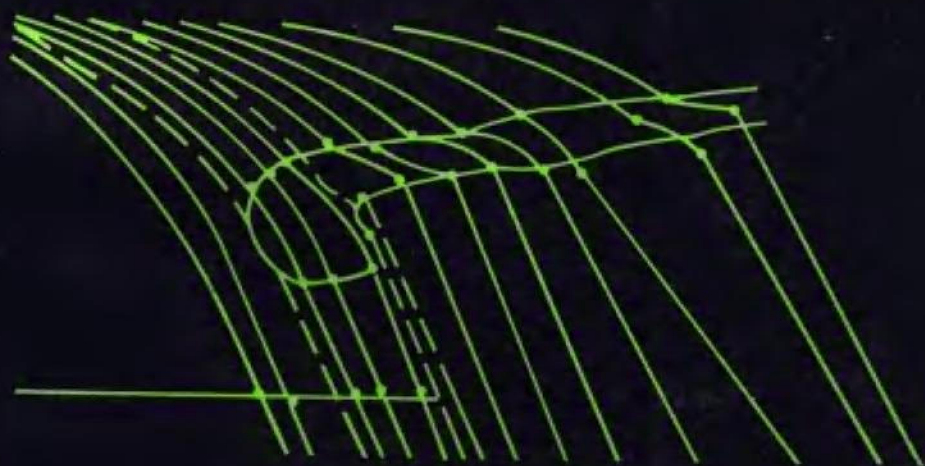


焊接连续冷却转变图 及其应用

顾钰熹 王宗杰 编
张文钺 审



机械工业出版社

焊接连续冷却转变图是焊接领域中重要的技术资料,它可用于间接地评定钢的焊接性和合理地确定焊接工艺规范,因此,在焊接生产和焊接研究中具有重要的实用价值和指导意义。

本书比较系统地阐述了焊接热影响区连续冷却转变图和焊缝金属连续冷却转变图的基本概念和表达形式、与热处理用 CCT图的区别、测定方法、影响因素以及工程应用等,并从大量国内外科技文献中收集、整理了 200 多幅焊接热影响区连续冷却转变图和几十幅焊缝金属连续冷却转变图。本书是一本工具书性质的书籍。

本书可供焊接专业的研究人员、工程技术人员、工人以及大、中专院校的教师、学生阅读和参考。

焊接连续冷却转变图及其应用

顾钰熹 王宗杰 编

张文钺 审

*

责任编辑:俞逢英 版式设计:吴静霞

封面设计:姚毅 责任校对:熊天荣

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)

(北京市书刊出版业营业许可出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张 14·字数 370千字

1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷

印数 0,001—2,400·定价:13.90元

*

ISBN 7-111-01402-2/TG·349

在编写过程中得到国家机械工业委员会哈尔滨焊接研究所、鞍山钢铁公司钢铁研究所等单位有关同志的大力支持，沈阳工业大学印刷厂姜明同志在照片的复制加工方面给予了很多帮助，主审作了详尽的审阅和校订加工，在此一并表示衷心的感谢。同时，向本书中所引用文献的作者深表谢意。

由于编者水平有限，书中疏漏和谬误在所难免，诚恳欢迎广大读者批评指正。

编者

1987年12月于沈阳工业大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
第二章 焊接热影响区 CCT 图的建立与应用	4
一、焊接热影响区 CCT 图的基本概念和表达形式	4
二、焊接热影响区 CCT 图与热处理 CCT 图的区别	12
三、焊接热影响区 CCT 图的测定和临界冷却时间的计算	19
四、影响焊接热影响区 CCT 图的因素	34
五、焊接热影响区 CCT 图的应用	94
第三章 焊缝金属 CCT 图的建立与应用	115
一、焊缝金属 CCT 图的基本概念和表达形式	115
二、焊缝金属 CCT 图的测定方法	127
三、影响焊缝金属 CCT 图的因素	132
四、焊缝金属 CCT 图的应用	136
第四章 焊接热影响区 CCT 图图谱	143
几点说明	143
一、碳素结构钢	146
二、低合金结构钢	160
三、合金结构钢	218
四、超高强度钢	355
五、低温钢	364
六、耐热钢	376
七、耐候钢	388
八、不锈钢	388
第五章 焊缝金属 CCT 图图谱	396
几点说明	396
一、Si-Mn 合金系统	398
二、C-Mn 合金系统	399

VI

三、Ni 合金系统	413
四、Cr-Mo合金系统	413
五、Ni-Cr-Mo 合金系统	413
六、Ni-Mo合金系统	422
七、Si-Mn-Ti 合金系统	422
八、Si-Mn-Ti-B 合金系统	422
九、Ni-Mo-Ti-V-Nb 合金系统	422
附录	429
一、主要元素符号对照表	429
二、摄氏与华氏温度换算表	430
参考文献及资料来源	432

第一章 绪 论

焊接连续冷却转变图（简称焊接 CCT 图），可以分为焊接热影响区连续冷却转变图（简称焊接热影响区 CCT 图）和焊缝金属连续冷却转变图（简称焊缝金属 CCT 图）两种。目前由于焊接热影响区 CCT 图应用比较广泛，一般焊接 CCT 图多指焊接热影响区 CCT 图。

焊接热影响区 CCT 图和焊缝金属 CCT 图，分别反映了某种钢材的焊接热影响区（一般指熔合线附近）和某种化学成分的焊缝金属在焊接条件下从高温连续冷却时，其微观组织和室温硬度与冷却速度的关系。这种关系对于分析在一定的焊接条件下焊接热影响区或焊缝金属的组织 and 性能以及合理地制定焊接工艺和规范有重要的指导意义。

焊接热影响区和焊缝金属的固相冶金是一种很复杂的过程。它是在焊接热源在极短的时间内对金属强烈局部加热，并引起温度不断地变化和应力、应变不断地变化的条件下进行的，因此它与钢在热处理过程中的固态相变有很大的不同。

从焊接热影响区（HAZ）来看，由于热源局部加热的结果，热影响区的温度分布很不均匀，其各点的最高加热温度包括了从金属的半熔化温度一直到稍高于常温的全部温度，其中熔合线附近温度最高。因此，一切可能的组织转变过程都必定会在焊缝附近的某些区域中发生，这样也就产生了显微组织的差异，使焊接热影响区存在着组织上的不均匀性和性能上的不均匀性〔1〕。

从焊接热影响区金属所经历的热循环来看，与热处理情况相比，两者也存在很大差异。图 1-1 是采用单道熔化焊，焊接厚度分别为 1、10、25 和 220mm 的低合金钢时，熔合线附近金属的热循环曲线与热处理时的热循环曲线的比较〔2〕。

由图中可以看出，两者最高加热温度显著不同，用炉子加热

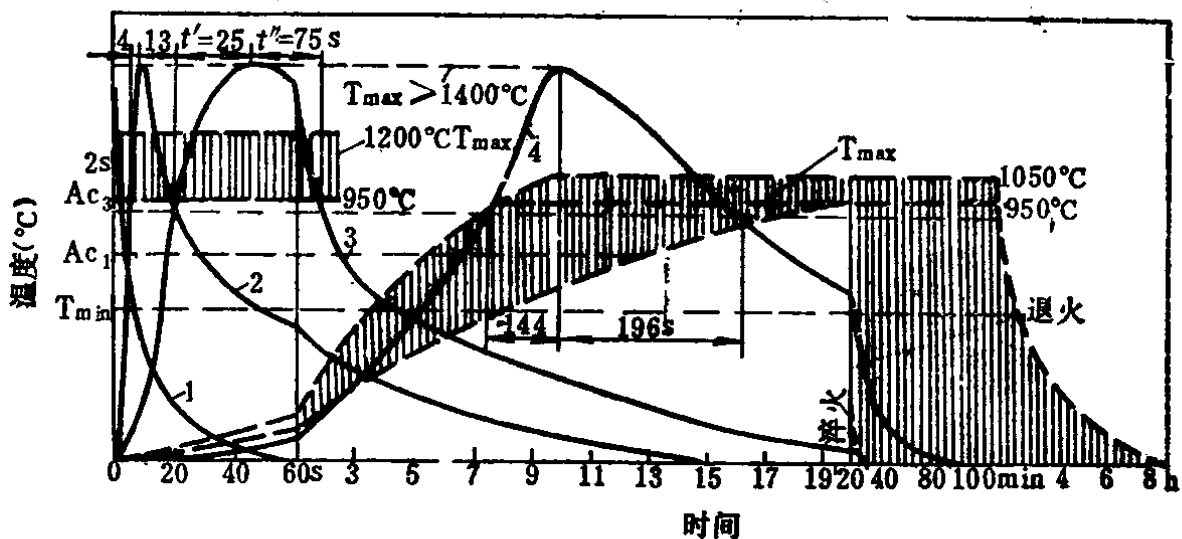


图1-1 焊接时（实线）与热处理时（虚线）热循环的比较

1—氩弧焊 $\delta = 1\text{mm}$ 2—埋弧焊 $\delta = 10\text{mm}$
 3—埋弧焊 $\delta = 25\text{mm}$ 4—电渣焊 $\delta = 220\text{mm}$

进行热处理时，最高加热温度 $T_{\max}$ 是 $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$ ，即不超过 $Ac_3 + 100\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，用高频加热进行热处理时，最高加热温度 $T_{\max}$ 被限制在 $950\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，而焊接热影响区熔合线附近金属的最高加热温度 $T_{\max}$ 接近熔点，可达 $1350\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 以上；在加热速度变化范围方面，当焊接 $1\sim 25\text{mm}$ 厚钢板时，熔合线附近金属在 $Ac_1\sim Ac_3$ 范围内的加热速度 W_H 为 $60\sim 1700^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，而用炉子热处理时，加热速度仅有 $0.1\sim 1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ；金属在 Ac_3 以上的高温停留时间 t_H ($t_H = t' + t''$) 也有显著差别，焊接时 t_H 很短，在焊接 $1\sim 25\text{mm}$ 厚钢板时，只有 $2\sim 100\text{s}$ ，而用炉子进行热处理时， t_H 长达几十分钟到几个小时；焊件一般都是在自然条件下冷却，个别情况下，焊后进行保温或焊后加热使冷却速度减慢，而热处理时可根据需要任意控制冷却速度。

根据金属学相变原理可以知道，上述热循环的参数对于奥氏体晶粒的尺寸、碳化物向奥氏体中的溶解以及奥氏体成分的均匀化程度都有很大影响，因此，必然导致对金属过冷奥氏体相变动力学和最终得到的微观组织及性能的影响。此外，焊接接头焊接时还受到应力、应变循环的作用，这也使其固态相变发生变化。

对焊缝金属来说，焊接时除了受到上述焊接热循环和应力、

应变循环的作用外，在过冷奥氏体发生转变之前，还一度发生熔化而又凝固过程，形成铸造组织。而且焊缝金属中一般含有比母材多的氧（主要以夹杂物的形式存在）、氮、氢等，这些也要影响金属过冷奥氏体的相变动力学。

由于焊接固态相变条件存在以上特点，因此促使焊接工作者对焊接条件下的组织转变规律进行研究。焊接连续冷却转变图正是在大量卓有成效的研究中取得的成果之一。焊接连续冷却转变图揭示了焊接热影响区和焊缝金属连续冷却时的固态相变规律，因此它的出现为我们研究焊接接头的固相冶金问题提供了一个重要手段。

焊接 CCT 图在国外研究与应用得较早。早在五十年代，美国 Rensselaer 工学院的 E. F. Nippes、苏联巴依柯夫冶金研究所的 M. X. Шопоров、日本名古屋大学的関口春次郎和日本国立材料技术研究所的稻垣道夫等人就开始对焊接热影响区 CCT 图进行研究，发展了各种测试装置，并制定了许多钢种的焊接热影响区 CCT 图〔2、3、4、5〕。其后，日本东京大学的木原博、挪威的 N. Christensen 等人研究制定了焊缝金属 CCT 图〔6、7〕。目前，国外已进入实际应用阶段。我国近些年来也开始制定出一些焊接用钢的焊接热影响区 CCT 图〔8、60〕。由于焊接 CCT 图是模拟焊接条件或实际施焊测定出来的，比较符合焊接的实际情况，现在已得到国内外普遍的重视。

第二章 焊接热影响区CCT图的建立与应用

一、焊接热影响区 CCT 图的基本概念和表达形式

焊接热影响区 CCT 图在有些文献中也称为焊接条件下钢的过冷奥氏体相变热力学曲线图^[10]。这种图在各个国家表达形式不尽相同，但其意义都相同。焊接热影响区 CCT 图是表征某种钢的焊接热影响区（一般是指熔合线附近）金属在各种连续冷却条件下，转变开始温度和终了温度、转变开始时间和终了时间以及转变的组织、室温硬度与冷却速度之间关系的曲线图。

常见的焊接热影响区 CCT 图如图 2-1 所示^[11]。图中，纵坐标以正常刻度表示温度，横坐标以对数刻度表示时间。A 表示奥氏体组织区域；F 表示铁素体组织转变区域；P 表示珠光体组织转变区域；Z_w 表示中间组织（即各种贝氏体类组织）转变区域；M 表示马氏体组织转变区域。曲线 $f-g$ 为从奥氏体开始析出铁素体的曲线； $p-q$ 为从奥氏体开始析出珠光体的曲线，同时也是铁素体析出结束曲线； $e-s$ 为从奥氏体析出珠光体结束曲线； $z-f-p-e$ 为从奥氏体析出中间组织的曲线，其中 $f-p$ 也是铁素体析出结束曲线， $p-e$ 也是珠光体析出结束曲线； $d-z-h$ 为马氏体开始转变曲线，其中 $z-h$ 也是中间组织转变结束曲线； M_f 线为马氏体转变结束曲线。曲线 R1~R21 是连续冷却曲线，它们分别表示以 A₁ 作为时间计算起点的不同冷却过程。在每条连续冷却曲线与组织转变终了线相交的地方标注了一些数字，分别表示在该冷却曲线的冷却条件下形成的这种组织在金属中所占的百分比。每条连续冷却曲线的末端还标注了在该冷却条件下金属在室温时的平均维氏硬度值。根据以上曲线和数据就可以判断在一定的焊接条件下，焊接热影响区某部位金属

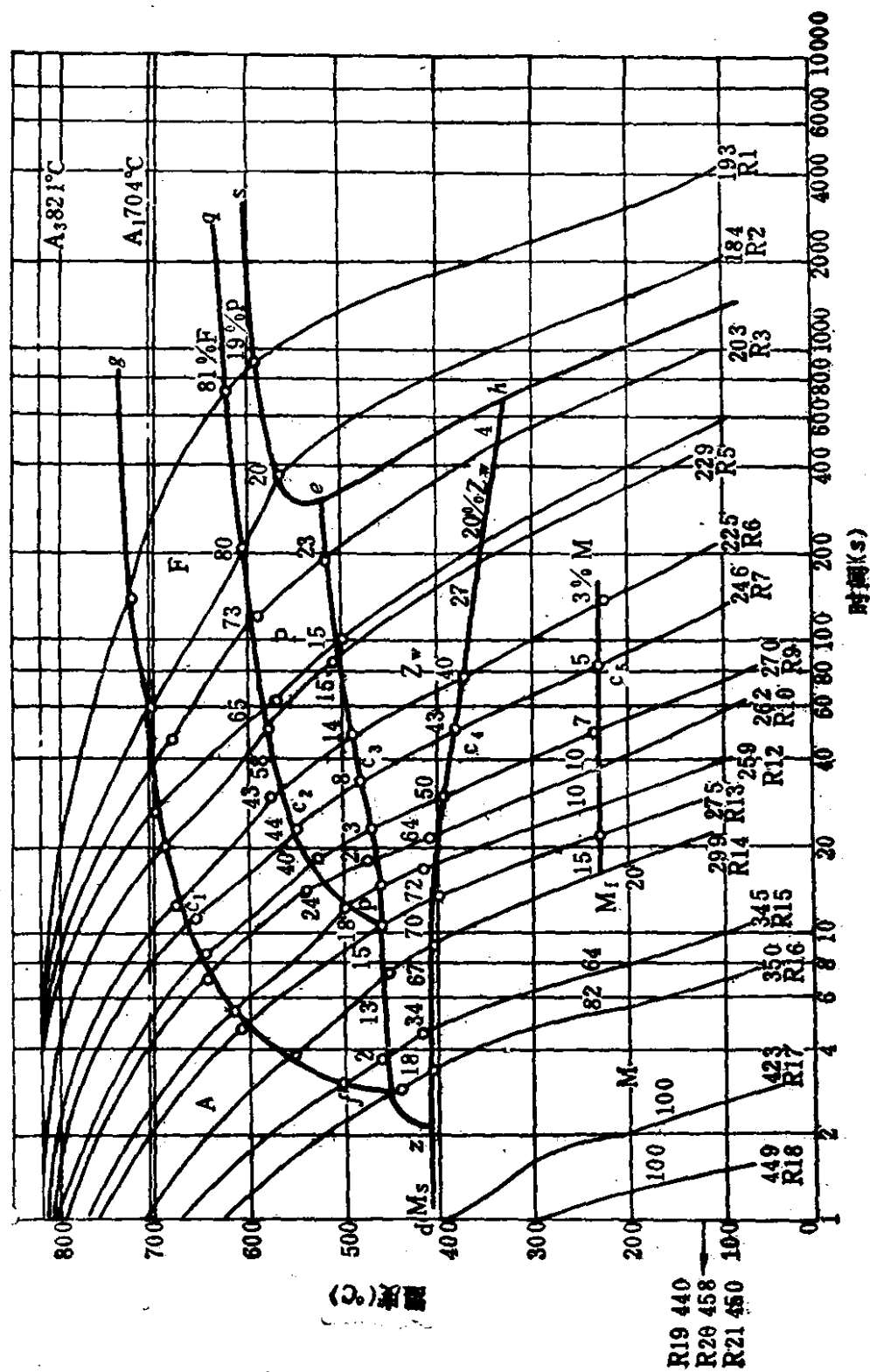


图2-1 成分相当于12Mn钢的焊接热影响区CCT图 ($T_{max} = 1350^{\circ}\text{C}$)

(一般指的是熔合线附近)经历了哪些组织转变,转变温度和转变温度范围以及在室温下转变产物的相对比例和平均硬度等。例如,成分相当于 12Mn 钢的焊接热影响区熔合线附近金属按图 2-1 中的 R7 曲线连续冷却时,当冷却到 c_1 点 (665°C) 时,奥氏体开始析出铁素体;当冷却到 c_2 点 (550°C) 时,铁素体析出结束,所占的比例是 44%,与此同时,奥氏体开始析出珠光体;当冷却到 c_3 点 (480°C) 时,珠光体析出结束,析出的珠光体比例是 8%,与此同时,奥氏体开始析出中间组织;到 c_4 点 (380°C),中间组织析出结束,析出的比例是 43%;在 c_4 点以下时,奥氏体开始向马氏体转变,到 c_5 点 (235°C),转变结束,马氏体所占的比例是 5%。因此,金属冷却到室温时,其微观组织的组成是 F 44%, P 8%, Z 43%, M 5%,其平均维氏硬度 HV 是 246。按冷却曲线 R2、R4、R7、R14、R15、R20 冷却到室温后形成的微观组织,见图 2-2。

作为判断焊接热影响区组织和性能的临界冷却条件的指标,一般是用热影响区金属从 A_3 (或 A_{c3}) 冷却到 500°C 时所需要的临界冷却时间或者经过 550°C 时的临界冷却速度来表示。前者为从 A_3 (或 A_{c3}) 相变点开始计算冷却到接近于 CCT 曲线鼻尖处的温度 (在最短时间内开始相变的温度) 的冷却时间。后者的 550°C 几乎与 CCT 曲线的鼻端处温度相对应。

图 2-3 给出的是成分相当于 12Mn 钢的临界冷却曲线和临界冷却时间 C'_1 、 C'_f 、 C'_p 、 C'_z 。其中:

C'_z ——表示从 A_3 冷却到 500°C 开始出现中间组织的临界冷却时间 (s);

C'_f ——表示从 A_3 冷却到 500°C 开始出现铁素体组织的临界冷却时间 (s);

C'_p ——表示从 A_3 冷却到 500°C 开始出现珠光体组织的临界冷却时间 (s);

C'_z ——表示从 A_3 冷却到 500°C 仅得到铁素体和珠光体组织的临界冷却时间 (s)。

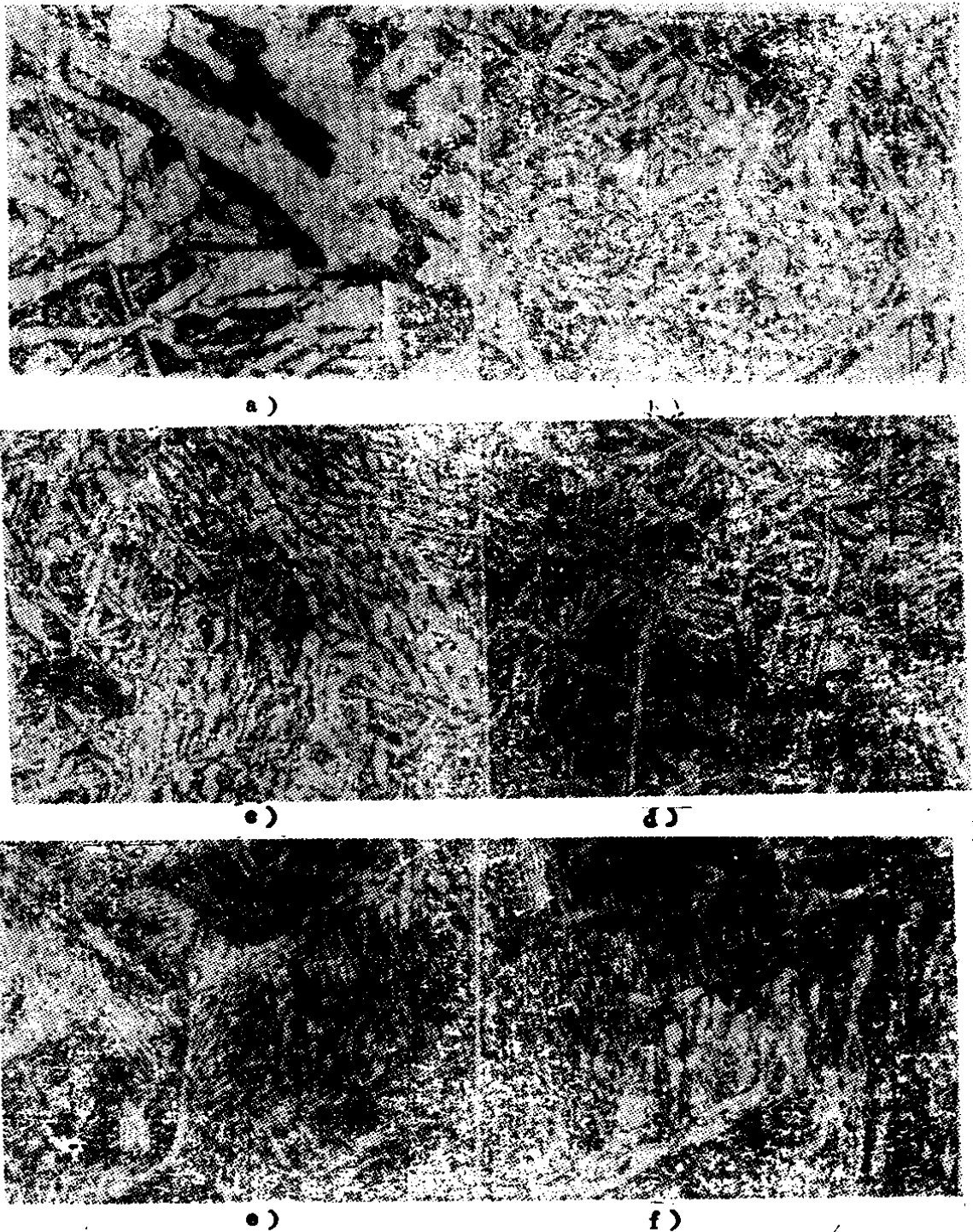


图2-2 在不同冷却条件下HAZ熔合线附近金属的显微组织 ($\times 500$)

- a) R2 F80%、P20%、184HV b) R4 F65%、P15% Z_w20%、216HV c) R7 F44%、P8%、Z_w43%、M5%、246HV d) R14 F13%、Z_w67%、M20%、299HV e) R15 F2% Z_w34% M64% 345HV f) R20 M100% 458HV

C'_z 、 C'_f 、 C'_p 、 C'_e 是由通过 z 、 f 、 p 、 e 诸点的临界冷却曲线与 500°C 等温线的交点 C_z 、 C_f 、 C_p 、 C_e 向时间坐标轴投影得到的时间值。这些特征值对于分析焊接热影响区的组织很有意

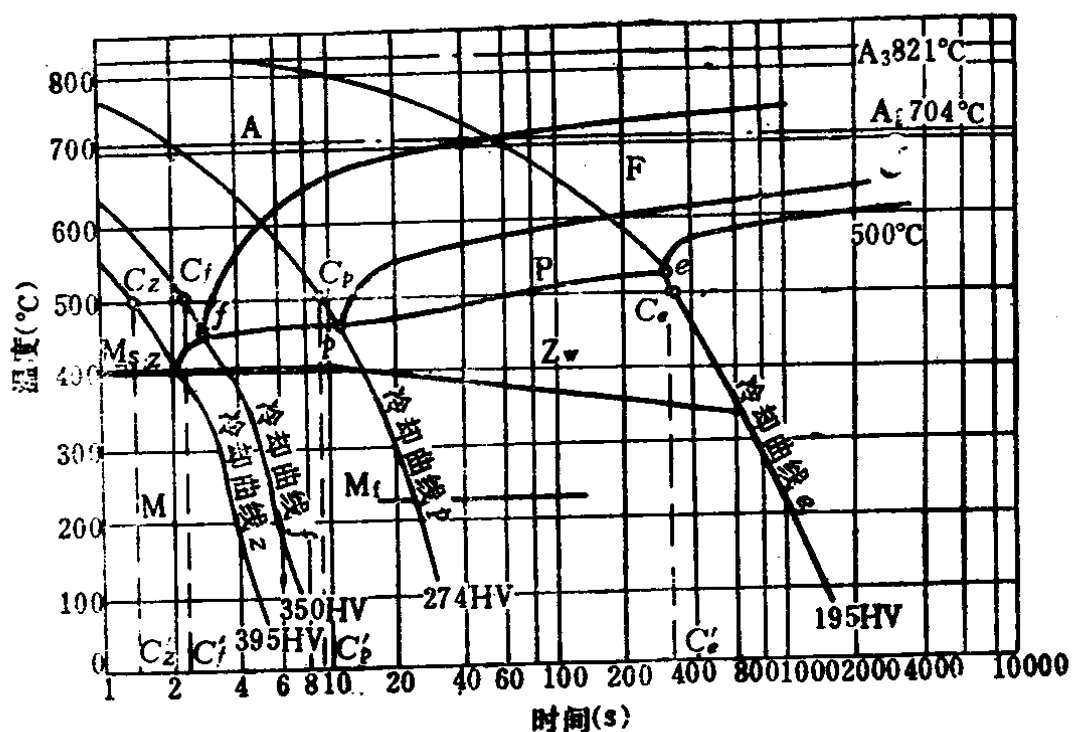


图2-3 临界冷却曲线和临界冷却时间

义。只要知道在实际焊接过程中焊接热影响区内所要研究部位的金属从 800°C (严格地讲应 A_3) 冷却到 500°C 的时间 t_s/s , 对照临界冷却时间, 就可以判断金属中所产生的微观组织。

以临界冷却速度作为判据的焊接热影响区 CCT 图, 如图2-4所示^[12]。图中 T_F 是铁素体开始转变的最低温度, T_P 是珠光体开始转变的最低温度, T_B 是贝氏体开始转变的最低温度 (即 M_s)。 t_F 、 t_P 、 t_B 分别表示从 A_{c_3} 冷却到铁素体、珠光体、贝氏体开始转变的最低温度点的时间。临界冷却速度有:

W_F ——表示开始出现铁素体的临界冷却曲线在 550°C 时的冷却速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$);

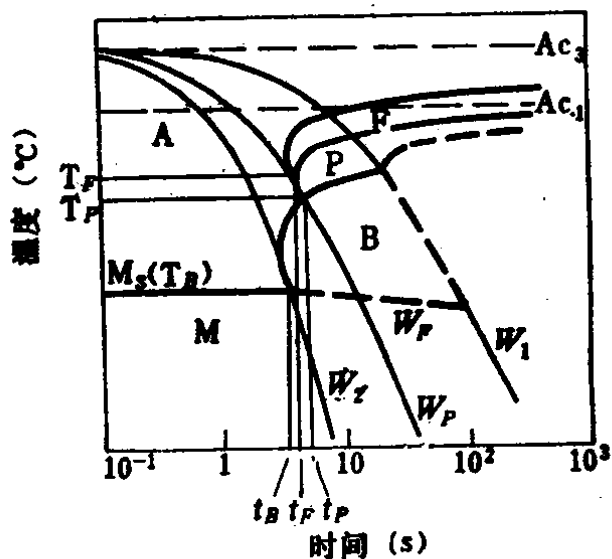


图2-4 以临界冷却速度做为判据的焊接热影响区 CCT 图 (第一种类型)

W_P ——表示开始出现珠光体的临界冷却曲线在 550°C 时的冷却速度($^{\circ}\text{C}/\text{s}$);

W_1 ——表示马氏体完全消失的临界冷却曲线在 550°C 时的冷却速度($^{\circ}\text{C}/\text{s}$);

W_2 ——表示开始出现贝氏体的临界冷却曲线在 550°C 时的冷却速度($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)。

其中 W_1 和 W_2 是两个重要的临界值, 因为当实际冷却速度 $W_{550^{\circ}\text{C}}$ 大于 W_1 时, 金属中开始出现马氏体组织, 而当 $W_{550^{\circ}\text{C}}$ 大于 W_2 时, 金属中将产生 100% 的马氏体组织。这两个临界值限定了开始产生淬硬组织马氏体和产生 100% 马氏体组织的冷却速度范围。

焊接热影响区 CCT 曲线的形状随钢材的不同而有差异。根据文献[12]作者的研究, 一般可分为三种类型:

第一种类型如图 2-4 所示。第二种类型如图 2-5 所示。这两种类型的 CCT 图

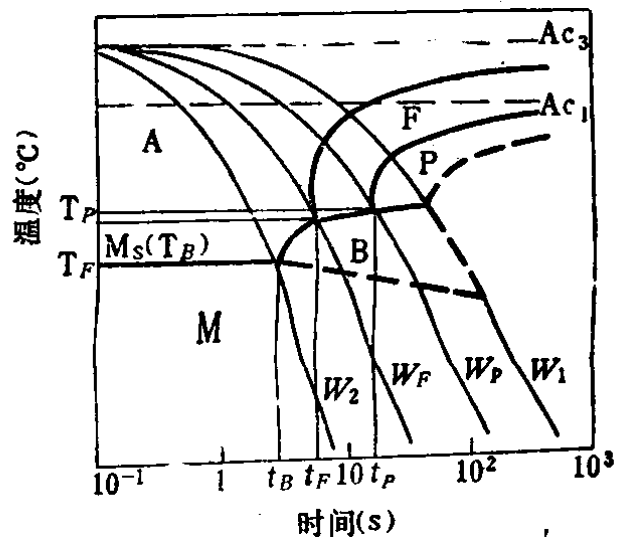


图2-5 第二种类型的焊接热影响区CCT图

扩散型转变区(即铁素体和珠光体转变区)与半扩散型转变区(即贝氏体转变区)和非扩散型转变区(即马氏体转变区)互不分离, 但是, 第一种类型 CCT 图的 $W_F > W_P$, 而第二种类型 CCT 图的 $W_F \approx W_P$ 。大多数碳素钢和低合金钢都有这样的特征。

第三种类型的焊接热影响区 CCT 图, 如图 2-6 所示。这类图的扩散型转变区与半扩散型转变区分离。一般含铬量比较高的钢如 18Cr2WV、20Cr2MoV、43Cr3SiNiMoVA、42Cr2MnSiNiMo 等都有这样的特征。

在许多资料中, 在给出该钢种的焊接热影响区连续冷却转变

图的同时, 往往还给出其组织 硬度图 (或组织图)。与图 2-1 相对应的组织硬度图示于图 2-7。在组织硬度图中, 横坐标表示从 A_s (或 A_{c3}) 冷却到 500°C 所需时间的对数值, 纵坐标有两个: 一个表示各种组织的百分比, 另一个表示平均维氏硬度值 HV_{10} 。图中曲线 I ~ III 为各种显微组织比例曲线, 曲线 HV_{10} 是载荷为 $10\text{kgf}^\ominus$ 的维氏硬度曲线。

组织硬度图是对焊接热影响区 CCT 图的一个补充。利用这种图虽然不能了解焊接热影响区金属组织转变的历程, 但是可以更加直观地了解在一定的冷却时间下组织的百分比和硬度值。

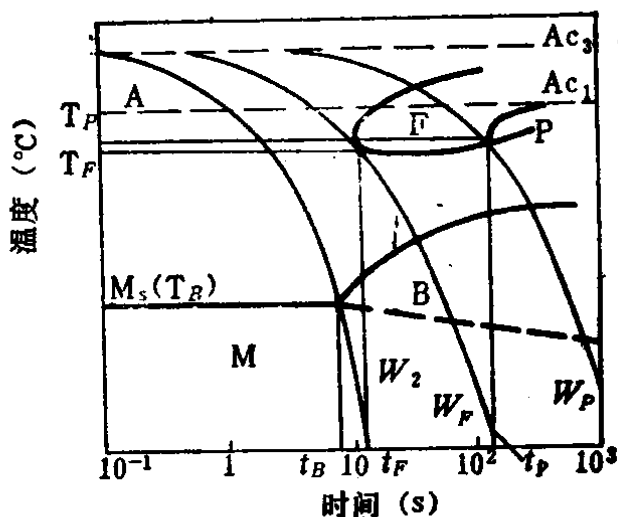


图2-6 第三种类型的焊接热影响区CCT图

上面介绍的以“温度 T -时间 t ”坐标表达的焊接热影响区CCT图是一种常规的表达式, 由于这种表达式与热处理条件下的 CCT 图基本相同, 两者便于比较, 而且由图可以清晰地反映出金属组织随时间变化而变化的过程, 因此是一种主要的表达式。

除此而外, 还有以“温度 T -时间 $t_{8/5}$ ”坐标表达的焊接热影响区 CCT 图, 其中一例见图 2-8 a [14]。在该图中, 用纵坐标表示温度 T , 用横坐标表示从 800°C 冷却到 500°C 的时间 $t_{8/5}$ 。这种表达形式的优点是, 由于焊接线能量是冷却时间 $t_{8/5}$ 的函数 (例如对于板厚 $\delta = 30\text{mm}$ 的钢板来说, 输入的线能量与冷却时间 $t_{8/5}$ 大约成正比关系), 热影响区 CCT 图与线能量曲线图 (图 2-8 b) 相配合, 可以直接用来指明焊接条件, 如板厚、线能量等。同时, 也能将硬度曲线 $HV = f(t_{8/5})$ 直接描进焊接热影响区 CCT 图中。

需要指出的是, 在以“温度 T -时间 t ”表达的一些热影响

$^\ominus$ $1\text{kgf} = 10\text{N}$, 下同。

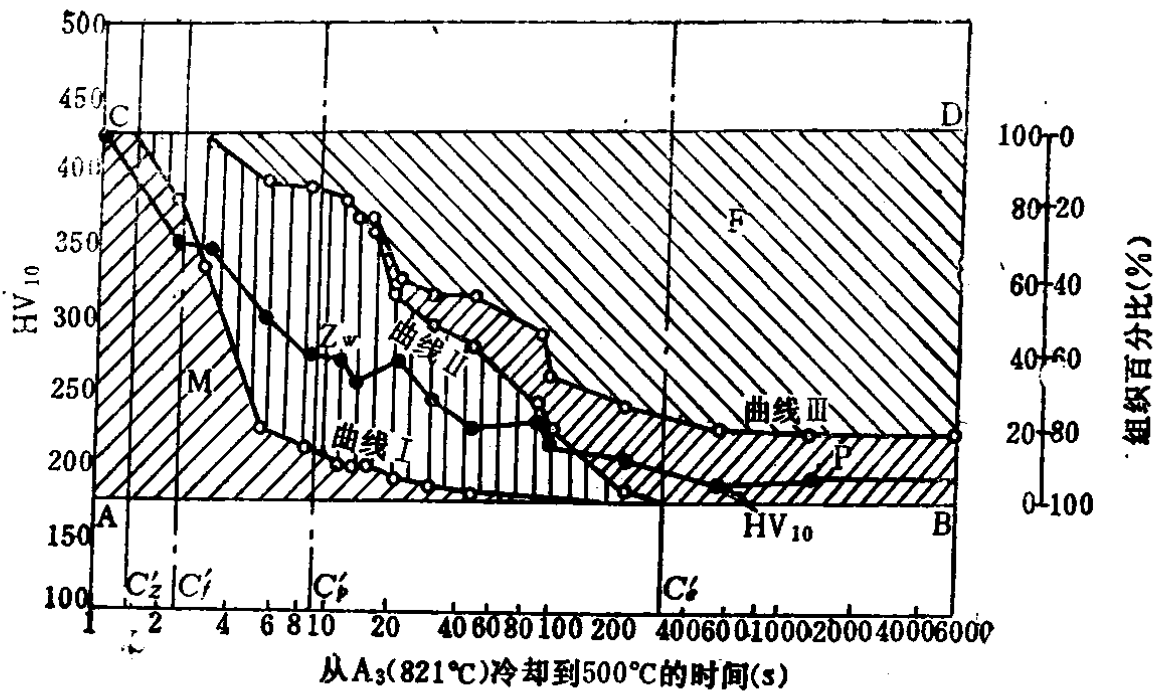
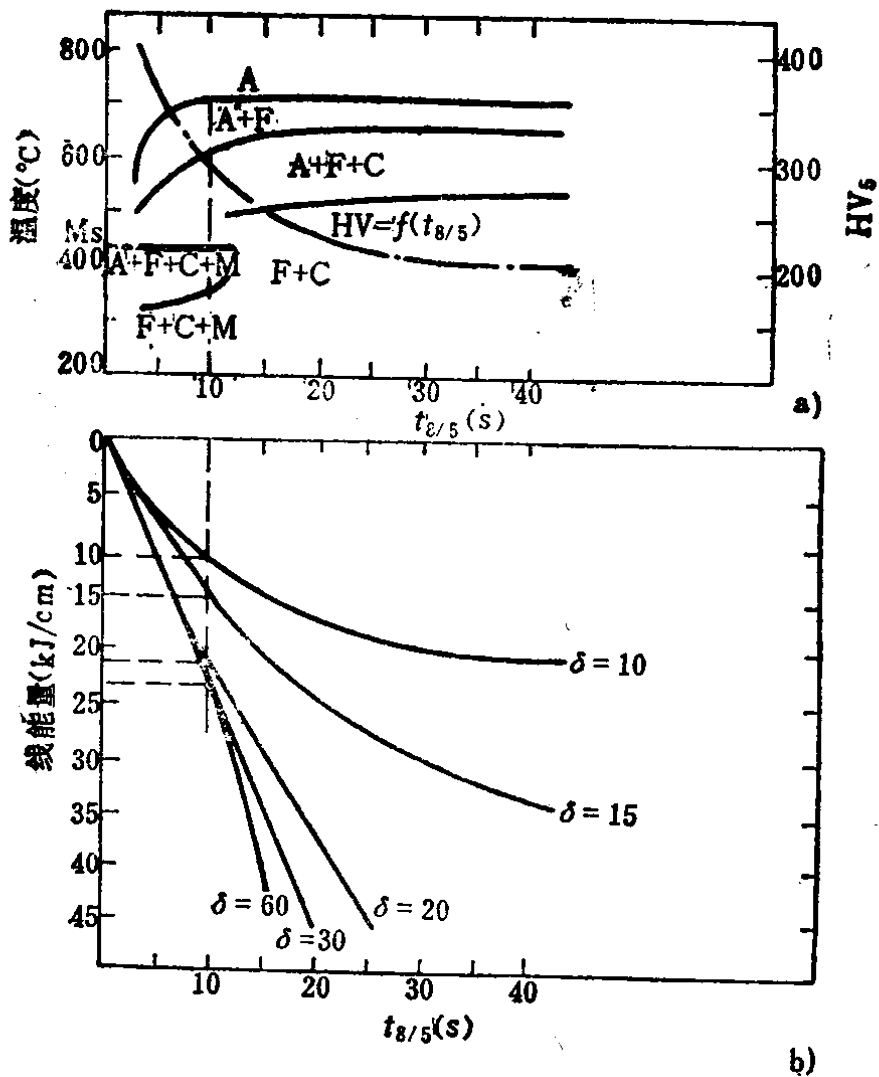


图2-7 组织硬度图

图2-8 用 $T-t_{8/5}$ 表达的焊接热影响区CCT图和线能量曲线图

(化学成分: C0.17%, Si0.17%, Mn1.08%)

 δ —试件厚度 (mm)

区 CCT 图中也有许多不同。如有的图温度坐标不采用摄氏温度，而采用华氏温度；大多数热影响区 CCT 图把 A_3 (或 A_{c3} 或 800°C) 温度时刻定为时间坐标轴的零点，而有的热影响区 CCT 图则把最高加热温度 (如 1350°C) 时刻定为时间坐标轴的零点，还有的图把 1000°C 时刻定为时间坐标轴的零点^[62]。在使用 CCT 图的时候，如果不注意这些差别，会得到完全错误的结果。

二、焊接热影响区 CCT 图与热处理 CCT 图的区别

焊接热影响区 CCT 图与热处理用 CCT 图的区别，首先在于焊接热影响区 CCT 图只适用于热影响区中的某一部分金属 (一般是熔合线附近)，并不能概括整个焊接热影响区组织的变化，而热处理用 CCT 图则不然，一种钢一般只需要一个 CCT 图即可。

如前所述，焊接热影响区的最高加热温度分布很不均匀，它包括了从金属的熔点一直到稍高于常温的全部温度，而且各点的热循环参数均不相同，因此，焊接时在热影响区的不同位置上进行的连续冷却组织转变过程是互不相同的。以亚共析碳钢为例，其热影响区中距熔合线 0 mm、1 mm、2 mm、3 mm 和 4 mm 处的焊接热影响区 CCT 图，如图 2-9 所示^[1]。这是一个三轴正交的立体图，它大致概括了随着距熔合线距离的增大，热影响区金属连续冷却组织转变行为发生的变化。图中距熔合线 0、1、2、3 和 4 mm 处的各点的热过程分别与图 2-10 中示出的第 0、1、2、3、4 号焊接热循环曲线相对应，距熔合线越近，其最高加热温度越高。

由图 2-9 可以看出在距熔合线 0 mm、1 mm 和 2 mm 这三处中，0 mm 处 (即熔合线处) 的 CCT 曲线比 1 mm 和 2 mm 处的 CCT 曲线明显地向左 (注：在此即向长时方向) 移动，而且 1 mm 处的 CCT 曲线比 2 mm 处也偏向左边。从组织来看，当 0 mm 处金属得到铁素体、微细片状珠光体和马氏体组织时，而距熔合线 1 mm 和 2 mm 处的金属完全得到铁素体和珠光体，而且距离