



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

# 金属材料焊接工艺

JINSHU CAILIAO  
HANJIE GONGYI

主 编 张丽红

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十二五”创新型规划教材

# 金属材料焊接工艺

主 编 张丽红

副主编 郭玉利 张伟 张永志

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料焊接工艺/张丽红主编. —北京:北京理工大学出版社, 2014. 3  
ISBN 978 - 7 - 5640 - 4443 - 5

I. ①金… II. ①张… III. ①金属材料—焊接 IV. ①TG457. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 266171 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)  
82562903 (教材售后服务热线)  
68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 15.25

字 数 / 264 千字

版 次 / 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 45.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



# 前 言

## PREFACE

本书是根据教育部培养高素质、高级技能型专门人才的任务，为满足焊接技术及自动化专业岗位能力的需求，由学校专业教师和企业工程技术人员合作编写的适用于焊接技术及自动化专业的工学结合教材。

本书在编写过程中，本着联系企业实际生产、知识够用为原则，突出知识应用能力的培养。其特点是由学校专业教师和企业工程技术人员共同制订本书的编写大纲，确定以金属材料（合金结构钢、不锈钢及耐热钢、铸铁、有色金属）焊接性及其焊接工艺制订，并结合实际生产案例为本书主要内容，初稿完成后集体进行了审阅。

本书由张丽红担任主编。其中模块一、模块三由郭玉利编写；模块二由张丽红编写；模块四由张伟编写；模块五由张永志编写。

在编写和审稿过程中，得到了许多焊接相关企业及兄弟院校同仁的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢。对所有为本书提供资料、建议和帮助的各方人士，表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，书中错误或不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

# 目 录

## CONTENTS

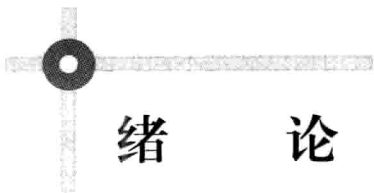
绪 论 .....	1
模块一 焊接性及其试验评定 .....	3
任务一 焊接性及影响因素 .....	3
(一) 焊接性的概念 .....	3
(二) 影响焊接性的因素 .....	4
任务二 焊接性试验的内容及评定原则 .....	6
(一) 焊接性试验的内容 .....	6
(二) 评定焊接性的原则 .....	7
(三) 焊接性评定方法分类 .....	8
任务三 焊接性的评定及试验方法 .....	10
(一) 焊接性的间接评定 .....	10
(二) 焊接性的直接试验方法 .....	13
思考题 .....	22
模块二 合金结构钢的焊接 .....	23
任务一 合金结构钢的分类和性能 .....	23
(一) 合金结构钢的分类 .....	23
(二) 合金结构钢的基本性能 .....	24
任务二 热轧及正火钢的焊接 .....	28
(一) 热轧及正火钢的成分和性能 .....	28

	(二) 热轧及正火钢的焊接性 .....	32
	(三) 热轧及正火钢的焊接工艺 .....	38
	(四) 典型案例——工字梁焊接 .....	45
<b>任务三</b>	<b>低碳调质钢的焊接</b> .....	47
	(一) 低碳调质钢的种类、成分及性能 .....	47
	(二) 低碳调质钢的焊接性分析 .....	50
	(三) 低碳调质钢的焊接工艺特点 .....	57
	(四) 典型案例——20MnMo 大型模锻压机 C 形特厚板的焊接 .....	61
<b>任务四</b>	<b>中碳调质钢的焊接</b> .....	64
	(一) 中碳调质钢的成分和性能 .....	65
	(二) 中碳调质钢的焊接性分析 .....	67
	(三) 中碳调质钢的焊接工艺特点 .....	69
	(四) 典型案例——齿轮焊接 .....	73
<b>任务五</b>	<b>珠光体耐热钢的焊接</b> .....	75
	(一) 珠光体耐热钢的成分及性能 .....	75
	(二) 珠光体耐热钢的焊接性分析 .....	78
	(三) 珠光体耐热钢的焊接工艺特点 .....	79
	(四) 典型案例——35CrMo 耐热钢的焊接 .....	82
<b>任务六</b>	<b>低温钢的焊接</b> .....	83
	(一) 低温钢的分类、成分及性能 .....	83
	(二) 低温钢的焊接性分析 .....	87
	(三) 低温钢的焊接工艺特点 .....	88
	(四) 典型案例——09MnNiDR 低温钢压缩机机壳的焊接 .....	92
<b>思考题</b>	.....	95
<b>模块三</b>	<b>不锈钢及耐热钢的焊接</b> .....	96
<b>任务一</b>	<b>不锈钢及耐热钢的分类及特性</b> .....	96
	(一) 不锈钢的基本定义 .....	96
	(二) 不锈钢及耐热钢的分类 .....	97
	(三) 不锈钢及耐热钢的特性 .....	98
<b>任务二</b>	<b>奥氏体不锈钢的焊接</b> .....	102

	(一) 奥氏体不锈钢的类型 .....	102
	(二) 奥氏体不锈钢焊接性分析 .....	103
	(三) 奥氏体不锈钢的焊接工艺特点 .....	110
	(四) 典型案例——1Cr18Ni9Ti 不锈钢小径管的焊条 电弧焊 .....	114
<b>任务三</b>	<b>铁素体不锈钢及马氏体不锈钢的焊接 .....</b>	<b>115</b>
	(一) 铁素体不锈钢的焊接 .....	115
	(二) 马氏体不锈钢的焊接 .....	120
	(三) 典型案例——破裂 2Cr13 不锈钢阀杆补焊 工艺 .....	125
<b>任务四</b>	<b>奥氏体 - 铁素体双相不锈钢的焊接 .....</b>	<b>127</b>
	(一) 奥氏体 - 铁素体双相不锈钢的类型 .....	127
	(二) 奥氏体 - 铁素体双相不锈钢的耐蚀性 .....	128
	(三) 奥氏体 - 铁素体双相不锈钢的焊接性分析 .....	129
	(四) 奥氏体 - 铁素体双相不锈钢的焊接工艺 特点 .....	132
	(五) 典型案例——00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢钢管 的焊接 .....	133
<b>任务五</b>	<b>奥氏体钢与珠光体钢的焊接 .....</b>	<b>134</b>
	(一) 异种钢的焊接性分析 .....	135
	(二) 异种钢的焊接工艺特点 .....	140
	(三) 典型案例——0Cr18Ni9 不锈钢与 16Mn 法兰的 焊接 .....	141
<b>思考题</b>	.....	143
<b>模块四</b>	<b>铸铁焊接 .....</b>	<b>145</b>
<b>任务一</b>	<b>铸铁的种类及石墨化 .....</b>	<b>145</b>
	(一) 铸铁的种类 .....	145
	(二) 石墨化过程及其影响因素 .....	147
<b>任务二</b>	<b>铸铁焊接接头白口及淬硬组织 .....</b>	<b>150</b>
<b>任务三</b>	<b>灰铸铁的焊接 .....</b>	<b>153</b>
	(一) 灰铸铁的焊接性分析 .....	153
	(二) 灰铸铁的焊接工艺特点 .....	156

	(三) 典型案例——灰铸铁气缸的焊补 .....	168
<b>任务四</b>	<b>球墨铸铁的焊接 .....</b>	<b>170</b>
	(一) 球墨铸铁的焊接性特点 .....	170
	(二) 球墨铸铁的焊接工艺特点 .....	171
<b>思考题</b>	.....	174
<b>模块五</b>	<b>有色金属的焊接 .....</b>	<b>175</b>
<b>任务一</b>	<b>铝及铝合金的焊接 .....</b>	<b>175</b>
	(一) 铝及铝合金的分类、成分及性能 .....	175
	(二) 铝及铝合金的焊接性 .....	179
	(三) 铝及铝合金的焊接工艺 .....	192
	(四) 典型案例——铝合金铁路货车底门的焊接 .....	199
<b>任务二</b>	<b>铜及铜合金的焊接 .....</b>	<b>202</b>
	(一) 铜及铜合金的分类、成分及性能 .....	202
	(二) 铜及铜合金的焊接性 .....	204
	(三) 铜及铜合金的焊接工艺 .....	208
	(四) 典型案例——船舶铜质螺旋桨的修复技术 .....	214
<b>任务三</b>	<b>钛及钛合金的焊接 .....</b>	<b>218</b>
	(一) 钛及钛合金的分类和性能 .....	218
	(二) 钛及钛合金的焊接性 .....	221
	(三) 钛及钛合金的焊接工艺 .....	223
	(四) 典型案例——钛及钛合金板对接钨极氩弧焊 .....	229
<b>思考题</b>	.....	232
<b>参考文献</b>	.....	233





# 绪 论

随着科学技术的发展，焊接技术广泛应用于机械、船舶制造、电力、石油化工、建筑、汽车、电子、航空航天等工业部门中。主要应用材料除钢材外，还有不断涌现的有色金属等具有特殊性能的新型结构材料，这对焊接性能提出了更高的要求。

## （一）合金结构钢的发展及应用

合金结构钢根据使用温度和环境条件，可分为低温用的合金结构钢，中温用的（400℃以下）合金结构钢和高温用的合金结构钢，有的还强调使用性能，如耐候性、耐腐蚀性和耐磨性等。

### 1. 锅炉和压力容器用钢

锅炉和压力容器因运行条件复杂，对钢材的性能提出了更高的要求。与普通结构钢相比，锅炉和压力容器用的低合金钢应具有较高的高温强度、常温和高温冲击性能、抗时效性、抗氢和硫化氢性能以及抗氧化性等。这类钢的合金系是以提高钢材高温性能的合金元素（如 Mn、Mo、Cr、V 等）为基础的。

锅炉和压力容器用钢除了 C-Mn 钢之外，都是以强碳化物形成元素合金的，以保证所要求的高温强度和抗氧化性。这些钢可以以热轧、退火、正火、回火或调质状态供货。

### 2. 船舶用低合金钢

“二战”期间，大量的焊接船舶在海上发生了灾难性的脆断事故，引起人们对船舶用钢的焊接性和抗脆断性能的高度重视。此后，一系列焊接性良好的船舶用钢被开发出来并得到广泛应用。

对船舶用钢低温冲击韧性的要求，世界各国基本统一分成三级，即 0℃、-20℃ 和 -40℃，最低冲击吸收功按强度等级分别为 27J、31J 和 34J。船舶用钢的合金系统基本上为 C-Mn 和 C-Mn-V-Nb 合金钢。各国标准对各种船舶用钢的化学成分范围的规定大致相同，保证了焊接性的稳定。

### 3. 低温用钢

近年来，随着石油化学工业的迅速发展，各种液态烯烃低温贮存设备的



需求量急剧上升。贮存液化天然气（LNG）和液化石油气（LPG）的低温贮罐也向大型化发展，促使冶金部门开发各种低温用钢以满足不同低温工作条件的要求。目前，世界范围内已形成了较完整的低温钢系列。

工作温度在 $-46^{\circ}\text{C}$ 以上，可采用铝镇静的低合金钢；工作温度在 $-60^{\circ}\text{C} \sim -170^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内应选用 $1.5\% \sim 8\%$ 的镍钢；工作温度达 $-170^{\circ}\text{C}$ 以下须选用 $9\%$ 的Ni钢和奥氏体钢。对低温钢的性能要求比较高，要在保证良好焊接性的前提下，使其具有足够高的低温韧性。

## （二）有色金属的发展及应用

随着科学技术的发展，有色金属的应用越来越多，从原来的航空航天部门逐渐扩展到电子、信息、汽车、交通、轻工等民用领域。有色金属焊接结构也引起人们越来越多的关注。有色金属及合金的分类方法很多，按基体金属可分为铝合金、铜合金、钛合金。

### 1. 铝及铝合金

铝合金具有密度低、强度高、耐腐蚀、导电导热性好、可焊接以及加工性能好等特点，应用范围之广仅次于钢铁，成为第二大金属。由于轻质的特点，铝合金一直是航空航天飞行器的主要结构材料，主要用于飞机蒙皮和舱体等部位，在军用飞机上，用量达 $50\%$ ；在民用飞机上最高达到 $80\%$ 。铝及铝合金广泛应用于汽车、高速列车、地铁车辆、飞机、舰船等交通运输工具中，表现出安全、节能和减少废气排放量等多方面的优越性能，为铝的应用展现了十分广阔的前景。

### 2. 铜及铜合金

铜及铜合金具有较高的导电导热性、抗磁性、耐蚀性和良好的加工性，除用于一般电器产品外，也是高能物理、超导技术、低温工程等高科技发展中必不可少的材料。尽管铜的资源稀缺，人们正在寻求代用材料，但想要完全替代几乎是不可能的，人们对它的探索研究其势不减。尤其是通过不断研发，更促进了铜及铜合金在工业及现代国防领域中的应用。

### 3. 钛及钛合金

钛及钛合金作为飞机机体的四大结构材料（铝合金、钢材、树脂基复合材料、钛合金）之一而倍受关注。钛合金由于具有轻质、高强、耐热、抗腐蚀等特点，在飞机机体制造中的用量不断上升。我国也在钛加工技术方面，特别是钛合金的焊接性方面，开展了大量的工作。我国开发的中强TC4、TA15钛合金已应用于J10、J11飞机和人造卫星，TB8超高强钛合金已用做J11系列飞机后机身，高强、高韧TC21钛合金已用于战斗机的重要承力件等。

# 模块一

---

## 焊接性及其试验评定

科学研究和工程实践表明，某些材料具有较高的强度、塑性和耐蚀性等，但用这些材料制造焊接结构时却发现可能出现裂纹、气孔、夹渣等缺陷，或者能得到完整的焊接接头而性能却达不到要求，这大大限制了这些材料的使用范围。单从材料本身的化学成分、物理性能和力学性能不足以判断它在焊接过程中是否会出现问题以及焊接后能否满足使用要求，这就要求从焊接性的角度出发来分析和研究材料的某些特定的性能，也就是材料的焊接性问题。

### 任务一 焊接性及影响因素

#### （一）焊接性的概念

焊接性是指材料在制造工艺条件下，能够焊接形成完整接头并满足预期使用要求的能力。换句话说，焊接性是材料焊接加工的适应性，指材料在一定的焊接工艺条件下（包括焊接方法、焊接材料、焊接参数和结构形式等），获得优质焊接接头的难易程度和该焊接接头能否在使用条件下可靠运行。材料焊接性的概念有两个方面的内容：一是材料在焊接加工中是否容易形成接头或产生缺陷；二是焊接完成的接头在一定的使用条件下可靠运行的能力。

##### 1. 工艺焊接性和使用焊接性

从理论上分析，任何金属或合金，只要在熔化后能够互相形成固溶体或共晶，都可以经过熔焊形成接头。同种金属或合金之间可以形成焊接接头，一些异种金属或合金之间也可以形成焊接接头，但有时需要通过加中间过渡层的方式实现焊接。可以认为，上述几种情况都可以看作是“具有一定焊接性”，差别在于有的工艺过程简单，有的工艺过程复杂；有的接头质量高、性能好，有的接头质量低、性能差。所以，焊接工艺过程简单而接头质量高、性能好的，就称为焊接性好；反之，就称为焊接性差。因此，必须联系工艺条件和使用性能来分析焊接性问题，由此提出了“工艺焊接性”和“使用焊接性”的概念。

工艺焊接性是指金属或材料在一定的焊接工艺条件下，能否获得优质致密、无缺陷和具有一定使用性能的焊接接头的能力。它涉及焊接制造工艺过程中的焊接缺陷问题，如裂纹、气孔、断裂等。使用焊接性是指焊接接头或整体焊接结构满足技术条件所规定的各种性能的程度，包括常规的力学性能（强度、塑性、韧性等）或特定工作条件下的使用性能，如低温韧性、断裂韧性、高温蠕变强度、持久强度、疲劳性能以及耐蚀性、耐磨性等。

## 2. 冶金焊接性和热焊接性

对于熔焊来说，焊接过程一般包括冶金过程和热过程这两个必不可少的过程。在焊接接头区域，冶金过程主要影响焊缝金属的组织 and 性能，而热过程主要影响热影响区的组织和性能，由此提出了冶金焊接性和热焊接性的概念。

(1) 冶金焊接性。冶金焊接性是指熔焊高温下的熔池金属与气相、熔渣等相互之间发生冶金反应所引起的焊接性变化。这些冶金过程包括：合金元素的氧化、还原、蒸发，从而影响焊缝的化学成分和组织性能；氧、氢、氮等的溶解、析出对生成气孔或对焊缝性能的影响。除材料本身化学成分和组织性能的影响之外，焊接材料、焊接方法、保护气体等对冶金焊接性有重要的影响。除了在研制新材料时可以改善冶金焊接性之外，还可以通过发展新焊接材料、新焊接工艺等途径来改善冶金焊接性。

(2) 热焊接性。焊接过程中要向接头区域输入很多热量，对焊缝附近区域形成加热和冷却过程，这对靠近焊缝的热影响区的组织性能有很大影响，从而引起热影响区硬度、强度、韧性、耐蚀性等的变化。

与焊缝金属不同，焊接时热影响区的化学成分一般不会发生明显的变化，而且不能通过改变焊接材料来进行调整，即使有些元素可以由熔池向熔合区或热影响区粗晶区扩散，那也是很有限的。因此，母材本身的化学成分和物理性能对热焊接性具有十分重要的意义。工业上大量应用的金属或合金，对焊接热过程有反应，会发生组织和性能的变化。

为了改善热焊接性，除了选择母材之外，还要正确选定焊接方法和热输入。例如，在需要减少焊接热输入时，可以选用能量密度大、加热时间短的电子束焊、等离子弧焊等方法，并采用热输入小的焊接参数以改善热焊接性。此外，焊前预热、缓冷、水冷、加冷却垫板等工艺措施也都可以影响热焊接性。

## (二) 影响焊接性的因素

影响焊接性的四大因素是材料、设计、工艺及服役环境。材料因素包括

钢的化学成分、冶炼轧制状态、热处理、组织状态和力学性能等。设计因素是指焊接结构的安全性，它不但受到材料的影响，而且在很大程度上还受到结构形式的影响。工艺因素包括施工时所采用的焊接方法、焊接工艺规程（如焊接热输入、焊接材料、预热、焊接顺序等）和焊后热处理等。服役环境因素是指焊接结构的工作温度、负荷条件（动载、静载、冲击等）和工作环境（化工区、沿海及腐蚀介质等）。

### 1. 材料因素

材料因素包括母材本身和使用的焊接材料，如焊条电弧焊时的焊条、埋弧焊时的焊丝和焊剂、气体保护焊时的焊丝和保护气体等。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。母材或焊接材料选用不当时，会造成焊缝成分不合格、力学性能和其他使用性能降低，甚至导致裂纹、气孔、夹渣等焊接缺陷，也就是使工艺焊接性变差。因此，正确选用母材和焊接材料是保证焊接性良好的重要因素。

### 2. 设计因素

对体积和重量有要求的焊接结构，设计中应选择强度较高的材料，如轻合金材料，以达到缩小体积、减轻重量的目的。对体积和重量无特殊要求的焊接结构，选用强度等级较高的材料也有其技术经济意义，不仅可减轻结构自重，节约大量钢材和焊接材料，避免大型结构吊装和运输上的困难，而且能承受较高的载荷。

焊接接头的结构设计会影响应力状态，从而对焊接性产生影响。设计结构时应使接头处的应力处于较小的状态，能够自由收缩，这样有利于减小应力集中和防止焊接裂纹。接头处的缺口、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。不必要的增大母材厚度或焊缝体积，会产生多向应力，也应避免。

### 3. 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。例如，铝及其合金用气焊较难进行焊接，但用氩弧焊就能取得良好的效果；钛合金对氧、氮、氢极为敏感，用气焊和焊条电弧焊不可能焊好，而用氩弧焊或电子束焊就比较容易焊接。

焊接方法对焊接性的影响，首先表现在焊接热源能量密度、温度以及热量输入上，其次表现在保护熔池及接头附近区域的方式上，如渣保护、气体保护、渣—气联合保护以及在真空中焊接等。对于有过热敏感性的高强度钢，从防止过热出发，可选用窄间隙气体保护焊、脉冲电弧焊、等离子弧焊等，有利于改善其焊接性。

工艺措施对防止焊接缺陷,提高接头使用性能有重要的作用。最常见的工艺措施是焊前预热、缓冷和焊后热处理,这些工艺措施对防止热影响区淬硬变脆、减小焊接应力、避免氢致冷裂纹等都是较有效的措施。合理安排焊接顺序也能减小应力和变形,原则上应使被焊工件在整个焊接过程中尽量处于无拘束而自由膨胀和收缩的状态。焊后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。

#### 4. 服役环境

焊接结构的服役环境多种多样,如工作温度高低、工作介质种类及辐射、载荷性质等都属于环境条件。高温工作的焊接结构,要求材料具有足够的高温强度,良好的化学稳定性与组织稳定性,较高的蠕变强度等;常温下工作的焊接结构,要求材料在自然环境下具有良好的力学性能;工作温度低或载荷为冲击载荷时,要特别注意材料在最低环境温度下的性能,尤其是韧性,以防止发生低温脆性破坏。焊接结构根据其服役情况的不同,可能承受不同的静载荷、疲劳载荷、冲击载荷等。对承受动载荷的构件,要求材料有较好的动态断裂韧性和吸振性。工作介质有腐蚀性时,要求焊接区具有耐腐蚀性。在核辐照环境下工作的焊接结构,由于中子辐射的作用,会导致材料屈服点提高、塑性下降、脆性转变温度升高、韧性下降,使材料呈现明显的辐照脆性。使用条件越不利,焊接性就越不易保证。

总之,焊接性与材料、设计、工艺和服役环境等因素有密切关系,人们不可能脱离这些因素而简单地认为某种材料的焊接性好或不好,也不能只用某一种指标来概括某种材料的焊接性。因此,为了分析和解决焊接性问题,必须根据焊接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,避免各种焊接缺陷的产生。

## 任务二 焊接性试验的内容及评定原则

### (一) 焊接性试验的内容

从获得完整的和具有一定使用性能的焊接接头出发,针对材料的不同性能特点和不同的使用要求,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

热裂纹是一种经常发生又危害严重的焊接缺陷,热裂纹的产生与母材和焊接材料有关。焊缝熔池金属在结晶时,由于存在S、P等有害元素(如形成低熔点的共晶物)并受到较大热应力作用,可能在结晶末期产生热裂纹,这

是焊接中必须避免的一种缺陷。焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力常常被作为衡量金属焊接性的一项重要内容。通常通过热裂纹敏感指数和热裂纹试验来评定焊缝的热裂纹敏感性。

#### 2. 焊缝及热影响区抵抗产生冷裂纹的能力

冷裂纹在合金结构钢焊接中是最为常见的缺陷，这种缺陷的发生具有延迟性并且危害很大。在焊接热循环作用下，焊缝及热影响区由于组织、性能发生变化，加之受焊接应力作用以及扩散氢的影响，可能产生冷裂纹（或延迟裂纹），这也是焊接中必须避免的严重缺陷。焊缝及热影响区抵抗产生冷裂纹的能力常被作为衡量金属焊接性的重要内容。一般通过间接计算和焊接性试验来评定冷裂纹敏感性。

#### 3. 焊接接头抗脆性断裂的能力

由于受焊接冶金反应、热循环、结晶过程的影响，可能使焊接接头的某一部分或整体发生脆化（韧性急剧下降），尤其对在低温条件下使用的焊接结构影响更大。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，经冶金反应、结晶、固态相变等过程，焊接接头由于受脆性组织、硬脆的非金属夹杂物、热应变时效脆化、冷作硬化等作用，发生所谓的焊接接头脆性转变。所以焊接接头抗脆性断裂（或抗脆性转变）的能力也是焊接性试验的一项内容。

#### 4. 焊接接头的使用性能

根据焊接结构使用条件对焊接性提出的性能要求来确定试验内容，包括力学性能和产品要求的其他使用性能，如不锈钢的耐腐蚀性、低温钢的低温冲击韧性、耐热钢的高温蠕变强度或持久强度等。此外，厚板钢结构要求抗层状撕裂性能，就须做 $Z$ 向拉伸或 $Z$ 向窗口试验，以测定钢材抗层状撕裂的能力；某些低合金钢需要做再热裂纹试验、应力腐蚀试验等。

## （二）评定焊接性的原则

评定焊接性的目的主要包括：一是评定焊接接头产生工艺缺陷的倾向，为制订合理的焊接工艺提供依据；二是评定焊接接头能否满足结构使用性能的要求。目前现有的焊接性试验方法已经有许多种，随着技术的发展及要求的提高，焊接性试验方法还会不断地增加。选择已有的或设计新的焊接性试验方法应符合下述的原则。

（1）可比性。焊接性试验条件应尽可能接近实际焊接时的条件，只有在这样有可比性的情况下，才有可能使试验结果比较确切地反映实际焊接结构的焊接性本质。试验条件相同时，试验结果才有可比性。

（2）针对性。所选择或自行设计的试验方法，应针对具体的焊接结构制

订试验方案，其中包括母材、焊接材料、接头形式、接头应力状态、焊接工艺参数等。同时试验条件还应考虑到产品的使用条件。国家或国际上已经颁布的标准试验方法，应优先选择，并严格按标准的规定进行试验。还没有建立相应标准的，应选择国内外同行中较为通用的或公认的试验方法。这样才能使焊接性试验具有良好的针对性，试验结果才能比较确切地反映出实际生产中可能出现的问题。

(3) 再现性。焊接性试验的结果要稳定可靠，具有较好的再现性。实验数据不可过于分散，否则难以找出变化规律和导出正确的结论。应尽量减少或避免人为因素对试验结果的影响，多采用自动化及机械化的操作方法。如果试验结果很不稳定，数据很分散，就很难找到规律性，更不可能用于指导生产。

(4) 经济性。在符合上述原则并可获得可靠的试验结果的前提下，应力求做到消耗材料少、加工容易、试验周期短，以节省试验费用。此外，在考虑试验成本的同时，还应考虑材料加工、焊接难易程度的不同对产品整体制造费用的影响。

### (三) 焊接性评定方法分类

#### 1. 模拟类方法

这类焊接性评定方法一般不需要进行实际焊接，只是利用焊接热模拟装置，模拟焊接热循环，人为制造缺口或电解充氢等，估计材料焊接过程中焊缝或热影响区可能发生的组织性能变化和出现的问题，为制订合理的焊接工艺提供依据。这类方法的优点是节省材料和加工费用，试验周期也比较短，而且可以将接头内某一区域局部放大，使有些因素独立出来，便于分析研究和寻求改善焊接性的途径。因为很多条件被简化，这类方法与实际焊接相比有一些差别。

#### 2. 实焊类方法

这类方法是比较直观地将施焊的接头甚至产品在使用条件下进行各种性能试验，以实际试验结果来评定其焊接性。这类方法的特点在于要在一定条件下进行焊接，通过实焊过程来评价焊接性。试验方法主要有：裂纹敏感性试验、焊接接头的力学性能试验、低温脆性试验、断裂韧性试验、高温蠕变及持久强度试验等。

较小的焊接构件可以直接用产品做试验，在生产条件下进行焊接，然后检查焊接接头是否产生裂纹等缺陷，然后再进行力学性能或其他使用要求的试验。大型焊接构件只能对“焊接试样”进行试验，即使用一定形状尺寸的



试板在规定的条件下进行试验,然后再做各种检测项目。属于这类评定方法的焊接性试验很多,一般都规定了严格的试验条件,可针对不同的材料和产品类型进行选择,例如:

(1) 焊接冷裂纹试验。常用的有斜 Y 形坡口对接裂纹试验、插销试验、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、压板对接 (FISCO) 焊接裂纹试验等。

(3) 再热裂纹试验。常用的有斜 Y 形坡口再热裂纹试验、H 形拘束试验、插销式再热裂纹试验等。

(4) 层状撕裂试验。常用的有 Z 向拉伸试验、Z 向窗口试验等。

(5) 应力腐蚀裂纹试验。有 U 形弯曲试验、缺口试验等。

### 3. 理论分析和计算类方法

(1) 利用物理性能分析。材料的熔点、热导率、线膨胀系数、密度和热容量等,都会对焊接热循环、熔化结晶、相变等产生影响,从而影响焊接性。例如,铜、铝等热导率高的材料,熔池结晶快,易于产生气孔;而热导率低材料(如钛、不锈钢等),焊接时温度梯度陡,应力大,易导致变形大,特别是线膨胀系数大的材料,接头的应力增大和变形将更加严重。

(2) 利用化学性能分析。与氧亲和力强的材料(如铝、镁、钛等)在焊接高温下极易氧化,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焊接等,有时焊缝背面也需要保护。例如,钛的化学活性很强,对氧、氮、氢等气体元素很敏感,吸收这些气体后,力学性能显著降低,特别是韧性急剧降低,因此要严格控制氧、氮、氢对焊缝及热影响区的污染。

(3) 利用状态图或 SHCCT 图分析。合金状态图和焊接连续冷却组织转变图 (SHCCT) 反映了焊接热影响区从高温连续冷却时,热影响区显微组织和室温硬度与冷却速度的关系。利用状态图和热影响区 SHCCT 图可以方便地预测热影响区组织、性能和硬度变化,预测某种钢焊接热影响区的淬硬倾向和产生冷裂纹的可能性。同时也可以作为调整焊接热输入、改进焊接工艺(焊前预热和焊后热处理等)的依据。

(4) 利用经验公式计算。这是一类在生产实践和科学研究的基础上归纳总结出来的理论计算方法。这类评定方法一般不需要焊出焊缝,主要是根据材料或焊缝的化学成分、金相组织、力学性能之间的关系,联系焊接热循环过程,加上考虑其他条件(如接头拘束度、焊缝扩散氢含量等),然后通过一定的经验公式进行计算,评估冷裂纹、热裂纹、再热裂纹的倾向,确定焊接性优劣以及所需要的焊接条件。由于是经验公式,这些方法的应用是有条件