

焊接学会 第 XIIa 专业分委员会
数值分析、CAD/CAM 研究组

“焊接专家系统”专题学术会议 论文集

1989. 11. 北京

焊接冷裂纹的计算机辅助评定(专家系统雏型)

上海交通大学 汪建华

摘 要

本文对低合金结构钢焊接冷裂纹的若干判据。如Itô的预热温度、临界冷却时间(t_{900})_{cr}、临界拘束应力以及后热下限温度等,利用计算机进行了分析研究,并与一些实例进行比较。结果表明,各冷裂判据评定结果是不尽相同的。作者认为在目前尚无完善而成熟的冷裂判据情况下,根据实际的焊接材料和条件,通过计算机进行综合性的辅助评定,将是有效的方法。本文提出了在Itô判据基础上并参照其它判据的冷裂纹综合评定方法,并可由此选择最佳的防止冷裂纹的措施,如预热温度等。

关键词: 焊接 冷裂纹 计算机 预热温度

前 言

在低合金结构钢焊接时,如何选择合理的焊接工艺参数,包括预热、后热和其它措施来防止冷裂纹是一个重要的实际课题。为了解决这个问题,通常是进行各种冷裂试验,如斜Y坡口拘束、刚性拘束裂纹试验等。近年来为了预测和防止冷裂纹,在大量实践和试验基础上,已提出了若干焊接冷裂纹判据。然而这些判据往往是建筑在各自的实验和实际经验基础上,因此如何在实际工作中了解它们各自的适用范围及可靠程度是十分必要的。本文目的就是试图对

目前常用的若干冷裂纹判据进行分析比较。并编制计算机程序对低合金钢的焊接冷裂纹进行综合评定。利用该程序，只要由屏幕输入必要的原始数据，很快可以在屏幕上显示出各种冷裂判据的结果，通过预置在计算机中的知识和推理，得到最后的综合评定结果，并提出防止冷裂纹的预热温度等的建议。

冷裂纹判据简介

影响焊接冷裂纹的主要因素为热影响区的组织和性能，扩散氢含量，拘束应力等。因此建立冷裂纹判据时，通常都以上述各种参量，如碳当量 P_{cm} ，扩散氢含量 $[H]$ 和拘束度 R_f 或拘束应力 σ_r 等作为评定的基础。

一. Ito 的预热温度判据「1」

冷裂纹敏感指数： $P_w = P_{cm} + [H]/60 + h/600$ (1)

式中： $P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$ (2)

$[H]$ ——甘油法测扩散氢含量 (ml/100g)

h ——板厚 (mm)。

防止冷裂纹的最低预热温度为

当 $0.25 \leq P_w \leq 0.4$, $T_0 = 1440 P_w - 392$ (3)

$0.27 \leq P_w \leq 0.5$, $T_0 = 350 \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-5 (P_w - 0.27) \right] \right\}$ (4)

当 $P_w \leq 0.40$ 时，上述两个公式是一致的。

Ito 判据是日本学者 Ito 等在约 200 个钢种试验中得出的统计结果，应用较广泛。但应注意它们是在斜 Y 坡口裂纹试件，在标

准热输入 17 kJ/cm 条件下得到的。板厚 $h = 19 \sim 50 \text{ mm}$, $[H] = 1 \sim 5 \text{ ml/100g}$, 并应考虑它的化学成份范围。由于斜 Y 裂纹试件拘束度较大, 因此该判据较适合接头拘束较严格的情况。此外, t_{100} 判据主要考虑预热的作用, 没有考虑后热的影响, 也没有考虑局部预热可能引起的附加应力等问题。

二. 临界冷却时间 $(t_{100})_{cr}$ 判据「2」「3」

t_{100} 为从焊接结束 (熔点) 至 100°C 的冷却时间。

裂纹指数: $CI = CE + 0.15 \log [H] + 0.30 \log (0.0017 k t_{0.5})$ (5)

式中, $CE = C + A(C) \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo+Nb+V}{5} + 5B$ (6)

$A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh [20(C - 0.12)]$ (7)

σ_y —— 屈服应力 (MPa)

k_s —— 应力集中系数, 对于 X、Y 型坡口根部, 可取 $k_s = 4$ 。

临界冷却时间 $(t_{100})_{cr}$ 为

$(t_{100})_{cr} = \exp(68.05 CI^3 - 181.77 CI^2 + 163.8 CI - 41.65)$ (8)

防止冷裂纹的预热温度, 可以在实际焊接时冷却到 100°C 的时间 t_{100} 大于 $(t_{100})_{cr}$ 的基础上选择, 即

$t_{100} > (t_{100})_{cr}$ (9)

临界冷却时间 $(t_{100})_{cr}$ 判据, 考虑到了温度较低时氢的逸出但未反映出相变区间冷却速度是其不足之处。文献「2」对该判据作了一些改进, 并根据钢材标准屈服应力对预热温度进行修正。

三. 临界拘束应力 σ_{cr} 判据「4」

从力学观点看，焊接接头某处的应力 σ 大于临界拘束应力 σ_r 时将会引起裂纹，因而可采用

$$\sigma < \sigma_r \quad (10)$$

作为冷裂纹的判据。然而在实际应用中却存在许多问题。首先实际应力 σ 确定十分困难，采用拘束度概念也是十分粗糙的。其次临界拘束应力 σ_r 测定有 RRC, TRC, 插销法和 PRRC 试验等。它们与实际焊接接头也不尽相同，这就大大地影响了判据的精度。因此该判据还不成熟，但可作为参考。

1. 焊接接头拘束应力 σ

$$\sigma = m \cdot Rf \text{ (MPa)} \quad (11)$$

式中， $m = 0.03 \sim 0.05$ ，通常取 0.045

Rf —拘束度 (N/mm²·mm)，通过实测或估计确定。

当 σ 超出材料屈服应力 σ_s 时，应采用如下公式：

$$\sigma = \sigma_s + 0.0025 (Rf - 22\sigma_s) \quad (12)$$

2. 临界拘束应力 σ_r

本文推荐插销试验临界应力经验式「5」：

$$\sigma_r = -2420 \left(P_{em} + \frac{[H]}{60} \right) + 5001g \pm 100 - 30 \quad (13)$$

当计算出 σ_r 和 σ 后就可以由 (10) 式对冷裂纹进行评定。如前所述，此法由于 σ_r 和 σ 的确定比较粗糙，因而仅能作初步估计。作为简单的判别，也有主张直接从插销试验的临界应力是否超过材料的屈服应力，甚至强度极限，即

$$\sigma_r > \sigma_s \quad \text{或} \quad \sigma_r > \sigma_b \quad (14)$$

作为冷裂纹的判据。

文献「6」对预热、后热对 σ 和 σ_r 的影响，采用 PRRC 试验进

行了研究。

四. 后热下限温度 T_{pc} [5]

若采用紧急后热处理来防止产生冷裂纹, 则有一个后热温度下限 T_{pc} , 低于此温度, 后热就不能防止冷裂纹的产生。 T_{pc} 可作为预热温度的上限温度, 即如果预热温度在 T_{pc} 以上, 则不论含氢量高低及拘束度大小, 均不会产生冷裂纹。

一个 T_{pc} 的碳当量 $[C_e]_p$ 的经验公式如下:

$$\begin{aligned} [C_e]_p = & C + 0.2033Mn + 0.0473Cr + 0.1228Mo + 0.0292 \\ & Ni - 0.0792Si + 0.0359Cu - 1.595P + 1.692S \\ & + 0.844V \end{aligned} \quad (15)$$

$$T_{pc} = 455.5[C_e]_p - 111.4 \quad (16)$$

可见, 碳当量越大, 后热下限温度 T_{pc} 越高。实际后热温度 T_p 应高于 T_{pc} 。后热时间 t_p 与后热温度的关系为:

$$t_p = A \exp\left(\frac{Q}{RT_p}\right) \quad (17)$$

式中的 R 及 A 为常数, Q 为激活能。

后热温度提高, 则后热时间可减少。

五. 熔合区的临界 $(t_{8/5})_{cr}$ [7][8]

熔合区从 800°C 到 500°C 的冷却时间 $t_{8/5}$, 是影响该区组织和性能的决定性因素。利用控制 $t_{8/5}$ 值来确定最佳焊接工艺参数, 包括防止冷裂纹, 有了很大的发展。其判据为:

$$t_{8/5} > (t_{8/5})_{cr} \quad (18)$$

熔合区的 $t_{8/5}$ 值可以根据焊接参数和工件的尺寸形状, 通过热传导分析得到。 $(t_{8/5})_{cr}$ 则根据材料的 SH-CCT 图及有关性能

试验得到。本方法建立在获得良好的焊接接头组织与性能基础上。采选择最佳焊接参数和预热温度并防止冷裂纹，是一个比较好的方法。目前主要问题是 $(t_8/5)_w$ 确定的原则尚需进一步研究。

六、其它冷裂纹判据「9」

尚有临界扩散氢判据，临界马氏体判据和纤维断面比率判据等，实际应用较少，在此不作详细介绍。

焊接冷裂纹的综合评定和程序

首先在屏幕上采用表格输入原始参数，包括钢材板厚，化学成分，扩散氢含量，初选的焊接参数和预热温度接头形式，拘束程度（A为高拘束， $R_f=700h$ ；B为一般拘束， $R_f=400h$ ）等，然后进行计算迅速得到各个冷裂判据的各自评定结果。在此基础上再进行全面分析进行综合评定，最后输出各冷裂判据以及综合的评定结果和建议（表格形式）。

综合评定的原则是通过许多研究，特别是实例分析而确定的。它以 $I t_0$ 的预热温度作为主要的基准，同时参考其它判据进行调整。这是因为 $I t_0$ 判据有较坚固的实验基础，比较实用而可靠。根据上述方法，初步分为如下几个评定指标：

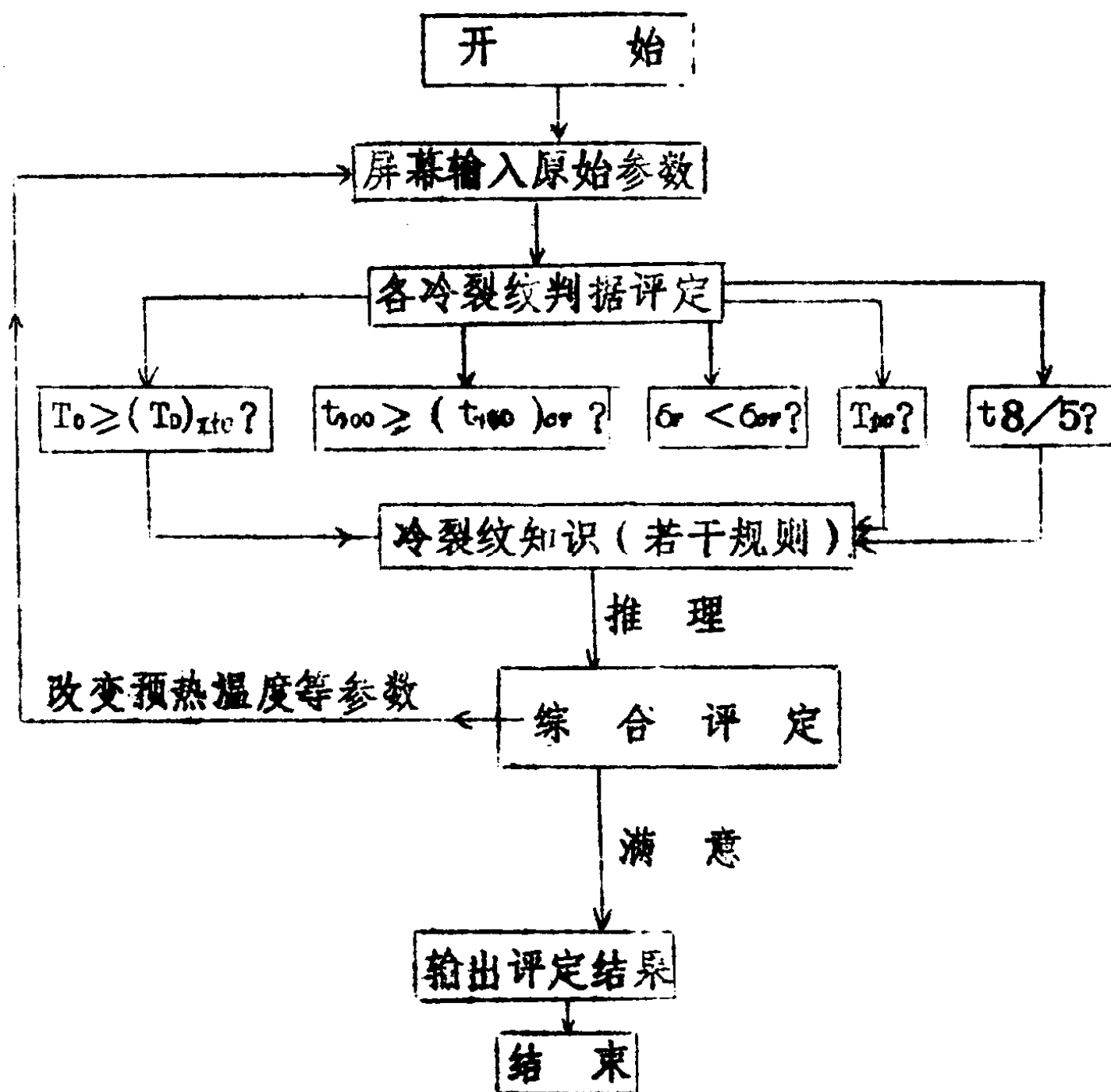
A—预热温度适当。

B—预热温度偏高，可适当降低；

C—预热温度不足，应适当提高；

D—要求预热温度过高，若局部预热可能产生高的附加应力，

建议考虑后热处理。



计算机流程图如上

上述程序具有初步的专家知识和推理功能，它可以在使用过程中加以修改补充和发展，因而可以说是一个焊接冷裂纹评定专家系统的雏型。程序采用 BASIC 语言编写，可在 IBM-PC 机上运行。

实例分析

表 1 为若干焊接冷裂纹评定的实例。^[10]材料为 16Mn, 921 和 14MnMnNbB, 采用手工焊在常规线能量下焊接。由表 1 可见，综合评定的结果是基本上符合实际情况的。例如，对于 16Mn 钢，序

1 由于预热不足产生裂纹, 综合评定为 C, 序号 2 综合评定为 B, 即预热温度 100°C 尚可适当降低一些, 序号 3 综合评定为 A, 即在 20°C 时不预热也不产生裂纹。同样对 921 钢的综合评定也是很适当的。对于 18MnMoNbB 板厚 28mm 的情况, 根据综合评定, 预热温度应大于 100°C , 小于 150°C , 这也与实际情况相符。

利用本程序系统, 可以反复调整预热温度或其它参数, 以达到防止冷裂纹的最佳效果。

结 论

1. 提出了一个以 It_0 预热温度为基础, 参考其它各判据的焊接冷裂纹综合评定方法。

2. 通过若干实例分析表明, 上述综合评定方法考虑到各个方面, 比较实用而可靠, 并可找到防止焊接冷裂纹的最佳条件。

3. 建立了一个焊接冷裂纹专家系统的雏型, 它可以在使用过程中修改和补充, 逐步完善。

参考文献

- 「1」伊藤庆典等, 《溶接学会志》, 1968, No. 9, 1969, No. 10.
- 「2」予热温度の实践的决定方法, 《溶接学会志》, 1987, No. 1
- 「3」N. Yarioka et al, 《Welding Journal》, 1983, No. 1
- 「4」佐藤邦彦等, 溶接工学, 理工学社, 1979.
- 「5」秦伯雄等, 《焊接》, 1988, No. 11
- 「6」陈伯鑫, 金属焊接性基础, 机械工业出版社, 1982.
- 「7」曾乐, 焊接工程学, 新时代出版社, 1986.
- 「8」K. Masubuchi 著, 张伟昌等译, 焊接结构分析, 机械工业出版社, 1985.

表1 焊接冷裂纹评定实例

序号	原始参数				冷裂判据						综合	实际
	钢种	h (mm)	[H]	T ₀ (°C)	(T ₀) _{no} (°C)	T _{pe} (°C)	t ₁₀₀ (s)	(t ₁₀₀) _{cr} (s)	σ _r (MPa)	σ _{cr} (MPa)	评定	裂纹
1	16Mn	50	2	25	132	91	64	200	399	193	C	有
2	16Mn	30	0.94	100	59	91	600	55	380	722	B	无
3	16Mn	18	2	20	56	91	180	200	324	418	A	无
4	921	20	0.46	15	46	73	160	272	579	424	C	有
5	921	20	0.46	60	46	73	387	272	579	615	A	无
6	921	20	0.46	80	46	73	538	272	579	687	B	无
7	14MnMoNbB	28	2	20	118	111	104	2054	405	248	C	有
8	14MnMoNbB	28	2	100	118	111	607	2054	405	631	C	无
9	14MnMoNbB	28	2	160	118	111	1455	2054	503	821	B	无
10	14MnMoNbB	28	2	200	118	111	2211	2054	503	912	D	有

[9] 《国外焊接》，1987, No. 1

[10] 《焊接》，1985, No. 1, 1986, No. 6, No. 11, 1988, No. 5.