

机电工人职业技能
培训系列读本

JIDIAN GONGREN ZHIYE JINENG
PEIXUN XILIE DUBEN

XINBIAN GAOJI HANGONG

新编
高级焊工
简明读本

J I A N M I N G

D U B E N



胡宝良
编

上海科学技术出版社

机电工人职业技能培训系列读本

新编高级焊工简明读本

胡宝良 编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

新编高级焊工简明读本 / 胡宝良编著. —上海: 上海
科学技术出版社, 2006.1
(机电工人职业技能培训系列读本)
ISBN 7-5323-8237-0

I.新... II.胡... III.焊接-技术培训-教材
IV.TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 120150 号

世纪出版集团 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号(临) 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 27.25

字数 653 000

2006 年 1 月第 1 版

2006 年 1 月第 1 次印刷

印数 1-4 500

定价: 49.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

前 言

劳动和社会保障部近期发文明确指出:全面贯彻实施人才强国战略,以提高劳动者素质和培养高技能人才为出发点……强化质量,创新模式,扩展规模,直接有效地为企业和劳动者服务……

据有关部门计划,要求在三年内,高级工的比例从6%升高到15%,技师、高级技师新增50万人,今后技术培训将向“灰领”方向倾斜,即培养既能动脑又能动手,既掌握一定现代科学知识又具有较高操作技能的复合型人才。要达到这一要求,这不仅是专业培训机构的事,还应有工厂企业、社会力量办学机构和从事职业技术教育的个人,积极创造条件参与这一工作。

高技能人才培养内容包括知识要求和技能要求两个方面:技能培训一般是在有条件的专业实训场地进行,当然工作岗位也是一个实践的地方。知识要求培训通常是在教室上课,并与工厂实际相结合的方法进行教学。对于高级工(机械类)来说,按等级要求应学习机械制图、公差、夹具、液压传动与气压传动、金属切削原理与刀具、金属切削机床、专业工艺等内容。这样就要求有一定课时,并有一套(几本)教材。但对于正在生产岗位上工作,想通过自学而要升高级工的中老年中级工来说,确有一定难度,他们希望能按等级要求将有关知识,少而精、删繁就简、开门见山地汇编在一本教材中,以便于学习。为满足这一要求,我们在有关部门支持下,按上述要求将这些知识汇编成这一读本。

本书编者虽长期从事职业技术培训工作,并直接参与第一线教学,对高级工培训有一定认识和积极性,但限于水平和某些条件限制,定有不妥之处,敬请广大读者提出宝贵意见,以便今后改进。

编 者

目 录

第一章 焊接性试验	1
第一节 金属焊接性概述及焊接性试验目的	1
第二节 影响金属焊接性的因素	2
第三节 常用金属焊接性试验	3
第四节 焊接接头裂纹概述	32
第二章 钢熔化焊焊接接头的检验	49
第一节 无损检测——射线探伤	49
第二节 焊缝的超声波探伤(UT)	55
第三节 焊缝的表面探伤	59
第四节 焊接接头的晶间腐蚀试验	63
第五节 焊接容器的致密性检验	75
第三章 合金结构钢的焊接	79
第一节 合金结构钢的概述	79
第二节 合金结构钢组织状态和性能	81
第三节 热轧与正火钢的焊接	82
第四节 低碳调质钢的焊接	87
第五节 耐候钢的焊接	90
第六节 低温钢的焊接	92
第七节 耐热钢的焊接	95
第八节 不锈钢的焊接	109
第四章 异种金属的焊接	129
第一节 异种金属焊接的概述与组合	129
第二节 异种金属的焊接特性	130
第三节 异种金属的焊接方法和焊接材料	132
第四节 钢与有色金属的焊接	135
第五节 钎焊	146
第六节 异种钢的焊接	152
第七节 铸铁与低碳钢的焊接	170
第五章 钛及钛合金的焊接	174
第一节 钛及钛合金的基本特性与种类	174
第二节 钛及钛合金的焊接特点	175
第三节 钛及钛合金的焊接工艺要点	176
第六章 焊接接头的应力	182

第一节 焊接接头的应力与应力集中	182
第二节 焊接残余应力的影响	195
第三节 焊接残余应力的调节与消除	197
第七章 焊接结构的失效	201
第一节 焊接结构的失效与分类	201
第二节 焊接结构的脆性断裂	205
第三节 焊接结构的疲劳破坏	216
第四节 焊接结构的蠕变断裂	222
第五节 焊接结构的腐蚀破坏	225
第八章 压力容器的焊接	232
第一节 压力容器的分类与制造	232
第二节 钢制压力容器焊接工艺评定及锅炉压力容器压力管道焊工考试规则的简介	268
第三节 压力容器生产制造举例	286
第九章 罐类、桁架及机器结构的焊接	295
第一节 罐类结构	295
第二节 桁架结构及轴类的焊接	319
第十章 梁、柱的焊接简介	333
第一节 梁、柱焊接的特点	333
第二节 梁与梁的对接及梁的筋板设置	353
第三节 焊接接头形式的合理选用	356
第四节 梁、柱焊接的自动化	364
第十一章 焊接结构生产中的定额管理	370
第一节 劳动工时定额	370
第二节 焊接材料的消耗定额计算	371
第十二章 技术小结与例题练习	385
第一节 技术小结	385
第二节 技术小结的推荐举例	386
试题练习	396
一、判断题 350 道	396
二、选择题 305 道	407
三、预热温度计算公式应用的试题	424
试题练习答案	425
一、判断题 350 道答案	425
二、选择题 305 道答案	425
三、预热温度计算公式应用的答案	426

第一章 焊接性试验

第一节 金属焊接性概述及焊接性试验目的

一、焊接性概述

焊接性常称可焊性,它是说明金属材料对焊接的适应性,是衡量金属材料在规定的焊接工艺、操作程序、工艺装备下能获得规定设计要求的焊接接头。因此,比较金属材料的焊接性应取用同样的焊接工艺、操作程序、工艺装备。所以某金属材料或异种钢采用的焊接工艺、操作程序、工艺装备越简便、经济代价越低,则它的焊接性就越好。

焊接性包括两个内容:一是接合性能,即在一定焊接工艺条件下能否获得优良致密,无缺陷焊接接头的能力,又称为工艺焊接性;二是在一定的焊接工艺条件下获得的焊接接头或整个焊接结构能满足产品技术条件规定的使用性能,又称金属焊接接头对使用要求的适应性,即使用焊接性。

1. 工艺焊接性

它不是金属材料所固有的性能,而是按选用的焊接方法和工艺措施进行评定,这主要指焊接结构的制造条件。就熔化焊而言,母材金属和熔敷金属都须经历传热过程与冶金反应过程,因而在对待工艺焊接性的区别中又分为“热焊接性”和“冶金焊接性”。

(1) 热焊接性

是指焊接热循环对焊接热影响区组织性能及产生缺陷的严重程度,如冷裂纹,热裂纹,晶粒长大,析出脆化,组织性能变化等。这些主要是金属材料本身的性能决定的,同时与焊接工艺有关。

(2) 冶金焊接性

是指在一定冶金过程的条件下,母材金属与熔敷金属的熔合比、稀释率;引起焊接接头化学成分的不均匀性;引起焊接结构的强度、塑性、缺口韧性、蠕变强度、疲劳强度、应力腐蚀等,还包括过烧、氧化、氢、氧、氮的溶解引起的气孔、夹杂、裂纹等变化情况。

2. 使用焊接性

是指焊接接头或结构形式、坡口形式满足技术条件规定的使用性能。使用性能取决于焊接结构的工作条件及设计的合理性与所提出的技术要求。常以常规的力学性能、低温韧性、抗脆断性能、高温蠕变强度、持久强度、耐腐蚀性能和耐磨性能等来反映。

因此,金属材料的焊接性不仅与材料本身的物理、化学性能有关,同时还与采用的焊接工艺条件有关。

二、焊接性试验目的

焊接性试验是依焊接试样为主要手段,通过它能直观测定正确控制焊接工艺参数条件下获得的焊接接头对裂纹、气孔、夹渣等缺陷的敏感性,以便制定相应的焊接工艺评定及工

艺规程,用以指导焊接结构的生产制造。

在焊缝中出现的冷裂纹、热裂纹、气孔、夹杂物、咬边等缺陷与母材有关,但更多的还与焊接工艺和焊工操作方法或水平有关。在母材与热影响区出现的冷裂纹、热裂纹、晶粒粗大及脆化等现象虽与焊接工艺有关,更多的原因却还是由母材的固有性能决定的。在这里焊接裂纹是焊接接头中最严重的缺陷,所以用得最多的是焊接裂纹试验。通过焊接性试验,可用较小的代价达到评定母材焊接性能的三个目的,即:

- ① 选择适用于母材的焊接材料。
- ② 确定合适的焊接工艺参数,它包括焊接电流,焊接速度以及预热温度,层间保温,焊后缓冷及热处理等方面的要求。
- ③ 研究和发展新型材料。

第二节 影响金属焊接性的因素

焊接在钢结构生产制造中是一种工艺措施,所以焊接性是金属材料的特殊工艺性能,除了受被焊材料本身物理、化学性能影响外,还受制造工艺条件,结构设计条件及使用条件等因素影响。

一、材料因素

材料包括母材与焊接材料。在相同的焊接方法、焊接工艺条件下,决定被焊母材焊接性的主要因素是它本身的物理、化学性能。

1. 物理性能

如被焊母材的熔点、热导率、线膨胀系数、密度、热容量等因素,均对热循环、温度场、熔化、一次结晶、二次结晶(相变)等过程产生影响,从而影响焊接性。如铜、铝等热导率高的材料,焊接热量分散快,温度场内温度梯度大,升温范围宽。若热源功率不足或加热不匀,焊接时坡口不易熔化或局部塌落。即使已形成焊缝由于熔池结晶快,易产生气孔。铝和奥氏体不锈钢线膨胀系数大。焊接时焊接接头的应力和变形较为严重。铝及其合金的密度小,焊接时,熔池中的非金属夹杂物及气泡不易上浮逸出,使焊缝产生残留气孔和夹渣等缺陷。

2. 化学性能

主要是被焊母材的杂质分布。而对焊接性能影响较大的元素是碳、硫、磷、氢、氧、氮。为满足钢的强度等使用性能还加入合金元素,常用的是锰、硅、铬、镍、钼、钛、钒、铌、铜和硼等。虽然在一定程度上满足了使用性能,然而却不同程度地增加了焊接热影响区的淬硬倾向和各种裂纹的敏感性。

对被焊金属与氧的亲合力强弱,也是化学性能不容忽视的重要因素。例如钛、铝及合金的化学活泼性很强,在焊接熔池高温下极易氧化,所以在焊接时,极须有严密可靠的惰性气体保护或在真空装置中焊接,否则焊接就难以实现。

3. 异种金属

异种金属的焊接,也只有其物理、化学性能相接近才比较容易实现焊接。异种金属冶金相溶性对异种金属的焊接性起着决定性作用。在液态下互不相溶的两种金属或合金实际上是不能用熔化焊的方法直接焊接的。例如铁与铝,铁与镁,铁与铅,铅与铜等。液态与固态下都具有良好的互溶性的异种金属。晶格类型相同,其冶金性能较好。有利于形成良好的

焊接性。

4. 焊接材料

焊接材料直接参与熔焊的全过程,进行着一系列的冶金化学反应,决定着焊缝金属的化学成分、组织性能及缺陷的形成。若焊接材料选择不当,与母材不匹配时,不仅不能获得满足使用要求的焊接接头,还会引起淬硬组织、脆化、裂纹等缺陷的产生与接头组织性能的变化。因此,正确、合理地选用焊接材料也是保证母材焊接性的重要冶金条件。

二、工艺因素

工艺因素包括焊接方法,焊接工艺参数,装配焊接顺序,预热温度,后热条件及焊后热处理等。焊接方法对焊接性影响最大,主要区分在焊接热源特性和保护效果两个方面。

被焊金属在不同热源条件下焊接,会显示出不同的焊接性。如电渣焊热源功率很大,但能量密度很低,由于热输入大,使热影响区晶粒粗大,冲击韧度显著降低,所以电渣焊接头的构件焊后必须经正火处理才能得以改善。相反,电子束焊、激光焊等焊接方法,热源功率虽不大,但能量密度很高,因加热快、高温停留时间短,热影响区很窄,故无晶粒长大现象。

调控焊接工艺参数,采用预热与多层多道焊控制层间温度等工艺措施,可调节与控制焊接热循环及温度场,从而改变被焊金属的焊接性。如焊接某些有淬硬倾向的低合金高强度钢,由于材料本身就有一定淬硬冷裂敏感性,若焊前采用预热或焊后辅以焊后热处理等措施,再选用合适的焊接材料,形成合理的焊接热循环,则可得到没有裂纹缺陷、满足使用要求的焊接接头。

三、结构因素

结构因素指的是焊接结构与接头的设计形式,如焊接结构的形状,几何尺寸,钢材厚度,接头的坡口形式,焊缝布置的疏密及截面形状等各因素对焊接性的影响。它主要影响热的传递及应力的分布。焊接结构,尤其当母材为低合金高强度钢时,第一道打底焊道通常存在着很大的拘束应力而产生裂纹。焊接结构中常用的坡口形式有 Y、X、V、K 等形状。实践与研究表明,裂纹是按 T^o(说明:T^o为单面半 V 形坡口的 T 形接头),Y、Y、X、F 的坡口形式顺序减少。

四、使用服役条件

焊接结构使用服役期间的负载,工作介质,工作温度,工作压力。这些服役条件及运行环境要求焊接结构必须具有相应的使用性能。例如在深冷、低温下运行的焊接结构应具备抗低温脆性断裂的性能;在交变载荷下工作的构件应具有良好的抗疲劳性能;在高温下工作的容器、管道必须具有抗蠕变性能及一定的高温持久强度;在酸、碱、盐类介质中工作的焊接容器应具有良好的抗腐蚀性等。总之,使用条件越苛刻,对焊接接头质量的要求就越高,而对金属材料的焊接性要求也越严。

第三节 常用金属焊接性试验

焊接性试验方法的选择,主要是为获得优质的焊接接头,并最终在焊接结构服役使用中表现出来。归纳起来受四大要素影响:材料、工艺、结构、服役使用。但任何一种焊接性试验方法都难以全面概括这四大要素,所以任何一种焊接性试验方法最多只能侧重判定一二个要素的影响,这在选择试验方法时应注意的,因为每一种试验方法都有局限性。

一、工艺焊接性间接评定法

1. 钢材冷裂纹倾向的碳当量法

由于焊接热影响区的淬硬及冷裂纹倾向主要与材料的化学成分有关,所以可利用化学成分间接地评估钢材的冷裂纹倾向。把钢中的合金元素(包括碳)含量,按其作用换算成碳的相当含量(以碳的作用系数为1),作为粗略评定钢材冷裂纹倾向的一种参考指标。即称为碳当量法,常以符号 C_E 表示。

国际焊接学会推荐的碳当量公式(质量分数%)

$$C_E = C + \frac{\omega(\text{Mn})}{6} + \frac{\omega(\text{Cr}) + \omega(\text{Mo}) + \omega\text{V}}{5} + \frac{\omega(\text{Cu}) + \omega(\text{Ni})}{15} \quad (\%)$$

该式适用于中高强度($\sigma_b = 500 \sim 900\text{MPa}$)的非调质低合金高强度钢。当使用该公式时,对于板厚小于 20mm 的钢材时,若 $C_E < 0.4\%$,则淬硬倾向不大,焊接性良好,焊前不需预热;若 $C_E = 0.4\% \sim 0.6\%$,尤其是大于 0.5% 时,焊接时钢材易淬硬,说明焊接性已变差,焊前须预热,且须控制层间温度,才能防止焊接裂纹;若板厚增大,预热温度也应相应提高。

目前世界各国工程界及各研究单位按钢材的合金体系及试验方法都建立了各自一定适用范围的碳当量公式,例如日本 JIS 标准的碳当量公式,美国焊接学会(AWS)推荐的碳当量公式。尽管各公式不尽相同,但反映了相当的规律,即碳当量数值越大,被焊钢材的淬硬倾向就越大,在热影响区越容易产生冷裂纹。

2. 低合金钢焊接冷裂纹敏感性指数法

随着近代工程技术的需要,低合金高强度钢的使用日益增多,用碳当量来评估钢材的焊接性已不适宜,仅按钢材的化学成分评定钢材的焊接性也不全面。因低合金高强度钢焊接时产生冷裂纹,除了被焊钢材的化学成分外,还有熔敷金属中的扩散氢含量,接头的拘束应力等原因。因此日本伊藤等人在大量试验的基础上提出了由化学成分、扩散氢含量和拘束度(或板厚)所建立的冷裂纹敏感指数数据公式,并用冷裂纹敏感性指数去确定防止冷裂纹所须的焊前预热温度。如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 伊藤预热温度计算公式和应用条件

冷裂纹敏感性数据公式(%)	预热温度计算公式(℃)	公式的应用条件
$P_c = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + \frac{\delta}{600}$ $P_w = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + \frac{R}{400000}$	$T_0 = 1440P_c - 392$	斜 Y 形坡口试件,适于 $C \leq 0.17\%$ 的低合金钢, $[H] = 1 \sim 5\text{mL}/100\text{g}$, $\delta = 19 \sim 50\text{mm}$
$P_H = P_{cm} + 0.075[\lg[H] + \frac{R}{400000}]$	$T_0 = 1600P_H - 408$	斜 Y 形坡口试件,适于 $C \leq 0.17\%$ 的低合金钢, $[H] > 5\text{mL}/100\text{g}$, $R = 500 \sim 33000(\text{MPa})$
$P_{HT} = P_{cm} + 0.088[\lg[\lambda H'_D] + \frac{R}{400000}]$	$T_0 = 1400P_{HT} - 330$	斜 Y 形坡口试件, P_{HT} 考虑了氢在熔合区附近的聚集

式中 $[H]$ ——熔敷金属中扩散氢含量($\text{mL}/100\text{g}$);

P_{cm} ——化学成分的冷裂敏感性指数;

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

δ ——被焊金属的板厚(mm);

R ——拘束力(MPa);

H'_D ——有效扩散氢含量($\text{mL}/100\text{g}$);

λ ——有效系数(低氢焊条 $\lambda = 0.6$, $H'_D = [H]$;酸性焊条 $\lambda = 0.48$, $H'_D = \frac{[H]}{2}$)。

P_{cm} ——冷裂纹敏感系数计算公式的适用范围:

C = 0.07% ~ 0.22%; Si = 0 ~ 0.60%; Mn = 0.40% ~ 1.40%;

Cu = 0 ~ 0.50%; Ni = 0 ~ 1.20%; Mo = 0 ~ 0.70%; V = 0 ~ 0.12%;

Nb = 0 ~ 0.04%; Ti = 0 ~ 0.50%; B = 0 ~ 0.005%。

我国根据国产低合金钢在插销试验基础上建立了由 P_{cm} 、[H]、 δ 和钢材抗拉强度 σ_b 构成的防止冷裂纹的预热温度计算公式:

$$T_0(^{\circ}\text{C}) = 324P_{cm} + 17.7[H] + 0.14\sigma_b + 4.72\delta - 214$$

式中 [H]——熔敷金属的扩散氢含量(mL/100g)(GB/T3965-1995);

P_{cm} ——冷裂纹敏感系数(%);

σ_b ——被焊金属抗拉强度(MPa);

δ ——被焊金属板厚(mm)。

此公式包含了强度因素。

上述公式计算举例:

有一钢材为 14MnMoVg, 板厚 $\delta = 40\text{mm}$, $\sigma_b = 490\text{MPa}$, [H] = 5mL/100g。其化学元素含量为(以中间值): C = 0.18%; Si = 0.50%; Mn = 1.60%; V = 0.15%; Mo = 0.65%。

P_{cm} 计算公式:

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

上述元素含量代入计算公式:

$$P_{cm} = 0.18 + \frac{0.5}{30} + \frac{1.6}{20} + \frac{0.65}{15} + \frac{0.15}{10} = 0.18 + 0.017 + 0.08 + 0.043 + 0.015 = 0.335$$

代入 $T_0(^{\circ}\text{C})$ 计算公式:

$$\begin{aligned} T_0(^{\circ}\text{C}) &= 324P_{cm} + 17.7[H] + 0.14\sigma_b + 4.72\delta - 214 \\ &= 324 \times 0.335 + 17.7 \times 5 + 0.14 \times 490 + 4.72 \times 40 - 214 \\ &= 108.54 + 88.5 + 68.6 + 188.8 - 214 \\ &= 454.44 - 214 = 240.44^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

答: 这一 14MnMoVg 钢材在焊前须预热到 240 ~ 250 $^{\circ}\text{C}$ 。

若其他条件都不变, 严格控制焊条烘焙温度使之扩散氢含量从[5]降至[2], 代入上述计算公式得

$$\begin{aligned} T_0(^{\circ}\text{C}) &= 324 \times 0.335 + 17.7 \times 2 + 0.14 \times 490 + 4.72 \times 40 - 214 \\ &= 108.54 + 35.4 + 68.6 + 188.8 - 214 \\ &= 401.34 - 214 = 187.34 \end{aligned}$$

答: 在其他条件不变, 仅扩散氢[H]从[5]降至[2], 则预热温度就从 240.44 $^{\circ}\text{C}$ 降至 187.34 $^{\circ}\text{C}$, 下降了 53.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

通过对伊藤公式与我国根据国产低合金钢插销试验基础上建立的防止冷裂纹预热公式作计算对比, 可看出我国的计算公式所需的计算条件比较容易取得, 且计算方便; 而伊藤公式所需的计算条件不易取得, 且计算条件又有局限性, 公式使用又较繁琐等缺点。

无论何种公式, 通过多次计算对比, 发现扩散氢含量上升, 预热温度也相应上升, 拘束度

下降,预热温度也下降。

3. 低合金钢焊接再热裂纹敏感指数法

钢中的合金元素对钢材的再热裂敏感性有很大影响,尤其是 Cr, Mo, V, Nb, Ti 等能强烈地形成碳化物的元素,都具有增加钢材再热裂倾向的作用。例如某些压力容器用的低合金高强度钢或耐热钢,由于含有合金元素,淬硬性较大,母材的焊接热影响区容易产生硬化裂纹,故一般在焊后要进行消除应力热处理,以缓和残余应力和软化热影响区的硬度,这是当前焊接结构生产的常规工艺。但实践发现在焊道重叠处下面,母材热影响区的粗晶区会出现裂纹,其称之为消除应力裂纹或称再热裂纹。尽管现在对这种裂纹产生的机理还没有完全弄清,但已掌握了一些规律。根据合金元素对钢材再热裂纹的影响程度,可得到类似碳当量公式,采用再热裂纹敏感性指数法进行间接评定。

常用的评定公式有两个:

(1) ΔG 法

$$\Delta G = \omega(\text{Cr}) + 3.3\omega(\text{Mo}) + 8.1\omega(\text{V}) - 1.39 \quad (\%)$$

当 $\Delta G < 0$, 不产生再热裂纹; $\Delta G \geq 0$, 对再热裂纹敏感。

通常,对于 HT50 级(日本钢号,相当于 500MPa 级)的合金结构钢: $\Delta G = -1.4 \sim -1.0$ 。

对于 HT60 级(日本钢号,相当于 600MPa 级)的高强度结构钢: $\Delta G = -1.4 \sim 0.6$ 。

(2) P_{SR} 法

此法更全面地顾及 Cu, Nb, Ti 等对再热裂的影响。计算式为

$$P_{\text{SR}} = \text{Cr} + \text{Cu} + 2\text{Mo} + 7\text{Nb} + 5\text{Ti} - 2 \quad (\%)$$

式中 P_{SR} ——再热裂纹敏感性指数。 $P_{\text{SR}} \leq 0$ 时,再热裂纹敏感性不强。当 $P_{\text{SR}} \geq 0$ 时,对再热裂纹敏感。

4. 焊接热影响区(HAZ)最高硬度法

焊接热影响区的最高硬度可以相对地评价被焊钢材的淬硬倾向与冷裂纹的敏感性。由于硬度测定的方法简单易行,已被国际焊接学会(IIW)采用,我国也已制定了适用于手弧焊的国家标准:GB/T4675.5-1984《焊接性试验,焊接热影响区最高硬度试验方法》。摘要如下:

(1) 试件制备

试件的形状和尺寸分别见图 1-3-1 和表 1-3-2。试件标准厚度为 20mm,若板厚超过 20mm,则需经机械切削加工成 20mm 厚,并保留一个轧制表面。若板厚小于 20mm 则不须加工。可用气割下料,1 号、2 号试件各备一块。

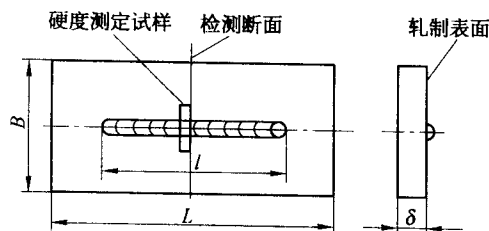


图 1-3-1 硬度试样的形状

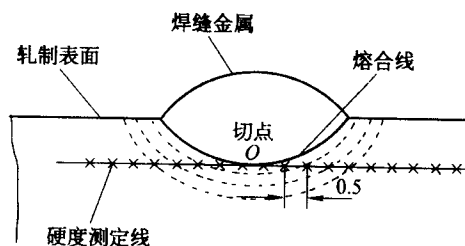


图 1-3-2 硬度测定的位置

表 1-3-2 试件尺寸 (mm)

试件名称	<i>L</i>	<i>B</i>	<i>l</i>
1 号试件	200	75	125 ± 10
2 号试件	200	150	125 ± 10

(2) 试验条件

焊前清除试件表面的水、油、铁锈过厚的氧化皮;焊时试件两端要支承架空,试件下面留有足够空间;1 号试件在室温,2 号试件在预热温度下进行焊接;采用平焊位置,沿试件轧制表面中心线焊出长为 125 ± 10mm 的焊缝,如图 1-3-1 所示。用直径 4mm 焊条,焊接电流 170 ± 10A,焊接速度为(150 ± 10)mm/min 施焊。焊后在静止空气中自然冷却,不进行任何热处理。

(3) 硬度的测定

焊后经 12h 冷却后,在室温下用机械方法加工垂直切割焊缝中部,在此断面上取硬度测量试样。试样的检测面经研磨后再腐蚀,然后按图 1-3-2 所示,划一条既切于熔合线底部切点 *O*,又平行于试样轧制表面的直线。在室温下沿直线上各隔 0.5mm 测一点,用载荷为 10Kg 的维氏硬度计测定。以切点 *O* 及其两侧各 7 个以上的点作为硬度的测定点。把点中维氏硬度最大值与该钢材规定的热影响区最大允许值比较,若超过允许值,则材料的冷裂敏感倾向大。这种方法比较简便,对于判断热影响区冷裂倾向有一定价值,它不像碳当量公式只是机械地考虑元素种类和数量的作用,而是直接测定组织的评定指标。但是,它也只是考虑了组织因素,没有涉及氢和应力对焊接接头的影响,所以不能借以判断实际焊接产品的冷裂倾向,仅适用于在相同试验条件下不同母材冷裂倾向的相对比较。

二、工艺焊接性直接试验法

金属工艺焊接性直接试验方法有上百种,较为常用的也有数十种,部分已标准化。在众多的工艺焊接性直接试验方法中,绝大多数是针对钢板在焊接过程中出现某类裂纹而设计的。因为裂纹是最常见且又是危害性最大的焊接缺陷。有些裂纹难以检查、发现和返修。裂纹的产生,有些与操作技能有关;有些和操作技能无直接关系,而是与被焊金属材料性能和焊接工艺措施有关;甚至可以说,某些裂纹的出现不是焊工的责任。所以通过工艺焊接性直接试验,可定性或定量地评定被焊金属产生某种裂纹的严重程度。通过评定寻找或确定防止这种裂纹的最佳焊接工艺措施,包括选择焊接方法、焊接材料、焊接工艺参数和预热温度等。

焊接冷裂纹的直接试验方法有两大类。一类是自拘束试验,即试件焊接时由于试件本身巨大的刚性造成焊缝和热影响区产生巨大的拘束应力,试验时不必另外施加外载;另一类是外拘束试验,试验过程中,必须外加巨大的拘束应力,来模拟焊接接头施焊时的应力状态、应变形态,甚至氢和组织状态。这种试验方法需要有较完好的加力装置和控制系统。

1. 冷裂纹的自拘束试验

碳素钢和低合金钢焊接接头冷裂纹的自拘束试验有以下几种,即斜 Y 形坡口焊接裂纹试验方法,搭接接头 (CTS) 焊接裂纹试验方法和 T 形接头焊接裂纹试验方法。

(1) 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验方法 (GB4675.1-1984)

本试验方法所产生的裂纹,多出现于焊根尖角处的热影响区。当焊缝金属的抗裂性不

好时,裂纹可能扩展到焊缝金属,甚至贯穿至焊缝表面。裂纹可能在焊后立即出现,也可能在焊后数分钟,甚至数小时后才开始出现。

试件的形状和尺寸见图 1-3-3。试件的厚度不作限制,一般厚度为 9~38mm。在两侧焊接拘束焊缝处开 X 形坡口,中间试验焊缝坡口开成斜 Y 形,坡口采用机械加工。

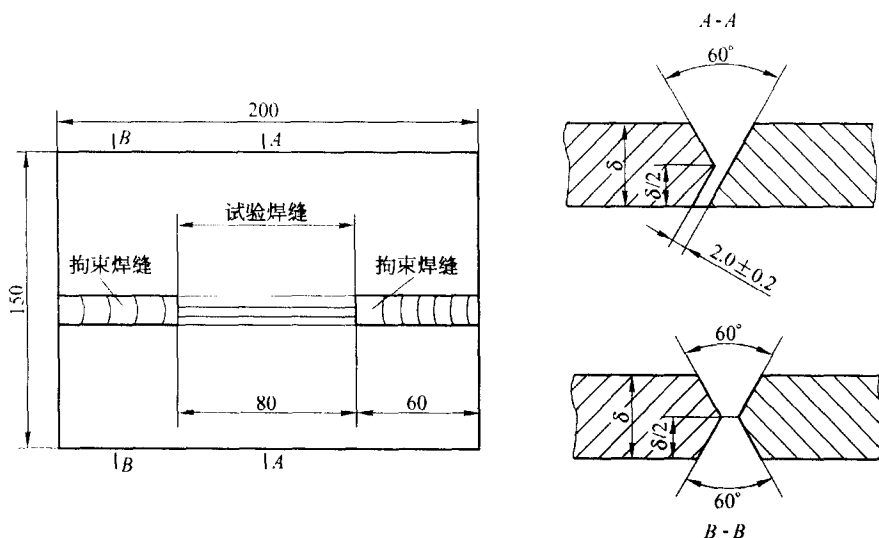


图 1-3-3 试件的形状和尺寸

焊接工艺参数:焊条直径为 4mm,焊接电流为 170 ± 10 A,电弧电压为 24 ± 2 V,焊接速度为 150 ± 10 mm/min。

首先进行拘束焊缝的焊接。焊接时采用低氢型焊条,先从背面焊第一层,焊后再焊正面一侧的第一层,注意不要产生角变形和未焊透。以下各层可从正面和背面交替焊接,直至焊完。接着进行试验焊缝的焊接。焊条电弧焊焊接试验焊缝时,需在坡口外引弧,坡口外收尾,如图 1-3-4 所示。采用焊条自动送进装置时的焊接位置,如图 1-3-5 所示。

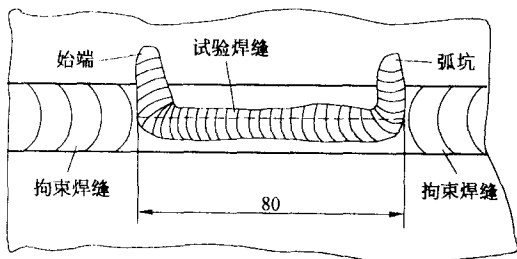


图 1-3-4 焊条电弧焊时试验焊缝位置

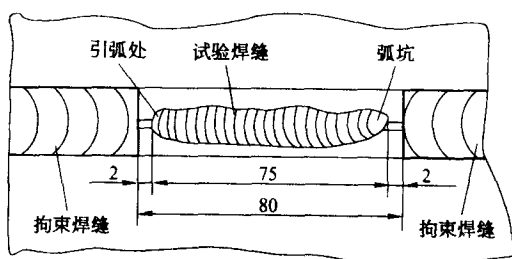


图 1-3-5 焊条自动送进装置焊接试验焊缝位置

焊接试验一般可在室温下进行,但也可以在各种预热和后热处理条件下进行。为了提高裂纹的敏感性,可以将试件在零度以下预冷,或把试件的一半浸放在水中进行焊接。

焊后对裂纹进行检验。表面裂纹的检查采用肉眼观察,或用磁粉或着色法进行检验。断面裂纹检测前要对裂纹检测的横断面进行研磨腐蚀。普通低合金钢采用 5% 硝酸酒精溶液腐蚀,特别推荐用 3% 苦味酸酒精溶液加 3% 浓硫酸腐蚀,然后放大 20 至 30 倍来观察裂纹。

裂纹被检查出后,最后应分别计算出表面裂纹率、根部裂纹率和断面裂纹率。裂纹的长度或高度的检测如图 1-3-6 所示。裂纹长度为曲线形状时按直线长度检测,裂纹重叠时不必重复计算。焊完的试件需经 48h 以后,才能开始进行裂纹的解剖和检测。

表面裂纹率的计算:

$$C_f = \frac{\sum L_f}{L} \times 100 \quad (\%)$$

式中 C_f ——表面裂纹率(%);
 $\sum L_f$ ——表面裂纹长度之和(mm);
 L ——试验焊缝长度(mm)。

根部裂纹率的计算:

$$C_r = \frac{\sum L_r}{L} \times 100 \quad (\%)$$

式中 C_r ——根部裂纹率(%);
 $\sum L_r$ ——根部裂纹长度之和(mm);
 L ——试验焊缝长度(mm)。

断面裂纹率的计算,是对试件的 5 个横断面进行断面裂纹检查、按图 1-3-6(c)的要求测出裂纹的高度,用下式对 5 个横断面分别计算出其裂纹率,然后再求出其平均值。

断面裂纹率的计算:

$$C_s = \frac{H_c}{H} \times 100 \quad (\%)$$

式中 C_s ——断面裂纹率(%);
 H_c ——断面裂纹的高度(mm);
 H ——试样焊缝的最小厚度(mm)。

5 个横断面位置的确定,是根据试验焊缝的宽度开始均匀处与焊缝弧坑中心之间的距离四等分而确定的。

(2) 搭接接头(CTS)焊接裂纹试验方法(GB4675.2-1984)

本试验方法主要适用于低合金钢焊接热影响区,由于马氏体转变而引起的裂纹试验。

试件的形状和尺寸如图 1-3-7 所示。试件厚度为 6~50mm。试验时视结构情况,上板和下板的厚度可以不等。上板试验焊缝的两个端面必须

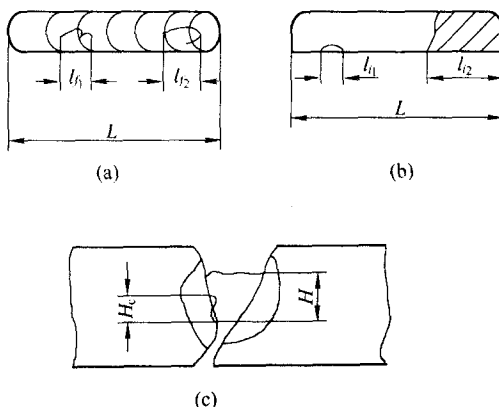


图 1-3-6 试样裂纹长度计算

(a) 表面裂纹率; (b) 根部裂纹率; (c) 断面裂纹率

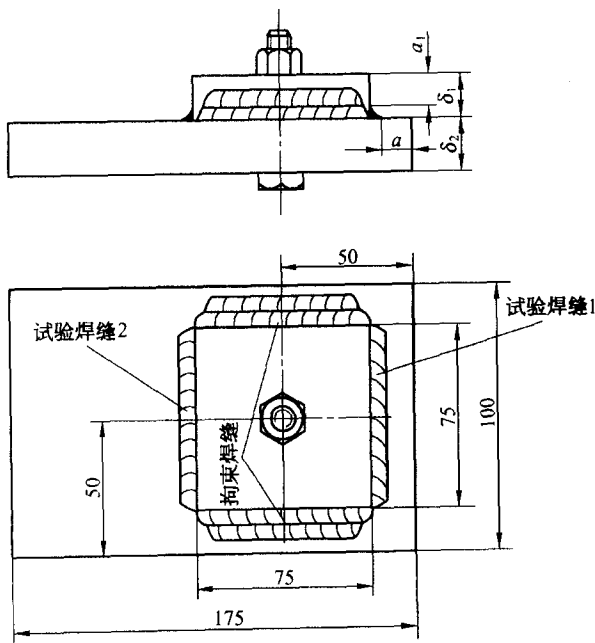


图 1-3-7 试件形状和尺寸

δ_1 —上板厚度; δ_2 —下板厚度; $a > 1.5$

经机械加工(气割割下时,留机械切削加工余量为 10mm 以上),其他端面可用气割下料。

焊接试验通常在室温下进行,但也可以在预热和后热处理的条件下进行。试验时将试件处于隔热状态下,以防止热量散失。焊接工艺参数为焊条直径 4mm;焊接电流 $170 \pm 10\text{A}$;电弧电压 $24 \pm 2\text{V}$;焊接速度 $150 \pm 10\text{mm/min}$ 。

试验步骤如下:

① 按图 1-3-7 所示的进行组装试件。先用螺栓把上板固定在下板上,然后采用试验焊条焊接两侧面的拘束焊缝,每侧焊两道。

② 待试件完全冷却至室温后,将试件放在隔热的平台上焊接试验焊缝。

③ 焊接试验时,按照图 1-3-7 先焊试验焊缝 1,然后待试件完全冷却至室温后,更换焊条再焊试验焊缝 2。

④ 焊后的试件在室温放置 48h 后进行解剖。

⑤ 试件解剖时,将每条试验焊缝按图 1-3-8 中虚线所示的尺寸进行机械切割,在每条试验焊缝上取 3 块试样,共计 6 块。

⑥ 对各试样检测面进行金相研磨和腐蚀处理,然后放大 10~100 倍检测有无裂纹,并测量裂纹的长度。

裂纹率的计算方法,试样裂纹长度的计算,见图 1-3-9。按下式分别算出上板和下板的裂纹率:

$$C_1 = \frac{\sum L_1}{S_1} \times 100 \quad (\%)$$

$$C_2 = \frac{\sum L_2}{S_2} \times 100 \quad (\%)$$

式中 C_1 ——上板裂缝率(%);

C_2 ——下板裂缝率(%);

$\sum L_1$ ——上板试样裂纹长度之和(mm);

$\sum L_2$ ——下板试样裂纹长度之和(mm)。

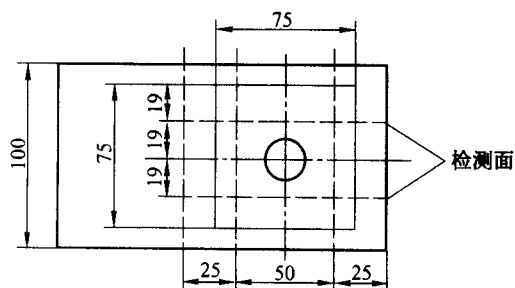


图 1-3-8 试件解剖尺寸

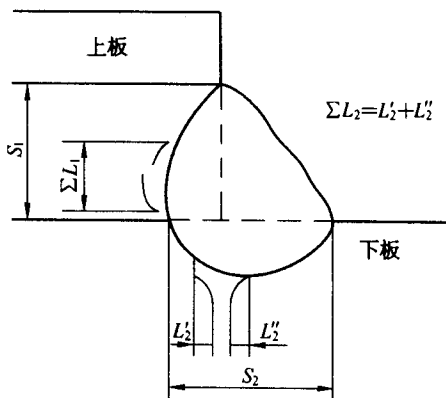


图 1-3-9 试件裂纹长度的计算

这种搭接接头试验方法最突出的一点是冷却速度。有人曾作过试验,试验焊缝 1 的冷却速度比钢板上堆焊时的慢,试验焊缝 2 的冷却速度比 T 形接头填角焊时慢。所以,从冷却

速度,主要是组织变化的角度来看,这一方法的试验条件比较宽。另外,试件虽有拘束焊缝,但拘束程度和应力集中并不像其他试验方法那样严峻,所以未能推广使用。

(3) T形接头焊接裂纹试验方法(GB4675.3-1984)

本试验方法适用于碳素钢 T 形接头角焊缝的裂纹试验。

试件的形状和尺寸,如图 1-3-10 所示。为了使底边和主板贴紧,在采用经气割加工的主板时,与底边相连接的一面要求进行机械加工。

试验用焊条的直径为 4mm。 S_1 、 S_2 焊缝均采用船形焊位置进行焊接,如图 1-3-11 所示。

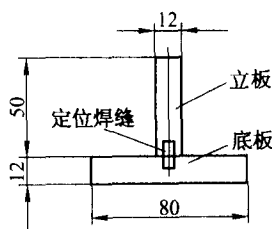


图 1-3-10 试件形状和尺寸

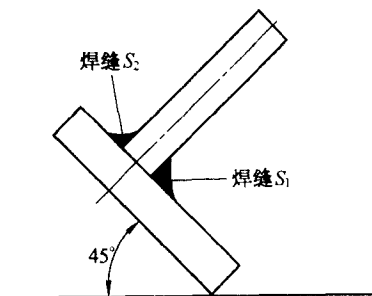
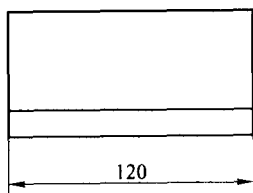


图 1-3-11 试验焊缝的焊接位置

试验步骤:

- ① 将试件的底板和主板贴紧,将端面用点焊固定。
- ② 焊完一道拘束焊缝 S_1 后,立即焊一道比 S_1 焊缝厚度小的试验焊缝 S_2 , S_2 的焊接方向与 S_1 相反。
- ③ 待试件冷却后,对试验焊缝 S_2 可用肉眼或其他适当的方法检查有无裂纹,并测量裂纹的长度。

裂纹率的计算可按下述公式进行:

$$C = \frac{\sum L}{120} \times 100 \quad (\%)$$

式中 C —— 裂纹率(%);
 $\sum L$ —— 裂纹长度之和(mm)。

2. 冷裂纹的外拘束试验

碳素钢和低合金钢焊接接头冷裂纹的外拘束试验方法有以下几种:插销式试验,拉伸拘束裂纹试验(TRC 试验)和刚性拘束裂纹试验(RRC 试验)等。

(1) 插销式试验

本方法主要用来评定氢致延迟裂纹中的焊根裂纹。

试件的形状和尺寸如图 1-3-12 所示。图(a)为插销,由被试的母材制成,插销纵向沿着被试母材的轧制方向。图(b)为底板,由被试的母材组成,或者由近似被试母材的钢板制成,厚度 δ 为 10~30mm,一块底板上有 4 个 $\phi 8$ mm 的孔,可供四次试验。

试验前,将插销有缺口的一端插入底板上的孔中,插销的端面与底板的上表面平齐,如图(c)所示,底板下表面由插销试验机的机架支托,而插销下端的螺纹则旋在插销试验机中