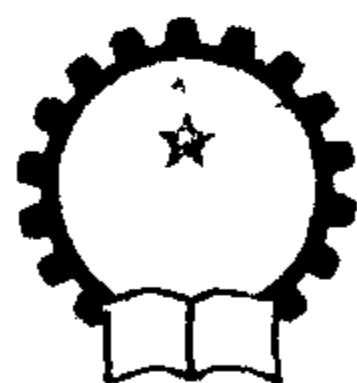


高 锰 钢

陈希杰 编著



机 械 工 业 出 版 社

前 言

冶金、矿山、建材、电力机械、铁路运输、煤炭、工程机械等部门大量使用高锰钢。高锰钢由于有良好的加工硬化性能，在冲击磨料磨损的工况条件下有优异的耐磨性能。这是在此种条件下其它材料所无法比拟的。因此从高锰钢问世一百年来，虽然不断研制和使用一些新的材料，但高锰钢在耐磨金属材料中仍占有重要的位置，仍在发挥它的作用。主要工业国家中都有自己的高锰钢的牌号和标准。多年来对这一古老钢种作过不少研究工作，但是关于钢的化学成分、组织和性能的研究工作仍在发展，生产工艺也在不断改进。尤其是关于高锰钢加工硬化的理论研究工作随着实验技术的进步也在不断地深化。

我国每年生产几十万吨高锰钢。目前无论是在高锰钢的冶炼、热处理、铸造生产工艺及高锰钢件的质量检验等方面都存在不少问题。如何根据钢的性能特点和工作条件选择化学成分和确定对组织和性能的要求，如何提高高锰钢铸件的质量和进一步提高耐磨性能，如何制订合理的生产工艺减少材料和能源的消耗等等都是生产中迫切需要解决的问题。对此种钢作深入的研究，尤其是理论方面的研究，将有助于上述问题的解决。

许多使用、生产和研究耐磨金属材料部门的同志都反映迫切需要关于此种钢的专门书籍，要求一方面能从理论上进行分析，同时又能结合生产实际介绍国内外关于此种材料的研究成果和发展方向。本书正是从这个需要出发而编写的。

IV

作者试图结合个人研究工作的体会和收获，理论联系实际地进行全面阐述。书中介绍了国内外的重要研究成果。作者希望此书能对高锰钢的研究工作和生产工作有所裨益。

书中对高锰钢的冶炼、热处理、铸造等生产工艺只介绍有关的理论、生产要点和必要的计算。本书对工艺过程不作详细叙述，以免和有关专业的书籍重复。书中有关高锰钢加工硬化性能的理论部分，介绍了国内外已有的一些研究工作的论点和结果，并作了些分析。由于高锰钢的理论研究目前仍在发展和深化之中，这部分的综述和分析是作者的一个尝试，意在解决一些书籍中对此问题阐述较少的不足。作者愿以此提供给愿从事深入理论研究的同志作为线索和参考。

北京钢铁学院刘慕怡副教授审阅了书稿并提出了宝贵的意见，作者对此深表谢意。书中部分金相组织照片是由王自琼、张丽娟同志协助翻拍，陈琪同志帮助整理书稿，在此表示感谢。

作 者

目 录

第一章	高锰钢的化学成分	1
第一节	高锰钢的化学成分和组织的概述	1
第二节	高锰钢的化学成分及其对组织和性能的影响	6
第三节	高锰钢的标准	31
第二章	高锰钢的性能	39
第一节	高锰钢的机械性能	39
第二节	高锰钢的物理性能	54
第三节	高锰钢的加工硬化和耐磨性	58
第三章	高锰钢中的合金元素	90
第一节	合金化的目的和方法	90
第二节	各种合金元素在高锰钢中的作用	92
第四章	高锰钢的冶炼	129
第一节	碱性电弧炉氧化法	130
第二节	返回法	135
第三节	碱性平炉冶炼	140
第四节	冶炼中各种因素对高锰钢性能的影响	143
第五章	冶金因素对高锰钢铸件质量的影响	157
第一节	高锰钢铸件的一次结晶组织	157
第二节	高锰钢铸件内金属的致密度	171
第三节	高锰钢中的非金属夹杂物	180
第六章	高锰钢的热处理	192
第一节	高锰钢冷却时的组织转变	193
第二节	高锰钢的固溶处理	208
第三节	高锰钢固溶处理的新方法	221
第七章	高锰钢的铸造性能和铸造工艺	228

VI

第一节	高锰钢的铸造性能·····	228
第二节	高锰钢的铸造工艺特点·····	246
第八章	高锰钢生产中的质量控制和检验·····	293
第一节	钢水工艺性能的控制·····	293
第二节	钢水脱氧的控制·····	294
第三节	冲击韧性的适宜值及其检验·····	296
第四节	硬度的检验·····	298
第五节	低倍和显微组织·····	299
第六节	碳化物和夹杂物的检验·····	304
第七节	高锰钢耐磨性的检验·····	308
第九章	高锰钢研究工作的发展和新技术·····	311
第一节	高锰钢的沉淀强化·····	311
第二节	高锰钢的悬浮浇注·····	333
第三节	Mn6M _Q 钢·····	344
第四节	介稳奥氏体锰钢·····	351
第五节	低碳含铝高锰钢·····	359
第六节	铸态使用的高锰钢·····	360
第七节	高锰钢的精炼·····	364
第八节	高锰钢的铸态水韧处理·····	366
第九节	高锰钢铸件的表面合金化·····	367
第十节	粉末成型高锰钢件的工艺·····	370
第十一节	高锰钢的爆炸硬化·····	371

第一章 高锰钢的化学成分

第一节 高锰钢的化学成分和组织的概述

锰合金钢的研究始于1840年。当时研究的合金钢的锰含量约在2.0~7.0%的范围，碳的含量不高，是中碳合金钢。其组织不是奥氏体。奥氏体高锰钢最初是于1882年9月在实验室中，在纯铁中加入锰铁得到的。那时发现钢中含锰7~20%，经水淬后得到单相奥氏体组织。这种钢有很好的流动性和韧性。可以用来制作铸件。1883年 R.A.Hadfield 获得了英国专利 (No.200)。在实验室研究出了这种新型材料之后的几年里测定了它的物理性能，如热学性能、磁性和其他一些性能。此外也研究了它的工艺性能。1892年第一次使用此种材料制作铸件。1896年确定了它的热处理的水淬温度。1902年又进一步确定了高锰钢铸件的水淬温度应为980~1050℃，锻件的水淬温度应为940~1000℃，以保证钢的韧性和强度。在这段时间内对钢的成分也不断进行研究，在上个世纪末已大体确定其碳含量在1.2%左右，锰的含量从开始时很宽的范围改变到12~13%左右。这样的化学成分一直沿袭到现在。从它的问世到现在已有一百年的历史。从它第一次在工业上得到使用也已有九十多年的历史。高锰钢是工业上首先使用的奥氏体类型钢。

为了能在较宽的成分范围内形成稳定的奥氏体组织，必须加入合金元素。合金元素应符合以下条件：

- (1) 合金元素应具有面心立方的晶格结构。
- (2) 原子半径应和铁的原子半径相近。

(3)合金元素原子和铁原子之间应有较强的金属键的作用。

在元素周期表中只有第Ⅷ族元素可以满足上述条件。铁和锰分别属于周期表中第四周期的Ⅷ和Ⅵ族。在此二族中元素的3d层电子不满。3s和3d层的能量相近。锰是符合上述条件的元素。

Fe—Mn二元系的相图如图1-1。

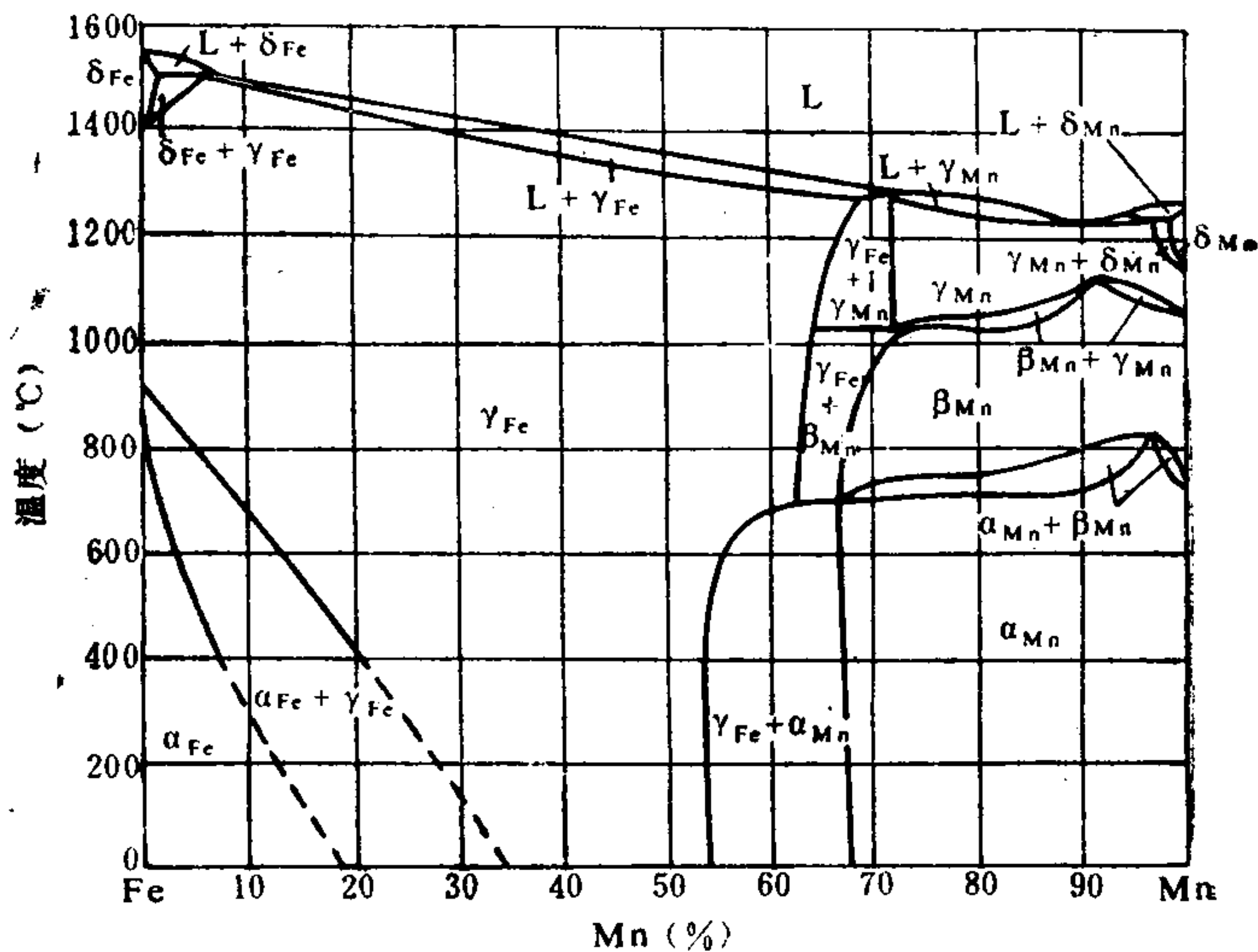


图1-1 Fe—Mn二元系相图

从图中可以看出，常温时只有锰含量相当高（超过30%）时才能得到单相奥氏体。而且此种二元合金的奥氏体的稳定性较低，没有实际使用的价值。在二元合金中加入碳，碳可以明显扩大γ相区。构成Fe—Mn—C三元合金。在三元合金中含有1.0~1.3%的碳时，锰含量只需9.0~

15.0%，即可得到单相奥氏体组织。Fe—Mn—C 三元相图中，锰、碳含量较高的部分过去曾有过争议，而研究较多的是 $Mn < 20\%$ 、 $C < 2.0\%$ 的部分。在这个成分范围内存在以下几个相： γ 、 α 、 ϵ 及碳化物，见图1-2。碳化物的类型是 $(Fe, Mn)_3C$ 。在上述的成分范围内并不生成 Mn_3C 、 Mn_7C_3 、 Mn_2C 等类型碳化物。 Mn_3C 是一个不稳定的相，它只在 $950 \sim 1050^\circ\text{C}$ 的温度范围内才存在，室温时不稳定。 ϵ 相是密排六方的晶体结构。它存在于 Fe—Mn—C 三元系之中。在三元系中当锰含量为 $17 \sim 20\%$ 、碳含量低 ($< 0.1\%$) 时， ϵ 相的数量较多。 $(Fe, Mn)_3C$ 的形成温度视合金中锰、碳含量而定。当锰含量为 13% 、碳含量为 1% 左右时，形成温度在 800°C 以上。根据实验资料证明，碳在 $(Fe, Mn)_3C$ 中固溶并以离子状态存在，具有正电荷。它的扩散系数高也是以离子状态存在的一个证明。碳原子半径和铁原子半径的比值很接近于 0.59 ，符合间隙固溶原子的条件。碳在晶格中是处于八面体的空隙之中。

从 Fe—Mn—C 三元系相图的截面 ($Mn 13\%$) 图中，可

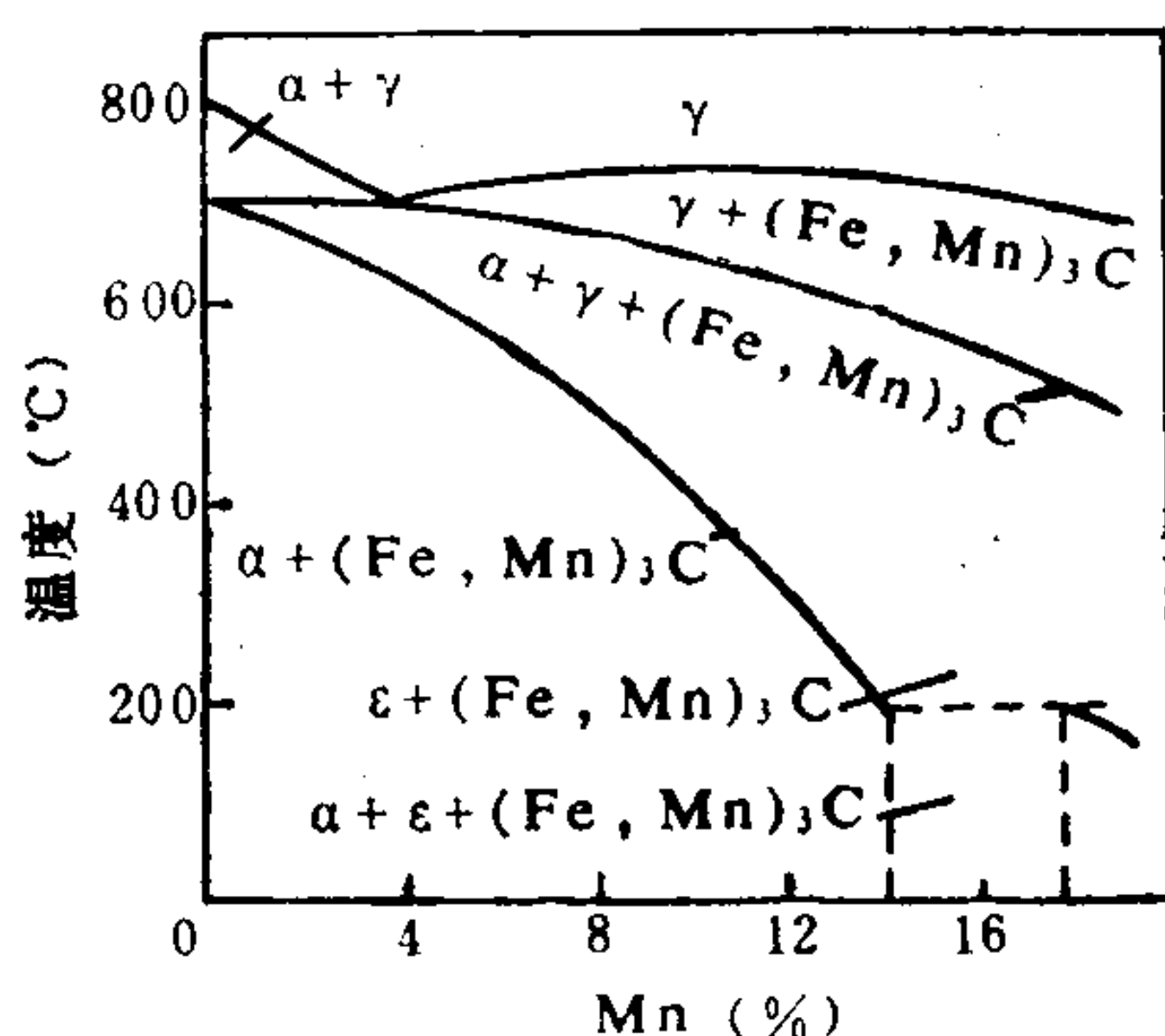


图1-2 Fe—Mn—C 三元相图(C1%)

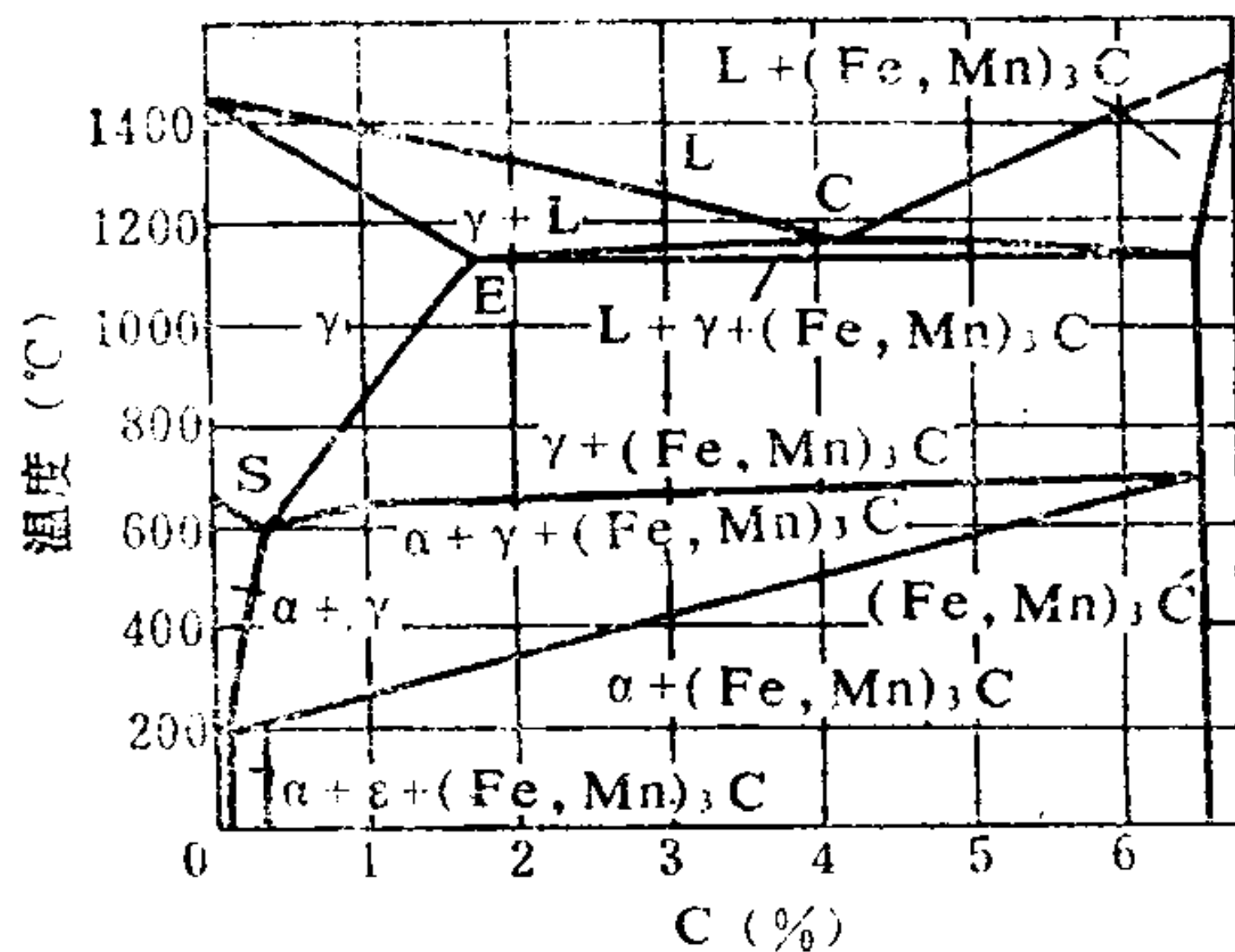


图1-3 Fe—Mn—C三元相图 (含Mn13%)

以看出 S、E 等临界点均明显左移 (图1-3)。当碳含量为 1.3% 的锰钢结晶时, 首先从液体金属中有 γ 相的核心形成。伴随着奥氏体枝晶的长大, γ 相和液相的成分都在改变。开始形成的 γ 相中碳含量较低, 而与之相邻的液相中碳的浓度较高。在固相和液相中均产生成分的扩散。结晶终了时所得到的单相的奥氏体的组织。

奥氏体冷却过程中也象在其他钢中一样, 发生树枝晶的粒化过程, 形成了在热力学上更为稳定的多面体的晶粒。

碳在奥氏体中的溶解度随温度的降低而不断下降。当该种化学成分的高锰钢冷到 ES 线时, 钢中开始析出碳化物。碳含量 1.3% 的钢开始析出碳化物的温度约为 960°C 左右。碳含量不同, 析出温度不同。碳愈高, 析出温度愈高。碳化物的析出使组织中出现第二相。当冷速较快时, 碳化物的析出温度可能降低, 析出的数量也和冷速有关。冷速愈慢, 愈接近平衡状态, 碳化物析出数量愈多。随着温度的降低, 奥氏

体中不断析出碳化物，奥氏体的含碳量不断下降。当达到 A_1 时发生共析分解。奥氏体的分解产物是 α 和碳化物 $(Fe, Mn)_3C$ 。Fe—Mn—C 三元合金的共析分解过程是在一个较宽的温度范围内进行的，也就是存在一个 $\gamma + \alpha + (Fe, Mn)_3C$ 的三相区。在碳含量一定时，此温度间隔将随锰含量的增加而扩大。在锰含量一定时，此温度间隔将随碳含量的增加而减小。

Fe—Mn—C 三元合金在600℃和650℃时的相区和锰、碳含量的关系如图1-4。共析转变进行得是否完全取决于冷

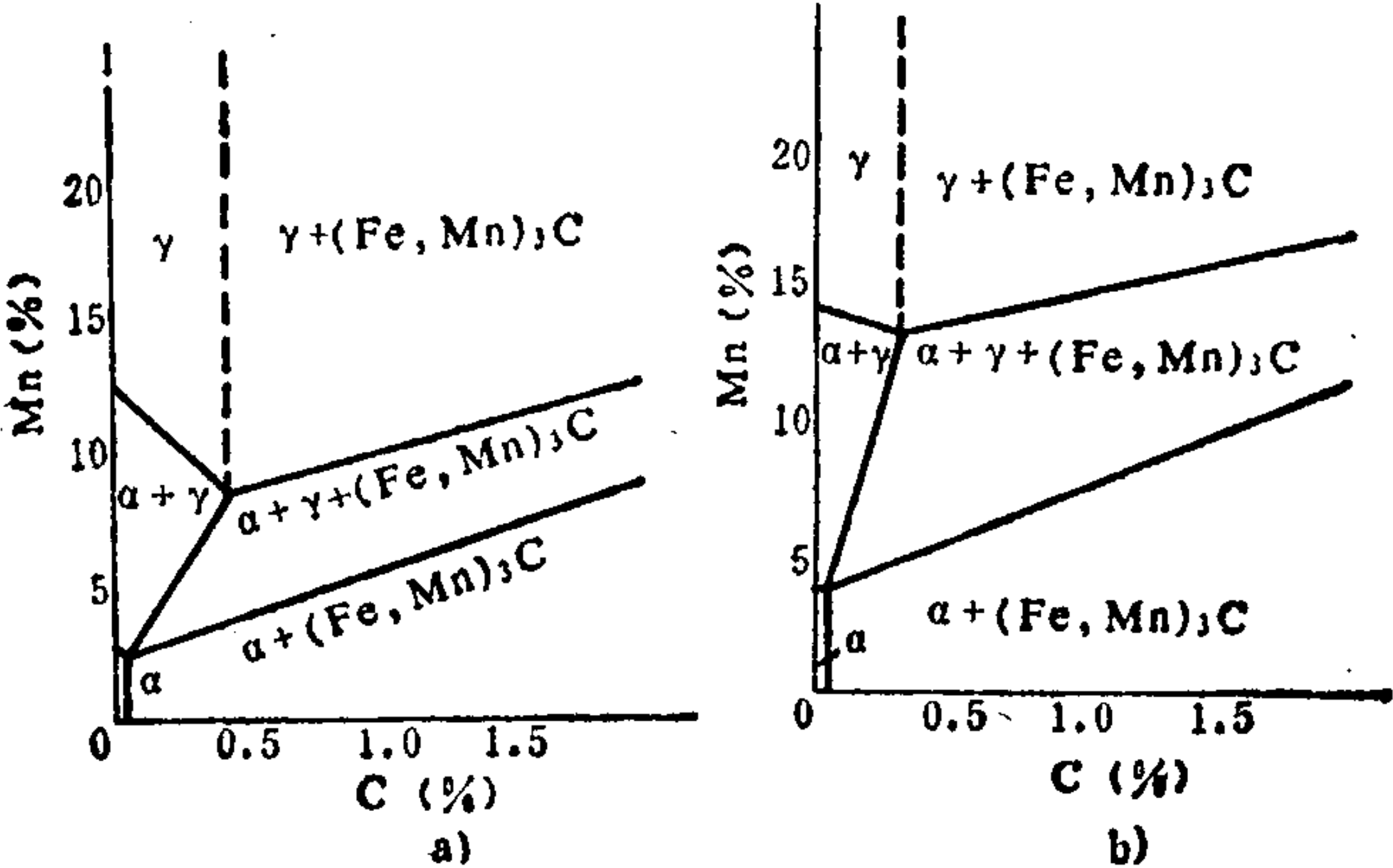


图1-4 Fe—Mn—C三元图的等温截面
a)600℃ b)650℃

却条件，冷速极慢，接近平衡条件时，对含碳 1.3%、含锰 13%的锰钢，在共析转变后常温时应是 α 和 $(Fe, Mn)_3C$ 两相所组成。冷速快，偏离平衡态时则会有一部分奥氏体残存下来。冷速愈快奥氏体数量愈多。这时常温的组织将是由奥氏体、碳化物和共析组织所组成。锰含量为13%，碳含量很

低时组织中会出现 ϵ 相。

第二节 高锰钢的化学成分及其对组织和性能的影响

化学成分是决定组织和性能的基本因素。在高锰钢研制成功时，钢的成分在一个很宽的范围内变化。随着研究工作的深入，钢的化学成分逐渐定型。高锰钢按其用途主要分为两大类，一类为无磁钢，主要利用高锰奥氏体的无磁的性质。另一类为耐磨钢，主要利用高锰奥氏体形变强化的性能。两类钢的化学成分有较大的差异。作为耐磨材料使用的高锰钢的化学成分大致为：

$$\begin{aligned} &C0.9\sim1.5\%, \text{ Mn}10\sim15\%, \text{ Si}0.3\sim1.0\%, \\ &S\leq0.05\%, \text{ P}\leq0.10\%. \end{aligned}$$

作为无磁材料使用的高锰钢的化学成分特点是：锰更高些，通常是在17%，甚至20%以上，碳低些，通常在1%以下。无磁钢的化学成分变动范围比耐磨用高锰钢更大些。本书中只讨论耐磨用的高锰钢的成分、组织和性能以及有关的生产工艺方面的问题。下面分别讨论各种化学成分的作用和它们对性能的影响。

一、碳

高锰钢属于含碳量高的钢种，碳含量0.9~1.5%。碳在高锰钢中有两个作用，一是促使形成单相奥氏体组织，二是固溶强化，以保证高的机械性能。碳对耐磨性也有重要影响。碳、锰含量不同时钢中形成不同的组织，如图1-5。碳低时形成马氏体组织。图中A表示奥氏体的相区。此区的成分范围变化很大。碳、锰含量低，则机械性能较差。希望在此区中将碳的含量尽可能选择高些。这样虽然铸态组织中

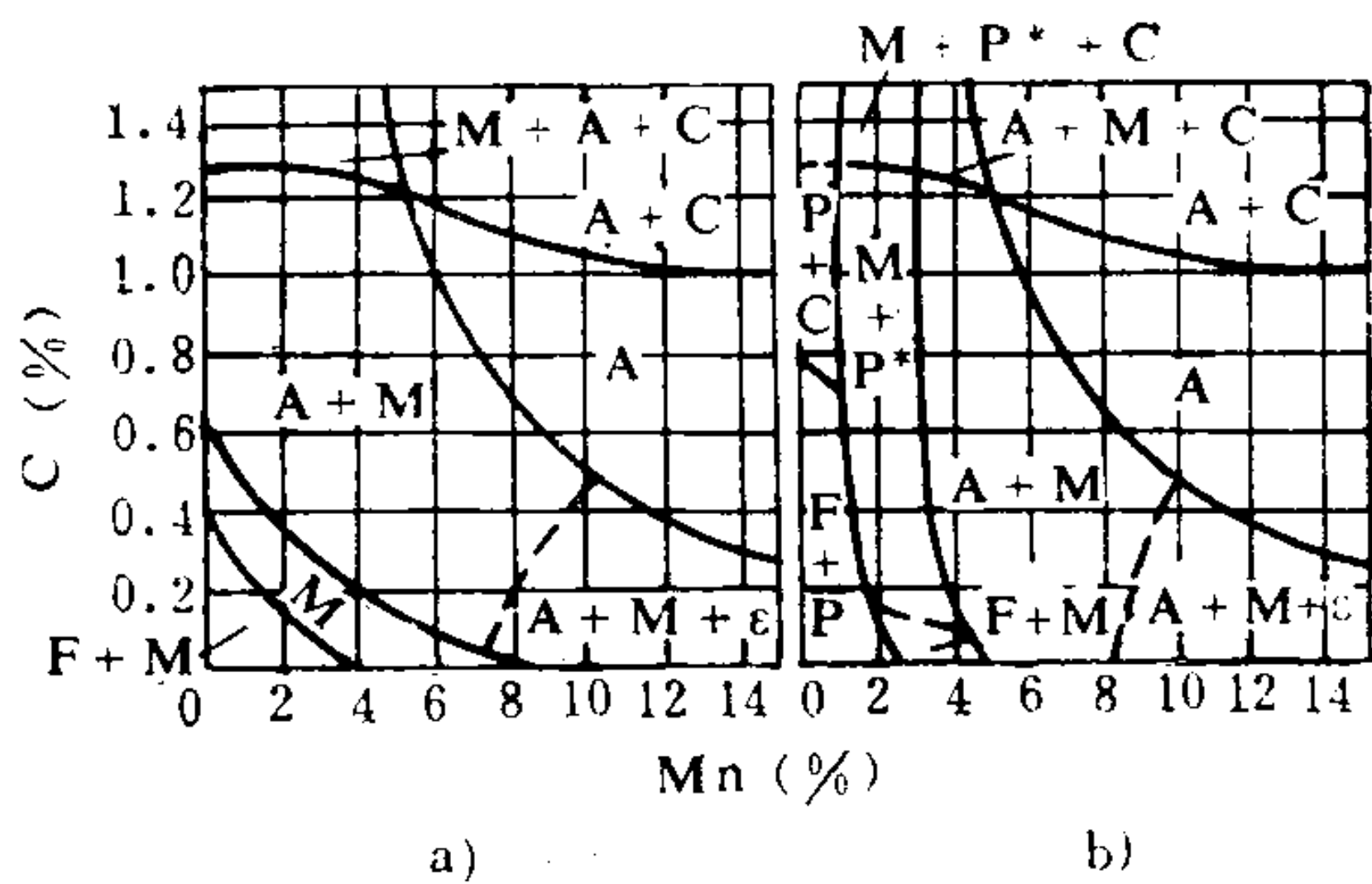


图1-5 不同碳、锰含量的钢的组织图
a)950℃水淬 b)950℃空冷
A—奥氏体 M—马氏体 C—渗碳体 F—铁素体 P—珠光体
P*—极细的珠光体 ε—ε马氏体

有较多碳化物，同时有少量珠光体组织，但经固溶处理后可以得到单相奥氏体组织。当然碳含量也不可过高，否则热处理后不能全部消除碳化物。

钢中碳含量对机械性能和耐磨性能有极为显著的影响。含 Mn11.6%，Si0.58%，P0.096%，S0.032%及不同碳含量的钢的铸态和热处理后的机械性能如表 1-1 所示。从表中可看出，铸态时随钢中碳含量的增加，钢的强度在一定的范围内是增加的。硬度则随碳含量的增加而不断提高。钢的塑性和韧性则明显降低。碳含量达到1.3%左右时，铸态钢的韧性即降低到零。这是由于随碳含量的增加，铸态组织中碳化物数量增加，甚至在晶界上形成连续网状碳化物，大大削弱了晶间的强度和钢的塑、韧性。经过固溶处理后钢的性能有很大变化。1050℃水淬后得到奥氏体组织。即使碳含量提高到1.48%，冲击韧性仍可达到81.395J/cm²。碳含量较低的可以达到196.133~294.2J/cm²。

碳对冲击韧性的影响在低温时特别显著。例如以碳含量

表1-1 碳对高锰钢铸态及热处理后机械性能的影响

碳含量 (%)	铸态机械性能					热处理后机械性能(1050℃水淬)									
	a _K (J/cm ²)	σ _b (MPa)	δ(%)	ψ(%)	HRC	不同温度时的 a _K (J/cm ²)					$\frac{a_{K-40}}{a_{K+20}} \times 100\%$	σ _b (MPa)	δ(%)	ψ(%)	HRC
						不同温度时的 a _K (J/cm ²)									
						20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃					
0.63	284	420	32.0	36.2	15	300	300	292	227	189	—	589	42.2	48.0	—
0.74	268	458	30.7	33.0	15	289	280	265	203	150	70.3	593	41.7	46.5	15
0.81	143	484	22.4	26.5	15	242	235	207	162	96	66.8	607	38.5	32.0	15
1.06	23	526	10.0	2.7	15	229	212	180	142	79	62.0	693	27.2	30.1	15
1.18	6	553	2.2	0	19	195	172	112	86	47	44.1	760	23.4	24.0	16
1.32	0	598	0	0	21	115	102	68	43	19	37.4	823	18.5	16.3	18
1.48	0	612	0	0	24	83	68	36	27	6	32.5	855	12.3	7.4	20

1.06%和1.48%的两种钢作对比，在20℃时二者冲击韧性约差2.6倍，但-40℃时相差约5.3倍。-60℃时相差13倍之多。因此对低温条件下工作的高锰钢铸件，碳含量的选择特别重要。

碳对冲击韧性的影响可见图1-6。从图中可看到碳对冲击韧性的影响与碳含量的范围有关。碳含量在0.8~1.15%的范围内影响很小，大于1.15%以后冲击韧性明显降低。碳含量的增加值和冲击韧性的变化数值之间在数量上存在以下关

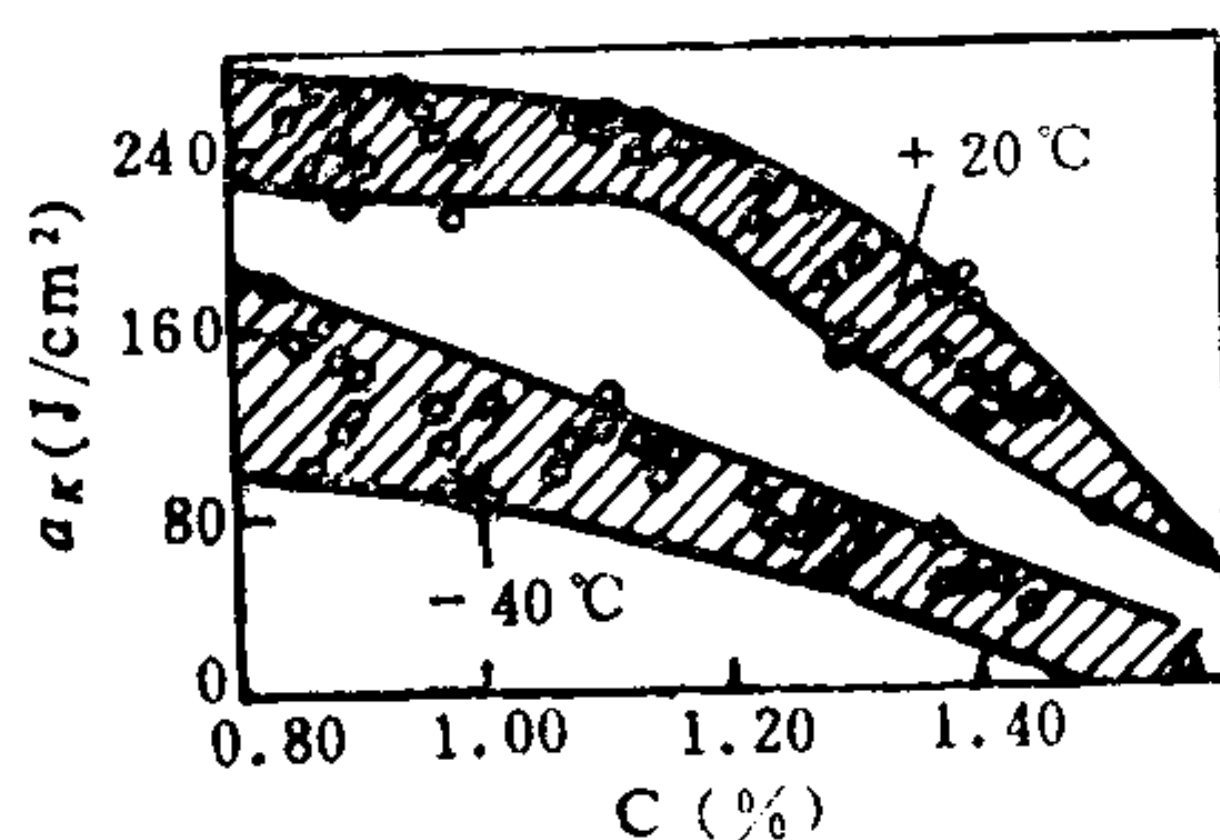


图1-6 冲击韧性与高锰钢碳含量的关系

系：碳含量每增加0.1%，常温下 α_K 值降低39.23~41.19 J/cm²。这也相当于温度降低15~20℃时冲击韧性的降低值。

虽然固溶处理可以使碳化物溶解，但是碳含量高时必须提高固溶处理的温度，或是延长热处理的时间才能使碳化物充分溶解。当碳化物数量多时，虽然可经过固溶处理消除，但不能保证金属微观组织的致密度。由于碳化物比容和奥氏体比容的差别造成碳化物溶解后在奥氏体中存在超显微的缺陷。因此碳含量愈高，碳化物数量愈多，热处理后金属的致密度愈差，韧性愈低。

碳含量高，碳化物数量多。用常规的固溶处理方法（即水韧处理）不能全部消除碳化物，这时会在热处理后的钢中出现残余碳化物。例如根据工厂的统计，由于碳含量高，经常规热处理方法处理后的钢中有残余碳化物的炉次的数量明显增加。从1059个炉次的钢的组织检验得出有残余碳化物的炉次所占的百分比和碳含量的关系见表1-2。

表1-2 钢中碳含量和有残余碳化物炉次百分比的关系

钢中碳含量(%)	<0.9	0.9~1.01	1.02~1.1	1.11~1.2	1.21~1.3	>1.3
有残余碳化物的炉次的百分比(%)	—	4.05	8.25	11.7	17.3	29.8

碳含量和强度性能及塑性性能之间的关系是与碳作为溶质原子和位错的交互作用有关的。碳原子半径小于铁和锰原子的半径,因此它必然在位错周围的压应力区域内富集,构成了柯氏气团。碳原子和位错之间的交互作用力使位错运动的阻力增加。表现为强度性能的增加和塑性的某种程度的降低。

在非强冲击磨料磨损的工作条件下,提高碳含量有利于提高钢的耐磨性。这是因为碳的固溶强化作用可以减少磨料对钢的凿削磨损。另外,当碳含量的提高超出一般规格时,即使经过常规的固溶处理,也容易在钢中残存一部分弥散分布的碳化物。这种组织有利于提高非强冲击磨料磨损条件下工件的耐磨性。

钢中碳含量较高而锰含量较低时,也容易出现这种碳化物。图 1-7 表示了在这种工作条件下的磨损试验中磨损失重和钢中碳含量的关系,这时提高碳含量有利于提高耐磨性。碳

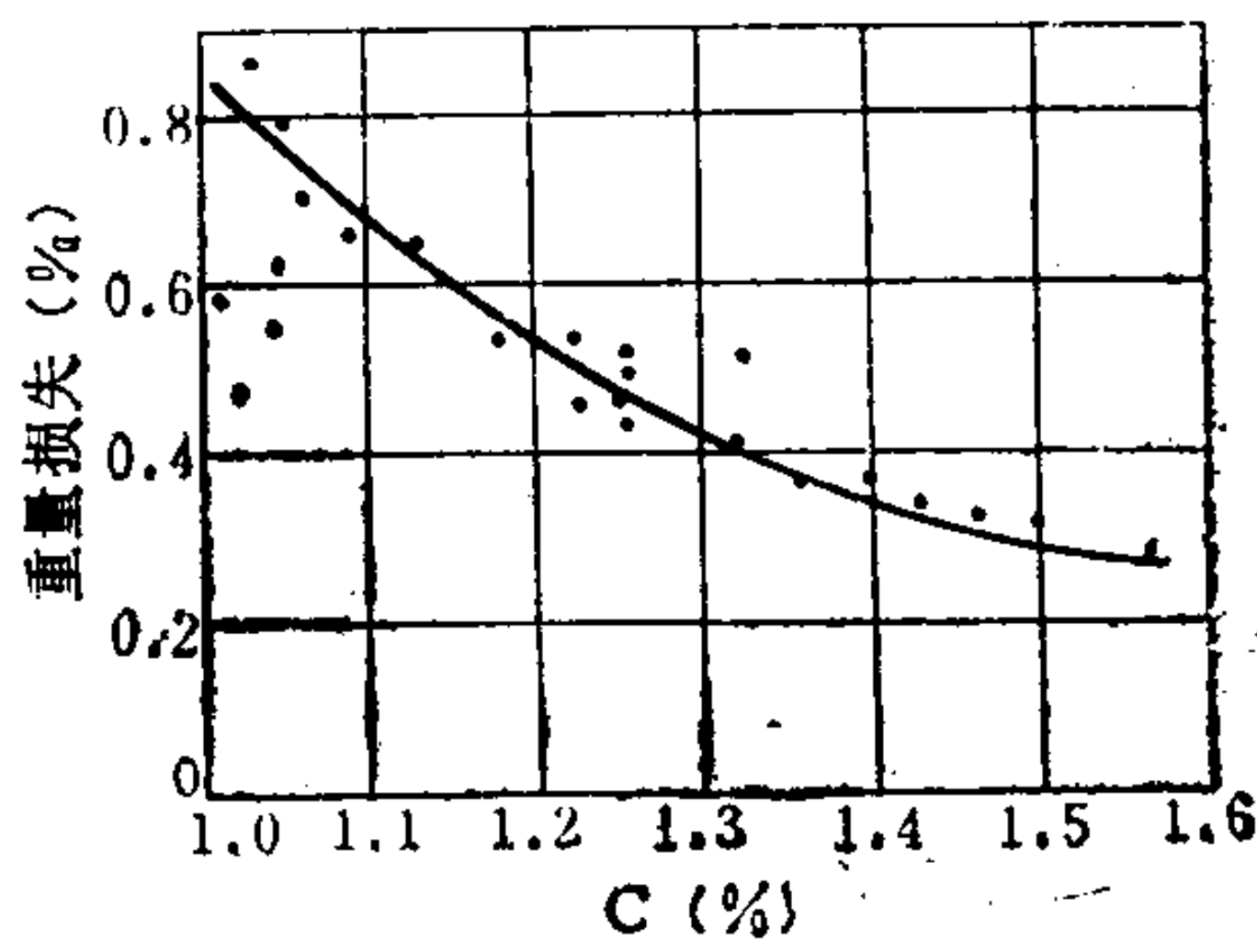


图1-7 高锰钢的磨损失重与钢的碳含量的关系

含量可以选择在1.25%以上。但是在强冲击条件下,这种提高碳含量的措施并不能保证提高耐磨性。因此,这种关系只是在一定条件下是正确的。

在强冲击条件下通常希望适当降低碳含量，甚至降到0.9~1.05%左右（锰不改变）。经过热处理可以得到单相奥氏体组织，具有好的塑、韧性，在形变过程中容易强化。例如铁路辙叉就是其中一例。这种碳含量较低的高锰钢在固溶处理后它的原始硬度为HB170~210。使用后硬度可以提高到HB450~480。硬化层深度可以达到18mm。在铁路辙叉组织中有较多的碳化物，强化效果反而不好，硬度只能提高到HB350~400。硬化层深度较浅，只有7~8mm。在这种条件下盲目提高钢中碳含量，只会造成硬化层的过早的破坏。

高锰钢中碳含量的选择应结合具体的工件的要求，例如工况条件（通常指使用时冲击的强弱、所接触的材料的硬度、工件和物料之间相对运动的速度等）、工件结构的复杂程度、工件的壁厚以及铸造工艺方法等。厚壁铸件由于冷速慢应选择较低的碳含量。薄壁铸件则可以选择较高的碳含量。砂型铸造冷速慢，在铸态组织中容易析出大量碳化物。此时碳含量应偏低。反之，金属型铸造时冷速快，可以适当提高碳含量。铸造结构复杂的工件时易产生裂纹。裂纹可由热裂或冷裂造成。结构复杂的工件在使用过程中，其受力状况也很复杂，它容易产生应力集中。因此必须保证工件整体的强度和塑、韧性，碳含量应偏低些。在锰钢件表面接触物料的硬度较低、接触压力较小时，钢中碳含量可以适当提高。

高锰钢的碳含量变化范围之所以很宽，正是为了适应各种工作条件的要求。所以有些国家的国家标准中有许多种牌号。设计人员和生产厂可以根据工件的具体条件选择牌号和相应的化学成分。我国拟订的高锰钢国标是积累了生产和使用的经验，在过去各种部颁标准只有一个牌号或少数部颁标准为两个牌号的基础上有所发展，拟订了四种牌号。其中高

碳含量的牌号是针对弱冲击、低接触应力、软物料的工况条件，如拖拉机履带板、小型挖掘机斗齿和某些料仓衬板等。另一种碳含量为0.9~1.2%的高锰钢，则适用于强冲击、高接触应力、硬物料的工况条件。这种工况条件对材料不只是要求耐磨性高，而且要求有好的机械性能。如强度性能和塑、韧性。铁路辙叉、某些破碎硬物料的粗、中破碎机械的磨损件的工作条件属于这种类型。随着技术水平的提高，高锰钢中碳含量适宜范围及其分类也将会有所发展。

二、锰

锰是高锰钢中的主要合金元素。它在钢中扩大 γ 相区，稳定奥氏体组织。锰和碳都使奥氏体稳定性提高。在钢中碳含量一定时，随着锰含量的增加钢的组织逐渐由珠光体型变为马氏体型并进一步转为奥氏体型。锰在钢中大部分固溶于奥氏体中，形成代位式固溶体，使基体得到强化。但是由于锰原子半径和铁原子半径差别不大，因此强化作用较小。钢中锰除固溶于奥氏体中以外，另一部分则存在于 $(Fe, Mn)_3C$ 型碳化物中。也有人认为高锰钢中也有 Mn_7C_3 、 $Mn_{23}C_6$ 、 Mn_3C 等类型的碳化物，其中含有较多的锰，但这方面的报导较少。锰还影响钢的物理性能和工艺性能。例如影响钢

表1-3 钢中锰含量和机械性能的关系

化 学 成 分 (%)			机 械 性 能			
C	Mn	Si	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ (%)	ψ (%)
1.30	8.7	0.46	362.85	436.40	6.0	17.0
1.16	12.40	0.44	402.07	465.82	6.0	13.5
1.24	13.90	0.53	406.98	470.72	6.5	15.5
1.20	14.30	0.52	426.59	490.33	5.0	16.0