

高等学校试用教材

金属熔焊原理及工艺

下 册

吉林工业大学周振丰 编

机械工业出版社

高等学校试用教材

金属熔焊原理及工艺

下 册

吉林工业大学周振丰 主编



机械工业出版社

金属熔焊原理及工艺

(下册)

吉林工业大学周振丰 主编

*

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证出字第117号)

广西民族印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092 1/16·印张19·插页12·字数500千字

1981年1月北京第一版·1983年5月广西第三次印刷

印数12,801—16,400 定价2.30元

*

统一书号: 15033·4887

前 言

本书是根据 1978 年“高等院校一机部对口专业座谈会”精神和“焊接专业教材编写会议”所制定的教材编写大纲进行编写的,供高等院校焊接专业学生使用,也可作为从事焊接专业工作的工程技术人员的参考书。

本书主要内容是:各种合金钢、有色金属、铸铁、异种金属等焊接及堆焊的有关可焊性问题的分析,焊接工艺及焊接材料的讨论;对金属可焊性概念及试验方法也作了扼要叙述。

本书由吉林工业大学焊接教研室周振丰同志主编,清华大学焊接教研室任家烈同志主审。参加编写的同志有:清华大学焊接教研室任家烈、陈伯蠡、包芳涵同志,沈阳机电学院焊接教研室顾玉熹、祁维朴、戚国福同志,吉林工业大学焊接教研室周振丰、彭高峨同志。

在本书审稿会上,很多兄弟院校焊接教研室的同志对原书稿进行了认真深入的讨论,提出了许多宝贵的意见;北京钢铁研究院,北京材料工艺研究所,北京航空材料研究所,哈尔滨焊接研究所等单位为本书提供了许多难得的照片;在此一并谨致谢意。

由于水平有限,加以时间比较紧迫,书中的缺点和错误是难免的,欢迎读者批评指正。

主要符号说明

I ——焊接电流, A	c ——比热容, J/kg·k
U ——焊接电压, V	λ ——导热系数, W/m·k
d_s ——焊丝直径, mm	ρ ——电阻率, $\Omega \cdot m$
d_w ——钨极直径, mm	α ——线胀系数, k^{-1}
v ——焊接速度, m/h	σ_b ——抗拉强度, N/mm ²
v_s ——送丝速度, m/min	σ_s ——屈服强度, N/mm ²
E ——焊接线能量, kJ/cm	ψ ——断面收缩率, %
Q ——气体流量, l/min	δ_s ——延伸率, %
D_s ——喷嘴直径, mm	a_k ——冲击韧性, J/cm ² , (J=N·m)
δ ——板厚, mm	W ——冲击功, J
t ——时间, h min s	vW ——V形缺口冲击功, J
T ——温度, K(或 °C)	t_f ——断裂时间
T_p ——预热温度, K(或 °C)	C_R ——裂纹率, %
T_m ——最高加热温度, K(或 °C)	v_{cr} ——临界变形速度
γ ——比重, g/cm ³	ω_c ——冷却速度, °C/s

目 录

第七章 金属可焊性及其试验方法..... 1	§ 9-2 奥氏体钢的可焊性.....92
§ 7-1 金属可焊性概念..... 1	一、焊接接头的耐蚀性.....92
一、金属可焊性..... 1	二、焊接接头的热裂纹.....99
二、工艺可焊性..... 2	三、焊接接头的“等强性”..... 103
§ 7-2 金属可焊性的试验..... 4	§ 9-3 奥氏体钢的焊接工艺特点..... 105
一、可焊性试验的内容..... 4	一、奥氏体钢焊接时的一般工艺特点..... 106
二、选择或制定可焊性试验方法 时应考虑的原则..... 5	二、焊接方法的选用..... 106
三、可焊性试验方法分类..... 5	三、焊接材料的选用..... 108
§ 7-3 常用的可焊性试验方法..... 6	四、奥氏体钢焊接前后的处理问题..... 110
一、焊缝和热影响区裂纹试验方法..... 6	§ 9-4 马氏体钢及铁素体钢的焊接..... 111
二、裂纹敏感性的间接评价方法.....12	一、马氏体钢的焊接特点..... 111
三、焊接接头使用性能试验.....13	二、铁素体钢的焊接特点..... 113
附录.....16	第十章 高温合金的焊接..... 116
第八章 合金结构钢的焊接.....21	§ 10-1 高温合金的类型及特性..... 116
§ 8-1 合金结构钢的分类.....21	一、高温合金的类型..... 116
一、强度用钢.....21	二、高温合金的合金化..... 119
二、特殊用钢.....21	三、高温合金的热处理..... 124
§ 8-2 高强钢的焊接.....22	四、高温合金的物理性能..... 125
一、高强钢的类型和特性.....22	§ 10-2 高温合金的可焊性..... 126
二、高强钢的可焊性.....28	一、焊接热裂纹..... 126
三、高强钢的焊接工艺特点.....52	二、应变时效裂纹..... 129
§ 8-3 珠光体耐热钢的焊接.....67	三、焊接接头的“等强性”..... 131
一、珠光体耐热钢的成分特点.....67	§ 10-3 高温合金的焊接工艺特点..... 133
二、珠光体耐热钢的焊接工艺特点.....71	一、加强保护防止合金氧化..... 133
§ 8-4 低温钢的焊接.....73	二、加强清理工作..... 134
一、低温钢的成分特点.....73	三、合理设计坡口..... 134
二、低温钢的焊接工艺特点.....76	四、控制装配质量..... 134
§ 8-5 低合金耐蚀钢的焊接.....80	五、减少接头过热..... 134
一、含 Al 低合金耐蚀钢的焊接.....80	六、正确选定焊接材料..... 135
二、含 P 低合金耐蚀钢的焊接.....82	第十一章 铝及其合金的焊接..... 138
第九章 不锈钢及耐热钢焊接.....85	§ 11-1 铝及其合金的类型及特性..... 138
§ 9-1 不锈钢及耐热钢的类型和特性.....85	一、工业纯铝的特性..... 138
一、不锈钢及耐热钢的类型.....85	二、铝合金的合金化及其特性..... 138
二、不锈钢的耐蚀性.....85	三、铝合金的耐蚀性..... 142
三、耐热钢的高温性能.....90	四、铝合金的物理性能..... 143
四、不锈钢及耐热钢的物理性能.....92	§ 11-2 铝及其合金的可焊性..... 144
	一、焊缝的气孔..... 144

二、焊接热裂纹	149	三、焊接接头裂纹问题	206
三、焊接接头的“等强性”	154	四、焊缝气孔问题	206
四、焊接接头的耐蚀性	160	§ 13-3 钛及钛合金焊接工艺特点	208
§ 11-3 铝及其合金的焊接工艺特点	162	一、氩弧焊	208
一、焊接工艺的一般特点	162	二、等离子弧焊	210
二、焊接方法的选用	162	三、真空电子束焊	210
三、氩弧焊焊接规范的选择	164	四、埋弧焊	211
四、焊丝的选用	165	第十四章 异种金属的焊接	214
第十二章 铜及铜合金的焊接	169	§ 14-1 珠光体钢与奥氏体钢的焊接	214
§ 12-1 铜及铜合金的分类、成分 及性能简介	169	一、可焊性分析	214
一、紫铜	169	二、焊接工艺	220
二、黄铜	170	三、不锈钢复合钢板焊接工艺特点	223
三、青铜	172	§ 14-2 钢与铜及其合金的焊接	224
四、白铜	174	一、可焊性分析	225
§ 12-2 铜及铜合金可焊性分析	174	二、焊接工艺要点	227
一、难熔合及易变形	174	§ 14-3 钢与镍及其合金的焊接	228
二、裂纹	175	一、可焊性分析	229
三、气孔	177	二、焊接工艺要点	231
四、焊接接头机械性能、导电性能及 耐腐蚀性能的变化及控制	179	第十五章 铸铁焊接	234
§ 12-3 紫铜焊接工艺	180	§ 15-1 铸铁的种类及性能简介	234
一、气焊	181	§ 15-2 灰口铸铁焊接	237
二、碳弧焊	183	一、灰口铸铁可焊性分析	237
三、手弧焊	183	二、同质(铸铁型)焊缝的熔化焊	241
四、埋弧焊	184	三、异质(非铸铁型)焊缝的电弧冷焊	249
五、惰性气体保护焊	185	四、钎焊	253
§ 12-4 黄铜及青铜焊接工艺	187	§ 15-3 球墨铸铁焊接	259
一、黄铜焊接工艺	187	一、同质(铸铁型)焊缝的熔化焊	259
二、青铜焊接工艺	189	二、异质(非铸铁型)焊缝的电弧冷焊	261
第十三章 钛及钛合金的焊接	192	第十六章 堆焊	262
§ 13-1 钛及钛合金的种类、成分 及性能简介	192	§ 16-1 堆焊的意义、用途及特点	262
§ 13-2 钛及钛合金可焊性分析	195	§ 16-2 堆焊合金和堆焊材料的选择	263
一、气体等杂质污染而引起 焊接接头脆化	196	一、金属磨损的概念	263
二、合金元素及焊接线能量变化对焊接 接头性能的影响	200	二、堆焊合金的类型和特点	265
		三、堆焊金属渗合金的方法	272
		四、堆焊材料的选择和工艺特点	274
		§ 16-3 堆焊方法的选择	290
		附录 国内外各类堆焊焊条对照表	298

第七章 金属可焊性及其试验方法

在多年生产实践和科学研究的基础上,人们发现,某些金属材料具有较好的强度、塑性、耐腐蚀、抗蠕变等性能,是理想的结构材料。但当利用这些材料制造结构时却又发现,它们在焊接加工时可能出现裂纹、气孔等缺陷,或者能得到完整的接头而性能却达不到要求。这些现象就大大限制了这些金属材料的使用范围。例如,在第二次世界大战期间,美国为了应付战争的需要而以大量生产的方式制造了 4700 艘焊接结构海轮,约有 1000 艘船体上发生了脆性破坏事故,其中 190 艘的船体的事故是极为严重的,有的船体裂成了两段。据事后调查,陆地上的低碳钢焊接结构如桥梁、管道、压力容器等,也都发生过类似的问题。

这些现象引起人们考虑:为什么有些性能良好的金属材料在焊接时或焊后使用中会出现问题呢?如何使金属材料能适合于用焊接方法来加工呢?

焊接时,焊缝和热影响区金属要经受很复杂的过程。从冶金的观点来看,就在焊接接头很小的范围之内,几乎所有的冶金现象都会出现,如:熔化、结晶、气相与金属反应、渣与金属反应、固态相变等等。而且由于热源温度高,作用时间短,比起炼钢、铸造或热处理来,焊接时冶金反应的条件是更加不平衡,这当然要对金属材料的性能产生很大的影响。此外,焊缝与热影响区各不同位置实际相当于进行了不同最高加热温度的空冷热处理,这会造成很大的内应力,因为加热、冷却、相变都是不均匀的,体积的膨胀收缩又都受到焊接结构的约束,不能自由变形,就造成了局部应力,甚至可能导致各种型式的裂纹。除了造成接头缺陷之外,焊接冶金过程和热过程还可能使接头的使用性能不符合要求,例如低合金高强度钢焊接接头脆化、软化,不锈钢焊接接头丧失耐腐蚀性等。

综上所述,可以看到,单从金属材料的基本性能本身,还不能较好地判断它在焊接时可能出现的问题以及焊后可能达到的接头性能水平,这就要求从焊接的角度出发来研究金属的特定性能,也就是金属可焊性问题。

§ 7-1 金属可焊性概念

一、金属可焊性

对于金属可焊性,三十多年来人们曾给它下了很多种不同的定义,这是由于理解的角度不同,分析可焊性的目的不同,或者由于焊接技术本身不断发展而引起的。应该认为,重要的是弄清楚金属可焊性的概念,以便在科学研究和生产实际中能有利于指导我们的工作,而不必过分纠缠于文字上的定义。因为金属可焊性涉及的问题十分广泛,应用的目的又很不相同,追求一个严格的、统一的、包罗万象的定义,既不必要,也不可能。

金属可焊性,就是金属是否具有适应焊接加工,以及在焊接加工以后是否能在使用条件下安全运行的能力。这就是说,可焊性包括了两个方面的概念:第一是在焊接加工时金属形成完整焊接接头的能力;第二是已焊成的焊接接头在使用条件下安全运行的能力。前者可以认为是结合性能,后者可以认为是使用性能。举例来说,人们都很熟悉的低碳钢,采用焊接加工时

很容易获得完整而无缺陷的焊接接头,不需要复杂的工艺措施,所以说低碳钢的接合性能很好。如果用同样的工艺来焊接铸铁,则往往会发生裂纹、断裂、剥离等严重的缺陷,得不到完整的焊接接头,所以说铸铁的接合性能不好或不加低碳钢。然而,如能使用特殊的焊接材料并采取高温预热、缓冷、锤击等工艺措施,那也可以获得完整的焊接接头。可见,接合性能不仅与母材本身的化学成分和性能有关,而且还与焊接材料和工艺方法有关。随着新的焊接方法、焊接材料、工艺措施不断出现,某些原来不能焊接或不易焊接的金属材料,现在可能变成能够焊接或容易焊接的了。

完整的焊接接头并不一定具备满足要求的使用性能。例如,铬镍奥氏体不锈钢是较容易获得完整焊接接头的,但如果焊接方法或工艺措施不合适,则焊接接头可能不耐腐蚀,造成使用性能不合格。焊接铸铁时,即使接头未发生裂纹等缺陷,也常常会由于熔合线附近存在极为硬脆的白口组织,不能进行切削加工而无法使用,这也是使用性能不合格而影响可焊性的一个例子。

理论上,任何金属或合金,只要在高温熔化后能相互形成溶液或共晶,就可以采用熔化焊的方法进行焊接。这样,同种金属或合金之间就是当然可以焊接的,或者说是具有可焊性的了。而异种金属或合金之间必要时可以通过加过渡层的办法来实现焊接。这种可焊性过去有人称之为“物理可焊性”。但这里就没有考虑到质量(裂纹、气孔等严重缺陷或使用性能不合格)和经济(特殊材料或工艺措施费用昂贵)问题,在实际生产中有可能是根本行不通的。为此,就有必要联系工艺条件来分析可焊性问题,一般可以称为是“工艺可焊性”问题。

二、工艺可焊性

工艺可焊性是金属或合金在一定的焊接工艺条件下,经过反应、变化而形成具有一定使用性能的焊接接头的能力。工艺可焊性与很多因素有密切关系。

(一)影响工艺可焊性的因素

1. 材料因素 材料因素包括母材本身和使用的焊接材料如:手弧焊时的焊条;埋弧焊时的焊丝和焊剂;气体保护焊时的焊丝和保护气体等。它们在焊接时都直接参与熔池或半熔化区内的冶金过程,影响焊接质量。母材或焊接材料选用不当时,会造成焊缝金属化学成分不合格,机械性能和其他使用性能降低,甚至造成裂纹、气孔等严重缺陷,也就是使工艺可焊性变差。由此可见,正确选用母材和焊接材料是保证可焊性良好的重要基础,必须十分重视。

2. 工艺因素 对于同一母材,当采用不同的工艺方法和工艺措施时,所表现的工艺可焊性也不同。例如,钛合金对氧、氮、氢极为敏感,用气焊和手弧焊不可能焊好,而用氩弧焊或真空电子束焊,由于能防止氧、氮、氢等侵入焊接区,就比较容易焊接了。所以,发展新的焊接方法和工艺措施也是改善工艺可焊性的重要途径。

焊接方法对可焊性的影响首先表现在焊接热源能量密度大小、温度高低以及热输入量多少上。对于有过热敏感的高强钢,从防止过热出发,宜于选用窄间隙焊接、脉冲电弧焊接、等离子焊接等方法,有利于改善可焊性。相反地,对于容易产生白口的铸铁来说,从防止白口出发,又以选用气焊、电渣焊等方法为宜。其次则表现在保护熔池及接头附近区域的方式,如渣保护、气保护及在真空中焊接等。

工艺措施对防止焊接接头缺陷,提高使用性能也有重要的作用。最常见的工艺措施就是焊前预热和焊后缓冷,它们对防止热影响区淬硬变脆,降低焊接应力,避免氢致冷裂纹是比较有效的措施。合理安排焊接顺序也能减小应力变形,原则上应使被焊工件在整个焊接过程中

都尽量处于无拘束而自由膨胀收缩的状态。

此外,焊前的冷作(如弯曲)、装配、气割等工序也应符合材料特点,以免造成硬化、脆化或不利的应力状态,引起裂纹等缺陷。坡口加工不当也会影响焊接质量。焊后进行热处理可以消除残余应力,也可以使氢逸出而防止延迟裂纹。铸铁焊补时用锤击防止裂纹,钨极氩弧焊铝时用直流反接造成阴极雾化保证良好熔合等,都是很重要的工艺措施,对改善可焊性能起很大作用。

3. 结构因素 焊接接头的结构设计会影响应力状态,从而对可焊性也发生影响。这里主要应从刚度、应力集中和多轴应力等方面来考虑。设计结构时应力图使焊接接头处于刚度较小的状态,能够自由收缩,有利于防止焊接裂纹。缺口、截面突变、堆高过大、交叉焊缝等都容易引起应力集中,要尽量避免。不必要地增大母材厚度或焊缝体积,会产生多轴应力,也要注意防止。

4. 使用条件 焊接结构的使用条件极为多种多样,如工作温度高低、工作介质种类、载荷性质等都属于使用条件。工作温度高时,可能产生蠕变;工作温度低或载荷为冲击载荷时,容易发生脆性破坏;工作介质有腐蚀性时,接头要求具有耐腐蚀性。总之,使用条件越不利,可焊性就越不易保证。

既然可焊性与材料、工艺、结构和使用条件等因素都有密切关系,它就不可能是很单纯而无变化的。人们不可能脱离这些因素而简单地认为某种材料可焊性良好或不好,也不可能用某一种指标来概括某种材料的可焊性。在科学技术不断迅速发展的今天,新的材料越来越多,其性能也越来越好,对焊接质量也提出了新的要求;与此相适应,焊接工艺和焊接材料也在日新月异地发展,同时利用断裂力学分析结构中的应力,利用新的检验手段发现和判断焊接缺陷,这些都对改善可焊性起着积极的作用。

综上所述,为了分析和解决可焊性问题,必须根据结构使用条件的要求,正确地选择母材、焊接方法和焊接材料,采取适当的工艺措施,避免不合理的结构形式。

(二) 工艺可焊性的分类

分析研究金属的工艺可焊性时,总与焊接条件分不开。对于熔化焊来说,焊接过程一般都包括冶金过程和热过程这两个必不可少的过程。在一个焊接接头上,冶金过程主要影响焊缝金属的性能,而热过程则主要影响近缝区金属的性能。

1. 冶金可焊性 焊接时金属的冶金可焊性是指熔焊高温下的熔池金属与气、渣等相之间发生物理化学反应所引起的可焊性变化。这些冶金过程包括合金元素的氧化、还原、蒸发,并从而影响焊缝金属的化学成分和性能;氧、氢、氮等的溶解、析出对生成气孔或对焊缝性能的影响;在焊缝金属结晶期间,由于熔池金属的化学成分、结晶条件以及接头刚度等影响而有时产生热裂纹。

金属材料本身的化学成分固然对冶金可焊性有主要作用,但绝不能忽略焊接材料、焊接方法、保护条件等对冶金可焊性的重要作用。这样,除了在研制新金属材料时可以改善冶金可焊性之外,还可以通过发展新焊接材料、新焊接方法等更多的途径来改善冶金可焊性。

2. 热可焊性 焊接过程中要向接头部位输入很多热量,对金属形成加热和冷却过程,这对靠近焊缝的热影响区金属就造成显微组织的变化,从而引起机械性能、硬度、耐腐蚀性能等的变化。

与焊缝金属不同,热影响区金属的化学成分在焊接时一般不会有明显的变化,而且也很难通过改变焊接材料来加以调整,即使有些元素可以由熔池向熔合线区扩散,那也是很有限的。所以,母材本身的化学成分对热可焊性具有十分重要的意义。工业上大量应用的金属材料都是合金,对热过程有反应,会发生组织和性能的变化,例如含碳稍多的低合金钢,在热影响区靠近熔合线处可能发生淬硬变脆现象,就是属于热可焊性问题。即使是一些不发生相变的纯金属如纯铝、纯钼等,经过焊接热过程影响,也会由于晶粒长大或形变硬化消失而使其性能发生较大变化。

为了改善热可焊性,除了注意选择母材之外,还要正确选定焊接方法和热规范。例如,在需要减少热输入时,可以选用能量密度大、加热时间短的电子束、等离子等焊接方法,并采用线能量小的焊接规范以改善热可焊性。此外,预热、缓冷、浸水、加冷却垫板等工艺措施也都可以影响热可焊性。

§ 7-2 金属可焊性的试验

由于可焊性的影响因素很复杂,所以评定可焊性的试验方法也很多。每一种方法所得的结果可能从某种角度(例如,对冷裂纹的敏感性等)说明其可焊性,而往往要进行一系列的试验才能全面说明金属的可焊性,说明结构的形式是否适当,说明应当选用什么焊接方法、焊接材料、焊接规范,以及需要采取一些什么工艺措施。可焊性试验方法有几百种之多,常用的也有几十种。对于某一项具体科研或生产工作来说,只能选用其中的少数几种,这就要求我们熟悉主要的可焊性试验方法及其特点,从而能够正确选择,达到以最少的人力、物力取得必要的试验结果。

一、可焊性试验的内容

从获得完整的、具有一定使用性能的焊接接头出发,可焊性试验主要有以下几种:

(一)焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力

熔池金属在结晶时,由于有害元素的存在且受到大的拉伸应力作用,就可能发生热裂纹,这是焊接时比较常见的一种严重缺陷,所以焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力常被当做衡量可焊性的重要标志。热裂纹试验的方法也是很多的。

(二)焊缝及热影响区金属抵抗产生冷裂纹的能力

在焊接热循环的作用下,焊缝及热影响区金属由于组织、性能发生变化,内应力作用,再加上扩散氢的影响,都可能发生冷裂纹,这也是一种常见的严重缺陷,所以冷裂纹试验的方法也有很多种。

(三)焊接接头金属抗脆性转变能力

由于焊接时的冶金反应、热循环、结晶过程的结果,可能使焊接接头的某一部分或整体发生脆化,以上结果尤其对在低温条件下使用的结构更为重要。所以接头金属抗脆性转变能力往往也是可焊性的一项标志。

(四)焊接接头的使用性能

包括机械性能和产品要求的其他性能,如不锈钢的耐腐蚀性、低温钢的低温冲击韧性、耐热钢的蠕变强度等。

此外,为一些在特定的条件下使用的产品,还制定了专门的可焊性试验方法,如厚板焊接

时的层状撕裂试验(板厚方向的拉伸试验、窗口试验等);铝合金的铸环试验等。

二、选择或制定可焊性试验方法时应考虑的原则

(一)试验结果应能说明科研、生产中的实际问题。例如裂纹试验时的材料、结构、焊接方法及规范等条件应尽量接近实际焊接时的条件,只有这样才能找出防止裂纹的必要条件,指明科研、生产中应采取的措施。

(二)试验结果尽量不受或少受人的因素的影响,具有较好的再现性。否则,试验结果将很不稳定,既不可能找到变化规律,更不可能应用于生产实践。

(三)消耗材料少,加工容易,试验过程短。

三、可焊性试验方法分类

根据试验进行方法的不同,可焊性试验可以分为模拟性的和实际焊接的两大类。模拟性可焊性试验是对金属试样模仿焊接特点加热冷却,有时还施加一定的拉伸应力来观察金属的变化,这对估价热影响区各部位金属在焊接时可能出现的问题是很有用的。但模拟与实际焊接总有相当的差异,因为不均匀组织、残余应力、吸氢等的影响都很大。实际焊接的可焊性试验则是通过在一定条件下进行焊接的办法来观察可能出现的问题,这就比模拟更接近生产条件,对评价母材、选择焊接材料、焊接方法、了解焊接接头使用性能等都是有用的。除了进行试验之外,还有从理论分析来评价可焊性的方法,如用母材化学成分来估计冷裂纹倾向以及需要的预热温度的碳当量法,也是在大量试验归纳的基础上总结出来的办法。

按照不同目的,主要可焊性试验方法包括下列各项,但在实际应用中往往只是挑选其中少数几项来进行:

(一)对母材进行的试验

1. 母材化学成分分析。
2. 母材机械性能试验 除常规的拉伸、弯曲、冲击等力学性能试验外,有时根据产品特点还要做低温冲击、时效冲击、疲劳试验、蠕变试验等。
3. 母材断裂韧性试验 这是为了分析结构在使用时的脆断倾向所需要做的实验。包括:应力强度因子 (Stress intensity factor) K_{Ic} 试验; 裂纹张开位移 (Crack Opening Displacement, COD) δ_c 试验等。
4. 母材的原材料缺陷检验 因为母材上的缺陷可以引起焊接接头的缺陷,例如母材分层和硫化物夹杂可能引起厚板焊接时的层状撕裂。

(二)对焊接接头进行的试验

1. 焊缝金属化学成分分析。
2. 焊接接头的机械性能试验 这包括焊缝金属本身和焊接接头整体的机械性能试验,具体项目与母材机械性能试验相似。
3. 焊接接头断裂韧性试验 包括 K_{Ic} 试验, COD 试验以及宽板试验等(详见焊接结构一书)。
4. 焊接接头的抗裂试验 这是可焊性试验中最重要的项目。抗裂试验可以用来确定母材及焊接材料的裂纹倾向,达到正确选择母材及焊接材料的目的。它也可以用来选择正确的焊接方法和工艺措施。抗裂试验对研究裂纹产生机理及影响因素也很重要,所以常常成为科学研究的重要手段。
5. 焊接接头的探伤及其他使用性能的试验。

§ 7-3 常用的可焊性试验方法

可焊性试验方法种类极多^[16]，这里只能介绍一些目前常用的可焊性试验方法，其中一些具体细节，则在附录中进一步说明。

一、焊缝和热影响区裂纹试验方法

(一) 不用专门装置的裂纹试验方法

1. 斜 Y 坡口对接裂纹试验 作为热影响区冷裂倾向的试验方法，斜 Y 坡口对接裂纹试验应用很广泛，通称为“小铁研式”抗裂试验，其试板如图 7-1 所示。用被焊材料制成的试板，两端先用焊缝固定，试板之间预留间隙 2~3 mm。试板中间焊试验焊缝。由于两端固定对焊缝有拘束作用，其拘束程度往往比实际结构（如船体、球形容器、桥梁等）的长焊缝还要大，所以一般认为只要裂纹总长小于焊缝长度的 20%，在实际生产中就不致发生裂纹。

裂纹形式大多如书末照片图 7-2(a) 所示，绝大多数裂纹是纵向冷裂纹。裂纹由焊缝根部尖角处开始，因为这里既

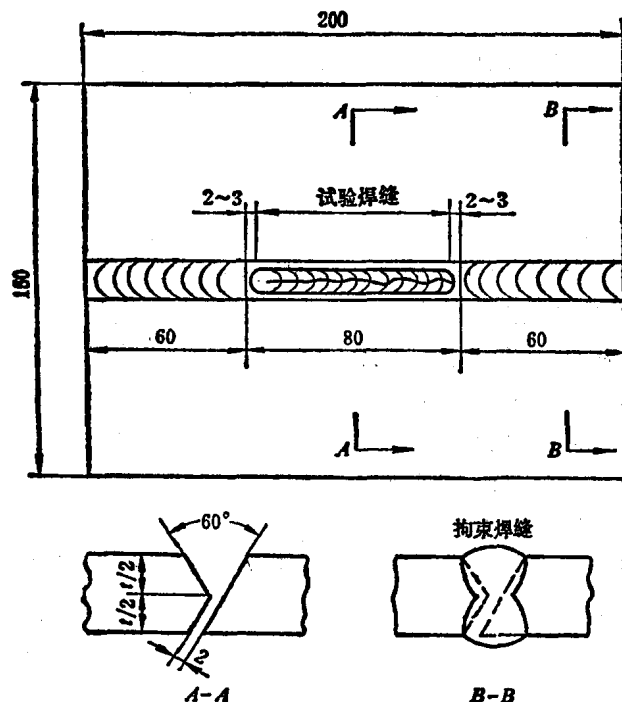


图 7-1 斜 Y 坡口对接裂纹试验试板

有组织转变引起的脆化，又有力学角度上的脆化，最容易开裂，而裂纹沿粗晶区扩展。如果焊缝金属抗裂性能不好，裂纹可能折入焊缝，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乃至数小时后才开始出现。

2. 直 Y 坡口对接裂纹试验 这种试验的试板如图 7-3，它与斜 Y 坡口试样十分相似，只是坡口形式有些差别。由于坡口形式改变，裂纹也改变为从焊缝根部尖角处开始，并在焊缝中扩展，也可能贯穿至表面。裂纹见图 7-2(b)。这种方法主要用于考核焊缝金属根部裂纹敏感性。

以上两种试验都只是单道焊或多层焊的第一道打底焊缝的情况。

3. 窗形拘束试验^[17] 此法主要用于考核多层焊时焊缝的横向裂纹敏感性，以及选择防止这类裂纹所需采用的焊接材料和工艺措施。图 7-4 就是窗形拘束试验的示意图，其中 a) 是窗口及试板的形式，b) 是焊后检查焊缝横向裂纹的示意图。图中底板是 1.2 m × 1.2 m × 50 mm 的低碳钢板，底板中央开有 320 mm ×

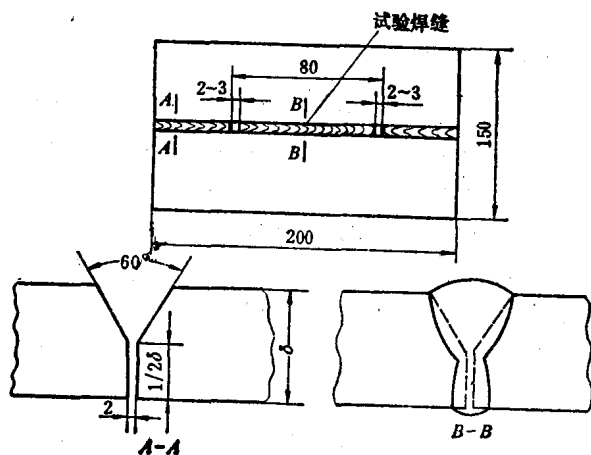


图 7-3 直 Y 坡口对接裂纹试验试板

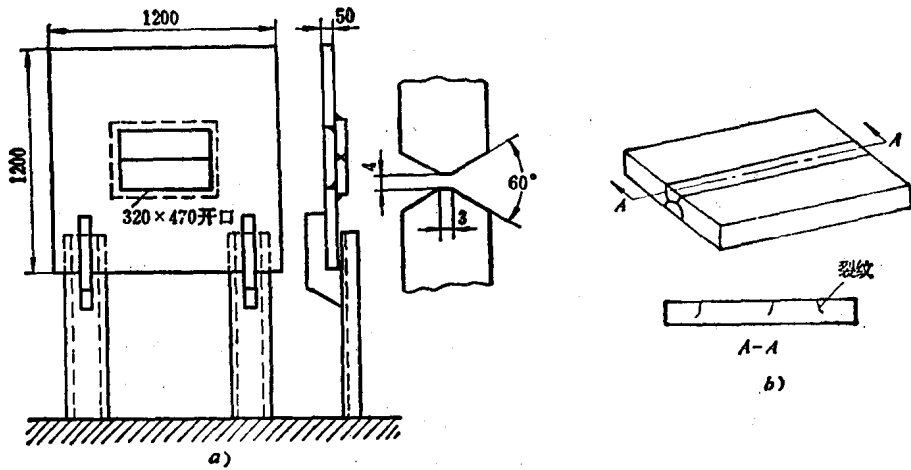


图 7-4 窗口拘束试验

470 mm 的窗口。试板是两块 500 mm × 180 mm 的被焊钢板，开 X 形坡口。事先将试板焊到窗口部位，试验时用多层焊从两面填满坡口。焊后放置数日再取下试板用 X 射线和磨片检查裂纹。磨片是沿焊缝中心线纵向剖开，在纵断面上检查裂纹如图 7-4b)。

4. 刚性固定对接裂纹试验^[1] 试样装配如图 7-5 所示。试验前，先用角焊缝将试板固定在厚大底板上，当焊接试验焊缝时，焊缝承受严重的刚性拘束，所以焊缝金属的裂纹敏感性很强，此法主要用于测定焊缝的裂纹倾向，但也可以测定热影响区的冷裂倾向。

焊后(经 24 小时后)在垂直焊缝方向切取试样做磨片检查裂纹。如果沿焊缝中心线切取纵向试样，更容易检查出细小的内在裂纹。此法拘束程度很大，太容易产生裂纹，往往在试验中发生裂纹而在实际生产中并不发生裂纹，故试验结果如何应用还值得分析。

5. 可变刚性裂纹试验 这种试验主要用来测定对接焊缝产生裂纹的倾向性，其原理见图 7-6。图中 a)、b) 分别为整体试样和组合试样，主要差别在于加工的方便与否。试验焊缝从右端开始焊接，由右向左，焊缝金属横向收缩所受到的拘束逐渐增大而可能发生裂纹。所产生

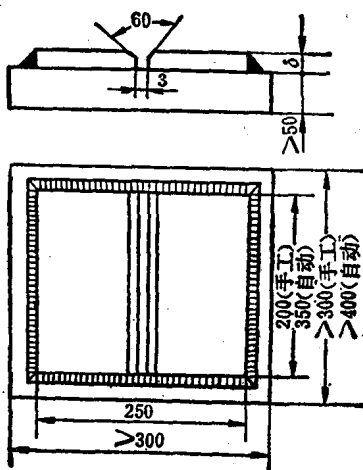


图 7-5 刚性固定对接裂纹试验

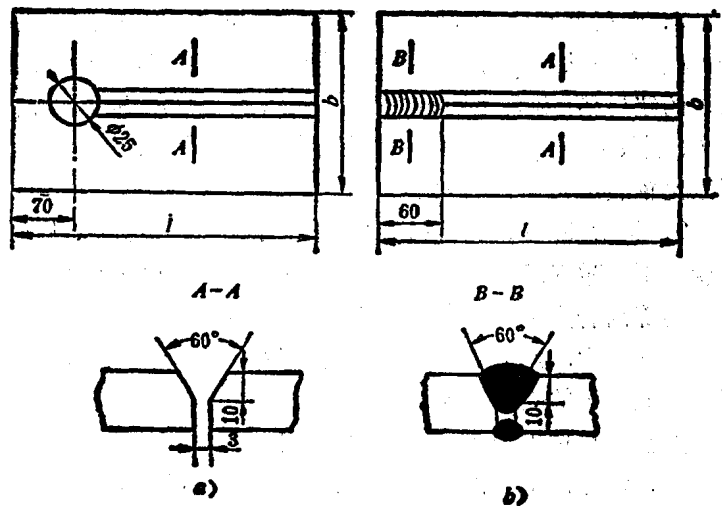


图 7-6 可变刚性裂纹试样

a) 整体试样 b) 组合试样

的裂纹长度可以做为裂纹敏感性的标志。

如在焊接过程中记录应力变化情况,此法还可以求得裂纹与应力、时间的关系,有助于了解裂纹形成机理,所以适用于研究工作。

6. 十字接头裂纹试验 这种试验的试样见图 7-7, 试样尺寸具体数字、焊接及解剖试样的方法均详见附录。此法适用于测定热影响区裂纹敏感性, 如果焊接时发现焊缝产生裂纹, 则认为所用的焊接材料不符合本试验的要求。焊后经 48 小时再解剖取样, 检查裂纹, 可以用裂与不裂为评定标准, 也可以用裂纹率为评定标准。此法焊接时散热面多, 冷却速度大, 而且刚性又强, 所以试验条件也是比较严格的。

7. 十字搭接裂纹试验^[9] 此试验适用于测定厚度仅 1~3mm 的结构钢、不锈钢、高温合金、铝合金、镁合金及钛合金薄板的裂纹倾向, 也可以测定相应的焊丝、焊条的裂纹倾向。如图 7-8 的试样, 两块薄板先用点焊固定在一起, 然后按图上的顺序和方向连续焊完 1、2、3、4 这几条焊缝。焊后两小时内检查焊缝及热影响区裂纹, 根据裂纹百分率评定焊接裂纹倾向性的等级。

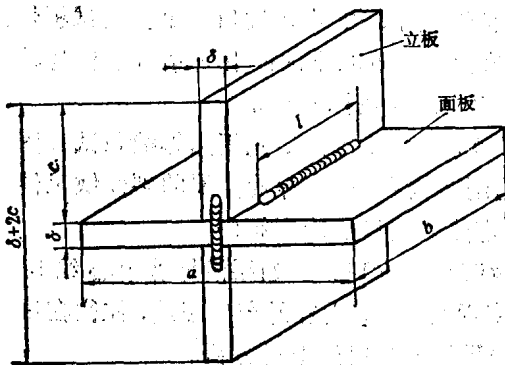


图 7-7 十字接头裂纹试验试样

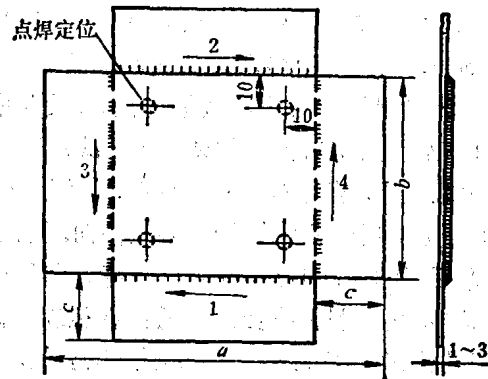


图 7-8 十字搭接裂纹试验

对结构钢、不锈钢及高温合金 $a=100$ $b=60$ $c=20$
对铝合金、镁合金及钛合金 $a=200$ $b=100$ $c=50$

8. 鱼骨状裂纹试验^[9] 鱼骨状试样如图 7-9 所示, 它适用于测定厚度 1~3mm 的铝合金、镁合金及钛合金薄板焊接时焊缝及热影响区裂纹倾向。由图可见, 试样上预先加工了不同深度的缺口槽, 显然缺口槽的深度越大, 拘束度就越低。焊接在水冷铜垫板上进行, 方向由 A 至 B, 裂纹发生后, 随着拘束程度降低, 最后停止扩展。测量焊缝和热影响区裂纹的总长度就可以比较裂纹倾向性的大小。

9. 指状裂纹试验 试样由若干窄条组合而成, 夹紧后好象并拢的手指(图 7-10), 就在夹持状态下堆敷焊缝。这种试验的条件与汽轮机叶片同叶轮焊接时的条件相近, 主要用以测定耐热钢等高合金钢焊缝金属的横向裂纹敏感性。变化窄条的宽度和厚度都可以调节刚度, 宽度和厚度越大, 刚度就越大, 也就越容易出现更多的裂纹。夹持夹具应在试样冷却后才拆除, 测量焊缝表面的裂纹长度或断面上裂纹区的面积来评价焊缝金属裂纹倾向。窄条宽度和发生裂纹的情况也可以用来说明横向裂纹倾向大小。

10. 铸环试验 由于焊缝金属与铸造金属达到临界变形(发生结晶裂纹)的条件是基本相同的, 所以许多铝合金 (Al-Cu, Al-Si, Al-Sn, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg 等) 可以用铸环试验来测定焊缝金属结晶时形成热裂纹的倾向。其方法是将待测定的铝合金浇铸到特制的铸铁模

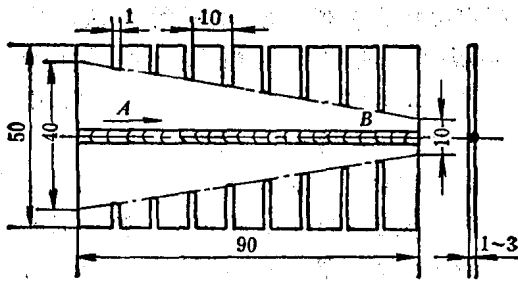


图 7-9 鱼骨状裂纹试验试样

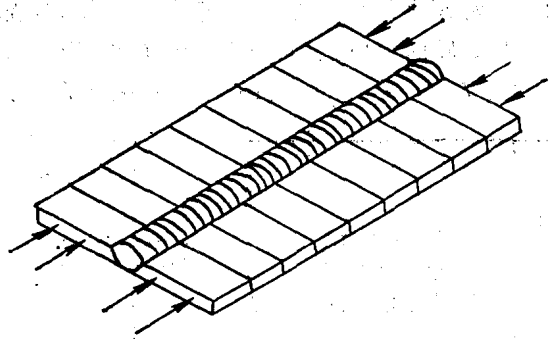


图 7-10 指状试样

(图 7-11) 中, 环形试样结晶收缩而箍紧在模内芯轴上, 在试样的圆周方向造成拉伸应力, 从而引起裂纹。裂纹倾向以用最大裂纹长度与圆环横断面周长比值的百分数来表示, 也可以用试样表面裂纹总长度来表示。

当铸环尺寸、铸模预热温度及合金浇铸温度选择适当时, 铸环试验可以相当好地评价大多数铝合金焊缝的热裂纹倾向。在工作用夹具固定的条件下焊接, 焊缝的热裂倾向与铸环试样的热裂倾更是大体相同。

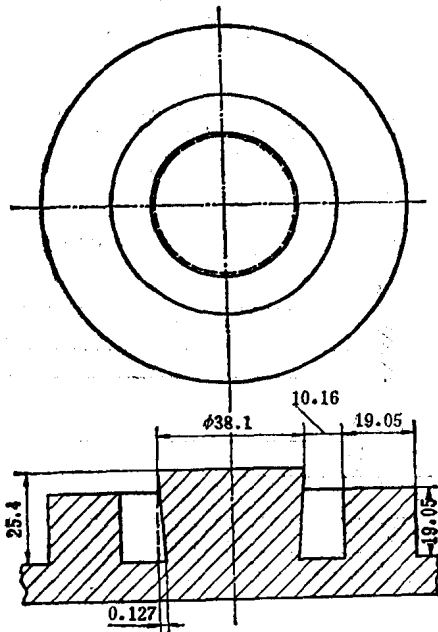


图 7-11 铸环试验所用的铸铁模

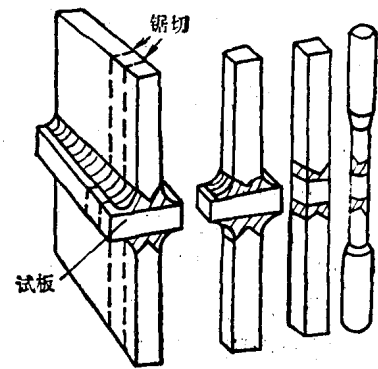


图 7-12 Z向拉伸试样的制备

11. Z 向拉伸试验^[14] 此法专门用来测定材料的层状撕裂 (Lamellar Tearing) 倾向。这是由于母材含杂质多, 轧制后沿平行于板面的方向分布, 因而在板厚方向(即 Z 向)塑性很低, 如果焊接时拉伸应力垂直于板面, 就可能造成母材内沿薄弱面撕开, 裂纹的主要部分平行于板面, 类似一层的撕裂, 故名层状撕裂。对于板厚较大的材料(如 $> 25\text{ mm}$), 如制备小型拉伸试棒, 可以不必接长而直接沿 Z 向切取试棒。如板厚小于 25 mm 或要做常规拉伸试棒, 则可按图 7-12 制备试样。在拉伸破坏时, 以 Z 向断面收缩率 $\varphi_z(\%)$ 为判断层状撕裂倾向性的指标。当板材 Z 向断面收缩率 $\varphi_z < (5 \sim 8)\%$ 时, 层状撕裂倾向性就很严重, 只能在 Z 向应力很小的条件下使用, 而 $\varphi_z > (15 \sim 25)\%$ 时, 就能较好地抵抗层状撕裂。

层状撕裂倾向测定方法很多, 此法是比较简便和节省的一种, 根据一些作者的实践也证

明,以 ϕ_z 来衡量层状撕裂倾向是比较符合实际情况的。

12. Z向窗口试验(Window test)^[14] 这也是测定层状撕裂倾向较常用的方法,其试样如图7-13,是在300 mm×350 mm×30 mm的拘束板中心的窗口内插入一块150 mm×

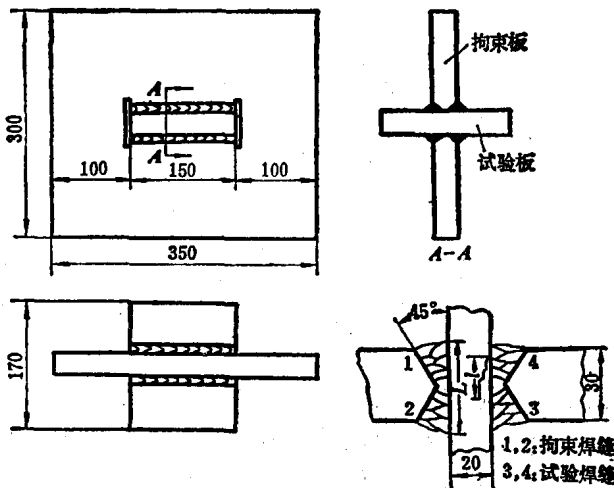


图7-13 Z向窗口试验

170 mm×20 mm的试验板,然后用1、2两个角焊缝来固定拘束,最后以3、4两个焊缝为试验焊缝。如果待试钢板的厚度大于20 mm,则可从一侧加工至只剩20 mm,然后在加工过的一面焊拘束焊缝进行试验。焊后切取剖面,用裂纹率 $C_R(\%)$ 评价层状撕裂倾向的大小:

$$C_R = \frac{\sum l}{\sum L} \times 100\% \quad (7-1)$$

式中 $\sum l$ ——各剖面上裂纹长度总和 (mm);

$\sum L$ ——各剖面上焊缝厚度总和 (mm)。

通过选用不同强度等级的焊条,采取不同的预热温度和层间温度,控制含氢量等办法,还可以进一步将试板的层状撕裂倾向进行分级,对焊接条件提出参考性的要求。

(二)需要专门装置的裂纹试验方法

上述不用专门装置的裂纹试验方法既可以当做试验研究手段,更适宜于在生产条件下测定可焊性,但是大都存在不便定量而只能相对比较的缺点。对于比较深入的理论研究工作,需要采用更加精确定量的方法,这些往往都要使用专门的装置。

1. 刚性拘束裂纹试验(RRC-Rigid Restraint Cracking Test)^[10] 此法原理见图7-14。在焊接前将对接试样一端固定在固定夹头上,另一端固定在移动夹头上,两固定端之间的距离 l 称为拘束长度。图中之 b 为夹持示意图,可以把它简化设想为图中之 a 的情况。试验以前可以调节拘束长度 l ,但焊接过程中要保持 l 固定不变(即刚性拘束)。焊接时的拉伸拘束度 R_F 为:

$$R_F = \frac{E\delta}{l} \quad (\text{kg/mm} \cdot \text{mm}) \quad (7-2)$$

式中 E ——弹性模量, kg/mm^2 ;

δ ——试板厚度, mm;

l ——拘束长度, mm。

拘束度 R_F 的定义为:使焊接坡口间隙弹性地平均收缩1 mm的单位焊接长度上的力的大小,单位为 $\text{kg/mm} \cdot \text{mm}$ 。

所以,调节拘束长度就可以获得各种不同的拘束度。试样焊缝处的拘束应力 σ_w 与拘束

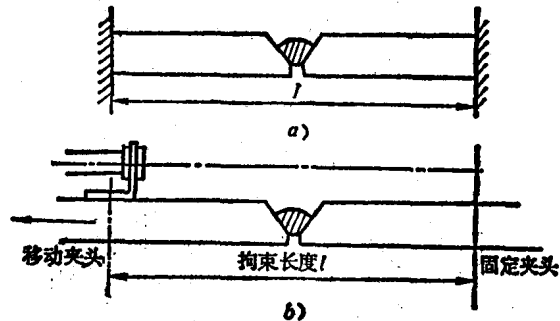


图7-14 刚性拘束裂纹试验(RRC)原理图