

铸铁物理冶金 理论与应用

翟后杰 编著



冶金工业出版社



内 容 提 要

本书从铸铁热力学和铸铁凝固过程及组织结构入手，系统介绍铸铁孕育、球化、蠕化处理的基础理论知识和工艺方法，同时介绍合金元素在铸铁中的作用及合金铸铁，以及铸铁热处理的理论及工艺。全书理论性与实用性相统一，突出反映铸铁领域最新研究成果。通过本书，不仅可以系统学习铸铁的基础理论知识，同时可以掌握铸铁生产的工艺方法。本书文字简洁、通俗易懂，可以满足不同层次读者的需要。

本书可供铸造、冶金等领域的工程技术人员、研究人员参考，也可作为上述专业大学生及研究生的教学参考书。

ISBN 7-5024-1712-5



9 787502 417123 >

ISBN 7-5024-1712-5

TF · 394 定价 10.00元

TG143
9700073

铸铁物理冶金 理论与应用

翟启杰 编著

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

铸铁物理冶金理论与应用/翟启杰编著. -北京:冶金工业出版社, 1995

ISBN 7-5024-1712-5

I. 铸… I. 翟… II. 铸铁-物理冶金 IV. TG143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 06175 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京昌平百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1995 年 7 月第 1 版, 1995 年 7 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5.5 印张; 146 千字; 168 页; 1-1200 册

10.00 元

前 言

铸铁作为一种重要的工程材料广泛应用于工农业及国防各部门，在国计民生中起着重要作用，在铸造合金中占主导地位。铸铁是一种具有极大开发潜力的多元多相合金，其组织和性能可随其凝固方式的不同而产生巨大的变化。这使铸铁在铸造合金中独具魅力，使人们对铸铁的研究长盛不衰。近年来，在现代检测技术和材料基础理论发展的推动下，人们对铸铁的研究取得了长足进步。

本书旨在介绍铸铁物理冶金学的系统知识及其在理论和实践上的最新研究成果，从而为铸造专业的工程技术人员、研究生及本科生提供一本进一步深入了解铸铁基础理论及其应用的参考书。对于书中所涉及的传热学、金属学、物理化学等基础理论，本书不再重复介绍，而着重介绍这些理论在铸铁领域中的应用。本书力求内容系统，文字简洁，突出新成果，理论性与实用性并举。

全书共分八章。第一章介绍铸铁的热力学基础；第二章介绍铸铁的凝固与组织；第三章至第五章介绍铸铁的孕育、球化及蠕化处理的理论与工艺；第六章介绍合金元素在铸铁中的作用及合金铸铁；第七章介绍微量元素在铸铁中的作用；第八章介绍铸铁的热处理。

全书承蒙连金江教授主审，并提出了许多具体和极为宝贵的修改意见。在编写过程中，作者还得到了胡汉起教授、钟雪友教授的鼓励与帮助。在本书完成之际，作者谨向三位前辈表示衷心的感谢和深深的敬意。

受编著者水平所限，疏漏与错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

翟启杰

1995年3月于北京科技大学

铸造教研室

作者简介

翟启杰，男，1959年生，工学博士，副教授。现任北京科技大学铸造教研室主任，兼任北京市铸造学会理事，全国铸造科技成果市场董事会常务理事。作者从事金属凝固原理、铸造合金及铸造工艺的教学及研究工作，在高强度灰铸铁、贝氏体球墨铸铁、耐磨铸造合金、特种铸造工艺的理论研究及应用方面取得了一定的成果。

2012

目 录

第一章 铸铁的热力学基础	(1)
第一节 铁碳二元相图.....	(1)
第二节 合金元素对铁碳相图的影响.....	(3)
第三节 第三组元在 Fe-C 合金中的平衡分配系数	(7)
第二章 铸铁的凝固与组织	(11)
第一节 铸铁溶液结构	(11)
第二节 灰口铸铁的凝固过程及组织结构	(13)
第三节 球墨铸铁的凝固过程及组织结构	(26)
第四节 蠕墨铸铁的凝固过程及组织结构	(32)
第五节 铸铁的介稳定凝固及白口铸铁	(36)
第六节 铸铁的二次结晶及组织	(37)
第三章 铸铁的孕育处理	(43)
第一节 孕育处理的理论基础	(43)
第二节 孕育处理工艺	(48)
第三节 孕育剂	(55)
第四节 孕育铸铁的组织与性能特点	(62)
第四章 铸铁的球化处理	(67)
第一节 球化处理的理论基础	(67)
第二节 球化剂	(71)
第三节 球化处理工艺	(75)
第四节 球墨铸铁的铸造性能与铸造工艺特点	(85)
第五章 铸铁的蠕化处理	(88)
第一节 蠕化剂	(88)
第二节 蠕墨铸铁的化学成分	(93)
第三节 蠕化处理工艺	(96)

第四节	蠕墨铸铁的铸造性能及铸造工艺特点·····	(102)
第六章	合金元素在铸铁中的作用及合金铸铁·····	(103)
第一节	铬在铸铁中的作用及铬系耐磨铸铁·····	(103)
第二节	硅在铸铁中的作用及高硅铸铁·····	(114)
第三节	铝在铸铁中的作用及铝系铸铁·····	(121)
第四节	镍在铸铁中的作用及含镍铸铁·····	(126)
第七章	铸铁中的微量元素·····	(132)
第一节	微量元素在铸铁溶液中溶解度 的热力学计算·····	(132)
第二节	微量元素对铸铁溶液结晶温度的影响·····	(134)
第三节	稀土在铸铁中的作用·····	(137)
第四节	氮在灰铸铁中的作用·····	(139)
第五节	锑在铸铁中的作用·····	(144)
第六节	钛、铋、硼在铸铁中的作用·····	(146)
第八章	铸铁的热处理·····	(149)
第一节	去应力退火热处理·····	(149)
第二节	石墨化退火热处理·····	(153)
第三节	改变基体组织的热处理·····	(157)

第一章 铸铁的热力学基础

作为研究铸铁凝固过程、组织和性能以及合金元素在铸铁中行为的基础，本章主要讨论铁碳体系中的基本热力学关系及第三组元对铁碳合金热力学性质的影响。

第一节 铁碳二元相图

铁碳二元相图有一个显著特点，即在同一相图中包含了稳定系（高碳相为石墨）和介稳定系（高碳相为渗碳体）两个不同的转变。图 1-1 为最新发表的铁碳二元相图^[1]，其中碳在稳定系及介稳定系条件下在铁中的溶解度可由式 (1-1) 至式 (1-7) 表示^[2,3]。

对于稳定系，即平衡高碳相为石墨，在 1152~2000℃ 范围内，碳在铁液中的溶解度为

$$\text{wt}\%c_{\max} = 1.3 + 2.57 \times 10^{-3}t \quad (1-1)$$

式中 t ——温度，℃。

或

$$\lg x_{c_{\max}} = -\frac{12.728}{T} + 0.727 \lg T - 3.049 \quad (1-2)$$

式中 $x_{c_{\max}}$ ——以摩尔分数表示的碳在铁液中的溶解度；

T ——绝对温度，K。

对于奥氏体

$$\text{wt}\%c_{\max} = -0.435 + 0.355 \times 10^{-3}t + 1.61 \times 10^{-6}t^2 \quad (1-3)$$

对于铁素体

$$\text{wt}\%c_{\max} = 2.46 \times 10^3 \exp\left(-\frac{11460}{T}\right) \quad (1-4)$$

对于介稳定系，即平衡高碳相为渗碳体，则碳在铁液中的溶解度为：

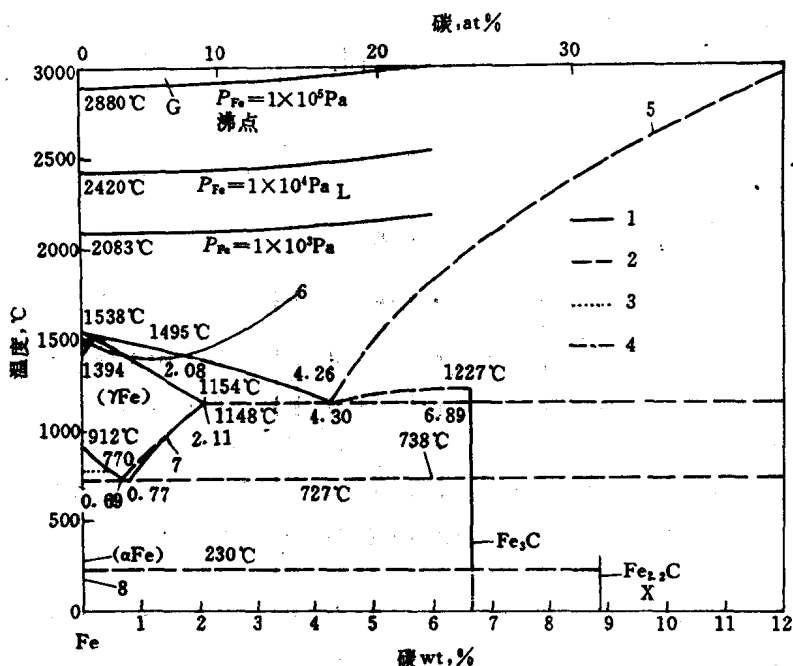


图 1-1 Fe-C 二元相图^[1]

1—铁—渗碳体平衡；2—铁—石墨平衡；3—铁素体居里温度；
4—渗碳体不确定区域；5—碳在铁液中溶解度；6—碳在 δ -Fe中溶解度；7—碳在奥氏体中溶解度；8—碳在铁素体中溶解度

$$\text{wt}\%c_{\max} = 4.34 + 0.1874(t - 1150) - 200 \ln \frac{t}{1150} \quad (1-5)$$

对于奥氏体

$$\text{wt}\%c_{\max} = -0.628 + 1.222 \times 10^{-3}t + 1.045 \times 10^{-6}t^2 \quad (1-6)$$

对于铁素体

$$\text{wt}\%c_{\max} = 1.8 \times 10^3 \exp\left(-\frac{10908}{T}\right) \quad (1-7)$$

式 (1-1) 至式 (1-7) 可用来计算碳在铁中各相中的溶解度。

第二节 合金元素对铁碳相图的影响

一、硅对铁碳相图的影响及 Fe-C-Si 三元相图

硅对铁碳相图有显著影响。图 1-2 为不同含硅量时的铁碳相图。该图表明,随含硅量的增加,共晶点和共析点向左移,共晶转变和共析转变温度升高,转变温度区间增大。尤其值得注意的是,硅的增加将使铁液按稳定系转变趋势增大,即更有利于石墨的析出,并使铁素体区增大,奥氏体区减小。

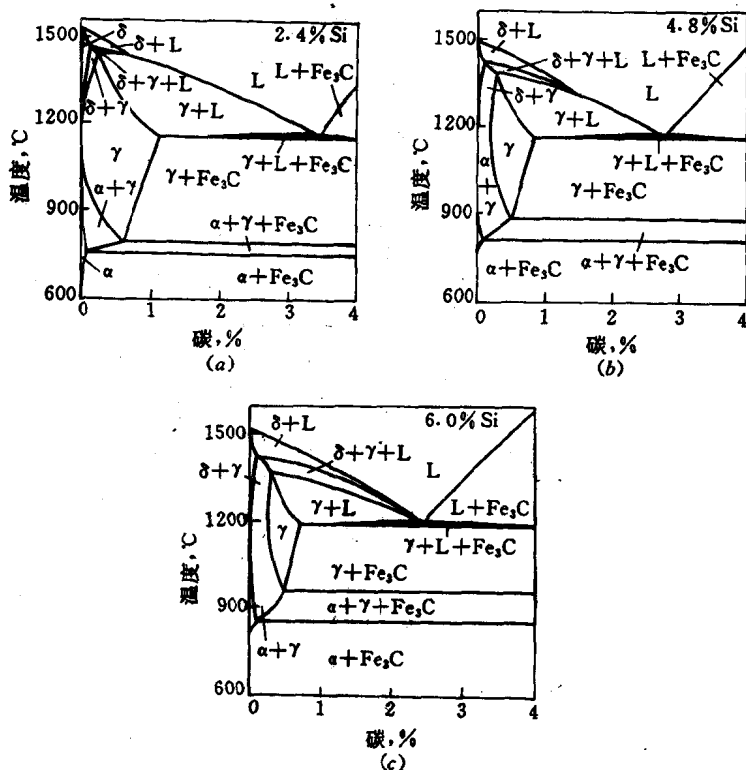


图 1-2 Fe-C-Si 三元相图垂直截面 (介稳定系)^[4,5]

二、锰对铁碳相图的影响及 Fe-C-Mn 三元相图

锰对铁碳相图的影响如图 1-3 所示。该图表明，锰对共晶转变温度影响很小，每增加 1% 的锰，共晶转变温度仅升高大约 3°C 。

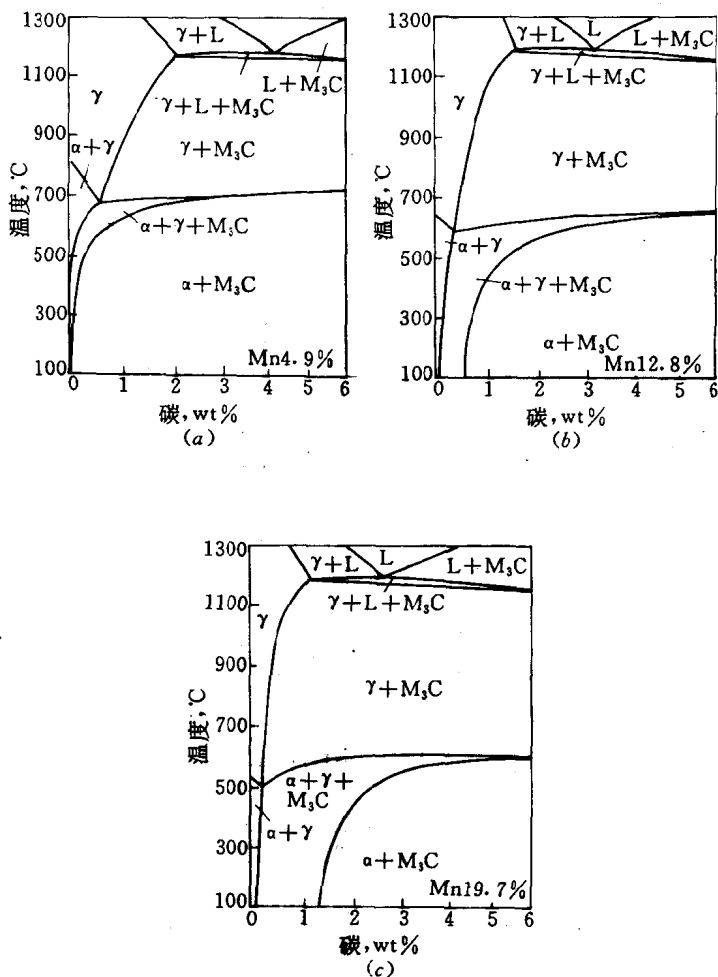


图 1-3 Fe-C-Mn 三元相图垂直截面 (介稳定系)^[6]

锰使共析转变温度降低，使共析转变温度区间显著增大，奥氏体区明显减小，使共晶点和共析点右移。

图 1-3 中 M_3C ，即 $(Fe, Mn)_3C$ ，在较大的成分范围内是稳定的，因此锰使铁液按介稳定系转变倾向增大。只有当锰含量很高时（高于 40%），才可能形成其他类型的锰碳化物。

三、其他常见元素对铁碳相图的影响

其他常见元素，诸如铬、铝、铜、钛、钒等对铁碳相图都有影响。表 1-1 为一些常见元素对铁碳相图临界转变温度的影响，由此表给出的数据亦可推测这些元素使各相区大小产生变化的趋势。

表 1-1 常见元素对铁碳相图临界转变温度的影响^[3,7], °C/wt%

元素	碳在奥氏体中 最大溶解度温度		共析点温度		共晶点温度	
	介稳定系	稳定系	介稳定系	稳定系	介稳定系	稳定系
Si	-10~15	+2.5	+8	0~30	-10~20	+4
Cu	-2	+5.2	...	-10	-2.3	+5
Al	-14	+8	+10	+10	-15	+8
Ni	-4.8	+4	-20	-30	-6	+4
Cr	+7.3	-	+15	+8	+7	-
Mn	+3.2	-2	-9.5	-3.5	+3	-2
V	+6~8	...	+15	+	+6~8	-
P	-180	-180	+	+6	-37	-3

对于铸铁，人们尤其关注的是添加元素对铁液凝固过程是按稳定系还是按介稳定系转变产生的影响。若以 T_{st} 表示沿稳定系共晶转变温度，以 T_{met} 表示沿介稳定系共晶转变温度，则 $T_{st} - T_{met}$ 反映了铁液沿稳定系转变的趋势。由图 1-4 可见，硅、铝、镍、铜是强石墨化元素，磷、硼是弱石墨化元素，而铬、钒、锰是反石墨化元素，钼、钨是弱反石墨化元素。图 1-5 给出了铬、硅、钒对铸铁共晶转变温度影响的更详细信息。

$\Delta T = T_{st} - T_{met}$ 的准确值可由表 1-1 中数据计算。例如，对于

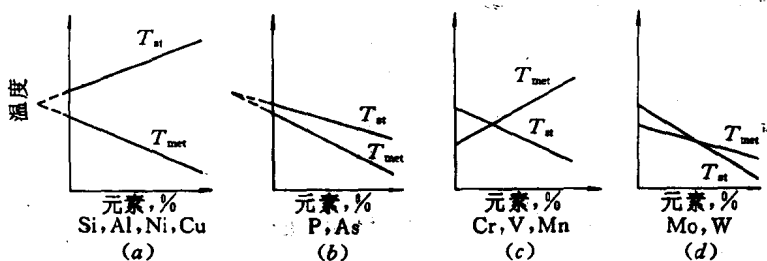


图 1-4 添加元素对铁液稳定及介稳定共晶转变温度的影响示意图^[8]

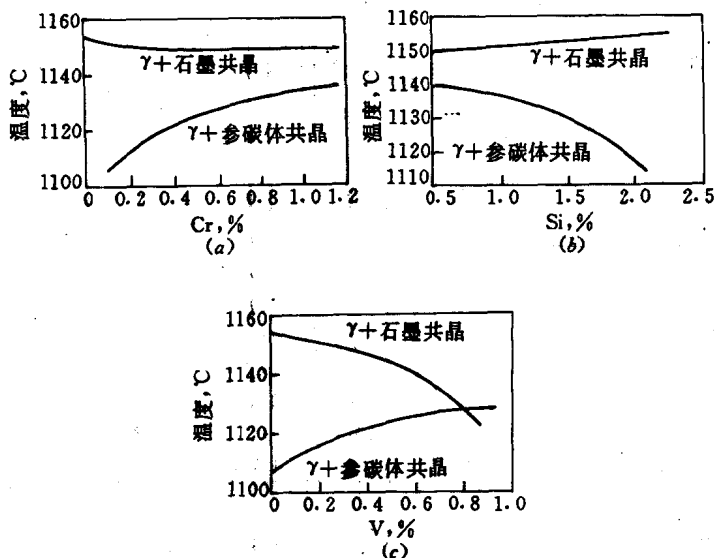


图 1-5 铬、硅、钒对铸铁共晶转变温度的影响^[6]

含 Si2%、Mn0.5%、Cu1% 的铸铁

$$T_{liq} = 1154^{\circ}\text{C} + 4\text{Si}\% - 2\text{Mn}\% + 5\text{Cu}\% = 1166^{\circ}\text{C}$$

$$T_{solid} = 1148^{\circ}\text{C} - 15\text{Si}\% + 3\text{Mn}\% - 2.3\text{Cu}\% = 1117.2^{\circ}\text{C}$$

则

$$\Delta T = 1166^{\circ}\text{C} - 1117.2^{\circ}\text{C} = 48.8^{\circ}\text{C}$$

其稳定系碳在奥氏体中的最大溶解度时的温度为：

$$T_E = 1154^\circ\text{C} - 2.5\text{Si}\% - 2\text{Mn}\% + 5.2\text{Cu}\% = 1160.7^\circ\text{C}$$

其介稳定系碳在奥氏体中最大溶解度时的温度为：

$$T_E = 1148^\circ\text{C} - 10\text{Si}\% + 3.2\text{Mn}\% - 2\text{Cu}\% = 1127.6^\circ\text{C}$$

合金元素对碳在铁液中碳的溶解度有影响。图 1-6 是 1200~

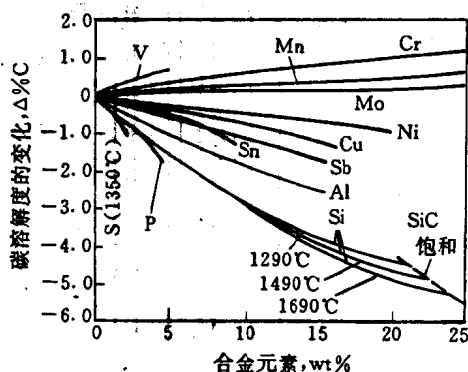


图 1-6 常见元素对碳在铁液中溶解度的影响^[2]

1700°C 范围里一些常见元素的含量与碳在铁液中溶解度的关系曲线。由该图可见，除 V、Mn、Cr 可使碳在铁液中的溶解度稍有提高外，多数元素的加入会使碳的溶解度降低。

第三节 第三组元在 Fe-C 合金中的平衡分配系数

由热力学理论可以计算出第三组元在 Fe-C 合金凝固过程中的平衡分配系数。文献[6]给出了一些常见元素在铁碳合金凝固过程中平衡分配系数的计算值和实测值(表 1-2)。其中， $P^{A/L}$ 为第三组元在奥氏体与液相中的平衡分配系数； $P^{F_3C/L}$ 为第三组元在渗碳体与液相中的平衡分配系数； P^M 为介稳定转变时第三组元在液相和共晶相中的平衡分配系数； P^S 为稳定转变时第三组元在液相和共晶相中的平衡分配系数； $\Delta P = P^M - P^S$ 。

第三组元在介稳定系与稳定系时在液相和共晶相中的平衡分配系数的差值 ΔP 反映了该元素的石墨化能力。如图 1-7 所示，

$\Delta P < 0$ 的元素均为促进石墨化元素,而且随着 ΔP 的减小,元素的石墨化能力提高,两者呈线性关系。图 1-7 中钛、铝、硅偏离直线,研究者认为与氮的存在有关。这些元素与氮反应,形成氮化物,这些氮化物作为石墨形核的核心,从而进一步促进了石墨化。目前已有许多关于氮化钛作为石墨异质核心的报道,至于氮化铝和氮化硅与石墨结晶的关系还有待于进一步印证。事实上,铝和硅与氧有很强的亲合力,其氧化物与石墨形核有直接关系(参见第三章)。

表 1-2 第三组元在 Fe-C 合金中的平衡分配系数

元素	$P^{A/L}$		$P^{Fe_3C/L}$		P^S	P^M	ΔP
	计算值	实验值	计算值	实验值			
Si	1.71	1.72	0	0.05	1.55	0.78	-0.77
Cu	1.57	1.62	0.12	0.08	1.43	0.78	-0.65
Al	.....	1.15	.....	0.03	1.05	0.55	-0.50
Ni	1.46	1.61	0.43	0.32	1.33	0.90	-0.43
Co	1.18	1.13	0.59	0.66	1.07	0.85	-0.21
Cr	0.53	0.55	1.96	1.95	0.48	1.32	0.84
Mn	0.70	0.75	1.03	1.21	0.64	0.90	0.26
Mo	0.41	0.38	0.60	0.84	0.37	0.52	0.15
W	0.23	0.42	0.42	0.88	0.21	0.33	0.12
B	0.06	.....	0.22	.....	0.06	0.15	0.09
N	2.04	2.04	2.12	.....	1.86	2.09	0.23
Ti	0.04	.....	0.09	0.27	0.04	0.07	0.03
P	0.15	.....	0.08	0.09	0.14	0.11	-0.03
S	0.06	.....	.....	.....	0.06	.....	.....

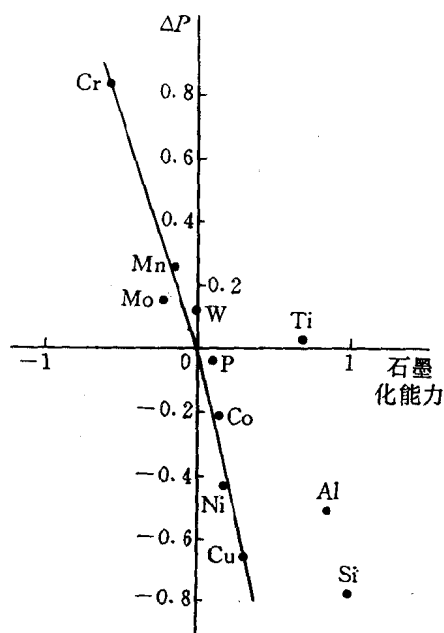


图 1-7 第三组元在铁液共晶凝固时
平衡分配系数与石墨化能力的关系

参 考 文 献

- [1] T. B. Massalski, et al., Binary Alloy Phase Diagrams, Vol. 1, ASM International, 1986.
- [2] F. Neumann, The Influence of Additional Elements on the Physico-Chemical Behavior of Carbon in Carbon Saturated Molten Iron, Recent Research on Cast Iron. Great Britain: Gordon and Breach, 1968, 659.
- [3] N. G. Girsovitich, Spravotchnik potchugunomu litja (Cast Iron Handbook), Mashinostrojenie, 1978.
- [4] E. Piwowarsky, Hochwertiger Gusseisen, 2nd, ed. Springer-Verlag, 1958.
- [5] Metallography, Structures and Phase Diagrams, Vol. 8. 8th ed. Metals Handbook, American Society for Metals, 1973, 400~416.
- [6] American Society for Metals, Metals Handbook, 9th, ed. Vol15: Casting Metals,