

化工设备设计参考资料

压力容器用钢基础知识

(一)

TH49

22(1)

化学工业部设备设计技术中心站

一九八三年五月四日

· 化工设备设计参考资料 ·

压力容器用钢基础知识(一)

83-3-V-60

(内部资料 注意保存)

化学工业部设备设计技术中心站

(上海南京西路 1856 号)

一九八三年九月

工本费: ~~1.80~~ 元

说 明

本资料第一章至第五章的内容取自国家
劳动总局锅炉压力容器安全监察局一九八一
年编写的《压力容器基础知识讲义》。

TH49/2202
09286

压力容器用钢基础知识

目 录

第一章 金属材料的基本知识.....	1
第一节 金属的机械性能.....	1
第二节 热处理基础.....	6
第三节 金属材料的脆性.....	15
第四节 常用钢号的表示方法及其意义.....	22
第二章 压力容器用钢的特点及一般要求.....	26
第一节 力学性能要求.....	27
第二节 工艺性能要求.....	31
第三章 碳钢、低合金高强度钢与合金结构钢的特点和 应用.....	34
第一节 碳 钢.....	34
第二节 低合金高强度钢.....	37
第三节 合金结构钢.....	65
第四节 低温用钢.....	74
第四章 压力容器焊接概论.....	88
第一节 概 述.....	88
第二节 压力容器常用焊接方法.....	93
第三节 金属材料可焊性及其试验方法.....	99
第四节 焊接接头的组织与性能.....	107

第五节	与压力容器焊接有关的规程与标准.....	111
第六节	低合金钢的焊接.....	115
第七节	奥氏体不锈钢焊接.....	127
第五章	压力容器的焊接缺陷及防止措施.....	141
第一节	焊接接头的缺陷.....	141
第二节	焊缝中的气孔.....	144
第三节	热裂纹及其防止措施.....	148
第四节	冷裂纹及其防止措施.....	150
第五节	再热裂纹及其防治.....	157

压 力 容 器 用 钢

压力容器由于其应用范围广泛、工作条件复杂，如受高温、低温、高压以及各种腐蚀介质作用等，所以，对钢材的性能要求也极为复杂和多样。要满足容器设计使用的要求，必须采用多种类型的材料。以年产30万吨合成氨装置为例：既有制造高压氨合成塔用的低合金高强度钢，又有中温变换用抗氢钢；不仅有高压氨分离器用低温钢，而且需要耐强腐蚀的不锈钢耐酸钢等等。

压力容器用钢按其合金成份分则包括：碳钢、低合金高强度钢、合金结构钢、高合金钢等。随着压力容器日趋大型化，低合金高强度钢由于其强度高、工艺性能良好，经济效益明显而越来越得到广泛应用。

压力容器用钢按其特殊性能与用途分为：低温钢、抗氢氮钢、不锈钢耐酸钢以及核容器用钢等。

温度、压力、介质及容器直径是选用压力容器用钢的主要参数。

本篇以压力容器用钢板为主介绍常用钢种的性能特点及其应用。

第一章 金属材料的基本知识

第一节 金属的机械性能

一、金属的晶体结构

在固态下，一切金属的组织都是由晶粒所组成。我们取一块纯铁，制备成金相线样，放在显微镜下观察，可以清晰地看到它是由许多小晶体组成的，这些小晶体叫做“晶粒”。普通的金属材料都是多晶体，由许许多多晶粒所组成。

用X射线分析的方法进一步研究晶粒（晶体）的内部结构，发现晶粒是由具有规则排列的原子组成的固体。这是晶体与非晶体的根本区别。非晶体内部的原子是无规则排列的。

为了便于分析各种晶体中原子排列的规律起见，可以用假想的线条将各原子的中心联接起来，使之构成一个空间格子。此时，各原子

都是位于该假想空间格子的结点上。这种用以描述原子在晶体中排列形式的空间格子叫做“晶格”。用晶格来描述晶体结构是很不方便的。为了简便起见，通常是取晶格中一个最基本（能代表其结构特征）的单元即“晶胞”来描述晶体结构。晶胞的各边尺寸—— a 、 b 、 c 称为“晶格常数”。其大小是以埃（ $\text{\AA}$ ）来量度（ $1\text{埃}=10^{-8}$ 厘米）。

在金属中晶体结构的类型很多，其中最常见的有体心立方和面心立方。体心立方晶胞的每个角上和晶胞的中心都有一个原子，属于体心立方晶体结构的金属有： α 铁、铬、钼、钒、钨、铌等；面心立方晶胞的每个角上和立方体每个面的中心都有一个原子，属于面心立方晶体结构的金属有： γ 铁、铜、铝、镍等。

实际应用的金属绝大多数是多晶体组织，一般不仅表现出各向同性，而且实际金属的强度也比理论强度低几十倍至几百倍。如铁的理论切断强度（切应力）为 230公斤/毫米^2 ，而实际的切断强度仅为 29 kgf/mm^2 。这是什么原因呢？这是由于前面所述是对单晶体而言，并且为了研究方便，认为是原子排列完全规则的理想晶体。而实际上，金属是由多晶体组成的，并且晶体内存在许多缺陷。晶体缺陷的存在，对金属的机械性能和物理、化学性能都有显著的影响。

晶体缺陷有：①面缺陷：多晶体金属是由很多晶格方位不同的晶粒所组成。晶粒与晶粒之间由于结晶方位不同（相差达 $20\sim40^\circ$ ），便形成一交界，叫做“晶界”。该处的原子排列是不整齐的，晶格歪扭畸变并常有杂质存在。晶界在许多性能上显示出一定的特点，如，晶界抗蚀性能比晶粒内部差；晶界的熔点较晶粒内部低；晶界的强度、硬度较晶内高，电阻率也较晶内为大等等。②线缺陷：它的具体形式是各种类型的位错。实际金属晶体内存在大量的位错，一般在每平方厘米面积上含有 10^8 个位错。经冷加工塑性变形后，位错数目可达到每平方厘米 10^{12} 个。由于位错密度的增加，使金属的强度大大提高。③点缺陷：如在实际晶体结构中，经常发现有的原子没有占据结点上的位置，而占据了晶格间隙的位置。由于晶格中存在“空位”与“间隙原子”等点缺陷，使晶体结构发生歪曲畸变，结果使金属的屈服强度提高。

三 金属的机械性能

金属的机械性能是指金属材料在外力作用下表现出来的特性，如弹性、强度、硬度、韧性和塑性等。也可以称之为“力学性能”。我们就是用金属材料在不同受力条件下所表现出来的不同特性指标，来衡量金属材料的机械性能。

任何金属，在外力作用下引起的变形过程都可分为三个阶段：

① 弹性变形阶段。即在应力不大的情况下，变形量随应力值成正比例增加，当应力去除后变形完全消失。

② 弹—塑性变形阶段。即当应力超过弹性极限时，在应力去除后变形不能完全消失，而有残留变形存在，这部分残留变形即塑性变形。此阶段的变形通常都是由弹性变形和塑性变形两部分所组成。

③ 断裂。当应力继续增大，金属在大量塑性变形之后即发生断裂。脆性材料在断裂之前往往没有明显的塑性变形阶段，这种断裂称为脆性断裂。而经大量的塑性变形之后发生的断裂，称为韧性断裂。

(一) 强度

强度是物体在外力作用下，抵抗产生塑性变形和断裂的特性。常用的特性指标有屈服极限(σ_s)和强度极限(σ_b)。数值由拉伸试验获得。

1. 屈服极限。材料承受载荷时，当载荷不再增加而仍继续发生塑性变形的现象叫做“屈服”。开始发生屈服现象时的应力，即开始出现塑性变形时的应力叫做“屈服极限”(σ_s)或“屈服点”。

对于实际金属来说，很多材料的拉伸曲线并不出现明显的屈服平台，不能明确地确定出屈服点。为此，在工程上规定：取促使试样发生0.2%残余变形的应力值($\sigma_{0.2}$)作为条件屈服极限。

屈服极限 σ_s (或 $\sigma_{0.2}$)是材料的一个十分重要的强度指标。一般来说，材料是不应在超过其屈服点的载荷条件下工作的，因为这会引起零件和构件的明显变形。因此，屈服极限往往是设计时绝大多数部件零件选用材料的依据。

2. 强度极限。材料抵抗拉力破坏作用的最大能力称为“强度极限”(σ_b)。一般又称为“抗拉强度”。强度极限也是材料的一个十

分重要的强度指标，因为它标志着当材料承受的应力值达到此值时，将引起破坏。

在工程上希望金属材料不仅具有高的 σ_s ，而且具有一定的屈强比(σ_s/σ_b)。屈强比愈小，结构零件的可靠性愈高，万一超载，也能由于塑性变形使金属的强度提高而不致立刻破断。但屈强比太低，则材料的有效利用率太低。因此，一般希望屈服比高一些。常用的碳素钢一般为0.6左右，低合金高强度钢一般为0.65~0.75，合金结构钢一般为0.85左右。

(二) 塑性

材料的塑性是指材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力。材料的塑性是用延伸率(δ)及断面收缩率(ψ)来表示。它们的数值是通过拉伸试验获得的。

1. 延伸率(δ)。它是试样拉断后的总伸长与原始长度之比值的百分率来度量塑性的大小。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

对于任何一种材料而言，不论试样的原始尺寸是多少，其相对均匀伸长率是相同的。但局部伸长量与试样的原始截面有关。由于总伸长是均匀伸长与产生局部缩颈后的伸长之和，故 δ 值的大小与试样尺寸有关。如果试样的原始截面相同，则其原始长度愈大，所得延伸率的数值就愈小。为了便于比较，必须采用标准试样，规定试样的原始长度与原始直径之间的比例关系。 δ_5 或 δ_{10} 表示试样的计算长度为其直径的5倍或10倍。这两种试样所得的延伸率是不同的，即 δ_{10} 小于 δ_5 。

2. 断面收缩率(ψ)。它是用试样在拉断后，断口面积的缩减与原始截面积之比值的百分率来度量塑性的大小。

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

一般来说，塑性材料的延伸率或断面收缩率较大，而脆性材料的延伸率或断面收缩率较小。由于 δ 的大小随试样尺寸而变化，因此，它不能充分地代表材料的塑性。而 ψ 与试样尺寸无关，它能较可靠地代表金属材料的塑性。对于材质所引起的塑性降低， ψ 比 δ 反应敏感。如大型锻件表面和内部不同部位取样，有时 δ 相差不大，而 ψ 相差悬殊，原因就在于此。

上述塑性指标在工程技术中具有重要的意义。首先，具有良好塑性的材料可以顺利地进行某些成型工艺，如冷冲压、冷弯曲等。其次良好的塑性使零件在使用时万一超载，也能由于塑性变形使材料强度提高而避免突然断裂。压力容器的主要零部件都是承压的，无论从制造工艺的要求及安全使用的要求，都希望材料具有很好的塑性。

(三) 硬度

所谓硬度是指金属材料抵抗压入物压陷能力的大小，也可以说是材料对局部塑性变形的抗力。硬度可采用不同的方法在不同的仪器上测定，其所得的硬度指标也各不相同。最常用的硬度指标为布氏硬度(HB)和洛氏硬度(HRC)。

硬度是材料的重要性能之一。一般情况下，材料的硬度高，其耐磨性能也较好，并且材料的硬度与强度之间也有一定的关系（因为硬度是反映局部塑性变形的抗力），根据经验，硬度与抗拉强度有如下近似关系：

轧制、正火或退火的低碳钢 $\sigma_b = 0.36HB$

轧制、正火或退火的中碳钢 $\sigma_b = 0.35HB$

硬度 $\leq HB250$ 经热处理的碳素钢和合金钢

$\sigma_b = 0.34HB$

硬度 $HB = 250 \sim 400$ 经热处理的合金钢

$\sigma_b = 0.33HB$

(四) 冲击韧性

冲击韧性是指材料在受到外加冲击负荷的作用下，断裂时所吸收能量大小的特性。它表示金属材料对冲击负荷的抵抗能力。它是衡量材料韧性的指标。也可以认为是综合地概括了材料的韧性和强度性能。

冲击试样所消耗的功(单位: $\text{kg f}\cdot\text{m}$),用试样缺口处断面积(单位: cm^2)去除,所得到的商值(单位: $\text{kg f}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$)称为“冲击韧性”或“冲击值”,用符号 α_K 表示。它通常是在摆锤式冲击试验机上测定的。

冲击值与试样的尺寸和形状有关。不同的冲击试样在试验时应力分布和破坏型式各不相同,试样在破坏时所吸收的冲击功也不相同,所以冲击值也不同。

冲击值还与试验温度有关。有些材料,在室温 20°C 试验时并不显示脆性,而在较低温度下则可能发生脆断。

冲击韧性是材料各项机械性能指标中对材料的化学成分、组织状态及均匀性、冶金质量、内部缺陷等比较敏感的一个质量指标,而且它也是衡量材料脆性转化情况的一个重要指标。

第二节 热处理基础

一、铁碳合金

(一) 铁碳合金的基本结构

根据构成合金的各元素间相互作用的不同,可以形成如下三种合金的基本组成物:固溶体、金属化合物和多种晶体的机械混合物。

1. 固溶体 两种或两种以上的化学元素,在固态下互相溶解构成的单一均匀的物质称为固溶体。其中含量较多的元素称为溶剂,含量较少的元素称为溶质。铁素体(常用 F 或 α 表示)是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶体,在铁素体中,铁是溶剂,碳是溶质。固溶体具有与溶剂金属同样的晶体结构,因此,铁素体具有与 $\alpha\text{-Fe}$ 相同的体心立方晶格。因为铁素体内原子间的空隙较少,故溶碳能力较差,室温时仅可溶碳 0.006% ,在 723°C 时达到最大,也仅 0.2% ,所以,其强度、硬度较低,而塑性、韧性很高。

按照溶质原子在溶剂原子晶格结点中所占有的位置,固溶体又分置换固溶体和间隙固溶体两种基本类型。

置换固溶体:溶质原子占据了溶剂原子晶格结点的位置而形成的固溶体。

间隙固溶体：溶质原子侵入溶剂晶格的间隙而形成的固溶体。

溶质原子在进入铁的晶格以后，由于原子直径的差异，引起晶格发生畸变，因而使塑性变形抗力提高，金属的强度和硬度升高，而塑性和韧性有所降低，这种强化现象称为“固溶强化”。

2. 金属化合物 两种或更多一些的元素按一定的原子数比例互相化合，而形成具有与这些元素完全不同类型晶格的化合物，叫做金属化合物。金属化合物一般都具有较高的硬度和较大的脆性，它存在于合金中可使硬度、强度提高，同时也能导致韧性下降。渗碳体 (Fe_3C) 就是铁和碳的化合物，其含碳量为 6.67%，熔点 1600°C ，具有复杂的斜方结构，硬度很高 (HB800)，很脆，塑性几乎等于零。

3. 机械混合物 由多种晶格的晶体组成的混合物称为机械混合物。珠光体 (用 P 表示) 就是由铁素体和渗碳体组成的机械混合物。由于珠光体是由硬的渗碳体片与软的铁素体片彼此相间组成的一种机械混合物，因此变形的抗力较高，强度较好，机械性能介于纯铁和渗碳体之间，硬度一般在 HB180 左右。

铁素体、渗碳体和珠光体为常温下铁碳合金的基本组织结构，其机械性能如表 3-1。由此可见，金属的机械性能与其化学成份和组织结构有着十分密切的关系。此外，还有一种在高温下 ($>723^\circ\text{C}$) 存在的组织——奥氏体 (用 A 或 γ 表示)，它是碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的固溶体，具有面心立方晶格。奥氏体内铁原子之间的空隙较大，故溶碳能力也大，在 723°C 时为 0.8%，随着温度升高，溶碳量不断增加，在 1147°C 时溶碳量达到最大值 2.06%。

表 3-1 铁碳合金基本组织结构的室温机械性能

名 称	符 号	σ_b (kgf/mm^2)	HB	δ (%)	α_k ($\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$)
铁素体	F 或 α	25	80	50	30
渗碳体	Fe_3C	3	800	≈ 0	≈ 0
珠光体	P	75	180	20~25	3~4

(三) $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图

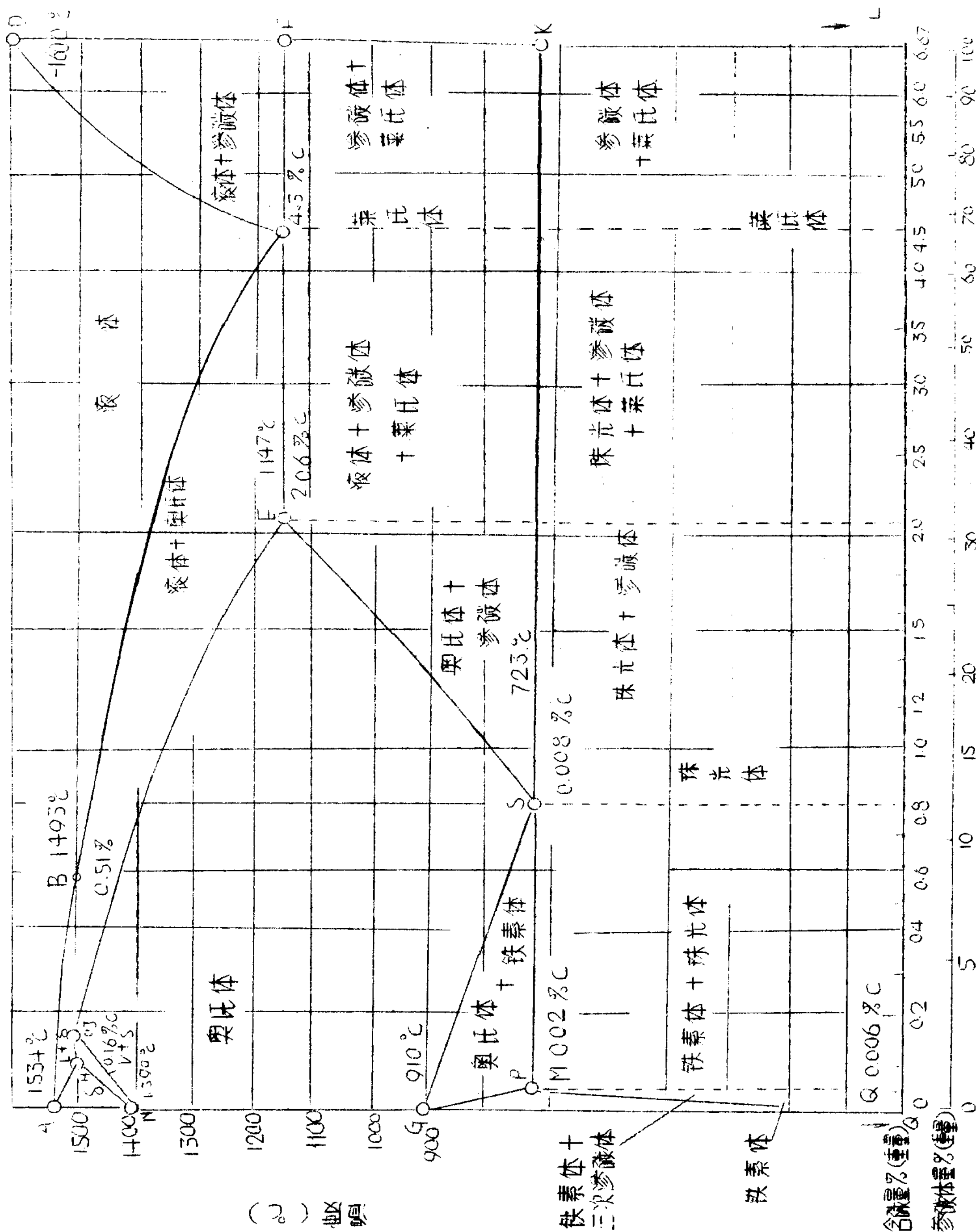


图 3-1 Fe-Fe₃C 状态图

由上可知，合金的组织结构与其化学成份和所处的温度密切相关， $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图就是表示不同成份的铁碳合金，在不同温度所具有的状态或组织的一种图形。因为它是在极缓慢加热或冷却情况下，即在平衡或接近于平衡状态下测制的，所以，也称为平衡图。

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图如图 3-1 所示。状态图中各特性点的意义、温度及含碳量见表 3-2。

含碳量从 0.006% 到 2.06% 之间的铁碳合金称为钢。我们只要抓住 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图左下角部分的两点（E 点、S 点）和三线（GS 线、ES 线、PSK 线），就能掌握钢的组织随成份和温度变化的规律。

1. GS 线，又叫 A_3 线。它表示含碳量低于 0.8% 的钢在冷却时由奥氏体开始转变为铁素体的温度。

2. ES 线，又叫 A_{cm} 线。它表示含碳量大于 0.8%，小于 2.06% 的钢冷却时从奥氏体中析出二次渗碳体 (Fe_3C_{II}) 的开始线。

3. PSK 线，又叫 A_1 线。合金冷却到此线时，在恒温 (723°C) 下，将从奥氏体中同时析出铁素体和渗碳体，其反应式为 $A \rightarrow (F + \text{Fe}_3\text{C})$ ，此反应称为共析反应，反应产物 ($F + \text{Fe}_3\text{C}$) 称为珠光体。

4. S 点，称为共析点。在 723°C 时，奥氏体的成分是不变的，含碳量只能是 0.8%，也只有在这一成分时，才能发生奥氏体 $\rightarrow$ 珠光体转变。钢的成分在 S 点以左的叫亚共析钢，室温下组织为铁素体 + 珠光体；钢的成分在 S 点以右的叫过共析钢，室温下组织为珠光体 + 渗碳体；成分恰恰等于 S 点成分的钢叫共析钢，其在室温下的组织为 100% 的珠光体。

5. E 点，表示碳在奥氏体中的极限溶解量，含碳值为 2.06%。E 点是钢和铸铁的分界线，含碳在 E 点以下是钢，在 E 点以上是铸铁。

二 钢的热处理

(一) 钢在加热时的转变

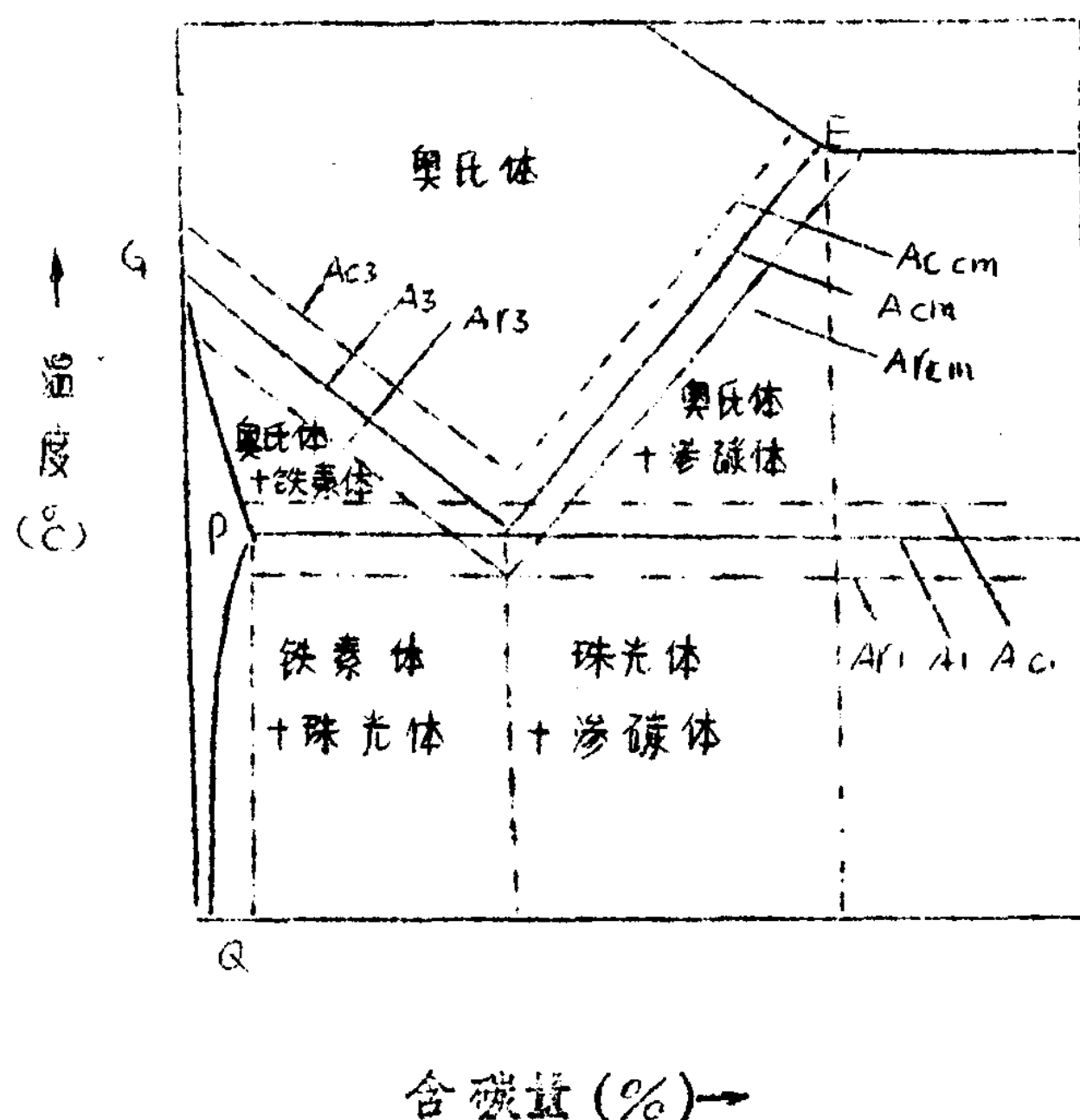
根据 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图，我们知道，共析钢在 A_1 (723°C) 温度以下时为珠光体，在 A_1 温度以上时为奥氏体。 A_1 是缓慢加热或冷却时，珠光体与奥氏体共同存在的平衡温度。在实际生产中，加热或

表 3—2 Fe—Fe₃C 状态图中
各主要点的意义、温度及含碳量

点的符号	温度 (°C)	含碳量 (%)	意 义
A	1534	0	纯铁的熔点
B	1493	0.51	包晶反应时液态合金的液度
C	1147	4.30	共晶点 $L_c \rightleftharpoons \gamma_E + Fe_3C$
D	1600	6.67	渗碳体熔点
E	1147	2.06	碳在 $\gamma-Fe$ 中最大溶解度
F	1147	6.67	渗碳体
G	910	0	$\alpha-Fe \rightleftharpoons \gamma-Fe$ 同素异构转变点 (A_s)
H	1493	0.10	碳在 $\delta-Fe$ 中的最大溶解度
J	1493	0.16	包晶点 $L_B + \delta_H \rightleftharpoons \gamma_J$
K	723	6.67	渗碳体
M	769	0	A_2 点 (磁性转变点)
N	1390	0	$\gamma-Fe \rightleftharpoons \delta-Fe$ 同素异构转变点
O	769	~0.5	磁性转变点
P	723	0.02	碳在 $\alpha-Fe$ 中最大溶解度
S	723	0.8	共析点 $\gamma_s \rightleftharpoons \alpha_p + Fe_3C$
Q	0	0.006	碳在 $\alpha-Fe$ 中溶解度

冷却并不是极其缓慢的。由图 3—2 可知，实际加热时各临界点的位置分别为图中 A_{c1} 、 A_{c3} 及 A_{ccm} ，而实际冷却时各临界点的位置分别为 A_{r1} 、 A_{r3} 及 A_{rcm} 。由此可见，要使珠光体转变成奥氏体，必须将钢加热至超过 A_{c1} 温度以上。

当加热至 A_{c1} 温度以上时，珠光体向奥氏体转变的过程通过三个步骤，即：在铁素体与渗碳体的交界面处形成奥氏体的晶核，依靠铁素体晶格的改组（从体心立方晶格转变成面心立方晶格）和渗碳体的溶解（相当于碳量溶入）完成奥氏体的成长；奥氏体成分的均匀化。



在加热 (冷却) 时 Fe-Fe₃C 状态图上各临界点位置
图 3-2

合金元素对加热转变的影响：除了个别合金元素如 Mn、Ni 等外，大多数合金元素加入钢中，都会升高钢的临界点，所以合金钢的加热温度大都要比碳钢高。同时，除了元素 C₀ 等以外，大多数合金元素都会减慢碳在奥氏体中的扩散速度，而且，合金元素本身的扩散速度也较小，所以合金钢在加热时奥氏体的形成，特别是奥氏体的均匀化过程都比碳钢要慢，因此，加热时必须进行较长时间的保温。

(二) 钢在冷却时的转变

热处理时加热和保温的主要目的是为了为了使钢获得细而均匀的奥氏体晶粒。试验表明：钢在室温时的机械性能，不仅与高温加热状态所获得的奥氏体晶粒大小、化学成分均匀程度有关，而且与奥氏体在冷却时的转变有直接的关系，特别是冷却方式和冷却速度对奥氏体的转变有极大的影响。如果我们用较快的冷却速度使奥氏体过冷到共析温度以下，随着过冷度的不同，它可以转变为各种不同的组织结构，而钢的性能就决定于这些组织结构的特点。因此，为了掌握钢的性能变

化规律，就要首先了解这些组织结构的变化规律。

1. 奥氏体等温转变曲线 我们知道，过冷的奥氏体是不稳定的，它一定要转变为在低温下更为稳定的组织。奥氏体等温转变曲线（简称S曲线或C曲线）就是描绘奥氏体在冷却时，时间、温度和转变三者之间关系的曲线，由于此曲线是在等温分解的条件下作出的，故称为等温转变曲线。

共析钢的奥氏体等温转变曲线如图3-3。由于曲线的形状很象“C”字形，故通常简称为“C曲线”。若将奥氏体过冷至 230°C ，则将开始发生马氏体转变，这一温度称为马氏体开始转变温度，用“ M_s ”表示。

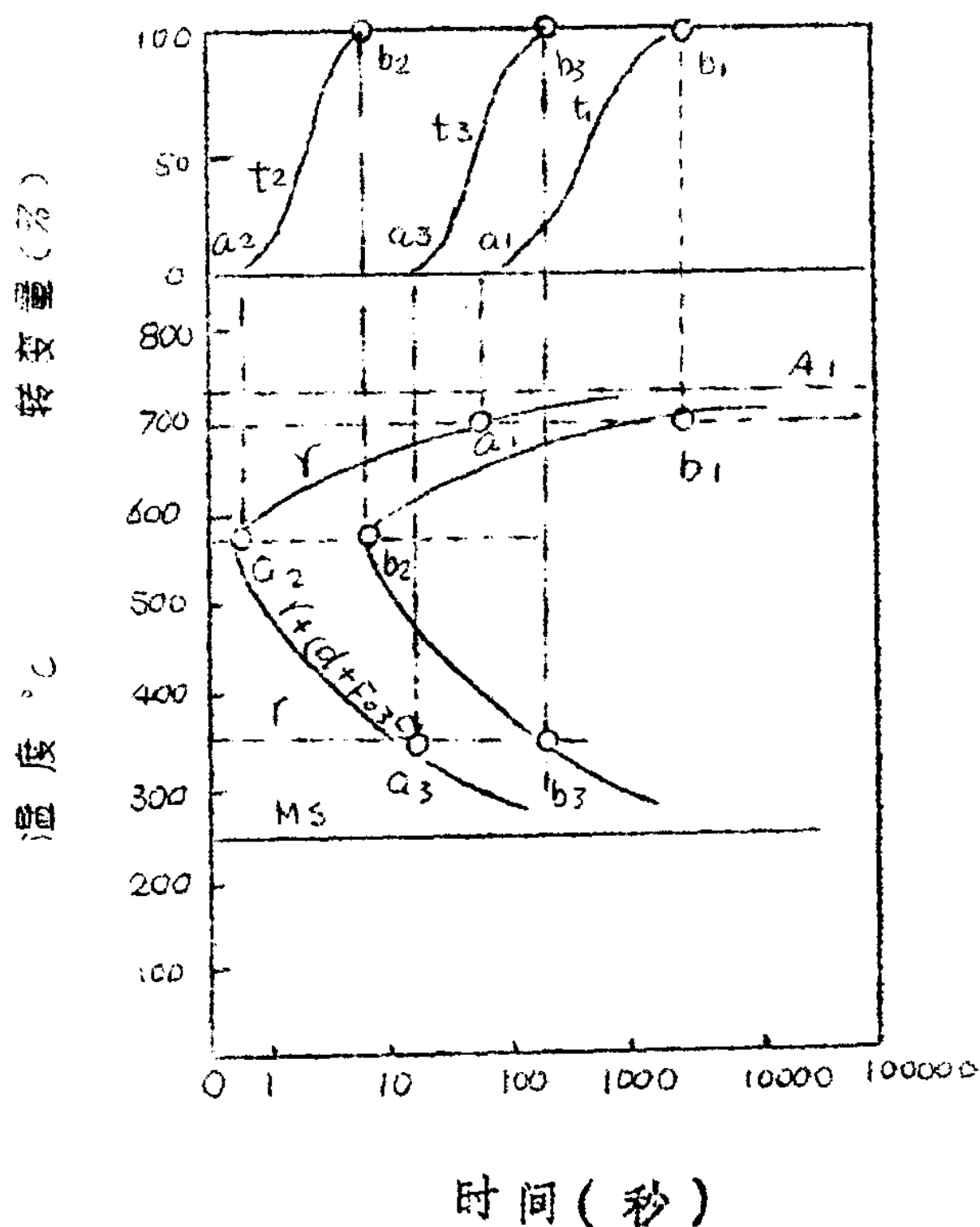


图3-3 共析钢的奥氏体等温转变曲线

2. 奥氏体等温转变产物的组织和性能 由奥氏体等温转变曲线（C曲线）可见，奥氏体实际上是在过冷度从几度到几百度（ A_1 —