

职业技术·职业资格培训教材

# 电 焊 工

(高 级)

主 编 芮树祥  
审 稿 简润富

中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

电焊工：高级/芮树祥主编. —北京：中国劳动社会保障出版社，2004

职业技术·职业资格培训教材

ISBN 7 - 5045 - 4387 - X

. 电... . 芮... . 电焊 - 焊接工艺 - 技术培训 - 教材 . TG443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 121170 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码：100029)

出版人：张梦欣

\*

新华书店经销

××××厂印刷 ××××装订厂装订

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 472 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

印数： 册

定价：32.00 元

读者服务部电话：010 - 64929211

发行部电话：010 - 64911190

出版社网址：<http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话：010 - 64911344

## 内 容 简 介

本书由劳动和社会保障部教材办公室、上海市职业培训指导中心依据上海1+X职业技能鉴定考核细目——电焊工（高级）组织编写。本书从强化培养操作技能，掌握一门实用技术的角度出发，较好地体现了本职业当前最新的实用知识与操作技术，对于提高从业人员基本素质，掌握高级电焊工的核心内容与技能有直接的帮助和指导作用。

本书在编写中摒弃了传统教材只注重系统性、理论性和完整性的编写方法，而是根据本职业的工作特点，以培养学生能力，掌握实用操作技能为根本出发点，采用了模块化的编写方式。主要内容包括：焊接接头的性能和焊接性试验、焊接接头力学性能试验和质量检验、焊接接头金相和耐腐蚀试验及焊条质量测定、异种金属及特殊金属焊接、典型金属结构焊接、高效焊接技术、焊接结构生产。每一模块着重介绍相关专业理论知识与专业操作技能，使理论与实践得到有机地结合。

为便于读者掌握本教材的重点内容，教材每单元后附有模拟测试题及答案，用于检验、巩固所学知识与技能。

全书由芮树祥主编，简润富审稿。

本书用于电焊工（高级）职业技能培训与鉴定考核教材，也可供全国中等职业学校学生学习、掌握先进高级电焊工知识与技术，或企业开展高级技能人才鉴定考核培训、岗位培训使用。

# 前 言

职业资格证书制度的推行，对广大劳动者系统地学习相关职业的知识和技能，提高就业能力、工作能力和职业转换能力有着重要的作用和意义，也为企业合理用工以及劳动者自主择业提供了依据。

随着我国科技进步、产业结构调整以及市场经济的不断发展，特别是加入世界贸易组织以后，各种新兴职业不断涌现，传统职业的知识和技术也愈来愈多地融进当代新知识、新技术、新工艺的内容。为适应新形势的发展，优化劳动力素质，上海市劳动和社会保障局在提升职业标准、完善技能鉴定方面做了积极的探索和尝试，推出了 1 + X 的鉴定考核细目和题库。1 + X 中的 1 代表国家职业标准和鉴定题库，X 是为适应上海市经济发展的需要，对职业标准和题库进行的提升，包括增加了职业标准未覆盖的职业，也包括对传统职业的知识 and 技能要求的提高。

上海市职业标准的提升和 1 + X 的鉴定模式，得到了国家劳动和社会保障部领导的肯定。为配合上海市开展的 1 + X 鉴定考核与培训的需要，劳动和社会保障部教材办公室、上海市职业培训指导中心联合组织有关方面的专家、技术人员共同编写了职业技术·职业资格培训系列教材。

职业技术·职业资格培训教材严格按照 1 + X 鉴定考核细目进行编写，教材内容充分反映了当前从事职业活动所需要的最新核心知识与技能，较好地体现了科学性、先进性与超前性。聘请编写 1 + X 鉴定考核细目的专家，以及相关行业的专家参与教材的编审工作，保证了教材与鉴定考核细目和题库的紧密衔接。

职业技术·职业资格培训教材突出了适应职业技能培训的特色，按等级、分模块单元的编写模式，使学员通过学习与培训，不仅能够有助于通过鉴定考核，而且能够有针对性地系统学习，真正掌握本职业的实用技术与操作技能，从而实现我会做什么，而不只是我懂什么。每个模块单元所附模拟测试

题和答案用于检验学习效果，教材后附本级别的知识模拟试卷和技能模拟试卷，使受培训者巩固提高所学知识与技能。

本教材虽结合上海市对职业标准的提升而开发，适用于上海市职业培训和职业资格鉴定考核，同时，也可为全国其他省市开展新职业、新技术职业培训和鉴定考核提供借鉴或参考。

新教材的编写是一项探索性工作，由于时间紧迫，不足之处在所难免，欢迎各使用单位及个人对教材提出宝贵意见和建议，以便教材修订时补充更正。

劳动和社会保障部教材办公室  
上海市职业培训指导中心

# 目 录

---

第一单元 焊接接头的性能和焊接性试验 .....	( 1 )
第一节 焊接接头的基本知识 .....	( 1 )
第二节 焊接接头焊接性试验 .....	( 20 )
模拟测试题 .....	( 45 )
模拟测试题答案 .....	( 48 )
第二单元 焊接接头力学性能试验和质量检验 .....	( 50 )
第一节 焊接接头力学性能试验 .....	( 50 )
第二节 焊接工艺评定 .....	( 62 )
第三节 焊缝表面质量检验 .....	( 68 )
第四节 焊缝内部质量检验 .....	( 72 )
模拟测试题 .....	( 81 )
模拟测试题答案 .....	( 85 )
第三单元 焊接接头金相和耐腐蚀试验及焊条质量测定 .....	( 87 )
第一节 金相试验的分类和耐腐蚀试验 .....	( 87 )
第二节 焊条质量测定 .....	( 91 )
第三节 耐压试验和致密性试验 .....	( 97 )
模拟测试题 .....	( 100 )
模拟测试题答案 .....	( 103 )
第四单元 异种金属及特殊金属的焊接 .....	( 104 )
第一节 异种金属焊接概述 .....	( 104 )
第二节 异种钢的焊接 .....	( 110 )
第三节 异种金属的焊接 .....	( 143 )
第四节 特殊金属的焊接 .....	( 158 )
模拟测试题 .....	( 176 )
模拟测试题答案 .....	( 182 )

---

第五单元 典型金属结构的焊接 .....	(186)
第一节 压力容器的焊接 .....	(186)
第二节 梁、柱的焊接 .....	(220)
模拟测试题 .....	(237)
模拟测试题答案 .....	(240)
第六单元 高效焊接技术 .....	(244)
第一节 高效焊接的特点和种类 .....	(244)
第二节 高效焊条电弧焊 .....	(251)
第三节 二氧化碳气体保护焊 .....	(258)
第四节 埋弧自动焊 .....	(298)
模拟测试题 .....	(315)
模拟测试题答案 .....	(317)
第七单元 焊接结构生产管理 .....	(320)
第一节 焊接结构生产工艺规程 .....	(320)
第二节 焊接时间定额 .....	(323)
第三节 焊接材料定额 .....	(334)
模拟测试题 .....	(338)
模拟测试题答案 .....	(339)

---

# 第一单元 焊接接头的性能和焊接性试验

---

## 第一节 焊接接头的基本知识

### 一、焊接接头的组成和类型

#### 1. 焊接接头的组成

将两个焊件用焊接方法连接的接头称为焊接接头。它由焊缝、熔合区、热影响区及其邻近的母材组成。焊接接头在焊接结构中按其连接的方式主要有两方面的作用：一是将被焊的工件连接成一个整体，起连接作用。它是一种焊缝与被焊工件串联的接头，焊缝承受传递全部载荷，焊缝一旦断裂，整个结构就会立即失效，这种接头中的焊缝被称为承载焊缝；二是将两个被焊工件用并联的接头连接成一个整体，起传力作用，即传递被焊工件所承受的载荷，使焊缝承受很小的载荷，焊缝一旦断裂，整个结构不会立即失效，这种接头中的焊缝被称为联系焊缝。

#### 2. 焊接接头的类型

焊接接头的种类和形式很多，可按所采用的焊接方法、接头组成形式及坡口形状、焊缝类型等来分类。根据所采用的焊接方法不同，焊接接头可分为熔焊接头、压焊接头和钎焊接头三大类。按照常用的焊接方法来分类，焊接接头有焊条电弧焊接头、埋弧焊接头、气体保护焊接头、电渣焊接头等，这类接头都属于熔焊接头。

熔焊接头的基本类型只有 5 种，即对接接头、T 形（十字）接头、搭接接头、角接接头和端接接头，如图 1—1 所示。

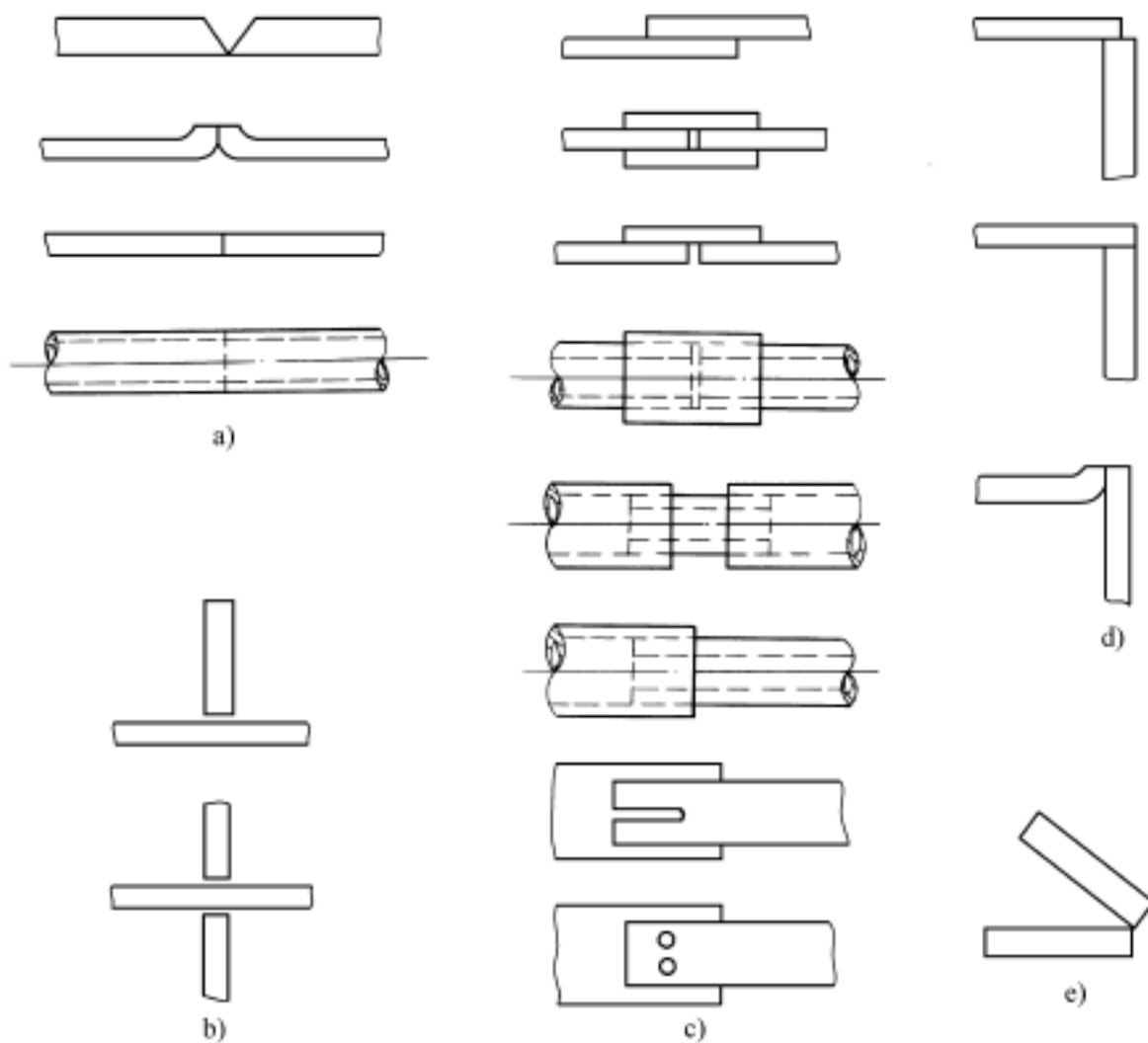


图 1—1 焊接接头的基本类型

a) 对接接头 b) T 形（十字）接头 c) 搭接接头 d) 角接接头 e) 端接接头

(1) 对接接头。对接接头是将两被焊工件处在同一平面上焊接起来形成的接头。对接接头从受力的角度看与其他接头类型相比是比较理想的接头形式，它的受力状况较好，应力集中程度较小。对接接头的焊缝需要传递全部载荷，因此要求接头为全熔透焊缝。焊接不同板厚或壁厚的对接接头时，为了保证焊接质量、减少焊接变形和焊接材料消耗，焊前要把被焊工件的对接边缘加工成各种形式的坡口，进行坡口对接焊。对于板厚小于 3 mm 的薄板对接接头，可将对接边缘加工成单边卷边或双边卷边的接头；对于板厚大于 3 mm 的板材对接接头，根据不同板厚和焊接方法的要求，可加工成 I、V、X、U 形和双 V、双 U 形的坡口形式。

(2) T 形（十字）接头。这种接头是把互相垂直的被焊工件用角焊缝连接起来的接头。这种接头有不开坡口和开坡口两类。不开坡口的 T 形及十字接头通常不要求焊透，通过焊脚尺寸的大小来适应传递载荷的大小。开坡口的 T 形及十字接头根据是否焊透来

选择坡口的形状和尺寸。

(3) 搭接接头。搭接接头是把两被焊工件部分地重叠在一起或加上专门的搭接件，用角焊缝或塞焊、槽焊缝连接起来的接头。由于搭接接头的受力状态很不理想，对于承受动载的接头不宜采用。

(4) 角接接头。角接接头是两被焊工件端面间构成大于  $30^\circ$ 、小于  $135^\circ$  夹角的接头，一般为  $90^\circ$  夹角。

(5) 端接接头。端接接头是两被焊工件重叠放置或两被焊工件之间夹角小于  $30^\circ$  在端部进行连接的接头。这种接头通常用于密封。

## 二、焊接时加热过程的组织变化

焊接接头的组织分布和性能，与焊接热循环的温度分布和作用时间以及冷却条件有密切关系。而这些热作用对焊接接头的组织性能有如此重要的影响，主要是与焊接条件下的金属相变规律有关。从基本原理上来讲，它与热处理条件下的相变是一致的，即新相的形成也是通过生核和核长大的两个过程。相变过程的动力，也是取决于系统的热力学条件，也就是取决于新相与母相的自由能之差。但由于焊接过程具有加热温度高、加热速度快、高温停留时间短、自然条件下连续冷却以及局部受热等特点，就必然使组织转变有着与热处理不同的规律。由此可见，焊接时完全根据金属学热处理的理论去解决焊接接头的组织性能，进行焊接规范和工艺的制定，并不能完全令人满意，必须根据焊接热循环的特点，建立焊接条件下的金属学理论才能得出正确的结论。

### 1. 焊接加热时的组织转变特点

在热处理条件下，一般加热速度是比较缓慢的，且可以在任何温度下进行保温。但在焊接时，加热的速度很快，各种金属的相变温度发生很大的变化。由于所采用的焊接方法和焊接规范不同，其加热速度也可能在很大范围内变化。对于低碳钢和低合金钢焊接时，不同的焊接方法的加热速度见表 1—1。

表 1—1 不同焊接方法的加热速度

焊接方法	板厚 (mm)	加热速度 $H$ ( $^\circ\text{C}/\text{s}$ )
焊条电弧焊 (含 TIG 焊)	5 ~ 1	200 ~ 1 000
单层自动埋弧焊	25 ~ 10	60 ~ 200
电渣焊	200 ~ 50	3 ~ 20

大量试验结果证实，加热的速度越快，被焊金属的相变点  $A_{c1}$  和  $A_{c3}$  的温度越高，则  $A_{c1}$  和  $A_{c3}$  间的距离越大。表 1—2 所列数据为加热速度对相变温度的影响。从表中可以看出，若钢中含有较多的形成碳化物合金元素时（例如 18Cr2WV），随着加热速度的提高，相变点  $A_{c1}$  和  $A_{c3}$  有更显著的提高。其原理可从金属学原理得知，钢被加热时，其珠光体、铁素体转变为奥氏体的过程是扩散性重结晶过程，也就是要有孕育期。在连续加热条件

下, 奥氏体必定要在一定的温度范围内形成。当加热速度很快时, 来不及在较低的温度下完成扩散过程所需的孕育期, 必然会引起相变温度的提高。如图 1—2 所示, 随加热速度  $A, B, C$  的逐次增加, 则所形成奥氏体的开始温度  $T_b$ 、结束温度  $T_c$ 、残余碳化物溶解终止温度  $T_s$  以及奥氏体均质化完成温度  $T_h$  都逐次有所提高。

对于含有碳化物合金元素 ( $V, Ti, Nb, W, Mo, Cr$  等) 的钢, 其加热速度对相变温度的影响更大, 则是由于碳化物合金元素的扩散速度小 (比碳小 1 000 ~ 10 000 倍), 同时它们本身还阻碍碳的扩散速度, 因而大大地减慢了奥氏体的转变过程。

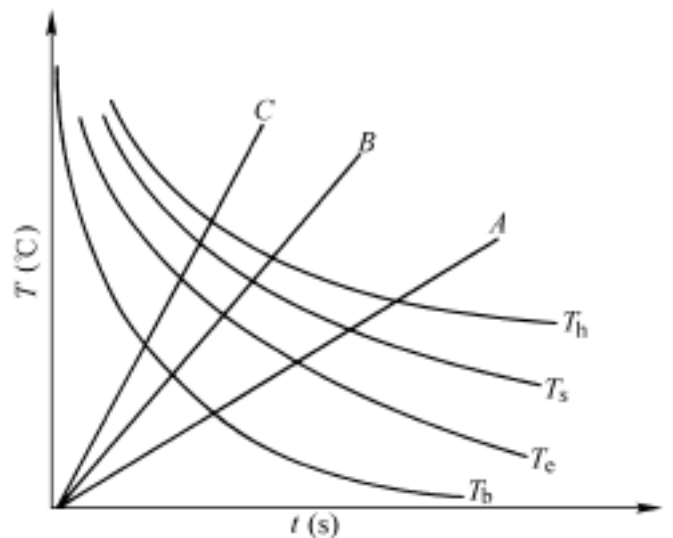


图 1—2 加热速度对相变温度的影响

表 1—2 加热速度对相变温度的影响

钢种	相变点	平衡状态 (°C)	加热速度 (°C/s), (700°C ~ 1 000°C)			
			3	30	300	1 400
45	$A_{c1}$	725	780	790	800	840
	$A_{c3}$	770	820	830	860	935
23Mn	$A_{c1}$	735	750	770	795	840
	$A_{c3}$	800	810	850	890	920
18Cr2WV	$A_{c1}$	710	800	870	920	1 000
	$A_{c3}$	810	860	930	1 000	1 150

加热速度除对相变温度有影响外, 对已形成的奥氏体进行均质化过程也具有重要影响。而在焊接过程中, 奥氏体均质化过程进行的程度, 也直接影响焊接接头的组织和性能。

根据焊接时相变过程进行的动力学原理, 奥氏体均质化的过程分为: 在  $A_{c3}$  以上开始加热和冷却两个阶段。

在  $A_{c3}$  以上开始加热的阶段, 此时奥氏体在成分上和组织上是不均匀的, 从进行显微硬度的试验结果表明, 其数值十分分散。随着加热速度的提高和在相变温度以上停留的时间越短, 这种情况就越显著。这仍然可以用碳的扩散过程来解释, 加热速度快和相变温度以上停留时间短, 不利于碳的扩散, 因此均质化进行的程度差。

在冷却阶段, 均质化的过程逐渐减弱。应当指出, 冷却到较低温度, 碳的扩散能力显著减弱, 均质化的过程也显著减弱。可以看出, 冷却时的均质化过程进行的程度与加热过程所遗留的均质化程度密切相关。如果在加热过程中已造成了很差的均质化, 那么在冷却时, 时间再长也不能达到很高的均质化程度。而在加热过程中就已达到了较高的均质化

时，则冷却时就可以获得更高均质的焊接接头。

## 2. 焊接条件下近缝区的晶粒长大

在焊接条件下，近缝区由于强烈的过热而使晶粒发生严重长大现象，不仅影响焊接接头的塑性，同时也增大了产生焊接裂纹的倾向。为此，掌握焊接条件下晶粒长大问题是十分必要的。

(1) 奥氏体晶粒长大的机理。我们知道，奥氏体晶粒的大小决定了钢由奥氏体状态冷却后存在于钢中的实际晶粒大小。奥氏体晶粒长大的动力是热力学条件，根据金属学原理，当由珠光体向奥氏体开始转变的初期，温度增高时，一方面使扩散速度增加；另一方面也使过热度增大。这样可使形成临界核的尺寸减小，因而也使晶粒的形成功减小。因此，提高温度将使奥氏体的生核率和长大速度同时增大，但是生核率比长大速度增长得快。

通过实验，利用快速加热，提高转变温度的办法来研究奥氏体的生核率与长大速度的关系。由表 1—3 中的数据可以看出，当转变温度由 740℃ 提高到 800℃ 时，生核率增加了 270 倍，而长大速度只增加 82 倍。这就是说，随着过热度的增加，则奥氏体的初始晶粒变小，即随着加热速度的增加，初始晶粒的尺寸变小。当形成了具有初始晶粒的奥氏体之后，随着温度的提高和保温时间的加长，奥氏体晶粒就开始长大，即进行聚集再结晶的过程。另外，晶粒长大还要经过一段孕育期才能开始，孕育期随温度的升高而急剧缩短。温度越高，奥氏体的长大越严重，最后得到的晶粒也越粗大。

表 1—3 过热温度对奥氏体的生核率和长大速度的影响

转变温度 (℃)	过热温度 (℃)	生核率 (晶核数/ (mm <sup>3</sup> ·s))	长大速度 (mm/s)	转变 50% 所需时间 (s)
740	17	2 280	0.000 5	100
760	37	11 000	0.01	9
780	57	51 500	0.026	3
800	77	616 000	0.041	1

焊接条件下，由于近缝区的温度很高，如低碳钢和低合金钢可达 1 300℃ ~ 1 400℃，故对奥氏体晶粒长大创造了良好的条件。

(2) 焊接条件下的晶粒长大及其影响因素。在焊接条件下，奥氏体晶粒不但在加热过程中长大，而且在冷却过程中也在长大。在钢的化学成分一定的条件下，焊接时影响奥氏体晶粒长大的因素主要是加热的最高温度和在  $A_{c3}$  以上停留的时间。

低合金钢采用不同的焊接方法单层对接焊时，近缝区 (1 350℃) 在 900℃ 以上停留的时间见表 1—4。

由于加热的最高温度  $T_m$  很高，所以  $A_{c3}$  以上停留的时间  $t_1 + t_2$  都是晶粒长大的阶段。但随着被焊金属化学成分、焊接方法和焊接线能量的不同，则晶粒长大的程度也是不一样的。如图 1—3 所示，即为焊条电弧焊、埋弧自动焊和电渣焊时，对晶粒长大的不同影响。

三条热循环曲线的最高温度  $T_m$  均为  $1\ 300\ ^\circ\text{C} \sim 1\ 350\ ^\circ\text{C}$ 。

表 1—4 低合金钢单道焊时近缝区热循环参数

板厚 (mm)	焊接 方法	焊接线能量 $E$ (J/cm)	900℃ 时 的加热速度 $H$ (°C/s)	900℃ 以上的 停留时间 $t_H$ (s)		冷却速度 $c$ (°C/s)	
				加热时 $t$	冷却时 $t$	900℃	550℃
1	钨极氩弧焊 (对接不开坡口)	840	1 700	0.4	1.2	240	60
2		1 680	1 200	0.6	1.8	120	30
3	埋弧自动焊 (对接不开坡口)	3 780	700	2.0	5.5	54	12
5		7 140	400	2.5	7	40	9
10		19 320	200	4.0	13	22	5
15	埋弧自动焊 (60°V 形坡口)	42 000	100	9.0	22	9	2
25		105 000	60	25.0	75	5	1

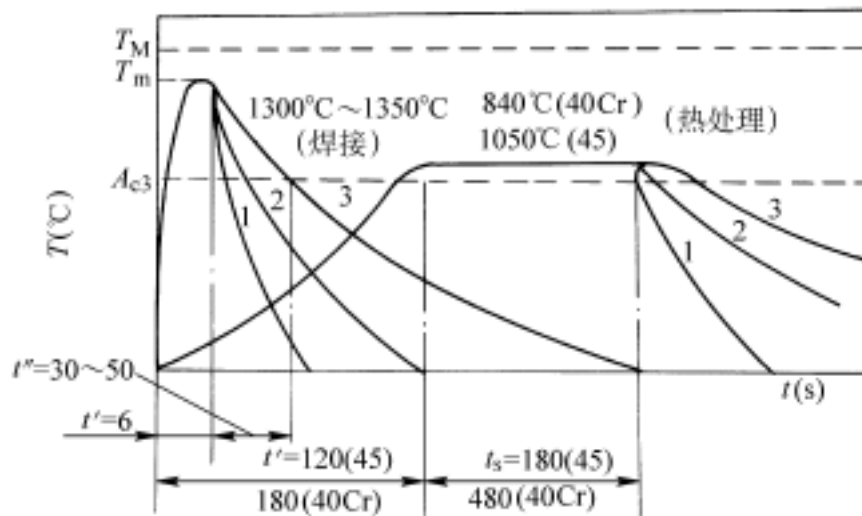


图 1—3 不同焊接方法对晶粒长大的影响

1—焊条电弧焊 ( $d = 100\ \text{mm}$ ) 2—埋弧自动焊 ( $d = 15 \sim 25\ \text{mm}$ ) 3—电渣焊 ( $d = 100 \sim 300\ \text{mm}$ )

图中曲线 1 是用焊条电弧焊时的热循环曲线。其特点是加热速度快，而  $A_{c3}$  以上停留时间 ( $t + t'$ ) 短，平均只有 20 s 左右，因此，晶粒长大不严重 ( $d = 0.1 \sim 0.3\ \text{mm}$ )。

曲线 2 是埋弧自动焊的热循环曲线。此时  $t + t'$  为 30 ~ 100 s，晶粒长大很快 ( $d = 0.3 \sim 0.4\ \text{mm}$ )，同时均质化的程度也较高些。

曲线 3 是电渣焊时的热循环曲线。此时  $t + t'$  为 600 ~ 2 000 s，晶粒严重地长大 ( $d = 0.4 \sim 0.6\ \text{mm}$ )。

由此可见，电渣焊时由于晶粒严重长大，焊后必须对焊接接头进行正火处理，否则将引起冲击韧度显著下降。

另外，钢中的化学成分对晶粒长大也有明显的影响，一般钢中含有钼、钒、铌、钨、锆、钡等元素，形成的碳化物和氮化物以及阻止碳扩散的元素镍，都可以降低晶粒长大的

倾向。这是因为碳化物合金元素和镍在一般钢中会形成细小而分布均匀的难熔质点分布在晶界上，当加热时，它们机械地阻碍晶粒长大，只有加热到很高温度时，或者时间较长时，这些难熔的质点溶解在奥氏体之后，晶粒才会显著长大。至于形成较易溶解的铬碳化物对奥氏体晶粒长大的阻碍作用较小些。

总之，近缝区的奥氏体晶粒决定于焊件的化学成分、焊接工艺方法和焊接线能量。其中主要决定于加热的最高温度  $T_m$  和  $A_{c3}$  以上的停留时间 ( $t + t'$ )。在焊接条件下，近缝区奥氏体的晶粒度对钢冷却过程的相变，对焊后近缝区的性能有很大的影响。

### 三、焊接时冷却过程的组织转变

由于焊接条件下热影响区所经历的热过程与热处理条件下有显著的不同，因此冷却过程的组织转变也必然会有很大的差异。一般来讲，焊接热影响区的熔合线附近是整个焊接接头的薄弱地带，所以都是以该区的冷却过程组织转变作为主要研究对象。

现以 45 钢和 40Cr 钢为例，介绍在两种情况下的组织转变差异。焊接及热处理时，加热及冷却的过程见图 1—4。其中两种情况下的冷却曲线 1, 2, 3，彼此具有各自相同的冷却速度。

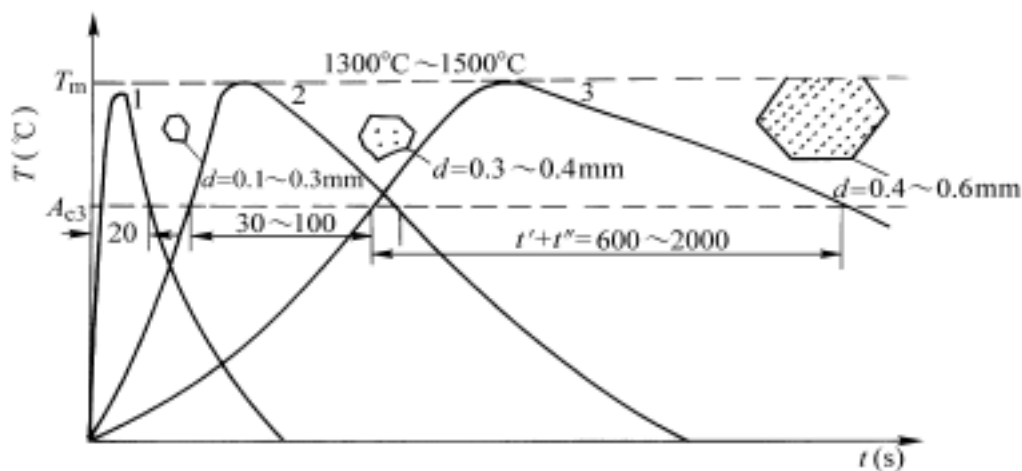


图 1—4 焊接及热处理时加热及冷却过程示意图

根据上述的实验条件，利用专用的焊接热模拟试验机和快速相变仪，可以得出两种钢在不同条件下，连续冷却的组织转变图（即 S 曲线），其中 45 钢在焊接条件下的 S 曲线比热处理条件下的 S 曲线向右移动。即在同样冷却条件下焊接比热处理的淬硬倾向大；相反，40Cr 钢在焊接条件下的 S 曲线比热处理条件下的 S 曲线向左移动，也就是在同样冷却速度下焊接比热处理的淬硬倾向小。这是由于形成碳化物的合金元素（如 Cr, Mo, V, Ti, Tb 等）只有它们充分溶解在奥氏体内部，才会增加奥氏体的稳定性（即增加淬硬倾向）。很明显，在热处理条件下，可以有充分的时间使形成碳化物的合金元素向奥氏体内部溶解。而在焊接条件下由于加热速度快，高温停留时间短，所以这些合金元素不能充分地溶解在奥氏体中，因此降低了淬硬倾向。

至于不含碳化物合金元素的钢（如 45 钢），一方面没有碳化物的溶解过程；另一方面在焊接条件下，由于近缝区的晶粒长大，故淬硬倾向比热处理条件下要大些。

表 1—5 所列为 45 钢和 40Cr 钢在焊接热处理时，相同冷却条件下的金相组织分布。

表 1—5 焊接热处理时相同冷却条件下的金相组织分布

钢种	冷却速度 ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )	金相组织 (%)		
		铁素体	珠光体及中间组织	马氏体
45	4	5 (10)	95 (90)	0 (0)
	18	1 (3)	9 (70)	90 (27)
	30	1 (1)	7 (30)	92 (69)
	60	0 (0)	2 (2)	98 (98)
40Cr	4	1 (0)	24 (5)	75 (95)
	14	0 (0)	10 (2)	90 (98)
	22	0 (0)	5 (0)	95 (100)
	36	0 (0)	0 (0)	100 (100)

注：1. 有 ( ) 号者为热处理时的金相组织百分数；

2. 中间组织包括：索氏体、托氏体和奥氏体。

根据上述分析，焊接条件下冷却过程中奥氏体转变的特点不仅与等温转变不同，也与热处理条件下连续冷却组织转变不同。因此，不能机械地利用热处理条件下组织转变规律来解决焊接情况下的问题。必须根据焊接热循环本身的特点，建立焊接条件下组织转变的理论。由于连续冷却组织转变图（即 SH—CCT 图）可以比较方便地预计焊接热影响区的组织和性能，它可作为预先估计焊接热影响区的组织性能，或作为制定工艺和焊接线能量的依据。但 SH—CCT 图的建立比较复杂，需要高精度的测试仪表和大量的试验工作。

图 1—5 所示是抗拉强度为 539 MPa 低合金高强度钢的模拟焊接热影响区连续冷却组织转变图（SH—CCT 图）。模拟加热的最高温度为 1 300  $^{\circ}\text{C}$ ，用不同的冷却速度可以得到不同的冷却曲线，也可用从 800  $^{\circ}\text{C}$  ~ 500  $^{\circ}\text{C}$  不同的冷却时间来表示。

如图中①、②、③、④等曲线。图中纵坐标表示温度，横坐标表示时间（对数值）。利用不同冷却曲线与 S 曲线相交的位置，就可以推算出冷却后所得的组织。以图中冷却最慢的曲线①为例，冷却到 a 点时（约 680  $^{\circ}\text{C}$ ）就从奥氏体中析出铁素体，到 b 点时（约 590  $^{\circ}\text{C}$ ）铁素体析出结束，并由 b 点开始珠光体转变，到 c 点时（520  $^{\circ}\text{C}$ ）转变结束。因此，按曲线①冷却后的组织应为铁素体和珠光体。

同样原理，冷却曲线在 ② 与 ③ 之间时，其组织为铁素体 + 珠光体 + 中间组织 + 马氏体；冷却曲线在 ③ 与 ④ 之间时，其组织为铁素体 + 中间组织 + 马氏体；冷却曲线在 ④ 与 ⑤ 之间时，其组织为中间组织 + 马氏体；而比曲线 ⑤ 更快的冷却速度，其组织仅有马氏体。

图 1—5 中  $C_z$ 、 $C_f$ 、 $C_p$  和  $C_e$  分别表示得到某种组织的临界冷却时间（800  $^{\circ}\text{C}$  ~ 500  $^{\circ}\text{C}$ ）。其中  $C_z$  为出现中间组织，即小于  $C_z$  时将全部得到马氏体； $C_f$  为出现铁素体； $C_p$  为出现珠光体；以及  $C_e$  为仅得到铁素体和珠光体。

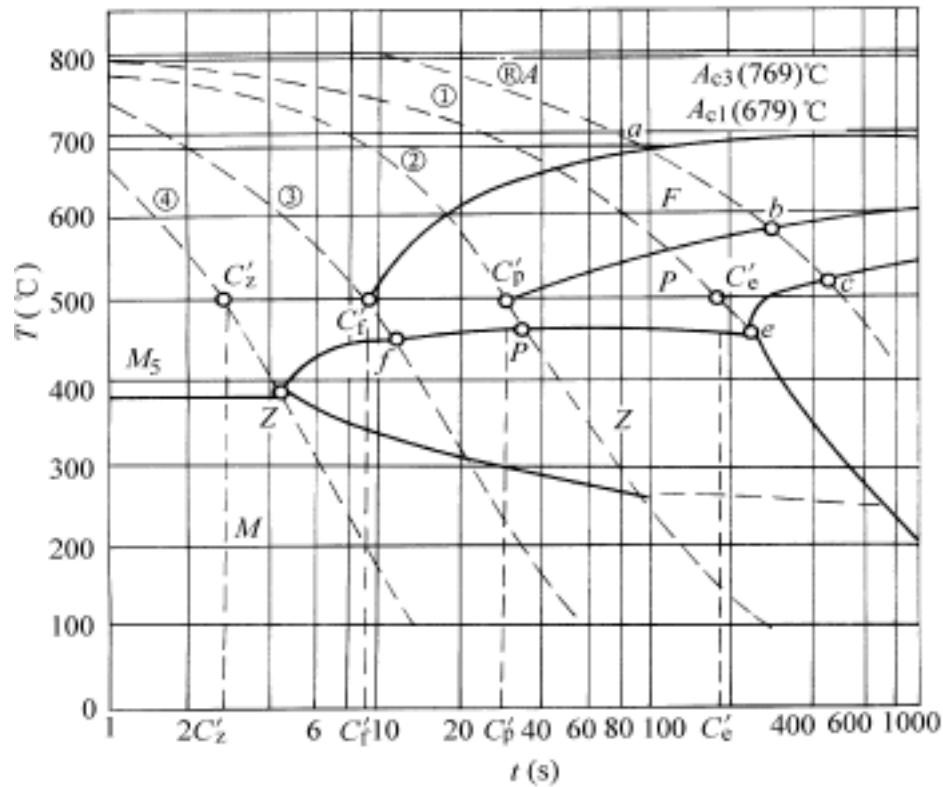


图 1—5 低合金高强度钢 ( $\sigma_b = 539 \text{ MPa}$ ) 的 SH—CCT 图  
( $T_m = 1300^\circ\text{C}$ ,  $t = 800^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  的冷却时间)

临界冷却时间  $C_z$ ,  $C_f$ ,  $C_p$  和  $C_e$  主要决定于钢种的化学成分。从降低淬硬倾向, 避免焊接延迟裂纹出发, 希望  $C_z$ ,  $C_f$  和  $C_p$  等冷却时间越短越好, 特别是  $C_z$  和  $C_f$  的大小是估计淬硬倾向的重要判据。大量实验证明, 钢种的碳当量越高, 则临界冷却时间越长, 也就是淬硬倾向越大, 这对于判断高强度钢的冷裂纹倾向具有重要意义。

但应当指出, 除钢种的化学成分外, 加热的最高温度  $T_m$  对临界冷却时间  $C_z$ ,  $C_f$ ,  $C_p$  和  $C_e$  也具有很大影响, 如图 1—6 所示, 随着加热最高温度的提高,  $C_z$ ,  $C_f$ ,  $C_p$  和  $C_e$  等临界冷却时间也随之增长, 但  $T_m = 1000^\circ\text{C}$  时, 温度再增高时, 则影响不大。

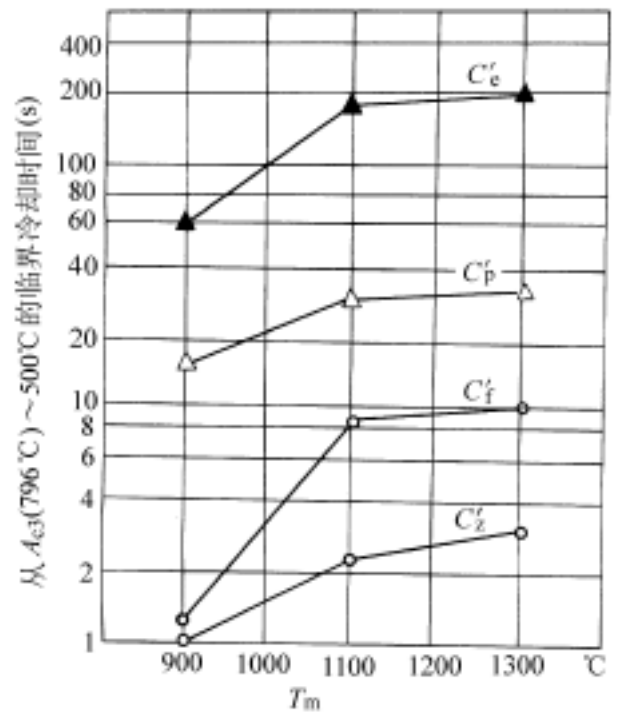


图 1—6 临界冷却时间 ( $C_z$ ,  $C_f$ ,  $C_p$  和  $C_e$ ) 与加热最高温度 ( $T_m$ ) 的关系

总之, 对于 SH—CCT 图的应用, 最重要的是根据不同冷却时间来确定热影响区的组织分布和硬度的变化。它可以间接判断焊接接头的性能和抗裂性, 从而能够根据在焊接条件下影响冷却时间的诸多因素, 如被焊金属的热物理性质和板厚、接头形式、焊前预热和焊后缓冷等, 来更合理地制定焊接工艺和选择焊接线能量。

#### 四、焊接热循环对焊接热影响区的组织和性能的影响

在焊接热源作用下，焊缝两侧发生组织和性能变化的区域称为热影响区或称近缝区。焊接热影响区的组织和性能与焊接热循环的温度分布、作用时间以及冷却条件有密切关系。而这些热的作用，对热影响区的组织和性能有如此重要的影响，主要是与焊接条件下的相变规律有关，也即这种组织转变的规律是研究热影响区性能的本质问题。下面以低碳钢或某些低合金钢为例进行分析。

##### 1. 焊接热影响区的组织分布

在工件热影响区上某点的加热速度、加热的最高温度、高温停留时间和随后的冷却速度决定了该点的组织和性能。由于近缝区上各点距离焊缝的远近不同，所以各点所经历的焊接热循环也不同，为此各点的组织也不一样。对于一般常用低碳钢和某些不易淬硬的低合金钢（16Mn, 15MnTi, 15MnV 等）来讲，在焊接热影响区根据其组织特征，又可分为熔合区、过热区、相变重结晶区（正火区）以及不完全重结晶区（见图 1—7）。

(1) 熔合区。熔合区又称半熔化区，位于焊缝金属与母材相邻的熔合线附近，其温度处于固液相之间。此区在化学成分、组织和性能上有较大的不均匀性，特别是异种金属焊接时，这种情况更为复杂。在靠近母材一侧的金属组织是处于过热组织，塑性很差。在各种熔化焊的条件下，这个区的范围虽然很窄，但对焊接接头的强度、塑性都有很大的影响。许多情况下，熔合区是产生裂纹、局部脆性破坏的发源地，因此引起了普遍的重视。

(2) 过热区。过热区的温度范围是处在固相线以下 1 100℃ 左右。此区的金属是处于过热状态，在此高温下，奥氏体晶粒发生严重长大，冷却后获得晶粒粗大的过热组织。在气焊和电渣焊条件下，甚至可得到魏氏组织。过热区的塑性很低，特别是冲击韧度通常要降低 20% ~ 30%。为此，当焊接刚度较大的结构时，常在过热区产生裂纹。过热区的大小与焊接方法、焊接规范及焊件的板厚等有关，气焊和电渣焊时比较宽；焊条电弧焊和埋弧自动焊时较窄。

(3) 正火区（相变重结晶区）。当金属被加热到  $A_{c3}$  以上稍高的温度时，金属将发生重结晶，即铁素体和珠光体全部转变为奥氏体，然后在空气中冷却，就会使金属晶粒得到均匀而细小的铁素体和珠光体，相当于热处理时的正火组织，故又称正火区。正火区的温

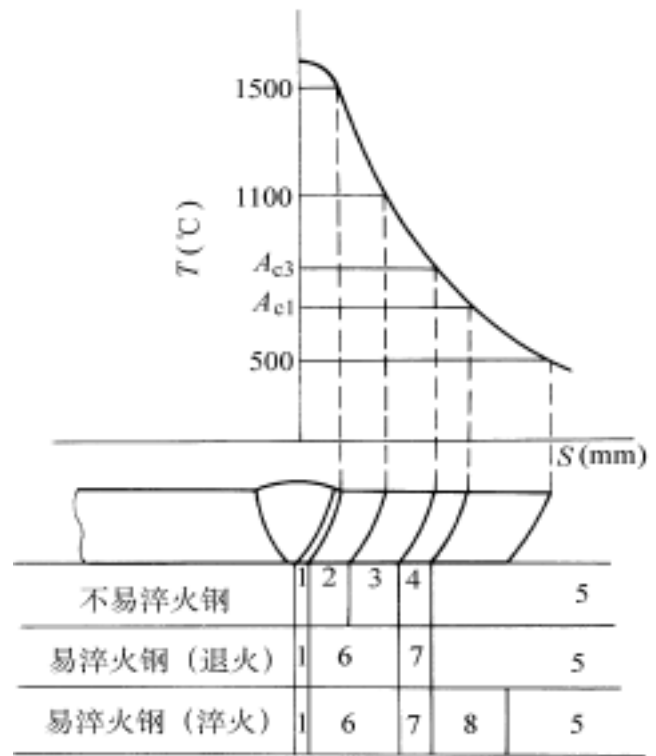


图 1—7 焊接热影响区分布  
1—熔合区 2—过热区 3—正火区 4—不完全重结晶区  
5—母材 6—淬火区 7—部分淬火区 8—回火区