

普通高等教育机电类规划教材

# 焊接冶金学

(金属焊接性)

吉林工业大学 周振丰 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

# 焊接冶金学

(金属焊接性)

主编 周振丰  
参编 包芳涵 任家烈  
      陈伯鑫 彭高峨  
主审 陈忠孝



机械工业出版社

本书是根据全国高等学校焊接专业教学指导委员会的决定，将原《焊接冶金与金属焊接性》教材名称改为《焊接冶金学》，并以基本原理部分、金属焊接性部分两本教材出版。

本教材《焊接冶金学(金属焊接性)》主要内容：各种合金钢、有色金属、铸铁及堆焊合金的焊接性分析；焊接（堆焊）材料的选择与焊接工艺要点的论述；对金属焊接性及其试验方法也作了扼要地阐述。

本书主要供高等学校焊接专业的教学用书，也可作为从事焊接专业工作的工程技术人员学习的主要参考书。

## 焊接冶金学

(金属焊接性)

吉林工业大学 周振丰 主编

责任编辑：董连仁 版式设计：冉晓华  
封面设计：郭景云 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·新华书店经售

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 12<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·字数 296千字

1995年10月第1版 第1次印刷

印数 0 001—4 500 定价：8.70元

ISBN 7-111-04665-X/TG·969(课)

## 前 言

根据1991年全国高等学校焊接专业教学指导委员会会议讨论精神,决定将原《焊接冶金与金属焊接性》课程教材的名称改为《焊接冶金学》,并确定以《焊接冶金学(基本原理)》与《焊接冶金学(金属焊接性)》两本教材出版。

本教材是按“焊接冶金学(金属焊接性)”课的新大纲编写的。其主要内容:各种合金钢、有色金属、铸铁及堆焊合金的焊接性分析;焊接(堆焊)材料的选择与焊接工艺要点的论述;对金属焊接性及其试验方法也作了扼要地阐述。本书主要供高等学校焊接专业的教学用书,也可作为从事焊接专业工作的工程技术人员的参考书。

本书由吉林工业大学周振丰教授主编;大连铁道学院陈忠孝教授主审。第一章由清华大学包芳涵教授编写;第二章由清华大学任家烈教授编写;第三章及第五章由清华大学陈伯鑫教授编写;第四、六、七章由吉林工业大学周振丰教授编写;第八章由重庆大学彭高峨教授编写。

本书不足之处谨请读者批评指正,以期再版时更为完善。

编者

1993年12月

KAG 1/11

## 名词符号对照表

A——奥氏体、安培	IIW——国际焊接学会
$A_{KV}$ ——U型缺口冲击吸收功(J)	L——长度(mm)
$A_{KV}$ ——V型缺口冲击吸收功(J)	M——马氏体
$a_{KV}$ ——U型缺口冲击韧度(J/cm <sup>2</sup> )	$M_s$ ——马氏体转变起始温度
$a_{KV}$ ——V型缺口冲击韧度(J/cm <sup>2</sup> )	$M_f$ ——马氏体转变终了温度
B——贝氏体	MIG——熔化极氩弧焊
$B_L$ ——下贝氏体	MAG——熔化极活性气体保护焊
$B_U$ ——上贝氏体	P——珠光体
$BTR$ ——脆性温度区间	Q——(气体流量)L/min)
BM——母材	RRC——刚性拘束裂纹试验
c——比热容(J/(kg·°C))、碳化物	S——索氏体
$C_R$ ——裂纹率(%)	SHCCT图——模拟焊接热影响区连续冷却组织转变图
CCT图——连续冷却转变曲线	T——托氏体, 温度(°C)
COD——裂纹张开位移(mm)	$T_L$ ——液相线温度(°C)
CST——临界变形速率(%)	$T_S$ ——固相线温度(°C)
$d_e$ ——焊条或焊丝直径(mm)	$T_{MAX}$ ——焊接热循环峰值温度(°C)
E——焊接线能量(J/cm)	t——时间(s)
C——碳化物、碳元素	$t_{8/5}$ ——800~500°C的冷却时间(s)
F——铁素体	TIG——钨极氩弧焊
f——接头强度系数	TRC——拉伸拘束裂纹试验
[H]——扩散氢含量(mL/100g)	$T_{rs}$ ——脆向转变温度
$\delta$ ——板厚(mm)	v——焊接速度(cm/min)
HAZ——热影响区	WM——焊缝
HB——布氏硬度	$\alpha$ ——线胀系数、弯曲角
HV——维氏硬度	$\delta$ ——高温铁素体相
HRC——洛氏硬度	$\omega_c$ ——冷却速度(°C/s)
I——电流	

# 目 录

## 前言

## 第一章 金属焊接性及其试验方法.....1

### 第一节 金属焊接性概念.....1

一、金属焊接性.....1

二、如何分析金属的焊接性.....2

### 第二节 焊接性的试验.....5

一、焊接性试验的内容.....5

二、焊接性试验方法分类.....6

三、选择或制定焊接性试验方法的原则.....6

### 第三节 常用焊接性试验方法.....7

一、斜Y形坡口焊接裂纹试验法.....7

二、插销试验.....9

三、压板对接(FISCO)焊接裂纹试验法.....10

四、可调拘束裂纹试验法.....11

五、其他焊接性试验方法简介.....12

思考题.....14

参考文献.....14

## 第二章 合金结构钢的焊接.....15

### 第一节 合金结构钢.....15

一、合金结构钢的分类.....15

二、合金结构钢的应用范围.....15

三、强度用钢和专用钢.....15

### 第二节 热轧、正火钢的焊接.....17

一、热轧、正火钢典型钢种成分及性能.....17

二、热轧、正火钢的焊接性分析.....20

三、热轧、正火钢的焊接工艺特点.....30

### 第三节 低碳调质钢的焊接.....33

一、低碳调质钢典型钢种成分及性能.....33

二、低碳调质钢的焊接性分析.....34

三、低碳调质钢的焊接工艺特点.....39

### 第四节 中碳调质钢的焊接.....43

一、中碳调质钢典型钢种成分及性能.....43

二、中碳调质钢的焊接性分析.....45

三、中碳调质钢的焊接工艺特点.....46

### 第五节 专用钢焊接的特殊要求.....49

一、珠光体耐热钢焊接的特殊要求.....49

二、低温用钢焊接的特殊要求.....52

三、低合金耐蚀钢焊接的特殊要求.....56

思考题.....59

参考文献.....59

## 第三章 不锈钢、耐热钢的焊接.....61

### 第一节 不锈钢、耐热钢的类型和特性.....61

一、不锈钢及耐热钢类型.....61

二、不锈钢及耐热钢特性.....63

### 第二节 奥氏体钢、双相钢焊接.....67

一、奥氏体钢焊接接头耐腐蚀性.....67

二、奥氏体钢焊接接头热裂纹.....71

三、奥氏体钢焊缝的脆化.....76

四、双相不锈钢的焊接性分析.....77

五、奥氏体钢、双相钢焊接工艺.....82

### 第三节 铁素体钢及马氏体钢焊接.....85

一、铁素体钢焊接.....85

二、马氏体钢焊接.....86

### 第四节 珠光体钢与奥氏体钢的焊接.....89

一、异种钢的焊接性分析.....90

二、异种钢焊接工艺措施.....93

三、复合钢的焊接特点.....94

思考题.....95

附录A GB4242—84焊接用

不锈钢丝.....96

附录B 常见不锈钢焊条熔敷金属

化学成分.....97

参考文献.....97

## 第四章 铸铁的焊接.....100

### 第一节 铸铁的种类及性能.....100

### 第二节 铸铁焊接性分析.....102

一、灰铸铁焊接性分析.....102

二、球墨铸铁焊接性的特点.....109

### 第三节 铸铁焊接方法简介及

工艺要点.....	109	二、焊接材料的选择 .....	147
一、灰铸铁同质(铸铁型)焊缝		三、焊接工艺要点 .....	148
的熔焊.....	109	思考题 .....	148
二、灰铸铁异质(非铸铁型)焊缝的		参考文献 .....	148
电弧冷焊.....	112	<b>第七章 钛及其合金的焊接</b> .....	150
三、灰铸铁钎焊.....	117	第一节 钛及其合金的种类、成分及	
四、球墨铸铁焊接工艺简介.....	118	性能简介 .....	150
思考题.....	120	第二节 钛及其合金的可焊性分析 .....	154
参考文献.....	120	一、气体等杂质污染而引起焊接	
<b>第五章 铝及其合金的焊接</b> .....	122	接头脆化 .....	154
第一节 铝及其合金的类型和特性.....	122	二、焊接接头裂纹 .....	158
一、铝及其合金类型.....	122	三、焊缝气孔 .....	158
二、铝及其合金特性.....	123	第三节 工业纯钛及TC1钛合金焊接	
第二节 铝及其合金的焊接性分析.....	125	工艺要点 .....	160
一、焊缝的气孔.....	125	一、氩弧焊 .....	160
二、焊接热裂纹.....	129	二、等离子弧焊 .....	162
三、焊接接头的“等强性”.....	132	三、真空电子束焊 .....	163
四、焊接接头的耐蚀性.....	135	思考题 .....	164
第三节 铝及其合金的焊接工艺.....	135	参考文献 .....	164
一、焊接工艺的一般特点.....	135	<b>第八章 堆焊</b> .....	165
二、焊接工艺制定问题.....	136	第一节 堆焊层的工作条件及堆焊合金	
三、焊丝的选用.....	138	成分的选用 .....	166
思考题.....	140	一、堆焊层的工作条件和对堆焊金属	
参考文献.....	140	使用性的要求 .....	166
<b>第六章 铜及其合金的焊接</b> .....	142	二、堆焊合金的类型、焊接性特点	
第一节 铜及其合金的种类与		和选用 .....	167
性能简介.....	142	第二节 堆焊方法的特点 .....	180
一、纯铜.....	142	一、手弧焊堆焊 .....	180
二、黄铜.....	143	二、氧-乙炔焰堆焊.....	181
三、青铜与白铜.....	144	三、埋弧堆焊 .....	181
第二节 铜及其合金的焊接性分析.....	144	四、气体保护和自保护明弧堆焊 .....	182
一、难熔合及易变形.....	144	五、等离子弧堆焊 .....	183
二、热裂纹.....	144	六、电渣堆焊 .....	184
三、气孔.....	145	七、热喷涂和喷熔 .....	185
四、焊接接头力学性能及导电性能		思考题.....	187
的变化.....	147	附录 国内外堆焊焊条.....	188
第三节 纯铜及黄铜的焊接工艺要点.....	147	参考文献.....	190
一、焊接方法的选择.....	147		

# 第一章 金属焊接性及其试验方法

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时的要求。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接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，就提出了所谓焊接性(Weldability)的问题。

## 第一节 金属焊接性概念

### 一、金属焊接性

金属焊接性就是金属是否能适应焊接加工而形成完整的、具有一定使用性能的焊接接头的特性。也就是说，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。

从理论上分析，只要在熔化状态下能够相互形成溶液或共晶的任意两种金属或合金都可以经过熔焊形成接头。同种金属或合金之间当然是可以形成焊接接头的。许多异种金属或合金之间也是可以形成焊接接头的，只是有时是需要通过中间过渡层的。因此，可以认为上述几种情况都可以看作是“具有一定焊接性”的。差别只在于有的工艺过程很简单，有的工艺过程很复杂；有的接头质量高、性能好，有的接头质量低、性能差。所以，金属焊接工艺过程简单而接头质量高、性能好时，就称作焊接性好；反之，就称作焊接性差。

从上述焊接性概念可知，虽然焊接性主要是金属本身所固有的性能，但工艺条件也起着重要的影响，所以分析焊接性不能完全脱离工艺条件。

熔焊时，熔滴与熔池金属在高温液态下因氧化、还原、溶解、蒸发以及其他化学反应而改变了成分，再经过结晶、固态相变等过程而形成焊缝。焊缝中氧、氮、氢或其他非金属夹杂物会影响焊缝金属的力学性能或造成气孔、夹渣之类的缺陷；金属的化学成分则直接影响其金相组织和力学性能；成分偏析和结晶形态还影响热裂纹敏感性。因此，母材和焊接材料的成分以及焊接工艺条件都对焊接性有重要影响。

除焊缝外，热影响区金属在焊接过程中受到热循环的作用，也将发生组织和力学性能的转变，例如淬硬脆化、晶粒长大、回火软化等，在某些条件下还可能造成热影响区开裂等焊接缺陷。这些问题主要取决于母材本身的材质和工艺条件，而与焊接材料基本无关。只要正确选择母材和焊接工艺条件，配合一些工艺措施，如预热、缓冷、加冷却垫板、控制层间温度等，就可以改善焊接性。

当然，焊接接头附近有无应力集中、刚度大小、是否承受多轴应力等结构方面的因素也会影响接头的性能或对产生缺陷的敏感性。



此外，焊件的使用要求，如载荷的性质、温度的高低、是否承受腐蚀或辐照等，实际上也是对焊接性提出了不同程度的要求，因而也是影响焊接性评价的。

## 二、如何分析金属的焊接性

除直接采用焊接试验的方法来确定金属的焊接性之外，通过分析金属的化学成分、物理特性、与各种气体的亲和力、相图特点、CCT图或SHCCT图、热处理状态、焊接工艺条件、保护方式、工艺措施等，均可以在某种程度上评价金属的焊接性。

### (一) 从金属的特性分析焊接性

#### 1. 利用化学成分分析

(1) 碳当量法 (Carbon Equivalent)<sup>[1]</sup> 钢材的化学成分对焊接热影响区的淬硬及冷裂倾向有直接影响，因此可以用化学成分来分析其冷裂敏感性。各种元素中，碳是对冷裂敏感性影响最显著的一个。因而，人们就将各种元素都按相当于若干含碳量折合并叠加起来求得所谓碳当量 (CE或 $C_{eq}$ )，用CE或 $C_{eq}$ 来估计冷裂倾向的大小。下面就是几种较常用的CE及 $C_{eq}$ 公式。

国际焊接学会 (IIW) 采用：

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

此式适用于中、高强度的非调质低合金高强钢。 $CE \leq 0.45\%$ 时，焊接厚度25mm的板可以不预热。 $CE < 0.41\%$ 且含C  $< 0.207\%$ 时，焊接厚度 $< 37\text{mm}$ 的板可以不预热。

日本JIS和WES采用：

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

此式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 $< 25\text{mm}$ ，手弧焊线能量 $17\text{kJ/cm}$ 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 $75^\circ\text{C}$

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

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

美国焊接学会采用：

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

此式适用化学成分范围为： $C \leq 0.6\%$ ； $Mn \leq 1.6\%$ ； $Ni \leq 3.3\%$ ； $Cr \leq 1.0\%$ ； $Mo \leq 0.6\%$ ； $Cu 0.5\% \sim 1.0\%$ ； $P 0.05\% \sim 0.15\%$ 。当 $Cu < 0.5\%$ 或 $P < 0.05\%$ 时，可不计入。试验结果归纳如图1-1及表1-1，它们可作为制定焊接条件的依据。

上述几种 $C_{eq}$ 公式都说明， $C_{eq}$ 越大，冷裂倾向也越大。但用 $C_{eq}$ 估计焊接性是比较粗略的，因为：公式中只包括了元素，而实际钢材中

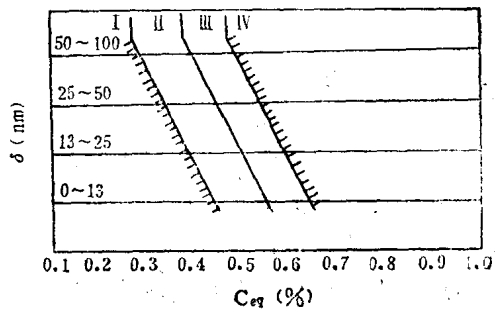


图1-1 焊接性与 $C_{eq}$ 的关系

还有其他元素；在不同含量和不同合金系统中元素作用的大小不可能是相同的，元素之间相互抵消或加强影响也不能用简单的公式反映。所以，碳当量法大多只用于对钢材焊接性从理论上的初步分析。

表1-1 不同条件下的预热要求

焊接性	用普通酸性焊条	用低氢焊条	消除应力	敲击处理
I. 优良	不需预热	不需预热	不需	不需
II. 较好	预热40~100℃	-10℃以上不需预热	任意	任意
III. 尚好	预热150℃	预热40~100℃	希望	希望
IV. 可以	预热150~200℃	预热100℃	必要	希望

(2) 焊接冷裂纹敏感指数<sup>[2]</sup> 除碳当量外，焊缝含氢量和接头拘束度都对冷裂倾向有很大影响。有人曾对200多种不同成分的钢材、不同的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 $P_c$ ：

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

式中  $\delta$  ——板厚 (mm)；

H ——焊缝中扩散氢含量 (mL/100g)。

此式适用条件：C 0.07%~0.22%；Si ≤ 0.60%；Mn 0.40%~1.40%；Cu ≤ 0.50%；Ni ≤ 1.20%；Cr ≤ 1.20%；Mo ≤ 0.70%；V ≤ 0.12%；Nb ≤ 0.04%；Ti ≤ 0.05%；B ≤ 0.005%； $\delta = 19 \sim 50$ mm；H = 1.0~5.0mL/100g (GB3965—83测氢法)。

求得 $P_c$ 后，利用下式即可求出斜Y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 $T_0$  (℃)：

$$T_0 = 1440P_c - 392$$

2. 利用物理性能分析 金属的熔点、导热系数、线胀系数、密度、热容量等因素，都对热循环、熔化、结晶、相变等过程产生影响，从而影响焊接性。

纯铜 (紫铜) 导热系数高，焊接时热量散失迅速，升温的范围很宽，坡口不容易熔化，焊接时需要较强烈的加热，热源功率不足时，会产生熔透不足的缺陷。铜、铝等导热系数高的材料，熔池结晶快，易于产生气孔。有些材料导热系数低 (如钛、不锈钢等)，焊接时温度梯度陡，残余应力高、变形大，而且由于高温停留时间延长，热影响区晶粒长大，对接头性能也不利。

金属线胀系数大时，接头的变形及应力也必将更加严重，奥氏体钢焊接时就应注意这方面的问题。

密度小的铝及铝合金，熔池中的气泡和非金属夹杂物不易上浮逸出，就会在焊缝中残留气孔和夹渣。

3. 利用化学性能分析 与氧的亲合力较强时 (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，如采用惰性气体保护焊或真空中焊接等，有时焊缝背面也需加以保护。此外，象钛这样化学活性性很强的金属，甚至对氧、氮、氢等气体元素都很敏感，吸收这些气体后，力学性能显著降低，所以要严格控制氧、氮、氢对焊缝及热影响区的污染。

4. 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, 因而可以利用他们的相图分析焊接性问题。例如, 对于共晶型相图来说, 其固相线与液相线之间的温度区间大小, 会影响结晶时的成分偏析, 影响生成低熔共晶的程度, 也影响脆性温度区间 (Brittle Temperature Range, BTR) 的大小, 这对分析热裂纹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影响因素。

5. 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) 或模拟焊接热影响区的连续冷却曲线 (SHCCT图) 分析其焊接性问题。这些曲线可以大体上说明在不同焊接热循环条件下将获得什么样的金相组织和硬度, 可以估计有无冷裂的危险, 以便确定适当的焊接工艺条件 (图1-2)。

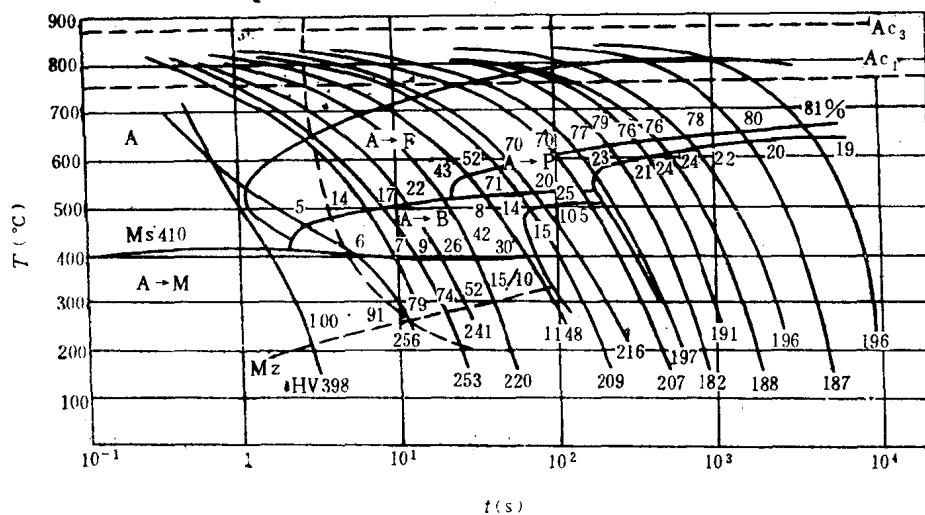


图1-2 16Mn钢的连续冷却曲线

(图中虚线表示的曲线是相当于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。如调质处理的高强钢, 焊接热循环作用后在热影响区必然会出现局部软化区, 就必须尽量缩小软化区或采取其它方法加以弥补。

## (二) 从焊接工艺条件分析焊接性

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可有很大差别, 从而影响焊接质量, 使金属在不同工艺条件下焊接时显示出不同的焊接性。如电渣焊功率很大, 但能量密度很低, 最高加热温度也不高, 焊接时加热缓慢, 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, 必须经正火处理才得改善。相反, 电子束焊、激光焊等方法, 功率虽不算大, 但能量密度很高, 加热迅速, 高温停留时间短暂, 热影响区极窄, 没有晶粒长大的危险。当然, 选择热源应考虑所焊材料的特点以及焊件的厚度等因素。

2. 保护方法 熔焊时, 对熔池和热影响区金属的保护方法不外乎是渣保护、气保护或在真空中等几种。这些方法分别适用于不同的金属和合金。在真空条件下焊接时对防止氮、氢、氧的侵入最为彻底, 但此法不适用于含高蒸气压成分 (如锌、锰、锂、镁) 较高的合金,

而且设备复杂，成本较高。通常钢铁焊接时多用渣为主的保护，如手弧焊、埋弧焊等；也有时采用气体保护焊，如 $\text{CO}_2$ 保护焊、氩弧焊等。对铝、镁、钛等较活泼的合金，则以惰性气体保护焊为最常用。保护方法选择是否恰当也会影响金属焊接性的效果。

3. 热循环控制 除由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，对工艺因素的其他环节也应给予足够的重视，其中主要的几个环节如下：

(1) 彻底清理坡口及其附近 清除油、锈对低合金钢焊接时防止气孔、裂纹是十分重要的。去除铝及铝合金表面的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜对防止气孔和夹渣也很有效。

(2) 严格按规定处理焊接材料 为保证焊接质量，焊条、焊剂应按规定烘干和保存；焊丝应严格除油、除锈；保护气体要经提纯去除杂质后使用。所有这些都对防止缺陷、获得好的焊接性有作用。

(3) 合理安排焊接顺序 大件或复杂形状的工件焊接时，为减少应力及变形，必须安排好各条焊缝的焊接次序。焊接次序安排不当，会影响接头性能，甚至引起焊接缺陷，从而使焊接性变差。

(4) 正确制定焊接规范 只有焊接规范适当时，才能保证良好的熔合比和焊缝形状系数。这不仅对防止产生裂纹等缺陷是必要的，而且对保证接头性能也是十分重要的。除了控制线能量外，还要控制焊接电流、电弧电压及焊接速度，使之保持在一定的范围内。此外，预热温度和层间温度的控制也是不可忽视的。

当然，可能影响焊接性的因素还有很多，这里只举出了较重要的部分以供分析时参考。

## 第二节 焊接性的试验

### 一、焊接性试验的内容

针对材料的不同性能特点和不同使用要求，焊接性试验的内容可以有以下几种：

#### (一) 焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力

熔池金属结晶时，由于存在一些有害的元素（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。热裂纹是一种较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。

#### (二) 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度钢焊接中是较为常见的缺陷，而且也是一种严重的缺陷，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。

#### (三) 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、冷作硬化等作用的结果，可能使韧性严重下降，即发生所谓焊接接头的脆性转变。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，韧性下

降是个严重的问题。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。

#### (四) 焊接接头的使用性能

由于使用性能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,如:厚板焊接时的层状断裂试验、某些低合金钢的再热裂纹试验、应力腐蚀试验、铝合金的铸环试验等。

### 二、焊接性试验方法分类

评定焊接性的方法有许多种,按照其特点可以归纳为以下几种类别:

#### (一) 直接模拟试验类

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,有时还可以从中确定必要的焊接条件。

(1) 焊接冷裂纹试验 常用的有插销试验、斜Y坡口对接裂纹试验、拉伸拘束裂纹试验(TRC)、刚性拘束裂纹试验(RRC)等。

(2) 焊接热裂纹试验 常用的有可调拘束裂纹试验、FISCO焊接裂纹试验、窗形拘束对接裂纹试验、刚性固定对接裂纹试验等。

(3) 再热裂纹试验 有H型拘束试验、缺口试棒应力松弛试验、U形弯曲试验等。还可以利用插销试验进行再热裂纹试验。

(4) 层状断裂试验 常用的有Z向拉伸试验、Z向窗口试验、Cranfield试验等。

(5) 应力腐蚀裂纹试验 有U形弯曲试验、缺口试验、预制裂纹试验等。

(6) 脆性断裂试验 除低温冲击试验外,常用的还有落锤试验、裂纹张开位移试验(COD)以及Wells宽板拉伸试验等。

#### (二) 间接推算类

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。

属于这一类的方法主要有: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。

#### (三) 使用性能试验类

这类焊接性评定方法最为直观,它是将实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。通常较小的焊接构件可以直接用产品做试验,而大型焊接构件只能以试样做试验。

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。

### 三、选择或制定焊接性试验方法的原则

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

1. 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，而且试验条件还应考虑到产品的使用条件，尽量使之接近。只有这样才能使焊接性试验具有良好的针对性，其试验结果能比较确切地显示出实际生产时可能发生的问题或可能获得的结果。

2. 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。为了做到这样，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比较严格，防止随意性。

3. 注意试验方法的经济性 在符合上述原则，并可获得可靠结果的前提下，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。

### 第三节 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，其它方法从简。

#### 一、斜Y形坡口焊接裂纹试验法<sup>①</sup>

此法(Y-Slit Type Cracking Test)主要用于评定碳钢和低合金高强度钢焊接热影响区对冷裂纹的敏感性。试件的形状及尺寸如图1-3。其坡口径机械加工，试验所用焊条应严格烘干。焊接工艺参数为：焊条直径4mm，焊接电流 $170 \pm 10A$ ，电弧电压 $24 \pm 2V$ ，焊接速度 $150 \pm 10mm/min$ 。

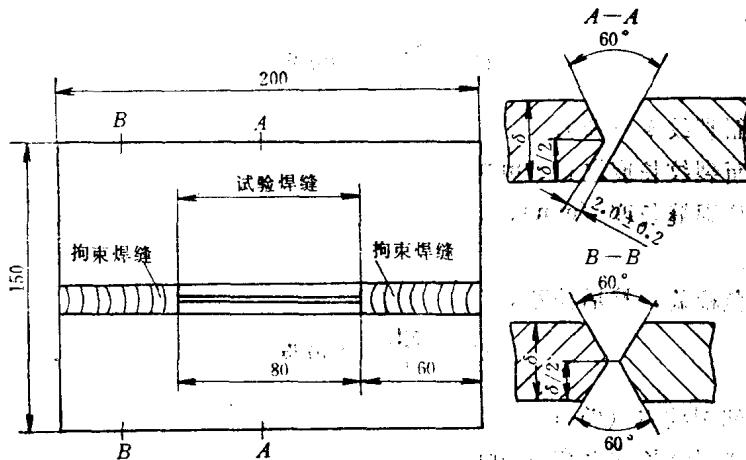


图1-3 斜Y形坡口焊接裂纹试验用试件形状及尺寸

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采用自动送进焊条电弧焊时应分别按图1-4中的a和b图所示进行。

试验焊缝可在各种不同温度下施焊，焊后静置24h再检测和解剖。检测裂纹可用肉眼和放大镜来观察焊接接头的表面和断面上是否存在裂纹，并用下述方法分别计算出表面裂纹率、根部裂纹率和断面裂纹率。试样上裂纹长度计算的示意图见图1-5。

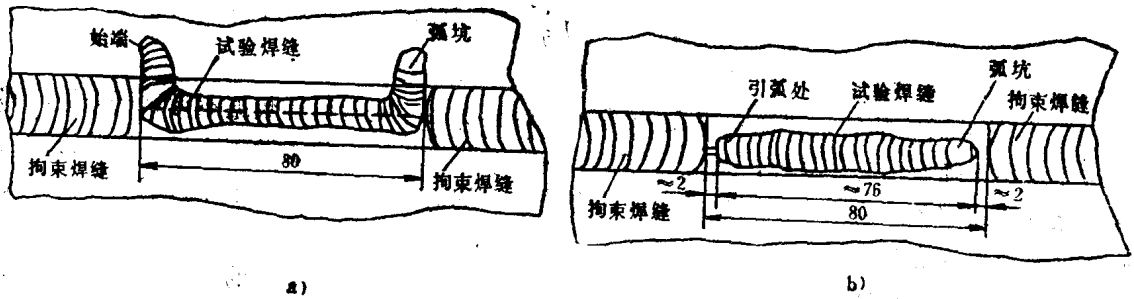


图1-4 试验焊缝的焊接方式  
a) 手弧焊 b) 自动送进焊条电弧焊

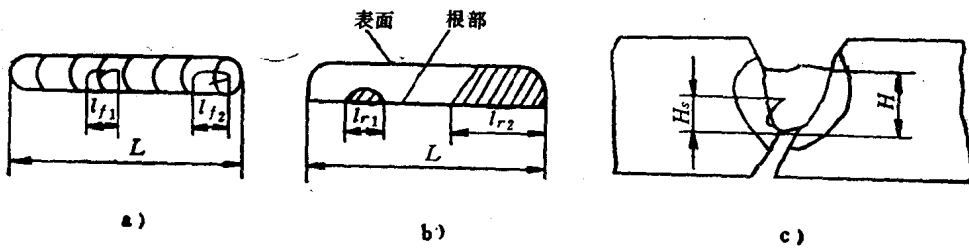


图1-5 试样上裂纹长度计算  
a) 表面裂纹 b) 根部裂纹 c) 断面裂纹

表面裂纹率:

$$C_s = \frac{\sum l_s}{L} \times 100\%$$

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

根部裂纹率:

试样先经着色检验, 然后拉断。

$$C_r = \frac{\sum l_r}{L} \times 100\%$$

式中  $C_r$ ——根部裂纹率 (%);  
 $\sum l_r$ ——根部裂纹长度之和 (mm)。

断面裂纹率:

在试验焊缝上切下 4~6 块试片, 检查 5 个断面上的裂纹深度。

$$C_c = \frac{\sum H_c}{\sum H} \times 100\%$$

式中  $C_c$ ——断面裂纹率 (%);  
 $\sum H_c$ ——5 个断面上裂纹深度之和 (mm);  
 $\sum H$ ——5 个断面焊缝最小厚度之和 (mm)。

就低合金钢而言由于这种接头形式的刚度极大, 所以, 一般认为表面裂纹率小于 20%,

用于生产就是安全的，但不应有根部裂纹。

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。试验程序与斜Y形坡口相同，但试验焊缝处的坡口形式如图1-6所示。

### 二、插销试验<sup>⊖</sup>

此法 (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。因插销试验消耗钢材很少，试验结果稳定可靠，在国内外都有广泛应用。经适当改变，此法还可用于测定再热裂纹敏感性和层状撕裂敏感性。

插销试验 (图1-7)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齐平。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。

插销试棒的形状、尺寸如图1-8及表1-2所示。缺口位置如表1-3所示。

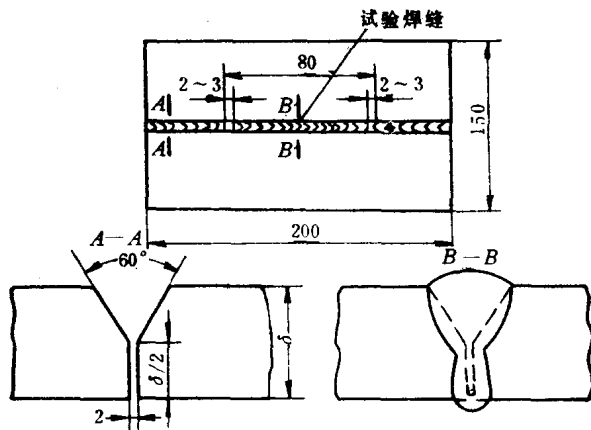


图1-6 直Y形坡口焊接裂纹试验试样

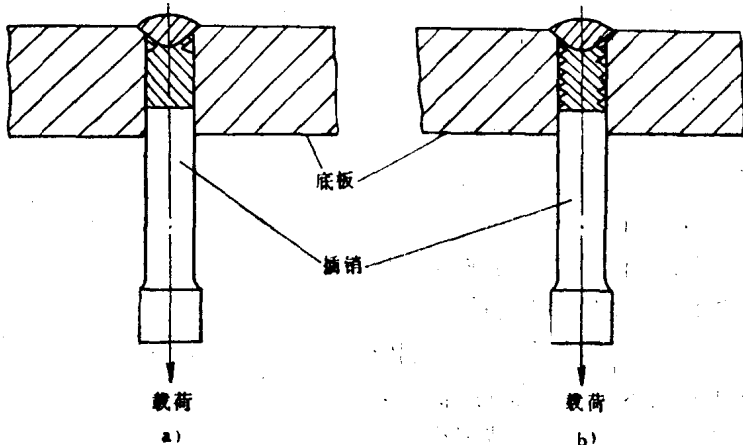


图1-7 插销试棒、底板及熔敷焊道

a) 环形缺口试棒 b) 螺形缺口试棒

其余<sup>⊖</sup>

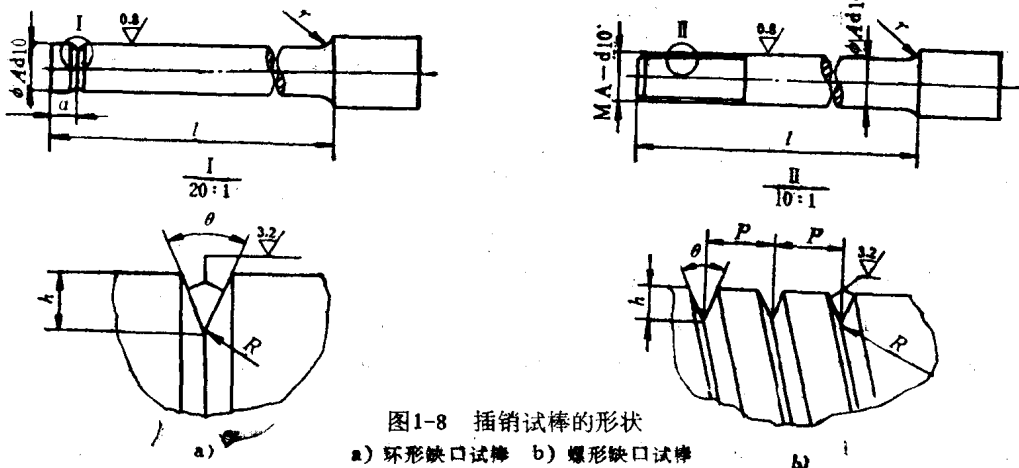


图1-8 插销试棒的形状

a) 环形缺口试棒 b) 螺形缺口试棒



表1-2 插销试棒的尺寸

缺口类别	A(mm)	h(mm)	$\theta$	R(mm)	P (mm)	L (mm)
环形	8	$0.5 \pm 0.05$	$40^\circ \pm 2^\circ$	$0.1 \pm 0.02$	—	大于底板的厚度，一般为30~150
螺形					1	
环形	6	$0.5 \pm 0.05$	$40^\circ \pm 2^\circ$	$0.1 \pm 0.02$	—	
螺形					1	

表1-3 缺口位置 $a$ 与线能量 $E$ 的关系

$E$ (kJ/cm)	$a$ (mm)	$E$ (kJ/cm)	$a$ (mm)
9	1.35	15	2.0
10	1.45	16	2.1
13	1.85	20	2.4

底板材料应与被试材料相同或热物理常数基本一致，其形状及尺寸见图1-9。

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 $100^\circ\text{C}$ 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。

在无预热条件下，载荷保持16h而试棒未断裂即可卸载。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 $\sigma_c$ 。临界应力 $\sigma_c$ 可以用启裂准则，也可以用断裂准则，但应加以注明。 $\sigma_c$ 的大小，即可相对比较材料抵抗产生冷裂纹的能力。

### 三、压板对接 (FISCO) 焊接裂纹试验法<sup>[8]</sup>

此法 (GB4678.4-84) 主要用于评定热裂纹敏感性，也可以做钢材与焊条匹配性的试验。

试验装置如图1-10。在C形夹具中，垂直方向有14个螺栓以 $3 \times 10^5\text{N}$ 的力压紧试板，横向有4个螺栓以 $6 \times 10^4\text{N}$ 的力顶住试板，这样使试板牢牢固定在试验装置内。试板尺寸如图1-11，坡口为I形，厚板时可用Y形。

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 $0 \sim 6\text{mm}$ )。先将横向螺栓紧固，再将垂直方向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10mm，弧坑不必填满，如图1-12。

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，观察有无裂纹，测量裂纹长度。裂纹率按下式计算：

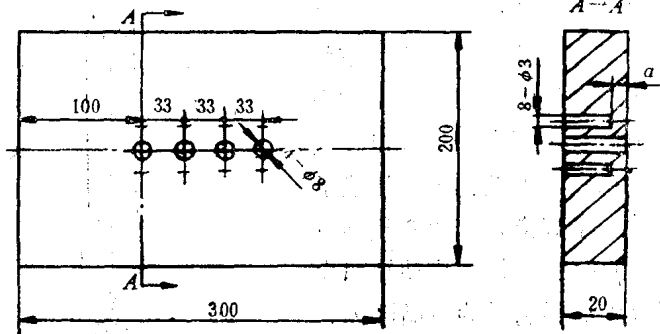


图1-9 底板形状及尺寸