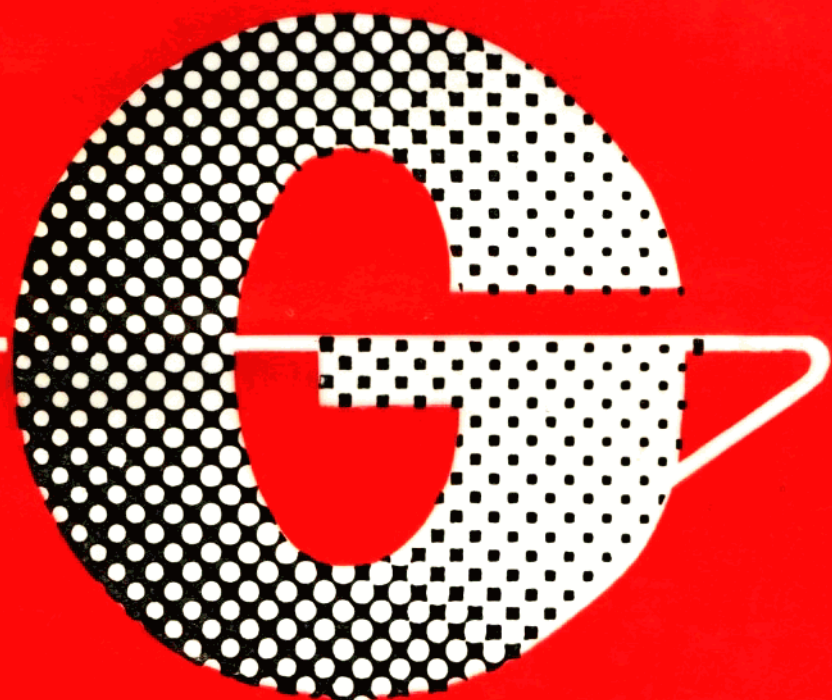


普通高等专科学校教育机电类规划教材

金属材料焊接



沈阳工业高等专科学校 宇永福
辽阳石油化工专科学校 张德生

主编

机械工业出版社

普通高等专科学校教育机电类规划教材

金属材料焊接

主编 宇永福 张德生

参编 宋洪伟

主审 于显臣

机械工业出版社

本书是根据高等专科教育培养目标及全国高等专科焊接专业教学研究会制定的教学大纲编写的。

全书共分十一章,第一章主要论述金属焊接性的概念及试验方法;第二~六章全面系统地介绍各种黑色金属(碳钢、合金钢、铸铁)的焊接性及焊接工艺;第七~九章重点阐述常用几种有色金属(铝、铜、钛及它们的合金)的焊接特点及工艺;第十、第十一章,讨论了同一范畴内的异种金属的焊接、堆焊及热喷涂。本书重点在分析各种金属材料的焊接性及焊接工艺,突出对工程实际指导作用。

本书为高等专科学校焊接专业教材,还可作为职工大学、工程技术人员岗位培训教材,并供金属材料、热加工、机械制造等有关专业师生参考。

金属材料焊接

主编 李永福 张德生

参编 宋洪伟

主审 于显臣

责任编辑:董连仁 版式设计:王 颖

封面设计:姚 毅 责任校对:姚培新

责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本787×1092¹/₁₆·印张18·字数435千字

1995年5月北京第1版·1995年5月北京第1次印刷

印数 0 001—5 000 定价:10.85元

ISBN 7-111-04430-4/TG·937(课)

前 言

本书是按照1991年10月全国高等专科学校焊接专业研讨会上确定的“金属材料焊接”课程教学基本要求(或称教学大纲),并根据高等专科学校是培养为工业、工程第一线从事制造、施工、运行等应用型高级工程技术人才的特点而编写的。全书突出工程技术的应用性和实践性。力求在阐明有关金属材料焊接性的基础上,着力于讨论各种金属材料焊接问题及解决这些问题的途径、方法和措施。书中相应地介绍若干生产应用实例,作为学生理论联系实际启发。使学生通过本门课程学习和实践,不仅能为将来解决各种金属材料焊接问题、制订正确工艺方案等奠定必要的理论基础,又能将所制订工艺方案或高层次设计转换成可操作技术。它既是一本教科书,又适当兼顾指导工艺(施工)编制与实施的工具书的某些功能。

全书共十一章,由沈阳工业高等专科学校宇永福老师任主编,辽阳石油化工专科学校张德生老师任副主编。其中第四、五、九、十章由辽阳石油化工专科学校宋洪伟老师编写;第六章由辽阳石油化工专科学校张德生老师编写;其余六章由宇永福老师编写。最后由哈尔滨机电专科学校于显臣老师主审。

本书是在参阅、整理国内外众多文献资料,并结合多年教学实践的基础上编写的。在此,向被借鉴的参考书和文献的作者表示诚挚的谢意。

限于编者学识水平和生产实践经验的不足,书中内容取舍不当和谬误在所难免,恳请使用这本教材的广大教师和学生批评指正。

编者

1994年3月

目 录

前言

第一章 金属焊接性及试验方法1

第一节 金属焊接性概述1

一、焊接性1

二、影响焊接性的因素2

三、焊接性试验内容3

四、焊接性试验方法的分类3

五、焊接性试验方法的选择3

第二节 焊接性试验方法4

一、工艺焊接性试验方法4

二、使用焊接性试验方法17

第二章 碳钢的焊接19

第一节 碳钢的种类和焊接性19

一、碳钢的种类19

二、碳钢的焊接性19

第二节 碳钢的焊接工艺23

一、碳钢焊接方法的选择23

二、低碳钢的焊接24

三、中碳钢的焊接26

四、高碳钢的焊接28

五、生产应用实例28

第三章 合金结构钢的焊接30

第一节 合金结构钢的种类30

一、强度用钢30

二、低温用钢31

三、低合金耐蚀钢31

四、低合金耐热钢31

第二节 热轧正火钢的焊接31

一、热轧正火钢的成分和性能31

二、热轧正火钢的焊接性35

三、热轧正火钢焊接工艺39

第三节 低碳调质钢的焊接44

一、低碳调质钢的成分和性能44

二、低碳调质钢的焊接性48

三、低碳调质钢的焊接工艺52

第四节 中碳调质钢的焊接57

一、中碳调质钢的成分和性能57

二、中碳调质钢的焊接性59

三、中碳调质钢的焊接工艺61

第五节 低温用钢的焊接64

一、低温用钢的成分和性能64

二、低温用钢的焊接性66

三、低温用钢的焊接工艺67

第六节 耐候钢及耐蚀钢的焊接69

一、耐候钢的焊接69

二、低合金耐蚀钢的焊接71

三、生产应用实例74

第四章 不锈钢的焊接76

第一节 不锈钢的种类和性能76

一、不锈钢的分类76

二、不锈钢的耐腐蚀性77

第二节 奥氏体不锈钢的焊接78

一、奥氏体不锈钢的一般特点78

二、奥氏体不锈钢的焊接性81

三、奥氏体不锈钢的焊接工艺90

第三节 铁素体和马氏体不锈钢的

焊接97

一、铁素体不锈钢的焊接98

二、马氏体不锈钢的焊接101

三、生产应用实例103

第五章 耐热钢的焊接106

第一节 耐热钢的种类和性能106

一、耐热钢的分类106

二、耐热钢的高温性能106

三、对耐热钢焊接接头性能基本

要求107

第二节 低中合金耐热钢的焊接109

一、低中合金耐热钢的化学成分和

性能108

二、低中合金耐热钢的热处理108

三、低中合金耐热钢的焊接性109

四、低中合金耐热钢的焊接工艺113

第三节 高合金耐热钢的焊接120

一、高合金耐热钢的种类和特点120

二、高合金耐热钢的焊接性	124	一、铜及铜合金的焊接性	184
三、高合金耐热钢的焊接工艺	126	二、焊接方法和焊接材料的选择	186
四、生产应用实例	128	三、坡口形式及清理	189
第六章 铸铁的焊接	130	第三节 纯铜的焊接	191
第一节 铸铁的种类和性能	130	一、气焊	191
一、白口铸铁	131	二、碳弧焊	192
二、灰铸铁的类型、性能和用途	131	三、手弧焊	193
三、球墨铸铁的组织、性能和用途	131	四、埋弧焊	194
四、可锻铸铁的性能和用途	132	五、手工钨极氩弧焊	195
第二节 灰铸铁的焊接	133	六、熔化极氩弧焊	196
一、灰铸铁的焊接性	133	七、钎焊	197
二、灰铸铁的焊接方法和焊接材料 选择	135	第四节 铜合金的焊接	200
三、灰铸铁焊接工艺要点	140	一、黄铜的焊接	200
第三节 球墨铸铁的焊接	145	二、青铜的焊接	202
一、球墨铸铁的焊接特点	145	三、白铜的焊接	203
二、球墨铸铁的焊接工艺要点	146	四、生产应用实例	203
三、生产应用实例	148	第九章 钛及钛合金的焊接	206
第七章 铝及铝合金的焊接	150	第一节 钛及钛合金的种类与性能	206
第一节 铝及铝合金的种类与性能	150	一、纯钛的性能特点	206
一、铝及铝合金的分类	150	二、钛及钛合金的类型与性能	207
二、工业纯铝	153	第二节 钛及钛合金的焊接性	209
三、铝合金	153	一、焊接相变引起的性能变化	209
第二节 铝及铝合金的焊接性	155	二、杂质对焊接接头的污染	210
一、铝及铝合金焊接的一般特点	155	三、焊缝气孔	212
二、焊缝中的气孔	156	四、焊接冷裂纹	213
三、焊接热裂纹	158	第三节 钛及钛合金的焊接工艺	214
四、焊接接头不等强性和耐腐蚀性	162	一、焊前准备	214
第三节 铝及铝合金焊接工艺	164	二、焊接时的保护	215
一、焊接方法的选择	164	三、填充金属的选择	216
二、填充金属的选择	166	四、清除应力处理	216
三、坡口设计与焊接前后的清洗	167	五、钛及钛合金的常用电弧焊方法	217
四、焊接工艺	169	六、生产应用实例	219
五、生产应用实例	179	第十章 异种金属的焊接	220
第八章 铜及铜合金的焊接	180	第一节 异种金属焊接概述	220
第一节 铜及铜合金的种类和性能	180	一、异种金属焊接的应用及类型	220
一、纯铜	180	二、异种金属的焊接性	220
二、黄铜	181	三、异种金属焊接的主要问题	222
三、青铜	183	四、异种金属焊接方法及焊接材料的 选择	222
四、白铜	183	第二节 异种钢的焊接	223
第二节 铜及铜合金的焊接性和焊接 工艺	184	一、异种钢焊接的种类	223
		二、珠光体钢与奥氏体钢的焊接	224
		三、不锈钢复合钢板的焊接	231

第三节 钢与有色金属的焊接	233	四、自动埋弧堆焊	244
一、钢与铜的焊接	233	五、等离子弧堆焊	245
二、钢与铝的焊接	235	第三节 堆焊合金与堆焊工艺	246
三、生产应用实例	236	一、堆焊合金的分类	246
第十一章 堆焊及热喷涂	239	二、堆焊合金及堆焊工艺	246
第一节 堆焊的特点及应用	239	三、堆焊材料的选择	262
一、堆焊的特点	239	第四节 热喷涂	265
二、堆焊的应用	239	一、热喷涂的种类和特点	265
三、堆焊合金的使用性能	240	二、热喷涂方法	266
第二节 堆焊方法	241	三、热喷涂材料及应用	272
一、堆焊方法的选择	241	四、生产应用实例	277
二、氧-乙炔焰表面堆焊	242	参考文献	278
三、手弧焊堆焊	243		

第一章 金属焊接性及试验方法

第一节 金属焊接性概述

一、焊接性

讨论金属材料的焊接时,经常涉及到“焊接性”这一术语。所谓焊接性,是指金属材料对焊接加工的适应性,主要指在一定焊接工艺条件下(包括焊接方法、焊接材料、焊接规范及接头形式等),获得优质焊接接头的难易程度。按GB3375—82,它包括两方面的内容:其一是接合性能,即在一定焊接工艺条件下,一定的金属对形成缺陷的敏感性;其二是使用性能,即在一定焊接工艺条件下,一定金属的焊接接头对使用要求的适应性。因此,人们也相应地常将焊接性的具体内容分为工艺焊接性和使用焊接性。

工艺焊接性是在一定工艺条件下,能否获得优质致密、无超标缺陷的焊接接头的能力,即接合能力。因此,金属材料的工艺焊接性必然与其焊接过程有关。就熔焊而言,其焊接过程涉及热过程和冶金过程,从而又可把工艺焊接性分为“热焊接性”和“冶金焊接性”。其中热焊接性是指在焊接热过程条件下,对焊接热影响区组织、性能和形成缺陷的影响程度,可用以说明被焊金属材料对焊接加热的敏感性;冶金焊接性是指焊接冶金反应对焊缝以及熔合区性能和形成缺陷的影响程度,它包括合金元素的氧化与还原、气体的溶解和反应,以及相应缺陷的形成,可以此来说明被焊金属材料对焊接冶金条件的敏感性。由上述可见,工艺焊接性主要表现在金属在焊接过程中对接头性能的改变,尤其是形成缺陷的敏感性,在通常情况下,可作金属材料焊接性的标志。

使用焊接性,则是指焊接接头或整体结构满足技术条件所规定的各种使用性能的程度,包括常规的力学性能,以及接头或结构服役时所需的低温性能、抗脆断性能、高温抗蠕变、抗疲劳、抗腐蚀、耐磨等,亦即在一定工艺条件下所获得焊接接头对使用要求的适应性。

显然,金属的焊接性既与材料本身的固有性能有关,同时也取决于诸多的焊接工艺条件。因此,在不同的焊接工艺条件下,同一材料可以有不同的焊接性,以至相差悬殊。而且随着新的焊接方法、焊接材料和焊接工艺的开发和完善,一些原来焊接性差的金属或其它材料,也会变成焊接性好的材料。

就金属本身的性能而言,凡在高温熔化状态下相互能形成固溶体或共晶体的诸种金属或合金之间,原则上均可以实现焊接,并可称之为原则焊接性。原则焊接性仅为材料实现焊接提供了理论依据,而没有指出一定工艺条件下形成满足使用性能要求的优质焊接接头的难易程度。由前面的论述已知,同样的金属材料在不同的焊接工艺条件下焊接性可以表现出很大的差异,因此所谓焊接性实际上应是一个相对的概念。例如,30年前钛的焊接殊为困难,随着氩弧焊的成熟和普及,钛焊接结构就得到了广泛的应用。铸铁在用普通的结构钢焊条焊接时很难得到满足使用性能要求的接头,但是在用镍基焊条焊接后就能得到较为满意的接头。一些铝合金采用氧-乙炔焰气焊难于获得优质接头,并易于出现裂纹,而采用氩弧焊则情况

就大有改善。不同的金属材料更有不同的工艺适应性。例如一般的低碳钢材不需要复杂的工艺措施即可获得优质的焊接接头,而合金结构钢的焊接则通常需要采用预热、缓冷等等特殊工艺措施才能使所获接头满足使用要求。

二、影响焊接性的因素

影响金属焊接性的因素很多,大体可以归纳为材料、工艺、设计及服役环境等四方面,以钢为例概述如下:

(一) 材料因素

材料方面有关因素有钢材的化学成分、冶炼轧制状态、热处理状态、组织状态和力学性能等,尤以化学成分影响最甚。如钢材只是依靠合金元素实现固溶强化,一般情况下焊接过程中最易使焊缝金属以及热影响区与母材有良好的相匹配性能。如果钢材为较复杂的合金系,并通过热处理、变形加工等方式实现强化,则不易获得与母材完全匹配的焊缝金属,以至整个接头。各种元素对焊接性的影响必然各不相同。对钢来说,影响焊接性较大的元素有碳、硫、磷、氢、氧、氮等。合金元素中锰、硅、铬、镍、钼、钛、钒、铌、铜、硼等,都在不同程度上有可能增加焊接接头的淬硬倾向和裂纹敏感性。一般而言,钢材的焊接性将随含碳量和合金元素含量的增加而恶化。

钢的冶炼方法、轧制工艺及热处理状态等,也都在不同程度上影响焊接性。例如近年来研制发展的各种CF钢(抗裂钢)、Z向钢、TMCP钢(控轧钢)等,就是通过精炼提纯、控制轧制工艺等手段,以使其焊接性有重大改善。

焊接材料直接参与焊接过程一系列冶金反应,决定着焊缝金属的成分、组织和缺陷的形成。如焊接材料选择不妥,与母材匹配不当,不仅不能获得满足使用要求的接头,还会引起裂纹等缺陷的产生和脆化等力学性能的变化,所以正确选用焊接材料是保证获得优质焊接接头的重要冶金条件。

(二) 工艺因素

工艺因素包括焊接方法、焊接规范、预热、后热及焊后热处理等等。它们对焊接性的影响,首先在于诸如其焊接热源特点、功率密度、线能量等工艺参数,它们会直接决定接头的温度场和热循环,从而对焊缝及热影响区的范围大小、组织变化和产生缺陷的敏感性等有明显的影响。其次是诸工艺方面的因素决定了熔池和近缝区的保护方式及冶金条件,例如,采用焊前预热和焊后缓冷可降低接头的冷却速度,籍以降低接头的淬硬倾向和冷裂纹敏感性。选择合理的焊接顺序可以改善结构的约束程度和应力状态。应用氩弧焊等焊接方法可使焊接区保护严密,减少合金元素烧损,获得满意的接头性能等。

(三) 结构因素

结构方面的因素有焊接结构和焊接接头的形式、刚度以及应力状态等,它们将影响接头的力学性能以及产生缺陷的倾向。所设计的焊接结构刚度过大、接口处断面的突然变化、焊接接头的缺口效应和过大的焊缝体积等,都会不同程度地造成脆性破坏的条件。在某些部位的焊缝过于集中和多向应力状态也会对结构的安全性产生不良影响。

(四) 环境因素

服役环境因素,是指焊接结构的工作温度、负荷条件(载荷种类、作用方式及速度等)和工作介质等。一般说来,环境温度越低,焊接结构越易发生脆性破坏。

综上所述,焊接性取决于母材和焊缝金属的化学成分、焊接接头和结构的设计,以及焊

接方法、焊接工艺等的一种综合性能。因此只单纯从材料本身来评金属的焊接性，有时就显得很不够，不能满足要求，还必须通过对上述各种因素进行全面地综合地评估，才能对金属焊接性作出正确、全面的结论。

三、焊接性试验内容

从焊接性定义而言，评价金属焊接性试验主要有：①评定金属在经焊接加工时对缺陷的敏感性，一般情况下，主要是评估对裂纹的敏感性，即进行抗裂纹试验；②评定焊接接头能否满足结构使用性能的要求。对于评价接头或结构使用性能的试验内容复杂，具体项目取决于结构的工作条件和设计上提出的技术要求，通常为常规力学性能(拉伸、弯曲、冲击等)试验。对于高温、腐蚀、磨损和动载疲劳等不同环境中的工作的结构，则应根据不同的要求分别进行相应的高温性能、低温性能、脆断、抗腐蚀、耐磨损和动载疲劳等试验；对有时效敏感性的被焊金属，还应进行焊接接头的热应变时效脆化试验。

四、焊接性试验方法的分类

焊接性对焊接过程中很多因素都很敏感，没有一种简单的试验方法能确切地评价出金属的焊接性。因为有很多参数，诸如拘束度、装配状态等不易预测，所以试验常带有某些局限性。但焊接性试验仍可为正确选择焊接方法和焊接材料提供有用的依据。评定焊接性试验方法很多，不论工艺焊接性还是使用焊接性，大体上都可分为直接试验和间接试验两种类型。

(一) 直接试验

这是在一定条件下通过直接施焊来评定焊接性的方法，主要是针对钢在焊接过程所出现的缺陷以及焊接后的接头性能变化而提出的。它可在生产条件下施焊、检查焊接接头裂纹及其它缺陷的敏感性或测定其力学性能；或在规定条件下在一定尺寸试件上施焊，再作各种检查。前者不需特殊装置，后者尚需特殊装置。

属于此类试验方法有实际产品结构试验，各种裂纹试验以及抗气孔和热应变时效试验等。

(二) 间接试验

间接试验：一是以热模拟组织和性能、焊接SHCCT图和断口分析，以及焊接热影响区的最高硬度等来判断焊接性；二是根据被焊金属的化学成分和其它条件(如拘束度、焊接金属扩散氢含量等)，通过理论和经验计算来评估热裂、冷裂倾向大小；三是焊缝和接头各种性能试验，如高温蠕变、疲劳试验、耐蚀试验等。

值得提出，在大量试验基础上利用电子计算机建立数据库，再利用相应的数学模型建立专家系统，利用这一现代化的工具来评定钢材的焊接性和优化焊接工艺是评价焊接性的新发展。焊接性试验方法的分类详见图1-1。

五、焊接性试验方法的选择

在生产和科研工作中应根据具体情况，有针对性地拟定必要的焊接性试验。选择试验方法原则大体如下：

1. 试验有明显的针对性、适应性 如淬硬性倾向大的高强钢应选冷裂纹试验；对热处理强化铝合金则应选热裂纹试验；对实际工作中刚性较大的结构应选严格拘束下试验；而结构刚度不大的则应当选普通拘束度的试验。

2. 试验条件稳定，试验结果有较好可靠性和再现性 尽量选择较成熟的通用试验方法，试验规范参数能确切反映某些因素的作用，试验结果可比性强。

3. 试验材料消耗量少, 加工容易, 试验周期短, 试验方法经济。

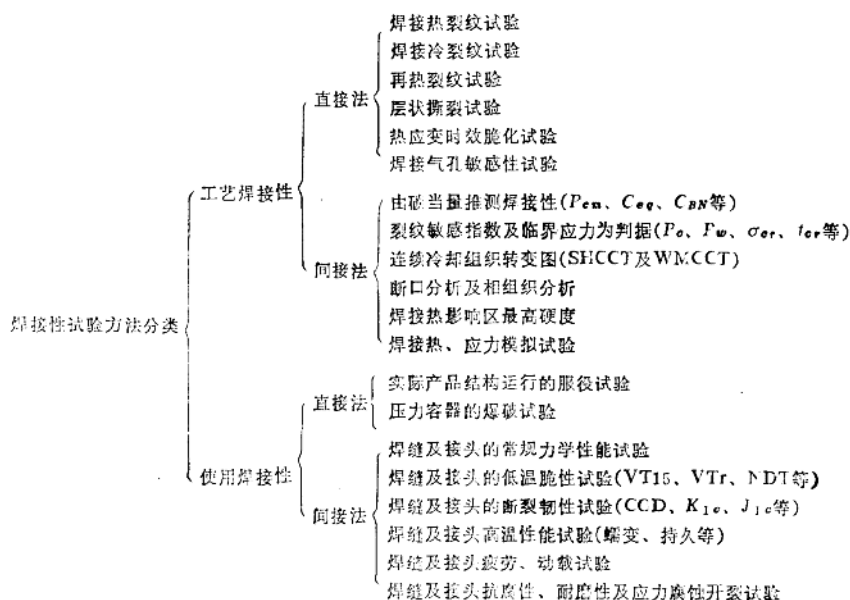


图1-1 焊接性试验方法的分类

第二节 焊接性试验方法

一、工艺焊接性试验方法

(一) 工艺焊接性的间接估算法

1. 钢的碳当量公式 焊接热影响区的淬硬及冷裂纹倾向与钢种的化学成分直接有关, 所以可用化学成分来评估其冷裂纹敏感性。将钢中包括碳在内和其它合金元素对淬硬、冷裂及脆化等影响各折合成碳的相当含量, 即用所谓碳当量来评估。

由于各研究单位所用的试验方法和钢材的合金体系不同, 所以都各自建立了许多碳当量公式。其中以国际焊接学会(IIW)所推荐CE(IIW)和日本JIS标准所规定 C_{eq} (JIS)应用较为广泛。

$$CE(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (1-1)$$

$$C_{eq}(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (1-2)$$

式中化学元素都表示该元素在钢中的重量百分数, 在计算碳当量时, 元素含量均取其成分范围的上限。式(1-1)主要适用于高强度的非调质低合金高强度钢($\sigma_s=500\sim900\text{N/mm}^2$), 式(1-2)主要适用于低碳调质低合金高强度钢($\sigma_s=500\sim1000\text{N/mm}^2$)。前者可用于含碳量偏高的钢种($C\geq 0.18\%$), 后者的适用化学成分范围如下:

$C\leq 0.2\%$; $Si\leq 0.55\%$; $Mn\leq 1.5\%$; $Cu\leq 0.5\%$; $Ni\leq 2.5\%$; $Cr\leq 1.25\%$; $Mo\leq 0.7\%$; $V\leq 0.1\%$; $B\leq 0.006\%$ 。

对于冷裂纹,可用公式CE(IIW)或 C_{eq} (JIS)作为判据,二式的数值越高,被焊钢材的淬硬性倾向越大,热影响区产生冷裂纹倾向越大。所以一般可用碳当量来预测某种钢的焊接性,以便确定是否需要预热和其它工艺措施。

例如,板厚小于20mm,CE(IIW)<0.4%时,钢的淬硬倾向不大,焊热性良好,不需要预热。当CE(IIW)=0.4%~0.6%,特别是大于0.5%时,钢材易于淬硬,焊接时需要预热才能防止裂纹。

同理,也可根据 C_{eq} (JIS)来确定是否需要预热及合适的预热温度。板厚小于25mm,手弧焊17kJ/cm时,根据 C_{eq} (JIS)的限界确定预热温度如下:

钢材的 $\sigma_s=500\text{N/mm}^2$, C_{eq} (JIS)=0.46%, 不预热;

$\sigma_s=600\text{N/mm}^2$, C_{eq} (JIS)=0.52%, 预热75℃;

$\sigma_s=700\text{N/mm}^2$, C_{eq} (JIS)=0.52%, 预热100℃;

$\sigma_s=800\text{N/mm}^2$, C_{eq} (JIS)=0.62%, 预热150℃;

另外,美国焊接学会提出碳当量公式:

$$C_{eq}(\text{AWS}) = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{15} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \left(\frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{P}}{2} \right) \quad (1-3)$$

此公式适用范围为:

$C < 0.6\%$, $\text{Mn} < 1.6\%$, $\text{Ni} < 3.3\%$,

$\text{Cr} < 1.0\%$, $\text{Mo} < 0.6\%$, $\text{Cu} < 0.5\%$,

$\text{P} 0.05\% \sim 0.15\%$ 。计算结果经整理参见图1-2及表1-1。

前苏联按下式确定碳当量:

$$C_{eq} = c + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr}}{3} + \frac{\text{V}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Ni}}{15} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{P}}{2} \quad (1-4)$$

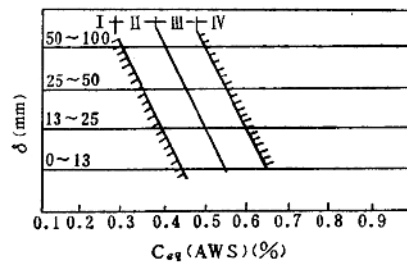


图1-2 焊接条件与碳当量关系

钢的焊接性可按表1-2予以分类。

根据经验一般可认为:当 $C_{eq} < 0.4\%$ 钢材的淬硬倾向不明显,焊接性优良,焊前不需预热; C_{eq} 为0.4%~0.6%的钢材淬硬倾向逐渐增加,需采取适当预热、控制线能量等工艺措施;当 $C_{eq} > 0.6\%$ 需采取较高的预热和严格的工艺措施,以防止冷裂纹的产生。

表1-1 焊接性分类

焊接性分类	普通酸性焊条	低氢焊条	消除应力
I 优良	不需预热	不需预热	不需要
II 较好	预热40~100℃	-10℃以下不需预热	任意
III 尚好	预热150℃	预热40~100℃	希望
IV 可	预热150~200℃	预热100℃	必要

表1-2 焊接性与合金元素含量关系

合金元素总和(%) (Mn, Si, Cr, Mo)	C _{eq} (AWS) (%)	焊接性	合金元素总和(%) (Mn, Si, Cr, Mo)	C _{eq} (AWS) (%)	焊接性
<1	<0.25	优良	1~3	0.30~0.40	尚可
	0.25~0.35	满意		>0.40	不良
	0.35~0.45	尚可		<0.18	优良
	>0.45	不良		0.18~0.28	满意
1~3	<0.20	优良	>3	0.28~0.38	尚可
	0.20~0.30	满意		>0.38	不良

2. 冷裂纹敏感指数估算法 用化学成分的碳当量评估冷裂纹的敏感性时未考虑扩散氢、拘束度以及冷却速度等因素。日本伊藤等人为解决上述冷裂纹敏感性的碳当量法的不足, 提出焊缝根部裂纹敏感指数公式为:

$$P_w = P_{CM} + \frac{[H]}{60} + \frac{\delta}{600} \quad (1-5)$$

$$P_{CM} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \frac{Cu}{20} + 5B \quad (1-6)$$

式中 P_w ——焊缝冷裂纹敏感指数(%);

P_{CM} ——冷裂纹敏感性当量(%);

$[H]$ ——焊缝金属扩散氢(mL/100g);

δ ——板厚(mm)。

式(1-5)适用范围(%): C 0.07~0.22; Mn 0.4~1.4; Si 0~0.6; Ni 0~1.2; Mo 0~0.07; V 0~0.12; B 0~0.005。此外, 扩散氢限制在 1~5mL/100g, 板厚为 19~50mm, 焊接线能量 17~30kJ/cm, 同时可按下式求出所需预热温度 T_0 :

$$T_0 = 1440P_w - 392^\circ\text{C} \quad (1-7)$$

根据国产低合金钢的 P_{CM} 、 $[H]$ 、抗拉强度 σ_s 和板厚 δ 建立的预热温度计算公式:

$$T_0 (^\circ\text{C}) = -214 + 324P_{CM} + 17.7[H] + 0.14\sigma_s + 4.73\delta \quad (1-8)$$

式中 $[H]$ ——熔敷金属的扩散氢含量(GB3165-83)(mL/100g);

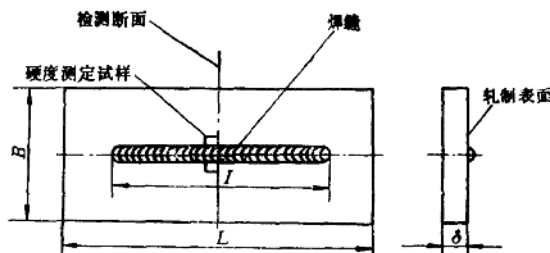
σ_s ——被焊金属的抗拉强度(N/mm²);

δ ——板厚(mm)。

3. 焊接热影响区(HAZ)最高硬度法 由焊接热影响区的最高硬度可以间接判断被焊钢材的淬硬倾向和冷裂纹的敏感性。

由于试验方法简单, 已被国际焊接学会(IIW)采用。我国的国家标准为 GB4675.5-84, 适用于手弧焊。

试件形状和尺寸如图 1-3 标准厚度为 20mm。当板厚超过 20mm 时, 则需机加工成 20mm, 并保留一个轧制表面。



焊前要除去试件表面水、油、铁锈及过厚的氧化皮。焊接电流以4mm焊条为例的常用范围：170±10A作为标准，焊接速度为150±10mm/min。用以获得大致相等的最高硬度。

焊接时试件两端要支承架空，试件下面留有足够的空间。在平焊位置施焊，焊道长125±10mm，试件在静止的空气中自然冷却，且不进行任何热处理。

试件焊后在室温下有时效现象，硬度会有一定增加，约10h后达到最高值，所以规定至少要经过12h才能测量。如图1-3所示采用机械加工方法垂直切割焊缝的中部，然后在此断面上取硬度的测量试样。切割时，必须边冷却边加工，在试样表面上不允许产生回火色，以免焊接热影响区的硬度因断面温度的升高而降低。

硬度测量试样的检测面，经研磨后再加以腐蚀，然后按图1-4所示划一条切于熔合线底部又平行试件轧制表面的直线，在此直线上每隔0.5mm测定载荷为10kg的维氏硬度。切点o及两侧各11个以上的点作为硬度的测定点。试验规程按GB4340—84《金属维氏硬度试验法》的有关规定执行。我国常用焊接用钢的碳当量及允许的最大硬度，如表1-3所示。

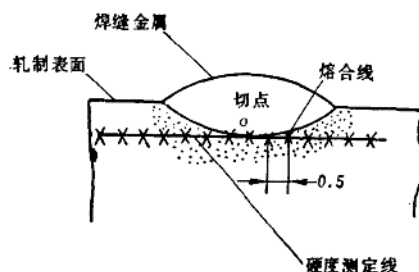


图1-4 测定硬度的位置

表1-3 常用焊接用钢的碳当量及允许的最大硬度

国产钢种	σ_s (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	$F_{0.2}$		CE(IIW)		HV _{max}	
			非调质	调质	非调质	调质	非调质	调质
16Mn	353	520~637	0.2435	—	0.4150	—	390	—
15MnV	392	550~676	0.2413	—	0.3993	—	400	—
15MnVN	441	588~706	0.3091	—	0.4943	—	410	380 (正火)
14MnMoV	490	608~725	0.285	—	0.5117	—	420	390 (正火)
18MnMoNb	549	668~804	0.3356	—	0.5782	—	—	420 (正火)
12Ni3CrMoV	617	706~843	—	0.2787	—	0.6693	—	435
14MnMoNbB	686	781~931	—	0.2658	—	0.4593	—	450
14Ni2CrMnMo-VCuB	784	862~1030	—	0.3346	—	0.6794	—	470
14Ni2CrMnMo-VCuN	882	961~1127	—	0.3246	—	0.6794	—	480

注：1. 钢种化学成分取自《机械工程手册》第12篇表12.3-12上的上限。

2. HV_{max}是按IIW最高硬度法测定的。

4. 焊接连续冷却组织转变图法(SHCCT图法) 焊接条件下连续冷却组织转变图是利用快速膨胀仪或热模拟试验机在模拟焊接热循环条件下制作出来的，它可以比较方便地预测焊接热影响区的组织、性能和硬度，从而可以预测某钢材在一定焊接条件下的淬硬倾向和产生冷裂纹的可能性。同时也可作为调节焊接线能量、改进焊接工艺(预热、后热、降氢及焊后热处理等)的依据。

以上简要介绍了工艺焊接性的几个主要间接估算法,即碳当量法、冷裂纹敏感指数法、HAZ最高硬度法及SHCCT图法。由于这些方法比较方便,故在工程上得以广泛应用;但各种方法都有各自优点和不足,在应用时应视具体条件加以选用。

(二) 工艺焊接性的直接试验法

焊接裂纹是工艺焊接性中主要问题,被焊材料的焊接性,很多情况下主要决定于该材料的焊接裂纹敏感性大小。

在焊接生产中由于被焊材料和结构类型的不同可能出现各种裂纹,主要有热裂纹、冷裂纹、再裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂纹等五大类。下面介绍评估热裂纹和冷裂纹敏感性的几种直接试验法。

1. 焊接热裂纹敏感性试验法 为了评价不同被焊金属在一定工艺条件下对热裂纹的敏感性,各国先后建立许多试验方法,这里介绍我国常用的几种方法:

(1) T形接头裂纹试验法(GB4675.3—84) 该试验方法主要用于评价焊缝的热裂纹倾向,也可以测定焊条及工艺参数对热裂纹的敏感性。

图1-5所示试件的拘束和试验焊缝均在船形位置施焊(图1-6)。拘束焊缝 S_1 焊完后,立即焊接试验焊缝 S_2 。拘束焊缝的焊缝厚度应大于试验焊缝厚度。 S_2 的焊接方向与 S_1 的方向相反。试验一般在室温下进行。试验焊条直径为4mm,焊接电流为该焊条规定的上限值。完全冷却后采用肉眼或其它适当方法检查有无裂纹,并测量裂纹的长度。如有裂纹,按下列公式计算裂纹率:

$$C_R = \frac{\Sigma L}{120} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 ΣL ——裂纹总长(mm);

C_R ——裂纹率(%)。

最终用裂纹长度和裂纹率评估焊接性。

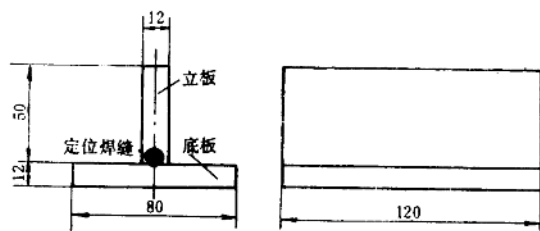


图1-5 试件尺寸和形状

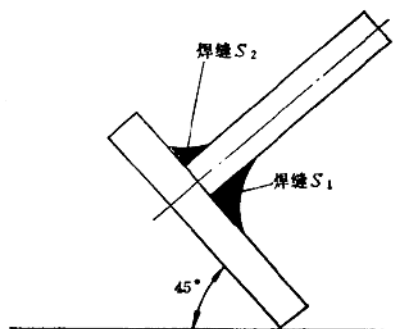


图1-6 试验焊缝的焊接位置

(2) 鱼骨状裂纹试验法 鱼骨状裂纹试验主要适用于测定铝合金、镁合金和钛合金的薄板(1~3mm)焊缝及热影响区的热裂纹敏感性。试件的形状和尺寸如图1-7所示。如图可见,试件上每10mm加工一不同深度的沟槽,造成了该试件沿长度方向的不同拘束度。显然,沟槽的深度越大,拘束度就越小。

试验采用钨极氩弧焊($I \approx 70 \sim 80A$, $v \approx 150 \sim 180mm/min$),在带有铜垫的专用夹具上施焊,焊接方向由A至B。裂纹发生后,随着拘束度的降低,裂纹将停止扩展,测量焊缝

或热影响区的裂纹长度(以5个试件的平均长度值确定),即可评定裂纹敏感性大小。

(3) 压板对接(FISCO)焊接裂纹试验(GB4675.4—84)—这种试验方法主要适用于评定低合金高强度钢、奥氏体不锈钢、铝合金的焊缝金属热裂纹敏感性。

试件的形状和尺寸如图1-8所示。试件的坡口形状为I形。厚板可用正Y形,坡口采用机械加工。

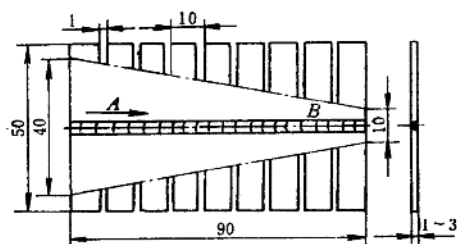


图1-7 鱼骨状裂纹试件

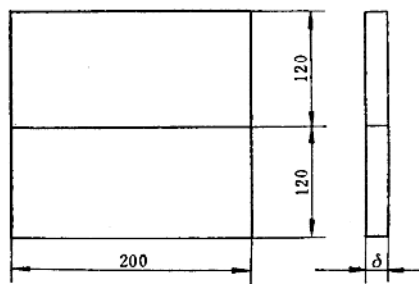


图1-8 试件形状和尺寸

焊前试件坡口附近表面要经打磨或机械加工,消除其氧化皮、铁锈、油污,将试件安装在图1-9所示的专门试验装置内。垂直方向用14个加固螺栓压紧压板,横向用4个螺栓定住,各以 $3 \times 10^5 \text{N}$ 和 $6 \times 10^5 \text{N}$ 的力把试件牢牢固定。为保证坡口间隙(在 $0 \sim 6 \text{mm}$ 范围内变化),按要求装入相应尺寸的塞片。把水平方向螺栓紧固后,再把垂直方向的螺栓用测力扳手以

$12000 \text{N} \cdot \text{cm}$ 的扭矩紧固好。按图1-10所示顺次焊接4条(长度 $L_0 \approx 40 \text{mm}$) 试验焊缝,试验所用焊接工艺参数按生产上要求确定。试验焊缝间距约 10mm ,弧坑原则上不必填满。

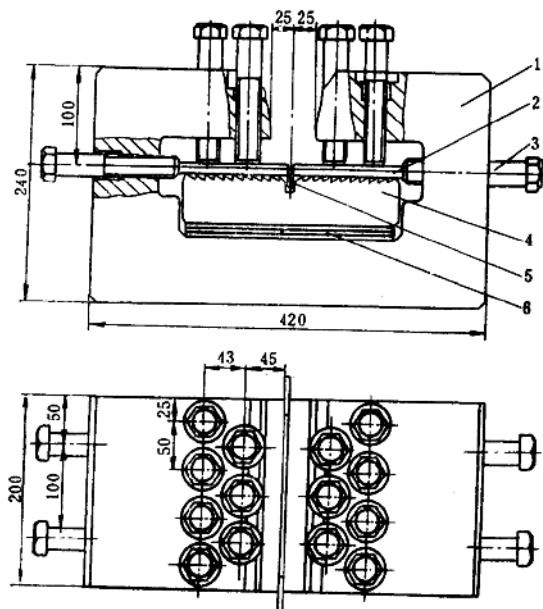


图1-9 试验装置

1—C型拘束框架 2—试件 3—紧固螺栓 4—齿形底座
5—定位塞片 6—调节板

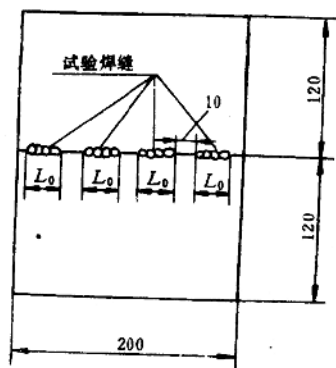


图1-10 试验焊缝位置

焊接后约10min将试件从装置上取出。待试件冷却至室温后将试件沿焊缝纵向弯断，视察断面上裂纹情况，并测量裂纹长度。

对4条焊缝的裂纹率可用下式计算：

$$C_R = \frac{\Sigma l_R}{\Sigma L_0} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 C_R ——FISCO试验的裂纹率(%)；

Σl_R ——4条试验焊缝的裂纹长度之和(mm)；

ΣL_0 ——4条试验焊缝长度之和(mm)。

(4) 可调拘束裂纹试验法 这种试验法主要用于研究各种类型的热裂纹。它的基本原理是利用在焊缝凝固后期施加不同的应变值，来研究裂纹产生的规律。当外加的应变值在某一温度区间超过焊缝金属或热影响区内塑性变形能力时，即产生裂纹。

可调拘束裂纹试验装置如图1-11所示，可以进行纵向试验，也可以进行横向试验。

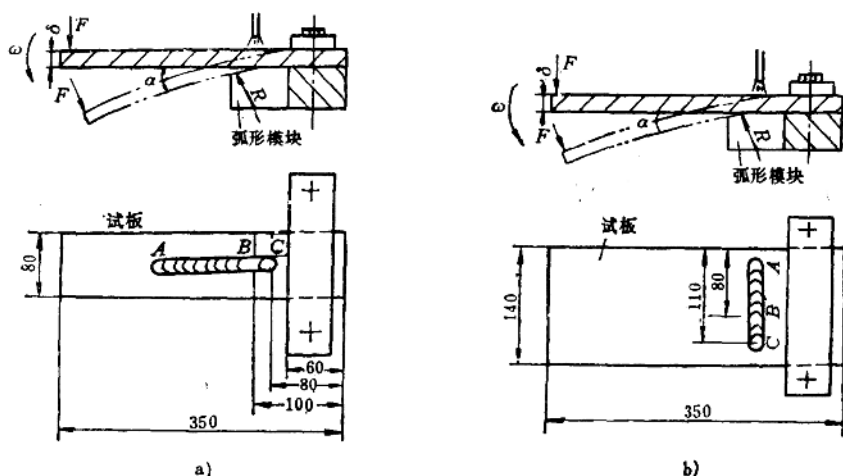


图1-11 可调拘束裂纹试验装置简图

a) 纵向试验法 b) 横向试验法

加载时是从试件单侧进行。为了保证试件变形速度的均匀性和试件承受应变量的准确性，采用了旋转式加载机构，也就是使加载压头始终垂直于试件表面。

可调拘束裂纹试验机具有快速和慢速变形两个功能。采用气液压联合作用的加载机构，其加载能力约为 $(5 \sim 10) \times 10^4 \text{N}$ 。

慢速变形时，采用支点弯曲的方式，应变量由加载压头下降距离 S 任意调节，应变速度约为 $(0.3 \sim 7.0) \% / \text{s}$ 。

$$S = R_0 \alpha \frac{\pi}{180} \quad (1-11)$$

式中 S ——加载压头下降的弧形位移(mm)；

R_0 ——加载压头的旋转半径(mm)；

α ——试板的弯曲角($^\circ$)。