

前 言

对于焊接结构来说,防止焊接裂纹的产生是一个重要的课题。为了不产生焊接裂纹和保证焊接生产安全,焊前应选定能够防止产生裂纹的焊接工艺和材料。

近年来,国际上为了保证低合金高强钢的焊接质量,针对冷裂纹产生的原因和防止措施,进行了大量的研究工作。因此,也随之拟定了许多种冷裂纹试验方法,如铁研式、里海式、T型角接、十字接头及CTS 裂缝试验等。这些方法大多简单、使用方便,但都是小型经验性的,依据这些方法所提出的焊接工艺往往不能保证焊接时不出现裂缝。

随着生产的发展和大型焊接结构愈来愈多地采用高强度钢,近十年来的趋向是发展对开裂临界应力提供定量数据的试验方法,以及弄清冶金因素与力因素的相对重要性。目前,国外广为研制和应用的方法有:日本的 TRC、RRC、MRC,法国的插销法,以及荷兰的平板刚性拘束等等,但这些方法也有一定的局限性。

对焊接裂缝试验方法的研究,归根结底是要选择合理的钢材和焊接材料,更重要的是为给定钢种的焊接提出可以防止冷裂缝的焊接工艺条件。

在我国,随着低合金高强度钢日益广泛地用于重要焊接结构,防止冷裂缝的产生是当前面临的重大课题。裂缝试验方法的研究,对我国社会主义建设也具有重大意义。

我们遵照毛主席“洋为中用”的教导,收集了国外对这方面研究的论文,编译了本文集,供我国从事这方面工作的人员参考。

由于编译时间仓促和水平所限,错误和不当之处在所难免,望读者批评指正。

编 者 一九七七年

目 录

钢结构焊接裂缝产生与扩长的研究.....	(1)
焊接接头中应变和拘束测量文献综述.....	(13)
插销式焊接裂纹试验法及应用.....	(26)
插销试验在测定高强钢焊接冷裂敏感性中的应用.....	(35)
插销试验与 RRC 和 TRC 试验的关系.....	(46)
选择焊接规范的冷裂缝试验方法.....	(59)
各种焊接裂缝试验法之间的关系.....	(67)
新发展的 MRT 裂缝的试验研究.....	(77)
焊缝金属开裂的 G-BOP 试验的研究	(86)
一种检验高强钢裂缝敏感性的新方法.....	(91)
显微斑裂的测定.....	(95)
高强度钢焊缝延迟裂缝的研究.....	(99)
关于焊接裂缝的拘束应力和应变研究的新动向	(110)
钢的相变特点与其可焊性关系的研究	(128)
钢板层状撕裂敏感性测量方法的发展	(131)
细晶粒结构钢热影响区的组织变化与峰值温度、加热时间和保持时间的关系	(137)
用声发射方法研究钢焊接时氢致裂缝的形成	(145)
低合金钢焊接时延迟断裂的研究	(153)
关于焊接接头中氢含量	(157)
压力容器焊接接头热影响区裂缝和晶界弱化的研究和检测方法	(163)

钢结构焊接裂缝产生与扩长的研究

本文论述了结构件制造时产生的焊接缺陷,特别是引起结构件破坏的焊接裂缝的产生与传播问题。

众所周知,产生焊接裂缝的原因是很复杂的,因此,必须把那些从钢铁材料学、焊接材料学、焊接冶金学、焊接力学、断裂力学等多方面获得的基本数据,系统地应用于构件设计、材料选择和工艺方法,方可提出合理的防裂措施。日本研究防止焊接裂缝直接或间接有关的主要研究单位及研究内容,列于表1。其中,1~5从事基础性的研究;8~11以船舶、桥梁、钢铁骨架等结构物为对象进行应用性研究;4及7从防止结构件脆性破坏的角度研究有关断裂力学或材料断裂韧性问题。

近年来,钢结构越做越大,使用的钢材强度和厚度也在提高和增大,例如:

①1972年建造了吨位四十七万吨油船,现正进一步探讨一百万吨位油船的建造问题。船体用钢一般为HT-50,板厚在50毫米以下。

②日本各主要船厂1974年开始建造第一艘液化天然气运输船。液化天然气运输船的容器用钢材,多根据容器的形式及容量来选定,但多用铝合金(5083)、9%Ni钢等低温材料,第一艘船使用的是铝合金。

③日本已建成潜水深度600米级的潜水调查船。其耐压壳体使用HT-60(最大板厚46毫

表1

序号	学会或协会名称	研究委员会	研究内容(仅载有关焊接裂缝的主要内容)
1	焊接学会(JWS)	焊接冶金研究委员会	探讨有关焊接裂缝的材料冶金问题
2	日本钢铁协会(JISI)	延迟破坏研究会	探讨钢中氢的活动及氢脆的基本理论问题
3	焊接学会(JWS)	焊接结构研究委员会	探讨有关力学问题(拘束应力,拘束强度等)
4	日本造船学会(JSNA)	焊接研究委员会 第一分委员会	探讨有关断裂力学的基本理论问题
5		第二分委员会	探讨焊接及热加工引起应力变形的基本理论问题
6	日本焊接协会(JWES)	钢铁研究部技术委员会 CSW委员会	从钢材的焊接冷裂缝敏感性角度评价钢材有关问题的一般性研究(如层状撕裂等)
7		BE委员会	有关高强钢焊缝熔合线材质评价的一般性研究
8		造船研究部焊接工艺委员会	船体焊接施工时产生裂缝(仰位角接头裂缝,单面自动焊的终端裂缝等)的资料交流及一般性研究
9	日本钢结构协会(JSSC)	标准分委员会 焊接裂缝研究	使用厚板高强钢的大型结构件焊接裂缝防止措施的探讨
10		超厚高强钢焊接研究	今后设想的大型桥梁用高强钢焊接裂缝防止问题及其合理试验的确定
11	日本造船学会(JSNA)	造船工作法规研究委员会第一分委员会	船体制造时精确标准的制订等以及船体制造法规中的一般性问题

米) 钢板。目前正在研制的潜水船的耐压壳体的材料将采用屈服强度100~150公斤/毫米²级的超高强钢 (板厚60~100毫米)。

④超高大楼骨架, 如梁用材料主要是 HT—50钢板及轧制H型钢。

⑤1974年 7 月通车的港大桥构架材料, 使用最大板厚75毫米的 HT—80钢。

⑥压水管用材厚度取决于设计水头 (H) × 内径 (D), 所以 H × D 增大时, 材料的强度等级也随之提高。1975年开始运转的九州电力公司太平发电站, 首先使用了 HT—80 钢 (最大板厚35毫米)。关西电力公司奥吉野发电站, 准备使用最大板厚50毫米的 HT—80钢。

如上所述, 日本主要大型结构使用的钢材, 除特殊情况外, 目前大都使用板厚 75~100 毫米的 HT—80级钢。

一般来说钢材的断裂行为, 取决于强度等级。屈服强度 $\sigma_y < \frac{E}{300}$ 的低强度材料 (钢 $\sigma_y < 70$ 公斤/毫米²), 在室温下具有足够的断裂韧性; $\sigma_y > \frac{E}{150}$ 的高强度材料 (钢, $\sigma_y > 140$ 公斤/毫米²), 断裂韧性值偏低与温度无关)。因此, 根据可焊性及断裂行为选择材料, 是很重要的。

图 1 所示为低合金钢抗拉强度, 对缺口抗拉强度及氢裂临界应力的影响。由图可见, 在抗拉强度为120~150公斤/毫米²时, 都出现峰值。超过这个界限, 缺口抗拉强度受氢的影响, 钢材的强度越高, 断裂应力越低。含镍稍高的高韧性高强钢 HT—100 (HY130) 及 HT—75 (HY90) 的刚性拘束焊接裂缝试验结果比较情况示于图 2。HT—100 的裂缝产生临界

应力稍高于 HT—75; 但 HT—100 钢, 一旦产生焊接裂缝, 就迅速传播, 以致完全断裂, 其裂缝传播形式与 HT—75 有很大不同。因此, 为了要将 HT—80 以上的高强度材料作为焊接用钢而推广, 必须把包括材料可焊性和焊接工艺在内的制造技术作全盘考虑, 使之在现在水平基础上向前跨进一步。

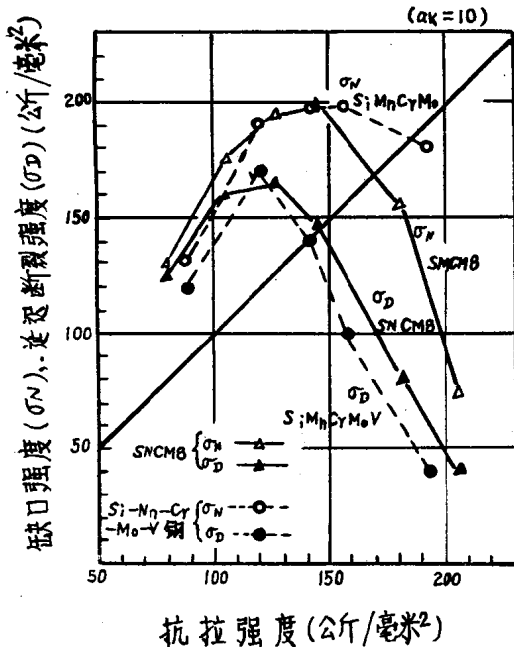


图 1 抗拉强度 (σB) 与缺口强度 (σN) 及 100 小时水中延迟断裂强度 (σD) 的关系

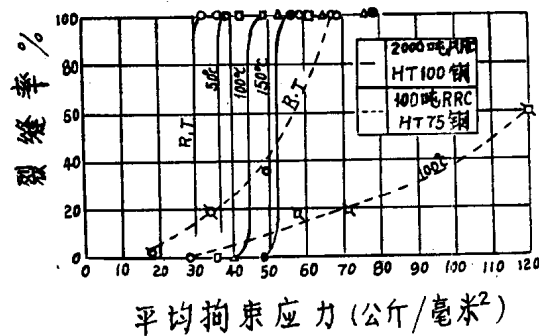


图 2 刚性拘束焊接裂缝试验 (RRC) 时焊接裂缝率与平均拘束应力的关系

钢结构制造时产生焊接裂缝的原因

日本钢结构协会焊接裂缝研究组分析研究了1968年调查中新汇集的桥梁、钢铁骨架焊接

裂缝65例，1970年发表了调查报告。表2及表3就是根据此报告综合而成的。

表2 钢结构（桥梁、骨架）制造时焊接裂缝（65例）的分类

接头形式	裂 缝 产 生 时 期			共 计
	热 裂 缝(%)	冷 裂 缝(%)	焊接中或焊后数日内发现的裂缝(%)	
角 接	3	2	4	9
T 型	5	22	3	30
+ 字	2	40	3	45
斜 接	0	6	3	9
对 接	0	4	3	7
共 计	10	74	16	100

表3 钢结构（桥梁、骨架）制造时产生焊接裂缝(65)例的原因

可 能 的 原 因	件 数 (%)	具 体 原 因 举 例
结 构 及 接 头 设 计	47	(1) 全 焊 透 (2) 镶 嵌 焊 接 (3) 隔板开孔处补强板的环焊 (4) 圆 形 断 面
工 艺	31	(1) 工艺上的问题（焊接顺序不良） (2) 装配部件的间隙不够精确等 (3) 技术管理上的问题（作业中断时的管理不良，预热温度不当等）
材 料 (母材及焊接材料)	17	(1) 钢板的夹杂多 (2) 碳当量太高
其 它	5	

按照裂缝产生的时间及接头形式的不同，可将上述焊接裂缝实例加以分类（表2）。包括焊完后发现的裂缝在内，冷裂缝占裂缝总数的90%，多数裂缝产生于部件集中、拘束度较大的T型接头和十字接头中。此外，焊接裂缝还可根据产生原因分类（表3）。由表3可知，就裂缝原因而言，结构及接头设计上的问题要比材料及工艺上的问题多得多。

焊接设计上应尽量避免图3中示出的贯穿板全周焊及补强环焊接头，因为这种镶嵌式焊接问题较多。但这种接头可以靠设计上的改进，减轻其拘束程度。几个较厚部件集中于一处，采用不合理的焊接位

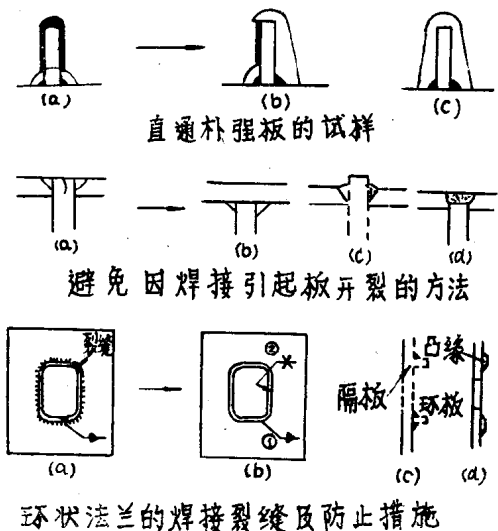


图3 焊接裂缝及防止

置，勉强进行预热和焊接的作法是不符合设计要求的。

在操作过程中应特别注意的是，往往由于加工不够精确引起接头错位和间隙过大或过小等，而导致产生焊接裂缝。这种加工误差与部件的切断及组装精度控制有关。可见，防止焊接裂缝的问题，不仅仅是焊接问题，还必须全面考虑整个过程的所有问题。日本主要船厂，在材料切割方面已采用了数控技术，这不仅提高了生产率，而且显著提高了切割质量。另外，由于组装精度控制技术的加强，大型船舶肘板与龙骨的间隙缺陷率显著减少。

上面所讲的是有关结构件制造中的焊接裂缝问题，下面再分析一下结构件使用中产生裂缝的情况。将近二十年来建造的100艘大型船只的外板和强力甲板上产生的144处龟裂原因列于表4和表5。这些裂缝都是在航运中产生的（不包括撞击、爆炸、触礁等原因）。从表4来看，航运中产生的裂缝约60%是在结构设计上的应力集中处产生的。工艺不良引起的裂缝，大部分与接头形式有关（表5）。

表 4

可 能 的 原 因	件 数 (%)
结 构 设 计	58
工 艺	20
设 计 与 工 艺	9
材 料	5
设 计 与 材 料	4
腐 蚀	3
工 艺 与 腐 蚀	1

表 5

对 接 接 头 (%)	对接接头的通常缺陷	23	48
	补焊接头的缺陷	14	
	镶嵌焊接的缺陷	11	
角 接 接 头 (%)	有错位的角接接头的趾部	23	37
	角接接头的缺陷	11	
	其 它	3	
气 割 的 自 由 边 (%)	开口隅角边割痕之类的缺陷	9	12
	板自由边的割痕	3	
其 它 (%)		3	

表2、表3和表4、表5，都是分别调查获得的数据，尽管调查的对象各不相同，但有趣的是，从产生裂缝的原因来看，其数值都比较相似。上述分析结果说明，要防止结构件制造中产生焊接裂缝和因此造成使用中的断裂源，不能狭隘地注重在焊接工艺上，还必须从设计、工艺、材料等方面着手，进行综合性研究。

合 理 的 防 裂 措 施

过去，关于各个因素对钢焊接裂缝的影响已经进行了很多基础理论研究，但因结构件制

造时产生的焊接裂缝,是由很多原因相互作用形成的,问题极其复杂,所以大多数措施仍然是一些经验性的。近来,大厚度高强度材料的使用在逐渐增多,所以只根据过去的工作方法来解决问题,是很不够的,必须综合基础理论研究的成果,才能定出防止焊接裂缝的合理措施。

如前所述,结构制造时产生的焊接裂缝,常受母材、焊接材料、焊接工艺、施工条件、结构及接头设计等多种因素的影响。如果把这些因素用 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 表示,则产生焊接裂缝的临界值一般可用下式表示。

$$F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0$$

假设焊接裂缝产生的机理不同,则函数 F 及参数 X_n 的形式也应不同。但还不能用函数 F 和参数 X_n 的形式解释出现的每个焊接裂缝。伊藤等人提出的所谓 P_w-t_c 标准,就是上述函数 F 及参数 X_n 的具体形式中的一例,虽然在细节上还存在一些问题,但对目前使用的一般构造用高强钢的第一层焊缝的冷裂缝,是适用的。这个标准采用下述四个参数获得高强钢焊接热影响区产生冷裂缝的临界值关系式:

$$F(P_{CM}, H, K, t_c) = 0$$

四个参数是:

X_1 = 母材成分因素 P_{CM} ;

X_2 = 焊缝金属含氢量 H ;

X_3 = 作用于焊接接头的应力,应变因素(接头的拘束强度) K ;

X_4 = 焊接接头冷却到 100°C 的冷却时间 t_c 。

① $(t_c)_{\text{临界}} = A (P_w - 0.28)^n$ (秒)

式中: A, n 为常数

$$A \approx (13 \sim 15) \times 10^4, n \approx 2$$

② $P_w = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40000}$ (%)

$$P_{CM} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Cu}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Cr}}{20} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5B \quad (\%)$$

$C, \text{Si}, \text{Mn}, \text{Cu}, \text{Ni}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{V}, B$ 合金元素含量(重量, %)

H : 焊缝金属的扩散氢含量(毫升/100克)(用急冷法获得的测定值)

K : 接头的拘束强度(公斤/毫米²)

③ P_w 式的适用范围如下,超过时必须注意适当场合。

C : $0.07 \sim 0.22\%$ Si : $0 \sim 0.60\%$

Mn : $0.40 \sim 1.40\%$ Cu : $0 \sim 0.50\%$

Ni : $0 \sim 1.20\%$ Cr : $0 \sim 1.20\%$

Mo : $0 \sim 0.70\%$ V : $0 \sim 0.12\%$

Ti : $0 \sim 0.05\%$ Nb : $0 \sim 0.04\%$ B : $0 \sim 0.005\%$

板厚(h) 19~50毫米 焊缝金属的含氢量(H): 1.0~5.0毫升/100克
拘束强度(K): 500~3300公斤/毫米²

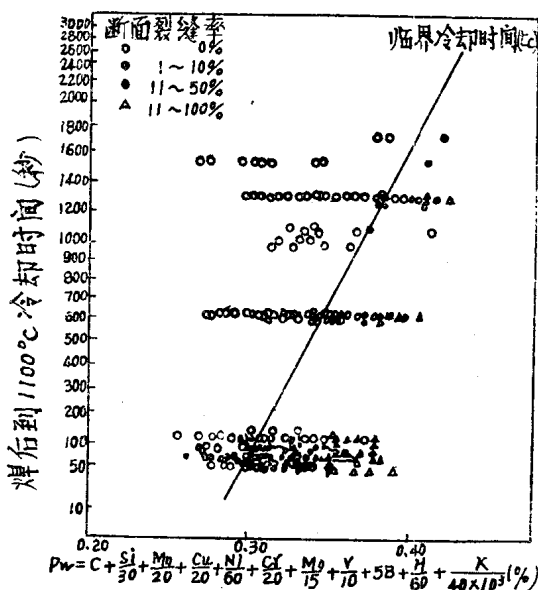


图4 热输入为17千焦耳/厘米时 P_w 值与临界冷却时间 (t_c) 的关系

通过上述标准,日本钢结构协会焊接裂缝研究组根据图5所示的防止焊接裂缝流程图,编写出了防止焊接裂缝的具体措施手册。图6所示为 P_{CM}, H, K 等因素与所需预热温度的关系。

此图不仅可供选择预热温度，而且也可作为防裂材料（母材及焊接材料）选择，结构及接头设计的参考资料。图 5 中数据 P_{CM} 、 H 和 K 大致情况如图 7、图 8 和表 6 所示。使用这些图表便可具体地制订出符合实际的防止焊接裂缝措施。

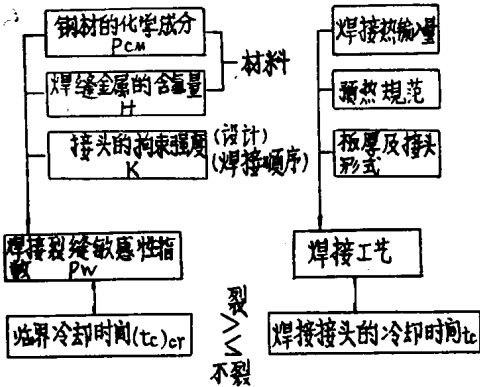


图 5 设想中的防裂措施流程图

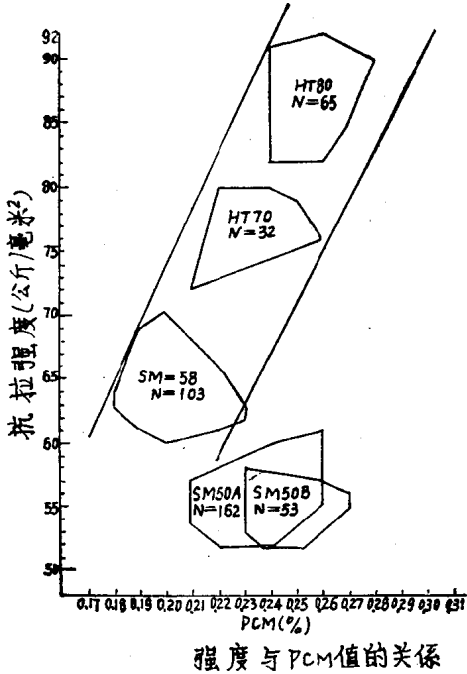
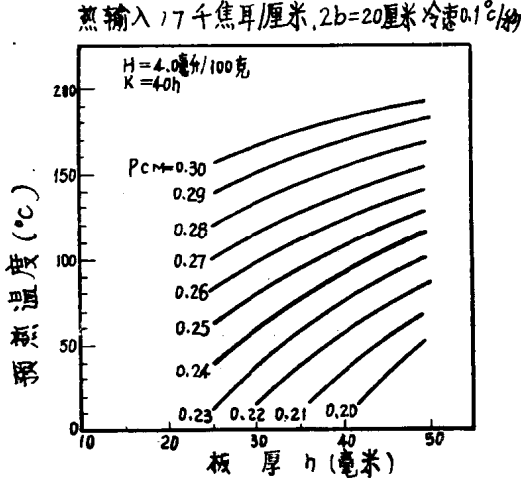
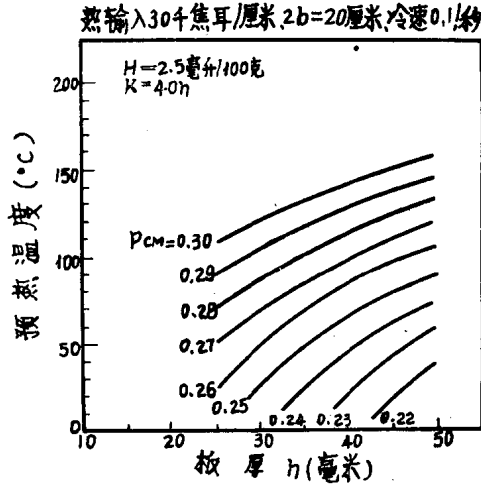


图 7 强度与 P_{CM} 值的关系



(a) P_{CM} 值与预热温度的关系
(设 $H=4.0$ 毫升/100 克, $K=40h$)



(b) P_{CM} 值与预热温度的关系
(设 $H=2.5$ 毫升/100 克, $K=40h$)

图 6 P_{CM} 值与预热温度的关系

表 6 焊缝金属含氢量

钢种	焊条情况	普通低氢型焊条 (毫米/100克)	湿度特别高时或焊条保管不善时 (毫米/100克)	超低氢型焊条 (毫米/100克)
HT 50		4.0	6.0	2.0
HT 60		2.3	4.0	1.0
HT 80		1.6	2.5	1.0

表 7

预 热 方 法	钢 材	板 厚 (毫 米)		
		$t < 25$	$25 \leq t < 38$	$38 \leq t \leq 50$
仅 焊 前 预 热 (°C)	普通HT80钢	165	180	200
	碳当量低的HT80钢	40	105	120
焊前及焊后都预热 (°C)	普通HT80钢	75	85	90
	碳当量低的HT80钢	25	75	85

注：焊接热输入量17000焦耳/厘米，预热方法：电热。

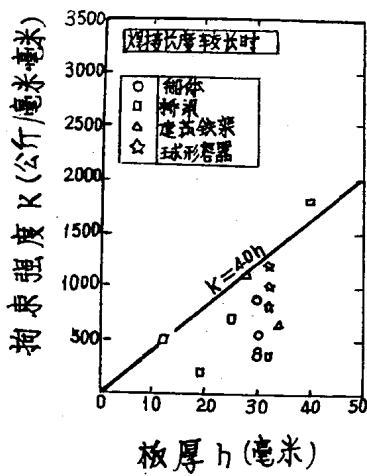


图 8 实际结构上焊接接头的拘束强度

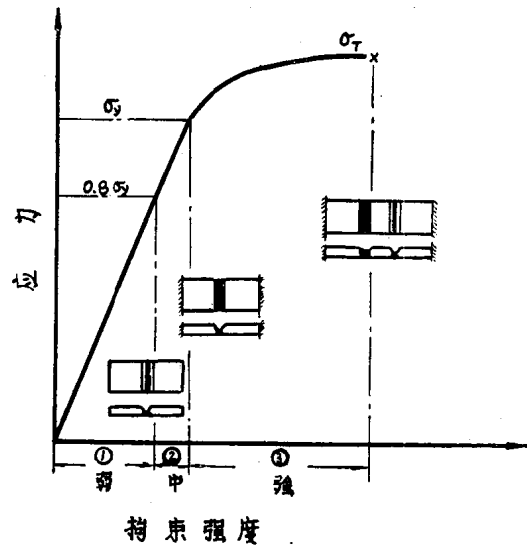


图 9 接头的拘束状态与拘束应力的关系

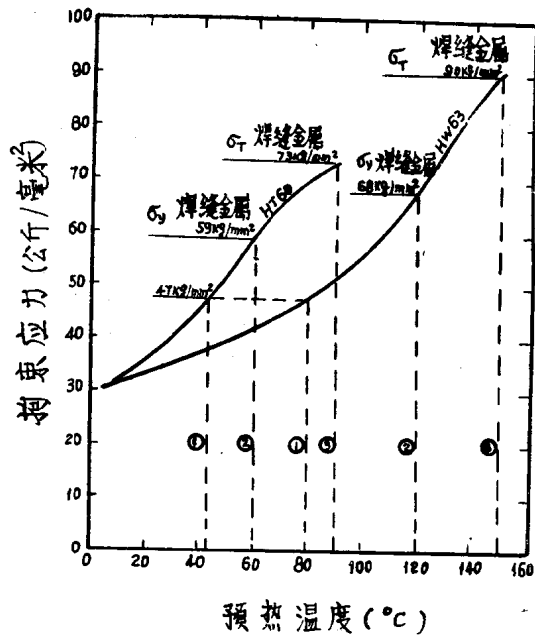


图10 各拘束状态下的最佳预热温度

根据上述顺序制订出的 HT80 预热温度如表 7 所列。由表可知, 采用电预热且焊后保持适当温度, 比仅用焊前预热, 所需的预热温度可以大大下降。上述有关防止焊接裂缝措施的做法已收入本四连络桥上部结构用钢的调查报告中, 预料这种做法也将适用于今后的大型钢结构件的制造。

其次, 与焊接裂缝有关的拘束强度 K , 无论在理论上, 或在实际中, 都有很多问题值得研究。图 8 所示为对船体、桥梁、建筑物、球形容器等钢结构件中被认为拘束较大的焊接接头所测定的拘束强度。下面介绍一种由板和骨架组成的船体结构拘束强度实用分析法。对船体焊接所遇到的接头, 根据其拘束状态, 可分为标准型、低拘束接头(初装配工程的板拼接等)和高拘束接头(高嵌焊接等)。在各不相同的拘束状态下, 用理论和实验方法求出焊接第一层上产生的拘束应力上限(图 9), 再根据图 10 确定出防止焊接裂缝的预热温度。此法应用于高韧性高强度 HY90 钢的船舶焊接, 已取得了成果。

对于防止钢结构焊接裂缝的合理措施, 英国还提出了钢材的碳当量, 焊件板厚, 焊条含氢量及预热温度的相互关系图(图 11), 其对象是 C-Mn 钢焊件焊接热影响区的冷裂缝。

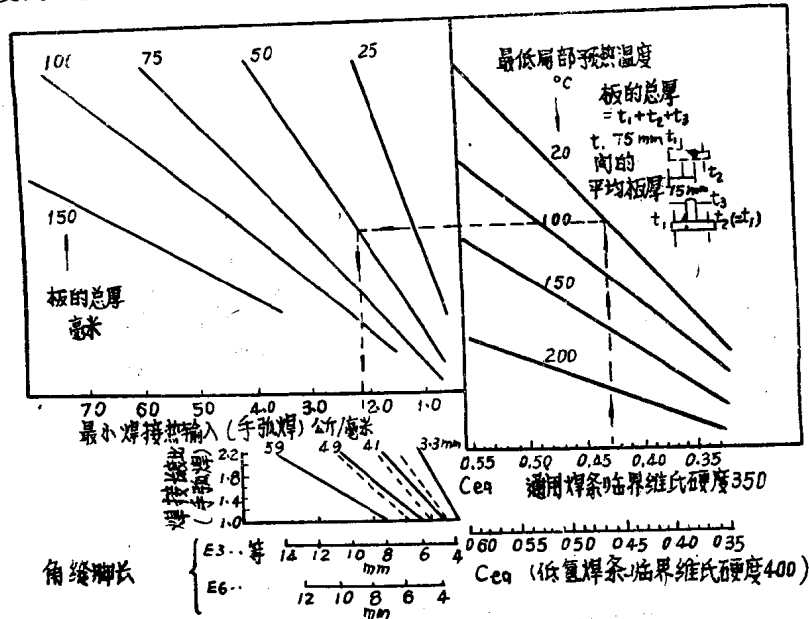


图11 焊接规范选择

焊接裂缝研究中的今后问题

如前所述, 从与焊接有关的材料学、冶金学、力学等角度出发, 对产生裂缝的各种因素的影响进行综合性的基础理论研究, 是非常重要的。

有关焊接裂缝的应力及应变研究

今后的研究方向是:

二元及三元应力作用下的拘束强度: 前项所述的包括在 P_w-t_c 标准之内的拘束强度 k , 是根据纯一元应力作用的拘束接头下的定义。在该接头中, 拘束强度 K 与作用于焊接接头的拘束应力 (σ_w) 及接头延伸率 (λ_w) 之间存在着图 12 的关系。立体结构中接头交叉处的拘

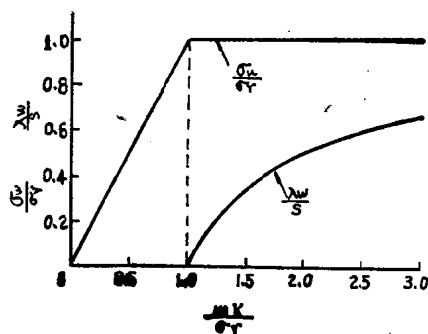


图12 拘束应力 (σ_w) 及焊接接头延伸率 (λ_w) 与拘束强度 (K) 的关系

束的有效板宽,也是可以计算的,图13, a 所示的长度为 L 的连续槽式焊接时,沿焊缝方向的拘束强度尚未完全查明,但拘束应力超过屈服点、焊接接头产生塑性变形的槽两端部及拘束应力处于弹性状态的槽中央部,则可分别用简单假设的办法,将它们的平均拘束强度计算出来(如图13, b 所示)。把结构制造时产生的错位,角变形等引起的拘束应力导致弯曲的因素引入拘束强度概念中,在实际应用中是有重要意义的,有待于今后研究。

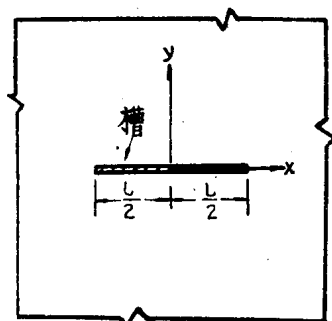


图13 a 开槽式焊接

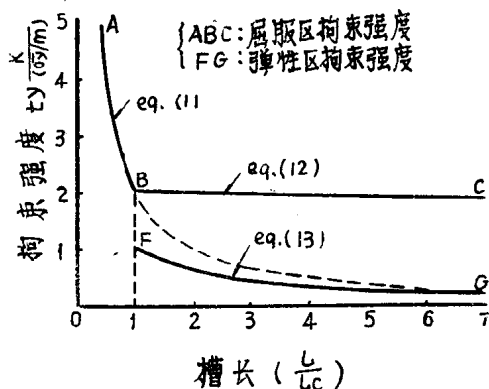


图13 b 用 L/L_c 的函数表示的槽式焊接时的拘束度

$$L \leq L_c; K = \frac{\sigma_T}{m} \cdot \frac{2L_c}{L} \text{ 或 } K = \frac{2Eh}{\pi L}$$

$$L > L_c; K = \frac{\sigma_T}{m} \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{L_c}{L} \cdot \frac{L_1}{L} \cdot \frac{1}{\psi} \text{ 对塑性区}$$

$$K = \frac{\sigma_T}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L_c}{L - 2L_1} \log \frac{L - L_1}{L_1} \text{ 对弹性区}$$

$$\text{式中: } \psi = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left[(I_n')^2 + \frac{L_c}{L} I_n' I_n'' \right]$$

$$I_n' = \int_0^{\theta_1} \sin \theta \sin n\theta d\theta, I_n'' = \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin n\theta}{\sin \theta} d\theta$$

$$\sin^2 \theta_1 = \frac{L_c}{L}, L_c = \frac{mEh}{\pi \sigma_T}$$

$$2L_1 = L \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{L_c}{L}} \right\} = \frac{L_c}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{L_c}{L} \right) + \frac{1}{8} \left(\frac{L_c}{L} \right)^2 + \dots \right\}$$

图13 开槽式焊接拘束度

断裂力学在焊接裂纹中的应用问题

自从断裂力学方法用于分析钢材、焊接接头及结构件的断裂现象以来，已经很多年了。如果把焊接裂纹也看作是一种断裂现象，那么，断裂力学的引入，就有可能把焊接裂纹产生及成长的标准搞得更加精确些。在分析钢材的冷裂纹时，必须把可能产生焊接裂纹的局部位置的氢扩散、局部应力及变形集中和焊接热影响引起的组织变化考虑进去，同时，为了用数学形式表示，还必须考虑时间的因素。

为了解析应力腐蚀裂纹、氢脆延迟裂纹等环境脆化所引起的裂纹现象，引用断裂力学理论的断裂韧性值（图14）和延迟裂纹的临界应力的下限扩大系数（ K_{Isc} ）（图15）等。

为了解析焊接裂纹的产生及成长现象，必须考虑图16所示的裂纹成长过程中氢扩散及由此引起的接近裂纹尖端处的断裂韧性值的下降情况。

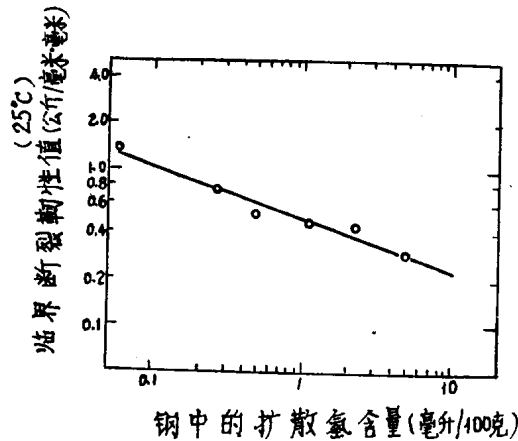


图14 扩散氢对断裂韧性的影响

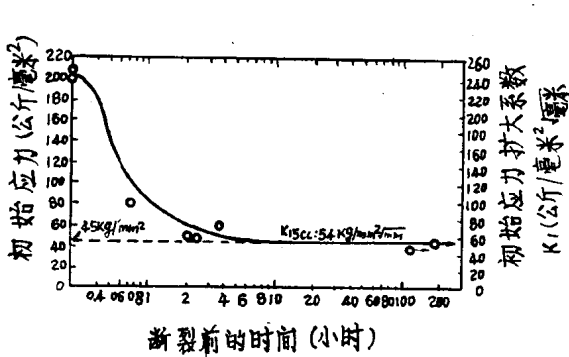


图15 HT80钢的延迟断裂特性曲线

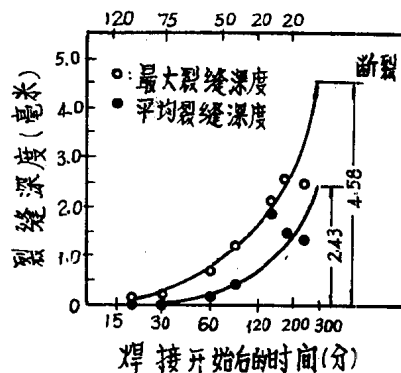
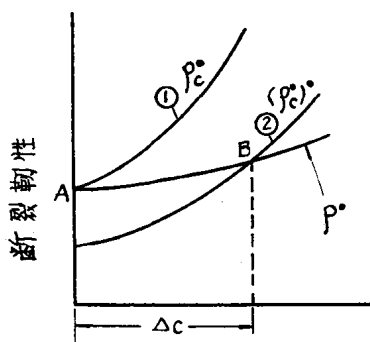


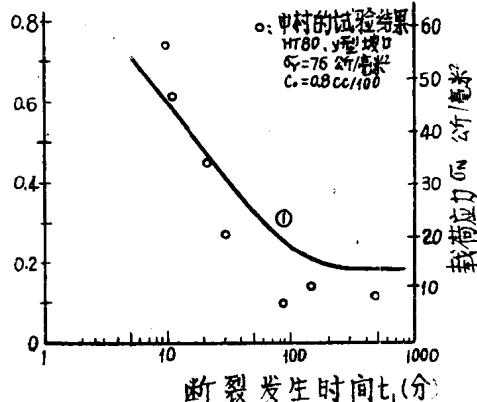
图16 焊接时间与裂纹深度

有关氢集中引起的裂纹尖端处的断裂韧性做了如下设想：①裂纹产生标准采用所谓 P^+ 概念；②假定产生裂纹的断裂韧性值 P_c^+ 随附近氢气的析集而成指数函数变化；③假定裂纹成长必须的断裂韧性值 (P_c^+) *以图17所示的曲线进行变化，然后以定拉伸拘束变形裂纹试验为对象进行计算（图17，a、b）。

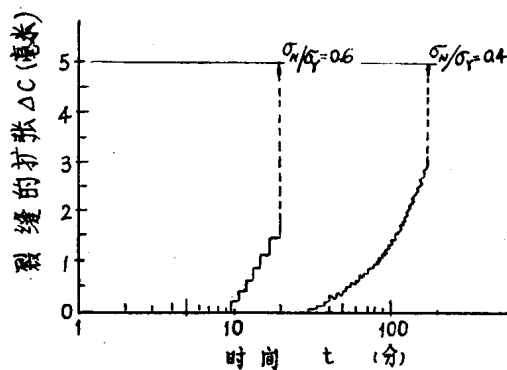


a) 距裂缝尖端的距离

裂缝尖端附近断裂韧性概念图



b) 荷载应力 σ_N 与断裂发生时间的关系



c) 荷载应力对裂缝扩张速度的影响

图17 裂缝尖端附近断裂韧性

焊接裂缝试验方法的研究

各国提出并采用了不少焊接裂缝的试验法。但从防止结构制造时产生焊接裂缝的观点来看，焊接裂缝试验结果最好能有助于直接而且定量地确定结构的焊接工作规范。金属材料技术研究所及大阪大学分别提出的 TRC和RRC 焊接裂缝试验法*，不仅在日本而且在欧美各国都予以关注，并且正在应用它进行实验。

TRC和RRC 试验有一定的优点，但也存在试件较大的缺点。另外，对材料焊接裂缝敏感性进行比较试验的焊接裂缝试验法，采用较小型的试件也能获得，日本过去广泛使用的 Y型拘束裂缝试验法，就是为此目的的试验法。最近，在国际焊接学会第Ⅸ委员会上，插销试验法也被认为是符合此种目的的一种方法。日本钢结构协会超厚高强钢焊接研究组，针对高强钢制造大型结构在焊接裂缝试验中应该采取的防止焊接裂缝措施提出了如下问题：①各种焊接裂缝试验法的相互关系；②多层堆焊时的裂缝试验；③ Y型拘束裂缝试验在超厚板钢材中的应用；④自动焊裂缝试验法等。图18为这个研究工作中 TRC和RRC 试验结果（Y型坡口）与插销试验结果的相互关系。由图可见，在本试验范围内，两种试验法的裂缝产生临界应力大体是一致的。插销试验用较小试件短时间内所得出的很多数据。

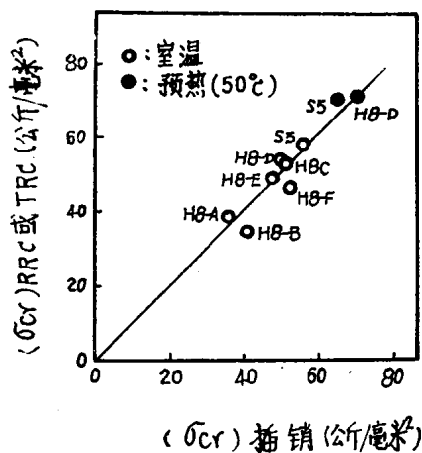


图18 由 TRC或RRC 试验所得的裂缝产生临界应力 (σ_{cr}) 与插销试验所得临界应力 (σ_{cr}) 比较

结构制造时焊接裂缝的成长及传播

在大型结构中, 由于焊接接头多, 所以某一个焊接接头产生的小裂缝, 因其附近接头焊接时引起的热应力及因热加工引起的应力等影响, 就可能使小裂缝长大, 以致发展成为大裂缝。

图19为研究这个问题的各因素相关图, 由图可见, 与这个问题有关的因素极多, 对表 1 所示的几个研究单位所提供的基础资料加以综合, 是很必要的。

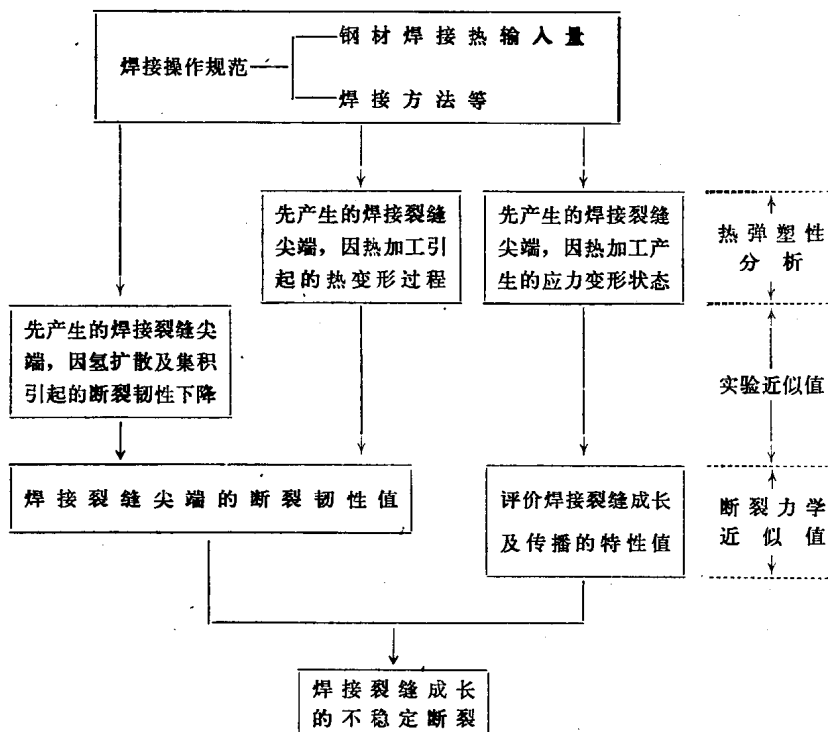


图19 研究先产生的焊接裂缝的成长及传播因素图

——译自《溶接学会志》1974, №12

焊接接头中应变和拘束测量文献综述

可以对每一种焊接接头确定一种最佳焊接工艺。它应包括要采用的焊接方法、焊丝或焊条、电流、电压、送丝速度、预热、焊后热处理,以及坡口加工等。目的是要得到一个尽可能无缺陷的焊接接头。如果焊接接头中的缺陷是不连续的,可能使质量变差并且容易断裂。焊缝金属或热影响区中存在的缺陷有:夹杂、气孔、未焊透和裂缝。铁素体钢焊接接头在焊接过程中和焊后热处理或焊后几天都可能产生使用前的焊接裂缝,可分为以下几种类型:

- (1) 焊缝金属中的凝固裂缝;
- (2) 热影响区中的液化裂缝;
- (3) 焊缝金属和热影响区中的再热裂缝;
- (4) 热影响区或母材中的层状撕裂;
- (5) 热影响区或焊缝金属中的氢裂缝。

每一种裂缝都是由一定的参数共同作用促成的,就像形成裂缝敏感区那样。促成某一种裂缝的形成还需要进一步的条件,即垂直于可能产生裂缝的方向产生的应变。这种条件是由于接头在焊接过程中或焊后热收缩和焊缝收缩形成的拘束而产生的。产生这种拘束有两种情况,第一,将一个构件焊于大型结构(如船体)可能产生反作用应力,焊缝在这里受到大型的似固定结构的冷却,由于收缩使焊缝受到拘束;第二,局部接头几何形状产生的拘束。垂直于平面的圆钢或钢管的角接头就是一个例子。

焊接裂缝不仅降低结构的静载强度,而且由于载荷低可能成为破坏源,这就可能引起静态脆性断裂和疲劳断裂。

因此,根据接头的拘束程度来定量分级是很有用的。只要拘束参数不超过规定值,接头就不会产生裂缝。过去,用拘束程度来确定焊接工艺的想法,还仅限于特殊形式的焊件。实际焊接接头与试件不同,要考虑到焊接工艺条件有很大变化,如接头拘束较大,要求较高的预热温度。“拘束因素”可以作为一个焊接工艺参数来使用,像热输入一样的重要。

尽管力求从理论上来确定拘束参数,可是,根据实际经验也可能确定。为了推断出拘束参数,需要对应变最明显的区域作大量地测量和试验。应变测量的部位随裂缝类型的不同而不同,因此,推荐应变测量的时间和部位为:

- (1) 凝固裂缝,在焊接过程中位于焊缝的横向和纵向;
- (2) 液化裂缝,在焊接过程中位于焊缝的纵向和厚度方向;
- (3) 再热裂缝,在热处理前、后及热处理过程中位于焊缝的横向和纵向;
- (4) 层状撕裂,在焊接过程中和冷却过程中位于热影响区和距离焊缝轴线更远的厚度方向;
- (5) 氢裂,在冷却过程中和焊后位于焊缝的横向和纵向。

在评论拘束参数和应变测量这个题目之前,首先概略评论一下各种测量技术的工作原理及其应用范围。在各种测量技术中,没有一种方法能够完全适用各种情况;有的情况在很高的温度下要求很短的量规长度;而另一种情况则要求从高温到中温的各种温度范围包括对整

个表面的测量。了解产生焊接裂缝时的应变，也很重要。凝固裂缝和液化裂缝，是在熔池受热和受冷过程中产生的；再热裂缝，是在焊后热处理的热循环中产生的；层状撕裂早在焊后的当时结构受到冷却迅速产生的；热影响区裂缝，是在焊后或焊后几天才发生的。显然，需要了解接头在不同的时间出现的应变，取决于所研究裂缝的种类。此外，还要求进行表面应变和内应变测量，后者对于层状撕裂尤为重要。一般来说，应变测量分为局部和大面积两种方法。例如，电阻应变片属于局部测量法，脆漆法属于大面积测量法。与应变测量有密切关系的，是残余应力的测量。残余应力的大小要通过应变测量来确定。

本文拟通过文献评论探讨定量拘束测量法。应变测量。

应 变 测 量

应变片及其有关技术 电阻应变片是一种金属丝，箔片或半导体结构，一般用于表面局部应变测量，只有少数适用于表面下的应变测量。然而，它用于焊接接头，要受到温度的限制。某些制造厂声称，应变片可以在高达 400°C 温度下工作，但是在实践中发现，只在稳定性良好的情况下，才略有可能。因此，除了距离焊缝轴线较远，即温度较低的区域外，在焊接过程中不可能使用电阻应变片。当然，焊后完全可以贴上应变片，但是，只能测量残余弹性应变，因此，需松弛结构，例如采用打孔。

钻孔技术比较灵活、简单，也不损坏周围结构，如图1所示。马瑟首先介绍了这种方法；随后是索特和范·克罗布鲁格将这个方用于表面和表面下的测量。采用钻孔，是用来消除一些残余应力，其周围的材料便按照钻孔消除应力的比例产生收缩或延伸。测量长度上的这些变化，

可以采用机械法(马瑟法)或在圆孔周围的表面贴上应变片(索特和思盖特法)，其它轴线与圆孔中心线相重合。经过这种测量和计算之后，便获得定量的残余弹性应力和应变。

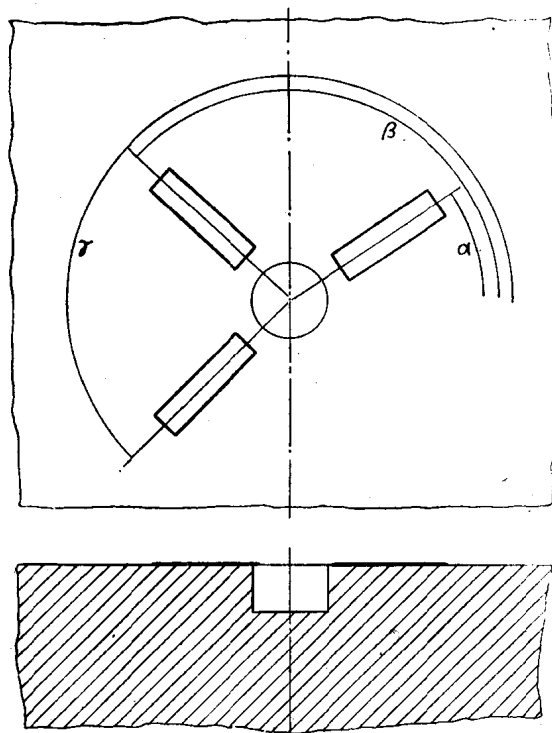


图1 用于残余应力和应变测量的钻孔方法(应变片放置在圆孔周围的表面，钻孔后便记录其表面应变的变化情况)

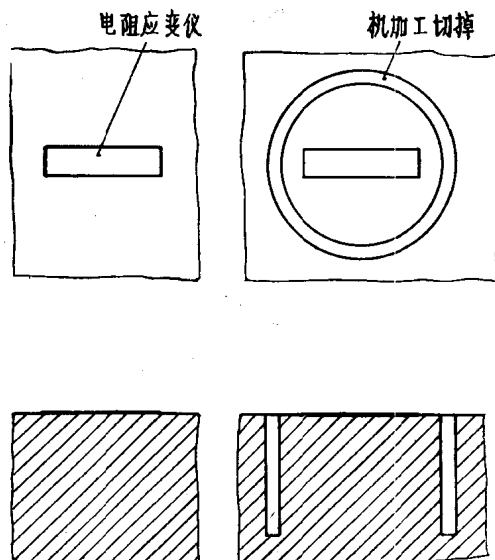


图2 用于残余应力和应变测量的一种简单开孔法(仅能检查残余应力产生的弹性应变，开孔法为铣削或电火花加工法)