

本书的目的和特点

本书就焊接冶金学的最重要论题“钢材的焊接裂缝”，综合整理了过去的知识和最近各国的研究成果，系统地作了概括性的阐述。内容是关于低碳钢和低合金高强度钢焊接区在常温下发生的各种冷裂缝。论述了裂缝的类型、形态、现象、试验方法、影响因素、裂缝机理和理论以及防止措施，同时指出了有待于今后研究的一些问题供研究人员参考。

本书不但可供钢材和焊接材料制造者参考，而且也是为焊接设计人员、施工技术人员、管理和检验人员以及焊接研究人员而撰写的。本书的最大特点是把大量研究报告中繁复内容的精华，归纳整理成易于实际应用的、方便的图表。因此，书中多数插图往往是将原研究报告的几个图表之内容综合在一幅图中。而且本书不是几个人分担执笔，而是由作者单独写成，所以在各种焊接裂缝的处理上考虑了其系统性。

目 录

本书的目的和特点

本书的内容与今后的研究课题

一、钢材焊接裂缝的种类	1
二、焊道下裂缝和焊趾裂缝	3
(一) 裂缝的形态和试验方法	3
(二) 巴提尔的焊道下裂缝理论	5
(三) 合金元素的影响	8
(四) 其它因素的影响	11
(五) 防止焊道下裂缝的措施	13
三、焊接区的氢	16
(一) 氢的扩散与逸出	16
(二) 焊接区的氢及其逸出	27
(三) 焊接区的氢源	36
(四) 钢的氢脆	46
四、根部裂缝	57
(一) 根部裂缝的形态和试验方法	57
(二) 拘束度和拘束应力	66
(三) 影响根部裂缝的各种因素	76
(四) 根部裂缝的宏观理论	102
(五) 填角焊接的根部裂缝	110
(六) 防止根部裂缝的措施	115
五、层状撕裂	124
(一) 层状撕裂的形态和试验方法	124
(二) 影响层状撕裂的各种因素	131
(三) 防止层状撕裂的措施	136

VI

六、焊缝金属的冷裂缝	139
(一) 显微裂缝	139
(二) 多层焊缝金属的宏观裂缝	148
七、多层焊接的冷裂缝	152
(一) 焊趾裂缝	152
(二) 变形裂缝	160
(三) 超厚板焊接的冷裂缝	167
八、防止钢材焊接裂缝的要点	175
参考文献	178

一、钢材焊接裂缝的种类

在钢材焊接过程易产生的裂缝中，除图 1 所示者外，还有消除应力退火裂缝。

焊接裂缝是一种损害结构物安全性的最危险的焊接缺陷，由无损检查法测出的裂缝，1975 年以前，在重要的接头中一般是不允许的。

高强度钢的焊接裂缝可以分为以下几类：

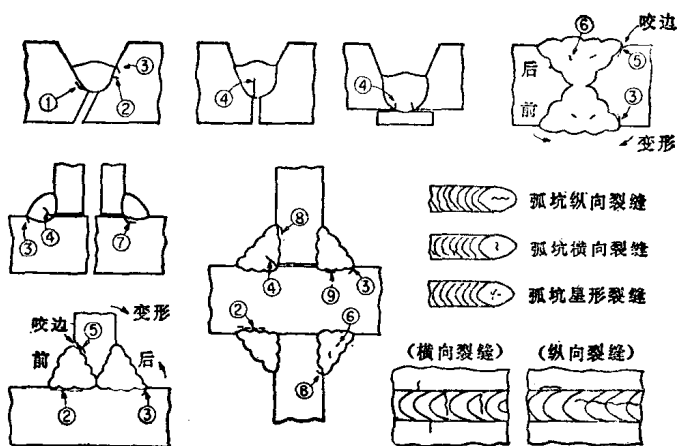


图 1 焊接时的各种裂缝

- ①热影响区根部裂缝 ②层状撕裂 ③焊趾裂缝 ④焊缝金属根部裂缝
 ⑤变形裂缝 ⑥焊缝金属显微裂缝 ⑦趾部裂缝 ⑧热影响区显微裂缝
 ⑨焊道下裂缝

- (1) 按发生部位来分有焊缝金属裂缝和母材裂缝；
- (2) 按发生温度来分有热裂缝和冷裂缝；
- (3) 按尺寸来分有宏观裂缝和显微裂缝；
- (4) 按相对于焊道的方向来分有纵向裂缝和横向裂缝；
- (5) 按发生的形态来分有根部裂缝、焊趾裂缝、踵部裂缝（ヒールクラック）、焊道下裂缝、层状撕裂、弧坑裂缝和微裂缝。
- (6) 按发生原来分有再热裂缝和变形裂缝等。

二、焊道下裂缝和焊趾裂缝

(一) 裂缝的形态和试验方法

焊道下裂缝 (underbead crack) 是一种以小规范进行电弧焊接时发生在高强度钢热影响区中的微小裂缝, 往往不能在表面上发现。图 2 即示在Cr-Mo系强韧钢板中, 用氢含量多的涂药焊条 (二氧化钛型) 所焊接的焊道断面内发生的焊趾裂缝 (从焊缝边缘发生) 和焊道下裂缝^[1]。根据实验, 前一种裂缝在焊后数分钟即发生, 而后一种焊道下裂缝则在

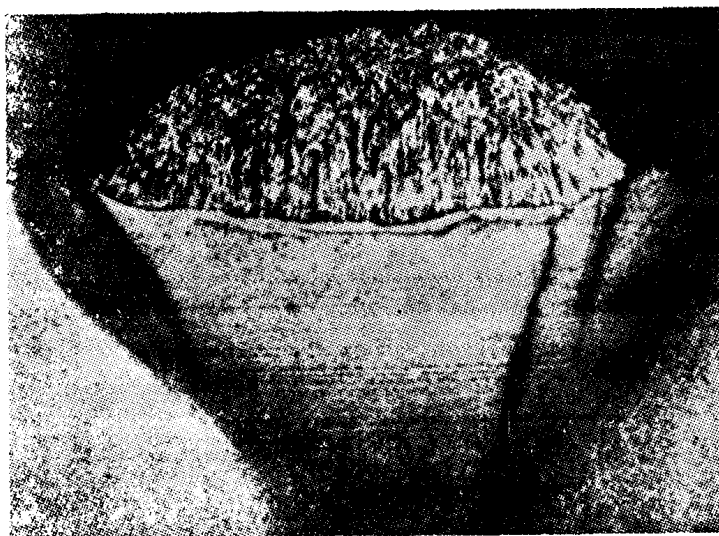


图 2 板厚3.2毫米的SAE4130
钢板(0.30C, 10Cr, 0.20Mo)焊道断面内的焊趾裂缝和焊
道下裂缝(E6013二氧化钛型焊条)^[1]

焊后数十分钟或数小时后才发生。

另一个例子为示于图3的 Mn-Si 系 HT50 钢(50 公斤级高强度钢), 25 毫米厚板用含氢多的高纤维素型涂药焊条所焊接的焊道之横断面^[1]。图中上半部分为焊缝金属的柱状组织, 焊道下裂缝发生在离熔合线 0.1~0.2 毫米之粗晶区的马氏体组织部分。裂缝主要通过晶内(贯穿晶粒)或者沿晶界扩展, 但不是一条连续的裂缝, 而是由小的、一个一个的显微裂缝集合而成。

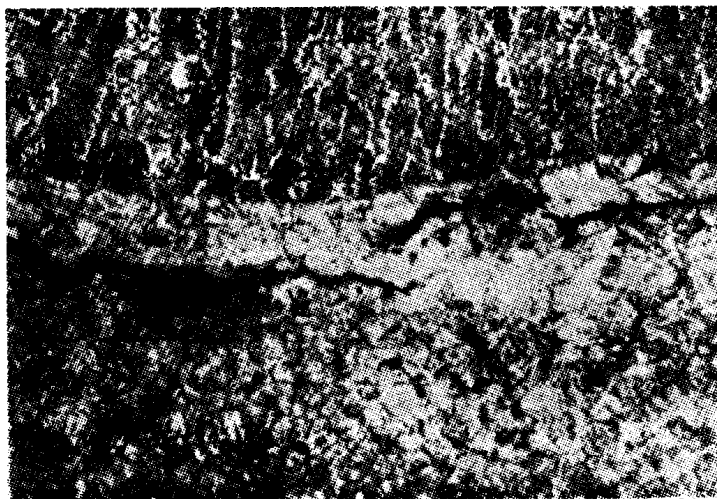


图3 HT50钢板(0.17C, 1.17Mn)
的焊道下裂缝(50×8/15)^[1]

关于高强度钢、特别是防弹钢板的焊接区之焊道下裂缝, 美国的巴提尔研究所 (Battelle Memorial Institute) 曾对这种裂缝进行了详细的研究, 试验使用如图4所示的焊道下裂缝试板^[1, 2]。用小直径($\phi 3.2$ 毫米)高纤维素型(产生大量的氢)焊条以低热输入(100安, 25伏, 25厘米/分)

堆焊短焊道（长 38 毫米），并以放置 1 天后在中央纵剖面内测出的裂缝长度与焊道全长之比作为裂缝率。试验方法的详细内容从略。裂缝率的精度，以 5 个试板的平均值计约为 20%，若取 10 个试板则为 5~10%〔2〕。

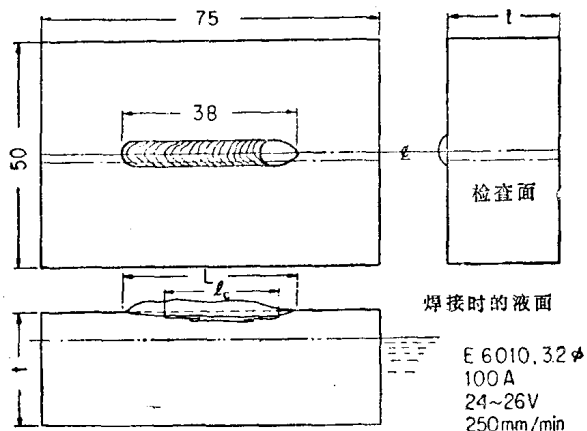


图 4 巴提尔式焊道下裂缝试板〔1,2〕

根据巴提尔研究所的多年研究，焊接区中氢越多，且马氏体量越多，则越容易发生焊道下裂缝〔1〕。由于巴提尔式焊道下裂缝试验拘束较弱，存在裂缝敏感性低的缺点，为克服它，采用含氢多的高纤维素焊条和低热输入、快速冷却方式来提高裂缝的发生率。这种试验方法，对于相对地比较钢材的抗裂性是方便的，但与实际的施工条件相差较远。对于实际的施工条件来说，则后述的斜 Y 形拘束裂缝试验方法其敏感性要好得多。

（二）巴提尔的焊道下裂缝理论

低合金钢中发生的焊道下裂缝，因焊条的药皮类型不同

而有显著的差别，这与电弧气氛中氢含量有密切的关系，这一点已为巴提尔研究所的麦利特 (Mallet) 和里皮尔 (Rieppel) [3] 所查明。他们用不产生氢和水蒸汽的薄药皮空心焊条，并通过焊芯的内孔向电弧气氛中送入二氧化碳、一氧化碳和氢气的混合气体的办法，对 C-Mn 钢 (HT50, 50 公斤/毫米² 级高强度钢) 作了焊道下裂缝试验，其结果如图 5 所示 [3]，裂缝率随氢含量以正比例增大。再则，高纤维素型涂药焊条电弧气氛中的氢气含量约为 40~50% (容积)，而用低氢型焊条时则为 2~10

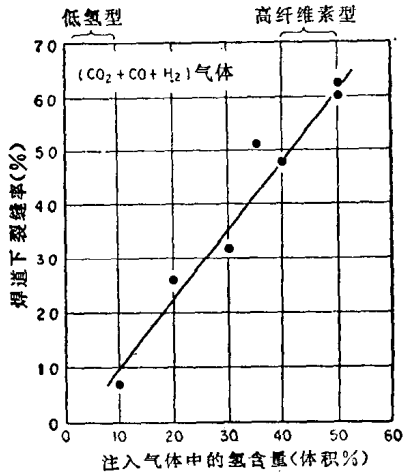


图 5 电弧气氛中的氢气含量与焊道下裂缝 [3]

%左右。由图可见，采用低氢型焊条对防止焊道下裂缝是极为有益的。

另外，麦利特和里皮尔 [4] 对 Mn-Mo 系防弹钢板，用低氢型焊条堆焊焊道、而无焊道下裂缝的试板，在室温下电解充氢，用实验方法证明了发生焊道下裂缝和焊趾裂缝的事实。

在这些研究的基础上，对低合金钢的焊道下裂缝提出了以下的理论，目前已广泛地得到公认 [3, 4]。这些理论是：

(1) 用容易产生氢的焊条焊接时，焊缝金属大量地吸收氢，随着焊缝的冷却，氢向热影响区扩散，那里的氢含量

增多并达到饱和。

(2) 即使在低碳钢的情况, 用小规范焊接, 在室温时热影响区中也产生马氏体。

(3) 马氏体由于氢作用而脆化, 因收缩应力和相变应力而产生微小的裂缝。

焊道下裂缝系在焊后数分钟乃至数天之后发生的, 是延迟裂缝的一种。焊接结束后到发生裂缝的时间称为潜伏期 (incubation period)。若根据氢学说, 这一潜伏期可理解为: 氢从焊缝金属扩散到热影响区的硬化区并达到某个极限量的时间。

关于HT70、HT80钢以及Ni-Cr-Mo钢发生焊道下裂缝和焊趾裂缝的温度与潜伏期, 根据小林等人^[5]的研究, 对HT80钢用钛铁矿型焊条焊接时的焊道下裂缝而言如图6所

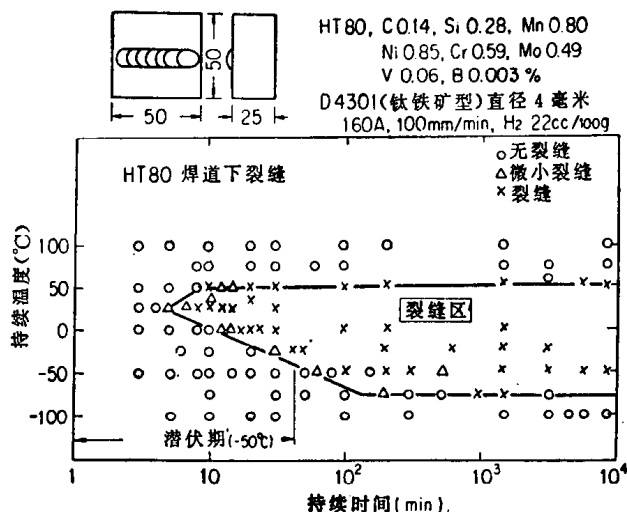


图6 HT80钢发生焊道下裂缝的温度和潜伏期^[5]

示。对于这种HT80钢，在50℃以下直至-75℃的温度区间内，焊后经数分钟乃至数小时就发生焊道下裂缝。其潜伏期在25℃时为最短。图示为使用扩散氢含量多的钛铁矿型焊条（22毫升/100克）的情况。如果采用低氢型（1~3毫升/100克）焊条，则在HT80钢板上堆焊焊道时，就不发生焊道下裂缝。

另外，在HT80钢中虽然不产生焊趾裂缝，但Ni-Cr钢（C 0.35%，Ni 2.71%，Cr 0.74%）在0~-75℃的温度区间，经10~90分钟的潜伏期产生了焊趾裂缝。然而，自硬Ni-Cr-Mo钢（C 0.50%、Ni 1.72%、Cr 0.76%、Mo 0.19%）在50~-100℃温度区间内焊后不到1分钟就发生。经查明，这种钢在热影响区马氏体相当脆的情况下，仅仅因冷却时的收缩应力（即使没有氢的作用）就会发生焊趾裂缝。

（三）合金元素的影响

关于低合金钢的合金元素对焊道下裂缝的影响，作者将巴提尔研究所赛姆斯（Sims）和本塔（Banta）〔6〕的实验结果作了汇总，示于图7。

根据此图来看，C和Mn是最有害的，其次是V和Mo，Cr在1%以下没有影响。Ti在0.02%以内无影响，超过0.02%就有害。Al仅在溶性铝（即可溶于酸的铝含量）处于0.03~0.06%范围内时使裂缝增多。

作者把上述结果归纳为碳当量 C_{eq} 的形式：

$$C_{eq}(\text{焊道下裂缝}) = C + \frac{1}{6} \text{Mn} + \frac{1}{24} \text{Si} + \frac{1}{29} \text{Mo} + \frac{1}{14} \text{V} + 0 \times \text{Cr} \quad (1)$$

（此处 $C \approx 0.21\%$ ）

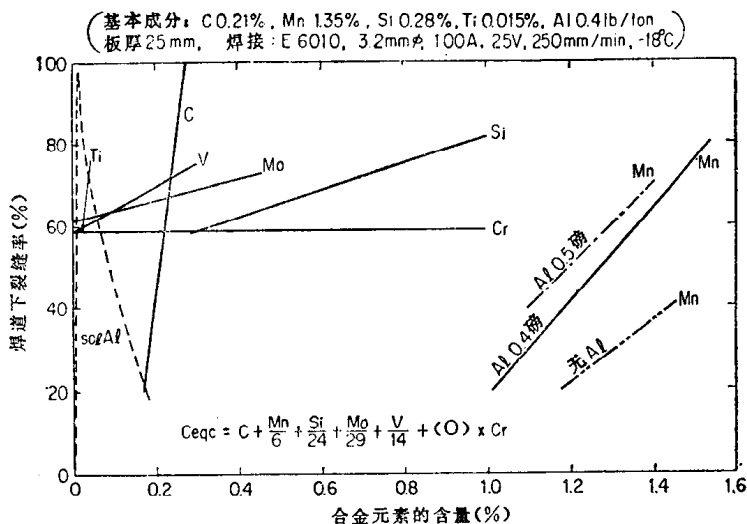


图7 合金元素对低合金钢焊道下裂纹的影响^[6]

Sol Al——熔性铝

这是以日本焊接学会标准 WES 的 C_{eq} 为开端, 而由作者等人开始采用的一种形式。但式(1)是以 $C = 0.21\%$ 的 C-Mn-Ti 钢为基础的, 而对低碳 ($C = 0.13 \sim 0.17\%$) 的 C-Mn 钢, 单独地添加 $0 \sim 0.4\%$ V 或 $0.1 \sim 0.8\%$ Mo 也不产生焊道下裂纹^[6]。也就是说式(1)中的 Mo 和 V 的系数为零, 于是可得:

$$C_{eq} = C + \frac{1}{6} Mn + \frac{1}{24} Si + 0 \times (Cr + V + Mo) \quad (1')$$

(此处 $C = 0.13 \sim 0.17\%$)

这样, 碳当量式中的系数应根据钢的含碳量作相应的改变。

关于 25 毫米厚的各种化学成分的 C-Mn 钢 ($C = 0.17 \sim 0.36\%$, $Mn = 0.38 \sim 1.51\%$), 巴提尔研究所^[1, 7]在室温 (24°C)、 66°C 和 107°C 时所作的焊道下裂纹试验的结果, 如

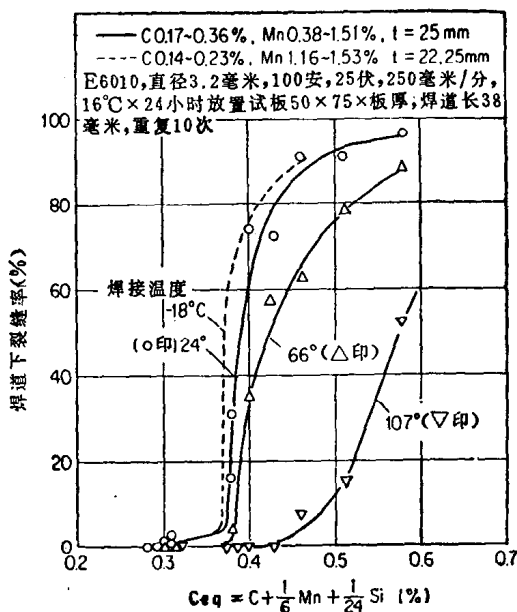


图8 碳当量和预热温度对C-Mn钢焊道下裂缝的影响(高纤维素型焊条, 板厚22~25毫米)(作者据资料^[1]和^[7]绘制)

图8中圆圈标记所示, 碳当量在某个极限值以上就发生裂缝(在原来论文中, 碳当量采用 $C + \frac{1}{6} Mn$, $C + \frac{1}{4} Mn + \frac{1}{4} Si$, 但作者以 $C + \frac{1}{6} Mn + \frac{1}{24} Si$ 作图并作了修正)。在这一图中, 若补充其他来源的 -18°C 的资料, 则板厚为22~25毫米的C-Mn钢, 在用高纤维素型焊条以点定焊那种小规范焊接的情况下, 其产生焊道下裂缝的临界碳当量值随着预热温度的升高而显著增大;

预热温度(°C)	-18	24	66	107
$C_{eq} (\%) = C + \frac{1}{6} Mn + \frac{1}{24} Si$	0.37	0.38	0.39	0.46

也就是说，即使合金元素含量多，但由于预热，（特别是100°C左右）裂缝就不易发生。其主要原因如后所述，是由于预热使焊道内的扩散氢含量减少了。

（四）其它因素的影响

关于氢和预热对焊道下裂缝的影响已在上面作了讨论，现就下列其它因素的影响进行评述：

- （1）显微组织和原始状态；
- （2）热影响区的最高硬度；
- （3）焊接热输入量；
- （4）拘束应力。

1. 显微组织和原始状态

产生焊道下裂缝的地方，系在焊接时被加热到约1300°C以上热影响区的粗晶段，因此，HT50~HT100级低合金钢的原始状态，由于高温加热而大部分被改变了。实验证实，它对焊接裂缝几乎没有影响。但是，合金成分多的合金钢，例如Cr-Mo系钢和强韧钢SAE4130，在C=0.28~0.33%，Mn=0.40~0.60%，Si=0.20~0.35%，Cr=0.80~1.10%和Mo=0.15~0.25%时仍残留一部分原始状态，经查明，如果在焊接之前进行碳化物的球化处理（在A₁点处长时间加热），焊道下裂缝就难以发生〔1〕。

2. 热影响区的最高硬度

对25毫米厚的C-Mn钢（轧制状态，HT50）在-18°C时所作的巴提尔式焊道下裂缝试验的结果示于图9〔1〕。图中

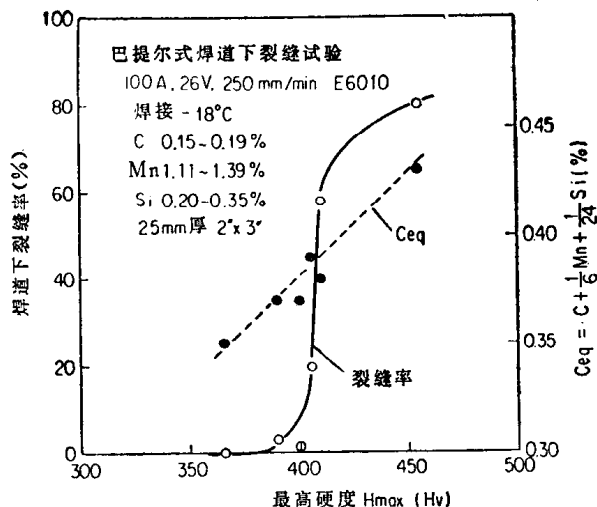


图9 厚25毫米C-Mn钢板(HT50)的焊道下裂縫与碳当量和热影响区最高硬度的关系(高纤维素型焊条, -18°C) [1]

所示为使用含氢量多的高纤维素型焊条 E6010 焊接的、长 38 毫米的短焊道是在热影响区的最高硬度

$$H_{max} \geq 390 \text{ (HV30)} \quad (2)$$

时发生的裂縫，而且示出了在图示的这种焊接条件（板厚 25 毫米，-18°C，小规范，短焊道，含氢量多）下，当

$$C_{eq} \geq 0.37\% \quad (2')$$

时就发生焊道下裂縫。

若增大焊接热输入量，因热影响区的冷却速度减小，最高硬度降低，就能防止焊道下裂縫。另外，兼用预热使最高硬度略有一些降低，而且由于在 100~300°C 温度区间内的冷却时间延长，显著地促进了氢的逸出，当然可使裂縫减少。

3. 拘束应力

在平板上堆焊焊道时，作用于热影响区的应力，除相变

引起的微观应力外，只有因收缩而产生的宏观应力，因此拘束应力不太强。小林、泷本〔8〕的研究查明，如果在这种试板上沿板面从外部施加拉伸应力，则焊道下裂缝增多，若施加压缩应力，裂缝会减少。所以，在对接焊或角焊时，当从外部作用有拉伸或弯曲应力时，将比在平板上堆焊焊道时更易产生焊道下裂缝。

（五）防止焊道下裂缝的措施

根据上述焊道下裂缝的各种现象，其防止措施有如下这些：

1. 减少热影响区的氢

- a) 使用低氢型焊条；
- b) 使用奥氏体型焊条；
- c) 采用少氢的焊接方法（例如 CO_2 电弧焊、金属极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊等）；
- d) 预热或后热；
- e) 增加焊接热输入量；
- f) 干燥焊接坡口。

2. 减少马氏体量

- a) 减少化学成分（碳当量，特别是含碳量）；
- b) 降低冷却速度（预热，增加热输入量）；
- c) 采用后热。

3. 减少拘束（实际上难以实现）

前已指出，如果热影响区的氢浓度相当低，就不会发生焊道下裂缝。低氢焊条经过充分干燥后使用，就可防止或者减少焊道下裂缝。虽然如此，在易发生裂缝时，最好是提高预热温度，或者增加焊接热输入量。对难于提高预热温度的

复杂结构物，将各个焊道在焊接结束后数分钟内（在焊道下裂缝发生之前）进行后热是有效的。借助后热促进了焊道区氢的逸出，而且可使热影响区的马氏体回火并软化。关于后热的效果，根据美国弗伦尼根(Flanigan)和图克(Tucker)^[9]的实验，对厚19毫米的试验钢板（ASTM A441、C-Mn-V系，HT50），不预热用高纤维素型焊条焊接，防止焊道下裂缝所必需的后热温度和最短保温时间如下（参见图10）：

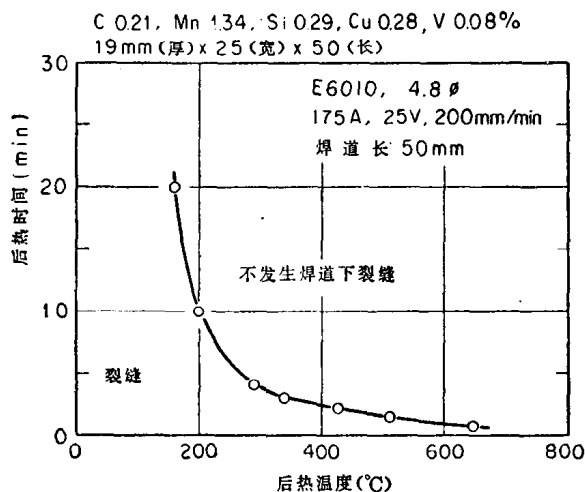


图10 防止厚19毫米HT50钢板(ASTMA441)的焊道下裂缝之必要的后热温度和最短保温时间(高纤维素型焊条)^[9]

后热温度 (°C)	160	200	300	400	500
后热时间 (分)	20	10	4	2.5	1.5

这种试验用材料如不预热，焊接后约10分钟就要产生焊道下裂缝。

上述这些数据系对焊接厚数毫米的焊道、氢容易逸出到