒马氏体区开始发生的。横向裂缝常常扩展到焊缝和母材，虽然存在氢时会促使这种裂缝发生，但即使在没氢存在时，也可能在热影响区中产生横向裂缝。

第3类—缺口裂缝 这种裂缝发生在热影响区的外表面（如焊趾部位），也就是发生在缺口作用最大的地方。裂缝开始发生的部位局限于多轴拉伸应力区，特别是粗晶粒马氏体区。没有氢时也会发生这种裂缝。

第4类—过渡裂缝 如果用奥氏体焊条焊接，这种裂缝起始于靠近热影响区的焊缝金属中的马氏体区。所有四类裂缝都倾向于在粗晶粒马氏体区中发生，这种粗晶粒马氏体区是从奥氏体化的最高温度冷却时形成的。

第1、3、4类裂缝一般沿着形成延迟裂缝倾向最严重的等温面发生，这一点对于第1类裂缝最明显（图2）。裂缝的分布极为明显，裂缝直接横穿大尺寸晶粒而不受晶界的影响，所以是典型的短穿晶裂缝。

所有4类裂缝是由垂直裂缝扩展方向的收缩应力作用引起的。在研究的裂缝区域中增大拉伸应力可以证实这种看法。根据钢盘外圆上的焊道使热影响区中的压缩应力增大（图6，a），而圆环内表面上的焊道在热影响区中造成较大的拉伸应力（图6，b）进行了试验。在后一种条件下的试验表明，产生裂缝的机率比前一种条件下大20~70%。利用这一原理确定出现每种裂缝的机率。采用铁素体和奥氏体焊条试验的结果如图7。出现的百分率是以有裂缝断口数与检查的总断口数之比计算的。



1. 焊道下裂缝；2. 横向裂缝；
3. 缺口裂缝；4. 过渡裂缝。

图1 点焊道试件过渡区中的延迟裂缝的主要类型

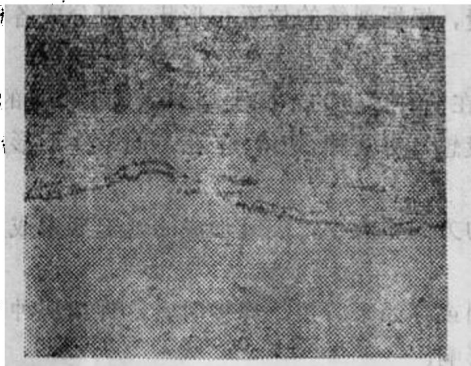


图2 沿着延迟破坏倾向最大的等温面产生的焊道下裂缝的性质

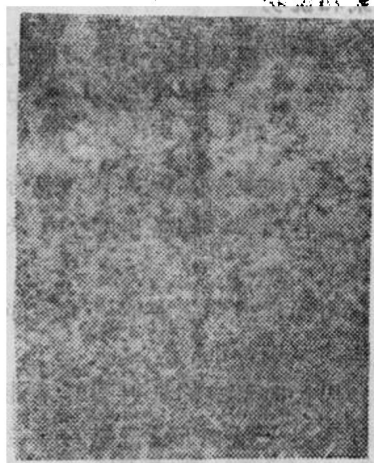


图3 过热马氏体区中开始的典型横向裂缝。焊缝金属是用18铬/8镍奥氏体焊条熔敷的