

钢 焊 接 区 的 热 应 变 脆 化

日本焊接协会 HSE 委员会编

机 械 工 业 出 版 社

分

钢 焊 接 区 的 热 应 变 脆 化

日本焊接协会 HSE 委员会编

会员委员 委员会 委员会 委员会 委员会

严 莺 飞 译

王 楠 文 校

1981年10月第1版 1981年10月第1次印刷
16开 128页 32开 128页 32开 128页 32开 128页
定价：0.80元 0.80元 0.80元 0.80元

机械工业出版社

本书系统而全面地叙述了钢焊接区的热应变脆化问题。这是焊接学科领域的一个新课题。着重介绍了焊接等热循环过程引起的热应力、应变循环、焊接热应变循环对材质的影响、线状加热和焊后热处理对材质的影响、热应变脆化与焊接接头脆性断裂行为的关系以及带缺口宽板焊接接头的断裂力学分析等问题的研究成果和现状。

本书可供从事钢材焊接和焊接接头力学性能研究的工程技术人员、焊接专业的教师、研究生和高年级学生参考，也可供从事断裂力学研究的有关人员、一般焊接技术人员参考。

社团法人日本溶接協会 HSE 委員会
溶接学会技術資料 No. 2 (JWS BULLETIN)
鋼溶接部の熱ひずみ脆化 (レビエー)

1977年2月

* * *

钢焊接区的热应变脆化

日本焊接协会 HSE 委员会编

严雪飞 译

王岫文 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 6 · 字数 130 千字

1982 年 10 月北京第一版 · 1982 年 10 月北京第一次印刷

印数 0,001—7,600 · 定价 0.75 元

*

统一书号: 15033 · 5284

序 言

钢结构在其制造过程中，将受到焊接、气割、火焰加工等各种进行局部加热的热加工。过去有几篇文献已经指出，由这些热加工引起的局部热、应变循环，有时将对钢材及其焊接区的机械性能，特别是对断裂韧性产生很大影响。但是可以说，定量地掌握热加工工艺条件对钢材及其焊接区机械性能的影响，并将这种定量影响在决定施工工艺条件时反映出来，这从钢结构使用性能的观点来看是很重要的。

从这个观点出发，日本焊接协会钢铁部门会议决定设立热应变脆化(HSE——Hot Straining Embrittlement)委员会，进行有关热应变循环引起的钢材及其焊接区的机械性能变化规律的共同研究。对于热应变脆化委员会，在研究的第一阶段，就是调查过去有关这个问题在各方面进行过的研究成果，以适当的形式加以汇集，从而提出问题进行研究。本书就是这样所汇集成的调查报告。

在本书的编写过程中，承蒙日本焊接协会钢铁部门会议技术委员会各位委员的帮助指教。同时，这份调查报告是由热应变脆化委员会中设立的专门小组进行编写的，资料图表的整理得到西川修史先生（大阪大学）的合作。对给予协助、合作的各位先生和引用文献的各位作者——表示感谢。

目 录

序言

第一章 焊接接头的脆性断裂行为和影响因素..... 1

1.1 断裂行为的影响因素和早期的脆性断裂实验 1

1.2 韦尔斯-木原试验和残余应力对脆性断裂的影响 5

1.3 材质变化对低应力脆性断裂的影响 9

1.4 缺口的加工时期对带缺口宽板焊接接头产生脆性断裂的影响 10

1.5 预热、焊后热处理对焊接接头脆性断裂的影响 18

第二章 焊接等热加工过程中的热应力、应变循环..... 22

2.1 焊接热应力、应变循环和残余应力、应变 22

2.2 存在初始裂纹的对接接头的热应力、应变循环和残余应力、应变分布 30

第三章 受预应变后钢材的材质变化..... 39

3.1 室温预应变对钢材塑性、断裂行为的影响 39

3.2 高温预应变对钢材塑性的影响 49

3.3 高温预应变对钢材断裂韧性的影响 56

第四章 高温预应变脆化和动应变时效..... 67

4.1 应变时效——静应变时效 68

4.2 动应变时效——蓝脆性 74

第五章 焊接热应变循环引起的材质变化..... 93

5.1 焊接接头的断裂韧性 93

5.2 经历了焊接热应变循环后亚临界热影响区的脆化 98

5.3 焊接热应变循环引起的脆化和热应变脆化 115

第六章 线状加热和焊后热处理引起的材质变化 121

6.1 线状加热引起的材质下降 121

6.2 后热处理对焊接接头脆性断裂性能的影响	133
(1) 后热处理与脆性断裂强度	133
(2) 后热处理降低残余应力	143
(3) 残余应力对断裂性能的影响与后热处理	148
6.3 后热处理引起的材质变化	149
第七章 带缺口宽板焊接接头的断裂行为和断裂力学分析	158
7.1 带缺口宽板焊接接头发生断裂的断裂力学分析	158
7.2 存在残余应力的焊接接头的性能评定	170
第八章 结束语	173
参考文献	174

第一章 焊接接头的脆性断裂

行为和影响因素

1.1 断裂行为的影响因素和早期的脆性断裂实验

防止焊接结构的失稳断裂是一个重要问题，从许多研究工作及其取得的成果来看，在这方面人们已经作过努力。以焊接结构作为研究对象时，可以认为焊接区特有的因素决定了结构件的失稳断裂。例如，作为典型的因素可以举出：（a）焊接缺陷的存在；（b）残余应力和残余应变的存在；（c）机械性能和断裂韧性值的不均匀性等。结果，当焊接区发生失稳断裂时，看来是由于下列缺陷的存在起着重要的作用：

（1）焊接残余应力和施工误差等引起的过载状态；（2）焊接等引起的缺陷顶端附近材质下降。

为了弄清焊接区发生的失稳断裂行为，应考虑焊接残余应力等因素，求得焊接区产生的应变状态与缺陷顶端变形行为的关系并查明缺陷顶端附近的断裂韧性值。

研究有关焊接结构中出现的低应力脆性断裂，首先是从实验室内实现模拟低应力脆性断裂开始的。根据这种观点，在实验室内，静载下成功地使焊接接头发生脆性断裂的大概要算肯尼迪（Kennedy）^{〔1〕}最早。肯尼迪进行了下列研究：

（a）拘束应力对脆性断裂的影响；（b）根据无缺口焊接接头三点弯曲试验，有无预热和后热与脆性断裂行为的关系；

（c）结构上的不连续性引起载荷集中的影响；（d）裂纹的扩展速度等。试验所用的材料为含碳0.2%的半镇静

(semi-killed) 船用钢, 弯曲试件的尺寸如图 1 所示。试验在 $-20^{\circ}\text{F} (-29^{\circ}\text{C})$ 下进行, 试验指出, 弯曲角度有时在 $4^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 时即发生脆性断裂。最后, 肯尼迪导出以下结论:

(1) 对发生脆性断裂来说, 温度是一个非常重要的因素。

(2) 关于残余应力的影响, 如在室温下进行试验, 对于在相当大的变形后发生断裂的情况, 其影响不显著; 而在断裂前变形较小时, 残余应力起着重要的作用。

(3) 当存在非常尖锐的缺口又是低温的情况, 即使只有焊接引起的拘束应力, 有时脆性断裂也会发生。

(4) 焊接引起的材质变化是脆性断裂行为的重要影响因素。预热和后热有改善接头性能的效果。材质变化的影响似乎要比残余应力的影响还显著。

(5) 裂纹扩展速度约为 4000 英尺/秒 (1200 米/秒)。

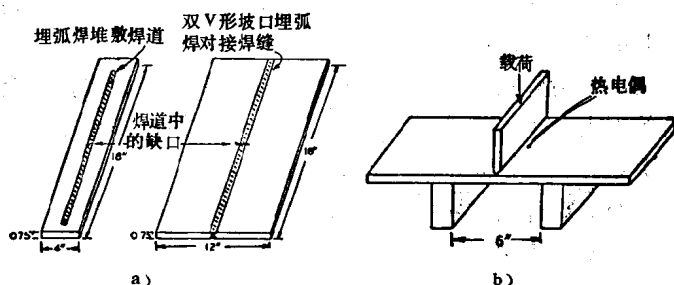


图 1 带缺口弯曲试件^[1]

a) 带缺口焊接接头的弯曲试件 b) 弯曲试验示意图

肯尼迪的研究是在一定的试验温度下进行的实验, 但实现了焊接区的模拟低应力脆性断裂; 并且在脆断的影响因素方面得到了许多很有启示的结论。

继肯尼迪之后, 格林 (Greene)^[2]于 1949 年根据宽板对接接头的弯曲试验指出, 如果降低温度, 则会发生低应力脆性断裂。

有缺陷的交叉焊缝的弯曲试验: 交点处的裂纹尺寸 $5/16 \times 2$ 英寸, 焊件尺寸 30×36 英寸, 试验跨距 23 英寸, 试验温度 -20°F

试件号	弹性极限 (磅/英寸 ²)	断裂弯曲应力或最大应力(磅/英寸 ²)	最大载荷时的挠度 (英寸)	备 注
焊后状态				
1A		10000	0.05	裂口 6 英寸
1B		3300	0.02	裂口 6 英寸
低温消除应力				
2A	58000	82000	0.75	横向裂开
2B	55000	68200	0.31	裂口 12 英寸
炉内消除应力 (1200°F)				
3A	49000	70090*	2.25	未断裂
3B	55000	83000*	2.05	未断裂

* 最大试验载荷下的计算应力, 因挠度限制试验中断。

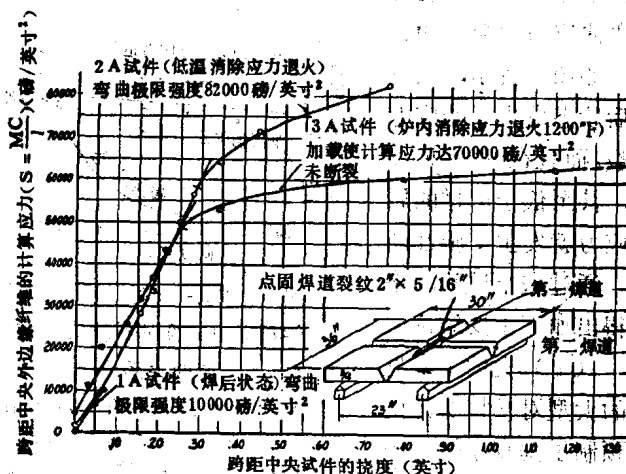


图 2 带缺口十字焊缝对接接头弯曲试验结果和
载荷、挠度曲线举例^[2]

格林首先用低碳钢焊制了尺寸如图 2 所示的十字焊缝接头, 使点固焊道中含有裂纹, 在 -20°F (-29°C) 下进行弯曲试验。进行了焊后状态 (as welded) 和 1200°F (650°C) 1 小时的消除应力 (SR) 处理以及 400°F (204°C) 的低温消除应力处理等三种情况的试验。如图 2 所示, 焊后状态也是在很低的弯曲应力下发生断裂。随后, 格林焊制了在坡口区加工成如图 3 所示的人工缺口的焊接接头, 在各种温度下对这种接头进行了弯曲试验。报导了发生断裂时的弯曲应力和温度的关系, 如图 3 所示, 只有焊后状态发生了低应力断裂, 而且在 $+20^{\circ}\text{F}$ 以下, 甚至低于母材的屈服应力就发生了脆性断裂。通过这个试验, 格林得出如下主要结论:

(1) 大约 1 米见方的大型对接接头, 由于预制了垂直于焊缝中心线的初始缺陷, 可能造成很大的残余应力

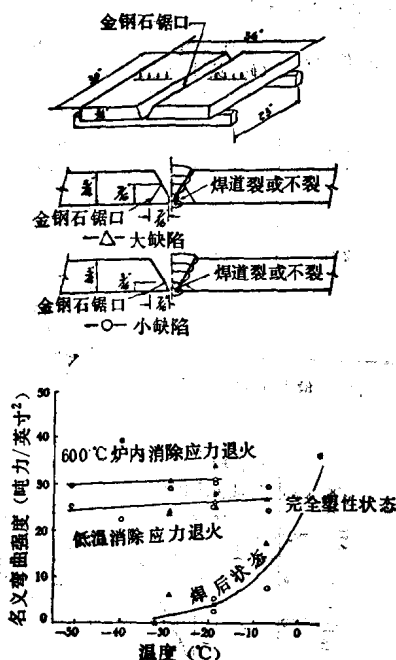


图 3 带缺口焊接接头弯曲试验和弯曲试验时断裂抗力与温度的关系^[2]

- : 焊后状态—小缺陷 △: 焊后状态—大缺陷 ○: 低温消除应力—小缺陷
△: 低温消除应力—大缺陷 ●: 炉内消除应力—小缺陷 △: 炉内消除应力—大缺陷

场，即使在较高的温度下，对于焊后状态的这种接头，也会发生低于母材屈服应力的低应力脆性断裂。

(2) 脆性裂纹扩展到长达 100~200 毫米即停止扩展。

(3) 低温和 650°C 消除应力处理是防止脆性断裂的有效措施。

(4) 断裂应力的跃迁现象是明显的，一旦温度低于某一温度时，在很低的应力下即发生脆性断裂。

这样，由肯尼迪、格林等最初的实验指出，在研究焊接区的断裂行为时，必须考虑把焊接残余应力、拘束应力和因焊接热与热处理引起的材质变化作为主要的影响因素。

1.2 韦尔斯-木原试验和残余应力对脆性断裂的影响

韦尔斯 (Wells)^[3] 于 1956 年根据对图 4 所示的带缺口纵向焊接接头试件的静载拉伸试验，获得了模拟低应力脆性断裂的初次成功。试验中采用厚度 1 英寸 (25.4 毫米) 的半镇静钢板 (C 0.17%, S_i 0.04%, Mn 0.7%, 屈服应力 $\sigma_y = 26$ 公斤力/毫米², 抗拉强度 $\sigma_u = 44.6$ 公斤力/毫米², $T_s = 50^\circ\text{C}$)，焊接前垂直焊缝中心线机械加工出图 4 所示的缺口，每一面各焊三道

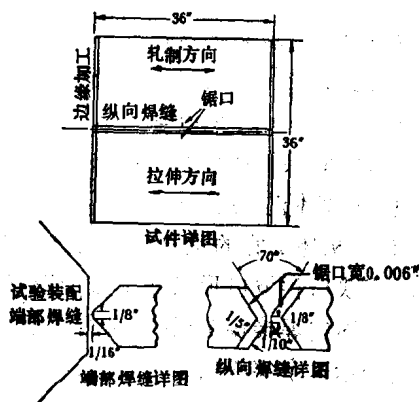


图 4 带缺口纵向焊接接头试件^[3]

焊道后作为拉伸试件。图 5 是表示这个实验结果的曲线图，表示了断裂应力和温度的关系。将这样的试件在不同的温度下进行拉伸试验，则在低温条件下，低应力时即产生脆性裂纹，而一旦止裂，结果需在高达屈服应力的高应力下才达到最后断裂。同样，在高温条件下，也是在高于屈服应力的高应力下，产生裂纹并发生最后断裂的。然而，根据韦尔斯的实验，在某一温度下，虽然只是一例，但发现了在低应力下产生裂纹并且是一次断裂 (single stage fracture)。韦尔斯很重视，最初把这种一次断裂的发生温度叫作“失稳断裂温度 (也称灾难性温度—calamity temperature)”。

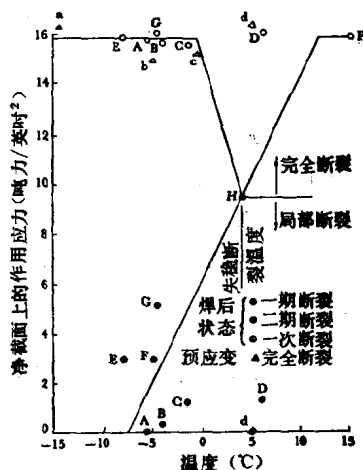


图 5 带缺口纵向焊接接头试件的脆性断裂应力与温度的关系^[3]

韦尔斯实验结果的深远意义在于，仅在静载拉伸条件下，实现了模拟低应力脆性断裂，不过它只是唯一的一例，木原、增渊^[4]从怀疑它的重复性等出发，用和韦尔斯同样的方法，将缺口和坡口形状作了若干修改，就三种低碳钢焊制了带缺口纵向焊接接头试件，进行了静载拉伸试验。图 6 a)、b) 就是表示这个实验结果的曲线图。木原等多次发现低应力一次断裂的例子，并对脆性断裂作了如下三种类型的断裂形态分类：

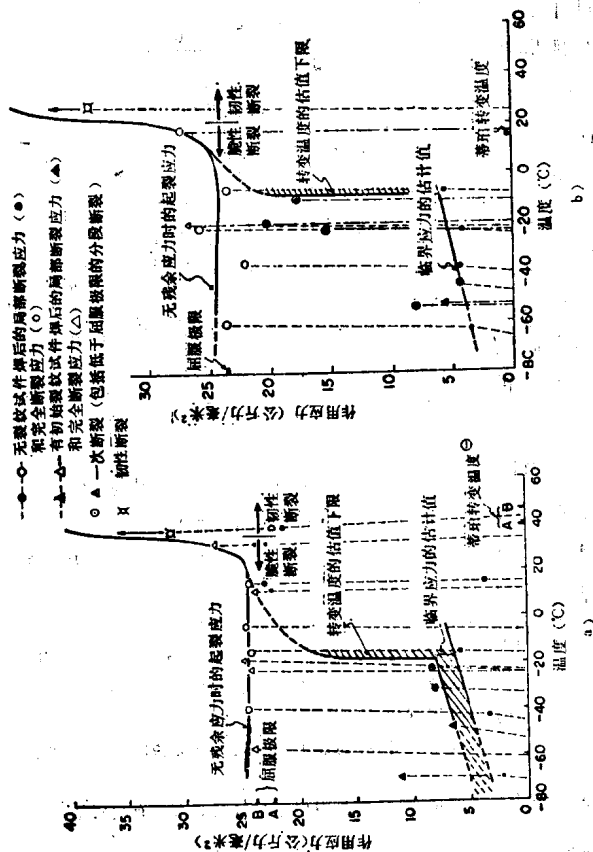


图 6 带缺口纵向焊接接头的脆性断裂强度⁽¹⁾

a) 材料 A 和 B b) 材料 C

① 由蒂珀 (Tipper) 试验求得的脆性断裂转变温度。蒂珀试验是一种使用双边 V 形缺口板状试样进行静拉伸试验的研究钢材脆性断裂敏感性的试验方法, 由英国蒂珀女士首创。——译者注

(1) 低应力一次断裂：在低于屈服应力的低应力条件下，产生脆性裂纹并在试件整个宽度上传播而断裂。这种断裂发生在高于产生裂纹的应力条件下。

(2) 分段断裂 (multiple stage fracture)：在比 (1) 低的应力 ($3 \sim 6$ 公斤力/毫米²) 下产生裂纹，只是在裂纹达到某一长度时，停止扩展，然后当达到相当高的应力时，裂纹再次扩展并断裂。

(3) 高应力断裂：在接近屈服应力的条件下断裂，这种情况有所谓一次断裂和分段断裂。

木原等的实验结果和韦尔斯的区别在于指出了在相当宽

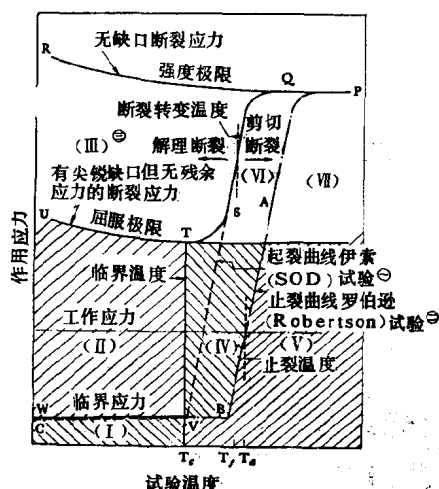


图7 带缺陷纵向焊接接头脆性断裂行为的概念图⁽⁴⁾

- 区域 (I)：起裂但不扩展 (有残余应力和尖锐缺口)
 区域 (II)：起裂并扩展 (同上)
 区域 (III)：起裂并扩展 (有圆钝缺口无残余应力)
 区域 (IV)：不起裂 (有残余应力和尖锐缺口)
 区域 (V)：不起裂且止裂 (同上)
 区域 (VI)：起裂但不扩展 (有尖锐缺口，无残余应力)
 区域 (VII)：起裂但不扩展且止裂 (有尖锐缺口)

- ⊖ 是一种使用单边缺口拉伸试件进行试验的大型脆性断裂试验方法。由美国伊索 (ESSO) 石油公司首先采用，最初叫索德 (SOD) 试验，以后公司易名，改称伊索试验。——译者注
 ⊖ 是一种使用罗伯逊 (Robertson) 试件进行试验的大型脆性裂纹扩展止裂试验方法，由英国罗伯逊教授首创。——译者注
 ⊖ 原文未注出，是译者加的。——译者注

的温度范围内会发生一次断裂，同时说明了搞清楚这种一次断裂发生条件的必要性。最后，木原等把带缺口纵向焊接接头的脆性断裂行为整理成如图 7 所示的概念图。

韦尔斯[3, 5, 6, 7]和木原[4]都在采用带缺口宽板焊接接头的静载拉伸试验模拟低应力脆性断裂方面获得了成功。所以，这种试验一般也称为韦尔斯——木原试验。关于这种试验中的低应力脆性断裂总是从尖锐的缺口处开始的原因，以国际焊接学会 (ITW) 年会等作为讲台，做了多次讨论，认为有以下两点：(1) 缺口周围存在较高的残余应力；(2) 缺口附近断裂韧性值降低。

韦尔斯和木原等主要注意了残余应力对脆性断裂的影响效果并开展了研究。为说明图 5 所示的试验结果，韦尔斯[8, 8]在进行残余应力测定的同时，测定了横贯焊接区切口张开度，在这个基础上求出了裂纹扩展时的应变能释放率（或裂纹扩展力）。木原、增渊[4, 9, 10]也根据同样的研究，由残余应力分布在理论上推算出张开度和应变能释放率，如在第七章中将要谈到的，得到了与试验值很一致的结果。

1.3.3 材质变化^①对低应力脆性断裂的影响

对于带缺口宽板焊接接头的低应力脆性断裂，韦尔斯和木原等根据他们的许多试验结果得出结论认为，缺口周围存在的弹性残余应力起了巨大作用。同时指出，对于这种带缺口焊接接头的脆性断裂，缺口顶端区由于焊接受到的应变特别是高温应变也产生了重要影响。

① 原文“冶金的变化”中“冶金”一词包括化学冶金和物理冶金，“冶金的变化”与我国常说的“材质变化”含义相近，考虑我国习惯，故译作“材质变化”。——译者注

博依德(Boyd)[11~14]指出,对于带缺口宽板焊接接头的脆性断裂,重要的是必需特别注意材质变化,并得出如下结论:

“在实验或使用状态的影响因素中,过去更多的只注意到残余应力,但是看来同时考虑残余应力和材质变化才是恰当的。特别是对于没有大缺陷的焊接接头发生低应力脆性断裂,只能说明是由残余应力和材质变化所引起的局部韧性降低的综合效果。”

同样,迈洛纳斯(Mylonas)[15,16]也指出,焊接过程中高温应变所引起的塑性下降是宽板焊接接头脆性断裂的主要原因。正如后面将要详细叙述的那样,迈洛纳斯等在各种不同的温度下,对给予不同程度的压缩或者拉伸预应变后钢材的塑性进行了许多实验。通过这些实验,迈洛纳斯作出结论说:“仅仅用残余应力的存在来说明低应力脆性断裂是不够的,由高温预应变造成的塑性下降才是从焊接区附近的缺陷处发生断裂的主要原因”。

如后所述,寺沢、大谷等[70,78,79]也指出,高温预应变将造成塑性和断裂韧性的显著下降(热应变脆化)。

1.4.5 缺口的加工时期对带缺口宽板焊

接头产生脆性断裂的影响

木原等[17]采用纵向焊缝焊接后机械加工缺口的韦尔斯-木原型试件,如图8所示,得到的结果和前述焊前加工缺口的韦尔斯和木原的试验结果完全相同。

实验是针对25毫米厚的低碳钢($C 0.15\%$ 、 $Mn 1.00\%$ 、 $Si 0.06\%$, $\sigma_y = 31.7$ 公斤力/毫米², $\sigma_u = 45.0$ 公斤力/毫米²)进行的,纵向焊缝的焊接采用埋弧焊,正反面各焊一道焊缝,缺口长度加工成36毫米。图9就是表示这个实验结果的曲线

图, 图中表明, 焊后状态的焊接接头试件, 断裂应力在 0°C 附近出现明显的跃迁现象。这种形式的韦尔斯-木原试验, 也许由于简便, 到现在为止, 韦尔斯-木原型试件在日本可以说仍然占据主流。

霍尔 (Hall)、芒斯 (Munse) 等 [18~22] 提供了有关缺口加工时期影响的很有意义的资料。霍尔等根据这些实验指出, 缺口因纵向焊缝焊接后加工 (AWN) 或者焊接前加工 (BWN), 会给带缺口宽板焊接接头脆性断裂的发生以很大影响。他们对多种钢材和板厚、各种不同的缺口形状进行了研究。作为其中的一例, 如对美国材料试验标准 (ASTM) A-212B 钢材 [C 0.30%, Mn 0.90%, Si 0.28%, $\sigma_r = 39$ 千磅/英寸² (27 公斤力/毫米²), $\sigma_u = 76$

千磅/英寸² (53 公斤力/毫米²)] 的试验结果介绍如下。缺口的类型是各种各样的, 但图 10 所示的三种类型可以说是有代表性的。就是说, 型式 1 的缺口是纵向焊缝焊接前在坡口面上加工的, 焊接后保持焊后状态; 型式 2 和型式 1 是相同的, 但在焊接后, 缺口上的熔敷金属部分要重新加工; 型式 6 的整个缺口是在焊接后加工的。试验中也研究了有关 400°F (204°C) 的预热和消除应力处理、机械法消除残余应力处理等

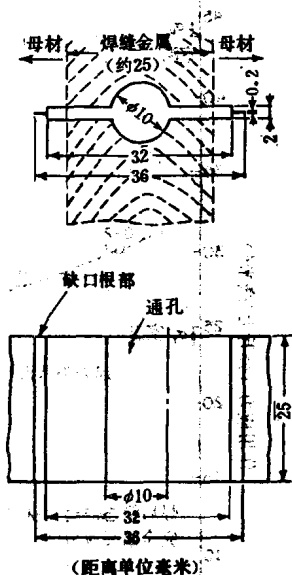


图 8 纵向焊缝焊接后加工缺口的宽板焊接试件 (焊后开缺口试件) 的缺口区详图 [17]