



普通高等教育材料成型及
控制工程系列规划教材

金属焊接性基础

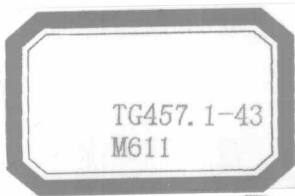
孟庆森	主 编
张柯柯	副主编
薛 锦	主 审

JINSHU HANJIEXING JICHU

7.1-43



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及
控制工程系列规划教材

金属焊接性基础

孟庆森 主 编
张柯柯 副主编
薛 锦 主 审

刘 洁 张红霞 梁志芳 参 编
王 宏 闫红彦 高 珊 王丽七

TG457.1-43
M611



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要论述常用金属工程材料的焊接性、焊接工艺要点及常用焊接材料、金属堆焊及表面改性技术的基本原理。全书共分8章,第1章金属焊接性基础;第2章碳钢及低合金钢的焊接;第3章耐热钢及不锈钢的焊接;第4章铜、镍及其合金的焊接;第5章钛及钛合金的焊接;第6章铝、镁及其合金的焊接;第7章铸铁的焊接;第8章堆焊及金属表面改性。各章都附有思考题和参考文献,以便于读者查阅、理解和掌握相关理论知识及工程实践的要点。

本书供高校材料成型及控制工程专业与大中型院校材料加工工程专业的大学生和研究生使用,也可供机械、造船等企业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属焊接性基础/孟庆森主编. —北京:化学工业出版社, 2010.5

(普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材)

ISBN 978-7-122-07947-3

I. 金… II. 孟… III. 金属材料-焊接-高等学校-教材 IV. TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第041520号

责任编辑:彭喜英

文字编辑:颜克俭

责任校对:吴静

装帧设计:周遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张14¼ 字数349千字 2010年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00元

版权所有 违者必究

序

材料成型及控制工程专业是1998年国家教育部进行专业调整时,在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业,其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”,以拓宽专业面,加强学科基础,培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同,也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如,一些研究型大学担负着精英教育的责任,以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主,学生毕业以后大部分攻读研究生,继续深造,因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任,以培养工程技术型、应用复合型人才为主,学生毕业以后大部分走向工作岗位,因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来;从人才市场来看,许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业学得少,而毕业后又不能接受继续教育,就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况,教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》,共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划,按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识,具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力,具有创新精神,能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作,综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向,强化专业基础,具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”,针对第三类培养方案,按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进,在传统知识的基础上,注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求,突出重点、难点,力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨,提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业知识扎实、工程实践能力和创新能力强、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李春峰

2010年4月

前 言

本教材作为焊接冶金学的组成部分,是《焊接冶金(基本原理)》课程的后续课程。本书的编写根据教育部材料成型与控制工程专业教学指导委员会制定的“材料成型及控制工程(焊接专业方向)培养方案”,结合各类本科院校和材料加工学科的课程设置要求和焊接专业优秀工程师的培养目标,注重教材的科学性和实用性。

在编写过程中编者力求从实际出发,加强基础知识和基本概念,并注重编入了有关新的金属材料的焊接性及其连接新技术、新标准的相关内容,其中部分内容是编者在近年的科学研究工作中所取得的研究成果。

全书共分8章。第1章介绍了有关金属材料焊接性及焊接冶金学的基础知识;第2~7章介绍了各类工程常用金属材料的焊接性及焊接工艺要点;第8章介绍了金属材料堆焊及表面改性技术的基本概念及工艺方法。为便于读者查阅资料,各章尽量附上常用的英文关键词及专业术语、常用焊接材料及工艺规范、主要参考文献等技术资料。每章都附有部分思考题,以便于读者正确理解和掌握本章的基本概念和对主要内容的复习和巩固。

第1章由河南科技大学张柯柯编写;第2章由华北科技学院梁志芳编写;第3章由太原理工大学孟庆森和太原科技大学刘洁编写;第4章和第6章分别由太原科技大学高珊和王宏编写;第5章由太原理工大学张红霞编写;第7章和第8章由河南理工大学阎红彦编写;孟庆森负责编写绪言和全书的统稿工作。安徽国防科技职业学院王丽七校对整理了全书的图、表和编辑了多媒体课件。全书经西安交通大学薛锦教授主审。

本书是各位参编者在多年的教学经验和科学研究成果的基础上编写的,部分内容属于科学技术前沿初步发展和尚待深入探讨的技术问题。由于编者水平所限,编写过程难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2010年1月于太原

目 录

第 1 章 金属焊接性基础	1	3.1.4 耐热钢的高温力学性能	93
1.1 金属焊接性及其试验方法	1	3.2 耐热钢的焊接	95
1.1.1 金属焊接性	1	3.2.1 珠光体耐热钢的焊接	95
1.1.2 焊接性试验	5	3.2.2 马氏体耐热钢的焊接	100
1.1.3 常用焊接性试验方法	6	3.2.3 T91/P91 钢的焊接性	101
1.2 焊缝金属的凝固及相变特征	12	3.2.4 TMCP 耐热钢的焊接性	101
1.2.1 焊缝金属的凝固	12	3.3 不锈钢的焊接	102
1.2.2 焊缝的相变组织	13	3.3.1 不锈钢的性能	102
1.3 焊接热影响区的组织与性能	15	3.3.2 铁素体不锈钢的焊接	103
1.3.1 焊接热循环	15	3.3.3 马氏体不锈钢的焊接	105
1.3.2 焊接热影响区的组织转变特点	16	3.3.4 奥氏体不锈钢的焊接	107
1.3.3 焊接热影响区的组织特征	17	3.3.5 铁素体+奥氏体双相不锈钢的 焊接	111
1.3.4 焊接热影响区的性能	18	3.4 珠光体钢与奥氏体不锈钢异种钢的 焊接	114
1.4 焊接接头的常见缺陷	20	3.4.1 异种钢焊接的主要问题	114
1.4.1 焊接裂纹	21	3.4.2 异种钢的焊接工艺要点	118
1.4.2 气孔及夹杂	22	思考题	120
思考题	24	参考文献	120
参考文献	24	第 4 章 铜、镍及其合金的焊接	122
第 2 章 碳钢及低合金钢的焊接	25	4.1 铜及铜合金的焊接	122
2.1 碳钢的焊接	25	4.1.1 铜及铜合金的分类、成分及 性能	122
2.1.1 碳钢的分类及焊接性	25	4.1.2 铜及铜合金的焊接性	124
2.1.2 低碳钢的焊接	26	4.1.3 紫铜及黄铜的焊接工艺要点	127
2.1.3 中碳钢的焊接	31	4.2 镍及镍合金的焊接	132
2.2 合金结构钢的焊接	33	4.2.1 镍及镍合金的分类、成分、性能 及用途	132
2.2.1 合金结构钢的种类	34	4.2.2 镍及镍合金的焊接性	134
2.2.2 热轧正火钢的焊接	36	4.2.3 镍及镍合金的焊接工艺	136
2.2.3 低碳调质钢的焊接	47	思考题	138
2.2.4 中碳调质钢的焊接	60	参考文献	138
2.2.5 微合金控轧钢的焊接	67	第 5 章 钛及钛合金的焊接	139
2.2.6 低温钢的焊接	76	5.1 钛及钛合金的分类与性能	139
2.2.7 耐候及耐蚀钢的焊接	83	5.1.1 工业纯钛	139
思考题	88	5.1.2 钛合金	139
参考文献	89	5.1.3 钛及钛合金的性能特点	143
第 3 章 耐热钢及不锈钢的焊接	90	5.2 钛及钛合金的焊接性	144
3.1 耐热钢的分类及特点	90		
3.1.1 按照高温性能的分类	90		
3.1.2 耐热钢的性能	91		
3.1.3 新一代耐热钢简介	92		

5.2.1 气体及杂质污染对焊接性能的影响	144
5.2.2 焊接热循环对接头性能的影响	146
5.2.3 焊接接头裂纹问题	146
5.2.4 焊缝中的气孔问题	147
5.3 钛及钛合金的焊接工艺要点	148
5.3.1 焊前准备	148
5.3.2 焊接使用夹具	148
5.3.3 焊接接头的焊后热处理	148
5.3.4 焊接材料	149
5.3.5 钛及钛合金的氩弧焊接工艺	150
5.3.6 钛及钛合金的真空电子束焊接	152
5.3.7 钛及钛合金的激光焊接	152
5.3.8 钛及钛合金的等离子弧焊接	153
5.3.9 钛及钛合金的扩散连接和扩散钎焊	154
思考题	156
参考文献	156
第6章 铝、镁及其合金的焊接	158
6.1 铝及铝合金的焊接	158
6.1.1 铝及铝合金的特性及分类	158
6.1.2 铝及铝合金的焊接性	163
6.1.3 铝及铝合金焊接方法及填充材料的选择	167
6.1.4 铝锂合金的焊接	174
6.2 镁及镁合金的焊接	175
6.2.1 镁及镁合金的特性及分类	175
6.2.2 镁及镁合金的焊接性	180
6.2.3 焊接方法及填充材料的选择	183
思考题	186
参考文献	186

第7章 铸铁焊接	188
7.1 铸铁的种类及性能	188
7.2 铸铁焊接性分析	190
7.2.1 灰铸铁焊接性分析	190
7.2.2 球墨铸铁焊接性特点	195
7.3 铸铁焊接方法、工艺及焊接材料	196
7.3.1 灰铸铁的焊接	196
7.3.2 球墨铸铁的焊接	200
7.3.3 其他铸铁的焊接	201
思考题	202
参考文献	202
第8章 堆焊及金属表面改性	203
8.1 堆焊合金	203
8.1.1 工作条件对堆焊层使用性能的要求	203
8.1.2 堆焊合金的类型、焊接性特点和选用	204
8.2 常用堆焊方法及工艺特点	213
8.2.1 焊条电弧堆焊	213
8.2.2 氧-乙炔火焰堆焊	214
8.2.3 埋弧堆焊	214
8.2.4 气体保护和自保护电弧堆焊	214
8.2.5 等离子弧堆焊	215
8.3 金属表面改性技术	215
8.3.1 热喷涂	215
8.3.2 喷熔	217
8.3.3 熔结	218
思考题	218
参考文献	218

第 1 章 金属焊接性基础

金属材料在焊接时要经受加热、熔化、化学反应、结晶、冷却、固态相变等一系列复杂的过程,这些过程又都是在温度、成分及应力极不平衡的特定条件下发生的,有时可能在焊接区造成缺陷,或者使金属的性能下降而不能满足使用的要求。金属本身的物理性能、化学性能和力学性能,都不足以直接说明它在焊接时可能出现什么问题或焊后能否满足使用要求。为了从焊接的角度分析研究金属的某些特定的性能,人们就提出了所谓焊接性(weldability)的问题。深入地了解焊接接头的组织与性能以及焊接缺陷的特点,将有助于分析金属材料的焊接性。

1.1 金属焊接性及其试验方法

1.1.1 金属焊接性

1.1.1.1 金属焊接性的概念

金属焊接性就是金属是否能适应焊接加工而形成完整的、具备一定使用性能的焊接接头的特性。金属焊接性的概念有两方面内容:一是金属在焊接加工中是否容易形成缺陷;二是焊成的接头在一定的使用条件下可靠运行的能力。这也说明,焊接性不仅包括结合性能,而且包括结合后的使用性能。简而言之,焊接性就是指金属材料“好焊不好焊”以及焊成的接头“好用不好用”。

焊接性是金属本身固有的性能,焊接工艺条件对其有重要影响,分析焊接性不能完全脱离工艺条件。因此,焊接性又可分成工艺焊接性和使用焊接性。工艺焊接性是指在一定焊接工艺条件下,获得优质、无缺陷的焊接接头的能力。工艺焊接性是可以比较的,如果一种金属材料可以在很简单的工艺条件下焊接而获得完好的接头且能够满足使用要求,就可以说其焊接性良好;反之,则焊接性较差。使用焊接性是指焊接接头满足某种使用性能的能力,通常包括常规的力学性能、低温韧性、抗脆断性能、高温蠕变、疲劳性能、持久强度以及抗腐蚀性和耐磨性等指标。

1.1.1.2 影响焊接性的因素

焊接性是金属材料对焊接加工的适应能力,既受材料本身的性质影响,也与焊接工艺条件和使用条件有关。因此,影响焊接性的因素包括材料因素、工艺因素、结构因素和服役条件。

(1) 材料因素 材料因素不仅包括被焊母材本身,而且包括所使用的焊接材料,如焊条电弧焊时的焊条、埋弧焊时的焊丝和焊剂、气体保护焊时的保护气体等。母材和焊接材料在焊接过程中直接参与熔池或熔合区的冶金反应,对焊接性和焊接质量有重要影响。如果焊接材料和母材匹配不当,则可能引起焊接区内的气孔、裂纹等缺陷,或者造成脆化、软化及耐蚀、耐磨等性能的变化,因此必须对材料因素予以充分重视。

(2) 工艺因素 对于同一种母材,采用不同的焊接方法和工艺措施,所表现出来的焊接

性有很大的差异。焊接方法对工艺焊接性的影响主要有两个方面：一方面是焊接热源的特点，如能量密度大小、温度以及热量输入等，它们可以直接改变焊接热循环的各项参数，如峰值温度、高温停留时间及相变温度区间的冷却速度等；另一方面是对熔池和接头附近区域的保护，如熔渣保护、气体保护、渣-气联合保护或真空保护等，这些都将影响焊接冶金过程。焊接热过程和焊接冶金过程直接决定接头的质量和性能。工艺措施对防止焊接缺陷、提高接头使用性能有着重要的作用，如焊前预热、缓冷、焊后热处理等。这些措施对防止热影响区淬硬变脆、减小焊接应力、避免裂纹等是较为有效的。

(3) 结构因素 结构因素主要是指焊接结构形状、尺寸、厚度以及接头坡口形式和焊缝布置等。不同板厚、不同接头形式或坡口形状的焊件传热方向和传热速度不一样，从而对熔池结晶方向和晶粒成长有影响。焊接结构的形状、板厚和焊缝的布置决定接头的刚度和拘束度，对接头的应力状态产生影响。在设计焊接结构过程中，尽量避免接头缺口、截面突变、堆高过大、交叉焊缝等。这样可以减少焊接应力集中和焊接裂纹，改善材料的焊接性。

(4) 服役条件 服役条件指工件的工作温度、负载条件和工作介质等。一定的工作环境和运行条件要求焊接结构具有相应的使用性能。例如，在低温条件下工作的焊接结构必须具备抗脆性断裂性能，在高温条件下工作的焊接结构要具备抗蠕变性能，在交变载荷下工作的焊接结构具有良好的抗疲劳性能，在一定腐蚀介质中工作的焊接容器应具备抗腐蚀性能等。服役条件越苛刻，对接头质量的要求就越高，焊接性就越不易得到保证。

1.1.1.3 焊接性的分析方法

确定金属的焊接性，除直接采用焊接试验的方法之外，还可以通过分析金属的化学成分、物理化学特性、相图特点、CCT 图（连续冷却曲线）或 SHCCT 图（模拟焊接热影响区的连续冷却曲线）、热处理状态、焊接工艺条件、保护方式和工艺措施等，间接地评价金属的焊接性。

(1) 从金属的特性分析焊接性

① 利用化学成分分析。

a. 碳当量法（carbon equivalent）。钢材的化学成分对焊接热影响区的淬硬和冷裂倾向有直接影响，因此可以用化学成分来分析其冷裂纹敏感性。在各种元素中，碳对淬硬和冷裂纹的影响最为显著。因而，人们就将各种元素的作用按照相当于若干含碳量折合并叠加起来求得所谓的碳当量（CE 或 C_{eq} ），并以此来评估冷裂倾向的大小。低合金钢的淬硬及冷裂纹敏感性常用碳当量法来估计。

国际焊接学会（IIW）推荐：

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

式（1-1）适用于中、高强度的非调质低合金高强钢。 $CE \leq 0.45\%$ 时，焊接厚度小于 25mm 的板可以不预热； $CE \leq 0.41\%$ 且含 $C < 0.207\%$ 时，焊接厚度小于 37mm 的板可以不预热。

日本的 JIS 和 WES 推荐：

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

式（1-2）适用于低合金调质钢，其化学成分范围： $C \leq 0.2\%$ 或 0.18% ； $Si \leq 0.55\%$ ； $Mn \leq 1.5\%$ ； $Cu \leq 0.5\%$ ； $Ni \leq 2.5\%$ ； $Cr \leq 1.25\%$ ； $Mo \leq 0.7\%$ ； $V \leq 0.1\%$ ； $B \leq$

0.006%。当板厚小于 25mm, 手弧焊线能量 17kJ/cm 时, 预热范围大致如下:

钢材 $\sigma_b=500\text{MPa}$, $C_{eq}=0.46\%$ 时, 可不预热;

钢材 $\sigma_b=600\text{MPa}$, $C_{eq}=0.52\%$ 时, 预热 75°C ;

钢材 $\sigma_b=700\text{MPa}$, $C_{eq}=0.52\%$ 时, 预热 100°C ;

钢材 $\sigma_b=800\text{MPa}$, $C_{eq}=0.62\%$ 时, 预热 100°C 。

美国焊接学会 (AWS) 推荐:

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

式 (1-3) 适用化学成分范围为: $C\leq 0.6\%$; $\text{Mn}\leq 1.6\%$; $\text{Ni}\leq 3.3\%$; $\text{Cr}\leq 1.0\%$; $\text{Mo}\leq 0.6\%$; $\text{Cu} 0.5\%\sim 1.0\%$; $\text{P} 0.05\%\sim 0.15\%$ 。当 $\text{Cu}<0.5\%$ 或 $\text{P}<0.05\%$ 时, 不可计入。

b. 焊接冷裂纹敏感指数。合金结构钢焊接时产生冷裂纹的原因除化学成分外, 还与焊缝含氢量和接头拘束度等密切相关。日本学者采用 Y 形坡口 “小铁研试验” 对 200 多种不同成分钢材、不同厚度及不同的焊缝含氢量进行试验, 求得焊接冷裂纹敏感指数 P_c :

$$P_c=C+\frac{\text{Si}}{30}+\frac{\text{Mn}}{20}+\frac{\text{Cu}}{20}+\frac{\text{Ni}}{60}+\frac{\text{Cr}}{20}+\frac{\text{Mo}}{15}+\frac{\text{V}}{10}+5\text{B}+\frac{\delta}{600}+\frac{H}{60} \quad (\%) \quad (1-4)$$

此式子适用条件: $C 0.07\%\sim 0.22\%$; $\text{Si}\leq 0.60\%$; $\text{Mn} 0.40\%\sim 1.40\%$; $\text{Cu}\leq 0.50\%$; $\text{Ni}\leq 1.20\%$; $\text{Cr}\leq 1.20\%$; $\text{Mo}\leq 0.70\%$; $\text{V}\leq 0.12\%$; $\text{Nb}\leq 0.04\%$; $\text{Ti}\leq 0.05\%$; $\text{B}\leq 0.005\%$; 板厚 $\delta=19\sim 50\text{mm}$; 扩散氢含量 $H=1.0\sim 5.0\text{mL}/100\text{g}$ (GB 3965—83 测氢法)。

求得 P_c 后, 利用式 (1-5) 即可求出斜 Y 形坡口对接裂纹试验条件下, 为防止冷裂所需要的最低预热温度 T_0 ($^\circ\text{C}$):

$$T_0=1440P_c-392 \quad (1-5)$$

c. 焊接热影响区最高硬度法。根据焊接接头焊接热影响区的最高硬度 ($H_{\max}$) 可以相对地评价被焊钢材的淬硬倾向和冷裂纹敏感性。此方法简单易行, 已被国际焊接学会 (IIW) 推荐采用。我国也制定了焊接热影响区最高硬度试验方法标准 (GB/T 4675.5—1984)。其焊接热影响区硬度测试标准为: 试样的标准厚度为 20mm, 长度为 200mm, 宽度为 150mm; 采用焊条直径 4mm, 焊接电流 $(170\pm 10)\text{A}$, 焊接速度 $(0.25\pm 0.02)\text{cm/s}$, 沿轧制试样表面的宽度中心线方向焊长度 $(125\pm 10)\text{mm}$ 的焊缝; 焊后自然冷却 12h, 垂直切割焊缝中部, 在断面上截取硬度测试试样并测量其硬度。一般的焊接结构钢均有其热影响区允许的最高硬度值。通过测试比较, 就可间接评测钢材的焊接性。

② 利用物理、化学性能分析。金属的熔点、热导率、线膨胀系数、密度、热容量等因素, 都会对焊接热循环、熔化、结晶、相变等过程产生影响, 从而影响材料的焊接性。例如, 纯铜的热导率高, 焊接时热量散失迅速, 坡口不易熔化, 焊接热功率不足时会产生未熔透缺陷; 不锈钢与钛的热导率低, 焊接温度梯度大, 残余应力高、变形大, 当高温停留时间长时热影响区晶粒粗大, 对接头性能不利; 金属密度小的铝及铝合金, 熔池中的气泡和非金属夹杂不易上浮逸出, 会导致焊缝气孔和夹渣缺陷。

与氧的亲合力较强的金属 (如铝、钛及其合金) 在焊接高温下极易氧化, 因而需要采取较可靠的保护方法。例如, 钛化学活泼性较强, 对氧、氮、氢等气体元素很敏感, 所以在焊接时要严格控制氧、氮、氢对焊缝和热影响区的污染。

③ 利用合金相图分析。大多数被焊材料都是合金，或至少含有某些杂质元素，因而可以利用它们的相图分析焊接性。如在共晶型相图中，固相线与液相线之间的温度区间大小会影响结晶过程的成分偏析，影响生成低熔点共晶的程度，也影响脆性温度区间的大小，这对分析热裂倾向是重要的参考依据。另外，若结晶凝固时形成单相组织，则焊缝晶粒易于粗大，也是形成热裂纹的重要因素。

④ 利用 CCT 图或 SHCCT 图分析。对于各类低合金钢，可以利用其各自的连续冷却曲线（CCT 图）和模拟焊接热影响区的连续冷却曲线（SHCCT 图）进行焊接性的分析。利用这些曲线（图 1-1），可以大体上说明在不同的热循环条件下获得什么样的组织和硬度，可以估计裂纹发生的危险性，以便确定合适的焊接工艺条件。

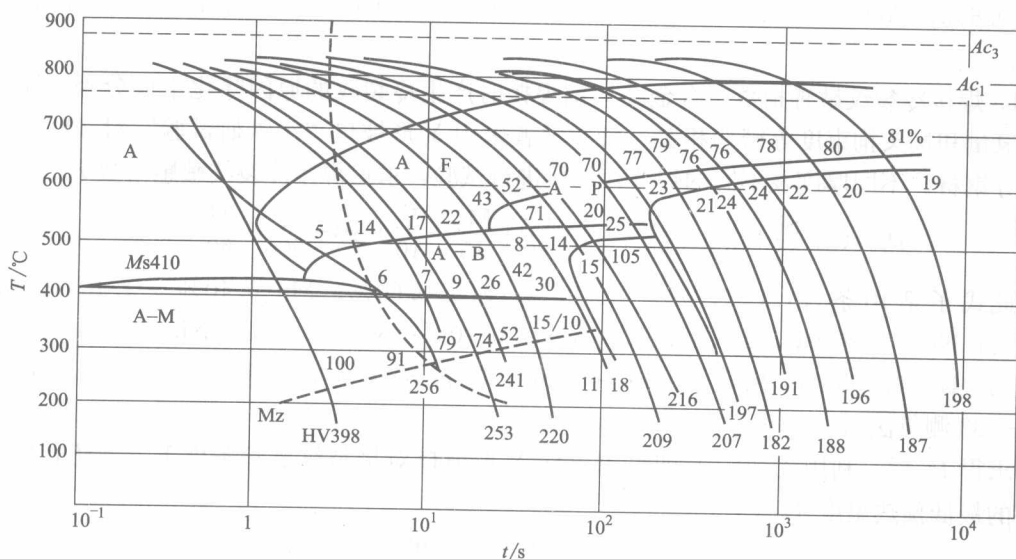


图 1-1 16Mn 钢的连续冷却曲线（虚线表示厚板手弧焊时的冷却速度）

除上述各项之外，金属焊前的热处理状态也是分析焊接性时需要考虑的因素。

(2) 从焊接工艺条件分析焊接性 工艺条件主要包含热源特点、保护方法、热循环控制及其他的一些工艺因素。它们均在不同程度上影响金属材料的焊接性。

① 热源特点。各种焊接方法所采用的热源在功率、能量密度、最高加热温度等方面有很大的差别，从而影响焊接质量，使金属在不同的工艺条件下显示出不同的焊接性。例如，电渣焊功率大，但能量密度低、最高加热温度也不高、高温停留时间长，使得热影响区晶粒粗大，冲击韧度显著降低；相反，激光焊功率虽然不大，但能量密度很高，加热迅速，高温停留时间短，热影响区极窄，没有晶粒长大的危险。

② 保护方法。熔焊时，对熔池和热影响区金属的保护方法有渣保护、气保护和真空保护等几种，分别适用于不同的金属和合金。保护方法选择是否恰当也会影响金属焊接性的效果。通常钢铁焊接时多用渣为主的保护，如手弧焊、埋弧焊等；有时也采用气保护，如 CO_2 保护焊、氩弧焊等。对铝、镁、钛等活泼的合金，则多采用惰性气体保护。

③ 热循环控制。除正确选择焊接工艺规范控制焊接热循环外，预热、缓冷、层间温度等工艺措施也都能调整焊接效果，可不同程度地改变金属的焊接性。

④ 其他工艺因素。为改善焊接性，防止各类缺陷的发生，还要对工艺因素的其他环节予以足够的重视。如焊前清理、焊接材料的处理、焊接顺序和焊接规范等。

1.1.2 焊接性试验

1.1.2.1 焊接性试验的内容

针对材料的不同性能特点和使用要求,焊接性试验的内容有以下几种。

(1) 焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力 熔池金属结晶时,由于存在一些有害元素(如低熔点的共晶物)并受热应力的作用,就可能在结晶末期发生热裂纹。热裂纹是一种经常发生又是危害严重的缺陷,所以焊缝抵抗产生热裂纹的能力就是焊接性的一项重要内容,通常是通过热裂纹试验来进行的。热裂纹试验与焊接材料关系密切,母材也有一定影响。

(2) 焊缝及热影响区金属抵抗产生冷裂纹的能力 焊缝及热影响区金属在焊接热循环作用下,由于组织及性能变化,加之受焊接应力和扩散氢的影响,可能发生冷裂纹。冷裂纹在低合金高强钢焊接中较为常见,而且是一种严重缺陷,是焊接性试验中很重要又最常用到的一项试验内容。冷裂纹试验是针对母材进行的试验。

(3) 焊接接头抗脆性转变能力 经过焊接冶金反应、热循环、结晶、固态相变等一系列过程,焊接接头由于受脆性组织、硬脆的非金属夹杂物、时效脆化、冷作硬化等的作用,可能导致接头韧性严重下降,发生所谓的焊接接头脆性转变。对于在低温下工作的焊接结构和承受冲击载荷的焊接结构,韧性损失是个严重的问题。因此,焊接接头抗脆性转变能力也是焊接性试验常常涉及的一项内容。

(4) 焊接接头的使用性能 焊接结构的不同使用性能会对焊接性提出许多不同的要求,所以有很多焊接性试验项目是从使用性能角度出发制定的,即根据特定的使用条件制定专门的焊接性试验方法。属于这方面的试验内容如:焊接接头耐放射性辐照的能力、蠕变强度、疲劳强度、抗晶间腐蚀能力等。此外,还有一些针对具体特定结构的专门试验方法。

1.1.2.2 焊接性试验方法分类

评定焊接性的方法多种多样,按照其特点可以归纳为以下几类。

(1) 直接模拟试验 这类焊接性评定方法一般是仿照实际焊接的条件,通过焊接过程观察是否发生某种焊接缺陷或发生缺陷的程度,直观地评价焊接性的优劣。主要包括:焊接冷裂纹试验、焊接热裂纹试验、再热裂纹试验、层状撕裂试验、应力腐蚀裂纹试验和脆性断裂试验。

(2) 间接推算 这类焊接性评定方法一般不需要焊出焊缝,而只是根据材料的化学成分、金相组织、力学性能之间的关系,联系焊接热循环过程进行推测或评估,从而确定焊接性优劣以及所需要的焊接条件。主要包括:碳当量法、焊接裂纹敏感指数法、连续冷却组织转变曲线法、焊接热-应力模拟法、焊接热影响区最高硬度法及焊接区断口金相分析等。

(3) 使用性能试验 这类焊接性评定方法最直观,它是将施焊的接头甚至产品在使用条件下进行各方面性能的试验,以试验结果来评定其焊接性。属于这一类的方法主要有:焊缝及接头的拉伸、弯曲、冲击等力学性能试验、高温蠕变及持久强度试验、断裂韧性试验、低温脆性试验、耐腐蚀及耐磨试验、疲劳试验等。直接用产品做的试验有水压试验、爆破试验等。

1.1.2.3 选择或制定试验方法的原则

现有的焊接性试验方法已经有许多种,且随着技术的发展、要求的提高,焊接性试验方法还会不断增多。选择制定焊接性试验方法时必须符合下述原则。

(1) 针对性 焊接性试验的条件要尽量与实际焊接时的条件相一致。这些条件包括母

材、焊接材料、接头形式、环境温度、接头受力状态、焊接工艺参数等，而且试验条件还应该考虑到产品的使用条件，尽量使之接近。

(2) 再现性 焊接性试验的结果要稳定可靠，具有较好的再现性。试验所得数据不可过于分散，只有这样才能正确显示变化规律，获得能够指导生产实践的结论。为此，试验方法应尽可能减少或避免人为因素的影响，多采用自动化、机械化的操作，少采用人工操作。另外，应将试验条件规定得严格些，防止随意性。

(3) 经济性 在符合上述原则获得可靠试验结果的前提下，要力求减少材料消耗，避免复杂昂贵的加工工序，节省试验费用。

1.1.3 常用焊接性试验方法

焊接性试验的内容和方法多种多样，这里只举出最常用的几种冷裂纹试验和热裂纹试验为例，其他方法简单介绍。

1.1.3.1 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验法

此法 (Y-slit type cracking test) 主要用于评定碳钢和低合金高强钢焊接热影响区对冷裂纹的敏感性，通常又称为“小铁研”试验，在生产实际中广泛应用。

斜 Y 形坡口焊接裂纹试验用试件的形状及尺寸如图 1-2 所示。被焊钢材厚度 δ 为 9~38mm；坡口经机械加工，焊条使用前应严格烘干。焊接工艺参数为：焊条直径 4mm，焊接电流 (170 ± 10) A，焊接电压 (24 ± 2) V，焊接速度 (150 ± 10) mm/min。拘束焊缝为双面焊接，应事先焊好，注意防止角变形和未焊透。试验焊缝采用手弧焊和自动送进焊条电弧焊时应分别按照图 1-3 中 (a) 和 (b) 所示进行。

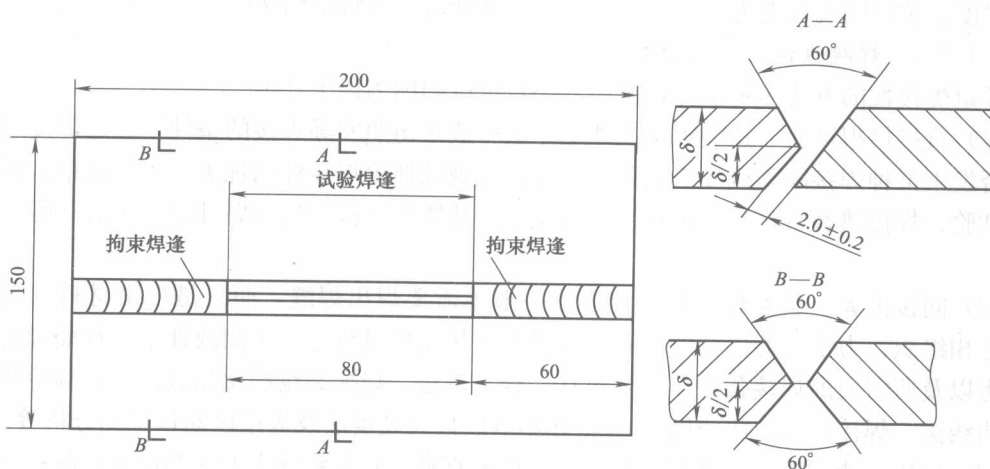


图 1-2 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验用试件的形状及尺寸

试验焊缝可在不同的温度下施焊，焊后静置 24h 后，截取试样解剖并检测裂纹。沿焊缝长度方向均匀截取试样，检查其中 5 个断面的裂纹情况。根据式 (1-6)~式 (1-8) 计算裂纹率：

$$\text{表面裂纹率} \quad C_f = \frac{\sum l_{cf}}{l_c} \times 100\% \quad (1-6)$$

$$\text{根部裂纹率} \quad C_r = \frac{\sum l_{cr}}{l_c} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$\text{断面裂纹率} \quad C_s = \frac{\sum h_s}{\sum h} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 Σl_{cf} ——表面裂纹长度之和, mm;
 l_c ——试验焊缝长度, mm;
 Σl_{cr} ——根部裂纹长度之和, mm;
 Σh_s ——5 个断面上裂纹深度之和, mm;
 Σh ——5 个断面焊缝最小厚度之和, mm。

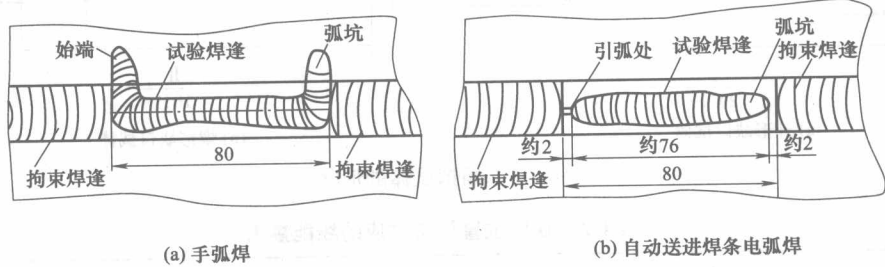


图 1-3 试验焊缝的焊接方式

由于斜 Y 形坡口对接裂纹试验的接头拘束度很大, 焊缝根部尖角应力集中, 试验条件相对比较苛刻, 冷裂纹敏感性很大。所以, 一般认为在这种试验中若表面裂纹率不超过 20%, 用于一般焊接结构生产是安全的。

除上述斜 Y 形坡口之外, 还有一种直 Y 形坡口的试验方法, 主要用于考核焊缝金属的裂纹敏感性。其试验程序与斜 Y 形坡口相同。

1.1.3.2 插销试验

插销试验 (implant test) 是测定钢材焊接热影响区冷裂纹敏感性的一种定量试验方法。附加其他装置, 也可用于测定再热裂纹和层状撕裂敏感性。因为插销试验消耗钢材很少, 试验结果稳定可靠, 在国内外都有着广泛的应用。

插销试验 (图 1-4) 是将被焊钢材加工成圆柱形的插销试棒。试棒插入底板上的孔中, 试棒上端与底板表面平齐。插销试棒上端附近有环形或螺形缺口。试验时在底板上以规定的线能量熔敷一条焊道, 其中心线通过试棒的中心, 其熔深应使缺口尖端位于热影响区的粗晶区内。

插销试棒具体形状、尺寸如图 1-5 及表 1-1 所列, 缺口位置见表 1-2 所列。底板材料应与被焊钢材相同或热物理常数基本一致, 其形状及尺寸如图 1-6 所示。

表 1-1 插销试棒的尺寸

缺口类别	A/mm	h/mm	$\theta/(^{\circ})$	R/mm	P/mm	l/mm
环形	8	0.5 ± 0.05	40 ± 2	0.1 ± 0.02	—	大于底板的厚度, 一般约为 30~150
螺形					1	
环形	6	0.5 ± 0.05	40 ± 2	0.1 ± 0.02	—	
螺形					1	

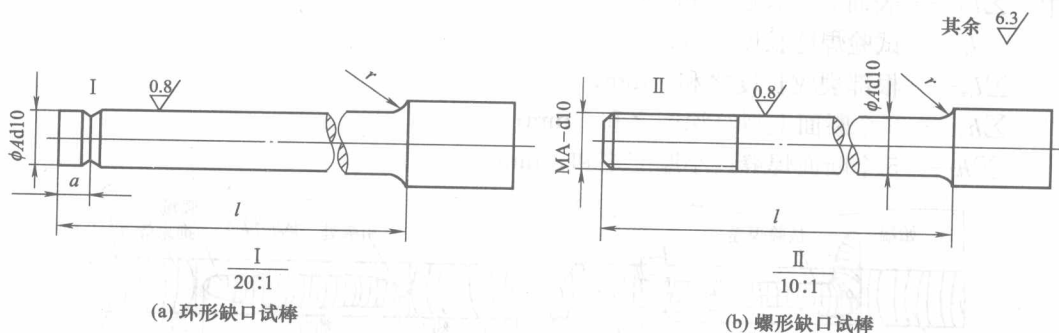


图 1-5 插销试棒的形状

表 1-2 缺口位置与所对应的线能量 E

a/mm	1.35	1.45	1.85	2	2.1	2.4
$E/(\text{kJ}/\text{cm})$	9	10	13	15	16	20

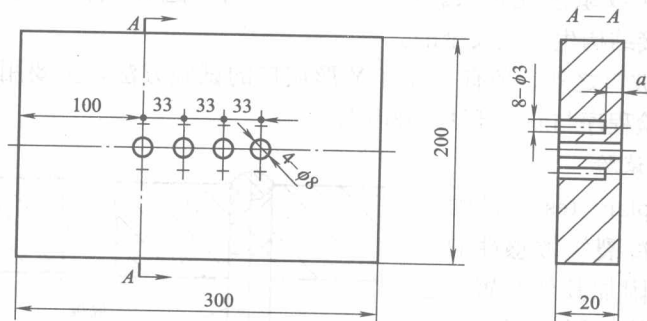


图 1-6 底板形状及尺寸

施焊时应测定 $t_{8/5}$ 值。如不预热，焊后冷却至 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 时加载；如有预热，应在高于预热温度 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 时加载。载荷应在 1min 之内，且在冷却至 100°C 或高于预热温度 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 之前施加完毕。如有后热，应在后热之前加载。

在无预热的条件下，载荷保持 16h 而试棒未断裂即可卸载。如有预热条件下，载荷保持至少 24h 才可卸载。经多次改变载荷，即可求出在试验条件下不出现断裂的临界应力 σ_{cr} 。临界应力 σ_{cr} 可以用启裂准则，也可以用断裂准则，但应加以注明。 σ_{cr} 的大小，即可相对比较材料抵抗产生冷裂纹的能力。

1.1.3.3 压板 (FISCO) 对接焊接裂纹试验法

此法 (GB 4675.4—84) 主要用于评定低合金钢焊缝金属的热裂纹敏感性，也可以做钢材与焊条匹配性的试验。

试验装置如图 1-7 所示。在 C 形夹具中，垂直方向用 14 个紧固螺栓以 $3\times 10^5\text{N}$ 的力压紧试板，横向用 4 个螺栓以 $6\times 10^4\text{N}$ 的力定位，使试板牢牢固定在试验装置内。试板尺寸如图 1-8 所示。坡口为 I 形，厚板时也可以采用 Y 形坡口。

试板在试验装置内安装时用定位塞片 5 来保证坡口间隙 (变化范围为 $0\sim 6\text{mm}$)。先将横向螺栓紧固，再将垂直方向上的螺栓用测力扳手以 $12000\text{N}\cdot\text{cm}$ 的扭矩紧固。然后按生产上使用的工艺参数依次焊接 4 条约 40mm 长的焊缝，间距约为 10mm，弧坑不必填满，如图

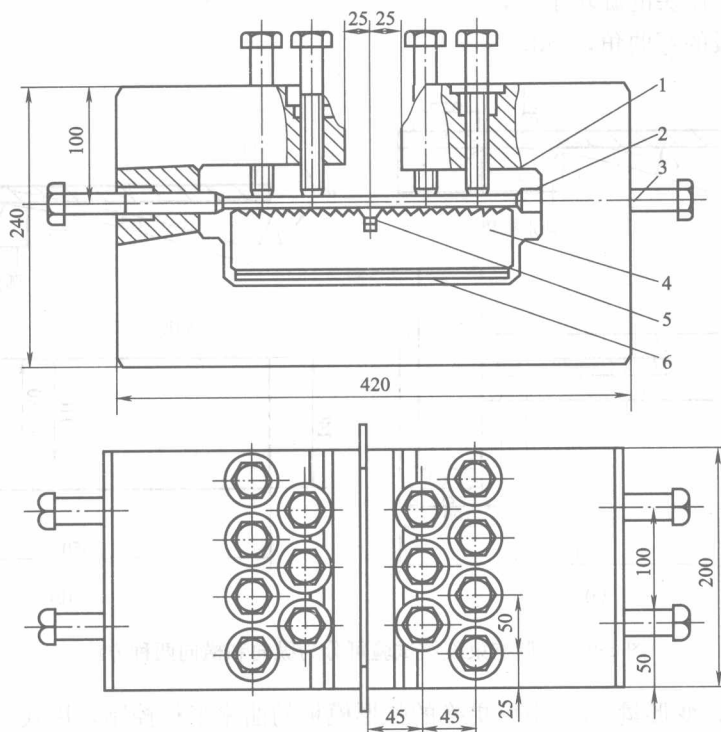


图 1-7 压板对接 (FISCO) 实验装置

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

1-8 所示。焊后经过 10min 取下试板，待冷却至室温后将试板沿焊缝纵向弯断，观察是否有裂纹产生，并测量裂纹长度。裂纹率按式 (1-9) 计算：

$$C_F = \frac{\sum l_F}{\sum L_F} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 C_F ——FISCO 试验的裂纹率，%；

$\sum l_F$ ——4 条试验焊缝上裂纹长度之和，mm；

$\sum L_F$ ——4 条焊缝长度之和，mm。

1.1.3.4 可调拘束裂纹试验

可调拘束裂纹试验 (varestraint test) 主要用于评定低合金钢的热裂纹 (结晶裂纹、液化裂纹等) 敏感性。其基本原理是在焊缝凝固后期施加不同的应变值，研究产生裂纹的规律。当外加的应变值在某一温度下超过焊缝或热影响区金属的塑性变形能力时，就会产生热裂纹，以此来评定产生焊接热裂纹的敏感性。可调拘束裂纹试验可分为纵向和横向两种方法，如图 1-9 所示，加载变形有快速和慢速两种形式。

慢速变形时，采用支点弯曲的方式，应变由压头下降的弧形距离 S 控制，其应变速度约为 $0.3\% \sim 0.7\%/s$ 。

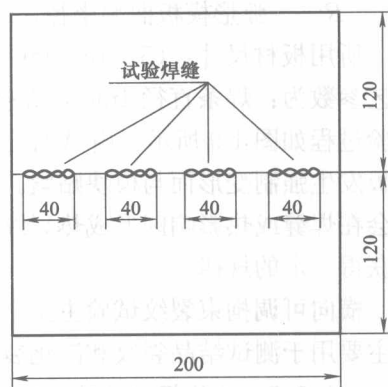


图 1-8 FISCO 试验试板尺寸及焊缝位置

$$S = R_0 \alpha \frac{\pi}{180} \quad (1-10)$$

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, rad。

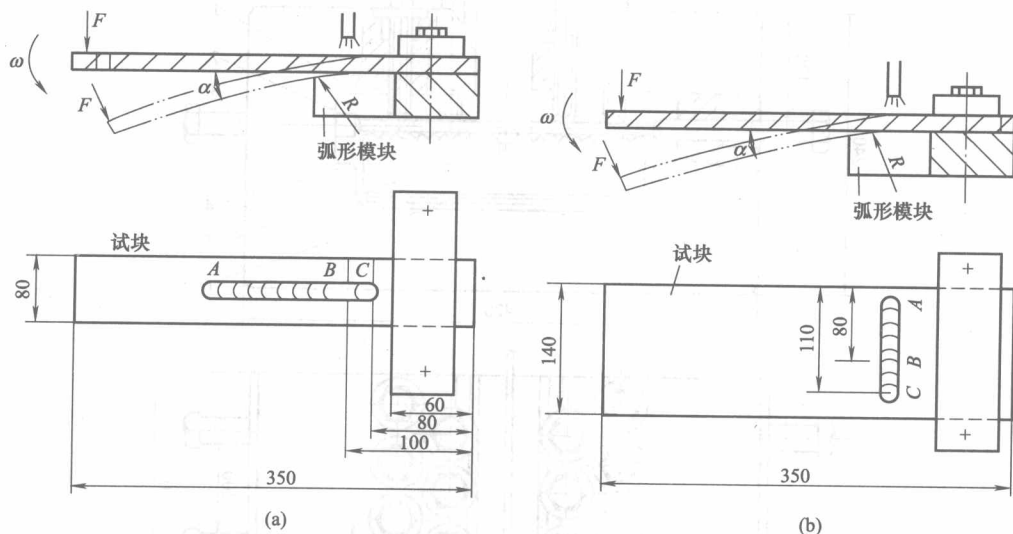


图 1-9 可调拘束裂纹试验可分为纵向和横向两种方法

快速变形时, 变形量 (ϵ) 由可更换的弧形模板的曲率半径控制, 用式 (1-11) 计算:

$$\epsilon = \frac{\delta}{2R} \times 100 \quad (\%) \quad (1-11)$$

式中 δ ——试板厚度, mm;

R ——弧形模板曲率半径, mm。

所用板材尺寸: (5~16)mm × (50~80)mm × (300~350)mm。焊条焊前需烘干, 焊接工艺参数为: 焊条直径 4mm, 焊接电流 170A, 焊接电压 24~26V, 焊接速度 150mm/min。试验过程如图 1-9 所示: 由 A 焊至 C 点后熄弧, 焊至 B 点时加载压头突然加力 F 下压, 使试板发生强制变形而与模块贴紧。变更模块的 R 既可变更应变变量 ϵ , 当 ϵ 达到一定数值后, 就会在焊缝或热影响区形成热裂纹。热裂纹的数目及长度总和随着 ϵ 的增大而增加, 从而可以获得一定的规律。

横向可调拘束裂纹试验主要用于测试结晶裂纹和高温失塑裂纹; 纵向可调拘束裂纹试验则主要用于测试结晶裂纹和液化裂纹。

1.1.3.5 其他焊接试验方法简介

抗裂性试验除了上述几种主要方法外还有许多种, 这里仅简要介绍其中的几种。

(1) 拉伸拘束裂纹试验 (TRC, tensile restraint cracking test) 此法的基本原理是模拟焊接接头承受的平均拘束应力, 在一定坡口形状和一定尺寸的试板间施焊后, 冷却至规定温度, 在焊缝横向施加一个恒定载荷直至发生启裂或断裂。调整载荷, 可以求得加载 24h 而不发生开裂的临界应力, 用此应力大小值来评定冷裂纹的敏感性。此法设备大而复杂, 实验结果常与插销试验一致。

(2) 刚性拘束裂纹试验 (RRC, rigid restraint cracking test) 此法的基本原理是模拟焊接接头承受的外部拘束, 评定由于接头冷却时金属收缩产生的应力而引起的裂纹。其原理